

바람시어 경보 발표를 위한 가이드스 개발

구대영, 박종수, 강혜영, 박한나, 신서용

제주공항기상대

1. 서론

최근 항공기 결항에 영향을 미치는 요소를 보면 기상으로 인한 결항률이 높은 실정이다. 물론 안개 및 강풍에 인한 요소도 있지만 최근에는 바람시어에 의한 요인이 크게 주목받고 있다. 이에 제주공항에서는 바람시어 관측 장비인 LLAWS를 설치, 운영하고 있으며 지상 30~40m 상공의 지점별 풍향풍속을 비교, 분석하여 공항 주변 저층바람시어의 발생 유무와 발생강도 및 위치를 경보하고 있다. 이에 예보사들은 LLAWS 장비를 활용하여 현재 바람시어 경보를 발표하고 있으나 그 위험성이 차지하는 비중에 비하여 예보사의 경험에 의존하여 발표해야 하는 어려움이 있다. 특히 제주공항에서 발생하는 바람시어는 기상학적 요인에 지형적 요인이 결합되면서 계절별로 다른 발생특성을 보이는데 특히 풍향에 따라 발생특성이 다르다. 그리고 풍속에 따라 발생강도도 다르게 나타나며 같은 풍향에서도 발생유무가 다르게 나타난다. 북서풍 및 태풍은 현재 바람시어에 대한 피해 사례가 거의 없고 예측이 가능한 반면에 남풍류로 인한 수렴 및 주풍으로 인하여 나타나는 바람시어의 경우는 위의 사례와는 달리 예측이 매우 어려울 뿐만 아니라 한 번 발생하면 그 강도가 매우 강하고 발생빈도 또한 높다.

따라서 본 연구에서는 제주공항 바람시어 발생일을 기압패턴별로 분류하여 남풍류에 대해서 수렴현상이 일어나는 경우와 주풍으로 유입하여 발생하는 경우를 다른 관측지점과 비교 분석하여 바람시어경보 발표에 활용할 수 있는 예보가이드스를 정략적으로 제시하고자 한다(그림 1).



[그림 1] 바람시어 발생 모식도

2. 본론

2.1 지형분석 및 자료선정

2.1.1 지형분석

[그림 2]은 제주공항의 지형도를 모식화한 그림이다. 제주공항 좌표는 33°30'44"N, 126°29'34"E 해발고도 36.0m로 제주도 북쪽 제주도 서부 해안가에 위치하고 있다. 또한 해발 1,950m의 한라산과 기생화산(대략 직경 1km미만의 표고 200~300m인 봉우리로 "오름, 약, 봉"이라 불림)이 산 정상에서 해안까지 분포되어 있으며 특히 해발 600m이하의 고도에 약 80%가 골고루 산재되어 있어 하층바람에 영향을 주는 지형적인 특성을 가지고 있다.



[그림 2] 제주공항의 지형도

2.1.2 조사자료

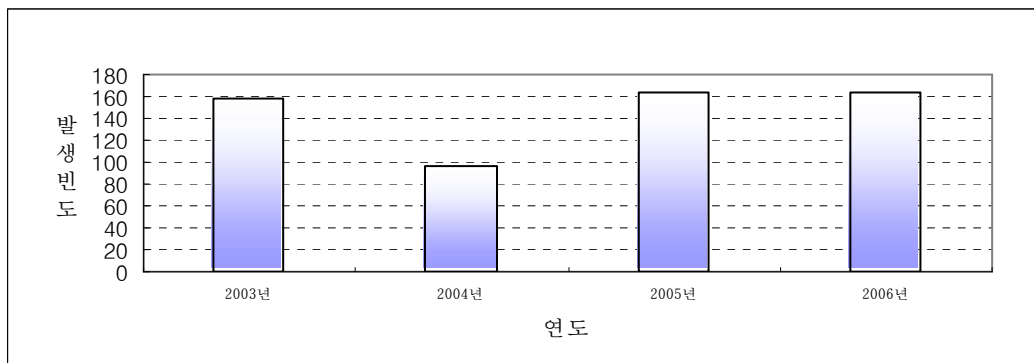
기간 : 2003년 ~ 2006년

- 자료 : - 제주공항의 LLWAS 저층바람시어 발생 횟수(2003년 ~ 2006년)
- 공항기상 관측표, 일기도(지상, 850hPa), 고산 고층바람자료
- 제주도의 AWS바람벡터(제주공항, 제주시, 유수암, 선흘)

2.2 통계적 자료 분석

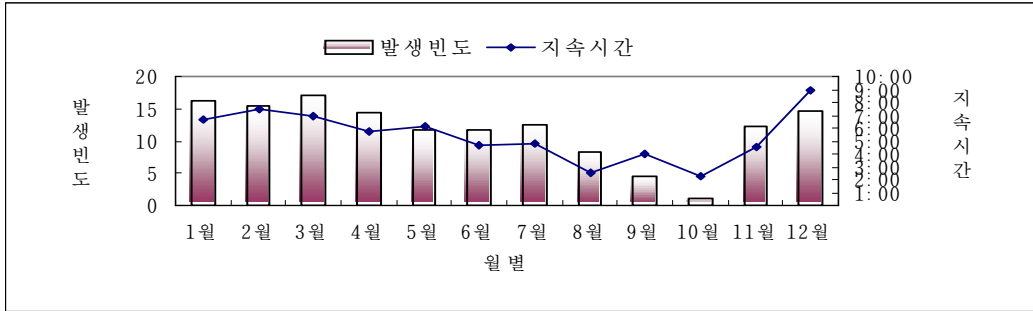
2.2.1 연도별, 월별, 계절별 바람시어

2003년 ~ 2006년까지 제주공항의 지속적인 바람시어 총 발생횟수를 [그림 3]과 같이 통계 분석하였다. 총 발생횟수는 560회이며 2003년은 159회, 2004년은 96회, 2005년은 163회, 2007년은 163회이다.



[그림 3] 연도별 바람시어 발생빈도

[그림 4]와 같이 월별 발생빈도는 3월이 평균 17회로 가장 두드러졌으며 그 다음 1월, 2월, 12월, 4월 순이었다. 반면 10월의 발생빈도는 평균 1회, 지속시간 평균 2시간 19분으로 가장 낮았다. 계절별로는 겨울철이 총 186회, 평균 지속시간 7시간 40분으로 발생빈도가 가장 두드러져 cP기단의 강풍으로 인한 지속적인 바람시어가 발생했음을 추측할 수 있다. 그 다음으로 봄철이 총 173회, 지속시간 6시간 14분이었고 여름철은 130회, 가을철이 71회였다. 즉 계절별로 보면 겨울철과 봄철에 바람시어 발생빈도와 지속시간이 모두 높았고 상대적으로 가을철에는 가장 낮았다(표 1).



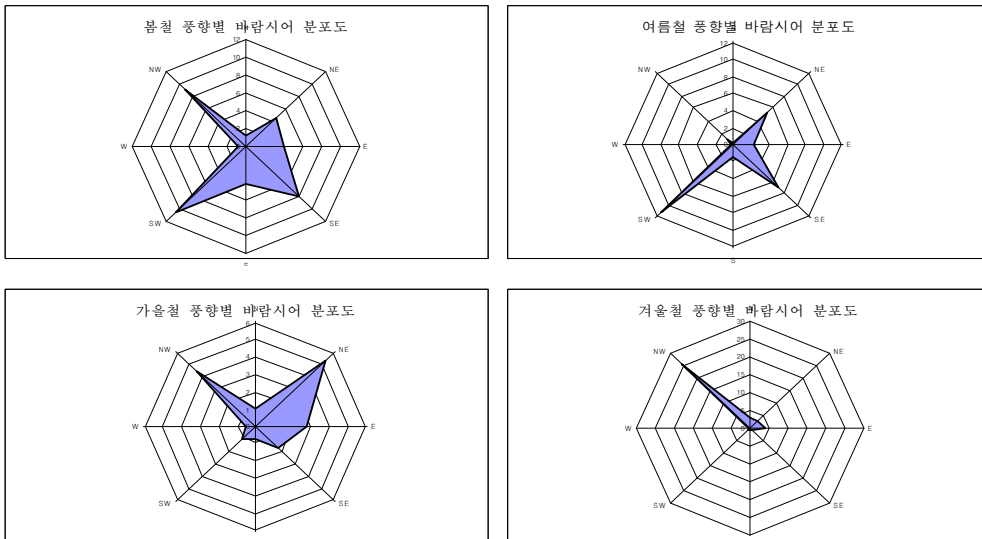
[그림 4] 월별 바람시어 발생빈도 및 평균지속시간

<표 1> 계절별 바람시어 발생횟수 및 평균 지속시간

계절	바람시어 총 발생 횟수	바람시어 평균 지속시간
봄	173	6시간 14분
여름	130	3시간 58분
가을	71	3시간 39분
겨울	186	7시간 40분

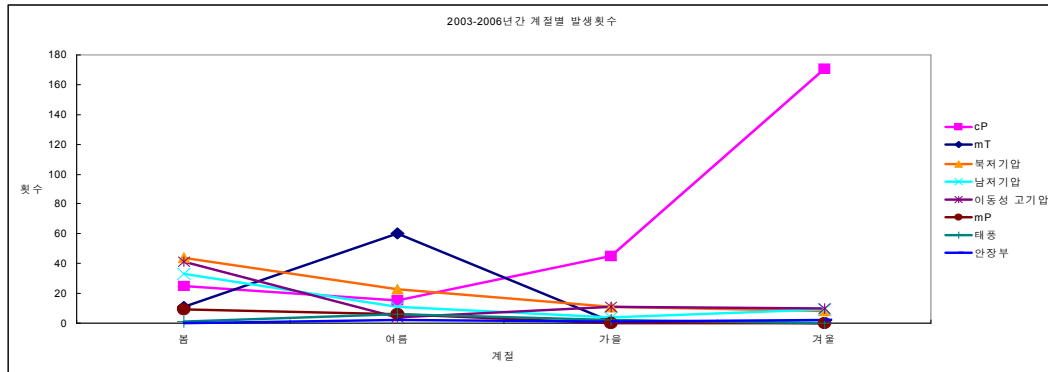
2.3 풍향별 바람시어 분포

2003년 ~ 2006년의 바람시어 발생횟수를 계절별로 분류하여 풍향 분포를 [그림 5]와 같이 분석해 보았다. 봄철의 경우 남서풍, 북서풍이 탁월하였고, 여름철에는 남서풍, 남동풍이 두드러졌다. 또한 가을철에는 북서풍, 북동풍이 겨울철에는 북서풍이 탁월하게 나타났다.



[그림 5] 계절별(봄, 여름, 가을, 겨울) 바람시어 풍향별 발생빈도 분포

계절별로 나타난 바람시어를 각 기압패턴으로 분류하여 발생빈도를 [그림 6]과 같이 분석해 보았다. 봄철에는 저기압과 고기압 발생 시 바람시어가 주로 발생하였고, 여름철에는 mT기단, 가을철에는 cP기단과 저기압 및 고기압, 겨울철에는 대부분 cP기단에 의해 발생하였다.



[그림 6] 계절별(봄, 여름, 가을, 겨울) 바람시어 패턴별 발생빈도

바람시어를 계절별로 분류하면 봄철에는 대륙성고기압이 쇠약해지고 이동성고기압과 저기압의 출현 빈도가 높아지면서 남서풍 및 남동풍 바람시어가, 여름철에는 고온다습한 북태평양 기단인 mT기단에 의한 남서풍 바람시어, 가을철에는 북태평양기단이 쇠퇴하고 대륙에서 발생하는 이동성고기압과 늦가을 무렵 시베리아 지방에서 확장하는 차고 건조한 cP기단으로 인한 북서풍 및 북동풍 바람시어, 겨울철에는 시베리아와 몽고 지방에서 발달하는 차고 건조한 한랭고기압이 확장하면서 전형적인 서고동저형 기압배치가 형성되어 북서풍의 바람시어가 나타나는 것을 알 수 있었다.

2.4 기압계의 패턴별 분석

2.4.1 북쪽저기압

북쪽저기압의 경우 봄철이 전체의 43%로 발생빈도가 가장 높았으며 지속시간 또한 약 7시간 30분으로 가장 길었다. 이에 비해 겨울철은 전체의 12%로 발생빈도가 가장 낮았으며 그 다음은 여름철(15%), 가을철(31%) 순이었다. 바람시어 지속시간은 여름철이 평균 약 4시간 35분, 겨울철 약 5시간 27분, 가을철이 약 6시간 28분이었다. 저기압 패턴에서 제주공항의 바람시어가 발생한 사례를 풍향별로 분류하여 제주도의 다른 지점과의 연관성을 분석해 보았다.

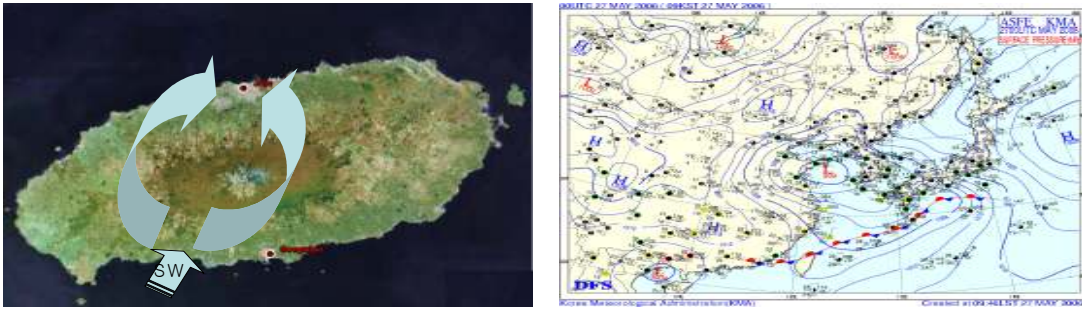
가) 남서풍류

남서풍이 불 때 발생하는 바람시어 현상은 크게 두 가지로 나뉜다. 첫 번째는 돌풍성의 강풍이고 두 번째는 수렴현상인데 바람시어 발생원인 특성과 관련지어 제주공항에 바람시어가 발생한 시점과 비교하여 보았다.

(1) 수렴 발생 시

(가) 저기압 위치와 발생현상

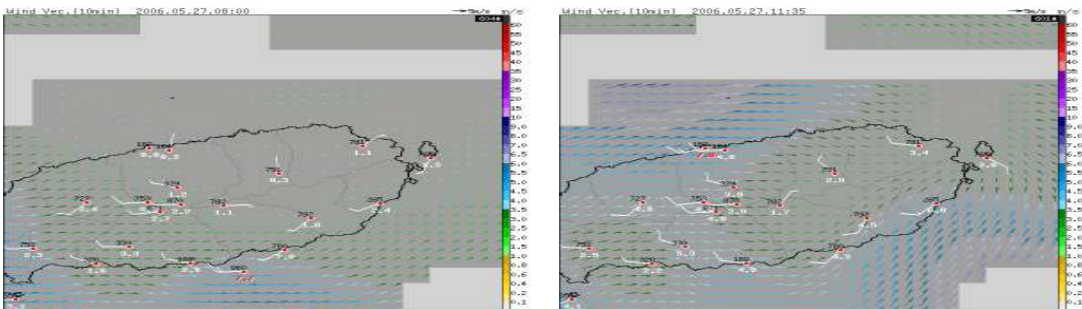
남서풍에 의해 바람시어가 발생하는 저기압은 주로 중국 화북지방 이상의 위도에서 발생하여 점차 북동진하여 산둥반도를 거쳐 제주도 북부를 지나가는 진행 패턴을 보이고 있다. 남서풍에 의한 바람시어 중 제주도 동쪽에 수렴 현상을 보이는 빈도는 저기압 남풍류 전체의 38%로 가장 빈번하게 발생하였고, 평균 지속시간은 약 3시간 30분이었다. 이는 남서풍의 풍하측인 제주공항 동쪽(조천읍, 구좌읍) 부근에 수렴현상으로 바람시어가 발생하는 것으로서 한라산의 지형적인 이유로 남서풍이 유입되면 바람이 한라산을 넘지 못하고 양쪽으로 갈라져 풍속이 약해지면서 동쪽 선홀 지역에 바람이 수렴하게 되는 것이다.



[그림 7] 저기압 남서풍형(수렴) 모식도(좌), 남서풍형 일기도(우)

(나) AWS 바람벡터 분석

[그림 8]에서 제주도 북동부 지역은 거의 Calm 상태를 보이다가 남서풍이 강하게 유입되면서 한라산 동쪽 선홀 지역 주위에 풍속이 약한 수렴현상을 보였다. 제주공항에 바람시어가 발생한 11시의 2시간 전인 9시 이후에 제주공항은 12kt 이상의 풍속을 보였지만 상대적으로 선홀은 6kt로 약하게 유입되었다.



[그림 8] 제주도의 AWS 바람벡터(2006.05.27.0800KST(좌), 1130KST(우))

<표 2>에서 선홀과 관련하여 선행현상을 살펴보면 발생 전에는 두 지점 사이에 풍속차가 보이지 않지만 바람시어 발생 약 2시간 전부터 선홀에 비해 제주공항이 5kt 이상 풍속이 강하게 유입되는 경향을 보였다.

<표 2> 바람시어 발생 전 제주공항, 선홀 풍속 차(2006.05.27)(단위 : kt)

지 명	0800KST	0900KST	1000KST	1100KST
제주공항	0	12	13	14
선 홀	0	6	6	6
풍속차이	0	6	7	8

북쪽저기압에서 남서풍이 수렴하여 다른 풍계가 들어오는 경우를 정리하면 <표 3>과 같다. 바람시어 평균 지속시간은 약 7시간 30분 정도로 바람시어가 나타나기 전의 선행현상은 제주공항과 선홀의 풍속차가 2시간 전에 5kt 이상 나타나는 특징을 보였다.

<표 3> 남서풍 수렴 시 바람시어 착안사항

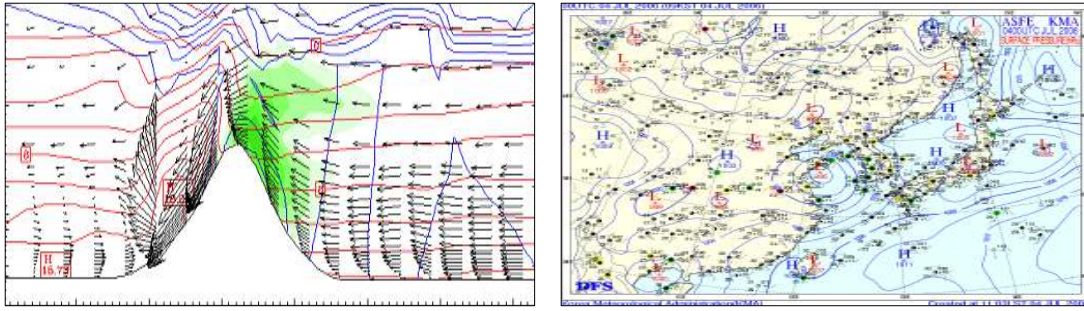
남서풍 수렴 시	지속시간	850hPa	선행현상(제주공항-선홀의 풍속차)
	약 7시간 30분	20kt 이상	2H 전 5kt 이상

(2) 주풍 발생 시

(가) 돌풍 발생현상

저기압의 강한 경도력으로 바람이 한라산을 넘어갈 정도의 강한 남서풍이 불어 올 때 췌 현상이 자주 발생하여 돌풍성 강풍으로 인한 바람시어가 발생한다. 이 때는 850hPa에서 30kt 이상의 풍속을 보였다.

저기압 남서풍으로 인한 바람시어 전체 발생일 중 돌풍현상은 27%를 차지하며 지속시간은 평균 약 6시간 56분으로 수렴현상보다 길게 나타났다. 제주도에 남서풍이 유입될 때 한라산 뒷편에 위치한 제주공항은 제주도 서부에 위치한 유수암보다 풍속이 현저하게 약하지만 제주공항에 돌풍으로 인한 바람시어가 발생할 때에는 유수암보다 제주공항의 풍속이 강하게 나타났다. 이는 한라산을 넘으면서 풍하층의 바람이 풍상층보다 강하게 되는 물뿜현상으로 인한 돌풍성 현상임을 추측할 수 있다.



[그림 9] 물뿔현상 모식도(좌), 남서풍형 일기도(우)

(나) 물뿔현상(hydraulic jumps)

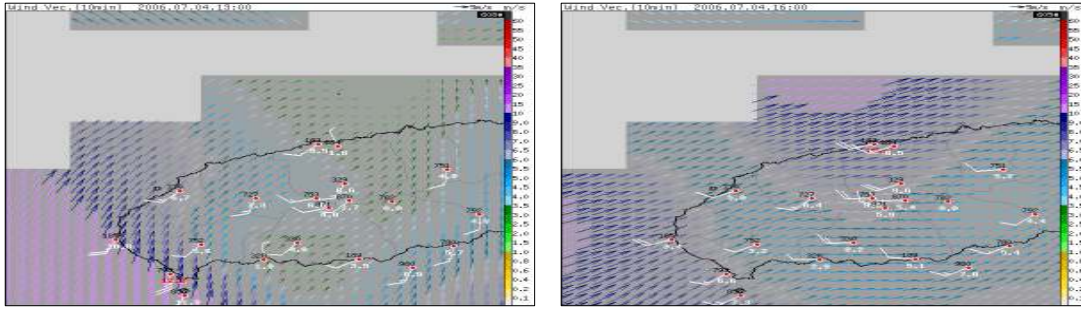
물뿔현상이란 빠른 속도의 유체가 장애물에 부딪힐 때 마찰에 의해 속도가 낮아지면서 유체 표면이 불쑥 솟아오르는 즉 높이가 증가하는 현상이다. 초기 유체 속도가 강할수록 천이(층류에서 난류로 바뀜)가 급격해지며 어느 속도 조건에 도달하면 파도가 부서지듯 자신 쪽으로 굽어 들어가는데 이 때 급격한 난류, 소용돌이, 혼입(air entrainment)과 표면 굴곡을 동반한다. 이 현상의 원리는 빠르게 흐르는 유체의 초기 운동에너지가 속도가 낮아지면서 줄어들고 열역학 법칙에 의해 잉여 에너지가 위치에너지로 전환되어 높이가 증가하는 것이다. 이 에너지는 비가역성으로 열에너지, 즉 난류로 전환되어 손실된다.

듀란(1989, J, Atmos. Sci.)에 의해 고안된 기상학적 물뿔현상(atmospheric hydraulic jumps) 시뮬레이션을 살펴보면 한라산에 남풍계열의 강풍이 불 때 제주공항에 바람시어가 발생하는 원리가 잘 설명된다. 한라산을 넘어 들어오는 바람이 지형과 지표에 가까운 안정층(상대적)을 만나 속도가 느려지면서 공기층 두께가 증가하고 이로 인해 발생하는 난류로 인해 돌풍이 나타나는 것이다.

비슷한 예로 호주 북쪽 카페테리아 만에서 발생하는 "Morning Glory" 현상이 있다. 이것은 카페테리아 만 남쪽 해안에서 새벽 무렵에 자주 발생하는 길고 낮으며 좁다란 구름 띠를 동반한 스콜 현상에 붙여진 명칭인데 남동 무역풍에 의한 물뿔현상으로 인해 발생한다.

(다) AWS 바람벡터 분석

[그림 10]과 <표 4>는 제주공항과 유수암의 시간별 풍속이다. 남서풍이 유입될 때 그 강도가 높아지면서 물뿔현상의 발생 전(14시)에는 제주공항은 유수암과 비교하여 풍속이 약하여 풍속차가 음의 11kt 값을 보이지만 바람시어 발생 전인 14시부터 풍하층의 바람이 강해져 양의 풍속차를 보였다.



[그림 10] 제주도의 AWS 바람벡터(2006.07.04 1300KST(좌), 1600KST(우))

저기압 남서풍의 돌풍으로 바람시어가 발생할 경우 바람시어 발생 전인 2시간 이후부터 유수압과 비교하여 2시간 전에는 평균 +1.8kt, 1시간 전에는 평균 +4.8kt, 바람시어 발생시에는 평균 +6.6kt 풍속이 더 강해지는 선행현상을 보여 남서풍의 바람이 강할 때에 제주공항과 유수압의 풍속차가 음에서 양으로의 변곡 시점을 주시할 필요가 있다.

<표 4> 바람시어 발생 전 제주공항, 유수압 풍속 차(2006.07.04)(단위 : kt)

지 명	1200KST	1300KST	1400KST	1500KST	1600KST
제주공항	9	9	21	26	25
유 수 압	20	14	15	16	12
풍속차이	-11	-5	+6	+10	+13

북쪽저기압에서 남서풍이 주풍으로 유입되는 경우를 정리하면 <표 5>와 같다. 바람시어 평균 지속시간은 약 6시간 50분정도 되었으며 유수압과의 선행현상을 보면 바람시어가 나타나기 전에는 유수압의 풍속이 강한 반면 바람시어가 발생시점에는 제주공항의 풍속이 강해지는 특징을 보였다.

<표 5> 남서풍 주풍 시 바람시어 착안사항

남서풍 주풍 시	지속시간	850hPa	선행현상(유수압과의 풍속 차(kt))			
			-3H	-2H	-1H	바람시어 발생
	약 6시간	30kt	-1.0	+1.8	+4.8	+6.6
	56분	이상				

나) 남풍류

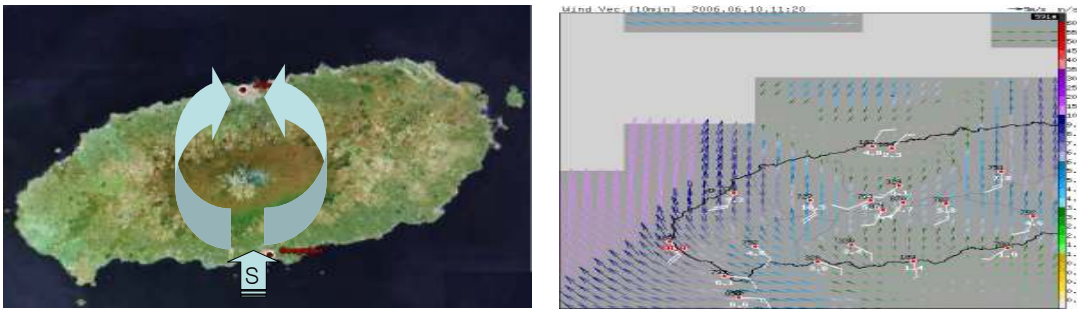
남풍형은 제주도로 남풍이 강하게 유입되면서 발생하는 형태인데 중국 화중에서부터 산둥반도에 저기압 중심이 위치할 때 바람시어 현상이 나타난다. 제주공항에서는 주로 바람의 형태가 수렴하면서 바람시어가 발생하게 된다.

(1) 수렴 발생 시

(가) 발생현상

제주공항에 풍향이 서로 다른 방향으로 모여들어 수렴하면서 바람시어가 발생하는 것으로서 저기압으로 인한 바람시어 발생 중 남풍의 수렴현상으로 인한 발생 빈도는 29%의 비중을 차지하며 지속시간은 7시간 26분으로 나타났다.

[그림 11]과 같이 저기압에 의한 남풍류는 제주도에 지속적으로 유입되면서 한라산을 넘어가는 것이 아니라 동서로 나뉘어 돌면서 본래의 풍향인 남풍과는 전혀 다른 해풍의 유형으로 제주공항에는 서풍과 동풍 계열의 바람이 불어오게 된다.



[그림 11] 저기압 남풍형(수렴) 모식도(좌), 제주도 AWS 바람벡터일기도(우)

제주공항의 수렴부분은 일정한 주풍 없이 바람이 약하고 가변적으로 불 뿐 아니라 제주공항 중심으로 그 범위가 좁고 해풍과 비슷한 유형으로 해상에서 풍향이 변해 유입, 수렴하므로 해상에서의 관측 자료가 필요하지만 관측 자료가 부족하고 앞서 설명했듯이 제주공항에서의 수렴현상이므로 다른 관측지점과의 특징적인 연관성을 찾기 어렵다.

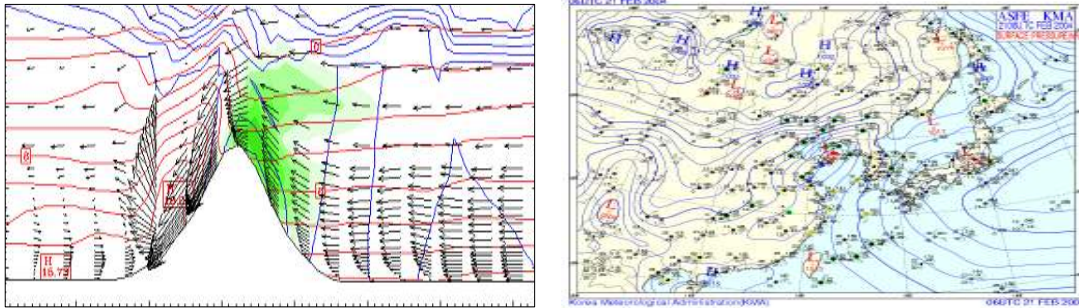
(2) 주풍 발생 시

(가) 발생현상

남풍류가 한라산 사면을 넘을 수 있을 정도의 강한 풍속으로 불어올 때 제주공항 바람시어 발생 특징을 살펴보면 제주공항 주변에 돌풍이 발생되었다. 하지만 남풍 바람시어 발생빈도는 7%로 가장 낮았으며 지속시간은 평균 3시간 19분으로 나타났다. 이는 저기압의 기압경도가 강해져 남풍이 강하게 유입되는 것으로서 제주도에 가장 영향을 미치는(한라산 1,950m) 850hPa의 풍속이 30kt 이상일 때 나타났다.

저기압의 남풍은 제주공항에서 수렴현상을 보이다가 강한 남풍이 유입되면서 돌풍으로 인한 바람시어가 발생하였다. 하지만 남풍이 강하게 유입되었을 때 내륙

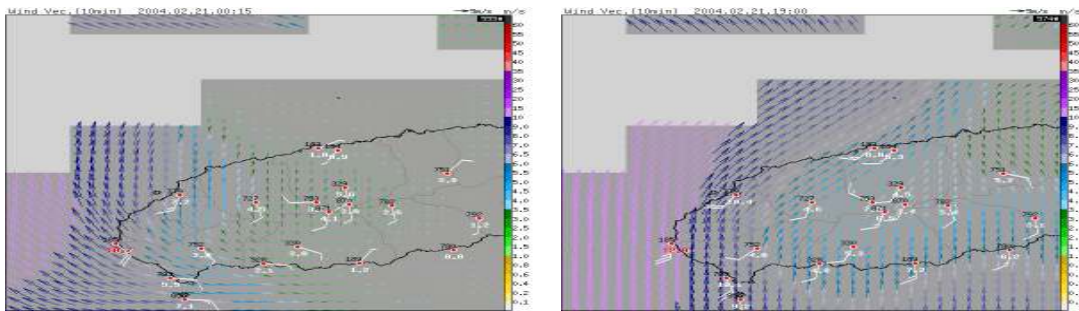
에 들어오면서 대체로 서향하는 경향이 있다. 그러므로 제주도 특히 제주공항은 내륙으로 인한 남서풍의 현상을 보이므로 앞서 설명한 남서류의 강풍으로 인한 바람시어 현상과 유사하다고 판단, 물뿔현상을 적용하여 유수암과 그 선행현상을 분석하였다(그림 12).



[그림 12] 물뿔현상 모식도(좌), 지상일기도(2004.02.21.1500KST)(우)

(나) AWS 바람벡터 분석

[그림 13]과 같이 해상에서는 180° 방향의 남풍이 유입되지만 유수암은 190°, 제주공항은 이보다 더 서쪽으로 편향되어 220°의 바람이 불게 된다. 또한 제주공항의 수렴으로 인하여 바람시어 발생 시각(2004.02.21.0017KST)에는 제주공항 풍속은 4kt, 유수암은 평균 17kt로 -13kt의 큰 차를 보이지만 제주공항의 강풍과 돌풍으로 인한 바람시어 현상 시 제주공항 18kt, 유수암 12kt로 +6kt의 풍속차를 보였다. 이는 앞서 설명한 물뿔현상에 의해 제주공항과 유수암의 풍속이 역전되는 것을 증명하는 결과라 볼 수 있다(표 6).



[그림 13] 제주도 AWS 바람벡터(2004.02.21.0015KST(좌), 1855KST(우))

<표 6> 바람시어 발생 제주공항, 유수암 풍속 차(2004.02.21)(단위 : kt)

지 명	0100KST	0200KST	0300KST	0400KST	0500KST	0600KST	0700KST
제주 공항	3	3	6	3	4	4	3
유수암 풍속	16	18	18	17	16	15	18
풍속 차이	-13	-15	-12	-14	-12	-11	-16
지 명	1100KST	1200KST	1300KST	1400KST	1500KST	1600KST	1700KST
제주공항 풍속	12	7	15	13	18	18	15
유수암 풍속	14	14	15	14	13	12	10
풍속 차이	-2	-7	0	-1	+5	+6	+5

저기압 남풍의 돌풍으로 바람시어가 발생한 경우를 정리하면 <표 7>과 같다. 유수암과 비교하여 발생 2시간 전에는 평균 -2kt, 1시간 전에는 제주공항과 유수암의 풍속이 유사하게 유입되었고, 바람시어 발생 시에는 평균 +4kt의 강한 풍속 선행현상을 보여 남풍이 강할 때에 남서풍처럼 제주공항과 유수암의 풍속차가 음에서 양으로 변곡되는 시점을 주시할 필요가 있다. 하지만 남풍의 강풍, 돌풍으로 인한 제주공항 바람시어의 발생일수가 7%(3회)로 매우 적기 때문에 일반적인 선행현상이라 보기는 어렵다.

<표 7> 남풍 강풍 시 바람시어 착안 사항

남풍 주풍 시	지속시간	850hPa	선행현상(유수암과의 풍속 차(kt))			
	약 3시간 19분	30kt 이상	수렴에 의한 바람시어와 동반	-2H -2	-1H 0	바람시어 발생 4

2.4.2 남쪽저기압

남쪽에 저기압이 분포하는 경우 풍향별로 바람시어 발생비율을 보면 동풍계열은 26%, 북풍계열은 39%, 남풍계열은 34%로 나타났다. 이 중 남풍계열의 풍향을 보면 남풍은 19%, 남동풍은 52%, 남서풍 29%로 남풍계열의 바람 중에서 남동풍이 불 경우 바람시어가 더 많이 발생하였다. 계절별로 살펴보면 봄철에 46%, 지속시간은 평균 8시간 3분으로 가장 빈번하게 발생했으며 여름철에 29% 지속시간은 평균 5시간 17분, 가을철에 10%, 평균 2시간 34분, 겨울철에 15%, 6시간 53분으로 나타났다.

가) 남서풍류

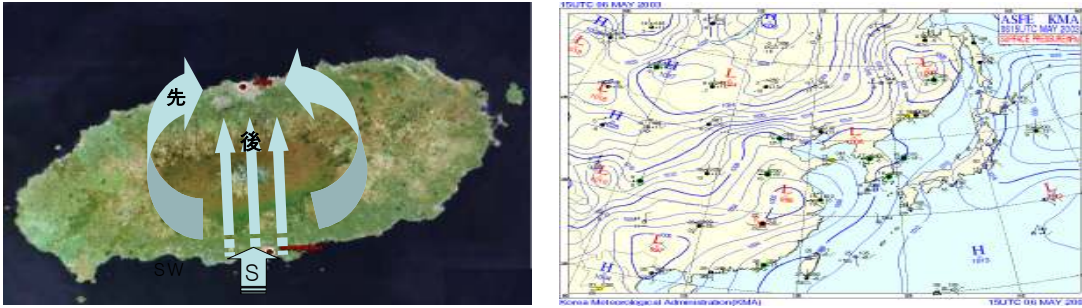
남서풍이 바람시어에 영향을 미치는 경우는 1건으로 이때 주풍으로 남서풍이 강하게 유입하여 강풍으로 인한 돌풍 발생으로 바람시어가 발생하였다. 남쪽 저기압이 남부지방으로 이동하면서 지속시간 또한 1시간 미만이었고 그 빈도수도 너무 적어 남서풍에서의 바람시어 선행현상을 찾기엔 무리가 있다고 생각된다.

나) 남풍류

(1) 수렴발생 후 주풍 발생

(가) 발생현황

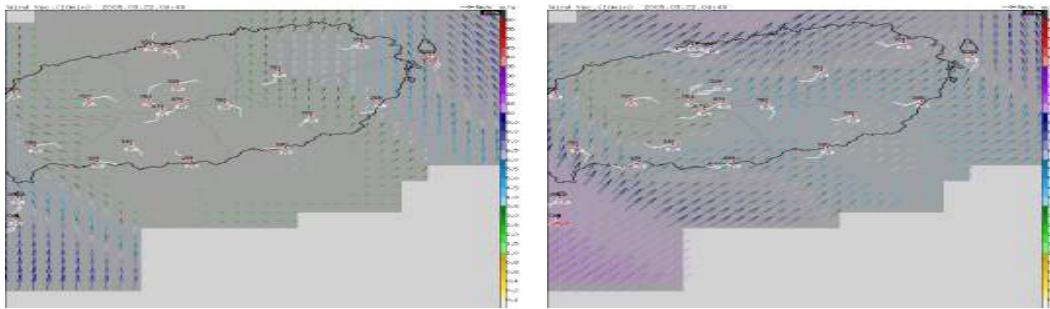
제주도 남서쪽에 있는 저기압이 접근하면서 남풍이 유입하는데 이 남풍은 한라산을 중심으로 두 방향으로 나누어지면서 제주공항에 수렴 발생, 바람시어가 발생한다. 발생빈도는 43%로 남쪽에서 저기압 접근 시 가장 많은 바람시어가 발생되며 평균 지속시간은 약 7시 20분이다.



[그림 14] 저기압 남풍형(수렴, 주풍) 모식도(좌), 제주도 일기도(우)

(나) AWS 바람벡터 분석

저기압 접근 시 남풍이 유입할 경우 제주공항에서는 바람시어 나타나기 전과 후에 풍향, 풍속이 일정한 주풍 없이 매우 약한 것을 볼 수 있다. 다른 관측지점과의 연관성을 조사하였으나 뚜렷하게 나타나는 특징은 나타나지 않았으며 풍향차이에 의한 바람시어가 나타난 것으로 생각된다(그림 15, 좌). 저기압의 한랭전선 통과 후 남서풍이 강하게 유입되면서 제주공항에서는 유수암보다 풍속이 더 강해지는 물뿔현상이 발생, 돌풍에 의해 바람시어가 발생했다(그림 15, 우).



[그림 15] 제주도의 AWS 바람벡터(2005.03.22.0040KST(발생전-좌),0440KST(발생후-우))

남쪽 저기압에서 남풍에 인하여 바람시어가 발생했을 경우를 정리하면 <표 8>과 같다. 평균 지속시간은 약 7시간 20분으로 저기압 접근 시 다른 기압 패턴의 남풍류에서 나타났듯 바람시어가 나타나기 전부터 유수암의 풍속이 세게 불고 한라산 능선을 넘으면서 풍속이 약해지는 경향을 보인다. 이 후 저기압이 통과하면서 남서풍이 강하게 유입되면서 유수암 풍속보다 제주공항이 풍속이 더 강해지는 현상(물뿜현상)이 발생하면서 풍속차에 의한 바람시어가 발생하였다. 따라서 저기압 이동에 따라 풍향이 바뀌면서 바람시어가 여러 가지 요인에 의해서 발생하는 것을 알 수 있다.

<표 8> 남풍 수렴 시 바람시어 착안 사항

남풍 수렴 시 (수렴 후 주풍)	지속시간	선행현상
	약 7시간 20분	수렴 : 제주공항 부근으로 수렴현상 발생 유수암의 풍속 강 유수암을 지나면서 제주공항 주변 풍속 약 주풍 : 물뿜현상 발생

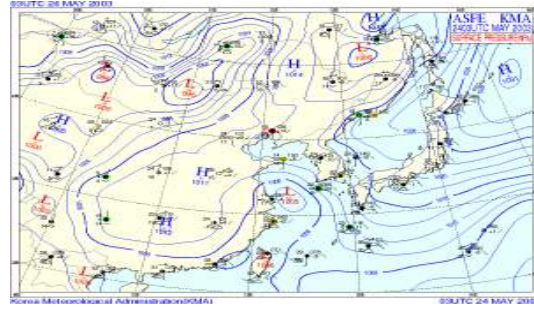
다) 남동풍류

기압경도력에 따른 풍속 강도에 따라 수렴현상과 강풍으로 인한 돌풍으로 바람시어가 발생한다.

(1) 주풍 발생 시

(가) 발생현상

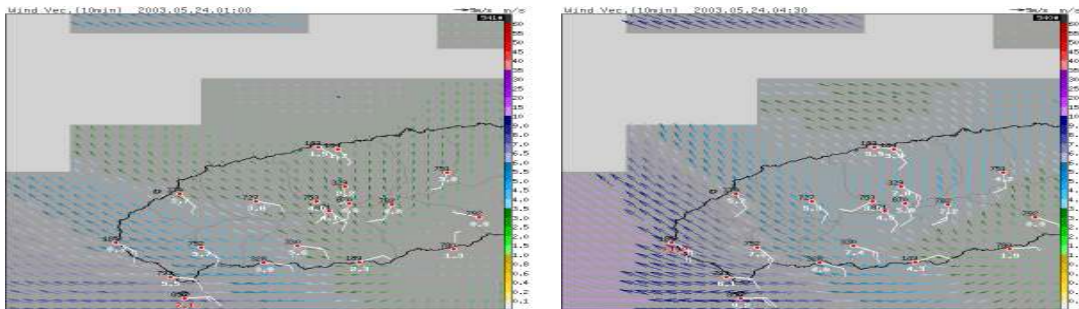
남쪽저기압의 남동풍은 중국 화남지방과 제주도 동남부 해안 사이에 위치하여 한라산 사면을 넘는 강한 바람이 유입되면 제주공항 LLWAS 각 설치 지점 풍속 차로 인하여 바람시어가 발생되는데 발생 빈도는 36%이고 그 지속시간은 평균 14시간 23분으로 나타났다. 강한 남동풍이 유입될 경우 지면에 의해서 동향하는 경향을 보이며 바람시어가 제주공항에 나타나는 시점인 1시간 전후로 한라산의 북쪽에 위치한 오등지역에 강한 풍속 현상을 보였다.



[그림 16] 남동풍형(주풍) 모식도(좌), 동풍형 지상일기도(2003.05.24)(우)

(나) AWS 바람벡터 분석

[그림 17]과 같이 바람시어현상이 나타난 3시 30분 전(새벽 1시)에는 한라산 뒤쪽에 위치한 제주도 북부 지역의 풍속이 대체로 약하게 나타남을 알 수 있다. 제주공항과 오등 또한 새벽 2시 30분까지는 풍속이 5kt 내외로 약하게 유입되고 있지만 바람시어 발생 2시간 전부터 한라산의 정상을 넘어 위치한 오등지역 풍속이 9kt 이상으로 급증하고 바람시어 발생 시에는 제주공항에 8kt 내외, 오등은 20kt로 강하게 나타났다.



[그림 17] 제주도 AWS 바람벡터(2003.05.24.0100KST(좌), 0430KST(우))

<표 9> 바람시어가 나타나기 전 제주공항, 오등의 풍속차(2003.05.24.)(단위 : kt)

지 명	0100KST	0130KST	0200KST	0230KST	0300KST	0330KST	0400KST	0430KST
제주공항	4	3	2	3	3	1	8	7
오 등	4	6	5	3	9	9	10	20
풍속차이	0	-3	-3	0	-6	-8	-2	-13

남쪽저기압의 남동풍 주풍이 불었을 때 <표 10>과 같다. 오등지역은 강한 바람이 한라산을 만나 넘어가면서 튀어오르는 물뿔현상으로 인해 난류 및 돌풍이 발

생하면서 강한 풍속이 나타남을 알 수 있다. 850hPa의 풍속이 30kt이상으로 나타났으며 제주공항 바람시어 발생 1시간 전에는 오등의 풍속이 평균 11kt, 제주공항은 3kt로 오등지역은 1시간동안 약 5kt 이상 강해지고 제주공항은 오등보다 늦은 1시간 후에 풍향이 7kt 강한 10kt의 바람이 유입되었다.

이는 주풍으로 인한 돌풍현상이 한라산 사면의 뒤쪽, 북부에 위치한 오등지역부터 영향을 주고 물뿔현상으로 인하여 제주공항보다 강한 풍속·시간당 풍속 증가율의 선행 현상이 있음을 알 수 있다.

<표 10> 남동풍 주풍 시 바람시어 착안사항

남동풍 주풍 시	지속시간	선행현상 - 오등과의 풍속 차(kt) (제주공항/오등 풍속)			
		약 14시간 23분	-3H	-2H	-1H
		-7(2/9)	-2(4/6)	-8(3/11)	-7(10/17)

2.4.3 북태평양 고기압

여름철에 mT가장자리의 불안정역에서 지속적으로 강한 저기압이 발생하였으며, 특히 장마전선상의 영향을 받아 바람시어가 발생한다. 풍향별로 보면 동풍 11%, 남풍 23%, 남동풍 20%, 남서풍 45%로 바람시어가 발생하였고 대부분 남풍계열의 바람이 바람시어 발생 원인이었다.

지속시간을 보면 전체 풍계는 약 4시간 27분으로 나타났고 그 풍향별로 동풍은 약 1시간 30분, 남풍 7시간 26분, 남동풍 5시간, 남서풍 4시간 30분이었으며 남풍의 경우 그 지속시간이 다른 풍계보다 길게 나타났다. 그 원인은 북태평양고기압의 흐름은 남풍계열이 많고 제주공항은 주풍대인 남풍이 그대로 유입되기보다는 한라산의 지형적인 원인으로 인하여 제주공항을 중심으로 수렴하는 바람이 불어 그 풍향 차에 의하여 바람시어가 발생한 것으로 생각된다.

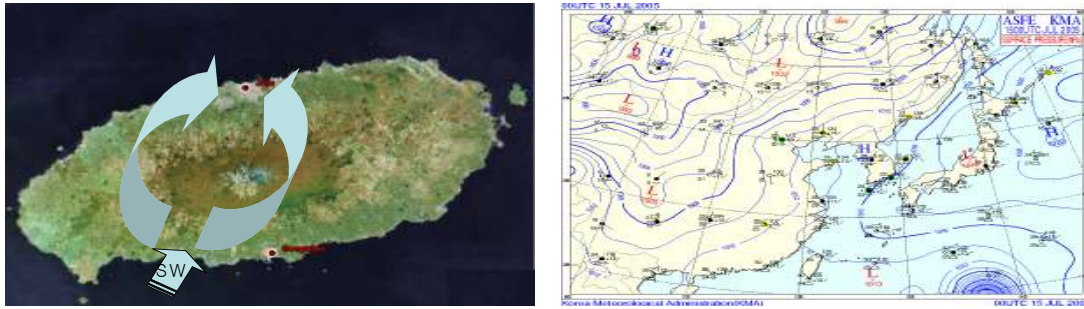
남풍계열의 바람이 주풍으로 들어왔을 경우 지속시간이 6시간 30분정도이고 수렴하여 유입하는 경우 3시간 20분 정도로 수렴하여 들어올 때가 주풍으로 유입했을 때보다 지속시간이 3시간정도 짧았다. 또한 그 빈도수를 보면 남풍류가 주풍으로 들어오는 경우는 38%, 주풍이 아닌 바람이 유입되는 경우는 62%였다. 따라서 제주공항은 지형특성상 남풍계열의 바람이 유입될 시 남풍계열이 그대로 들어오기보다는 수렴하여 들어온다는 것을 알 수 있다.

가) 남서풍류

(1) 수렴 발생 시

(가) 발생현상

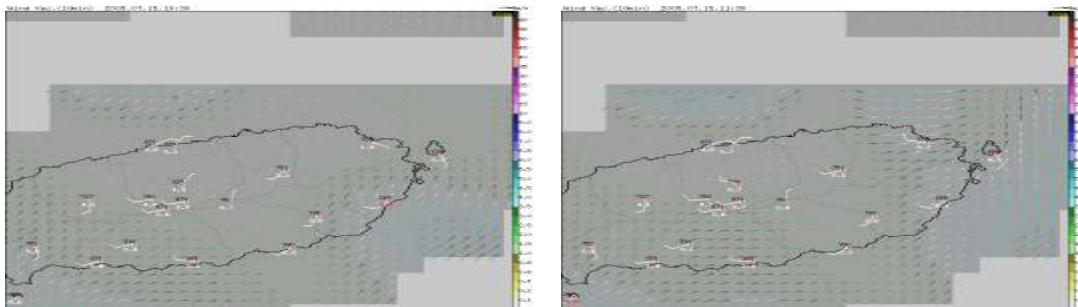
남서류로 인하여 제주도 동쪽에 수렴지역이 발생했을 경우 북태평양 기단은 그 빈도가 3%로 매우 적었고 지속시간 또한 1시간 미만으로 매우 짧았다



[그림 18] 저기압 남서풍형(수렴) 모식도(좌), 남서풍형 일기도(우)

(나) AWS 바람벡터 분석

[그림 19]와 같이 남서풍이 제주도 남서쪽에서 동서로 나누어지고 한라산 능선을 넘으면서 풍속이 매우 약해지는 특징을 보이며 나누어진 바람이 제주 동쪽에서 수렴하여 제주공항에 북동풍이 유입되는 모습을 보이고 있다. <표 11>를 보면 북쪽 저기압에서 나타났던 선홀과의 연관성은 찾을 수 없다.



[그림 19] 제주도의 AWS 바람벡터(2005.07.15.1033KST(발생전-좌),1130KST(발생후-우))

<표 11> 바람시어가 발생 전 제주공항, 선홀 풍속 차(단위 : kt)

지명 \ 시간	09KST	10KST	11KST	바람시어 발생
제주공항	3	3	5	7
선홀	1	4	8	4
풍속차이	2	-1	-3	2

(2) 주풍 발생 시

(가) 발생현상

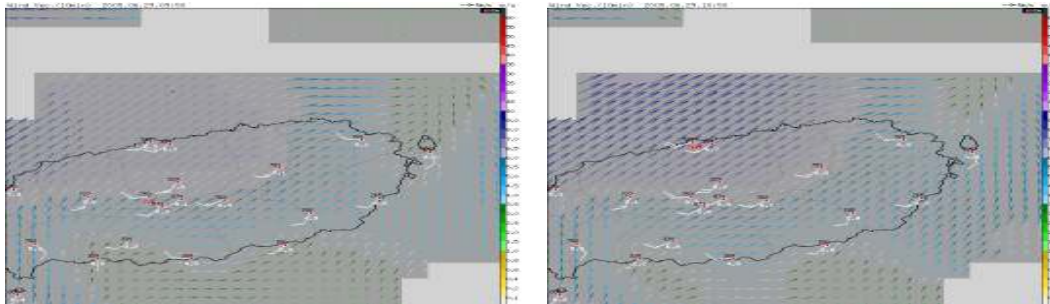
남서풍이 강하게 유입되면 한라산 서쪽 능선을 넘으면서 제주도로 유입되는 바람보다 풍속이 더 강해져 그 풍속 차에 의하여 바람시어가 발생한다. 지속시간은 약 5시간 50분 정도로 나타났으며 돌풍으로 인한 바람시어 발생현상이 약 38% 정도로 수렴보다 매우 높은 비율을 차지하였다.



[그림 20] 저기압 남서풍형(주풍) 남서풍형 일기도(좌), 모식도(우)

(나) AWS 바람벡터 분석

바람벡터에서 남서풍이 강하게 유입되었을 때 바람시어가 나타나기 전, 후를 보면 제주도 서쪽에 위치한 우수암의 풍속은 14kt로 제주공항의 풍속 12kt 보다 강하게 유입되고 있다. 이 바람이 한라산 능선을 넘으면서 물뿔현상으로 인하여 풍하층의 제주공항풍속이 22kt로 우수암의 풍속 14kt보다 더 세게 부는 특징을 보였다(그림 21).



[그림 21] 제주도의 AWS 바람벡터(2005.06.29.0950KST(발생전-좌),1050KST(발생후-우))

<표 12>에서 제주공항과 우수암의 풍속차를 비교해 보면 제주공항에 바람시어 발생 3시간 전부터 우수암과 비교하여 3시간 전에는 -5kt, 2시간 전에는 -3kt, 1시간

전에는 -1kt, 바람시어 발생시에는 +8kt로 풍속이 점점 강해지는 경향을 보인다.

<표 12> 바람시어가 나타나기 전 제주공항, 유수암의 풍속차(단위 : kt)

지 명	0800KST	0900KST	1000KST	바람시어 발생
제주공항	11	13	16	23
유 수 암	16	16	17	15
풍속차이	-5	-3	-1	8

북태평양 고기압에서 남서풍이 주풍으로 불었을 경우를 정리하면 <표 13>과 같다. 바람시어 평균 지속시간은 약 5시간 50분정도였으며 유수암과의 선행현상을 보면 제주공항에 바람시어 나타나기 2시간 전에는 약 2.6kt, 1시간 전에는 1.8kt 정도의 -값을 나타냈으며 바람시어 발생 후 제주공항이 유수암보다 +3.2값을 나타내는 특징을 보였다. 즉, 바람시어 발생 전에는 유수암 풍속이 센 반면 제주공항의 바람시어 발생 시에는 큰 음의 풍속차가 ±1kt의 값을 가질 때 1시간 후, 제주공항에 바람시어를 예상할 수 있다.

<표 13> 남서풍 주풍 시 바람시어 착안사항

남서풍 주풍 시	지속시간 약 5시간 50분	선행현상(유수암과의 풍속 차, 단위 kt)		
		-2H	1H	바람시어 발생
		-2.6	-1.8	3.2

나) 남동류

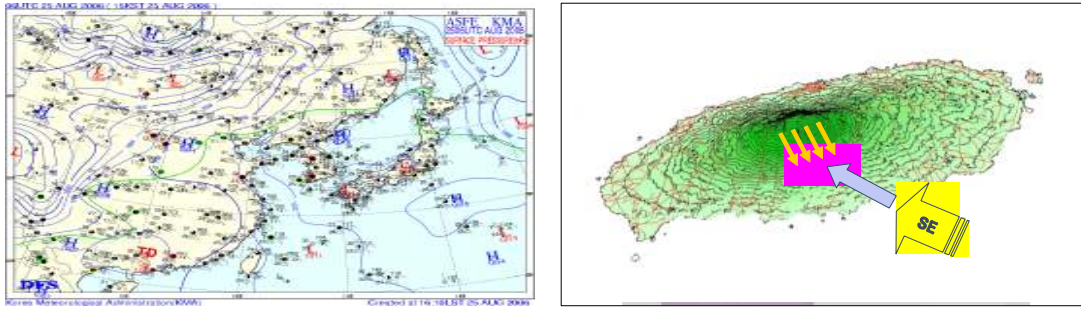
mT기단에서 남동풍이 유입되면서 발생하는 형태로 기압경도력에 따라 수렴현상과 강풍으로 인하여 바람시어가 발생한다.

(1) 수렴 발생 시

(가) 발생현상

남동풍이 한라산의 영향으로 두 방향으로 나뉘었다가 제주도 서쪽부근에서 만나게 된다. 하지만 두 방향의 바람(서풍과 동풍)은 지형적인 영향으로 서로 전혀 다른 풍향과 풍속으로 만나게 됨으로써 바람시어가 발생하며 제주공항에서는 동, 북동계열의 바람이 많이 유입된다. 남동풍의 수렴현상으로 인한 발생빈도는 21%를 차지하였으며 지속시간은 약 2시간 정도로 대부분 짧게 나타났다(그림 22).

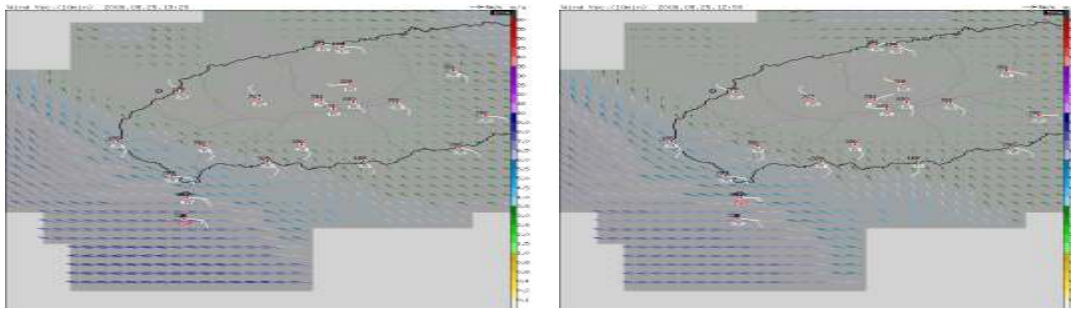
또한 남동풍이 수렴했을 경우 대부분(80%이상) 야간보다는 낮에 바람시어가 많이 발생하였다. 이는 [그림 22]과 같이 풍속이 약한 밤에는 한라산의 육풍과 제주도로 불어오는 남동풍의 바람이 서로 상쇄되어 밤에는 제주시의 바람시어 영향을 주는 남동풍의 영향을 거의 받지 않기 때문이다.



[그림 22] 남동풍형 지상일기도(좌), 육풍과 남동풍과의 상쇄현상 모식도(우)

(나) AWS 바람벡터 분석

[그림 23]에서와 같이 바람벡터에서 보면 제주공항 동쪽으로 수렴부분이 보이며 제주공항으로는 해풍의 영향을 받은 북동풍이 들어오고 있다. 바람시어가 나타나기 전과 후의 지역별 특징을 조사하여 보았으나 남동풍이 주풍에서 보였던 제주공항과 오등의 풍속차가 바람시어 발생 전에 점점 강해지는 특징을 보이지는 않았다.



[그림 23] 제주도의 AWS 바람벡터(2006.08.25.1030KST(발생전-좌),1230KST(발생후-우))

북태평양 고기압에서 남동풍이 수렴하여 바람시어가 발생했을 경우를 정리하면 <표 14>과 같다. 이 때 평균 지속시간은 2시간 정도이며 제주공항은 북동, 북풍 계열의 바람이 들어왔다. 제주공항의 서쪽에는 수렴현상이 발생하였다. 제주도 관측지점별로 선행현상의 특징을 분석하여 보았으나 그 특징을 찾기가 어려웠다.

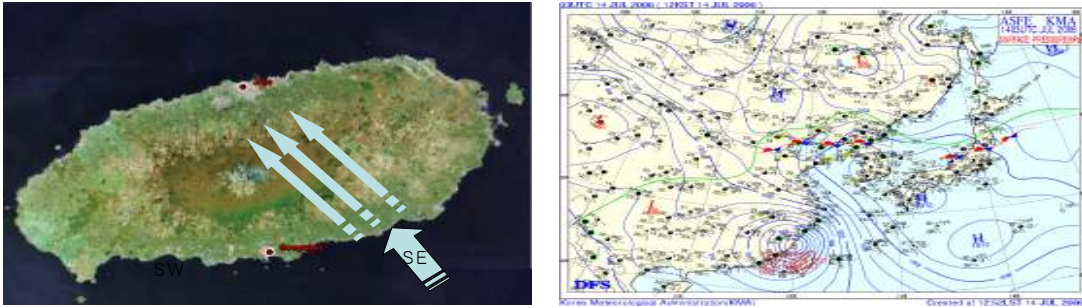
<표 14> 남동풍 수렴 시 바람시어 착안 사항

남동풍 수렴 시	지속시간	선행현상
	약 2시간	제주공항 서쪽에 수렴현상 발생 지역별 선행현상 찾기 어려움

(2) 주풍 발생 시

(가) 발생현상

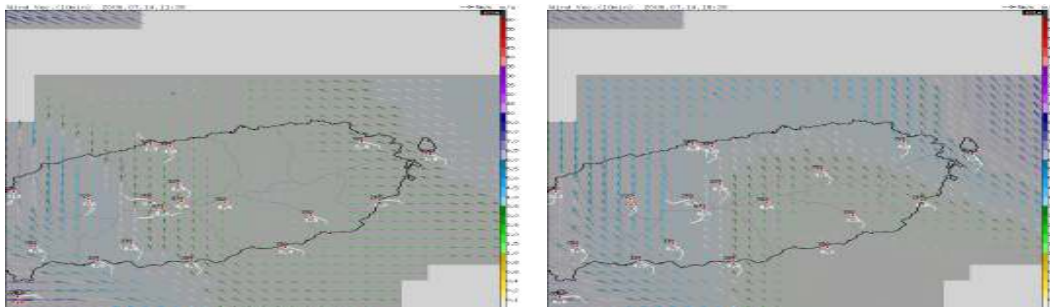
mT기단에서 남동풍이 주풍으로 들어오는 경우 북태평양 영향권에 있지만 화남 지역에 세력이 강한 저기압이나 태풍이 자리잡아 그 사이에 기압경도력이 조밀해 지면서 남동풍이 강하게 제주도에 유입되어 한라산을 넘으면 풍속 차에 의해 바람시어가 발생한다. 이 때 평균지속시간은 약 11시간 50분으로 나타났으며 발생 빈도는 6%로 매우 적게 나타났다.



[그림 24] 남동풍형(주풍) 시 모식도(좌), 남동풍형 일기도(우)

(나) AWS 바람벡터 분석

[그림 25]에서 보는 것과 같이 바람시어가 처음 발생하였을 당시 제주공항과 제주청의 풍향이 다른 방향으로 나타나고 그 풍속 또한 2 ~ 3kt 정도로 매우 약하였고 오등 또한 풍향은 반대였고 바람도 약하였다. 바람시어 발생 1시간 후부터 제주공항도 남서풍이 들어오기 시작했고 풍속이 강해지면서 풍속 차에 의한 바람시어가 발생하였다.



[그림 25] 제주도의 AWS 바람벡터(2006.07.14.1130KST(발생 후-좌),1830KST(발생 전-우))

<표 15>에서 보면 바람시어 발생 3시간 전에 제주공항과 오등은 풍속차이가 매

우 약하게 나타났고 2시간 이전부터 오등의 풍속이 세지면서 제주공항보다 풍속이 5kt 이상 차이가 나기 시작했다. 이는 한라산에서 넘어오는 바람이 물뿔현상으로 인해 난류 및 돌풍이 발생하면서 오등지역에 영향을 준 것으로 생각된다.

<표 15>바람시어가 나타나기 전 제주공항과 오등의 풍속차이(단위 : kt)

지 명	0900KST		1000KST		1100KST		바람시어 발생	
제주공항	북	5	북	2	서	5	남동	4
오 등	남동	6	남동	8	남동	10	남동	10
풍속차이(제주-오등)		1		6		6		6

또한 제주공항과 제주청의 풍속차이가 바람시어 발생시간이 가까울수록 더 커지는 경향을 보이며 제주청이 제주공항보다 풍속이 강한 경향을 보였다(표 16).

<표 16> 바람시어가 나타나기 전 제주공항과 제주청의 풍속차이(단위 : kt)

지 명	0800KST	0900KST	1000KST	바람시어 발생
제주공항	2	5	2	4
제 주 청	4	8	8	12
풍속차이	-2	-3	-6	-8

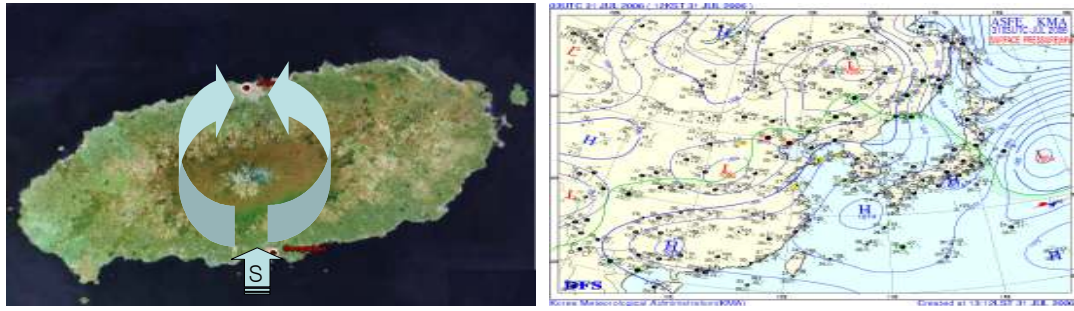
남동풍은 조사기간 동안 주풍으로 들어오는 경우보다는 수렴하는 경우가 많은 특징을 보였고 앞의 사례는 남동풍이 강하게 들어오는 경우를 예로 들은 것으로 이 때 <표 15>, <표 16>과 같은 특징은 나타났지만 그 사례일수가 너무 적어 일반적이라 하기엔 무리가 있겠다.

다) 남풍류

(1) 수렴 발생 시

(가) 발생현상

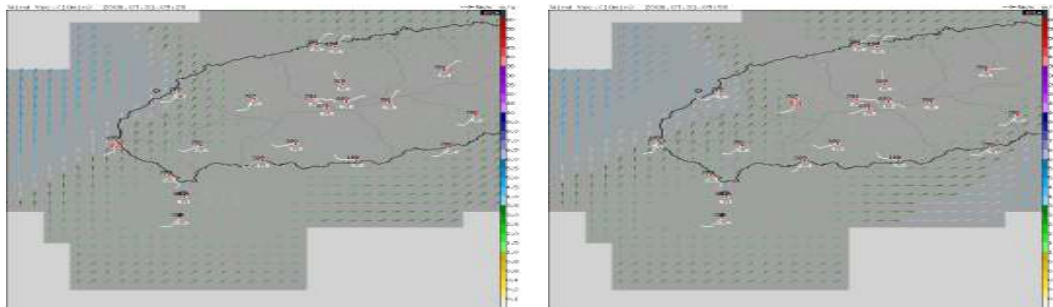
mT기단에서 남풍이 제주도에 유입되면서 한라산을 중심으로 해서 동쪽과 서쪽 두 방향으로 나뉘게 되는데 두 방향의 바람은 정반대의 바람(남서풍과 북동풍)으로 수렴됨으로써 강한 바람시어가 발생한다. 남풍의 수렴현상으로 인한 발생빈도는 27%를 차지하였으며 지속시간은 약 4시간 30분 정도로 대부분 짧게 나타났다.



[그림 26] 남풍형(수렴) 모식도(좌), 남풍형 일기도(우)

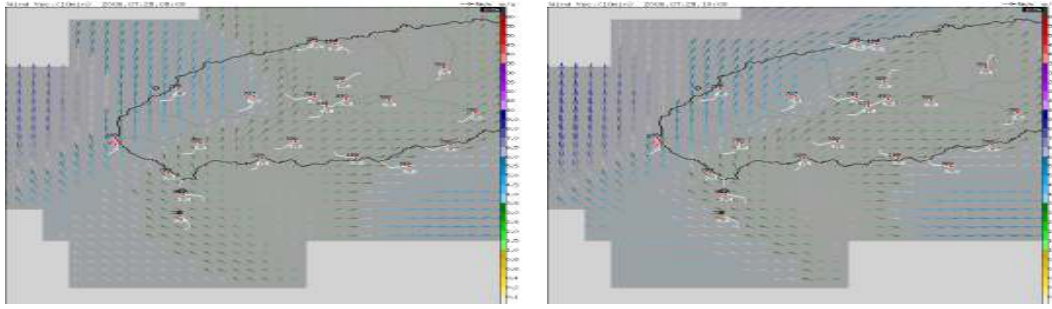
(나) AWS 바람벡터 분석

[그림 27]에서 보면 동쪽에서는 남풍이 한라산을 중심으로 동서로 나누어지면서 동쪽의 바람은 유수암을 지나 한라산의 능선을 넘으면서 풍속이 매우 약해지는 경향을 보였고 제주공항은 해풍의 영향을 받아 남, 남동, 남서풍이 유입되었다. 바람벡터로써는 바람시어가 발생하기 전과 발생한 후에 다른 관측지점과의 특징적인 연관성을 찾기 힘들었다.



[그림 27] 제주도의 AWS 바람벡터(2005.07.31.0920KST(발생전-좌),0930KST(발생후-우))

북태평양 고기압에서 남풍이 수렴하여 바람시어가 발생한 경우를 정리하면 <표 17>과 같다. 평균 지속시간은 약 3시간 20분으로 나타났고 바람시어가 나타나기 전부터 유수암이 풍속이 세게 불고 한라산 능선을 넘으면서 풍속이 약해지는 경향을 보인다. 이외에 바람시어가 나타나기 전에 동서로 선행현상을 알아보았으나 각각의 사례마다 일치하는 특징이 없는 경향을 보였다.



[그림 29] 제주도의 AWS 바람벡터(2006.07.28.0900KST(발생전-좌),1030KST(발생후-우))

남풍이 주풍으로 유입하는 경우는 북태평양 고기압에서는 단 1회 발생하였기에 남풍 주풍 시의 지속시간 및 선행현상을 결정짓기엔 부족함이 있겠다.

3. 결론

3.1 통계적 분석 결과

- 바람시어 총 발생횟수는 560회이며, 2003년 - 159회, 2004년 - 96회, 2005년 - 163회, 2007 - 163회 발생하였다.
- 2003년~2006년의 바람시어 월별분포는 3월이 평균 17회로 빈번하게 발생하였고 1월, 2월, 12월, 4월 순으로 나타났다. 반면 10월에는 평균 1회, 지속시간 평균 2시간 40분으로 가장 낮게 나타났다.
- 2003년~2006년의 바람시어 계절별 분포는 겨울철이 cP기단의 지속적인 강풍으로 인한 바람시어로 인해 총 186회, 지속시간 7시간 40분으로 가장 두드러지게 나타났고, 봄철 총 173회, 여름철은 총 130회, 가을철이 71회로 나타났다.
- 바람시어 발생 시 봄철에는 저기압과 고기압의 영향으로 남서풍, 북서풍이 탁월하였고 여름철에는 mT기단에 의한 남서풍, 남동풍이 두드러졌으며 가을철에는 고기압, 저기압, cP기단의 북서풍, 북동풍이 겨울철에는 cP기단에 의한 북서풍이 탁월하게 나타났다.

3.2 기압패턴 분석 결과

- 북쪽저기압 : 남서류 바람시어 착안사항

수렴 시	발생빈도	지속시간	850hPa	선행현상(제주공항-선홀의 풍속차)			
	38%	약 7시간 30분	20kt 이상	2H 전 5kt 이상			

주풍 시	발생빈도	지속시간	850hPa	선행현상(유수암과의 풍속 차, 단위 kt)			
	28%	약 6시간 56분	30kt 이상	-3H	-2H	-1H	바람시어 발생
				-1.0	+1.8	+4.8	+6.6

- 북쪽저기압 : 남풍류 바람시어 착안사항

수렴 시	발생빈도	지속시간	선행현상				
	29%	약 7시간 26분	다른 관측지점과의 특징적인 연관성 없음				

주풍 시	발생빈도	지속시간	850hPa	선행현상(유수암과의 풍속 차, 단위 kt)			
	7%	약 3시간 19분	30kt 이상	수렴에 의한 바람시어와 동반	-2H	-1H	바람시어 발생
				-2	0	4	

- 남쪽저기압 : 남서풍류 바람시어 착안사항

수렴, 주풍 시	발생빈도	지속시간	선행현상				
	7%	1시간미만	관측지점별 연관성 찾기 어려움				

- 남쪽저기압 : 남동풍류 바람시어 착안사항

주풍 시	발생빈도	지속시간	선행현상 - 오등과의 풍속 차(kt) (제주공항/오등 풍속)				
	36%	약 14시간 23분	-3H	-2H	-1H	바람시어 발생	
			-7(2/9)	-2(4/6)	-8(3/11)	-7(10/17)	

- 남쪽저기압 : 남풍류 바람시어 착안사항

수렴 시	발생빈도	지속시간	선행현상(수렴 후 주풍으로 바뀜)				
	43%	약 7시간 20분	수렴 : 제주공항 부근으로 수렴현상 발생 유수암 풍속 강 유수암 지나면서 제주공항주변 풍속 약 주풍 : 물뿔현상 발생				

- 북태평양고기압 : 남서풍류 바람시어 착안사항

수렴 시	발생빈도	지속시간	선행현상		
	3%	1시간미만	북쪽 저기압에서 보여주었던 선홍과의 연관성 없음		

주풍 시	발생빈도	지속시간	선행현상(유수암과의 풍속 차, 단위 kt)		
	38%	약 5시간 50분	-2H	1H	바람시어 발생
			-2.6	-1.8	3.2

- 북태평양고기압 : 남동풍류 바람시어 착안사항

수렴 시	발생빈도	지속시간	선행현상		
	21%	약 2시간	관측지점별 연관성 찾기 어려움		

주풍 시	발생빈도	지속시간	선행현상(제주공항과의 풍속차, 단위 kt)				
				-3H	-2H	1H	바람시어 발생
			오등	1	6	6	6
		제주청	-2	-3	-6	-8	

- 북태평양고기압 : 남풍류 바람시어 착안사항

수렴 시	발생빈도	지속시간	선행현상		
	27%	약 3시간 20분	제주공항 부근으로 수렴현상 발생 유수암 풍속 강 유수암 지나면서 제주공항 주변 풍속 약		

주풍 시	발생빈도	지속시간	선행현상(유수암과의 풍속 차(kt))			
	6%	약 9시간	수렴에 의한 바람시어와 동반	-2H	-1H	바람시어 발생
				-9	-3	-1

4. 참고문헌 및 웹사이트

제주공항기상대 2005 : 제주공항 저층난류 경향 분석, 항공기상 현업연구, 141-151.

제주공항기상대 2006 : 제주공항기상대, 항공기상 예보기술지침 II, 116-119.

제주공항기상대 2006 : 남풍류에 의한 저층윈드시어 발생특성 및 예보 가이드스. 항공기상 현업 연구, 156-165.

항공기상대, 2007 : 제7장 항공기상특보, 항공기상업무지침. 7/21-24.

<http://www.atmos.ucla.edu/~fovell/AS120/hydraulic.html>

<http://www.morninggloryaustralia.com>

http://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_jump