

SODAR를 이용한 대기 확산능의 조사

Investigation of Atmospheric Diffusibility Using SODAR

천 성 남 · 박 옥 현

부산대학교 공과대학 환경공학과

(1998년 3월 25일 접수, 1998년 8월 17일 채택)

Sung-Nam Chun and Ok-Hyun Park

Dept. of Environmental Engineering, Pusan National Univ., Pusan, Korea, 609-735

(Received 25 March 1998; accepted 17 August 1998)

Abstract

Various meteorological data obtained by SODAR system in shoreline area surrounding Boryung power plant have been analysed to investigate atmospheric diffusibility.

Important conclusion may be summarized as follows; (i) Stability classification scheme based on σ_θ (standard deviation of wind direction in degree for averaging time of 1 hour) appears to evaluate certain atmospheric situation as more stable class rather than σ_w/\bar{u} scheme where σ_w means standard deviation of vertical turbulent velocity and \bar{u} indicate horizontal mean wind speed. Thus different scheme for stability classification seems to be preferable in order to appropriately estimate lateral and vertical dispersion coefficients σ_y and σ_z , respectively. (ii) As a result of comparisons between 3 available schemes for estimating of mixing height, best one turned out to be the double height scheme where height corresponds to maximum σ_w .

Key words : SODAR, Atmospheric Diffusibility, Shoreline, Stability, Mixing Reight

1. 서 론

대기질 모니터링은 대기 중에 존재하는 오염물질을 측정하거나, 대기경계층에서 오염물질 확산과 유관한 기상인자를 측정하는 것으로서 후자의 경우, 주로 측정되는 항목은 저층 안정도, 역전의 형태, 부력, 난류강도, 혼합고, 풍속 및 중규모 기류 패턴(meso-scale flow pattern) 등이 포함된다. 이와 같은 기상 요소 측정을 위해 현장에서 사용되는 장비 및 방법은 radio-sonde, 높은 고도의 기상탑, tethered-sonde, air-sonde 및 측정장비를 탑재한 항공기 등이

있으며, 이 중 가장 보편적인 관측장비인 radio-sonde는 보통 1일 2회 온도, 기압, 습도 및 바람자료들을 주로 공항근처에서 고도별로 측정하며, 지상에서 측정된 기압, 바람, 온도, 습도, 시정 및 운량 등과 같은 기상 자료들과 함께 처리하여 저층의 안정도, 혼합고 및 풍속 profile 등을 결정하는데 이용된다. 그러나, 이 관측장비를 사용하는 데에는 고비용이 소요되고, sonde가 빠르게 상승하기 때문에 저고도에서의 기상정보 취득에 제약이 있어 지표에 가까운 대기질을 모니터링하고 예측하는 점에서 그 유용성이 떨어진다. Radio-sonde나 tethered-sonde를 천천히 상승시키거나, 기상탑이나 측정장비가 장치된 항

공기를 사용하는 등의 방법으로 저층의 기상 자료를 어느 정도까지는 수집할 수 있지만, 저 고도에서 관측점의 밀도를 증가시키는 것은 그에 따른 비용이 기하급수적으로 증가하는 문제점이 따를뿐 아니라 이들 장비는 시시각각으로 변화하는 대기의 상태를 연속적으로 측정하지 못하는 단점을 가지고 있다. 따라서 측정점에서 기상인자를 직접계측(in-situ)하는 센서를 대신하는 원격센서(remote sensor)가 고안되어 시·공간적으로 연속이면서 높은 해상능(resolution)으로 낮은 고도의 기상 요소들을 측정하기 위한 시도가 이루어지게 되었다. 이들 원격측정장비들은 음향, 빛 또는 전자파가 매질 중에서 전파되는 특성을 이용하는 것으로 이들 대부분은 3차원으로 광범위한 영역을 측정할 수 있다. 이같은 측정 시스템 중 장비가격, tracer의 이용성, 큰 분산 단면, 현재의 개발단계 및 측정 신뢰도 등을 고려할때 음향 신호를 사용하는 것이 유리한 것으로 알려져 있다(Neff and Coulter, 1986).

음향신호를 이용하는 대표적 측정장비인 SODAR는 음향레이더(acoustic radar)라고도 불리며, 1,500 Hz 범위에서 10,000 Hz 범위의 음역 주파수를 가지는 방향성이 있는 순간적인 소리를 공기중으로 방사시키면 이들 파는 그들이 전파되는 대기 공기중에서 온도 혹은 밀도, 풍속 및 습도의 변동에 의해 분산되고, 분산된 에너지는 음파를 내보낸 안테나 혹은 다른 안테나에 의해 수신된다. 수신된 신호로부터 대기 중渦의 열적 거동(thermal activity), 야간의 역전 등에 관한 정성적 혹은 정량적 정보들을 알 수 있으며, 수신된 분산신호의 크기와 주파수로부터 대기경계층의 여러 고도에서 풍속, 온도, 대기층의 구조 파라미터, 난류 강도 그리고 측정이 행해진 대기의 바람장(wind field)에 관한 정량적인 정보를 얻을 수 있다.

본 연구는 SODAR 시스템을 운영하여 기상인자들에 관한 정보를 얻고, 이들로부터 대기 중에서 오염물질의 확산과 유관한 인자들의 변동을 조사하였다. 본 논문은 주로 대기 중에서 오염물질의 확산능력을 지배하는 대기의 열적구조, 연직방향 바람의 분포, 대기안정도, 혼합고의 변동에 대해 다루고 있으며, SODAR에서 얻어진 기상인자에 관한 정보에 기초한 확산 계수의 평가 및 이들의 적용타당성 조사와 이들을 이용한 오염농도 평가는 후속되는 논

문에서 다루어 질 것이다.

2. 분석대상자료

2.1 SODAR의 설치

본 연구에서 사용된 원 자료(raw data)는 보령화력발전소에 설치된 SODAR를 운영하여 얻었다. 보령화력발전소는 충남 보령시에서 북쪽으로 약 10 km 지점의 해안에 위치하고 있으며 보령화력발전소로부터 북동쪽 7km 지점을 지나면서 높이 580m의 조서산을 비롯한 일련의 산계가 위치하며, 남동쪽으로는 차령산맥의 남단에서 갈라져 나온 약 200 m 높이의 낮은 산맥들이 위치하고 있다. 발전소를 중심으로 내륙쪽 반경 약 5 km 이내의 지형은 해발 약 50~70m의 야산이 대부분의 면적에 걸쳐 분포하며, 발전소 동남쪽 약 3 km 지점에 위치한 해발 229m의 봉대산을 정점으로 하는 일련의 산계가 남북방향으로 위치하고 있다. 이 지역은 서해안과 면해 있어 해안 지역의 기후 특성을 나타내며 발전소에서 지금까지 측정된 기상 자료에 의하면, 주풍이 겨울철엔 북풍, 여름철엔 남서풍으로 나타났고, 연평균 풍속은 약 3.12 m/s였으며, 1992년도의 대기안정도는 50% 정도가 중립으로 평가되었다.

SODAR는 대기 중으로 음파를 보내고, 대기 중의渦들에 의해 분산된 음파를 수신하는 장비이므로 이 장비의 운영 장소 선정시에는 수신되는 반향음신호에 잡음(noise)이 끼어들지 않도록 유의해야 한다. 잡음은 광역(broad band) 및 협역(narrow band) 잡음으로 대별되고 전자는 비행기가 통과할 때 나는 소음이나 기차 등이 지나갈 때 바퀴에서 나는 소음등이 대표적이며, 후자로는 기차나 자동차의 경적과 같은 것이 포함된다. 광역잡음은 전체적인 잡음수준(noise level)을 증가시켜 SNR(Signal to Noise Ratio)를 낮추는데 반하여, 협역잡음은 마치 SODAR에서 송신된 음파가 주파수가 전이된 반향음 신호처럼 인식되게 한다. 본 연구에 사용된 SODAR는 사용자가 특정 SNR값 이하가 되는 자료를 바람자료 분석에서 배제시킬 수 있도록 운영가능하기 때문에 광역 잡음에 의한 영향을 배제시킬 수 있는데 반하여 협역잡음은 배제시킬 수 없기 때문에 후자의 경우가 심각한 오류자료를 만들어 낼 수 있으므로 이와 같은 소음의 영향이 최대한 배제

될 수 있도록 SODAR는 발전소 소음의 주 발생 지점인 보일러 및 발전 설비로부터 직선거리로 약 1.8km 떨어진 발전소 부지의 북동쪽 외곽지점에 설치하였다.

2.2 원자료의 수집 및 처리

본 연구에서는 1997년 1월부터 1997년 7월 사이에 보령화력발전소에 설치된 SODAR를 운영하면서 얻은 자료중 결손 기록이 적은 57일의 것을 분석대상 자료로 취하였다. 자료 취득을 위해서는 미국 Radian사의 Echosonde-600 SODAR 시스템을 사용

하였다. 이 시스템은 크게 3개의 음파 송·수신 안테나와 시스템 제어 및 자료 처리 컴퓨터로 구성되며, 음파 송수신 안테나는 외부 소음에 의한 영향이 최소화될 수 있도록 안테나를 둘러싸는 커버인 Cuff가 설치되어 있다. 세 개의 안테나 중 하나는 연직 방향으로 고정되어 있고, 나머지 두 개는 각각 동서 및 남북 방향으로 15°만큼 기울여 설치하여, 각 방향으로 송·수신된 음파의 진동수 변동을 파악하여, Doppler 효과에 의해 풍속을 계산한다.

측정기간 중 SODAR는 세 개의 안테나에서 교대로 150ms의 파장을 가지는 음파를 공기 중으로 내보내고, 난류로 인한 대기의 비균일성 (inhomogeneity) 에 의해 유발되는 음의 분산량을 최저 측정점 50m 높이에서 최고 측정점 700m 높이까지 25m 간격으로 수집하도록 운전되었으며, 상세한 운전조건은 표 1에 정리하였다.

Table 1. Operating parameters of the SODAR used in this investigation.

parameters	Operating Condition-
pulse length	150ms
ping amplitude	18dB
gain	40dB
lowest wind gate	50m
top wind gate	700m
wind gate width	25m
lowest back scatter gate	50m
top backscatter gate	700m
backscatter gate width	10m

3. 결과 및 고찰

3.1 SODAR 반향음도 (echogram)와 대기의 연직방향 열적 구조

대기 중으로 쏘아올린 음향신호의 분산신호 수신

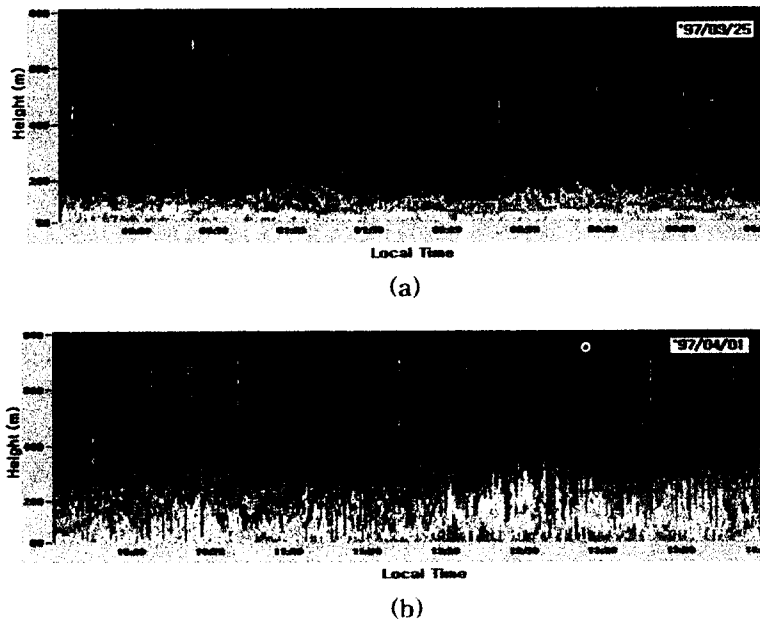


Fig. 1. Two type of characteristic SODAR echograms, (a) shear echos (b) thermal echoes.

값을 처리하여 얻어지는 SODAR 반향음도는 그림 1에 나타난 것처럼 shear echo와 thermal echo로 대별된다(Asimakopoulos *et al.*, 1996). Shear echo는 반향음도가 시간 경과에 따라 평평한 형상을 유지하며, 온위가 고도에 따라 증가하는 안정한 대기 중에서 바람전단에 의한 난류에 의해 나타나며, 지표 위 또는 지표와 떨어진 상부에 안정층이 형성된 대기를 나타낸다. 지표에서 발달하는 석순모양의 thermal echo는 온위가 고도에 따라 감소하는 과단열 대기층 즉 불안정한 대기층에서 나타나는 것으로 지표면이 그 위에 있는 대기에 비해 현저히 따뜻할 때 나타난다. Thermal echo가 간헐적으로 나타나는 것은 열적渦라 불리는 개개의 대류 cell에 의한 것으로 이들 열적渦 사이의 반향신호가 없는 영역은 중립 혹은 단열 하강하는 기괴가 감지되었음을 나타낸다. 날마다 작성되는 SODAR 반향음도는 언제나 그림 1에 나타난 것처럼 단순하지는 않으나 대부분 이런 큰 범주의 분류 기준에 의해 구분될 수 있으며, 이와 같은 대기의 열적 구조변동 또는 복잡성은 지배적인 대기 조건이 끊임없이 변화하고 있음을 나타낸다.

3.2 연직방향 풍속 및 풍향 분포

대기 중에서 오염물질의 수송 및 확산에 가장 크게 영향을 미치는 요소인 바람의 연직방향 분포를 조사해 보기 위해 SODAR 반향음도로부터 대기의 안정도 상태를 분류하고, 이렇게 분류된 안정 및 불안정 조건에 대해 연직방향 풍속 및 풍향의 고도에 따른 변화를 조사하였다.

그림 2(a)는 SODAR 반향음도에 의해 안정으로 분류된 6월 2일 02:00~07:00 사이에 기록된 15분 평균 풍속의 고도에 따른 변화를 나타낸 것이다. 안정층이 형성된 연직방향 고도 약 400m까지의 수평 풍속은 고도증가에 따라 증가하였으며, 일반적으로 적용되는 풍속의 고도에 따른 역수분포 형태를 확인할 수 있었다. 그림 2(b)에 나타난 바와 같이 고도에 따른 수평방향 평균 풍향의 변화는 약 70~220° 범위에 걸쳐 분포하고 있어, 지표 부근의 바람과 상층에서의 바람이 풍향에 있어 완전히 다르며, 동일 고도에서 풍향 변동 또한 크게 나타났다. 따라서 이와 같은 풍향의 고도에 따른 변화를 고려하지 않고 지표에 가까운 곳에서 측정된 풍향자료만을

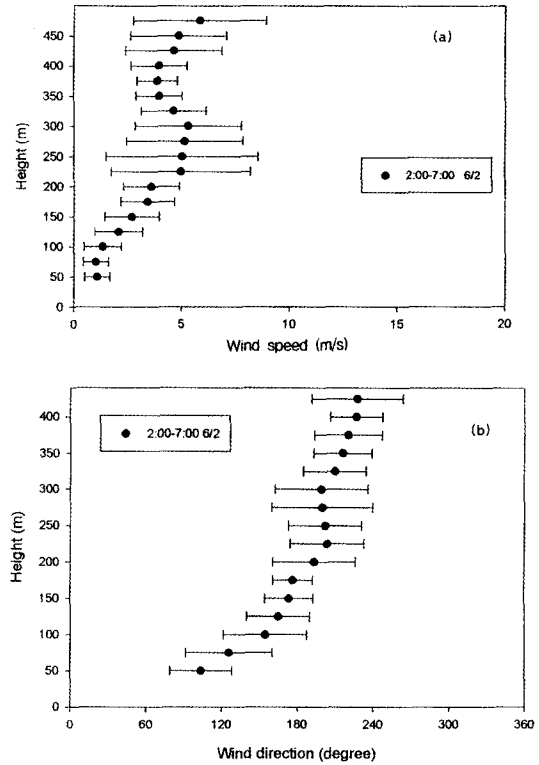


Fig. 2. Variation of wind speed and direction with height in stable boundary layer, (a) wind speed (b) wind direction.

특정 배출원으로부터 배출된 오염물질의 농도를 예측하기 위해 사용하는 경우 plume이 두꺼워진 중·장거리 피해지점에 대해 계산된 대기오염 농도 값은 실제와 현저한 차이를 나타낼 수 있다. 특히 연돌높이가 높은 경우에는 실측치와 평가치 사이의 오차가 더욱 커지게 될 것이다. 또한 고도에 따른 풍향 변동 즉 바람전단으로 인해 적어도 이 지역에서의 중·장거리 수평방향 분산계수 값은 증대될 것으로 보아진다.

그림 3에는 SODAR 반향음도에 의해 불안정으로 분류된 6월 2일 07:00~11:00 사이에 관측된 평균화 시간 15분의 수평 풍향 및 풍속의 고도에 따른 변화를 나타내었다. 안정조건의 대기상태에서와는 달리 약 100 m 이하 고도의 경우를 제외하면 수평 풍속의 고도에 따른 변화는 크게 나타나지 않는 것으로 판단된다. 평균 풍향은 약 700 m 이하 고도에

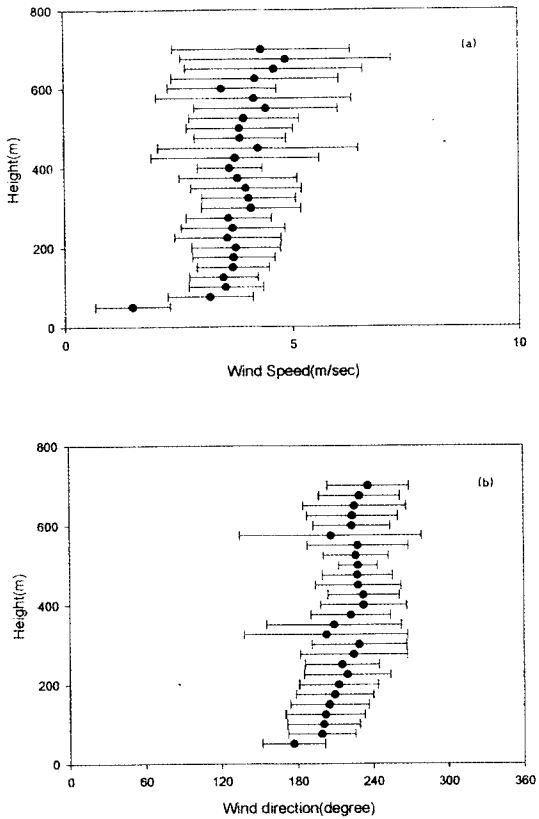


Fig. 3. Variation of wind speed and direction with height in unstable boundary layer, (a) wind speed (b) wind direction.

서 대략 170~260°의 범위에서 변동하여 안정층에서처럼 고도에 따른 체계적 변화를 보이지 않고 약 350m 및 약 600m 고도에서 급격한 변동을 보이고 있다. 이는 대류가 왕성한 불안정 경계층내에서 연직방향으로의 열적渦 때문에 수평 풍속 및 풍향의 변동이 억제되고 대기가 두꺼운 층에 혼합되므로 전 경계층에 걸쳐 이들이 거의 일정한 값을 갖는다(Wyngaard, 1985)는 사실을 부분적으로 입증하는 것 같다.

대류가 왕성한 불안정 대류경계층에서 연직방향 속도는 지표면에서 태양복사에 의한 열적渦로 발생하는 상향속도와 상부 역전층의 존재에 의해 지표로 내려오는 하향속도로 구성된다(Sorbjan, 1991). 그림 4에는 이와 같은 대기 중에서 연직 방향의 속도 분포를 확인해 보기 위해 1월 13일 12:30~14:00에 걸쳐 측정된 평균화 시간 15분에 대한 연직방향 속도분포를 고도 및 시간의 함수로, 그 시간에 기록된 thermal echo와 함께 나타내었다.

그림 4로부터 대류가 왕성한 불안정 대류경계층에서의 연직방향 속도분포는 상향속도 성분과 하향속도 성분이 섞여있음을 알 수 있다. 연직방향 평균 속도가 (-)로 나타나는 13:00~13:15분 근처의 하향속도는 반향음도에 나타난 13:00~13:15분 근처의 하향속도(검게 나타난 부분의 영역)를 나타낸다. 두 그림사이에서 속도분포와 반향음도의 형상이 완전히 일치되지 않는 이유는 SODAR 반향음도가 2

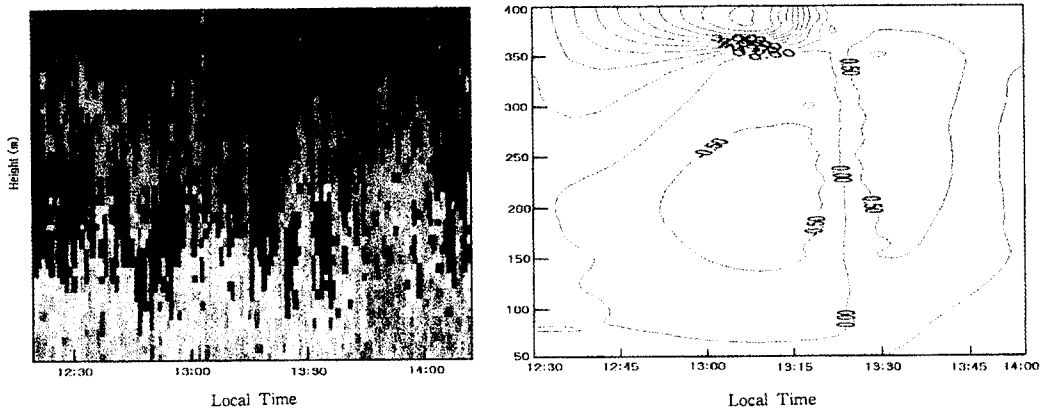


Fig. 4. The echogram of convective plumes and corresponding vertical wind speed isopleths (in m/s, averaging time 15 min.) on 13th. Jan.

Table 2. Characteristics of echogram according to stability categories (Singal, 1993).

Stability class (Pasquill)	Wind direction fluctuation criteria(degrees)	Nature of SODAR echograms	Outlook
Strongly unstable (A)	$\sigma_\theta \geq 23$	i) Well defined thermal plumes up to heights more than or equal to 275m	Clear sunny day with strong solar heating and light/calm winds
Moderately unstable (B)	$18 \leq \sigma_\theta \leq 23$	i) Well defined thermal plumes up to shallow heights (less than 275m) ii) Rising layer with thermal plumes	Moderate solar heating and moderate winds Bright sunny morning
Slightly unstable (C)	$13 \leq \sigma_\theta \leq 18$	i) Thermal plumes up to very shallow heights	Weak solar heating cloudy, moderate to strong winds and late afternoon
Neutral (D)	$8 \leq \sigma_\theta \leq 13$	i) Spiky top layer of height above 150m ii) No structure iii) Darkness due to rain or wind	Early evening hours on clear days After rain or storm, cloudy /windy conditions. During rain or heavy winds
Slightly stable (E)	$4 \leq \sigma_\theta \leq 8$	i) Flat top layer of depth more than 100 m ii) Surface-based layer with spiky, top of depth generally within 150 m iii) Stratified layers of depth more than 200 m	Clear night with moderate winds
Moderately stable (F)	$\sigma_\theta < 4$	i) Surface-based layer with flat top of depth within 100m ii) Stratified layers of height less than 200 m	Clear night with strong radiative cooling and light/calm winds

ping cycle (30초)마다 그려지는데 반하여, 풍속 값은 15분 평균으로 얻어지기 때문이었다. 따라서 풍속의 평균화 시간을 반향음도가 얻어질 때의 그것과 일치시키면 두 그림간 일치도가 높은 연직방향 풍속 분포의 시공간적 구조 형상을 얻을 수 있을 것으로 판단된다(Beran *et al.*, 1971).

3.3 대기 안정도 평가

수평 및 연직 방향으로의 오염물질 확산과 유관한 대기 안정도를 SODAR에서 측정되는 기상인자에 관한 정보를 이용하여 평가하기 위해 Shaw (1971)가 처음으로 반향음도 패턴들로부터 대기안정도를 분류한 이래 여러가지 안정도 분류방법들이 제안되었다. Walczewski (1984, 1983)는 SODAR 반향음도를 연직방향으로 길게 나타나는 type 1, 지면에 닿아 있고 평평한 층 구조를 이루는 type 2, 지면에 닿은 층이 없이 고공수평층을 형성하는 type 3 및 반향음이 없는 type 4와 같이 4가지 type으로 분류 정리하였으며, type 1은 낮동안에, type 2는 한 밤중에, type 3은 아침에, 그리고 type 4는 해가 지는

Table 3. Criteria for determination of stability class (Best *et al.*, 1986).

Stability class	Criterion	
	σ_θ (degree)	σ_w/\bar{u} (dimensionless)
A	> 22.5	> 0.15
B	17.5 ~ 22.5	0.1 ~ 0.15
C	12.5 ~ 17.5	-
D	7.5 ~ 12.5	0.05 ~ 0.1
E	3.5 ~ 7.5	0.0 ~ 0.05
F	0 ~ 3.5	-

저녁에 주로 나타남을 확인하였다. Singal 등(1985, 1983)은 수평방향으로의 풍향의 표준편차 값을 사용하여 Pasquill 안정도 계급을 결정하였고, Singal (1993)은 이렇게 분류된 Pasquill 안정도 계급과 반향음도를 연관지어 안정도 분류표를 표 2와 같이 작성하였다.

Thomas (1986)는 SODAR로 측정·처리된 수평 방향 풍향의 표준편차 σ_θ 로 안정도를 분류하는 scheme을 제시하였으며, Best 등(1986)은 이 방법을 사용하는 것은 매우 평탄하고 균일한 지형조건이

Table 4. Coincidence level of stability classes determined by σ_θ and σ_w/\bar{u} schemes.

σ_θ \diagdown σ_w/\bar{u}		stability class						Total (%)
		A	B	C	D	E	F	
stability class	A	28	10	-	4		-	42 (15.4)
	B	13	8	-	2		-	23 (8.5)
	C	8	11	-	2		-	21 (7.7)
	D	12	12	-	78	17	-	119 (43.8)
	E	4	5	-	41	16	-	66 (24.3)
	F			-			-	1 (0.4)
Total (%)		65 (23.9)	46 (16.9)	-	127 (46.7)	34 (12.5)	-	272

skill-score; (130/272 = 0.48)

아니면 안정도 평가가 잘못될 수 있음을 지적하면서, 또 다른 안정도 계급결정법으로 난류파라미터 σ_w/\bar{u} 의 사용을 제안하였다. 이들에 의해 제안된 안정도 결정기준은 표 3과 같다.

위와 같은 분류기준에 따라 σ_θ 와 σ_w/\bar{u} 값을 적용하여 보령화력 발전소 주변 임해지역에서 평가된 대기안정도의 두 방법간 일치도를 조사해 보기 위하여 표 4와 같은 일치도 표를 만들었다.

σ_w/\bar{u} 를 이용하여 대기안정도를 평가하는 기준은 표 3에 나타난 것처럼 C 및 F등급의 대기안정도가 고려되지 않기 때문에 해당등급의 빈도가 나타나 있지 않다. 두 방법으로 평가된 272개 자료의 안정도 등급들 사이의 일치도(skill score)는 약 48% (130/272)로 나타났다. 또한 σ_w/\bar{u} 로 평가된 안정도 계급이 σ_θ 로 평가된 안정도 계급보다 안정한 경우가 13%(35/272), σ_θ 로 평가된 안정도 계급이 σ_w/\bar{u} 로 평가된 안정도 계급보다 안정한 경우가 39%(107/272)이었다. 따라서, σ_θ 에 의해 평가된 대기안정도가 σ_w/\bar{u} 에 의해 평가된 그것에 비해 대기를 다소 안정하게 평가하는 경향이 있는 것으로 나타났으며, 이는 Best 등(1986)이 호주의 Stanwell에서 평가한 결과와 유사하다.

σ_θ 가 수평방향으로의 오염물 퍼짐과 관련한 σ_y 를 보다 정확하게 평가하기 위한 안정도 등급 구분 파

라미터이고, $\Delta T/\Delta z$ 가 연직방향 퍼짐과 관련한 σ_z 를 보다 정확히 평가하기 위한 안정도 등급 구분 파라미터임(Irwin, 1983)을 고려할 때, 이들의 평가를 위해서는 서로 다른 안정도 등급 구분용 파라미터를 취할 필요가 있는 것 같고, 특히 대기오염물질의 확산평가에 많은 오차를 가져오는 한 원인으로 알려진 σ_y 의 결정과 관련해서는 σ_w/\bar{u} 를 연직방향 퍼짐 평가를 위한 안정도 등급구분 파라미터로 취함이 바람직한 것 같다. 향후 안정도 구분을 위한 다른 기준들과 비교해서 본 상대적 수월성에 대한 고찰이 뒤따라야 할 것으로 판단된다.

3.4 혼합고 계산

저층대기에서 난류(turbulence)는 오염물질의 확산을 일으키기 때문에 이런 난류에 의해 형성되는 낮동안의 열적 echo의 높이와 밤 동안의 shear echo의 높이로부터 혼합고를 평가하는 것은 오염물질 평가에 중요한 의미가 있다. 그러나 현재까지 SODAR 반향음도를 이용하는 신뢰할 만한 혼합고 평가법은 야간에 지상으로부터 발달한 shear echo나 낮 동안의 thermal echo 위에 고공역전층이 존재하는 경우로 국한된다.

연직방향 온도분포, LIDAR 및 SODAR의 반향음도로부터 상부역전이 있는 오전의 혼합고 측정 결

과 (Coulter, 1979)에서는 LIDAR로부터 계산된 혼합고 값이 SODAR의 그것보다 크고, 온도분포로부터 구한 것은 나머지 두가지 방법에 의한 것보다 작은 값을 나타내어 측정방법별로 미소한 차이가 있음을 보고하고 있다.

Arya (1981)는 야간의 안정조건에서 SODAR의 관측자료와 고도에 따른 온도분포를 비교한 결과 SODAR에 의해 구해진 안정층의 높이와 연직방향 온도분포로부터 구해진 그것과의 사이에서는 그다지 높은 상관관계를 얻어내지는 못했으나, 매우 안정한 대기조건에서는 풍속의 연속성이 나타나는 최고점이 SODAR 측정자료로 평가된 안정층의 높이와 잘 일치함을 확인하였다.

불안정 대류경계층에서 혼합고는 지상으로부터 첫번째 고공역전이 나타나는 높이까지로 정의되며, 이것은 radio-sonde 자료를 사용해서 고공역전층의 위치를 확인하여 결정할 수 있다. 통상 radio-sonde는 공항 근처에서 하루 두차례 운용되기 때문에 측정시간 이외의 낮 시간 동안이나, 이런 측정소들 사이에 위치한 지역에선, 지상에서 측정된 온도 값과 오전에 인근 관측소에서 측정된 연직방향 기온분포 및 건조단열 감률 등으로부터 Holzworth model (1972)을 적용해 혼합고를 산정한다.

낮동안 SODAR 전송기록에 나타나는 thermal echo는 혼합고 결정을 위해 바로 사용되지 못한다. Jones (1985)는 thermal echo상부에 변하지 않는 역전층(capping layer)이 존재한다면 이것이 고공역전의 존재를 나타내기 때문에 혼합고 산정에 이용될 수 있음을 지적하였으며, 이와 같은 고공역전층은 주로 아침시간에 존재하거나 특수한 기상 조건하에서는 낮동안에도 발생할 수 있다. 불안정한 대기조건하에서 위와 같은 경우를 제외한 다른 모든 경우의 혼합층 높이는 SODAR의 측정범위를 벗어나게 되며, 이 경우 혼합고로는 1000m를 사용할 것을 제안하고 있다(Jones, 1985).

Singal 등(1984)은 radio-sonde자료와 Holzworth 모델을 사용해 계산된 대류경계층의 혼합고 값을 SODAR의 thermal echo 측정 높이 값과 비교한 결과로부터, 불안정한 대기조건에서 thermal echo의 높이를 사용하는 경험적 혼합고 결정식을 식 (1)과 같이 제안하였다.

$$z_i = 4.24z_c + 95 \text{ (m)} \quad (1)$$

여기서, z_i 는 혼합고, z_c 는 thermal echo의 높이

대류경계층이 발달하는 아침시간에 풍속 및 풍속의 분산치 측정은 불안정 조건시의 대류구조 및 혼합고 연구에 매우 유용함이 확인되었다(Weill *et al.*, 1978). 자유대류조건에서 연직방향 속도 분산치는 대류경계층의 중심부근에서 최대가 되며, 이는 Deardorff (1972)의 연구결과와도 일치한다. 따라서 이것으로부터 연직방향 속도 분산치의 최대값이 나타나는 높이의 2배를 취하여 대류경계층의 높이를 계산할 수 있다.

또한, 이들은 대류경계층의 높이와 열 flux간의 관계를 조사하여 식 (2)와 같은 근사식을 유도하였다.

$$\sigma_w^{1/2} z \approx (\alpha)^{1/2} (g/\theta) \overline{w' \theta'} \quad (2)$$

여기서, z 는 연직 방향 높이, σ_w 는 연직방향 풍속의 표준편차, w' 은 연직방향 풍속의 변동 성분, α 는 상수로서 1.4의 값을 취하며, θ 는 온위, g 는 중력가속도, θ' 는 온위의 변동 성분이다. 이 식은 $\sigma_w^{1/2}$ 에 비례하는 현열 flux, $\overline{w' \theta'}$ 를 나타내므로 $\sigma_w^{1/2}$ 의 연직방향 분포로부터 대류경계층의 높이를 구할 수 있다. 즉, $\sigma_w^{1/2}$ 를 z 의 함수로 나타내어 $\sigma_w^{1/2}$ 값이 0이 되는 다시말하면 $\overline{w' \theta'}$ 가 0이 되는 고도를 대류경계층의 높이로 평가한다.

전술한 바와 같이 안정조건하에서 혼합고는 반향음도에 나타나는 최대높이 및 지표에서 연직방향으로 수평방향 풍속 분포의 연속성이 나타나는 최대 높이 값으로 구해지므로 그림 5에는 안정한 대기에서 이와 같은 두 가지의 경계층 높이 결정 방법들에 의해 구해진 안정경계층의 높이를 비교하여 나타내었다.

그림 5에 나타난 바와 같이 두 방법으로 평가한 경계층의 높이는 대체로 수평 방향 풍속이 연직방향으로 연속성을 나타내는 최대 높이를 안정층의 높이로 취하는 방법이 반향음도로부터 안정층의 높이를 평가한 방법보다 경계층 높이를 다소 높게 평가하는 것으로 나타났으며, 이 기간 동안 연직방향 풍속 profile로 평가된 안정층의 높이는 150~325m에 걸쳐 분포한 반면 반향음도로 평가된 높이는 100~250m였다. 불안정 대기조건하에서는 식 (1)에

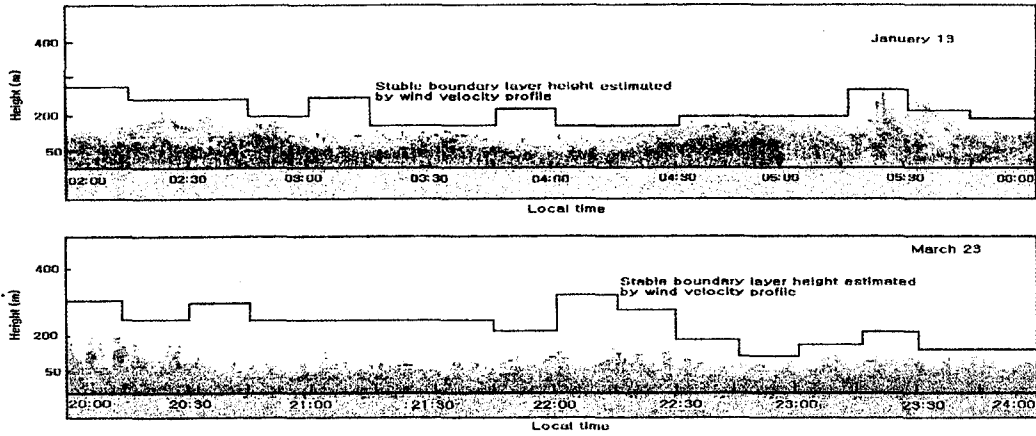


Fig. 5. Comparisons of stable boundary layer height estimated by SODAR echogram and successive horizontal wind velocity method.

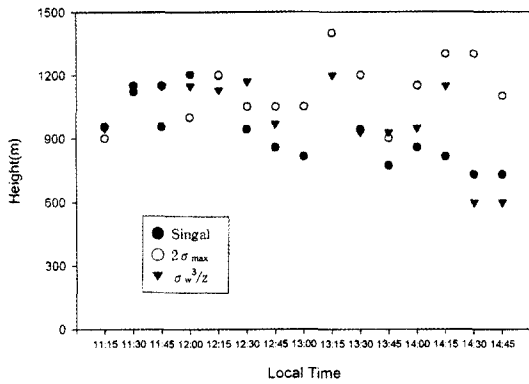


Fig. 6. Comparisons of unstable boundary layer height estimated by (i) Singal's empirical equation, (ii) double of height where σ_w become maximum and (iii) vertical σ_w^3/z method.

나타낸 경험식을 이용하는 방법, σ_w 의 연직방향 분포에서 최대값이 나타나는 고도의 2배를 취하는 방법 및 σ_w^3/z 값의 연직방향 분포가 0이 되는 고도를 혼합고로 취하는 방법 등 3가지 방법으로 혼합고를 평가하였다. 이 방법들에 따른 혼합고 평가치들의 차이를 비교해 보기 위해 각 평가 방법별로 구해진 불안정 대기에서의 혼합고도 평가치를 그림 6에 나타내었다.

각 방법으로 측정된 혼합고의 높이는 σ_w 의 최대

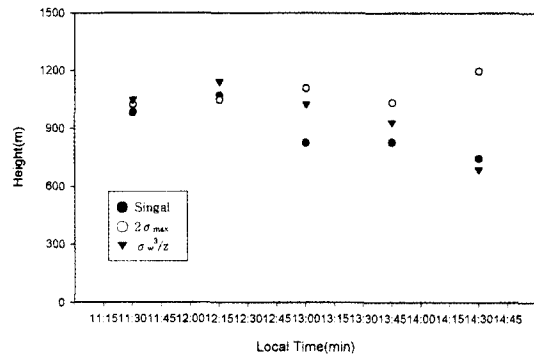


Fig. 7. Recalculation results of mixing height using Bootstrap method.

치가 나타나는 고도를 두배해서 구한 경우가 다른 방법들에 비해 혼합고를 대체로 높게 평가하며 Singal 등의 경험식에 의한 방법이 혼합고를 상대적으로 작게 평가하고 있다. 이와 같은 차이는 특정 기상 및 지형에서 관측된 자료에 기초한 경험식을 사용하거나, tethered-sonde 또는 항공기와 같은 기상인자를 측정하기 위해 사용된 측정 장비와 본 실험에서 사용한 장비(SODAR)와의 차이에 그 원인이 있을 수 있으므로, 이들을 포함한 혼합고 평가법들에 관한 종합적 비교 고찰의 연구가 뒤따라야 할 것으로 생각된다.

15분 간격으로 구한 혼합고 데이터는 자료의 크

기가 수적으로 빈곤하여 신뢰성에 문제가 있어 Bootstrap기법(Kolen and Brennan, 1995; Cox, 1990)으로 매 30분간에 해당하는 혼합고 데이터를 100개 씩으로 확충하고 그 평균과 표준편차의 범위를 그림 7에 나타내었다.

본 연구 대상 지역에서 SODAR 운영 기간동안 대기의 연직방향 온도 분포에 관한 자료가 이용 가능하지 못했으므로, 다른 지역들에서 측정된 불안정한 낮동안의 혼합고 변동경향으로 부터 위의 3가지 방법중 어느 것이 보다 정확한 것인지 판단할 문제인 바, Russell 등(1974)이 St. Louis에서 측정한 혼합고 자료등에 의하면 11시경 이후 혼합고가 점차 증대하다가 일시적으로 낮아지기도 하지만 일반적으로는 오후 5시 정도까지는 대체로 증가하는 추세를 보이는 점을 고려할 때 위 3가지 방법 중 σ_w 의 연직방향 분포에서 최대값이 나타나는 고도의 2배를 취하는 방법이 가장 나은 것으로 보아진다.

4. 결 론

1) SODAR에서 얻어진 수평방향 풍향의 표준편차 σ_θ 와 수평 방향 풍속에 대한 연직 방향 풍속의 표준편차의 비(σ_w/\bar{u})에 의해 평가된 대기안정도 등급의 일치도를 분석한 결과 전자가 후자에 비해 대기를 다소 안정하게 평가하였다. σ_w/\bar{u} 는 연직방향 분산평가의 정확도 개선을 위한 한가지 안정도 등급 분류기준이 되는 것 같다.

2) 안정한 대기상태에서 혼합고를 결정하는 방법으로서 SODAR 반향음도의 높이를 취하는 경우와 고도에 따른 수평 풍속의 연속성이 나타나는 접까지를 혼합고로 취하는 경우를 비교해 본 결과 후자가 경계층의 높이를 다소 높게 평가하는 것으로 나타났다. 불안정한 대기 상태에서 (1) Singal의 경험식, (2) σ_w 의 연직분포가 최대점을 가지는 높이의 2배를 혼합층 높이로 취하는 방법 및 (3) $\sigma_w/2$ 값의 연직방향 분포에서 이 값이 0을 나타내는 점을 혼합고로 취하는 방법 들에 의해 평가된 혼합고의 높이를 비교해 본 결과 (2) > (3) > (1)의 순으로 혼합고를 높게 평가하였으나 이의 지역 의존성에 대해서는 추가적인 연구가 요구되는 것 같다. 낮동안 관측되는 일반적 혼합고도 변동을 고려하면 σ_w 의 연직 분포가 최대점을 가지는 높이의 2배를 혼합층 높이

로 취하는 방법이 위의 세가지 평가법 중 가장 나은 혼합고 평가법으로 생각된다.

참 고 문 헌

- Arya, S.P. (1981) Parameterizing the height of the stable atmospheric boundary layer. *J. Appl. Meteor.* 20, 1192-1202.
- Asimakopoulou, D.N., Helmis, C.G. and Petrakis, M. (1996) Mini-acoustic sounding-A powerful tool for ABL application : Recent advances and applications of acoustic mini-SODAR. *Boundary Layer Meteorology*, 81, 49-61.
- Berab, D.W., Little, C.G. and Willmarth, B.C. (1971), Acoustic doppler measurements of vertical velocities in the atmosphere. *Nature*, 230, 160.
- Best, P.R., Kanowski, M., Stumer, L. and Green, D. (1986) Convective dispersion modeling using acoustic sounder information. *Atmos. Res.*, 20, 173.
- Coulter, R.L. (1979) A comparison of three methods for measuring mixing layer height. *J. Appl. Meteor.*, 18, 1495.
- Cox, W.M. and Tikvart, J.A. (1990) A statistical procedure for determining the best performing air quality simulation model. *Atm. Env.*, 24A, 2384-2395.
- Deardorff, J.W. (1972) Three dimensional and numerical modelling of the planetary boundary layer. Workshop on Micrometeorology, edited by Haugen, D.A., Amer. Meteor. Soc., Boston, MA, 271-309.
- Holzworth, G.C. (1972) Mixing heights, wind speeds and potential temperature for urban air pollution throughout the contiguous United States., U.S Environ. Prot. Agency, Publ., No. Ap-101, 118p.
- Irwin, J.S. (1983) Estimating plume dispersion-A comparison of several sigma scheme. *J. of Clim. and Appl. Meteor.*, 22, 92-114.
- Jones, D.E. (1985) Mixing depth in the Latrobe valley. *Clean Air*, 19, 49.
- Neff, W.D. and Coulter, R.L. (1986) Acoustic remote sensing, Probing the Atmospheric Boundary Layer, edited by Lenschow, D.H., Amer. Meteor. Soc., Boston, MA., 201-236.
- Russell, P.B., Uthe, E.E. and Ludwig, F.L. (1974) A comparison of atmospheric structure observed with monostatic acoustic sounder and lidar techniques. *J. of Geophysical Research*, 79, 5555-5566.
- Shaw, N.A. (1971) Acoustic Sounding of the Atmosphere,

- Dissertation, University of Melbourne.
- Singal, S.P. (1993) Monitoring air pollution related meteorology using SODAR, *Appl. Phys.* 57B, 65-82.
- Singal, S.P., Aggarwal, S.K., Pahwa D.R. and Gera, B.S. (1985) Stability studies with the help of acoustic sounding, *Atm. Env.*, 19, 221.
- Singal, S.P., Gera, B.S. and Aggarwal, S.K. (1984) Nowcasting by acoustic remote sensing : experiences with the systems established at the National Physical Laboratory, New Delhi, *J. Sci. Ind. Res.*, 43, 469-488.
- Singal, S.P., Gera, B.S. and Aggarwal, S.K. (1983) Studies of boundary layer at Delhi using SODAR, in *Proceeding of the 2nd International Symposium on Acoustic Remote Sensing of the Atmosphere and Oceans*, Rome, Italy.
- Sorbjon, Z. (1991) Similality scale and universal profile of statistical moments in the convective boundary layer, *J. Appl. Meteor.*, 29, 762-775.
- Thomas, P. (1986) Stability classification by acoustic remote sensing, *Atmos. Res.*, 20, 165.
- Walczewski, J. (1983) Acoustic sounding of the atmosphere for inversion layer climatology over an urban area, in *Proceeding of the 2nd International Symposium on Acoustic Remote Sensing of the Atmosphere and Oceans*, Rome, Italy.
- Walczewski, J. (1984) Characteristics of the boundary layer of the atmosphere over Cracow on the basis of the results of acoustic sounding, in *Research Papers of the Institute of Meteorology and Water Management*, Warsaw, Poland, Ser. Meteor., 10p.
- Weill, A., Eymard, L., Lequere, M.E., Klapisz, C., Baudin, F., and Grunderbeeck P.V. (1978) Investigations of the planetary boundary layer with an acoustic Doppler sounder, in *Proceeding of the 4th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Amer. Meteor. Soc., Denver, CO, 415-421.
- Wyngaard, J.C. (1985) Structure of the planetary boundary layer and implication for its modelling, *J. Clim. and Appl. Meteor.*, 24, 1111-1130.