

종횡비 변화에 따른 사각주형 구조물주위의 풍압계수 결정

Determination of Wind Pressure Coefficients around Prismatic Structures with Different Aspect Ratios

서상호*, 이광열**, 유상신***, 노형운****
 S. H. Suh, K. Y. Lee, S. S. Yoo, H. W. Roh

Key words : Wind Pressure Coefficient(풍압계수), Aspect ratio(종횡비), Wind Tunnel Test(풍동실험), Numerical Analysis(수치해석)

Abstract

The purpose of this study is to determine the wind pressure coefficients around prismatic structures with different aspect ratios. Air flows around a model of prismatic shape are investigated experimentally in the wind tunnel and simulated using finite volume method. Pressure distributions and the corresponding pressure coefficients are calculated from the experimental and numerical results. The effects of aspect ratios on the pressure coefficients are discussed extensively. The numerical results are compared with those of experiments. The simulated and experimental results for average wind pressure coefficients are considerably lower than those defined in the Korean Architectural Standard Code.

기 호 설 명

<p>A : 전면면적</p> <p>B : 사각주형 모형의 폭</p> <p>C_1, C_2, C_u : k-ε 난류모델의 경험상수</p> <p>C_p : 풍압계수</p> <p>$\overline{C_p}$: 평균풍압계수</p> <p>H : 사각주형 모형의 높이</p> <p>k : 난류운동에너지</p> <p>L : 사각주형 모형의 길이</p> <p>n : 지 수</p> <p>P : 전단응력 생성율(rate of production of shear stress)</p> <p>p : 풍 압</p>	<p>p'</p> <p>p_∞</p> <p>U</p> <p>\overline{U}</p> <p>u</p> <p>u</p> <p>$V(y)$</p> <p>V_∞</p> <p>y</p> <p>y_∞</p>	<p>: 시간평균 N-S방정식의 수정압력 $(p' = p + \frac{2}{3}\rho k)$</p> <p>: 기준압력</p> <p>: 속도벡터</p> <p>: 시간평균풍속</p> <p>: 속도변동텐서</p> <p>: 속도변동성분</p> <p>: 풍 속</p> <p>: 자유유동속도</p> <p>: 지표면으로부터의 높이</p> <p>: 대기경계층 높이</p>
--	---	---

그리이스 문자

<p>* 숭실대학교 기계공학과</p> <p>** 대림전문대학 건축과</p> <p>*** 한국항공대학교 기계설계학과</p> <p>**** 숭실대학교 대학원 기계공학과</p>	<p>ϵ</p> <p>μ_s</p>	<p>: 난류운동에너지 소산율</p> <p>: 유효점성계수</p>
---	--	--------------------------------------

- μ_1 : 층류점성계수
- μ_2 : 난류점성계수
- ρ : 밀 도
- $\sigma_{k,c}$: 난류운동에너지에 대한 유효 Schmidt-Prandtl수
- σ_ϵ : 난류운동에너지 소산율에 대한 유효 Schmidt-Prandtl수
- ϕ : 일반종속변수
- \otimes : 텐서적(tensor product)

1. 서 론

오늘날 도시의 인구집중현상으로 인한 택지의 부족과 지가상승에 대처하기 위한 방안의 하나로 건축물을 고층화하여 대지의 이용도를 높이는 방법이 강구되고 있다. 이에 따라, 고층건축물의 건설이 활발해지고 있으며, 구조적 안정성이 확보될 수 있도록 하기 위한 신기술이 계속 도입되고 있다. 과거에는 구조물을 설계할 때 무거운 재료를 많이 사용하므로써 지진하중이 상당히 중요시 되었지만, 최근에는 건축물이 점점 고층화되면서 건축물의 형상, 재료 및 건축물의 밀집정도 등에 따른 풍압의 크기가 지진하중보다 중요한 설계인자로 고려되고 있다.¹⁾

바람이 건물이나 구조물 전면에 접근하면 유동 진행방향으로 압력이 증가되고 건물상부로 진행한 유동은 경계층을 형성하면서 유동박리현상이 발생한다. 이때 유동박리로 인한 재순환영역이 간헐적으로 수축 또는 팽창하면서 공기의 유출입이 있게 되는데, 이 공간내에 건물환기장치의 흡기 또는 배기부가 공존하는 경우에는 심각한 문제점이 발생한다. 건물의 후면에도 유동의 박리로 인한 재순환영역이 형성되어 돌풍이 일어나고, 냉각탑등에서 나오는 공기흐름이 건물쪽으로 빨려 들어오는 현상이 생긴다.

이러한 구조물 주위의 바람유동을 해석하기 위한 방법으로 실제관측과 풍동실험, 그리고 수치해석적인 접근법이 많이 이용된다. 실제관측을 통한 구조물 주위의 유동현상을 연구하는 방법은 자연 풍중에서 직접 유동파라미터를 측정하는 것으로서 정확한 자료를 얻을 수 있는 장점이 있지만, 바람의 강도와 풍향등을 임의로 제어하기 어렵기 때문에

형상이 다양한 구조물주위의 유동특성에 관한 정보를 얻기 힘들 뿐만 아니라, 거액의 경비가 필요하고, 고도의 정밀도를 가진 측정기술이 요구되므로 실제로는 거의 이용하지 않고 있다. 풍동내에 실제 대기유동과 근사한 유동을 생성시키고 건축물이나 구조물 형상을 축소한 모형을 통과하도록 하여 모형주위의 유동장을 해석하는 방법이 많이 이용되고 있다.²⁾ 풍동실험을 수행하기 위해서는 바람의 특성, 상사조건과 측정기술에 관해 폭 넓은 이해가 필요하다. 또한, 급격히 발전하고 있는 컴퓨터를 이용하여 구조물주위의 유동을 해석하고자 하는 수치해석적 연구가 활발해지고 있다.^{2~8)} 수치해석적 접근법은 물리현상을 나타내는 지배미분방정식을 이산화하여 수치해를 구하는 방법으로서 풍동 실험으로 재현 곤란한 현상을 가시화하여 유동현상을 명확히 이해할 수 있는 장점이 있다. 최근에는 형상이 복잡한 구조물과 여러 형상의 건물이 뒤섞여 있는 경우에 대해서는 바람에 의한 구조물주위의 유동문제를 먼저 수치적 방법을 적용하여 전체적인 경향을 분석하고, 풍동 실험자료를 이용하여 수치 해석결과를 검증하는 추세에 있다.

따라서, 본 연구에서는 구조물주위의 유동현상을 이해하기 위한 기초연구로써 접근유동조건이 변할 때, 구조물의 중형비변화에 따른 구조물 주위의 유동장해석을 풍동실험 및 수치적인 방법으로 수행하여 구조물주위의 속도분포와 압력분포를 구하고자 한다. 수치계산결과는 실제 제작된 구조물 모형을 이용한 실험결과와 비교·검토하여 수치해석결과와 타당성을 검증한 다음 실제 구조물에 작용하는 풍압계수를 계산하여 풍해의 예측 및 대책을 수립하는 기초연구자료로 활용하고자 한다.

2. 관련이론

2.1 풍속의 수직분포

바람은 대기의 압력차에 의한 유동현상으로서, 일반적으로 수평방향의 흐름으로 정의한다. 바람의 중요한 특성중의 하나는 고도에 따른 풍속의 변화이다. 점성의 영향이 작용하는 영역을 대기경계층(atmospheric boundary layer)이라고 부른다. 지표면의 영향이 미치지 않는 대기경계층 바깥의 수

평흐름을 경도풍(傾度風)이라고 한다. 경도풍이 시작되는 곳까지의 높이를 대기경계층고도 혹은 경도풍고도라고 한다. 경도풍고도는 지표면에서 약 300~500 m 이상인데, 경도풍고도는 지표면 조도의 영향을 크게 받는다. 또한 바람은 불규칙한 변동 성분(fluctuation component)을 갖는 난류흐름이므로 시간에 따라 순간풍속이 달라지기 때문에 평가시간을 명시하여 평균풍속으로 바람의 강도를 나타내고 있다. 우리나라의 경우 풍속은 지상 10 m 지점에서 풍속계로 측정된 10분간의 평균풍속으로 나타낸다.

대기 경계층내 풍속의 수직분포에 대한 일반식을 지수법칙으로 나타내면 식 (1)과 같다.⁹⁾

$$V(y) = V_x \times (y/y_x)^{1/n} \quad (1)$$

여기서, y 는 지표면으로부터의 높이이고, V_x 는 대기경계층 밖의 풍속이며, y_x 는 대기경계층 높이이다. 식 (1)의 $1/n$ 은 Table 1과 같이 바람이 지나가는 지역의 건물, 숲, 경작물등의 밀도, 높이 및 크기에 따른 함수이다.

지형에 따라 ANSI A58.1-1972 규준에서 정하고 있는 고도분포지수에 관한 값과 Davenport⁹⁾가 제시한 값을 Table 1에 요약하였다.

2.2 풍압계수

물체표면의 정체점에서는 풍속이 0이지만 표면의 다른 곳에서는 일반적으로 풍속은 0이 아니다. 물체표면의 임의의 점에서의 풍속과 풍압을 각각 V , p 라고 하고, 중력의 영향을 무시하면 베르누이 방정식으로부터

$$p_x + \frac{\rho}{2} V_x^2 = p + \frac{\rho}{2} V^2 \quad (2)$$

이 된다. 여기서 p_x , V_x 는 물체표면에서 멀리 떨어진 상류에서의 기준풍압과 풍속이다. 본 연구에서는 경도풍고도에서의 압력과 속도를 기준풍압과 기준풍속으로 정하였다.

바람에 의한 압력차는 구조물주위의 풍속이 증가하거나 감소함에 따라 달라지게 된다. 만일, 물체표면의 풍속이 상류의 풍속보다 작다면 표면의 풍압은 상류의 풍압보다 크게 되고 물체표면에는 정압력(positive pressure)이 작용한다. 즉, $V < V_x$ 이면 $(p - p_x) > 0$ 이 된다. 또한, 물체표면의 풍속이 상류의 풍속보다 크게 되면 부압력(negative pressure)이 작용한다. $V > V_x$ 이면 $(p - p_x) < 0$ 이 된다. 물체표면에서의 속도를 구하기 어려우므로 V 를 0으로 가정하고 풍압계수를 식 (3)과 같이 정의하여 V 가 0이 아닌 경우의 압력차 ($p - p_x$)를 구할 수 있게 된다.

$$C_p = \frac{p - p_x}{\frac{1}{2} \rho V_x^2} = 1 - \left(\frac{V}{V_x} \right)^2 \quad (3)$$

V 가 0이 아닌 경우의 압력차는 식 (3)의 풍압계수로 쉽게 예측할 수 있다. 만일 $V < V_x$ 이면, $C_p > 0$ 이 되어 풍압계수는 양의 값(positive value)을 갖게 된다. 이와는 반대로 $V > V_x$ 이면 $C_p < 0$ 이 되어 부압이 작용하게 된다. 구조물 주위의 풍압계수는 구조물의 형상과 바람방향에 대한 구조물의 배치위치에 따라 크게 달라진다. 연속방정식을 만족하기 위하여 구조물주위에서의 풍속은 커져야 한다. 따라서 바람이 구조물전면에서 후면으로 유동함에 따라 풍압계수는 양의 값에서 음의 값으로 변하게 된다. 음의 풍압계수의 절대값은 양의 풍압계수의 절대값과 비교할 때 훨씬 크게 되므로, 부압으로 인한 문제점이 발생하게 된다. 또한 임의의 면에 대한 평균풍압계수, \bar{C}_p , 는 식 (4)와

Table 1 Parameters in Eq. (1) for different terrains

Terrain	Height of B.L.(y_x)	Power-law index(1/n)	
		Davenport ⁹⁾	ANSI standard
Open terrain	270 m	0.16	1/7
Suburban terrain	360 m	0.28	1/4.5
Large city	450 m	0.40	1/3

같이 정의한다.

$$\bar{C}_p = \frac{1}{A} \int_A C_p dA \quad (4)$$

3. 풍동실험

3.1 풍동장치

구조물에 작용하는 바람에 의한 유동특성을 연구하기 위하여 풍동실험을 수행하였다. 풍동실험은 풍동내에서 생기는 바람의 특성이 자연풍의 특성과 다르며, 모형의 축척(scaling)에 따른 역학적상사를 만족시키기 어려운 단점이 있으나, 실제 관측을 통한 방법보다는 풍동내에서 유동조건을 바꾸면서 유동특성을 예측할 수 있는 장점이 있다. 또한, 풍동실험은 실험에 따른 상사조건 파라미터를 달리 함으로써 가장 경제적으로 많은 양의 자료를 얻을 수 있으므로 일반적으로 내풍문제를 연구하는데 풍동실험이 많이 이용되고 있다.¹¹⁾

Fig.1은 구조물주위의 바람의 유동특성을 연구하기 위해 제작한 개방형 경계층풍동의 개략도이다. 경계층풍동(boundary layer wind tunnel)은 풍동내에 어떤 건축물이나 어떤 지역의 유동특성과 오염물질 확산을 연구하기 위해 대기경계층과 유사한 경계층을 생성시킨 풍동을 말한다. 이 풍동의 유로단면은 정사각형이고, 전체길이는 13.6m이다. 사용송풍기는 다익송풍기로 최대회전수 1220 rpm 이고, 소요 구동력은 11kw이며, 확대각 6.13°로 마찰손실이 최소가 되도록 제작하였다. 속도분포를 일정하게 하고, 기류의 난류도를 작게 하기 위하여 #10, #24의 스텐리스 금속격자망을 축류부 전방에 설치하였으며, 기류의 선회방지를 위하여 하니컴(honeycomb)을 설치하였다. 하니컴 눈의 치수는 망의 치수에 비해 상당히 큰 $\phi=9\text{mm}$ 를 사용하였다. 그러나 하니컴 후방의 난류강도가 비교적 크기 때문에 하니컴 후방의 난류강도를 줄이기 위하여 #24의 스텐리스격자망을 설치하였다. 송풍기에서 나오는 바람은 확대부를 통하여 풍속분포를 일정하게 하고, 난류도를 줄이기 위하여 격자망이 설치된 정류부를 통해 속도장 및 압력장을 일정하게 하기 위한 축류부를 거쳐 측정부에 도달하도록

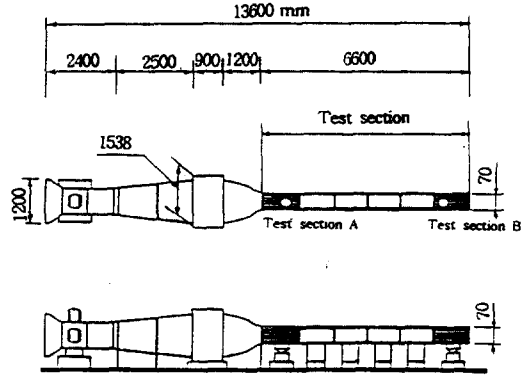


Fig.1 Schematic diagram of wind tunnel

계획되었으며, 이때 측정부 단면내에서의 최대풍속은 22 m/s이다. 자연조건과 유사한 대기경계층을 만들기 위하여 풍동바닥에 4가지 형태(50 mm×50 mm×60 mm, 45 mm×30 mm×50 mm, 20 mm×30 mm×40 mm, 20 mm×30 mm×20 mm)의 조도블럭을 거치른 양탄자표면 위에 부착하였다. 또한 경계층 높이를 조절하기 위하여 풍동의 측정부 입구에 풍동바닥으로부터 높이 60 mm되는 평판을 붙였다. 접근유동이 균일유동일 때는 시험부 A에서 모형실험을 하였고, 접근유동이 경계층유동인 경우에는 시험부 B에서 유동변수를 측정하였다.

3.2 상사조건

자연풍을 실험실내의 경계층풍동에서 모형실험하기 위해서는 상사조건을 설정하여야 한다. 상사조건은 크게 기하학적 상사, 운동학적 상사, 그리고 역학적 상사로 나눌 수 있다.¹⁰⁾

풍동실험을 위한 모형제작시 길이의 척도비가 일정한 기하학적 상사와 운동학적 크기의 비가 일정한 운동학적 상사를 만족시키는데는 큰 어려움이 없으나, 모형을 실제 구조물보다 아주 작게 축소시켰으므로 모든 독립적인 힘의 비가 같은 역학적 상사를 만족하기 위한 레이놀즈수를 일치시키는 것은 실제 풍동실험에서는 불가능하다. 그러나, 여러가지 장애물 주위의 유동특성을 연구한 결과¹²⁾에 의하면 레이놀즈수가 어느 크기 이상이 되면 기하학적 상사만 만족되어도 실제 대기경계층의 유동과 풍동내의 경계층유동은 동일한 것으로 간주할 수 있다. 경험적으로 풍동내 유동의 레이

놀즈수가 대략 $10^4 \sim 10^5$ 이상이면 실제 대기경계층의 바람의 레이놀즈수가 그 이상이라 하더라도 구조물주위의 유동특성을 연구하는 데는 큰 영향이 없는 것으로 발표되고 있다.²⁾

실제 풍동실험에서 고려될 수 있는 상사조건은 대기경계층의 평균풍속분포의 상사와 난류강도의 상사이다.

3.2.1 평균풍속분포의 상사

구조물주위의 유동특성을 1/800로 축척된 모형으로 풍동내에서 실험하기 위해서는 생성된 풍속분포가 실제 자연풍의 풍속분포와 일치해야만 한다. 대기경계층내의 평균풍속분포는 지표면의 조도에 따라 다르므로 본 연구의 풍동실험에서는 멱법칙 지수 n 을 4.5로 선택하여 중·소도시에서의 대기경계층을 생성하였다.

Table 1의 중·소도시(suburban terrain)에서의 평균풍속분포를 풍동내의 경계층유동의 평균풍속분포와 비교하여 Fig.2에 나타내었다. 풍동내에서 측정된 평균풍속분포와 이론적인 멱법칙 평균풍속분포는 아주 잘 일치함을 알 수 있다.

3.2.2 고도에 따른 난류강도의 상사

난류강도($\sqrt{u^2} / \bar{U}$)는 지표면의 조도, 지상으로부터의 높이, 바람의 강도등에 의하여 변화하는 양으로써 바람의 난류정도를 나타내는데 이용된다.

평균속도 \bar{U} 는 지표면에서 멀어질수록 증가하기 때문에 난류강도는 반대로 감소된다. 지역별 난류강도는 Table 2에 제시하였다. Fig.3은 본 연구에 사용된 경계층 풍동내에서 측정된 고도에 따른 난류강도를 나타낸 것으로 지표면 부근에서는 20~30%, 최고높이 70 mm(중소도시 지역이 56 mm)에서는 15% 내외로서, 중·소도시지역에서 강풍이 불 때 지상에서의 높이 10 m의 난류강도 20~30%와 잘 일치함을 알 수 있으며, 높이에 따라 감소하고 있음도 알 수 있다.

3.3 모형제작

풍동실험에 이용되는 모형은 클수록 미세한 부분까지 측정이 용이하므로 가능한 한 크게 제작하는 것이 바람직하나, 풍동내의 폐쇄효과(blockage effect)와 경계층 높이를 고려하여 지붕면이 $B \times L = 70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 이고, 높이가 H 인 사각주형 모델로 결정하였다. 종횡비(aspect ratio), H/B , 는 각각 0.5, 1.0, 2.0으로 하여 알루미늄과 10 mm 아크릴판으로 제작하였다. 알루미늄각주의 표면은 마찰력을 작게하기 위하여 매끄럽게 가공하여 아크릴각주의 조도와 같게 하였다. 압력은 아크릴각주의 측정공을 통하여 측정하였고, 모형주위의 유속측정은 표면이 매끈한 알루미늄각주로 만든 모형을 이용하였다.

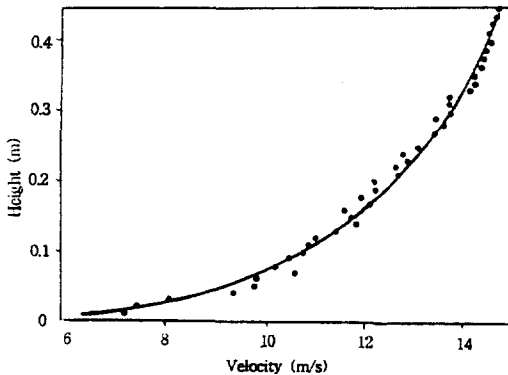


Fig.2 Comparison of measured axial velocity profile with power-law velocity profile

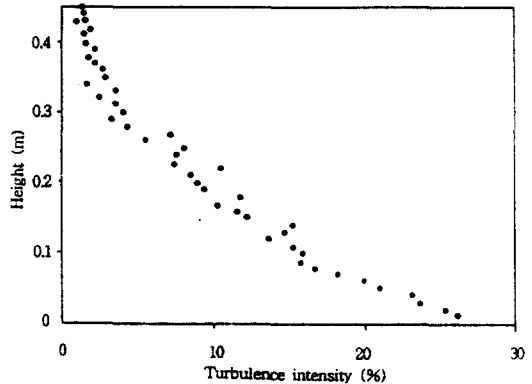


Fig.3 Turbulence intensity profile of the wind tunnel experiment

Table 2 Turbulence intensity values for different terrains

Terrain	Open terrain	Suburban terrain	Large city
Turbulence intensity	15~20%	20~30%	25~50%

Table 3 Types of models for wind tunnel test

Model	Width, B (mm)	Length, L (mm)	Height, H (mm)	Aspect ratio, H/B
A	70	70	35	0.5
B	70	70	70	1.0
C	70	70	140	2.0

실험에 사용된 모형의 치수는 Table 3과 같다.

3.4 압력측정

Fig4와 같이 한 변이 70 mm인 아크릴판으로 제작된 사각주형 모형에서의 압력은 H/B=1.0일 때 지붕면에 64개, 전, 후, 측면에 각각 56개씩 설치된 내경 1mm의 측정공을 이용하여 측정하였다. 또한, H/B=0.5와 H/B=2.0인 경우에는 전, 후, 측면의 압력측정공의 갯수는 각각 32개 및 80개로 증가하여 설치하였다. 측정공은 실리콘 튜브로 마이크로마노미터(micromanometer, furness FCO12)에 연결하였고, 마노미터로부터 나오는 신호를 A/D 변환하여 평균풍압과 국부풍압을 계산하였다.

4. 수치해석

4.1 유동장에 관한 지배방정식

수치해석의 대상인 사각주형 모형주위의 유동특성인 속도와 압력변수를 구하기 위한 시간평균화된 연속방정식과 Navier-Stokes방정식을 좌표계에 무관한 텐서형으로 나타내면 식 (5) 및 식 (6)과 같다.

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \tag{5}$$

$$\begin{aligned} & \rho(\nabla \cdot (\mathbf{U} \otimes \mathbf{U})) - \nabla \cdot (\mu_s \nabla \mathbf{U}) \\ & = -\nabla p' + \nabla \cdot (\mu_s (\nabla \mathbf{U})^T) \end{aligned} \tag{6}$$

식 (5)와 식 (6)에서 \mathbf{U} 는 시간평균 속도벡터이고, μ_s 와 p' 는 유효점성계수와 수정압력으로서 식 (7) 및 식 (8)과 같이 정의한다. 또한, $\mathbf{U} \otimes \mathbf{U}$ 와 $[\nabla \mathbf{U}]^T$ 는 텐서적(tensor product)과 전치계수(tranpose of rank)를 나타낸다.

$$\mu_s = \mu_t + \mu_l \tag{7}$$

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k \tag{8}$$

본 연구에서는 매우 높은 예측성과 다양한 형태의 유동장에 널리 테스트되어 모델성능이 파악된 k-ε 방정식모델을 적용하여 식 (6)의 유효점성계수, μ_s , 를 식 (9)와 같이 계산하였다.

$$\mu_s = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \tag{9}$$

여기서, C_μ 는 경험적으로 결정해야 할 매개변수 혹은 상수로서 본 연구에서는 0.09로 정하였다.

난류운동에너지 k와 난류에너지소산율 ε을 계산하기 위한 두개의 전달방정식은 Navier-stokes 방정식으로부터 유도하였다. 국부적으로 등방성이고 레이놀즈수가 높다는 가정하에 k와 ε에 대한 전달방정식은 식 (10) 및 식 (11)과 같이 쓸 수 있다.

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{U} k) - \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k,\epsilon}} \right) \nabla k \right] = P - \rho \epsilon \tag{10}$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \epsilon) - \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k,\epsilon}} \right) \nabla \epsilon \right] = \frac{\epsilon}{k} (C_1 P - C_2 \rho \epsilon) \tag{11}$$

식 (10)과 식 (11)의 전단응력생성율(rate of production of shear stress), P, 는 식 (12)와 같이 표현된다.

$$P = \mu_s \nabla \mathbf{U} (\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T) \tag{12}$$

식 (10)과 식 (11)의 유효 Schmidt-Prandtl 수와

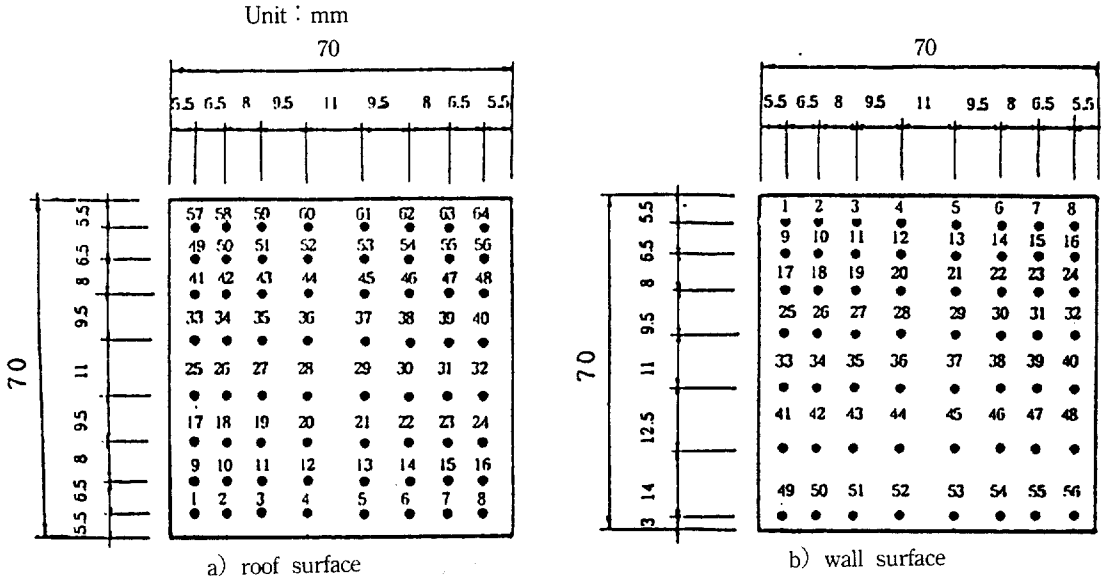


Fig.4 Pressure measuring points of a model with H/B=1.0

Table 4 Constant values for the k-ε Model

Constant	$\sigma_{k,\epsilon}$	$\sigma_{\epsilon,\epsilon}$	C_1	C_2
Value	1.0	1.3	1.44	1.92

상수, C_1 , C_2 , 는 경험적으로 구하게 된다. k-ε 난류 모델에 있어서 이들 경험에 의한 상수는 많은 연구자들에 의해 발표되었고, 비교되었다.¹³⁾ 본 논문에서는 레이놀즈수가 높고, 난류로 충분히 발달되었다는 가정하에 Table 4와 같은 상수를 사용하였다. 그러나 이 파라미터들은 난류점성계수가 크고 국소 등방성이라는 가정하에 유도되므로 벽면근처의 재충류효과로 인한 분자점성계수의 영향을 무시하는 단점이 있다. 벽면근방에서의 경계층내의 유동문제를 효과적으로 해석하기 위해서는 Table 4에 언급된 파라미터들을 변형하거나 대수응력모델과 같은 모델을 이용할 수 있다. 대수응력모델은 대수적 표현이 확장된 k-ε 모델의 한 형태로서 참고문헌 [11]과 [14]에 상세히 설명되어 있다.

4.2 수치해석방법

구조물주위의 유동문제에 대한 지배방정식을 유한체적법으로 풀기 위하여 영국 Harwell 연구소에

서 개발한 FLOW3D Release 3.2.1 코드를 이용하였다.^{8,14)} 유동장은 Fig5와 같이 격자수가 52×48인 직교격자계로 분할하였다. 지배 미분방정식의 대류항은 Hybrid scheme을 적용하여 이산화하고, 압력-속도 수정 알고리즘인 SIMPLE방법을 이용하여 반복적으로 수치해를 구하였다. 경계조건은 벽면근방에서의 경계조건을 제외하고는 난류운동에너지 k나 난류운동에너지소산율 ε에 대한 경계조건만 입구경계면에서 조금 달라질 뿐 충류유동문제의 경계조건과 유사하다. 본 연구에서 적용한 k-ε 난류 모델과 대수응력모델은 재충류효과등으로 벽면근방에서는 그 효율성을 잃기 때문에 벽함수방법¹⁵⁾을 적용하여 벽면근방의 유동문제를 모델링하였다. 또한 접근유동의 조건을 경계층유동으로 하기 위하여 Fortran으로 서브루틴을 작성하여 연계시켜 주었다. 수렴조건은 속도에 대한 상대오차가 1×10^{-6} 이 되도록 하였다.

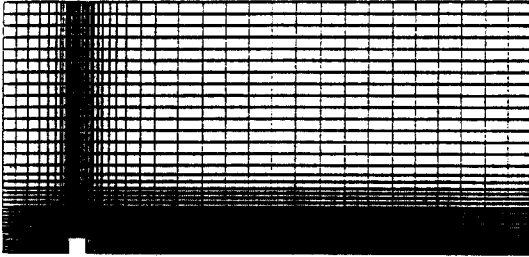
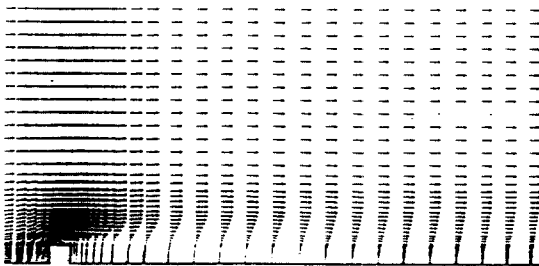
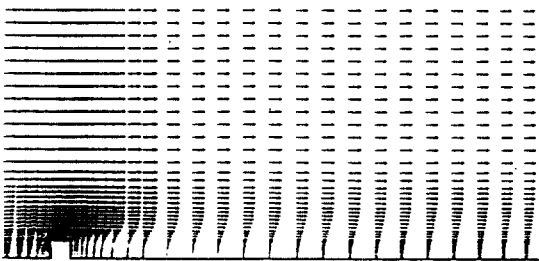


Fig.5 Mesh for the flow field around a model of prismatic shape



a) Uniform flow



b) Boundary layer flow

Fig.6 Velocity vectors around the model with $H/B=1.0$

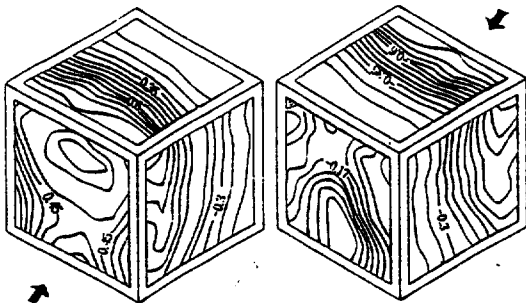


Fig.7 Wind pressure coefficients on the model surfaces for $H/B=1.0$

5. 결과 및 검토

5.1 접근유동조건의 영향

먼저 접근유동조건이 경계층유동과 균일유동일 때 수치해석으로 구한 모형주위의 유동특성을 비교하였다. 레이놀즈수가 7.2×10^4 이고, 종횡비 $H/B=1.0$ 일 때 접근유동조건의 변화에 따른 모형주위의 유동장내 속도벡터를 Fig.6에 나타내었다.

접근유동조건이 균일유동인 경우와 경계층유동인 경우 모두 모형 전면의 아래쪽과 지붕면 바로 위쪽에 와류가 형성됨을 확인할 수 있다. 또한 모형의 후류에서는 커다란 재순환영역이 형성됨을 알 수 있다. 재순환영역의 길이는 균일유동인 경우에는 모형높이의 13배이고, 경계층유동에서는 8배임을 알 수 있다. 전면벽의 아래쪽에는 밀기로 향하는 기류가 형성되어 지표면에 부딪힌 후 다시 위로 유동하고 있음을 알 수 있다. 또한 전면벽의 위쪽으로는 벽에 부딪힌 유동이 아주 빠른 속도로 급격히 상승하여 지붕면에 상당히 큰 부압을 형성 시킴을 알 수 있다. 균일유동인 경우가 경계층유동일 때보다 지붕면 상부에서 하류쪽 먼 곳까지 영향이 미치고 있음을 알 수 있다.

종횡비, H/B , 가 1.0이고, 레이놀즈수가 7.2×10^4 일 때 풍동실험으로 구한 지붕면과 벽면에서의 풍압계수분포는 Fig.7과 같다. 지붕면의 풍압은 유동박리점 가까이에서 가장 큰 부압(negative pressure)이 나타나고, 하류쪽으로 갈수록 가파른 압력감소현상을 나타내고 있다. 또한 좌측면과 전면 하부 모서리 부분에 강한 정압(positive pressure)을 형성하고, 후면에서는 대부분 부압을 형성하므로 건물의 안정성에 영향을 미칠 수 있음을 유추할 수 있다.

Fig.8은 수치해석하여 구한 종횡비 $H/B=1.0$ 인 사각주형 모형표면에서의 풍압계수분포를 풍동실험에 의한 결과값과 비교하여 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 수치계산결과와 풍동실험결과는 서로 잘 일치한다. 다만 건물 전면의 정체점부분에서는 $k-\epsilon$ 난류모델을 이용한 수치계산결과가 실험결과보다 높게 나타난다. 그 이유는 $k-\epsilon$ 난류모델은 Reynolds 수가 높다는 가정하에 유도된 식이기 때문인 것으로 사료된다. ASM모델¹⁴⁾을 이용한 수치계산결과는 풍동실험결과와 대체적으로 일치하는 경향을 나타내지만, 모형전면 아래쪽에는

Table 5 Averaged wind pressure coefficients of H/B=1.0

Surface	\overline{C}_p (Experiment)	\overline{C}_p (k- ϵ Model)	\overline{C}_p (ASM)
Roof	-0.44	-0.47	-0.44
Front	0.48	0.49	0.46
Right	-0.42	-	-
Left	-0.42	-	-
Rear	-0.17	-0.20	-0.22

Fig.6 Averaged wind pressure coefficients for different aspect ratios

Aspect ratio	Roof			Side			Front			Rear		
	Exp.	Num.		Exp.	Num.		Exp.	Num.		Exp.	Num.	
		k- ϵ M.	ASM		k- ϵ M.	ASM		k- ϵ M.	ASM		k- ϵ M.	ASM
H/B=0.5	-0.33	-0.38	-0.37	-0.23	-	-	0.46	0.42	0.45	-0.13	-0.19	-0.19
H/B=1.0	-0.44	-0.47	-0.44	-0.42	-	-	0.48	0.49	0.46	-0.17	-0.20	-0.22
H/B=2.0	-0.65	-0.62	-0.66	-0.53	-	-	0.50	0.65	0.64	-0.23	-0.25	-0.24

실험결과보다는 조금 낮게 나타남을 알 수 있다.

식 (4)로 정의되는 평균풍압계수를 계산하여 Table 5에 나타내었다. 전면에서의 평균풍압계수는 $\overline{C}_p = +0.48$ 이고, 지붕면과 후면의 풍압계수는 각각 $\overline{C}_p = -0.44$ 와 $\overline{C}_p = -0.17$ 이다.

5.2 종횡비의 영향

상류의 레이놀즈수가 7.2×10^4 일 때 모형의 종횡비, 즉 H/B의 변화에 따른 모형주위의 유동특성을 연구하였다. Fig.9는 접근유동이 경계층유동일 때 종횡비변화에 따른 모형주위의 속도벡터를 나타낸 그림이다. 종횡비가 증가함에 따라 모형의 전면과 후면에서의 재순환영역이 증가됨을 그림에서 알 수 있다. H/B=0.5일 때는 유동박리로 인한 역류는 지붕면의 전면에서 일부 발생하다가 소멸되어 버리나, 종횡비가 증가함에 따라 지붕면에서의 유동박리는 모형 후류의 유동박리에 크게 영향을 받음을 알 수 있다. 또한, 종횡비가 증가함에 따라 모형 후류의 재순환영역은 모형의 높이보다 크게 확장됨을 알 수 있다. Fig.10과 Fig.11에 모형의 종횡비 변화에 따른 풍압계수의 값을 나타내었다. 지붕면에서는 유동박리점 가까운 상류부근에서 가장 큰 부압이 나타나고, 하류로 유동이 진행할수록 풍압계수는 감소한다.

종횡비, H/B, 가 증가함에 따라 전체적인 풍압계수의 절대크기는 증가한다. 모형의 벽면과 후면에서는 수치해석에 의한 풍압계수의 값은 실험에 의한 결과값과 아주 잘 일치하고 있으나, 지붕면에서는 실험에 의한 결과값이 수치계산값보다 지붕전면 모서리부근에서 낮게 나타난다. Table 6에 모형의 종횡비변화에 따른 모형표면에서의 평균풍압계수의 값을 제시하였다.

H/B가 0.5, 1.0 및 2.0일 때 지붕면의 평균풍압계수값(\overline{C}_p)은 각각 $\overline{C}_p = -0.33$, $\overline{C}_p = -0.44$, $\overline{C}_p = -0.65$ 로 종횡비가 커질수록 평균풍압계수의 값이 커짐을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 모형의 후면에서도 동일하게 나타나지만, 변화의 크기가 모형의 지붕면과 비교할때 크지 않다. Table 6에 모형의 측면에 대한 평균풍압계수의 수치계산값은 제시되어 있지 않다. 이는 풍동실험은 3차원적으로 수행되었지만 수치해석은 2차원적으로 수행되었기 때문이다. 모형의 전면에서의 평균풍압계수는 각각 $\overline{C}_p = 0.46$, $\overline{C}_p = 0.48$, $\overline{C}_p = 0.50$ 으로 거의 동일한 값을 나타낸다. 따라서 전면에서의 종횡비변화에 따른 평균풍압계수의 변화는 미미한 것으로 판단된다. 그러나, 종횡비가 2.0일 때 모형의 전면, 후면, 지붕면의 평균풍압계수(\overline{C}_p)는 각각 $\overline{C}_p = 0.50$, $\overline{C}_p = -0.23$, $\overline{C}_p = -0.65$ 의 값으로, 건축물의 구조기준등

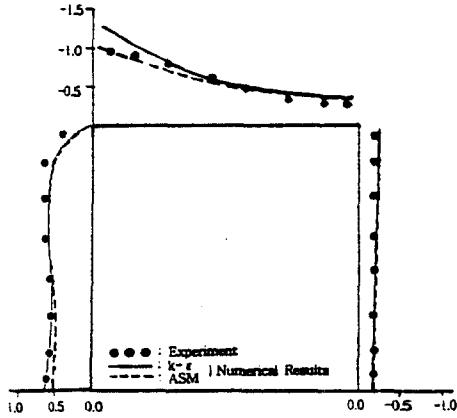


Fig.8 Comparison of wind pressure coefficients in the boundary layer flow of $H/B=1.0$

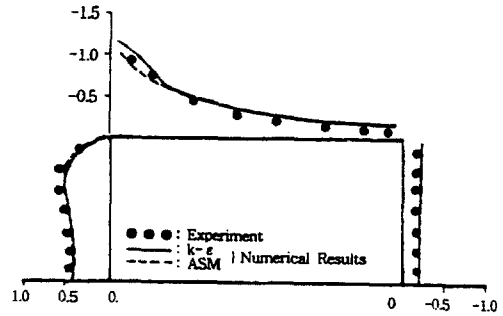


Fig.10 Wind pressure coefficients on the model surfaces for aspect ratio $H/B=0.5$

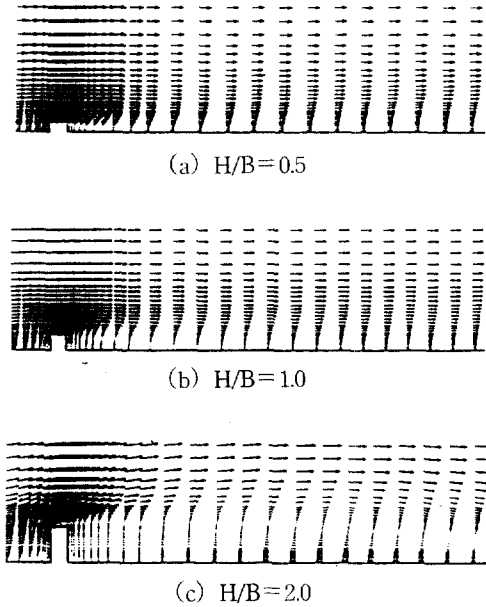


Fig.9 Velocity vectors around the models of prismatic shape

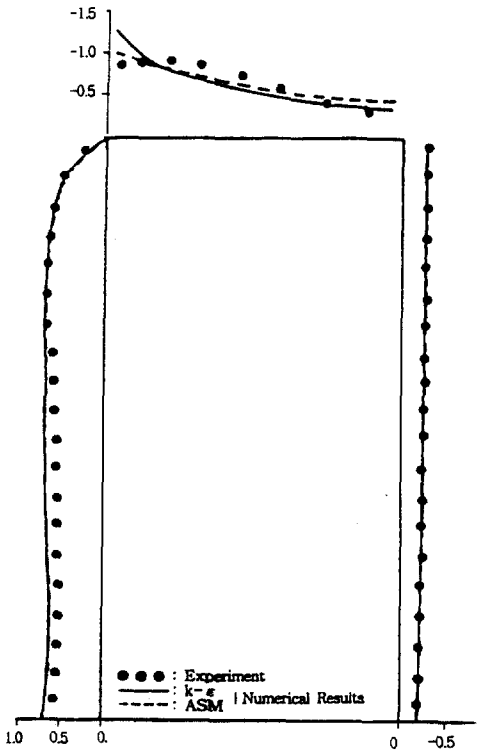


Fig.11 Wind pressure coefficients on the model surfaces for aspect ratio of $H/B=2.0$

에 관한 규칙 제 13조 제 3항 제 1호에 규정된 값 (전면 : $\bar{C}_p=0.5$, 후면 : $\bar{C}_p=-0.6$, 지붕면 : $\bar{C}_p=-0.7$)보다 상당히 작은 값을 나타낸다.

6. 결 론

풍동실험으로 구한 사각주형 구조물 표면의 풍

압계수분포와 수치해석에 의한 구조물 주위의 속도분포, 풍압계수분포결과를 비교·검토하여 요약하면 다음과 같다.

1) 수치해석 방법중에서 대수응력모델을 이용하여 구한 사각주형 구조물표면의 풍압계수분포는 k-ε모델을 이용하여 구한 결과보다 풍동실험결과와 더 잘 일치한다.

2) 수치해석을 통하여 사각주형 구조물 주위의 유동박리현상을 파악할 수 있으며, 구조물 뒤쪽의 재부착길이는 $H/B=1.0$ 일 때 균일유동의 경우에는 구조물높이의 13배이고, 경계층유동의 경우에는 구조물높이의 8배로 경계층유동에서의 재부착거리가 짧아짐을 알 수 있다.

3) 접근유동이 경계층유동일 때 종횡비에 관계없이 구조물의 전면, 후면, 그리고 지붕면의 평균 풍압계수는 건축법이 규정하는 평균풍압계수범위보다 상당히 작은 값을 나타낸다.

4) 수치해석으로 구한 지붕면과 후면의 재순환 영역은 구조물의 종횡비가 증가함에 따라 확장됨을 알 수 있었으며, 접근유동이 경계층유동이고 종횡비가 0.5, 1.0 및 2.0일 때 구조물 뒤쪽의 재부착 길이는 각각 구조물 높이의 5배, 8배, 그리고 17배로 증가함을 알 수 있다.

5) 평균풍압계수의 절대값은 종횡비의 증가에 따라 지붕면과 후면에서 증가한다.

참 고 문 헌

1. 이광열, 1993, 사각주형 구조물주위의 바람유동 및 표면풍압에 관한 연구, 동국대학교 박사학위 논문.
2. 박기호, 경남호, 유성연, 1993, "대기 경계층내에서 두개의 사각주 주위의 유동특성에 관한 연구", 대한기계학회 추계학술대회 논문집(II), pp. 71~75.
3. 원성필, 이동환, 1987, "건축물주위의 이차원 난류유동장에 대한 수치적 연구", 공기조화·냉동공학 논문집, 제 16권 제 2호, pp. 167~175.
4. Kim, H. G., Kyong, N. H. and Lee, C. H., 1994, "Numerical Analysis of the Flow over a Hill", KSME Spring Annual Meeting, Vol. II, pp. 233~238.
5. Murakami, S., Mochida, A. and Hayashi, Y., 1991, "Scrutinizing EVM and ASM by Means of LES and Wind Tunnel for Flow Field Around Cube", 8th Symp. on Turbulent Shear Flows.
6. Murakami, S., 1992, "Comparison of Various Turbulence Models Applied to a Bluff Body", J. of Wind Eng., No. 52, pp. 164~179.
7. 송하진, 이광열, 노형운, 서상호, 유상신, 1993, "바람에 의한 정사각주형 건물주위의 유동해석", 공기조화·냉동공학 동계학술발표회, pp. 147~151.
8. 서상호, 노형운, 임용빈, 이광열, 유상신, 1994, "종횡비 변화에 따른 사각주형 구조물 주위의 유동해석", 공기조화·냉동공학 하계학술발표회, pp. 238~243.
9. Davenport, A. G. and Surry, D. J., 1974, "The Pressure on Low Rise Structure in Turbulent Wind", Canadian Structural Engineering Conference.
10. Dantec Elektronik, 1989, "acgWIRE", Technical Reference Manual.
11. 최영돈, 1991, 전산유체역학의 기초와 응용, 도서출판 한미, 서울.
12. 신철수, 1993, 수치해법을 이용한 층류 및 난류유동문제 해석, 숭실대학교 박사학위 논문.
13. Nagano, Y. and Hishida, M., 1987, "Improved Form of the $k-\epsilon$ Model for Wall Turbulent Shear Flow", Transactions of the ASME. J. of Fluids Engrg., Vol. 109, pp. 156~160.
14. FLOW3D Release 3.2.1, User's Manual, 1993, AEA Industrial Technology Harwell Lab., United Kingdom.
15. Jones, W. P. and Launder, B. E., 1972, "The Predictions of Laminarization with a 2 Equation Model of Turbulence", Int. J. Heat & Mass Transfer, Vol. 15, pp. 301~313.