

남한상공에서 발생하는 산악파와 산악파 관측에 대한 연구

노성길, 이용갑, 송근호, 이승주, 박선주
항공기상관리본부 예보과

1. 서론

항공기가 운항 중 겪는 난류는 발생 원인에 따라 열적 난류, 역학적 난류, 지형적 원인의 난류로 분류된다. 열적 난류는 발달한 적란운과 관련된 스콜라인, 한랭전선 등에 의한 것이고, Z-기류 주변에서 활성화 되는 Kelvin-Helmholtz 파에 의한 역학적 난류, 그리고 산악지형을 넘어가는 기류가 연직으로 전파되면서 발생하는 산악파 난류로 분류된다. (홍성길, 1995).

국제민간항공기구(ICAO)의 ANNEX3에서는 계약국에 예보 및 특보, 저고도 악기상 정보(AIRMET; Airman's Meteorological information), 악기상정보(SIGMET; Significant Meteorological information)에 산악파에 대한 발표를 권고하고 있으며, 특히 저고도를 비행하는 항공기 사고의 주요원인에 해당하는 산악파는 항공기 사고를 발생시키는 중요한 기상요소중 하나이다.

산악파에 대한 선행연구는 양간지풍으로 널리 알려진 영동지방을 중심으로 연구가 활성화 되었다. 이재규(2003)는 태백산맥의 지형적인 효과와 관련된 강릉 지역의 강풍 사례에 대한 수치 모의 연구에서 종관적으로 가장 이상적인 남고북저형 기압배치를 보여 순수하게 지형 효과를 볼수 있는 1996년 2월 11일 강풍 사례분석을 통하여 풍하 측 강풍에 대한 수치 모의 검증과 연구를 행하였고, 하현주(1994)는 영동 지방에서 발생하는 국지 강풍특성과 윈 현상과의 관련성 연구를 통해 국지강풍은 중규모의 대기현상이지만 종관배경이 중요하게 작용하고 있음을 보였으며 산맥 풍상 측에 하층 저지현상과 낮은 역전층의 존재를 발견하였고, 산 정상 부근의 강한 바람의 하향 이동에 따른 운동량 수송의 결과 영동 지역 국지 강풍이 발달함을 보였다. 김정훈·정일웅(2006)은 WRF 모델을 이용한 결과 남고북저형 기압 배치 하에서 순수하게 산맥 영향에 의해 영동지역의 국지 하강풍을 발생시킨 2005년 4월 5일 사례에서 풍하 측 상공의 파동파괴가 있었으며, 그와 동반되어 풍하 측에서 난류적 물뿔 현상도 나타남을 발견했다. 또 산맥의 풍상과 풍하 측에서의 푸르드 수(Froude number)를 이용하여 기류의 흐름에 적용하였다.

산악파 예보를 위한 해외 연구사례로 Ellrod, G.P. (1989)는 Lee Wave에 의한 산악파 난류는 권운에 의한 산악파구름의 운열이 산맥과 일정한 GAP이 발생하면 난류발생 가

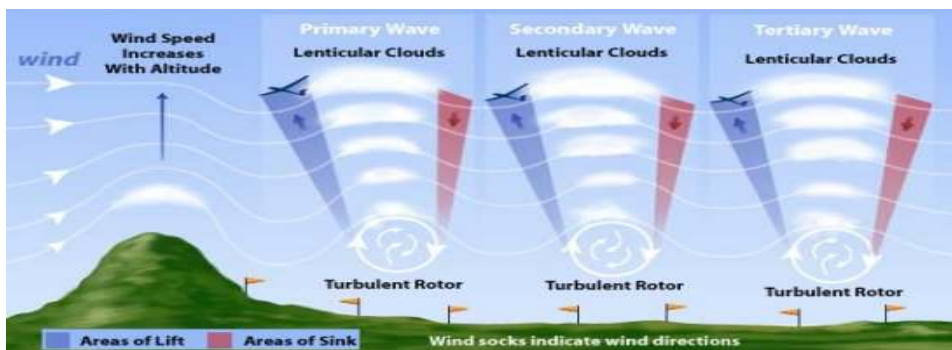
능성이 매우 높다는 연구 결과를 발표했다.

이번 연구의 목적은 산악파 예보에 대한 가이던스의 성격이 크다. 영동지방을 중심으로 산악파와 관련된 연구가 진행되었으나 항공기를 위한 산악파 예보는 산악파에 대한 기초적인 자료가 부족해 아직도 어려움이 많으며, 선행연구자들이 모델값을 이용한 연구가 진행되었지만, 아직도 산악파 예보를 발표하는데 많은 어려움이 있다. 이에 산악파 관측에 관한 객관적 자료를 수집하여 산악파 예보에 도움을 주는데 이번 연구의 목적이 있다.

2. 산악파와 PIREP 분석

2.1 산악파와 항공기 난류

중규모로 나타나는 중력파와는 달리 산악파는 MESO- γ 규모의 대기현상 중 하나이며, 산악파에 의한 항공기 난류는 산맥의 풍하측에서 발생하는 강한 하강기류에서 발생하는 Downslope windstorm과 연직으로 전파된 파가 깨지면서 나타나는 Wave Breaking 지역 마지막으로 산맥의 파가 연직으로 전파되면서 권계면 부근에서 나타나는 산악파 깨짐 지역으로 분류할 수 있다. 마지막으로 파가 진행되면서 상하층 운동을 하는데 WAVE의 능과 곡에서 켈빈헬름홀츠 파가 나타날 수 있다.



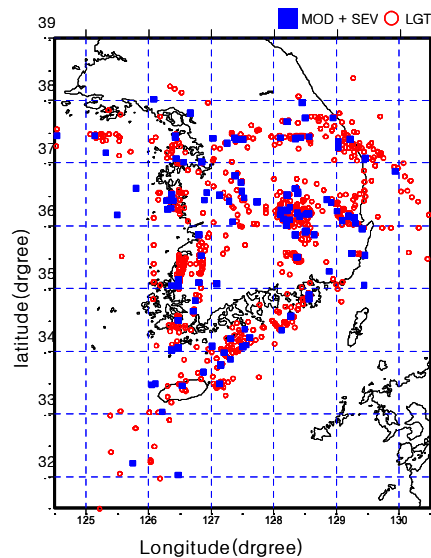
[그림 1] 산악파에 의한 항공기의 위험

2.2 PIREP 자료의 분석

조종사 기상보고(Pilot REPort ; PIREP)란 비행 임무를 수행하는 조종사가 비행 중에 조우하거나 관측한 기상 현상을 기상대 또는 관련 기관에 통보하는 것을 말하며 항공기 상 요소의 검증에 필수적이다. PIREP 자료의 주관성과 누락 자료(missing data)의 해석 문제 등으로 인해 이 자료의 정량적인 사용에 있어서 주의가 필요하다고 지적한 바 있으나, 지금으로서는 PIREP이 시정, 실링(ceiling), 난류, 착빙(icing), 기온, 바람 등의 항공기

상 요소들을 현장에서 직접 관측할 수 있는 유일한 수단이며, PIREP자료를 이용하여 이승재·김영철(2002, 2005)은 항공기 난류 및 항공기 착빙 예측 연구에 사용한 바 있다.

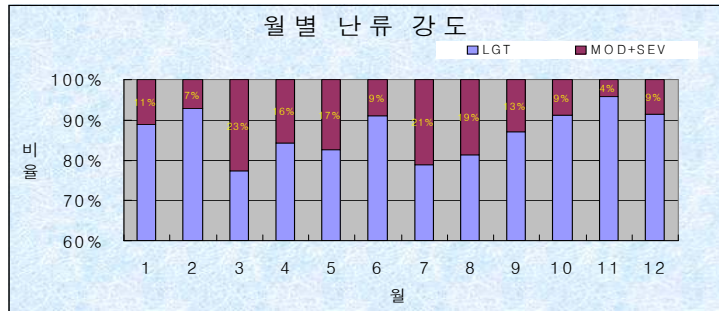
국제민간항공기구(international civil aviation organization ; ICAO) 국제항공항행을 위한 기상업무(meteorological service for international air navigation)에서는 난류보고 단계를 4단계로 분류하여 보고하고 있으나, 국내 항공기에는 난류 측정장치가 설치되어 있지 않아 조종사의 주관적 자료에 의존하고 있다. 난류의 강도는 약(light ; LGT), 중(moderate ; MOD), 강(severe ; SEV), 극심(extreme ; EXRTM) 등 4가지 범주로 구분된다. 본 연구는 항공기상대에서 수집한 조종사 보고 자료를 분석하여 비행 시 상공에서 발생하는 항공기 난류의 특성을 파악하고자 하였다.



[그림 2] 남한 상공에서 관측된 난류(기간 : 2003. 01 ~ 2006. 07)

PIREP자료의 조사기간은 2003년 1월에서 2006년 7월에 남한지역 상공에서 발생했던 항공기 난류(총 보고자료 횟수 : 1,508회) 중 LGT 강도의 난류는 87.5%, MOD의 강도의 난류는 12.4%로 나타났고 SEV의 강도는 총 5건이 보고 됐다. [그림 2]의 난류 분포도는 남한상공에서 관측된 난류 분포자료이며 주로 항공로 및 산악지형에서 많이 발생했다.

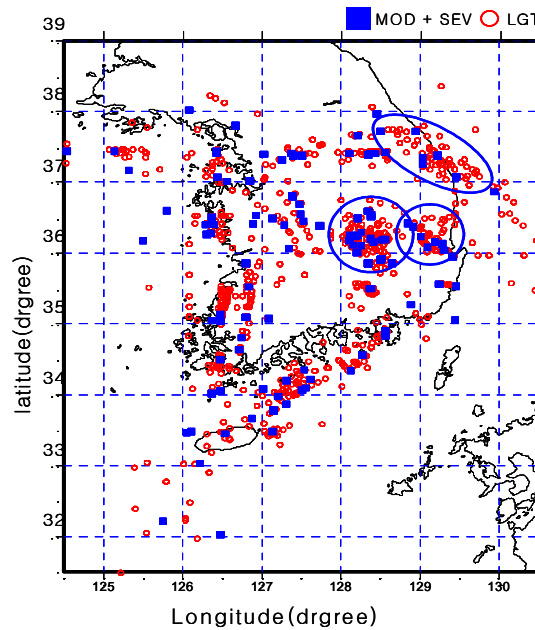
난류강도가 강했던 계절로는 3월, 4월, 5월, 7월, 8월로 나타났으며, 이승재·김영철(2002)과 이영곤·최병철(2003)은 PIREP 분석을 통해 봄철 난류강도가 강하게 나타남을 발표했는데, 이번 분석에도 봄철에 강하게 나타났다. 그리고 7월 및 8월의 경우 난류의 발생 형태는 대부분 열적인 난류로 나타났다.



[그림 3] 월별 난류 강도

3.3 한반도 상공에서의 산악파에 의한 청천난류

청천난류는 바다보다 육상의 산악지형에서 3배 이상 많이 발생한다. 이러한 기계적 난류는 산악 또는 언덕 위를 지나는 바람이 지형 강제에 의한 중력파가 발생하고 일정한 조건에서 연직으로 전파되어 대류권계면까지 전달하게 된다. [그림 4]의 자료에서 남한상공의 난류발생 빈도가 높은 지역을 보면 경상북도 김천-상주, 포항-안동, 태백산맥에 의한 영동지방에서 많이 발생했다. 김천-상주지역은 서쪽에 소백산맥(백호산 : 923 m, 만주지산 : 1,214 m)이 위치하고 있으며, 포항- 안동구간은 (보현산: 1,124 m, 향로봉 932 m), 영동지방의 태백산맥에 의한 산악파에 의한 난류로 예상되며 이러한 위험지역에 대한 난류 경고 및 항공기 운항에 주의가 필요할 것이다.



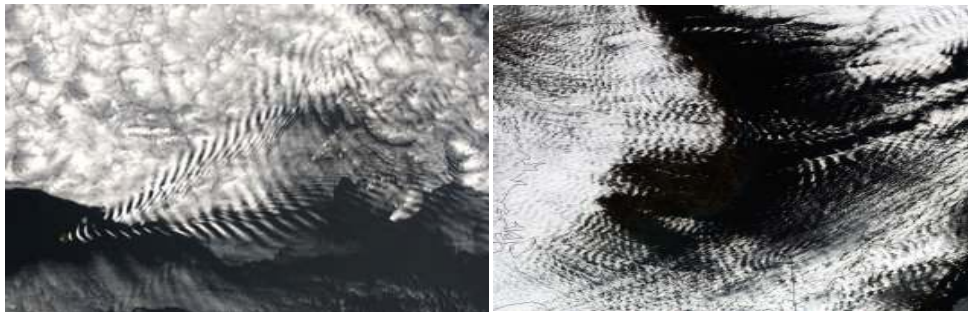
[그림 4] 산악파에 의한 청천난류

3. 본 론

3.1 산악파의 관측

산악파는 기압의 변화가 거의 없으므로 미기압계(microbarograph)로 관측이 가능하나 우리나라에서는 아직까지 관측이 되지 않고 있다. 또 산악부근에서 발생하는 항공기난류 관측 자료를 이용하여 관측자료 수집이 가능하나 이는 역학적 난류와 발생형태가 유사하여 산악파에 의한 항공기 난류로 분류가 어렵다. 기상위성의 분석과 이용(2000 기상청)에 의하면 위성영상에 산악파구름이 관측되고, 산악파구름은 산악파에 의해 발생됨을 기술하였으며, 이에 산악파 관측자료를 산악파구름을 이용하여 조사하였다.

3.2 산악파구름(mountain wave cloud)



[그림 4] 위성영상에 관측된 산악파구름 우) 섬에 의한 산악파구름
좌) 한반도에서 발생하는 산악파구름

산악파구름은 위성영상에서 관측이 가능하며, 습도가 많은 파(Wave)의 능에서 받고랑과 같은 연속적인 파를 발생한다. 산맥과 섬 등 장애물의 풍하측에 등간격으로 늘어선 운역을 “산악파구름”이라 하며 산을 넘는 풍하측에 생기는 산악파구름은 위성영상에서 관측되며, 이러한 구름은 적운과 층적운 등의 하층운에 속한다.

3.3 산악파구름의 발생조건

- 가. 풍향은 상층까지 두터운 층에 걸쳐서 거의 일정하며, 장애물의 진행방향과 직교해야 한다.
- 나. 상층까지 두터운 층에 걸쳐서 절대안정이다.
- 다. 구름을 형성하기에 충분한 수증기가 존재한다.
- 라. 산정부근에서 10m/s 이상의 풍속이 있다.
- 마. scholar수가 감소하는 성층 속에서 발달한다

그러나 위성에서 관측된 산악파구름이 항공기 난류와 직접적인 연관이 되는 것은 아니지만 난기류의 잠재성의 파악에 이용될 수 있다(기상위성영상의 분석과 이용 2000 기상청).

3.4 자료분석 및 조사기간

가. 자료조사기간 : 2003 ~2005년 (3년간)

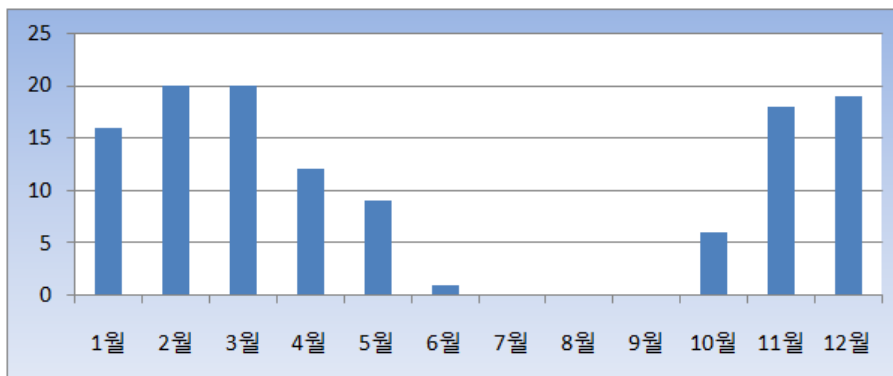
나. 분석자료

위성영상자료 : 가시영상, 적외영상

AWS 자료 : AWS바람벡터, 기압분포도, 기온분포도

3.5 산악파구름 자료의 분석결과

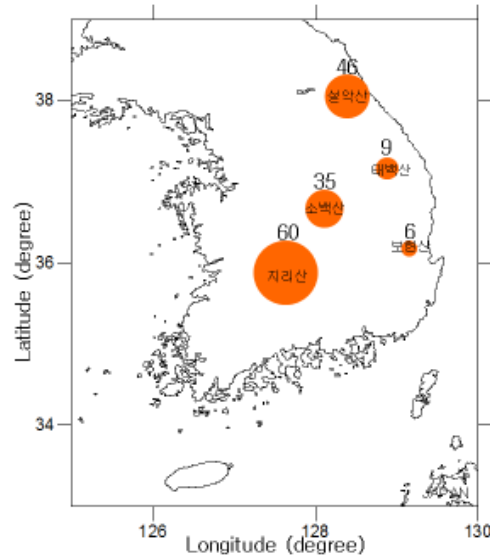
보이지 않은 산악파의 특성상 산악파를 관측하는 유일한 방법으로 산악파구름을 이용했으며, 2003년부터 2005년 동안 위성영상의 가시 및 적외영상을 이용하여 조사하였다.



[그림 5] 월별 산악파구름의 관측횟수

[그림 5]의 월별 산악파구름의 관측횟수를 조사한 결과 대부분 경압대기의 날씨가 나타나는 10월부터 5월까지 나타났으며, 북태평양 기단의 영향을 받는 6월~8월에는 산악파구름이 관측되지 않음을 알 수 있다. 중력파의 종류 중 적란운에 의한 내부중력파는 주변으로 에너지가 전달되는 과정에 산악파구름을 발생시키나(중규모 기상학, 이태영 2005) 지속시간이 짧은 적란운에 의한 산악파구름은 위성영상에서 판독이 어려워 조사가 어려웠다. 그러나 산악파구름의 월별 조사결과 대부분 가을, 겨울, 봄철에 나타났으며, 이는 산악파가 대부분 경압대기에서 나타남을 알 수 있다.

산악파구름은 지형의 영향으로 발생한다. [그림 6]의 발생 지역별로 조사한 자료에 의하면 산악파는 지리산(1,915m) 부근에서 가장 많이 생성되었고, 설악산(1,708m) 소백산(1,124m) 부근에서 생성된 경우가 많았다. 또 일부이지만 태백산(1,568m)에서 또 경북 동해안에 위치한 보현산(1,439m), 백암산(1,004m)에서 관측되었다.



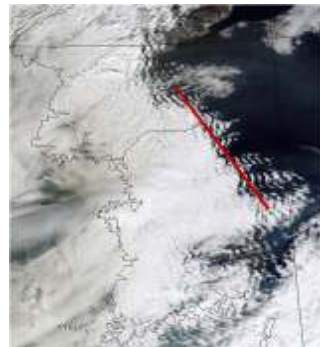
[그림 6] 산악파구름이 발생한 지역별 분포도

3.6 산악파구름의 발생 패턴별 분류

이번 조사과정에서 특징은 산악파구름의 운열의 진행방향이 크게 3가지 형태로 나타났다. [그림 7]의 계열 A의 북동-남서로 나타난 경우는 소백산맥과 관련된 소백산, 속리산(1,058m), 지리산에 의하여 형성된 운열로 생성되었고, B의 북서-남동계열은 태백산맥 북쪽의 설악산, 오대산(1,563m)에 의하여 발생한 산악파구름이며, C의 북-남 운열은 태백산맥 중부의 태백산, 가리왕산(1,563m) 부근에서 발생한 운열로 분석되었다.



계열A: 북동-남서



계열B: 북서-남동



계열 C : 북-남

[그림 7] 산악파구름의 진행 방향별 종류

<표 1> 산악파구름의 진행방향별 발생횟수

구 분	북동-남서 계열	북서-남동 계열	북-남 계열
발생횟수(%)	51(66%)	18(23%)	8(11%)

산악파구름의 진행방향별 나타난 횟수를 보면 북동-남서 계열이 51회로 대부분 관측되었고, 북서-남동 계열은 18회(23%), 북-남 계열 11%로 나타났다.

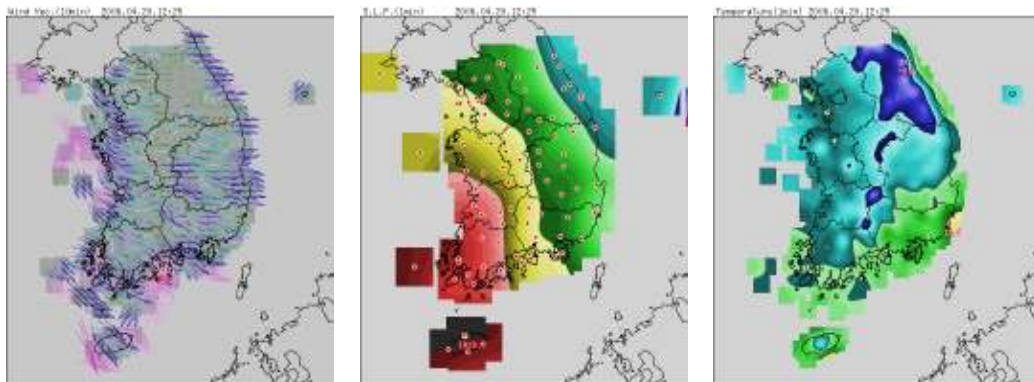
[그림 6]과 <표 1>의 결과를 통하여 남한에서 발생하는 산악파는 백두대간에서 주로 나타났으며, 일부 경상도 동쪽지방으로 나타나는 경우도 있었으나 이는 소백산맥에 의한 산악파구름의 전파 및 2차 파동에 의한 산악파구름(TURBULENCE Peter F. I. 2000)의 생성으로 분석된다.

3.7 산악파 관측 자료에 대한 검증

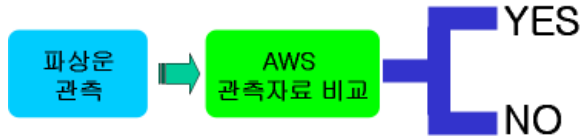
산악파 예보를 발표하는데 객관적인 관측 자료의 부족이 가장 큰 문제이다. 관측자료의 부족은 산악파예보가 아직도 어렵다는 한계로 나타나나고 있으며, 이번 연구에서는 산악파의 관측 자료에 대한 수집에 노력을 했다.

중력과 이론에 의하면 종관규모의 산맥의 풍하측에 기압이 낮아지는 특성이 나타나며, 영동지방의 폭설도 풍하측에서 발생하는 저기압의 영향에 의한 것으로 나타나 산맥의 풍상측과 풍하측의 기압을 비교했으며, 두 번째 산악파는 정상부근에서 밀도가 높은 공기가 풍하측으로 밀려내려 오면서 강풍을 발생시키며 이러한 원인으로 풍상과 풍하측의 강풍을 비교해 보았다. 마지막으로 편현상에 의한 기온의 증가에 대하여 검증해 보았다.

- 가. 풍하측의 풍속이 풍상측보다 5m/s 이상 증가한 경우
- 나. 풍하측에서 기압이 풍상측보다 5hPa 이상 낮아진 경우
- 다. 풍하측에서 기온이 풍상측보다 +5℃ 이상 증가



[그림 8] AWS 관측자료 바람벡터, 해면기압, 기온



[그림 9] 관측자료의 검증

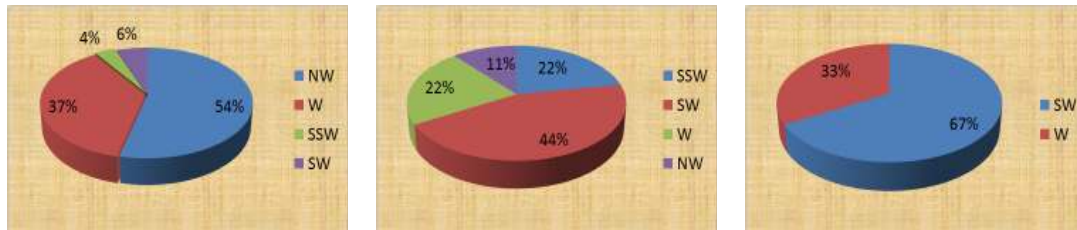
검증은 산악파구름이 관측지점의 AWS 바람벡터, 해면기압, 기온의 자료를 조사하여 조건에 부합되면 “YES”, 맞지 않으면 "NO"로 검증을 실시했다.

<표 2> 산악파 관측자료에 대한 검증 결과

구 분	계열		
	북동-남서 계열	북 - 남 계열	북서-남동 계열
풍하측 풍속이 5m/s이상 증가한 경우	76%	73%	75%
풍하측에서 기압이 5hPa 낮아진경우	12%	15%	9%
풍하측에서 기온 +5℃이상 증가한 경우	25%	26%	28%

검증결과 산악파구름이 관측되고 산악파구름이 발생한 산맥을 중심으로 지상의 관측자료를 비교한 결과 풍하측 풍속이 5m/s이상 증가한 경우가 75%이상의 연관성이 있었으나 기압이나 기온은 연관성이 낮게 나타났다

산악파와 관련된 지상관측자료의 활용중 풍하측 풍속의 증가가 산악파와의 연관성이 매우 높은 것으로 조사됐으며, 이는 풍하측 경사면 폭풍(대기역학 J. R. Holton)에 대한 역학적인 설명이 기술되어 있다.



북동-남서 계열

북서-남동 계열

북-남 계열

[그림 10] 계열별 지상풍속

이와 같은 결과를 바탕으로 산악파구름의 방향별 지상풍속을 조사한 결과 북동-남서 계열의 산악파구름은 NW풍이 54%, W풍이 37%로 대부분을 차지했으며, 북서-남동계열

의 지상풍속은 SSW, SW, W풍 계열의 바람이 불었고 북-남 계열은 SW, W풍이 차지했다.



[그림 11] 계절별 지상풍속

지상 풍속별 분포를 구분해 본 결과, 지리산 부근에서 발생하는 산악파는 지상풍속이 대부분 서에서 북서계열의 바람이었으며, 설악산 부근에서 발생하는 산악파는 SW-W풍 계열의 바람이 관측되고 태백산은 서풍 계열의 바람이 관측되었다.

검증자료와 계절별 풍속자료를 비교해본 결과 산악파의 관측방법은 AWS 바람벡터를 이용하는 방법이 좋을 것이며, 지상의 풍속이 산맥과 직교하고 풍하측에서 풍속이 증가한다면, 산악파를 추정해도 될 것 같다.

5. 결론

우리나라의 지형과 관련된 항공기 난류 발생지역은 태백산맥 효과에 의해 영동지역에 많이 발생할 것으로 예상했지만 PIREP 자료의 분석 결과 영동지방 이외에 전라남도 장성에서 전라북도 고창사이, 소백산맥 풍하측에 위치한 대구분지, 경상북도 영천과 울산광역시 사이에 청천난류의 발생빈도가 높게 나타났다. 그러므로 이들 지역에 대한 조종사의 주의가 필요할 것이며, 산악파는 청천난류의 주요 발생 원인에 해당하므로 산악파 발생 및 예측에 관한 연구가 필요할 것으로 본다.

보이지 않는 특성을 가진 산악파 연구를 위하여 위성영상의 산악파구름을 이용했으며 산악파구름의 관측 자료를 이용하여 산악파에 통계분석을 실시했다.

우리나라의 산악파는 10월부터 5월까지 나타났으며, 주로 설악산, 소백산, 지리산으로 이어지는 백두대간을 중심으로 나타났다. 산악파구름의 운열은 북서기류에 의한 소백산맥

과 관련된 산악파와 남서기류에 의한 설악산의 산악파, 서풍에 의한 태백산의 산악파로 분류 됐다.

그리고 이번 연구에서는 산악파의 관측가능성에 대한 연구를 실시했다. 산악파 구름이 발생한 지역 산맥을 중심으로 풍상측과 풍하측의 바람, 기온, 기압을 비교해본 결과 기온과 기압은 연관성이 낮았지만 풍하측의 바람은 75%의 매우 높은 연관성을 나타냈으며, 이는 산맥의 풍하측에 풍상측보다 강한 바람이 관측된다면 산악파 발생가능성에 대한 객관적 추정이 가능할것으로 생각된다.

이번 연구를 통해 산악파에 대한 통계적 접근과 풍하측에서 발생하는 강풍자료를 이용하여 산악파의 존재가능성에 대한 검증을 실시했으나 아쉬운 점은 지상의 실황에서 객관적인 분석자료의 생성이 필요할 것으로 보인다. 푸르드 수(Froude number)나 스코러 모수(Scorer Parameter)등에 대한 값을 실황자료에서 생성한다면 보다 객관적 산악파 예보가 가능할 것으로 생각한다.

6. 참고문헌

- 이승재 · 김영철, 2002: 남한지역 상공에서 관측된 항공기 난류의 수치예보와 검증. 한국기상학회지38, 5, 493-507
- 김정훈 · 정일웅 2006: 봄철 영동 지역 국지 하강풍 메커니즘과 지형 효과에 대한 연구 한국기상학회지,
- 이재규, 2003: 태백산맥의 지형적인 효과와 관련된 강릉지역의 강풍 사례에 대한 수치 모의 연구. 한국환경과학회지, 12, 1245-1254
- 홍성길, 1995, 기상분석과 일기예보, 교학연구사, 530 pp.
- 김보희, 1995, 항공기상학, 한국항공대학교 출판부, 385 pp.
- Peter F. Lester, 2004, JEPPESEN, 468 PP.
- 기상청, 2000, 기상위성영상의 분석과 이용, 161 pp.