기상청 Korea Meteorological Administration

초급 예보관 훈련용 교재

항공기상

목차

1장. **항공기상예보**

1장. 항공기상예보

1.1 항공기상예보 개요
1.2 항공위험기상
1.3 고도 수정법
1.4 METAR와 TREND 코딩
1.5 비행장 예보(TAF)

학습목표

- 항공기상지원 요소에 대해서 이해한다.
- 항공기상예보에 사용되는 약어들을 이해한다.
- 항공위험기상 요소들에 대해서 이해한다.
- 고도수정법에 대해서 이해한다.
- METAR와 TREND 코딩과 해석 방법을 이해한다.
- TAF 코딩방법과 해석 방법에 대해서 이해한다.

1.1 항공기상예보 개요

1.1.1 항공기상업무 소개

항공 분야는 주요한 기상정보 사용 고객이며 역사적으로 예보 기술의 발전은 항공기상 지원 능력 향상과 같이하고 있다. 첨단 기술들과 항공기 성능의 개선 등으로 기상정보 요구가 점차 변화하고 있는 추세에 있다. 경제적 항공기 운항의 중요성이 대두되고 첨단 장비들이 가지는 기상 환경에 대한 민감성에 따라 보다 정밀한 기상정보 요구가 증가하고 있다. 비록 많은 기술 발전이 이루어졌다고 하더라도 항공기 분야는 여전히 기상 환경에 민감하기 때문에 예보관들은 여전히 중요한 역할을 수행한다. 이번 장에서는 항공기상을 '비행 안전' 측면을 강조하여 다루도록 하겠다.

1947년 국제항공기구가 만들어지면서 전 세계 항공기상 지원을 전담할 기관과 방법들이 표준화되기 시작하였다. 국제민간항공기구(ICAO : International Civil Aviation Organization)가 민간 항공 분야에서는 핵심적인 조정자 역할을 하고 있다. ICAO는 항공업무와 절차들에 대한 다양한 표준과 권고 사항들을 제시하여 관련 업무의 지침으로 활용토록 하고 있다. 항공기상 업무와 내용은 ICAO 부록 3 국제항행을 위한 기상업무와 WMO 기술노트 49를 활용한다.

주요 항공기상 정보 사용자들은

- 민간 항공 기관(CAA : Civil Aviation Authority)
- 항공교통기관 등이 있다.

1.1.2 민간 항공 기관 대상 항공기상 지원

민간항공기관을 상대로 한 항공기상 정보는 워싱턴과 런던에 위치한 세계공역예보센터(WAFC)에서 관할하는 지역에 대해서 항공기 항행 안전에 영향을 미칠 수 있는 난류(청천난류 포함), 착빙, 뇌우, 화산재, 열대성 저기압 등에 관한 정보를 일기도나 문숫자 형태로 발표한다.

1.1.2.1 SIGMET

SIGMET는 운항 중인 항공기의 안전에 영향을 미칠 수 있는 악기상 요소들에 대한 경보를 제공한다.

1.1 항공기상예보 개요

1.1.2.2 공항 경보

공항 운영이나 항공기 안전에 영향을 미칠 수 있는 악기상 요소들이 발생 가능성에 대한 경보를 제공한다. 공항에 위치한 기상대는 고유한 기상정보 요구들을 받지만 공항에서의 항행에 영향을 미칠 수 있는 악기상 요소들은 반드시 경보를 발표해야 한다.

1.1.2.3 바람/온도 자료

전지구 바람과 온도 자료는 일반적으로 전구 모델 결과 자료를 사용하며, 국지적인 바람은 지역 모델이나 국지 모델 결과를 활용하여 제공한다.

1.1.2.4 고고도 위험기상 예상도(High-level SIGWX)

10,000ft 이상의 상공을 비행하는 항공기 운항에 영향을 미칠 수 있는 특이 기상 요소들은 위험기상 예상도에 그 지역과 내용을 표시하여 다양하게 제공한다.

1.1.2.5 저고도 위험기상 예상도(Low-level SIGWX)

10,000ft 이하의 고도를 비행하는 항공기 운항에 영향을 미칠 수 있는 특이 기상 요소들은 하층 위험기상 예상도에 그 지역과 내용을 표시하여 다양하게 제공한다.

1.1.2.6 AIRMET

저고도(10,000ft 미만) 비행의 안전에 영향을 미칠 수 있는 위험기상에 대하여 전문 또는 수요자의 이해 증진을 위해 차트형태로 제공한다.

1.1.2.7 TAF/METAR

공항에 대한 예보와 관측 정보를 항공업무 종사자(조종사와 승무원 등)가 이해하기 쉽게 간략한 코드 형태로 제공한다.

1.1 항공기상예보 개요

1.1.2.8 항로 예보

항공기 비행 경로상의 위험기상 요소에 대한 예보를 말한다.

1.1.3 상층 바람과 온도

전구모델이나 중규모 모델에서 나온 결과와 상층 관측자료를 활용하여 상층바람과 온도를 지원한다. 특수한 경우 운항 고도별 지점별 바람과 온도 정보가 필요하기도 하다.

1.1.3.1 최대풍 일기도

제트기류의 위치와 강도, 상층운의 짙기, 청천난류(CAT) 지역과 같은 부가적인 특이 기상현상을 일기도에 표시하여 제공한다.

1.1.3.2 위험기상 예상도

민간항공기관에 대한 특이 기상 일기도와 마찬가지로 군 작전 권역 내에서의 특이 기상현상들을 일기도에 표시하여 제공한다.

1.1.3.3 저고도 위험기상 예상도

비교적 낮은 고도를 비행하는 군용기를 위하여 10,000ft 이하의 하층일기도를 고도별로 제공하기도 하고, 저고도 특이 기상을 일기도에 표시하여 제공하기도 한다.

1.1 항공기상예보 개요

1.1.3.4 TAF

민간 공항과 마찬가지로 국제공항은 30시간, 국내공항은 12시간 동안의 비행장 예보(TAF)를 발표한다. TAF의 형태는 민간항공의 TAF와 다소 차이가 난다.

1.1.3.5 비행장 경보

비행장의 운영이나 항공기 운항에 영향을 미칠 수 있는 악기상 발생이 예상될 경우 경보를 발표한다. 비행장에 위치한 기상대는 고유한 기상정보 요구들을 받지만 비행장에서의 항행에 영향을 미칠 수 있는 악기상 요소들은 반드시 경보를 발표해야 한다.

1.1.3.6 항로 예보

비행을 시작하기 전에 제공되는 기상자료들은 다양하지만 일반적으로 다음과 같은 내용을 묶어서 제공한다.

- 최신 지상일기도
- 특이 기상 일기도
- 최대풍, 청천난류 일기도
- 육지/해상 저고도 특이 기상 일기도(LOLAN/LOMAR)
- 5,000ft에서 39,000ft 까지 고도별 바람
- 필요한 지점의 TAF와 METAR

이외의 부가적인 기상정보는 상황에 따라 구두로 전달된다.

1.1.3.7 국지적인 하층 기상 일기도

특수한 목적으로 다양한 형태의 상세한 하층 기상 일기도가 제공되기도 한다.

1.1.3.8 공역 예보

군용 항공기는 일정한 공역에서 기동을 실시하기 때문에 해당 공역에 대한 기상 예보를 제공한다. 공역 예보는 조종사뿐만 아니라 항공교통통제(ATC : Air Traffic Control)에도 제공되어 항공기 관제에도 활용하도록 한다.

1.1 항공기상예보 개요

1.1.3.9 수직 단면도

구름과 기상현상들의 수직 단면도를 제공하기도 한다. 주로 수치예보 모델에서 직접 생산하여 제공하는데 주 목적은 글라이딩, 공수강하, 레이더 회피, 야간 비행 등에 활용하기 위함이다.

1.1.4 항공기상 장애 요소들

운항 중이거나 지상에 계류 중인 항공기는 다양한 기상 요소에 의해서 영향을 받을 수 있다. 항공기상 장애 요소들은 아래와 같으며 1.2절 **항공위험기상**에서 상세하게 다루겠다.

- 항공기 착빙
- 엔진 착빙
- 난류
- 산악파
- 뇌우와 우박
- 마이크로버스트
- 어는 강수
- 눈
- 집중호우
- 연무
- 안개와 하층운
- 돌풍/강풍

1.1 항공기상예보 개요

1.1.5 항공기상 경보 요소들

항로 상의 특이 기상 경보는 SIGMET를 통해서 제공된다. SIGMET는 지정된 지역 기상감시소(Watch Office)에서 지정된 비행정보구역(FIR)에 대하여 발표한다. SIGMET는 지정된 비행정보구역내 위험기상이 관측되거나 예상이 될 때 간략하고 짧은 경보로 관측이나 예보에서 예상하지 못했던 특이 기상에 대한 경보를 제공한다. SIGMET를 발표해야 하는 기상 요소들은 다음과 같다.

- 심한 난류
- 심한 착빙
- 심한 산악파
- 강한 우박
- 스콜선
- 열대성 저기압
- 화산재
- 강한 먼지 폭풍
- 강한 모래 폭풍

공항(비행장) 경보는 비행장 상공이나 주변에서 운영 중인 항공기에 영향을 미칠 수 있는 기상 요소들을 사전에 경고하는 것을 말한다. 경보는 정상적인 예보와 분리하여 발표해야 하며 혼란을 방지하기 위하여 유효시간과 장소를 구체적으로 표현해야 한다. 비행장 경보를 발표해야 하는 요소는 다음과 같다.

- 돌풍
- 강풍
- 공중/지상 서리
- 항공기 착빙
- 눈녹음
- 눈
- 우박
- 뚜렷한 산악파
- 하층운, 안개/언 안개
- 윈드시어

1.1 항공기상예보 개요

- 스콜
- 뇌우
- 어는 강수
- 뚜렷한 하층 온도 역전층

1.1.6 항공기상예보 준비

항공기상 예보는 일반적인 대중을 상대로 하는 예보와는 완전히 다르고, 기상학에 관한 어느 정도의 지식을 가진 사람들을 상대로 한다고 가정하고 발표한다. 조종사가 조종면장을 취득하기 위해서는 반드시 기상학 시험을 통과해야 하며, 관제 요원들도 일정한 수준의 기상교육을 수료해야 업무를 수행할 수 있다. 그렇지만 이들의 기상학적 지식은 매우 제한적이라는 사실도 명심해야 한다.

항공기상 예보를 생산하는 데에는 엄격한 지침들이 있다. 예보관들은 예보에 사용되는 약어들의 용어를 잘 이해하고 이에 맞추어 예보를 생산해야 한다.

항공기상 예보를 생산함에 있어서 전체적으로 고려해야 할 요소는 비행안전으로 정해진 절차와 규정을 정확하게 지키는 것이 중요하다. 정확한 절차와 규정을 지키는 것은 애매모호한 예보는 오해의 소지가 높고 그 결과 항공기 사고도 직결될 수 있기 때문이다. 항공기 사고가 발생하면 사고조사위원회는 조종사에게 제공된 모든 예보를 면밀히 조사한다. 따라서 항공기상 예보를 발표할 때는 불일치성이나 불연속성이 없는지를 충분히 검토한 후에 발표해야 한다. 항공기상 예보는 명확하고, 간략하며, 모호함이 없어야 한다.

1.1 항공기상예보 개요

1.1.7 저고도 공역 예보

10,000ft 이하의 고도를 비행하는 경우를 저공 비행이라고 부르는데 일반적으로 2,000ft 이하를 비행하는 경우는 드물다. 저공 비행은 지형뿐만 아니라 기상 조건에 따라 다양한 문제를 야기할 수 있다. 항공기의 속도가 빠른 경우에는 500kts를 넘기 때문에 어떤 악기상과 조우했을 때 반응할 수 있는 시간적 여유가 제한적이기 때문이다.

그리고 경항공기들도 항공기 자체의 성능과 조종사의 기술이 부족한 경우가 많기 때문에 문제가 될 수 있다. 경항공기들은 기상 조건에 매우 민감하기 때문에 그 안전을 보장하기 위해서는 정확한 예보가 필수적이다.

1.1.7.1 기상자료의 문제

군의 대부분 저고도 항공작전은 비교적 원거리나 상대적으로 인구가 밀집되지 않은 지역에서 실시한다. 따라서 대부분의 사람들은 항공기의 운항 자체를 느끼지 못할 수 있다. 따라서 사람이 거주하고 있지 않은 지역에서의 저공 비행을 지원하는 데에는 기상자료의 한계가 존재한다.

기상자료의 문제는 다음과 같다.

- 신뢰할 수 있는 관측의 부족
- 짧은 시간 내의 큰 기상 변화
- 짧은 지역 내의 큰 기상 변화
- 산악지역의 기상은 국지적으로 영향을 주기 때문에 유사성이 없음.
- 기상 레이더는 산악지역의 저고도 기상현상은 잘 탐지하지 못함.
- 기상 레이더가 관측할 수 있는 범위의 제한
- 위성 영상의 수평해상도는 원하는 상세 기상정보에 비해 부족
- 고층기상 관측자료 부족

1.1 항공기상예보 개요

1.1.7.2 예보생산의 문제

저공 비행을 지원하기 위한 예보는 특히 산악이나 해상 지역에 대한 예보 생산에 문제가 발생한다.

바다에서 가장 위험한 기상 요소는 해무인데, 해무는 광범위한 영역에 분포하고 그 농도와 기류에 따른 이동이 불규칙하기 때문에 그 이동과 발달을 예상하기 어렵다. 특히 해수면의 온도가 기단의 노점온도 보다 낮을 경우에 문제는 더 심각해진다. 해무는 4월에서 8월 사이에 해상 어느 곳에서든지 발생할 수 있는 조건을 가진다. 해무를 잘 예보하기 위해서는 기본적인 기단 이론과 층운 형성 과정에 대한 충분한 이해가 필요하다. 위성영상은 해무를 예보하는데 가장 유용한 도구이지만, 해무가 층운으로 소산된 이후에도 해무가 남아 있는 것처럼 보일 수 있다.

산악지역에서의 저공 비행은 다음과 같은 요소로 영향을 받을 수 있다.

- 산악에서의 강제 상승에 따른 강수 강도의 강화와 낮은 어는 고도(Freezing Level)나 강수의 증발 냉각으로 인한 착빙 가능성
- 산악에서의 잠재 불안정 해소에 따른 대류활동 발생
- 북쪽 사면의 일사량 부족으로 인한 계곡의 안개와 하층운 소산 지연
- 넓은 산림 지역에 의한 물 증발량 증가
- 배수 효과에 의한 냉각 강화
- 수로효과와 역전층으로 인한 국지적인 강풍
- 지형에 의한 풍향 변경
- 강제단열상승에 의해 어는 고도가 낮아짐에 따라 착빙 발생 가능성 증가
- 고원 효과에 의한 높은 대류성 구름 운저
- 남쪽 사면과 바위 지대의 국지적인 강한 일사(Hot Spot)에 의한 소낙성 강수의 시작 혹은 강화
- 산악파
- 난류의 강화(원통회전 운동)
- 높은 지형에 오랫동안 남아있는 잔설
- 녹은 눈에 의해서 발생하는 언덕 안개

1.1 항공기상예보 개요

1.1.7.3 조종사에 대한 기상 브리핑

예보관은 기상 분야의 전문가이긴 하지만 만약 그들이 기상정보를 유창하고 명확하게 전달하지 못하면 기상정보의 가치와 신뢰도는 제한될 수밖에 없다.

조종사에게 기상 브리핑을 할 때는 운항하는 지역에서 가장 발생 가능성이 높은 기상 조건을 강조하는 것이 바람직하다.

- 모든 예보가 같은 신뢰도를 가지는 것은 아니다. 따라서 확신을 주기 위해서는 불확실성이 무엇인지, 어떤 오차가 발생할 수 있는지 설명해야 한다.
- 조종사는 기상전문가가 아니다. 따라서 가능하면 상세하게 설명해야 한다.
- 조종사에게 무엇을 해야 한다고 말하지 말라. 예보관의 역할을 조언을 하는 것이다. 비행을 할 것인지 말 것인지에 대한 결정은 조종사에 의해서 이루어져야 한다.
- 통계적으로 볼 때 많은 항공기 사고가 기상과 관련되어 나타났다. 항상 기상예보가 누군가의 생명과 직결될 수 있다는 것을 명심해야 한다.
- 안심은 금물이다. 특히 산악지역에서 저공 비행을 계획하는 경우 모든 가용한 기상자료를 토대로 예보를 생산해야 한다. 어떤 지역의 기상이 양호하면 다른 지역 모두가 양호할 것이라는 가정의 늪에 빠지지 말아야 한다.
- 필요한 경우 예보를 수정하라.

1.1 항공기상예보 개요 – 부록 1. 일반적인 항공기상 약어 설명

본 부록은 항공 분야에서 통용되는 특수 용어들을 정리한 것이다.
항공기상 예보에서는 모든 약어를 대문자로 표시한다.

특수 약어	의미
AIREP	Aircraft Report. 항공기에서 관측된 기상 정보
AIRMET	민간 항공근무자를 위한 지역 예보 녹음 방송
ATC	Air Traffic Control. 항공운항통제소
CAA	Civil Aviation Authority. 민간 항공 기관
CDM	Chemical Downwind Message. 화학풍 전문(화생방)
COC	Combat Operation Center. 전투작전본부
EDF	Effective Downwind Forecast. 유효풍하측예보(방사능)
FIR	Flight Information Region. 비행 정보 구역
HAS	Hardended Aircraft Shelter. 항공기 엄체호
IFR	Instrumental Flight Rule. 계기비행규칙
LOLAN	Low-level Significant weather chart for land area 육상 저고도 특이 기상 일기도
LOMAR	Low-level Significant weather chart for sea area 육상 저고도 특이 기상 일기도
MT	Motor Transport Section. 활주로 착빙 제거팀
OPS	Operations. 작전/운영
QFE	비행장 현지기압
QNH	비행장 현지기압을 평균 해수면 기압으로 수정한 기압
RCC	Rescue Coordination Center. 탐색구조협조센터
RVR	Runway Visual Range. 활주로 가시거리
SAR	Search and Rescue. 탐색구조
SNOTAM	눈으로 공항이 혼탁해진 상태에 대한 보고
SGIMET	비행정보구역 내의 악기상 경보 제공
SST	Super Sonic Track. 초음속 비행이 가능한 경로
TDA	Tactical Decision Aid. 전술 운영에 대한 기상학적 조언
VFR	Visual Flight Rule. 시계비행규칙

1.1 항공기상예보 개요 – 부록 1. 일반적인 항공기상 약어 설명

특수 약어	의미
VOLMET	운항 중인 항공기에 대한 기상 정보 방송망
VMC	Visual Meteorological Conditions. 시계비행기상조건
WAFC	World Area Forecast Center. 세계지역예보센터

a. EMBD(Embedded) : CB가 다른 구름으로 이루어지 구름 층에 묻혀있는 상태 혹은 연무에 의해서 가려진 상태. 다른 용어들과 혼합되어 사용될 가능성이 높음. 예) ISOL EMBD CB

b. ISOL(Isolated) : 독립적인 CB가 최대 공간 범위가 50% 이하의 지역에 영향을 미칠 때.

c. OCNL(Occasional) : 따로 잘 분리된 CB들이 최대 공간 범위 50~75%에 영향을 미칠 때.

d. FRQ(Frequently) : 거의 분리되어 있지 않은 CB들이 최대 공간 범위 75% 이상의 범위에 영향을 미칠 때.

주의 1 : 위의 정의들은 ICAO에서 특별히 중간고도와 고고도 특이 기상 일기도를 생산할 목적으로 만든 용어이다. 하층 예보 일기도나 영역예보를 생산할 때는 다른 약어들이 사용된다.

주의 2 : 가능성은 사용하지 않는다.

주의 3 : CB의 운량은 생략된다. 예) ISOL CB

1.1 항공기상예보 개요 – 부록 2. 세계지역예보센터와 악기상 약어 설명

시간예보와 공간 예보에 동시에 사용되는 약어들

아래의 약어들은 하층 예보 일기도나 영역 예보에서 사용된다.

a. ISOL(Isolated) : 불규칙적으로 발생하고 쉽게 회피할 수 있는 기상 상태. 대류성 기상현상(예, ISOL TS)과 비대류성 기상현상(예, ISOL 7KM HZ)이 전체 영역의 25% 이마에 영향을 미칠 때 사용한다.

b. LOC(Local or Locally) : 어떤 작은 영역에 기상현상들이 연달아 발생하지만 쉽게 회피할 수 있는 상태. 비대류성 기상현상에만 사용하고 특정 지역이나 지형을 표시하기도 하며, 영향을 주는 영역이 해당 지역의 25% 미만일 때 사용한다. 예) 'LOC BKN 3000 M BR NAN' 혹은 'BKN ST BASE 006/015(BASE LOC 002 SEA/WINDWARD COT'

c. OCNL(Occasional) : 자주 있는 현상이 아니고 회피가 가능한 상태 (예, occasional thunderstorm). 대류성 기상현상(예, OCNL CB)이나 비대류성 기상현상(OCNL 4000 M BR)이 해당 지역의 25% 이상 50% 미만에 영향을 미칠 때 사용한다.

d. Areas : 자주 있는 현상은 아니지만 연속적으로 발생하여 회피가 어려운 기상 상태이지만 넓은 지역에 영향을 미치지는 않는 상태. 비대류성 기상현상(예, Areas BKN ST)에만 사용하며 영향을 받는 영역은 25% 이상, 50% 미만이다.

e. FRQ(Frequent) : 여러 지역에 영향을 미치는 기상현상으로 회피가 어려운 상태. 대류성 기상현상(예, FRQ + SHRA on trough)만 사용하며 영향을 미치는 영역이 50% 이상일 때 사용한다.

f. WDSPR(Widespread) : 다양한 지역에 영향을 미치며 회피가 불가능한 기상 상태(WDSPR 7KM HZ)로 50% 이상의 영역에 영향을 미칠 때 사용한다.

g. EMBD(Embedded) : 구름이 다른 형태의 구름층 속에 묻혀있거나 연무에 의해서 가려진 상태일 때 사용한다. 다른 약어들과 혼합해서 사용한다. 예) ISOL EMBD CB.

1.1 항공기상예보 개요 – 부록 2. 세계지역예보센터와 악기상 약어 설명

주의 1 : '한정사들'는 영향을 받는 영역이나 시간이 명확할 때 사용한다. 예, 'ISOL SHRA N' 혹은 'ISOL SHRA TL 09 Z'. 발생 빈도가 바뀌는 경우에도 이를 표현해 준다. 예) 'Areas FG BECMG WDSPR FM 2100 Z'. 약어인 'FM'과 'TL'은 이러한 예보에만 사용된다.

주의 2 : 확률은 하층 예상 일기도에서는 사용하지 않는다. 확률은 영역예보에서 10% 단위로 사용한다. 예) 'PROB30 SCT ST BASE 800 FT TOP 1200 in SW of area'

주의 3 : 어떤 지역에서의 CB에 대한 예보에서 CB의 운량은 생략한다. 예) 'ISOL CB'

주의 4 : '한정사들'의 혼용해서 사용하지 말아야 한다. 예) 'LOC ISOL 3000 M BR' 혹은 'ISOL AREAS SCT ST'는 사용하지 않는다.

요약

아래 표는 각종 일기도나 전문에 사용할 수 있거나 없는 약어들을 정리한 것이다.

약어 \ 생산물	TAF	TREND	단면도	영역 예보 일기도	예상 일기도	특이 기상 일기도
BECMG	YES	YES	YES	YES	YES	NO
TEMPO	YES	YES	YES	NO	NO	NO
$PROB_{XX}$	YES	NO	YES	YES	NO	NO
$RROB_{XX}$ TEMPO	YES	NO	YES	NO	NO	NO
FM	YES	NO	YES	YES	YES	NO
TL, AT	NO	YES				
EMBD	NO	YES	YES	YES	YES	YES
ISOL	NO	NO	NO	YES	YES	YES
LOC	NO	NO	NO	YES	YES	NO

1.1 항공기상예보 개요 – 부록 2. 세계지역예보센터와 악기상 약어 설명

생산물 / 약어	TAF	TREND	단면도	영역 예보 일기도	예상 일기도	특이 기상 일기도
OCNL	NO	NO	NO	YES	YES	YES
'Areas'	NO	NO	NO	YES	YES	NO
FRQ	NO	NO	NO	YES	YES	YES
WDSPR	NO	NO	NO	YES	YES	NO

1.2 항공위험기상

1.2.1 항공위험기상 개관

본 절은 항공기상 업무에 종사하는 예보관들을 위한 예보 지침을 제공하기 위한 것이다. 본 절에서 다루어야 할 내용들은 불행하게도 항공기 운항에 위험을 줄 수 있는 다양한 기상 현상들이다.
위험 기상현상들은 민간과 군용 항공기의 연착과 비행 취소의 원인이 되기도 하지만, 심한 경우에는 수천억원에 달하는 항공기와 많은 생명을 앗아갈 수 있다.
본 절에서 예보 기법들이 다루어질 것이기는 하지만 이것이 예보를 생산하는 '교과서'가 될 수는 없다. 항공위험기상 현상들과 그 예보법을 잘 이해하기 위해서는 기상학에서 사용되는 특수한 용어들에 대해서 충분히 이해하고 있어야 한다. 본 절에서 다루지 못한 상세한 부분은 ICAO와 WMO에서 발간하는 관련 서적을 참조하기 바란다.

1.2.2 난류와 윈드시어

난류는 특히 낮은 고도를 비행하고 있는 항공기에 영향을 줄 수 있는 주요한 위험기상 현상이다.

윈드시어는 '인근한 공기의 층이나 기둥이 서로 다른 속도(속력이나 방향)를 가지고 흘러가는 현상'이라고 정의할 수 있다. 윈드시어는 특히 항공기 운항과 관련될 때 심각한 고려 대상이 된다. 항공기가 동일한 층류(Laminar Flow) 위를 비행할 때는 부드럽고 요동 없이 나아갈 수 있지만, 서로 다른 속도와 방향을 가지는 층류들의 경계를 가로지르게 되면 항공기는 상하로 요동치거나 상승/하강 각도에 변화를 초래할 수 있다.

난류는 윈드시어의 결과로 나타나는 현상이다. 대류에 의해서 상승하거나 하강하는 기류들 사이에서 발생하는 '시어'도 그 원인이 될 수 있다. 대기를 포함한 모든 유체의 가장 심한 시어는 층류에서 난류로 바뀌기 직전에 가장 심하다.

항공기의 종류에 따라 난류의 영향을 더 많이 받는 것들도 있다. 일반적으로 소형 항공기는 난류에 의해서 요동치기 쉽고 약한 난류에 의해서도 심각한 영향을 받을 수 있다. 반면 군용 제트기들은 난류에 대해서 높은 허용도를 가지도록 설계되어 있어 영향을 적게 받는다.

1.2 항공위험기상

ICAO는 난류의 강도를 다음과 같이 분류하고 있다.

약한 난류(Light)

◦ 보통 난류보다 영향이 작은 약한 난류

보통 난류(Moderate)

- 항공기의 운항 고도를 다소(Moderate) 변화시키지만 항공기는 여전히 조종 가능한 상태
- 공기 속도 변화는 일반적으로 작음
- 항공기 무게 중심에서의 가속도계의 변화가 0.5g에서 1g 사이로 나타남.
- 탑승객들은 안전벨트가 당겨지는 느낌을 받고, 항공기 내부에서 걸어 다니기 힘들며, 고정되어있지 않은 물건들은 움직일 수 있음

심한 난류(Severe)

- 항공기의 고도가 갑자기 변함. 짧은 시간 동안 항공기가 통제 불능 상태에 놓이기도 함.
- 공기 속도 변화가 일반적으로 큼.
- 항공기 무게 중심에서의 가속도계 변화가 1g를 넘음(항공기는 +4g/-2g를 심한 난류 기준으로 사용한다).
- 안전벨트가 심하게 당겨지고 헐거운 물체들은 들썩이고 서로 섞인다.

극심한 난류(Extreme)

- 심한 난류보다 현저한 영향을 미치는 난류

위에서 볼 수 있듯이 이 기준들 중에서 주관적이지 않은 것은 가속도계 값 밖에 없다. 따라서 풍속, 최대풍, 안정도 등의 기상 요소를 이용하여 난류의 강도를 정확하게 예측하는 것은 아주 어려운 문제이다. 난류 예보를 결정할 때는 경험식이나 상관관계에 의존하는 경우가 많다.

1.2 항공위험기상

군에서는 '수송기 크기 항공기'의 속도계에 읽히는 대기속도(IAS : Indicated Airspeed)가 5~15kts 사이에서 변화할 때를 약한 난류, 13~25kts 사이에서 변화할 때 보통 난류, 25kts 이상 변화할 때 심한 난류라고 부른다. 약한 난류나 보통 난류에 대해서는 난류라는 말보다 'Chop'이란 용어를 사용하기도 한다.

윈드시어는 실제로 심하게 그 존재를 느낄 수 있어도 윈드시어 자체만으로 그 강도를 구분하지 않는다. 앞으로 다음과 같은 주제들에 대해서 다루기로 하겠다.

- 대류성 난류
- 기계적(하층) 난류
- 지형에 의한 난류
- 청천난류(CAT)
- 하층 제트
- 항적 난류/항적 와도

1.2.2.1 대류 활동에 의한 난류

1) 설명

대류성 구름 주변과 내부의 연직 기류가 난류를 초래한다.

- 대부분의 대류성 구름 내부
- 적란운의 외부(특히 상부)
- 건조한 열기포 내부(포화되지 않고 상승하는 공기)
- 강수에 동반된 하강 기류. 소낙성 강수 주변에 스콜선 형성 가능

육지에서 열적으로 유도된 난류는 뚜렷한 일변화 경향을 가지는데, 가장 강한 난류는 오후에 발생하고 심야에 가장 약하다.

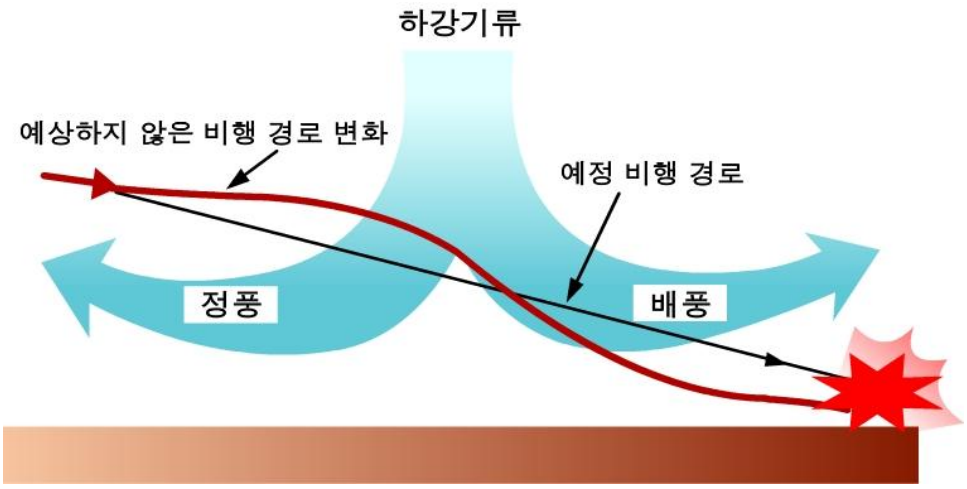
2) 항공기에 미치는 영향

가장 단순한 대류성 난류는 비행 중에 항공기가 '울퉁불퉁한(Bumpiness)' 곳을 비행하는 느낌이 들게 한다. 물론 난류의 강도가 증가함에 따라 ICAO의 기준에 따라서 나타나는 증상들도 변화한다. 특히, 항공기의 형태에 따라서 심한 난류는 항공기에 구조적인 피해를 주기도 한다.

1.2 항공위험기상

또한, 강한 대류성 스톰이 발생할 경우 강수에 동반된(동반되지 않을 수도 있음) 강한 하강기류(Down-draughts, 마이크로버스트)가 지표면에 도달하면서 사방으로 퍼져나가는 현상이 발생하기도 한다. 마이크로버스트는 아시아나 유럽 쪽에서는 자주 발생하는 현상은 아니다. 마이크로버스트는 주로 미국의 대평원 지역에서 자주 발생한다.

그림 1.1은 어떻게 마이크로버스트가 착륙을 시도하는 항공기에 영향을 미칠 수 있는지를 보여주고 있다. 윈드시어와 하강기류에 의한 갑작스러운 고도변화는 치명적인 사고의 원인이 될 수 있다.



[그림 1.1] 마이크로버스트가 착륙시 항공기에 미치는 영향

그림 1.1의 마이크로버스트의 예에서 볼 수 있듯이 난류와 윈드시어가 상호 관련성을 가지고 있음을 알 수 있다. 적란운 내부나 부근에서의 상승하거나 하강하는 공기의 기둥 사이에는 윈드시어가 강하고 마이크로버스트에 의한 하강기류의 경계에서도 강한 윈드시어가 발생한다.

1.2 항공위험기상

3) 각종 영상들을 이용한 위험 기상 진단

위성기술의 발달은 적외영상과 가시영상을 활용하여 대류성 구름들의 발달을 실시간 감시할 수 있는 기회를 제공하고 있다. 특히 실황예보(Nowcasting)에서 그 활용도가 매우 높다. 수증기영상은 열적/지형적 대류 방아쇠 작용 인자들과 연동될 경우 강한 대류활동을 유도할 수 있는 상층 양의와도이류(PVA : Positive Vorticity Advection) 구역을 진단하는데 사용할 수 있다. 수증기영상은 상대적으로 긴 시간에 대한 예측에 도움을 줄 수 있다.

가장 최근의 천리안 등 위성자료는 예보관들에게 더 많은 정보를 제공해 주고 있다. 가시 채널의 해상도는 더 높아졌고, 발달하는 대류성 구름을 실시간 감시할 수 있는 시간적 해상도인 15분마다 위성 영상을 수신할 수 있다. 또한 파장과 컬러화 기술을 활용하여 구름 운정의 얼음 구역과 적란운으로부터의 모루구름 형성에 대한 정보도 얻을 수 있다.

기상레이더 영상은 발달하는 스톰에 대한 초단기 예보에 없어서는 안 될 도구이다. 합성영상은 대략 10~15분, 단독 영상은 5분 단위의 영상을 예보관에게 제공한다. 스톰 탐지 및 추적 알고리즘을 이용하여 적란운들의 이동을 추적하여 영향을 미칠 수 있는 시간과 이동 방향에 대한 정보를 얻을 수 있다. 항상 기존의 스톰들과 직접 관련이 있거나 관련이 없는 새로운 스톰들이 언제든지 발생할 수 있다는 사실을 명심해야 한다.

도플러 레이더는 대류성 스톰들의 내부와 주변에서의 상대적인 기류를 진단하는데 도움을 받을 수 있다. 도플러 레이더는 기존의 단파 도플러에서 이중편파 기능을 추가하여 단순한 스톰 추적 기능뿐만 아니라, 스톰 내부의 기류의 흐름, 강수형태, 우박 영역, 정량적강수량예보(QPF) 등으로 활용도가 늘어나고 있다.

1~5분 사이의 간격으로 제공되는 낙뢰 영상도 대류성 스톰의 감시에 크게 적용할 수 있다.

1.2 항공위험기상

4) 경험적 예보 기법들

대류활동이 약화될 것인지 강화될 것인지를 결정하는 다양한 예보 기법들이 있다. 상세한 내용들은 항공위험기상 절을 충분히 활용한다. 이 외에도 다양한 예보 기법들을 기술한 기술노트들을 활용하는 것이 좋다.

위험한 하층 윈드시어/난류 예보 기준은 다음에 열거한 내용들 중 한 개 이상이 예상될 때이다.

- 평균 지상풍 풍속이 20kts 이상일 때
- 지상풍과 2,000ft 경도풍의 바람 벡터 차이가 40kt 이상일 때
- 10km 이내에서 뇌우와 강한 소낙성 강수가 있을 때
- 인근을 비행하고 있는 항공기로부터 뚜렷한 윈드시어가 보고되었을 때

표 1.1은 다양한 대류활동과 관련된 전형적인 난류의 강도를 보인 것이다.

[표 1.1] 대류활동과 관련된 난류의 강도

형태	연직속도			난류
	(m/s)	~KT	~FT/min	
작은/보통 적운	1~3	2~6	200~600	약함
작은/보통 적운	3~10	6~20	600~2000	보통
적란운	10~25	20~50	2000~5000	심함
극심한 대류성스톰(미국)	20~100	40~200	4000~20000	극심함
건조한 열기포	1~5	2~10	200~1000	약함/보통
하강기류	3~15	6~30	600~3000	보통/심함
마이크로버스트(미국)	40 까지	80 까지	8000 까지	극심함

1.2 항공위험기상

어떤 자료들은 운항 중인 항공기는 적란운으로부터 최소한 15에서 20마일을 이격해서 비행해야 하며, 항공기가 적란운의 모루구름 아래로 비행하는 것은 피할 것을 권고하고 있다.

그러나 예보관들은 모든 기본적인 기단 이론과, 실제와 예보된 상층선도 분석, 중규모대류계의 개념모델과 새로운 스톰의 발생 과정들에 대해서 충분히 알고 있어야 한다.

5) 수치예보 자료들

현재 대부분의 현업기관에서는 독자적인 수치예보 모델을 운영하고 다양한 자료들을 제공한다. 수치예보 자료들은 기본적인 일기도뿐만 아니라 지상 유선, 수렴/발산 구역에 대한 정보를 제공하여 대류성 구름의 발생에 관한 정보를 제공한다.

상세한 내용은 본 절에서 계속해서 다룰 적란운과 뇌우 부분을 참조하라.

어떤 자료들은 운항 중인 항공기가 적란운으로부터 최소한 15에서 20마일을 이격해서 비행해야 하며, 항공기가 적란운의 모루구름 아래로 비행하는 것은 피할 것을 권고하고 있다.

그러나 예보관들은 모든 기본적인 기단 이론과, 실제와 예보된 상층선도 분석, 중규모대류계의 개념모델과 새로운 스톰의 발생 과정들에 대해서 충분히 알고 있어야 한다.

1.2 항공위험기상

6) 사례 연구(2가지 사례)

① 마이크로버스트

1982년 7월 9일 보잉 727-235기가 뉴올리언스 국제공항을 이륙한 직후 추락했다. 가장 큰 원인은 공항 주변에서 발생한 대류성 스톰에서 발생한 마이크로버스트였다.

- 종관 상황

고기압이 멕시코 만에 중심을 두고 있어 덥고 습한 오후 날씨를 만들었다. 예보는 3,000ft에 스캐트성 구름이 주를 이루는 가운데 3,000m 시정을 동반한 1,000ft 브로큰성 구름과 보통 소나기와 뇌우를 예상하는 것이었다. 뉴올리언스 주 180km 이내에는 전선이나 저기압이 존재하고 있지 않았다.

- 이륙과 동시에 사고

바람이 없다가 강한 비가 시작되면서 지상풍은 돌풍성으로 변해갔다. 공항은 윈드시어 경보 시스템을 가지고 있었고 조종사에게 그 내용이 정확하게 전달되었다. 최근 착륙한 항공기인 A767기는 100ft에서 10kt의 윈드시어를 보고하였다.

항공기는 활주로 28에서 이륙하여 공항 경계를 넘어 거주지 부근에 하강하여 충돌하기 전까지 100ft를 상승하였다.

정풍 성분의 바람이 18kt였고, 이륙 지점으로부터 3,500ft 떨어진 곳에서 항공기는 510ft/min(=5kts)의 하강 기류를 만났고, 이륙 후 4,000ft 지점에서 배풍 36kt의 바람에 직면했다.

- 원인

공항을 가로지르는 뇌우로부터 발생한 마이크로버스트에 의한 물리적인 하강기류와 갑작스러운 풍향과 풍속 변화에 따른 대기속도 상실로 항공기의 고도가 급속도로 낮아진 것이다.

1.2 항공위험기상

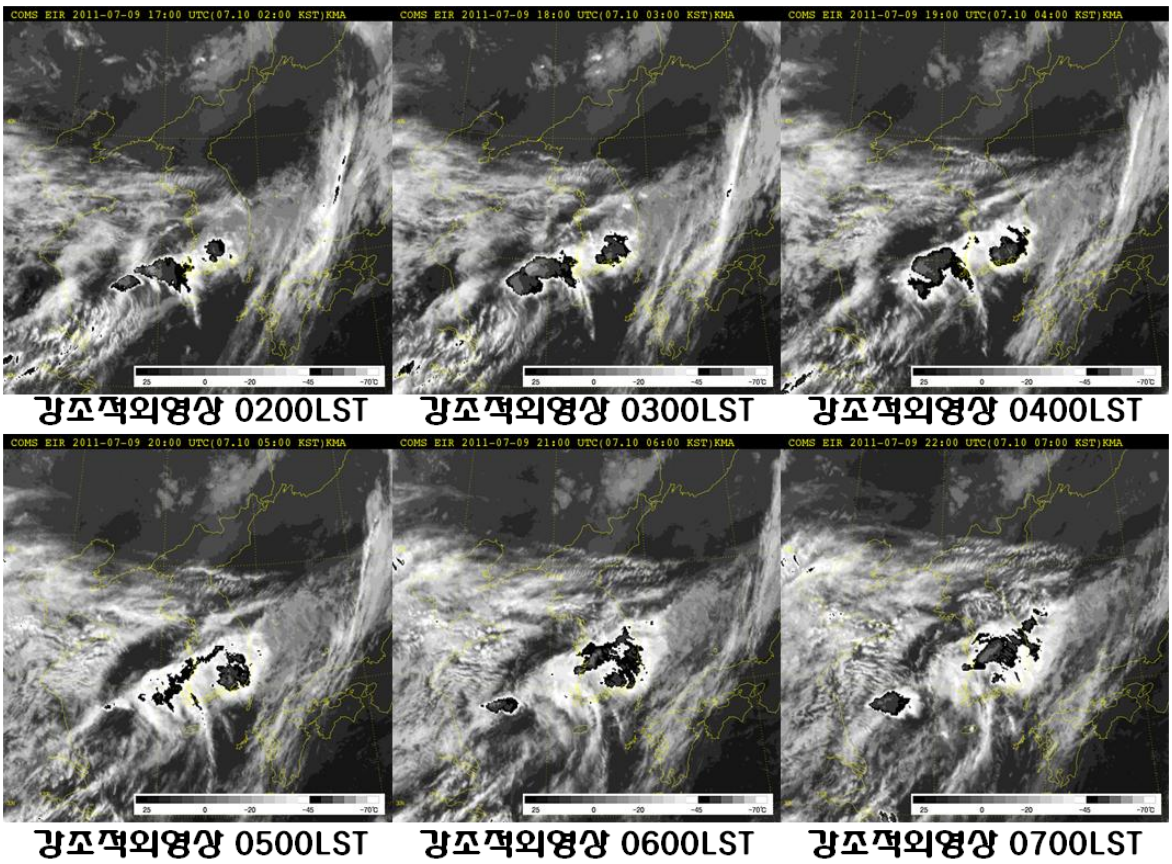
책임 예보관은 공항 당국과 접촉하여 사고가 나기 전에 '매우 강한 뇌우와 심한 난류, 낙뢰와 돌풍성 바람'이 발생할 가능성이 높다는 조언을 하였다. 8명의 주민을 포함한 152명의 인명이 이 사고로 사망했다.

② 강한 뇌우와 비

2011년 7월 10일 충청지방을 중심으로 뇌우를 동반한 강한 비가 내렸다.

충청지방 집중호우를 동반한 대류성 스톰의 위성영상(2011년 7월 10일)

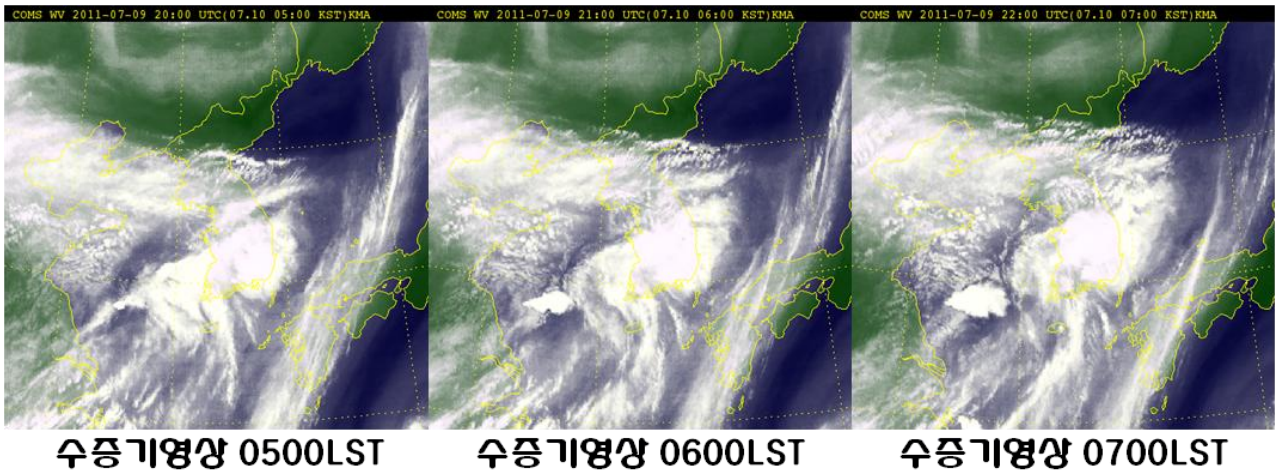
7월 10일 02시부터 07시까지의 연속적인 강조적외영상은 얼마나 빠르게 집중호우를 동반하는 대류성 스톰이 발달하는지를 잘 보여주고 있다. 장마전선 부근의 충층과 하층 불안정의 결과로 02시 남부지방에서 발생한 스톰의 주변에서 04시에 새로운 스톰이 발생해서 빠르게 성장하여 운정온도가 -45℃가 넘는 구역이 확대되고, 07시에 가장 강하게 발달하는 모습을 보여주고 있다.



[그림 1.2] 중층의 적란운 위성영상

1.2 항공위험기상

강조적외영상이 적란운 셀들이 매우 빠른 속도로 성장하고 있는 모습을 보여주고 있는 가운데, 수증기 영상은 높은 잠재와도(어두운 곳)가 지형과 열적 방아쇠 작용에 의해 대류성 스톰이 발생하고 있는 지역을 가로질러 형성되어 있는 것으로 보여주고 있다.



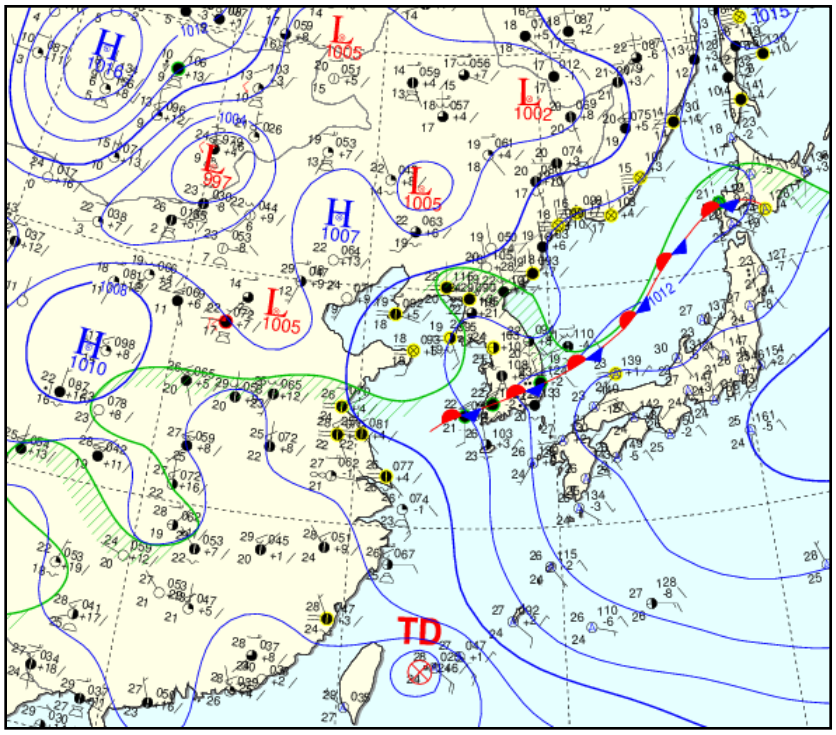
[그림 1.3] 중층의 적란운 수증기영상

1.2 항공위험기상

아래 그림 1.4는 7월 10일 15UTC(00LST) 지상일기도를 보여주고 있다.

일본에서 남해안 부근으로 장마전선이 정체되어 동에서 가로질러 있으며, 습윤구역이 한반도 전체를 덮고 있는 것을 알 수 있다. 장마전선을 경계로 북쪽에는 상대적인 고기압이 자리잡으면서 낮 동안 강한 일사가 있었던 반면 남쪽은 계속해서 구름이 덮여있으면서 남북 온도경도와 하층에서의 불안정이 강화되는 모습을 보여주고 있었다.

야간에는 복사냉각에 의한 전도로 인한 하층 상승운동이 발생하고 이 강제상승 운동과 상층의 잠재불안정 구역이 만나면서 강한 대류성 상승운동이 만들어진 것이다



[그림 1.4] 2011년 7월 10일 00LST 지상일기도

위성 영상에서 보이는 강한 대류성 스톰 셀들에 의해서 충청지방을 중심으로 강한 집중호우성 비가 내렸고 국지적인 돌발홍수가 발생하였다.

1.2 항공위험기상

1.2.2.2 기계적(하층) 난류

1) 설명

기계적 난류(주로 하층난류라고 불림)는 지표면 상공의 공기가 지표면 마찰력의 영향으로 방향과 속도가 변화하는 것을 말한다. 기계적 난류의 강도는 다음과 같다.

- 바람의 강도
- 지형의 거칠기
- 지표면 근처 대기의 안정도

일반적으로 강한 바람과 거친 지형은 더 강한 난류를 만든다. 해수면 위를 지나는 약한 바람은 난류를 거의 만들지 않는다.

기온감률이 커질수록 지표면 부근에서 돌풍 발생 가능성이 높고 더 강한 난류가 발생한다. 더 안정된 대기 중에서는 연직 에디의 활동이 제한을 받고 난류는 감소한다. 그러나 안정된 대기라고 하더라도 큰 장애물(언덕, 산악)에 의해서 충분한 연직 변이가 있으면 산악파나 풍하측 파가 발달한다. 지형성 난류 참조. 층적운은 난류 혼합의 징후가 될 수 있고, 그 구름의 내부에서는 약한 혹은 보통의 난류가 존재한다.

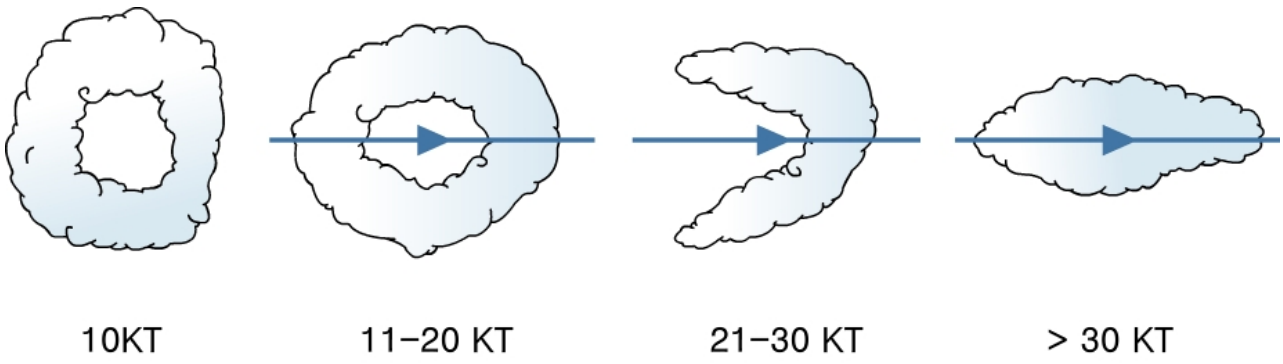
1.2 항공위험기상

2) 항공기에 미치는 영향

가장 단순한 기계적 난류는 비행 중에 항공기가 '울퉁불퉁한(Bumpiness)' 곳을 비행하는 느낌이 들게 한다. 물론 난류의 강도가 증가함에 따라 ICAO의 기준에 따라서 나타나는 증상들도 변화한다. 난류의 강도가 주어졌을 때, 지표면 부근에 가깝게 빠르게 날고 있는 항공기는 이러한 난류에 적절히 대응할 수 있는 시간이 부족할 수 있다. 특히, 항공기의 형태에 따라서 심한 난류는 항공기에 구조적인 피해를 주기도 한다.

3) 각종 영상들을 이용한 위험 기상 진단

각종 영상을 이용하여 지상풍을 진단하는 것은 매우 어렵다. 위성이나 레이더 영상 분석은 구름이나 소낙성 강수의 이동에 관여하는 기류의 흐름을 알려주지만 이것은 일정한 고도 이상의 상공을 흐르는 기류에 대한 정보를 제공하기 때문에 지표면이나 지표면 근처의 바람에 대한 정보를 직접적으로 제공하는데 한계가 있다. 그림 1.5는 지상 경도풍 풍속에 따른 전형적인 대류성 구름의 형태를 보여주고 있다. 그러나 이러한 현상은 해상에서 그대로 적용이 가능하지만 육지에서는 그 모습이 깨어진다.



[그림 1.5] 지상 경도풍 풍속에 따른 대류성 구름의 형태

가장 효과적인 지상풍 감시를 통한 난류 강도 예측 방법은 지속적인 지상풍 보고를 분석하는 것이다. 그리고 이러한 지상풍보고와 수치예보 모델들의 예측 결과를 지속적으로 비교 검토할 필요가 있다.

1.2 항공위험기상

4) 경험적 예보 기법들

예보관들이 자신의 풍속 예보에 자신감을 가진다면, 이에 따라 난류의 강도를 예상할 수 있다. 아래 표는 풍속에 따른 난류 가능성을 정리한 것이다.

[표 1.2] 풍속에 따른 난류 가능성

지상풍속(KT)	해상	평지 지형	산악 지형
15 ~ 35	약함~보통	보통	심함
35 이상	보통~심함	심함	극심함

주어진 기압경도력으로부터 지상풍 풍속을 결정할 때 예보관들은 대기의 안정도 뿐만 아니라, 최대풍 요소도 동시에 고려해야 한다. 소낙성 강수를 동반한 대류성 스톰의 경우 최대풍은 기압경도 강도에 접근한다. 매우 불안정하고 강한 소낙성 강수가 동반된 뇌우의 경우에는 최대풍이 경도풍의 풍속을 넘어서고 아마도 5,000ft 상공의 풍속까지 접근할 수 있다.

돌풍성 지상풍을 예보할 때 예보관은 하층 난류가 심한 강도를 가질 것이라는 사실을 인지하고 있어야 한다.

1.2 항공위험기상

5) 수치예보 자료들

수치예보 모델에서 생산된 바람은 좋은 난류 예보 지침이 될 수 있다. 그러나 항상 모델이 가지는 수평해상도와 지형해상도 한계에 의해서 제한적인 예측만 가능하다는 사실을 인지하고 있어야 한다. 주로 925hPa 바람장을 '경도풍' 크기로 간주하고 이를 통해서 지상풍을 예측한다. 다만 지상기압이 1013hPa을 넘으면 925hPa 고도가 너무 높아 그대로 사용할 수 없다는 사실도 인지하고 있어야 한다. 최근 수치예보 모델들은 바람장과 운동역학 에너지를 이용하여 난류를 직접 계산하고 그 강도를 그래픽으로 표출한다.

1.2.2.3 지형성 난류

1) 설명

지표면의 지형이 거칠어서 '산맥과 계곡'을 이루는 정도라면 지형을 따라 흐르는 기류는 원래 위치로부터 많은 변위를 가지게 된다. 이러한 기류의 연직 변위는 대기의 안정도에 따라 대류성 스톰을 발생시켜 난류를 유발하기도 하고, 안정화된 대기 중에서 변위된 기류가 다시 제자리로 돌아오는 과정에서 '정립파(Standing Wave)'와 회전형 기류를 만들기도 한다. 계곡으로 모여서 흐르는 기류는 정상적인 경도풍보다 훨씬 강한 바람을 만들어 낼 수 있다.

예보관들은 '무풍(Clam)' 시나리오로부터 난류에 대한 정보를 읽어낼 수 있어야 한다. 활강바람(Katabatic)이나 활승바람(Anabatic)은 바람이 없는 상태에서 갑자기 만들어 질 수 있기 때문이다. 활강/활승바람은 일반적인 경우에는 잘 발생하지 않지만, 넓은 빙하가 깔려있는 지역에서 자주 발생한다.

산악파(Mountain Waves)는 특정한 대기 조건에서 발달할 수 있다. 산악파 운동은 풍하측으로 수백 마일까지 유지될 수 있다. 산악파가 발달하기 위해서는 대기가 층상으로 안정된 상태에 있어야 하며 다음과 같은 조건이 합쳐질 때 발생한다.

- 온난 구역
- 고기압 주변의 강한 바람
- 온난 전선의 전단면(Front-edge)

1.2 항공위험기상

좀 더 특별하게 산악파가 만들어지기 위한 신호들은 다음과 같다.

- 대기 경계층 꼭대기에서의 강한 바람(20~25kts 이상), 전형적으로 강한 역전 바로 아래
- 산맥 능선에 수직방향으로 30도 이내의 각도에서 바람이 불어올 때
- 하층의 중립 대기층이 산악 높이의 1.5에서 2배에 해당하는 고도에 뚜렷한 역전층을 가지고 있을 때

뒤에서 산악파를 다룰 때 산악파를 '갇힌(Trapped)' 산악파와 '갇히지 않은(Untrapped)' 산악파(에너지가 연직으로 전파되는)로 구분할 것이다.

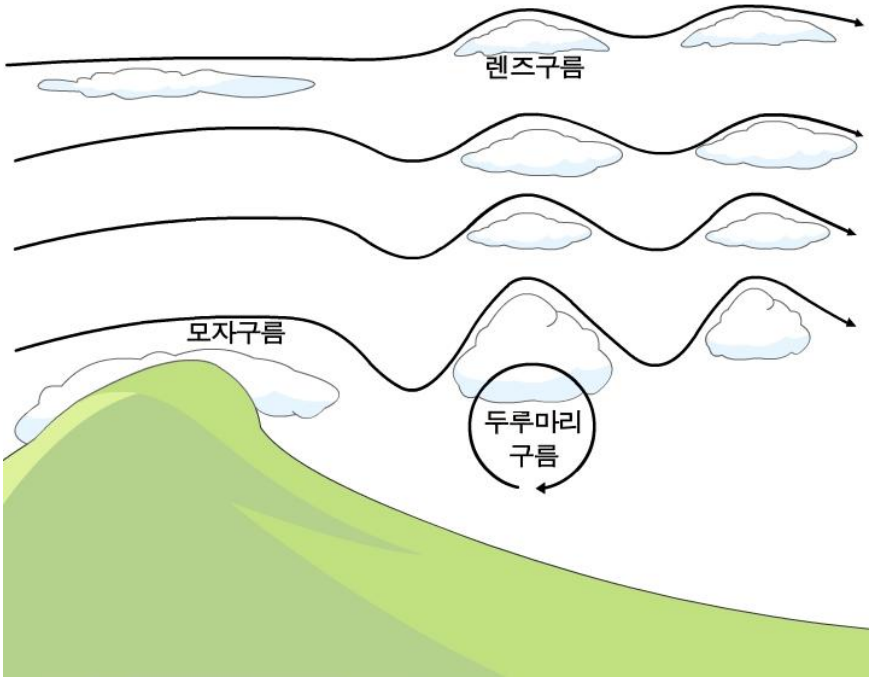
갇힌 산악파는 바람이 고도에 따라 증가하거나 상대적으로 덜 안정된 공기층이 안정된 공기층을 이루고 있을 때 발생하는데 이 경우 파동 에너지는 갇히게 되고 에너지는 아래쪽으로 전파된다.

안정도가 높은 상태에서 풍속이 약하거나, 산맥의 폭이 넓을 때 갇히지 않는 산악파가 발생한다. 이때 파동 에너지는 상층으로 전파되고 그 파동은 성층권까지 도달하는데, 전형적인 지형성 권운과 같은 뚜렷한 경계와 현상들이 관측된다.

산악파 운동에 따라 다양한 형태의 난류가 발생할 수 있는데, 만약 연직 기류가 강하고 파의 파장이 짧으면 난류가 강할 수 있다. 난류가 잘 발생하는 지역은 산악파의 마루나 골상이다.

원통형 회전기류는 대형 산맥의 풍하측의 급한 경사면 부근에서 잘 발생하는데, 아주 맹렬한 난류를 만들 수 있다. 이 회전기류를 따라 만들어지는 조각난 적운 형태인 두루마리구름은 강한 회전기류가 존재하고 있음을 보여준다. 가장 강한 회전기류는 첫 번째(최하층) 산악파의 마루 부근에서 발생한다.

1.2 항공위험기상



[그림 1.6] 원통형 회전기류

풍하측 회전기류는 다음과 같은 조건 하에서 발생한다.

- 대기 경계층 꼭대기에서의 강한 바람(20~25kts 이상), 전형적으로 강한 역전 바로 아래
- 산맥 능선에 수직방향으로 30도 이내의 각도에서 바람이 불어올 때
- 하층의 중립 대기층이 산악 높이의 1.5에서 2배에 해당하는 고도에 뚜렷한 역전층을 가지고 있을 때
- 산악 높이의 1.5에서 2배 높이의 고도에서 뚜렷한 풍속 감소가 있고 풍향이 크게 변할 때
- 잘 혼합된 최하층 위에 안정된 기단이 놓일 때

두루마리구름을 동반한 회전기류는 산맥의 풍하측에 약한 바람이 불 때 지상에서 잘 관측된다. 이때 그 풍향은 경도풍의 반대인 경우가 많다.

산맥의 풍하측 역전층은 강제 하강과 단열 승온으로 인해서 풍상측에 비해서 낮다.

산악파가 있거나 회전기류가 없는 상태에서 강한 바람이 불면 지표면 거칠기에 의해서 활승면을 따라 심한 난류가 발생할 수 있다.

1.2 항공위험기상

2) 항공기에 미치는 영향

산악파는 항공기 운항에 이익과 불이익을 동시에 제공한다.

경험이 많은 글라이드 조종사들은 충분한 비행고도를 얻기 위해서 산악파의 상승기류 부분을 찾는다. 산악파의 상승기류는 약 500ft/min으로 글라이드가 충분한 고도로 빠르게 상승하는데 도움을 준다. 산악파의 상승면에서의 비행은 아주 부드럽게 이루어진다.

산악파의 몇 가지 고유한 위험성은 다음과 같다.

1. 급격한 고도의 변화를 조종사가 눈치 채지 못하는 경우가 있고, 비행 고도의 차이가 크게 남에 따라 혼란을 겪을 수도 있다. 더욱 중요한 것은, 만약 산악파에 의한 하강기류에 붙잡히면 비행고도가 빠르게 하강하게 되고 지형과 비행 고도 사이에 회피할 수 있는 공간이 부족해서 최악의 경우 지상에 추락할 수도 있다. 이러한 현상은 비행경로가 산맥과 나란할 때 자주 발생할 수 있다. 산악파 활동은 항공용 일기도에 연직속도가 500ft/min 이상으로 예상될 경우 표시한다. 경비행기인 세스너기의 경우 최대 상승률이 700ft/min라는 사실을 상기하면 500ft/min의 연직속도는 항공기의 이륙을 불가능하게 할 수도 있다. 대형항공기나 군용기의 경우보다 빠르게 상승할 수 있지만 500ft/min의 하강기류는 큰 부담이 될 수도 있다.

2. 부드러운 층류는 첫 번째나 두 번째 고도의 파동의 마루에서 회전기류를 만들어 낼 수 있다. 이 지역에서는 아주 심한 난류가 발생할 수 있는데, 두루마리구름(Roll Cloud)가 관측될 경우도 있지만 그렇지 않을 경우도 있다.

3. 충류에서 파동으로 떨어져나오면 부드럽던 기류는 아주 거칠어지게 되며, 난류의 강도 기준에 따르면 보통이나 심한 난류가 될 수 있다.

4. 만약 파장이 짧으면 산악파를 따라 비행하거나 가로질러 비행할 때 연직속도의 변동 때문에 항공기가 연속적으로 크게 상하로 요동칠 수도 있다.

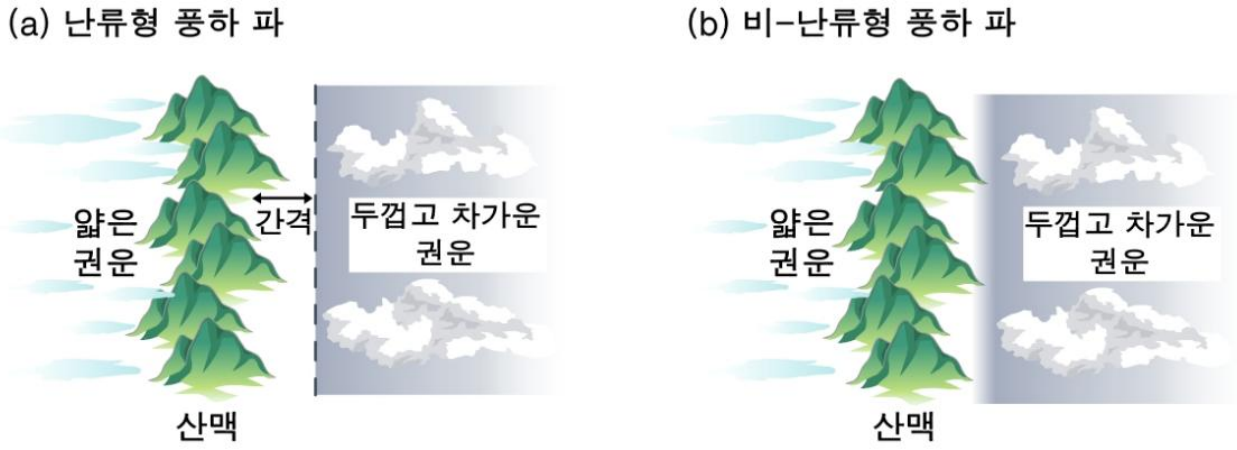
회전기류나 지상 회전기류는 항공기에 아주 위험할 수 있다. 이런 기류가 존재하면 조종사는 활주로에 접근하는 과정에서 항공기를 안정화시키는데

1.2 항공위험기상

큰 어려움을 겪을 것이다. 풍향의 급변(윈드시어)뿐만 아니라 오르락 내리락하는 기류에 휩싸이게 되면 항공기가 상하로 크게 요동칠 수 있다. 난류성 기류는 빠르게 강한 기류에 의해서 채워지는데 산악의 하강 경사면에서 이 기류가 형성되면 항공기의 축풍 제한치를 넘어가는 경우가 자주 발생한다. 따라서 산악주변에 위치해서 산악파나 난류의 영향을 많이 받는 지역에 위치한 공항에는 바람자루(Windsock)들을 공항 주변에 많이 설치해서 뚜렷하게 변하는 풍향과 풍속을 확인할 수 있도록 해야 한다.

3) 각종 영상들을 이용한 위험 기상 진단

산악파 활동은 위성영상을 통해서 구별해 낼 수 있다. 갇힌 산악파는 뚜렷한 파형 구름을 통해서 쉽게 진단할 수 있지만, 연직으로 전파되는 갇히지 않은 산악파는 '지형성 권운' 신호를 통해서 인지할 수 있다. 난류형 산악파와 비난류형 산악파에 따른 지형성 권운의 형태는 그림 1.7과 같다.



[그림 1.7] 난류형 산악파와 비난류형 산악파에 따른 지형성 권운의 형태

지표면 풍속과 풍향 분석은 지표면 부근에서의 회전기류 존재 여부를 찾는데 유용하다. 이 경우 지표면의 기류는 아주 약하면서 완전히 반대 방향에서 불어온 바람이 만나기도 한다.

1.2 항공위험기상

4) 경험적 에보 기법들

지형성 난류는 다음과 같은 종관 환경에서 뚜렷하게 나타난다.

- 강한 바람을 동반한, 깊이 발달한 저기압 주변
- 온난전선의 전면, 상층의 안정된 공기가 산악을 타고 넘는 기류의 수직 확대를 억제한다. 이에 따라 산꼭대기의 풍속이 경도풍의 2배까지 늘어날 수 있으며 풍하측에 회전기류를 만들어 낸다.
- 여름철 강한 일사에 의해서 형성된 안정된 온난 공기역 내에서 강한 바람이 있을 때

Casswell 방법은 난운의 존재에 대해서, Horace 방법은 실제 혹은 예보된 상승기류를 통해 산악파의 활동과 연직 속도를 진단할 수 있는 방법을 제시한다. 그러나 이들 방법은 전문가들에는 호응을 얻지 못하고 있다.

이들 방법 이외에도 다양한 방법들이 제시되고 있지만, 대부분의 경우 과도한 가정을 전제로 하기 때문에 효용성이 떨어진다. 최근 들어서는 수치예보를 통해서 답을 찾으려는 노력이 경주되고 있다.

1.2 항공위험기상

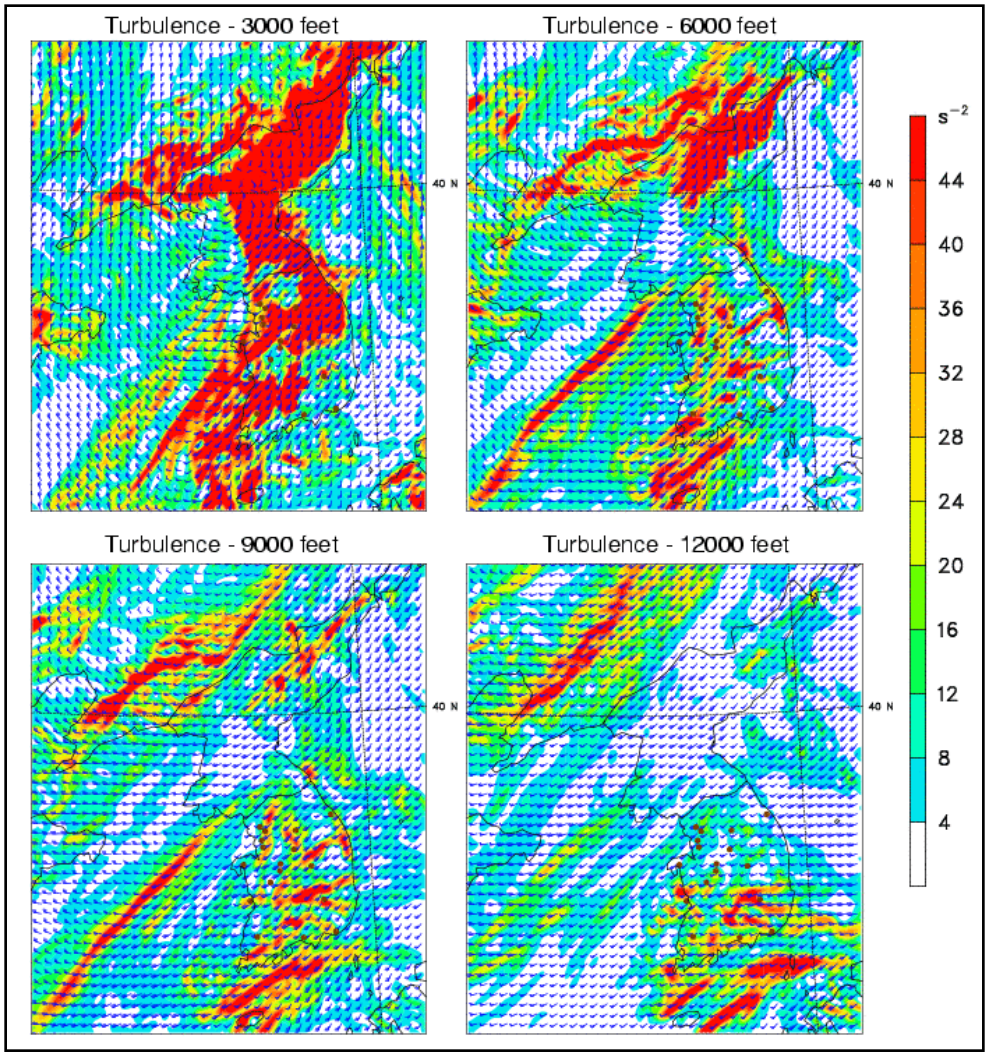
5) 수치예보 자료들

산악지형을 가로지르는 기류에 대한 정보는 925hPa, 850hPa과 같은 상층 수치예보자료의 풍향 풍속과 연직 프로파일의 변화를 통해서 수직 윈드시어 구역을 찾아서 판단할 수 있다. 그러나 실제로 상층 예상일기도에서 직관적으로 난류의 위치와 강도를 판단하는 것은 매우 어려운 일이다. 또한 모델에서는 지형이 실제 지형에 비해서 평활화되어 반영되기 때문에 실제적인 지형의 효과를 그대로 판단하기도 힘들다. 따라서 예보관들은 주변 지형에 대해서 잘 알고 이들 자료를 활용해야 한다.

최근 수치예보 모델들은 주어진 격자에서의 연직 윈드시어를 계산하고 이를 운동에너지로 전환하여 그 세기를 계산하여 난류의 강도를 계산하는 방법을 통해서 고도별 난류의 강도를 그래픽으로 전환하여 제공하고 있다. 이러한 수치예보 자료의 제공은 특히 산악지형이 발달된 한반도에서 낮은 고도를 비행하는 항공기들의 조우할 가능성이 높은 난류 발생 가능성을 예보관들이 미리 판단하고 조언할 수 있도록 도움을 준다. 물론 이 과정에서 예보관들은 관측된 단열선도와 모델 단열선도를 잘 비교해서 신빙성을 먼저 판정해야 한다.

다음에서 보여지는 예상도(그림 1.8)는 모델에서부터 생산된 난류의 강도를 고도별로 예측한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 3,000ft(1km) 고도의 바람이 서풍에서 남서풍 계열로 불면서 소백산맥과 태백산맥의 풍상측과 풍하측의 넓은 지역에 강한 난류가 발생할 것임을 예상할 수 있다. 반면 2km, 3km, 4km 고도를 올라가면서 주로 지리산(소백산맥)의 풍하측에서 강한 난류를 예상하고 있는데, 이는 산악파의 발생가능성이 높음을 보여준다.

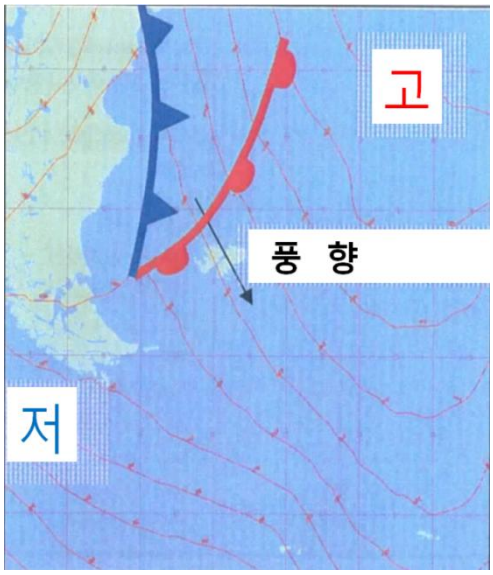
1.2 항공위험기상



[그림 1.8] 수치예보 모델에서 예측한 고도별(1km,2km,3km,4km) 난류 예상도

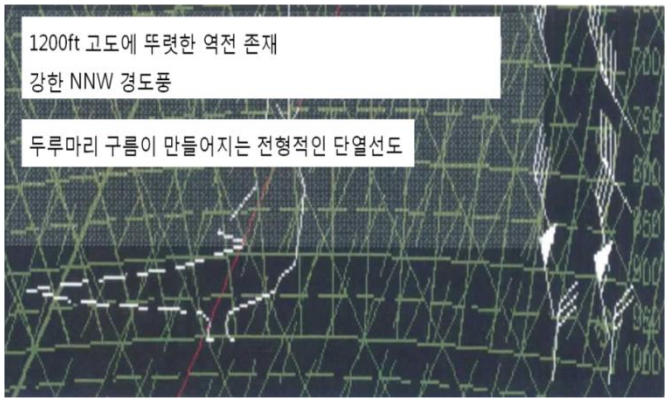
1.2 항공위험기상

6) 사례 연구



[그림 1.9] 포클랜드 섬 주변의 지상일기도

위의 일기도는 전형적인 안정된 대기 상태에서 북서풍이 포클랜드 섬을 넘어서 불어오고 있는 모습을 보여주고 있다. 이런 일기도 패턴에서는 약한 침강역전이나 접근하는 온난전선 전면에서 역전이 발생하기도 한다. 아래에 보이는 단열선도는 그 지역에서의 바람과 온도 프로파일을 보이는데 이러한 형태의 연직 구조는 회전기류가 발생하기 좋은 모습이다. 포틀랜드 섬은 비행장으로부터 북쪽으로 수 마일 떨어진 곳에 동서로 산악이 분포하고 있다. 이 산의 높이는 2,300ft이지만 대부분의 지역은 1,500ft 정도의 높이를 가지고 있다.



[그림 1.10] 포클랜드 섬의 단열선도. 강한 역전과 높은 습윤감률 그리고 강풍이 나타나고 있다.

1.2 항공위험기상

이 기간 동안의 METAR 전문을 보면

a) 50kt 최대풍을 동반한 강한 기류

b) 0805UTC와 1350UTC 사이의 풍속과 최대풍의 심한 변동

c) 회전기류 구역을 인지할 수 있는 작은 운량의 층운 등의 발생을 알 수 있다.

[표 1.3] 포클랜드 섬의 METAR 전문

221650	33015KT	9999 FEW010 SCT100 BKN120
221550	33027G39KT	9999 -RA FEW012 SCT100 BKN120
221450	34031G42KT	9999 FEW012 BKN100 BKN120
221350	35036G47KT	9999 FEW008 SCT012 BKN100
221250	34009G19KT	6000 VCSH FEW007 BKN012
221150	01016KT	9999 -RA FEW007 BKN014
221134	36015G25KT	9999 FEW008 BKN014
221050	33010KT	9999 FEW008 BKN018 BKN100
220950	35016G29KT	9999 FEW011 SCT019 BKN150
220850	35036G48KT	9999 FEW045 SCT130 OVC160
220750	35024G36KT	9999 FEW045 SCT080
220650	36033G46KT	9999 FEW010 SCT090 BKN200
220550	35033G47KT	9999 FEW010 SCT090 BKN200
220450	36036KT	9999 FEW010 BKN220
220350	36039G50KT	9999 FEW008 SCT080 BKN120
220250	36028G38KT	9999 FEW008 SCT080 BKN120
220150	03023KT	9999 FEW008 SCT180 BKN120
220050	01031G41KT	9999 FEW008 SCT120
212350	01038G49KT	9999 FEW007 SCT120
212250	01028KT	9999 FEW007 SCT120
212150	36037G50KT	9999 FEW007 SCT050 BKN220
212050	01028G39KT	9999 FEW003 BKN100 BKN120

1.2.2.4 청천난류(CAT)

1) 설명

청천난류는 중층 혹은 상층의 뚜렷한 윈드시어 지역에서 발생하는 난류라고 정의할 수 있다. 청청난류라는 이름에서 알 수 있듯이 이 난류는 구름이 없는 상태에서 나타나는 경우가 많기 때문으로 사전에 눈으로 인지할 수 없는 것이 특징이다.

1.2 항공위험기상

2) 항공기에 미치는 영향

다른 모든 난류와 같이 난류의 강도는 ICAO의 분류 기준을 따른다. 대부분의 경우 항공기가 높은 고도를 비행하는 동안 조우하지만 심한 난류는 절대 무시할 수 없을 만큼 강하고 극심한 경우에는 항공기에 구조적인 피해를 입히기도 한다.

민간항공기의 경우에는 승객들이 매우 불편하게 느끼고 심한 경우에는 공포를 느끼기도 한다.

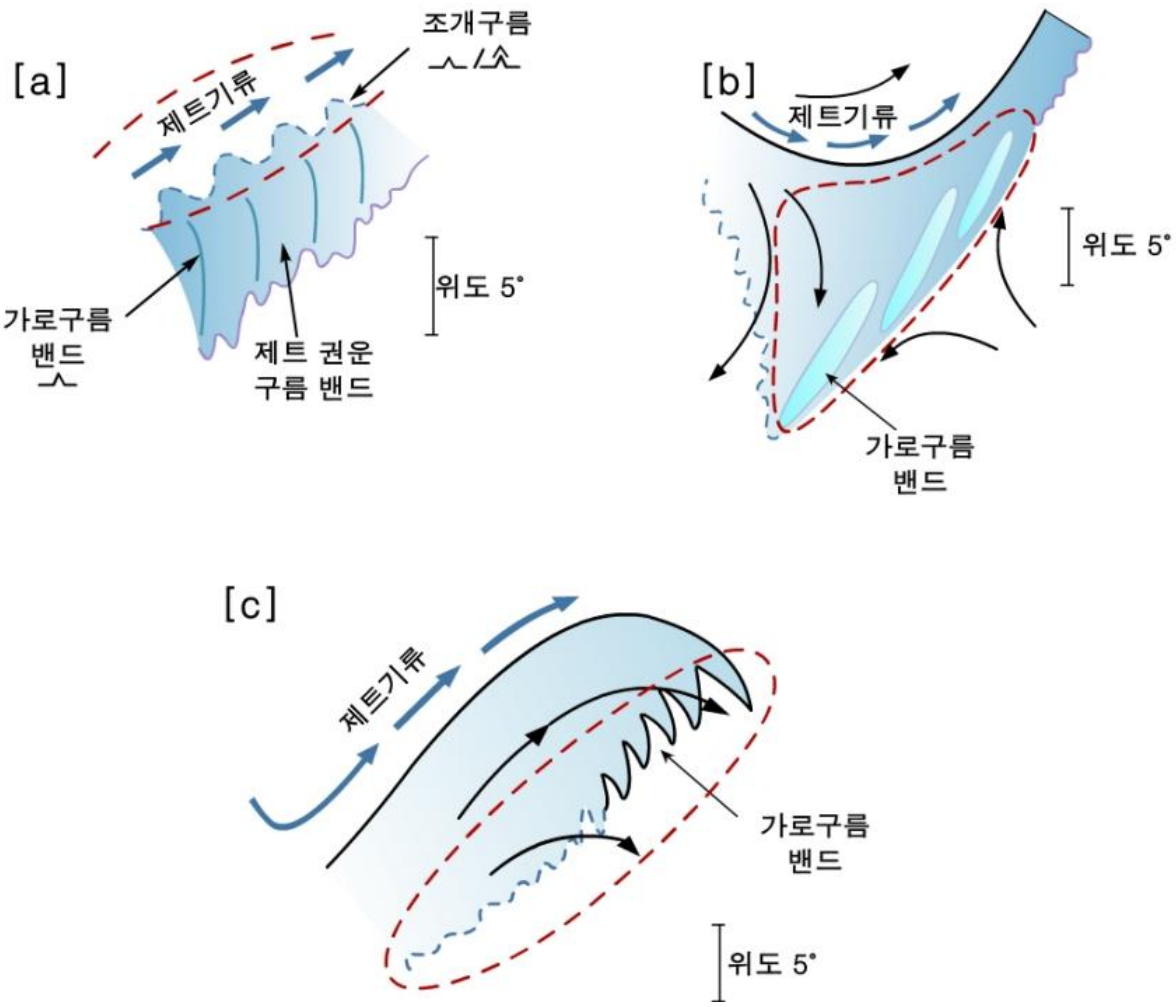
군용항공기의 경우에는 편대 비행에 영향을 미치고 공중 급유에 심각한 영향을 미친다.

엄격하게 말하면 산악파에 의한 난류도 청천난류의 하나로 분류할 수 있다.

3) 각종 영상들을 이용한 위험 기상 진단

청천난류가 발생하는 지역에서 잘 발달하는 특정한 형태의 구름들을 위성영상을 통해서 확인 할 수 있다. 비행 중에 발생하는 난류에 대한 조종사 기상보고도 잘 참조해야 한다.

1.2 항공위험기상



[그림 1.11] 청천난류 지역을 판단할 수 있는 고유한 구름 형태

'물결구름(Billow)'라고 불리는 특정한 권운 패턴은 청천난류가 발생한 구역이라는 전조를 보여준다. 물결구름은 층류가 Kelvin-Helmotz 불안정파의 형태로 난류로 떨어져 나오는 징후가 된다.

Kelvin-Helmotz 불안정은 Richardson 수를 통해서 판단할 수 있다. R_i는 그 자체적으로(혹은 Brunt-Vaisalla 진동수) N과 같이 정적 안정도의 정도를 나타낸다.

1.2 항공위험기상

$$R_i = \frac{N^2}{(dU/dz)^2}$$

여기에서 N: $Brunt - Vaisalla\ frequency$

$$N^2 = \frac{g}{\theta} \times \frac{d\theta}{dz}$$

위의 방정식에서 U는 풍속, g는 중력가속도(9.8m/s), θ는 온위, z는 고도를 의미한다. 비록 성층권의 정적안정도는 높지만 충분한 크기의 윈드시어가 발생하면 난류나 층류로부터 떨어져 나온 분리파가 발생할 수 있다. 이 값이 0.25 이하이면 분리파의 발생이 가능하고, 0.25에서 1 사이면 지속적인 난류가 발생할 수 있다. 반면 R_i가 1을 넘으면 기존 난류가 억제되기 시작한다.

[그림 1.12] Kelvin-Helmotz 불안정파에 의한 물결구름

청천난류는 대부분 제트기류 주변에서 발생하는 경우가 많기 때문에 수증기영상이나 적외영상은 제트기류의 위치를 확인하는데 없어서는 안 될 도구이다. 특히 한반도와 일본과 같이 아열대 제트와 한대제트가 동시에 존재하는 경우에는 수증기 영상을 통해 제트기류의 남북이동을 잘 판단하고 감시해야 한다

1.2 항공위험기상

조종사 기상보고도 항상 관심을 가지고 분석해야 하며 제트기류의 강도를 판단하는데 유리하다.

4) 경험적 예보 기법

청천난류는

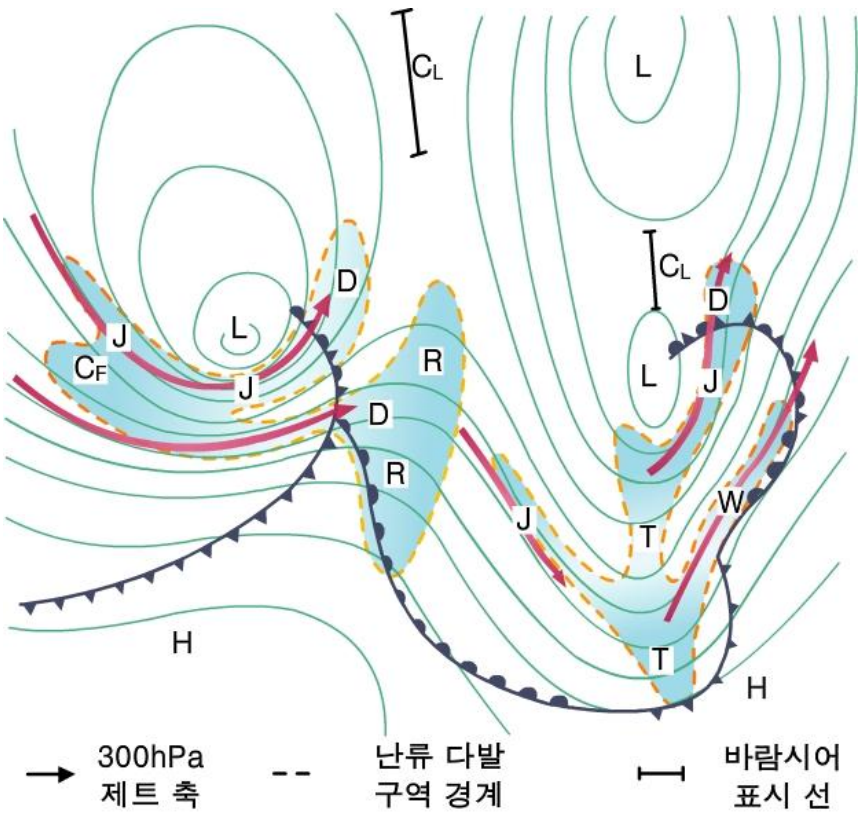
- 제트기류의 차가운(북쪽) 부분에서는 윈드시어가 가장 큰 지역인 제트 중심 근처나 바로 아래에서 주로 발생
- 제트기류의 따뜻한(남쪽) 부분에서는 제트 중심의 바로 위에서 주로 발생. 제트기류의 세기가 강할수록 청천난류가 존재할 가능성이 높음
- 상층의 발달하는 기압능의 주변 기류의 흐름이 곡률 효과로 인해 그 한계에 도달하는 속도를 가지는 지역
- 풍향이 급변하는 깊은 상층 골
- 제트기류가 합류하거나 분류되는 지역
- 안장부에서도 좁지만 강한 청천난류 선이 발생할 수 있음
- 만약 제트기류의 풍속이 100kts를 넘고 연직 윈드시어가 4kt/1000ft 이상이면 그 지역으로부터 150마일 이내에서 청천난류 발생을 예보함
- 청천난류는 Richardson 수가 0.25보다 큰 상태에서는 드물기는 하지만 대류권계면보다 높은 고도에서도 발생
- 청천난류는 대류가 활발한 지역에서 발생하고, 강화되는데 특히 전선에 파묻혀서 발생하는 대류활동 지역에서 잘 발생한다.

1.2 항공위험기상

청천난류는 육지(특히 산악지형)에서 해상보다 더 많이 발생한다. 전체 청천난류의 60%는 제트기류 근처에서 보고된다. 청천난류의 강도는 아래 표에서 보이는 것과 같이 수평/수직 윈드시어의 세기를 통해서 예측할 수 있다. 최근 수치예보모델들은 청천난류의 발생 가능성예보를 제공한다.

[표 1.4] 수평/수직 윈드시어와 청천난류 강도

	보통 난류	심한 난류
수평 윈드시어	위도 1° 당 20kts	위도 1° 당 30kts
수직 윈드시어	1000ft 당 6kts	1000ft 당 9kts



[그림 1.13] 청천난류가 자주 발생하는 지역 모식도

1.2 항공위험기상

실선 - 300hPa 등고도선

C_F : 2개의 제트기류가 합류하는 지역
C_L : 상층 안장부. 안장부의 윈드시어 선을 따라 좁은 구름 밴드 형성
D : 제트기류 분류 지역
J : 저기압 지역에서의 제트기류 난류
R : 상층 기압능 발달 구역
T : 깊은 상층 기압골
W : 파동 저기압 발달 구역

5) 수치예보 자료들

청천난류 지역은 상층 제트 구역의 등고도선, 등풍속선, 그리고 유선 분석을 통하여 분석할 수 있다. 수치예보 모델 자료를 활용하여 상층 기압골과 기압능이 얼마나 발달하는 추세에 있는지 파악하고 위에서 언급한 경험적 예보 기법들을 모델 자료들에 적용하여 청천난류 가능성을 예보한다. 모델 해상도에 따라 제트기류가 잘 모의되지 않을 수도 있다.

Dutton 지수를 수치예보 모델을 통해 계산하여 사용할 수 있다.

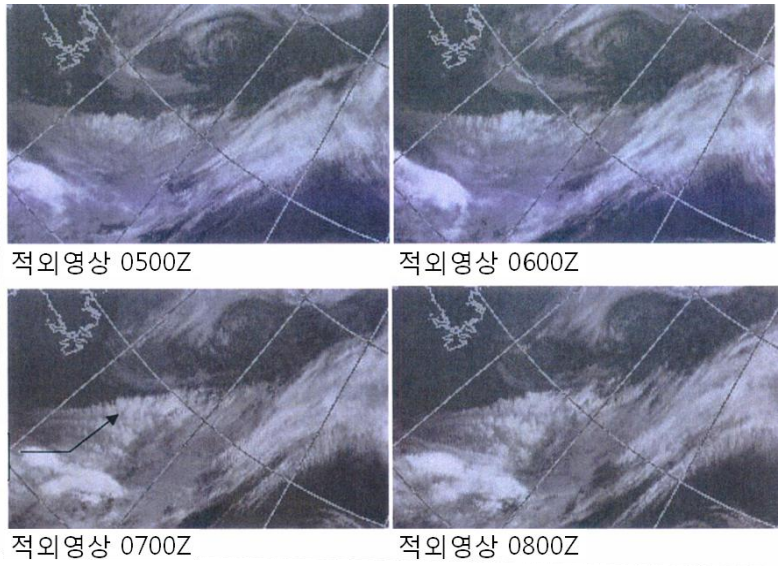
$$Dutton \in dex = \frac{5(\text{수평 바람시어}) + (\text{연직 바람시어})^2 + 42}{4}$$

청천난류는 DI > 4이면 발생할 수 있다.

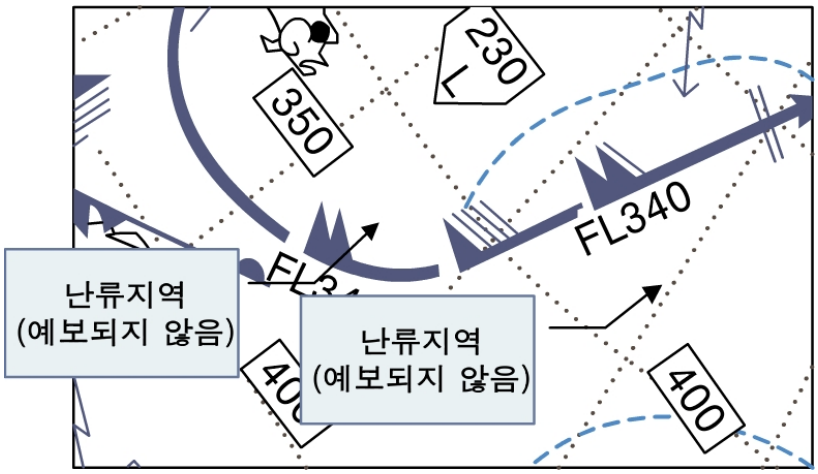
'제트비행계획'(경로 상의 바람, 소요시간, 연료 소모량, 운항고도 온도 측정을 위한 특별 비행) 자료들을 통해서 윈드시어 값들을 얻고 이를 예보에 활용할 수 있다.

1.2 항공위험기상

6) 사례 연구



[그림 1.14] 2005년 6월 6일 발달하는 조개구름과 가로구름 밴드 위성 영상



[그림 1.15] 2006년 6월 6일 WAFC 발표 SIGMET 일기도

세계지역예보센터(WAFC)의 예보는 24시간 전에 발표되기 때문에 특이 구름대가 나타나는 것을 예측하기 어렵다는 사실을 인지하고 있어야 한다. 특히 기압계가 발달하고 있는 상태에서는 더욱 그러하다. 또한 수치예보 모델들도 오차가 있을 수 있기 때문에 예보관들이 이들 자료만 이용해서 예보를 생산하면 청천난류를 완벽하게 예보하기 어려울 수 있다.

그렇지만 이들 자료는 긴 항로를 비행하는 조종사들에게 기상브리핑을 실시할 때 이해도를 높일 수 있는 자료로 충분히 활용할 수 있다.

1.2 항공위험기상

1.2.2.5 하층 제트(Low Level Jets)

1) 설명

하층 제트에는 여러 가지 종류가 있다.

첫 번째 하층 제트는 한랭전선의 전면을 따라 형성되는 강한 하층 바람 튜브를 들 수 있다. 이 하층 제트는 전선의 이동에 따라 함께 움직인다.

두 번째 하층 제트는 야간 역전층 형성에 따른 풍속 증가를 들 수 있다. 이 하층 제트는 주로 경압풍이나 지상풍의 분리와 관련되어 있다. 기류가 분리되면 지상풍은 약해지지만 그 상공의 기류는 더 이상 마찰력(혹은 점성항력)의 영향을 받지 않기 때문에 점점 강해질 수 있다

세 번째 형태는 소위 '찌르기 제트(Sting Jet)'라고 불리는 것으로 폭발적으로 발달하는 저기압의 중심에서 발생할 수 있다. 이 하층 제트는 강수에 동반된 하강 기류가 강수의 증발로 인해서 차가워짐(더 밀도가 커짐)에 따라 점차 가속되면서 나타난다. 하강기류의 가속에 의한 '찌르기 제트'는 여전히 연구가 진행 중인 현상으로 정확하게 형성되는 과정은 매우 복잡한 양상을 띤다.

마지막으로 기후학적 하층 제트는 계절에 따라 발달하고 소멸하는 형태인데 '소말리 제트(Somali Jet)'가 대표적이다. 소말리 제트는 북반구 여름철에 나타나는데 아시아 몬순이 발달함에 따라 몬순 밴드를 따라 나타난다. 강하게 발달한 하층의 남동기류가 마다가스카르의 북단을 지나면 남풍기류로 순전하기 전에 남서기류로 바뀌면서 아프리카 대륙 북서부를 가로질러 흘러가게 된다. 이 제트기류의 최대 풍속은 850hPa 고도에서 40~50kts 정도로 항공기상에서는 충분히 고려 대상이 된다.

1.2 항공위험기상

2) 항공기에 미치는 영향

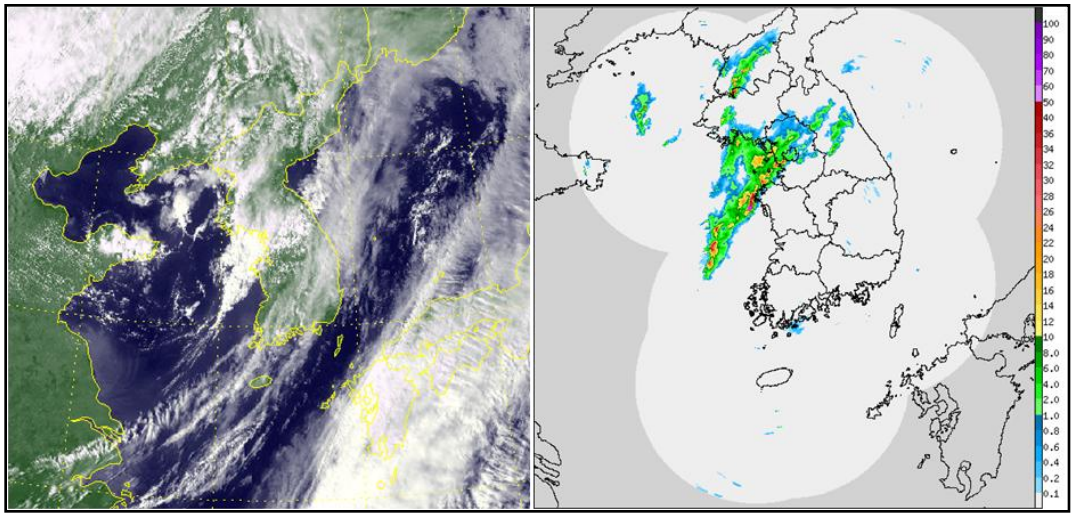
난류라는 측면에서 보면 한랭전선에 동반된 하층 제트는 강하면서도 예측하기 어렵다. 제트를 가로질러서 나타나는 윈드시어가 아주 크기 때문에 조종사는 이 제트를 횡단할 때 적절하게 대처해야 한다. 하층 제트는 그 고도가 낮기 때문에 조종을 할 때는 항상 지형과 충분한 간격을 가지고 있어야 하며 특히 착륙 시기에는 위험한 상황과 조우할 수 있다.

야간 하층 제트는 조종사가 제트와 나란히 비행해서 불연속선의 한 지역에 위치한다고 하더라도 뚜렷한 난류와 조우하는 일은 거의 없다. 그러나 야간 하층 제트를 가로질러 비행할 경우에는 난류를 조우할 가능성이 높다. 하층제트는 착륙하거나 이륙하는 단계에서 날개 주변의 기류가 급변함에 따라 양력을 잃게 할 수 있다.

3) 각종 영상들을 이용한 위험 기상 진단

한랭전선에 동반된 하층 제트는 해상도가 낮은 위성 영상으로 잘 판별할 수 없다. 그러나 강한 대류 활동이 나타나는 지역에서는 선형 구름들을 통해서 그 지역에 하층 제트가 발생하고 있을 가능성을 진단할 수 있다. 얕은 습윤층을 가지는 지역에서 발생하는 분리 전선들은 하층 제트의 존재를 암시하는 경우가 있다.

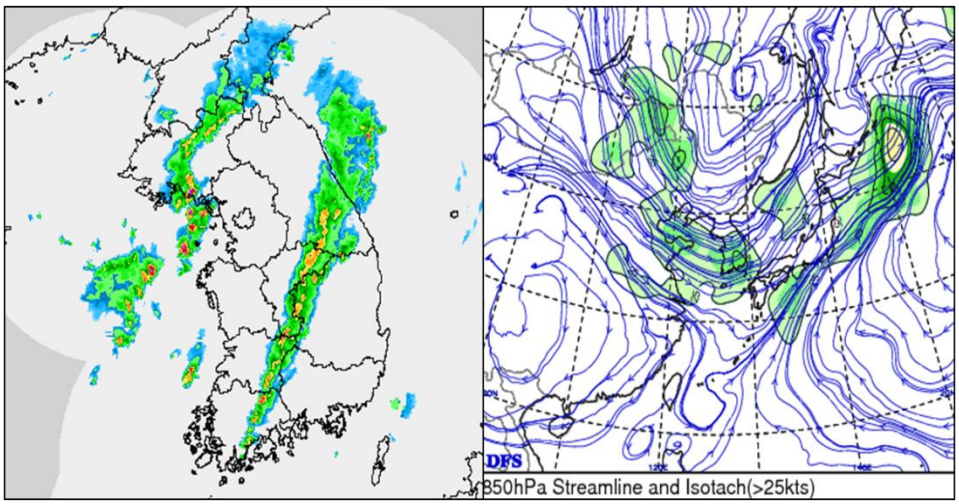
아래 그림은 상하층 전선대 전면에서 발생하는 하층 제트의 예를 보인 것이다.



[그림 1.16] 선형 구름과 선형 대류 에코를 보여주는 위성영상과 레이더 영상

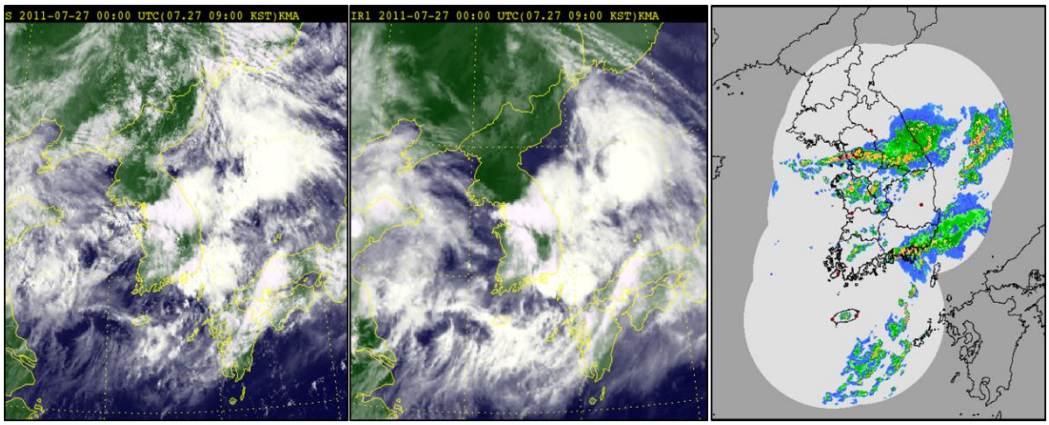
1.2 항공위험기상

그림 1.17은 2011년 10월 15일 21시 레이더 영상과 850hPa 하층제트의 위치를 보여준다. 위의 레이더 영상에서는 한랭전선 상에서 형성된 2개의 선형 대류 활동을 잘 보여주고 있는데, 선형 대류 지역과 하층제트가 지나는 지역이 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.



[그림 1.17] 레이더 위성 합성 영상(좌측)과 850hPa 하층제트(우측)의 모습

그림 1.18은 2011년 7월 27일 09시(00UTC)의 가시, 적외 위성영상과 레이더 영상을 보여주고 있다. 위의 영상에서 연직으로 강하게 발달한 중규모대류계에 동반된 강한 대류성 스톰이 가시영상과 적외영상에서 뚜렷하게 발견되고 있다. 그러나 위성영상을 보면 연직으로 강하게 발달한 대류성 스톰의 운정이 대류권계면까지 도달해서 수평으로 퍼지면서 형성된 모루구름으로 인해서 정확하게 강한 대류에 의한 집중호우가 발생하는 지역을 구분해 내기가 쉽지 않다.

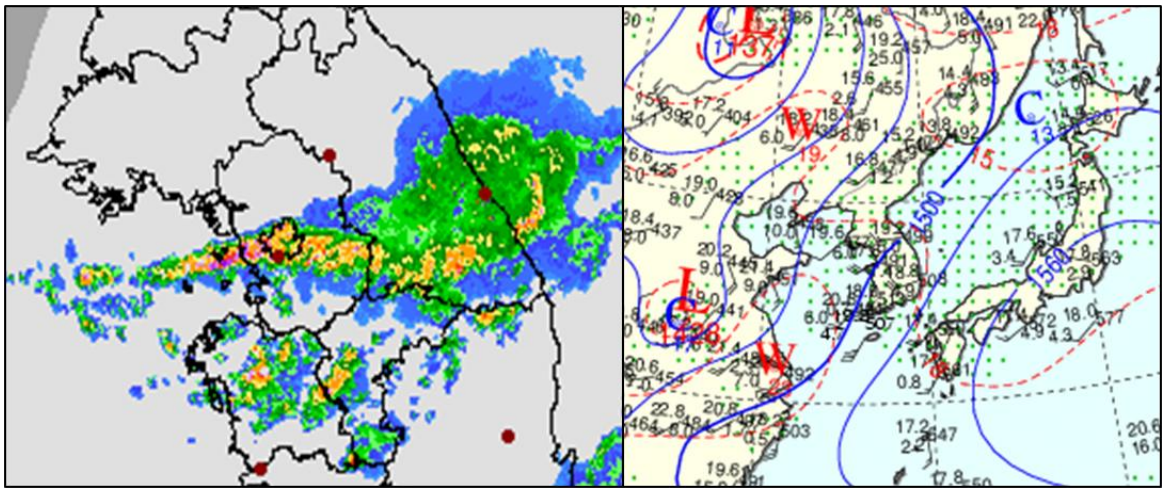


[그림 1.18] 2011년 7월 27일 00UTC 가시영상(왼쪽), 적외영상(중앙), 레이더(오른쪽) 합성영상

1.2 항공위험기상

그림 1.19는 그림 1.18의 레이더 영상을 확대한 영상으로 위성영상에서 가려져 있던 강한 독립적인 대류성 스톰들이 선형을 이루고 동서방향으로 선형에코를 형성하고 있는 것을 볼 수 있다.

또한 같은 시각의 오른쪽 850hPa 선도에서 한반도에서 관측되는 850hPa 고도의 바람이 모두 30kts를 넘는 것을 확인할 수 있는데, 이는 선형에코를 형성하는 대류성 스톰들 남서쪽으로부터의 강한 하층제트에 동반된 풍부한 수증기와 불안정으로 인해서 강하게 발달한다는 사실을 잘 보여주고 있다.



[그림 1.19] 2011년 7월 22일 레이더 확대영상(왼쪽)과 850hPa 일기도(오른쪽)

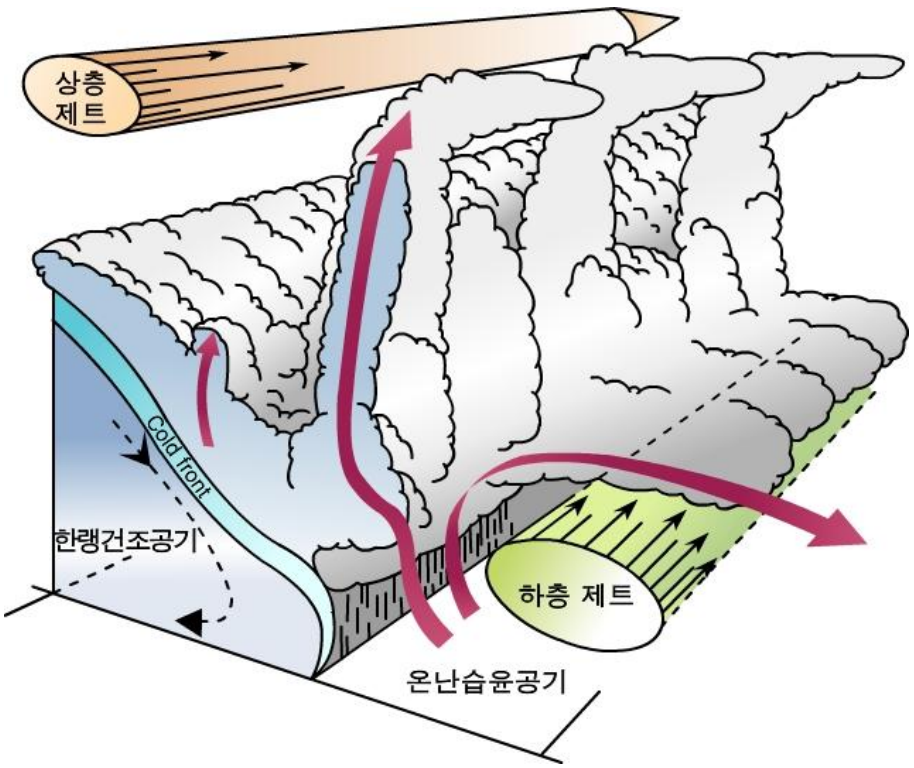
1.2 항공위험기상

4) 경험적 예보 기법들

예보관들은 하층 제트 발생에 대한 개념 모델들에 대해서 잘 알고 있어야 한다. 모든 하층 제트 예보에 적용할 수 있는 경험적 기법들은 존재하지 않는다.

그러나 도표를 활용해 페르시아 만에서 국지적으로 형성되는 야간 제트의 강도와 고도를 결정하기 위한 경험칙이 존재한다(사례 연구 참조).

전선대와 선형 대류활동 그리고 하층 제트와의 관련성은 아래 그림과 같이 모식화 할 수 있다.



[그림 1.20] 지상 한랭 전선면과 나란하게 발달하는 하층제트의 개념 모델

1.2 항공위험기상

5) 수치예보 자료들

수치예보 자료들은 하층 제트를 모두 모의하지 못한다.

갑작스럽게 발생하는 하층 제트가 발생하는 구역을 정확하게 예측하기 위해서는 관측된 상층 단열선도와 기타 선도들을 수치예보 자료와 지속적으로 상호 비교해야 한다. 상층 선도와 단열선도를 제대로 분석해야 실제 하층 제트의 발생을 정확하게 예측할 수 있다.

강한 한랭 전선 부근의 850hPa 상당온위 경도가 높은 지역은 위의 그림 1.20에서 보이는 것과 같이 분리 전선에 의한 하층 제트가 발생하기 쉬운 지역이다.

수치예보에서 생산된 단열선도를 통해 상층의 역전을 확인할 수 있지만 해상도에 따라 좁고 강한 역전은 확인할 수 없을 수 있다. 예보관은 항상 지표면 근처의 하층 기류에서 지상풍과 경도풍이 분리되면 하층 제트 발생 가능성이 높음을 인식하고 있어야 한다.

1.2 항공위험기상

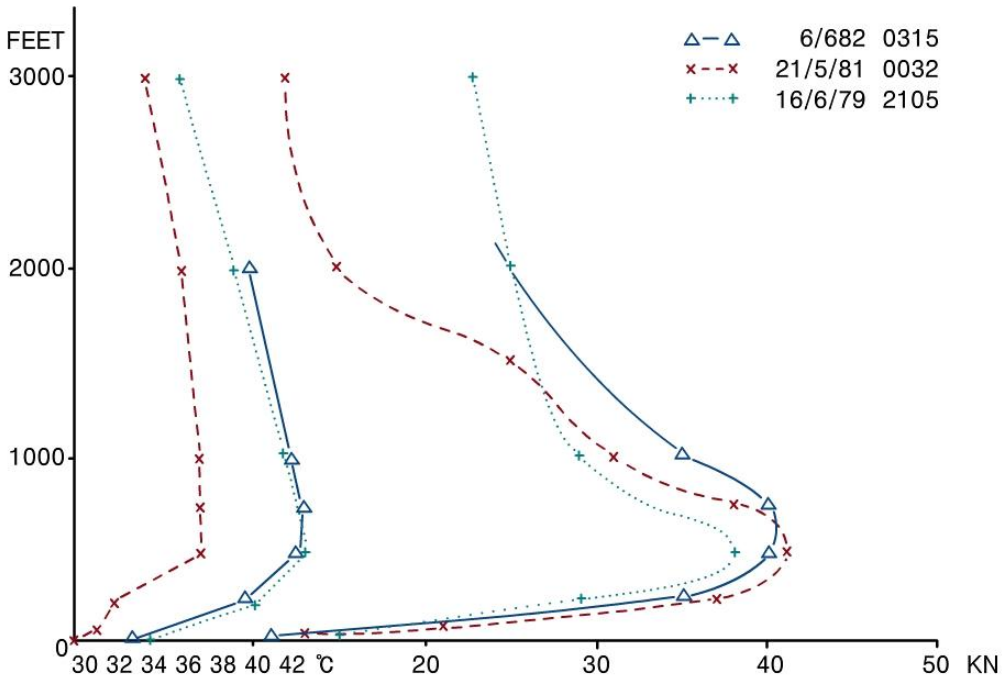
6) 사례 연구

야간 하층 제트는 한밤중과 새벽 사이에 아라비아 만의 남쪽 해안선을 따라 자주 관측된다. 지상풍이 풍속이 약하고, 경도풍이 20kts 이하로 약한 상태에서도 1,000ft 고도에서 40kts의 하층 제트가 발생하기도 한다. 이 하층 제트는 이륙하거나 착륙하는 항공기에 위험한 윈드시어를 형성할 수 있다.
그림 1.21은 뚜렷한 온도 역전층이 존재하고 1,000ft 이하의 고도에서 40kts의 하층 제트가 관측된 3가지 사례를 보여주고 있다.

Membery(1983)는 주어진 온도 역전의 강도에 따른 하층 제트의 강도와 고도를 예측하기 위한 도표를 제시하였다. 이 도표는 야간 하층 제트가 발달하기 좋은 기상 조건에서 적용할 수 있다.

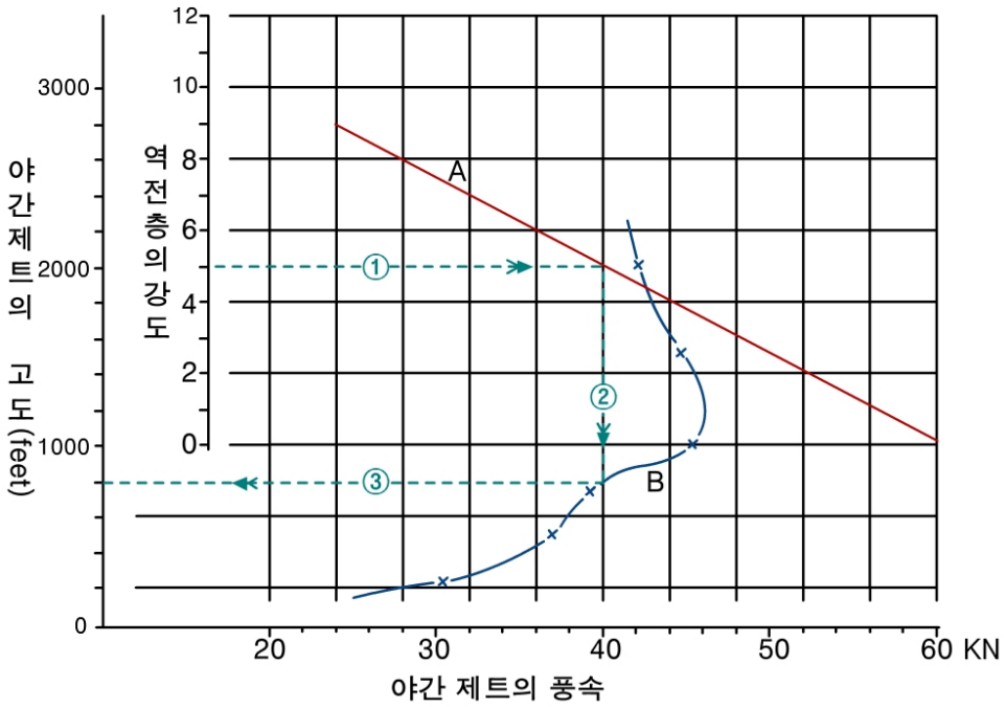
- 맑은 날씨로 지표면 부근의 충분한 냉각이 발생하여 지표면 부근에 안정된 공기층이 형성되어 있는 상태
- 큰 기압 경도를 가진 고기압 권내에서 나타나는 북서기류

야간 하층 제트는 일출 이후 일사가 시작되면서 하층의 역전층이 깨어지기 시작하면 바로 사라지는 특성을 가지고 있다.



[그림 1.21] 바레인에서 관측된 강한 온도 역전을 동반한 온도 프로파일들

1.2 항공위험기상



[그림 1.22] 야간 하층 제트의 풍속과 고도를 예보하기 위한 도표

단계 1 : 역전의 강도를 예보한다. 5℃인 경우 선 A와 만날 때 까지 선을 긋는다.
단계 2 : 하층 제트의 최대 풍속을 읽는다(40kts).
단계 3 : 하층 제트가 나타날 수 있는 고도를 읽는다(800ft).

역전층의 온도 차이 3℃에서 9℃까지, 풍속 24kts에서 46kts 사이의 값을 가질 때 적용 가능하다.

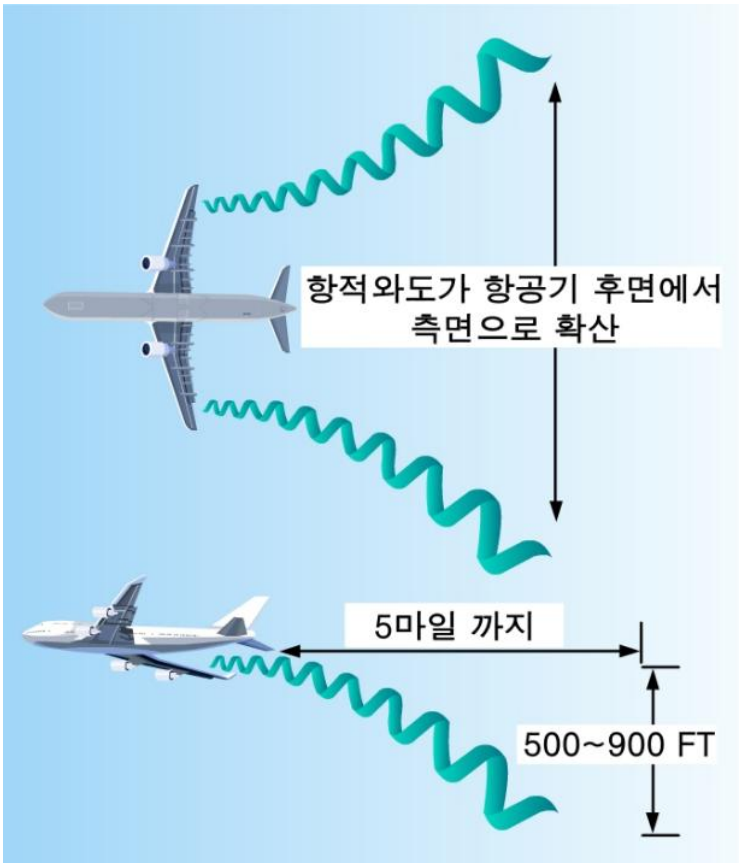
1.2.2.6 항적 난류/항적 와도

1) 설명

항적 난류는 이륙하는 대형 항공기의 항적에 의한 와도의 결과로 만들어진다. 와도는 항공기 날개의 상단 표면에서 만들어져 항공기의 후면의 항적을 따라 이동해 간다. 헬리콥터도 항적 난류를 만들어 낼 수 있는데 주로 주 날개의 회전에 의한 와도에서 기인한다

항적 난류는 사실상 '기상학적' 원인으로 시작되는 것이 아니다. 항적 난류는 항공기의 무게, 크기, 항공역학적 특성들의 함수이다. 그러나 한번 형성되면 가라앉으면서 주변의 기류에 의해서 이동해 나간다.

1.2 항공위험기상



[그림 1.23] 항적난류의 형태와 영향 범위

2) 항공기에 미치는 영향

다른 난류들과 같이 항적 난류를 낮은 고도에서 만나면 회복 공간과 시간이 부족하기 때문에 매우 위험하다.

가장 최악의 시나리오는 2개의 항공기가 연달아 이륙을 시도하는 경우이다. 다른 조건이 동일한 가운데 먼저 이륙하는 항공기가 연료를 가득 채우고, 탑승객과 화물을 최대로 싣고 이륙하면 그 무게 때문에 더욱 강한 항적와도와 난류를 만들 것이다. 이어서 이륙을 시도하는 항공기 또한 무거운 상태라고 하면 이륙을 시도하는 도중에 항적 난류를 만나게 되면 충분한 추력을 가지고 있지 못하기 때문에 지상으로 추락할 수 있다.

경항공기가 대형 항공기의 항적 난류에 휘말리면 심하게 요동치게 된다.

1.2 항공위험기상

이륙이 끝난 이후에도 항공기는 예상치 못한 항적 난류와 조우할 수 있다. 항공기가 북쪽 방향으로 이륙하여 공항을 떠난 이후에 바람이 서풍으로 불고 있으면 항적 와도들은 동쪽으로 휘어져서 이동할 것이다. 이러한 상황에서 두 번째 항공기가 동쪽을 향해 이륙을 시도하면 결과적으로 이미 이륙해서 멀리 떠난 항공기의 항적에 휘말리게 된다.

가장 안전한 방법은 선행 항공기가 이륙한 이후에 충분한 간격을 두고 이륙을 시도하는 것이다. 대형항공기에 이어서 이륙을 시도하는 경항공기는 대형항공기들의 이륙 간격에 비해서 더 큰 간격을 두고 이륙을 시도해야 한다. 최근 들어 항공교통통제센터는 의무적으로 충분한 시간 간격을 두고 항공기를 이륙시키는 것이 의무화되었다. 기압이 상승하는 날은 이들 간격을 최소화할 수 있기 때문에 기상 조건도 어느 정도 감안된다.

항공기가 선행 항공기의 항적 난류를 만나면 심하게 진동할 수 있는데, 지상에 수증기가 많은 경우에는 낮은 고도에서 항공기 날개 끝에서 발생하는 항적을 눈으로 확인할 수 있다. 높은 고도에서는 선행 항공기가 비행운을 만들면서 비행하면 그 후면에 발생하는 항적 난류를 볼 수 있지만 그러한 경우가 흔하지 않기 때문에 항적 난류를 포착하기는 쉽지 않다. 군용 항공기가 공중 급유 중에도 항적 난류에 직면할 수 있다.

3) 각종 영상들을 이용한 위험 기상 진단

항적 난류를 진단할 수 있는 기상분야 영상은 없다. 최근에는 LIDAR 기술을 활용해서 난류를 파악할 수 있는 기술이 도입되고 있다.

1.2 항공위험기상

4) 경험적 예보 기법들

앞에서 언급되었듯이 항적 난류/와도는 항공기의 무게, 크기, 항공역학적 특성에 의해서 결정되기 때문에 일반화된 경험칙을 만들 수는 없다. 그러나 한번 형성되면 가라앉으면서 주변의 기류를 따라 이동하고, 항공기가 비행하고 있는 대기의 안정도와 풍속에 따라 지속 여부가 결정된다. 와도는 안정적으로 성층화된 대기와 불안정한 대기에서 빨리 사라진다. 반면 대기가 중립적으로 성층화되어 있으면 좀 더 오랜 시간 동안 유지되지만 현재의 상태에서 난류 가능성을 정확하게 예보하기란 힘들다.

항적 와도들이 만들어지면 분당 300ft에서 500ft의 속도로 가라앉고 만들어진 고도에서 1,000ft 이상 하강하면 흩어지고 항공기 후방으로는 5마일에서 9마일 까지 유지된다. 헬리콥터는 고정익 항공기에 비해서 무게 대비 상대적으로 강한 와도를 만들 수 있다. 항공기가 이착륙하는 도중에 만들어지는 와도는 가라앉을 수 없기 때문에 오랜 시간 동안 지표면 부근에 머물러 있을 수도 있고, 지표면에 부딪쳐 다시 위로 올라갈 수도 있다.

예보관들은 여러 개의 나란한 활주로를 동시에 사용하는 경우에는 계속해서 풍향에 대한 정확한 정보를 관제탑에 제공해서 항공기 항적들이 활주로를 가로질러 이동할 것인지 여부를 관제사가 판단할 수 있도록 해야 한다.

풍향은 항적 와도의 이동 경로뿐만 아니라 장주 방향(왼쪽 선회 혹은 오른쪽 선회)을 결정하는데도 관여한다.

1.2 항공위험기상

5) 수치예보 자료들

2001년 11월 12일 JFK 이류하던 에어버스 300 항공기가 인근의 주택지에 추락했다. 이 항공기는 앞서 이륙한 보잉 747기에서 발생한 항정 난류에 조우한 결과로 추정된다. 비록 명확한 사고 원인에 대해서는 논쟁의 여지가 있지만, 이 항공기가 747기의 항적 난류와 조우한 후 항공기를 회복하기 위해서 급하게 항공기를 조작했고 그 결과로 항공기의 수직 안정판을 망가뜨릴 만큼 강한 힘이 작용해서 항공기가 조정 불능 상태에 빠져 지상으로 추락한 것으로 믿어진다. 항적 난류는 그 자체만으로 항공기의 꼬리 날개를 부술 수는 없지만 조우한 후 급격한 조작에 의해서 부서질 수 있다.

1.2.3 착빙

착빙은 2가지 종류로 나눌 수 있다.

- 항공기 기체 착빙
- 항공기 엔진 착빙

일반적인 착빙 예보는 항공기 기체 착빙(Airframe Icing)을 의미한다.

많은 현대화된 항공기들은 착빙의 위험을 줄이기 위하여 착빙제거(De-icing) 혹은 착빙방지(Anti-icing) 장치 등을 부착하고 있지만, 이들 장비만으로 착빙의 위험이 완전히 사라졌다고 할 수 없어 여전히 착빙은 가장 위험한 항공기상 요소로 남아있다. 착빙은 특히 착빙제거 장치가 없는 경항공기나 헬리콥터 등에서 치명적인 경우가 있다.

일반적으로 착빙예보는 항공기가 구름 속을 비행하면서 만들어지는 경우만을 고려한다. 그러나 구름 바로 아래 존재하는 물과 얼음의 혼합물들도 온도에 따라 중요한 착빙 원인이 된다.

1.2 항공위험기상

1.2.3.1 항공기 기체 착빙

1) 설명

항공기 기체 착빙(이하 기체 착빙)은 주변 공기의 온도가 0℃이하이고 과냉각 수적들이 존재하고 있을 때 발생한다. 그러나 항공기가 외기온도가 영하인 고도를 비행하던 항공기가 급하게 하강하여 영상의 지역을 내려오더라도 여전히 항공기 표면의 온도가 영하인 상태로 남아 착빙이 발생하기도 한다. 이 경우를 '찬 적시기(Cold Soak)'라고 부른다.

기체 착빙은 5가지 형태로 형성된다.

- **거친 착빙(Rime Ice)** : 일명, 상고대착빙이라고도 불림. 흰색, 다공성, 불투명, 부서지기 쉬운, 거친 형태를 가진 서리 착빙은 항공기 기체 주변 기류의 정상적인 흐름을 깨뜨린다. 서리 착빙은 항공기 기체 주변의 기류의 관점에서 보면 툭 튀어나와 있는 또 하나의 기체 표면처럼 보일 것이다. 따라서 착빙으로 인한 항공기 날개 주변의 형태 변화는 날개 표면 위의 기류 흐름을 방해해서 날개의 기능적 효율성을 저하시킨다.

- **맑은 착빙(Clear Ice)** : 반짝이는 착빙(Glaze Ice)라고도 불리는 착빙으로, 깨끗하고, 단단하며, 착 달라붙는 형태로 이 착빙도 항공기 기체 주변의 기류 흐름을 방해한다. 맑고/반짝이는 유리 같은 형태를 가지고 있기 때문에 항공기 전면에 형성되면 마치 '뿔(Horns)'이 난 것처럼 앞으로 불룩 튀어 나온 형태가 된다. 이러한 돌출은 항공기 주변 기류의 정상적인 흐름에 큰 장애가 된다. 항공기 전면에 형성된 맑은 착빙을 제거하기 위해서 착빙방지 장치를 작동하면 이 얼음들이 항공기 날개의 위아래나 항공기 동체에 부착되는 경우가 발생할 수 있다. 이러한 경우가 발생하면 항공기 날개의 기능을 변조시켜 양력 발생이 줄어들 수 있다.

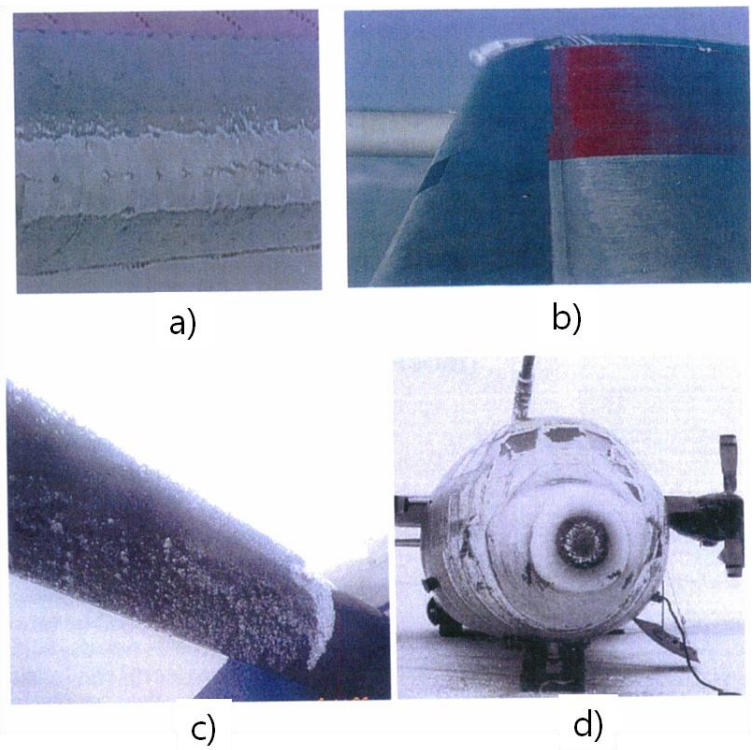
- **혼합 착빙(Mixed Ice)** : 서리 착빙과 맑은 착빙이 혼합된 형태로 매우 밀도가 높기 때문에 큰 위협이 된다.

- **비 착빙(Rain Ice)** : 아주 특이한 형태의 맑은 착빙으로 울퉁불퉁하고 고르지 못한 형태를 가진다.

- **서리 착빙(Hoar Frost)** : 비나 구름이 없는 상태에서 추운 겨울 밤에 외부에 주기되어 있거나 '찬 적시기'의 결과로 항공기 외부에 얇은 코팅막을 형성하는 형태로 발생한다.

1.2 항공위험기상

'고체형' 눈과 얼음 알갱이들은 영하의 기온이라고 하더라도 접착력이 없기 때문에 항공기 기체에 달라붙지 못한다. 가끔 특정한 환경 하에서 항공기 날개 앞부분에 선형으로 서리가 만들어지는 경우는 발생할 수 있지만 영향은 미미하다. 그러나 눈은 종류에 따라 부착성이 높은 경우가 있기 때문에 흡입구, 라디에이터 그릴 등과 같이 외부에 노출된 기관이나 틈에 쌓여 항공기 출력에 영향을 미칠 수 있다. 진눈깨비도 흡입구를 막거나 틈새를 파고 들어 심각한 문제를 일으킬 수 있다.



[그림 1.24] 착빙들의 예. a) 거친 착빙, b) 맑은 착빙, c) 혼합 착빙, d) 비 착빙

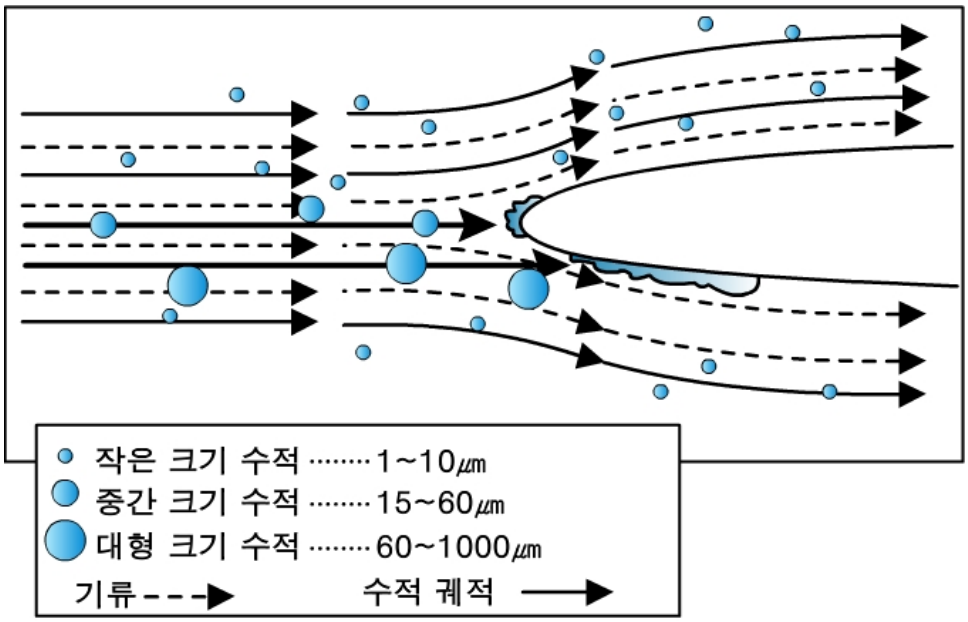
[그림 1.25] 착빙의 예(계속) a) 맑고/반짝이는 착빙이 항공기 전면에 형성, b)혼합 착빙이 항공기 날개 전면에 형성

1.2 항공위험기상

2) 항공기에 미치는 영향

가장 간단하게 운항 중인 항공기에서 발생하는 착빙 과정을 설명하면 작은 과냉각 수적들이 항공기에 접촉하는 순간 달라붙어 얼음으로 침착되고 이 얼음들이 계속해서 수적들을 포착하면서 항공기 날개의 전면부에 흰색의 거친 착빙들이 형성되는 것으로 이러한 형태의 착빙은 아주 크게 자랄 수 있다.

상대적으로 큰 수적들은 얼어붙는데 시간이 더 소요되기 때문에 맑은 착빙 형태로 나타나는 경우가 많고 착빙제거 장치가 없으면 위험할 수 있다. 큰 수적들에 의해서 만들어지는 착빙은 항공기의 속도와 날개각도 등에 의해서 형성 여부가 크게 영향을 받는다. 착빙제거 장치에 의해서 떨어져 나온 얼음들은 항공기 동체 부분으로 흩어져 다시 달라붙는다.



[그림 1.26] 항공기 날개 주변의 수적들의 흐름 궤도

1.2 항공위험기상

ICAO가 정의하고 있는 착빙의 강도는 다음과 같다.

약함(Light) : 누적 비율로 볼 때 1시간 이상 동일한 환경 속을 비행하면 문제가 될 수 있는 수준의 착빙

보통(Moderate) : 누적 비율로 볼 때 조우되는 시간이 짧아도 위험할 수 있는 수준의 착빙으로 착빙방지 장치의 작동이 필수적인 상태

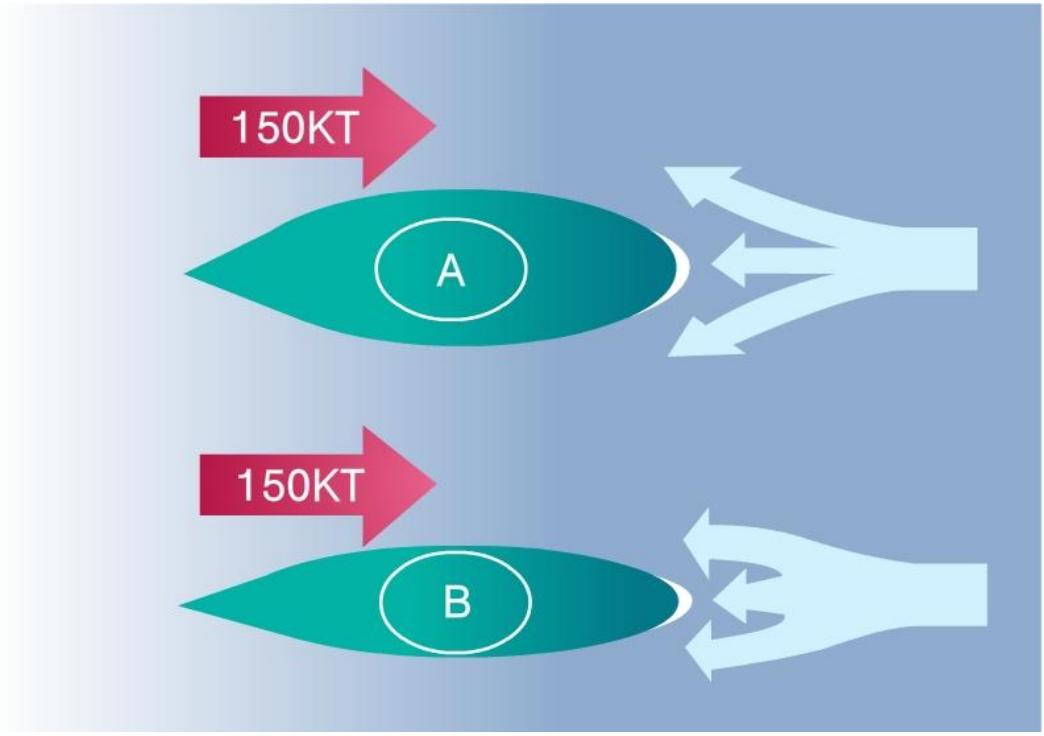
심함(Severe) : 누적 비율이 착빙제거 장치를 사용하더라도 착빙이 줄어들지 않거나 항공기 조종에 위험을 초래할 수준의 착빙. 즉시 해당 지역으로부터 벗어나야 함.

어떤 기관들은 ICAO의 정의에 따르지 않고, 액체물함량(LWC : Liquid Water Content)으로 착빙의 강도를 사용하기도 한다. 호주 기상국은 약한 착빙은 LWC가 0.5 까지, 보통 착빙은 0.5~1, 심한 착빙은 1.0 이상일 때 사용하는데 다른 몇몇 기관들도 이를 따르고 있다.

1.2 항공위험기상

기상학적 요소 이외에 착빙이 누적되는 비율은 항공기의 특성에 크게 좌우된다. 다른 조건들이 같다고 할 때, 항공기 날개의 전단부의 공기 흐름이 다른 부분에 비해서 빠르기 때문에 더 빠르게 과냉각 수적들을 모을 수 있고, 날개의 형태가 얇은 것이 두꺼운 것에 비해서 더 빠르게 착빙이 일어 날 수 있다(그림 1.27 참조). 항공기 표면의 마찰열 효과나 전면의 압축열까지 논의가 확대되면 매우 복잡해진다.

헬리콥터는 착빙에 특히 취약할 수 있다. 주 회전날개 위에 착빙이 발생하면 균형을 깨뜨리고 동체를 불안정하게 할 수 있다.



[그림 1.27] 항공기 날개 단면 모양에 따른 착빙 누적률 차이

항공기 기체 착빙은 아주 위험한 항공 기상 요소로 그 영향 범위는 다음과 같다.

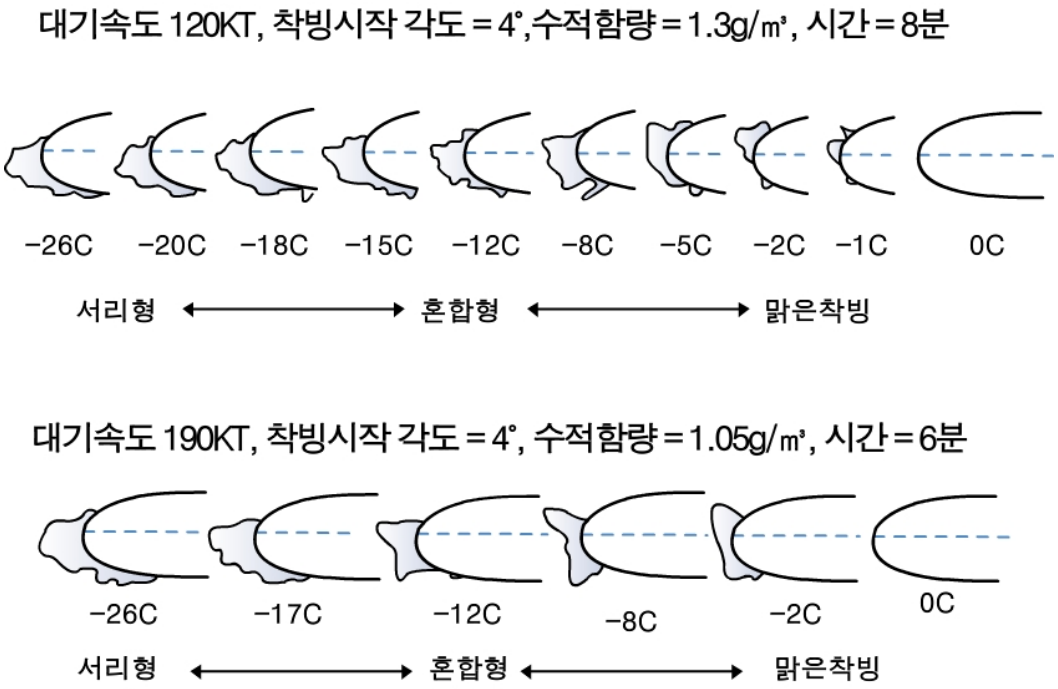
- 항공역학적 성능 저하
- 무게 증가와 불균등 하중
- 엔진 흡입구 막힘
- 착륙 장치 접힘/펼침 문제 야기
- 비행통제 장치 오작동 혹은 뻑뻑함
- 조종사 튜브 막힘

1.2 항공위험기상

• 통신 불량
• 시정 저하

그림 1.28은 특정한 조건에서 항공기 날개의 전단에 복잡한 형태의 착빙이 발생하는 양상을 보인 것이다.

현재까지의 예보 기술로는 항공기 날개에 착빙이 발생하는 상황을 예측할 수 있는 도구는 없다. 그러나 항공 안전 차원에서 항공기 착빙이 어떤 모습으로 발생하는지에 대해서 알고 있는 것은 매우 중요하다.

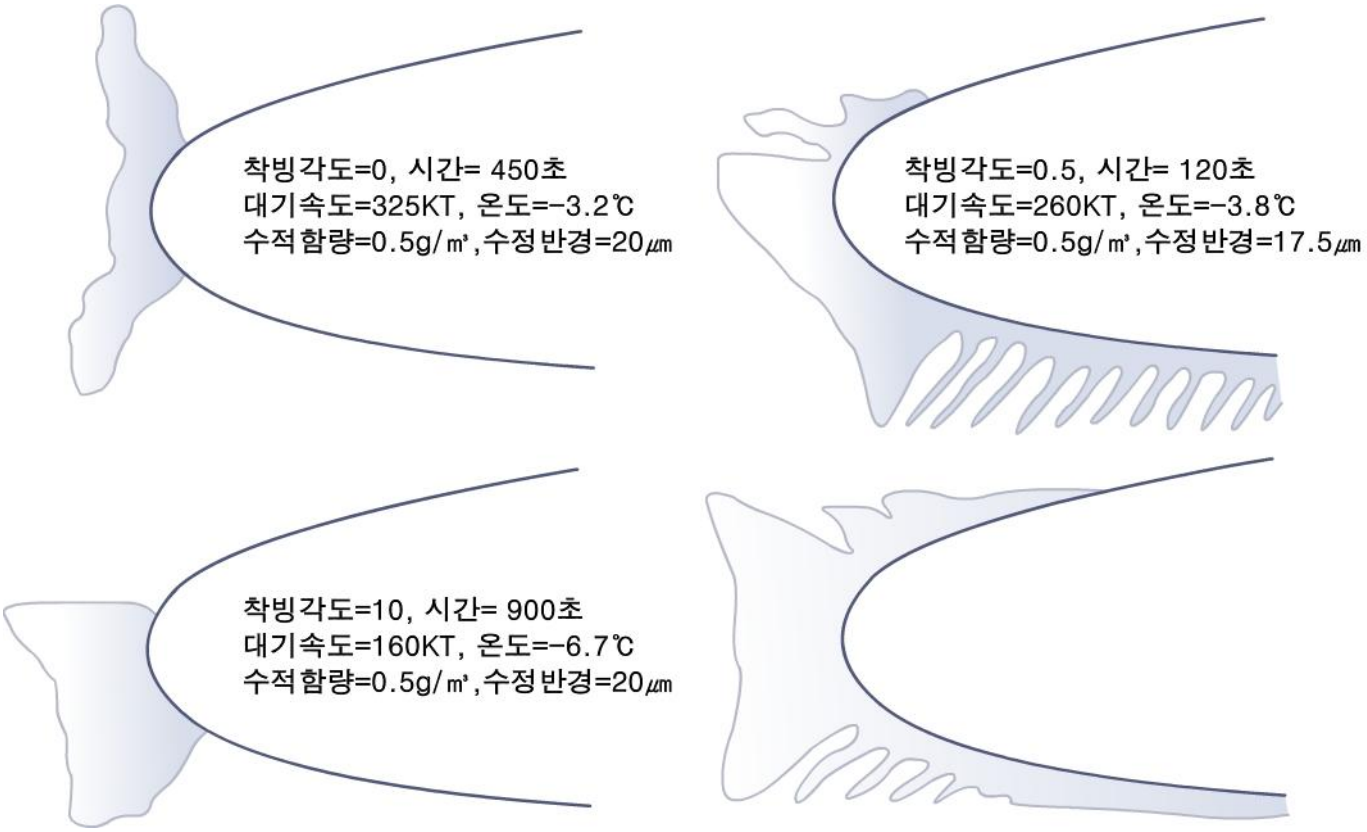


[그림 1.28] 특정한 조건하에서 경항공기 날개의 전단에 착빙이 형성되는 과정 모식도
(출처 DRA/NASA/ONERA 공동연구자료)

온도가 영하에서 조금 내려가 있는 상태에서는 투명하고 맑은 착빙이 뿔 모양으로 형성되어 항공기 날개 주변의 기류 흐름을 변형시킨다. 더 낮은 온도에서는 투명한 착빙과 거친 착빙에 유의해야 한다. 온도가 -20℃에 가까워지면 거친 착빙이 주를 이루게 된다.

다음의 그림에서는 온도가 -2℃가 넘어섬에 따라 착빙이 형성되기 시작하는 반면 위쪽 그림에서는 더 낮은 온도에서 비슷한 모양의 착빙이 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 액체물 함량이 적다고 하더라도 항공기 주변의 대기속도가 빠르면 더 빠르게 착빙이 발생할 수 있음을 보여준다.

1.2 항공위험기상



[그림 1.29] 특정한 조건하에서 경항공기 날개의 전단에 착빙이 형성되는 과정 상세 모식도
(출처 DRA/NASA/ONERA 공동연구자료)

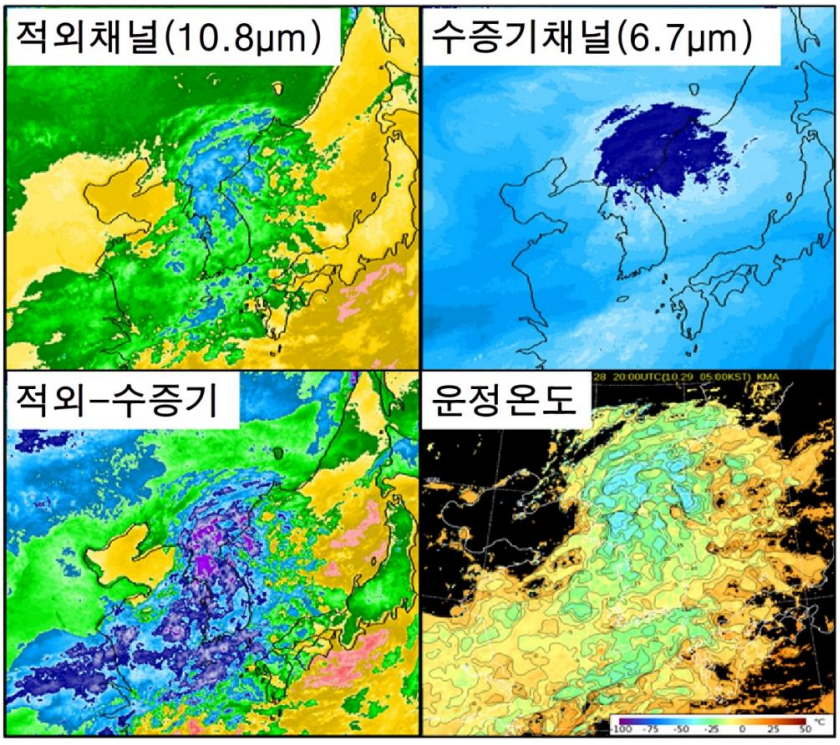
그림 1.29처럼 실험 결과를 보면 항공기의 속도가 높으면 앞쪽에 만들어진 착빙들이 떨어져 나가기 쉬운 것처럼 생각할 수 있다. 그러나 착빙이 발생하는 것은 속도뿐만 아니라 날개의 모양과 크기에 크게 좌우됨을 알 수 있다.

1.2 항공위험기상

3) 각종 영상들을 이용한 위험 기상 진단

착빙을 예보하는데 가장 많이 사용되어지는 것이 위성을 통해서 정확한 구름의 모양과 위치 그리고 형태를 확인하는 것이다. 주간의 경우에는 가시영상을 통해서 구름의 형태와 위치를 잘 파악할 수 있지만, 야간의 경우에는 구름의 두께와 형태를 파악하기가 곤란하다.

이러한 한계를 극복하기 위해서 제공되는 기법이 기상위성이 가지고 있는 적외채널들의 파장 차이를 이용하는 것이다. 그림 1.30은 적외채널과 수증기채널을 활용해서 정확한 하층운과 중층운의 위치를 판별하는 모습을 보여주고 있다. 적외채널은 하층운의 탐지에 강하고, 수증기채널은 중층 이상의 습윤구역 탐지에 강하기 때문에 이를 이용해서 구름의 형태와 모습을 정확하게 판단할 수 있다. 그리고 착빙은 기본적으로 구름의 온도가 영하가 되어야 하기 때문에 운정 온도 분석 영상을 활용하는 것이 매우 좋다. 특히 다양한 구름층이 존재하는 경우에는 어느 곳에서부터 항공기가 구름 속에서 착빙과 조우할 수 있는지 결정하는데 유용하게 활용할 수 있다. 그림 1.30에서 한반도 전역의 운정 온도가 영하권이고 가장 높은 곳은 -20℃까지 발달하고 있어서 착빙이 발생할 가능성이 높음을 보여준다.



[그림 1.30] 2011년 10월 15일 2000UTC 적외, 수증기, 적외-수증기, 운정온도

1.2 항공위험기상

최근 들어 이중편파 레이더 기술이 보편화되면서 구름을 구성하고 있는 요소를 수적, 얼음알갱이, 물과 얼음 혼재, 우박 등으로 상세하게 구분할 수 있게 되었다. 이러한 자료들을 활용하면 짧은 운항거리를 운행하는 항공기나 기지에 이착륙을 시도하는 항공기가 구름에 진입했을 때 착빙이 발생할 수 있는 가능성을 보다 정확하게 예보할 수 있다.

4) 경험적 예보 기법들

항공기 기체 착빙은 온도, 액체물 함량, 수적 크기, 연직 속도의 함수이다. 구름 속의 이러한 대기 상태를 정확하게 파악하기 위해서는 관측되거나 예보된 온도의 연직 프로파일, 기상 레이더와 위성 영상 등이 구름 형태 별로 어떠한 고유한 특징들을 가지는지에 대한 지식과 이해가 필요하다.

예보 고려요소들

착빙을 예보할 때는 다음과 같은 기상 요소들을 고려해야 한다.

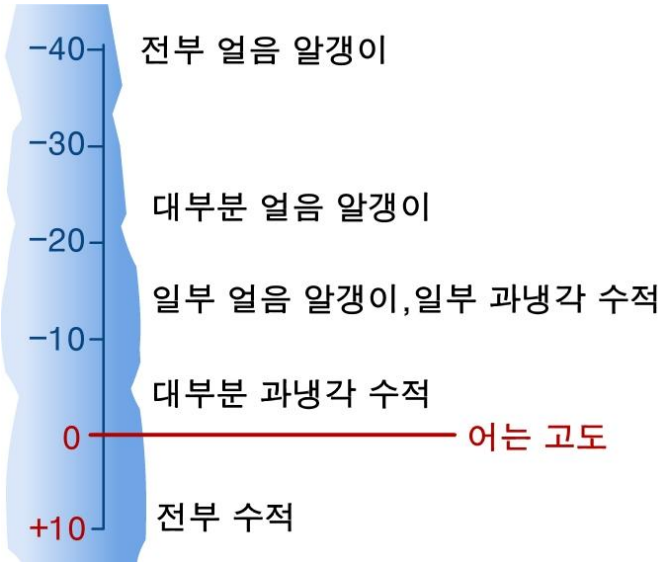
- 착빙이 발생하기 위해서는 0℃ 이하의 온도를 가지는 과냉각 수적들이 대기 중이나 구름 속에 존재하고 있어야 한다.
- 더 많은 과냉각 수적들이 존재할수록, 즉 과냉각 액체물 함량이 높을수록 착빙의 위험성은 높아진다. 과냉각 액체물 함량은 온도가 낮을수록 감소한다.
- 과냉각 수적의 크기가 클수록 착빙의 위험도는 더 높아진다.
- -20℃ 이하의 온도에서는 아주 작은 과냉각 수적들만이 존재할 수 있으므로, 가장 위험한 온도는 0℃에서 -15℃ 사이의 온도에서 발생한다.
- 과냉각 수적은 -40℃ 이하의 온도에서는 존재할 수 없다.
- 과냉각 수적은 고체표면에 닿으면 얼어붙을 수 있지만, 대부분은 완전히 얼어붙기 전에 퍼져 나갈 것이다. 얼마나 많이 퍼져 나가느냐는 수적의 크기에 달려있다. 큰 수적일수록 더 멀리 퍼져 나가고 주변 공기와 고체표면의 온도에 따라 달라진다.
- 구름을 형성하고 있는 공기의 연직 운동이 활발할수록 더 많은 액체물 함량을 보유하고 있다. 가장 심한 착빙은 적운형 구름의 상승기류 부분에서 발생하지만, 전선에 동반된 구름이나 지형성 구름 내부에서도 강한 연직 운동이 있을 수 있으므로 심한 착빙이 발생할 수 있다.

1.2 항공위험기상

구름의 액체물 함량

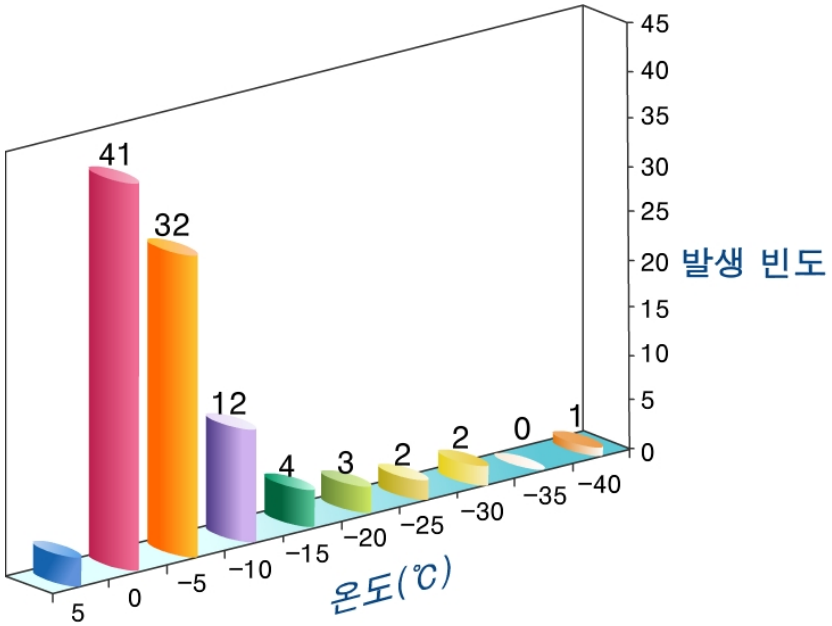
구름 속의 액체물 함량은 다양한 요소에 의해서 좌우된다. 액체물 함량이 어느 정도인지 판단할 때 고려 사항은 다음과 같다(그림 1.31 참조).

- 구름의 운저 온도가 0℃보다 약간 낮은 경우, 구름 속의 액체물 함량은 600ft~1,000ft 사이에서는 선형적으로 증가한다. 지형적 강제상승이 없는 상태에서 묻혀있는 적란운이나 강수에서는 거의 착빙이 발생하지 않지만 발생한다면 600ft에서 1,000ft 고도가 유력하다.
- 구름 속의 수적들의 분포는 매우 가변적이다. 구름의 상부에서 건조한 공기가 섞이게 되면 액체물 함량은 최대값의 절반 정도로 줄어들 수 있다. 그리고 실제 수적들이 구름 속에서 차지하고 있는 체적은 아주 작다.
- 평평하지 않게 분포하고 있는 층운형 구름 속에서도 강한 착빙이 발생할 수 있는 구간이 있을 수 있는데, 그 구간은 지형 효과에 의해서 상승 운동이 있는 지역이 될 것이다.



[그림 1.31] 고도에 따른 기온 하강과 물의 상변화 관계

1.2 항공위험기상



[그림 1.32] 항공기 기체 착빙 발생 비율(%) (800건)

착빙 형태 예보(그림 1.32 참조)

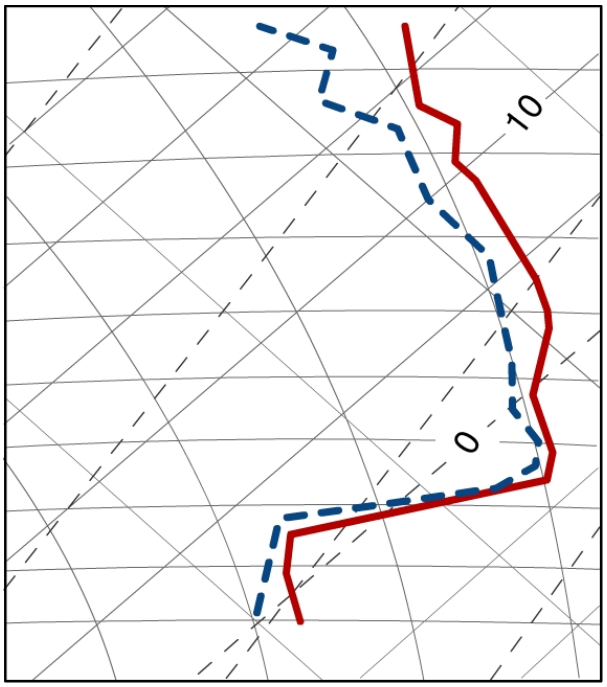
- **거친 착빙** : **작은 크기**의 과냉각 수적, 비행경로를 따라 상대적으로 **낮은** 과냉각 수적함량, 기온 분포는 0℃에서 -40℃ 사이 어디에서나, 주변 공기에 대한 잠열 방출이 작아 **빠르게** 얼어붙음. 거친 착빙은 항공기 전단부에 주로 형성

- **맑은 착빙(투명한 얼음)** : **큰 크기**의 과냉각 수적, 비행경로를 따라 상대적으로 **높은** 과냉각 수적함량, 기온 분포는 0℃에서 -15℃ 사이에서, 주변 공기에 대한 잠열 방출이 많아 **느리게** 얼어붙음. 맑은 착빙은 항공기 전단부에 뿔 모양의 형태로 만들어짐. 과냉각 수적들은 전단부에서 날개와 동체를 따라 **후방으로 흘러감**.

- **혼합 착빙** : **다양한 크기**의 과냉각 수적, 비행경로를 따라 **다양한** 과냉각 수적함량, 기온 분포는 -10℃에서 -15℃ 사이에서, 얼어붙는 비율은 **경우에 따라 다름**.

1.2 항공위험기상

• **비 착빙 : 최악의 시나리오.** 어는 비나 어는 이슬비와 같이 아주 큰 과냉각 빗방울들이 기체에 부착되면서 투명한 얼음 형태로 부착된다. 비 착빙은 빠른 시간 내에 항공기 기체 전체에 막 형태의 착빙을 형성한다. 비 착빙은 일반적으로 따뜻한 공기층에서 만들어진 빗방울이 하부에 위치한 차가운 공기층을 통과하면서 과냉각 되면서 발생하는데 주로 겨울철에 온난전선이 접근할 때 하층의 차가운 공기 위를 따뜻한 공기가 덮을 때 발생한다(그림 1.33 참조).



[그림 1.33] 어는 비를 발생시키는 전형적인 온도 프로파일

• **서리 착빙** : 노점온도가 0℃ 이하인 기체 온도보다 높을 때 발생한다. 3가지의 발생 시나리오가 가능하다.

a) 항공기가 추운 겨울밤에 야외 주기된 경우

b) 차가운 영하의 환경에서 빠르게 하강하여 따뜻한 공기로 내려오는 경우 (일명 찬 적시기)

c) 야간 지표면 역전으로 인해 상대적으로 온난하고 습윤한 공기가 떠올라 달라붙는 경우

1.2 항공위험기상

착빙의 강도 예보

표 1.5는 기체 착빙의 가능성, 강도, 형태 등을 종합한 것이다. 적운형 구름은 층운형 구름에 비해서 액체물함량이 높고, 수적의 크기가 크고, 연직 속도가 높기 때문에 더 나쁜 상황을 만들어 낸다. 착빙의 위험성은 높은 과냉각 수적함량과 온도가 0℃ 근처 영하인 운중이 가장 크다. 위의 상황에서 운형과 상관없이 액체물 함량이 0.5에서 1.0 사이가 보통 착빙과 심한 착빙의 기준이 된다.

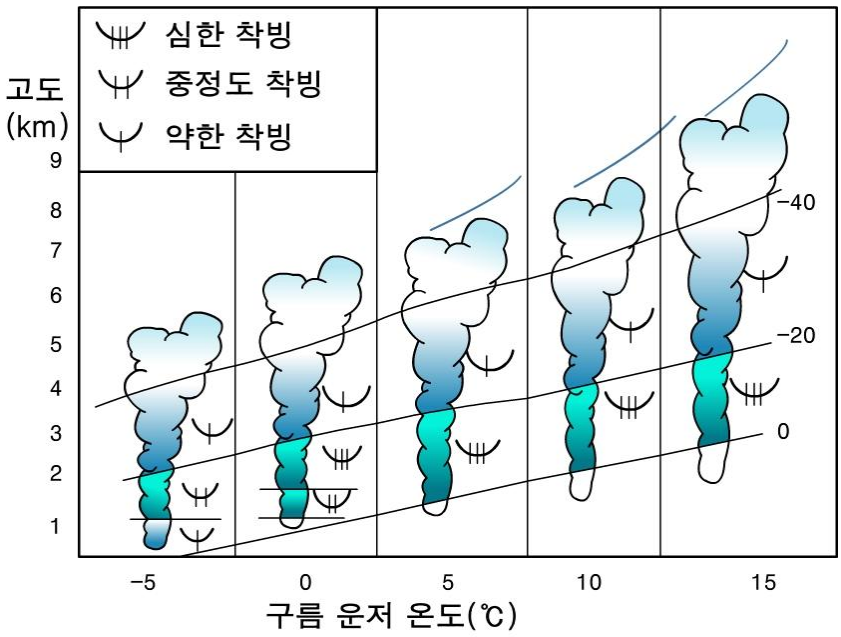
[표 1.5] 구름 종류에 따른 착빙 발생 가능성, 강도, 형태

운형	착빙 가능성	착빙 강도	착빙 형태	액체물함량 (g/m^3)
CB	높음	심함	모든 종류	0.2 ~ 0.4
CU	보통/높음	보통/심함	맑은 착빙	0.2 ~ 0.6
NS	높음	심함	모든 종류	0.2 ~ 0.4
SC, AC	보통	보통 이상 드물게 발생	혼합 착빙	0.1 ~ 0.5
AS	낮음	보통/약함	거친 착빙	0.1 ~ 0.3
ST	낮음	약함	거친 착빙	0.1 ~ 0.5

※ 참고 사항

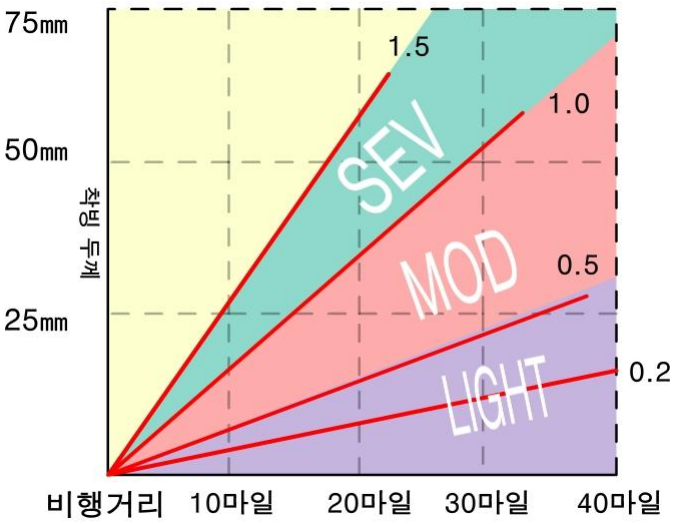
a) 과냉각 수적이 풍부한 층운형 구름을 따라 길게 비행하는 경우 착빙 발생 가능성은 현저하게 증가함.
b) 층적운(SC)은 가끔 예기치 못한 심한 착빙을 발생시킬 수 있는데, 해상에서 역전층 바로 밑에 영하의 공기 층이 놓여있는 경우에 그 가능성이 높다.

1.2 항공위험기상



[그림 1.34] 적운형 구름에서의 착빙의 강도 기준

착빙이 발생하는 환경 속을 비행하는 경우 얼마나 많은 시간동안 이 환경에 노출되었는지도 중요한 고려 요소가 된다. 구름 속에서 착빙이 발생하는 층은 2,000ft에서 3,000ft 정도의 두께를 가지고 있고, 5,000ft를 넘는 경우는 거의 없다. 적운형 구름은 대부분 회피해서 비행하는 것이 원칙이기 때문에 긴 시간 동안 그 속을 비행하는 경우는 흔하지 않지만, 층운형 구름이 비행 고도와 거의 일치하는 경우에는 오랜 시간동안 착빙 환경에 놓일 수 있다. 이 경우에는 일정한 고도가 확보된다면 구름 위나 아래로 비행하는 것이 좋다.



[그림 1.35] 과냉각 수적함량에 따른 착빙 누적률

1.2 항공위험기상

비 기상학적 고려요소들

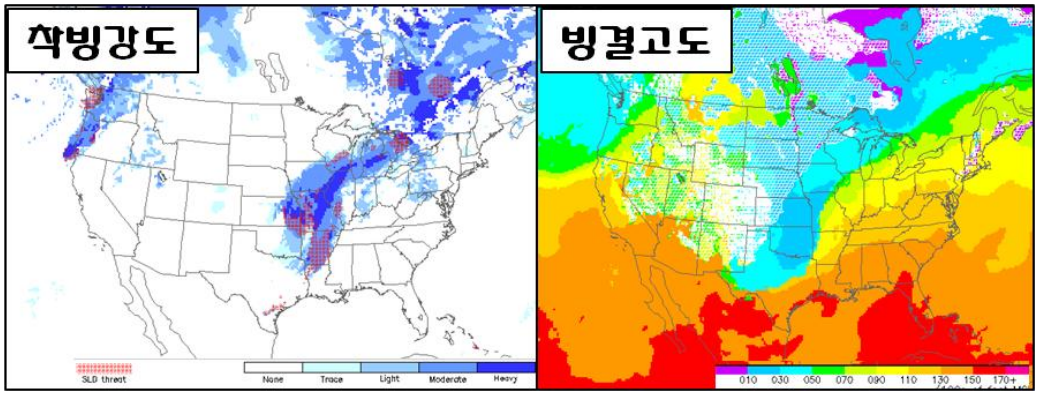
- 착빙의 위험성과 강도는 연직속도가 큰 산악의 사면에 위치한 영하의 구름 속에서 증가한다.
- 착빙의 위험성과 강도는 과냉각 수적 함량 높거나 큰 과냉각 수적이 존재할 가능성이 큰 수면의 풍하측에 위치한 영하의 구름 속에서 증가한다.
- 마찰력에 의한 운동학적 가열은 항공기 외부 온도를 100kts에서는 1℃, 500kts에서는 25℃ 높인다.

1.2 항공위험기상

5) 수치예보 자료

앞에서도 언급되었지만 착빙은 순수한 기상학적 요인에 의해서만 발생하는 것이 아니라 항공기와 수적의 접촉에 의해서 발생하는 물리적인 현상으로 기상 수치예보모델에서 착빙을 바로 예측하는 것은 불가능하다.

다만, 과냉각 수적의 양이나 액체물함량은 모델 변수를 통해서 계산이 가능한 요소로 미국과 같은 선진국의 항공기상 현업기관에서는 수치예보 모델과 관측자료, 조종사 기상보고를 활용하여 고도별 착빙가능성과 빙결 고도 정보를 제공하는 시스템을 구축하고 있으나(그림 1.36 참조), 한국 항공기상청은 여전히 개발 중인 단계에 있다.



[그림 1.36] 미국 NCEP에서 제공하는 고도별 착빙강도와 빙결고도 정보

그림 1.36의 왼쪽 착빙강도 정보를 보면 시카고 지역을 중심으로 보통 이상의 착빙이 발생하고 있으며 향후 24시간 동안 이 지역을 30,000ft로 비행하는 항공기들이 착빙에 노출될 가능성이 높다는 사실을 잘 알 수 있다.

이와 함께 고층관측과 위성분석 등을 활용한 빙결고도 정보를 통해서 항공기가 순항하는 고도에 따라 어느 고도부터 영하의 기온을 보일 것인지 판단할 수 있도록 하고, 빙결고도가 낮은 지역에 구름이 발달되어 있으면, 구름 속을 비행하는 과정에서 착빙이 발생할 가능성이 높음을 예보관들과 조종사들이 판단할 수 있도록 하고 있다.

1.2 항공위험기상

6) 사례 연구

호주 교통안전국(ATSB)의 보고서에 의하면 샤브 340 항공기가 비행 중 조정 불능 상태에 빠져서 최저 비행고도인 3,810ft를 침범한 사례는 호주 뉴 사우스 웨일즈에서 착륙을 위해 마지막 하강을 시도하던 도중에 항공기가 기체 착빙과 조우한 결과로 조사되었다.

이 항공기는 처음에 아무런 사전 경고 없이 좌측 기울어지고 아래쪽으로 기울어지는 현상에 발생하면서 회복하는 동안 첫 번째 스톰을 경험했고, 그 이후 항공기가 자세를 회복한 다음에는 다시 오른쪽으로 기울어지면서 하강하여 고도를 회복하는 동안 112ft를 하강하였다.

“ATSB의 마지막 조사에서 사브 340 항공기는 2002년 6월 28일 비행하는 도중 낮은 대기 속도, 기체 착빙에 의한 자동조종장치의 이상으로 조종사가 조정 불능 상태에 빠졌으며, 사전에 스톰 경고를 듣지 못하였다.”

해당 시간과 장소에 해당하는 온도 프로파일과 위성 적외영상을 통해 이 사례와 관련된 다음과 같은 기상학적 조건들을 찾을 수 있었다.

- 0℃ 등온선 고도는 3,500ft였다
- 구름 상태는 운저 3,000ft, 운정 7,500ft인 구름이 브로컨에서 오버캐스트 상태였다.
- 운정 고도의 온도는 -7℃에서 -9℃ 사이였다.
- 구름의 형성에는 지형적인 효과도 작용하였다.
- 착빙의 누적이 구름을 뚫고 하강하는 항공기의 전면 유리에서 관측되었다.

1.2 항공위험기상

1.2.3.2 기화기와 엔진 착빙

어떤 종류의 항공기들은 기화기나 공기 흡입구에서 착빙이 자주 발생한다. 이 부분의 착빙은 공기의 가속에 따른 단열 냉각에 의한 기압 감소에 의한 것이다.

기화기 착빙은 피스톤 엔진을 가진 항공기에서 자주 발생하는 현상으로 습한 공기가 기화기의 벤투리관으로 들어와 얼음알갱이가 침착하면서 발생한다. 벤투리관에 얼음이 침착되면 점점 성장하여 출력을 크게 감소시킨다. 카뷰레터 착빙은 주변 온도가 0℃이상이고 습한 공기가 존재하는 환경에서 대부분 발생한다. 공기 중의 습도가 높을수록 발생 위험은 높다. 따라서 엔진 착빙은 따뜻하고 습한 구름 많은 여름철 낮에 잘 발생한다. 아주 습한 공기는 단열냉각을 하면서 5℃ 이상 냉각될 수 있다.

흡입된 공기의 냉각은 기화기 속의 연료의 증발을 통해서 더욱 강화될 수 있다. 이러한 현상으로 10℃ 이상 냉각이 발생한다.

부가적인 문제는 착빙이 흡입구의 테두리나 뼈대에서 발생하는 경우로 심한 경우 큰 얼음 조각이 깨지면서 엔진을 손상 시킬 수도 있다.

엔진 착빙은 +3℃에서 -1℃ 사이의 고도의 공기가 60% 이상의 상대습도를 가지고 있다면 그 고도를 피해서 비행하는 것이 발생을 방지할 수 있는 최상의 방법이다.

1.2 항공위험기상

1.2.4 적란운과 뇌우

적란운(CB)은 다음과 같은 현상들을 동반하는 항공에 있어서 가장 위험한 기상 요소이다.

- 심한 난류
- 심한 착빙
- 마이크로버스트, 강한 하층 난류를 유도하는 스콜선이나 돌풍전선
- 뇌우와 낙뢰
- 집중호우
- 우박

적란운은 동일한 장소와 같은 시간에 다양한 형태의 위험 기상을 함께 발생시키기 때문에 절대로 그 위험성을 과소평가해서는 안 된다. 항공기는 반드시 적란운이 활동하고 있는 지역으로 알려진 곳은 회피해서 비행해야 한다. 또한 적란운의 발달이 다른 구름에 가려져서 안 보일 수 있으므로 적란운 발생 가능성이 높은 날은 항상 발생 가능성을 염두에 두고 비행해야 한다.

개별적으로 발생하는 적란운은 생애 주기가 1시간 30분 정도이지만, 가장 강력한 형태의 적란운의 발달과 낙뢰를 동반한 뇌우는 적란운들의 복합체인 다중셀대류계(Multi Cell Convective System)나 수퍼셀(Supercell)에서 이루어진다. 다중셀대류계와 수퍼셀은 지속적인 새로운 셀들의 발생으로 인해 수 시간 동안 지속된다.

예보관들은 전형적인 낙뢰를 동반한 뇌우가 발생할 수 있는 다양한 종관 환경들에 대해서 잘 이해하고 있어야 한다. 적란운과 뇌우는 그 자체로도 학습의 범위가 넓기 때문에 상세하게 다루지 않고 다른 참고 서적을 참고하기 바란다.

1.2 항공위험기상

1.2.4.1 심한 난류

예보관들은 본 학습서에서 난류를 다루면서 언급된 적란운 구름과의 관련성에 대해 재학습하고 어떻게 적란운과 뇌우가 위험한 심한 난류를 만들어 내는지 인지하고 있어야 한다.

1.2.4.2 심한 착빙

예보관들은 본 학습서에서 착빙을 다루면서 언급된 적란운 구름과의 관련성에 대해 재학습하고 어떻게 적란운과 뇌우가 위험한 심한 착빙을 만들어 내는지 인지하고 있어야 한다.

1.2.4.3 마이크로버스트

예보관들은 본 학습서에서 난류를 다루면서 언급된 적란운 구름과 마이크로버스트에 대해서 다룬 부분을 재학습하고 어떻게 적란운과 뇌우가 위험한 마이크로버스트를 만들어 내는지 인지하고 있어야 한다.

1.2.4.4 뇌우와 낙뢰

1) 설명

뇌우와 낙뢰는 적란운 구름 속에서 발생할 수 있다. 기상학 사전은 번개를 약 20쿨롱의 전기량에서 볼트의 잠재 전압 차이를 가지는 방전 현상으로 정의하고 있다.

천둥은 방전 현상으로 인해 만들어진 번개가 지나가는 경로 주변에 있는 대기가 엄청난 가열과 팽창으로 인해서 발생하는 큰 소리를 말한다.

2) 항공기에 미치는 영향

낙뢰가 항공기와 승무원 및 승객들에게 미치는 영향은 다양하다. 만약 번개가 소리에 앞서서 금속으로 둘러싸인 동체를 때리면 그 소리는 항공기에 남겠지만, 실제로 승객이나 승무원이 번개의 전압이나 전류의 영향을 받지는 않는다. 이것을 패러데이 새장(Faraday Cage) 효과라고 부른다. 그러나 번개가 들어와서 나가면서 만든 탄 자국은 항공기의 표면에 남는다. 만약 방전이 항공기의 동체가 아닌 안테나와 같은 특정한 구조물 근처나 구조물을 통해서 전기가 흘러가면 그 구조물은 파괴될 것이다.

1.2 항공위험기상

번개는 승객과 승무원들에게 쇼크와 두려움을 줄 것이다. 야간에 강한 번개가 항공기를 때리면 조종사는 순간적으로 눈이 안보이거나 시력 저하를 경험할 것이다.

번개가 현대적인 복합재료로 구성된 부분을 때리면 복합재료는 조각으로 갈라져 나갈 것이다. 만약 그 복합재료가 항공기에서 구조적으로 중요한 부분을 차지하고 있다면 본래의 성질과 강도가 훼손될 가능성이 높다. 이러한 이유 때문에 번개가 복합재료로 구성된 헬리콥터의 날개를 때리면 그 구조와 성질을 변화시킬 수 있기 때문에 위험한 것이다.

번개가 항공기를 때리면 전기/전자 시스템은 아마도 회로나 선로 이상 등으로 고장이 날 것이다. 자기식 나침반도 믿을 수 없게 될 것이다.

무선통신과 항법장비에도 해로운 영향을 받을 것이고 자동방향탐지기(ADF : Auto Direction Finder)도 스톰의 중심부를 향하게 되어서 신뢰할 수 없을 것이다.

3) 각종 영상들을 이용한 위험 기상 진단

루프 기능을 이용해서 위성 영상을 연속적으로 관찰하면 대류성 구름의 발달을 탐지할 수 있다. 적외영상은 적란운의 운정온도와 이를 토대로 개략적인 고도에 대한 정보를 제공한다. 수증기영상은 적란운, 뇌우/낙뢰의 발달에 유리한 높은 양의 와도이류(PVA) 구역을 찾는데 도움을 줄 것이다.

낙뢰는 낙뢰탐지 장비를 통해서 관측된 낙뢰 발생 시간과 장소, 그리고 그 강도를 지도위에 표시한 낙뢰 영상을 통해서 확인할 수 있다. 최근에는 낙뢰가 나타나는 부분을 위성영상이나 레이더 영상과 합성하여 예보관들이 구름이나 에코 속에서 낙뢰가 있는 지역을 쉽게 구별할 수 있도록 도음을 준다.

기상레이더는 적란운과 뇌우의 탐지, 추적, 예보에 핵심적인 도구이다. 반사도 값을 통해서 대류활동이 강한 구역을 찾을 수 있고, 도플러 기능을 활용하여 강한 수렴과 상승 운동이 있는 구역을 알아 낼 수도 있다. 또한 이중 편파기능을 활용하여 구름 속의 입자들의 구성과 연직 운동의 크기를 측정할 수도 있다.

1.2 항공위험기상

4) 경험적 예보 기법들

뇌우와 낙뢰를 예보하기 위한 다양한 기법들이 제시되고 있다. 이들 기법을 간단하게 정리하면 다음과 같다.

- 실제 혹은 예보된 프로파일을 이용한 단열선도 그리기
- 대류 깊이 측정, 대류 깊이가 13,000ft를 넘어야 함
- 대류 상승운동이 -20℃ 등온선 이상 지속
- 뇌우와 관련된 다양한 불안정도 지수 계산
- 고도에 따라 상당온위가 떨어지는 잠재 불안정 구역 찾기
- 분리 한랭전산과 관련된 '얇은 습윤' 구역 구별
- 구름 깊이에 해당하는 고도에 따라 윈드시어가 없거나, 방향성이 없거나, 방향성을 가지는 모든 경우를 고려

적란운과 뇌우/낙뢰 발생을 예보할 때 가장 많이 사용되는 불안정도 지수로는 대류가용잠재에너지(CAPE : Convective Available Potential Energy)와 치올림 지수(LI : Lifted Index)가 있다. CAPE는 단열 상승하는 공기덩어리의 궤적이 LFC에서부터 EL가지 올라가서 다시 주변 온도 프로파일을 만나면서 만들어 내는 영역의 크기를 에너지로 표시한 것인데, 간단한 식이나 소프트웨어를 통해서 관측된 라디오존데 자료에 바로 계산할 수 있다. 850hPa의 LI 값도 많이 사용하는데 이 지수는 샘플 고도 바로 위에 전선이 존재하거나, 어는 고도가 존재하면 사용하지 말아야 한다.

뇌우와 낙뢰 발생을 예보하기 위한 CAPE의 값의 범위는 아래와 같다.

- 0 안정
- 0 ~ 1,000 안정과 불안정 경계
- 1,000 ~ 2,500 보통 불안정
- 2,500 ~ 3,500 심한 불안정
- 3,500 이상 극도로 불안정

500hPa의 치올림 지수(LI)

- 11 극도로 안정뇌우 발생 가능성 없음
- 8 ~ 11 매우 안정뇌우 발생 가능성 없음
- 4 ~ 7 안정뇌우 발생 가능성 없음

1.2 항공위험기상

• 0 ~	3대체로 안정	뇌우 발생 가능성 없음
• -1 ~ -1	약간 불안정	뇌우 발생 가능
• -5 ~ -4	불안정	보통 뇌우 발생 가능
• -7 ~ -6	매우 불안정	심한 뇌우 발생 가능
• -7 이하	극도로 불안정	극심한 뇌우, 토네이도 발생 가능

대류성 셀들은 대류성 구름의 운저에서부터 위쪽으로 전체 구름 높이의 1/3에 해당하는 고도의 바람장을 따라 이동한다.

보통 700hPa(~10,000ft) 고도의 바람이 뇌우의 궤적 예상에 잘 적용되는 것으로 알려져 있자. 그러나 대류성 구름이 심하게 낮고/얇거나 높고/깊은 경우, 새로운 셀들이 지속적으로 발생하는 경우에는 700hPa 바람장을 따라 이동하지 않고 그 셀들과 시스템의 이동 벡터 차이에서 만들어지는 전파 벡터(Propagation Vector)의 방향으로 이동한다는 사실도 잘 인식하고 있어야 한다.

5) 수치예보 자료들

경험적인 예보 기법들을 보완하기 위해서 수치예보 자료로부터 다양한 불안정 지수들을 얻을 수 있다. 대부분의 수치예보 모델은 강수를 대류성 강수와 층운형 강수로 구분하고 그 강도를 알 수 있도록 도와주는데, 대류성 강수의 강도를 통해 적란운과 뇌우의 발생 가능성을 예측할 수 있다.

수치예보 모델들의 해상도가 높아짐에 따라 각종 불안정 지수를 직접 그래픽으로 표출하고 이 지역과 강수 지역을 오버레이해서 강한 뇌우가 발생할 수 있는 지역이나 집중호우가 발생할 수 있는 지역을 식별할 수 있도록 도와준다. 최근에는 모수화 기법을 활용하여 연직속도와 구름의 깊이, 대기의 안정도, 구름 물량 등을 종합적으로 고려하여 구름 내부의 전하들의 위치를 예측하고 낙뢰 가능성을 예보하는 알고리즘도 개발되어 활용되고 있다. 다만 수치예보 모델의 특성상 불안정도가 지나치지 않도록 스스로 제어하므로 실제 관측되는 값보다 낮은 경우가 많고, 강수나 구름 예보에 경도되는 경우가 있으므로 유의해야 한다.

1.2 항공위험기상

1.2.4.5 호우

1) 설명

호우로 분류할 때에는 보통의 경우 대류성 구름이나 뇌우가 어느 정도의 비를 호우(Heavy Rain)로 정의할 것인지에 대한 국제적인 기준은 없다. 보통의 경우 다음의 기준에 따른다.

- 시간당 강수량이 20mm를 넘는 강도의 강수
- 24시간 누적 강수량이 100mm를 넘는 경우

여름철에 강한 뇌우나 적란운에 동반된 소낙성 강수는 심한 경우 시간당 50mm를 넘기도 한다. 보통 이 정도의 강수는 열대성 기단의 영향을 받는 지역에서 발생하지만 최근 들어서는 중위도 지방에서도 빈번하게 발생하고 있다.

'집중호우'라는 말 또한 정확한 공식적인 정의는 없다. 여기에서는 편의상 강수의 강도가 보통의 경우보다 아주 크고 뇌우와 동반될 경우를 가정하고 사용하기로 한다.

2) 항공기에 미치는 영향

집중호우 혹은 호우는 일반적으로 시정을 저하시킨다. 그러나 실제로 기상분야에서의 시정 저하는 강수 입자나 구름으로 인해서 시정 저하가 나타나는 것을 의미하지만, 항공기상에서는 빗방울이 항공기의 창문이나 캐노피와 부딪치면서 시정을 저하시키는 효과가 배가된다. 강수 강도가 클 경우에는 창문에 달린 와이퍼로도 비를 제거하지 못하는 경우도 발생한다.

여압장치가 되어있지 않은 경항공기의 경우 집중호우가 내리는 경우 물기가 객실/조종실/엔진에 스며들어 전기 장비 계통에 문제를 일으킬 수도 있다.

민간항공에서 사용되는 엔진들은 집중호우나 물기가 스며든다고 해서 '엔진이 꺼지지 않는다'는 시험과 증명을 받는다.

활주로가 넘치거나 깊은 물에 오랫동안 랜딩 기어 부분이 잠겨있는 경우 브레이크 계통에 문제가 발생할 수 있고, 비대칭 브레이크 작용으로 활주로 밖으로 항공기가 미끄러져 나갈 수 있다.

1.2 항공위험기상

강한 비가 내릴 경우에는 예상하지 못한 하층운(층운 토막구름)이 발생해서 실링을 낮추거나 시정을 떨어뜨릴 수 있다.

3) 각종 영상들을 이용한 위험 기상 진단

기상레이더는 비록 어느 정도 제한 사항들을 내포하고 있지만 강수가 내리는 지역과 강도를 진단하는데 없어서는 안 되는 도구이다.

위성영상은 운정온도 분석을 통해 차가운 지역(강한 상승기류가 있고 대류성 구름이 발달하는 구역)의 넓이와 온도를 통해 집중호우가 발생할 가능성이 높은 지역에 대한 정보를 얻을 수 있다. 일반적으로 중규모대류계(MCSs : Mesoscale Convective Systems)나 중규모대류 복합체(MCC : Mesoscale Convective Complex)는 집중호우와 직접 관련되어 있는 경우가 많기 때문에 운정온도의 분포를 통해서 이들의 존재를 알아 낼 수 있다.

낙뢰 영상은 뇌우 활동이 존재하고 있는 지역을 보여줌으로써 뇌우의 강도와 이동 방향을 예측하는데 활용할 수 있다.

항상 적운형 구름에 의한 집중호우를 예측하기 위해서는 오래된 대류계에서 새롭게 발생하는 스톰 셀들의 발달 가능성을 항상 염두에 두고 있어야 한다. 그리고 그들의 이동 방향은 일반적인 바람이나 '조종 고도(Steering Level)' 기류에 의존하지 않는다는 사실도 명심해야 한다.

4) 경험적 예보 기법들

집중호우가 발생하는 지역은 높은 양의 와도이류 구역과 온난 이류가 동시에 일어나는 지역으로 이들 환경에서는 층운형 구름과 적운형 구름이 동시에 만들어진다.

지형 효과로 인해서 산악지역의 풍상측에서 강수가 강화될 수 있다.

오랜 시간 동안 강수가 계속되면 증발에 의한 냉각 과정을 통해 하층의 상대습도가 높아지게 한다. 강한 집중호우의 경우에는 주변 공기의 냉각 효과로 인해서 30분에서 1시간 이내에 건구 온도가 습구 온도에 가깝게 냉각되기도 한다. 보통 강도를 가지는 강수라도 1시간에서 2시간 정도 지속되면 동일한 효과가 발생한다. 여름철에 강수에 따라 발생하는 강한

1.2 항공위험기상

하강기류와 증발로 인한 냉각으로 인해 차갑고 밀도가 높은 공기가 대기 하층에 쌓이는 현상을 찬공기풀(Cold Pool)이라고 하는데, 찬공기풀은 대류성 스톰들의 지속적인 발달과 새로운 스톰 셀이 발생하는데 매우 중요한 역할을 한다. 또한 강수가 지속되면 층운의 일종인 조각구름이 발생할 수 있는데 강수 지속 시간에 따라 고도가 낮아진다.

- 2 시간 지속되는 강수 - 운저 800ft
- 4 사간 지속되는 강수 - 운저 400ft

5) 수치예보 자료들

기본적인 모델 자료들은 정해진 시간에 정해진 지역에 예상되는 역학적 강수와 대류성 강수량과 강도에 대한 정보를 제공하고 일정한 시간 동안의 누적 강수량 정보도 제공된다.

예보관은 모델 자료의 한계(수직/수평해상도, 지형 해상도)를 인식해야 하며, 강수의 강도는 격자에 평균된 값이라는 점과 지형 효과로 인해서 경사면의 풍상측에서 강수가 강화될 수 있다는 사실도 인식하고 있어야 한다.

1.2.4.6 우박

1) 설명

작은 우박(METAR 코드 GS)은 우박의 반지름이 5mm 이하인 경우에 사용하고, 진짜 우박(METAR 코드 GR)은 우박이 반지름이 5mm 이상인 것을 말한다. GS와 GR은 적란운에서 발생한다. 다만 GS는 적운 복합체(TCU)에서도 발생할 수 있다. 우박은 얼음싸라기(METAR 코드 PE)와 구별해야 하는데 얼음싸라기는 층운형 구름에서 만들어진다.

우박은 강한 대류성 구름 속에서 상승기류와 하강기류를 타고 얼음 알갱이가 수적들을 포착하면서 성장해서 크기가 충분히 자라서 상승기류가 무게에 의한 중력을 이기지 못할 만큼 성장하면 밑으로 떨어진다.

1.2 항공위험기상

2) 항공기에 미치는 영향

작은 크기의 우박은 항공기에 구조적인 영향을 거의 미치지 못하고 기체에 부딪치면 튕겨 나간다. 그러나 작은 우박이라고 하더라도 시정 장애를 초래할 수 있다. 창문이나 캐노피에 우박이 쌓이기 시작하면 빠르게 쌓이기 때문에 조종사가 놀랄 수 있다.

우박이 일정한 크기 이상으로 자라면 항공기의 표면에 흠집을 낼 수 있고, 이 흠집들은 항공기의 항공역학적 특성을 변화시킬 수 있고 항공기 유리창을 깨뜨릴 수도 있다.

갑작스러운 우박을 동반한 소낙성 강수는 극도로 미끄러운 활주로나 유도로 상태를 야기할 수 있다. 따라서 소낙성 강수가 지나갔고 시정과 구름이 착륙에 적당한 상태로 회복되었다고 하더라도 브레이크의 작동에 문제가 생길 수 있다.

3) 각종 영상들을 이용한 위험 기상 진단

레이더 영상에서 관측된 대류성 스톰의 일정 고도 이상에서 비정상적으로 높은 반사도 값을 가지는 지역이나 갑자기 반사도 값이 급증하는 지역은 우박이 존재할 가능성이 높다. 왜냐하면 얼음은 물방울에 비해서 더 많이 레이더파를 산란시키기 때문이다. 도플러 레이더는 구름 속에서 우박이 충분히 존재하는데 필요한 상승기류에 대한 정보를 제공한다. 도플러 레이더에서 시선속도 분석을 통해서 얻어진 순환은 연속적인 상승과 하강운동을 통해 우박이 '층층으로 쌓여서 성장'할 수 있음을 보여준다.

1.2 항공위험기상

4) 경험적 예보 기법들

우박은 다음과 같은 상황에서 발생할 수 있다.

- 적란운의 운정 온도가 -20℃ 이하
- 공기 덩어리의 궤적이 이루는 온도 프로파일이 주변 공기의 온도 프로파일에 비해서 4℃ 이상 높고, 구름의 운정이 15,000ft 이상 성장한 경우
- 공기 덩어리 궤적을 사용할 경우에는 다음과 같은 사항에 더욱 유의해야 한다.
  - 공기 덩어리의 궤적이 -20℃ 고도에 도달하면 공기덩어리의 온도와 주변 공기의 온도 차이를 구한다.
  - 만약 온도 차이가 5℃ 이상이면 우박을 예보하고, 5℃에서 2.5℃ 차이라면 부드러운 우박이나 비를, 2.5℃ 미만이면 비를 예보한다.

우박이 더 크게 자라기 위해서는 '정지 상태'가 필요하다. 다만, 느리게 이동하는 스톰에서는 이러한 상태가 필요하지 않다. 적란운의 운정 고도와 운저 고도 사이에 연직 바람 시어가 있어야 한다.

5) 수치예보 자료들

수치예보 자료를 바탕으로 예보된 단열선도를 통해서 대류성 스톰들이 발달할 수 있는 유용한 정보를 얻을 수 있다. 이를 통해서 우박이 발달할 수 있는지 아닌지 결정한다.

수치예보 모델의 원시 자료를 통해 대류성 강수를 모의하는 구름 물량이 밀집하고 상승 운동이 강한 지역에서 우박이 발달하기 쉽다. 그러나 이 작업은 상당한 추론이 필요하다.

1.2 항공위험기상

6) 사례 연구

아래 그림은 비행 도중 강한 우박을 맞아 기체가 크게 손상된 항공기의 사진이다.

[그림 1.37] 우박으로 손상된 항공기

1.2.5 집중 호우

1.2.4 적란운과 뇌우, 1.2.4.5 호우 부분을 참조할 것.

집중호우는 적란운이 없이도 발생할 수 있다. 두껍고 깊은 전선성 구름들이 지형성 강제상승에 의해서 강화되면 경사면의 풍상측에 집중호우가 발생할 수 있다. 비대류성 구름에서 집중호우가 발생하기 위해서는 난층운(NS)가 존재해야 한다.

왜 난층운에는 적란운이 묻혀서 동시에 존재하지 못하는가에 대한 명확한 이유는 없다.

1.2 항공위험기상

1.2.6 눈

1) 설명

눈은 그 자체로 고체형 강수의 하나인데 가지 형태, 얼음 알갱이, 얼음 알갱이들의 덩어리형태로 존재한다. 눈이 어떤 모양으로 형성되는지는 발달하는 단계의 온도와 상태에 따라 결정된다. 운정 온도가 -5℃ 이상이면 얼음 알갱이들이 뭉치기 시작한다.

2) 항공기에 미치는 영향

눈의 강도가 약하더라도 강설현상은 시정을 심각하게 저하 시킨다.

영하의 온도에서 녹지 않은 고유한 눈은 항공기 주변의 공기의 흐름에 따라 비껴나가고 항공기 기체에는 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 눈이 항공기 엔진 덮개 속으로 날려 들어가거나 열린 랜딩기어 접이 장치와 같은 빈틈으로 들어가면 눈들이 뭉쳐서 장애물로 작용한다. 이러한 눈뭉치들은 엔진으로 들어가는 기류의 흐름을 방해하거나 랜딩 기어가 접혀 들어가는 것을 방해한다.

지상에서 정지해 있거나 느린 속도로 이동하면 눈이 항공기 동체에 쌓이게 되어 항공역학적 특성을 변형시키고, 항공기의 무게를 증가시키는 역할을 한다. 또한 항공기의 창문이 눈으로 가려지고 창문의 와이퍼가 얼어붙어 제대로 작동하지 못하는 경우가 있다.

녹은 눈은 항공기의 기류에 의해서 비껴나가지 않고 쉽게 항공기의 울퉁불퉁한 부분을 덮게 된다. 위에서 언급했듯이 눈이 엔진 덮개, 랜딩 기어 접이 장치, 엔진 흡입구 등에 쌓이면 심각한 결과를 초래할 수 있다.

눈에 의해서 활주로가 덮이게 되면 브레이크의 성능이 저하된다. 눈이 쌓이면 활주로 등이 가려지게 되고 활주로 주변 잔디와 활주로가 구분되지 않을 수 있다. 특히 시정이 떨어진 상태에서는 더욱 심각한 문제를 초래할 수 있다. 공항의 지상에는 눈이 내리지만 1,000ft 혹은 그 이상의 고도에는 눈이 내릴 가능성이 있다. 이러한 상황에서 장주를 돌고 있는 항공기나 접근을 시도하는 항공기는 눈 때문에 영향을 받을 수 있다.

1.2 항공위험기상

3) 각종 영상들을 이용한 위험 기상 진단

레이더나 위성 영상은 특별히 지상에 내리는 눈을 진단하는데 큰 도움을 주지 못한다. 위성에서 볼 수 있는 운정은 지표면 부근을 대부분 가리고 있을 것이다. 가끔 가시영상을 통해서 구름이 없는 곳에서 최근에 눈으로 덮인 적설 구역을 구분할 수 있다.

눈은 일반적으로 판형으로 구성되어 있기 때문에 레이더로 되돌아오는 에너지의 양이 현저하게 줄어들어 대체적으로 반사도 값이 작게 나타난다. 강한 강설을 포함하고 있는 구름이라고 하더라도 20dBZ를 넘는 경우는 흔하지 않다. 그러나 녹는 눈은 상대적으로 되돌아오는 반사도 값이 크다. 어는 고도를 통과하면서 눈이 녹으면서 만들어지는 반사도가 높은 구역(레이더 영상에서는 레이더 중심으로부터 일정한 거리에 원형으로 형성됨)을 '밝은 밴드(Bright Band)'라고 부른다.

4) 경험적 예보 기법들

예보관들은 눈이 내릴 수 있는 종관 환경에 대해서 잘 인지하고 있어야 한다. 극지방으로부터 불어오는 차가운 바람은 소낙성 눈을 만들어 낸다. 차가운 대륙성 기단이 온난 전선의 전면에서 파고들면 눈이 낮은 고도에서 만들어져서 떨어지게 된다.

눈에 대한 경험적 예보 기법들은 특별한 것이 존재하지 않는다. 다만, 예보관들은 다음과 같은 사항들을 고려해야 한다.

- Boyden의 1000-850 기법 (층후에 의한 눈과 비 구역 구분)
- 0℃ 등온선 고도
- 지상 온도
- 1000-500 층후
- 습구온위
- 백엽상 습구온도

예보관들은 이들 기법들이 가진 한계를 잘 인식하고 적절한 강설량을 예보하기 위해서는 지형효과, 강설에 따른 어는 고도의 하강 등을 고려해서 각 기법들을 정량적으로 조절하여 예보에 활용해야 한다. 또한 예보관들은 깔려있는 눈들이 높게 날리거나 지표면 근처를 표류하는 상황도 충분히 고려해야 한다.

1.2 항공위험기상

5) 수치예보 자료들

수치예보는 눈을 예보함에 있어서 일반적인 종관 환경에 대한 정보를 제공하기 때문에 예보관들은 이를 이용해서 눈이 내릴 것인지 여부를 판단해야 한다.

기존의 수치예보 모델에 사용되었던 강수물리 과정은 눈과 비를 구별하지 못했기 때문에 강수가 시작되는 고도와 지형의 높이 등을 고려해서 2차적으로 눈 구역과 비 구역을 구분했지만, 최근 수치예보 모델들은 구름 속의 물과 얼음, 그리고 혼합물을 구분해 낼 수 있기 때문에 구름 내부의 온도와 지상 부근의 온도를 고려해서 눈이 내리는 지역을 비가 내리는 지역과 구분하여 자동으로 표시할 수 있게 되었다.

간접적인 모델 자료들도 눈 예보에 사용될 수 있다. 850hPa 고도의 습구온위 2선과 1000-500hPa 5280 층후선은 지표면 부근에서 눈이 내릴 것인지 여부를 결정하는 지표가 될 수 있다.

수치예보에서 생산된 단열선도를 잘 활용할 필요가 있다. 단열선도를 통해 어는 고도가 어느 정도 높이에 형성될 것인지에 대한 정보를 얻을 필요가 있다. 예보관들은 눈이 비로 바뀌는 상변화 과정에서의 냉각 효과로 인한 어는 고도가 내려가는 현상에 대해서도 인지하고 있어야 한다.

어는 고도가 잠열 흡수 과정을 통해서 낮아지게 되면 상대적으로 안정적이었던 대기 하층에 불안정이 형성되게 되고 이 결과 눈이 지속적으로 내리는 과정에서 조각구름(Fractus)이라고 불리는 적운이 형성되기도 한다.

6) 사례 연구

1982년 1월 13일 에어 플로리다 737 항공기가 워싱턴 국제공항을 이륙한 후 인근의 포토맥 강으로 추락한 사건이 있었다. 눈이 내리고 날림눈 현상이 동시에 발생한 상태에서 이륙을 시도한 항공기는 착빙 제거 장치를 가동했지만 계속해서 비행하지 못하고 추락하였다.

착빙 제거 장치의 가동에도 불구하고 항공기 날개 위에 이륙하기 전에 이미 눈이 쌓여 있었다. 항공기를 끌고 가는 트럭이 항공기를 뒤로 밀지 못하는 상황에서 항공기는 엔진을 역추진해서 유도로로 나아가야 하는 상황에 놓였다.

1.2 항공위험기상

엔진의 역추진 과정에서 눈이 빨려 들어갔고 엔진 안쪽에 얼음이 만들어짐에 따라 항공기 추력을 나타내는 조종실의 계기 센서에 문제를 일으킨 것으로 조사되었다.

결론적으로 눈이 덮인 날개가 충분한 양력을 받지 못한 상태에서 엔진의 출력도 계기에 비해서 부족했기 때문에 항공기가 더 이상 비행하지 못하고 추락한 것이다.

1.2.7 안개

1) 설명

안개는 미세한 수적들이 공중에 부유하고 있거나 얼음 안개처럼 얼음 입자들이 공중에 부유하고 있는 현상을 의미한다. 항공기상에서는 수평 시정이 이러한 현상들로 인해서 1,000m 미만으로 떨어지는 경우를 안개라고 한다.

안개는 이류과정이나 복사냉각 과정을 통해서 형성될 수 있고 언덕안개와 전선성 안개도 형성 원인으로 분류된다.

안개는 넓게 지속적으로 한 지역을 덮고 있거나 공항의 일정한 부분만을 덮고 있을 수 있다. 안개층이 2m보다 낮으면 얇은 안개라고 부른다.

2) 항공기에 미치는 영향

안개는 시정을 급격히 악화시켜 항공기의 이착륙을 불가능하게 할 수도 있다. 최신 항공기들은 '자동 착륙' 장치를 보유하고 있지만 이를 적절히 활용하기 위해서는 공항에도 적절한 시설이 구축되어 있어야 한다. 아무리 기술이 발달했다고 하더라도 여전히 '자동 착륙' 장치는 사람의 조종을 보조해 주는 수단에 불구하다.

얼음안개는 시정 저하 효과는 일반 안개와 비슷하지만 유도로나 활주로에 얇은 얼음 막을 형성할 수 있고 항공기에도 착빙을 가져올 수 있다.

조종사가 공항에 접근하는 과정에서 착각에 빠질 경우도 발생할 수 있다.

1.2 항공위험기상

조종사가 공항을 선회하면서 항공 상공에서 내려 보는 수직시정을 통해 공항의 구조물들과 활주로를 깨끗하게 확인했다고 하더라도 착륙을 시도하는 과정에서 안개를 통해서 사면 각(Slant Angle)으로 공항을 내려다보면 갑자기 가시적인 신호를 놓칠 수 있고 착륙에 큰 어려움을 겪을 수 있다.

3) 각종 영상 자료들을 이용한 위험 기상 진단

안개는 같은 시간대에 촬영된 가시영상과 적외영상 비교 분석을 통해 쉽게 그 구역을 구별할 수 있다. 보통 안개 꼭대기의 온도는 지표면 온도와 비슷하기 때문에 적외영상에서는 지표면과 구분되지 않지만 안개는 태양 빛을 강하게 반사하기 때문에 가시영상에서는 아주 하얀색으로 뚜렷하게 나타난다. 이러한 방법은 가시영상이 유효한 낮에만 사용이 가능하다.

야간에는 두 개의 다른 적외채널(10.8 와 3.7)의 차이를 이용하여 안개 구역을 찾아낼 수 있다. 이것을 '안개 채널' 방법이라고 한다.

낮과 밤에 상관없이 위에 구름이 가리고 있으면 안개를 탐지할 수 없으므로 지상 관측을 잘 모니터 해야 한다.

1.2 항공위험기상

4) 경험적 예보 기법들

가장 기본적인 임무는 어떤 형태의 안개이고, 어떤 지역에 영향을 미칠 것인가를 결정하는 것이다. 이를 위해서는 지형, 전선 이동, 온난 기단의 찬 지표면 이류, 바람이 없는 맑은 날 야간의 복사 냉각 등과 같이 안개 형성에 작용하는 모든 요소들을 고려해야 한다. 안개는 국지성이 매우 크기 때문에 국지 지형과 기후에 대한 지식이 무엇보다 중요하다. 주변 습지나 큰 저수지(댐)의 위치와 크기를 알면 어느 지역에서부터 안개가 형성될 것인지 정확하게 알아 낼 수 있다. 활강운동의 영향을 받는 평지 지역도 안개가 잘 형성된다.

안개의 형성과 소산 여부를 결정하기 위한 몇 가지 기법들이 있는데 이들은 숙련된 예보관들이 활용하기 적합하다.

지상 온도에 대한 정확한 예보가 정확한 안개 예보를 위한 최우선 요구 조건이다. 복사안개의 경우 Saunders 방법을 이용하여 안개온도를 결정한다. Craddock과 Pritchard 등도 회귀방법을 이용하여 최저기온을 통해 안개온도를 계산할 수 있는 방법을 제시하고 있다.

상대적으로 따뜻한 기단이 차가운 표면(바다나 육지)을 지나면 예보관은 이류안개 형성 가능성에 촉각을 세워야 한다. 특히 언제 주변 공기의 노점온도가 지표면 온도보다 높아지는지가 중요한데 특히 해무의 발생 여부를 결정하는 중요한 기준이 된다.

5) 수치예보 자료들

시정도 수치예보 모델에서 직접 지원이 가능한 요소이다. 안개에서 시정이 모의되었더라도 국지적인 특성과 경험적인 기법들을 활용해서 적절히 조절해서 안개 예보를 생산해야 한다.

1.2 항공위험기상

1.2.8 하층운(로실링)/저시정

1) 설명

로실링(Low-ceiling)과 저시정은 잠재저인 항공기상 위험 요소가 된다. 그렇지만 하층운과 저시정은 항공기 종류와 조종사의 기술과 경험, 항공기의 정밀한 조작, 항로상, 출발지, 도착지, 대체 공항 등의 항법상 조언 등에 의해서 크게 차이가 나는 요소이기 때문에 정확하게 정의하는 것은 매우 어려운 일이다.

다양한 가능성 때문에 이들을 정의하는 정확한 값들을 결정하기 어렵지만, 아마도 로실링과 저시정은 항공기나 조종사가 운항을 할 수 있는 운항 최저치 이하로 이들 값들이 떨어질 때 사용할 수 있을 것이다.

작은 운량(1~2옥타)의 하층운들은 항공기 운항에 위험을 주지 않는다. 그러나 운량이 증가 할수록 항공기에 대한 위험도 증가한다.

소낙성 강수나 안개 형성에 의한 저시정은 좁은 지역에 영향을 미칠 수 있으며, 다양한 원인(비, 박무, 연무, 연기 등)에 의해서 발생할 수 있다. 좁은 지역에 나타나는 저시정 상태는 조종사들이 돌아서 비행하는 방법을 통해서 해결할 수 있다. 역으로 말하면 넓은 지역에 저시정 현상이 나타나면 문제는 매우 복잡해진다.

2) 항공기에 미치는 영향

구름의 운저나 시정이 받아들일 수 있는 수준 이하로 떨어지면 조종사가 장애물을 눈으로 확인하고 회피 기동하는데 충분한 시간을 확보하지 못할 가능성이 높다. 장애물들은 자연적인 장애물(언덕, 지형), 구조물 (빌딩/타워) 혹은 다른 항공기가 될 수도 있다. 이들을 미처 발견하고 회피하지 못하면 충돌할 수도 있다.

계기비행 자격을 가지고 있지 못한 조종사나 안전 장비가 충분하지 못한 항공기는 저시정이나 낮은 하층운 환경 하에서 방향을 상실할 수 있다.

1.2 항공위험기상

높여진 연무층은 조종사를 잘못 유도할 수 있다. 왜냐하면 보고된(정확한) 시정 값은 지상에서 수평방향으로 평가된 것이기 때문에 연무층을 비행하는 조종사가 감지하는 시정은 보고된 시정만큼 좋지 않을 가능성이 높다.

조종사가 낮은 연무층(지상에만 영향을 주는) 위를 비행할 때는 지상에서 불러주는 시정보다 더 먼 곳을 볼 수 있을 정도로 좋은 시정이라고 느껴서 안전상의 착각을 할 수 있고 그 결과 연무층 속으로 하강하면서 갑자기 시정이 줄어드는 것을 느낄 수 있을 것이다.

3) 각종 영상 자료들을 이용한 위험 기상 진단

하층운은 높은 구름층에 의해서 가려지지 않는다면 가시영상이나 적외영상으로 쉽게 구별할 수 있다. 저시정을 판별하는 방법은 안개를 진단하는 방법과 동일하다.

로실링과 저시정은 지상 관측에 포함되어 보고되므로 예보관은 항상 지상 관측 내용을 모니터링하고 있어야 한다.

4) 경험적 예보 기법들

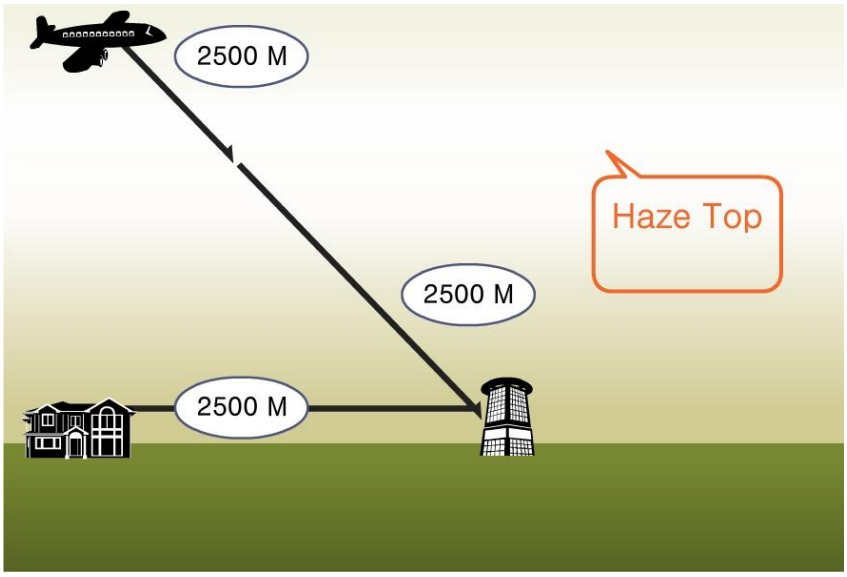
하층운(로실링)

하층운 예보를 함에 있어서 실제 관측된 단열선도와 예보된 단열선도를 표준 선도와 비교하여 그 차이를 읽어내야 한다. 지표면 온도를 예보하고 지상풍의 풍속을 예보하는 것은 하층운의 운저 고도를 예보하는 것과 밀접한 관계가 있다. 구름의 운저 고도는 지속적인 보통 혹은 강한 강수, 대류성 구름으로 부터의 하강기류, 지형성 들어올림 등에 의해서 예상했던 것보다 낮을 수 있다.

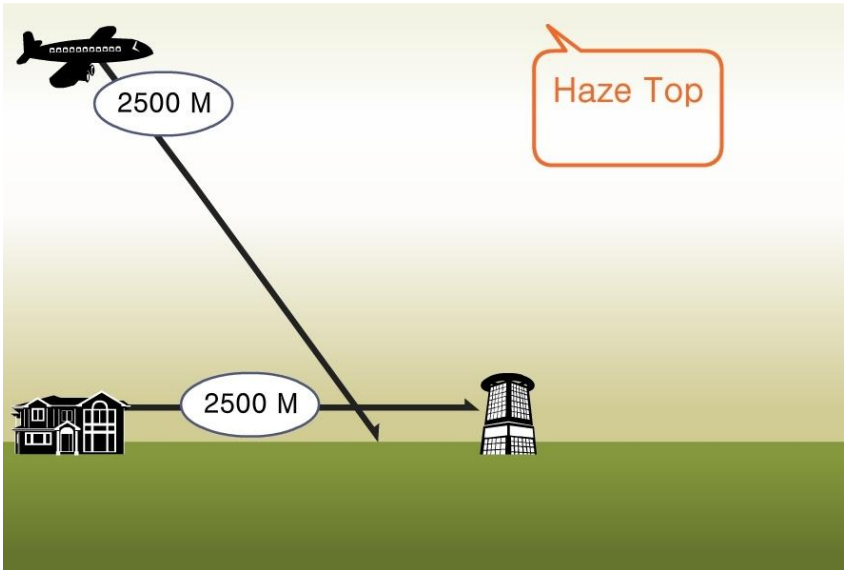
1.2 항공위험기상

저시정

시정을 저하시킬 수 있는 원인은 매우 다양하기 때문에 예보관들은 시정 값의 결정에 영향을 미칠 수 있는 여러 가지 인자들을 충분히 고려해야한다. 저시정 예보에 대한 기법들은 안개 부분에서 설명이 되었다. 저시정이 어느 정도 인지 예보관이 확인할 수 없다고 하더라도 조종사에게 사면 시정이 줄어들 수 있다는 사실과 높여진 연무층이 예상되면 이 사실도 주지시켜 주어야 한다.

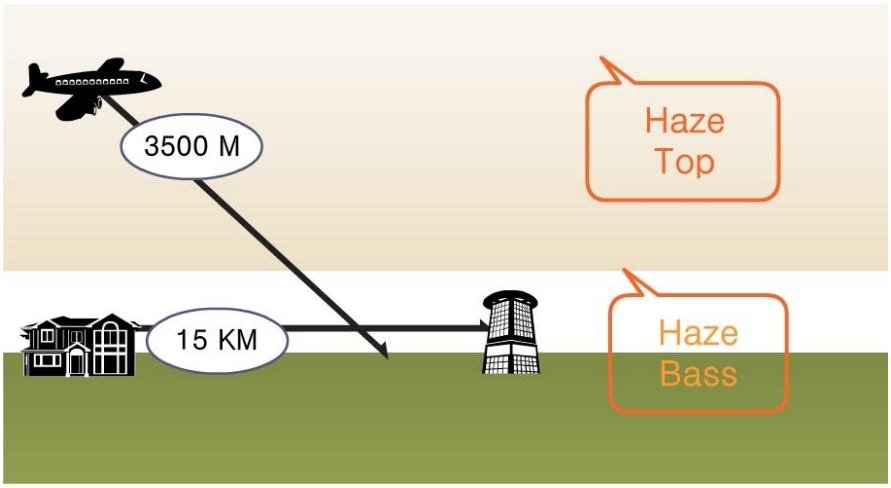


[그림 1.38] 연무층 이상을 비행하고 있는 조종사가 지상 관측보다 더 좋은 시정을 가질 수 있는 예

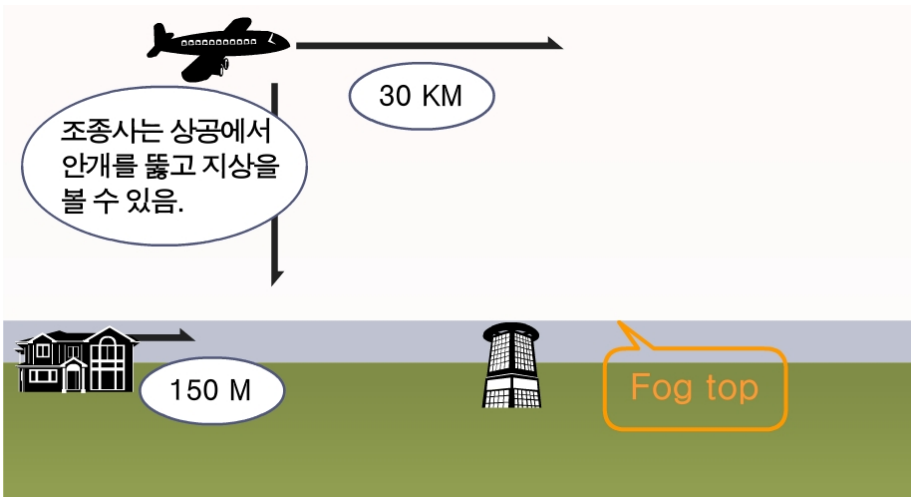


[그림 1.39] 연무층을 비행하고 있어 조종사가 지상 관측보다 더 나쁜 시정을 가질 수 있는 예

1.2 항공위험기상



[그림 1.40] 조종사가 높아진 연무층을 비행함에 따라 지상 관측에 비해서 훨씬 낮은 시정을 가지는 경우의 예



[그림 1.41] 종사가 안개층 위를 비행하는 상황. 조종사는 지상의 구조물들을 깨끗하게 확인할 수 있을 것이다. 그러나 지표면에 접근해서 안개층 안으로 들어가면 시정이 급격하게 떨어지는 것을 경험할 것이다.

5) 수치예보 자료들

안개 부분에서도 다루었지만 안개와 시정은 수치예보 자료에서 바로 제공되는 변수이다. 그러나 수치예보 자료를 그대로 예보에 활용하기 보다는 경험적 기법도 동시에 활용해서 조정할 필요가 있다.

1.2 항공위험기상

'기단성' 안개의 시정은 에어로졸의 수농도에 좌우된다. 비록 공기 중에 수증기가 많다고 하더라도 이들이 응결핵을 만나야 안개가 시작될 것이기 때문에 시정 값에는 습도 그 자체만으로 영향을 미칠 수 없다. 그러나 강수현상에 관련되어 있거나 이류하는 안개의 경우에는 에어로졸의 숫자와 시정과는 상관이 없을 수도 있다.

수치예보자료들로부터 얻어진 상층 단열선도를 통해 역전층의 존재를 확인할 수 있는데, 이 역전층의 높이가 연무의 꼭대기 고도가 될 수 있을 것이다. 상층 대기의 구조가 대류활동을 유도할 수 있는 형태인가는 연무층이 들려 올라갈 것인가 그 자리에 머물러 있을 것인가를 결정한다. 또한 대류활동에 의해서 연무가 연직으로 확산되어 연무층이 깨지도록 할 것인지에 대한 정보도 얻을 수 있다.

고해상도 모델이 아니라면 하층 역전층과 고기압에 의해서 오랜 기간 동안 형성되어 있는 뚜렷한 연무층의 존재를 확인하기 힘들 것이다. 역전층 아래에 형성된 기단은 가열과 냉각을 반복하면서 낮은 고도에 며칠 씩 갇혀 있을 수 있다. 이 경우 연무가 오랜 시간 동안 지속될 수 있다.

1.2 항공위험기상

1.2.9 모래폭풍과 먼지폭풍

1) 설명

먼지폭풍이나 모래폭풍은 먼지나 모래가 공중에 떠올라 있는 구역을 의미한다. 먼지와 모래는 바람에 이해서 떠오르며 난류와 불안정도에 따라 다양한 고도까지 상승한다.

명확하게 먼지와 모래 입자들은 다양한 크기 분포를 가지며 작고 가벼운 입자들은 더 쉽게 높은 고도까지 올라가고 더 오랫동안 공중에 부유해 있을 수 있다.

2) 항공기에 미치는 영향

먼지폭풍이나 모래폭풍은 시정을 급격하게 떨어뜨릴 수 있다. 어떤 환경하에서는 시정이 0마일까지 떨어지기도 한다.

먼지나 모래 입자들이 항공기 엔진 속으로 흡입되면 출력을 떨어뜨리는 원인이 될 수 있다.

먼지와 모래들이 조종실 안쪽에서까지 발견된다면 전기 계통 장비에 문제를 일으킬 수 있다.

3) 각종 영상 자료들을 이용한 위험 기상 진단

모래와 먼지폭풍은 표준 가시영상과 적외영상으로 분석할 수 있다. 최근에는 적외 채널의 파장 차이를 이용해서 모래폭풍과 먼지폭풍 구역을 구분하는 기법들이 적용되고 있다. 이들 영상들을 루프 기법으로 분석하면 이동경로를 파악하는데 유리하다.

1.2 항공위험기상

4) 경험적 예보 기법들

경험적으로 풍속 15kts는 먼지가 떠오르게 하기에 충분하다. 더 강한 바람은 더 큰 입자들 떠오르게 할 수 있다.

사막지역이 모두 항상 모래와 먼지를 잃는 지역은 아니다. 사막지역도 일부는 바위로 이루어져 있을 가능성이 높다. 따라서 예보관들은 먼지나 모래폭풍을 예보할 때는 그 발원지가 어디인지에 대해서 먼저 파악하고 있어야 한다.

좀 더 복잡한 일은 먼지나 모래가 어느 고도까지 상승할 것인지를 평가하는 것이다. 모래와 먼지가 높게는 15,000ft가지 떠오를 수 있는 것으로 알려져 있지만 대부분의 경우에는 3,000ft에서 6,000ft 사이에 머무른다. 첫 번째로 먼지와 모래가 떠오를 수 있는 고도의 한계는 건조단열감률이 끝나는 고도가 된다.

먼지나 모래 덩어리들의 이동을 고려할 때는 먼지와 모래가 존재하고 있는 다양한 고도의 바람의 궤적에 따라 퍼져 나갈 것이다. 따라서 지상풍은 먼지나 모래의 대부분이 어디로 흘러갈지 알려주는 최고의 증표가 될 수 없다.

10kts 이하의 바람이 분다고 가정할 때 일단 떠오른 먼지와 모래들은 난류와 불안정도에 따라 감소하는데 먼지는 시간당 1,000ft의 속도로 가라앉는다. 더 큰 입자들은 더 빨리 가라앉는다.

비는 먼지와 모래에 2가지 영향을 미친다.

- 일반적으로 비가 종료된 후 24시간 동안은 먼지나 모래가 떠오른 것은 억제될 것이다.
- 비는 대기 중의 먼지와 모래를 씻어내는 역할을 한다.

하부브(Haboob)

이 형태의 먼지/모래폭풍은 하부브(Haboob)라고 불리는 대류성 하강기류에 의해서 만들어진다. 간단하게 말해서 강한 대류성 하강기류가 지표면의 먼지와 모래를 떠오르게 하는 것이다.

1.2 항공위험기상

이 현상은 마이크로버스트에 동반된 돌풍전선이나 난류와 비슷한 형태라고 볼 수 있다. 하부브 현상에서 먼지나 모래가 떠오르는데 필요한 일반적인 풍속은 고려할 필요가 없지만, 하강기류에 의한 국지적인 바람의 가속과 불안정이 전체적인 현상을 이끄는 메커니즘이다.

5) 수치예보 자료들

수치예보 자료들은 이런 현상이 잦은 지역에서의 먼지와 모래폭풍 예측에 많은 도움을 준다.

지상풍 풍속 예보를 지속적으로 모니터링 함으로써 예보관은 어디에서 먼지와 모래가 떠올라질 것인지 지역을 결정할 수 있다. 단열선도는 먼지나 모래폭풍의 깊이를 평가하는데 활용할 수 있다.

적란운 구름에 의해서 만들어지는 하강기류와 하부브의 영향도 고려해야 한다.

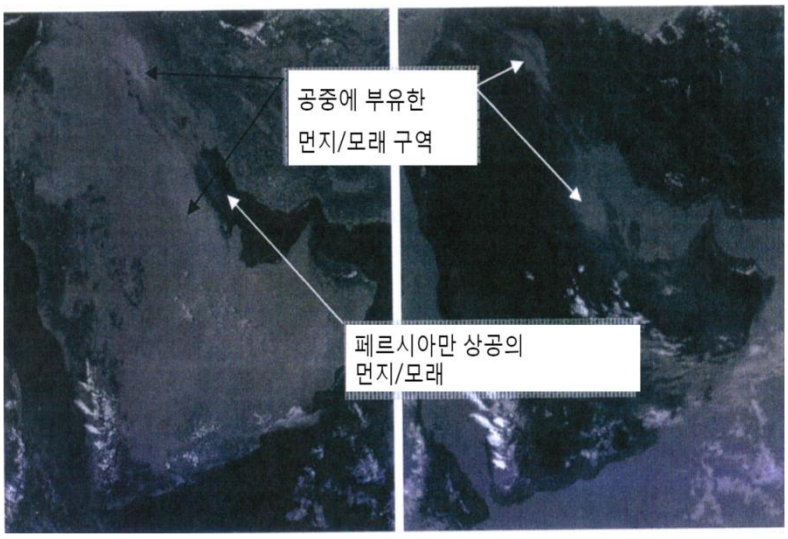
먼지의 형성과 확산을 방해하는 강수에 대한 예보 추적도 중요하다. 그러나 사막의 경우에는 모델에서 예보된 강수가 하층의 건조한 공기에 의해서 땅에 까지 도달하지 못하는 경우도 있다는 사실을 명심해야 한다.

수치예보 자료들 중에서 먼지나 모래(황사)의 수송을 예보하는 자료도 존재한다

1.2 항공위험기상

6) 사례 연구

그림 1.40은 먼지와 모래 폭풍이 발생한 지역에서 촬영된 위성영상이다. 이 먼지와 모래폭풍은 시리아와 이라크에서부터 시작되어 강한 샤말바람을 따라 남동쪽으로 이동해 가고 있다. 항상 똑 같지만 영상 루핑 기법은 좋은 실마리를 제공하지만 이들 영상만으로도 먼지와 모래폭풍이 발생한 지역을 구별할 수 있기를 기대한다.



[그림 1.40] 2005년 8월 7일 12 2UTC 가시영상(왼쪽)과 적외영상 (오른쪽)에 포착된 먼지/모래 폭풍

1.3 고도 수정법

1.3.1 서론

1.3.1.1 기압 – 고도 관계식

기압고도계(Pressure Altimeter)를 통해 비행고도를 feet 단위로 읽는 것은 기압과 고도와의 관계식에서 유도된 것이다. 이 관계식은

$$h = \frac{RT}{g} \ln\left[\frac{p_{surface}}{p_{upper}}\right]$$

여기에서 h는 고도, R은 기체 상수, g는 중력가속도, T는 공기의 평균 기온이다.

위의 방정식에 R과 g는 상수이므로 고도는 온도와 기압에 의해서 변화한다.

따라서,

$$h = 96\,T \ln\left[\frac{p_{surface}}{p_{upper}}\right]$$

가 되고, 고도 h는 feet 단위로 측정된다.

대부분의 항공기는 한 장소에서 다른 장소로 일정한 시간 동안 비행하기 때문에 온도와 기압의 공간적 시간적 변화가 기압고도계가 고도를 나타내는데 영향을 미친다.

과거에 가장 보편적으로 항공 분야에서 사용되던 대기압의 단위는 밀리바(mb)와 수은 인치(inchHg)이다. inchHg는 주로 군사 항공분야에서 많이 사용된다.

1.3.1.2 기압의 단위

현재 대부분의 기상 기관과 세계기상기구(WMO)에서 사용하는 기압의 단위는 헥토파스칼(hPa)이다. 1hPa은 1mb와 거의 동일하다.

1hPa ≡ 1mb,

따라서 1013.25hPa = 1013.25mb

1.3 고도 수정법

1hPa = 0.002953inchHg

따라서 1013.25hPa = 29.92inchHg 가 된다.

1.3.2 기압고도계

기압고도계는 항공기에 기본적으로 장착되는 장비로 아네로이드 기압계를 기본으로 하고 있다. 기압고도계는 만약 대기가 ICAO가 정한 표준대기(ISA)(부록 참조)와 일치한다면 기압의 변화에 따라 선형적으로 해당되는 고도를 표시하도록 하고 있다.

위의 방정식들에서 보는 것처럼 실제 고도는 실제 평균온도를 사용하여 구한다는 것을 알 수 있다. 따라서 보정된 지시고도가 실제고도와 일치하도록 하려면 다음과 같은 식을 따라야 한다.

$$\text{실제고도} = \frac{\text{지시되는 고도} \times \text{실제평균온도}}{ICAO\ \text{표준대기 평균온도}}$$

기압고도계에는 기압을 표시할 수 있는 하부척도(Sub-scale)들이 표시되어 있다. 기압계의 세팅을 이 하부척도들 표시하는 고도로 조정하면 고도계는 원하는 고도 예를 들면 해면 고도를 0으로 맞추어질 수 있도록 조정된다. 이러한 세팅 작업에 주로 이용되는 하부규모 기압들은 표 1.6과 같다.

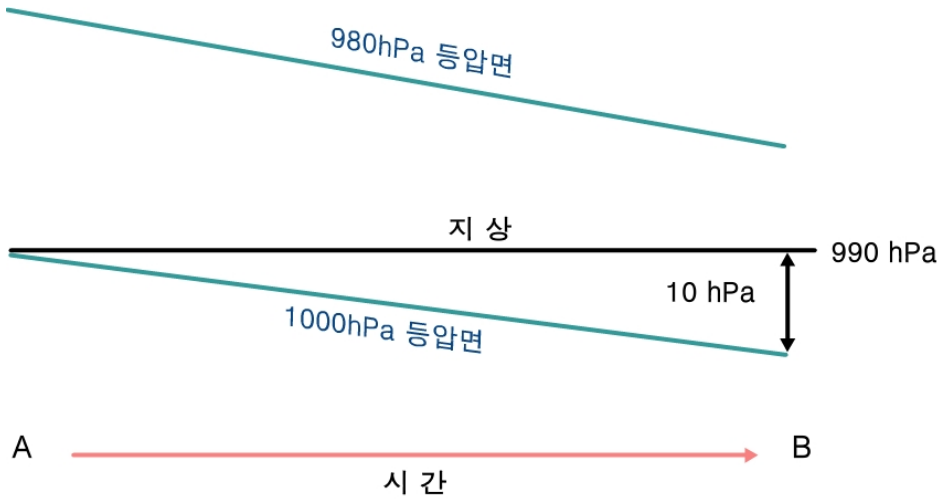
[표 1.6] 하부규모 기압

Q 코드 약어	의미
QFE	공항 해발고도에서의 대기압
QFF	평균해면고도로 수정된 기압계상의 기압
QNH	고도계가 지상에서 공항해발고도를 표시하도록 하는 기압 하부척도
QNE	고도계 하부척도를 1013.2hPa로 조정했을 때 고도가 지상고도(0)를 지시하도록 하는 척도
예보된 QNH	1시간의 유효시간을 가지는 예보된 QNH 값.

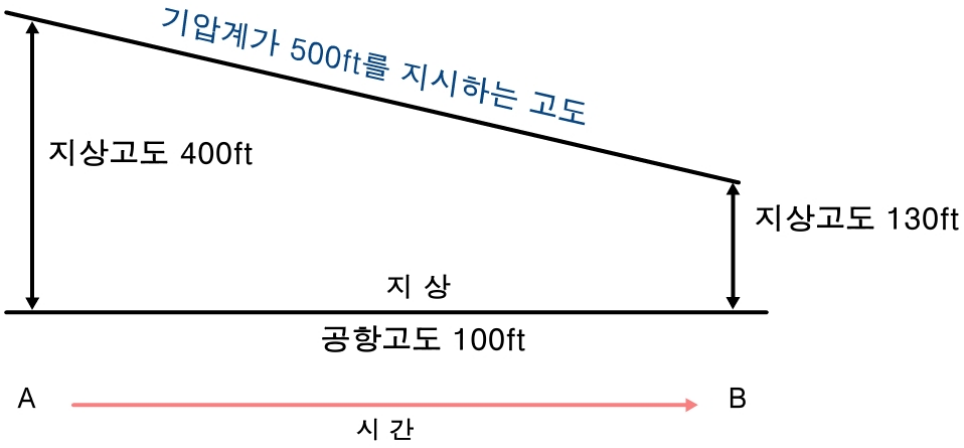
1.3 고도 수정법

고려사항 : 조종사는 출발하기 전에 최신 QNH 값을 기압고도계에 세팅한다. 예를 들면 1000hPa을 세팅하면 기압고도계는 그에 해당하는 고도인 100ft(관측소해발고도)를 지시한다. 그리고 조종사는 비행을 종료한 후에 그 비행장에 다시 착륙하게 된다.

만약 기압이 비행하는 동안 그대로 유지가 된다면 QNH가 동일하기 때문에 착륙하는 항공기의 기압고도계는 100ft를 지시하고 있을 것이다. 반면 기압이 10hPa이 떨어진다면 착륙하는 항공기가 지시하는 고도는 327ft(1hPa 당 27ft 상승)가 될 것이다. 이러한 상황은 그림 1.41a에 묘사되고 있다. 만약 이러한 상황에서 조종사가 계속해서 기압고도계가 지시하는 고도인 500ft로 비행을 한다면 마지막 착륙을 시도하는 단계에서 지상으로부터 130ft 밖에 여유가 없을 가능성이 있다(그림 1.41b 참조).



[그림 1.41a] 시간에 따른 기압의 하강



[그림 1.41b] 시간에 따른 기압 하강이 원래 QNH 값을 세팅하고 비행한 항공기의 계기 상의 고도와 실제 지상고도와의 차이를 만든 예

1.3 고도 수정법

반대의 경우도 상정할 수 있다. 만약 기압이 같은 10hPa 만큼 상승한다면 고도계는 착륙한 이후에 -170ft를 지시하고 있을 것이다.

이러한 경우에 기압이 떨어지고 있는 곳을 비행하는 조종사는 자신이 기압 고도계의 지시를 따라 비행하고 있는 고도가 실제보다 낮다는 사실을 인지하지 못하고 있을 가능성이 높고 이 경우 치명적인 상황이 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 기압의 변화가 있을 것을 가정하여 착륙 전에 도착 공항의 QNH를 다시 세팅해 주어야 한다.

1994년 12월 화물기가 영국 코번트리 공항에 착륙을 시도하던 중 활주로에 미치지 못하고 추락하여 5명의 승무원이 사망한 사건이 있었다. 사건의 조사 결과를 보면 외국인 조종사가 고도계를 세팅할 때 잘못된 QNH 값을 입력했고 정해진 하강 경로보다 수백 피트 낮게 하강 경로를 지정해서 착륙을 시도할 것으로 추정되었다.

기압 값이 중요하기 때문에 전달하는 과정에서의 오류의 위험성을 감안해서 예보관들은 관측표를 신중히 체크해야 한다. 최근에는 자동관측장비에서 관측된 관측소 기압을 토대로 QNH 값이 자동으로 생산되어 예보관과 관제탑에 전달되기 때문에 이런 오류가 거의 발생하지 않지만 항상 관측표를 수시로 점검하여 자동관측장비와 비교하고 관재탑에 알려주어야 한다.

조종사들이 다음과 같은 일반적인 기상학적 규칙을 기억하고 있다면 훨씬 좋을 것이다.

“북반구에서 바람이 왼쪽에서 불어오면 고도계는 실제보다 높게 지시하고, 바람이 오른쪽에서 불어오면 고도계는 실제보다 낮게 지시하는 경향이 있고, 바람이 강할수록 오차는 커진다.”

1.3.3 라디오 고도계

라디오 고도계는 아래쪽에 놓인 지표면에 전자기파를 발사해서 반사되어 오는 시간으로 항공기의 고도를 측정한다. 다양한 형태의 라디오 고도계가 있는데 라디오 고도계는 기본적으로 실제 비행고도를 측정하는 것을 목적으로 하며 기상 요소에 영향을 많이 받는다. 유일한 결점은 지상으로부터의 고도를 표시하기 때문에 지형의 기복에 따라 고도계가 수시로 다양한

1.3 고도 수정법

고도를 지시할 수 있다는 것이다. 그리고 라디오 고도계는 모델에 따라서 다르겠지만 항공기가 어떤 정해진 값 이상으로 좌우나 상하로 선회할 경우 전자기파가 지상에 도달하지 못하거나 회절되면서 제대로 고도를 측정하지 못하는 경우가 있다. 따라서 기압고도계가 공항에 접근하거나 착륙하는 단계에서는 유리하다. 그러나 기압고도계도 착륙 시에는 라디오 고도계와 함께 사용하는 것이 좋다.

1.3.4 기압 고도

기압고도는 국제표준대기에서 표준기압인 1023.2를 기압고도계에 세팅시켰을 때 고도계가 지시하는 고도로, 이러한 하부척도 세팅을 '표준 기압계 세팅'이라고 부른다. 비행고도(FL : Flight Level)는 기압 고도로 100ft 단위로 측정된다. 예를 들어 FL300은 기압 고도가 30,000ft라는 것을 의미하는데 이 고도는 300hPa 등압면 고도와 같다.

$$PA = Elevation + 28(1013.2 - QNH)$$

여기에서 고도(Elevation)는 공항의 고도를 ft 단위로 나타낸 것이고 QNH는 예상되는 QNH를 0.1hPa 단위로 표시한 것이고, PA는 기압 고도를 ft 단위로 표시한 것이다.

1.3.5 밀도 고도

ICAO 국제표준대기에서는 탁월한 지배적인 밀도류가 발생할 경우 밀도 고도가 실제 고도와 동일한 것으로 간주된다. 밀도 고도는 항공기의 운영과 양력 특성에 중요한 요소로 간주된다.

1.3.6 D values

D value는 기본 기압계 세팅을 1013.2에 맞추고 비행하고 있는 항공기가 고도계에 실제 비행하고 있는 해면 고도를 표시할 수 있도록 보정해 주는 값을 의미한다.

1.3 고도 수정법

D value는 항공기가 정확하게 실제 비행고도를 알아야 하는 연구용, 지형지도 제작, 군사적 목적을 가진 사용자에게 필요한 것이다. D value는 가장 가까운 라디오존데 관측자료에서 계산되며 대부분의 경우 좋은 값을 제공하지만 라디오존데 관측자료가 너무 오래된 것이거나 정확한 지역에서 관측되지 않은 것이라면 문제가 발생할 수 있다.

1.3.7 예보 QNH

예보 QNH(FOQNH)는 국지기압세팅으로도 불리는데, 한 시간 동안 정해진 지역에서 나타날 수 있는 가장 낮은 QNH 값을 의미한다. 영국의 경우에는 21개의 고도계세팅구역(ASR : Altimeter Setting Region) 이 있는데 이 구역들은 다시 4개의 단위 구역으로 나눠지고 이 지역들에 대해서 FOQNH가 제공된다. FOQNH를 사용하는 목적은 조종사가 비상 상황에 처했을 때 보다 많은 회복 공간을 확보할 수 있도록 하기 위해서다.

비행정보구역(FIR : Flight Information Region)의 특정한 고도들을 비행하는 항공기들은 지정된 구역을 지날 때 FOQNH를 사용해야 하고 다른 고도계수정구역으로 넘어갈 때에는 그 값을 수정해 주어야 한다. 그 이유는 동일한 지역을 비행하는 항공기들이 모두 동일한 정보를 가지고 비행하도록 하기 위함이다. 이 작업은 관제사가 항공기들을 적절하게 수직 분리하여 비행 안전을 도모하기 위한 것이다.

만약 FOQNH가 5hPa 이상의 오차를 가지는 것이 발견되면 즉시 수정 FOQNH,가 발표된다. 수정된 값들은 그 값이 적용되기 전 시간에 전문이나 속보를 통해서 제공된다.

지점(Target)에 대한 FOQNH. 어떤 군사적 외교적 목적을 위하여 특정한 지점을 비행하는 경우 조종사는 원하는 시간에 그 지점의 FOQNH를 요구할 수 있다.

일반 예하 기상대에서는 고도계세팅구역에 대한 FOQNH를 결정하면 안된다. 고도계세팅구역 FOQNH는 중앙 기상센터에서 생산되어 항공운영센터를 통해서 조종사에게 제공되어야 한다. 동일한 시간과 지역에 다른 FOQNH가 제공되면 항공기들이 충돌사고를 일으킬 가능성이 높다.

1.3 고도 수정법

1.3.8 고도계 오류

고도계는 대기의 상태가 국제표준대기(ISA)와 잘 맞으면 정확한 고도를 지시할 것이다. 그러나 이런 경우는 매우 드물기 때문에 예보관들은 고도계가 잘못 지시하여 조종사가 고도를 착각하는 사태가 발생할 수 있다는 것을 인식하고 있어야 한다.

항공기가 비행하는 고도의 주변 공기 온도가 ISA 프로파일로부터 벗어나 있으면 그것은 곧 고도계 지시 오류로 나타난다. 온도가 표준대기로부터 10℃ 벗어나 있으면 4%의 오차를 가지게 되는데 온도가 표준대기보다 낮으면 고도계가 실제보다 높은 고도를 지시하게 된다. 조종사가 실제 비행하고 있다고 믿고 있는 고도보다 항공기가 낮은 고도를 비행하고 있으면 매우 위험할 수 있다. 겨울철에는 보통 야간에 지상 기온이 -5℃ 이하로 떨어지게 되는데, 이것은 표준대기 보다 20℃ 낮은 것으로 약 8%의 오차를 발생시킬 수 있다.

다른 고도계 오류는 기계적 결함이나 조종사의 입력 실수에서 기인한다.

예보관이 기상 조건에 따른 QFF와 QNH의 관계를 이해하고 있으면 매우 유용하다. 두 가지 모두 기압고도계 세팅을 '평균해수면으로 조정'하지만 서로 다른 값을 지시할 수 있다. 왜냐하면 QHN는 표준대기 상태를 가정한 것이고, QFF는 그 기지의 우세한 평균 온도를 사용하고, 평균해수면고도에서는 등온을 가정하기 때문이다.

아래의 표 1.7은 QNH와 QFF의 관계를 평균 해수면 고도보다 높을 때와 낮을 때, 표준대기보다 따뜻하거나 차가울 때에 대해서 나타낸 것이다.

[표 1.7] QNH와 QFF의 관계

	평균해수면 고도보다 높음	평균해수면 고도보다 낮음
국제표준대기 보다 따뜻함	$QFF < QNH$	$QFF > QNH$
국제표준대기 보다 차가움	$QFF > QNH$	$QFF < QNH$

QFF가 상대적으로 정확하지만, 항공기의 고도계들은 ISA에 초점을 두고 만들어진 것이기 때문에 QNH를 세팅하는 것이 맞다.

1.3 고도 수정법 – 부록 1

ICAO 세계표준대기(ISA)의 주요 고도별 기압과 온도

고도(ft)	기압(hPa)	온도(℃)
40,000	188.2	-56.5
35,000	239.1	-54.2
30,000	301.5	-44.3
25,000	375.6	-34.5
20,000	466.0	-24.6
15,000	572.0	-14.7
10,000	696.9	-4.8
5,000	843.1	+ 5.1
2,000	942.1	+ 11.0
0	1013.25	+ 15.0
-1,000	1050.4	+ 17.0

ICAO ISA 주요 특성

평균해면고도 : 기압 1013.25, 온도 15℃, 밀도 1.225g/m^3.

평균해면고도~11km(36,090ft) : 1km 당 6.5℃ 기온 감소 (대류권)

11km ~ 20km(65,617ft) : -56.5℃ 등온 (성층권)

20km ~ 32km(104,987ft) : 1km 당 1℃ 온도 상승 (중간권)

1.3 고도 수정법 – 부록 2

FOQNH 전문 예

Eample of forecast QNH message

Bulletin time 061200

01314	01011	02014	03014	04017	05017
07022	08019	09017	10027	11024	12018
13023	14017	15021	16005	17012	18005
19012	20015	21995	22005	23017	24017
25017=					

전문 발표 시간 : 해당 월의 6일 1200UTC

전문 유효 시간 : 해당일 1300UTC~1400UTC

이어지는 값들은 고도계세팅구역(ASR) 번호 2자리, 예보되는 가장 낮은 QNH값

예를 들어 ASR 01구역에 대한 가장 낮은 QNH 값은 1011hPa, 02는 1014hPa임.

우리나라에서는 기압예보를 별도로 발표하지 않고 이륙예보에 포함하여 매시간 발표한다.

1.4 METAR와 TREND 코딩

1.4.1 서론

항공기상에서는 METAR(METeorological Aerodrome Report)라고 불리는 특수한 코드를 통해 기상 관측자료를 교환한다. METAR에 포함되어 보고해야 할 요소는 다음과 같다.

- 두문(METAR or SPECI)
- 비행장 ICAO 식별부호
- 관측 날짜와 시간
- 풍향과 풍속
- 시정
- *활주로 가시거리(RVR)*
- 기상 현상
- 구름
- 온도와 노점 온도
- 기압-QNH
- *최근 특이 기상*
- *윈드시어 정보*
- 경향(TREND)
- *활주로 상태(눈이 활주로를 덮고 있으면 보고)*

위에서 표시된 모든 요소를 보고할 필요는 없다. 이탤릭체로 표시된 정보는 필요 시에만 포함되고 보통은 포함하지 않는다.

이런 구분은 예보관이나 조종사들이 METAR 전문을 사용하고 이해하는데 도움을 주기 위해서이다. 민간 공항은 완전한 형태의 METAR 전문을 보고하지만 군용 비행장은 주로 진하게 된 부분만 보고하는 경우가 많다. 두문으로 METAR 대신에 SPECI를 사용하기도 하는데, 이는 기상 조건이 어떤 기준보다 나빠지거나 좋아질 때 실시하는 특별 관측 전문임을 의미한다.

1.4 METAR와 TREND 코딩

1.4.2 METAR

아래 전문은 겨울철에 소낙성 강수가 내리는 상황을 보여주는 METAR 전문의 예이다(두문에는 날짜와 시간이 포함됨).

METAR	RKSI	141250Z	12025G40KT	030V160	4000	+ SHRASN
	SCT004	BKN012CB	02/M03	Q0995	RMK	WS RWY040
	BECMG	FM1330	9999	NSW	FEW015	=

전문에서 밑줄로 표시한 부분은 경향예보인 TREND 부분인데 이는 1.4.5항에서 자세하게 다루기로 하겠다. 다음 항들은 METAR 전문 그룹들에 대한 설명이다.

1.4.2.1 공항 지시자

RKSI

이것은 ICAO가 지정한 공항 지시자이다. 앞의 2자리 대문자는 해당 국가에 대한 지시자로 한국은 RK, 북한은 ZK, 중국은 ZB, 일본은 RJ 등으로 표시한다. 미국과 같이 면적이 넓은 국가에는 공항이 많기 때문에 1자리의 영문 대문자로 표시하는데, 예를 들어 미국은 K로 표시한다. 공항 지시자에 따라서 나오는 2자리(미국은 3자리) 대문자는 해당 공항을 가리키는 지시자이다. 예를 들면 RKSI = 인천 국제공항, RJAA = 일본신국제공항, KJFK = 미국 케네디 국제공항 등이다.

1.4.2.2 날짜와 시간

날짜와 시간은 METAR의 3번째 그룹에 들어간다. 날짜는 해당 월의 날짜를 사용하고, 시간은 UTC를 사용하는데 'Zulu'라고 부르고 뒤에 대문자 Z를 붙인다. METAR는 군용 비행장은 HH+50분에, 민간공항은 HH+20분과 HH+50분에 발표한다. 이것은 SYNOP 전문이 1시간에 1번 HH+00에 발표되는 것과 차이가 난다.

METAR	RKSI	141250Z	12025G40KT	030V160	4000	+ SHRASN
	SCT004	BKN012CB	02/M03	Q0995	RMK	WS RWY040
	BECMG	FM1330	9999	NSW	FEW015	=

위의 METAR 전문은 14일 1250UTC에 발표된 것이다.

1.4 METAR와 TREND 코딩

1.4.2.3 바람

METAR RKSI 141250Z 12025G40KT 030V160 4000 +SHRASN

위의 METAR에서 바람은 '풍향 120°, 평균 풍속 25KTS, 최대풍 40KTS'를 의미하며, '120 degree, mean speed 25, gusts 40'라고 읽는다. 앞의 **풍향**을 나타내는 3자리 숫자는 바람이 **불어오는 방향**을 **진북방향**으로부터 10° 단위로 구분하며, 다음 2 자리 숫자는 10분 동안 평균 풍속을 말하며, 풍향도 10분 평균 풍향을 사용한다. 다음 G다음에 나오는 2 자리 숫자는 지난 10분간의 순간 최대풍으로 평균 풍속이 10kts 이상 일 때 사용하고 G를 붙여서 순간 최대풍임을 나타낸다. 만약 순간 최대풍이 없을 경우에는 G다음 부분은 생략한다. 뒤에 따라오는 두 자리 대문자는 풍속을 나타내는 단위인데, 대부분의 유럽과 군에서는 kts를 사용하지만, ICAO 표준은 km/hour(KMH)이다. 일부 동유럽 국가들에서는 m/s(MPS)를 사용하기도 한다.

1) 풍향 변화(군용 비행장에서는 사용하지 않음)

METAR RKSI 141250Z 12025G40KT 030V160 4000 +SHRASN

이 그룹은 풍향에 대한 부가적인 정보로 풍향이 가변적인 경우에 사용한다. 위 전문에서 030V160은 바람이 030°에서 160°도 까지 수시로 변한다는 것을 말하고 V는 가변이라는 의미이다.

1.4.2.4 시정

METAR에 포함되는 기상학적 시정은 적어도 관측자 중심으로 수평원의 절반 이상 혹은 비행장 지표면의 절반 이상에 해당하는 시정 값을 의미한다. 시정이 비행장에 전체적으로 연속적으로 나타나든 부분적으로 단절적으로 나타나든 절반 이상을 차지하는 시정 값을 보고하는데 이를 우시정(Prevailing Visibility)이라고 부른다.

METAR RKSI 141250Z 12025G40KT 030V160 4000 +SHRASN

이 그룹에서 시정은 미터(m) 단위로 정해진 기준에 따라서 간격을 두고 보고한다. 만약 우시정 이외에 특이한 방향으로 특별한 시정 장애가 나타나면 그 현상도 보고할 수 있다. 이것은 특히 공항 일부에 안개가 끼어 있을 때 유용하게 사용할 수 있다. 우시정을 먼저 보고 한 후에 부분 시정의 값과 방향을 표시한다. 이 때 부분 시정은 그 방향의 최저 시정이 1500m

1.4 METAR와 TREND 코딩

미만이거나 우시정의 50% 미만일 때에만 보고할 수 있다.

예)

METAR RKSI 141250Z 12002KT 8000 1200N BCFG

혹은

METAR RKSI 141250Z 12002KT 8000 3500W BCFG

군용 METAR에서 시정은 우시정이 다음과 같은 단계에 있을 때 다르게 표현한다.

- 시정이 800m 까지는 50m 단위로 보고하고 50미터 이하의 거리는 버린다. 예를 들어 360m는 0350으로, 40m는 0000으로 보고한다.
- 시정이 801m에서부터 5,000m 사이인 경우에는 100m 단위로 보고하고 100단위 이하는 버린다.
- 시정이 5,001m에서 9,999m 까지는 1,000m 단위로 끊어서 보고한다.
- 시정이 10km를 넘으면 9999로 코딩해서 보고한다.

1.4.2.5 현재 기상

METAR RKSI 141250Z 12025G40KT 030V160 4000 +SHRASN

이 그룹은 기상 현상을 설명하는 그룹이다. 현재기상 그룹은 그룹 당 9자리까지 3개의 분리된 그룹으로 나누어 보고할 수 있다. 현재기상 그룹은 한정사를 먼저 나타내고 그 다음에 기상 요소를 보고한다. 한정사는 강도(아래 표 1.8의 첫 번째 줄에 나오는 + 기호는 강하다는 의미)와 서술자로 구성된다. 위의 전문에서 강도(+) 다음에 사용된 서술자 SH는 '소낙성 강수'를 나타내는 서술자이다. 표 1.8의 오른쪽 부분은 2자리 대문자로 이루어진 독립적인 기상 현상들로 여러 가지 현상을 붙여서 실제 기상현상을 설명할 수 있다. 따라서 위의 전문 +SHRASN은 "강한 소낙성 비와 눈이 섞여서 내리는데 비가 우세하다"라는 의미가 된다.

기상현상 약어 GR은 우박의 지름이 5mm 이상일 때에만 사용한다.

기상현상 약어 BR, FU, HZ, DU, SA (DRSA 제외)는 보고되는 현상으로 인해 시정이 5,000m 이하(군 기상대는 10km 이하) 일 때만 사용할 수 있다. 한정사 없이 FG를 보고할 때는 시정이 1,000m 미만이어야 하며, MI나

1.4 METAR와 TREND 코딩

VC를 사용할 때는 시정이 1,000m 이상이어야 한다. 지상 2m의 시정인 MIFG를 사용할 때는 시정이 1,000m 이상 이어야 한다.

[표 1.8] WMO에서 규정한 METAR와 TAF에 사용되는 주요 기상 현상들

한정사				기상 현상					
강도, 근접성		서술자		강 수		시정장애		기타	
1		2		3		4		5	
-	약함	MI*	얇음	DZ	이슬비	BR	연무	PO	모래/먼지
		BC*	조각	RA	비	FG	안개		회오리
(없음)	보통	DR	낮게 날림	SN	눈	FU	연기	SQ	스콜
		BL	높게 날림	SG	가루눈	VA	화산재	FC	깔대기구름
+	강함	SH	소낙성	IC	세빙	DU	먼지	SS	모래폭풍
		TS	뇌우	PE	얼음싸라기	SA	모래	DS	먼지폭풍
VC*	근처 (8km 이내)	FZ	과냉각	GR	우박	HZ	박무		
		PR*	부분 덮임	GS	작은 우박				
		* :	FG와 함께 사용						

1.4.2.6 구름

METAR RKSI 141250Z 12025G40KT 030V160 4000 + SHRASN
SCT004 BKN012CB 02/M03 Q0995 RMK WS RWY040 SCT004
BECMG FM1330 9999 NSW FEW015 =

이 그룹은 구름 그룹으로 운량이 먼저 나오고 운고가 나온다. 운형은 적란운(CB)이나 탑상적운(TCU)이 관측되었을 때 사용한다. 구름의 그룹은 3개를 넘지 말아야 한다. 그러나 만약 CB나 TCU가 처음 3개의 그룹에 포함되어 있지 않은 경우에는 3개를 넘을 수도 있다.

1.4 METAR와 TREND 코딩

운형이 CB나 TCU가 아니라면 5,000ft 이하의 구름만 보고한다. 구름 그룹은 고도, 운량 순으로 보고한다.

1. 가장 낮은 층은 운량에 상관에 없이 보고(5,000ft 이하)
2. 다음 구름 층은 2옥타 이상만 보고(5,000ft 이하)
3. 그 다음 구름 층은 4옥타 이상만 보고(5,000ft 이하)

지금까지 포함되지 않은 CB나 TCU는 높이와 운량을 보고한다.

[표 1.9] METAR 전문에서 사용하는 운량 약어

운 량
FEW = few(1 ~ 2옥타)
SCT = scattered(3 ~ 4옥타)
BKN = broken(5 ~ 7옥타)
OVC = overcast(8옥타)

운량은 표 1.9와 같이 약어를 사용한다. 운고는 100ft 단위로 보고한다. '000'은 구름의 운저고도가 100ft 미만이란 뜻이다. 위의 전문에서 구름이 400ft에 scattered, 1,200ft에 broken으로 분포하고 있음을 의미한다.

하늘이 완전히 가려져 있으면 VV///를 구름 그룹에 사용한다. 이때 ///는 100ft 단위의 수직 시정으로 대체할 수 있다. 'NSC'(No Significant Cloud)는 하늘에 구름이 없거나 보고할 만한 구름이 없다는 뜻이다. 'NSC'는 CAVOK을 사용하지 않을 때 사용한다.

1.4.2.7 온도

METAR RKSI 141250Z 12025G40KT 030V160 4000 +SHRASN SCT004 BKN012CB 02/M03 ...

이 그룹은 건구 온도와 노점 온도로 구성된다. 사선(/)으로 두 가지 온도를 구분하는데, 건구 온도가 항상 먼저 온다. 온도는 2자리 숫자로 구성되고 영하의 기온은 접두어 M을 붙인다. 온도는 정수로 표시하는데 반올림을 할 때는 따뜻한 쪽으로 올려준다. METAR에서 온도는 ℃를 단위로 사용한다.

1.4 METAR와 TREND 코딩

1.4.2.8 기압

METAR RKSI 141250Z 12025G40KT 030V160 4000 + SHRASN SCT004 BKN012CB 02/M03 Q0995 ...

이 그룹은 관측된 기압을 해면 기압으로 보정하여(QNH) 보고한다. 접두어 Q는 기압을 나타내는 접두어이며 만약 수은 인치 단위를 사용한다면 접두어 A를 사용한다. 기압은 4자리 숫자로 보고하는데 소숫점 이하는 제외한다. QNH가 995.8hPa이면 Q0995로 보고한다.

1.4.2.9 최근 기상

METAR RKSI 141250Z 12025G40KT 030V160 4000 + SHRASN SCT004 BKN012CB 02/M03 Q0995 RMK WS RWY040 ...

이 그룹은 최근 특이 기상 그룹이다. 이 **보충그룹**은 지난 시각 METAR 보고 이후 발생한 비록 짧은 시간동안이라도 특이한 기상 현상이 있을 때 사용하며 앞에 RE를 붙인다. 최근 기상은 아래 사항에 주의하여 보고한다.

- 최근 기상 보고에는 강도를 나타내는 한정사를 사용하지 않는다.
- 한 개 이상의 최근 기상이 존재 할 때는 **최대 3개** 까지 보고한다. 예를 들어, 보통 우박을 동반한 뇌우가 있은 후 보통 소나기가 내렸으면 RMK RESHGR RESHRA로 보고한다.
- 강도가 보통 혹은 강한 강수를 최근 기상으로 보고하는데 이 기간 동안 같은 강수형태에서 강수가 종료되거나 강도가 줄어든 경우에 사용한다. 어는 비 혹은 어는 이슬비는 종료되거나 강도가 줄어들었더라도 강도 약, 중, 강에 상관없이 모두 보고한다.
- 최근 뇌우를 보고할 때는 **적어도 지난 10분 동안** 천둥소리가 들리지 않았어야 한다. 10분 이내에 천둥소리가 들렸다면 관측시간 이전이었다고 하더라도 '**현재 기상**'으로 보고한다.

예)

1. 지난 관측 이후 강한 눈이 내렸으나 관측 시간에는 약해진 경우
   - SN으로 현재기상을 보고한 후, RESN으로 최근 기상을 보고한다.
2. 지난 관측 이후 보통 소나기가 내렸으나 계속해서 그 소나기가 보통 비로 바뀌어 내리는 경우
   - RA로 현재기상을 보고한 후, RESHRA으로 최근 기상을 보고한다.

1.4 METAR와 TREND 코딩

3. 지난 관측 이후 보통 비를 가진 뇌우가 있었으나 지금은 소멸한 경우
- 현재 기상은 없이 RMK RESHRA으로 최근 기상을 보고한다.

1.4.2.10 바람 시어

METAR RKSI 141250Z 12025G40KT 030V160 4000 +SHRASN SCT004 BKN012CB 02/M03 Q0995 RMK WS RWY040 ...

WS는 바람 시어 그룹을 나타낸다. RWY040은 바람 시어가 활주로 040에 영향을 미친다는 뜻이다. ALL RWY는 바람 시어가 공항 전체에 영향을 미칠 때 사용한다

1.4.3 활주로 가시거리(RVR) (군용 비행장에서는 사용하지 않음)

위에서 예를 들었던 METAR 전문에는 활주로 가시거리가 빠져있다. 활주로 가시거리 그룹은 접근 경로 상의 시정이 보고되는 수평 시정과 확연히 다르게 수평 저시정(1,500m 미만)이 나타났을 때 사용하는 그룹이다. 이 보고는 항공기 착륙구역(Touchdown Zone)에 대해서만 보고한다.

활주로 가시거리는 두문 R을 사용하며 활주로 방향을 먼저 사용하고 사선(/)을 한 다음에 시정을 적는다. 다음은 활주로 가시거리가 포함된 METAR의 예이다.

METAR RKSI 200850Z 22003KT 0350 R24/066 FG VV/// 02/02 Q1021=

위의 전문에서 수평 우시정은 350M이지만 활주로 240도는 시정 600M에 하늘이 완전히 가려져 있다는 뜻이다.

다음 METAR 전문은 활주로 가시거리를 보다 복잡하게 표시한 예이다.

METAR RKSI 242250Z 22003KT 0350 R09L/1000D R09R/1000V060U R09C/1000N FG VV/// 02/02 Q1021=

1.4 METAR와 TREND 코딩

위의 전문은 RVR 관측 장비가 구비된 3개의 평행한 활주로를 가지는 대형 공항의 예로 활주로 09의 왼쪽(R09L)의 가시거리가 1,000m이고 10분 평균 시정이 떨어지고 있는 추세(D)이며, 활주로 09의 오른쪽(R09R)의 1분 평균 가시거리가 최대 1,000m이면서 지난 10분 동안 600m까지 시정이 나타났고(1000V060) 전반적으로 시정이 올라가고(U) 있음을 뜻하다. 또한 활주로 09 중앙(R09C)의 가시거리가 1,000m이고 지난 10분 동안 시정의 변화가 없었다(N)는 뜻이다. 여기에서 사용되는 U는 RVR 값이 증가하는 경향을, D는 RVR 값이 감소하는 경향을, N은 뚜렷한 변화 경향이 없음을 의미한다.

1.4.4 CAVOK

한 특별한 예로 시정이 좋고 뚜렷한 특이 기상이 없으며, 구름은 존재하더라도 보고할 정도가 아닌 경우에 사용하는 용어가 CAVOK(Cloud And Visibility OK)이다. 관측 시간에 CAVOK을 보고할 수 있는 상세한 기상상태는 다음과 같다.

- 시정이 10km 이상
- 5,000ft 이하에 구름이 없거나, 구름이 있더라도 보고 최저고도 보다 높은 경우
- 적란운이 없는 상태
- 표 1.7에 나타난 기상현상이 관측되지 않은 경우

다음은 CAVOK을 이용한 METAR 전문의 예이다.

METAR RKSI 300350Z 25015G25KT CAVOK 18/08 Q1030=

1.4 METAR와 TREND 코딩

1.4.5 TREND (경향 예보)

TREND는 METAR의 마지막에 덧붙이는 것으로 관측 후 2시간 동안의 경향을 예보하는 것이다. TREND는 일어날 것으로 예상되는 실제 기상 상태의 변화를 보고한다. 군에서는 TREND를 사용할 때 색깔로 그 상태를 표시한다.

TREND는 공항이 정상적인 비행을 하기 위해서 열려있고 예보관이 업무에 임하고 있는 경우에 사용한다.

예를 들어 'BECMG FM1330 9999 NSW FEW015='로 보고된 전문은 '1330UTC부터 시정이 10km 이상이고, 특별한 기상 현상이 나타나지 않으며, 하늘 상태가 1500FT에 FEW로 바뀔 것'임을 의미한다. 비행장예보(TAF)에서 사용하는 경향예보 방식과 비슷하지만, 민간 공항에서 사용하는 TREND는 확률을 의미하는 'PROB'를 어용하지 않는다.

만약 TREND가 적용되는 기간이 끝날 때까지 어떤 형태의 기상 호전도 발생하지 않을 경우 '특이 변화 없음(NOSIG : NO SIgnificant chanGe)'을 사용한다. NOSIG가 TREND가 유지된다는 뜻으로 알려지면서 경향예보에 가장 많이 사용되고 있다.

1.4 METAR와 TREND 코딩

1.4.5.1 민간 공항

민간 공항에서 보고되는 METAR에 경향예보(TREND)가 포함되어야 하는 기준은 아래의 표 1.10과 같다.

[표 1.10] 민간 TREND 기준

BKN/OVC의 운량을 갖는 가장 낮은 층의 운저가 단계별로 변화하거나, BKN/OVC에서 NIL/SCT로 바뀌거나, NIL/SCT에서 BKN/OVC로 바뀌는 경우	시정이 한 단계에서 다음 단계로 바뀌는 경우
5,000ft 이상	10km 이상
1,500ft ~ 4,900ft	5,000m ~ 9km
1,000ft ~ 1,400ft	1,500m ~ 4,900m
500ft ~ 900ft	800m ~ 1,400m
200ft ~ 400ft	350m ~ 750m
100ft 이하	300m 이하

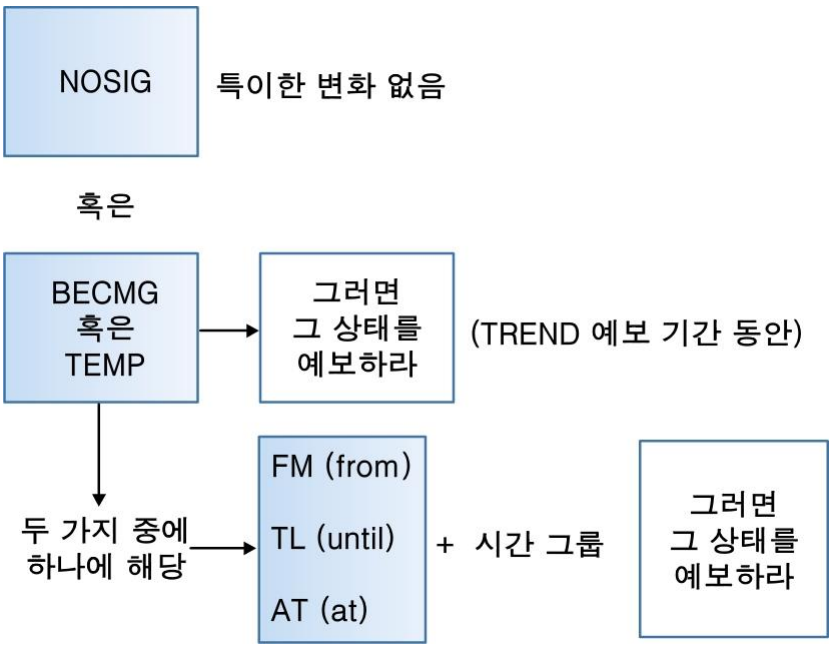
민간 공항에서 TREND를 보고해야 하는 조건은 다음과 같다.

- 바람
  a) 평균 풍향이 60° 이상 변화하는 경우
  b) 평균 풍속이 10kt 이상 변화하는 경우
- 시정 : 표 1.10 이용
- 기상 : 특이 구름으로 인해서 운저가 1,000ft 이하나 시정이 1,500m 이하로 떨어지는 경우 혹은 기상 현상 자체가 TAF의 변화 기준에 따라 특이하게 변화하는 경우
- 구름 : 표 1.10 이용

1.4 METAR와 TREND 코딩

1.4.5.2 TREND 변화 그룹들

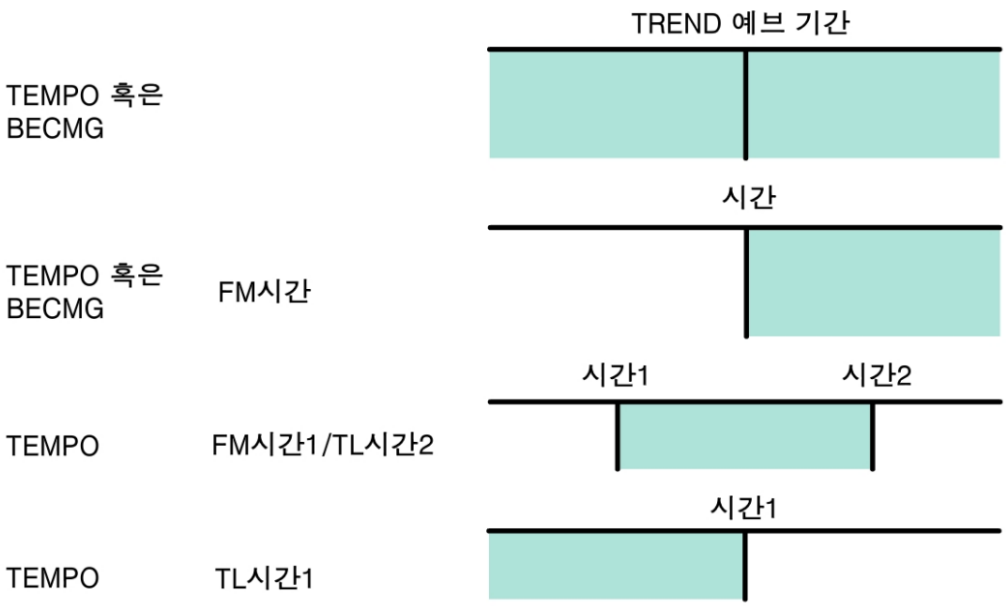
TREND의 사용은 그림 1.42에서 보이는 방법에 따른다.



[그림 1.42] TREND 변화 그룹 이용 개념도

1.4 METAR와 TREND 코딩

BECMG과 TEMPO의 정의는 TAF의 것을 참조하라. TREND 그룹에는 부가적인 그룹 FM, TL 그리고 AT가 사용되는데 시간 그룹의 흐름에 따라 전체 2시간이 아니라 그 중간에 변화를 하는 경우에 사용한다. 그림 1.43은 가장 많이 사용하는 시간 그룹의 조합이다.



[그림 1.43] TREND 변화 그룹을 그림으로 표현한 예. TREND 예보기간은 검은 선으로, 음영 부분은 변화 그룹이 적용되는 구역을 의미함

다음은 민간 공항 TREND 사용의 몇 가지 예이다.

METAR RKSI 220950Z 12003KT 030V160 4000 +SHRASN SCT004 BKN012CB 02/M03 Q0995 RMK WS RWY040 NOSIG=

BECMG 3000 BR=

BECMG FM1030 TL1130 3000 BR=

BECMG FM 1100 23020KT 9999 SCT020=

TEMPO 3000 SHRA BKN010=

TEMPO FM1030 TL1130 + SHRA BKN010CB=

1.4 METAR와 TREND 코딩

1.4.6 활주로 상태 보고

눈이 활주로를 덮고 있으면 활주로 상태를 보고한다. 활주로 상태 보고는 자주 있는 일은 아니지만 어떤 환경이나 장소에서는 항공 승무원에게는 매우 중요한 요소이다. 활주로 상태보고는 민간 공항에서만 이루어지며 METAR 전문에 더해져서 항공교통통제소로 전송된다.

그 형태는 AABCDDEE의 형태의 6자리 숫자로 구성되어 있으며 METAR 전문의 마지막에 붙는다.

AA	활주로 지시자	18 = 활주로 18, 68 = 활주로 18 오른쪽
B	활주로 최적상태	0 = 깨끗하고 마름, 1 = 촉촉함, 2 = 젖음 3 = 서리로 덮임, 4 = 마른 눈, 5 = 젖은 눈 6 = 진창 눈, 7 = 얼음, 8 = 굳은 눈 9 = 얼음 자국, '/' = n/a
C	활주로 덮임 정도	1 = 10% 미만, 2 = 11% ~ 25% 5 = 26% ~ 50%, 9 = 51% ~ 100% '/' = 보고되지 않음
DD	침전물의 깊이	밀리미터 단위 90mm, 92 = 10cm, 93 = 15cm, 등등
EE	브레이킹 동작	마찰력 계수, 28 = 0.28, 69 = 0.69 91 = 동작 나쁨, 93 = 보통, 95 = 좋음

1.4 METAR와 TREND 코딩 – 부록 1 METFORM 2309에 포함된 현재 기상

※ 참고 : SYNOP 코드 숫자는 METAR 코드에 가장 가까운 값을 의미함.

SYNOP 코드	METAR 코드	METFORM 2309 표기 (의미)	SYNOP 코드	METAR 코드	METFORM 2309 표기 (의미)
00		없음	34	+SS *or*	강한 모래 폭풍
01		없음		+DS	강한 먼지 폭풍
02		없음	35	+SS *or*	강한 모래 폭풍
03		없음		+DS	강한 먼지 폭풍
04	FU *or*	연기	36	DRSN	낮게 표류하는 눈
	VA	화산재	37	DRSN	낮게 표류하는 눈
05	HZ	연무	38	–BLSN *or*	높게 날리는 눈
06	DU	넓게퍼진 먼지		BLSN	보통 높게 날리는 눈
07	BLSA *or*	높게 날리는 모래	39	+BLSN	심하게 높게 날리는 눈
	BLDU *or*	높게 날리는 먼지	40	VCFG	인근에 안개
	DRSA *or*	낮게 표류하는 모래	41	BCFG	조각 안개
	DRDU	낮게 표류하는 먼지		PRFG	안개 둑
08	PO *or*	Dust devil	42	FG	안개
	+PO	Dust devil	43	FG	안개
09	VCDS *or*	인근에 먼지폭풍	44	FG	안개
	VCSS *or*	인근에 모래폭풍	45	FG	안개
	[REDS] *or*	없음	46	FG	안개
	[RESS]	없음	47	FG	안개
10	BR	박무	48	FZFG	어는 안개
11	MIFG	얇은 안개	49	FZFG	어는 안개
12	MIFG	얇은 안개	50	–DZ	이슬비
13		없음	51	–DZ	이슬비
14		없음	52	DZ	보통 이슬비
15		없음	53	DZ	보통 이슬비
16	VCSH	인근에 소낙성 강수	54	+DZ	강한 이슬비
17	TS	뇌우	55	+DZ	강한 이슬비
18	SQ	스콜l	56	–FZDZ	어는 이슬비
19	FC *or* [REFC]	깔대기 구름	57	FZDZ *or*	보통 어는 이슬비
20	[REDZ] *or* [RESG]	없음		+FZDZ	강한 어는 이슬비
21	[RERA]	없음	58	–RADZ	비와 이슬비
22	[RESN]	없음	59	RADZ *or*	보통 비와 이슬비
23	[RERASN] *or*	없음		+RADZ	강한 비와 이슬비
	[REPE]	없음	60	–RA	비
24	[REFZRA] *or*	없음	61	–RA	비
	[REFZDZ]	없음	62	RA	보통 비
25	[RERA]	없음	63	RA	보통 비
26	[RESN] *or*	없음	64	+RA	강한 비
	[RERASN]	없음	65	+RA	강한 비

1.4 METAR와 TREND 코딩 – 부록 1 METFORM 2309에 포함된 현재 기상

SYNOP 코드	METAR 코드	METFORM 2309 표기 (의미)	SYNOP 코드	METAR 코드	METFORM 2309 표기 (의미)
27	[REGS] *or*	없음	66	–FZRA	어는 비
	[REGR]	없음	67	FZRA *or*	보통 어는 비
28		없음		+ FZRA	강한 어는 비
29	[RMK]	없음	68	–RASN *or*	비와 눈
30	–SS *or*	약한 모래 폭풍		–DZSN	이슬비와 눈
	–DS *or*	약한 먼지 폭풍	69	RASN *or*	보통 비와 눈
		보통 모래 폭풍		DZSN *or*	보통 이슬비와 눈
	DS	보통 먼지 폭풍		+ RASN *or*	강한 비와 눈
31	–SS *or*	약한 모래 폭풍		+ DZSN	강한 이슬비와 눈
	–DS *or*	약한 먼지 폭풍	70	–SN	눈
	SS *or*	보통 모래 폭풍	71	–SN	눈
	DS	보통 먼지 폭풍	72	SN	보통 눈
32	–SS *or*	약한 모래 폭풍	73	SN	보통 눈
	–DS *or*	약한 먼지 폭풍	74	+ SN	강한 눈
	SS *or*	보통 모래 폭풍	75	+ SN	강한 눈
	DS	보통 먼지 폭풍	76	IC	다이아몬드 먼지(얼음알갱이)
33	+ SS *or*	강한 모래 폭풍	77	SG	가루 눈
	+ DS	강한 먼지 폭풍	78	–SN	눈

1.4 METAR와 TREND 코딩 – 부록 1 METFORM 2309에 포함된 현재 기상

SYNOP 코드	METAR 코드	METFORM 2309 표기 (의미)	SYNOP 코드	METAR 코드	METFORM 2309 표기 (의미)
79	PL	얼음싸라기	95	–TSRA *or*	뇌우와 약한 비
80	–SHRA	약한 소낙비		–TSRASN *or*	뇌우와 약한 비와 눈
81	SHRA *or*	보통 소낙비		–TSSN *or*	뇌우와 약한 눈
	+ SHRA	강한 소낙비		TSRA *or*	뇌우와 보통 비
82	+ SHRA	강한 소낙비		TSRASN *or*	뇌우와 보통 비와 눈
83	–SHRASN	소낙비와 소낙눈		TSSN *or*	뇌우와 보통 눈
84	SHRASN *or*	보통 비와 소낙눈		+ TSRA *or*	뇌우와 강한 비
	+ SHRASN	강한 소낙비와 소낙눈		+ TSRASN *or*	뇌우와 강한 비와 눈
85	–SHSN	약한 소낙눈		+ TSSN	뇌우와 강한 눈
86	SHSN *or*	보통 소낙눈	96	TSGR *or*	뇌우와 우박
	+ SHSN	강한 소낙눈		TSGS	뇌우와 작은 우박
87	–SHGS	약한 작은 우박 소나기	97	–TSRA *or*	뇌우와 비
88	SHGS *or*	보통 작은 우박 소나기		–TSRASN *or*	뇌우와 비와 눈
	+ SHGS	강한 작은 우박 소나기		–TSSN *or*	뇌우와 눈
89	–SHGR	약한 우박 소나기		TSRA *or*	뇌우와 보통 비
				TSRASN *or*	뇌우와 보통 비와 눈
90	SHGR *or*	보통 우박 소나기		TSSN *or*	뇌우와 보통 눈
	+ SHGR	강한 우박 소나기		+ TSRA *or*	뇌우와 강한 비
91	–RA [RMK]	비		+ TSRASN *or*	뇌우와 강한 비와 눈
	–SHRA [RMK]	소낙비		+ TSSN	뇌우와 강한 눈
92	RA [RMK] *or*	보통 비	98	TSDS *or*	뇌우에 동반된 먼지 폭풍
	SHRA [RMK] *or*	보통 소낙비		TSSS *or*	뇌우에 동반된 모래 폭풍
	+ RA [RMK] *or*	강한 비		TSRA DS *or*	뇌우와 비에 동반된 먼지 폭풍
	+ SHRA [RMK]	강한 소낙비		TSRA SS *or*	뇌우와 비에 동반된 모래 폭풍
93	–SN [RMK] *or*	약한 눈		TSRASN DS *or*	뇌우와 비와 눈에 동반된 먼지폭풍
	–SHSN [RMK] *or*	약한 소낙눈		TSRASN SS *or*	뇌우와 비와 눈에 동반된 모래폭풍
	–RASN [RMK] *or*	약한 비와 눈		TSSN DS *or*	뇌우와 눈에 동반된 먼지 폭풍
	–SHRASN [RMK] *or*	약한 소낙비와 소낙눈		TSSN SS	뇌우와 눈에 동반된 모래 폭풍

1.4 METAR와 TREND 코딩 – 부록 1 METFORM 2309에 포함된 현재 기상

SYNOP 코드	METAR 코드	METFORM 2309 표기 (의미)	SYNOP 코드	METAR 코드	METFORM 2309 표기 (의미)
	-SHGR [RMK]or	약한 우박 소나기	99	+ TSGR *or*	강한 뇌우와 우박
	-SHGS [RMK]	약한 작은 우박 소나기		+ TSGS	강한 뇌우와 작은 우박
94	SN [RMK] *or*	보통 눈			
	SHSN [RMK] *or*	보통 소낙눈			
	RASN [RMK] *or*	보통 비와 눈			
	SHRASN [RMK] *or*	보통 소낙비와 소낙눈			
	SHGR [RMK] *or*	보통 우박 소나기			
	SHGS [RMK] *or*	보통 작은 우박 소나기			
	+ SN [RMK] *or*	강한 눈			
	+ SNSH [RMK] *or*	강한 소낙눈			
	+ RASN [RMK] *or*	강한 비와 눈			
	+ SHRASN [RMK] *or*	강한 소낙비와 소낙눈			
	+ SHGR [RMK] *or*	강한 우박 소나기			
	+ SHGS [RMK]	강한 약은 우박 소나기			

1.5 비행장 예보(TAF)

1.5.1 서론

약어 형태로 구성되어 있는 비행장 예보(TAF)는 공항에서 조종사에게 제공되는 가장 우선적인 예보이다. TAF 코드는 언어장벽과 항공기 운항이 전 지구를 상대로 함에 따라 국제적으로 인정된 표준을 사용하고 있다.

TAF 생산의 근본 방침은 관심 기간 동안 공항에 영향을 미칠 수 있는 모든 특이 기상 요소에 대한 정보를 제공하는 것이다.

기상 요소의 시간적 공간적 가변성과 예보 기법의 한계, 어떤 요소들에 따른 약간의 정의 차이 등에 따라, **TAF에서 제공되는 모든 기상 요소의 특정한 값들은 예보 기간 동안 발생할 것으로 예상되는 기상 요소들 중에서 가장 개연성이 높은 값을 제공하여 사용자들의 이해를 도와야 한다.** 비슷하게 예보에 기상 요소의 발생 시간이나 변화가 포함되어 있으면 그 시간도 가장 발생 가능성이 높은 시간으로 제공되어야 한다.

이 교재에서 사용하는 TAF는 기본적으로 유럽의 협약에 기반을 하고 있다. 각 나라들이 모두 같은 규정을 적용하고 있지 않고, 기상 요소들을 다르게 이해하고, TAF 생산 절차를 수정하여 사용하는 경우가 많다. 예를 들어 미국과 캐나다는 다른 나라들과 많이 다른 절차와 협약을 사용하고 있다. 만약 외국으로 비행을 계획하고 있는 항공기 승무원에게 TAF를 제공할 때는 항상 TAF를 정확하게 읽고 모든 그룹들을 완전히 이해한 후에 정보를 제공해야 한다.

1.5.2 TAF의 구성

아래는 TAF 작성법을 학습할 때 유용하게 사용될 수 있는 지침들을 정리한 것이다.

- TAF를 작성하기 전에 가장 최근의 실제 기상을 살펴라. 왜냐하면 실제로 현재 발생해서 자리 잡고 있는 기상 조건이 TAF 작성을 시작하는 가장 좋은 출발점이기 때문이다.
- 어떤 기상 요소들이 예보 기간 동안 주요하게 변할 것인지 생각하라. 그리고 그것들을 TAF에 표현할 만큼 중요한 것인지 고려하다.
- TAF는 가능한 한 짧게 작성하라. 왜냐하면 너무 많은 변화 그룹군이 사용되면 사용자들이 혼동할 있기 때문이다.

1.5 비행장 예보(TAF)

• 가장 적절한 값들을 찾으려고 노력하라. 전형적인 시정 값들은 다음과 같다.

• 약한 비/소나기	8,000m ~ 10km 이상
• 보통 비/소나기	4,000m ~ 7,000m
• 강한 비	1,500m ~ 4,000m
• 보통 혹은 강한 이슬비	1,500m ~ 4,000m
• 약한 눈	3,000m ~ 6,000m
• 보통 눈	1,000m ~ 4,000m
• 강한 눈	100m 미만 ~ 1,500m

• TAF를 '수정할 수 없도록' 작성하지 말라. 왜냐하면 TAF는 누구나 수정할 수 있어야 한다.
• TAF의 평가와 검증이 중요해 졌다고 해서 예보가 너무 비관적이지 않도록 노력하라
• 해당 기상대의 기상 통계에 대해서 잘 인식하고, 아주 분명한 이유가 있지 않다면 가능하면 그 통계를 넘어서는 예보를 생산하지 않도록 노력하라.
• TAF가 기상 경보, 지역 예보, 수직 단면 예보 등과 일치하도록 작성하고 발표하라. 예를 들어, TAF에 강풍을 예보했다면 강풍 경보가 유효하거나, 차후에 발표될 것이라는 것을 알고 있어야 한다.

1.5.3 TAF 코딩

TAF의 코딩과 디코딩에 대한 정보는 WMO No. 306 Manual on Codes Volume 1 - FM51 Ext TAF에 상세하게 기술되어 있다.

전문 인식자 - TAF, TAF AMD, TAF COR

'TAF'는 일련의 주기를 가지고 발표하도록 되어 있다. 'TAF COR'는 원래 예보에 포함되어 있는 내용들의 전송상의 오류를 수정하는 것을 의미한다. 이때 예보는 맞다는 것을 가정한다. 'TAF AMD'는 원래 예보가 명백한 오류를 가지고 있어서 예보 자체를 수정되어야 할 때 사용한다.

TAF AMD나 TAF COR의 유효시간 시작은 TAF의 변경이나 수정이 이루어진 시간을 시작 시간으로 해야 한다.

1.5 비행장 예보(TAF)

예를 들어 기존의 TAF가

TAF RKSI 190802Z 1009/1918... 로 발표되었고,

변경이나 수정된 TAF가 발표된 시간이 1015UTC라고 하면 TAF는

TAF RKSI 191015Z 1910/1918...로 수정되어야 한다.

기존의 TAF를 취소하고 새로운 TAF를 발표 할 때 TAF AMD의 특수한 형태를 사용할 수 있다.

TAF RKSI EGZZ 021420Z 021322 CNL=

공항들에 대한 모든 TAF들이 취소되었다면, 이것은 계획되어 있던 군사 작전 시간이 취소되거나, 민간 공항의 예보관이 원거리에 있어서 적어도 1시간 이상 METAR 자료가 수신되지 않은 경우일 것이다. 이런 일들은 외국의 소규모 사설 공항에서 가끔 발생한다.

CCCC – 공항 지시자

이 그룹은 각 공항들을 확인시키는 ICAO 위치 지시자이다. 앞의 2개의 대문자는 국가를 의미하고 뒤의 2개의 대문자는 각 공항들을 의미한다. 예를 들면 , RK는 한국, RJ는 일본, ZB는 중국을 의미한다. 뒤의 2개의 대문자는 공항을 의미하는데, 예를 들어 RKSI는 한국 인천공항을, RJAA는 일본 도쿄의 신국제공항을, ZBAA는 중국 북경공항을 의미한다. 국토가 넓은 미국과 같은 나라는 앞의 1개의 대문자로 국가를 나타내고 뒤의 3개의 대문자로 공항을 표시한다. 예를 들어 미국의 KJFK는 JFK 공항을 의미한다.

YYhhmm – 발표 날짜와 시간, 그 뒤에 'Z'가 따름.

YY는 그 달에 해당하는 날짜가 되고, hhmm은 TAF가 발표된 시간과 분이 된다. TAF와 METAR는 사용자들의 이해를 증진시키기 위해서 세계표준시(UTC)를 채용하고 있는데, 날짜와 시간을 나타내는 지시자 뒤에 대문자 'Z'를 붙여 UTC임을 나타낸다.

1.5 비행장 예보(TAF)

$YYG_1G_1G_2G_2$ - 날짜와 유효 시간

YY는 그 달에 해당하는 날짜가 된다. G_1G_1은 TAF 유효시간이 시작되는 시간을 G_2G_2는 TAF가 유효한 마지막 시간을 뜻하는데, TAF를 작성할 때는 오전 오후를 구분하지 않고 24시간 체제로 시간을 표시한다. 예를 들어 1212는 24시간 동안 유효한 TAF로 오늘 12U00TC에서 다음날 12U00TC 까지 적용됨을 의미한다. 대부분의 TAF들의 유효시간은 9시간이고 길게는 24시간까지 발표한다.

$dddffGf_mf_mKT$ - 바람

Ddd 10° 단위의 풍향
VRB 풍향이 다양하게 변해서 가변적일 때 사용한다.
ff 평균 풍속(단위는 Knots를 많이 사용하지만 국가에 따라 km/hr(KPH), m/s(MS)를 사용하기도 함.

만약 순간 최대풍이 예상되면 Gfmfm을 포함시켜야 하며, fmfm은 평균 풍속을 넘는 최대풍을 10KT 단위로 보고한다. 예를 들어, 230° 25 KT with gusts 38 KT는 23025G38KT로 표현한다.

VVVV - 우시정

TAF에서 시정을 예보할 때는 시정의 범위에 따라서 각각 다른 간격으로 보고하고 간격 이하의 값들을 잘라 낼 때는 더 안 좋은 쪽으로 잘라낸다.

[표 1.11] 민간 공항 TAF에서 사용되는 시정 값들

시정 거리	단계
800m 미만	50m
800m ~ 4900m	100m
5000m ~ 9000m	1000m
10km 이상	9999로 보고

1.5 비행장 예보(TAF)

w'w' - 기상 현상

TAF에서 사용되는 기상 그룹은 표 1.12에 나타난 기상 변수들을 기반으로 그 상태를 표현산다.

w'w' 그룹은 기상 현상의 강도를 표현하는 한정사를 맨 앞에 두고 그 뒤쪽에 기상 요소를 덧붙인다.

예를 들면, 약한 소낙비 = -SHRA
보통 소낙비 = SHRA
강한 소낙비와 소낙눈 섞인 강수 = +SHRASN

하나의 기상 그룹은 9자리까지 사용할 수 있고, 민간 공항의 경우 기상 그룹들은 3개의 기상 현상별 그룹을 가질 수 있다. 반면 군용 비행장은 2개의 기상 현상별 그룹을 사용하거나 9자리로 표현한다.

특이 기상현상의 종료를 나타낼 때에의 기상 현상(w'w') 약어는 NSW(No Significant Weather)가 사용된다.

[표 1.12] WMO에서 규정한 TAF에 사용되는 주요 기상현상들

TAF에 사용되는 특이 기상 현상들									
한정사				기상 현상					
강도, 근접성		서술자		강수		시정장애		기타	
1		2		3		4		5	
-	약함	MI*	얇음	DZ	이슬비	BR	연무	PO	모래/먼지
(없음)	보통	BC*	조각	RA	비	FG	안개	SQ	회오리
+	강함	DR	낮게 날림	SN	눈	FU	연기	FC	스콜
VC*	근처	BL	높게 날림	SG	가루눈	VA	화산재	SS	깔대기구름
	(8km 이내)	SH	소낙성	IC	세빙	DU	먼지	DS	모래폭풍
		TS	뇌우	PE	얼음싸라기	SA	모래		먼지폭풍
		FZ	과냉각	GR	우박	HZ	박무		
		PR*	부분 덮임	GS	작은 우박				
		*:	FG와 함께 사용						

1.5 비행장 예보(TAF)

부가적으로 참고해야 할 사항들은 다음과 같다.

- 민간 공항 TAF에서 시정이 5,000m 미만으로 줄어들었을 때, 시정장애를 의미하는 약어인 FU, HZ, DU, SA, BR를 함께 사용할 수 있다.
- 약어 FG는 시정이 1,000m 미만 일 때만 사용할 수 있다.
- 약어 BCFG, PRFG는 시정이 1,000m 미만 혹은 1,000m와 같거나 높을 때 사용한다.
- 약어 MIFG and VCFG는 1,000m 보다 좋을 때 사용한다.

어떤 기상 그룹들은 특이하지 않기 때문에 그 자체만으로는 그 변화에 대한 기준을 가지고 있지 않다. 만약 약한 강수(예를 들면 -RA, -SN, -SHRAGS 등)는 변화 경향을 주지 않는다. 다만, 이러한 형태의 강수들이 시정이나 구름의 변화 기준에 영향을 미친다면 TAF에 그 내용을 포함 시킨다.

$N_sN_sN_sh_sh_sh_s$ – 구름

$N_sN_sN_s$– 운량(아래 표 1.12 참조)
$h_sh_sh_s$– 100ft 단위 운저 고도

[표 1.13] TAF의 $N_sN_sN_s$ 그룹에 사용되는 전문에서 사용하는 운량 약어

운 량		
FEW	= few	(1 ~ 2옥타)
SCT	= scattered	(3 ~ 4옥타)
BKN	= broken	(5 ~ 7옥타)
OVC	= overcast	(8옥타)

구름의 운형은 적란운(CB)이나 탑상적운(TCU)이 아닌 경우에는 생략하고, 이 두 가지 운형은 $h_sh_sh_s$(운량) 바로 다음에 표시한다. **다른 형태 구름의 운형은 포함하지 않는다.** 만약 CB와 TCU가 동시에 예보되는데 같은 고도에 형성될 것으로 예상될 경우 두 개의 운량을 더해서 총 운량으로 표시하고 CB로 표시한다.

1.5 비행장 예보(TAF)

예) 3 stratus at 1200 FT = SCT012
7 cumulonimbus at 1200 FT = BKN012CB

- 총 4개의 구름 그룹이 TAF에 포함될 수 있다.
  1. 운량에 상관없이 가장 낮은 층의 구름
  2. 2옥타 이상의 다음 개별 구름 층
  3. 4옥타 이상의 그 다음 개별 구름 층
  4. 위의 3단계에서 포함되어 있지 않은 적란운(CB)

- 구름 그룹은 가장 낮은 구름 층에서 가장 높은 구름 층으로 순서대로 보고한다. 이때 **반드시 모든 특이 구름 층은 포함되어야 한다.**

- 하늘이 구름이나 안개로 차폐되는 경우에는 $N_sN_sN_sh_sh_sh_s$ 대신 **VV///**을 사용하여 표시한다.

- 예보 기간 동안 5,000ft 이하에 구름이 없거나, 공항 제한치 고도보다 높거나, 적운이나 적란운의 발생이 예상되지 않거나, 하늘에 구름이 없을 것으로 판단되면 구름 그룹은 약어 **NSC**(**N**o **S**ignificant **C**louds)나 **CAVOK** 둘 중에 하나로 표현한다.

- CAVOK(**C**eiling **a**nd **V**isibility **OK**ay)는 다음 경우에 단독으로 사용이 가능하다.
  1. 시정이 10km 이상
  2. 5,000ft(1,500m) 이하에 구름이 없거나, 운고가 공항 제한치 고도보다 높은 경우
  3. 적란운이 없을 때
  4. 표 2에서 정한 특이 기상현상 발생을 보고하지 않을 때

- CAVOK은 우시정(VVVV)와 구름($N_sN_sN_sh_sh_sh_s$) 그룹을 대체해서 사용한다.

- 만약 5,000ft 이하에 구름이 없고, 운고가 공항 제한치 고도 보다 높은 경우, CB가 없을 경우이나 CAVOK의 사용이 적절하지 않다고 판단되는 경우에는 NSC를 사용해야 한다.

  예를 들어, 시정 12km, 보통 비, 5,000ft에 5 옥타 ST가 있는 조건이면 TAF는 ... 9999 RA NSC ...으로 작성한다.

1.5 비행장 예보(TAF)

TAF에서 구름의 형성과 관련해서 변화를 예보할 때는 **2,500ft 이하에 해당하는 모든 보고 가능한 구름층이 포함되어야 한다. 구름층 정보에 대한 변화가 없다고 하더라도 되풀이해서 그 내용을 TAF에 포함해야 한다.**

탑상적운(TCU)의 발달과 소멸은 그 자체로 TAF 변화 그룹의 사용이 필요하지 않으며, TAF의 변경도 필요하지 않다. 그러나 예보관이 다른 기상현상들이 변화/수정 기준에 도달해서 구름 형태를 특정하는 경우에는 포함되어야 한다. 그리고 만약 예보관이 TCU의 포함이 예보의 질을 더 높일 것이라고 판단하는 경우 포함을 고려할 수 있다.

$TNTT_FT_F/YYG_FG_FZ$ and $TXTT_FT_F/YYG_FG_FZ$ – 온도

온도 그룹은 최고기온(TX)과 최저기온(TN)을 예보한다. 최고 기온과 최저기온(T_FT_F)은 (YY)일 (G_FG_F)시에 나타날 것이다.

$5Bh_Bh_Bh_Bt_L$ – 난류

난류 그룹은 더 이상 WMO/ICAO에서 사용을 강제하고 있지 않지만, 난류가 자주 발생하는 기상대나 군용 비행장에서 여전히 사용하고 있다. 첫 번째 숫자 '5'가 난류에 대한 지시자로 이후에 난류에 대한 정보가 표시된다. 'B"는 난류의 강도나 횟수를 의미하고 $h_Bh_Bh_B$는 난류층의 최저고도 높이를, t_L은 난류층의 깊이를 나타낸다.

$6I_ch_jh_jh_jt_L$ – 착빙

착빙 그룹도 더 이상 WMO/ICAO에서 사용을 강제하고 있지 않지만, 몇 개 국가에서는 착빙층의 존재를 알리기 위해서 사용하고 있다. 첫 번째 숫자 '6'은 착빙에 대한 지시자로 이후 착빙에 대한 정보가 표시된다. 'I_c'는 착빙의 강도를, '$h_jh_jh_j$'는 착빙층 최저 고도를 't_L'은 착빙층의 두께를 의미한다. 착빙에 대한 디코딩은 WMO No. 306 Manual on Codes Volume 1 – FM51 VIII의 Codes 항에 설명되어 있다.

1.5 비행장 예보(TAF)

1.5.4 변화 그룹군

변화 그룹군은 TAF 유효시간 동안의 기본적인 대기 상태에서 어떤 특정한 상태로 변화하는 것을 표현하는데 사용한다. 지시 그룹군은 일시적인 현상이나 지속적인 변동이 있을 때 사용하는데, 바람, 기상현상, 시정과 구름의 상태가 개선되거나 악화되는 두 가지 경우 모두 포함된다. 몇 개의 변화 그룹군이 사용되어야 할 것인가는 예상되는 기상 상태에 따라 다르기 때문에 여러 개가 되더라도 받아들여야 하겠지만 상항 예보되는 상태가 명확하고 모호함이 없도록 노력해야 한다. 변화 그룹군을 사용할 때는 그 사용을 최소화하는 것이 좋으며(어떤 기관들은 최대 5개의 변화 그룹군만을 허용한다) 특별히 변화 그룹군들이 중복되서 표현되는 일은 가능하면 배제해야 한다.

TTTT YYGG/YYG$_e$G$_e$

TTTT는 BECMG이나 TEMPO를 사용한다. YYGG는 이 변화가 시작되는 시간이고, YYG$_e$G$_e$는 그 변화가 끝나는 시간이다. 종료되는 시간은 날짜가 바뀔 수도 있다.

BECMG은 다음과 같이 특정한 상태가 완전히 변화해서 다시 기존의 상태로 돌아오지 않는 상태를 의미한다. 따라서 변화된 기상 상태가 GGG$_e$G$_e$가 규정한 시간이 끝날 때부터 TAF의 유효시간이 끝날 때 까지(혹은 다음 비슷한 변화군이 끝날 때 까지) 유지된다. BECMG은 2시간보다 짧으면 안 되고 4시간보다 길면 안 된다.

TEMPO는 예보된 기본적인 기상 상태들이 자주 혹은 가끔 변동하는 상태를 의미하며, 그 현상이 발생하는 기상 상태들이 길어도 1시간을 넘으면 안 되고 TEMPO가 나타나는 시간이 GG부터 G$_e$G$_e$까지의 시간의 절반을 차지해서는 안 된다. TEMPO는 소낙성 강수 상태를 설명할 때 가장 자주 사용하는 용어이다.

주의사항 : 만약 예보 기간의 시작 시간이 자정이라면 GG에는 24가 아니라 00이 표시되어야 하며, 예보 기간이 끝나는 시간이 자정이라면 G$_e$G$_e$는 00이 아니라 24를 사용해야 한다.
좋은 예 : TAF EGZZ 0024…, BECMG 2124…, TEMPO 0002…, BECMG 0003…, TEMPO 1924…,
나쁜 예 : TAF EGZZ 0000…, TAF EGZZ 2400…, TAF EGZZ 2424…, BECMG 2100…, BECMG 2403…,

1.5 비행장 예보(TAF)

TTYY$G_hG_hG_mG_m$

앞의 TEMPO나 BECMG 그룹을 대신해서 FMYY$G_hG_hG_mG_m$그룹을 대체해서 사용할 수 있지만 권장할 사항은 아니다. FM은 예보 시작시간 즉 YY일 G_hG_h시 G_mG_m 분이라는 자체의 시작 시간으로 하기 때문이다. 따라서 TAF가 유효한 전체 시간에 대한 주된 기상 상태를 먼저 표현하고 새로운 기상 현상이 나타나는 시간 이후의 새로운 기상 상태를 언급하는 것이 좋다.

예를 들면

TAF RKSI 200850Z 201019 21015G25KT 9999 SCT017 FM1540 24012kt 9999 BKN020=

PROBC_2C_2

PROB는 독립적으로 사용할 수도 있고, TEMPO와 같이 사용하여 어떤 기상 현상이 발생할 가능성을 퍼센트로 나타낸다. 이 그룹에는 시간 그룹이 반드시 포함되어야 하며 C_2C_2에 30이나 40이란 숫자는 기상 현상의 발생 가능성이 30%나 40% 정도 된다는 것을 의미한다. 가능성이 30% 미만이라는 것은 이미 예보된 내용에서 크게 벗어나지 않은 것으로 RPOB에 사용하는 것이 적합하지 않다. 그리고 50%를 넘는 경우에는 PROB보다는 BECMG이나 TEMPO에 FM을 함께 사용하는 것이 적합하다.

예를 들어,

1809 21005KT 3000 BR SCT004 PROB30 TEMPO 2106 0800 BCFG BKN001= 이 TAF는 조각 안개가 공항의 일부에 주어진 시간에 영향을 미칠 것이고 지속 시간은 1시간을 넘지 않을 것이며, 전체적으로 유지되는 시간은 총 4시간 30분으로 전체 예보 시간의 2/9에 해당한다는 뜻이다.

...1809 21005KT 3000 BR SCT004 PROB30 2106 0800 FG BKN 001= 이 TAF는 안개가 공항 전체에 영향을 미칠 것이고 그 지속 시간이 1시간 이상일 것이라는 것을 의미하는데 변동이 심한 층운과 해무에 동반된 경우에 유용하다.

주의 : PROB는 BECMG이나 FM과는 함께 사용할 수 없다.

1.5 비행장 예보(TAF)

1.5.5 변화 그룹 기준

TAF에서 예보된 기본 기상 조건에 대한 변화 그룹을 사용할 때는 뚜렷한 변화를 포함하고 있어야 한다. 부록 1은 민간 공항에서의 변화 그룹 사용규정을 상세하게 기술하고 있다.

부록 1에는 포함된 변화 기준은 자체적으로 충분히 설명이 되지만 구름의 운저나 운량 같은 경우에는 추가적인 기준이 제시된다.

[표 1.14] 부록 1의 구름 변화 그룹의 기준의 예외 조건들

5C.A2.4 **구름의 운저** 4옥타 이상의 운량(BKN 혹은 OVC)을 가지는 가장 낮은 구름의 운저가 다음 범위를 넘어서 발생하는 경우 ⁂ NSC(혹은 CAVOK)에서 BKN/OVC로 변화하거나, BKN/OVC에서 NSC(혹은 CAVOK)으로 변화하는 경우 ※ 유전이나 천연가스 시설처럼 위험한 지역에 설치된 헬기장의 경우에는 부가적인 변화 그룹이 적용된다(5C.A4 참조).	5,000ft 이상 1,500ft ~ 4,900ft⁂ 1,000ft ~ 1,400ft 500ft ~ 900ft (700ft ~ 900ft)※ (500ft ~ 600ft)※ 200ft ~ 400ft 100ft 미만 (하늘 차폐 포함)
5C.A2.5 구름의 운량 최하층의 운저가1,500ft 이하인 구름의 운량이 변화하는 경우	절반 이하의 운량(NIL, FEW, SCT)에서 하늘의 절반 이상(BKN, OVC)를 넘는 경우와 그 반대의 경우
주의 : 5,000ft 이하에 구름이 없거나, CB가 나타나지 않는 상황으로 변화하는 경우 CAVOK을 사용하지 않는다면 두 경우는 'NSC'를 사용한다. 주의 : CB의 발달이나 소멸은 그 자체로 구름 변화군에 영향을 주지 못한다. 구름 변화그룹은 운고와 운량의 변화 기준에 따라서 적용된다.	

1.5 비행장 예보(TAF)

1.5.5.1 구름 변화 기준

표 1.14는 예보관이 항상 집중해야 할 민간 공항 TAF에서의 구름 변화 기준을 정리한 것이다.

적란운이나 탑상 적운의 발달과 소멸은 어떠한 TAF에서도 그 자체로 구름 변화 그룹을 만들어 낼 수 없다. 그러나 구름의 운량이나 운저가 변화가 발생하는 경우에는 적운이나 탑상 적운의 발생이 예상되는 시간을 운저 고도와 상관없이 구름 변화 그룹에 포함시켜야 한다. 이 경우 이들 구름의 운저가 5,000ft를 넘어도 무방하다.

부가적으로 다음의 구름 변화들과 운저가 2,500ft 이하인 구름의 변화는 앞에서 언급한 층들을 되풀이 한다고 하더라도 반드시 포함되어야 한다.

다음 예들은 어떤 것이 구름 변화 기준에 적합한 것인지에 대한 이해를 도울 것이다.

- SCT012에서 BKN012으로 변화하는 것은 운량 변화 기준으로 볼 때 적합하다.
- SCT020에서 BKN020으로 변화하는 것은 변화 기준과 부합하지 않는다.
- NSC(혹은 CAVOK)에서 BKN020으로 구름의 운저 변화 기준으로 볼 때 적합하다
- SCT025에서 SCT014로 변화하는 것은 운량이 부족하기 때문에 기준에 부합하지 않는다.
- BKN025에서 BKN014로 변화하는 것은 운저 변화 기준으로 볼 때 적합하다.
- FEW012에서 OVC008은 구름 운저와 운량 변화 기준으로 볼 때 적합하다.
- SCT008 BKN020에서 BKN008 BKN020으로 변화하는 것은 운저와 운량 변화 기준으로 볼 때 적합하다. 이때 2,000ft의 구름이 계속 남아있는 것이므로 2,500ft 기준 이하이므로 재 언급되어야 한다.
- SCT008 BKN030에서 BKN008 BKN030으로 변화하는 것은 부적합하다. 비록 800FT의 구름의 운량이 SCT에서 BKN으로 바뀌었다고 하더라도 2500FT 기준 이상인 BKN030은 다시 언급할 필요가 없다.
- BKN020에서 BKN012CB는 구름 운저 변화 기준과 부합하므로 허용된다.

1.5 비행장 예보(TAF)

- BKM008에서 SCT030TCU는 구름 운저 변화 기준과 부합하므로 허용된다.
- SCT020에서 BKN020CB는 기준에 부합하지 않는다.
- FEW030에서 BKN012SCT016CB는 운저 변화 기준과 부합하므로 허용된다. 뒤에 CB를 덧붙인 것도 명확한 구름 층의 변화와 함께하므로 적합하다.
- BKN012에서 SCT060CB로 변화하는 것도 적합하다. 1,200ft 구름의 소산이 구름 변화 기준에 부합하기 때문이다. 그리고 뒤에 붙은 6,000ft 고도의 구름은 그것의 운저가 5,000ft 이상이라고 하더라도 포함된다. 왜냐하면 CB는 어떤 고도의 것도 포함시킨다.

구름 변화 규칙들은 뇌우를 예보에 포함시킬 때는 보통의 경우 CB를 포함시키고 구름 변화 기준에 적합한 운저와 운량을 포함시켜야 한다는 것이다.

다음에서 보여지는 TAF를 보자.

"... 9999 SCT020 TEMPO 0112/0118 3500 + TSRA="

만약 SCT040CB 혹은 BKN040CB에 의해서 뇌우가 만들어 진다고 하더라도 이것들은 구름 변화 기준에 부합하지 않으므로 TAF에 포함시킬 수 없다.

1.5.5.2 TAF 변화 기준 – 예

기존의 TAF에서 사용된 기준들을 통해 TAF 예보 시간 내에서 허용 가능한 것들이 무엇인지 이해할 필요하가 있다.

예를 들어 리드 브래포드 공항(EGNM)에서 발표된 TAF를 보자.

TAF RKSI 020750Z 0209/0218 09009KT 3000 DZ OVC 008
PROB 30 0209/0217 0800 FG OVC001
BECMG 0217/0218 21015G35KT 9999 NSW SCT020=

진하게 표현한 기본 상태는 그 상태의 일부 혹은 전부가 일시적(TEMPO)으로 혹은 영구적(BECMG 혹은 FM)으로 변화하지 않는 한 유효시간 전체에 적용될 것이다.

1.5 비행장 예보(TAF)

바람의 기본 상태가 09009KT인 조건에서 변화 그룹을 사용할 수 있기 위한 조건은 다음과 같다.

- 평균 풍향이 30° 이상 변화하거나 평균 풍속이 20KT 이상 변화해야 한다.
- 평균 풍향이 60° 이상 변화하거나 평균 풍속이 변화이후에 10KT 이상 증가해야 한다.
- 평균 지상풍이 적어도 19KT 이상 증가해야 한다.
- 평균 풍속이 15KT 이상인 상태에서 순간 최대풍이 25KT 이상 증가해야 한다.

시정이 1,500m 이하로 떨어지거나 5,000m 이상으로 올라가는 경우 변화 그룹 사용이 필요하다. 기본적인 시정이 1700UTC까지 800m 이하로 떨어져 있는 상태에서 1700UTC와 1800UTC 사이에 나머지 유효기간 동안 10km 이상으로 향상되었다.

800ft에 OVC였던 구름 조건은 운고가 1,000ft 이상으로 올라가거나 500ft 이하로 떨어졌을 때 변화 그룹을 사용해야 한다. 또한 OVC에서 SCT나 그 이하로 떨어질 때 사용한다. 구름의 조건이 BECMG 변화를 활용해서 800ft OVC에서 2,000ft SCT로 TAF 유효시간 내에서 완전히 바뀌었음을 보여준다.

1.5.6 TAF 수정

TAF는 부록 1에서 정한 기준을 넘어서는 기상 현상이 발견되면 수정되어야 한다. TAF는 예보관이 오류가 있다고 판단하면 수정되어야 한다. 비행안전은 최고의 가치이므로 예보관은 '예보가 잘못되도록 기다리는 일'은 절대로 하지 말아야 한다. 합리적인 이유가 있으면 예보관은 한발 앞서서 TAF를 수정해 주어야 한다. 수정된 TAF는 TAF AMD 두문을 사용하여 송신해서 원래 TAF를 대체할 수 있도록 유효 시간을 원래 TAF가 가진 유효 시간 전체를 포괄하도록 작성해야 한다. 기존 TAF의 유효 시간이 종료되기 15분 전까지는 TAF 수정이 가능하다. 만약 TAF 수정 이전에 다음 시간 TAF가 필요한 내용을 포함하여 발표되었다면 TAF AMD를 발표할 필요가 없다.

1.5 비행장 예보(TAF) – 부록 1. TAF의 변화/수정을 위한 변화/수정 기준

	민 간	민간공항 취항 군 공항
평균 풍향	평균 풍속이 20kts 이상인 상태에서 풍향이 30° 이상 변할 때. 평균 풍속이 10kts 이상인 상태에서 풍향이 60° 이상 변할 때.	평균 풍속이 15kts 이상인 상태에서 풍향이 60° 이상 변할 때.
평균 풍속	10kt 이상 변할 때.	평균 풍속이 15kts 이상인 상태에서 풍속이 10kts 이상 변할 때.
최대 순간 풍속	평균 풍속이 15kts 이상인 상태에서 최대 순간 풍속이 10kts 이상 변할 때.	
우시정	아래 단계의 범위를 벗어 날 때 : 10KM 이상 5000M ~ 9 KM (5000M ~ 6KM & 7KM ~ 9KM)** 1500 M ~ 4900M (1500M ~ 2900M/3000M ~ 4900 M)** 800M ~ 1400 M 350 ~ 750M 300M 미만	아래 단계의 범위를 벗어 날 때 : 8 KM 이상 (BLU) 5000 M ~ 7 KM (WHT) 3700 ~ 4900 M (GRN) 2500 ~ 3600 M (YLO1) 1600 ~ 2400 M (YLO2) 800 ~ 1500 M (AMB) 700 M 미만 (RED)
기상현상	다음 기상현상의 발생과 소멸 보통/강한* 비(소낙성 포함), 이슬비, 비와 이슬비, 눈 (소낙성 포함), 비+ 눈 (소낙성 포함), 우박, 작은 우박, 얼음 싸라기와 가루 눈 뇌우 (강수 포함 혹은 미포함) 혹은 스콜 모든 강도의 어는 강수 어는 안개 낮게 표류하는/높게 날리는 눈 스콜, 깔때기 구름/스콜, 깔대기 구름/모래폭풍/모래폭풍 낮게 표류하거나 날리는 먼지/모래/눈 . *보통에서 강함으로 변하거나 그 반대. 참고 1 : 강도에 상관없이 시정 혹은 구름의 변화에 영향을 미치는 다른 기상 현상도 포함 가능함.	다음 기상현상의 발생과 소멸 강한 비 (소낙성 포함) 보통/강한* 눈 (소낙성 포함) 보통/강한* 비와 눈 (소낙성 포함) 반지름 5mm 이상 우박 뇌우(강수 포함 혹은 미포함) 모든 강도의 어는 강수 어는 안개 낮게 표류하는 먼지, 모래, 눈 먼지폭풍 혹은 모래폭풍 스콜, 깔대기 구름(토네이도 혹은 용오름) *보통에서 강함으로 변하거나 그 반대. 참고 1 : 강도에 상관없이 시정 혹은 구름의 변화에 영향을 미치는 다른 기상 현상도 포함 가능함.

1.5 비행장 예보(TAF) – 부록 1. TAF의 변화/수정을 위한 변화/수정 기준

	민 간	민간공항 취항 군 공항
운고	BKN이나 OVC 상태인 최하층의 운저가 다음 범위 사이로 변할 때 : 5000FT 이상 1500FT ~ 900 FT 1000FT ~1400 FT 500FT ~900 FT (500FT~600FT / 700FT~900 FT)** 200 to 400 FT 100FT 미만 (하늘 차폐 상태 포함)	STC, BKN, OVC 상태인 최하층의 운저가 다음 범위 사이로 변할 때 : 2500 FT or more (BLU) 1500-2400FT (WHT) 700-1400FT (GRN) 500-600FT (YLO1) 300-400FT (YLO2) 200FT (AMB) 100FT미만 (RED) (하늘 차폐 포함)
운량	1500FT 미만의 최하층의 운량이 절반 이하(NIL, FEW, SCT)에서 이상(BKN, OVC)으로 변하거나 그 반대	2500FT 미만의 최하층의 운량이 2옥타 이하(NIL, FEW)에서 이상(STC, BKN, OVC)으로 변하거나 그 반대
운형	CB가 발생하거나 소멸 할 때 ** 최근 정유시설이나 가스시설 헬기장의 헬기 지원을 위해 새롭게 추가된 기준	

연습문제

1. 민간항공을 대상으로 지원하는 항공기상 정보의 종류에 대해서 기술하시오.

2. 항공위험기상 요소들을 열거하고 개략적으로 설명하시오.

3. SIGMET을 발표해야 하는 항공기상 경보 요소들을 열거하시오.

4. 공항 경보를 발표해야 하는 위험 요소들을 열거하시오.

5. 지형에 의해서 발생하는 난류의 종류와 특징 구름에 대해서 설명하시오.

6. 기압고도 약어와 의미를 설명하시오.

7. METAR 코드의 요소를 설명하시오.

8. CAVOK의 의미와 사용 기준에 대해서 설명하시오.

9. TREND 그룹에 사용되는 용어들과 그 의미를 기술하시오.

10. TAF의 코딩 요소에 대해서 설명하시오.