creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

[UCI]I804:24011-200000264024

2013년 8월
석사학위 논문

여수공항의 윈드시어 발생 특성 연구

조선대학교 대학원

대 기 과 학 과

변 판 수

2013년 8월 석사학위논문

여수공항의 윈드시어 발생 특성 연구

변판수

여수공항의 윈드시어 발생 특성 연구

A Study on the Characteristics of Wind-Shear Occurrence in Yeosu Airport

2013년 8월 23일

조선대학교 대학원

대 기 과 학 과

변 판 수

여수공항의 윈드시어 발생 특성 연구

지도교수 류 찬 수

이 논문을 이학 석사 학위신청 논문으로 제출함

2013년 4월

조선대학교 대학원

대 기 과 학 과

변 판 수

변판수의 석사학위 논문을 인준함

위원장 국가태풍센터 센 터 장 이 종 호 (인)

위 원 군장대학교 교 수 정 병 옥 (인)

위 원 조선대학교 교 수 류 찬 수 (인)

2013년 5월

조선대학교 대학원

목 차

List of Tables ····· ii
List of Figures ····· iii
ABSTRACT ····· v

제1장 서 론 ····· 1

제2장 자료 및 분석방법 ····· 3
제1절 조사기간 ····· 3
제2절 조사자료 ····· 3
제3절 분석방법 ····· 3

제3장 여수공항 지형 및 windshear 관측 ····· 7
제1절 여수공항 지형 특성 ····· 7
제2절 Windshear의 정의 및 관측 장비 ····· 9
제3절 대표적인 windshear의 발생 유형 ····· 13

제4장 windshear 발생의 통계적 특성 및 원인 분석 ····· 15
제1절 여수, 울산, 김해공항의 windshear 발생횟수 비교 ····· 15
제2절 월별, 계절별 windshear 발생 특성 ····· 16
제3절 기압유형별 windshear 발생 특성 ····· 17
제4절 활주로 양단의 windshear 발생 특성 ····· 21
제5절 강풍여부에 따른 windshear 발생 특성 ····· 23
제6절 강풍경보와 windshear 발생의 상관관계 ····· 25
제7절 대표적인 windshear 발생 유형 및 원인 ····· 28

제5장 결론 ····· 44

참고문헌 ····· 46

List of Tables

Table 1. Classification of Pressure pattern & figure ····· 4
Table 2. Windshear warning standard of Yeosu Airport ····· 9
Table 3. Frequency of total and mean days of windshear each Airport ····· 16
Table 4. Frequency of total days of windshear each pressure pattern ····· 18
Table 5. Monthly Alert Occurrence of current state about windshear each runway (R17, R35) ····· 22
Table 6. Mechanism of trough development in bottom atmosphere(850hPa) ····· 30
Table 7. Probability of Windshear (Cyclone) - Detailed Statistics data ····· 43

List of Figures

Fig. 1. Case of cP expansion period (2009. 1. 10. 06KST) ····· 5
Fig. 2. Case of Anticyclone(STR) (2008. 2. 19. 15KST) ····· 5
Fig. 3. Case of Anticyclone(MOD) (2010. 05. 01. 12KST) ····· 5
Fig. 4. Case of Anticyclone(WEK) (2009. 01. 22. 12KST) ····· 5
Fig. 5. Case of Anticyclone center (2008. 10. 15. 15KST) ····· 5
Fig. 6. Case of Cyclone(Rain) (2009. 05. 17. 00KST) ····· 5
Fig. 7. Case of Cylcone(No Rain) (2011. 03. 28. 03KST) ····· 6
Fig. 8. Case of Changma(Rain) (2009. 07. 13. 03KST) ····· 6
Fig. 9. Case of Typhoon (2010. 09. 02. 03KST) ····· 6
Fig. 10. Main mountain range of the Korean Peninsula(Left), Mountain range ··· 7
Fig. 11. Surrounding topography of Yeosu Airport ····· 8
Fig. 12. Windprofiler observation Antena in Yeosu Airport ····· 10
Fig. 13. Windprofiler observation network ····· 10
Fig. 14. System of measuring about windprofiler observation data ····· 11
Fig. 15. Windshear Observation Integrated Operational Program ····· 12
Fig. 16. Case of Microburst ····· 14
Fig. 17. Case of Front ····· 14
Fig. 18. Case of See breeze front ····· 14
Fig. 19. Case of Terrain etc. ····· 14
Fig. 20. Frequency of the windshear mean days each airport ····· 15
Fig. 21. Frequency of monthly mean days(Windshear, Strong wind) ····· 17
Fig. 22. Frequency of season mean days(Windshear, Strong wind) ····· 17
Fig. 23. Frequency of monthly total days (cP Expansion, Windshear) ····· 19
Fig. 24. Frequency of monthly total days (Anticyclone(STR), Windshear) ····· 19
Fig. 25. Frequency of monthly total days (Anticyclone(MOD), Windshear) ····· 19
Fig. 26. Frequency of monthly total days (Anticyclone(WEK), Windshear) ····· 20
Fig. 27. Frequency of monthly total days (Anticyclone Center, Windshear) ····· 20
Fig. 28. Frequency of monthly total days (Anticyclone, Windshear) ····· 20

Fig. 29. Frequency of monthly total days (Cyclone(Rain), Windshear) ····· 21
Fig. 30. Monthly Alert Occurrence of current state about windshear each runway (R17, R35) <graph> ····· 22
Fig. 31. Statistics of Strong wind of Yeosu Airport : Factors of emergency flight(Up), Statistics of each month & wind system(Middle), Wind system at Occurrence of strong wind(Down) ····· 24
Fig. 32. Probability of Windshear occurrence by wind speed ····· 26
Fig. 33. Distribution of Windshear intensity by surface wind speed ····· 26
Fig. 34. Case of trough development(2009. 01. 10. 03UTC) ····· 29
Fig. 35. Example of windshear forecast procedure (2009. 01. 10. 03UTC) ····· 31
Fig. 36. Case of cP Expansion - Wind Profiler Obsevation (2009. 01. 10.) ····· 32
Fig. 37. Case of transmutation cP extension(2008. 01. 15. 09KST) ····· 34
Fig. 38. Case of N-E trough extension(2010. 02. 04. 09KST, 21KST) ····· 35
Fig. 39. Formation of See-breeze ····· 36
Fig. 40. Case of See-breeze penetration - Surface Chart (2009. 05. 05. 15KST) ····· 37
Fig. 41. Case of Anticyclone Border(WEK) & Anticyclone Center - Wind Profiler Observation (2009. 05. 05.) ····· 38
Fig. 42. Identify of frontgenetic region(Surface) ····· 39
Fig. 43. Identify of reinforce cyclone(trough) & Cold advection(Mid Atmosphere) by 500hPa Chart ····· 40
Fig. 44. Identify of Surface Cyclone trace ····· 40
Fig. 45. Case of Warm front - Windprofiler Observation (2009. 05. 16.) ····· 41
Fig. 46. Case of Cold front - Windprofiler Observation (2009. 05. 17.) ····· 42

ABSTRACT

A Study on the Characteristics of Wind-Shear Occurrence in Yeosu Airport

Byun, Pan-Su
Advisor : Prof. Ryu, Chan-Su Ph.D
Department of Atmospheric Science
Graduate School of Chosun University

Lately, the air traffic of Korea has been steadily increasing. Especially improving the level of the national economy with aviation and tourism, leisure activities and population, light aircraft flying at a low altitude demand has been noticeably increasing, accordingly importance about safe operation of aircraft is required urgently.

According statistics from the U.S. Federal Aviation Administration, aviation accident investigation, ratio of approximately 21% of aircraft accidents is weather, specifically the ratio of approximately 60% of cross wind, tailwind, wind shear, turbulence, etc is wind(a large proportion). And aircraft accident is very high ratio about landing(31%), take-off(19%), landing approach(11%). Similarly in the case of the Yeosu Airport, according to statistics over the past five years, ratio of 31% of aircraft operated abnormal factors is weather and specifically, the ratio of 37%, 34.2%, 10.4%, 9.8% is strong wind, low visibility, snowfall, sea breeze. Through the above statistics, we know that ratio of cancellations about wind is very high.

Especially, Yeosu Airport is located in the boundaries of the land and the sea, as a result wind is strong, nature of geographical conditions caused by wind shear, because around the runway is formed by mountains, foothills about 1,000ft altitude but wind shear has difficult to define to occurrence mechanism because it

occurs very locally and has very short duration of occurrence. Thus, the aircraft has constraints take-off & landing and potential risk of an aircraft accident is higher.

So, Yeosu Airport had installed wind profiler in runway for take-off and landing ground near in August 2007 and has been providing wind shear information less than the hight of 2,000ft. We were analyzed typical types of wind shear occurrence & cause and characteristics of wind shear through wind shear data from wind profiler observations, various numerical weather chart, analysis weather chart. And we were analyzed statistical probability about wind shear mechanism of occurrence, wind shear observations each season, pressure patterns and presence of strong winds in Yeosu Airport.

Also, not only characteristics of wind shear occurrence at both ends of runway but also frequency of occurrence of wind shear difference about Ulsan airport, Gimhae Airport which has been operating same equipment(wind profiler) had been analyzed. The results of the study are as follows.

(1) Frequency of occurrence of wind shear each airport is 2.54times(Ulsan Airport) and 1.08times(Gimhae Airport).

(2) Frequency of occurrence of wind shear each season, month is concentrated in the winter and spring. Especially, the distribution of occurrence of wind shear is high(March, January).

(3) Frequency of occurrence of wind shear each pressure patterns is most frequent in Anticyclone Border(256days/37.7%) but, occurrence of probability is the highest in cP expansion(85.7%) except the typhoon(100%).

(4) Frequency of occurrence of wind shear each runway is 2.1times more R35 than R17. R35 occurs more frequently than R17 all of pressure patterns.

(5) Representative types of occurrence of wind shear is cP expansion, cyclone(Rain)

(6) In Yeosu Airprot the main factors causing wind shear is strong wind, terrain effects and in order to forecast wind shear, we should consider formation & enforcement of 850hPa trough, blocking of anticyclone in East-sea, penetration of see breeze, frontogenesis(whether precipitation), north-south oscillation of sta-

tionary front, cold-advection and so on.

(7) When strong wind occurs(10 minute average wind speed is more than 20 kts), probability of occurrence of wind shear is 93%. when wind speed is observed more than standard of strong wind warning(10 minute average wind speed is more than 25 kts), probability of occurrence of wind shear is 100%. But, just wind shear occurrence doesn't reach standard of strong wind warning.

As a result, first we analysis pressure patterns and then consider probability of statics. In sequence weatherman discern comprehensive occurrence of wind shear or not by applying each pressure patterns about major weather forecasting factors in Yeosu Airport. If weatherman progress above procedure, wind shear probability of occurrence may be more efficient.

I hope this study helps safe operation of aircraft in Yeosu Airport.

제1장 서 론

최근 우리나라는 항공 교통량이 꾸준히 증가하고 있으며, 특히 국민 경제수준의 향상과 함께 항공관광·레저 활동 인구와 경항대기 수요가 지속적으로 증가하는 추세이다. 여수공항의 경우, 2011년 전라선 고속철도 개통에도 불구하고, 2012여수세계박람회와 2013순천만국제정원박람회 등 대규모 국제행사의 연이은 개최로 항대기 운항횟수 및 항공 운송수요가 꾸준히 증가하고 있다. 운항의 경우 2009년 5,671회에서 2012년 6,000회로 6%, 여객의 경우 2009년 609,662명에서 2012년 629,120명으로 3.2% 증가하였다.(한국공항공사 통계자료, 2013년) 특히 해양경찰청 항공단과 소형항대기 회사가 여수공항에 상주하는 등 헬리콥터나 경량항대기 등 저고도를 운항하는 항대기의 운항 수요가 눈에 띄게 증가하고 있어서 항대기 안전운항에 대한 중요성이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

미국 연방항공청인 FAA ASAIS(Federal Aviation Administration Aviation Safety Analysis Information and Sharing)에서 조사한 항공사고 통계(2003~2007년)에 따르면 항대기사고 중 기상현상으로 인한 비율은 약 21%이며, 기상 현상별로는 측풍, 배풍, windshear, 난류 등 바람으로 기인한 경우가 약 60%로 큰 비중을 차지한다. 또한 비행 단계별로는 착륙 31%, 이륙 19%, 착륙 접근 중 11%로써 이착륙과 관련하여 항대기 사고 비율이 매우 높게 조사되었다. 여수공항의 경우 비정상 운항률은 2.8%로 낮지만, 기상현상으로 인한 항대기 비정상 운항 요인은 31%이며, 요소별로는 강풍 37%, 저시정 34.2%, 강설 10.4%, 해풍 9.8% 등 바람과 관련된 경우가 많다.

여수공항은 한반도 남해안의 여수반도에 위치하고 있으며 사계절이 뚜렷하고, 해양성 기후의 영향을 받아 연평균 기온이 14.8℃로 온화하고, 연평균 강우량도 약 1,500 mm에 가까운 다우지역이다.

그러나 동쪽으로 광양만, 서쪽으로 호남정맥의 지류, 남서쪽으로 1,000ft 내외의 산들과 구릉지로 형성되어 있고 육지와 바다의 경계면에 위치하여 연평균 풍속이 7.2kt로 강한 편이며, 지형적인 특성 상 windshear가 발생할 조건을 갖추고 있다. 조종사들에 의하면 실제로 windshear를 자주 경험한다고 한다. 또한 공항시설등급이 CAT-I이고 활주로 길이도 2,100×45 m에 불과하여 위험기상이 발생한다면, 그만큼 항대기 운항에 큰 제약을 받을 수 있고, 항대기 사고 위험도 높다고 할 수 있다.

Windshear는 다른 기상현상들과는 달리 아주 국지적으로 발생하며, 지속시간이 짧기 때문에 그 발생 메커니즘을 명확히 밝히기가 어렵다.(ICAO, 2005) 항대기가 착륙할 때 windshear를 만나서 맞바람(head wind)이 감소하거나 뒷바람(tail wind)이 증가하면 항대기의 대기속도가 감소하고, 부력이 상실되며 활주로에 불시착 할 수 있다. 또한 항대기 이륙 시 windshear를 만나서 맞바람이 감소하거나 뒷바람이 증가하면 상승각이나 상승률은 더 낮아져 측풍(cross wind)성분을 가진 강한 windshear가 발생하여 항대기를 활주로의 중심으로부터 벗어나게 하는 원인이 될 수 있다.

1980년대부터는 LLWAS(Low Level Windshear Alert System)가 개발되어 현재 미국, 대만, 싱가포르, 쿠웨이트, 사우디아라비아 등 여러 나라에서 운영되고 있다.

우리나라는 인천국제공항, 제주국제공항, 양양국제공항에 LLWAS를 설치 운영해 오다가 공항주변의 도시화 등 현실적 여건을 감안하여 LLWAS 대신 windprofiler를 도입하였다. 2005년 3월 울산공항을 시작으로 2007년 8월부터 여수공항과 김해공항의 활주로 이착륙 접지대 부근에 windprofiler를 설치하여 2,000ft 이하 고도의 wind-shear 관측정보를 제공하고 있다.

저층 windshear에 관한 연구는 1970년대 JFK(John Fitzgerald Kennedy)공항의 마이크로버스트(microburst)로 인한 사고를 계기로 본격적인 연구가 미연방항공청인 FAA에서 시작되었다. 대부분 저층windshear가 발생하는 대기상태와 기상현상에 대한 연구이며, 최근에는 수치모델에서 windshear 발생을 예측하는 연구가 이루어지고 있다.(Binbin et al., 2005)

국내에서는 LLWAS를 활용한 저층 windshear 연구(국립기상연구소, 2009) 등 LLWAS 장비가 설치된 공항을 대상으로 몇 건의 연구가 수행되었으며, windprofiler를 이용한 windshear 연구는 거의 없는 상태이다. 또한, ICAO Circular windshear에 대한 보고서에 의하면, 강풍, 마이크로버스트, 지형, 해륙풍, 뇌전 등을 windshear 발생 주원인으로 지목하고 있다.(ICAO, 2004)

이번 연구에서는 여수공항에서 발생하는 windshear의 대부분도 위와 같은 기상학적인 요인과 지형적인 요인이 결합하여 발생한다고 판단하였다. 이에 windprofiler에서 관측한 windshear 자료를 활용하여 공항별, 시기별, 기압유형별, 활주로 양단별 windshear 발생 특성과, 강풍여부에 따른 windshear 발생 특성을 분석한 뒤 통계적 분석에 근거하여 여수공항에서의 대표적인 windshear 발생 유형을 제시하고 그 원인을 규명하고자 한다. 본 연구가 여수공항을 운항하는 정기항대기 및 소형항대기들의 안전운항에 도움이 되기를 바란다.

제2장 자료 및 분석방법

제1절 조사기간

본 연구를 위하여 사용한 자료의 관측기간은 3년 5개월(2008. 1. 1. ~ 2011. 05. 31. / 1,247일)이다.

제2절 조사자료

· 여수공항 AMOS 풍향·풍속 데이터
· 강풍 및 windshear 발생일의 일기도 및 수치예보 자료
· 여수공항 windprofiler windshear 원시 데이터(150ft층간 바람변화 경향 15kt 이상), MOD(5~10kt), STR(10~15kt), SEV(15kt 이상)으로 강도 분류
· 울산공항 및 김해공항 windprofiler의 windshear 경보 현황
· 항대기 비정상운항 자료

제3절 분석방법

연구기간 동안 지상일기도의 기압유형을 일별 cP확장, 고기압 주변(기압경도 강), 고기압 주변(기압경도 중), 고기압 주변(기압경도 약), 고기압 중심, 장맛비, 저기압(무강수), 저기압(강수), 태풍 등 9가지로 구별한 뒤 강풍 발생여부(10분 평균풍속 20 kt 이상)와 windshear 발생여부(SEV 이상)를 분류하여 windshear와 관련된 종합 현황을 정리하였다. 지상일기도의 기압유형은 Table 1과 같이 분류하였다.

종합 현황을 이용하여 계절별, 기압유형별, 강풍 발생여부에 따라서 windshear가 어떤 분포로 발생하였는지 그래프와 표를 이용하여 정리한 뒤 여수공항과 같은 windshear 탐지장비를 운영 중인 울산공항, 김해공항의 windshear 발생 현황을 통계 정리하여 여수공항과의 빈도수를 비교하였다. Windshear가 1일에 1회 이상이라도 발생하면 그날을 windshear 발생일로 간주하여 계산하였다.

지상일기도, 각종 상층 분석장, windprofiler 고도별 풍향 풍속값을 이용하여 기압유형별 windshear 발생 특성에 대해 분석하였으며, 활주로 양단의 windshear 발생 빈도를 통계적으로 분석하였다. 또한 강풍 발생과 windshear 관계를 규명하기

위하여 여수공항 주변 지형과의 상관관계를 조사·분석하였다.

마지막으로 windshear 발생확률에 대하여 분석하였다. 이렇게 도출된 windshear 통계값을 windshear 예측 시 참고하고, 최종적으로 종합적인 여수공항의 windshear 발생 특성을 고려한 windshear 예측기법을 제시하였다.

Table 1. Classification of Pressure pattern & figure.

Pressure pattern	Classification	Figure
① cP Expansion	1. the pressure gradient(isobaric line) had continuous placement in korea peninsula, west sea, east sea?(at least more than 3, line hPa gap is 2hPa) 2. isobaric placement had north-south direction? 4. continent polar(cP) had went toward to SE?	Fig. 1
② Anticyclone Border(STR)	1. the pressure gradient had 3 isobaric line in korea peninsula? 2. it is not necessary to have strong gradient continuous placement between west sea and east sea. 3. not only continent polar(cP) but also corrupt anticyclone can be classified Anticyclone Border(STR)	Fig. 2
③ Anticyclone Border(MOD)	1. the pressure gradient had 2 isobaric line in korea peninsula? 2. only corrupt anticyclone can be classified Anticyclone Border(MOD)	Fig. 3
④ Anticyclone Border(WEK)	1. the pressure gradient had 1 isobaric line in korea peninsula? 2. only corrupt anticyclone can be classified Anticyclone Border(WEK)	Fig. 4
⑤ Anticyclone Center	1. it had no isobaric line and korea peninsula had been located in looped curve of isobarice line?	Fig. 5
⑥ Cyclone(Rain)	1. cyclone(front) included Cold, Warm had been located in korea peninsula and surrounding sea? 2. find precipitation phenomena?	Fig. 6
⑦ Cyclone(No rain)	1. cylcone(no front) had been loacted in korea peninsula and surrounding sea? 2. find no precipitation phenomena?	Fig. 7
⑧ Changma	1. stationary front had been located in surrounding korea peninsula in MAY, JUN, JLY, AUG? 2. find precipitation phenomena?	Fig. 8
⑨ Typhoon	1. the eye of typhoon had been located in more than north-latitude 32°? 2. trace of typhoon affect korea peninsula directly?	Fig. 9

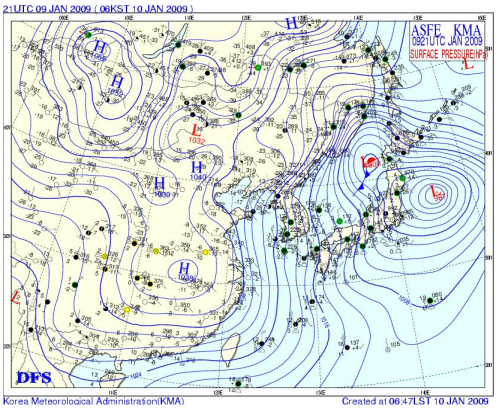


Fig. 1. Case of cP expansion period
(2009. 1. 10. 06KST).

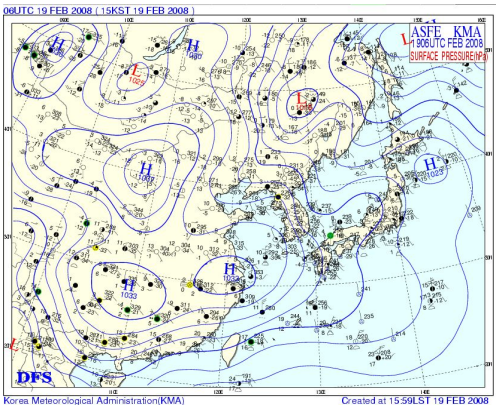


Fig. 2. Case of Anticyclone(STR)
(2008. 2. 19. 15KST).

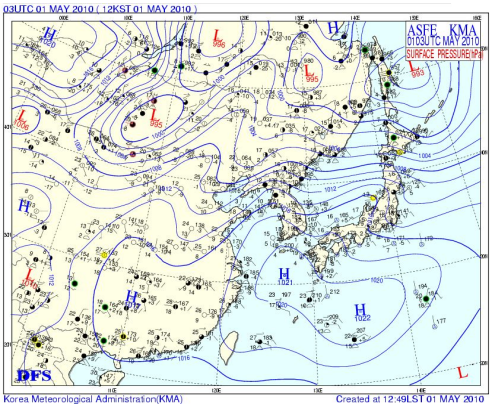


Fig. 3. Case of Anticyclone(MOD)
(2010. 05. 01. 12KST).

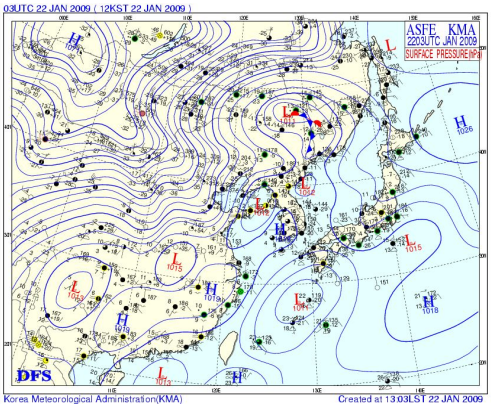


Fig. 4. Case of Anticyclone(WEK)
(2009. 01. 22. 12KST).

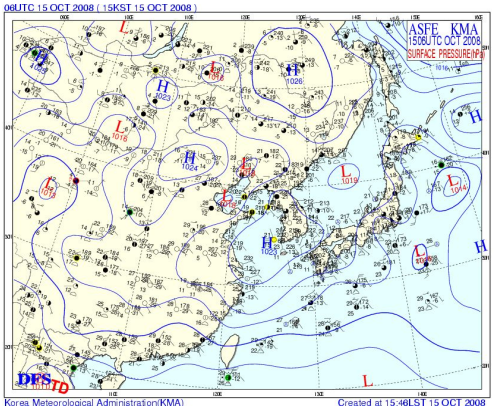


Fig. 5. Case of Anticyclone center
(2008. 10. 15. 15KST).

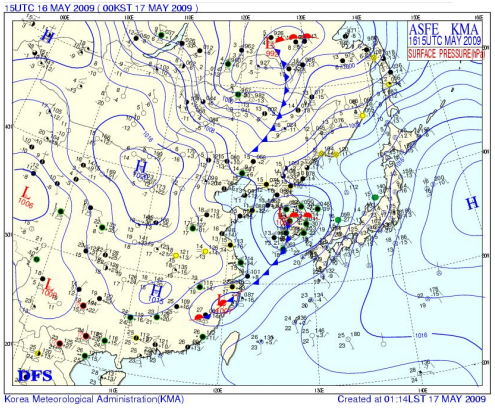


Fig. 6. Case of Cyclone(Rain)
(2009. 05. 17. 00KST).

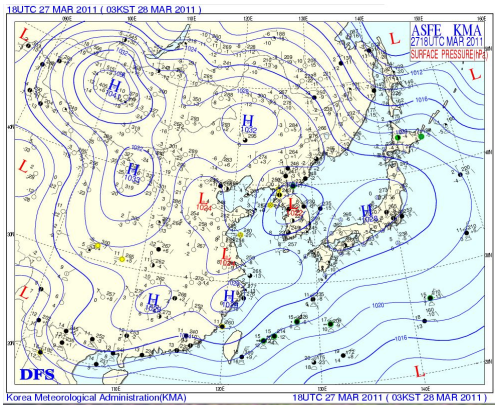


Fig. 7. Case of Cylcone(No Rain)
(2011. 03. 28. 03KST).

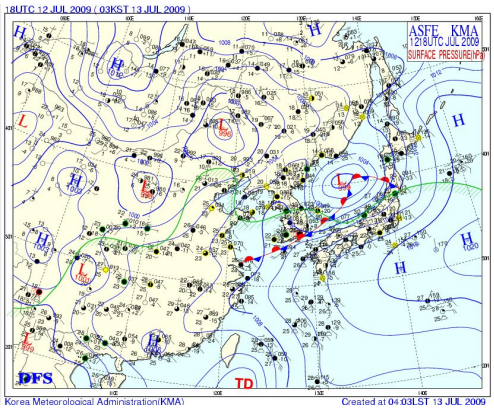


Fig. 8. Case of Changma(Rain)
(2009. 07. 13. 03KST).

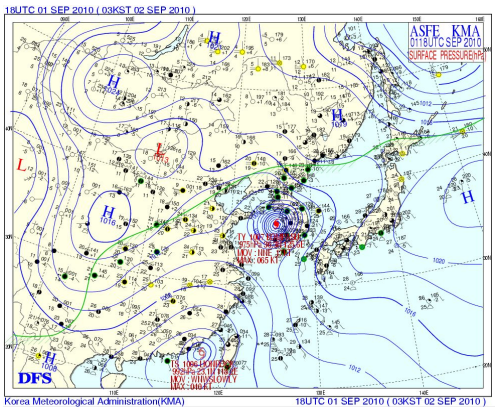


Fig. 9. Case of Typhoon
(2010. 09. 02. 03KST).

제3장 여수공항 지형 및 windshear 관측

제1절 여수공항 지형 특성

1. 여수공항 주변 산맥분포

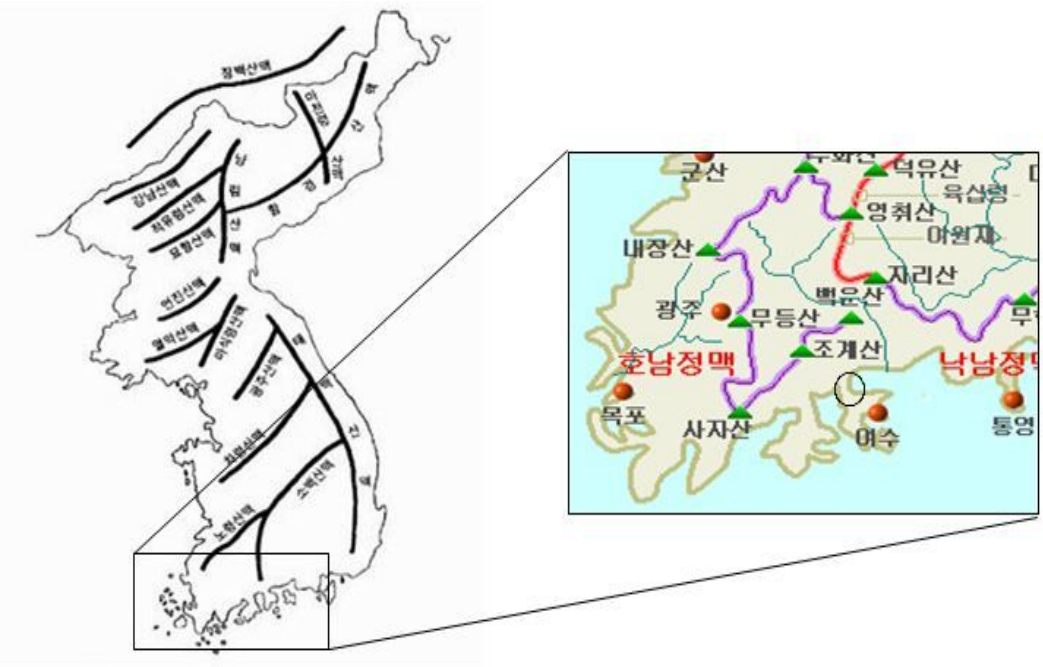


Fig. 10. Main mountain range of the Korean peninsula(left), Mountain range of Joen-nam(right).

Fig. 10은 한반도의 주요 산맥분포를 나타낸 것이다. 여수공항 북쪽에는 소백산맥의 지류인 호남정맥이 있고, 그 북쪽에는 고도가 더 높은 소백산맥이 위치하고 있다. 이러한 지형적 요인은 여수공항 windshear 발생 특성에 상당한 영향을 끼칠 수 있다.

2. 여수공항 주변 상세지형

Fig. 11. Surrounding topography at Yeosu Airport.

Fig. 11은 여수공항의 주변 상세지형을 나타낸 것이다. 여수반도는 전라남도의 남동쪽에 위치하고 여수반도의 입구인 북쪽으로는 순천, 동쪽으로는 광양만, 서쪽으로는 순천만이 있고, 남쪽에는 여수가 있다. 여수반도에는 300~400 m의 야산들이 중앙부분에 위치하고 이를 중심으로 동쪽과 서쪽으로는 도로와 주거지, 논과 밭으로 이루어져 있다. 여수공항은 34°50′N, 127°37′E에 위치하고 행정구역상 전라남도 여수시 율촌면 신풍리로 반도중간의 북동쪽에 약간 돌출되게 위치하고 있다. 북쪽으로는 광양만의 일부가 만 형태로 형성되어 있으며, 동쪽으로도 광양만이 있다. 서쪽으로는 호남정맥의 끝자락 지류인 국사봉, 황새봉 등의 구릉이 북서에서 남동방향으로 작은 산맥처럼 뻗어 있고, 남쪽으로는 해발 약 200 m 이하의 야산들과 논밭이 산재하여 있다.

제2절 Windshear의 정의 및 관측 장비

1. Windshear 정의 및 경보 기준

Windshear는 wind와 shear의 합성어이다. Shear는 자르는 것(절단)의 뜻을 가지고 있어 바람이 정상적으로 불지 않고 변형을 일으키는 현상을 뜻한다. 국제민간항공기구(ICAO)에 의하면 windshear는 바람의 속도와 방향, 속도 또는 방향이 급격히 변화 하는 경우로 정의하고 있다.

또한 windshear 경보는 활주로부터 지상 500 m 사이에 나타나는 바람의 변화[1)]가 15kt 이상 관측되거나, 지속 될 것으로 예상될 때 발표하며 항공기상청에서는 Table 2와 같은 windshear 강도 기준을 제시하고 있다.[2)] 본 연구에서의 windshear 강도는 windprofiler에서 관측된 SEV강도 즉, 풍속 변화경향이 15 kt 이상인 것을 기준으로 하였다.

여수공항의 windshear 강도는 Table 2와 같이 MOD(Modernate), STR(Strong), SEV(Severe) 등 3단계로 구분하여 관측되며 정풍과 배풍의 변화가 150ft 층간 바람의 변화 경향이 30kt 이상일 때는 microburst로 관측하여 통보한다.

Table 2. Windshear warning standard of Yeosu Airport.

	Intensity	Variation of wind	Note
Wind-Shear	MOD	5-10kt	Internal standard (Yeosu Airport)
	STR	10-15kt	
	SEV	More than 15kt	
		More than 30kt	Included Information of Microburst

1) Gain(정풍)또는 Loss(배풍)의 변화

2) ICAO Manual on Low-level Wind Shear(Doc 9817) AN/449 : Light(0-4kt per 100ft), Modernate(5-8kt per 100ft), Strong(9-12kt per 100ft), Severe(above 12kt per 100ft)

2. Windshear 관측 장비

Fig. 12는 여수공항 windprofiler 안테나이며 Fig. 13은 windprofiler 관측망 구성도이다.

2005년 3월부터 울산공항에 windprofiler를 설치, 운영 중이며, 2007년 8월부터는 여수공항과 김해공항에도 같은 종류의 장비를 설치하여 운영하고 있다.

Fig. 12. Windprofiler observation antena in Yeosu Airport.

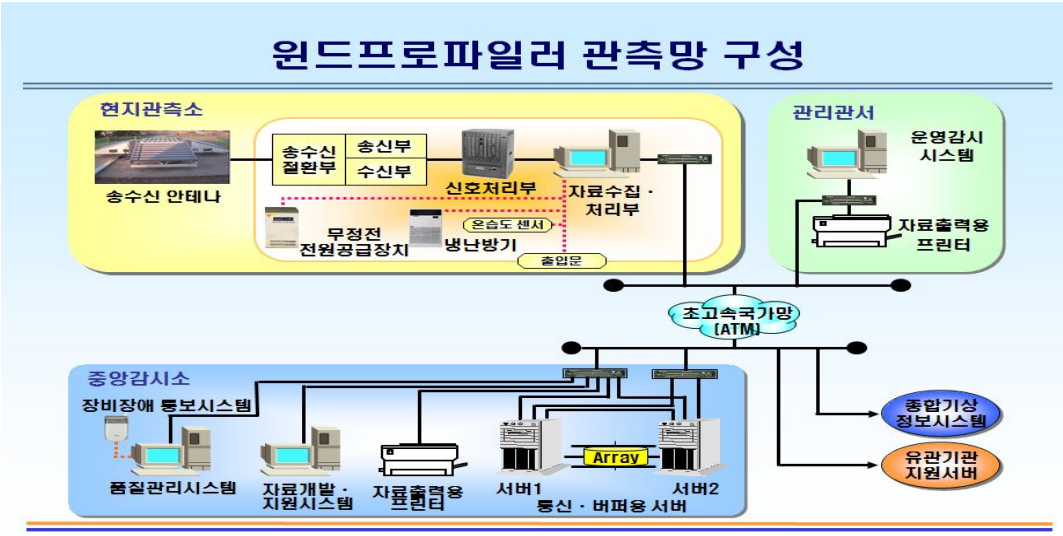
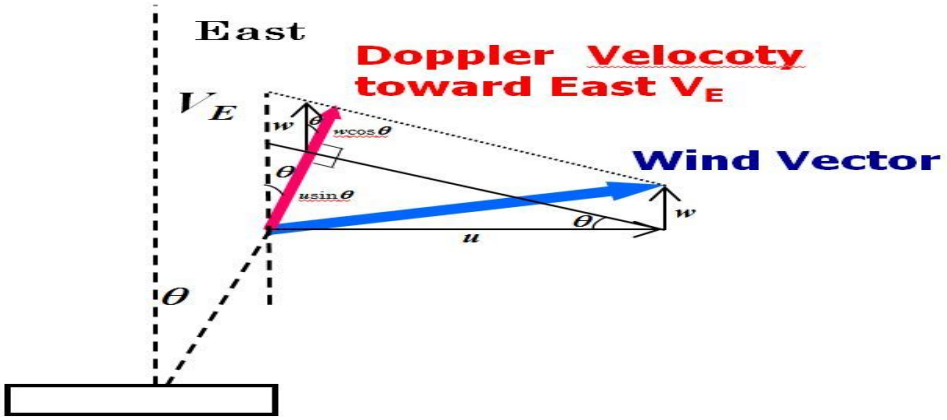


Fig. 13. Windprofiler observation network.

Windprofiler는 UHF 또는 VHF 파장의 전파 빔을 상층대기로 송신하고 바람과 함께 이동하는 난류에서 산란되어 오는 전파 신호를 수신하여 바람을 관측한다.

안테나는 연직방향과 14~20°만큼 기울어진 동·서·남·북 등 5개의 패널로 구성되어 있으며, 각 패널에서 수직으로 전파를 발사하여 각 방향의 대기운동에 따라 도플러 편이가 된 전파신호를 수신(시선속도 측정)하게 된다. 일정 고도에서 수평 바람장이 일정함을 가정하고, 연직방향의 빔과 천정각이 Θ인 5개 빔의 시선속도로부터 다음(Fig. 14)과 같이 바람의 u, v, w 성분을 산출하여 각 방향별 시선속도를 구한다.



$$V_E = wcos\theta + usin\theta \quad \cdots\cdots ①$$
$$V_W = wcos\theta - usin\theta \quad \cdots\cdots ②$$
$$V_N = wcos\theta + vsin\theta \quad \cdots\cdots ③$$
$$V_S = wcos\theta - vsin\theta \quad \cdots\cdots ④$$
$$V_Z = w \quad \cdots\cdots ⑤$$

$$u = \frac{V_E - V_W}{2\sin\theta} \cdots\cdots ① + ②$$
$$v = \frac{V_N - V_S}{2\sin\theta} \cdots\cdots ③ + ④$$
$$w = V_Z$$

Fig. 14. System of measuring about windprofiler observation data.

기하학적 접근을 통해 동시선속도($V_E = wcos\theta + usin\theta$)를 구하며 나머지 시선속도의 경우도 위와 같은 방법으로 도출할 수 있다. 사실 V_E 에서 관측한 수적과 V_W 에서 관측한 수적은 다른 것이나 고도에 따른 바람장을 일정하다고 가정한 이유는 식①+식② 해법은 해가 u,w두 개이나 식은 하나이기에 두개의 식을 연결해야 해를 도출할 수 있기 때문이다. 이러한 이유로 관측 고도가 높아질수록 많은 오차가 생긴다.

3. Windshear 관측 자료의 처리방법

Fig. 15는 여수공항 windprofiler의 windshear 탐지장비 통합 운영프로그램(WOIOP, Windshear Observation Integrated Operational Program) 설치 구성도이다.

이 프로그램은 공항에 설치된 두 대의 windprofiler에서 생산되는 실시간 바람자료를 화면에 표출하고, windshear 및 마이크로버스트 감지시 경보 발생 기능을 수행하는 소프트웨어이다. 즉, PCA와 PCT는 각 windprofiler의 상세 환경설정과 원시자료 및 바람자료를 처리하는 운영프로그램인 반면, 본 windshear 탐지장비 통합 운영프로그램은 통합 서버로 전송된 두 개의 windprofiler의 자료를 함께 처리하는 소프트웨어이다. 각 windprofiler의 하드웨어 통제 변수를 비롯한 상세 환경설정과 원시자료 표출은 PCA와 PCT에서 가능하므로 통합 운영프로그램에서는 PCA에서 처리된 바람성분(u, v, w)을 이용한 두 지점에서의 실시간 자료 표출과 경보 발생 기능 및 자료 검색 등 자료 활용과 관련된 기능을 수행하며, 크게 실시간 자료 표출과 경보 발생 및 자료 검색부분으로 구성되어 있다.

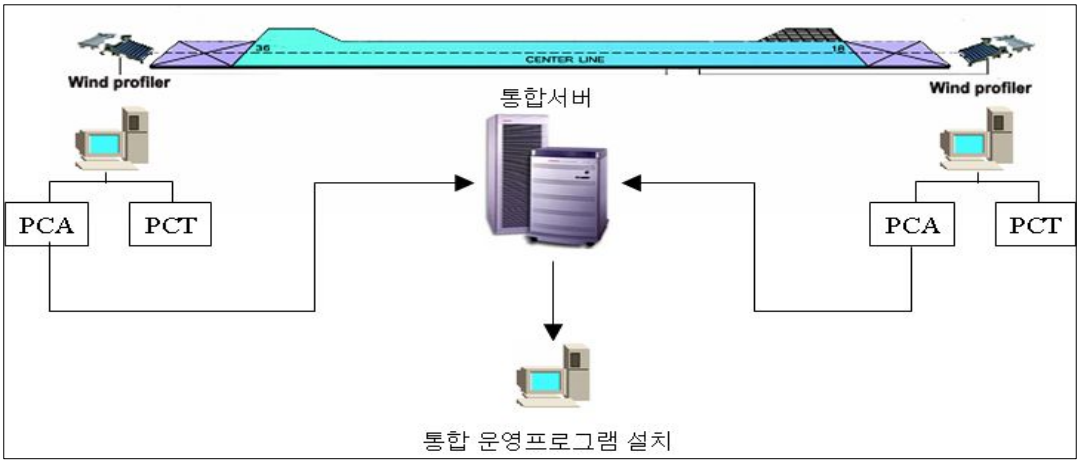


Fig. 15. Windshear Observation Integrated Operational Program.

또한, 본 시스템에서는 windprofiler의 고도별 바람자료와 AMOS(Aerodrome Meteorological Observation System)지상 바람자료 및 수치지형자료 등을 고려한 비압축성 유체를 가정하여 연속방정식을 기본으로 3차원 수치모델링에 의해 활주로 주변의 3차원 바람장을 표출하며, 위에서 언급한 3단계 강도별로 windshear를 탐지하고 경보를 제공한다.

제3절 대표적인 windshear의 발생 유형[3)]

1. 마이크로버스트 - Fig. 16

마이크로버스트(microburst)란 위험한 windshear 조건을 만들어 내는 강수를 유발하는 하강기류로써, 4 km 이하의 수평거리를 가지는 다운버스트(downburst)를 말한다. 마이크로버스트는 보통이나 그 이하의 강도를 가지는 하강기류를 만드는 과정과 동일하게 형성된다. 즉, 강수의 항력과 증발로 인한 냉각, 그리고 강수입자의 융해에 의해 만들어지는 현상이다. 마이크로버스트에 있어서 하강기류는 강한 강수로 인해 강화되고 건조대기의 증발, 냉각과 큰 음의 부력으로 발생하는 하강기류와 혼합될 때에도 강화된다. 또한, 대류운의 운저에서 하강하는 차고 농밀한 대기로 이루어진 뚜렷한 중심부를 이루는 것이 특징이다. 그것이 지상에 도달하면 측면 바깥으로 퍼지면서 바깥 경계를 따라 위쪽으로 감싸는 소용돌이 고리(vortex ring)를 형성한다. 전형적인 마이크로버스트는 모운(parent cloud)의 운저에서 지상까지 즉시 하강하면 풍속은 강하고 풍향은 마이크로버스트의 중심선을 가로질러 180˚로 변하고, 수평 windshear가 나타난다. 이 현상들은 지상 근처에서 매우 짧은 시간에 발생하고 낮은 실링과 악시정을 동반한다. 일단 마이크로버스트가 지상에 도달하면 그 생애는 5~30분 정도이다.

2. 전선면(frontal surface) - Fig. 17

일반적으로 전선이 위치하는 지역에서는 전선의 전후에 따라 풍향 및 풍속이 급변한다. 또한, 전선은 두 개의 서로 다른 기단의 경계지역이므로 두 개의 다른 밀도를 가진 대기가 있다. 따라서 찬 대기가 따뜻한 대기를 파고들어 가기 때문에(한랭전선) 하강 또는 상승기류가 존재한다. 그러므로 전선이 위치한 지역에서는 windshear 및 난류가 발생한다. 특히, 온난전선 상에서 발생하는 windshear는 매우 강할 뿐 아니라 지속시간이 길고, 낮은 구름과 악시정을 초래하기 때문에 항대기 운항에 큰 문제를 일으키기도 한다.

---

3) 국립기상연구소, 2009 : LLWAS를 활용한 저층 windshear 연구

3. 해풍전선대(sea breeze frontal zone) - Fig. 18

해상에 인접한 공항에는 바람이 약하고 일사가 강한 날에 해풍과 육풍이 교차되어 해풍전선대(sea breeze front)가 형성되고 이 부근에서 windshear가 발생한다.

4. 지형 및 기타(terrain etc.) - Fig. 19

앞의 windshear 요인 외에도 지형 및 장애물에 의한 지상풍 변화로 인한 windshear가 발생하며, 또한 하층 제트, 저층 기온역전에 인하여 windshear가 발생한다.

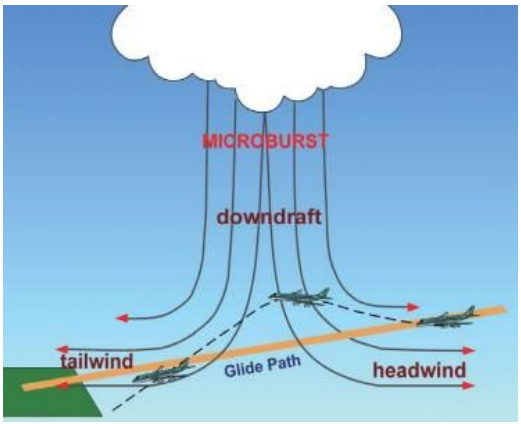


Fig. 16. Case of Microburst.

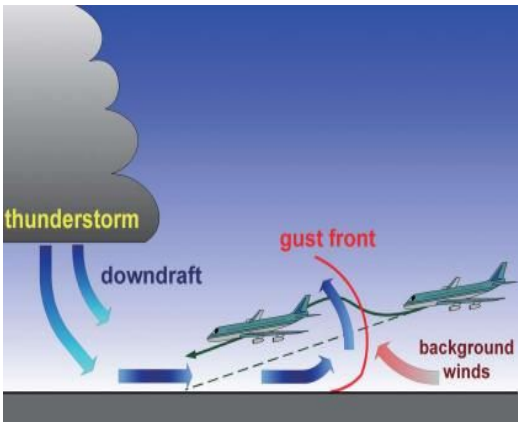


Fig. 17. Case of Front.

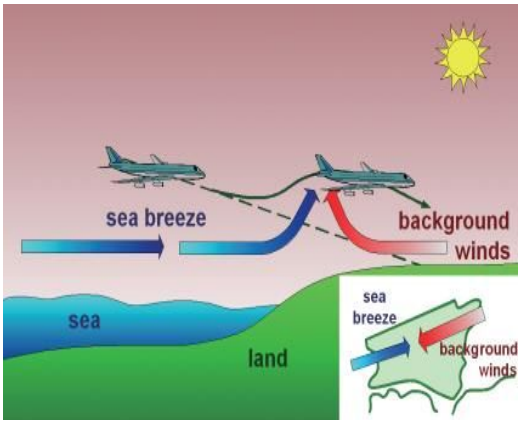


Fig. 18. Case of See breeze front.

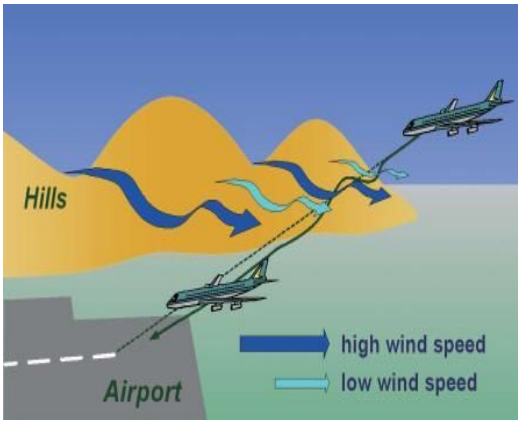


Fig. 19. Case of Terrain etc.

출처: HKO/IFALPA/WMO/ICAO Windshear Posters

제4장 Windshear 발생의 통계적 특성 및 원인 분석

제1절 여수, 울산, 김해공항의 windshear 발생횟수 비교

여수공항에 설치된 windprofiler와 동일한 장비를 설치하여 운영하고 있는 울산공항, 김해공항의 windshear 발생 횟수를 비교 분석하였다.

3개 공항의 windshear 발생횟수를 Fig. 20에서 살펴보면 조사기간 동안에 여수공항 679회, 김해공항 630회, 울산공항 268회이며, 공항별 windshear 발생확률은 여수공항 54.5%, 울산공항 21.5%, 김해공항이 50.5%로 여수공항에서 windshear 발생빈도가 가장 높았고, 울산공항에서 가장 낮았다. 이는 각 공항별 지형 및 기후적 특성이 반영된 결과로 해석된다.

월별로는 3월과 4월의 windshear 발생빈도가 두 공항에 비해 높게 나타났다. 그러나 10월과 11월에는 김해공항과 여수공항의 발생빈도가 비슷하였고, 오히려 9월에는 김해공항의 발생빈도가 높게 나타났다.

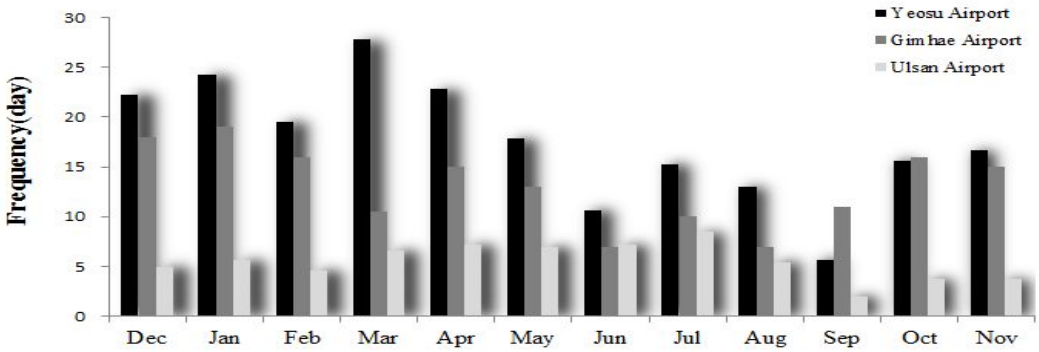


Fig. 20. Frequency of the mean windshear days at airports.

10월부터 2월까지의 windshear 발생 분포를 살펴보면, 여수와 김해의 경우 민감하게 대륙성 고기압이 지배하는 일수와 windshear 발생횟수가 비례하는 경향을 보였지만, 울산의 경우 거의 상관관계가 나타나지 않는 동시에 오히려 여름에 비하여 낮은 분포를 나타내었다.

Table 3. Frequency of total and mean windshear days at airports.

Month	Year mean values		
	Yeosu Airport	Ulsan Airport	Gimhae Airport
DEC	22.3	5.0	18.0
JAN	24.3	5.7	**19.0**
FEB	19.6	4.7	16.0
MAR	**27.8**	6.7	10.5
APR	22.8	7.3	15.0
MAY	17.9	7.0	13.0
JUN	10.7	7.3	7.0
JUL	15.3	**8.5**	10.0
AUG	13.0	5.5	7.0
SEP	5.7	2.0	11.0
OCT	15.7	3.8	16.0
NOV	16.7	3.8	15.0

제2절 월별, 계절별 windshear 발생 특성

여수공항의 windshear 연평균 발생일은 212일이며, 3월 27.8일, 1월 24.3일, 4월 22.8일 순으로 많이 발생하였고 9월 5.7일, 6월 10.7일순으로 적었다.(Fig. 21)

Windshear의 계절별 발생일(Fig. 22)을 살펴보면 봄(3, 4, 5월)이 69일(32.4%), 겨울(12, 1, 2월)이 66일(31.3%)순으로 많이 발생하였고, 여름(6, 7, 8월)이 39일(18.4%), 가을(9, 10, 11월)이 38일(17.9%)로 비슷하게 나타났다.

여수공항에서 연평균 강풍 발생일은 총 62일이며, 1월 14.1일, 12월 10일, 3월 9.1일순으로 많이 발생하였고 6월 0.3일, 8월 0.7일순으로 적었다.

강풍(10분 평균풍속 20 kt 이상)의 계절별 발생일을 살펴보면, 겨울(12, 1, 2월)이 107일(53.0%), 봄(3, 4, 5월)이 63일(31.2%)순으로 많이 발생하였고 가을(9, 10, 11월)이 26일(12.9%), 여름(6, 7, 8월)이 6일(3.0%)로 가장 낮게 나타났다.

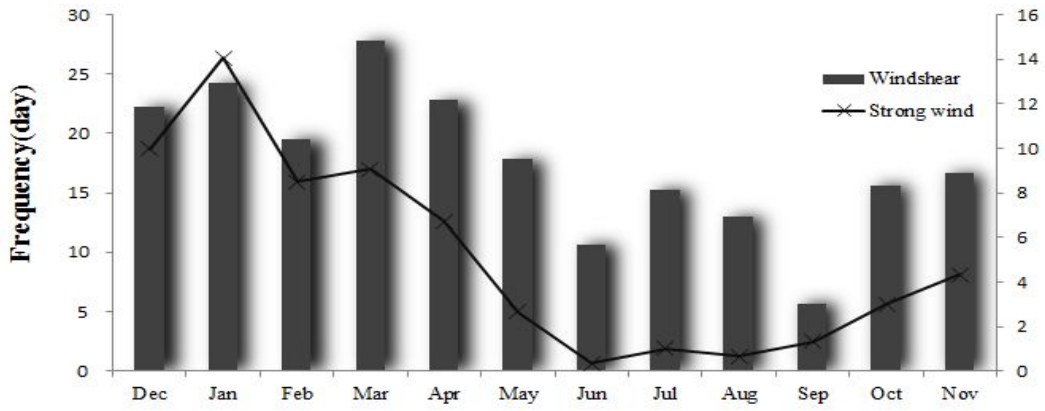


Fig. 21 Frequency of monthly mean days at Yeosu airport (Windshear, Strong wind).

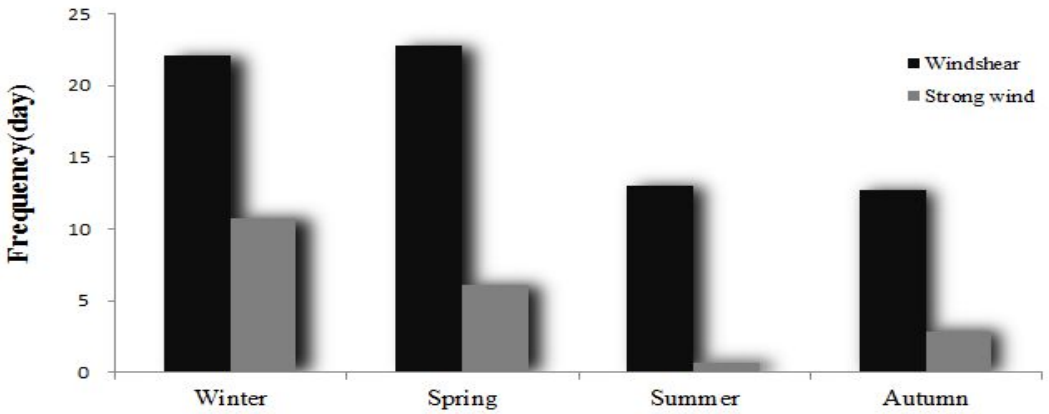


Fig. 22. Frequency of seasonal mean days at Yeosu airport (Windshear, Strong wind).

제3절 기압유형별 windshear 발생 특성

연구기간 동안 지상일기도를 분석하여 기압유형을 9가지로 분류하고 기압유형별 windshear 발생빈도를 조사 분석하였다.

기압유형별 종합적인 windshear 발생현황을 살펴보면 Table 4와 같다.

Table 4. Frequency of total windshear days for Pressure patterns.

Pattern / Month	cP Expansion	Anticyclone Border (STR)	Anticyclone Border (MOD)	Anticyclone Border (WEK)	Anticyclone Center	Cyclone (Rain)	Cyclone (No Rain)	Changma (Rain)	Typhoon
DEC	21/22	8/9	6/10	10/20	4/11	18/21	-	-	-
JAN	48/57	5/8	11/23	3/9	7/14	8/11	1/2	-	-
FEB	20/26	8/13	12/20	7/14	4/17	16/23	-	-	-
MAR	11/12	16/18	23/26	9/13	11/18	20/31	4/6	-	-
APR	-	14/17	9/12	9/15	12/34	34/44	-	-	-
MAY	-	3/4	13/19	13/26	5/22	24/46	3/5	-/2	-
JUN	-	1/1	4/7	3/16	3/15	15/41	2/4	4/5	-
JLY	-	1/1	1/4	9/20	3/8	22/42	1/2	8/14	1/1
AUG	-	1/1	3/11	9/31	-/7	20/34	2/6	1/1	2/2
SEP	-	1/1	1/9	4/33	-/11	5/30	-/1	-	5/5
OCT	2/2	2/3	7/13	12/31	7/20	17/24	-	-	-
NOV	12/14	6/10	2/11	10/17	10/23	10/14	-/1	-	-
Total	**114** / 133	66 / 86	92 / 165	98 / 245	66 / 200	**209** / 361	13 / 27	13 / 22	8 / 8
Probability (%)	**16.8** / **85.7**	9.7 / **76.7**	13.6 / 55.8	14.4 / 40.0	9.7 / 33.0	**30.8** / **57.9**	1.9 / 48.1	1.9 / 59.1	1.2 / **100**

기압유형별 windshear의 발생빈도 총679회 중에서 강수를 동반한 저기압유형 일 때 209회, 30.8%로 가장 높았으며, 다음으로 cP확장인 경우가 114회, 16.8%를 차지하며, cP확장을 포함한 고기압 주변일 경우 370회, 54.5%로 windshear 발생빈도가 매우 높음을 알 수 있다.

기압유형별 windshear 발생 확률은 cP 확장시 85.7%, 고기압 주변에서 기압경도가 강할 때 76.7%를 보여 강풍유발조건에서 windshear의 발생 확률이 높음을 알 수 있다. 또한 cP확장을 포함한 고기압 주변에서 58.8%, 강수를 동반한 저기압유형일 때 57.9%로 대부분 고기압주변 또는 강수를 동반한 저기압 유형일 경우 windshear의 발생 확률이 매우 높게 나타났다. 단, 태풍의 경우 발생빈도는 8회였지만, 적은 횟수에도 불구하고 반드시 windshear를 유발하는 것을 알 수 있다.

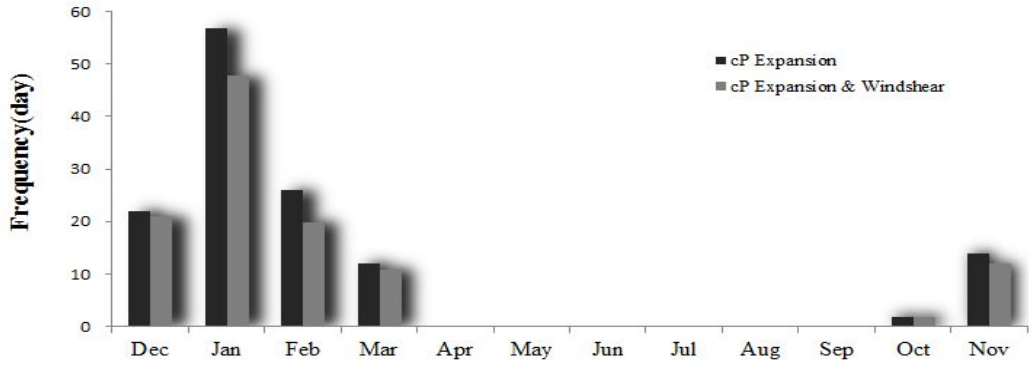


Fig. 23. Frequency of monthly total days (cP Expansion, Windshear).

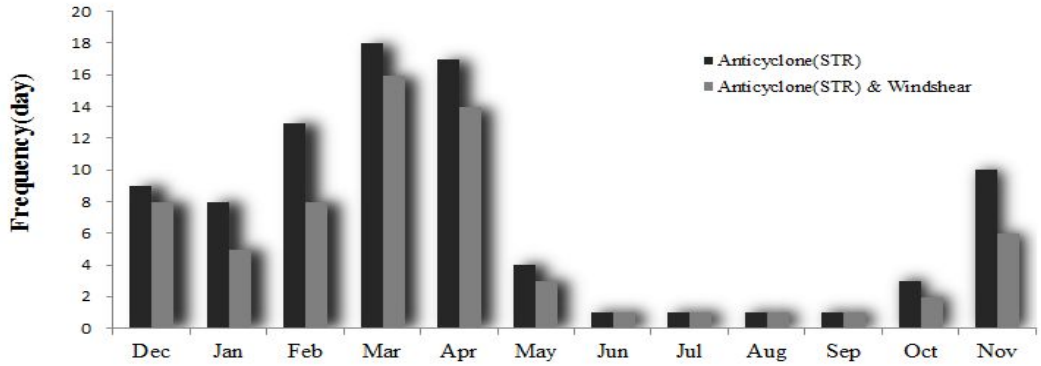


Fig. 24 Frequency of monthly total days [Anticyclone(STR), Windshear].

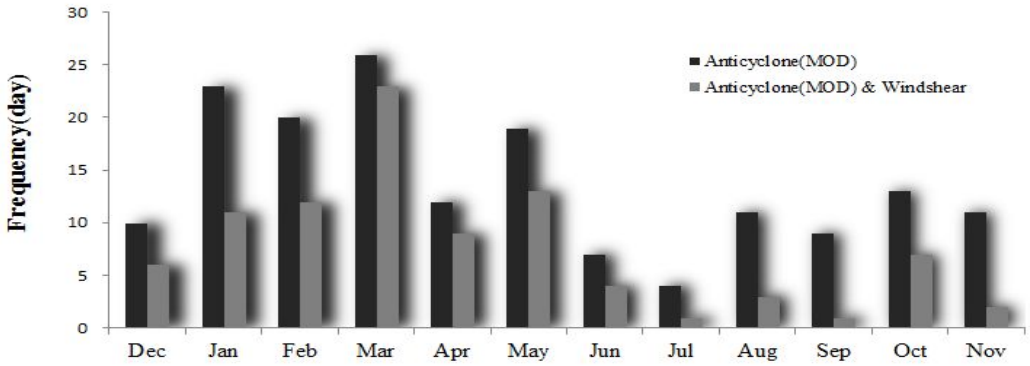


Fig. 25. Frequency of monthly total days [nticyclone(MOD), Windshear].

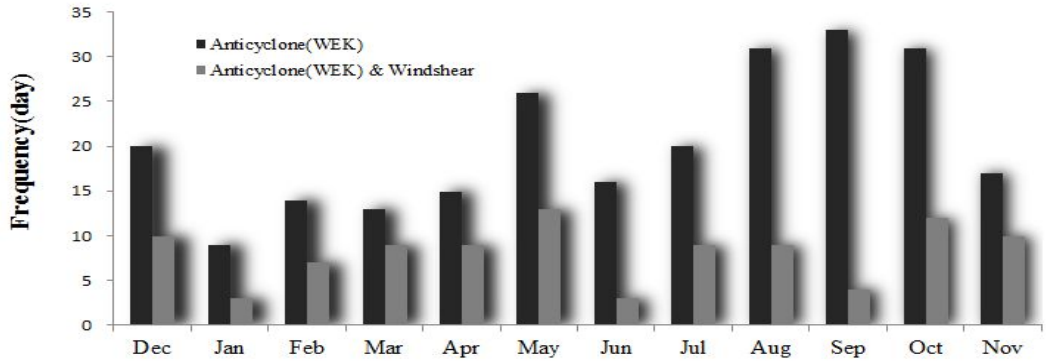


Fig. 26. Frequency of monthly total days [Anticyclone (WEK), Windshear].

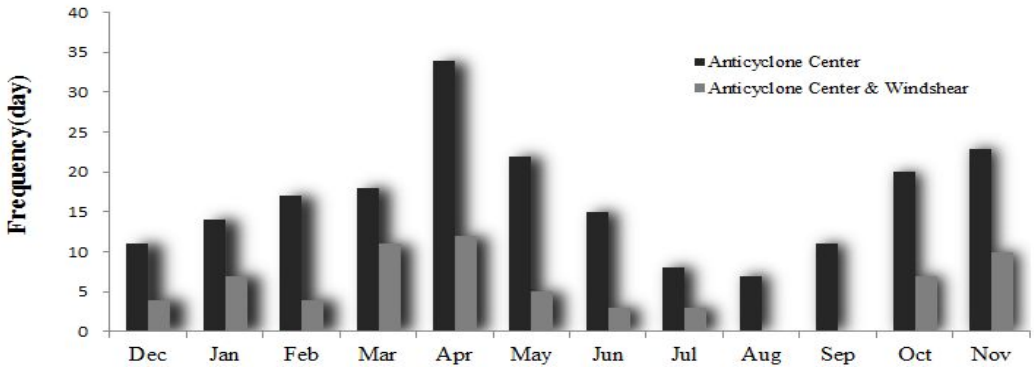


Fig. 27. Frequency of monthly total days (Anticyclone Center, Windshear).

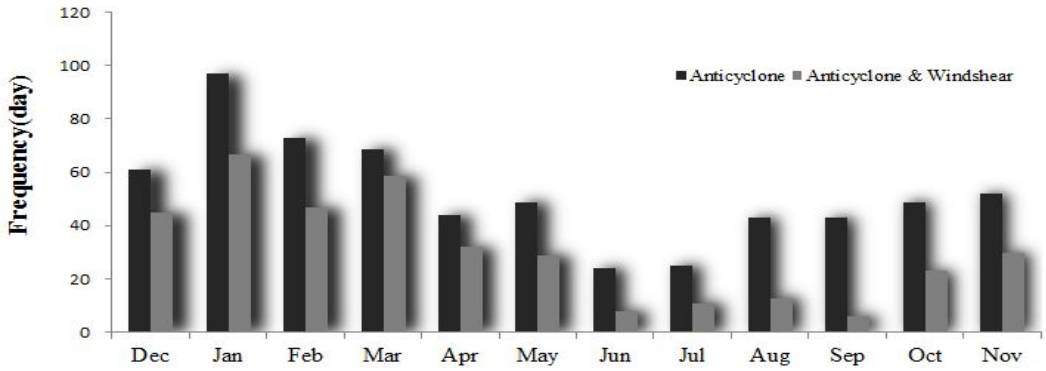


Fig. 28. Frequency of monthly total days (Anticyclone, Windshear).

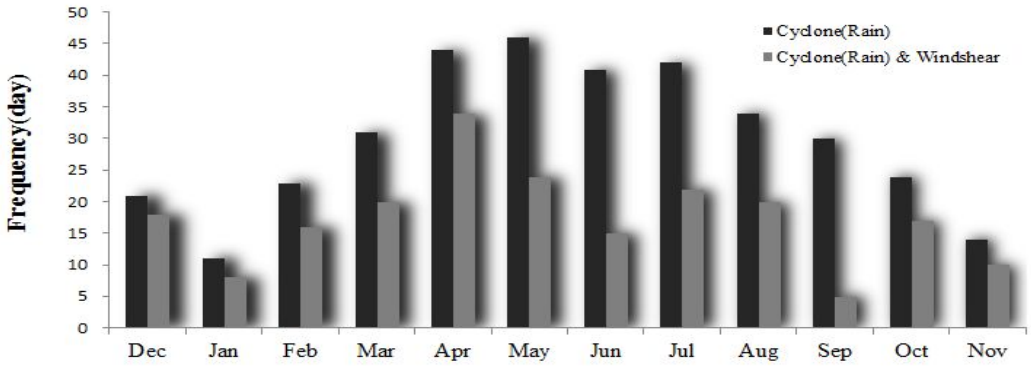


Fig. 29. Frequency of monthly total days [Cyclone(Rain), Windshear]

제4절 활주로 양단의 windshear 발생 특성

1. 발생빈도 비교 및 월별 발생현황

Table 5는 2008년 1월 1일부터 2011년 05월 31일까지 windshear 기준별 Alert(경보)현황의 월평균 분포를 나타낸 것이다. 본장에서의 windshear 발생횟수는 조사기간 동안 발생한 모든 windshear 횟수를 합한 것이다. 활주로 양단의 windshear 발생횟수는 35방향이 17방향보다 2.1배 더 많이 나타났다. 계절별로도 35방향이 17방향에 비하여 windshear 발생 빈도차가 확연히 높았다.(Fig. 30)

기압유형별 발생빈도를 알아보기 위하여 cP확장형(2013. 02. 02.)과 강수가 있는 저기압형(2013. 05. 27.)의 대표적인 두 사례일을 조사한 결과 둘 다 35방향에서 windshear가 자주 발생하는 것을 알 수 있었다.

Table 5. Monthly Alert Occurrence of current state about windshear at runways (R17, R35).

Month	R17	R35	Total of SEV
	SEV	SEV	
JAN	791	968	1,759
FEB	358	343	701
MAR	261	815	1,076
APR	381	808	1,189
MAY	75	670	745
JUN	25	196	221
JLY	36	297	333
AUG	20	257	277
SEP	15	38	53
OCT	103	404	507
NOV	415	381	796
Dec	371	813	1,184
쌕미	2,851	5,990	8,841

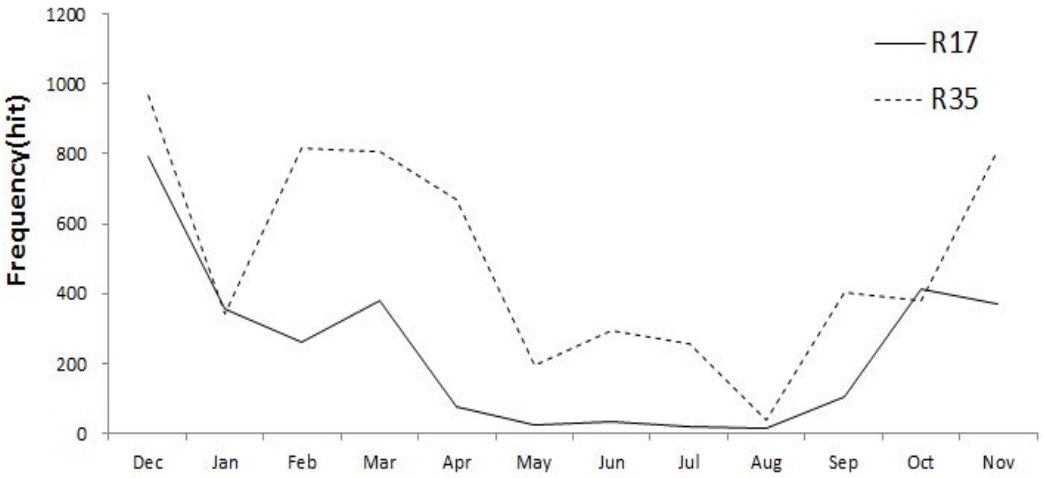


Fig. 30. Monthly Alert Occurrence of current state about windshear at runways (R17, R35)

제5절 강풍여부에 따른 windshear 발생 특성

1. 강풍의 정의

항공기상청에서 강풍경보는 10분 평균풍속이 25kt 이상 또는 순간풍속(GUST)이 35kt 이상 관측되거나 예상될 때 발표한다. 그러나 여기에서는 강풍경보 기준에 도달하기 전에 사전에 인지할 수 있도록 하기 위하여 10분 평균풍속이 20kt 이상인 경우를 강풍으로 정의하였다.

2. 강풍의 발생 특성

Fig. 31은 여수공항의 기상에 의한 항대기 비정상운항 통계와 2008년부터 2011년까지 4년 동안의 월별 강풍 현황 및 겨울철의 여수공항의 풍향별 강풍(20kt 이상) 발생 현황[4]이다. 강풍에 의한 항대기 비정상 운항이 37%로 가장 높게 나타났다. 20kt 이상의 강풍은 총 217회, 연 평균 약 54회 발생하였으며, 북서풍이 전체 풍계 중 73%로 가장 많이 발생하였다. 이러한 이유로 풍향 유형은 대개 cP확장 시 강풍이 발생할 확률이 높다는 것을 방증한다.

4) 한국공항공사 통계팀 자료

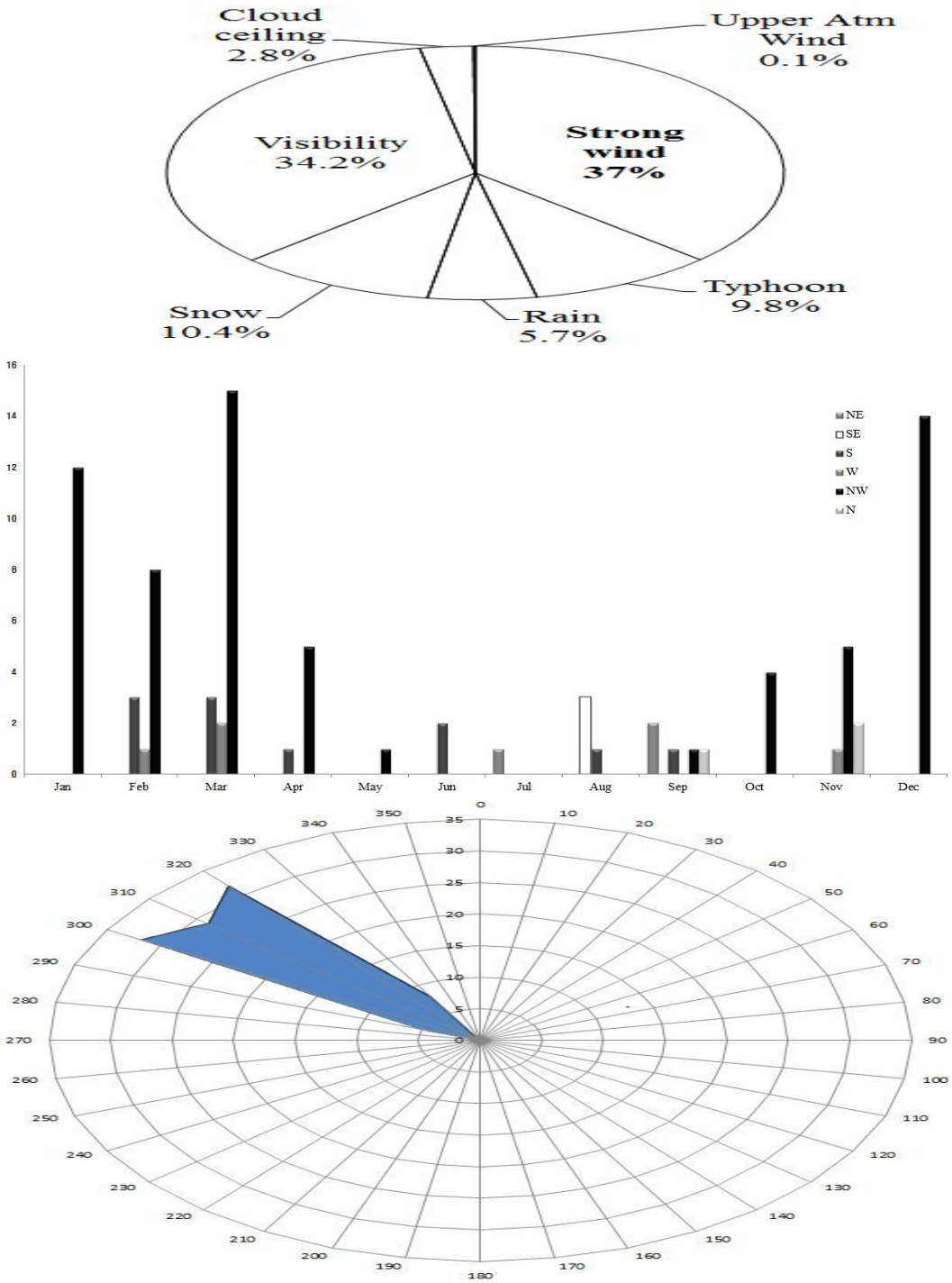


Fig. 31. Statistics of Strong wind of Yeosu Airport : factors of emergency flight(up), statistics of each month & wind system(mid), wind system at occurrence of strong wind (down).

3. 강풍 발생여부에 따른 windshear 발생 일수

연구기간 동안 총 강풍 발생일은 202일이며, windshear와 강풍이 동시에 나타난 날은 188일이다. 강풍(10분 평균풍속 20kt이상)이 발생하면 windshear가 발생할 확률은 93.1%이다. 1월의 경우 강풍발생이 연평균 14.1일로 가장 빈발하였으며 6월이 연평균 0.3일로 가장 낮은 강풍 발생 빈도를 보였다. 강풍 발생과 windshear가 동시에 발생한 달 또한 1월이 연평균 13.2회로 가장 높은 발생 빈도를 보였으며, 6월이 연평균 0.3일로 가장 낮은 발생빈도를 보였다. 따라서 강풍발생과 windshear 발생은 비례함을 알 수 있다.

제6절 강풍경보와 windshear 발생의 상관관계

강풍과 windshear는 아주 밀접한 관계가 있다. 하층대기(850hPa)에서 강풍이 나타나게 되면 지상에서도 강풍이 나타나지만 지표의 마찰력에 의한 풍속의 변화는 풍속이 강할수록 크게 발생하게 되고, windshear의 발생 가능성은 강풍이 없을 때보다는 높아지는 경향을 보였다. 이를 알아보기 위하여 다음과 같은 명제를 세우고, 참, 거짓 여부를 판별하였다.

Strong wind Warning ⇌ Windshear

첫 번째 강풍경보가 발생하였을 때 windshear가 발생했는지 여부를 조사한 결과를 Fig. 32에 나타내었다.

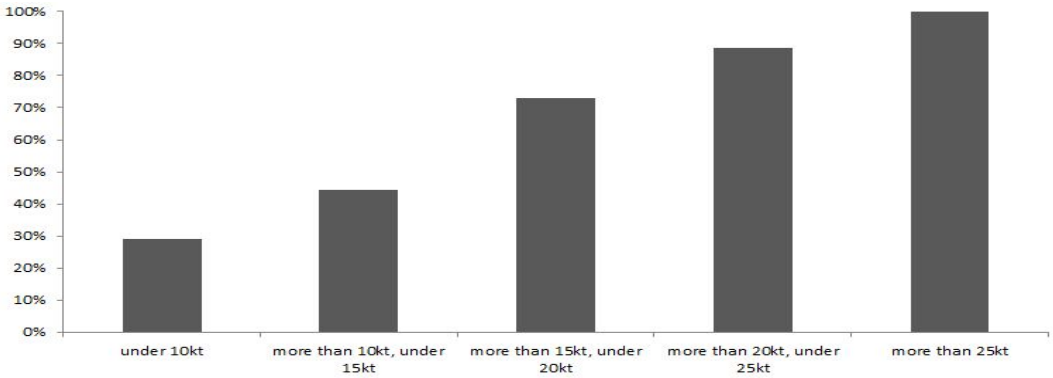


Fig. 32. Probability of Windshear occurrence by wind speed.

즉, 풍속이 강할수록 windshear가 발생할 확률이 높아짐은 물론 강풍경보 기준인 25kt 이상에서는 100% windshear가 발생함을 확인할 수 있었다. 따라서 강풍경보가 발생하면 windshear가 발생한다는 명제는 참이 된다.

두 번째로 windshear가 발생하면 강풍경보의 발생여부에 대해 알아본 결과, windshear의 발생 시 지상풍속과의 관계를 Fig. 33과 같이 분포도로 표현하였다.

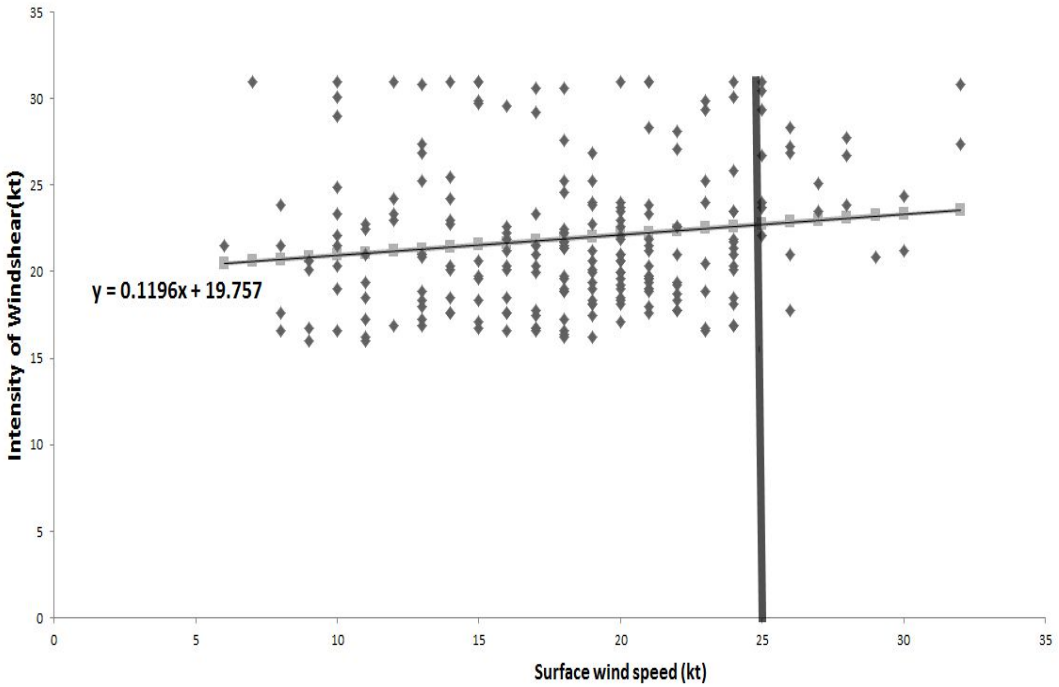
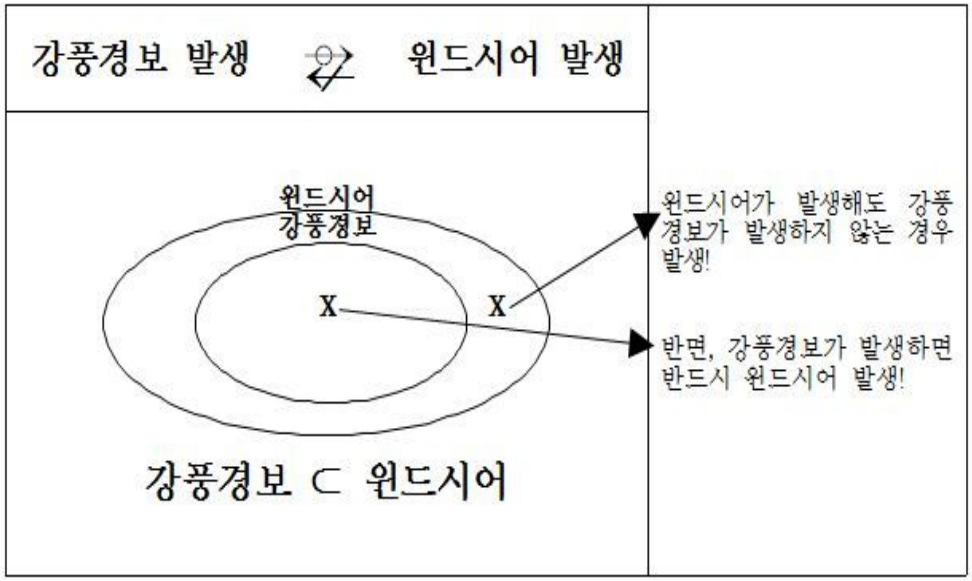


Fig. 33. Distribution of Windshear intensity by surface wind speed.

Windshear경보 강도 기준 15kt 이상인 자료(windshear 발생일을 대상으로 y축을 windshear 강도, x축을 지상풍속으로 표출)만을 조사하여 회귀분석 하였으며, X축은 지상풍속, Y축은 windshear 강도를 나타낸다. Windshear가 발생하는 경우만 조사했음에도 불구하고 강풍경보 기준인 25kt 보다 작은 경우에도 windshear가 발생하는 빈도가 더 많았고, 회귀분석 결과 상관계수가 0.1196으로 나타나 지상풍속과 windshear 강도는 거의 아무런 상관관계가 없음을 알게 되었다. 그러므로 windshear가 발생했다고 해서 반드시 강풍경보 기준이 되는 것은 아님을 알 수 있었다. 위의 두 가지 결과를 명제와 벤다이어그램으로 정리하면 다음과 같다.



위 결과에 따라 강풍경보가 발생하였을 때는 windshear가 반드시 발생하므로 강풍의 정량적 예측 가이던스를 제시하게 되면 업무의 효율성을 높이는 동시에 windshear 발생을 예상할 수 있어 안전한 항대기 이착륙에 상당히 기여할 수 있을 것이다.

제7절 대표적인 windshear 발생 유형 및 원인

전체 windshear 발생 중 기압유형별 비율을 살펴보면, cP확장형 16.8%, 고기압 주변 37.7%, 고기압 중심 9.7%, 저기압(강수) 30.8%를 차지해 고기압 주변과 강수를 동반한 저기압 유형에서 전체 windshear 발생의 95%를 차지하고 있음을 알 수 있다. 그밖에 장맛비, 저기압(무강수), 태풍 유형의 경우 모두 합하여 5%로 전체 windshear 발생 중 낮은 비율을 차지하였다. 따라서 본장에서는 cP확장을 포함한 고기압 주변과 고기압 중심에서의 windshear 발생 그리고 강수를 동반한 저기압 유형에서 발생한 windshear에 대한 원인에 대하여 집중 분석하였다.

1. cP확장형(2009. 01. 10.)

여수공항의 경우 cP확장형 기압유형에서는 85.7%의 windshear 발생확률을 보였다. 강풍 발생 시 windshear가 발생할 확률은 93.1%로 매우 높음을 알 수 있다. 강풍을 유발하는 cP확장 사례에 대한 메커니즘을 분석한 후 정량적인 강풍 예측기법을 제시하여 windshear 발생의 사전 예측성을 높이고자 하였다.

Windshear는 상층(300hPa)의 발산장 발생여부와 하층대기 trough형성의 유무 그리고 하층대기 강풍대(20kt)의 위치에 따라서 판단 할 수 있다[5]. 여기에서 착안하여 하층대기 trough가 형성 되면 대기가 수렴하게 되고 하층 기압계에서 관성작용에 의하여 등고도면이 조밀하게 되며, 지상풍향과 풍속과의 차이가 커지게 되어 windshear가 발생하게 된다. 또한 하층대기의 강풍대가 발생할 확률이 높아지는 동시에 상층에서는 하층의 대기가 상층으로 올라가 발산하게 되어[6] 발산대가 생기게 된다. 따라서 지형에 의한 하층대기 troug형성에 대하여 분석하는 동시에 하층대기 강풍대와 상층대기 발산역의 존재유무를 적절히 활용하여 windshear를 예측하는데 활용하면 된다. 2008년~2011년 5월 사이 겨울철 강풍 시 windshear 사례 114건을 검토한 결과 대부분 이 경우에 해당되었다.

하층대기에 trough가 발생하게 되면 한랭이류 또한 더욱 강해지는 동시에 등온선의 간격이 좁아진다. 즉, 경압성이 강해져 windshear 발생에 좋은 조건을 만들어

---

5) Aviation Weather Handbook(Terry T. Lankford, Page 23-7)참고

6) 대기는 비압축성 성질을 가진다는 가정하에 연속방정식($\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0$)을 만족한다. 이에따라 하층에 수렴대가 발생하면 상층에는 발산대가 형성 되는 것이다.

주는 것이다. 따라서 하층대기 trough형성의 유무, 상층대기 발산역 존재유무, 하층대기 강풍대 유무, 등온선의 조밀도 등이 중요한 예측변수로 작용하였다.

가. 하층대기(850hPa)의 trough형성

cP가 확장하여 서고동저형 기압계 유형을 가지게 되면 여수공항은 북서풍계 혹은 북풍계의 바람이 분다. 북서풍이나 북풍계열의 바람이 남으로 이동하면서 대부분 Fig. 34와 같은 유형을 가지면서 여수공항의 주변지형과 절대와도 법칙에 따라 trough가 남서로 사행되어 형성된다.

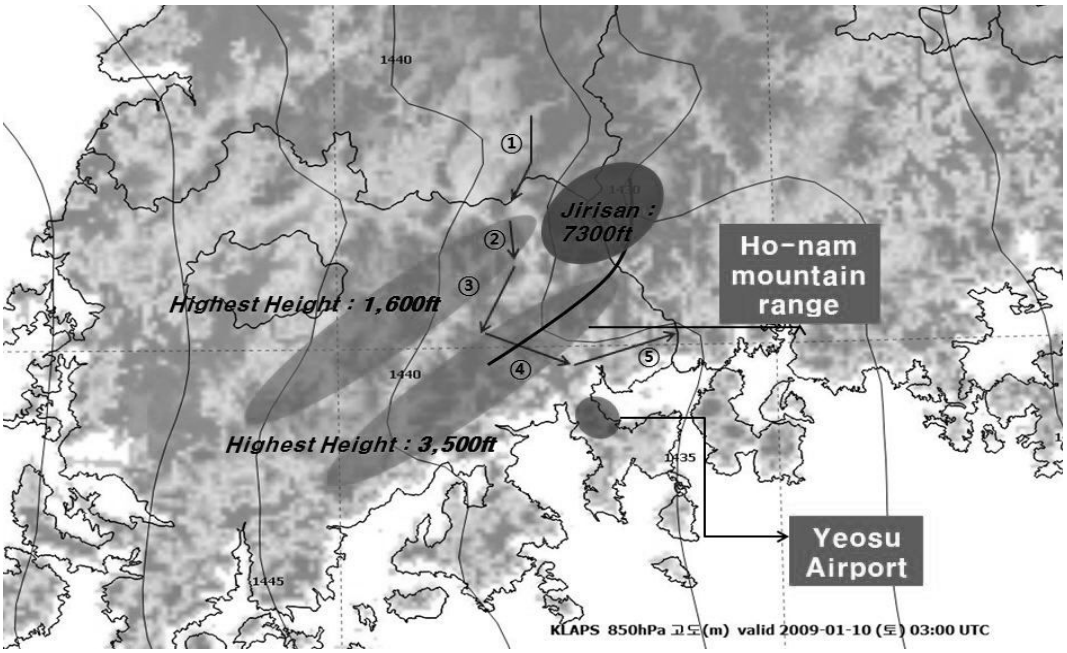


Fig. 34. Trough development case (2009. 01. 10. 03UTC).

북쪽에서 내려오던 바람은 산맥에 의해 흐름의 방해를 받게 되고 와도보존법칙에 의해 850hPa trough가 발생하게 된다. 단열과정(adiabatic process)에서 대기덩이는 자신의 수평면적(δA)과 절대소용돌이도($\zeta + f$)의 곱이 보존되는 운동을 하게 된다.<$\delta A(\zeta + f) = Const$> 즉, 지구와도[7]($f$)가 변화하지 않으면 수평면적($\delta A$)이 작

7) Colioli's parameter : $f = 2\Omega \sin\phi$(Ω = 지구자전각속도, ϕ = 위도)

아지게 되고 와도보존법칙에 의해 상대와도(ζ)는 커지게 되는 운동을 하는 것이다. 간단하게 생각하면 피겨스케이트 선수가 몸을 움츠려 회전속도를 빠르게 하는 원리와 같다. 이러한 원리를 이용하여 Fig. 34와 함께 각 번호 위치별 풍향이 어떻게 변화하여 trough형성이 발생하는지 Table 6으로 과정을 정리하였다.

Table 6. Mechanism of trough development in bottom atmosphere (850hPa).

$$\delta A(\zeta + f) = Const$$

위 치	풍 계	해 석
①	남 → 남서	대기괴는 산맥(지리산)을 만나기 직전 단열팽창되어 연직신장 현상이 발생하게 되고 수평면적(δA)은 작아지게 된다. 대기괴가 남쪽으로 이동하므로 대기괴의 지구와도(f)가 작아지게 된다. 대기괴는 절대와도를 보존하기 위하여 상대와도(ζ)가 높아져 저기압성 기류가 강해진다.
②	남서 → 남, 남동	대기괴는 산맥에 도달하게 되고 대기괴의 지구와도(f)는 계속 작아진다. 이에 대기괴가 연직수축되면서 대기괴의 수평면적(δA)은 커지게 된다. 대기괴는 절대와도를 보존하기 위하여 상대와도(ζ)가 낮아져 고기압성 기류가 강해진다.
③	남, 남동 → 남서	남에서 남동으로 이동하던 대기괴는 다시 더 높은 산맥(소백산맥 지류)에 도달하게 되고 대기괴의 지구와도(f)는 계속 낮아지다. 동시에 대기괴는 연직신장되어 수평면적(δA)이 작아지게 되고 절대와도를 보존하기 위하여 대기괴의 상대와도(ζ)는 다시 높아진다. 이런 과정에서 대기괴의 저기압성 기류가 강해진다.
④	남서 → 동	남서로 이동하던 대기괴는 다시 산맥(호남정맥)에 도달하게 되고 대기괴의 지구와도(f)는 계속 낮아지고 대기괴가 연직수축되면서 수평면적(δA)은 커진다. 대기괴는 절대와도를 보존하기 위하여 상대와도(ζ)가 낮아져 고기압성 기류가 강해진다.
⑤	동 → 북동	동으로 이동한 대기괴는 평지에 도달한다. 이에 대기괴의 지구와도(f)는 보존되며 다시 대기괴는 연직신장되어 수평면적(δA)이 작아진다. 대기괴는 절대와도를 보존하기 위하여 상대와도가(ζ)가 커지며 저기압성 기류가 강해진다.

위 메커니즘에 의해 풍계가 두 번 꺾이면서 남서쪽으로 trough축이 사행되어 나타나게 된다. 따라서 기압경도 및 온도경도가 더욱 강해져 windshear가 발생할 더 좋은 조건이 발생하게 된다.

나. 상층(300hPa) 발산역과 850hPa 등풍속선(20kt)

Trough가 침투하게 되면 그에 상응한 타 기상요소의 특징도 두드러지게 나타나게 된다. 하층대기에서 대기가 수렴함에 따라 상층에서는 발산이 나타나게 된다. 300hPa 발산장을 통하여 trough 형성에 의한 저기압 강도를 측정할 수 있다. 등온선이 조밀해지면 하층대기의 한랭이류는 가속화된다. 또한, 지상과 하층대기간의 온도경도가 강해져 풍속이 증가하고 windshear가 강해진다. 또한, 300hPa 발산장, 등온선의 조밀도, 850hPa 강풍대(20kt 이상)의 위치 등을 통하여 windshear 발생을 가늠해 볼 수 있다.

Fig. 35는 cP확장형에서의 windshear 발생사례를 웹기반기상분석시스템을 통하여 구현한 것이다.

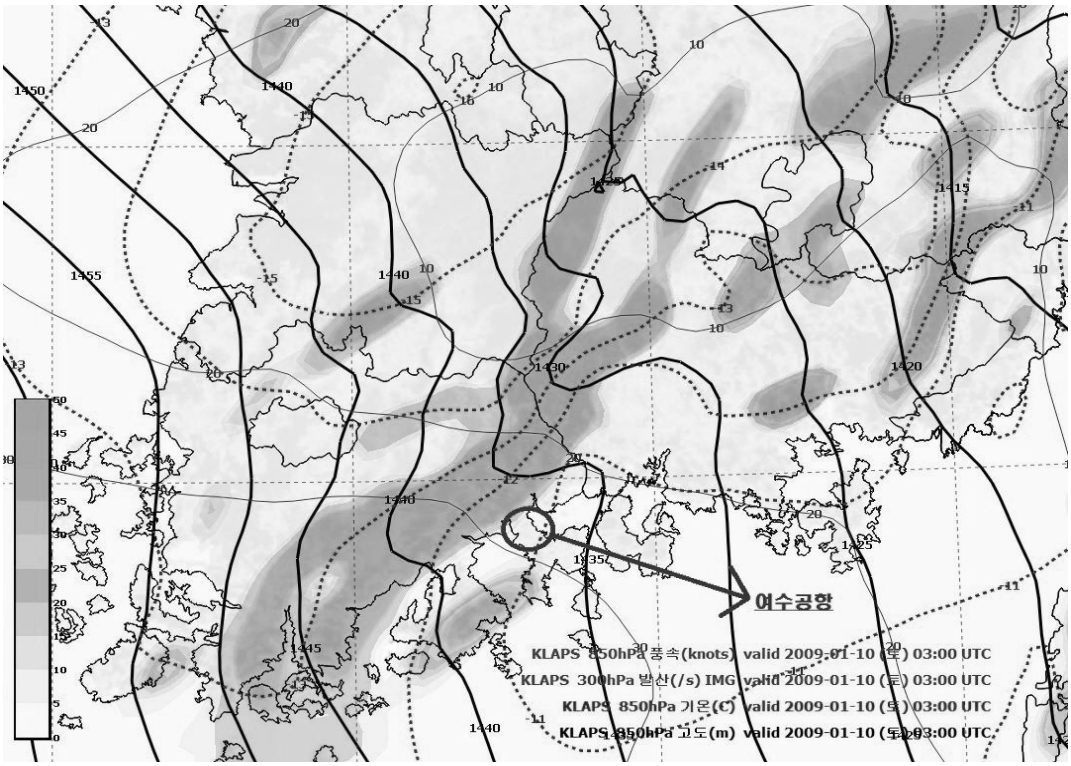


Fig. 35. Example of windshear forecast procedure (2009. 01. 10. 03UTC).

굵은 실선은 등고선, 파선은 등온선, 이미지 음영은 상층대기 발산역, 가는 실선

은 강풍대를 나타낸다. Trough가 있는 곳을 중심으로 등온선이 조밀하여 한랭이류가 강함을 알 수 있고 상층대기(300hPa) 발산역이 뚜렷히 나타나는 것으로 보아 trough가 강하게 형성되었음을 알 수 있다. 또한 850hPa의 20kt 이상 구역에도 속하여 windshear가 발생할 가능성이 클 수 있음을 방증하며 이러한 windshear 예측 Procedure를 웹기반기상분석시스템의 예측장에서 구성하여 windshear 경보 발표에 활용하여야 한다. 실제로 이날은 03UTC에 windshear가 발생하였다.

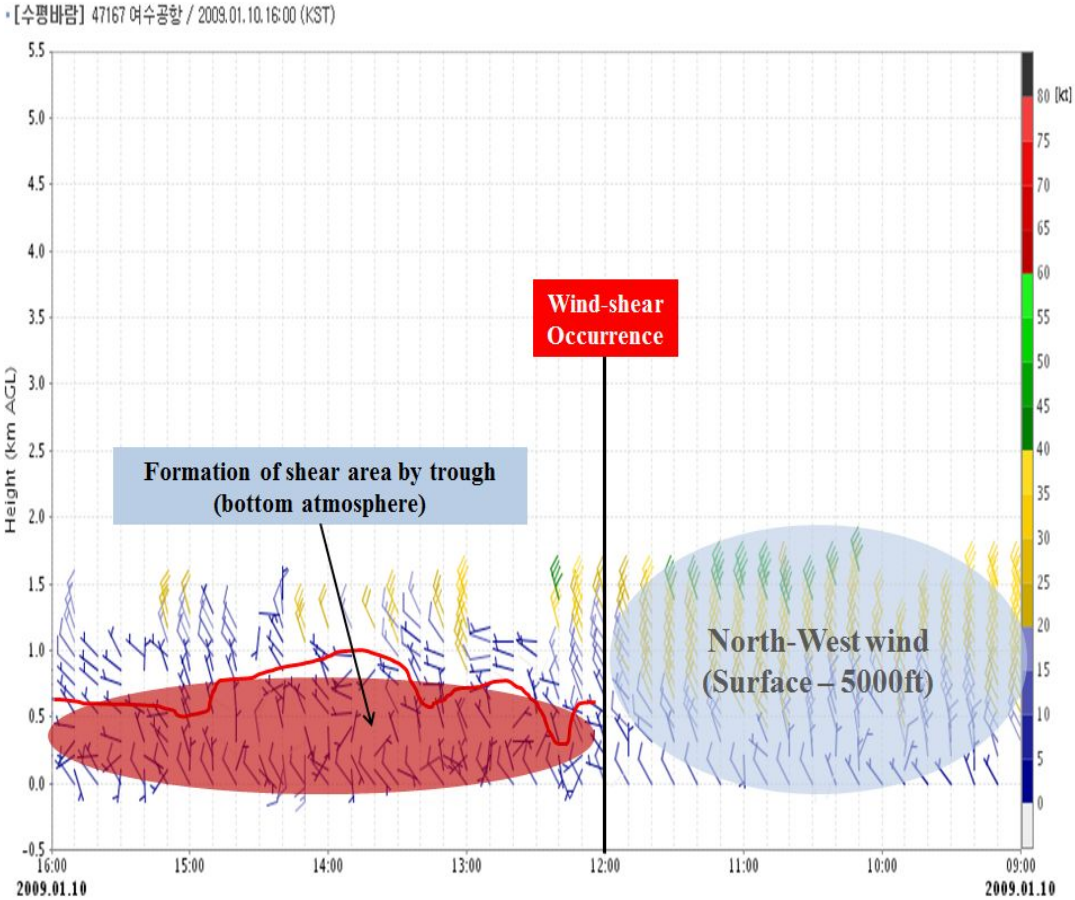


Fig. 36. Case of cP Expansion – Wind Profiler Observation (2009. 01. 10.).

Windprofiler 관측자료(Fig. 36)를 살펴보면 03UTC(12KST)전에는 지상~5000ft (1.5km) 간 풍향이 북서계열로 거의 일정하지만 03UTC(12KST)에 약 1500ft(500m)를 기준으로 하층대기의 trough형성으로 인해 북서계열로 일정했던 풍계가 일정하지 않

게 되고 그 결과 하층에서 풍향 시어역이 발생 하는 것을 확인할 수 있다.

앞에서 살펴본 바와 같이 소백산맥 및 호남정맥에 의해서 발생한 windshear 뿐만 아니라 여수공항 주변으로 동쪽에는 광양만, 서쪽과 남서쪽에는 호남정맥의 끝자락 지류의 낮은 산과 구릉(간리봉 310m, 황새봉 346m, 가마봉 367m)들이 위치하고 있어 windshear를 강화 시키는 역할을 할 것으로 판단된다.

따라서 cP확장형 기압유형에서는 windshear 발생여부를 판단할 때에는 850hPa trough 형성, 300hPa 고도에서의 발산역 존재여부, 850hPa 고도에서의 20kt 이상 풍속선의 위치를 고려하여야 한다.

2. 고기압 주변형(강, 중, 약)

한반도가 고기압 주변에 위치하고 있을 때(기압경도 강, 중, 약의 경우) windshear가 발생한 확률은 앞에서 보았던 바와 같이 약 절반(51.6%)의 확률을 보였다. 고기압 주변의 경우 중층대기의 Blocking 작용으로 인한 하층 기압경도 강화가 가장 큰 요인으로 분석되었다.

가. 오메가형 Blocking 작용에 의한 windshear 발생사례(2008. 01. 15.) - Fig. 37

중층 대기인 700 hPa 일기도를 보면 일본 홋카이도 및 사할린 주변에서의 오메가형 Blocking이 동서류의 흐름을 방해하게 되고 결과적으로 하층과의 바람변화경향을 크게 만든다. 중층대기 골 후면에 한반도가 위치하게 됨에 따라 지상에는 고기압이 발달하게 되지만 중층의 동서류 방향의 흐름이 오메가형 블로킹에 의해 저지됨에 따라 동으로 진행되는 하층 대기의 고기압이 결과적으로 기압경도가 높아지면서 중국 화북 및 화남지방에 중심이 위치하게 되어 고기압이 변질된다. 그러나 기압골 축의 이동이 빨라 북동에서의 저기압 발달은 저지되어 고-저기압의 충돌로 인한 windshear 발달요소는 상대적으로 작게 나타났다. 동시에 풍속이 강해지며 한랭이류도 강해져 온도풍이 강해져 thermal wind-shear(열 windshear)가 발생되고 결과적으로 하층대기에서 windshear가 관측된다.

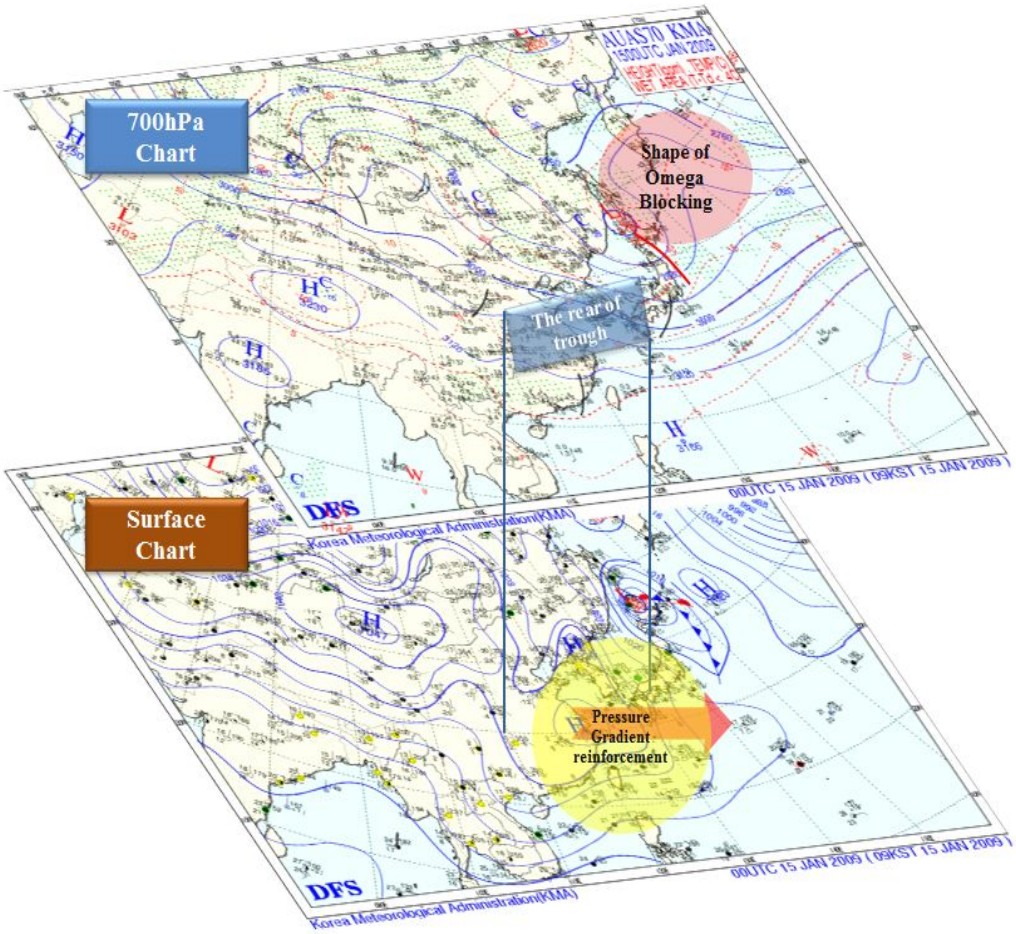


Fig. 37. Case of transmutation cP extension (2008. 01. 15. 09KST).

나. Rex형Blocking 작용에 의한 windshear 발생사례(2010. 02. 04.) - Fig. 38

오메가형 Blocking과는 달리 렉스형 Blocking에서 windshear가 발생한 사례(Fig. 38)이다. 중층에서의 trough 이동이 동해북부해상에서 정체하면서 저기압이 발달하는 반면, trough 후면에 위치한 한반도에는 상대적으로 고기압이 발달하게 되어 기압경도가 강화되고 시어역이 발생한다. 또한, 기압계의 진행속도가 오메가형 일 때보다 렉스형일 때 더 느리게 이동함을 알 수 있었다.

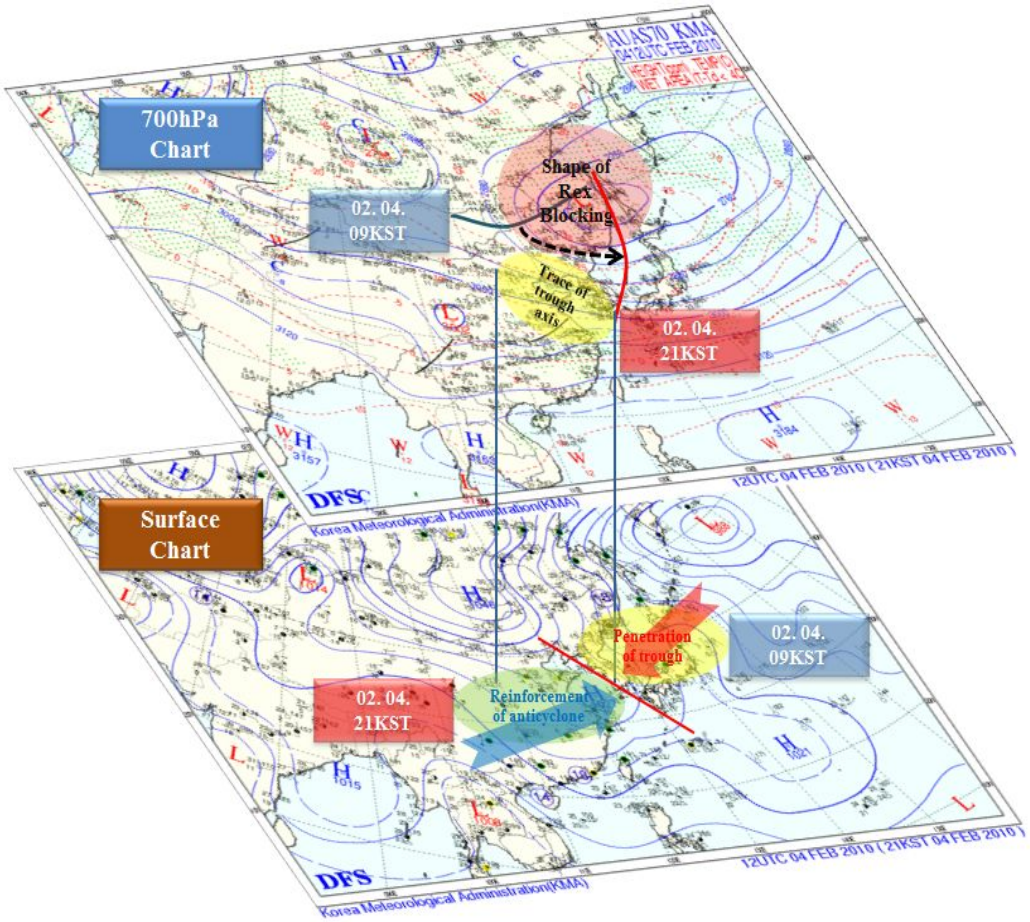


Fig. 38. Case of N-E trough extension (2010. 02. 04. 09KST, 21KST).

3. 해풍유입형 (2009. 05. 05.)

Fig. 39는 해풍의 모형을 설명한 것이다.

1. 일출 후 지표와 해수면의 비열차이로 인하여 지표의 온도가 해수면보다 빨리 상승하게 되어 상대적으로 지표에서의 대류가 활발하게 나타나 대기가 상층으로 올라가게 되고 지표에서는 저기압이 발달하게 된다.

2. 지표에서의 대기가 상대적으로 없어지게 되므로 유체의 비압축성 연속방정식에 의하여 해수면에 있는 대기가 지표면으로 이동하게 된다.(**해풍발생 -> 순간적 한랭이류 발생**)

3. 해수면에서 지표쪽으로 부는 바람(해풍)은 온도가 상대적으로 낮은 동시에 밀

도가 높고 지표에 있는 대기는 온도가 상대적으로 높은 동시에 밀도가 낮다. 이렇게 성질이 다른 대기괴가 만나게 되면 높은밀도와 낮은온도의 해풍이 지표면의 대기 밑으로 침투하게 되고 지표에서는 해풍이 부는 동시에 지표의 가열로 인해 상대적으로 높은 대기괴가 상승류와 만나 상공으로 올라가게 된다.**(수렴역 발달 - 지표면 상승류 발생)**

4. 이렇게 지표면에서 상승한 대기는 500-1,500m의 높이에서 쌓이게 되고 고기압성 기류가 발생하게 된다.

5. 500-1,500m 고도에서의 대기기는 고기압성 기류이므로 저기압으로 흐르게 된다.(지표→해수면) 그러므로 500-1,500m높이에서는 상대적으로 높은 대기가 해수면 쪽으로 이동하여 온난이류가 발생하게 된다.**(500-1,500m 온난이류 발생)**

6. 이렇게 해수면 쪽에 쌓인 대기(500-1,500m)는 점차 온도가 낮아지게 되고 밀도가 높아짐에 따라 해수면 지표에 가라앉게 된다.

7. 해수면 상공에서 가라앉은 대기괴로 인하여 해수면에서는 고기압이 점차 발달하게 되며 지표면에는 저기압 해수면에는 고기압이 발달하게 되어 이러한 순환이 반복된다.

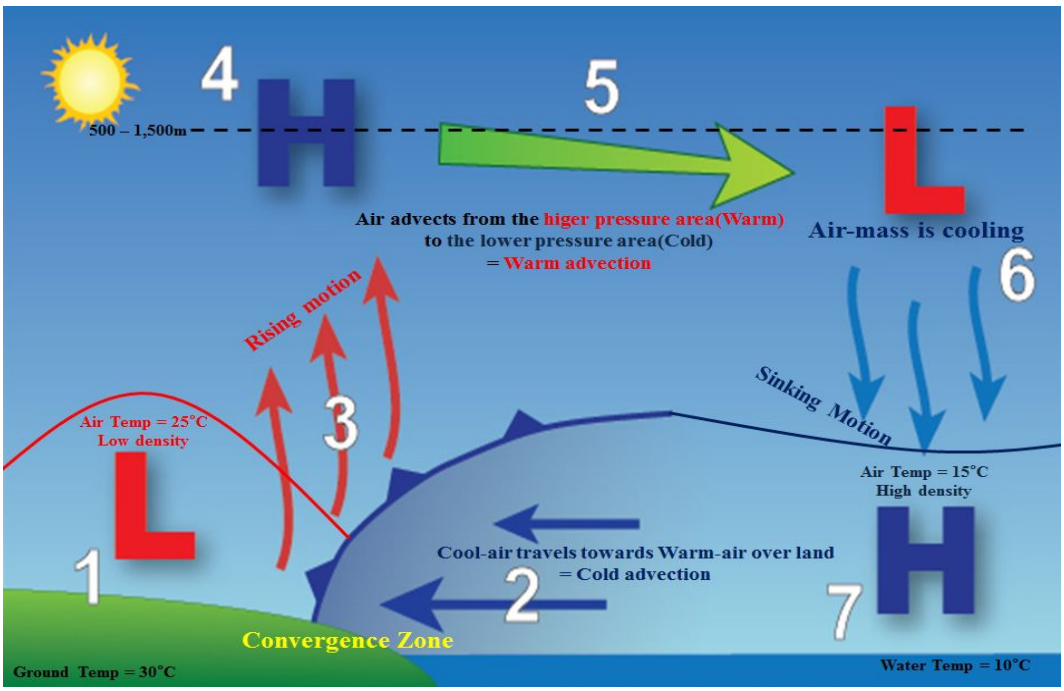


Fig. 39. Formation of See-breeze.[8)]

8) Extract from NWS - Jetstream Online School for Weather.

여수공항의 경우 고기압 주변(약)이거나 고기압 중심일 때 약 33%의 windshear 발생 확률을 보였으며, 대부분 해풍 유입에 의한 것이었다. 해풍유입은 하층대기(500-1,500m)의 갑작스러운 시어역을 형성하는 좋은 조건을 만들게 된다.[9] 기압경도력이 약하면 종관풍 보다는 국지풍의 영향을 더 받게 됨으로 고해상도의 모델자료가 요구되지만 여기에서는 모델 대신에 windprofiler 관측자료를 활용하여 windshear 발생특징을 분석해 보았다.

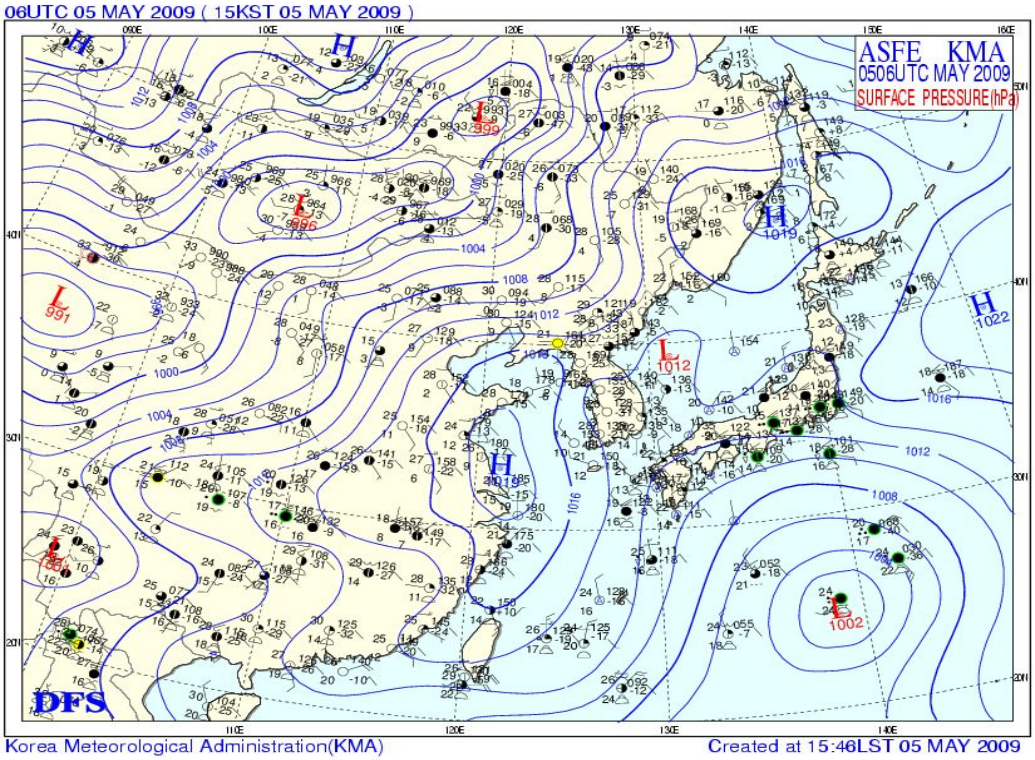


Fig. 40. Case of See breeze penetration - Surface Chart (2009. 05. 05. 15KST).

2009년 5월 5일 일기도(Fig. 40)를 살펴보면 고기압 주변에 위치하면서 기압경도는 약한 모습을 보이고 있다.

9) Aviation Weather Handbook(Terry T. Lankford : 23-1)

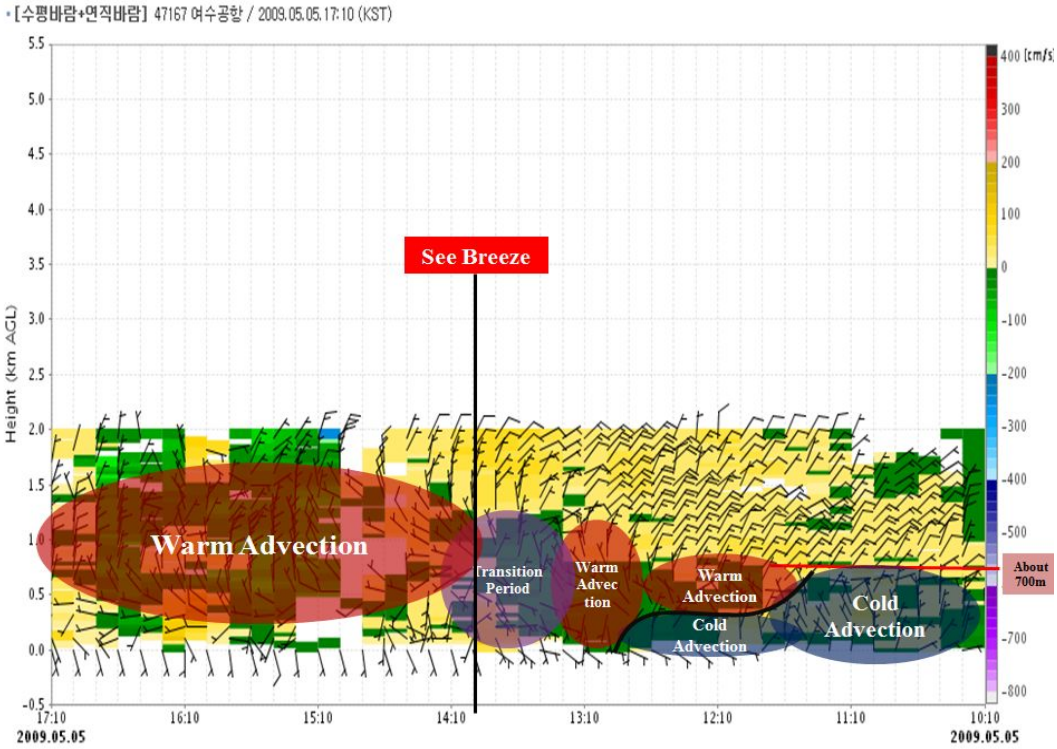


Fig. 41. Case of Anticyclone Border(WEK) & Anticyclone Center - Wind Profiler Observation (2009. 05. 05.)

동일 시각 windprofiler 관측자료(Fig. 41)를 살펴보면, 오전에 지표에서 약 700m 고도 사이에서 바람이 Backing하면서 한랭이류가 발생되고, 한랭이류의 고도가 점차 낮아지면서 그 위층에서는 온난이류가 발생하면서 시간이 갈수록 온난이류층이 하층까지 확대되었다. 그 후 Backing과 Veering이 번갈아가면서 나타나다가 약 500m이상 고도에서 완전히 온난이류역이 존재한다. 따라서 14시 이후에는 바람의 형태가 해풍으로 변화되는 사실을 확인 할 수 있다.

이렇게 기압경도가 약한 경우이거나 고기압 중심에 위치할 때는 windprofiler 관측자료를 이용하여 해풍의 유입과정을 파악하고 통계적 windshear 발생 확률을 고려하고 windshear의 발생여부를 예측하는 것이 좋다.

4. 저기압형

저기압에 의한 여수공항의 windshear 발생은 강수현상을 동반하는 경우 57.9%, 무강수시 48.1%로 강수현상이 있을 때 windshear 발생 확률이 높게 나타났다.

2009년 5월 16일의 경우는 강수현상을 동반한 저기압이 여수공항을 통과하면서 windshear가 발생하였던 대표적인 사례로써 여수공항에 windshear가 발생할 확률이 높은 조건은 첫째 Fig. 42와 같이 지상일기도 상에서 한랭전선과 온난전선이 한반도에 위치하여야 하며 둘째 Fig. 43과 같이 500 hPa 일기도에서 trough 전면에 놓여야 한다. 셋째 Fig. 44와 같이 저기압 중심부가 여수공항을 기준으로 북동이나 북서에 위치하여야 한다.

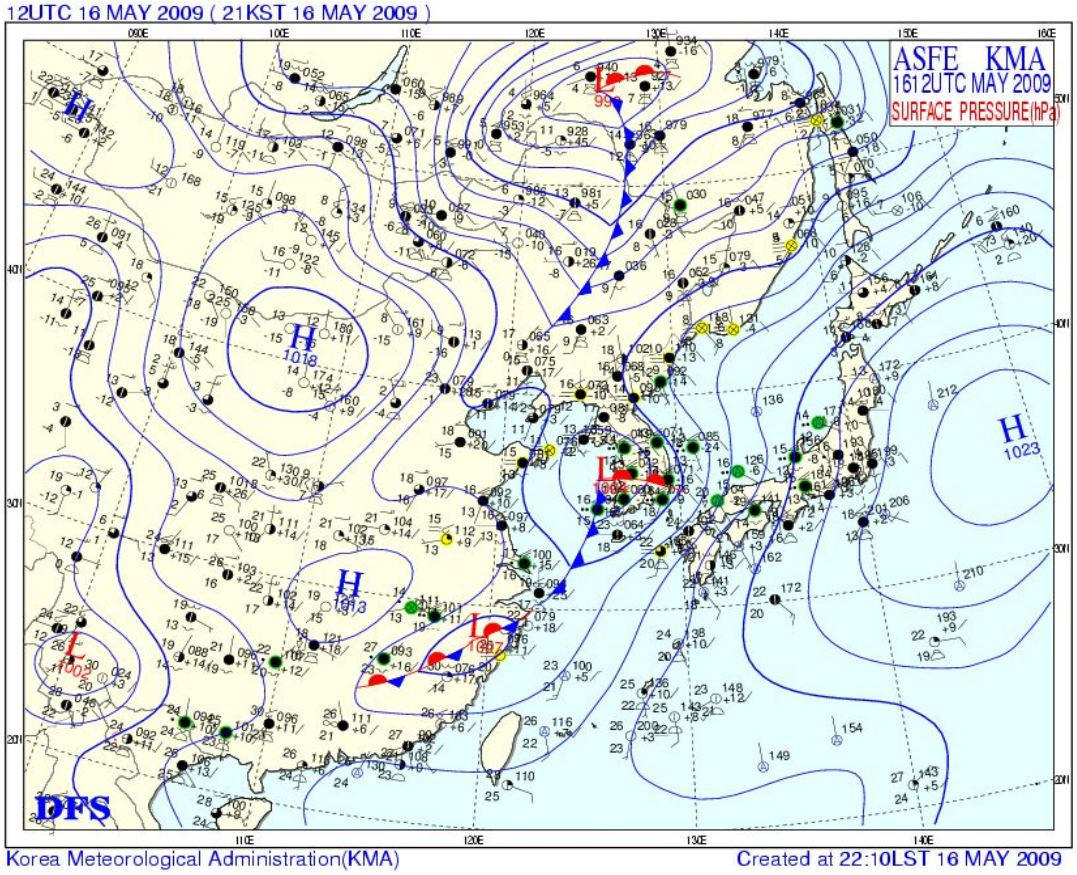


Fig. 42, Identify of frontogenetic region (Surface).

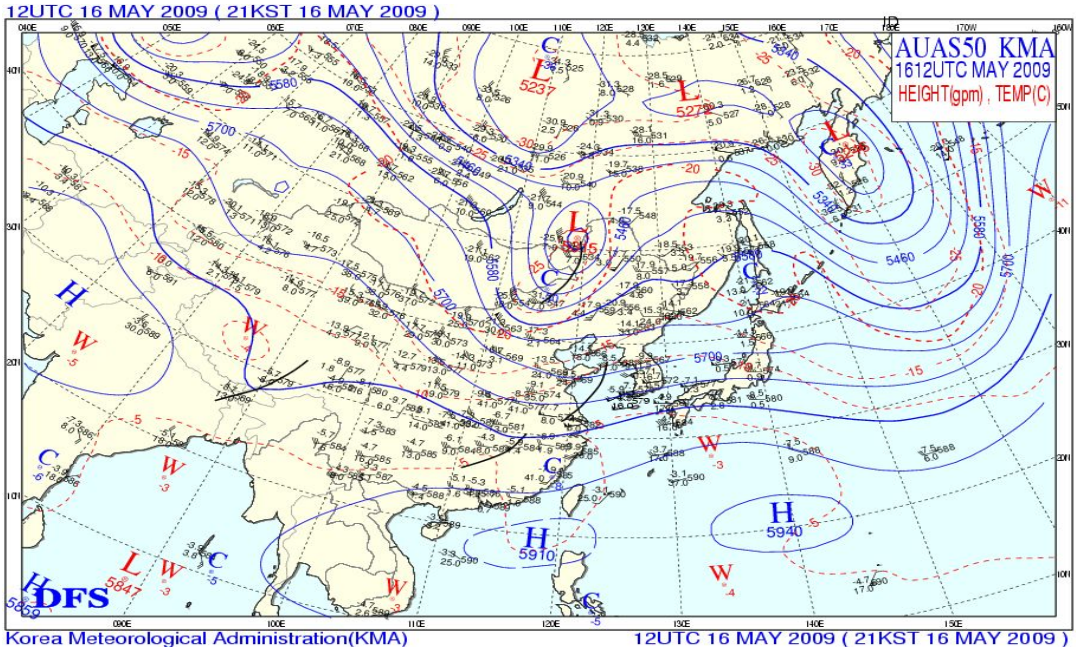


Fig. 43 Identify of reinforce cyclone(trough) & Cold advection (Mid Atmosphere) by 500hPa Chart.

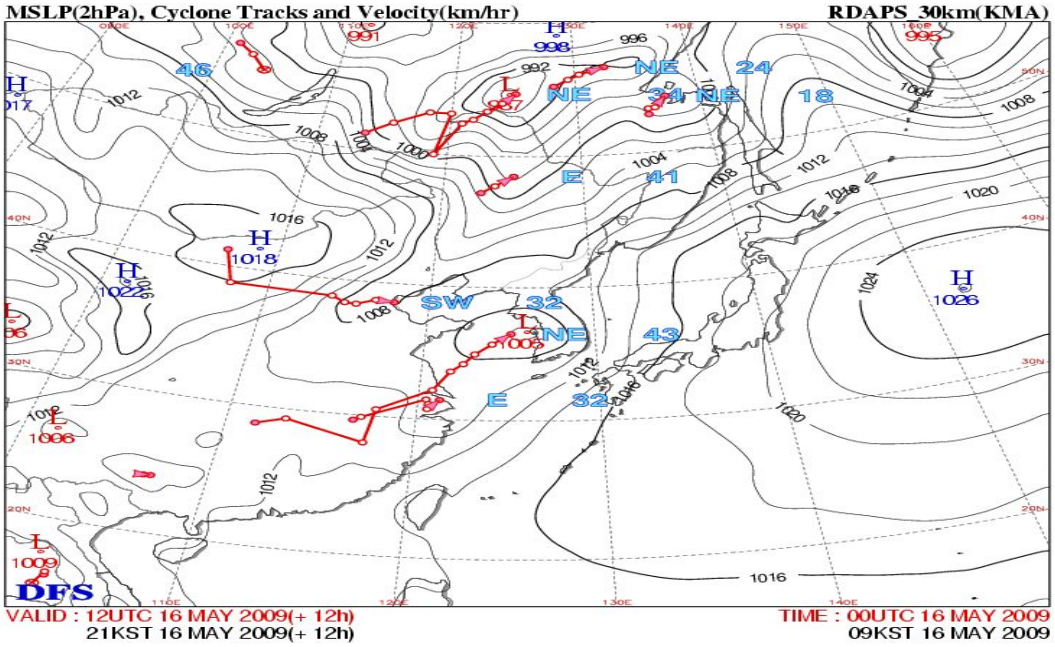


Fig. 44. Identify of Suface Cyclone trace.

Fig. 45, 46은 우리나라 기상청에서 windprofiler 관측자료를 이용하여 분석한 연직시어 자료이다. 온난전선이 통과하는 경우(Fig. 45) 시간이 경과함에 따라 0.5-1 km 영역에서 강한 시어역(빨간색)이 지표면으로 내려오는 경향을 보이며 바람이 동풍에서 남풍, 남풍에서 남서풍으로 변화하면서 전형적인 온난전선 접근형태를 보였다. 0.5 km이상 고도에서는 풍향의 변화가 없이 거의 일정하여 0.5 km 이하의 고도에서 시어역이 발생하고 있음을 알 수 있다.

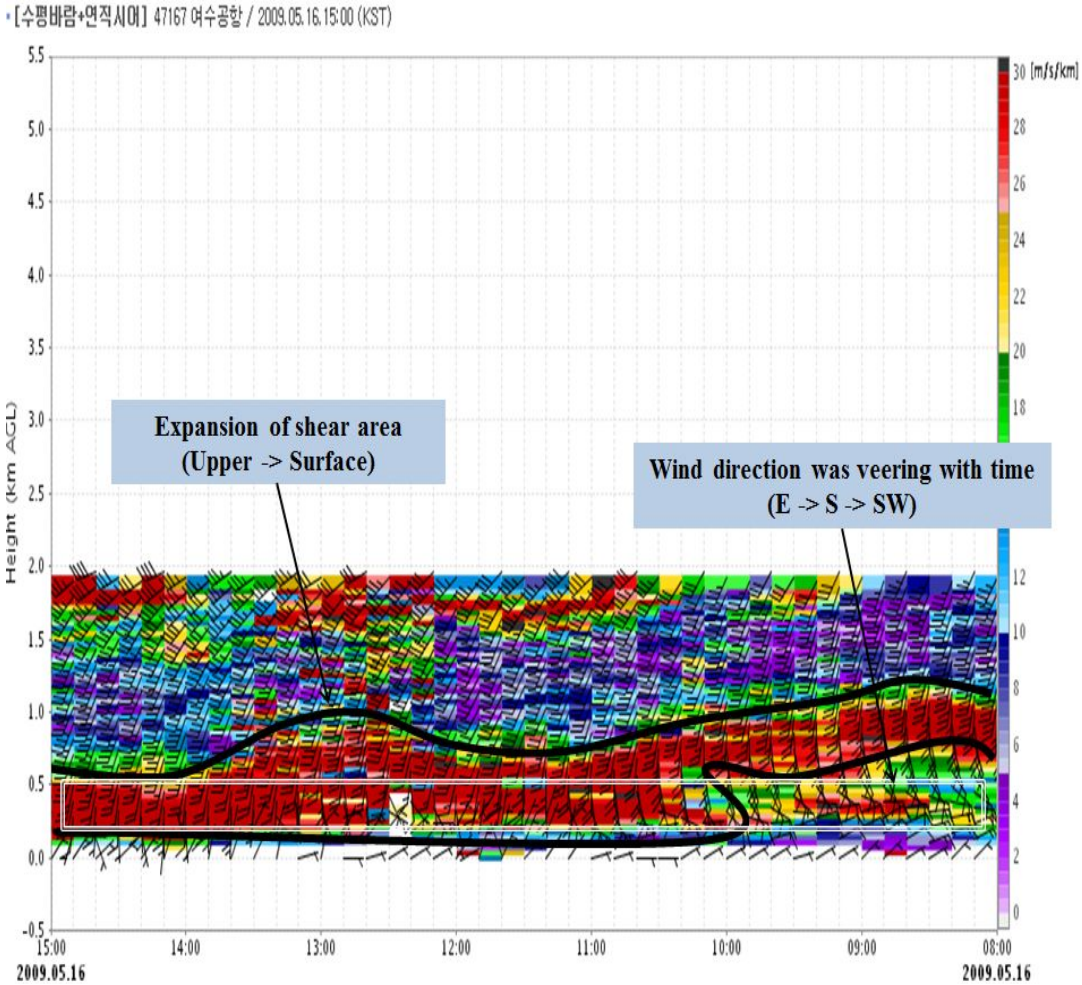


Fig. 45. Case of Warm front - Windprofiler Observation (2009. 05. 16.).

한랭전선이 통과하는 경우(Fig. 46) 시간이 경과함에 바람이 남서풍에서 서풍, 서풍에서 북서풍으로 변화하면서 한랭전선이 통과하는 형태를 보였다. 그리고 남서풍에서 서풍으로 바람이 변화 할 때보다 서풍에서 북서풍으로 변화할 때 강한 시

어역이 존재함을 알 수 있다.

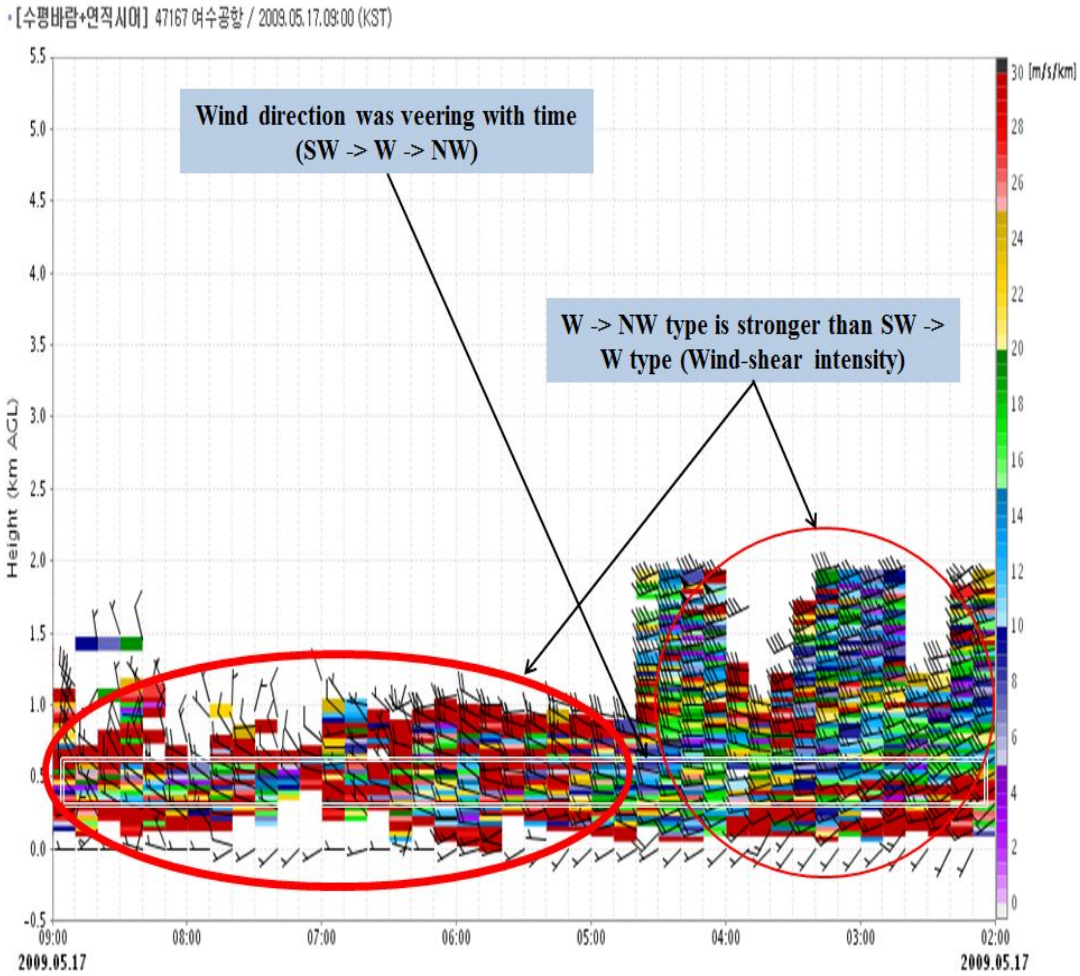


Fig. 46. Case of Cold front - Windprofiler Observation (2009. 05. 17.).

따라서 windprofiler 연직시어 자료에서 시어역과 풍향의 변화를 고려하여 windshear 발생 가능성을 예측할 수 있다.

또한 저기압의 중심부 위치에 따른 windshear 발생확률을 Table 7과 같이 분석한 결과 여수공항을 기준으로 저기압의 중심부 위치가 북동쪽(88.9 %)이나 북서쪽(87.0 %)에 위치할 때 windshear 발생확률이 매우 높았다.

Table 7. Probability of Windshear (Cyclone) - Detailed Statistics data.

Core state \ Frequency		occurrence days	Windshear occurrence days	Windshear Probability(%)
Cyclone(no rain)		27	13	48.1
Cyclone(rain)	S	26	14	53.8
	SE	28	13	46.4
	SW	70	38	54.3
	N	5	3	60.0
	NE	27	24	**88.9**
	NW	23	20	**87.0**
	W	26	19	73.1
	Boundary	**156**	**78**	50.0

제5장 결론

여수공항에서 발생하는 windshear의 발생 및 통계적 특성을 파악하기 위해서 windprofiler 관측자료, 각종 예보장 및 분석장을 이용하였다. 이를 통하여 계절, 기압유형 및 강풍유무별 windshear 발생 메커니즘, 통계적 특성을 파악하였다. 또한 동일한 windprofiler 관측장비를 보유한 울산공항과 김해공항의 windshear 발생일을 비교 분석하였다. 마지막으로 계절별, 기압유형 및 강풍유무별 요소별 통계적 확률값을 조사하여 그 특징을 분석하였다.

여수공항은 상대적으로 타 공항(울산의 2.54배, 김해의 1.08배)에 비하여 많은 windshear가 발생하였다. 이는 계절별 windshear 발생이 지형적인 요소 및 기후적 특성에 따라 발생빈도가 다르게 나타나는 것을 의미한다.

계절별 windshear 발생은 봄(32.4%)과 겨울(31.3%)에 집중적으로 발생하였으며, 특히 3월(27.8일)과 1월(24.3일)의 windshear 발생 분포가 가장 높았다. 그 원인으로는 강한 북서풍에 의한 강풍과 소백산맥 및 지류인 호남정맥의 지형적 영향으로 하층 대기의 trough확장이 가장 큰 역할을 하였다.

여수공항의 windshear 발생빈도를 cP확장형, 고기압 주변(기압경도 강, 중, 약), 고기압 중심, 저기압(무강수), 저기압(강수), 장맛비, 태풍 등 기압유형별 9가지로 분류하였다. 기압유형별 windshear의 발생빈도 총679회 중에서 cP확장을 포함한 고기압 주변(기압경도 강, 중, 약)일 경우 370회(54.5%), 강수를 동반한 저기압유형일 경우 209회(30.8%)로 windshear 발생빈도가 많았으며, windshear 발생확률은 태풍(100%), cP확장형(85.7%)이 가장 높게 나타났다. 따라서 여수공항에서의 windshear를 발생시키는 대표적 기압유형은 고기압 확장과 저기압(강수)이 통과할 경우이다.

기압유형별로 windshear를 발생시키는 주요 기상 예측인자는 cP확장형의 경우 지형적 효과로 인한 850hPa trough강화, 고기압 주변에 위치할 경우(기압경도 강, 중) 850hPa 기압경도 강화(Blocking 작용), 고기압 주변(기압경도 약) 및 고기압 중심에 위치할 경우 해풍유입에 의한 하층에서의 시어역 강화, 장맛비 현상이 나타날 때는 여수공항 상공에서의 정체전선 남북진동 여부(남북진동이 나타날 경우 윈드시어 발생확률 증가)이다. 한편, 저기압의 영향을 받을 때는 전선의 발달 및 강수

여부, 500hPa에서의 한랭이류와 trough 전면 위치여부 등 다양한 기상 예측 인자가 복합적으로 작용하므로 저기압 중심의 위치(여수공항 기준)에 따른 windshear 발생의 통계적 확률(북동쪽 위치 88.9%, 북서쪽 위치 87%)을 고려하여 windshear 발생 예측을 하는 것이 좋다.

여수공항의 활주로 방향별 windshear 발생빈도를 비교해 본 결과, 활주로 35방향이 17방향보다 2.1배 더 자주 발생하였으며, 모든 기압유형에서 활주로 35방향에서 windshear가 자주 발생함을 알 수 있었다.

강풍이(10분 평균풍속 20kt이상)이 발생하면 93%의 확률로 windshear가 발생하였으며, 강풍경보 기준인 10분 평균풍속 25kt이상이 관측될 경우 windshear는 100% 발생하는 특성을 가졌다. 강풍경보 기준에 도달하게 되면 windshear는 반드시 발생 하였지만 windshear가 발생한다고 강풍경보 기준에 도달하는 것은 아니었다.

결론적으로 windshear 발생 가능성 예측은 먼저 기압유형을 파악하고 windshear 발생의 통계적 확률을 고려한 후, 각 기압유형별 주요 기상 예측인자를 종합적으로 적용하여 예보관이 의사를 결정하는 과정으로 수행하는 것이 가장 효율적일 것이다.

참고문헌

강혜영, 이호용, 주순영, 안기창, 원혜영, 최영진, 박정규, 2010, 인천공항 LLWAS를 활용한 저층윈드시어 연구. 한국기상학회, 1(1), 258-259.

교통안전공단, 1994, Windshear의 경계와 회피. 교통안전공단, 12pp.

국립기상연구소, 항공기상청, 2009, LLWAS를 활용한 저층 윈드시어 연구. 국립기상연구소, 88pp.

기상청(박남철, 허복행, 이진아, 유동봉), 2006, 윈드프로파일러를 이용한 기상현상의 관측과 분석. 서울 기상청, 66pp.

기상청(조주영, 허복행, 김재영, 이진아), 2005, 수직측풍장비 운영 매뉴얼. 기상청 관측담당관실, 131pp.

김백조, 이성로, 박길운, 2009, 한반도 남서지역에서 발생된 강풍의 원인별 특성분석. 한국방재학회, 9(4), 37-44.

김상룡, 2011, LLWAS를 활용한 인천국제공항 저층 윈드시어에 관한 연구. 공주대학교 대학원 석사학위논문, 1(1), 50pp.

김영섭, 김경익, 하경자, 엄향희, 2003, 대기역학 엣센스. 시그마프레스(주), 27-29.

손대성, 2005, 윈드프로파일러를 이용한 바람시어탐지에 관한 연구. 국민대학교 산업기술대학원 석사학위논문, 1(1), 7-19.

한국공항공사, 2013, 한국공항공사 항공통계 결항통계. 한국공항공사, http://www.airport.co.kr.

항공기상청, 2010, 그림으로 쉽게 이해하고 활용하는 항공기상장비 운영 기술노트. 항공기상청, 31-90.

항공기상청, 2008, 항공기상 업무지침(제 7차 개정판). 항공기상청, 25-27.

항공기상청, 2011, 2011 항공기상 현업연구. 항공기상청, 192-203.

홍근도, 2006, 제주국제공항에 발생하는 저층윈드쉬어에 관한 연구. 제주대학교 산업대학원 석사학위논문?, 1(1), 48pp.

홍성길, 1995, 기상분석과 일기예보. 교학연구사, 97-101.

Hans A. Panofsky, Glenn W. Brier, 1968, Some Applications of Statistics to Meteorology. University Park, Pennsylvania, 1-30.

Howard B. Bluestein, 1992, Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes (Volume I). Oxpord University Press, 153-270.

ICAO, 2005, ICAO Manual on Low-level Wind Shear(Doc 9817) AN/449. ICAO, 213pp.

ICAO, 2011, Meteorological Service For International Air Navigation Annex3(75th Edition). ICAO, 88-89.

James R. Holton, 2004, An Introduction to Dynamic Meteorology(4th Edition). Elsevier Academic Press, 86-107.

John E. Simpson, 1994, Sea breeze and local winds. Cambridge University Press, 234pp.

Seymour L. Hess, 1959, Introduction to Theoretical Meteorology. Henry Hold and Company, New York, 241-247

Terry T. Lankford, 2001, Aviation Weather Handbook. McGraw-Hill, 23-1 - 23-9