

쌍곡선포물선 대공간 구조물의 측벽개구율에 따른 지붕의 풍압특성

Characteristic of Wind Pressure Distribution on the Roof of Hyperbolic Paraboloid Spatial Structures

유 장 열*
You, Jang-Youl

유 기 표**
You, Ki-Pyo

Abstract

There can be diverse causes in the destruction of a large space structure by strong wind such as characteristics of construction materials and changes in internal and external wind pressure of the structure. To evaluate the wind pressure of roof against the large space structure, wind pressure experiment is performed. However, in this wind pressure experiment, peak internal pressure coefficient is set according to the opening of the roof in Korea wind code. In this article, it was tried to identify the change of internal pressure coefficient and the characteristics of wind pressure coefficient acting on the roof by two kinds of opening on the side of the structure with Hyperbolic Paraboloid Spatial Structures roof. When analyzing internal pressure coefficient according to roof shape, it was found that minimum (52%) and maximum (30%~80%) overestimation was made comparing to partial opening type proposed in the current wind load. It is judged that evaluation according to the opening rate of the structure should be made to evaluate the internal pressure coefficient according to load.

키워드 : 풍압실험, 쌍곡선, 내압, 외압, 개구율

Keywords : wind pressure experiment, hyperbolic paraboloid, internal pressure, external pressure, opening

1. 서 론

강풍에 의한 대공간 구조물의 파괴는 사용되는 건축 재료적인 특성과 대공간 외부와 내부의 풍압력 변화등 다양한 원인이 발생 할 수 있다.¹⁾²⁾³⁾ 따라서 대공간 구조물의 지붕 풍압력에 대한 정확한 평가를 위해 풍압실험을 실시하고 있다. 그러나 풍압실험의 경우 현재 국내하중기준⁴⁾에서는 대공간 구조물 지붕의 폐쇄와 개방 여부에 따라 피크내압계수를 정하고 있다. 이에 따른 밀폐형 건축물의 경우 0 또는 -0.52, 부분개방형 건축물은 +0.83 또는

-0.83 그리고 탁월한 개방형 건축물은 +1.4 또는 -1.4로 규정을 하고 있다. 그러나 실제로 부분 개방형과 탁월한 개방형에 대한 정확한 개념이 없는 상태에서 개방형을 정의하고 있어 실제로 피크내압계수를 정의하기가 어려운 상태이다. ASCE-2005⁵⁾는 국내와 동일하게 개방형 형태에 따른 피크 내압계수를 제안하고 있으며, AS-1170하중⁶⁾기준은 건축물의 개방률에 따라 다양한 내압계수를 제시하고 있다. 그러나 이러한 하중기준들은 대부분이 일정한 박스 형태에 대해서만 적용이 가능한 상태이다. Fabio Rizzo등(2009)⁷⁾⁸⁾은 다양한 쌍곡선 대공간 구조물의 외관형태변화에 따른 풍하중이 작용 할때의 수직변위에 대해서 CFD와 풍압실험을 중심으로 연구를 수행하였다. 그리고 다양한 형태의 외관에 대해서는 일반적으로 오픈되어 있을 경우에는 외압과 내압실험을 실시하고 있는 실정이다.¹⁰⁻¹⁴⁾ 대공간 구

* Senior Researcher, KOCED Wind Tunnel Center, Chonbuk National University. Ph.D.

** Corresponding Author, Associate Professor, Architectural Engineering, Chonbuk National University. Ph.D. Long-span Steel Frame System Research Center.
Tel: 063-270-4057 Fax: 063-270-2285
E-mail : youkp@jbnu.ac.kr

조물 지붕이 폐쇄형으로 이루어 졌지만 사용목적에 따라 경기장이나 박람회장 같은 다중이용시설로 사용되기에 출입문들이 많이 설치되어 부분 오픈형태이지만 실제로 하중기준에서 제시하고 있는 부분 오픈형을 적용하기에는 내압계수 크기를 적용하기에 다소 어려움이 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 쌍곡포물선 대공간 지붕을 가지고 있는 건축물 측면에 서로 다른 2종류의 개구율을 설치하여 내압계수의 변동과 지붕에 작용하는 풍압계수의 특징에 대하여 알아 보고자 한다.

2. 실험모형

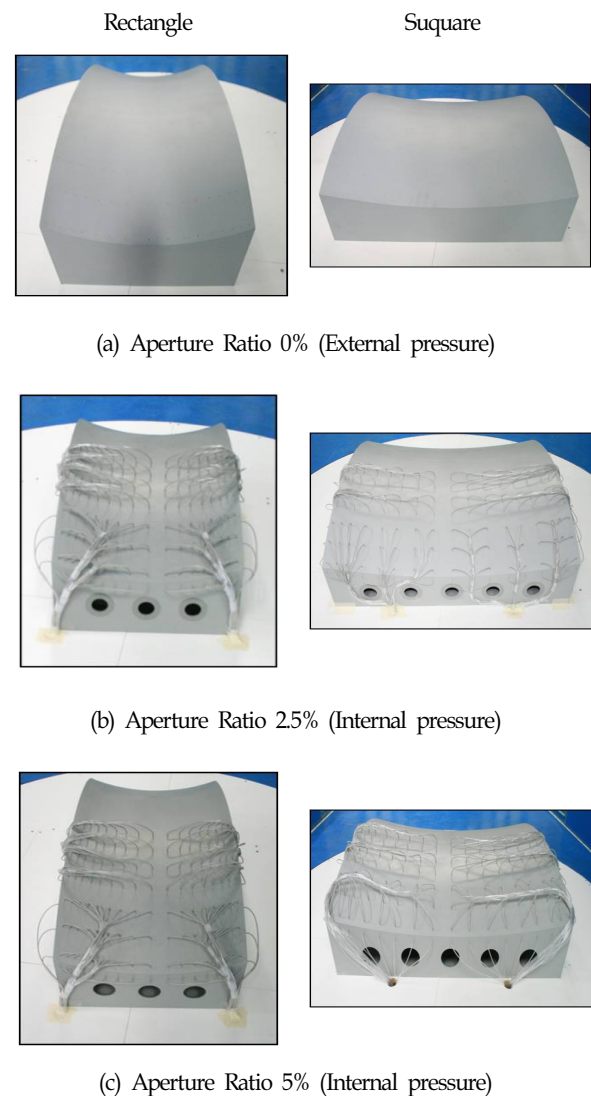
직사각형과 정사각형 쌍곡포물선(Hyperbolic paraboloid) 안장형 대공간 구조물의 전체 면적에 대하여 측면의 개구율을 0%, 2.5% 그리고 5%로 하여 지붕면에 작용하는 풍압력의 분포를 알아보기로 하였다. 풍압실험을 위한 모형스케일은 1/300으로 제작하였으며 실험대상건물의 제원은 <표 1>과 같으며 풍압실험에 사용되어진 실험조건은 <표 2>와 같다. 실험풍향각에 대해서는 총 24개 지점으로 나누어 풍압실험을 수행 하였다. <그림 1>은 실험에 사용된 쌍곡포물선 대공간구조물의 형태와 측면에 개구율을 설치한 모습을 나타내고 있다. 개구율은 측벽에 원형 구멍을 설치하였으며, 2종류의 실험모형 구조물(정사각형, 직사각형)의 면적이 서로 다르기 때문에 각 실험대상 구조물의 형태별 전체면적에 대해서 동일한 개구율을 유지할 수 있도록 구멍의 크기를 조정하였다. 개구율 0%일 경우 지붕의 외압만을 측정하였으며 개구율 2.5%와 5%경우에 대해서는 내압을 측정하였다. 개구부 구멍의 위치는 2개의 실험모형 모두 양쪽 측면에 설치하였으며 직사각형 지붕의 경우 짧은면에 설치하였다. 풍압측정을 위한 풍압공 위치는 실험대상 구조물의 특징상 좌우대칭이므로 지붕면의 절반까지만 설치하였다. 풍압공에 설치된 튜브는 길이 120cm를 사용하였으며 튜브의 특정위치에 저항관(restrictor)을 이용하여 풍압력 신호를 보정하였다.¹⁵⁾¹⁶⁾

<Table 1> Specification of model unit : mm

Type	Prototype			Model		
	Width	Length	Height	Width	Lehghth	Height
Rectangle	120000	240000	66600	400	800	222
Square	240000	240000	66600	800	800	222

<Table 2> The law of similarity for pressure experiment

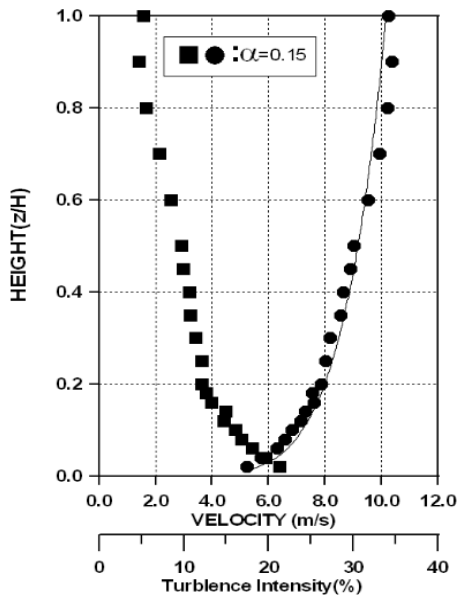
Basic wind speed	30m/s
Test wind speed	5m/s
Velocity scale	1/6
Model scale	1/300
Time scale	1/11.94
Measurement number	3 (×1024)
Sampling Frequency	200Hz (0.005sec)
Wind direction	Interval 15° (0° ~ 345°)
Surface roughness	$\alpha = 0.15$



<Fig. 1> Type of the roof of hyperbolic paraboloid

3. 풍동실험

풍압실험을 수행하기 위한 풍동실험은 전북대학교 경계층 풍동실험실에서 보유하고 있는 측정부 2.1m, 높이 1.7m, 실험부 길이 12m의 개방형 풍동장치에서 수행되어졌다. 가변풍속의 범위는 0.5~10m/s이며, 측정에 사용된 풍동내 기류는 모형높이에서의 난류강도가 10%인 교외지역($\alpha=0.15$)에 대하여 실험을 실시하였다. <그림 2>는 풍동 내 기류상태에 따른 평균풍속과 난류강도의 수직분포를 나타내고 있다.



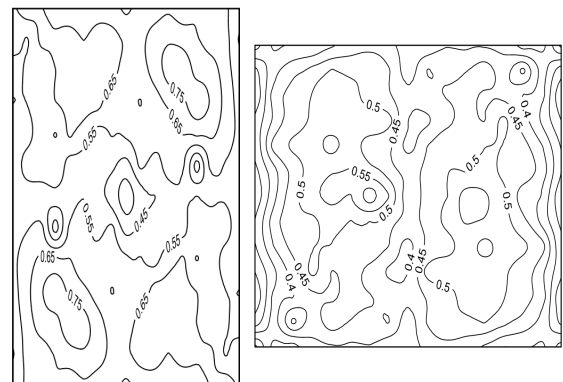
<Fig. 2> The vertical distribution of the mean wind speed and turbulence intensity($\alpha=0.15$)

4. 실험결과 및 분석

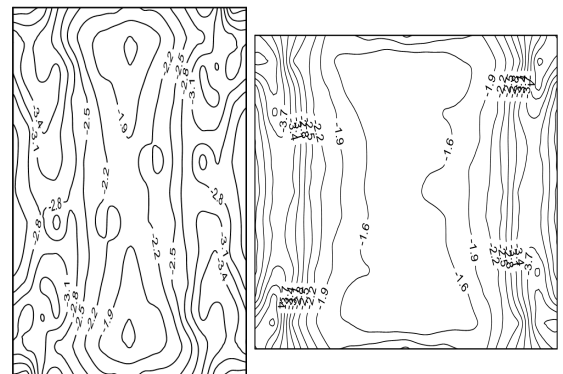
4.1. 풍압계수분포

쌍곡선포물선 안장형에 대한 측벽 개구율에 따른 지붕면의 풍압력 변화에 대해서 알아보려고 개구율에 따른 지붕의 내압과 외압실험을 수행하였다. <그림 3>은 측벽의 개구율이 0%일때 전체 풍향각에 대한 지붕면의 외압계수분포를 나타내고 있다. 지붕면의 최대 및 최소 피크풍압계수는 지붕면의 양쪽 모서리에서 가장 크게 나타나고 있었다. 그러나 중앙부로 갈수록 작아지고 있었다. 지붕면의 크기별 형태변화에서는 직사각형 지붕이 정사각형 지

붕보다 5% - 30%정도 크게 나타나고 있었지만 모형의 중앙부 영역의 변화가 모서리 영역의 변화보다 크게 나타나는 것으로 보아 지붕의 형태와 위치에 따라 풍압계수분포를 다르게 평가하여야 하며, 지붕의 외장재 설계에도 반영이 되어야 할 것으로 사료된다. <그림 4> - <그림 5>는 측벽 개구율이 2.5%, 5% 일때의 전체 풍향각에 대한 내압실험에서 구한 지붕면의 내압계수를 나타내고 있다. 측벽의 개구율 변화에 따른 지붕내부의 풍압계수는 개구율이 증가할수록 크게 나타나고 있었다. 그러나 내압계수의 위치별 차이에서는 값의 변동폭이 크게 나타나지 않고 일정하게 나타나고 있었다. 지붕의 형태별 변화에서는 직사각형지붕이 정사각형지붕보다 내압계수의 큰 값들이 많이 분포하고 있었으나 현재의 하중기준에서 제한하고 있는 부분 개방형 건축물의 내압계수(+0.83 또는 -0.83)보다는 적게 나타나고 있었다.

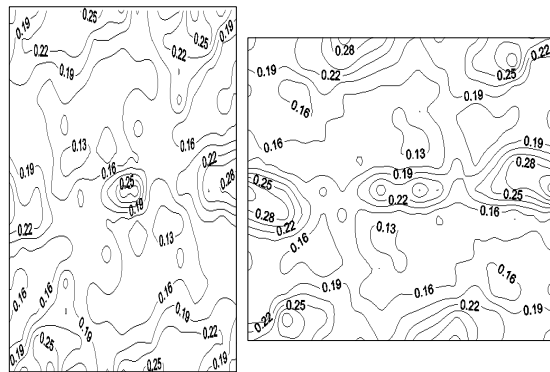


(a) Maximum wind pressure coefficient

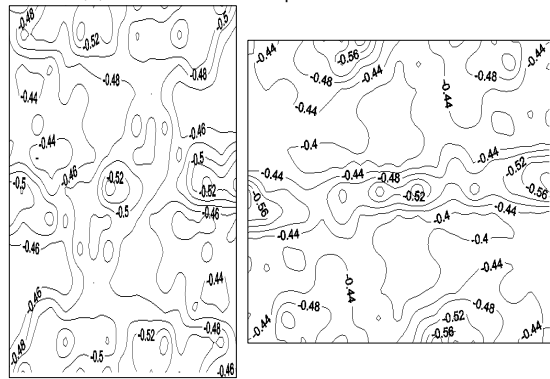


(b) Minimum wind pressure coefficient

<Fig. 3> Distribution of external pressure coefficient

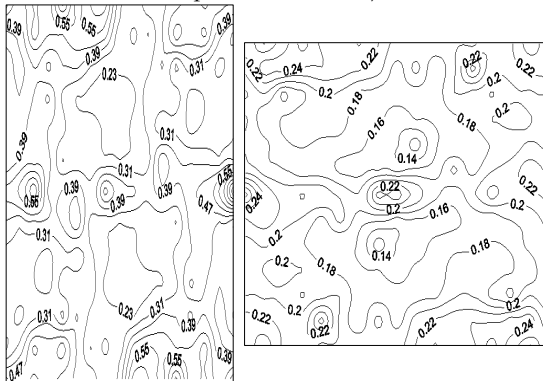


(a) Maximum wind pressure coefficient

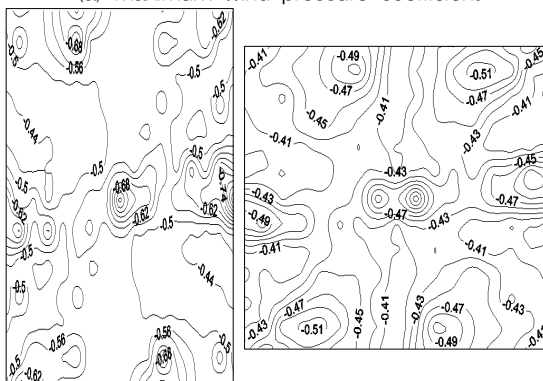


(b) Minimum wind pressure coefficient

<Fig. 4> Distribution of internal pressure coefficient (Aperture Ratio 2.5%)



(a) Maximum wind pressure coefficient

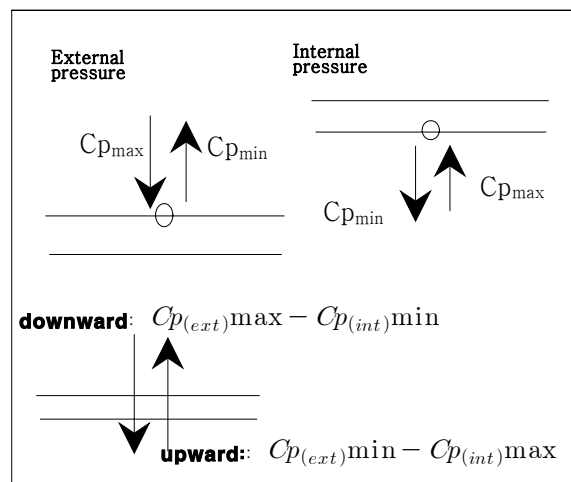


(b) Minimum wind pressure coefficient

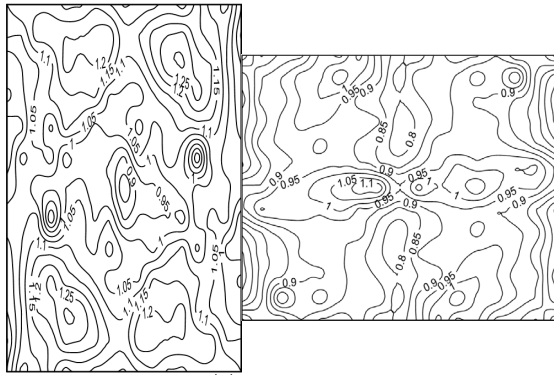
<Fig. 5> Distribution of internal pressure coefficient (Aperture Ratio 5%)

4.2. 지붕의 설계용 풍압계수

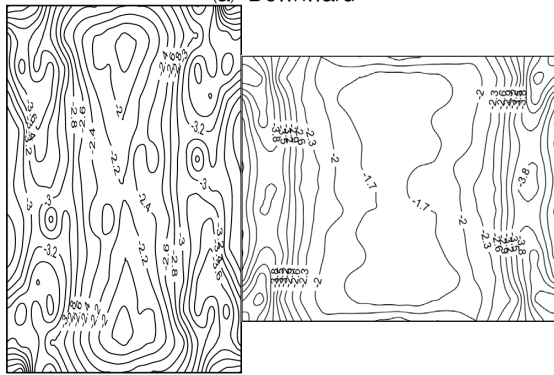
내압과 외압 풍압실험을 통해 얻은 피크외압계수를 이용하여 지붕면에 작용하는 설계용 풍압계수를 구하였다. <그림 6>은 지붕 구조물의 내압과 외압의 풍압방향에 대한 정의를 나타내고 있으며, <그림 7> - <그림 8>은 측벽의 개구율변화에 따른 지붕면에 작용하는 하향과 상향의 풍압계수 분포를 나타내고 있다. 하향으로 작용하는 풍압계수보다는 상향으로 작용하는 풍압계수가 크게 나타나고 있었다. 개구율이 증가할수록 상향으로 작용하는 풍압계수는 증가하고 있었으며 지붕의 양쪽모서리에서 발생하는 풍압계수 증가가 중앙부보다 크게 나타나고 있었다. 그리고 형태별 변화에서는 직사각형지붕이 정사각형지붕과 비교해 상대적으로 풍압계수가 크게 나타나는 것으로 보아 외압과 내압계수의 특성과 동일하게 나타나고 있었다. 단 하향의 풍압계수 분포는 지붕의 형태와 크기에 크게 변화가 없이 거의 일정한 범위에서 나타나고 있었다. 이는 내압계수분포의 최소피크외압계수가 개구율에 큰 영향을 받고 있지 않기 때문으로 판단이 된다. 또한 상향의 풍압계수 형태가 외압계수의 분포형태와 거의 동일하게 나타나고 있어지만 개구율에 따른 내압계수가 반영이 되면 외압계수보다 최대 30%이상 상향의 풍압계수가 증가하게 되어 외장재 풍하중 산정에 영향을 준 것으로 판단이 된다.



<Fig. 6> The directions of internal and external wind pressure to the membrane structure

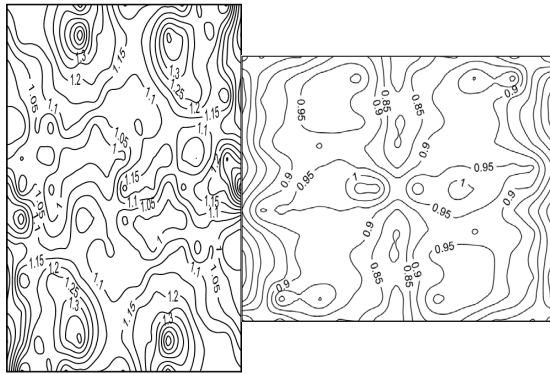


(a) Downward

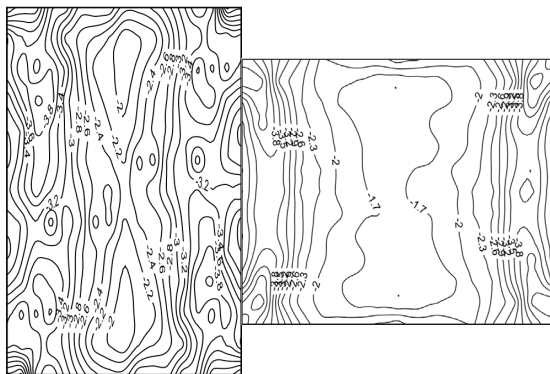


(b) Upward

<그림 7> Distribution of wind pressure coefficient (Aperture Ratio 2.5%)



(a) Downward

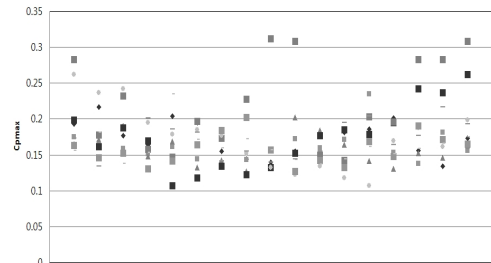


(b) Upward

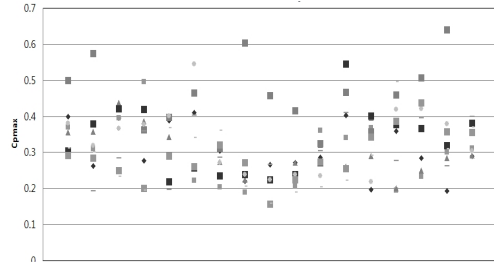
<그림 8> Distribution of wind pressure coefficient (Aperture Ratio 5%)

4.3. 하중기준의 비교

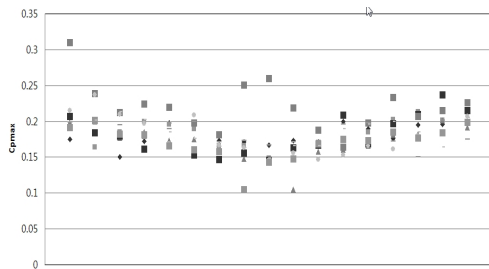
풍하중을 계산할 때 사용되는 내압계수는 일반적으로 개구부의 크기에 따라 다양하게 주어지고 있으며 현재 국내기준에서는 밀폐형, 부분개방형, 탁월개방형, 완전 개방형으로 구분을 하여 피크 내압계수를 제안하고 있다. 그러나 대공간의 특성상 완전 밀폐형 구조물로 제안하기에는 문제가 있다. 따라서 개구율에 따른 대공간 구조물 내부의 풍압계수를 알아보고 기존 하중기준과 비교해보고자 한다. <그림 9> - <그림 10>은 지붕의 형태와 개구율에 따른 내압측정을 위해 설치된 전체 풍압공에서 계측되어진 최대 및 최소피크 내압풍압계수를 나타내고 있다. 개구율이 증가할수록 피크내압계수가 증가하고 있는 것을 알 수 있었다. 직사각형 지붕의 피크내압계수의 변동 폭이 정사각형 지붕보다 크게 나타나는 것으로 보아 형태변화에도 많은 영향을 받고 있는 것으로 판단이 된다. 최대피크내압계수는 직사각형지붕과 정사각형지붕 각각 0.2~0.6범위, 0.1~0.4 범위 안에서, 최소피크내압계수는 -0.4 ~ -0.8범위, -0.4 ~ -0.6 범위 안에 나타나고 있어 직사각형지붕의 내압계수가 정사각형지붕보다 크게 나타나고 있었다. 특히, 실험에서 얻은 내압계수 범위와 비교하여 현재 국내하중기준에서 제안하고 있는 부분개방형의 경우 최대피크내압계수는 30%~80%, 최소피크내압계수는 52% 과대평가되고 있다.



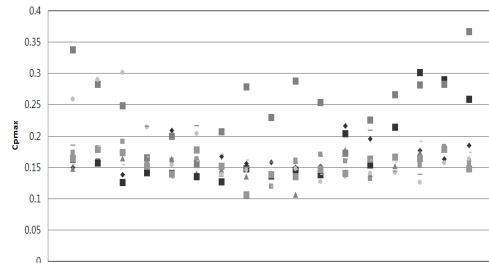
(a) Rectangle - Aperture Ratio 2.5%



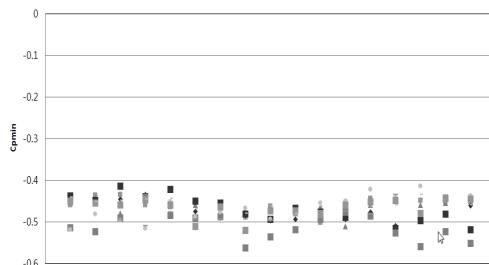
(b) Rectangle - Aperture Ratio 5%



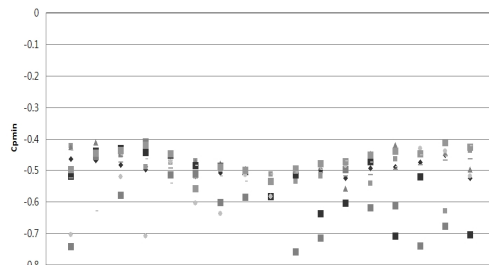
(c) Square - Aperture Ratio 2.5%



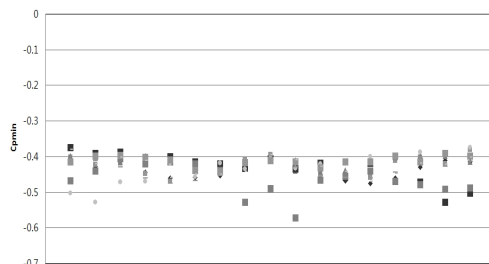
(d) Square - Aperture Ratio 5%
<Fig. 9> Distribution of maximum internal pressure coefficient



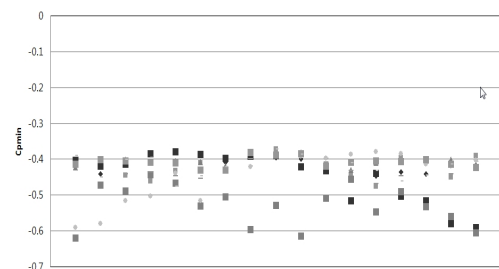
(a) Rectangle - Aperture Ratio 2.5%



(b) Rectangle - Aperture Ratio 5%



(c) Square - Aperture Ratio 2.5%



(d) Square - Aperture Ratio 5%
<Fig. 10> Distribution of minimum internal pressure coefficient

5. 결 론

쌍곡선 대공간 지붕을 가지고 있는 건축물의 측면개구율 변화에 따른 지붕면 풍압특성에 대하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 쌍곡선 대공간 지붕면에 작용한 위치별 외압계수는 양쪽 모서리에서 가장 크게 나타나고 있었으나 중앙부로 갈수록 피크풍압계수는 감소하고 있었다. 지붕면의 형태변화에서는 직사각형 지붕이 정사각형 지붕보다 피크외압계수가 크게 나타나고 있었다.

2) 내압계수의 변화에서는 측벽 개구율이 증가를 하면 피크외압계수가 증가하고 있었지만 위치분포에서는 거의 일정하게 분포하고 있었다. 형태별 차이에서는 직사각형이 정사각형보다 큰 내압계수들이 나타나고 있었다. 따라서 대공간 지붕의 위치와 형태에 따라 지붕의 외장재 설계 시 많이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

3) 국내 하중기준에서 제안하고 있는 부분개방형의 내압계수의 경우 풍압실험을 통한 지붕형태별 최대, 최소피크내압계수와 비교하여 과대평가되고 있는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 하중기준의 내압계수의 평가를 위해서는 구조물의 개구율에 따른 평가도 함께 진행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다.(No.2011-0028567) 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Yuan-Qi Li, Yukio Tamura, "Wind-Resistant Analysis for Large-span Single-layer Reticulated Shells" Vol.19, No.1, 2004, pp.47-59
2. P. Biagini, C. Borri, M. Majowiecki, M. Orlando, L. Procino, "BLWT Tests and Design Loads on the Roof of the New Olympic Stadium in Piraeus", 2006, pp.293-307
3. Qing-Shan Yang, Rui-Xia Liu, "On Aerodynamic Stability of Membrane Structures", Vol.20, No.3, 2005, pp.181-188
4. 대한건축학회 "건설교통부 고시 건축구조기준" 풍하중 2009.12
5. Guide to the Use of the Wind Load Provisions of ASCE7-2002
6. Structural Design Actions - Wind Actions AS/NZS 1170.2:2002
7. Fabio Rizzo, Piero D' Asdia, Massimiliano Lazzari, "Aerodynamic Behaviour of Hyperbolic Paraboloid Shaped Roofs - Wind Tunnel Tests", EACWE 5-Florence, Italy, 2009
8. Fabio Rizzo, Piero D' Asdia, Lorenzo Procino, "Wind Action Evaluation on Tension Roofs of Hyperbolic Paraboloid Shape", 2008
9. Yutaka ASAMI, "Wind Test for Membrane" Structure, Journal of Wind Engineering, No.78, 1999, pp.49-50
10. Yasushi Uematsu, Motohiko Yamada, Akihiro Karasu, "Design Wind Loads for Structural Frames of Flat Long-Span Roofs: Gust Loading Factor for a Structurally Integrated Type", 1997, pp.155-168
11. Yasushi Uematsu, Keisuke Watanabe, Akihiro Sasaki, Motohiko Yamada, Takeshi Hongo, "Wind-Induced Dynamic Response and Resultant Load Estimation of a Circular Flat Roof", 1999, pp.251-261
12. Y. Uematsu, M. Yamada, A. Sasaki, "Wind-Induced Dynamic Response and Resultant Load Estimation for a Flat Long-Span Roof", 1996, pp.155-166
13. 백선영, "아치형 하우스의 풍압분포에 대한 연구", 한국공간구조공학회 논문집, 제6권제1호, 2009, pp.123-128
14. 조슬기, "풍동실험을 통한 저층형 농촌시설물 풍압분포 분석", 한국공간구조학회 논문집, 제6권 제1호, 2009, pp.157-160.
15. 김영문 외 2인 역, 건축물의 내풍설계, 한림원, 2002
16. 김영문 역, 실무자를 위한 건축물 풍동실험 가이드북, 한국풍공학회, 1998

(접 수 일 자 : 2012년 09월 07일)

(심사완료일자 : 2013년 01월 25일)

(게재확정일자 : 2013년 02월 28일)