

공역 및 항공로상의 난류 예측

이홍열, 안기창, 노재훈
항공기상관리본부 예보과

1. 서론

난류(亂流, Turbulence)란 크고 작은 공기덩어리가 방향이나 속도, 강도 등이 불규칙하게 변하면서 소용돌이치는 현상으로 항공기가 난류 지역을 통과하면 흔들림으로 인하여 탑승한 승무원이나 승객은 불편감을 느낄 뿐 만 아니라 부상을 입을 수도 있다. 극도로 강한 난류에 조우되면 항공기는 조종이 불가능 해지고 기체가 파손되는 등의 심각한 피해가 발생되어 결국에는 치명적인 항공기 사고로 이어질 수도 있다.

그러나 이와 같이 항공기 운항에 위험요인이 되고 있는 난류를 예상하는 것은 관측자료와 참고할 수 있는 자료의 부족 등으로 인해 예보자의 지식과 경험이 없이는 대단히 어려운 실정이다. 그동안 국내에서는 조종사관측보고(PIREP)자료의 분석과 이를 활용한 항공기상 예보의 검증이 있어왔으나 항공기의 위치와 비행시간, 고도 등이 항공예보 지역과 일치하지 않은 경우가 많아 항공예보에 대한 검증을 고층자료를 이용한 난류지수 계산식에 의해 이루어져 왔으며, 2007년 초에는 항공난류를 위한 수치모델 자료도 제공되고 있다.

따라서 난류예보에 필요한 수치모델 자료의 검증은 예보자료의 축적과 함께 꾸준히 제기되어 왔으며, 이에 검증 결과에 대한 자료의 효용성을 살펴보고, 항공기 안전운항을 위한 예보 참고자료로 활용하고자 한다.

2. 관측 자료 및 분석

2.1 자료

2007년 1~10월까지 일 2회(09, 21KST) 수치모델(RDAPS 30km)에서 제공하고 있는 난류 예측장과 고층기상관측자료에서 산출되는 난류지수 값을 이용하였고, 이 자료가 예보 지원에 반영된 결과를 살펴보기 위해 09, 21KST 공역예보자료를 사용하였다.

2.2 난류 예보 및 분석

현재 국내에서 항공난류 예보 지원을 위해 사용하고 있는 방법은 크게 두가지로 나눌

수 있는데, 첫째는 고층 기상관측자료로부터 연직윈드시어(VWS)을 구하여 난류가 존재하는 층을 분석하거나, 단열선도상에서 기괴법(air parcel method)을 이용하여 주위 공기와의 온도차와 운형으로부터 난류 강도를 추측하는 것이다. 둘째는 객관 예보법으로 수치모델을 이용하여 12시간 간격의 예측장을 통해 예보 지원하는 방법이다. 전자는 오래전부터 이용하는 방법이고, 후자는 난류 예보의 객관화라는 측면에서 장점이 있으나, 예보 결과에 대한 검증이 전혀 이루어지지 않고 있어 그 효용성에 대한 검증이 필요한 실정이다

현재 항공난류에 대한 예보 지원과 예보 평가는 전자를 이용하고 있으며, 이 자료는 고층자료의 수집과 함께 자동으로 계산되어 평가에 이용하고 있다.

이에 Ellrod and Knapp(1992)이 개발하여 수치모델에서 예상장으로 지원되고 있는 운동학적 난류지수 자료와 고층기상관측자료를 이용한 자료의 차이를 살펴보였다.

3. 본론

3.1 난류 분류

난류를 여러 가지 방법으로 분류할 수 있으나 일반적으로 발생장소와 공기 순환의 규모 및 발생원인에 의거 다음의 4종류로 구분하여 사용한다.

- 저고도 난류(LLT : Low Level Turbulence)
- 뇌우 난류(TNT : Turbulence Near Thunderstorm)
- 청천 난류(CAT : Clear Air Turbulence)
- 산악파 난류(MWT : Mountain Wave Turbulence)

이 중 저고도 난류는 낮은 대기층에 지표가열이나 바람의 마찰효과가 강하면 많이 발생하고 있고, 뇌우는 불안정한 대기, 강한 상승작용, 그리고 높은 습도가 있는 조건에서 하층의 가열, 대류, 수렴, 기계적인 상승, 상층냉각 등에 의해 생성되어 강한 돌풍과 심한 난류, 번개, 맹렬한 소나기 그리고 심한 착빙 등 여러 가지 악기상을 동반한다.

청천난류는 고도에 무관하게 발생하나, 주로 고도 15,000ft 이상의 고도에서 제트 기류, 상층전선, 비 대류성 구름에 의해 발생하는 난류로서 청천난류의 약 75% 이상이 제트 기류에 의해서 발생된다고 한다. 산악파 난류는 안정되고 풍속이 빠른 공기층이 높은 산맥을 통과할 때 산맥으로 인해 강제로 상승되었다가 산맥 통과 후 복원되면서 풍하측에 산악파가 발생하는데 산악파와 관련되어 발생하는 난류를 말하며, 난류의 강도는 산 정상 을 넘는 바람의 속도에 따라 달라지고 산 정상의 풍속이 강하면 강할수록 난류의 발생가능성이 커지고 강도도 강해진다.

3.2 난류 강도

난류의 강도는 객관적으로 결정하기는 곤란하나, 수직방향의 가속도의 정도를 중력가

속도 g를 사용하여 표시. 비행기가 받는 충격은 비행기의 속도와 크기, 중량, 안정도 등의 특성에 좌우. 예를 들어, 어떤 항공기가 180mph의 속도로 비행시 15 ft/s의 돌풍에 봉착하면 0.9g의 가속도가 생긴다고 한다. 아래 표는 NASA에서 구분한 난류강도로서, 청천난류에 관한 관측에 의하면, 약정도 75%, 중정도 15~20%, 심한정도 이상이 5~10% 이었다고 한다.

또한 난류강도는 대기의 운동을 기계적으로 측정하여 결정하기 보다는 통상 비행 중 항공기의 흔들림을 운항승무원이나 승객의 체감, 기내 물건의 움직임, 항공기의 반응에 기초를 두고 분류하고 있다(표 1).

<표 1> 난류 강도에 대한 체감과 단위별 표현

항목 강도	가속도 (g)	체감정도			풍속의 변동폭	연직풍속 (ft/sec)
		비행체	사람	물건		
약정도 (light)	0.1 ~ 0.3	약간의 요동을 느낌	안전벨트 착용	움직임이 없음	15kt 이하	5
중정도 (moderate)	0.4 ~ 0.8	상당한 요동을 느낌, 통제 가능	걸기 힘들어짐	움직임이 있음	15 ~ 25kt	15
심한정도 (severe)	0.9 ~ 1.2	동요가 크고, 고도 변화가 있으며 순간적 통제력상실	심한 충격과 걸기가 불가능	심하게 흔들림	25kt이상	25
극심한 정도 (extreme)	1.2이상	심하게 흔들리며 통제력 상실				30 이상

* severe 난류는 heavy 난류라고도 하며, extreme 난류는 버우를 제외하고는 드문 현상이다.

정량적인 방법에 의하여 난류강도를 구분할 수도 있다. 중력부하(g-load)의 변동, 항공기 속도의 변동폭(kts), 난류 돌풍의 상승/강하율(fpm) 등을 다음 표 2.의 기준에 의하여 난류의 강도를 구분한다. 중력부하는 정상적인 중력을 1g로 정하여 “+” 및 “-” 방향의 값이고, 항공기 속도의 변동폭은 평균 항공기 속도의 편차이며, 난류돌풍에 의한 상승률은 난류 소용돌이에 의해 발생하는 수직(Vertical)운동속도의 시간별 변화량이다.

또한 난류의 강도는 난기류의 크기와 난기류의 수직속도, 항공기의 형태와 무게, 무게 중심(CG), 그리고 비행고도, 속도 및 항공기의 외장(Configuration)에 따라 다르다. 같은 강도의 난기류라도 항공기에 미치는 영향은 항공기의 속도에 비례 하고 항공기 무게에 반비례한다.

<표 2> 난류강도의 정량적인 수치

강도	증력가속도(g)	항공기 속도 변동폭(kts)	수직 풍속 (fpm)
약함 Light	0.2 ~ 0.49	5 ~ 14.9	300 ~ 1,199
보통 Moderate	0.5 ~ 0.99	15 ~ 24.9	1,200 ~ 2,099
심함 Severe	1.0 ~ 1.99	25 이상	2,100 ~ 2,999
극심함 Extreme	2 이상		3,000 이상

참고 : 수치는 모두 “+” 및 “-” 값임

현재 예보에 이용하고 있는 연직 Wind Shear(Vertical Wind Shear)는 등압면 자료를 활용한 난류 예보이며, 미공군 현업 지침서를 참고하여 적용하고 있으며 예보를 위한 지수 산출은 다음의 공식을 따른다.

$$vws = \{ [(u_{700} - u_{900}) / (T_{h_{700}} - T_{h_{900}})]^2 + [(v_{700} - v_{900}) / (T_{h_{700}} - T_{h_{900}})]^2 \}^{1/2}$$

(Th는 층후, v : 남북바람(풍향, 풍속)성분, u : 동서바람(풍향, 풍속)성분)

층후 : 기압이 다른 두 층간의 수직 두께(두 층간의 평균 온도에 비례)

산출된 지수는 다음의 판단 기준을 근거로 그 강도가 결정된다.

<표 3> 난류 판단범위 및 강도

난류판단범위	난류강도
0 ~ 5	약
5 ~ 10	중
10 이상	강

이러한 난류 예보의 특성은 난류의 발생 지역은 어느 정도 예측이 가능하나 난류의 정도는 항공기의 종류나 임무, 조종사의 조종 능력에 따라 다를 수 있다.

3.4. 난류 평가

공역예보에서 발표하는 예보요소는 난류, 착빙, 강수, 시정, 뇌우, 전선 등 6가지이다. 이 요소 중 가장 정확도가 낮은 요소는 난류로서 해마다 평균 점수보다 10점 정도 낮은 상태를 보여왔다.

이는 난류 예측이 다른 요소들 보다 어렵다는 것으로 항공기상에서 가장 해결하기 쉽지 않고, 장시간 연구해야 할 숙제로 남아 있다.

현재 항공기상관리본부에서 이용하고 있는 평가는 우리나라 비행정보구역(FIR) 을 5개 섹터(북부, 서부, 남부, 중부, 동부)로 분류하고, 각 섹터별로 지정된 고층관측지점에서 관측된 자료를 연직윈드시어(VWS)의 난류 산출 계산식을 이용하여 난류 발생과 강도의 대한 지수가 산출되면 이를 그 섹터의 예보와 비교하여 평가하고 있다.

3.5. 수치예보 모델

검증에 사용된 수치예보 모델은 지역모델(RDAPS) 30km로서 현재 기상청에서 현업모델로 이용하고 있으며, 일 2회(09, 21KST) 수행되고 있다.

이 모델에서 생산되어 제공하는 자료는 전체 8개 층(925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 200hPa)에 대하여 강도 표현과 함께 그래픽 처리되어 제공되고 있다.

그러나 난류는 규모가 수십 m에서 수십 km 정도로 작다는 것을 감안하면 항공난류 예보를 지원하기엔 수평 해상도가 너무 낮고, 항공기가 난류를 조우하는 경우가 13,000ft 이하의 하층 고도에서 주로 일어난다는 점을 볼 때 난류를 탐지할 수 있는 낮은 층의 대한 좀 더 자세한 층 분리가 필요한 실정이다.

여기에 사용되는 예보법은 현재 미국 공군에서 현업 운영 중인 Ellrod and Knapp(1992)의 객관적인 청천 난류 예보법을 도입하되, 한반도의 지형 고도가 미국에 비해 높지 않은 점과 항공기가 중하층 대기에서 더 많은 비행을 하는 것을 고려해 중하층 난류 예보에 초점을 맞추고, 공간적으로 해상도가 우수한 수치모델의 도입이 필요한 실정이다.

3.6. 난류지수

수치모델에서 사용하고 있는 Ellrod and Knapp(1992)의 운동학적 난류지수(kinematic turbulent index)를 살펴보면

이 지수는 Petterssen(1956)의 전선발생 강도식 $I_f = 0.5 | \nabla \theta | (DEF \cdot \cos 2\beta + CVG)$ 에 물리적인 근거를 두고 있으며, 온도의 기울기를 자연 좌표계로 표현하고 $\cos 2\beta$ 를 1로 가정한 뒤 온도풍 관계를 적용하여 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$TI2 = VWS \times (DEF + CVG)$$

난류지수 TI2는 전통적으로 사용되어 온 난류 발생 가능성 인자인 VWS항과, 유체의 2차원 속도장(velocity field)을 나타내기 위해 일반적으로 사용되는 수렴(CVG) 및 변형(DEF)항들로 이루어져 있으며, 각각의 정의는 다음과 같다.

$$VWS = \frac{\sqrt{\Delta U^2 + \Delta V^2}}{\Delta Z}$$

$$DEF = \sqrt{DST^2 + DSH^2}$$

$$DST = \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

$$DSH = \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

$$CVG = - \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

여기서, u , v 는 동서(x) 및 남북(y) 방향 속도이다.

VWS는 높이(z)에 따른 풍향과 풍속의 변화율로서, 전체 풍속이 크게 변하지 않더라도 풍향이 연직적으로 급변하게 되면 큰 값을 가질 수 있다. DEF는 원형의 영역을 타원형으로 변형시키는 유체의 한 성질로서 유체의 늘어남과(stretching, DST)과 층밀리기(shearing, DSH)항으로 구성되어 있다. 이 항은 제트기류의 골, 마루, 출구지역에서 큰 값을 가지며 상층의 전선대를 강화하는 작용을 한다.

CVG는 유선의 수렴 또는 공기의 감속에 의해 일어나는 압축현상이다. 일반적으로 대기를 비압축(incompressible) 유체로 취급하므로 공기는 CVG 지역에서 상승하거나 하강하여야 한다. 상층의 제트기류와 대류권계면 부근의 CVG는 강한 침강운동을 유도하고, 몇몇 경우에는 난류를 일으킨다. CVG는 전선 발생에 기여하고 대류권계면의 역전층을 교란시켜 중력파도 발생시킬 수 있다

난류지수 TI2 산출치가 현재 예보에 이용하고 있는 난류 발생 계산식과 대비하여 그 효용성에 대해서 살펴보고자 하는 것이 이 연구의 목적 중에 하나이다.

3.7 검증방법

일반적으로 흔히 사용되는 통계적 검증법은 예보 중심의 검증이다.

즉 어떤 악기상 현상이 예보되면 관측을 통해 그 발생 여부를 확인하는 방법이다. 또한 예보 중심의 비교는 관심을 두는 기상 현상이 한번이라도 발생하면 전체 예보 영역에 대해 검증이 이루어지는 객관적인 방식임에 반해, 항공난류는 이러한 객관적인 관측이 힘들고 한 사건의 효과가 항공기의 기종이나 속도, 이동방향, 위치 등에 따라 다양하게 변할 수 있다는 특징을 가지고 있다. 이 모두가 항공기 관측자료의 주관성과 시공간적인 불균일성에 기인하는 것이다. 이로 인해 조종사관측보고 자료를 검증에 이용하지 않고, 현재 예보 평가가 이루어지고 있는 난류 자료가 생산되는 09, 21KST에 난류 실황과 모델에서 생산된 12시간 예상자료, 예보자가 예상한 층과 난류 강도를 비교 분석하여 평가 시스템에서 평가하고 있는 6개 층에서 난류 강도 5 이상(보통강도 이상)인 경우와 예보를 비교하여 예보 정확도를 산출하는 방법 외에 모델 층별로 난류 강도와 실황, 예보의 일치여부를 판별하여 검증하는 방법을 택하였다.

<표 4> 수치모델 예상장과 실황, 예보와의 검증 방법

예상	모델에서 예상만 한 경우
실황	예상은 안 되고 실황이 나타난 경우
예상+실황	예상과 실황이 나타났으나 예보가 안 된 경우
실황+예보	예상은 안 되고 실황과 예보가 된 경우
예상+예보	실황은 안 나타나고 예상과 예보만 된 경우
예상+실황+예보	세가지 충족된 경우
예보	예보만 된 경우
무	세가지 다 없는 경우

3.8 검증결과

2007년 1~10월까지 공역예보 정확도가 80점을 조금 넘는 수준인데, 이 중 난류 예보 정확도는 70점을 조금 넘기고 있어 공역예보 요소 중 가장 낮은 상태이다. 과거 예보 정확도도 이와 비슷한 양상을 보여주고 있어 난류에 대한 정확도 향상이 전체 공역예보 정확도를 향상시키는 결과를 가져오고, 또한 난류에 대한 악기상정보 발표나 저고도 공역예보와 중고도 중요기상예상도에 표현하는 난류에 대한 이해와 예측은 무엇보다 중요하다고 할 수 있다.

검증 결과는 계절별, 고도별, 고층관측 지점별로 구분하여 살펴보았다.

3.8.1 계절별 난류 분석

[그림 1]은 2007년 1~10월까지 난류 예상과 실황을 비교한 것으로 수치모델에서 예상한 것이 실황으로 나타나는 경우는 3% 정도로 나타났고, 예상은 안 했는데 실황이 나타난 경우는 13%, 예상과 실황, 예보가 일치하는 경우는 3% 나타났다. 예상과 예보가 안 된 상태에서 실황이 나타난 경우도 4%나 되었다.

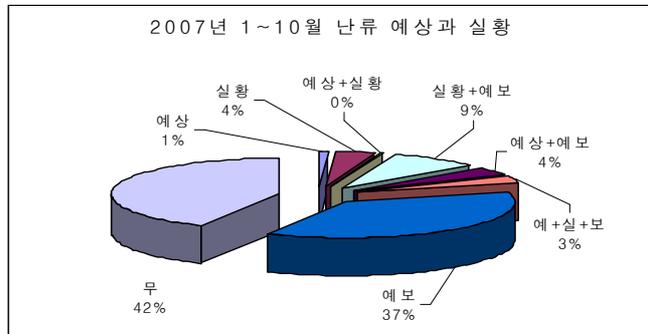
예상, 실황이 나타나지 않고 예보상으로 발표된 경우는 37% 이고, 예상과 실황, 예보가 없는 경우가 42%로 거의 절반 가까이 되는 난류가 나타나지 않는 것으로 분석되었다. 이는 수치모델에서 예상한 자료가 실황으로 나타나는 경우가 거의 없어예보 생산을 위한 참조자료로서의 유용성이 낮다는 것을 알 수 있다.

[그림 2~3]은 계절별로 1, 4, 7, 10월을 기준으로 분석한 것으로 지역적으로 약간씩 차이를 보이고 있는데, 1월에 속초와 포항은 다른 지점에 비해 상대적으로 예상과 실황, 예보 정확도가 조금 높게 나타나고 있고, 오산은 예보는 많이 하는데 실황과 예보가 잘 맞지 않는 것으로 나타났다.

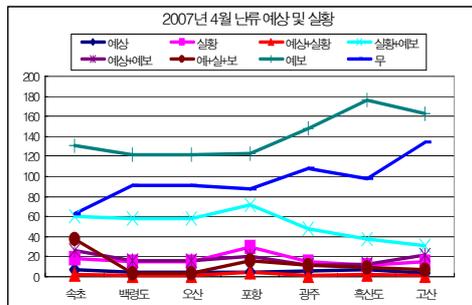
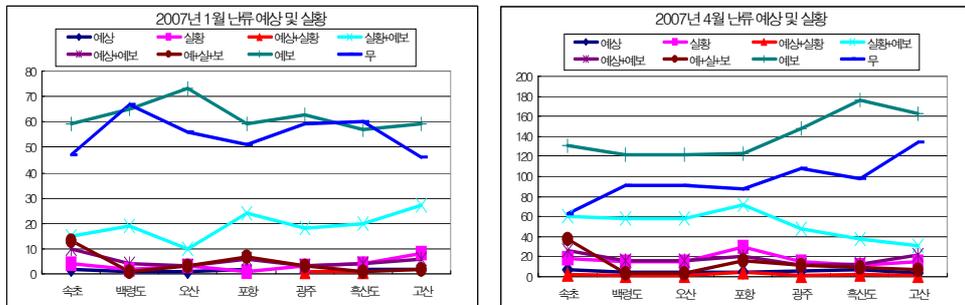
이에 비해 백령도, 광주, 흑산도, 고산은 전체적으로 비슷한 것으로 나타났다.

[그림 2]에서 봄철인 4월은 1월과 다르게 예보는 거의 비슷한 횟수로 발표 되었지만 광주, 흑산도, 고산은 상대적으로 실황과 예보가 맞는 경우가 적고, 속초와 포항은 1월과 비슷하게 예상과 실황, 예보가 일치하는 경우가 상대적으로 높게 나타났다.

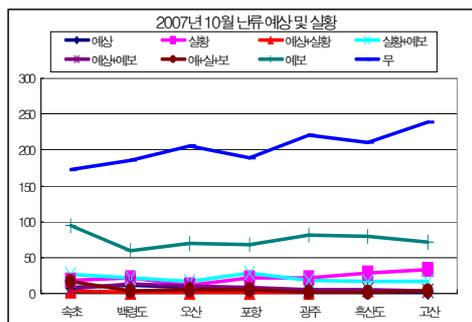
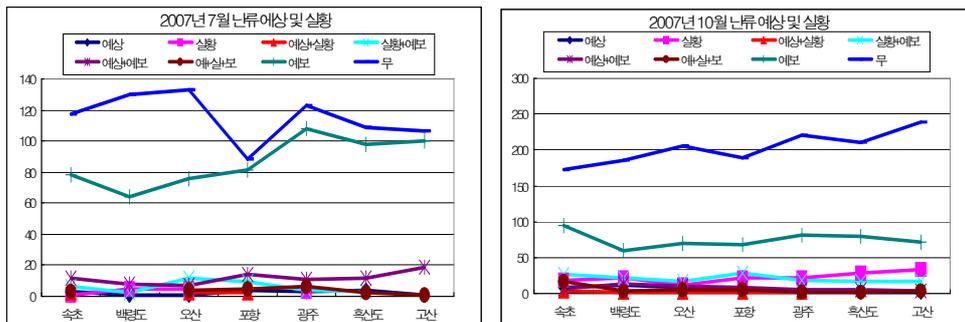
이는 대기 흐름이 겨울에서 봄으로 변화하는 과정에서 남부지방은 상대적으로 기온이 높고, 이동성 고기압 등의 영향을 많이 받아 대기가 중부지방에 비해 안정된 상태를 유지하기 때문에 분석되며, 속초와 포항은 산맥 동쪽에 위치하여 산악파의 영향을 일정 부분 받는 것으로 분석된다.



[그림 1] 2007년 1~10월 난류 예상과 실황



[그림 2] 2007년 1, 4월 난류 예상과 실황



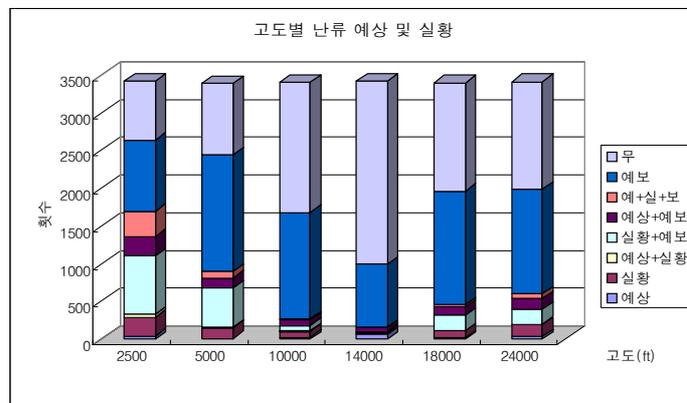
[그림 3] 2007년 7, 10월 난류 예상과 실황

[그림 3]은 7월과 10월의 난류 예상과 실황을 분석한 것으로 7월은 전국적으로 비슷한 패턴을 보여주고 있으나 포항은 상대적으로 난류가 발생하지 않은 경우가 적다는 것을 볼 수 있고, 광주, 흑산도, 고산은 예보와 예상, 실황, 예보가 없는 경우가 거의 비슷한 분포로 나타나 지역적으로 비슷한 기온 분포에 난류 발생도 비슷하게 나타났다.

10월은 난류 발생이 적고, 예보횟수도 적게 하는 것으로 나타났고, 지역적인 차이도 적게 나타나 대기가 가장 안정된 시기임을 알 수 있다.

3.8.2 고도별 난류 분석

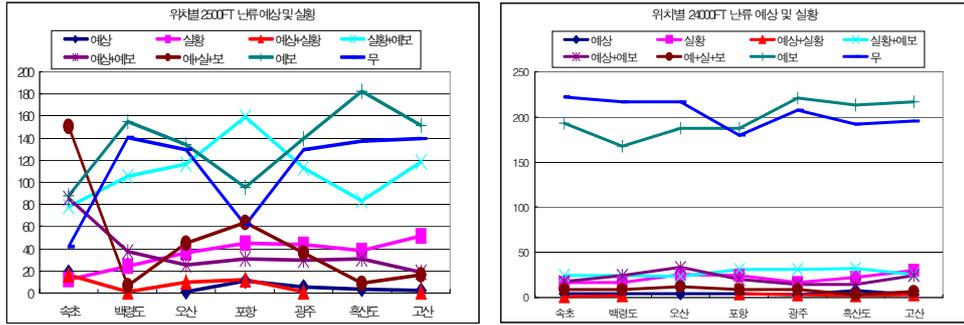
[그림 4]는 고도별 난류 예상 및 실황을 분석한 것으로 공역예보 최상 고도인 25,000ft 까지 분석한 것으로 전 지점에서 10,000ft 이하에서 난류 발생이 많고, 예상과 실황, 예보도 하층에 집중되어 있다. 그림에서 중간층고도인 15,000ft 에서는 상대적으로 난류 발생이 적고, 고도가 높아질수록 증가하는 것으로 나타났다.



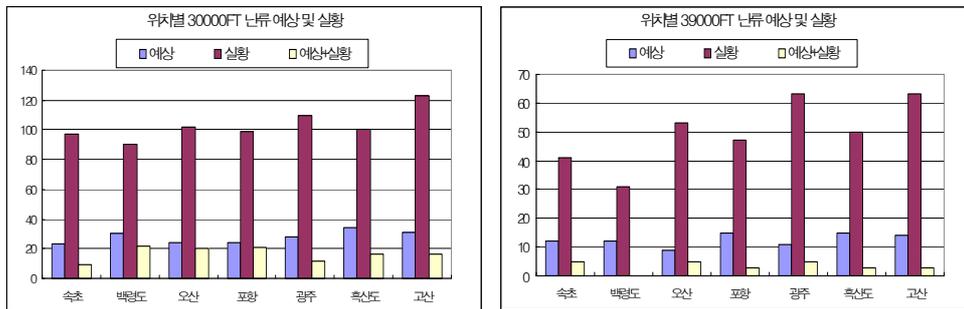
[그림 4] 고도별 난류 예상 및 실황

[그림 5]는 하층 2,500ft 고도의 난류 예상 및 실황을 분석한 것으로 속초, 포항은 예상과 실황, 예보가 일치하는 경우가 많고, 예보만 발표된 경우는 적어 유사한 흐름을 보였다. 백령도와 흑산도, 고산은 예보는 많았으나, 상대적으로 실황은 적게 나타났으며, 공역상의 항공기 운항이 많은 24,000ft 고도에서는 거의 전지역이 비슷한 형태를 보여주고 있다.

[그림 6]은 상층인 30,000ft 이상을 분석한 것으로 실황은 광주, 고산지역으로 많이 나타나며, 모델에서 예상은 전지역에서 비슷하게 예상하고 있다.



[그림 5] 2,500, 24,000ft 위치별 난류 예상 및 실황



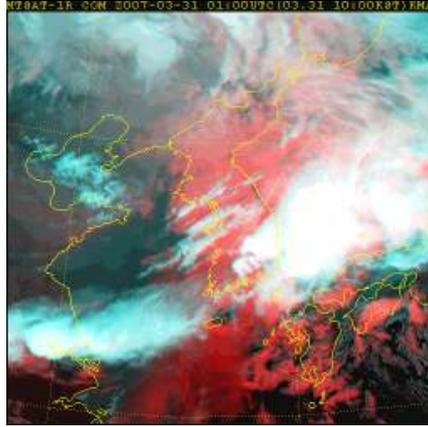
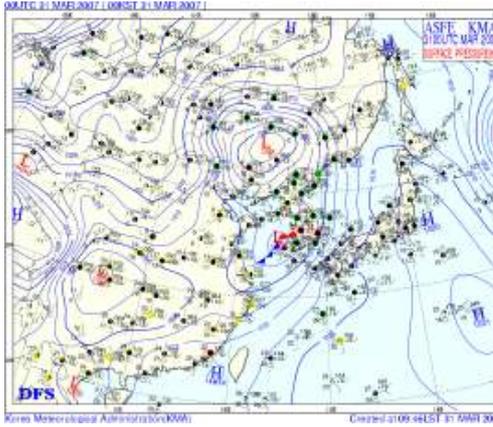
[그림 6] 30,000, 39,000ft 위치별 난류 예상 및 실황

4. 사례분석

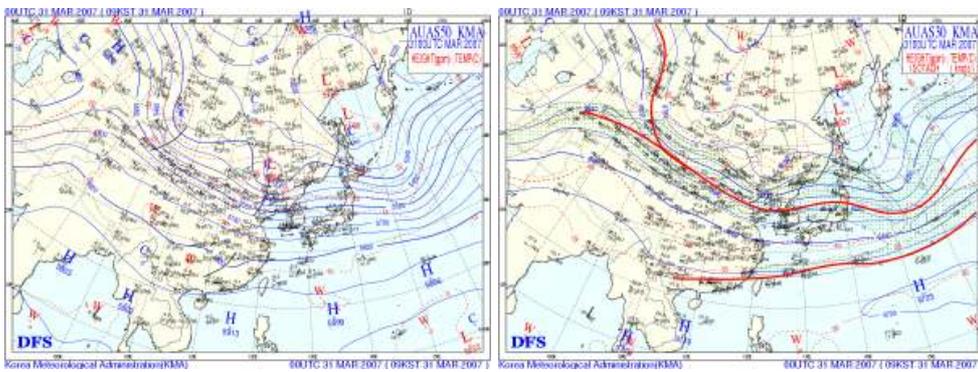
4.1 상·하층 난류 발생

4.1.1 2007년 3월 31일

사례일인 2007년 3월 31일 09KST에는 상하층에서 난류가 발생한 유형으로 만주에서 서해상까지 남북으로 저기압이 위치하면서 서해상에서 발달한 저기압이 한반도를 통과하면서 하층에서 상층까지 경압성이 강화되고, 제트기류도 한반도를 가로질러 통과하고 있다(그림 7~8).



[그림 7] 2007. 3. 31. 09KST 지상일기도, 위성영상

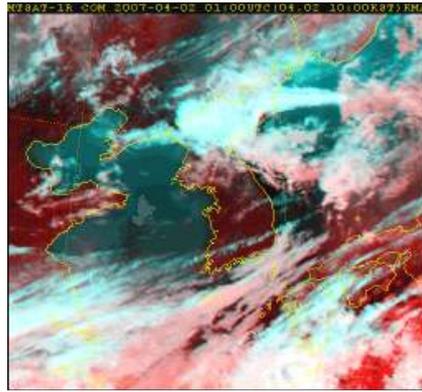
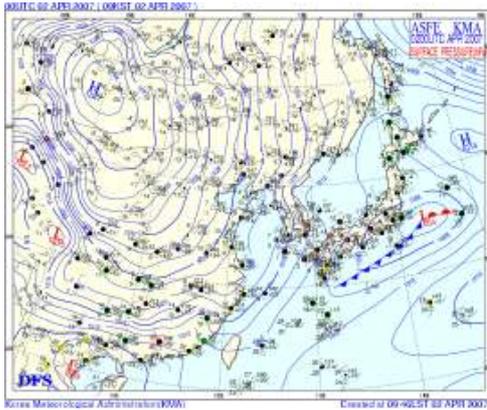


[그림 8] 2007. 3. 31. 09KST 500, 300hPa 일기도

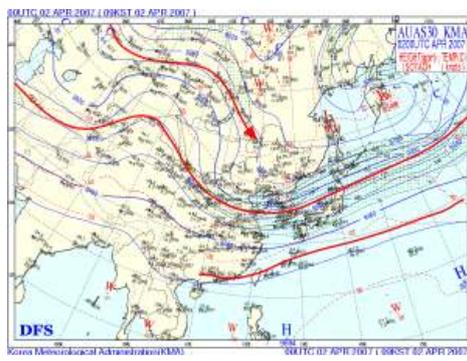
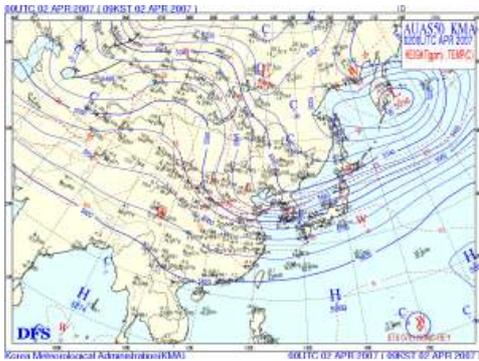
4.1.2 2007년 4월 2일

[그림 9]는 4월 1일 저기압이 한반도를 통과하고 난 후 발달한 대륙고기압이 남동쪽으로 확장하면서 우리나라는 서고동저형의 기압배치에서 남북 순환이 강화되며 경압성이 강한 상태를 보이고 있다. 저기압 통과 후에는 황사가 유입되면서 시정이 악화된 상태가 있었으나 황사는 대륙고기압이 강하게 확장하는 오후에 동해상으로 빠져나갔다.

[그림 10]의 500hPa 일기도에서는 상층골이 통과할 즈음 난류 발생도 최고조에 이르고 제트기류가 우리나라를 동서로 지나갈 때는 상층에서도 난류 강도도 강하게 발생하는 형태를 보이고 있다.



[그림 9] 2007. 4. 2. 지상일기도와 위성영상



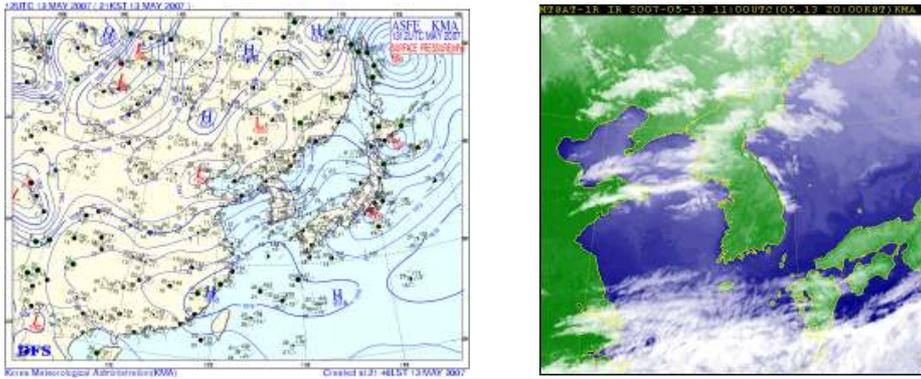
[그림 10] 2007. 4. 2. 500, 300hPa 일기도

4.2 하층 난류 발생

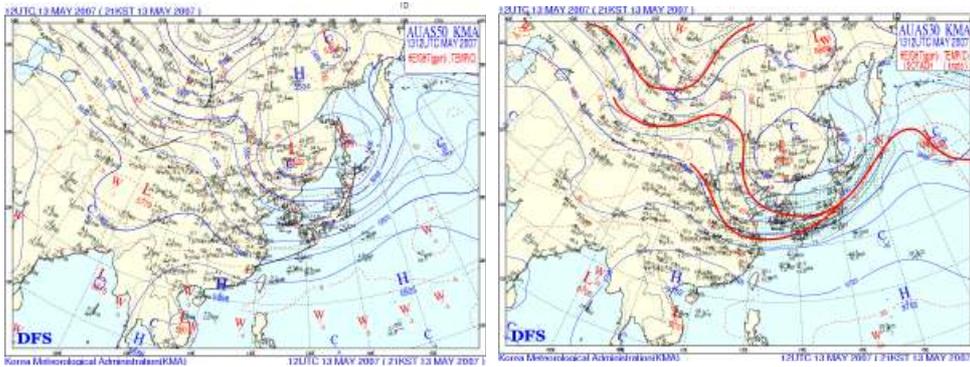
4.2.1 2007년 5월 13일

[그림 11]은 하층 난류 상태 변화를 알아보기 위하여 2007년 5월 13일 21KST 지상일기도와 위성영상을 표출한 것으로 하층에서 난류가 강하게 발생한 사례이다. 우리나라는 남고북저형의 기압배치로 한반도 전역에 걸쳐 남북으로 경압성이 강하지만 특히 중부지방은 고기압 가장자리에서 경압성이 강한 것을 알 수 있다.

[그림 12]의 500hPa 일기도에서 만주지방에 중심을 두고 있는 상층골은 우리나라에 영향을 미치고 있는 상태이며, 점차 동해상으로 빠져 나갈 것으로 예상되고, 상층 제트기류는 남북으로 우리나라 부근에서 합류했다가 일본쪽으로 이동하고 있어 상층의 풍속도 약해질 것으로 예상되고 있다. 이 유형에서 상층 난류강도가 지상에 비해 약해지는 형태지만 동해상으로는 여전히 난류가 강하게 발생할 수 있는 유형으로 판단된다. 여기서 상층 난류는 상층골과 제트기류가 우리나라를 벗어나는 시점으로 해서 난류강도는 약해지는 것으로 분석된다.



[그림 11] 2007. 5. 13. 21KST 지상일기도 및 위성영상



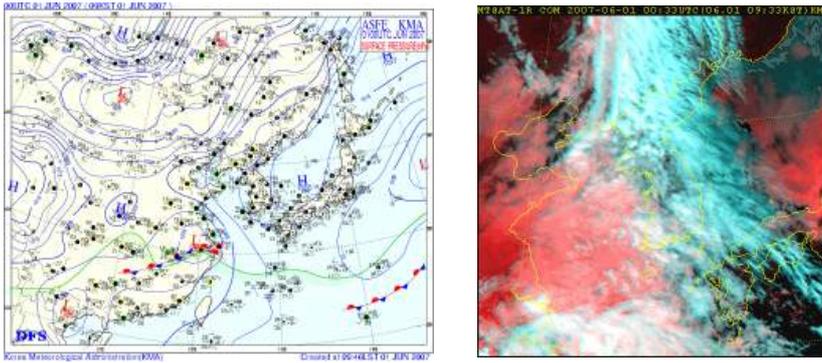
[그림 12] 2007. 5. 13. 21KST 500, 300hPa 일기도

4.3 상층 난류 발생

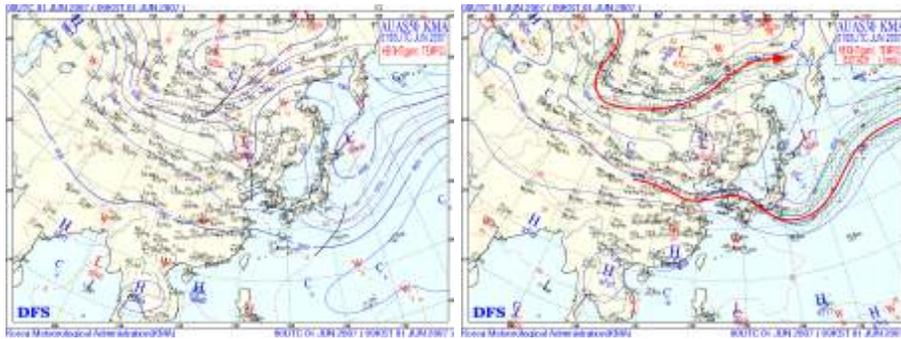
4.3.1 2007년 6월 1일

[그림 13]은 상층 난류 발생 변화를 살펴보기 위하여 2007년 6월 1일 09KST 지상일기도와 위성영상을 표출한 것으로 지상일기도에서는 중국대륙 남북으로 저기압이 위치하고, 우리나라는 오호츠크해 고기압에서 분리되어 동해상에 중심을 두고 있는 고기압의 영향을 받고 있다. 위성영상에서는 상해 부근의 저기압이 우리나라로 확장하지만 동쪽의 고기압의 블로킹에 의해 이동하지 못하고, 전면에서 구름층이 소산되고 있으나 우리나라 전역에 중상층운이 뒤덮고 있는 것을 알 수 있다. 한편 500hPa 일기도에서는 상층골이 북쪽에서 서해상으로 내려오는 형태를 보여주고 있고, 제트기류도 우리나라를 가로질러 통과하고 있다(그림 14).

상대적으로 위성영상이나 지상일기도 등을 살펴보면 하층에도 강한 난류가 발생 할 것으로 예상되는 유형인데 상해 부근의 저기압이 우리나라를 통과하기 전이어서 하층은 난류강도가 약하게 나타났고, 또한 동풍이 강하면서 하층의 시어 변화가 적어 난류 강도가 약한 것으로 판단된다 .



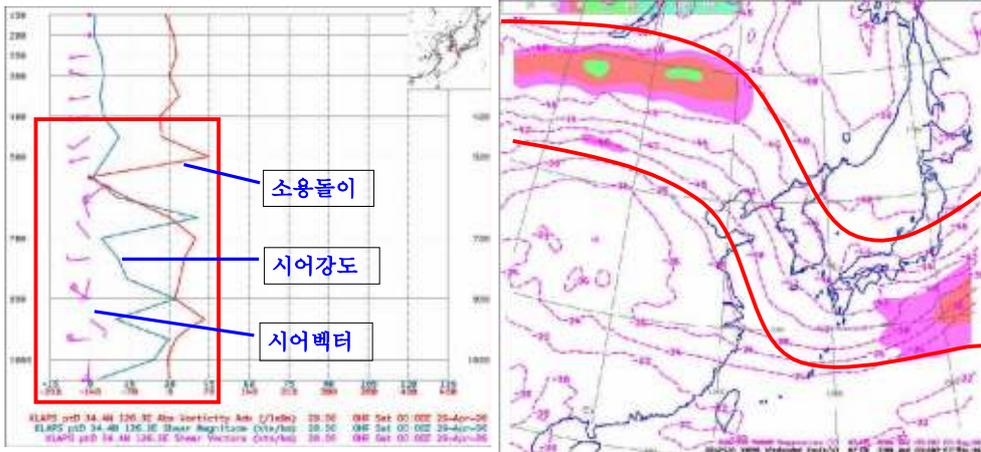
[그림 13] 2007. 6. 1. 09KST 지상일기도 및 위성영상



[그림 14] 2007. 6. 1. 09KST 500, 300hPa 일기도

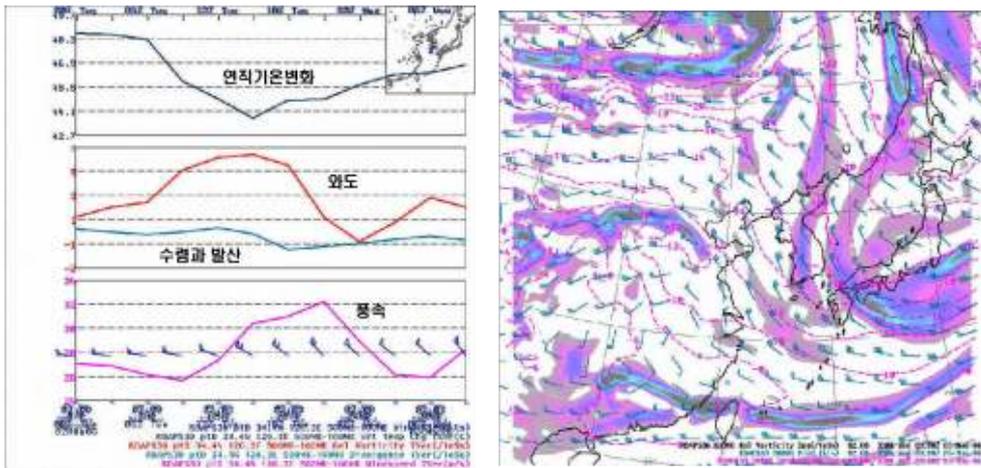
4.4. 난류 발생 유형

본 연구를 통해 난류가 잘 발생하고 강도도 강한 부분을 살펴보면 [그림 15]에 나타난 것과 같이 소용돌이, Wind Shear, 풍향, 풍속 변화가 심한 부분에 난류가 잘 발생하였으며, 강도도 강했다. 특히 하층에서는 이런 특징이 잘 나타났으며, 상층 난류는 제트기류와 불가분의 관계를 가지고 있었다. 그림에서처럼 제트기류가 통과하고, 제트기류가 사행하는 지역, 온도경도가 심한 지역 일수록 두드러지게 나타났다.



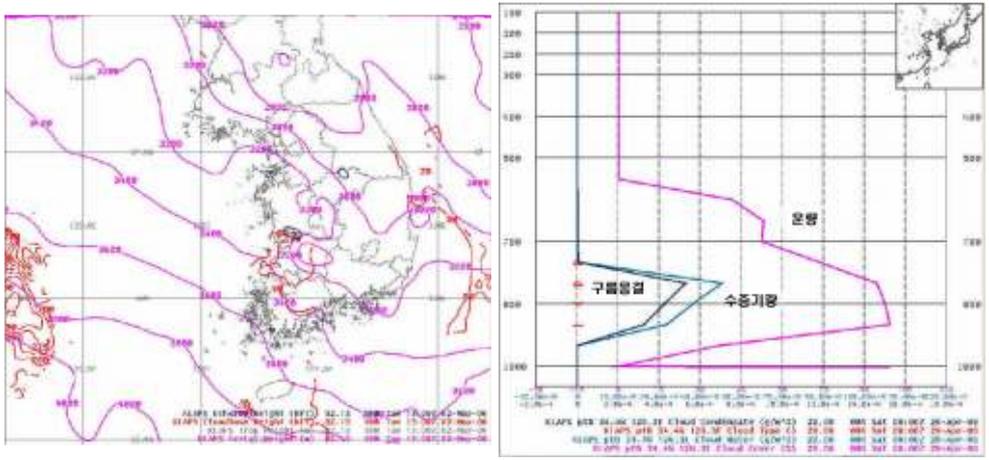
[그림 15] 소용돌이, Wind Shear, 풍향풍속 변화(좌), 제트기류, 기온변화(우)

[그림 16]은 한 지점의 500~1,000hPa 사이의 연직기온변화, 소용돌이, 수렴과 발산, 풍속변화 등을 표출한 것으로 한 지점의 대한 난류 발생 시점과 강도 파악을 예측할 수 있다.



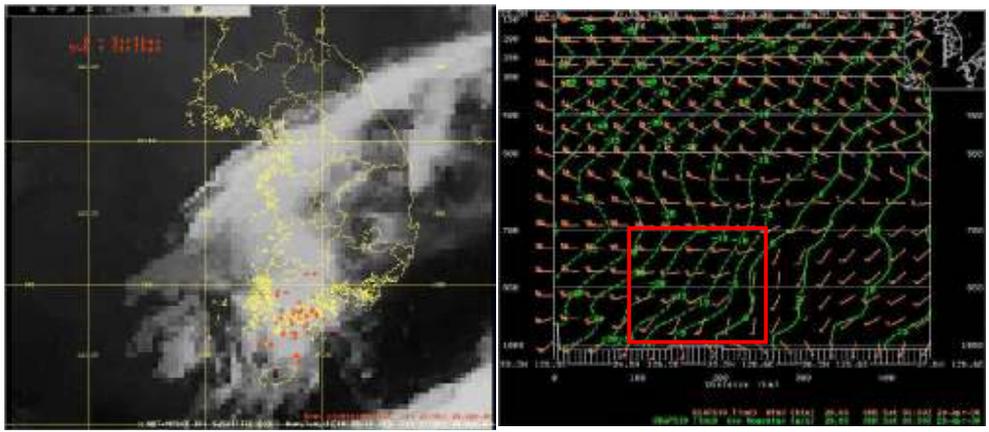
[그림 16] 500~1000hPa 소용돌이, 풍속, 수렴과 발산, 기온변화

[그림 17]은 영동지방에 북동기류의 영향으로 강수가 있었던 사례(좌)로 하층운이 발달하고 운저고도의 강하와 함께 freezing level 고도도 낮아지면서 하층으로 북동기류의 강도와 비례하여 난류 강도도 강화되었던 예이며, 우측자료는 운량과 수증기량, 구름응결량의 변화가 난류 발생 및 강도와 비례한 것으로 나타났다.

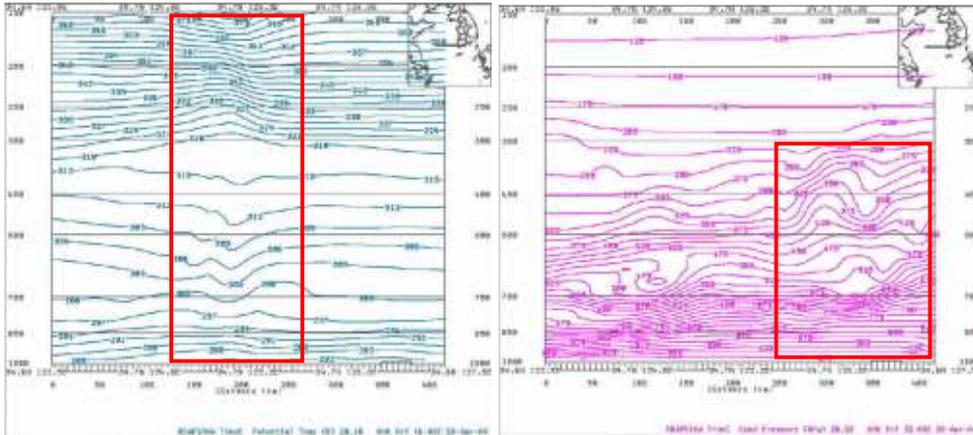


[그림 17] 운고, 구름응결, 수증기량, 운량변화

[그림 18]은 낙뢰 발달과 운형과 운고 파악, 구름의 이동 등 영상자료를 이용한 난류 발생과 강도 등 실황을 파악 할 수 있으며, 예측을 하는데 중요한 자료이다. 또한 공역이나 항공로상의 상하층간의 난류 예측을 위하여 단면도를 분석하고 거기에 따른 운동량과 바람의 변화 등이 심한 지역으로 난류가 많이 발생하는 것으로 나타났다.



[그림 18] 위성 및 낙뢰영상, 운동량과 풍향풍속변화



[그림 19] 기온차와 기압차 급변역

5. 요약 및 결론

난류 예측은 항공기 운항에서 가장 중요한 요소 중에 하나로서 난류가 많이 발생하는 지역은 대기층에 지표가열이나 바람의 마찰효과가 강하고, 불안정한 대기, 강한 상승작용이 있는 지역, 소용돌이가 강하고, 변화가 심한 지역, 기온, 기압, 고도차와 변화가 심한 지역, 전선 통과, 제트기류 위치 및 강도, 적란운 존재 지역 등에 많이 발생하고, 강도도 강하게 나타났다.

계절별로는 가을철에 가장 적고, 여름철에 가장 많았으며, 겨울, 봄철 순으로 나타났다. 특히 여름철에는 기온 상승과 함께 구름이 발달하는 고도도 높아져 난류 발생 고도가 높아지는 것을 알 수 있었다.

고도별로 보면 전체의 절반 이상이 10,000ft 이하에서 나타났고, 겨울철에는 하층에서 많이 발생하는 것으로 나타났다.

지역별로 보면 속초와 포항은 산맥의 동쪽에 있어 일정 부분 산맥의 영향을 받아 예상과 실황 다같이 다른 고층관측 지점에 비해 많이 나타났으며, 난류 발생 유형을 보면 하층에는 저기압 통과 시, 고·저기압 가장자리, 대륙고기압 확장 시, 남북으로 기압 경도가 강할 때, 기압차와 기온차 등이 강할 때 등으로 나타났고, 상층에는 상층골 통과 전후, 제트기류 위치 등에 따라 많이 발생하고, 강하게 나타났다.

기상현상에 따른 난류 강도는 1) 바람이 약하지만 구름이나 산악지역, 2) 소규모 적은 부근, 3) 상층 기압골, 상층저기압 지역, 제트 기류, 권계면 지역에 약한 Wind Shear 가 있는 경우, 4) 대기 층에서 15kt 정도의 바람이 불 경우 등에는 약한 상태의 난류 발생 경우가 많았고,

보통의 난류 경우에는 1) 풍속이 25kt 이상의 지역, 2) 소멸기의 뇌운 내 주위, 3) CB 나 탑상운 부근, 4) 하층지표의 가열이 강할 경우, 5) Wind Shear 가 강한 부분에

많이 나타났다.

강한 난류 발생지역은 1) 하층에서 소용돌이가 강한 지역, 2) 발달기나 성숙기의 뇌운 주위, 3) CB 나 탑상운 내부, 4) 강한 레이더 Echo 통과 지역 등에 많았다.

난류 예측은 그 발생 형태와 관계없이 대기의 흐름을 잘 파악해야 하는데, 난류 발생은 대기 하층의 가열이나 지형마찰, 한난의 경계층 형성 여부, 북서쪽에 한기핵의 존재여부 및 기류의 방향과 속도에 수평 및 연직구조 등에 대한 정밀 분석이 필요하고, 수치예보 모델 결과에서 표출되는 난류에 대한 역학적인 진단, 과거 유사사례에 대한 표본을 추출하여 활용하는 방법도 이 연구 사례와 유사한 사례에 대한 예측성을 높이는데 도움이 되지 않을까 사료된다.