

풍동실험에서 상사조건이 실험결과에 미치는 영향에 관한 연구

The Effect of Similarity Condition for the Test Results in a Wind Tunnel Test

봉 춘 근 · 김 신 도 · 이 회 관¹⁾

서울시립대학교 환경공학부, ¹⁾University of Reading, U.K

(1999년 5월 11일 접수, 2000년 8월 9일 채택)

Choonkeun Bong, Shindo Kim and Heekwan Lee¹⁾

Department of Environmental Engineering, The University of Seoul

¹⁾Department of Construction Management & Engineering, University of Reading, U.K

(Received 11 May 1999; accepted 9 August 2000)

Abstract

To set the similarity conditions between a prototype, usually in the field, and its reduced-scale model is a crucial part in model tests. No technique is available to keep perfect similarity for this procedure so far. The experimental work using a wind tunnel is not exceptional. Based on the field measurements, the effect of stack parameters and wind conditions on the dispersion of stack plume has been investigated in the laboratory. In this paper, intensive methodology is focused on matching these similarities.

Due to the limitations to keep perfect similarity conditions, some simplifications are involved in common. In this study, geometric conditions and kinematic conditions using Froude number and Reynolds number have been considered to keep the similarity conditions required.

From the tests, it is found that the critical Reynolds number (Re_{crit}) is 2,700 when the height of stack discharge is 50 mm. The dispersion has a similar trend for the higher Reynolds number than the critical Reynolds number. It is also found that different Froude number does not make any significant influence for the normalized tracer gas concentrations at the recipient, providing the same ratio of the wind speed to the discharge speed. No significant effect of stack diameter is observed in the normalized tracer gas concentrations with the same Froude number. The similarity conditions, therefore, used in this study are reliable to simulate the conditions in prototype into the wind tunnel tests.

Key words : wind tunnel, similarity, Reynolds Number, Froude Number

1. 서 론

대기오염물질의 영향을 파악하는 방법으로는 수

학적 모델링과 풍동을 이용한 물리 모델링으로 나눌 수 있다. 풍동실험은 실제 표면 경계층과 유사한 바람을 풍동 내에 발생시켜 실험 모형상을 통과하게 하고, 그 주위의 유동장과 농도장을 측정하게 된

다. 즉, 풍동실험은 실제 공기를 이용하고, 기하학적 상사에 의해 측정 대상지역을 풍동 내에 재현시키고 실험하기 때문에 많은 비용과 시간을 투입하지 않고도 실측조사에 상응하는 정확하고 상세한 측정치를 얻을 수 있다. 또한 풍향과 풍속 등의 유동조건을 제어할 수 있으므로 풍동 내에 균일한 분산조건에서 얻어진 상세한 측정치들은 수학적 모델의 보완 및 평가에 효과적으로 이용될 수 있다.

굴뚝으로부터 배출되는 연기의 거동과 관련된 연구를 위해 풍동을 이용한 예는 Sherlock과 Stalker (1940) 등에 의한 "The Control of Gases in the Wake of Smoke Stacks"에서 처음으로 찾아볼 수 있다. 그 이후 Storm *et al.* (1957)은 공장의 굴뚝으로부터 배출되는 오염물질의 농도를 추정하는데 풍동을 사용하였으며, Mochida *et al.* (1994), Dean (1977), Barrett (1973), Halitsky (1962) 등도 풍동실험을 통해 굴뚝 배출 오염물질의 영향을 파악하고자 하였다.

Huber와 Snyder (1982)은 배출관련 상사 기준을 적용한 연구에서 굴뚝의 downwash를 막기 위해 가벼운 가스를 사용하는 방법으로 배출가스의 밀도를 조절하였다. 또한 Ricou와 Spaulding (1961)은 Re (레이놀즈수)가 굴뚝 주변에서의 흐름에 미치는 영향에 관하여 연구하였다. 또한 Snyder (1981)의 보고에 의하면, Golsdtein (1965)은 굴뚝 내부의 조건이 실험결과에 미치는 영향을 연구하여, downwash를 모사하지 않는 경우 굴뚝 내부의 Re 는 중요하지 않음을 밝혔다.

Snyder (1981)는 오염물질의 거동을 추정하기 위한 풍동 실험에서, 배출 관련 실험을 위한 상사조건으로 Re_{crit} (임계레이놀즈수)의 일치, 풍속과 토출 속도, 공기와 배출가스의 밀도, Fr (푸르드수)의 조건을 지침으로 제시하였다. 또한 Mochida *et al.* (1994)은 터널 내에서 분산과 관련된 실험을 위한 상사조건에 관하여, Snyder (1981)가 제시한 지침을 기본으로 한 실험적 연구를 통해 Re 가 충분히 클 경우 풍속과 토출 속도의 비를 일치시킬 것을 제안하였다.

밀도차가 있는 가스의 분산은 부력의 영향이 매우 크기 때문에 풍동을 이용하여 배출 관련 실험을 할 때, 대부분의 연구자들은 Fr 일치 조건의 만족을 1차적인 전제로 실험하며, 다른 조건들에 대한 상사는 거의 무시한다. 그러므로 흐름의 특성을 결정짓는 접근 유동에 대한 상사조건 외에 배출과 관련된

상사는 Fr 와 관련된 식으로부터 비롯된다고 할 수 있다.

또한, 풍동실험을 용이하게 하기 위해서는 풍동 내에 낮은 풍속을 재현하는 것이 매우 어렵기 때문에 가능하면 풍속이 높은 상태에서 실험을 하는 것이 좋다. 풍동실험에서 축소비는 보통 1/100~1/1,000이며, 이러한 경우 실제 대기 중에서의 풍속이 5~10 m/s인 상황에 대하여 실험한다 하더라도, 완벽한 Re 상사를 일치시키는 것은 불가능하다. 뿐만 아니라, 대기 중에서의 Fr 를 고려할 경우에도 0.025 m/s~1.0 m/s로 재현해야 하는데 사실상 풍동 내에서 0.1 m/s 이하의 풍속을 재현한다는 것도 불가능하다. 그러나 실험 모형의 축소비를 작게 하는 것은 풍동의 차폐효과 등을 고려할 때 제약이 발생하므로 최대한의 범위에서 적당한 축소비를 유지하여야 할 것이다. 또한 접근 풍속과 관련된 상사조건을 만족하더라도 굴뚝 내부, 건물 표면의 Re 등을 만족시킬 수 없다.

이러한 제약조건들이 풍동실험을 어렵게 하는 경우가 많기 때문에, 본 연구에서는 풍동을 이용하여 대기오염물질의 영향을 파악하고자 할 때, 이러한 제약조건들을 완화시킴으로서, 용이하고 정확한 평가를 위한 방안을 제시하고자 하였다.

2. 이론적 배경

풍동을 이용한 모델실험에서 실제 지형과 모형간의 정확한 상사의 일치조건은 다음과 같이 정리된다.

1) 기하학적 축소비: 굴뚝의 직경과 굴뚝 높이 비의 일치: $D_m/D_p = H_m/H_p$

2) 실제 지형과 모형에서 배출가스와 공기의 밀도 비의 일치: $\{(\rho_s - \rho_a)/\rho_a\}_p = \{(\rho_s - \rho_a)/\rho_a\}_m$

3) 배출원 높이에서 굴뚝으로 접근하는 풍속과 굴뚝으로부터 배출되는 배출가스의 속도비 일치 또는 바람의 momentum flux와 배출가스의 momentum flux 비의 일치:

$$(W/U)_p = (W/U)_m \text{ or } (\rho_s W^2/\rho_a U^2)_p = (\rho_s W^2/\rho_a U^2)_m$$

4) 실제 지형과 모형에서 배출가스의 관성력과 부력의 비를 표현하는 Fr 의 일치:

$$\{W^2 \rho_a / g D \Delta \rho\}_p = \{W^2 \rho_a / g D \Delta \rho\}_m$$

5) 접근 유동의 wind profile, 난류강도, 난류 스케일 및 Re 상사

여기서 아래첨자 p와 m은 각각 proto type과 model, s와 a는 stack과 air를 가리키며, D는 굴뚝의 직경 (m), H는 굴뚝의 높이 (m), ρ 는 배출가스의 밀도 (kg/m^3), W는 토출속도 (m/s), U는 굴뚝높이에서의 접근풍속 (m/s), g는 중력 가속도 (m/s^2)을 가리킨다.

위의 5가지 조건 중 배출가스의 밀도는 실제 조건과 모형에서 동일한 가스가 사용된다면, 완벽하게 일치하는 것이다. 그렇지 않더라도 3)항과 4)항을 만족시키면 자동으로 상사를 만족시킨다고 볼 수 있다.

배출에 관한 상사조건은 Fr의 일치를 1차적인 조건으로 실험을 하는 것이 일반적이다. Fr의 일치를 전제로 실험할 경우에는 실제 조건의 배출물질보다 밀도가 작은 가스를 사용함으로써 풍속을 조절할 수 있다. 즉, $\{W^2 \rho_a / gD \Delta \rho\}_p = \{W^2 \rho_a / gD \Delta \rho\}_m$ 로부터 $\Delta \rho$ 의 값을 증가시키면, 굴뚝으로부터의 배출속도 W_s 를 $\sqrt{\Delta \rho}$ 배 증가시킬 수 있기 때문에, 풍속 U도 W와 동일한 비율만큼 증가시킬 수 있다. 그러나 이러한 경우에는 운동량의 비를 동시에 만족시킬 수는 없다는 단점이 있기는 하다. 또한 위의 식을 이용하면, 굴뚝 직경 D를 변경하는 경우에도 풍동내의 풍속을 \sqrt{D} 배 만큼 증가시킬 수 있을 것으로 생각된다.

Briggs (1965)는 굴뚝으로부터 배출되는 가스에 대한 초기 운동량과 부력에 의한 상승을 포함한 궤적을 식(1)과 같이 표현하였으며, 풍동실험을 위한

배출조건으로 이들의 일치를 제안하였다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta h}{H}\right) &= \beta_1^{3/2} \left(\frac{\rho_s W^2 \cdot D^2}{\rho_a U^2} \right) \left(\frac{x}{H}\right) + \\ &\beta_2^{3/2} \left(\frac{g D^2 W \Delta \rho}{4 \rho_a U^3 H}\right) \left(\frac{x}{H}\right) \\ &= \beta_1^{3/2} \left(\frac{l_m}{H}\right)^2 \left(\frac{x}{H}\right) + \beta_2^{3/2} \left(\frac{l_B}{H}\right)^2 \left(\frac{x}{H}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, β_1 과 β_2 는 유입계수 ($\beta_1 = 1/3 + U/W$, $\beta_2 = 0.6$), l_m 은 운동량의 길이 (momentum length scale, m), l_B 는 부력의 길이 (buoyancy length scale, m), x는 배출원으로부터 풍하거리 (m)를 나타낸다. Briggs (1965)는 이들의 관계를 다음 식(2)와 식(3)과 같이 간단하게 정리하였다.

$$l_m = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho_s}{\rho_a}\right)^{1/2} \frac{W}{U} D \quad (2)$$

$$l_B = g \frac{D^2}{4} \frac{W}{U^3} \frac{\Delta \rho}{\rho_a} \quad (3)$$

식(1)에서 x/H 항을 정리하면 식(4), (5)와 같은 상사 파라미터가 발생하고, 이 식을 이용하면 위의 3), 4)항의 배출관련 상사조건을 일치시킬 수 있다.

$$\frac{l_m}{H} = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho_s W^2}{\rho_a U^2}\right)^{1/2} \left(\frac{D}{H}\right) \quad (4)$$

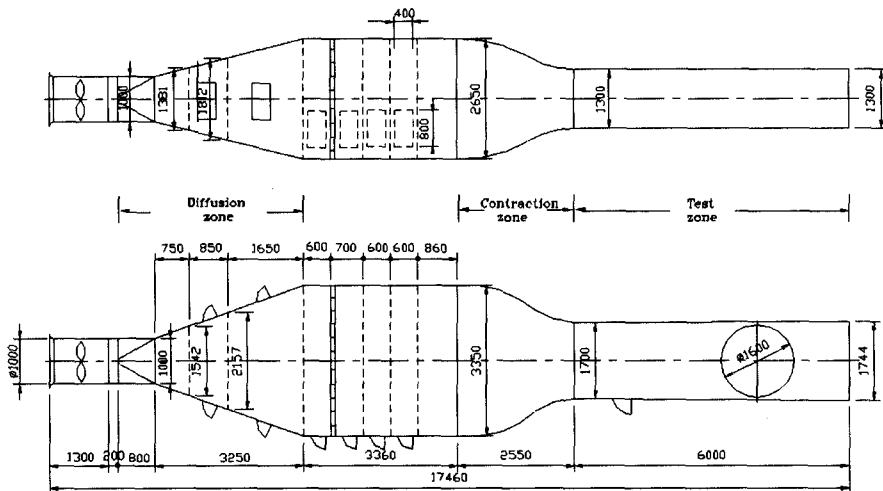


Fig. 1. The dimension of wind tunnel.

$$\frac{l_B}{H} = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{Fr_a^2} \right) \left(\frac{D}{H} \right) \left(\frac{\rho_s W^2}{\rho_a U^2} \right)^{3/2} \left(\frac{\rho_a}{\rho_s} \right)^{3/2} \quad (5)$$

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험장치

본 연구에서 사용한 풍동은 개방 토출형 환경풍동으로 전장이 17.46 m이다. 풍동의 수축비는 4:1, 측정부의 길이는 6 m이며, 폭은 1.7 m, 높이는 1.3 m이다. 풍동 내에는 수축부 입구에 설치된 0.25 m의 삼각 spire-type의 와류발생기와 바닥에 길이 10 mm 정도의 인공잔디를 설치하여 중립상태의 완전히 발달된 경계층을 모사할 수 있었다. 측정부에는 수동으로 360° 회전시킬 수 있는 직경 1.6 m의 원판이 설치되어 있다. 그림 1에 풍동의 제원을 나타냈다.

또한 풍동의 내부에는 이송거리가 x 방향으로 2 m,

y 방향으로 1.6 m, z 방향으로 0.6 m 이동 가능하고, 이동속도가 0.2 m/min인 3차원 자동이송장치(3D auto traversing system)가 설치되어 있으며, 이를 이용하여 풍속 측정용 hot-wire 센서 및 측정 probe를 자동으로 움직일 수 있다.

풍동 내에서는 0.3 m/s 이상의 풍속을 최대 8 m/s 까지 안정적으로 발생시킬 수 있으며, 풍속 균일도(uniformity)는 풍동 내에 아무 것도 설치되어 있지 않은 상태에서 1.5% 이내로 오염물질의 분산 실험에 적합하도록 설계하였다. 풍동에서의 풍속 조절은 inverter에 의해 출력 주파수를 조절함으로써, 송풍기의 회전수를 조절하여 원하는 풍속을 만들 수 있도록 되어 있다. 그림 2에 풍동의 수평, 수직 단면을 나타냈다. 풍속의 측정에는 X-type hot-wire Anemometer (IHW-100, KANOMAX, Japan)를 이용하였다.

그림 3(a), (b)는 풍동 내에 재현한 접근유동의 평균 풍속과 난류강도의 수직 분포를 나타낸 것이다.

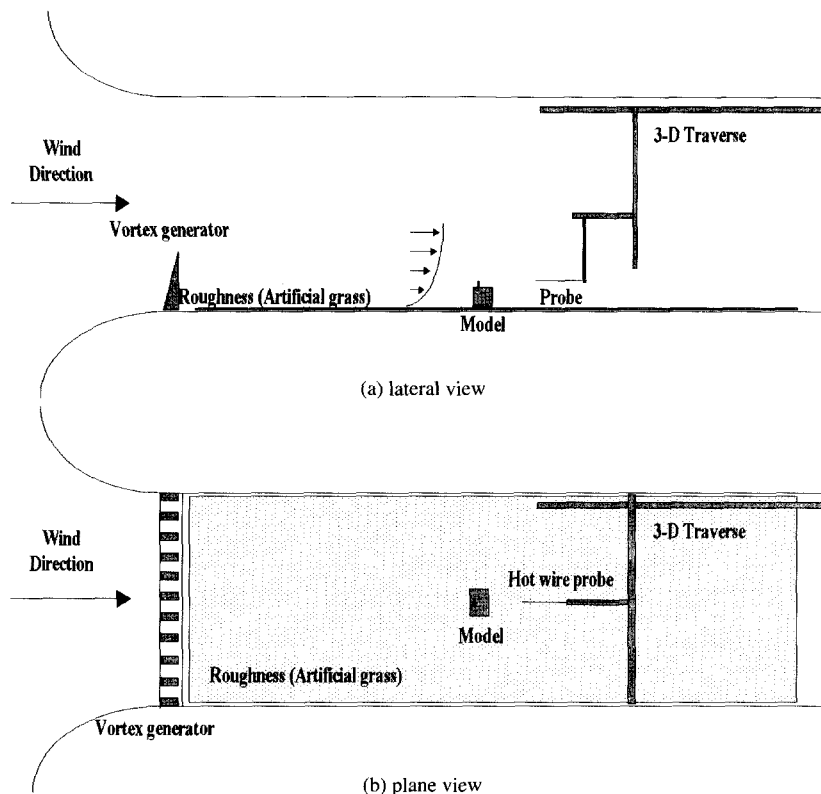


Fig. 2. Schematic diagrams of the wind tunnel used for the experiment.

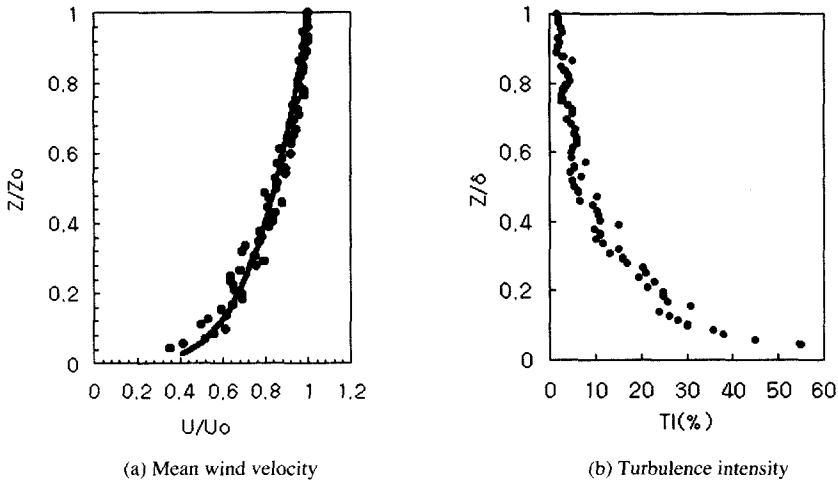


Fig. 3. Vertical profiles of wind velocity and turbulence intensity of approaching flows in wind tunnel.

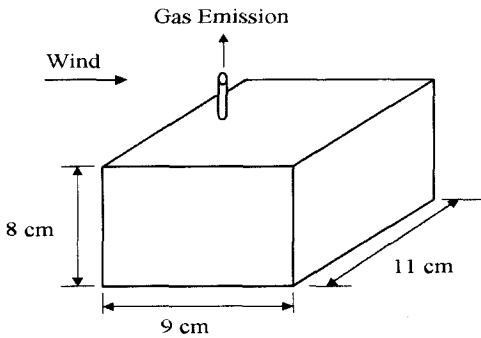


Fig. 4. Dimensions of a manufactured building and stack used for the test.

바람의 측정은 경계층 상층부의 풍속 2m/s를 기준으로 하였으며, 이때 생성된 경계층의 높이는 24cm 이고, power-law에 대한 지수 값은 약 0.25 정도로 도심지역의 중립상태에 해당되는 바람을 모사하고 있다.

실험모형은 그림 4에 나타낸 바와 같이, 건물은 폭 11cm, 길이 9cm, 높이 8cm이다. 실험 모형의 단면은 풍동의 높이 1.3m, 폭 1.7m인 점을 고려할 때, 풍동의 단면적과 모형의 단면적의 비로 표현되는 차폐율(blockage ratio)은 0.36%이다. 차폐율이 5%를 넘을 경우, 풍동 실험시 모형으로 인해 기류의 왜곡이 발생하는 것으로 알려져 있으며, 이에 대

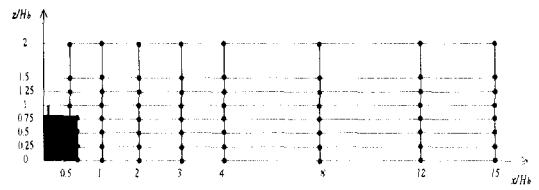


Fig. 5. Sampling points at the vertical plane crossing the stack on the model building.

하여 Snyder(1981)는 5% 이하로 할 것을 제안하였다. 건물의 옥상면에 위치한 굴뚝 배출구는 건물 옥상보다 2cm 높게 설치하였으며, 굴뚝의 직경은 실험조건에 따라 변화시켰다.

본 연구에서 사용한 추적가스로는 실제 굴뚝으로부터 가장 많이 배출되고 있는 이산화탄소(CO₂)를 사용하였으며, 농도의 측정에는 비분산적외선법(NDIR)을 이용하는 COX-2(SIBATA, Japan)를 이용하였다. 측정 프로브는 자동 이송기에 설치하여 측정지점을 일정시간간격으로 이동하게 하였다. 측정기에 의한 측정값은 A/D 신호 변환기를 통하여 P/C로 전송되어 5분간 농도를 평균하여 사용하였으며, 대기중의 농도를 지속적으로 측정하여 측정값과 대기중의 차를 실제 측정 농도로 하였다. 농도의 측정지점은 그림 5에 나타낸 바와 같이 연기의 농도가 가장 높을 것으로 추정되는 중심선을 기준으로 선정

하였다.

측정농도는 다음 식(6)을 이용하여 무차원화 하였다.

$$C = C_m \times \frac{H^2 U}{Q} \times 10^{-5} \quad (6)$$

여기서, C 는 무차원 농도를 나타내며, C_m 은 측정농도 (ppm), Q 는 배출량 (m^3/s)을 나타낸다.

3. 2 실험조건

3. 2. 1 Re 변화에 따른 특성

실제와 모형간에 Re 를 정확하게 상사하는 것은 불가능하기 때문에 Re_{crit} 조건을 찾고, 그 이상의 풍속에서 풍동실험을 실시하는 것이 일반적이다. 표 1은 Re 에 따른 분산특성을 파악하기 위한 실험 조건을 나타냈다. 이 실험에서는 배출속도와 풍속의 비를 일치하는 조건을 우선으로, 전반적인 분산 특성을 조사하고자 하였다. Re 산정시 대표길이는 굴뚝의 높이 10cm를 기준으로 하였다.

또한, 굴뚝 높이를 기준으로 풍속을 0.175~3 m/s 까지 단계적으로 증가시키면서, PIV (particle image velocimetry)를 이용하여 Re 에 따른 건물 후류에서의 유동 재부착점 (flow reattachment point)의 거리를 측정하였다.

Table 1. Test conditions for plume diffusion around a building with varying wind speed.

Exp. No.	D (mm)	U_o	W_s	W_s/U_o	Re
Exp. 1	3.76	0.35	0.175	0.5	2.33×10^3
Exp. 2	3.76	0.5	0.25	0.5	3.33×10^3
Exp. 3	3.76	0.7	0.7	0.5	4.67×10^3

Table 2. Test conditions for the relaxation of emission similarity criteria.

Exp. No.	Proto type	Exp. 4	Exp. 5	Exp. 6	Exp. 7	Exp. 8	Exp. 9
D (mm)	1.2(m)	4.56	6.14	4.56	4.56	4.56	4.567
H_s (m)	26.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
U_o	8.0	0.49	0.57	0.35	0.98	2.0	0.7
W_s	3.5	0.21	0.25	0.15	0.43	0.99	1.67
U_o/W_s	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.49	2.38
Fr	1.41	1.41	1.41	0.69	2.78	10.45	17.64
l_m/H_s	0.012	0.012	0.016	0.012	0.012	0.012	0.059
l_b/H_s	5.0×10^4	5.0×10^4	7.0×10^4	9.0×10^4	1.0×10^4	1.3×10^5	5.0×10^4
ρ_s/ρ_a	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.2	1.2
Re	1.4×10^7	3.3×10^3	3.8×10^3	2.3×10^3	6.5×10^3	1.3×10^4	4.7×10^3

3. 2. 2 배출조건의 변경에 따른 특성

본 연구에서는 풍동실험을 용이하게 할 수 있는 조건 중 배출조건을 조절하여 풍동내의 풍속을 증가시킬 수 있는 방안에 대하여 고찰함을 주목적으로 하였다. 배출조건을 변경한 실험조건을 표 2에 정리하였다. 모든 배출조건은 건물 후류에서 down-wash가 발생하는 조건을 만들기 위해 풍속과 토출속도의 비를 2:1로 설정하였다.

Exp. 4는 실제의 배출을 Fr 조건을 기준으로 정확하게 상사시킨 것이며, 굴뚝 직경을 기준으로 한 모형의 축척비는 1/263이다. Exp. 5는 굴뚝 직경의 변화에 따른 차이를 알아보기 위한 것으로서, Fr 를 Exp. 4과 동일하게 유지하고 직경을 변화시킨 후 각 지점에서의 농도를 측정하였다. 따라서 굴뚝으로부터의 배출속도와 풍속이 일정비율로 증가하였으며, 운동량이 Exp. 4보다 약간 증가하였다. 만약 굴뚝의 모형 전체에서 다른 지형들에 대한 기하학적 상사조건은 만족하고, 굴뚝의 직경을 증가시키거나 감소시킨다면 모형에서의 흐름의 상태가 어느 정도는 변하게 될 것으로 생각된다. 그렇지만 본 연구에서는 굴뚝의 직경 증가가 주변 지형에서 공기의 흐름에 영향을 주지 않을 것으로 생각되는 범위 내에서 약간 증가되었을 경우에 대한 실험을 실시하기로 하였다.

Exp. 6과 Exp. 7은 Fr 조건을 무시하고, 굴뚝으로부터의 배출속도와 풍속의 비를 일정하게 유지하였을 때의 결과를 알아보기 위한 조건이다. 이 조건에서는 배출가스와 공기의 밀도차가 변하지 않으므로 운동량의 길이 비가 자동으로 일치된다.

Exp. 8과 Exp. 9는 배출속도와 풍속의 비를 무시

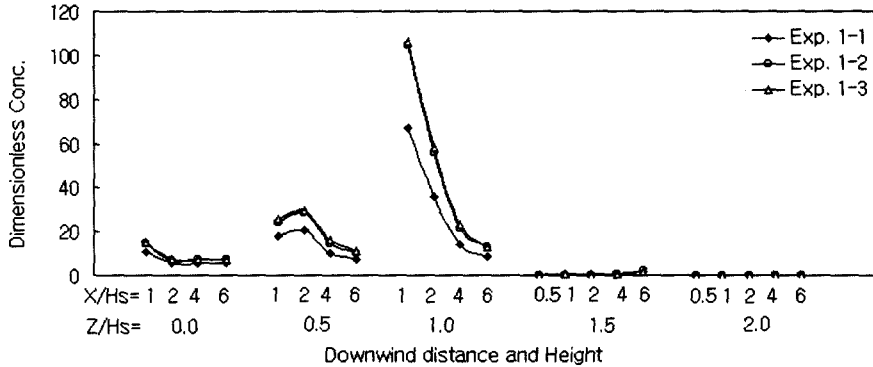


Fig. 6. Concentration trend according to different Re.

하고, 각각 운동량의 길이와 부력의 길이가 일치되는 조건을 조사하기 위한 것으로, 이 조건에서도 Re 를 상당히 증가시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 이 조건에서는 배출 가스의 온도를 100°C 증가시켰으므로, 배출 가스의 밀도를 변화시켰으며, Fr 및 배출 속도와 풍속 비는 무시하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 Re 변화에 따른 결과

4.1.1 농도분포 실험결과

그림 6(a), (b), (c)은 풍속의 증가 즉, Re 의 증가에 따른 분산특성을 파악하기 위한 Exp. 1~Exp. 3, $Y=0$ 평면에서의 실험결과를 나타낸 것이다. 전반적으로 세 가지 경우 모두 유사한 분산 형태를 보이고 있었다. 그렇지만 Fig. 6에서 알 수 있듯이 Exp. 1은 Exp. 2, Exp. 3과 비교할 때 배출원으로부터 멀리 떨어진 부분과 건물 근처 높이 $0.5H$ 이하에서는 농도가 낮게 검출되었다.

따라서 실험시 Snyder(1981)가 제안한 건물 주변에서의 Re_{crit} 값 10^4 보다는 낮고 Mochida *et al.* (1994)이 제안한 2.35×10^3 보다는 높은 3.33×10^3 정도에서 충분한 난류를 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

4.1.2 PIV를 이용한 유동 재부착점의 관측

흐름의 상태에 관하여 Re_{crit} 를 찾기 위한 가장 적절한 방법은 건물의 옥상으로부터 풍하측에 발생하는 유동박리(flow separation)에 대한 재부착 거리(reattachment distance)를 측정하는 것이다. 즉, Re_{crit}

Table 3. Reattachment distance of the air flow field corresponding to Reynolds number.

Wind speed (m/s)	Reattachment distance (L/H_b)	Reynolds number
0.25	1.51 ± 0.10	1.67×10^3
0.38	1.73 ± 0.08	2.53×10^3
0.45	1.80 ± 0.95	3.00×10^3
0.63	1.78 ± 0.12	4.20×10^3
0.75	1.78 ± 0.07	5.00×10^3
1.00	1.76 ± 0.08	6.67×10^3
3.00	1.76 ± 0.10	2.00×10^4

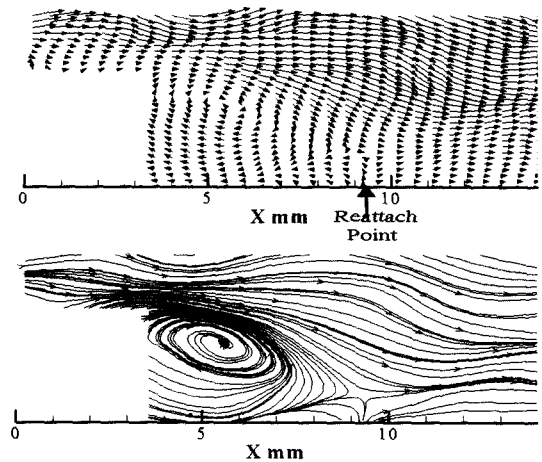


Fig. 7. Vector field and streamlines taken by the PIV system. (Wind speed : 0.38 m/s)

이상에서는 유동박리가 재부착되는 지점까지의 거리가 거의 일정하게 나타나는 것으로 보고되고 있

다. 표 3은 PIV를 이용하여 측정된 흐름의 재부착 거리를, 그림 7은 풍속 0.38 m/s에서 재부착 거리 측정 예를 벡터와 유선으로 나타낸 것이다. 여기서 Re 의 산정은 굴뚝의 높이 10 cm를 기준으로 산정하였

다. 표에서 볼 수 있듯이 본 연구에서는 풍속이 0.38 m/s 이상 즉, Re 가 2.53×10^3 이상에서 재부착거리가 거의 유사하게 나타나 굴뚝 높이를 기준으로 산정한 건물 후면의 Re_{crit} 는 2.53×10^3 임을 확인할

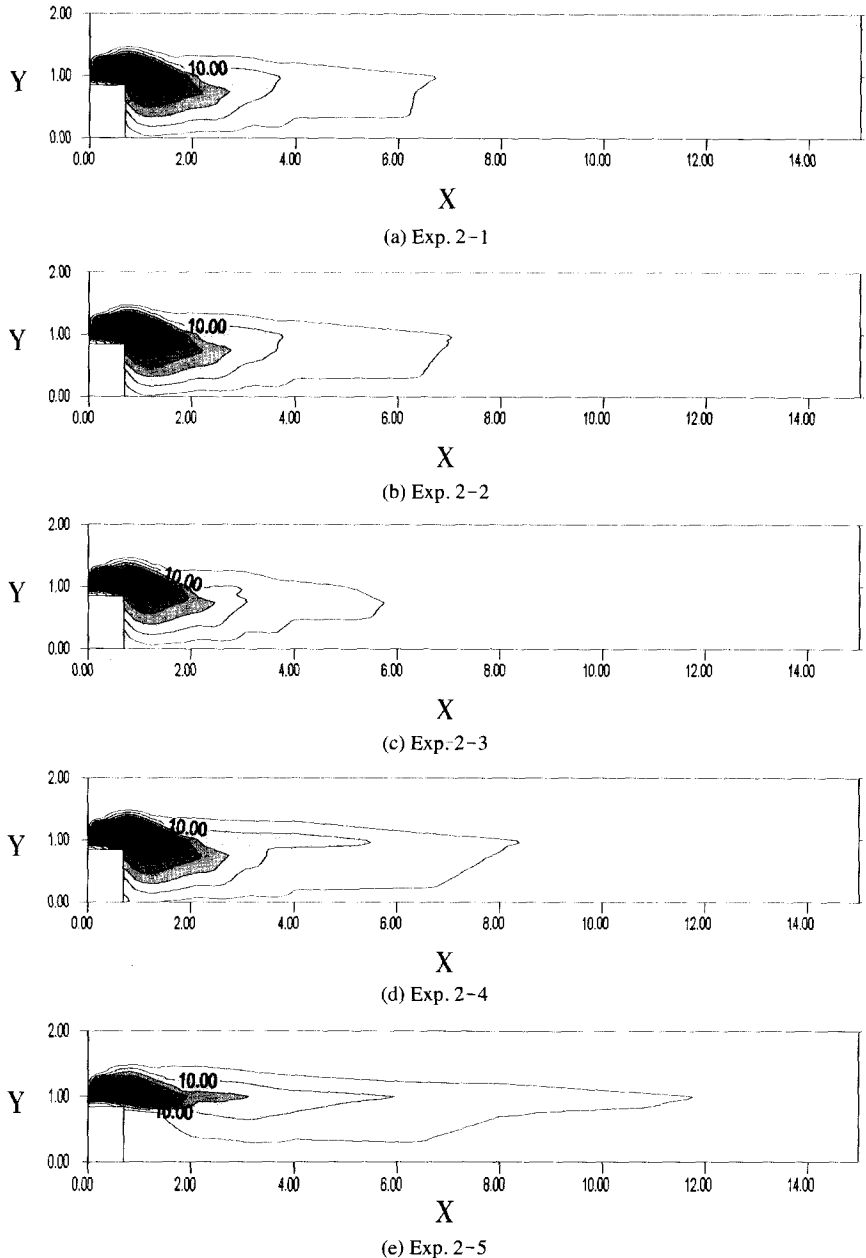


Fig. 8 Plume diffusion with the test conditions in Table 3. 2. ($X = x/H_s$, $Y = z/H_s$)

수 있었다.

4.2 배출조건의 변경에 따른 실험결과

그림 8은 실험조건에 따른 연기의 전반적인 분산 특성을 나타낸 것이다. 밀도차가 있고, 온도와 관련된 문제를 파악하고자 배출 온도를 100°C 증가시킨 Exp. 8을 제외한 모든 실험에서 전반적으로 연기의 분산특성은 거의 유사한 형태를 하고 있다. 또한 Exp. 6의 경우 앞의 Re에 따른 특성에서와 유사하게 배출원으로부터 멀리 떨어진 지역과, 건물근처 바닥 면에서 비교적 저농도로 나타났다.

그림 9는 Exp. 4와 굴뚝의 직경을 변화시킨 Exp. 5의 실험결과를 나타낸 것이다. 그래프에서 알 수 있듯이 직경이 변화하여도 수용점에서의 전체적인 농도는 매우 유사하게 검출되고 있음을 알 수 있다.

따라서 굴뚝직경을 증가시킬 수 있는 한계는 있으리라고 생각되지만, 직경의 증가에 따른 영향은 무시할 수 있었다. 이런 경우에는 미량으로 배출시킬 경우 발생할 수 있는 유량 조절의 어려움을 줄이고, 검출 농도를 증가시켜 배경농도가 높을 때 비교적 유용하게 사용할 수 있는 방법으로 생각된다.

그림 10은 풍속과 토출속도의 비를 일정하게 유지하면서, Re의 증가에 따른 경향을 나타낸 것이다. 여기서의 결과도 그림 6에 나타낸 것과 매우 유사한 결과를 나타내고 있다. Exp. 6의 경우에는 곳에 따라 농도가 낮은 부분이 있긴 하지만, 전반적인 경향을 보면 Exp. 4의 경우와 매우 유사한 농도로 검출되고 있음을 알 수 있다. Exp. 7의 경우에는 농도가 Exp. 4와 거의 동일하게 나타나 풍동내의 풍속을 증가시킬 필요가 있을 경우에 매우 유용하게 사

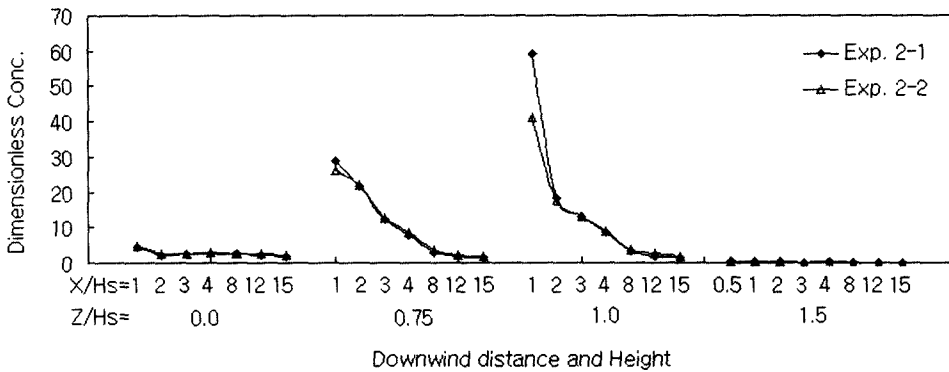


Fig. 9. Concentration trend by the variation of stack diameter. (maintained the same Fr condition)

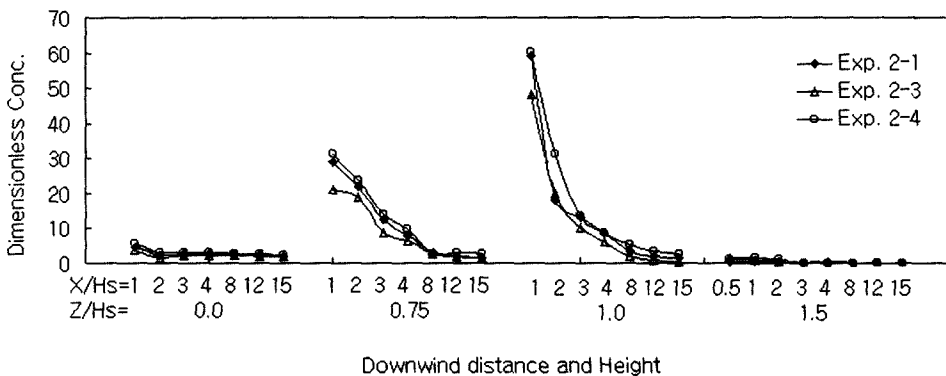


Fig. 10. Concentration trend by the wind speed variation. (maintained the same ratio of emission velocity to wind speed)

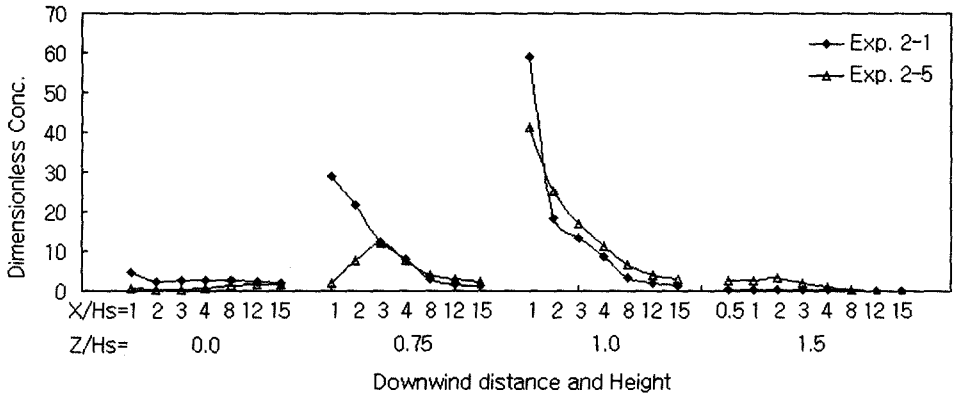


Fig. 11. Concentration trend by the density difference. (maintained the same buoyancy length scale ratio)

용할 수 있을 것으로 생각된다. 즉, 토출 속도와 풍속의 비를 일정하게 유지하는 경우 풍동내의 풍속을 증가시킬 수 있고, 따라서 Re_{crit} 조건을 쉽게 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

그림 11은 배출가스의 온도를 가열하고 부력의 길이 비를 일치시킨 결과를 나타낸 것이다. 전반적인 농도분포가 Exp. 4와 상이한 결과를 나타내고 있었다. 특히 굴뚝으로부터 멀리 떨어진 곳에서는 Exp. 4보다 높은 농도를 나타냈다. 반면 건물 가까운 곳에서는 지면의 농도를 포함하여 매우 낮은 농도를 나타내고 있었다. 이는 온도의 증가와 함께 부력의 길이를 일치시키긴 하였지만, 온도차나 밀도차로 인한 부력의 영향을 무시할 수 없음을 나타내는 것으로 생각된다. 따라서, 실제 상황에서 부력의 영향이 클 것으로 생각되는 조건에 대한 실험을 할 경우에는 부력에 대한 영향을 보다 신중하게 고려하여야 할 것으로 생각된다.

5. 결 론

굴뚝으로부터 배출된 오염물질의 영향을 평가하기 위한 방법은 여러 가지가 있으나 풍동실험은 현재 가장 신뢰할 만한 결과를 도출할 수 있는 추정 방법이다. 그러나 풍동을 이용할 경우에는 상사로 인한 몇 가지의 제약조건이 발생하게 되는데, 이러한 제약조건을 해결할 수 있는 방안이 모색된다면 풍동을 이용하여 오염물질의 영향을 평가할 때 더욱 많은 장점을 가질 것이다.

본 연구에서는 풍동을 이용하여 오염물질의 영향을 정량적으로 평가하고자 할 때, 가장 큰 제약조건인 Re 와 Fr 를 기준으로 한 연구를 통해 용이한 풍동실험을 수행할 수 있는 다음과 같은 결과를 도출하였다.

첫째로 일반적으로 생각하는 완전히 발달된 건물 주변에서의 난류 흐름을 평가하는 Re 에 대하여 고찰한 결과 기존에 Snyder(1981)에 의해 제시된 10^4 보다는 작고 Mochida *et al.* (1994)이 제안한 2.35×10^3 과 유사한 2.53×10^3 정도에서 흐름에 관한 충분한 Re_{crit} 를 얻을 수 있는 것으로 생각된다.

또한 배출조건에 대한 기준으로 적용하고 있는 Fr 에 대하여 고찰한 결과 충분히 발달된 난류 흐름에서는 토출 속도와 풍속의 비를 일치시킬 경우 충분히 신뢰할만한 결과를 얻을 수 있었다.

그러나 배출가스의 밀도를 조절하여 보다 강한 풍속으로 충분히 발달된 난류를 얻으려고 한 실험에서는 밀도차로 인하여 수용점에서 측정농도에 대한 오차가 큰 것으로 나타났다. 따라서 이에 대해서는 보다 세밀한 주의가 필요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

Barrett, R.V. (1973) Use of the wind tunnel to investigate the influence of topographical feature on pollution from a tall stack, Chimney Design Symposium, University of Edinburgh.

Briggs, G.A. (1985) A plume rise model compared with observations, Journal of Air Pollution control Asso-

- ciation, 15, 443-438.
- Dean, M. (1977) Gas pollution discharge from boiler stacks (A wind tunnel study), *University of Sydney*.
- Halitsky, J. (1962) Diffusion of vented gas around buildings, *J. of the Air Pollution Control Association*, 12, 74-80.
- Huber, A.H. and W.H. Snyder (1982) Wind tunnel investigation of the effects of a rectangular-shaped building on dispersion of effluents from short adjacent stacks, *Atmospheric Environment*, 16, 2837-2848.
- Mochida, A., S. Murakami, and S. Kato (1994) The similarity requirements for wind tunnel model studies of gas diffusion, *J. of Wind Engineering*, Vol. 59.
- Ricou, F.P. and D.B. Spalding (1961) Measurement of entrainment of axisymmetrical turbulent jets, *Journal of Fluid Mechanics*, 11, 21-32.
- Sherlok, R.H. and E.A. Stalker (1940) The control of gases in the wake of smoke stacks, *Mechanical Engineering*, 62, 455-458.
- Snyder, W.H. (1981) *Guideline for fluid modeling of atmospheric diffusion*. EPA, Report No. EPA-600/8-81-009, Research Triangle Park, North Carolina.
- Storm, G.H., M. Hackman, and E.J. Kaplin (1957) Atmospheric dispersal of industrial stack gases determined by concentration measurements in scale model wind tunnel experiments, *Journal of Air Pollution Control Association*, 7, 198-204.