

## 집중관측을 통한 서해연안의 대기 수직구조 특성

문 승 의 · 노 재 식 · 김 백 조 · 하 창 환\* · 최 성 식\*  
부산대학교 대기과학과 · 부산지방 기상청  
(1997년 6월 13일 접수)

### On the Characteristics of Vertical Atmospheric Structure in the Western Coastal Region through the Intensive Observation Period

Sung-Euil Moon, Chae-Shik Rho, Baek-Jo Kim, Chang-Hwan Ha\*, and Sung-Sik Choi\*

Dept. of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

\*Pusan Regional Meteorological Office

(Manuscript received 13 June 1997)

The intensive meteorological observations including pibal balloon at Ungcheon, airsonde and 10m meteorological tower observations at Gulup-Do, where are located in the western coastal region, are taken to investigate the characteristics of the upper and lower atmospheric structure and the local circulation pattern during the period of 17 to 22 September 1996. The diurnal variations of weather elements(i.e. air temperature, humidity, pressure, and wind speed) at Gulup-Do are analyzed and discussed with those at four inland meteorological stations. The vertical profiles of wind vector, orthogonality( $\Omega$ ), and shear obtained from the pibal observations are also presented to examine the change of wind structure according to the synoptic-scale pressure system's movement.

The diurnal temperature changes at Gulup-Do are more sensitive than that of inland meteorological stations in case of the inflow of southwesterlies but are not dominant due to the ocean effect under the influence of relatively cold northerlies. A well defined mixed layer is developed from the 500m to the maximum 1700m with a significant capping inversion layer on the top of it. It can be found from the vertical profiles of wind vector that the wind become generally strong at the interface heights between cloud layers and non-cloud layers. The maximum wind shear is appeared at the height where the variation of wind direction induced by the passage of synoptic-scale pressure system is accompanied with the increase of wind speed. Based on the wind orthogonality, the change of wind direction with height is more complicated in cloudy day than in clear day. In case of a fair weather, the change of wind direction is showed to be at around 2km.

**Key words:** upper and lower atmospheric structure, mixed layer, wind shear, wind orthogonality.

#### 1. 서 론

동북 아시아에 위치한 한반도는 주변이 황해, 남해, 동해로 둘러싸여 해양의 영향을 크게 받는다. 특히 서해 연안지역에는 난후기 동안 습하고 따뜻한 남서기류가 찬 황해상을 이동할 때, 수증기속이 강화되어 생기는 집중호우나 기류의 하층부가 냉각되어 발생하는 해무, 난후기 동안 차고 건조한 시베리아 기단이 황해상을 지나면서 해양으로부터 현열과 잠열의 공급으로 일어나는 기단변질 그리고 중관 기압계의 해상 통과로 야기되는 파랑 등의 영향으로 악기상이 빈번히 발생하며, 이로 인해 교통소통과 산업 운송수단의 방해, 재난사고를 유발

시킨다(Moon, 1981; 민경덕, 1974; 백종진, 1986).

우리나라 연안지역에서 실시된 상층 대기관측에 관한 연구로는, 기상연구소(1980, 1986)에서 남서 연안지역(군산일원)에서 파이발 관측을 행하여 그 지역의 해풍의 연직구조와 간단한 에어존데 관측으로 서해 중부연안(태안반도 부근)의 해무발생시 대기 연직구조를 조사한 것을 한 예로 생각할 수 있다. 저층대기에 관한 관측결과와 분석으로 문승의 등(1984)에 의해 고리 원자력발전소의 입지타당성을 조사하기 위해 역전층의 발생빈도, 시작, 소멸, 및 지속시간에 관한 조사가 있다. 또한 박순웅 등(1989)은 해륙풍의 순환과 연관된 혼합층의

Table 1. Observation time and running time of Pibal observation at Ungcheon during the period of Sep. 18 to Sep. 22, 1996

Date	Observation Time(LST)	Balloon Type	Starting Time	Running Time	Ending Reason	Remark
1996. 9. 18.	0000	ML - 161	09 : 00	27' 00"	CLOUD	
	0300	ML - 161	12 : 22	27' 20"	CLOUD	
	0600	ML - 161	15 : 00	24' 00"	CLOUD	
	0900	ML - 161	18 : 00	20' 00"	CLOUD	
	1200	ML - 160	21 : 00	20"	CLOUD	NO OBSERVATION
	1500	ML - 160	24 : 00	30"	CLOUD	NO OBSERVATION
	1800				RAIN	NO OBSERVATION
1996. 9. 19.	2100				RAIN	NO OBSERVATION
	0000				RAIN	NO OBSERVATION
	0300				RAIN	NO OBSERVATION
	0600	ML - 160	15 : 12	08' 00"	CLOUD	
	0900	ML - 161	18 : 04	17' 00"	CLOUD	
	1200	ML - 160	21 : 55	16' 00"	CLOUD	RE-STARTING
	1500	ML - 160	24 : 40	30' 00"	CLOUD	RE-STARTING
1996. 9. 20.	1800	ML - 160	03 : 00	09' 00"	CLOUD	
	2100	ML - 161	06 : 00	08' 00"	CLOUD	
	0000	ML - 160	09 : 03	20' 20"	CLOUD	
	0300	ML - 159	12 : 12	43' 00"	BALLOON EXPLOSION	
	0600	ML - 159	14 : 45	35' 40"	BALLOON EXPLOSION	
	0900	ML - 159	18 : 00	27' 00"	BALLOON EXPLOSION	
	1200	ML - 160	21 : 35	20' 00"	OPERATION STOP	
1996. 9. 21.	1500	ML - 160	24 : 00	21' 00"	OPERATION STOP	
	1800	ML - 160	03 : 00	14' 00"	FOG	
	2100	ML - 161	06 : 02	27' 00"	BALLOON EXPLOSION	
	0000	ML - 159	08 : 49	19' 40"		
	0300	ML - 159	12 : 04	34' 00"	BALLOON EXPLOSION	
	0600	ML - 159	15 : 00	35' 00"	REGION OBSTACLE	
	0900	ML - 159	18 : 00	35' 20"	REGION OBSTACLE	
1996. 9. 22.	1200	ML - 160	21 : 00	17' 00"	OPERATION STOP	
	1500	ML - 160	00 : 02	19' 00"	OPERATION STOP	
	1800	ML - 160	03 : 20	16' 00"	OPERATION STOP	
	2100	ML - 161	06 : 04	27' 00"	BALLOON EXPLOSION	
	0000	ML - 161	09 : 00	38' 20"	OPERATION STOP	

Table 2. Observation time and maximum balloon height of airsonde observation at Gulup-Do during the period of Sep. 18 to Sep. 20, 1996

Run No.	Starting Time(LST)	Running Time	Max. Balloon Height(m)
AIR1809	0900	20' 36"	3.200
AIR1815	1500	54' 32"	10.470
AIR1821	2100	22' 25"	3.370
AIR1903	0300	26' 39"	5.580
AIR1909	0900	20' 02"	5.400
AIR1915	1500	1 <sup>h</sup> 10' 47"	10.640
AIR1921	2100	39' 58"	9.190
AIR2003	0300	37' 12"	6.450
AIR2009	0900	9' 01"	2.150
AIR2015	1500	1 <sup>h</sup> 18' 26"	14.330

일변화 과정을 살펴보기 위하여 중부 서해안과 그 내륙 지방에서 지상, 에어존데 및 파이발의 특별관측을 실시하여 혼합층이 해풍 진입전에는 빨리 성장하며 해풍 진

입과 동시에 그 성장속도가 둔해짐을 확인하였다. 한영호 등(1991)은 해수온도의 변동에 따른 우리나라 서해안의 기온과 습도변화를 분석하여 해안지방의 기상특성

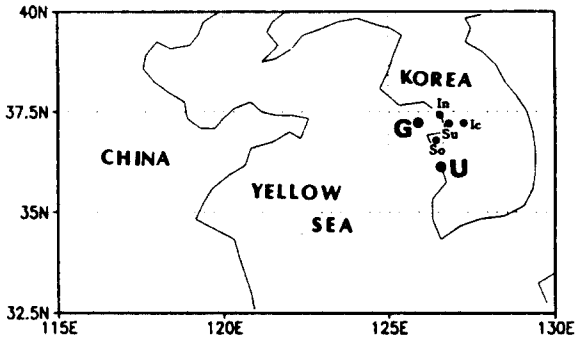


Fig. 1. Location of observation sites. Point U (Ungcheon) is the pibal observation site and Point G(Gulup-Do) is the surface (10m) and airsonde observation site. The other sites are the surface meteorological stations of Korea Meteorological Administration, i.e., Ichon(Ic), Incheon(In), Suwon(Su), and Sosan(So) used for the comparative analysis.

을 밝힌 바 있으나, 다른 복합적인 요인에 의한 것은 앞으로의 연구과제로 두었다. 이태영 등(1989)의 연구에 따르면 우리나라 여름철의 평균적 지상풍 구조중에서 특히 서해안에 나타난 특징은 경도풍이 아주 약한 날의 해풍 시작 시각은 1200~1300LST이며 최대해풍이 나타나는 시각은 1500~1600LST이었다. 봄철 중관 바람이 서풍 계열이고 맑은 날에 대해 서풍이 약한 경우 서해안 지역에서는 해풍이 시작할 때(1000~1100LST 경) 습도는 최대에 달하며, 그 이후 일변화의 영향을 받아 오후에 습도가 감소하는 경향을 보였고 서풍이 강한 경우는 평균 바람의 서풍 성분이 약간 증가하였고 습도, 기온, 기압의 변화 정도가 약간 감소하였을 뿐 그 변화 형태는 전자와 아주 유사함을 밝혔다(박영산 등, 1991). 최효(1993)는 동해의 5개 연안측후소에서 3년간 관측된 연안 표층풍의 풍계를 조사하여 일반적으로 동해에서 탁월풍이 여름에는 남서풍이고 겨울에는 북서풍이라는 통설과 다소 다른 결론을 얻었다. 이처럼 해안지역의 국지 기상의 차이는 해안 지역 주변의 지형, 해륙풍과 중관 바람의 풍향과 풍속에 기인함을 알 수 있었다. 국외의 연구를 살펴보면, Simpson(1996)은 해풍이 해안선과 직각에서 평행하게 불 때까지 낮동안 순전(veer)해야 한다는 간단한 수학적 이론에 반하여 실제 관측된 해풍의 호도그래프는 이같은 방향으로 회전하지 않는 것에 대해 지형이 크게 영향을 미친다고 결론지었다. Atkinson(1981)은 해안지역에 대표적인 국지풍인 해륙풍에서 낮동안 해풍이 발달할 때, 기온은 하강하고 습도가 증가함을 보였다. Yu et al.(1970)과 Vanwijk et al.(1990)은 연안지역의 내부 경계층에서 풍속을 관측하여 내부 경계층내에서의 풍속변화 양상을 밝혔다.

한편, 해상에서의 기상관측은 관측선 또는 관측부이(Buoy)에 의존하고 있으나 광범위한 해역에서 동시적인 관측이 이루어지기에는 매우 힘든 실정이다. 김규명 등

(1992)은 한반도 근해에서의 기온과 기압의 중관관측 자료를 사용하여 해상풍 모델을 개발하였으며, 조병길(1996)은 관측자료가 부족한 해양상 대기의 기온을 추정하기 위해 대기-해양 혼합 에너지 평형 모델을 이용하여 특히 해상위 850hPa면의 기온이 ECMWF 자료와 아주 근접하게 추정됨을 보였다.

이러한 문제의 해결 노력과 함께 정규 관측자료로는 연안 기상특성이나 해륙풍과 같은 중규모 대기순환 특성을 상세히 조사하기 어려우므로 여기에는 연구목적에 맞는 집중관측이 필요하다.

따라서 본 연구의 목적은 집중 관측기간동안 서해안에서 실시된 상층과 지상 집중 대기관측으로 얻은 기상자료를 토대로 인근 육상관측소의 그것과 비교하여 기압골 통과시 서해 연안기상 특성을 파악하고 바람벡터의 연직구조, 바람의 직교성 및 연직시어를 조사하여 연안역에서의 상, 하층 바람의 특성을 알아보고자 한다. 이같은 연구는 해수면 위를 이동해 오면서 변질되는 기단에 대한 물리적 변화를 정량화할 수 있는 해양-대기 혼합 모델 개발과 해상풍 모델 개발에 크게 기여할 것이다. 더 나아가 하계 서해 연안에 빈번히 발생하여 해난 사고 유발, 항공기 운항 차질 등으로 큰 경제적 피해를 주는 해무나 전선무의 발생원인 규명 및 예측시스템 개발 차원에서 이러한 연구가 중요한 기초자료로 활용되리라 사료된다.

## 2. 자료 및 분석방법

### 2.1 자료

서해 연안역의 상층 대기구조의 특성을 알아보기 위해서 1996년 9월 18일부터 9월 22일까지 약 5일간 충남 서천군 웅천부근 해변가에서 3시간 간격의 파이발 관측으로 얻은 고도별 풍향, 풍속자료(Table 1)와 경기도 웅진군 덕적면 굴업도에서 6시간 간격의 에어존데 관측으로 얻은 고도별 기온과 상대습도자료(Table 2)가 이용되었으며, 그리고 굴업도에 설치된 지상 10m의 기상탑에서 관측된 기온, 기압, 상대습도, 일사, 풍향, 풍속자료가 하층 대기구조를 분석하는 데 사용되었다. 또한 중관상태의 변화를 조사하기 위하여 기상청 발행 지상일기도와 3시간 간격의 GMS IR 영상자료도 사용되었다. 그리고 본 연구의 파이발 관측이 실시된 웅천, 에어존데 및 지상 집중관측이 행해진 서해 굴업도 그리고 인근 육상관측소들을 Fig. 1에 나타내었다.

### 2.2 분석방법

서해 연안지역의 지상 기상요소, 특히 기온, 습도, 풍속의 특성을 파악하기 위하여 Fig. 1에 제시된 인근 육상관측소의 기상자료와 비교하였으며, 기온과 Clausius-Clapeyron 방정식을 통해 유도되는 노점온도의 연직분포와 파이발 관측에서 구한 바람자료를 토대로 바람벡터의 연직구조, 바람의 직교성 및 연직시어를 조사하여 상층 대기구조를 파악하였다.

파이발 관측으로 얻은 바람자료를 토대로 바람벡터의 연직구조를 알아보기 위해서 바람의 동서성분과 남북성분으로 각각 구분하여 고도별로 분석하였다. 여기서,  $u$ ,

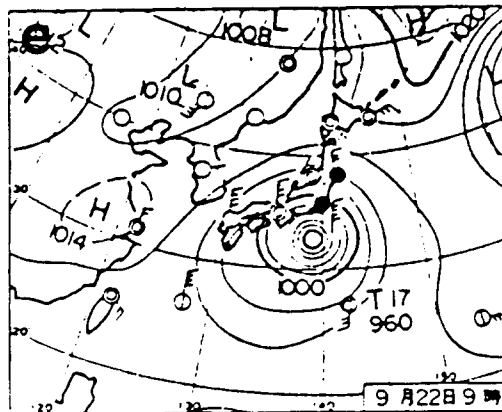
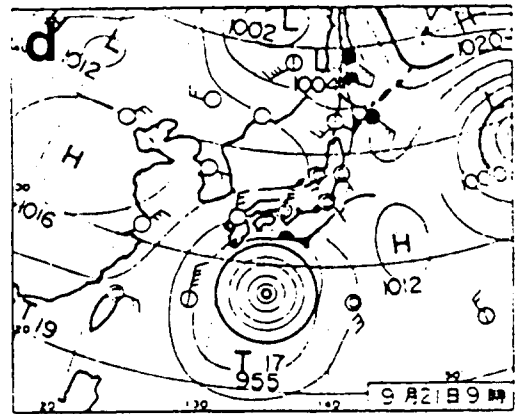
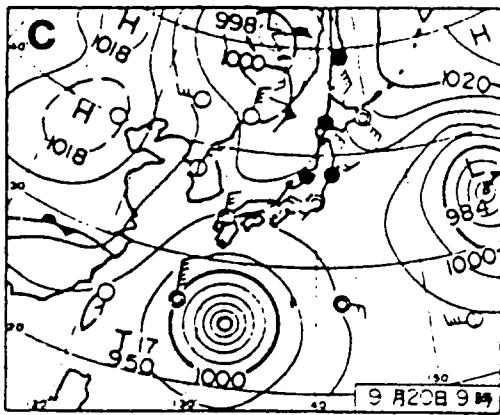
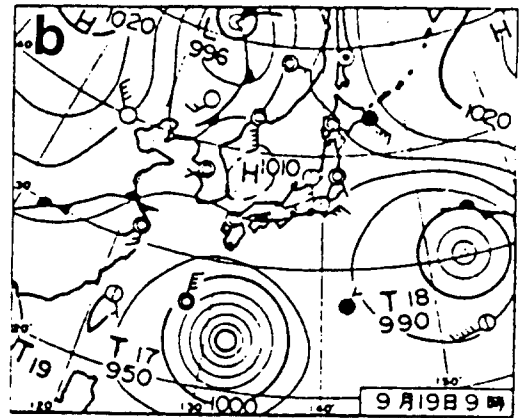
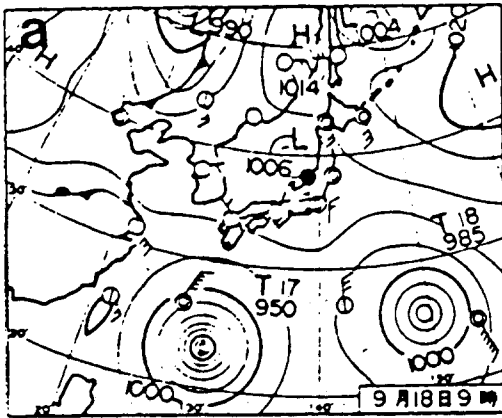
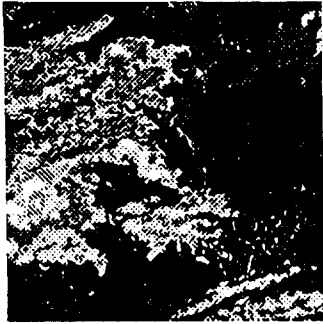
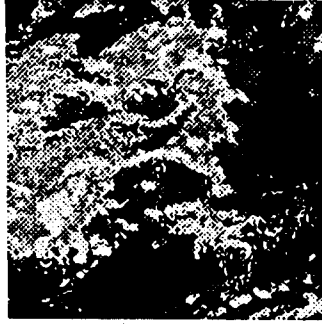


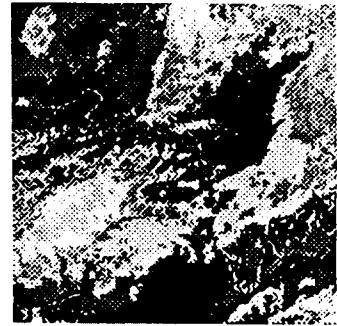
Fig. 2. Synoptic surface weather charts during the period of 0900LST 18 to 0900LST 22, September, 1986.



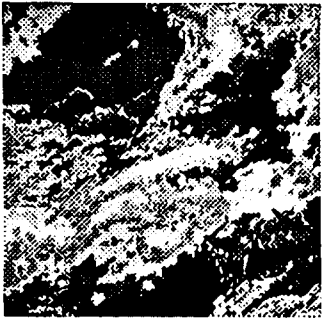
1996. 09. 18. 12 LST



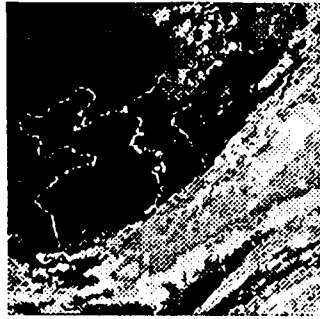
1996. 09. 18. 15 LST



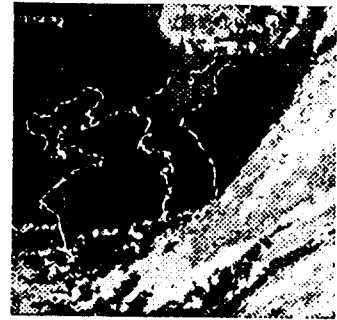
1996. 09. 19. 18 LST



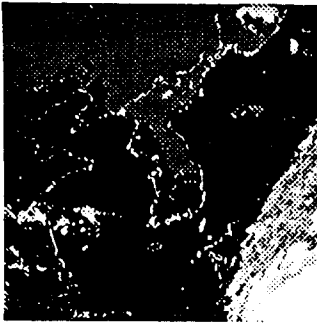
1996. 09. 19. 21 LST



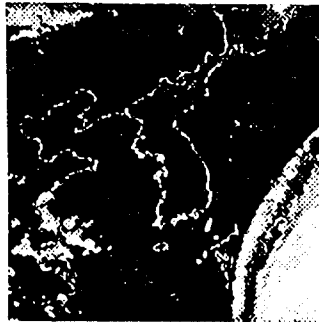
1996. 09. 20. 12 LST



1996. 09. 20. 15 LST



1996. 09. 21. 09 LST



1996. 09. 21. 15 LST



1996. 09. 22. 09 LST

Fig. 3. Same as Fig. 2 except for GMS IR imageries.

v성분이 양의 값이면 각각 서풍과 남풍이 부는 것을, 음의 값을 가지면 동풍과 북풍이 부는 것을 의미한다.

중관 기압계의 움직임에 따라 풍향의 전환이 일어나는 고도를 분석하기 위하여 바람의 연직 직교성( $\Omega$ )을 분석하였다. 바람의 직교성은 기준고도와 임의고도에서

풍향의 변화정도를 나타내는 값으로서  $\Omega$ 가 0인 경우는 바람의 방향이 서로 수직이고 1인 경우는 기준고도와 임의고도에서의 풍향이 같음을 의미하며  $\Omega$ 가 -1인 경우는 기준고도와 임의고도에서 풍향이 반대가 되는 경우를 말한다. 여기서는 상,하층의 풍향의 변화를 잘 반

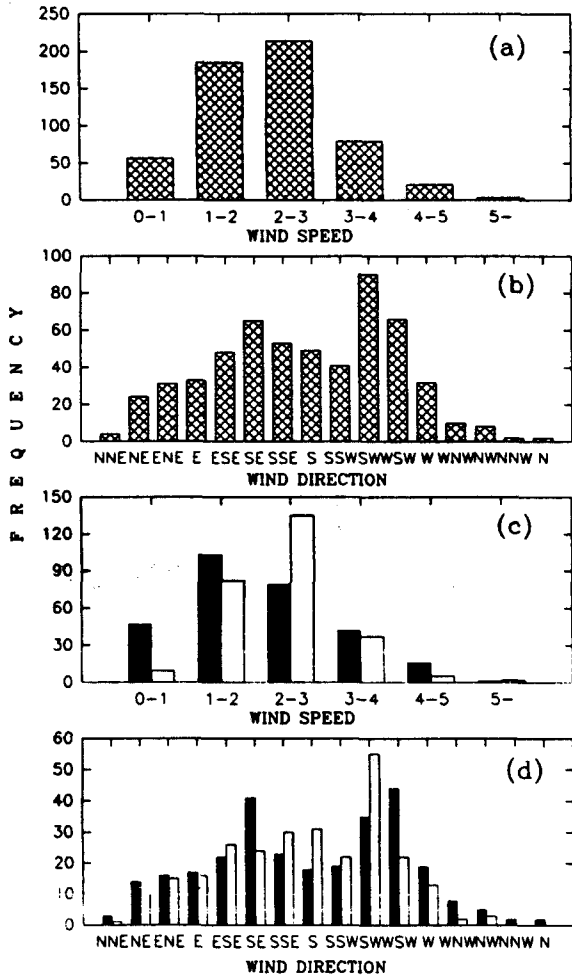


Fig. 4. Occurrence frequencies for each of wind direction and wind speed at Gulup-Do during the period of 17~21 Sept. 1996(a,b) and those of nighttime(fill bar) and daytime(open bar), respectively(c,d).

영하는 1.5km를 기준고도로 삼았다. 바람의 직교성(wind orthogonality)은 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$\Omega(z) = \frac{\vec{V}(z) \cdot \vec{V}_s}{|\vec{V}(z)| \cdot |\vec{V}_s|} \quad (1)$$

여기서,  $\vec{V}(z)$ 는 임의의 고도에서,  $\vec{V}_s$ 는 기준고도에서의 바람벡터이다.

고도별 풍속과 풍향 변화가 모두 고려된 바람의 연직 시어를 고도별로 다음과 같이 계산하였다(Leftwich and Wu, 1988).

$$SH = \frac{\sqrt{\Delta u^2 + \Delta v^2}}{\Delta z} \quad (2)$$

여기서,  $\Delta z$ 는 두 층간의 고도차이며  $\Delta u$ 와  $\Delta v$ 는 두 층에서 부는 바람의 동서성분과 남북성분을 각각 의미한다.

### 3. 결 과

#### 3.1 종관 기상상태

먼저 집중관측이 실시된 9월 18~22일의 기간은 문(1982)이 조사한 기압배치형별로 본 계절구분에 따르면 초가을(9월 8일~27일)에 속하며 특히 이 기간의 기압 배치형의 평균 발생빈도는 시베리아 고기압형이 1회, 기압곡형이 11회, 이동성 고기압형이 19회, 대상 고기압형이 8회, 여름형이 11회로 나타났다. 관측기간동안 지상일기도의 기압배치(Fig. 2)와 **GMS IR** 영상에 나타난 구름대의 이동모습(Fig.3)을 통해 종관 기상상태를 파악하였다. 9월 18일에는 우리나라의 서해 연안역은 이동성 고기압의 가장자리에 위치하고 중국의 동북지방에 놓인 저기압(996hPa)의 영향으로 서풍내지 남서풍이 탁월한 기압배치를 보이며 위성사진에서도 저기압에 동반된 구름대가 조금씩 우리나라 쪽으로 이동하고 있음을 알 수 있다(Fig. 2a). 9월 19일에는 한반도 북쪽의 중심기압이 996hPa인 저기압의 영향으로 대기가 불안정하며 전국적으로 구름이 많고 소나기 오는 곳이 많았으며, 상층운은 6°/6hr정도로 빠르게, 하층운은 다소 느리게 동진하여 우리나라에 접근하고 있었다(Fig. 2b). 9월 20일에 북서쪽에서 접근해 오는 이동성 고기압의 영향을 받아 우리나라는 대체로 맑은 날씨를 보였으나 남부지방은 일본 남쪽에 위치한 태풍과 저기압에 동반된 구름대의 영향을 받고 있었다(Fig. 2c). 그리고 9월 21~22일은 고기압의 영향으로 전국이 대체로 맑은 날씨를 보이고 있었다(Fig. 2d and 2e).

#### 3.2 기상요소들의 일변화

집중관측 기간동안 서해 연안역의 기상요소의 일변화 특성을 고찰하기 위해서 굴업도 서쪽 해안가에 설치된 지상 10m의 기상탑으로부터 관측된 자료를 인근 육상 관측소(인천, 수원, 서산, 이천)의 그것들과 비교하였다. 먼저 굴업도의 지상 10m에서 관측된 바람에 대한 풍향별, 풍속별 발생빈도를 풍향 16방위, 풍속 6등급으로 각각 구별하여 Figs. 4a 와 4b에 나타내었다. 서해 연안역의 집중관측 기간동안 남서풍계열(남서풍, 서남서풍)과 남동풍계열(남동풍, 남남동풍)의 바람이 탁월하게 나타나며, 북서풍계열과 북동풍계열은 앞의 두 계열의 바람보다 훨씬 낮은 발생빈도를 나타내었다. 이는 이 기간동안 통과한 기압골과 이동성 고기압의 영향으로 판단되며, 이러한 종관상황은 앞에 보인 문(1982)의 연구결과와 상응한다. 풍속의 경우, 2~3m/s이 전체 발생빈도의 38%로 가장 많았고 그 다음으로 1~2m/s의 순이며, 5m/s이상도 3회 나타났다. 그리고 관측 기간동안의 평균풍속은 2.2m/s이었고 표준편차는 0.91m/s이었다. 서해 연안역의 지상바람 특성에 미치는 해륙풍 효과를 알아보기 위해 Figs. 4c 와 4d에 밤(1800~0600LST)과 낮(0600~1800LST)으로 각각 나누어 풍향과 풍속의 발생빈도를 제시하였다. 주간의 평균풍속은 2.3m/s이었고 야간의 평균풍속은 2.1m/s로 나타나 야간의 풍속이 0.2m/s정도로 다소 약하게 나타났다. 계급별 풍속의 발생빈도를 살펴보면, 야간의 경우 최대 발생빈도는 1~2m/s으로 나타났으며, 주간의 경우는 2~3m/s

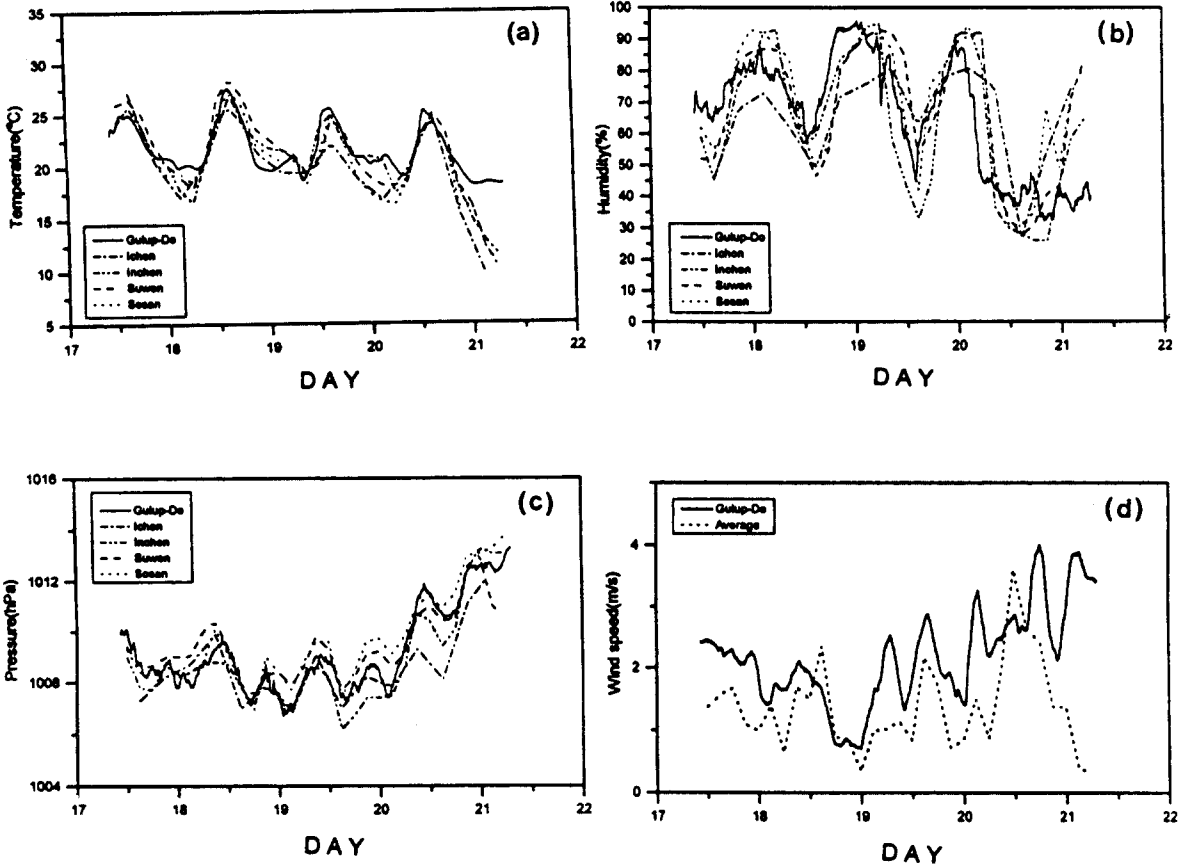


Fig. 5. Diurnal variations of the temperature(a), relative humidity(b), pressure(c), and wind speed(d) at Gulup-Do and the inland meteorological stations during the period of 17~21 Sept. 1996. In case of wind speed(d), the solid line is 9-point running mean observed at Gulup-Do and the dashed line is the mean at 4 inland meteorological stations.

의 풍속이 가장 많았다. 풍향의 발생빈도를 보면, 야간과 주간간의 차이가 뚜렷하였으며, 특히 주간에는 남서풍이 55회로 가장 많은 발생빈도를 보였지만 야간에는 서남서풍과 남동풍계열이 다소 탁월하게 나타났다. 이는 낮동안에 해풍과 밤의 다소 약한 육풍의 영향으로 사료된다.

Fig. 5는 굴업도에 관측된 기상요소(기온, 습도, 기압, 풍속)의 일변화와 인근 육상 기상관측소의 그것들의 특성을 살펴보기 위한 것이다. 기온의 일변화를 살펴보면, 인근 육상 관측소에서 기온의 일교차가 크고, 집중관측이 실시된 굴업도에서 작은 양상을 보인다. 관측기간동안 굴업도의 평균기온은 21.7°C이고 표준편차는 2.34°C이었으며 1500LST이후부터 서서히 하강하기 시작하다가 9월 19일 0600~0900LST에 인천기상대에서 강수가 기록된 시점부근부터 다른 육상관측소와 달리 굴업도와 인천의 기온이 다소 상승하였다가 하강하는 것을 볼 수 있다(Fig. 5a). 특히 굴업도는 19일과 20일 모두 8시 10분경에 18.7°C와 19.2°C으로 각각 최저기온을 기록하였으며, 이같은 현상은 기압골 전면에 위치한 이 두 지점에 따뜻하고 습한 남서기류가 유입되었기

때문으로 사료된다. 9월 20일 오후에서 21일 오전까지 굴업도의 기온은 전일과 큰 차이를 보이지 않으나 인근 육상관측소에서 기온의 급하강이 나타나는 데, 이는 기압골 통과후 상대적으로 한랭한 북풍계열의 유입에 의해 육상 관측소에 기온의 급하강이 일어났으며 해상에서는 해양으로 부터의 현열과 잠열의 공급으로 그다지 큰 기온 하강이 일어나지 않았기 때문으로 판단된다. 이러한 기온 하강으로 말미암아 습도의 일변화에서도 이 시점부터 굴업도와 육상관측소간의 습도 차이가 크게 나타나고 굴업도의 습도는 거의 40%정도로 지속된다. 또 습도의 일변화에서 최대 습도가 출현한 시각이 굴업도에서 가장 빠르고 그 다음이 인천, 서산, 수원, 이천순으로 나타나 기압골 통과시 지점간의 시간지연(time lag)이 존재함을 알 수 있다(Fig. 5b). 기압의 일변화에서는 앞의 두 요소(기온, 습도)와 달리 굴업도와 인근 육상 관측소간의 뚜렷한 차이를 발견하기 어려울 뿐만 아니라 그 변화경향도 비슷하였으며, 단지 서산의 기압이 다른 지점보다 다소 높게, 인천이 다소 낮게 나타났다(Fig. 5c). 서해 연안에서 관측된 바람과 육상 관측소의 그것과의 비교를 용이하게 하기 위해서 굴업도의 10분간격

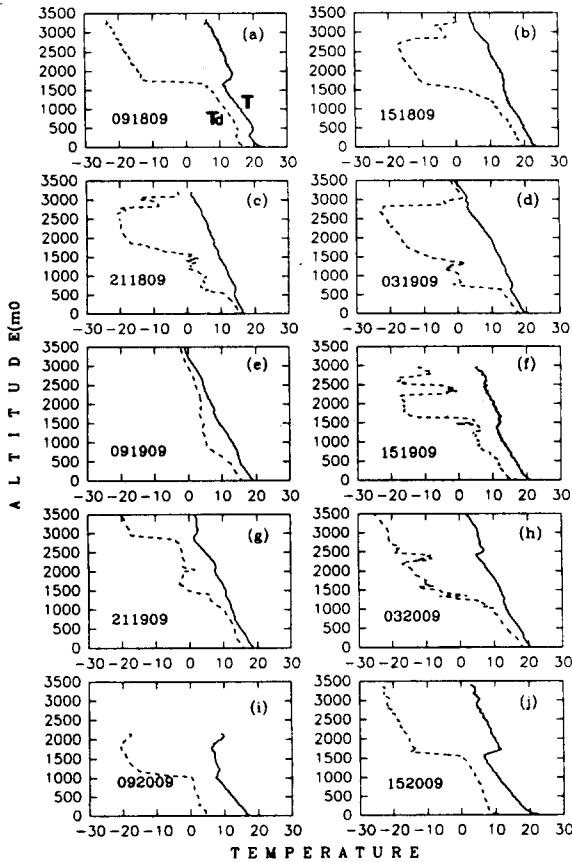


Fig. 6. Vertical profiles of observed temperature and dew point temperature for each of flight of airsonde at Gulup-Do during the period of 0900LST 18~1500LST 20, September, 1996.

풍속자료를 이동평균시켰고 육상관측소의 풍속도 4지점의 것을 평균하였다. 풍속의 경우를 보면, 관측기간동안 인근 육상관측소의 평균 풍속은 1.37m/s이었고 굴업도는 2.19m/s으로 다소 강하게 나타났으며 이같은 차이는 특히 야간에 뚜렷하게 나타났다(Fig.5d).

### 3.3 대기연직구조

Fig. 6은 9월 18일 0900LST부터 20일 1500 LST까지 굴업도에서 에어존데 관측으로 구한 기온과 노점온도의 연직분포를 나타낸 것이다. Fig. 7은 역전층의 형성고도와 시간 발전과정을 살펴보기 위하여 기온의 연직분포만을 제시하였다. 먼저 9월 18일 0900LST의 경우 지상에서 1713m까지 상대습도가 75%정도인 습윤층(또는 혼합층)이 존재하며, 지상으로부터 고도 346m까지의 기온감률(10.1℃/km)이 건조단열감률보다 크게 나타나 절대불안정층이 형성되어 있었고 고도 346m와 1648m에 역전층이 존재하고 있었다(Fig. 6a). 특히 고도 1648m와 1908m사이에 존재하는 상부 역전층은 기온 상승율이 11.5℃/km로 하부의 그것보다 다소 강하

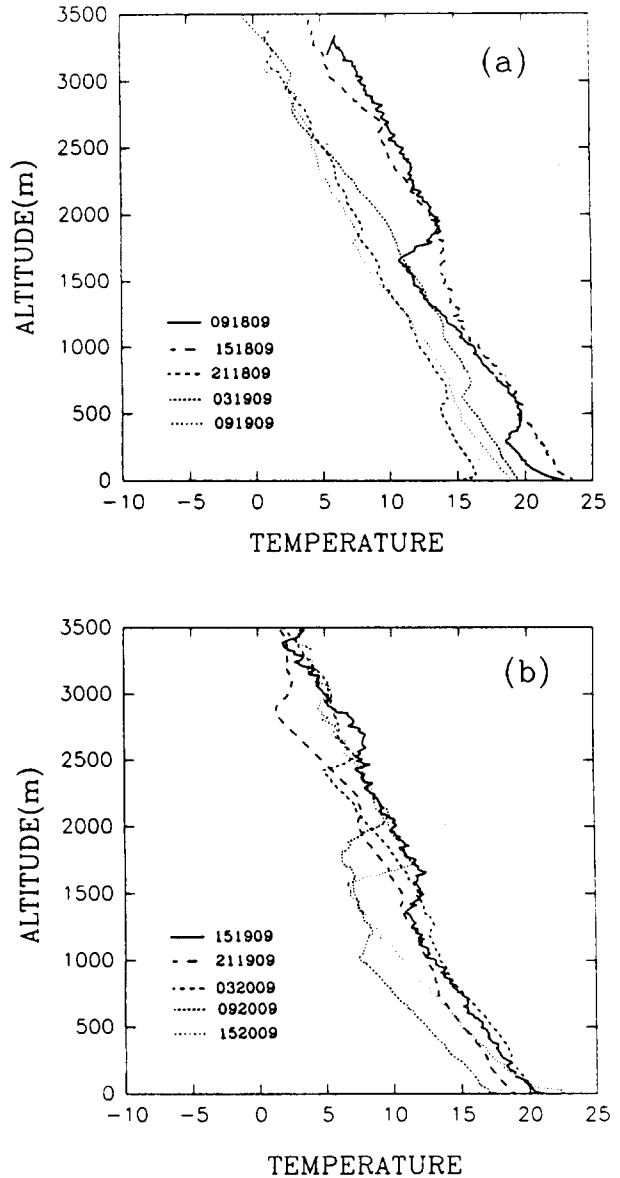


Fig. 7. Vertical profiles of 6-hourly temperature at Gulup-Do during the period of 0900LST 18~1500LST 20, September, 1996.

게 나타났다(Fig. 7a). 1500LST의 경우 습윤층의 고도가 1275m로 0900LST보다 438m정도 낮게 나타났으며 고도 1500m와 3000m사이에 상부에 상대습도가 18.7%정도인 건조층이 존재하였다(Fig. 6b). 2100LST의 경우를 보면, 지상으로부터 47m까지의 접지역전층과 고도 550m의 하부 역전층이 존재하였고(Fig. 7a), 습윤층은 고도 576m까지 이르렀다(Fig. 6c). 9월 19일 0300LST에 지상에서 고도 636m까지 불안정층이 형성되어 있었고 이 층의 상대습도는 87%이상으로 상당히 습윤함을 알 수 있었다(Fig. 6d). 이것은 상대적으로 고



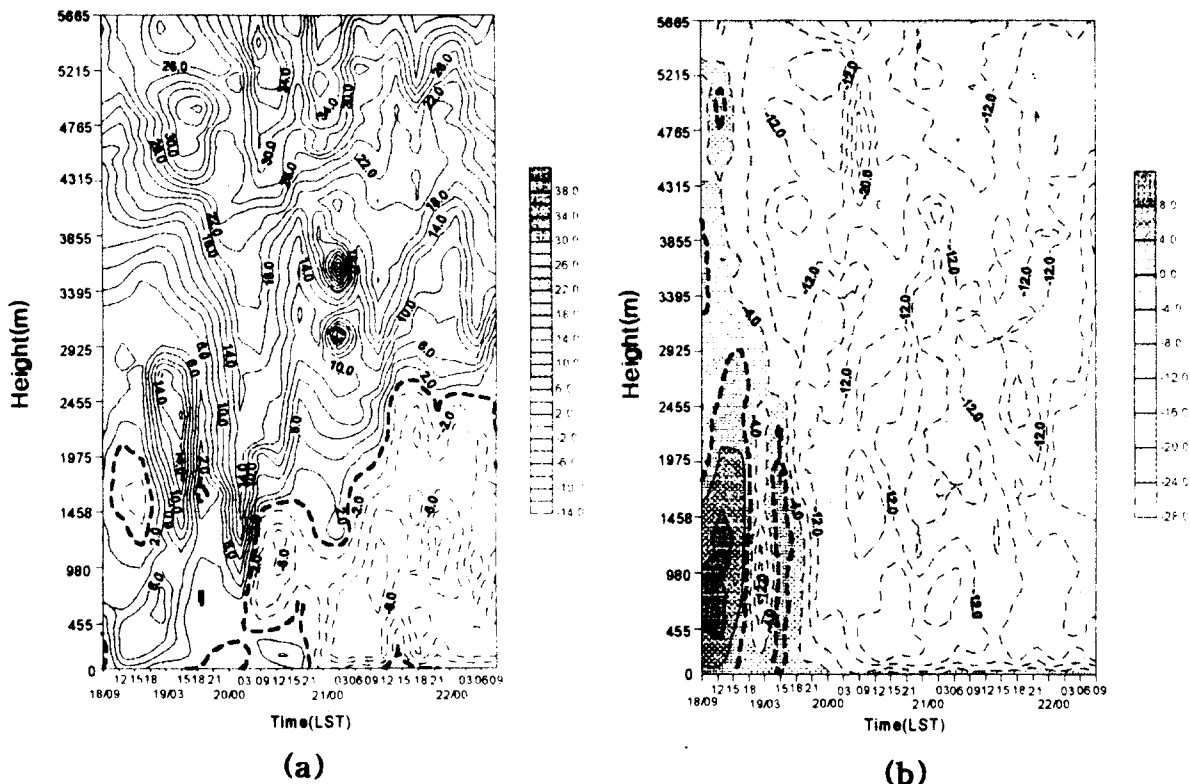


Fig. 8. Time-height plots of zonal(a) and meridional(b) wind components at Ungcheon during the period of 0900LST 18~0900LST 22, September, 1996.

은 다습한 남서기류의 유입에 의해 생성된 것으로 보인다. 고도 625m부근에 약한 하부 역전층이 존재하였으며 이 고도는 바로전 관측시 나타난 하부 역전층보다 70m정도 다소 높은 고도이다(Fig. 7a). 강우가 바로 끝난 직후인 0900LST의 경우 상, 하층 대기 모두 습윤하였으며 875m부근 54%로 다소 상대적으로 건조하게 나타났다(Fig. 6e). 이 때의 지상기온은 18.86°C이었고 고도 3500m의 기온은 -1.02°C이였으므로 기온 감율이 5.8°C/km이며, 이는 대기가 습윤하다고 가정한다면 대기가 불안정한 것으로 간주할 수 있다. 1500LST의 경우 지상으로부터 고도 1634m까지 불안정층이 존재하였고 하부 역전층은 1360m부근에 나타났다(Fig. 6f). 2100LST의 경우 지상보다 고도 600~800m에 90%로 습도가 다소 높게 나타났으며(Fig. 6g) 2870m부근에 약한 상부 역전층이 존재하였다(Fig. 7b). 이는 고기압 가장자리에 위치하게 되어 침강하는 공기에 의해 형성된 것으로 사료된다. 9월 20일 0300LST를 살펴보면, 지상에서부터 고도 1210m까지 습윤층이 형성되어 있으며(Fig. 6h), 고도 2420m에 상부 역전층이 존재한다(Fig. 7b). 0900LST의 경우 고도 1050m이상 등온층이 형성되어 있고 지상의 상대습도는 44%로 관측기간동안 가장 낮았으며(Fig. 6i), 고도 증가에 따라 습도가 감소하는 대기 연직구조를 보인다. 이러한 습윤층이하의 고도에서 대기 하부가 그 상부보다 상대습도가 다소 낮은 것은 기압골 통과에 뒤따른 다소 건조한 북동 내지 동풍계

열의 기류가 유입되었기 때문으로 판단된다. 1500LST에서는 지상 1588m이하의 고도에 불안정층이 존재하고(Fig. 6j) 그 층 바로위 100m에 걸쳐 역전층이 존재한다(Fig. 7b). 이처럼 기압골 통과 전 대기 저층부에 습하고 따뜻한 남서기류의 유입에 따라 하부 역전층 고도가 점점 낮아지고 상대습도가 증가한 것으로 생각된다. 기압골 통과후 하부 역전층의 고도는 다시 증가하며 지상이 그 위층보다 다소 건조한 양상을 보인다. 또한 상부 역전층은 고기압권내에서 침강하는 공기괴에 의해 형성된 것으로 생각된다. 결론적으로 해양상 대기의 하층의 습윤함과 그 상층의 건조함이 뚜렷이 나타나며, 전선부근에서 상층의 습윤함도 알 수 있다.

종관 기압계의 이동에 따른 바람벡터의 연직구조와 바람의 직교성, 연직시어를 살펴보면(Figs. 8, 9, and 10), 먼저 9월 18일은 이동성 고기압의 영향으로 낮동안에는 북동 내지 동풍 계열의 바람이 우세한 기압배치이나 바람벡터의 연직구조에서는 지상 1~2km부근에서 약한 동풍성분이 나타나지만 대기 상하층에서 서풍성분이 동풍성분 보다 강하게 나타나고 있다(Fig. 8). 바람의 남북성분은 지상으로부터 3km부근까지 남풍성분이 강하게 나타나, 전체적으로 하층에서는 남서풍이, 상층에서는 북서풍이 우세한 구조를 보인다. 서쪽에서 이동해 오고 있는 기압골에 동반된 구름대의 영향으로 지상 3km부근까지 남풍계열이 우세하게 나타나고 그 이상의 고도에서는 북서풍 계열의 바람이 탁월하게 나타

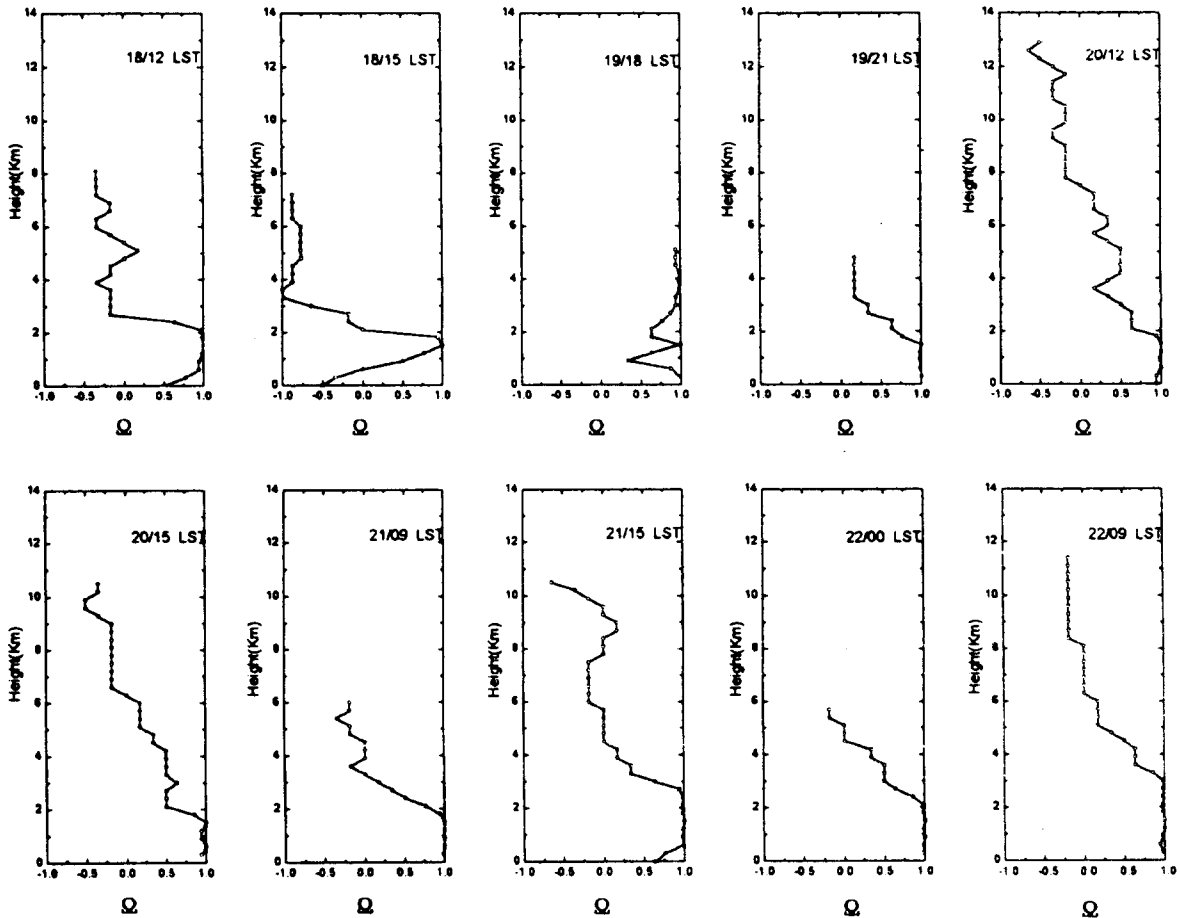


Fig. 9. The orthogonality ( $Q$ ) of observed wind at Ungcheon during the period of 0900LST 18 to 0900LST 22 Sept. 1996.

나고 있다. 바람의 직교성( $Q$ )을 보면 9월 18일 1200LST에  $Q$ 의 변화가 2km부근에서 기준고도와 직각인 상태의 풍향으로 변하게 되는데, 이는 바람벡터의 연직변화에서도 나타났듯이 남서풍에서 북서풍으로 풍계의 전환을 의미하며 그 고도가 2km 부근임을 알 수 있다(Fig. 9). 풍향, 풍속의 효과를 모두 고려한 바람의 연직시어에서 9월 18일 1200LST의 경우 고도 4.6km와 5.1km에  $4.61 \times 10^{-3} s^{-1}$ 과  $4.55 \times 10^{-3} s^{-1}$ 으로 시어의 최대가 나타나고, 그 다음은  $5.33 \times 10^{-3} s^{-1}$ 인 7km 부근이었다(Fig. 10). 이것은 3km이상의 고도에서 남서풍이 북서풍으로 바뀌면서 풍향의 변화와 풍속의 강화의 영향으로 판단된다. 1500LST에서 바람의 시어는 고도 1.5km에서  $2.94 \times 10^{-3} s^{-1}$ 로 최대가 나타나며, 이는 바람의 직교성에서 1500LST에 풍향이 급변했기 때문으로 사료된다(Fig. 10). 위성사진에서도 1500LST에 구름이 약화되고 바람벡터의 연직성분에서도 북서풍 계열의 바람이 강화되고 있으므로 구름이 관측지점을 통과하면서 풍향이 크게 변화한 것으로 보인다. 또 9월 18일 1500LST의 기온 및 노점온도의 연직변화에서 지상으로부터 고도 1km와 고도 3~4km부근에서 습윤층이,

그 사이 고도에서 건조층이 존재하고 있으며, 이것은 고도에 따라 구름의 유무를 평가할 수 있게 한다(Fig. 6b). 또 이것을 같은 시각의 바람 시어의 변화와 비교해 보면, 구름의 형성된 고도에서 그렇지 않은 고도로 바뀌면서 시어의 효과가 가장 크게 나타남을 알 수 있고, 그 고도가 1.5km, 2.1km, 4km부근임을 확인할 수 있다. 9월 19일의 경우는 한반도 북쪽에 위치한 저기압과 우리나라 북서쪽에 존재하는 1020hPa 고기압의 영향권에 놓여 있음을 짐작할 수 있다(Fig. 2b). 위성사진에서 9월 19일 1800LST에서 20일 1200LST까지 구름의 이동은 매우 빠른 속도로 동쪽으로 이동하고 있으며, 이것으로 기압계의 이동에 따라 북서풍 계열의 바람유입이 탁월하고(Fig. 3), 특히 바람의 동서성분에서는 고도 1.5km과 5km부근에서 서풍성분의 유입이 강화된 것으로 해석된다. 19일 바람의 시어는 2100LST에 고도 1.8km에서  $12.01 \times 10^{-3} s^{-1}$ 로 최대가 나타나는 데(Fig. 10), 이것은 바람의 직교성과 바람벡터의 연직성분에서 나타났듯이 남서풍에서 북서풍으로 풍향이 바뀌고 기압계의 흐름속도가 빨라져 시어효과가 최대로 나타난 것으로 분석된다. 9월 20일의 경우 한반도 북쪽의 저기압

집중관측을 통한 서해연안의 대기 수직구조 특성

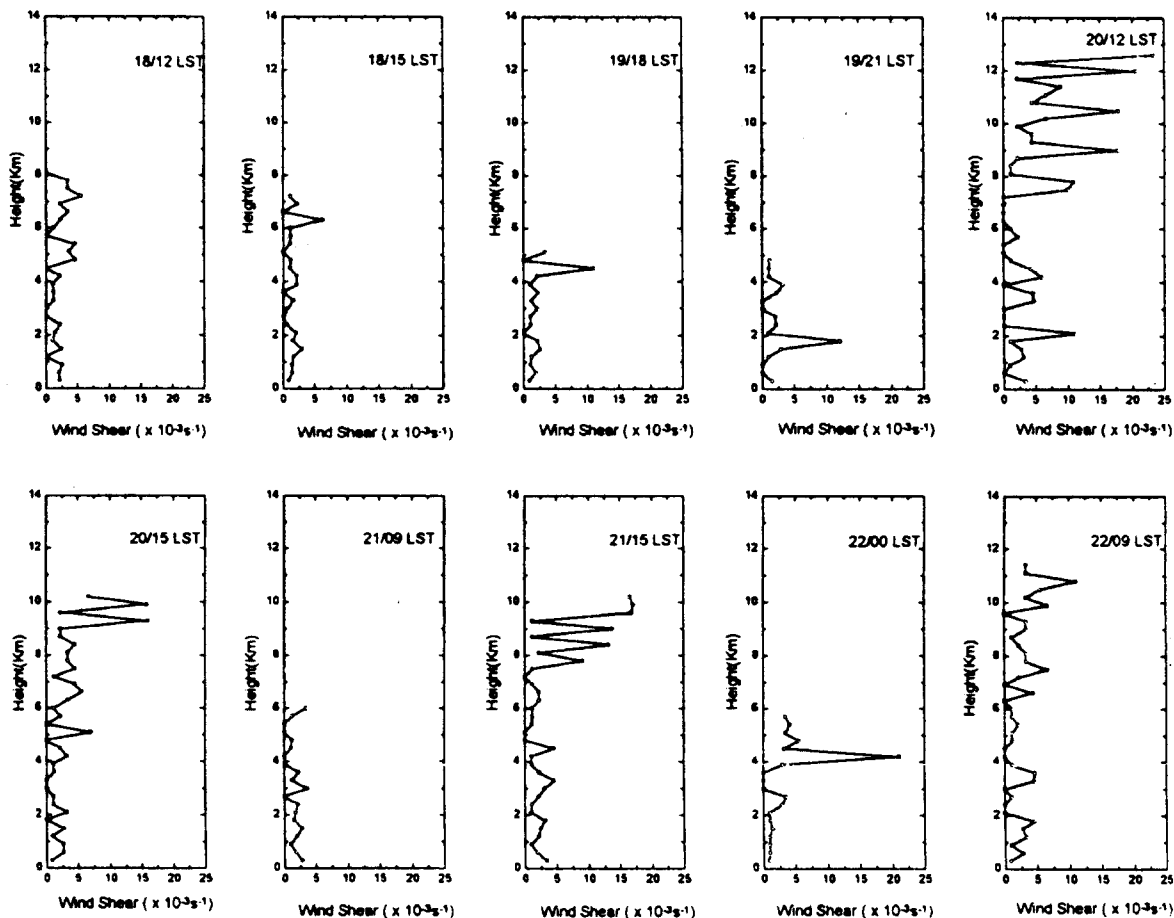


Fig. 10. Same as Fig. 9 but for vertical profiles of wind shear.

이 연해주 방향으로 빠져나가고 북서쪽에서 고기압이 다가오고 있으며 우리나라 남해안에 약간의 구름대가 걸쳐있는 상태이다(Fig. 2c). 바람벡터의 연직구조에서 20일 0300LST경부터 지상으로부터 1.5km부근까지 북동풍계열의 바람이 유입되고 있으며 그 이상의 고도에서는 북서풍계열의 바람으로 탁월하게 나타나고 있다(Fig. 8). 바람의 직교성은 고도 2km부근에서 0의 변화가 크게 나타나는데, 이것은 북동풍이 북서풍으로 전환됨을 의미하고 풍속도 구름이 있는 상태보다 일반적으로 강화된 것으로 해석된다(Fig. 9). 바람의 시어는 1200LST에 고도 2km부근에서  $10.86 \times 10^{-3} s^{-1}$ 로 다소 큰 값을 보이다가 8km이상의 고도에서 다시 크게 증가하여 12km부근에서  $20.91 \times 10^{-3} s^{-1}$ 로 최대가 된다(Fig. 10). 이러한 연직구조는 곧 2km부근의 풍향의 전환과 고도 8km이상에서 풍속이 증가하였기 때문이다. 20일 1500LST의 기온 및 습도의 변화에서도 고도 1km이상에서 기온과 노점온도의 차가 거의 일정하게 유지되고 있음을 확인할 수 있다. 9월 21, 22일은 고기압의 영향을 받고 있어 구름이 거의 없는 상태이다(Figs. 2d and 2e). 바람벡터의 연직분포에서 고도 약 2.5km이하에서 북동풍의 영향이, 그 이상의 고도에서 북서풍이 강하게 나타나고 구름이 있는 경우의 연직상태보다 단조로운

풍향변화가 보인다(Fig. 8). 서해 연안역에 구름이 존재하지 않는 이 기간의 풍향의 변화는 고도 2km부근에서 일어나며 북동풍이 북서풍으로 바뀌기 때문으로 생각된다. 또 바람의 시어는 풍향의 변화와 풍속의 증가가 있는 고도에서 최대로 나타난다(Fig. 10).

4. 요약 및 결론

1996년 9월 18일부터 22일까지 서해 연안역에서 실시된 집중관측 기간동안 그 지역의 상, 하층 대기 연직구조의 특성을 파악하기 위하여, 굴업도에서 관측된 지상 기상요소들을 인근 육상관측소의 자료와 비교하였고 에어존데 관측으로부터 얻은 기온과 노점온도의 연직분포 특성을 분석하였으며, 웅천의 파이발 관측으로 구한 바람자료에 기초하여 바람벡터의 연직구조, 바람의 직교성 및 연직시어를 조사하였다.

기압골과 이동성 고기압의 통과로 집중관측 기간동안 서해 연안역에서는 남서풍계열과 남동풍계열의 바람이 탁월하였으며, 풍속의 경우 2~3m/s가 전체의 38%로 가장 많이 나타났다. 밤과 낮동안의 풍향과 풍속의 발생 빈도를 분석해 본 결과, 낮동안은 해풍의 영향으로 밤동안보다 풍속이 0.2m/s정도 강하였고 남서풍이 55회로 가장 많은 빈도를 보인 반면, 밤동안은 남서풍과 남동풍

계열이 다소 탁월하게 나타났다. 9월 19일경 우리나라 서해안을 통과한 기압골의 전면에 놓인 굴업도와 인천은 온난 습윤한 남서기류의 유입으로 일중 최저기온이 다른 지점과 달리 오전 8시 10분경에 나타났다. 기압골 통과후 북풍계열의 유입으로 육상 관측소에서 기온의 급하강과 그와 연관된 상대습도의 증가가 관측되었으나, 해양으로 둘러싸인 굴업도에서는 그다지 큰 기온 하강이 일어나지 않음을 알 수 있었다. 섬지방인 굴업도의 풍속이 특히 야간에 인근 육상관측소보다 강하게 나타났다. 기압골 통과에 따른 하층의 남서기류 유입으로 형성된 하부 역전층이나 이동성 고기압의 영향하에서 침강하는 공기괴에 의한 상부 역전층이 거의 모든 관측시각에 존재하였으며, 집중관측 기간동안 혼합층의 고도는 대체적으로 500m~1700m에 존재하였다. 바람의 연직구조에서 서쪽에서 이동해 오는 기압골에 동반된 구름대의 영향으로 지상 3km부근까지 남서풍계열이 우세하고 그 이상의 고도에서는 북서풍의 바람이 탁월하게 나타났다. 바람의 직교성을 나타내는  $\Omega$ 값에서도 2km부근에서 기준고도와 직각인 상태의 풍향으로 변화여 이를 확인할 수 있었다. 또 기온과 노점온도의 연직 분포로 고도별 구름의 유무를 평가할 수 있는 데, 이것을 그에 대응된 시각의 바람시어의 변화와 비교해 보면 구름이 존재하는 고도에서 그렇지 않은 고도로 바뀌면서 시어가 크게 변화하였다. 구름이 존재하지 않은 기간인 9월 21, 22일에서 풍향의 변화는 고도 2km부근에서 일어났으며 그 이상의 고도에서 구름이 있는 대기상태보다 다소 단조로움을 알 수 있었다.

이상으로 서해 연안역의 굴업도에서 관측된 기상요소의 일변화는 인근 육상관측소와 달리 하층 남서기류의 유입시 기온의 변화가 상당히 민감한 반면, 기압골 통과 후 다소 한랭한 북풍계열의 기류가 유입될 때는 해양의 효과로 기온의 변화가 크지 않았으며 이로 인해 상대습도의 급격한 증가도 확인할 수 없었다. 이 지역의 습윤층(또는 혼합층)의 고도는 500~1700m에 존재하였고 그 이상의 고도에 전조층이 존재하였으며 낮동안 그 고도가 다소 증가하였다. 바람벡터의 연직 분포는 구름이 형성되어 있을 때와 그렇지 않을 때, 그 상,하층 구조가 다르게 나타났으며, 일반적으로 구름이 존재하는 층에서 그렇지 않은 층으로 바뀌는 고도에서 풍속이 강화되었다. 또 종관규모 기압계의 변화에 따른 풍향의 변화가 일어나는 고도에서 풍속의 증가가 뒤받침될 경우 그 고도에서 바람시어가 최대로 나타났다. 바람의 직교성에서 대체적으로 구름이 없는 날에 비하여 구름이 있는 경우에 풍향변화가 복잡하였으며, 맑은 날일 경우 평균적으로 2km부근에 풍향변화가 나타났다. 이같은 연구는 종관규모 기압계, 다시 말해 서쪽에서 이동해 오는 고기압이나 저기압의 발달에 미치는 황해상의 열역학적, 운동학적인 연구 뿐만 아니라 최근들어 서해 연안의 공업 발달에 따른 대기오염 대책을 위한 그 지역의 국지순환 특성연구에 상당한 기초자료를 제공할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 특정연구개발사업 "황해 종합 조사 연구"의 세부과제 "해양-대기 관측시스템(과제 번호:YS-02-A)"의 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

참고 문헌

기상연구소, 1980, 남서해안지역(군산일원)에서의 해풍에 관한 연구, MR 80-1, 39pp.  
 기상연구소, 1986, 한국 서해 중부 연안의 해무 특성 조사, MR 86-1, 83pp.  
 김규명, 강인식, 1992, 해상풍 산출 모형과 역학, 한국기상학회지, 28(1), 1-8.  
 문승의, 1982, 한반도를 중심으로 한 기압배치형의 분류, 부산대 논문집, 33, 267-280.  
 문승의, 유혜주, 김유근, 1984, 고리지역의 접지역전에 관한 기후환경학적 연구, 부산대 환경문제연구소보, 2, 69-77.  
 민경덕, 1974, 동계 황해상의 열 및 수증기 수지 해석과 이들이 시베리아 기단의변질에 미치는 영향, 한국기상학회지, 10(1), 1-10.  
 박영산, 박순웅, 1991, 한반도 해안 지역의 봄철 국지 기상 특성에 관한 연구, 한국기상학회지, 27(2), 67-86.  
 백종진, 1986, 한파 내습에 따른 황해상에서의 수증기 증발에 관하여, 서울대학교 석사학위 논문, 34pp.  
 이태영, 신동빈, 박영연, 1989, 남한 지역에서 여름철 기상풍의 평균적 구조, 한국기상학회지, 25(1), 30-42.  
 조병길, 1996, 에너지 평형 모델을 이용한 해상의 기온 추정, 부산대학교 박사학위 논문, 73pp.  
 최 효, 1993, 산업적 활용을 위한 동해 연안표층풍의 특성에 관한 연구, 한국기상학회지, 29(2), 69-84.  
 한영호, 정정실, 1991, 해수온도가 우리나라 서해안 지방의 기온 및 습도에 미치는 영향, 한국기상학회지, 27(3), 197-203.  
 Atkinson, B. W., 1981, Meso-scale atmospheric circulations, Academic Press, 495pp.  
 Moon, S. E., 1981, A synoptic climatological study of the rainy season in East Asia during summer, Doctoral thesis of Tsukuba Univ., 107pp.  
 Leftwich, P. W. and X. Xu, 1988, An operational index of the potential for violent tornado development, Preprint, 15th Conference on Severe Local Storm, Baltimore, Amer. Meteorol. Soc., 472-475  
 Park, S. U., Y. U. Lee and J. H. Bong, 1989, Special observations for the growth of the mixed layer, J. of Korean Meteorol. Soc., 25(3), 138-147.  
 Simpson, J. E., 1996, Diurnal changes in sea-breeze direction, J. of Applied. Meteorol., 35, 1166-1169.  
 Vanwijk, A. J. M., Beljaars, A. C. M., Holtslag, A.

A. M. and W. C. Turkenburg, 1990, Diabatic wind speed profiles in coastal region: Comparison of an Internal Boundary Layer (IBL) Model with Observation, *Boundary Layer Meteorol.*, 51, 49-75.

Yu, T. W., 1970, Diurnal variation of kinetic and internal energy in onshore winds along the upper Texas Gulf coast. *Atmospheric Science Group, Report 19, The University of Texas at Austin*, 45.