

碩士學位論文

제주국제공항에 발생하는
저층윈드쉬어에 관한 연구

濟州大學校 産業大學院

海洋生産學科



洪 根 道

2 0 0 6

제주국제공항에 발생하는 저층윈드쉬어에 관한 연구

지도교수 윤 석 훈

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함.

2006년 6월

제주대학교 산업대학원

해양생산학과 해양학전공

홍 근 도



홍 근 도의 이학 석사학위 논문을 인준함.

2006년 6월

심사위원장 고 유 봉 ①

위 원 윤 석 훈 ①

위 원 문 일 주 ①

A STUDY ON THE LOW LEVEL WINDSHEAR
AROUND JEJU INTERNATIONAL AIRPORT

Kun-Do Hong

(Supervised by professor Seok-Hoon Yoon)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE



DEPARTMENT OF MARINE PRODUCTION
GRADUATE SCHOOL OF INDUSTRY
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

JUNE, 2006

목 차

그림 목차 (List of Figures)	i
표 목차(List of Tables)	iii
Summary	iv
I. 서 론	1
II. 지형 및 분석기기	4
1. 제주공항의 주변지형	4
2. 윈드쉬어 및 발생요인	6
3. 저층윈드쉬어경보 장치	11
III. 자료분석 방법	17
IV. 분석결과	18
1. 윈드시어 발생일수	18
2. 제주공항 강풍특보 발표현황	21
3. 강풍으로 인한 항공기 결항 및 지연운항	24
4. 윈드쉬어 발생메커니즘	26
5. 모 식 도	32
6. 사례분석	42
V. 결 론	44
- 참고 문헌	46
- 요약	47
- 감사의 글	48

그림 목차 (List of Figures)

Fig. 1. Topographic map of Jeju island and Jeju International airport location.	5
Fig. 2. Microburst and vortex ring.(AMO, 2004)	8
Fig. 3. Effect of a microburst wind.(AMO, 2004)	8
Fig. 4. Three-dimensional view of windflow around cold/warm frontal system up to 2,000ft.(ICAO, 1987)	9
Fig. 5. Sea breeze front.(ICAO, 1987)	9
Fig. 6. Wind flow around obstacles.(ICAO, 1987)	10
Fig. 7. LLWAS data collection system.(AMO, 2004)	12
Fig. 8. LLWAS	12
Fig. 9. LLWAS system configuration.(AMO, 2004)	13
Fig. 10. Master station(a)	13
Fig. 11. Master station(b)	13
Fig. 12. Remote station	14
Fig. 13. Ribbon display terminal	14
Fig. 14. Display 7selection devices	14
Fig. 15. LLWAS algorithm.(AMO, 2004)	16
Fig. 16. Gain & Loss.(AMO, 2004)	16
Fig. 17. Frequency of monthly mean (2002~2005).	19
Fig. 18. Frequency of season mean (2002~2005).	19
Fig. 19. Monthly mean of strong wind Advisory and Duration	22
Fig. 20. Season average of strong wind Advisory and Duration (2002~2005).	22
Fig. 21. Monthly average aircraft canceled and delay(2003~2004).	25
Fig. 22. Surface weather chart 09:00(A) 21:00(B) 21. JAN., 2004	27
Fig. 23. AWS wind vector image 12:45(A) 12:50(B) 21. JAN., 2004	27
Fig. 24. LLWAS windshear image 12:47(A) 12:51(B) 21. JAN., 2004	27

Fig. 25. Surface weather chart 09:00(A) 21:00(B) 21. APR., 2004	29
Fig. 26. AWS wind vector image 08:55(A) 17:55(B) 21. APR., 2004	29
Fig. 27. LLWAS windshear image 09:00(A) 17:06(B) 21. APR., 2004	29
Fig. 28. Surface weather chart 09:00(A) 21:00(B) 17. JUL., 2003	31
Fig. 29. AWS wind vector image 21:20(A) 21:25(B) 17. JUL., 2003	31
Fig. 30. LLWAS windshear and microburst image 21:20(A) 21:25(B) 17. JUL., 2003 ..	31
Fig. 31. Surface weather chart 21:00(A) 25, 12:00(B) 26. NOV., 2004	33
Fig. 32. AWS wind vector image 06:00(A) 12:00(B) 26. NOV., 2004	33
Fig. 33. LLWAS windshear image 07:12(A) 08:53(B) 26. NOV., 2004	33
Fig. 34. Winter season mimetic diagram case A	35
Fig. 35. Winter season mimetic diagram case B	35
Fig. 36. Spring season mimetic diagram case A	37
Fig. 37. Spring season mimetic diagram case B	37
Fig. 38. Spring season mimetic diagram case C	38
Fig. 39. Summer season mimetic diagram case A	40
Fig. 40. Summer season mimetic diagram case B	40
Fig. 41. Autumn season mimetic diagram case A	42
Fig. 42. Autumn season mimetic diagram case B	42
Fig. 43. Surface weather chart 09:00(A) 21:00(B) 9. APR., 2006	44
Fig. 44. AWS wind vector image 11:30(A) 17:35(B) 9. APR., 2006	44
Fig. 45. LLWAS windshear image 13:51(A) 14:03(B) 9. APR., 2006	44

표 목차 (List of Tables)

Table 1. Frequency of monthly total and mean of windshear and microburst (2002~2005)	21
Table 2. Frequency of monthly total and mean of strong wind Advisory and Duration (2002~2005)	24
Table 3. Frequency of monthly total and mean of Cancel and Delay (2003~2004)	26



A STUDY ON THE LOW LEVEL WINDSHEAR AROUND JEJU INTERNATIONAL AIRPORT

Kun-Do Hong

Department of Marine Production
Graduate School of Industry
Cheju National University

Supervised by professor Seok-Hoon Yoon

Summary

The mechanism of seasonal windshear occurrence at Jeju airport and the relationship between the strong wind and windshear advisory and flight cancellation have been investigated using a low level windshear alert system.

The windshear at Jeju airport occurs most frequently in winter and progressively less often in spring, summer, and autumn. Months with the highest occurrence rates are December, January, March, April, July, and August. The strong wind advisory also occurs most frequently in winter and progressively less often in spring, summer, and autumn.

The longest duration of the strong wind advisory happens in winter and progressively less long in spring, summer and autumn. Months with the longest durations are December, January, March, April, July, and September. The total cases of flight cancellation and delay due to strong winds and typhoons at Jeju airport are the highest in January, while the only cancellation cases are the highest in September and the delay cases are the highest in May.

The characteristics of windshear at Jeju airport differ seasonally mainly due to the different seasonal wind feature as well as the topographical effect. It also shows that the most windshears occur in the strong wind events at Jeju airport. The mechanism of the seasonal windshear occurrence at Jeju airport can be summarized as follows.

In winter (December–February), the windshear occurs most frequently. The windshear occurs due to the abrupt speed change of northwesterly wind in time as well as the spatial change of wind speed induced by the terrain around Jeju airport. In spring (March–May), the windshear, which is strong and frequent, occurs due to the foehn phenomenon as well as the terrain factor that modifies strong southerly winds, resulting in converging winds at Jeju airport. In summer (June–August), the windshear occurs due to the three major factors; southwesterly winds by foehn phenomenon, strong winds generated by the local low atmospheric pressure, and easterly winds by typhoons. In autumn (September–November), the windshear, which is very rare, occurs due to westerly and northerly winds by cold fronts as well as the effect of typhoon.

I. 서 론

제주도민과 제주도를 찾는 많은 관광객들의 대부분은 항공기를 이용하고 있으며, 그 수요는 점차 증가하고 있다. 국제항공운송협회는 향후 2010년까지 세계 항공수요가 연평균 3.5~4.6%씩 증가할 것으로 예상하고 있으며, 특히 아·태지역의 항공수요는 앞으로 지속적으로 증가할 것으로 예측하고 있다. 제주공항의 경우에도 2002년도 항공교통량은 1999년도 대비 37.4%, 여객은 20.5%가 증가하였다(한국공항공사, 2003). 최근 제주공항은 항공수요의 증가와 함께 안전한 항공기 운항에 대한 관심이 커지고 있다. 항공기의 안전운항에 가장 큰 영향을 미치는 것은 기상현상으로서 제주공항의 경우 결항의 약 60%가 기상현상에 의한 것이다(부산지방항공청, 2006). 항공기의 운항에 위험을 주는 기상현상으로는 크게 시정확보에 문제를 일으키는 안개, 이착륙에 문제를 일으키는 강풍, 그리고 최근 가장 주목되고 있는 저층윈드쉬어가 있다(항공기상대, 2005). 이중 저층윈드쉬어(이하 윈드쉬어)는 다른 기상현상들과는 달리 아주 국지적으로 발생하며 지속시간이 짧기 때문에 그 발생메커니즘을 명확히 밝히기가 어렵다(ICAO, 1987).

제주공항에 발생하는 윈드쉬어의 대부분은 기상적인 요인과 지형적인 요인이 결합되면서 발생하고 있으며, 지표면 가까이에서 발생하고 있다. 항공기가 착륙 진입 시 윈드쉬어를 만나서 갑작스런 맞바람(head wind)의 감소나 뒷바람(tail wind)의 증가로 항공기를 조종하는데 실패하면 항공기의 대기속도는 감소하며, 항공기는 부력의 상실로 활주로를 벗어나 불시착할 수 있다. 또한 항공기가 이륙 시 윈드쉬어를 만나서 맞바람이 감소하거나 뒷바람이 증가하면 상승각이나 상승률은 더 낮아져 측풍(cross wind)성분을 가진 강한 윈드쉬어가 발생하여 항공기를 활주로의 중심으로부터 벗어나게 하는 원인이 될 수 있다.

제주공항과 같이 지형적인 영향으로 윈드시어 발생 가능성이 높은 대표적인 외국공항은 홍콩의 첵랍콕 (Chek Lap Kok) 국제공항이다. 이 공항의 주위에는 최대 높이 1000 m의 높은 산들로 인해 지형에 의한 윈드시어가 발생하고 있다. 따라서 이를 감지하고 경보하기 위해 Windshear and Turbulence Warning system (WTWS)이라는 윈드시어 경보시스템을 갖추고 있다. 이 공항의 연구 보고서에서는 지형에 의한 윈드시어는 그 지형이 험할수록 발생빈도가 높고, 지형에 따라서 발생지역이 뚜렷하다고 하였다. 또한 윈드시어의 크기 및 강도는 풍속이 결정되며, 발생위치는 풍향에 의해 결정되었다고 한다.

1970년대 JFK (John Fitzgerald Kennedy)공항의 마이크로버스트로 인한 사고를 계기로 본격적으로 저층윈드시어에 대한 연구가 미연방항공국인 FAA (Federal Aviation Administration)에서 시작되었다. 1980년대 저층윈드시어경보장치(Low Level Windshear Alert System(LLWAS))가 개발되어 현재는 미국의 거의 모든 공항에는 설치되어 운영되고 있다. 또한 이 장비는 대만, 싱가포르, 사우디아라비아, 쿠웨이트 등에서도 적극 활용되고 있으며, 우리나라에도 인천국제공항, 제주국제공항 그리고 양양공항에 설치 운영되고 있다. LLWAS는 지상에서 약 30~40m 상공의 풍향·풍속을 측정하는 후 가까이에 있는 LLWAS 지점의 풍향·풍속의 차이 및 변화경향을 파악해 윈드시어를 관측하게 된다. 윈드시어의 관측과 동시에 관제사에게 보고가 되며, 관제사는 이를 조종사에게 정보를 제공하는 시스템으로 되어 있다. 그리고 아주 강한 윈드시어가 발생할 경우에는 한번 더 마이크로버스트 경보를 함으로써 윈드시어로 인한 사고를 사전에 예방하는 시스템이다. LLWAS의 알고리즘은 NCAR (National Center for Atmospheric Research)가 UCAR (University Corporation for Atmospheric Research)에 의뢰하여 개발 되었으며, 현재 LLWAS Phase-III 까지 업그레이드 되었다.

윈드시어에 대한 연구는 대부분 저층윈드시어가 발생하는 대기상태와 기상현상에 대한 연구이며, 특히 ICAO Circular(1987)의 윈드시어에 대한 보고서

에서는 강한 폭풍, 전선대, 마이크로버스트, 지형, 해륙풍 등을 윈드시어 발생 원인으로 지목하고 있다. 그리고 이에 대한 예보 및 항공기가 대처 방법 등을 상세히 기술하고 있다. 최근에는 단기예보 모델에서 윈드시어 전조현상의 근거를 찾기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다(Binbin Zhou, 2004).

이번 연구에서는 제주공항의 LLWAS에서 관측된 윈드시어 자료를 이용하여 계절별 발생특성과 발생메커니즘을 밝히고자 한다. 그리고 윈드시어와 강풍특보의 및 항공기의 결항 및 지연사례를 비교함으로써 강풍으로 인한 윈드시어의 발생특성과 항공기의 안전운항에 미치는 피해와의 관계도 규명하고자 한다.



II. 지형 및 분석기기

1. 제주공항의 주변 지형

제주국제공항은 1941년 군용 활주로를 건설하여 사용하기 시작하여 1968년 4월 26일 제주국제공항으로 개항되었다. 1973년에 교차활주로를 건설하였고, 1981년 군용 활주로를 철거했다. 대형기도 취항할 수 있는 활주로를 건설하여 1982년 2월에 새롭게 개통했다. 현재 국제선은 일본의 도쿄 나리타·나고야·오사카 후쿠오카, 중국의 베이징, 상하이, 푸둥, 방콕, 타이베이와 연결된다. 국내선은 김포·김해·대구·광주·청주·울산·포항·사천·군산·원주·인천 노선이 운항되고 있다.

제주도는 한반도의 남쪽에 위치한 사면이 바다로 둘러싸인 섬으로 동서길이 약 73 km, 남북길이 약 31 km의 타원형의 섬으로 중앙에 위치한 원추모양의 한라산(1950m)을 중심으로 동서사면은 3~5°로 완만한 경사를 이루나 남북사면은 5~7°로 약간 급경사를 이루고 있다(Fig. 1). 이처럼 제주도는 면적에 비해 섬 중앙으로 갈수록 해발고도가 증가하며, 기온, 강수량, 바람 등의 변화가 고지대로 갈수록 상당한 차이를 보이고 있다. 또한, 제주도는 해양성 기후이면서 4계절 모두 다른 기상특성이 나타난다. 겨울철은 찬 대륙고기압의 영향으로 북서계절풍이 강하게 불고, 매우 추운 날씨를 보인다. 여름철은 북상하는 장마와 태풍의 영향을 가장먼저 받아 강수량이 많고, 무더운 날씨가 많다. 또한 봄과 가을에는 이동성 고기압의 영향으로 맑고 건조한 날이 많다. 이처럼 제주국제공항은 계절별 바람특성과 지형적 요인으로 인해 바람이 수시로 바뀌기기 때문에 교차활주로를 갖추어야 하는 특성이 있다.

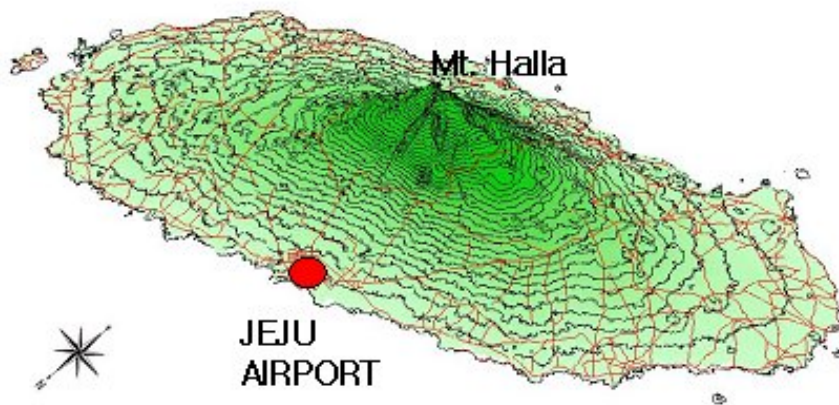


Fig. 1. Topographic map of Jeju island and Jeju International airport location.

2. 윈드쉬어 및 발생요인

바람은 방향과 속도를 가지는 벡터이기 때문에 윈드쉬어는 속도나 방향 혹은 둘 다의 변화를 가질 수 있다. 윈드쉬어의 원인을 고려할 때는 수평거리나 연직거리에 따른 바람의 변화(수평 윈드쉬어)나 연직거리에 따른 바람의 변화(연직 윈드쉬어) 혹은 두 가지 현상이 결합된 것으로 보는 것이 바람직하다. 윈드쉬어는 항공기의 착륙 조종시 가장 위험하다고 하며, 공항예보관들이 가장 고려해야 할 기상현상(Cole et al, 2002)으로서, 지표면에서부터 2000 ft까지 고도에서의 바람벡터의 차이이다. 강한 윈드쉬어는 고도 2000 ft당 20 kt의 풍속 변화가 나타날 때이다. 저층윈드쉬어란 항공기의 최종 접근로나 이륙로 혹은 이륙직후의 급상승로를 따라 지상 2,000ft이하의 윈드쉬어를 저층윈드쉬어(LLWS: Low Level Wind Shear)라 한다(항공기상대, 2004).

마이크로버스트(microburst)란 위험한 윈드쉬어 조건을 만들어 내는 강수를 유발하는 하강기류로서, 2.2 nm(4 km) 이하의 수평거리를 가지는 다운버스트(downburst)를 말한다(항공기상대, 2004). 마이크로버스트는 보통이나 그 이하의 강도를 가지는 하강기류를 만드는 과정과 동일하게 형성된다. 즉 강수의 항력과 증발로 인한 냉각, 그리고 강수입자의 용해에 의해 만들어지는 현상이다. 마이크로버스트에 있어서 하강기류는 강한 강수로 인해 강화되고 건조공기의 증발, 냉각과 큰 음의 부력으로 발생하는 하강기류와 혼합될 때에도 강화된다. 또한 대류운의 운저에서 하강하는 차고농밀한 공기로 이루어진 뚜렷한 중심부를 이루는 것이 특징이다. 그것이 지상에 도달하면 측면 바깥으로 퍼지면서 바깥경계를 따라 위쪽으로 감싸는 소용돌이 고리(vortex ring)를 형성한다(Fig. 2). 전형적인 마이크로버스트는 모운(parent cloud)의 운저에서 지상까지 즉시 하강하면 풍속은 강하고 풍향은 마이크로버스트의 중심선을 가로질러 180°로 변하고, 수평 윈

드쉬어가 나타난다. 이 현상들은 지상근처에서 매우 짧은 시간에 발생하고 낮은 실링과 악시정을 나타낸다. 일단 마이크로버스트가 지상에 도달하면 그 생애는 5분~30분 정도이다.

마이크로버스트가 발생한 영역을 항공기가 이륙할 경우(Fig. 3), 항공기는 증가하는 맞바람을 경험하고(position 1), 점차 감소하는 맞바람과 하강기류(descending current)가 뒤따르며(position 2), 최종적으로는 뒷바람으로 바뀌게 된다(position 3) 가장 강한 하강기류는 뒷바람으로 인한 대기 속도의 감소와 동시에 position 2와 3 사이에서 만나게 될 것이다. 이것은 지형적인 영향을 받거나 지상부근을 위협하게 운항하는 결과를 초래할 수 있다(position 4).

윈드쉬어를 발생시키는 또다른 원인들을 살펴보면 두 개의 서로 다른 기단 사이의 경계지역인 전선(front)을 들 수 있다. 전선역에는 수평 및 연직 윈드쉬어가 집중적으로 발생하며 특히 온난전선상에서 발생하는 윈드쉬어는 매우 강할 뿐 아니라 지속시간이 길고, 낮은 구름과 악 시정을 초래하기 때문에 항공기 운항에 큰 문제를 일으키기도 한다(Fig. 4). 그리고 해상에 인접한 공항에는 해풍과 육풍이 교차되는 해풍전선대(sea breeze front)에서도 윈드쉬어가 발생한다(Fig. 5). 맑은 날 밤 지면 복사냉각으로 인한 야간역전경계층의 윈드쉬어와 청천난류의 중요한 역할을 하는 제트기류에 의한 윈드쉬어가 있다. 국지적인 바람의 흐름이 공항안의 큰 건물에 의해 풍향과 풍속이 바뀌는 경우(Fig. 6A)와 활주로 주변의 숲으로 인해 활주로나 숲밖의 바람이 크게 차이가 생기는 터널효과(Fig. 6B)로 인해 윈드쉬어가 발생한다. 그리고 공항주변 산맥을 타고 내려오는 바람(Fig. 6C)과 언덕등과 같은 지형으로 인해 풍향과 풍속이 바뀌는 경우(Fig. 6D)에도 윈드쉬어가 발생한다.

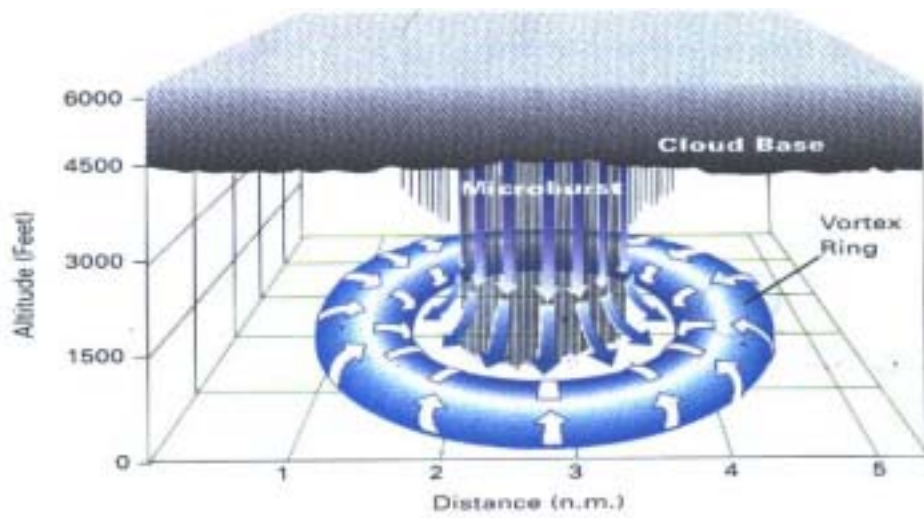


Fig. 2. Microburst and vortex ring.(AMO, 2004)



Fig. 3. Effect of a microburst wind.(AMO, 2004)

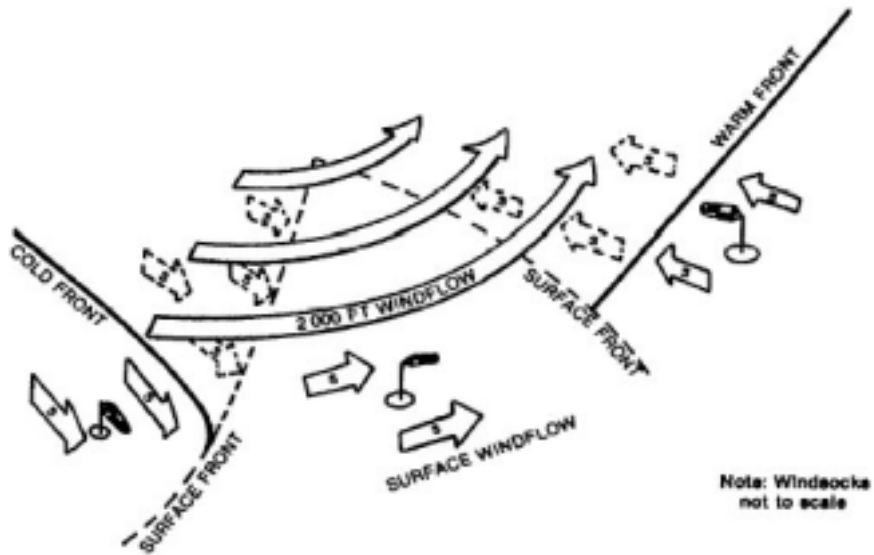


Fig. 4. Three-dimensional view of windflow around cold/warm frontal system up to 2,000ft.(ICAO, 1987)

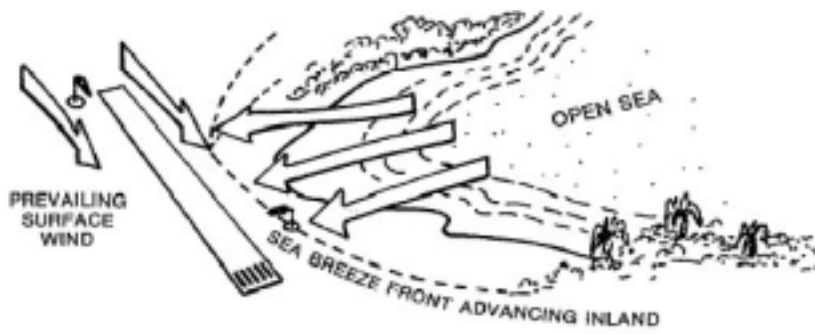


Fig. 5. Sea breeze front.(ICAO, 1987)

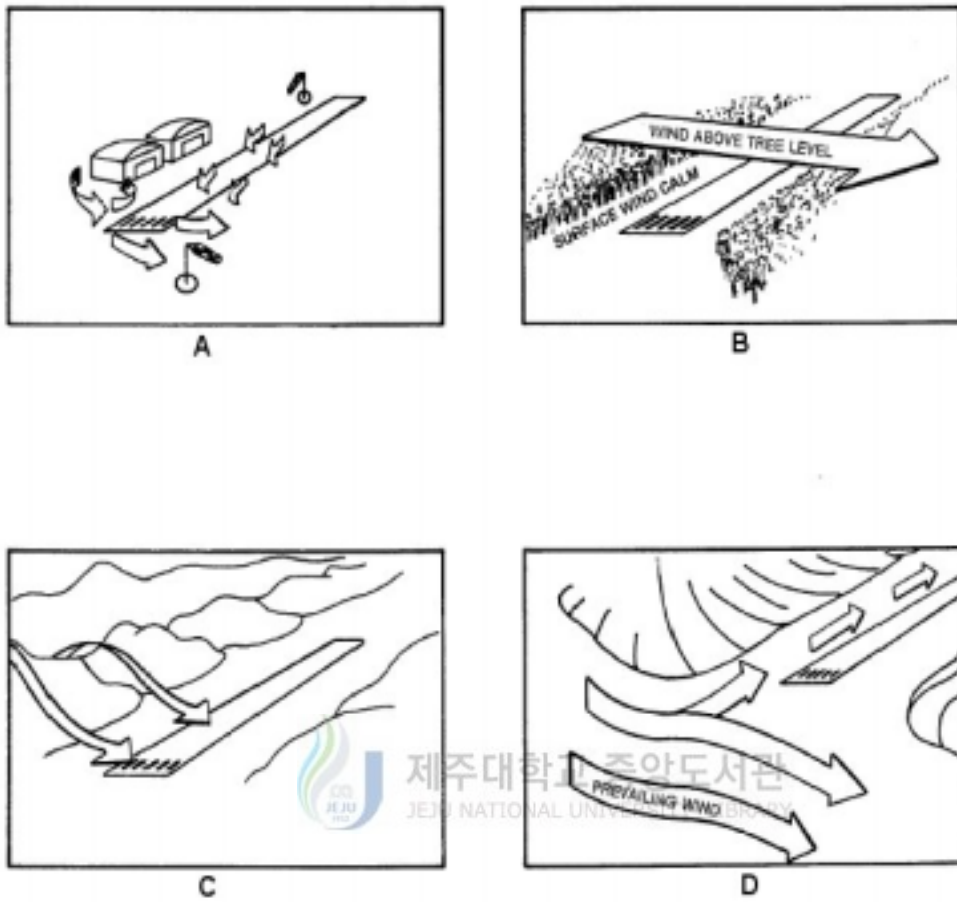


Fig. 6. Wind flow around obstacles.(ICAO, 1987)

3. 저층윈드쉬어경보 장치(LLWAS)

제주공항기상대의 LLWAS는 활주로 주변 30~40m 상공에 풍향·풍속센서로 각 지점별 풍향·풍속차이 및 변화경향 등을 분석하여 윈드쉬어와 마이크로버스트를 탐지할 수 있는 장비로서 발생 즉시 이·착륙 항공기에 윈드쉬어 현상을 제공해주는 시스템이다(Fig. 7). 현재까지 LLWAS-Ⅲ까지 업그레이드되어 신뢰성을 높이고 있는 첨단장비이다. 현재 인천국제공항과 양양공항에는 8대, 제주공항에는 11대가 설치되어 있다(Fig. 8). 제주공항에 11대가 설치되어 있는 이유는 교차활주로 사용할 뿐만 아니라 윈드쉬어가 자주 발생하기 때문이다.

제주공항 LLWAS의 시스템 구성은 주처리장치(MS: Master Station), 원격처리장치(RS: Remote Station), 자료표출장치(RBDT: Ribbon Display Terminal), 자료표출제어장치(DSD: Display Selection Devices)로 구성되어 있다(Fig. 9). 주처리장치(MS)는 각각의 원격처리장치들로부터 오는 각종 자료를 수신·처리하는 핵심장치이며, 관제탑 장비실에 설치되어 있다. 주와 종속의 두개가 한조로 되어 있으며(Fig. 10, 11), 종속은 백업용으로 동일한 일을 처리한다. 그리고 활주로 주변에 11개 지점에 설치되어 있는 원격처리장치(Fig. 12)는 각 지점의 풍향·풍속자료들을 수집하여 주처리장치로 송신하며, 초음파식 풍향·풍속계와 야기 안테나로 구성되어 있다.

자료표출장치(Fig. 13)는 관제탑, 접근관제소 및 기상대에 설치되어 있으며, 주처리장치에서 수신되는 풍향·풍속자료 및 윈드쉬어와 마이크로버스트 경보 등을 표출한다. 자료표출제어장치(Fig. 14)는 관제사에게 제공되는 장치로 주장치와 직접 연결되어 있으며 관제사가 RBDT에서 표출되는 바람자료를 제어하기 위하여 사용한다.

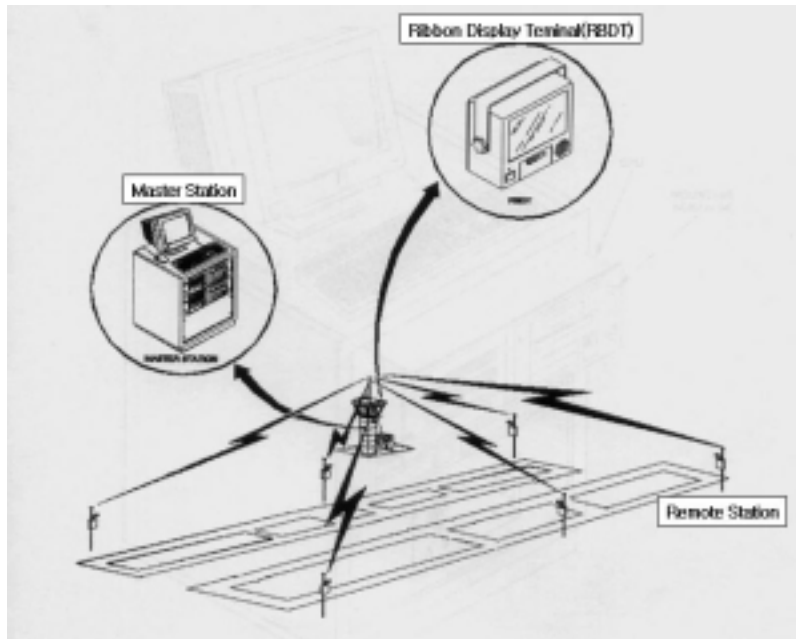


Fig. 7. LLWAS data collection system.(AMO, 2004)



Fig. 8. LLWAS

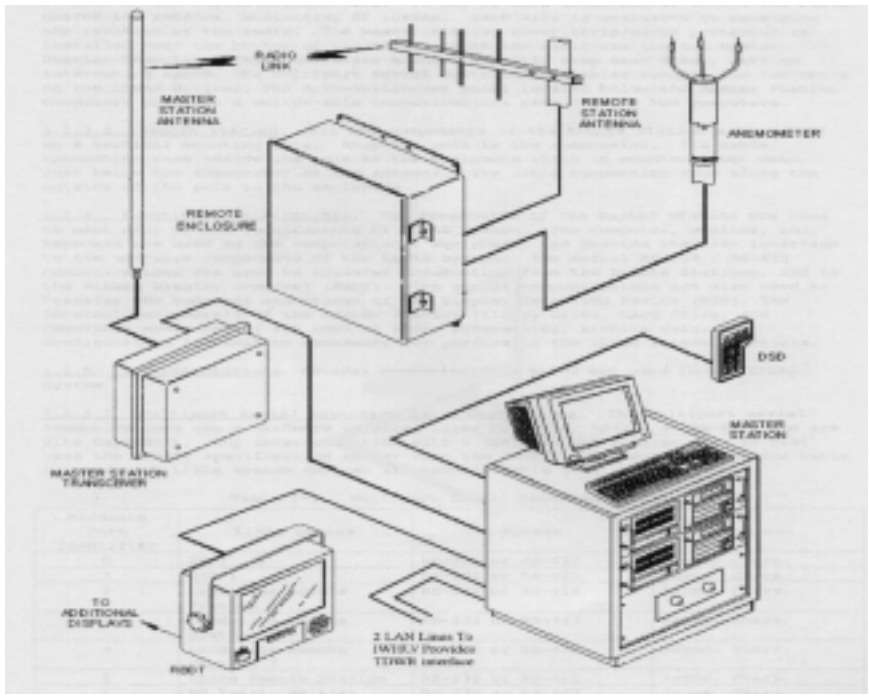


Fig. 9. LLWAS system configuration.(AMO, 2004)



Fig. 10 Master station(a)



Fig. 11 Master station(b)



Fig. 12. LLWAS remote station



Fig. 13. Ribbon display terminal

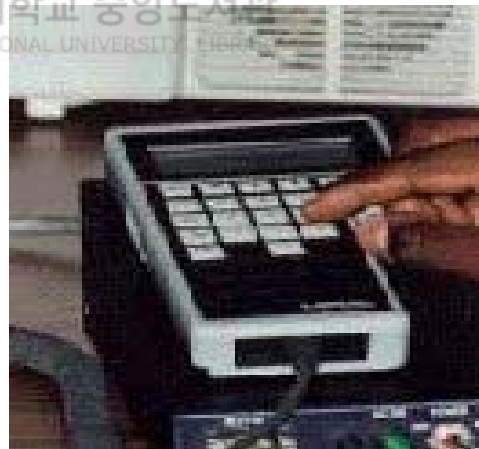


Fig. 14. Display selection devices

LLWAS의 알고리즘은 1992년 UCAR(University Corporation for Atmospheric Research)에서 개발되었으며, 윈드쉬어 및 마이크로버스트 경보의 정보를 문자와 숫자로 나타내기 위한 정보를 준비하는 등 LLWAS 풍향·풍속의 관측과정을 나타낸다. 알고리즘의 구성은 ACF(Airport Configuration File)에서 정의된 변수로 짜여졌으며, 유입변수는 m/s 로 관측된 벡터 풍속(u, v)값이다. 그리고 산출된 값은 윈드쉬어 및 마이크로버스트 경보, 항공기 Gain/Loss 값, 경보지점 등이다(Fig. 15).

LLWAS의 윈드쉬어 경보는 기준은 풍속이 5~29 knot(loss) 또는 풍속이 15 knot(gain) 초과이며, 마이크로버스트 발생기준은 풍속이 30 knot(loss) 이상이다. 여기서 Gain과 Loss는 항공기가 최종적으로 받게 되는 바람효과를 의미한다. 항공기가 뒤바람 5 knot에서 앞바람 15 knot로 변경되어 최종 20 knot의 풍속 Gain효과(양력 +)를 받게 된다. 이 경우 LLWAS에서는 “WSA 20KT +”라는 윈드쉬어 경보가 발생하게 된다. 이와 반대로 항공기는 앞바람 15 knot에서 뒤바람 15 knot로 변경되어 최종 30 knot의 풍속 Loss효과(양력 -)를 받게 된다. 이 경우 LLWAS에서는 “MBA 30KT -“ 이라는 마이크로버스트 경보가 발생하게 된다(Fig. 16).

LLWAS가 관측하는 마이크로버스트란 풍속이 30knot(loss)이상인 바람이 관측되는 경우를 마이크로버스트로 관측하고 경보한다. 이는 위에서 설명한 일반적인 마이크로버스트와 다소의 개념 차이가 있다. 그 이유는 항공기상에서는 항공기가 어떤 바람을 받게 되는가에 따라서 윈드쉬어와 마이크로버스트로 구분짓기 때문이다. 이러한 기준으로 경보가 발생하게 되면 관제사는 즉시 RBDT의 경보내용, 즉 활주로 방향과 출·도착, 풍향·풍속, 경보의 종류, Gain/Loss, 그리고 경보지점을 이·착륙 항공기에 알림으로써 윈드쉬어로 인한 위험을 사전에 예방하게 된다. 또한 LLWAS 그래픽 화면에서의 윈드쉬어는 노란색(Fig. 30A)으로 표출되고, 마이크로버스트는 빨간색(Fig. 30B)으로 구분하여 표출된다.

LLWAS ALGORITHM

대기연구소 (UCAR) 연구 특허
 특허번호: 5,221,924
 개발자: Wilson, Jr

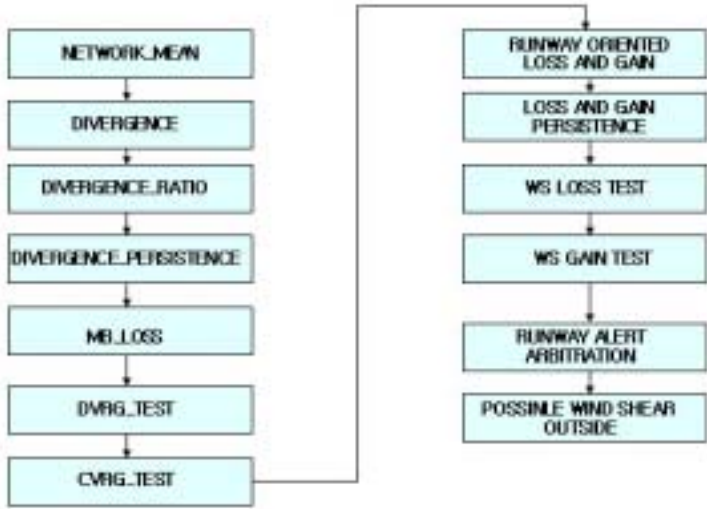
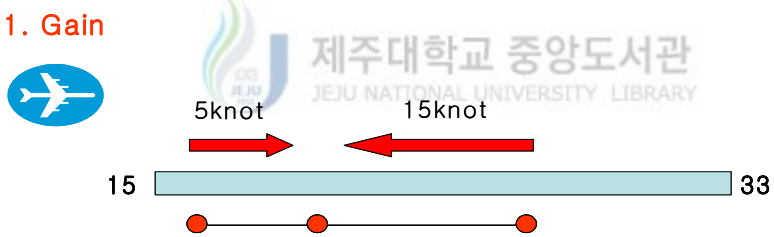


Fig. 15. LLWAS algorithm .(AMO, 2004)

1. Gain



2. Loss

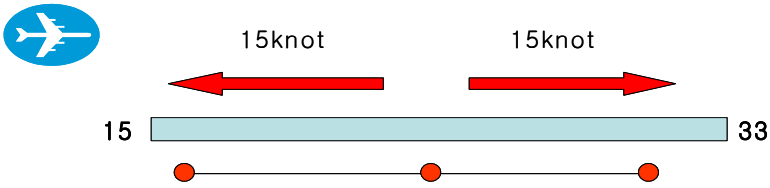


Fig. 16. Gain & Loss.(AMO, 2004)

Ⅲ. 자료 분석방법

제주공항기상대의 LLWAS는 바람자료를 분석하여 윈드쉬어와 마이크로버스트의 종류를 구분하며, 윈드쉬어가 발생하면 강도 및 위치 그리고 시간자료를 10초 간격으로 갱신하여 표출한다.

LLWAS자료의 시간단위는 2001~2003년까지는 UTC(Universal Time Coordinated)이며, 2004년부터는 KST(Korean Standard Time)를 쓴다.

분석 자료는 2002년~2005년까지의 LLWAS에서 생산된 일중 30분 이상의 발생시간을 갖는 윈드쉬어 및 마이크로버스트 자료와 제주공항 강풍특보발표 건수와 지속시간의 자료를 활용하였다. 그리고 부산항공청의 2003년~2004년의 제주공항 월별 항공기 결항 및 지연 편수 자료를 이용하였다.

기압계 패턴별 제주도에 유입되는 바람의 유형을 구분하기 위해 지상일기도를 이용하였고, AWS(Automatic Weather System) 바람분포도자료는 제주공항 주변지형에 의한 풍향 풍속의 변화를 비교했다. 그리고 LLWAS서버의 윈드쉬어 기초자료를 이용하여 윈드쉬어의 계절별 발생일을 파악하였고, LLWAS 그래픽 자료는 윈드쉬어의 발생위치와 강도를 분석하는데 활용하였다. 그리고 제주공항에 발생하는 강풍과 윈드쉬어와의 관계를 보기 위하여 월별, 계절별 강풍주의보발표 건수 및 지속시간을 윈드쉬어 발생일과 비교하였다. 또한 강풍과 윈드쉬어가 항공기에 미치는 영향을 알아보기 위해 위의 두 자료와 항공기 결항 및 지연 자료를 비교하여 분석하였다.

아울러, 2006년 4월 9일을 발생사례로 분석을 하였다. 이 사례는 봄철의 남풍이 지속적으로 유입되면서 제주공항주변지형의 영향으로 인해 윈드쉬어가 발생했다. 윈드쉬어의 지속시간이 7~8시간으로 길게 나타났고 강도가 매우 강하게 나타나면서 97편의 항공편이 결항되는 등의 항공기의 안전운항에 큰 영향을 주었던 사례이다.

IV. 분석결과

1. 윈드쉬어 발생일수

2002년~2005년까지 제주공항의 윈드쉬어 연평균 발생일은 105일이며, 윈드쉬어와 마이크로버스트의 동시 발생일은 34일로써 전체 발생일의 32%를 차지하고 있다.

윈드쉬어의 월평균 발생일(Fig. 17)을 살펴보면 겨울철은 12월과 1월 그리고 봄철은 3월과 4월, 여름철은 7월과 8월, 가을철은 11월에 중점적으로 발생하고 있으며, 계절별 발생일 분포는 겨울, 봄, 여름, 가을 순으로 나타나고 있다(Fig. 18).

겨울철(12~2월)은 윈드쉬어가 가장 많이 발생하는 계절로서 평균 발생일은 32.8일이며, 마이크로버스트 발생일수는 14.3일이다. 따라서 겨울철에는 윈드쉬어의 발생빈도가 높을 뿐 아니라 마이크로버스트의 발생빈도도 높다.

봄철(3월~5월)의 평균발생일은 27.8일이며, 마이크로버스트 발생일수는 8.8일이다. 봄철에도 윈드쉬어 뿐만 아니라, 마이크로버스트의 발생빈도가 높았으며, 특히 5월은 윈드쉬어 발생빈도에 비해 마이크로버스트의 발생빈도가 높다.

여름철(6월~8월)의 평균발생일은 26.3일이며, 마이크로버스트 발생일수는 5.5일이다. 7월은 윈드쉬어의 발생빈도가 가장 높고, 8월에 마이크로버스트의 발생빈도가 높다.

가을철(9월~11월)의 평균발생일은 18.0일이며, 마이크로버스트 발생일수는 5.0일이다. 10월은 연중 윈드쉬어 발생빈도가 가장 낮으며, 11월부터는 발생빈도가 증가하고 있다.

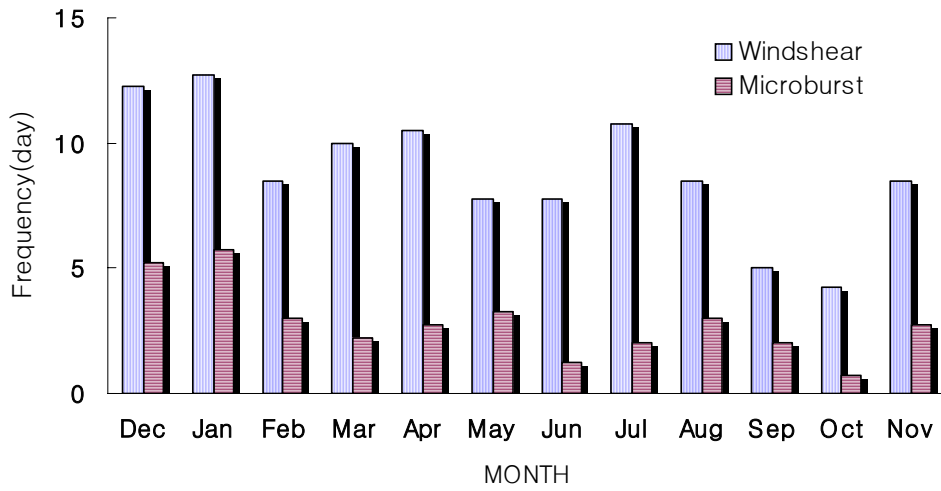


Fig. 17. Frequency of monthly mean (2002~2005).

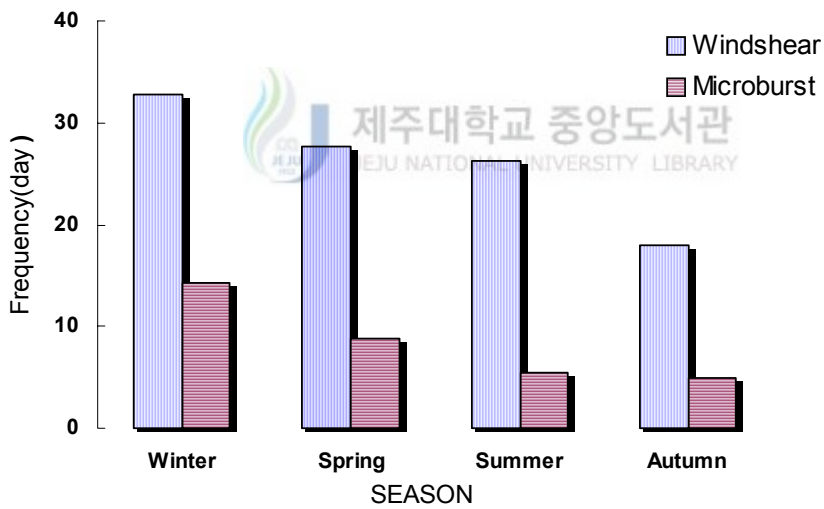


Fig. 18. Frequency of season mean (2002~2005).

Table 1. Frequency of monthly total and mean of windshear and microburst (2002~2005).

Month	Total		Mean	
	Windshear	Windshear & Microburst	Windshear	Windshear & Microburst
DEC	47	21	12.3	5.3
JAN	50	24	12.8	5.8
FEB	34	12	8.5	3.0
MAR	41	11	10.0	2.3
APR	39	11	10.5	2.8
MAY	31	13	7.8	3.3
JUN	29	4	7.8	1.3
JUL	42	7	10.8	2.0
AUG	34	11	8.5	3.0
SEP	21	8	5.0	2.0
OCT	16	2	4.3	0.8
NOV	35	10	8.5	2.8



2. 제주공항 강풍특보 발표현황

2002년~2005년까지 제주공항에서 발표한 강풍특보는 총 69회이며, 연평균 14회가 발표되었다. 월평균 강풍특보발표건수(Fig. 19)의 경우 겨울철은 12월과 1월 그리고 봄철은 3월, 여름철은 7월, 가을철은 9월에 중점적으로 발표되고 있다. 계절별 특보발표건수는 겨울, 봄, 여름, 가을 순으로 나타나고 있다(Fig. 20). 겨울철 강풍특보 평균 발표건수는 5.5회이며, 지속시간은 13시간이다. 특히 12월은 강풍특보발표건수가 10건으로 가장 많을 뿐 아니라 지속시간도 17.1시간으로 가장 길다. 봄철 강풍특보 평균발표건수 겨울철과 같은 5.5건이며, 지속시간은 9.1시간이다. 강풍발표건수는 3월이 11건으로 가장 많았으나, 지속시간은 4월이 10.9시간으로 봄철 중 가장 길다. 여름철의 강풍특보 평균발표건수 4.3건이며, 지속시간은 8.2시간이다. 강풍특보 발표건수는 7월이 9건으로 가장 많았으나, 지속시간 8월이 10.7시간으로 가장 길다. 가을철 강풍특보 평균발표건수는 2건이며, 지속시간은 7.2시간으로 가장 적다. 강풍특보 발표건수는 9월이 5건으로 가장 많았으나, 지속시간은 10월이 11.8시간으로 가장 길다.

윈드쉬어 발생일(Fig. 18)과 강풍특보 발표건수(Fig. 19)를 비교해보면 그 변화 경향이 아주 비슷하게 나타나고 있으며, 계절별 분포 역시 매우 흡사하게 나타난다. 따라서 제주공항에 강풍이 발생할 경우 거의 대부분 윈드쉬어가 발생함을 알 수 있다. 제주공항 강풍주의보(경보) 기준은 10분간 평균 풍속이 25kt (42kt) 또는 최대순간풍속이 35kt (52kt)이상인 상태가 예상될 때 발표한다.

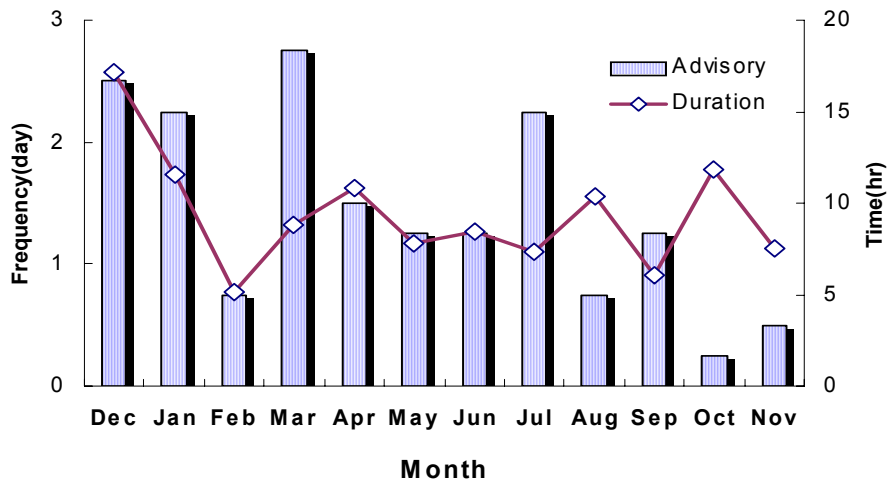


Fig. 19. Monthly mean of strong wind Advisory and Duration (2002~2005).

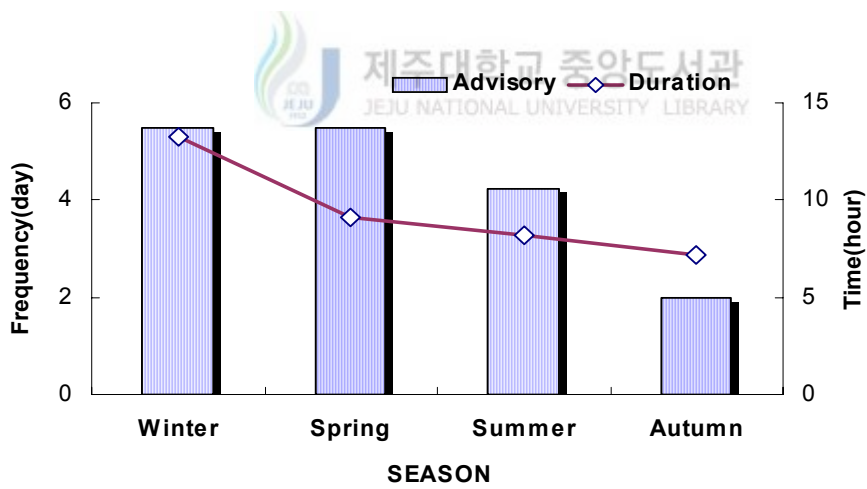


Fig. 20. Season average of strong wind Advisory and Duration (2002~2005).

Table 2. Frequency of monthly total and mean of strong wind Advisory and Duration (2002~2005).

Month	Strong wind Advisory (day)		Duration (hour)	
	Total	Mean	Total	Mean
DEC	10	2.5	171	17.0
JAN	9	2.3	104	12.0
FEB	3	0.8	15	5.1
MAR	11	2.8	97	8.8
APR	6	1.5	65	11.0
MAY	5	1.3	39	7.8
JUN	5	1.3	42	8.5
JUL	9	2.3	66	7.3
AUG	3	0.8	31	10.0
SEP	5	1.3	31	6.1
OCT	1	0.3	12	12.0
NOV	2	0.5	15	7.5



3. 강풍으로 인한 항공기의 결항 및 지연운항

최근 제주공항의 항공기 운항 편수는 국내선이 65,000대가 넘게 운항되고 있으며, 이것은 지방공항으로는 가장 많은 운항편수이다. 그러나 이중 결항 편수가 연간 1,600대 이상이 되고 있다. 결항의 원인을 살펴보면 기상현상, 항공기접속, 정비, 기타 순으로써, 이중 기상현상으로 인한 결항률은 전체 결항률 중 약 60%로 연간 1,000대 이상이 결항이 된다(제주공항공사, 2005). 결항 및 지연의 요인이 되는 기상현상들은 안개, 강수, 강설, 운고, 태풍, 강풍이 있다. 이중 안개가 약 33%로 가장 높은 비중을 차지하고 있으며, 강풍은 18%이다. 지연운항이란 정부로부터 인가받은 정기운항시간보다 국제선은 1시간, 국내선은 30분을 초과하여 출·도착한 경우를 말하며, 결항이란 기상, 항공기 정비 등을 사유로 정기편이 운항하지 않는 경우를 의미한다(부산항공청, 2005).

2003년~2004년까지 제주공항의 강풍 및 태풍으로 인해 결항 및 지연운항된 항공기의 월평균 편수를 분석해 보면(Fig. 21), 1월은 결항이 55.5편, 지연편수는 22.5편으로 결항과 지연이 가장 많다. 특히 5월은 결항도 많지만 지연운항이 매우 많다. 이러한 원인은 갑자기 발생한 윈드쉬어와 강풍으로 인해 결항보다는 지연되는 경우가 많기 때문이다. 7월~9월까지 결항이 급속히 증가하고 있으나 지연운항은 매우 적다. 이러한 원인은 여름철과 초가을까지 우리나라에 영향을 주는 태풍 때문인데 강풍과 윈드쉬어와 달리 태풍의 영향권에 제주공항이 위치하게 되면 모든 항공기가 결항되기 때문에 결항편수가 많아지는 반면 지연운항은 거의 없다(Table 3). 제주공항에 발생하는 윈드쉬어와 강풍은 항공기 안전운항에 직접적인 영향을 미치고 있다.

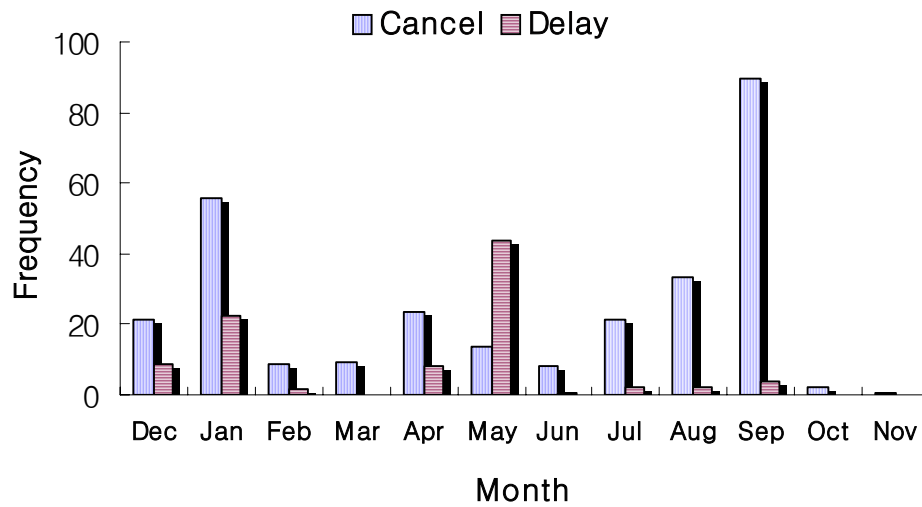


Fig. 21. Monthly average aircraft canceled and delay(2003~2004).

Table 3. Frequency of monthly total and mean of cancel and delay (2003~2004).

Month	CANCEL		DELAY	
	Total	Mean	Total	Mean
DEC	43	21.5	17	8.5
JAN	111	55.5	45	22.5
FEB	18	9.0	3	1.5
MAR	19	9.5	0	0.0
APR	47	23.5	16	8.0
MAY	27	13.5	87	43.5
JUN	16	8.0	1	0.5
JUL	43	21.5	4	2.0
AUG	67	33.5	4	2.0
SEP	179	89.5	8	4.0
OCT	4	2.0	0	0.0
NOV	1	0.5	0	0.0

4. 윈드쉬어 발생메커니즘

가. 겨울철(12월~2월)

제주도의 겨울철 기후특성은 찬 대륙고기압이 확장하면서 북서계절풍이 탁월하고, 겨울철 내내 강한 바람이 분다(Fig. 22). 제주공항 역시 대륙고기압의 영향으로 북서풍이 강하게 불며 강한 윈드쉬어가 자주 발생한다. 겨울철 윈드쉬어의 지속기간은 2~3일로 대륙고기압이 영향을 미치는 기간과 거의 비슷하여 다른 계절보다 매우 길다. 제주공항의 겨울철 윈드쉬어 발생메커니즘은 두 가지 형태로 나눌 수 있다.

첫 번째는 풍속의 변화에 의해 발생하는 형태이다. 제주공항의 겨울철 주풍은 북서계절풍으로서 풍향은 북서방향으로 일정하다. 이러한 북서풍은 풍속이 매우 강하지만 그 세기가 일정하지 않고 강약이 교차된다. 그 반복 주기는 약 10분 정도로 급격히 풍속이 증가한 후 풍속이 급격히 감소하는데, 풍속의 변화시점에서 해상과 내륙의 풍속차이로 인해 윈드쉬어가 발생한다. 이 경우는 주로 남북방향으로 놓여있는 보조 활주로에서 발생한다(Figs. 23A, 24A).

두 번째는 제주공항의 해안지형에 의한 풍속차이로 인해 발생하는 형태이다. 제주공항 해상과 인접해 있으며, 주활주로의 거리는 약 3 km로써는 동서방향으로 놓여있다. 하지만 주활주로는 해상과 인접해 있고 주변지형의 해발고도의 차이가 크다. 따라서 주활주로를 가로지르는 바람인 북서풍이 강하게 불 경우에는 활주로 중앙부분과 양쪽 말단부분의 풍속차이가 커지면서, 윈드쉬어가 발생하게 된다(Figs. 23B 24B). 따라서 겨울철 윈드쉬어는 강한 북서풍의 풍속의 차이에서 발생한다.

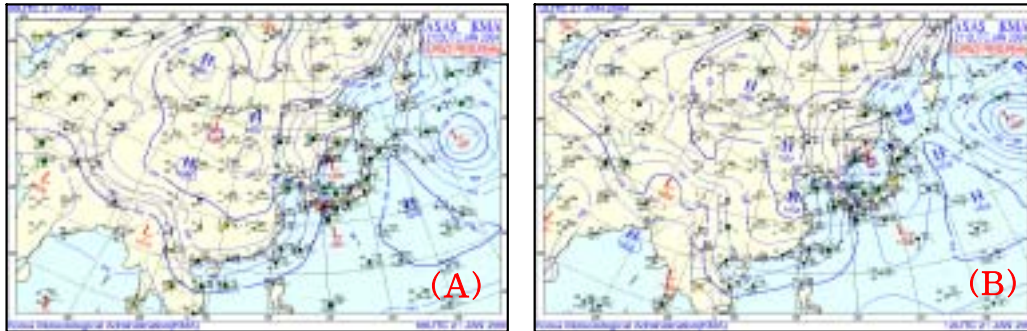


Fig. 22. Surface weather chart 09:00(A) 21:00(B) 21. JAN., 2004

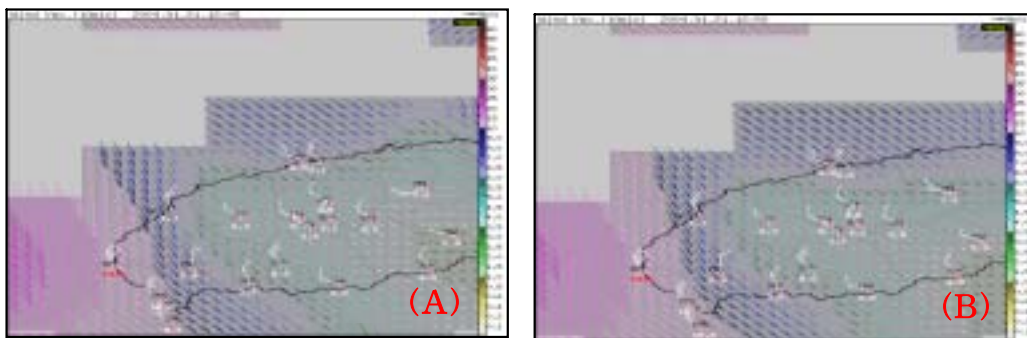


Fig. 23. AWS wind vector image 12:45(A) 12:50(B) 21. JAN., 2004



Fig. 24. LLWAS windshear image 12:47(A) 12:51(B) 21. JAN., 2004

나. 봄철

봄철 제주도는 대륙성고기압의 세력이 점차 약해지고 이동성 고기압과 저기압이 주기적으로 통과하면서 맑은 날과 흐린 날이 반복된다(Fig. 25). 그리고 지속시간이 12시간 이내의 윈드쉬어가 자주 발생하며, 강한 윈드쉬어도 자주 발생한다. 그 발생형태는 세 가지로 나눌 수 있다.

첫 번째는 남동풍이 강하게 유입되면서 발생하는 형태로서, 제주도 남서쪽에서 저기압이 접근하면서 제주도에는 남동풍이 지속적으로 다소 강하게 분다. 이 바람은 두 방향으로 나뉘는데 한 쪽 바람은 한라산 동쪽 능선을 넘어 제주공항으로 강하게 유입되지만, 다른 쪽 바람은 한라산 서쪽 능선을 넘어서 제주공항 서쪽부근에서 서로 수렴된다. 따라서 제주 공항의 서쪽 부근에서 서로 다른 바람의 수렴으로 윈드쉬어가 발생한다.

두 번째는 남풍이 강하게 유입되면서 발생하는 형태로서, 중국내륙에서 발생한 저기압이 제주도로 접근하면 제주도에는 지속적으로 남풍이 유입된다. 이 남풍은 한라산을 중심으로 해서 동쪽과 서쪽 두 방향으로 나뉘게 되는데 두 방향의 바람은 한라산의 양쪽 능선을 넘으면서 제주공항 정반대의 바람(남서풍과 북동풍)으로 수렴됨(Fig. 26)으로써 강한 윈드쉬어가 발생한다(Fig. 27).

세 번째는 남서풍이 강하게 유입되면서 발생하는 퀴(Fohn)현상으로 인해 윈드쉬어가 발생하는 형태이다. 퀴현상은 바람이 산이나 사막을 경사면으로 강제상승 냉각되면서 수증기가 응결된다. 이후 건조한 상태로 경사를 타고 내려오면서 건조단열적으로 기온이 상승할 뿐만 아니라 매우 강한 바람이 된다(McKnight, TL 2000). 제주도 북쪽으로 저기압 통과시 강한 남서풍으로 인한 퀴현상으로 남서풍 매우 강하게 불면서 윈드쉬어를 발생한다. 이 퀴현상에 의한 윈드쉬어는 위의 두 형태와는 달리 풍향은 일정하나 강한 바람에 의해 윈드쉬어가 발생한다. 따라서 봄철 윈드쉬어는 풍향과 풍속차이로 발생한다.

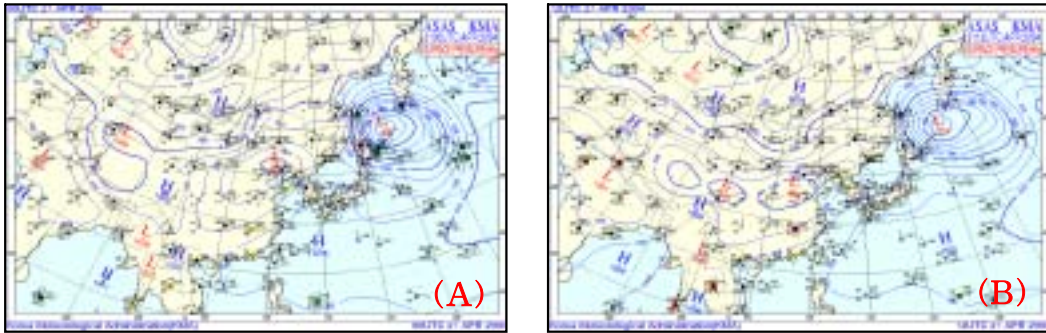


Fig. 25. Surface weather chart 09:00(A) 21:00(B) 21. APR., 2004

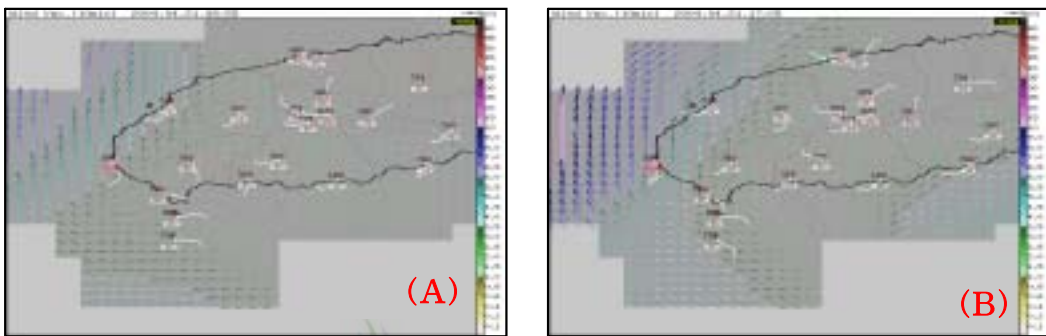


Fig. 26. AWS wind vector image 08:55(A) 17:55(B) 21. APR., 2004



Fig. 27. LLWAS windshear image 09:00(A) 17:06(B) 21. APR., 2004

다. 여름철

여름철은 북태평양 고기압의 영향을 받기 시작하면서(Fig. 28) 최고기온이 30℃ 이상 오르기도 한다. 여름철 윈드쉬어의 발생원인은 국지성 저기압의 강한 바람과 태풍의 직·간접적인 영향으로 인한 강한 동풍이다. 또한 초여름에는 봄철과 같이 편현상으로 인해 발생하기도 한다. 따라서 여름철 주 발생원인은 국지성 저기압과 태풍으로 나눌 수 있다.

첫 번째는 강한 국지성 저기압에 의해 발생하는 형태로써, 여름철은 북태평양고기압 가장자리의 불안정역에서 강한 국지성 저기압이 자주 발생한다. 제주도 부근 해상에서 발생한 강한 저기압이 제주공항부근으로 접근하면서 발생한 강한 바람이 활주로부근으로 유입(Fig. 29)되면서 매우 강한 윈드쉬어가 발생시킨다(Fig. 30). 이 때 발생하는 윈드쉬어와 마이크로버스트는 약 20분~30분정도 지속된 후 급속히 소멸된다.

두 번째는 태풍의 직·간접영향권에서 강한 바람으로 발생하는 형태로써, 제주도에 영향을 미치는 태풍의 대부분은 제주도 남쪽에서부터 접근한다. 이때 제주공항에는 북동풍 혹은 동풍이 매우 강하게 유입되면서 윈드쉬어를 발생시킨다. 제주도에 영향을 미치는 태풍의 강도와 이동경로에 따라 윈드쉬어의 강도와 지속시간이 달리 나타나지만 대부분 매우 강하고 지속시간도 매우 길게 나타난다. 따라서 여름철은 풍속의 차이에 의해 윈드쉬어가 발생한다.

라. 가을철

가을철은 북태평양고기압이 점차 약화되고 대륙에서 발생한 이동성 고기압이 자주 통과하면서 좋은 날씨가 지속된다(Fig. 31). 따라서 다른 계절에 비해 윈드쉬어의 발생빈도가 매우 낮고, 발생한다고 해도 그 강도가 약하다. 또한 초가을에는 태풍의 영향으로 윈드쉬어가 발생하기도 한다. 10월말부터 대륙고기압 세력이 점차 강해지기 때문에 한랭전선 상의 서풍이 강할 뿐 아

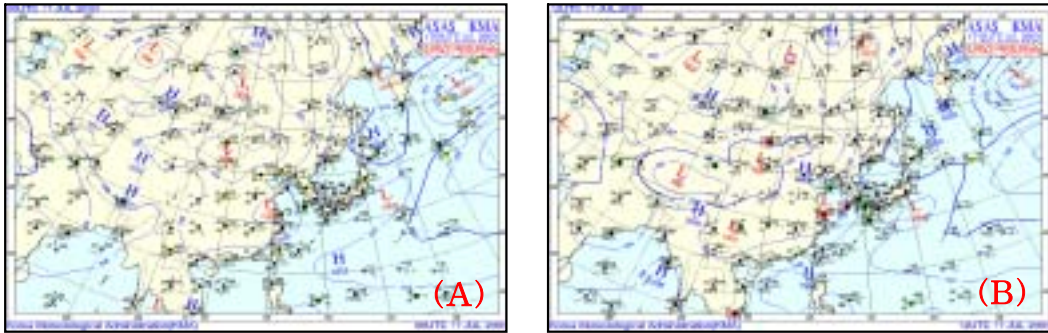


Fig. 28. Surface weather chart 09:00(A) 21:00(B) 17. JUL., 2003

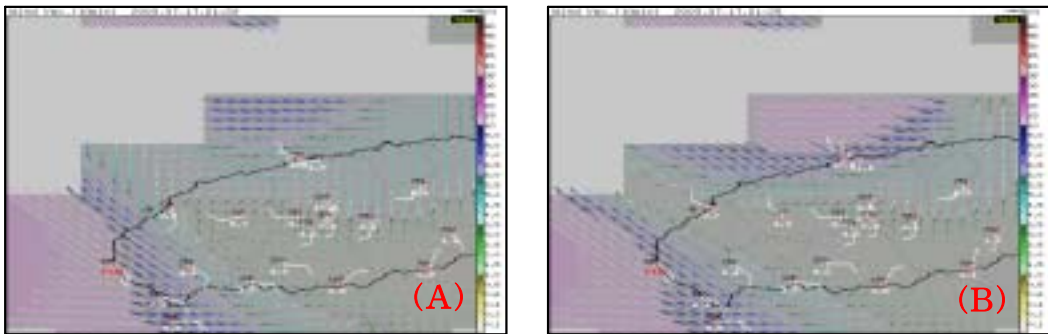


Fig. 29. AWS wind vector image 21:20(A) 21:25(B) 17. JUL., 2003



Fig. 30. LLWAS windshear and microburst image 21:20(A) 21:25(B) 17. JUL., 2003

나라, 겨울철과 같이 북서풍에 의한 윈드시어가 발생한다. 따라서 가을철은 한랭전선 상의 강한 서풍과 통과 후 강한 북서풍으로 발생하는 형태로 나눌 수 있다. 한랭전선의 영향으로 발생한 강한 서풍이 제주공항부근 해안가와 내륙지형에 의한 풍속차로 인해 윈드시어가 발생한다(Fig. 32A, 33A). 하지만 이 서풍은 지속시간이 길지 않기 때문에 제주공항에 발생하는 윈드시어 역시 지속시간이 2~3시간 정도로 다른 경우에 비해 매우 짧다.

한랭전선 통과 후 강한 북서풍에 겨울철과 같은 형태로 다시 윈드시어가 발생한다(Fig. 32B, 33B). 가을철 북서풍에 의한 윈드시어는 대륙고기압이 크게 발달한 겨울철과는 달리 그 강도가 약할 뿐 아니라 지속시간도 짧다. 따라서 가을철은 지형에 의한 풍속차이에 의해 발생한다.

5. 모식도

모식도에서 바람은 화살표로 표시했으며, 화살표의 방향은 풍향, 크기는 풍속으로 나타내었다.



가. 겨울철

겨울철은 윈드시어가 발생하면 매우 강하게 발생할 뿐만 아니라 그 발생기간도 2~3일로 매우 길다. 그리고 발생메커니즘이 다르기 때문에 윈드시어 발생위치도 서로 다르다. 따라서 겨울철 모식도는 발생원인으로 구분했다.

1) 겨울철 A형 모식도

제주공항의 겨울철 주풍은 북서계절풍으로써 풍향은 북서방향으로 일정하다. 하지만 이 북서풍의 풍속은 약 10분을 주기로 급격히 강해졌다가 약해졌다가를 반복한다. 따라서 풍속의 변화시점에서 해상과 내륙의 풍속이 큰

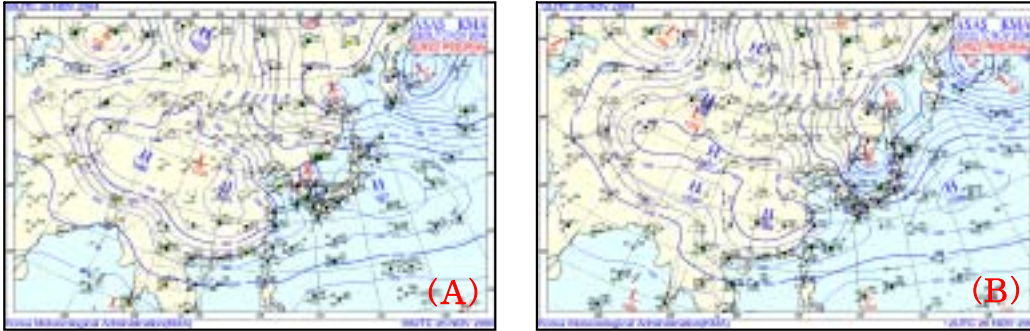


Fig. 31. Surface weather chart 21:00(A) 25, 12:00(B) 26. NOV., 2004

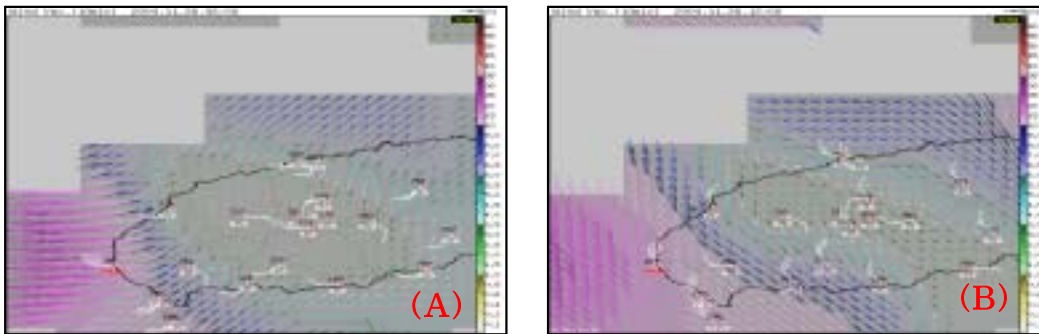


Fig. 32. AWS wind vector image 06:00(A) 12:00(B) 26. NOV., 2004



Fig. 33. LLWAS windshear image 07:12(A) 08:53(B) 26. NOV., 2004

차이로 인해 윈드쉬어가 발생한다(Fig. 34). 이 경우는 남북방향으로 놓여 있는 보조 활주로에서 주로 발생한다.

2) 겨울철 B형 모식도

해안지형에 의한 풍속차이에서 발생하는 형태로써 제주공항의 활주로는 해안선과 평행하게 놓여있다. 하지만 해안선은 위치별 해발고도가 다르기 때문에 북서풍이 강하게 불 경우에는 활주로 중앙부분과 양쪽 말단부분의 풍속차이가 커진다. 따라서 이런 풍속의 차이로 인해 윈드쉬어가 발생한다(Fig. 35). 이 경우는 동서방향의 주 활주로에서 주로 발생한다.

나. 봄철

봄철 윈드쉬어는 대부분 저기압의 영향으로 발생하며, 발생시간이 약 10시간 이내로 매우 강하게 발생한다. 특히 제주도에 어떠한 바람이 유입되는가와 그 바람이 얼마나 지속적으로 부는가에 따라 윈드쉬어의 발생위치와 그 강도가 달라진다. 따라서 봄철 모식도는 제주도로 유입되는 풍향 발생메커니즘으로 구분했다.



1) 봄철 A형 모식도

제주도에 남동풍이 지속적으로 강하게 유입되면서 발생하는 형태로써, 강한 남동풍이 한라산의 영향으로 두 방향으로 나뉘었다가 제주공항 서쪽부근에서 다시 만나게 된다. 하지만 두 방향의 바람(서풍과 동풍)은 지형의 영향으로 서로 전혀 다른 풍향과 풍속으로 만나게 됨으로써 강한 윈드쉬어가 발생한다(Fig. 36). 이 경우는 제주공항의 서쪽지역에서 발생한다.



Fig. 34. Winter season mimetic diagram case A



Fig. 35. Winter season mimetic diagram case B

2) 봄철 B형 모식도

제주도에 남풍이 지속적으로 강하게 유입되면서 발생하는 형태로서, 강한 남풍이 한라산을 중심으로 해서 동쪽과 서쪽 두 방향으로 나뉘어 나뉜 후 전혀 다른 바람(남서풍과 북동풍)으로 제주공항에서 만나게 됨으로써 매우 강한 윈드시어가 발생한다(Fig. 37). 이 경우는 제주공항의 활주로 상에서 발생하기 때문에 매우 위험하다.

3)봄철 C형 모식도

남서풍이 강하게 유입되면서 발생하는 뽀(Fohen)현상으로 인해 윈드시어가 발생하는 형태이다. 이 뽀현상에 의한 윈드시어는 위의 두 형태와는 달리 제주공항의 풍향은 일정하나 강한 남서풍에 의해 윈드시어가 발생한다(Fig. 38).

다. 여름철

여름철은 뇌우성의 강한 국지성 저기압으로 인해 20~30분사이의 아주 짧은 시간에 매우 강하게 발생하는 형태와 태풍의 직·간접적인 영향권에서의 강한 동풍으로 인해 발생하는 형태로 구분된다. 때로는 초여름에는 봄철과 같이 뽀현상으로 인해 발생하기도 한다. 따라서 여름철 모식도는 국지성 저기압의 영향과 태풍의 영향으로 발생하는 형태로 구분했다.

1)여름철 A형 모식도

국지성 저기압에서 발생한 강한 바람이 제주공항활주로로 유입되면서 매우 강한 윈드시어가 발생한다. 저기압이 제주공항의 서쪽에서 동쪽으로 이동하면서 풍향이 북동에서 북, 그리고 북서풍으로 바뀌고 풍속은 발생초기에는 매우 강했다가 점차 약해지고 있다.(Fig. 39). 이 때 발생하는 윈드시어는 약 20분~30분 정도 매우 강하고 발생된 후 빠르게 소멸된다.

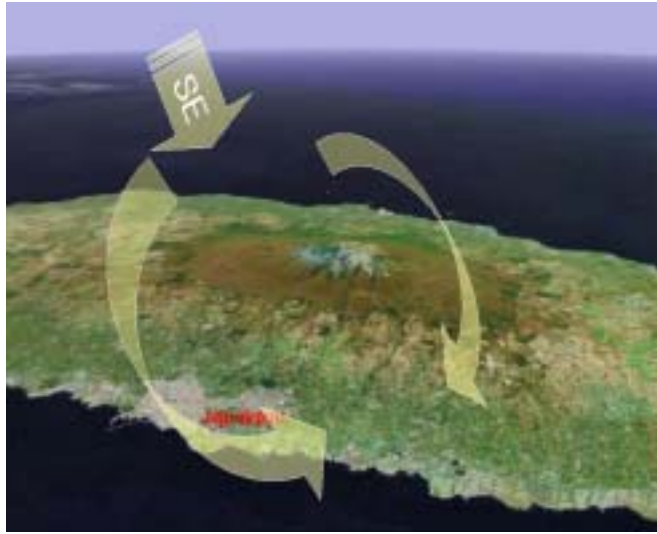


Fig. 36. Spring season mimetic diagram case A



Fig. 37. Spring season mimetic diagram case B



Fig. 38. Spring season mimetic diagram case C

(2)여름철 B형 모식도

제주공항이 태풍의 직·간접영향권에 들게 되면 매우 강한 동풍이 유입되면서 강하고 오랜 지속시간을 가진 윈드시어 발생한다. 강한 동풍에 의한 윈드시어는 모식도(Fig. 40)와 같이 해상과 내륙과의 풍속차이에 의해 발생한다. 제주도에 영향을 미치는 태풍의 강도와 이동경로에 따라서 윈드시어의 강도와 지속시간이 달리 나타나지만 대부분 매우 강하고 지속시간도 매우 길게 나타난다.

라. 가을철

가을철은 다른 계절에 비해 윈드시어의 발생빈도가 매우 낮고, 발생한다고 해도 그 강도가 약하다. 여름철과 같이 태풍의 영향으로 윈드시어가 발생하기도 한다. 10월말부터 대륙고기압 세력이 점차 강해지기 때문에 한랭전선의 서풍이 강할 뿐 아니라, 겨울철과 같이 북서풍에 의한 윈드시어가 발생한다. 따라서 가을철은 한랭전선의 강한 서풍과 통과 후 강한 북서풍으로 발생하는 형태로 구분했다.



1)가을철 A형 모식도

제주공항 서쪽에서 서풍이 강하게 유입 되지만 해상과 내륙의 풍속차이로 인해 윈드시어가 발생한다(Fig. 41). 하지만 이 서풍은 한랭전선의 통과하면서 급속히 약해지기 때문에 윈드시어는 지속시간이 2~3시간 정도로 다른 경우에 비해 짧다.

2)가을철 B형 모식도

한랭전선 통과 후 강한 북서풍에 겨울철과 같은 형태로 다시 윈드시어가 발생한다(Fig. 42). 하지만 가을철 북서풍은 겨울철과는 달리 강하지 않기 때문에 윈드시어 역시 강도가 약할 뿐 아니라 지속시간도 짧다.



Fig. 39. Summer season mimetic diagram case A



Fig. 40. Summer season mimetic diagram case B



Fig. 41. Autumn season mimetic diagram case A



Fig. 42. Autumn season mimetic diagram case B

6. 사례분석

2006년 4월 9일은 제주공항의 강한 윈드쉬어로 인해 오후 3시부터 97편의 항공기가 결항되는 피해가 발생한 사례이다. 지상일기도(Fig. 43)에서와 같이 중국내륙에서 발생한 저기압이 제주도 서쪽 해상에서 발달하면서 동쪽으로 이동하고 있으나, 일본열도에 중심을 둔 고기압이 정체하면서 블로킹현상을 보이고 있다. 따라서 저기압이 동쪽으로 이동하는 속도가 매우 느려졌을 뿐 아니라, 제주도를 포함한 우리나라 부근으로 기압경도가 커지고 있다. 따라서 제주도에 남풍이 지속적으로 유입되면서 AWS바람분포도(Fig. 44)에서 나타나듯이 남풍은 한라산을 중심으로 동서로 나뉘고 있다. 이렇게 나뉜 바람으로 인해 제주도동부와 서부지역은 바람이 강하게 나타나고 있으며, 다시 두 바람은 제주공항부근에서는 서로 만나고 있다.

LLWAS 그래픽영상(Fig. 45)에와 같이 제주공항 및 활주로부근 바람은 각 관측지점별 다른 풍향과 풍속을 보이고 있다. 따라서 제주공항 활주로상에는 윈드쉬어가 발생하고 있으며, 점차 주활주로에서 보조활주로까지 확대되면서 발생하고 있다.

이 사례는 저기압이 제주도로 접근하면서 발생한 강한 남풍에 지형적인 요인이 더해져 제주공항의 활주로상에는 각기 다른 풍향과 풍속을 가진 바람이 유입되었고 이로 인해 강한 윈드쉬어가 발생했다. 항공기의 특성상 항공기는 맞바람(head wind)으로 일정한 풍향에서 이착륙을 해야 하나 이와 같은 강한 윈드쉬어로 인해 무더기 결항사태가 발생했던 것이다. 이 사례에서 보듯이 강한 윈드쉬어는 항공기 안전에 큰 영향을 미치고 있으며, 이와 같은 윈드쉬어 발생형태는 모식도에서 제시한 제주공항 봄철 B형과 같은 형태이다.

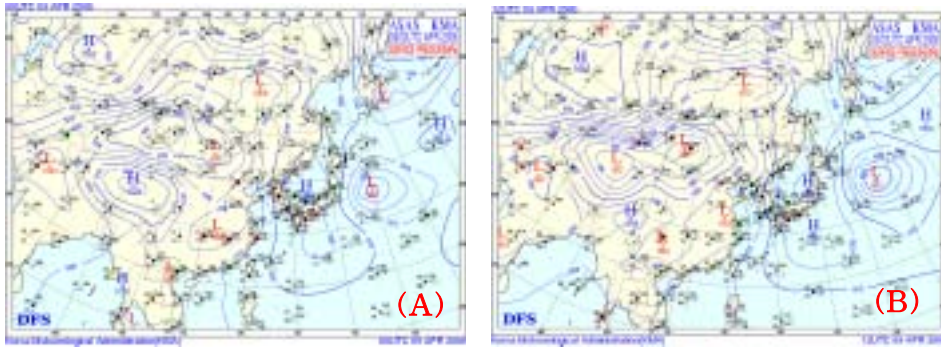


Fig. 43. Surface weather chart 09:00(A) 21:00(B) 9. APR., 2006

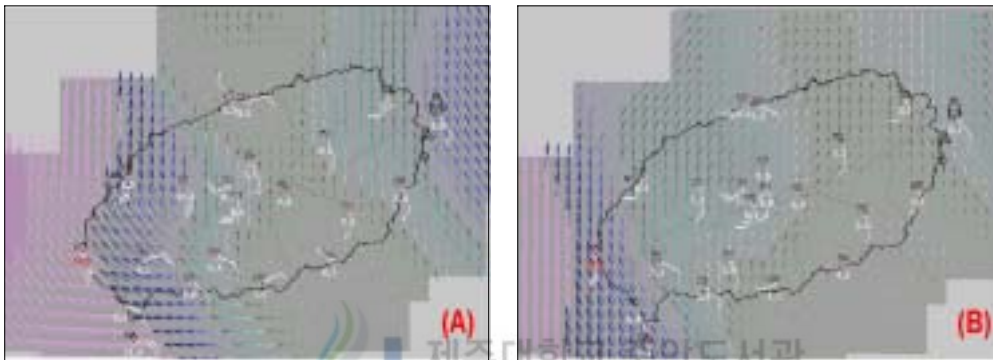


Fig. 44. AWS wind vector image 11:30(A) 17:35(B) 9. APR., 2006



Fig. 45. LLWAS windshear image 13:51(A) 14:03(B) 9. APR., 2006

V. 결 론

제주국제공항에 발생하는 윈드쉬어의 발생특성을 파악하기 위하여 제주공항 LLWAS의 윈드쉬어 관측 자료를 이용하여 제주공항의 계절별 윈드쉬어 발생메커니즘을 파악해 보았다. 제주공항 계절별 윈드쉬어 발생분포를 살펴보면, 겨울철(12~2월)은 윈드쉬어가 가장 많이 발생하는 계절로써 평균 발생일은 32.8일이며, 마이크로버스트 동시발생일수는 14.3일이다. 따라서 겨울철은 매우 강한 윈드쉬어가 발생하고 있으며, 그 원인은 강한 북서풍의 반복적인 풍속변화와 제주공항 해안지형에 의한 풍속차이이다.

봄철(3월~5월)의 평균발생일은 27.8일이며, 마이크로버스트 동시 발생일수는 8.8일이다. 특히 5월은 윈드쉬어의 평균발생일이 7.8일이고, 이 중 마이크로버스트발생일은 3.3일로써 강한 윈드쉬어가 발생하고 있다. 발생원인은 남풍류와 지형(한라산)적인 영향으로 인해 제주공항 부근에서 정반대의 바람(남서풍과 북동풍)이 만나면서 발생하고 있으며, 또한 편현상으로 인한 풍하층의 강한 바람으로도 발생한다.

여름철(6월~8월)의 평균발생일은 26일이다. 특히 7월에 가장 많이 발생하고 있으며, 8월은 마이크로버스트의 발생빈도가 가장 높다. 그리고 여름철 후반으로 갈수록 강해지는 것으로 나타났다. 발생원인으로는 초여름 편현상, 국지성 저기압의 강한 바람, 태풍의 영향권에서 나타나는 강한 동풍이다.

가을철(9월~11월)의 평균발생일은 18일로써 발생 빈도가 가장 낮다. 특히 10월은 윈드쉬어 발생일 4.3일로 가장 적다. 11월은 발생일 8.5일로 빈도가 높고, 다소 강한 윈드쉬어가 발생한다. 발생원인으로는 초가을의 태풍의 영향에 의한 동풍, 한랭전선상의 서풍, 찬 대륙고기압의 북서풍이다.

제주공항 윈드쉬어를 발생원인별로 분류하면 풍속차에 의한 윈드쉬어와 풍

향·풍속의 변화에 인한 윈드시어에 나눌 수 있다. 첫 번째는 풍속차로 인해 윈드시어가 발생하는 경우이다. 겨울철 북서풍, 태풍에 의한 동풍, 전선에 의한 서풍은 해상과 내륙이라는 지형적인원인으로 풍속의 차이가 나타나면서 윈드시어가 발생한다. 그리고 편현상으로 발생하는 풍하층의 급격한 풍속변화로 발생하고 있다. 두 번째는 풍향·풍속의 변화로 윈드시어가 발생하는 경우이다. 봄철 발생하는 윈드시어의 전형적인 형태로서 제주도에 남풍류가 강하게 유입되면 지형적인 원인으로 서로 다른 두 바람(남서풍과 북동풍)이 제주공항부근에서 수렴되면서 윈드시어가 발생하는 경우이다. 그리고 여름철 국지성 저기압의 강한 하강류에 의한 바람이 제주공항의 풍향과 풍속을 갑자기 바뀌게 함으로써 발생하는 경우로 나눌 수 있다.

계절별 바람특성으로 인해 제주공항의 윈드시어 발생메커니즘은 4계절 모두 다르게 나타났다. 그러나 윈드시어는 단순히 계절별 바람특성으로 발생하는 것이 아니라 주변지형에 의한 급격한 변화로 발생하고 있다는 공통점을 찾을 수 있었다. 즉 제주공항에 발생하는 윈드시어가 계절별 특성을 가지는 이유는 각 계절별 바람특성이 다르기 때문이며, 그 바람이 공항주변지형에 의해 변화가 발생하기 때문이다. 또한 제주공항에 강풍이 발생할 경우 대부분 윈드시어가 발생하고 있기 때문에 항공기의 결항 및 지연운항에 막대한 영향을 미치고 있었다. 특히 봄철에 발생하는 윈드시어는 이러한 현상이 아주 뚜렷하게 나타나고 있으며, 그 강도가 매우 강하게 나타나는 것은 주목할 만하다.

참 고 문 헌

홍성길, 2003, 기상분석과 일기예보, pp. 155-157

제주지방기상청, 2002, 제주지방국지예보실무지침서, pp. 3-10

성백량, 최정석외 2004. LLWAS 운영지침, pp. 9-83

Binbin Zhou, 2004, Ensemble forecast and verification of low level wind shear by NCEP SREF system, pp. 1-2

C.M.Shun & H.K.Lam 2002. Remote Sensing of Windshear under Tropical Cyclone Conditions in Hong Kong, The 35th session of the Typhoon Committee, Chiang Mai, Thailand

ICAO circular, 1987, 186-AN/122 WIND SHEAR 3-9, pp. 11-124



McKnight, TL & Hess, Darrel 2000. Foehn/Chinook Winds. In , Physical Geography: A Landscape Appreciation, pp. 132.

Wilson, F.W. 2004. Aviation impacts of terrain induced wind shear. Preprint, 11th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology Hyannis, Ma

요 약 문

제주공항에 설치되어있는 저층난류경보장치의 윈드쉬어 관측자료를 이용하여 계절별 윈드쉬어의 발생 특성과 원리 그리고 윈드쉬어 및 강풍 특보와 항공기의 결항 및 지연과의 관계를 조사하였다.

제주공항 계절별 윈드쉬어 발생빈도는 겨울, 봄, 여름, 가을 순이며, 월별로는 12월, 1월, 3월, 4월, 7월, 8월에 집중적으로 발생하였다. 계절별 강풍특보 발표건수는 겨울과 봄이 가장 높았으며, 다음으로 여름과 가을 순으로 나타났다. 강풍특보 지속시간은 겨울, 봄, 여름, 가을 순으로 나타났다. 월별 강풍특보발표건수는 12월과 1월, 3월과 4월, 그리고 7월과 9월에 집중적으로 발표되었다. 제주공항의 강풍과 태풍으로 인해 결항 및 지연운항 편수는 1월이 가장 많았고, 결항편수는 9월, 지연운항은 5월이 가장 많았다.

제주공항의 윈드쉬어는 계절별로 다른 바람특성과 공항주변 지형에 의한 영향으로 사계절 모두 다르게 나타났다. 또한 제주공항은 강풍이 발생할 경우 대부분 윈드쉬어가 발생하였다. 제주공항 윈드쉬어의 계절별 발생메커니즘을 요약하면 다음과 같다.



겨울철(12~2월)은 윈드쉬어가 가장 많이 발생하는 계절로써 북서풍 풍속의 급격한 변화와 제주공항 주변의 지형에 의한 풍속차이로 발생한다. 특히, 봄철(3월~5월)은 강한 남풍류에 지형적인 요인이 더해져 제주공항에서 바람이 수렴되는 경우와 편현상의 강한 바람으로 발생한다. 봄철은 윈드쉬어의 발생빈도가 높을 뿐 아니라, 강한 윈드쉬어가 발생하여 항공기 운항에 큰 위험요소가 되고 있다. 여름철(6월~8월)은 편현상에 의한 남서풍과 국지성 저기압의 강한 바람, 태풍의 영향에 의한 강한 동풍으로 인해 윈드쉬어가 발생하고 있다. 가을철(9월~11월)은 태풍의 영향과 한랭전선상의 서풍과 북서풍에 의해 윈드쉬어가 발생하며, 발생 빈도는 가장 낮다.

감사의 글

학문의 길이 얼마나 어렵고 고달픈 과정인지도 모르고 의욕 하나로 무지하게 뛰어 들었던 내 자신을 되돌아보면 부끄러움을 감출 길이 없으며, 더 열심히 했어야 하는 아쉬움을 남기면서 이 한권의 『논문』을 내놓습니다.

먼저 이 논문을 위해 시중 아낌없는 지도로 결실을 맺게 해주신 윤석훈 교수님과 문일주 교수님께 머리 숙여 감사를 드립니다. 그리고 멀리서나마 많은 가르침을 주신 방익찬 교수님께 깊이 감사드립니다. 그리고 본 논문의 심사를 위하여 많은 조언과 면밀한 검토를 해주신 심사위원장 고유봉 교수님, 그리고 많은 관심과 가르침을 주신 윤정수 교수님, 최영찬 교수님, 이준백 교수님, 유종인 선배님께 감사드립니다.

그리고 항상 바쁘시면서도 많은 힘이 되어준 신윤식 조교와 김태정 조교께 고마움을 전합니다.

아울러 직장에서 격려와 따뜻한 위로로 이끌어 주시고 학업을 마칠 수 있게 배려해주신 기상청 직원여러분께 진심으로 감사드립니다.

그리고 멀리 서울에서 많은 조언을 해준 친구 훈석, 태성이와 항상 곁에서 힘이 되어준 동훈, 기범, 정민, 우혁 그리고 선배 진영이형에게도 감사하다는 말을 전하고 싶습니다.

끝으로 지난 2년 반 동안 지치고 힘든 생활속에서도 희망과 믿음으로 격려를 아끼지 않았던 영원한 벗인 사랑하는 아내 임용순과 아들 흥영민과 함께 이 작은 결실을 나누고 싶습니다.