

## 고층건축물의 풍진동 저감을 위한 공기역학적 방법

하 영 철\* 김 동 우\*\*

### Aerodynamic Methods for Mitigating the Wind-Induced Motions on the Tall Buildings

Ha, Young-Cheol\*, Kim, Dong-Woo\*\*

**Key Words** : Tall Building, Opening, Wind-Induced Vibration, Vortex Shedding, Wake, Power Spectral Density

#### Abstract

The excessive wind-induced motion of tall buildings most frequently result from vortex shedding induced across-wind oscillations. This form of excitation is most pronounced for relatively flexible, lightweight and lightly damped structure, e.g. tall building. This paper discusses aerodynamic means for mitigating the across-wind vortex shedding induced in such situations. Emphasis is on the change of the building cross section to design the building with openings from side to side which provide pressure equalization and tend to reduced the effectiveness of across-wind forces by reducing their magnitudes and disrupting their spatial correlation. Wind tunnel test have been carried out on the Kumoh National University of Technology using rigid models with twenty-four kinds of opening shapes. Form these results, the effective opening shape, size and location for building to reducing wind-induced vortex shedding and responses are pointed out.

#### 1. 서론

폭에 비해 높이가 큰 세장한 고층건축물의 경우에는 강풍 시 유발되는 건축물의 수평진동이 구조안정성과 거주성을 결정짓는 중요한 인자가 되기 때문에 풍하중에 의한 동적응답을 줄이기 위한 방법이 세계 각지에서 다각적으로 연구되어 지고 있다. 예를 들면, 강풍에 의한 구조물의 동적응답을 제어하기 위하여 제진장치를 설치하는 능동적인 방법이 그것이다. 그러나, 건물의 초기 설계 단계에서 공기역학적으로 유리한 단면형상을 갖도록 하거나, 중공부를 설치함으로써 풍하중에 의한 동적응답을 줄이는 것도 좋은 방법이라 할 수 있다.

풍하중에 의한 동적응답을 줄이기 위한 연구의 대부분은 건물의 모서리를 변화시켜 전단층의 재부착을 촉진시킴으로서 박리된 전단층의 성질을 변화시키고, Wake(後流)의 폭을 좁게함으로써 풍직각방향의 진동을 감소시키기 위한 시도였다.<sup>[1],[2]</sup> 그러나, 건축물에 중공부를 설치함으로써 얻어지는 진동감소효과에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 건축물의 기본형상으로 생각되는 정사각형 각주에 □자형과 +자형의 두 가지 형상의 중공부를 설치한 후, 각각의 형상에 대하여 중공부 크기를 2 종류로 변화시키고, 중공부 위치를 6종류로 변화시킨 총 24가지의 모형을 대상으로 풍방향, 풍직각방향에 대한 풍속별 응답변위의 특성을 풍동실험을 통하여 분석하였다. 이로부터 얻어진 결과를 건축물의 기본형상

인 정사각형 각주의 응답변위 특성과 비교 분석하여 중공부의 형상 변화, 크기 변화, 위치 변화에 따른 풍진동의 저감효과의 정도를 정량적으로 제시하였다.

#### 2. 실험

실험은 금오공과대학교 풍동실험실의 토출식 경계층풍동에서 실시하였다. 풍동의 측정부 길이는 14m이고, 측정부 단면은 1.54m×1.3m이다. 풍속의 연직분포 및 기준난류강도는 풍동 내에 조도블록과 스파이어(Spire)를 사용하여 형성하였고, 풍속은 열선풍속계에 의해 측정하였으며, 그 값은 피토판의 수치를 토대로 보정하여 사용하였다. 실험풍속은 모형 정상부에서의 풍속( $V$ )을 모형고유진동수( $f_{0,m}$ )와 모형폭( $B$ )으로 정규화한 무차원풍속( $V/f_{0,m}B$ )을 사용하였다.

##### 2.1 모형의 설계

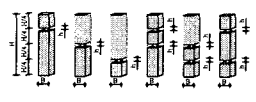
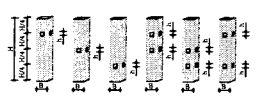
모형의 형상은 중공부가 없는 정사각형 각주를 기본형으로 하였다. 중공부 변화 모형은 Table 1.과 같이 기본형에서 평면형상이 □자형과 +자형인 2가지 중공부 형태를 가지도록 한 후, 중공부의 크기는 모형폭 B의 B/4, B/2인 2가지 종류로 하였고, 중공부의 위치는 상(Up), 상중(Up·Middle), 상하(Up·Down), 중(Middle), 중하(Middle·Down), 하(Down)에 있도록 변화시킨 6종류로 만들어 총 24가지 모형을 제작하였다. 모형의 축적은 1/200, 모형의 높이( $H$ )는 형상비( $H/\sqrt{B \times D} = 8$ )를 고려하여 48cm, 폭( $B$ )과 깊이( $D$ )는 각각 6cm로 하였으며, 수평방향 병진운동을 대상으로 한 1질점 2자유도계 로킹모드(선형모드:  $z/H$ )로 하였다. 실험모형의 재질은 발사제로 하였다.

\* 금오공과대학교 건축공학과, ycha@kumoh.ac.kr

\*\* 금오공과대학교 건축공학과, wind9858@hanmail.net

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구과제 (과제번호: R05-2001-000-01296-0)의 일부임

Table 1. Shape & Title of Models

기본형	Section	Elevation Type
기 본 형	Type I	
	Type II	

모형명칭정의  
 ● Type I U - I  
 ┌ 중공부 크기 → I : h(B/4) = 15 mm  
 │ 2 : h(B/2) = 30 mm  
 └ 중공부 위치 → U : 상, UM : 상중  
 M : 중, UL : 상하  
 L : 하, ML : 중하  
 ┌ 중공부 형태 → I : □자형  
 └ II : +자형

2.2 상사조건

로킹모형을 이용한 풍진동 실험 시에는 질량비, 무차원진동수, 감쇠정수의 3가지를 상사시켜야한다.<sup>[1],[4]</sup>

실험모형의 일반화질량  $M_m$ 과 Rocking 강성  $k$ 는 다음 식으로 구하였다.

$$M_m = \frac{k}{(2\pi f_{0,m})^2} \tag{1}$$

$$k = \frac{I(2\pi f_{0,m})^2}{l^2} \tag{2}$$

여기서,  $I$ 는 모형·부가질량의 관성모멘트,  $f_{0,m}$ 은 모형의 1차 고유진동수,  $l$ 은 로킹 회전중심으로부터 스프링까지의 거리이다.

모형의 1차고유진동수  $f_{0,m}$ 은 모형하부의 스프링강성을 조정하면서 자유진동곡선으로부터 측정하였고, 감쇠정수  $\zeta$ 는 모형하부에 설치된 감쇠기의 실리콘유체의 농도를 조절하면서 모형에 자유진동을 주어 얻어진 자유진동곡선으로부터 다음 식으로 산정 하였다.

$$\zeta = (1/2n\pi)\ln(a_0/a_n) \tag{3}$$

여기서,  $a_0$ 는 자유진동곡선의 첫 번째 진폭,  $a_n$ 은  $n$  번째 진폭이다. Figure 1.은 □자형 중공부 모형 가운데 Type I<sub>UM-2</sub>를 자유 진동시켜 얻은 진동 파형을 나타낸 것이고, Table 2.는 실험 모형에 대한 특성 값을 나타낸 것이다.

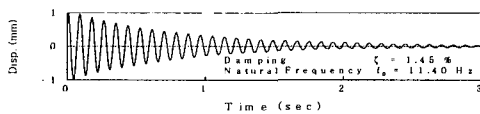


Figure 1. Free Vibration Curve of Model

Table 2. Characteristic Values of Experimental Models

Type	$f_{0,m}$ (Hz)	$\eta$ (%)	I (kgf · cm · sec <sup>2</sup> )	k (kgf/cm <sup>2</sup> )
기본형	11.77	1.55	0.234	5.335
Type I <sub>U-1</sub>	11.55	1.52	0.233	5.118
Type I <sub>U-2</sub>	11.19	1.45	0.233	4.784
Type I <sub>UM-1</sub>	11.19	1.50	0.226	4.640
Type I <sub>UM-2</sub>	11.40	1.45	0.233	4.976
Type I <sub>M-1</sub>	11.40	1.46	0.235	5.008
Type I <sub>M-2</sub>	11.33	1.44	0.235	4.950
Type I <sub>L-1</sub>	11.47	1.46	0.235	5.073
Type I <sub>L-2</sub>	11.55	1.46	0.235	5.150
Type I <sub>UL-1</sub>	11.55	1.49	0.236	5.167
Type I <sub>UL-2</sub>	11.33	1.43	0.237	5.004
Type II <sub>U-1</sub>	11.26	1.43	0.235	4.904
Type II <sub>U-2</sub>	11.40	1.43	0.236	5.050
Type II <sub>UM-1</sub>	11.76	1.54	0.225	5.106
Type II <sub>UM-2</sub>	11.85	1.53	0.224	5.174
Type II <sub>M-1</sub>	11.62	1.56	0.225	4.989
Type II <sub>M-2</sub>	11.77	1.58	0.225	5.111
Type II <sub>L-1</sub>	11.76	1.56	0.225	5.119
Type II <sub>L-2</sub>	11.47	1.50	0.225	4.872
Type II <sub>UL-1</sub>	11.62	1.50	0.225	5.000
Type II <sub>UL-2</sub>	11.93	1.57	0.226	5.275
Type II <sub>M-1</sub>	11.62	1.50	0.225	5.000
Type II <sub>M-2</sub>	11.93	1.57	0.226	5.275
Type II <sub>L-1</sub>	11.69	1.51	0.226	5.073
Type II <sub>L-2</sub>	11.62	1.50	0.227	5.031
Type II <sub>UL-1</sub>	11.93	1.58	0.226	5.279
Type II <sub>UL-2</sub>	11.55	1.55	0.226	4.961

3. 실험결과 및 고찰

3.1 변동변위의 파워스펙트럼 특성

기본형인 정사각형의 각주와 □자형 중공부 모형 가운데 풍진동 저감효과가 가장 뚜렷한 Type I<sub>UM-2</sub>와 +자형은 Type II<sub>UM-2</sub>에 대해서만 풍방향 및 풍직각방향의 변동변위 파워스펙트럼을 Figure 2., Figure 3.에 나타내었다.

Figure 2.에서 풍방향에 대한 변동변위 파워스펙트럼의 전체적인 특징을 보면, 기본형을 비롯한 모든 중공부 모형은 실험풍속의 변화에 관계없이 저풍속 영역과 고풍속 영역에서 풍속의 변동성분에 기인한 광대역의 완만한 피크와 모형의 고유진동수 부근에서 공진에 의한 협대역의 첨예한 피크를 나타낸다. 협대역의 피크는 무차원풍속 8 부근에서 나타나고, 피크값은 중공부를 설치한 Type I<sub>UM-2</sub>, Type II<sub>UM-2</sub> 이 기본형 각주보다 약간 작다.

Figure 3.에서 풍직각방향에 대한 변동변위 파워스펙트럼 특징을 보면, 기본형 정사각형 각주의 경우에는 무차원풍속 2, 4, 6, 8에서 각주 후면에서 발생하는 Vortex Shedding에 의한 첫 번째 피크가 뚜렷하게 나타나고, 모형의 고유진동수 부근에서 두 번째 피크가 나타난다. Vortex Shedding에 의한 피크는 무차원풍속 2인 경우 진동수 2 Hz, 무차원풍속 4에서는 4 Hz 부근에서 나타나고, 무차원풍속이 증가하면 진동수가 고주파수 영역으로 이동하는 경향을 보이다가 무차원풍속이 10 이상이 되면 Vortex Shedding의 진동수가 고유진동수와 일치하여 공진에 의한 진동만이 현저해지는 현상을 나타낸다. Type II<sub>UM-2</sub>의 경우에는 무차원풍속 2, 4, 6인 3곳에서, Type I<sub>UM-2</sub>의 경우에는 무차원풍속 2, 4인 2곳에서 Vortex Shedding에 의한 피크가 나타나고, 무차원풍속 8, 6 이상이 되면 Vortex Shedding의 진동수가 고유진동수와 일치하여 공진에 의한 진동만이 현저해지는 현상을 나타낸다.

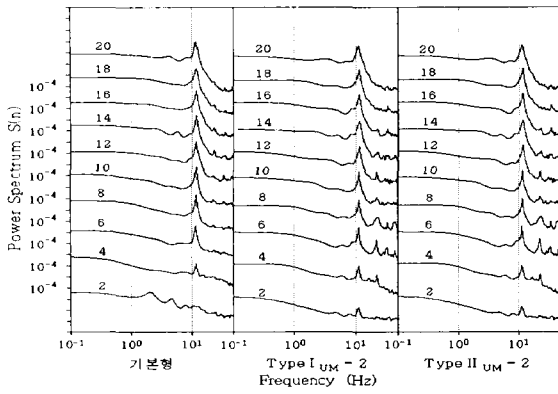


Figure 2. Power Spectral Density (Along-wind)

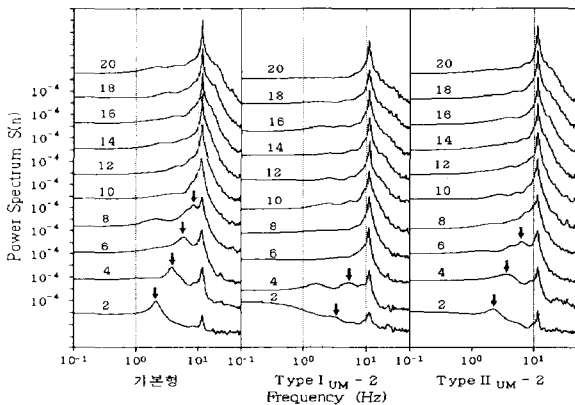


Figure 3. Power Spectral Density (Across-wind)

기본형과 비교하면 Vortex Shedding의 피크 크기가 작고, 발생수도 3, 2개로 작다. 그 이유는 +자형 및 □자형의 중공부의 설치로 인하여 모형 양쪽 모서리에서의 기류의 박리가 최소화되고, 후류의 폭이 감소함으로써 Vortex Shedding이 억제되기 때문이라고 생각된다. 이로부터 □자형 중공부를 설치하면 Vortex Shedding의 억제에 큰 효과가 있음을 알 수 있으며, 특히, □자형인 Type I이 +자형인 Type II 보다 더 효과적임을 알 수 있다.

### 3.2 응답변위의 특성

Figure 4. ~ Figure 7.은 중공부의 변화에 따른 풍진동 저감효과를 정사각형 각주와 비교하기 위하여 □자형 중공부인 Type I 과 +자형 중공부인 Type II에 대한 응답변위를 무차원화 하여 나타낸 것이다. 풍방향 응답변위는 주로 평균풍속과 Buffeting에 의존하기 때문에 풍속의 증가에 대하여 급격히 증가하지 않고 점진적으로 비선형곡선 형태로 증가하는 경향을 나타낸다. 전반적으로 중공부 모형이 정사각형 각주에 비하여 변위가 약간 감소하는 경향을 나타낸다. 이것은 중공부를 설치함으로써 정사각형 각주에 비하여 바람을 받는 수압면적이 줄었기 때문에 발생하는 현상으로 생각된다.

풍직각방향 응답변위는 Vortex의 발생주파수와 모형의 고유진동수가 일치하는 공진풍속(무차원풍속 8~14정도) 부근에서 변위가 급격히 커지고, 그 이후에는 Vortex와 진동체의 상호작용에 의한 공력불안정성(Aeroelasticity)을 나타내는 것으로 생각된다. 공진풍속 이후의 응답변위의 크기를 보면 □자형인 Type I의 경우에는 기본형 각주에 비하여 응답감소효과가 현저하나, +자

형인 Type II의 경우에는 응답감소효과가 그리 크지 않다. 중공부에 의한 응답감소의 효과는 무차원풍속 8 이상의 고풍속 영역으로 갈수록 커지는 경향을 나타낸다. 따라서, 중공부는 무차원풍속이 8 이상되는 설계풍속영역에서 더 효과적임을 알 수 있다.

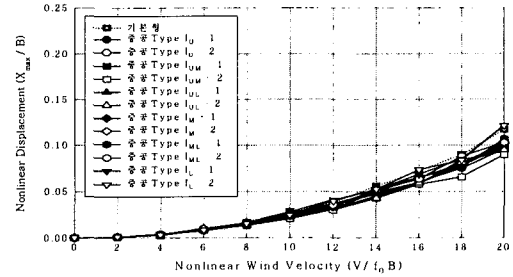


Figure 4. Response Curve of Type I (Along-wind)

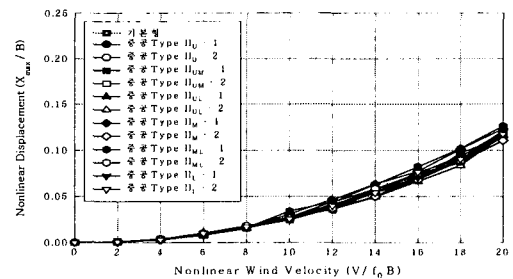


Figure 5. Response Curve of Type I (Along-wind)

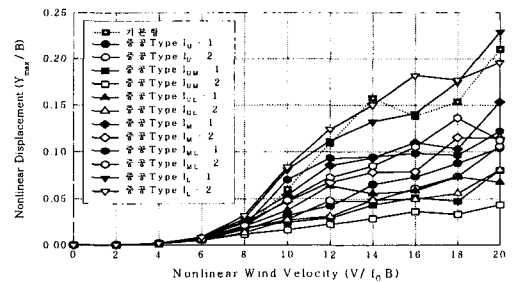


Figure 6. Response Curve of Type I (Across-wind)

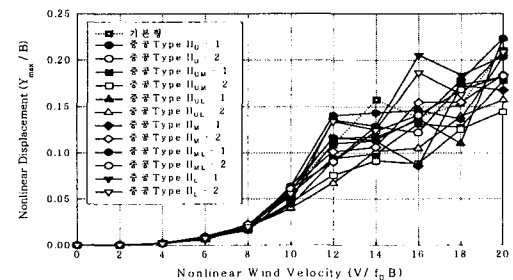


Figure 7. Response Curve of Type II (Across-wind)

Table 3. Along-wind & Cross-wind Response Ratio for Type I

무차원 풍속	중공 Type I - 풍방향												중공 Type I - 풍직각방향											
	U		UM		UL		M		ML		L		U		UM		UL		M		ML		L	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
2	1.00	0.82	0.68	0.77	0.75	0.56	0.93	0.90	0.95	0.83	1.05	1.05	1.66	0.73	0.73	1.22	1.04	0.88	0.79	1.34	1.04	1.29	1.10	1.13
4	1.02	1.10	0.73	0.92	0.97	0.87	1.16	1.18	1.11	1.04	1.20	0.98	0.92	0.76	0.67	0.52	0.78	0.59	0.81	0.75	0.76	0.71	1.01	0.93
6	0.93	0.90	1.05	0.97	1.25	1.00	1.02	1.00	1.19	1.17	1.02	1.00	0.75	0.93	0.73	0.71	0.73	0.67	1.04	1.06	0.76	0.85	1.10	1.15
8	0.85	0.87	0.84	0.79	0.89	0.83	0.88	0.95	0.97	0.96	0.96	0.92	0.95	0.98	1.08	0.66	1.15	0.75	1.46	1.34	1.16	1.20	1.61	1.80
10	0.86	0.82	0.73	0.72	0.88	0.77	0.92	0.82	0.92	0.84	0.96	0.86	0.53	0.46	0.41	0.27	0.62	0.45	0.89	0.78	1.17	0.80	1.35	1.40
12	0.92	0.83	0.81	0.78	0.83	0.88	0.87	0.92	0.96	0.92	1.07	1.03	0.38	0.43	0.27	0.21	0.58	0.28	0.78	0.61	0.85	0.66	1.02	1.13
14	0.84	0.76	0.80	0.76	0.87	0.76	0.94	0.89	0.89	0.92	0.93	0.93	0.41	0.30	0.27	0.18	0.35	0.31	0.59	0.50	0.60	0.54	0.84	0.95
16	0.82	0.83	0.80	0.80	0.82	0.82	0.90	0.89	0.90	0.87	0.95	1.01	0.53	0.44	0.37	0.26	0.42	0.36	0.80	0.57	0.71	0.76	1.02	1.32
18	0.86	0.83	0.93	0.73	0.88	0.90	0.87	0.89	0.84	0.98	0.94	0.93	0.57	0.48	0.31	0.22	0.48	0.36	0.67	0.75	0.63	0.89	1.14	1.15
20	0.85	0.82	0.80	0.77	0.84	0.81	0.87	0.88	0.91	0.88	1.04	1.04	0.49	0.50	0.38	0.21	0.32	0.38	0.73	0.54	0.58	0.53	1.09	0.93

Table 4. Along-wind & Cross-wind Response Ratio for Type II

무차원 풍속	중공 Type II - 풍방향												중공 Type II - 풍직각방향											
	U		UM		UL		M		ML		L		U		UM		UL		M		ML		L	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
2	1.01	1.00	1.12	0.73	1.05	0.99	0.88	0.46	0.87	0.94	0.77	0.79	1.28	0.91	1.13	0.97	1.00	1.16	1.43	1.75	1.92	1.29	1.28	1.37
4	1.15	1.19	1.05	1.16	1.03	1.17	1.01	0.75	1.21	1.00	0.94	0.96	0.74	0.70	0.78	0.78	1.02	0.94	0.89	0.97	0.96	1.07	1.16	0.79
6	0.95	1.10	0.93	0.95	0.95	1.28	0.97	1.05	1.06	1.22	1.08	1.21	0.97	1.00	0.99	0.91	0.89	0.76	0.86	1.24	1.01	1.03	1.14	1.01
8	0.93	0.96	0.95	1.00	0.91	0.94	0.99	0.97	0.94	1.08	0.97	1.02	1.06	1.08	0.89	1.00	0.97	1.13	1.30	1.22	0.99	1.26	1.15	1.13
10	0.87	0.97	0.86	0.94	0.96	0.92	1.07	0.89	1.18	0.92	0.84	0.90	0.98	0.72	0.92	0.77	1.06	0.67	0.87	1.02	1.06	1.01	0.75	0.93
12	0.98	1.06	0.96	0.93	1.14	0.94	1.21	0.98	1.14	0.97	1.08	1.04	1.06	0.83	0.86	0.69	1.06	0.61	1.01	0.93	1.28	0.83	1.24	1.23
14	0.97	1.02	0.96	0.90	1.03	0.88	1.13	0.88	1.12	1.04	0.98	0.96	0.74	0.82	0.63	0.58	0.72	0.65	0.72	0.67	0.91	0.78	0.82	0.79
16	0.92	1.01	1.03	0.94	1.03	0.91	1.07	1.00	1.13	0.94	0.97	1.05	0.98	0.88	0.95	0.64	0.99	0.76	0.62	1.12	1.05	1.02	1.48	1.35
18	1.08	0.96	0.96	1.01	1.04	0.93	1.12	0.97	1.13	0.98	1.03	1.00	1.16	1.13	0.83	0.82	0.72	0.91	1.12	1.01	0.89	1.09	1.20	1.06
20	0.99	1.04	0.98	0.98	0.99	1.00	1.06	0.95	1.08	1.00	1.03	1.01	1.06	0.86	0.85	0.69	1.06	0.75	0.80	0.88	0.97	0.87	0.97	0.99

Table 3.은 기본형인 정사각형 각주의 변위응답을 1.0으로 하였을 때, □자형의 중공부를 가진 Type I에 대한 풍방향 및 풍직각방향의 응답 비율을 나타낸 것이다. 풍방향의 응답변위는 중공부가 클수록 저감효과가 크다. 중공부를 모형높이의 1/2 이상인 중·상층부에 설치하면 무차원풍속 10 이상인 설계풍속영역에서 응답변위가 평균 0.87 정도로 감소하나, 모형높이의 1/2 이하인 하층부에 설치하면 감소효과는 나타나지 않는다. 풍직각방향의 경우에도 중공부가 클수록 응답변위는 감소한다. 중공부를 모형높이의 1/2인 이상인 중·상층부에 설치하면 무차원풍속 10 이상인 설계풍속 영역에서는 평균 0.58 정도로 감소하나, 모형높이의 1/2 이하인 하층부에 설치하면 응답변위의 감소효과는 나타나지 않는다. 따라서 풍방향 및 풍직각방향의 응답변위를 저감시키기 위해서는 중공부를 건물높이의 1/2이상인 중·상층부에 설치하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

Table 4.은 기본형인 정사각형 각주에 대한 +자형 중공부인 Type II의 응답 비율을 나타낸 것이다. 풍방향 및 풍직각방향의 경우 중공부의 크기 및 위치를 변화시켜도 응답감소의 효과는 거의 없다. 그 원인은 중공부의 형상이 +자형인 경우에는 기류가 모형의 정 중앙부에서 후면으로 흘러나가기 때문에 모형의 양쪽 측면 모서리에서 박리하여 모형 후면에 규칙적으로 발생되는 Vortex의 형성을 방해하지 못하기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 +자형의 중공부는 풍방향 및 풍직각방향의 응답변위를 감소시키는데 효과적이지 못하다고 할 수 있다.

4. 결론

초고층 건축물의 중공부 변화에 따른 풍진동 저감효과를 검토하기 위하여 형상비가 8이고, 중공부가 없는 정사각형 각주

기본 모형 하나와 형상비는 같고 중공부의 형상, 크기 및 위치를 변화시킨 24가지의 모형을 제작하여 풍동에서 공력진동실험을 실시하였다. 풍동실험결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 중공부의 형태로는 □자형이 풍방향 및 풍직각방향에 대한 응답변위의 감소효과가 우수하였고, +자형은 풍방향 및 풍직각방향에 대한 응답변위의 감소효과가 미소하였다.
2. 중공부의 위치는 □자형인 중공부를 모형높이의 1/2이상인 중·상층부에 설치하였을 때 응답변위의 감소효과가 우수하였고, 모형높이의 1/2 이하되는 하층부에 설치하였을 때는 감소효과가 거의 없었다. 중공부가 +자형인 경우에는 중공부의 위치에 관계없이 응답변위의 감소효과가 작았다.
3. 중공부 크기에 따른 응답변위는 중공부가 □자형인 경우에는 중공부가 클수록 풍방향 및 풍직각방향의 응답변위가 감소하였다. 그러나, +자형인 경우에는 중공부가 커져도 풍방향 및 풍직각방향에 대한 응답변위의 감소 효과는 거의 없었다.

참고문헌

[1]. 하영철, 김동우, 이정환, 「고층건축물의 모서리 형상 변화에 따른 풍진동 저감효과에 관한 연구」, 대한건축학회 논문집, 제 17권 7호(2001), p.p. 3~10  
 [2]. Kwok, K.C.S. and Bailey, P.A., *Aerodynamic Devices for Tall Buildings and Structure*, J. of Engineering Mechanics, Vol. 113, No. 3(1985)  
 [3]. 日本建築センター, 「實務者のための建築物風洞実験ガイドブック」, 1994  
 [4]. ASCE, *Wind tunnel studies of buildings and structures*, ASCE manuals and reports on engineering practices No.67( 1999)