

복잡한 지형내 오염물질의 대기확산 풍동실험

I. 산지지형에서의 확산

Wind Tunnel Experiments for Studying Atmospheric Dispersion in the Complex Terrain

I. Dispersion in a Mountainous Area

경 남 호 · 김 영 성 · 손 재 익

한국에너지기술연구소
(305-343 대전시 대덕연구단지 사서함 5호)
(원고접수 ; 1992. 6. 16)

Nam-Ho Kyong, Young-Sung Ghim, and Jae-Ek Son

Korea Institute of Energy Research
P.O. Box 5 Taedok Science Town, Taejon 305-343, Korea
(Received 16 June 1992)

Abstract

Dispersion of pollutant in a mountainous area is simulated in a wind tunnel. In the northwest side of the terrain model, the sea level is assumed. Wind from the sea initially confronts hills along the shoreline, a line of large buildings next, and finally a valley between high mountains in the south and in the east. In the northwest wind conditions, severe flow separation occurs in the lee side of hills, even beyond the building area. Pollutant from the buildings is trapped in this region and its concentration is the highest. In the west wind conditions, pollutant from the buildings flows along the hills aslant the main wind direction in this case. Since large valley is located in the downstream, pollutant tends to disperse along the valley.

1. 서 론

실측자료는 그 자체가 드러난 대기환경의 지표라는 면에서 절대적 의미를 가진다. 그러나 실제 대기를 대상으로 한 측정은 측정영역이 크고 기상조건 등의 변수때문에 정확도를 기하기가 매우 어렵다. 따라서 유동이나 확산 실측자료는 분산이 심하고, 제한된 기상조건을 기초로 계산된 예측치와의 비교 분석이나 평가도 오차의 중첩으로 인해 신빙성이 결여되기 쉽다. 또한 실측의 경우 고가의 장비와 많은 시간과 노력이 소요될 뿐 아니라 주위환경의 변

화에 따라 유동장, 농도장에 영향을 미치는 많은 요소를 제대로 규명해 내기가 어려우므로 이론적 확산모델과 비교할 때에는 상당한 오차를 허용하지 않으면 안된다 (DiCristofaro et al., 1985).

이에 대한 대응책의 하나가 대기경계층과 유사한 경계층을 실험실내의 풍동에 발생시켜 실험모형을 통과하게 하고 그 주위의 유동장과 농도장을 측정하는 풍동시뮬레이션이다. 풍동실험의 측정치들은 실제 대기를 대상으로 한 실측보다 정확하고 직접적인 비교가 가능하여 이론모델의 보완 및 평가에 효과적으로 이용될 수 있다 (Lawson et al., 1989;

Skylingstad and Andrews, 1989). 또 농도 측정치는 상대적 농도를 직접 실측치와 비교하기도 하는데 현장 측정이 어려운 지점에서도 측정이 가능하므로 현장실험을 확인 및 보완할 수 있다.

그러나 풍동내의 유동과 실제 대기유동은 경우에 따라 크기의 차이가 수천배 이상일 수 있으므로 두 결과를 비교하기 위하여는 양자간의 상사성(similarity) 여부 확인이 중요하다. 특히 상사성 확인에 필요한 여러 무차원수 중 레이놀즈(Reynolds) 수는 풍동을 사용하는 한 상사가 불가능한데 이에 대해서는 다양한 관점이 있을 수 있으나 레이놀즈 수가 $10^5 - 10^6$ 이상이면 유동특성이 더 이상 크게 변하지 않는 것으로 보며 이를 Re_{crit} , 즉 임계 레이놀즈 수라 한다. 따라서 풍동내 모형주위의 유동에서도 레이놀즈 수가 Re_{crit} 이상이면 상사에 큰 문제가 없는 것으로 보고 있다 (Cermak, 1971, 1976).

풍동 시뮬레이션연구는 이미 구미각국에서 활발히 진행되어 왔으며 이를 위한 전문적인 풍동도 수십기에 달한다. 대표적인 예로는 미국 Colorado 주립대학의 대형풍동 3기와 영국의 CEGB(Central Electricity Generating Board) Marchwood Tunnel 등을 들 수 있다. 전자는 강한 성층화가 가능하여 대기확산은 물론 건물, 굴뚝의 downwash나 풍력발전소 위치선정등 많은 응용연구에 이용되었으며 후자는 경계층의 두께를 무려 2m 이상 키운 풍동으로 알려져 있다 (Hunt and Fernholz, 1975; Counihan, 1973).

풍동내에 중립상태의 두꺼운 경계층을 발생시키는 기술은 비교적 쉬운 일이나 그 경계층을 성층화시켜 각종 안정도 상태에서 확산실험을 수행하는 기술은 세계적으로 예가 그다지 많지 않다. 그 이유는 풍동실험에서는 실제지형을 1/500-1/3,000로 축소 한 모델을 사용하게 되는데 길이척도가 과다하게 축소되어 성층화의 상사여부를 좌우하는 무차원수인 프루드(Froud) 수를 동일하게 유지하려면 실제 대기보다 훨씬 큰 성층화가 필요하기 때문이다. 미국 EPA의 대기과학실험실에서는 중립상태의 대기는 풍동으로 시뮬레이션하고 강한 성층화가 필요하면 대형수조를 소금물 농도로 성층화시키고 실험모형을 끌어서(towing) 실험하고 있으나 실험시간이 충분치 않고 경계층형성에 아직 어려움이 남아있다 (Snyder and Hunt, 1984).

본 연구의 대상인 복잡한 지형(complex terrain)이란 굴뚝의 높이 즉, 오염원의 높이가 주변 지형보다 낮은 경우로 정의된다 (USEPA, 1986). 우리나라는 국토의 70%가 산지로 대부분의 오염물질의 확산문제가 이 복잡지형내 확산에 속해 있어 이에

대한 세련된 모델이 절실히 요구되고 있으나 아직 국내의를 막론하고 인정받을 만한 이론적 확산모델이 없는 실정이다. 뿐만 아니라 고층, 저층 건물이 섞여있는 도심지도 대표적인 복잡지형의 하나이다.

복잡지형내의 확산에서 중요한 문제는 정체현상, 훈증(fumigation) 현상과 장애물 후면에서의 downwash 및 plume 충돌조건 확인 등인데 이러한 문제들은 유동장에 대한 이해가 부족하면 설명하기 곤란하다 (USEPA, 1986). Downwash나 plume 충돌현상은 인구밀집 지역인 도심지의 건물군에서 더욱 심각한 문제를 발생시키는데 예를 들면 연돌, 냉각탑 등으로부터의 배가스가 환기구로 재유입된다거나, 고층건물의 배기가 지표면 부근에서 정체되는 현상 등이다. 또 유동자체의 난류특성도 변하여 plume의 두께도 장애물 가까이에서 확대 혹은 축소되는 경향이 있다 (Hunt, 1973, 1985; Hunt and Mulhearn, 1973). 미국 EPA에서는 이의 해결을 위해 막대한 자금을 들여 1980년도부터 "복잡지형 모델개발 과제"를 수행하고 있으며 현장 실측에 앞서 풍동실험과 수조실험을 실시한 바 있다 (DiCristofaro et al., 1985).

국내에서는 아직 대기경계층의 풍동시뮬레이션이 수행된 바가 없는데 인력 및 인식의 부족과 함께 대형풍동의 제작설치 및 부대시설에 막대한 자금이 소요되기 때문으로 생각된다. 본 연구에서는 복잡지형내의 대기확산 특성을 파악하기 위해 풍동내에 경계층 유동을 발생시키고 이를 복잡지형의 축소모형을 통과하게 하여 지형모형 각 지점에서의 유동상태를 측정 후 오염원에서 시험 오염물질을 배출하며 주변지역의 오염도를 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에서는 실제 대기경계층을 모사하기 위하여 요구되는 여러 상사조건 중 지구회전에 따른 로스비(Rossby) 수의 영향을 무시하였으며, 경계층 높이와 상층부 균일유속을 바탕으로 한 레이놀즈 수는 1.6×10^6 으로 Re_{crit} 에 가까웠다 (경남호와 김영성, 1990). 복잡지형은 산지모형과 도심지모형의 두 가지를 시험하였는데 본 논문은 그중 산지모형에 관한 것이다. 풍동의 구조는 그림 1과 같다.

2.1 풍동 (Wind Tunnel)

본 실험에서 사용된 풍동은 흡입형(suction type)으로 수축면적비는 3:1이다. 풍동은 Izumi회사의 15kw 가변속 교류모터로 가동되는 축류 송풍기로 운전되며, 시험부에서는 최대유속 10m/s, 최저유속 1m/s까지 균일한 속도장을 얻을 수 있다. 경계층을

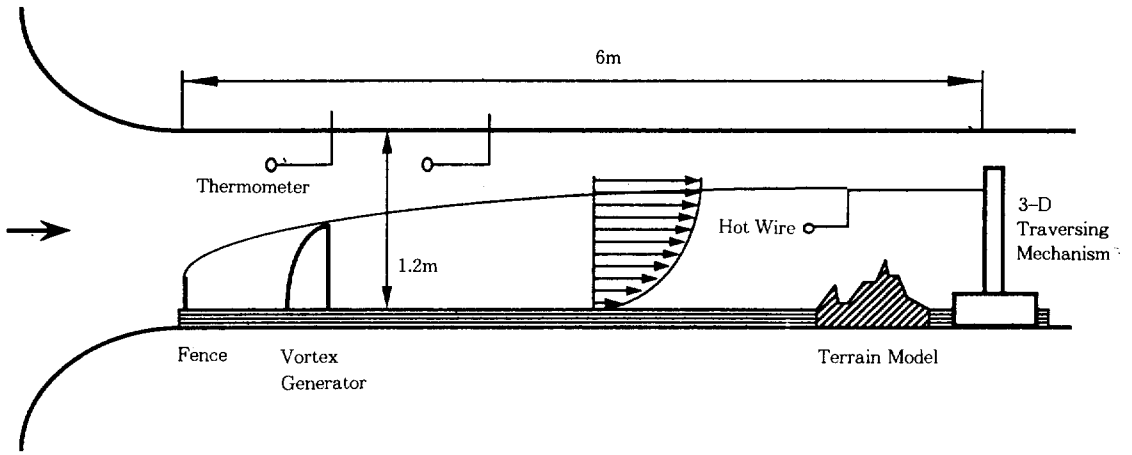


Fig. 1. Schematic diagram of wind tunnel experiment.

발생시키지 않을 때 측정부의 난류강도(turbulent intensity)는 열선풍속계의 측정하한인 0.5% 이하로 충분히 낮아 풍동내의 평균유속이 균일함을 의미하고 있다. 시험부의 크기는 1.2mx1.2m, 길이는 6.0m이며 길이는 더욱 확장할 수 있다. 풍동실험용 바닥은 스티로폴로 적립한 후 잔디 모양의 인조 플라스틱 바닥을 깔아 표면거칠기를 조절하였다.

2.2 경계층 생성장치

실제 대기조건에서 지형으로 접근하는 유동(approaching flow)은 해수면위의 대기경계층이므로 표면거칠기가 아주 작은 경우에 속한다. 대기경계층은 높이방향으로 로그함수 혹은 지수함수의 유속분포를 가지므로 풍동내에서도 경계조건을 만족하기 위하여서는 이와 같은 유속분포를 가진 두꺼운 경계층을 생성시켜야 한다. 경계층 생성기법에는 비대칭 grid, 긴 시험부에 의한 자연생성 등 여러가지 방법이 있으나, 짧은 거리내에서 두꺼운 경계층을 만들기 위하여 Counihan(1968)의 방법에 따라 장애벽(fence)과 와류발생기(vortex generator)를 조합하여 약 230mm 두께의 중립상태 경계층을 하류에 생성시켰다.

장애벽과 와류발생기와의 거리는 경계층 두께의 5/6정도이며 와류발생기 사이의 거리는 경계층 두께의 1/2정도였다. 장애벽의 형상은 와류발생기를 마주하는 부분을 ㅼ자 모양으로 5mm정도 낮게하여 와류발생기로 향하는 유동의 박리가 작도록 하였다. 이러한 방법으로 생성되는 경계층은 평균유속뿐 아니라 난류강도, 난류 스펙트럼까지 실제 PBL

(planetary boundary layer)과 대단히 유사한 것으로 밝혀져 있다 (Counihan, 1973).

2.3 모형제작

산지지형 모형은 서해안에 위치한 실제 지형을 1/3,000로 축소하여 모형상사와 경계조건상사를 만족하도록 점토를 이용하여 제작하였다. 특히 산지의 거칠기를 맞추기 위해 0.2mm의 거칠기를 주었으며, 직경 800mm의 원형으로 제작하여 풍동시험부의 밑바닥에서 회전시킴으로써 풍향을 조절하였다.

2.4 유속측정

유속센서로써 당초에는 5공(standard five-hole) 피토판을 사용할 예정이었으나 예비실험 결과 3m/s 이하 저속에서 신호가 압력변환기의 잡음강도에 불과할 정도로 둔감하여 부적합한 것으로 판명되었다. 따라서 대안으로 열선풍속계(hot-wire anemometer)의 수평방향 X-probe와 수직방향 I-probe를 조합하여 3차원을 측정하였으며 유동방향 측정에는 split film과 tuft를 사용하였다. 3차원 이송장치는 THK 선형 운동 가이드와 backlash 0.0nm의 ball screw로 구성하였다. X축 피치 6mm, 스트로크 1,200mm, Y축 피치 5mm, 스트로크 380mm, Z축 피치 10mm, 스트로크 487.6mm이며 Z축 최대 위치오차는 0.1mm, X,Y축의 위치오차는 무시할 정도였다. 이들은 모두 스텝(steping) 모터로 구동되며 최대 토오크는 12kg·m이었다.

그림 2는 유속측정에 사용된 기기들의 배치도를 보여준 것이다. 온도계는 풍동내 공기온도를 측정하

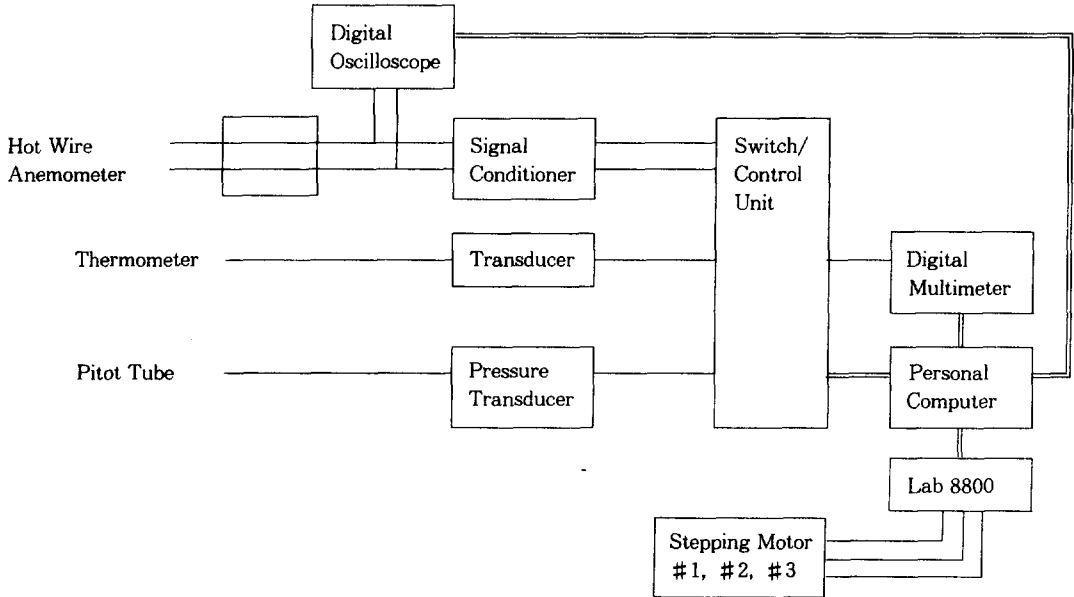


Fig. 2. Instrumentation of wind speed and concentration measurements.

기 위한 것으로 풍속계 출력 보정용이며 피토관은 평균속도 보정용이다. 디지털 전압계, 다중송신기, oscilloscope, Lab 8800 디지털 입출력, 스텝모타 등 모든 기기는 컴퓨터에 의해 제어되며 프로그램은 Microsoft Quick Basic 4.5로 작성하였다 (경남호와 김영성, 1990).

2.5 농도측정

시험가스로는 분자량이 공기와 비슷한 일산화탄소를 이용하였다. 농도측정기로는 전기화학적 방법으로 CO를 측정하는 미국 Teledyne사의 MAX 5 배가스분석기를 사용하였으며 RS-232C 접속기로 그림 2의 개인용 컴퓨터에 직접 연결하였다. Max 5의 측정범위는 CO의 경우 0-1,000ppm, 정밀도 1ppm, 정확도는 전 측정범위(full scale)의 2%이다. 따라서 본 논문의 농도단위는 ppm이며, 분석기의 흡입속도는 2.0ft³/hr로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 경계층 형성

시험부의 복잡한 지형내 유동현상을 측정하기 위하여서는 그 모형으로 접근하는 유동의 형상과 균일도가 무엇보다 중요하다. 접근 경계층이 측방향으로 균일하지 못하면 당연히 예기치 못한 부차적 유동이 생길 가능성이 높다. 그림 3은 풍동내 생성된

경계층을 지형모형 100mm 앞에서 측정한 결과이다. 측방향 즉, Y방향으로는 약 100mm 간격으로, 중심부 부터 500mm까지 측정하여 (1)식과 같은 경계층에 대한 지수함수 법칙과 비교하였다.

$$\frac{U}{U_n} = \left(\frac{Z}{H} \right)^{1/n} \quad (1)$$

여기서 U_n 은 경계층 상부의 풍속을, H 는 경계층의 높이이며 경계층내 높이 Z 에서의 유속이 U 이다. 지수 n 은 표면의 거칠기에 따라 다르며 표면이 매끈할 때는 6내지 7에서 고층 빌딩이 밀집된 도심에서는 $n=2.5$ 까지 변화한다 (Plate, 1971). 그림 3을 보면 높이방향으로 측정치의 변화가 지수함수 법칙과 상당히 근사하게 일치하고 있는데 본 연구의 경계층은 표면의 거칠기가 작아 n 값이 대략 6에 해당한다. 또한 풍동의 Y방향으로도 각 측정치들이 서로 잘 일치하여 생성된 경계층이 Y방향으로 충분히 균일함을 알 수 있다.

3.2 산지지형 위의 유동장

그림 4는 산지지형의 풍동실험용 모형중 측정부위의 입체도를 보여주고 있다. 접근유동이 북서풍일 때 X 는 바람이 불어가는 방향을, Y 는 바람을 가로지르는 방향을 나타낸다. 북서쪽에는 해수면이, 해안을 따라 구릉지대가 있으며, 동쪽과 남쪽에 각기 높은 산이 있어 모형의 남동쪽에는 계곡이 위치한

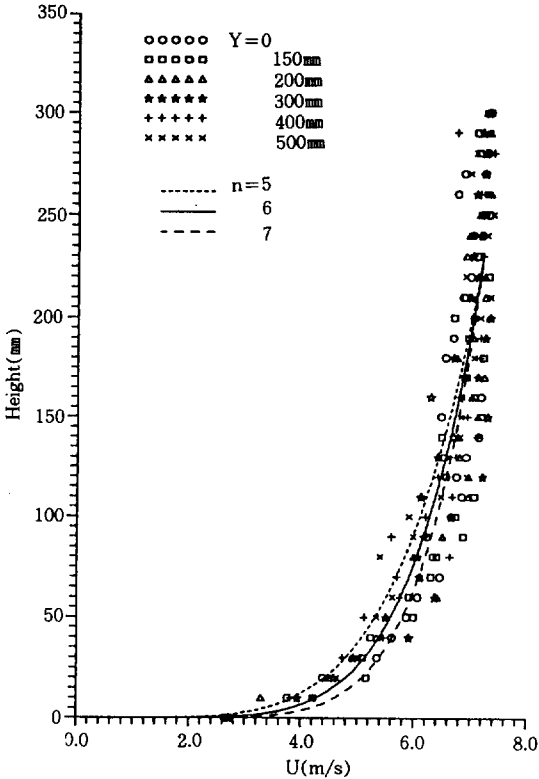


Fig. 3. Velocity profile of the boundary layer. Power-law profiles were obtained by assuming the velocity at the top of the boundary layer was 7.2m/s and the height of the boundary layer was 230mm.

다. 해안을 따른 구룡의 뒤편에는 $X=380\text{mm}$ 선상에 Y 방향으로 #1부터 #6까지 약 90mm 간격으로 6개의 건물이 배치되어 있다. 지형의 높이를 측정 한 후 내삽하여 입체도를 작성함에 따라 건물들이 작은 구룡처럼 나타나 있다.

유동측정 결과는 그림 5에 평면도의 등고선상에 벡터(vector)로 표시하였다. 그림 5의 (a)는 지표면에서 가장 가까운 측정점에서의 측정결과로 1/3, 000 축척을 고려하면 지상 15m지점에서의 유동상태에 해당된다. $X=180\text{mm}$ 와 250mm 지점에서의 유동을 살펴보면 (X, Y)좌표 (300,200)을 정점으로 하는 산지지형으로 인해 $Y < 200$ 부분이 아래쪽으로 편향되고 있다. 또 $Y=200$ 을 따라 하류로 가며 유동이 (300,200)의 정상까지 유속이 빨라지고, 그 이후 유속이 급격히 감소하여 건물후방의 지표면 고도가 가장 낮은 $X=450$ 근처에서는 유동박리로

인해 소위 정체지역(dead flow zone)이 형성되어 유속이 가장 작다.

정체지역의 유동은 유속이 대단히 작을 뿐 아니라 tuft를 이용하여 풍향을 조사한 결과 거의 무작위적이었다. 굳이 방향을 구분한다면 고공부의 주흐름과 반대일 확률이 높았으나 그림 5의 (a)에서는 편의상 주흐름 방향과 일치시켰다. 이후의 유동은 다시 (750,80)을 기점으로 하는 산지를 만나 유동이 흐트러지는데, $Y=330, X > 550$ 부근에는 계곡이 있어 이곳 $Y=330$ 선상의 유동은 계곡을 따라가며 점차 유속이 증가하고 있다. $Y=80$ 을 따라 (750, 80)의 산정상까지의 유동 역시 유속이 빨라지며 유동의 방향이 정상을 비껴가는 모습을 볼 수 있다.

그림 5의 (b)는 실제로는 지상 42m에 해당된다. 유동의 양상은 (a)와 유사하지만 건물 후방 $X=450$ 근처에서 유속이 빨라지고 유동의 방향도 외부 주바람 방향과 일치되기 시작하며 정체현상으로부터 벗어나는 경향을 볼 수 있다. 그림 5의 (c)는 지상 69m에 해당되는 유동장으로 $X=200-300$ 에서 유동의 흐트러짐이 적어지고 $X=450$ 부근에서도 지형의 영향을 완전히 벗어나고 있다. 이후로도 모형상에서는 9mm, 실제로는 27m 간격으로 높이를 변화시키며 유동을 측정하였는데 (김영성 등, 1991), 그림 5의 (d)는 지상 267m 고공에서의 균일 유동의 모습을 나타내고 있다.

유동속도와 방향에 대한 실험오차는 온도변화, 열선의 산화로 인한 열전달 특성저하 등 열선 센서 자체의 오차가 약 5%로 통용된다. 2개의 열선 센서를 쓸 때에는 각각의 특성변화로 인한 부정합에 의한 오차 약 5%가 더하여져 X -type인 경우 약 10%의 오차를 허용하고 있다. 지표면에서 수직방향, 즉 Z 방향 유속까지 측정하려면 서로 수직인 3개의 열선센서를 사용하여야 하므로 방향에 따라 다르나 오차범위는 약 20%로 추정된다. 본 연구에서는 X -probe와 I -probe로 각기 별도 측정 한 값을 조합하여 삼차원 유속을 구하였는데 수직방향의 유속은 두 probe의 감도 차이로 인하여 오차가 커서 수평방향의 유속측정 결과만 제시하였다. 삼차원 유속을 정확히 측정하려면 우선 3방향을 동시에 측정하여야 하며, 유속측정의 오차를 줄이기 위하여 각 열선 센서의 온도, 산화로 인한 변수를 미리 예측하여 보정하여야 하나 이는 많은 시간과 비용이 요구되어 차후의 연구에서 고려하기로 하였다.

3.3 산지지형의 확산특성

산지지형의 대상 지역이 서해안인 점을 감안하여 북서풍과 서풍이 불 때, 두 경우의 확산 특성을 조

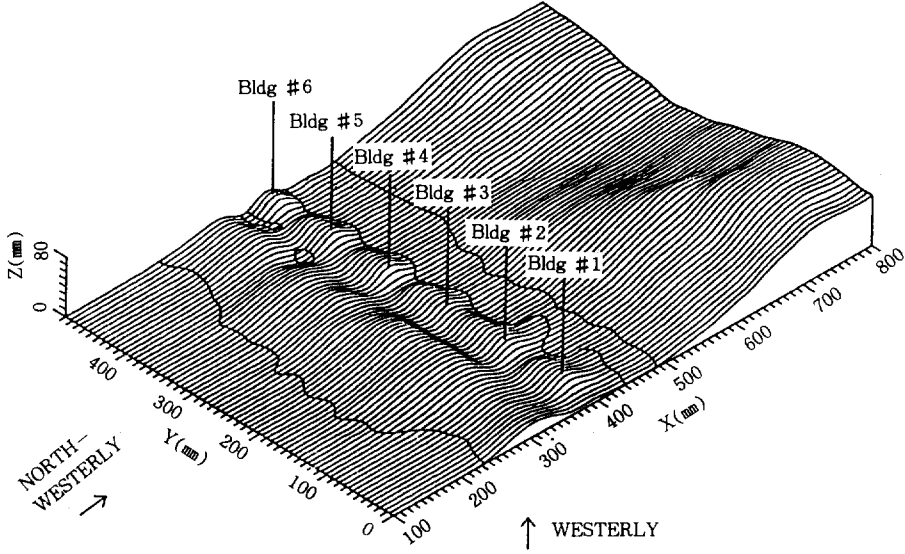


Fig. 4. Three-dimensional surface plot of the terrain model.

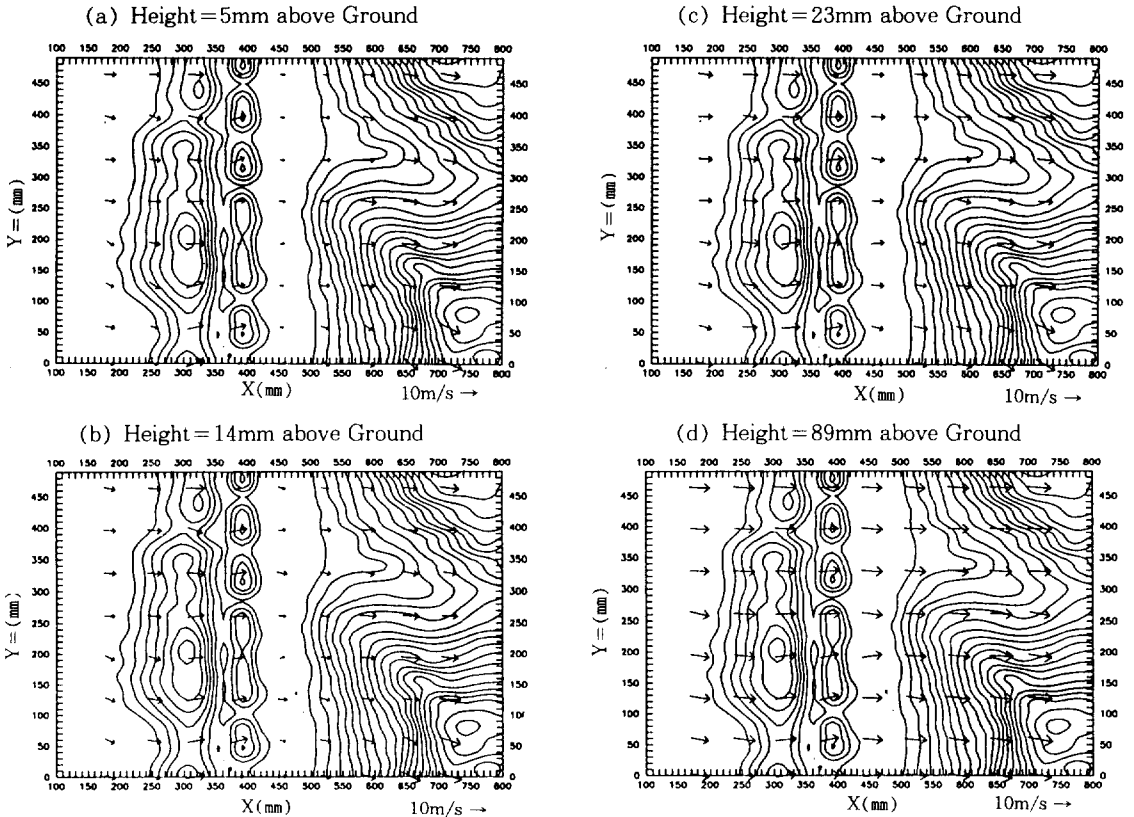


Fig. 5. Top view of velocity distributions on the terrain model.

사하였다. 이송장치의 이동범위가 한정되어 있어 북서풍일 때에는 건물 #2, #4에서의 배출을, 서풍일 때에는 건물 #1, #3에서의 배출을 시험하였다. 시험가스로는 앞에서 언급한 바와 같이 일산화탄소를 사용하였으며 배출량은 0.5 l/min로 하였는데 이는 측정부위 최장거리에서 농도측정이 가능한 최소의 배출량이었다.

먼저 각 경우와의 비교를 위해 장애물이 전혀 없는 평지에서 실험을 수행하였다. 그림 6은 그 결과를 보여주고 있는데 오염원의 높이는 약 20mm였으며 지표면의 최고농도는 오염원 하류 약 150mm 지점에 위치하였다. 이상적인 실험이라면 배출원의 중심축을 중심으로 등농도곡선의 상하가 대칭이어야 하나 가스분석기 Max 5가 위에서 아래로 이동(scanning)하는 동안 고농도 측정후에 저농도를 측정하게 되는 그림의 아래쪽에서는 분석기의 회복시간 때문에 실제보다 농도가 약간씩 높아지고 있다. 그림의 오른쪽에서 농도 곡선이 아랫 방향으로 편향된 것은 오른쪽 상단에 위치한 이송장치때문으로, 높이가 있는 산지나 도심모형에서는 중요하지 않으나 평지에서는 장애물로 작용하여 유동이 오른쪽 하단으로 치우침에 따라 나타난 현상이다.

그림 7의 (a)와 (b)는 산지지형에 북서풍이 불 때 각각 건물 #2, #4에서 배출된 가스가 확산되는 모습을 보여주고 있다. 평지에서의 확산과 비교해 불 때 장애물 후면에 나타나는 강한 난류현상으로 인해 확산범위가 대단히 크다. 오염원의 위치와 최대농도 지역까지의 거리가 약 50mm정도로 평지

의 경우에 비해 훨씬 짧은데, 이는 그림 5 (a)에서 오염원 하류 X=450mm 부근에 위치한 정체지역에서 오염도가 갑자기 높아진 때문으로 일종의 downwash 현상이다.

후기의 확산은 오염원 주변의 지형조건에 따라 양상이 다르다. 오염원이 계곡 앞에 위치한 건물 #4로부터의 배출물의 확산을 나타내는 그림 7의 (b)를 보면 초기 확산은 그림 7 (a)의 건물 #2와 유사하나 계곡을 따라가며 plume의 크기가 오히려 줄고 있다. 이는 고도에 따라 유속이 점점 증가하며 유선(streamline)의 폭이 감소하는 유동의 수렴현상 때문인데, 계곡쪽으로의 확산이 원활함에 따라 오염물의 농도도 그림 7 (a)의 건물 #2보다 상대적으로 낮다. 반면 건물 #2의 배출물은 뒷부분의 산지에 가로막혀 건물 후방의 오염도가 급격히 높아지며 이후 plume은 산지를 피하여 계곡쪽으로 확산되고 있다.

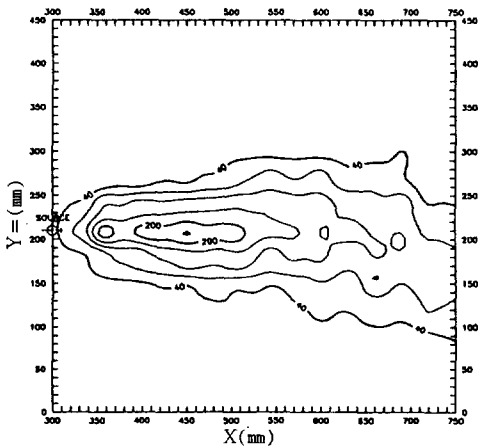
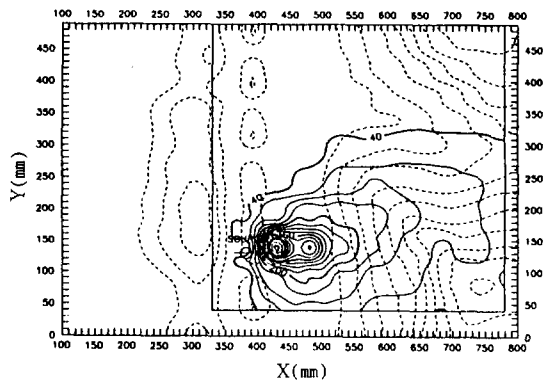
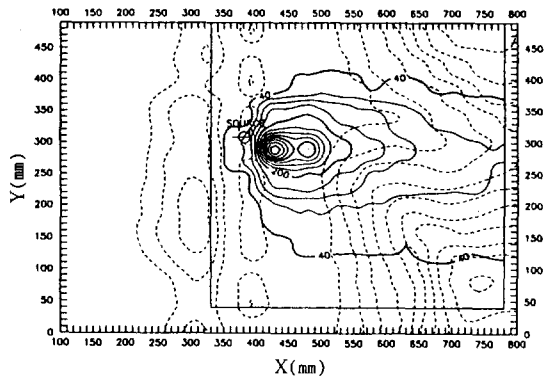


Fig. 6. Dispersion of plume from the source on the flat terrain. Height of the source was about 20mm above the ground.



(a) Source is located on the Building #2.



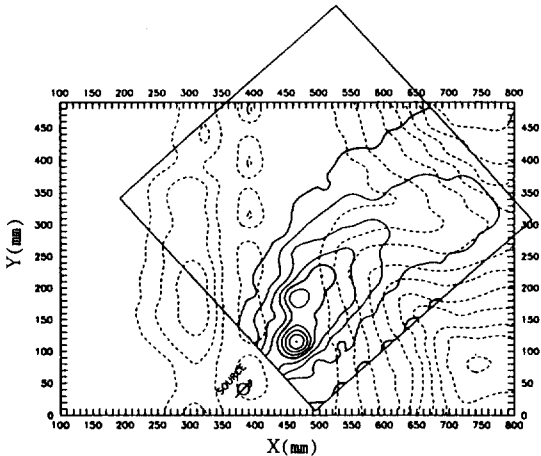
(b) Source is located on the Building #4.
Fig. 7. Dispersion of plume when the wind blows from the northwest.

그림 7의 (b)에서 최대오염지역이 아래로 치우친 이유는 건물 #4 전후의 지형조건이 복잡하여 명확히 설명하기 힘들으나 주로 측정점의 배치에 따라 발생한 이상 현상 때문으로 생각된다. 본 논문의 측정점들은 X, Y 각각 50mm 간격으로 배치되었는데, 예를 들어 건물 #4 오염원 주변의 측정점들은 X 방향으로 380, 430, 480, Y 방향으로 240, 290, 340 등이다. 그림 7의 (b)에서 최대오염지역이 형성된 곳은 Y=290 선상으로 다음 측정점인 Y=340 보

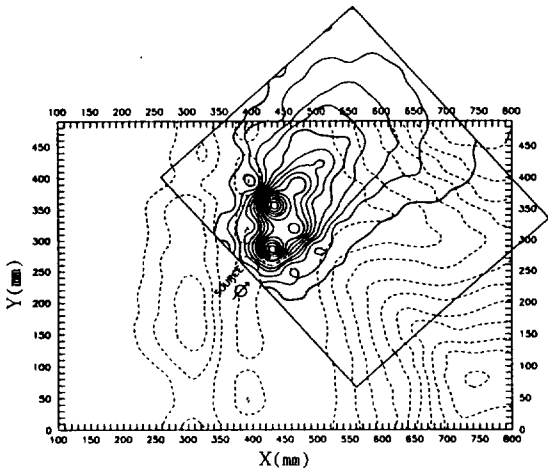
다는 오염원에 인접되어 있다. 그림 7의 등농도곡선들이 최대 오염지역 부근에서 분리되는 현상도 동일한 이유로 설명할 수 있는데, 농도가 높아진 X=430, 480 등은 모두 측정점이 위치한 지점들이다. 그림 6의 평지의 경우도 이같은 현상을 관찰할 수 있으나 그림 7과 같이 뚜렷하지 않다.

그림 8의 (a)와 (b)는 산지지역에 서풍이 불 때, 건물 #1과 #3에서 배출된 가스가 확산되는 모습을 보여준 것이다. 풍향은 지형모형을 회전시켜 조절하였으므로 그림 8의 농도 좌표계는 그림 7과 비교하여 시계바늘과 반대방향으로 45° 만큼 회전시킨 결과가 된다.

(a)와 (b) 모두에서 확산초기 고농도 등고선이 오염원 왼쪽으로 치우친 경향을 보이는 것은 건물 앞쪽의 구멍이 풍향에 비스듬하게 장애물로 작용하여 장애물을 따라 흐르는 유동이 형성되는데 따른 channel 효과로 해석된다 (Hunt et al., 1978). 확산후기에는 plume이 계곡을 만나 계곡쪽으로 편향되면서 확산이 진행되는데 이같은 경향은 오염원이 계곡의 아래쪽에 위치하였던 그림 8의 (a)에서 특히 두드러진다. 그림 8의 (a) 보다 (b)의 오염도가 심한 것은 건물 #3의 경우 바람이 불어오는 쪽이 구멍으로 막혀있어 건물 #3의 후면까지 구멍의 후류(wake) 지역에 포함되기 때문이다.



(a) Source is located on the Building #1.



(b) Source is located on the Building #3.

Fig. 8. Dispersion of plume when the wind blows from the west. Both minimum contour and contour interval are 40ppm as were in Fig. 7.

4. 결 론

주바람의 방향이 북서풍일 때 중립상태에서 풍동 실험에 의한 산지지형에서의 유동특성을 요약하면 해면으로부터의 바람이 초기에 산지를 만나 그 산지의 측면방향으로 퍼져 나가고 건물을 포함하는 산지의 후면은 유동박리(flow separation) 영역이 되어 난류강도가 대단히 높아 심한 확산을 일으킨다. 고도가 높아질수록 경계층내 유동은 유동박리 영역을 벗어나 주바람의 방향과 유속으로 접근하는데 실험 결과를 살펴보면 장애물에서 수직으로 100mm정도만 되어도 유속이나 풍향이 접근유동에 상당히 근접하여 지형에 의한 경계층의 교란은 최대 장애물 높이의 2배정도로 추측된다. 바람이 더 진행하면 남쪽과 동쪽의 두 산과 그 사이 계곡의 영향이 두드러져 유동은 주로 계곡으로 몰려 빠져 나간다.

산지지형에서의 오염물질의 확산 역시 전술한 유동특성이 그대로 반영되어 일어나고 있다. 확산 초기의 복잡지형에서는, 특히 바람이 불어오는 쪽에 산지나 건물이 높일 경우 유동박리의 영향으로 하류에 심한 확산과 함께 정체현상이 일어나 오염도

가 급격히 높아진다. 장애물이 오염원의 높이보다 높고 풍향에 대해 기울어진 경우에는 장애물을 따라 흐르는 유동으로 인하여 확산의 편향현상이 뚜렷하다. 확산이 진행되며 산, 계곡등의 산지와 만나게 되면 산에서는 유선(streamline)이 발산하여 오염물질이 흐트러져서 농도가 낮아지고 계곡쪽에서는 반대로 농도가 높아진다.

풍동실험은 아직까지 복잡지형에 대한 이론적 모델개발이 미숙하다는 점에서 국토의 대부분이 산지인 국내 오염원 배출물의 확산특성 조사에 특히 유용하게 이용될 수 있다. 풍동실험 자체로써 실측의 부족함을 보완할 수 있으며 이론적 모델과 함께 사용함으로써 오염원 주변지역의 오염현상을 구조적으로 분석할 수도 있다. 또한 Hunt(1973, 1985 등)에게서 대표적으로 볼 수 있는 바와 같이 풍동실험은 복잡한 지형내 이론적 대기확산 모델개발을 위한 가장 효율적 수단이기도 하다.

〈감 사〉

본 연구는 과학기술처 기본과제로 시작된 후 청정 에너지정책 수립을 위한 동력자원부 출연연구사업의 일환으로 진행되었습니다. 연구비를 지원하여 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

경남호, 김영성 (1990) 복잡한 지형내 오염물질의 대기확산 모델개발 연구, 한국동력자원연구소 연구보고서 KE-90(B)-11, 과학기술처.
 김영성, 경남호, 선도원, 조성호 (1991) 에너지소비에 따른 대기환경영향 평가기법 개발 (II) 한국에너지기술연구소 연구보고서 KE-91049G.
 Cermak, J. E. (1971) Laboratory simulation of the atmospheric boundary layer, AIAA J., 9, 1749-1754.
 Cermak, J. E. (1976) Aerodynamics of buildings, Annual Review of Fluid Mech., 8, 75-106.
 Counihan, J. (1968) An Improved Method of Simulating an Atmospheric Boundary Layer, Central Electricity Research Laboratory Report No. RD/L/R 1540, Surrey, England.
 Counihan, J. (1973) Simulation of an adiabatic urban boundary layer in a wind tunnel,

Atmospheric Environment, 7, 673-689.
 DiCristofaro, D. C., D. G. Strimaitis, B. R. Greene, R. J. Yamartino, A. Venkatram, D. A. Godden, T. F. Lavery, and B. A. Egan (1985) EPA Complex Terrain Model Development, Fifth Milestone Report, EPA Publication No. EPA/600/3-85/069.
 Hunt, J. C. R. (1973) A theory of turbulent flow round two-dimensional bluff bodies, J. Fluid Mechanics, 61, 625-706.
 Hunt, J. C. R. (1985) Turbulent diffusion from sources in complex flows, Ann. Rev. Fluid Mech., 17, 447-485.
 Hunt, J. C. R., C. J. Abell, J. A. Peterka, and H. Woo (1978) Kinematic studies of the flow around free or surface mounted obstacles; applying topology to flow visualization, J. Fluid Mech., 86, 179-200.
 Hunt, J. C. R. and H. Fernholz (1975) Wind tunnel simulation of the atmospheric boundary layer: A report on Euromech 50, J. Fluid Mechanics, 70, 543-559.
 Hunt, J. C. R. and P. J. Mulhearn (1973) Turbulent dispersion from sources near two-dimensional obstacles, J. Fluid Mechanics, 61, 245-274.
 Lawson, R. E. Jr, W. H. Snyder, and R. S. Thompson (1989) Estimation of maximum concentrations from sources near complex terrain in neutral flow, Atmospheric Environment, 23, 321-331.
 Plate, E. J. (1971) Aerodynamic Characteristics of Atmospheric Boundary Layer, U. S. Atomic Energy Commission, USAEC Technical Information Center, Oak Ridge, Tenn., 190pp.
 Skyllingstad, E. D. and G. L. Andrews (1989) A simple model for wind field estimation in complex terrain, 6th Joint Conf. on Applications of Air Pollution Meteorology, Anaheim, California.
 Snyder, W. H. and J. C. R. Hunt (1984) Turbulent diffusion from a point source in stratified and neutral flows around a three-dimensional hill-II. Laboratory measurement of source concentrations, Atmospheric Environment, 18, 1696-2002.

U.S. Environmental Protection Agency (1986)
Guideline on Air Quality Models (Revised)

EPA Publication No. EPA-450/2-78-
027R.