

대스팬 지붕구조물의 등가정적 풍하중 산정에 관한 연구

A Study on the Equivalent Static Wind Load Estimation of Large Span Roofs

이 명 호* 김 지 영** 김 대 영*** 김 상 대***
Lee, Myung-Ho Kim, Ji-Young Kim, Dae-Young Kim, Sang-Dae

요 약

Gust Factor법은 구조물의 등가정적 풍하중을 평가하는 일반적인 방법으로 구조물의 최대 응답시의 풍하중의 분포가 평균풍하중의 분포와 동일한 형상을 가진다는 가정하에 적용한다. 그러나 대스팬 구조물의 경우 평균 풍하중의 형상과 변동 풍하중의 형상이 다를 수 있어 1차모드뿐 아니라 고차모드의 영향을 고려하여 구조물의 풍응답과 풍하중을 산정하여야 한다.

본 논문에서는 등가정적 풍하중을 산정하기 위하여 현재 사용되고 있는 Gust Factor 법 (GF법), Load-response-correlation 법 (LRC법)에 대해 고찰하고, Advanced Conditional Sampling 법 (ACS법)을 제안하였다. ACS법은 최대하중효과를 나타내는 순간에 선택된 풍압분포와 구조물의 동적거동에 의해 발생한 관성력을 합성하여 등가정적풍하중을 산정하는 방법이다. 최대하중 효과는 풍동실험에서 얻어진 풍압데이터를 이용하여 시간이력해석으로 평가한다. 제안된 ACS법과 기존의 GF법 및 LRC법을 지붕 구조물에 적용하여 등가정적 풍하중을 산출하고 이를 상호 비교 분석함으로써 ACS법의 유효성을 검증하고자 한다.

Abstract

The GF(Gust Factor) method is usually used as a method to evaluate equivalent static wind loads for general structures. The GF method is performed on the assumption that the shape of the equivalent static wind load profile is typically similar to that of mean wind loads. The shape of fluctuating wind loads could be quite different with that of the mean wind loads in case of large-span structures. So, the effect of higher modes as well as first mode must be considered to evaluate the wind loads.

In this study, the ACS (Advanced Conditional Sampling) method is suggested to evaluate of equivalent static wind loads after investigating about GF and LRC method. The ACS method can derive effective static wind loads by combining wind pressures and inertia forces of a structure chosen at a maximum load effect. The maximum load effect is assessed with the time history analysis using pressure data measured in wind tunnel tests. Equivalent static wind loads evaluated using ACS, GF, and LRC methods are compared to verify the effectiveness of ACS method.

키워드 : 거스트 계수법, 하중-응답 상관계수법, 새로운 조건적 샘플링법, 하중효과, 대스팬구조, 풍동실험

Keywords : Gust Factor, LRC (Load-response-correlation), ACS (Advanced Conditional Sampling Method), Load Effect, Large-Span Structure, Wind Tunnel Test

1. 서 론

자연풍은 시간적, 공간적으로 끊임없이 변동하고 있으므로 구조물에 가해지는 풍력의 평가는 이러한 사실을 반드시 고려하여야 한다. 특히 대스팬 지붕구조물의 경우는 구조물 자체가 공간적으로 큰 규모

를 가지고 있고, 구조물의 경량화 및 이에 따른 풍하중 등의 영향이 커지게 되므로 규모효과 및 공진효과를 고려하여 설계해야 한다¹⁾.

국내풍하중 기준에서는 구조물의 1차 진동모드가 탁월하며, 평균변위가 1차 진동모드 형태와 근사하다는 전제하에 정형화된 지붕구조물의 풍하중을 산정할 수 있도록 규정하고 있다.

또한, 풍압실험에 의한 풍응답 및 풍하중의 산정은 구조물의 기준과 마찬가지로 1차 진동모드가 탁월하고, 구조물의 최대 응답시의 풍하중의 분포가 평균풍하중의 분포와 동일한 형상을 가진다는 가정

* (주) 대우건설 기술연구원, 전임연구원

** (주) 대우건설 기술연구원, 선임연구원

*** 정희원, (주) 대우건설 기술연구원, 수석연구원, 공학박사
Tel : 031-250-1162 Fax : 031-250-1132

E-mail : kindy@dwconst.co.kr

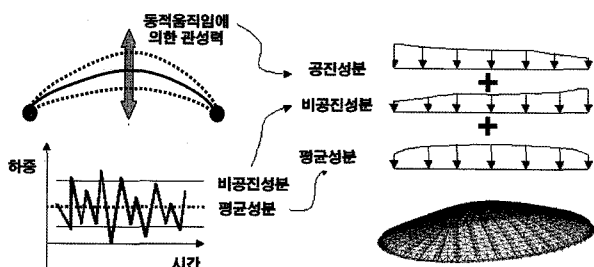
**** 고려대 건축공학과, 교수

하에 Gust Factor법을 적용하여 이루어진다²⁾. 그러나 대스팬 구조물의 경우 평균 풍하중의 형상과 변동풍하중의 형상이 다를 수 있어 1차모드뿐 아니라 고차모드의 영향을 고려하여 구조물의 풍응답과 풍하중을 산정하여야 한다. 따라서 최근에는 다점동시 측정시스템을 이용하여 구조물의 각 지점별 풍압을 동시에 측정하고, 이를 이용하여 구조물의 하중영향을 분석하여 풍하중을 산정하는 연구가 이루어지고 있다³⁾.

본 논문에서는 등가정적 풍하중을 산정하기 위하여 현재 사용되고 있는 Gust Factor 법(GF법)²⁾, Load-response-correlation 법(LRC법)¹⁾⁴⁾의 문제점을 살펴보고 이를 수정·보완할 수 있는 Advanced Conditional Sampling 법(ACS법)을 제안하였다. ACS법은 최대 하중효과를 나타내는 순간에 선택된 풍압분포와 구조물의 동적거동에 의해 발생한 관성력을 합성하여 등가정적풍하중을 산정하는 방법이다. 제안된 ACS법과 기존의 GF법 및 LRC법을 실제 지붕 구조물에 적용하여 등가정적 풍하중을 산출하고 이를 상호 비교 분석함으로써 ACS법의 유효성을 검증하고자 한다.

2. 기존 평가법

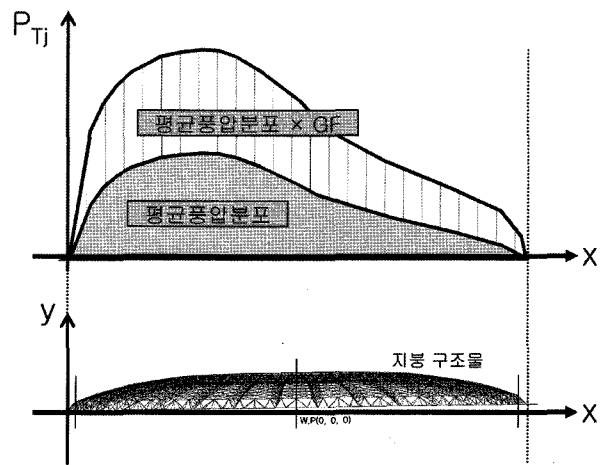
지붕 구조물에 대하여 설계용 풍하중은 <그림 1>과 같이 평균(Mean)성분, 비공진(Background)성분과 공진(Resonant)성분의 하중으로 구분될 수 있다⁶⁾. 평균성분과 비공진성분은 각각 바람의 평균성분과 변동성분에 의해 발생하며 공진성분은 변동풍하중에 의한 구조물의 진동으로 발생하는 관성력에 해당한다. 시계열 풍압데이터를 바탕으로 산정된 풍하중의 세 가지 성분을 조합하여 설계용 등가정적하중을 산정하게 된다.



<그림 1> 풍하중의 구성성분

2.1 Gust Factor법(GF법)

<그림 2>와 같이 시계열 풍압데이터를 이용하여 구조물의 주요진동모드에 대한 일반화풍력을 구하고 동적해석을 통해 응답을 산정한 뒤 식 (1)과 같이 평균응답에 대한 최대응답의 비를 구함으로써 거스트계수(G_f)를 산정한다. 그리고 식 (2)와 같이 산정된 거스트계수를 평균풍압(P_{Mj})에 곱하여 등가정적풍압(P_{Tj})을 산출한다.



<그림 2> Gust Factor법의 개념도

$$G_f = 1 + g \frac{\sigma_r}{\bar{r}} \tag{1}$$

$$P_{Tj} = G_f P_{Mj} \tag{2}$$

여기서 g : 응답의 피크팩터

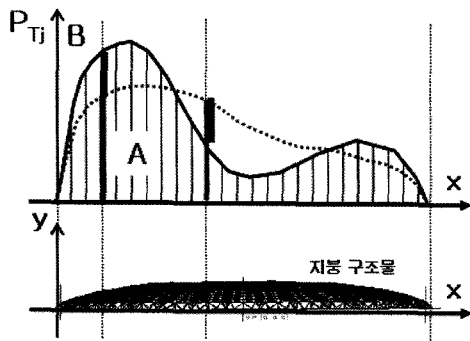
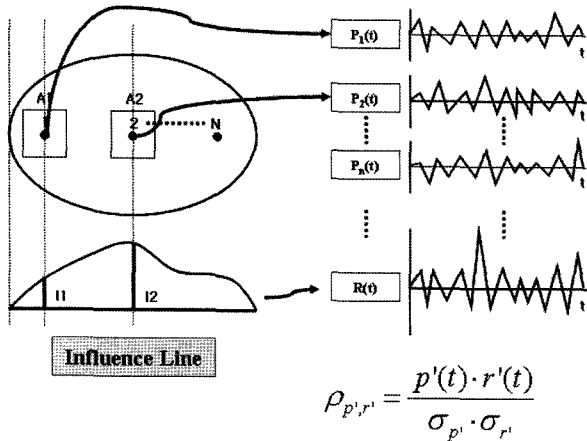
σ_r : 응답의 rms

\bar{r} : 평균응답

GF법은 구조물의 동적거동으로 인해 발생하는 관성력을 평가하여 등가정적하중에 반영할 수 있다. 그러나 최대응답을 발생시키는 풍하중의 분포가 평균풍하중과 동일하다는 가정하에 등가정적 풍하중이 산정되므로 실제 비공진 및 공진성분의 분포형을 반영하기 어렵다.

2.2 Load Response Correlation 법(LRC법)

<그림 3>과 같이 구조물에서 발생하는 임의의 하중효과와 각 풍압과의 상관계수를 구하여 식 (3)과



〈그림 3〉 LRC법의 개념도

같이 각 풍압공의 비공진(P_{Bj}) 풍압을 산정한 뒤 이를 식 (4)와 같이 각 풍압공의 평균(P_{Mj})풍압과 조합하여 전체 풍하중을 산정한다.

$$P_{Bj} = g_B \sum_{i=1}^n p_i p_j I_{ri} / \sigma_{rB} \quad (3)$$

$$P_{Tj} = P_{Mj} + P_{Bj} \quad (4)$$

여기서, g_B : 비공진 성분의 피크팩터

p_i, p_j : i, j 점의 풍압

I_{ri} : i 점의 영향계수

σ_{rB} : 비공진성분 응답의 rms

LRC법은 임의의 하중영향과 풍하중과의 상관계수를 평가하여 등가정적 풍하중을 산정하게 되므로 주요부재 및 응답에 대한 설계용 풍하중을 평가할 수 있는 장점이 있다. 그러나 기본적인 LRC법은 풍하중의 평균 및 비공진성분을 대상으로 등가정적 풍하중을 산정하므로 구조물의 동적거동에 의해 발생하는 공진성분의 풍하중을 평가할 수 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 Holmes¹⁾에 의해 수정

안이 제시되어 있다.

3. Advanced Conditional Sampling법 (ACS법)

GF법의 경우 공진풍하중을 고려하여 등가정적 풍하중을 산정할 수 있으나 하중영향이 고려된 풍하중의 프로 파일을 구할 수 없으며 LRC법의 경우 다양한 하중영향을 고려할 수 있으나 공진풍하중을 산정하기에 부적절한 측면이 있다. 따라서 이를 보완하기 위해 ACS법을 제안하였다.

〈그림 4〉와 같이 구조물을 모델링하고 시계열 풍압데이터를 풍하중으로 입력하여 시간이력해석을 수행한다. 해석결과로부터 임의의 설계대상인 하중효과가 최대인 순간을 찾은 뒤 이 순간의 풍압 분포로부터 평균풍압과 비공진 풍압의 분포를 구한다. 그리고 최대하중효과가 발생한 순간의 가속도 값을 시간이력 해석결과로부터 구하여 구조물의 관성력을 산정함으로써 공진성분의 풍하중을 계산한다. 최대하중효과가 나타난 순간에 산정된 비공진풍압(p_{Bj})과 공진풍압(p_{Rj})은 동일한 순간에 발생한 값이므로 식 (5)과 같이 선형적으로 합성하고 이를 평균풍압(p_{Mj})과 조합하여 등가정적 풍압(P_{Tj})을 산정한다.

$$P_{Tj} = p_{Mj} + p_{Bj} + p_{Rj} \quad (5)$$

$$p_{Bj} = p_{B\gamma}(j, t_k) \quad (6)$$

$$p_{Rj} = a(j, t_k) m_j \quad (7)$$

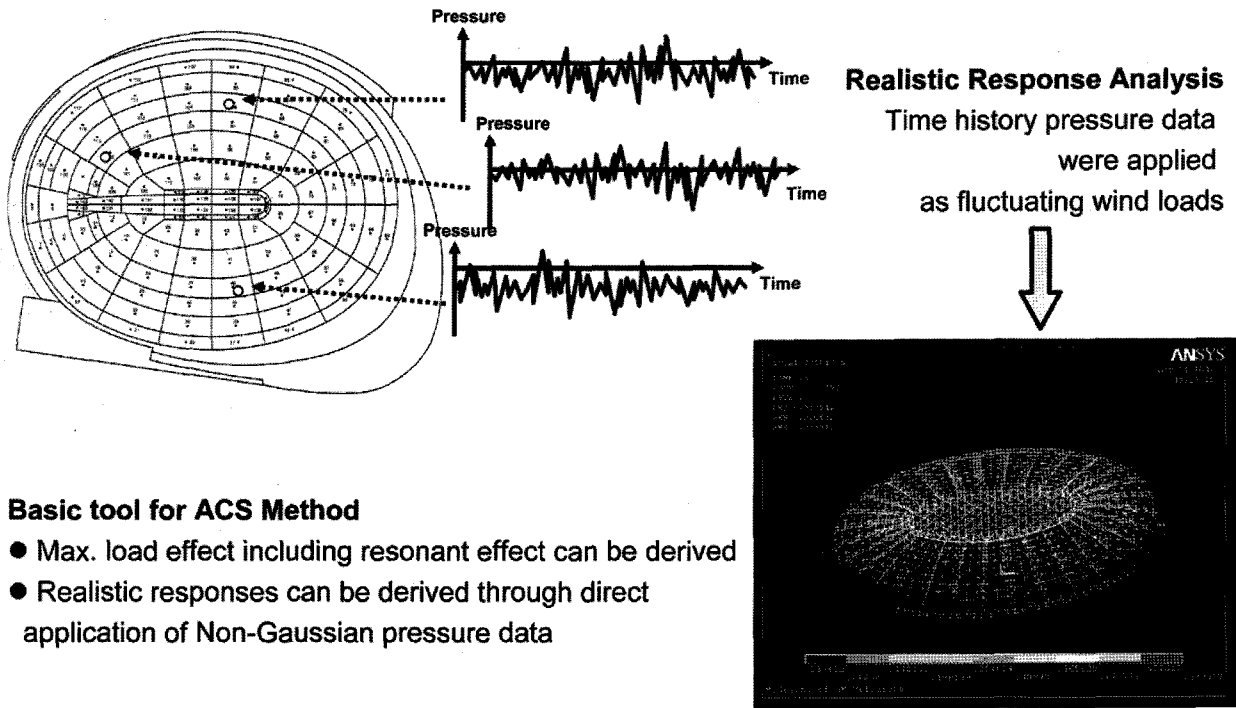
여기서 t_k : 최대하중 효과가 발생한 시간

$p_{B\gamma}(j, t_k)$: t_k 일 때 j 점에서의 풍압

$a(j, t_k)$: t_k 일 때 j 에서의 가속도

ACS법은 GF법과 같이 공진성분의 풍하중을 구할 수 있으며 LRC법과 같이 다양한 하중영향에 대한 등가정적 설계하중을 산정할 수 있다. 또한 평균, 비공진 및 공진 성분의 풍하중을 각각 구하여 조합하기 때문에 임의의 하중효과에 대하여 실제에 가까운 등가정적 풍하중 분포를 구할 수 있다.

그러나 LRC법과 같이 응답과 하중과의 연관성을



Basic tool for ACS Method

- Max. load effect including resonant effect can be derived
- Realistic responses can be derived through direct application of Non-Gaussian pressure data

<그림 4> 풍압데이터를 이용한 시간이력해석

바탕으로한 *rms*값으로 등가정적하중이 평가되는 것이 아니라 최대하중영향이 발생할 때 순간적인 풍압분포 및 관성력이 선택되는 것이기 때문에 수 개의 샘플에 대한 평균화 과정이 필요하다.

4. 풍동실험

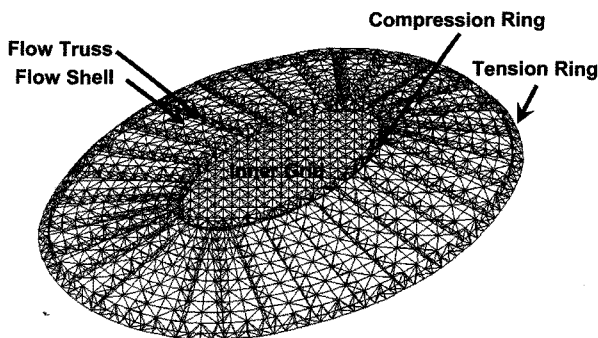
<그림 5>의 지붕구조물을 대상으로 풍압실험을 실시하였다. 본 구조물은 돔 경기장의 지붕이며 장변 180m, 단변 132m이고, 중심부에서의 높이는 18m, 자중은 445tf이다.

<그림 6>과 같이 풍동내에 모델의 축적이 1/400

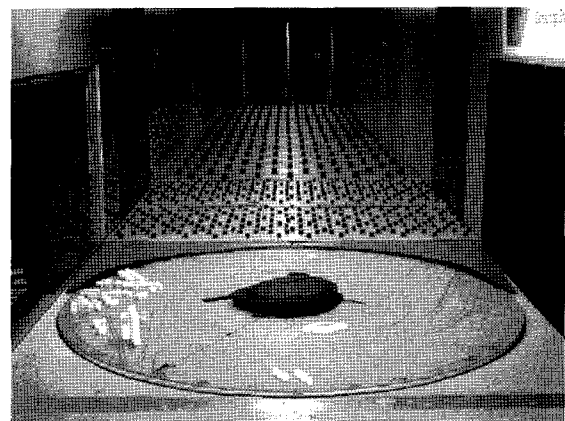
인 풍압모델을 설치하고 노풍도 C인 조건에서 풍압 실험을 실시하였다.

동시성이 확보된 풍압 시계열 데이터를 얻기 위해 다점 풍압 동시측정 장치를 이용하여 <그림 7>과 같이 배치된 183개의 풍압공으로부터 측정주파수 512Hz로 풍압데이터를 동시측정하여 풍압공당 12288개의 데이터를 확보하였다. 실험에서 측정된 풍압이 각각의 분담면적 (Tributary Area)에 작용하는 풍압을 대표할 수 있도록 풍압공을 배치하였다.

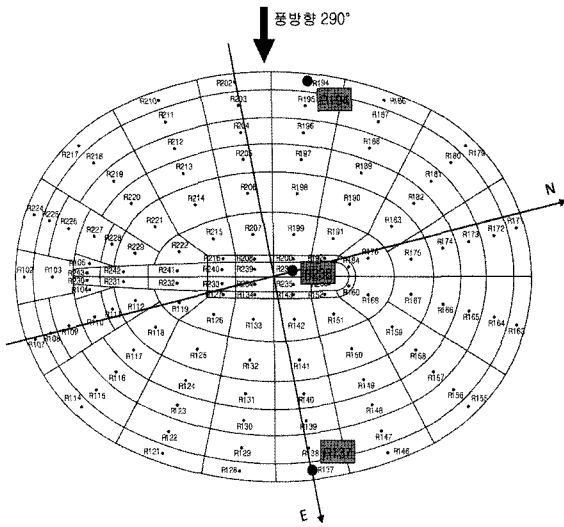
풍압측정점과 센서를 연결하는 튜브에 의해 공명



<그림 5> 대상 구조물



<그림 6> 풍동실험 전경



<그림 7> 풍압실험을 위한 풍압공의 배치

현상 및 감쇠 등이 발생하여 압력신호의 진폭과 위상이 왜곡되므로 0Hz에서 500Hz 대역에 대하여 튜브의 동특성보정을 실시하였다⁵⁾.

5. 동적해석

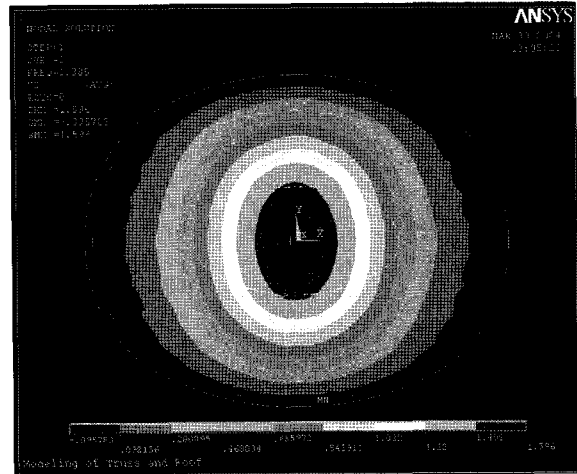
공진효과가 포함된 동적하중효과를 도출하여 등가정적 풍하중을 산정하기 위해 동시 측정된 풍압데이터를 이용하여 구조물의 시간이력해석을 수행하였다^{10),11)}.

해석프로그램은 ANSYS¹³⁾이며, 구조물에 풍압을 작용시키기 위하여 프레임 구조의 절점을 연결하는 면요소(Surface Element)를 모델링하였다. 면요소는 강성과 질량이 없으며 풍압을 구조물에 전달하는 역할을 수행한다.

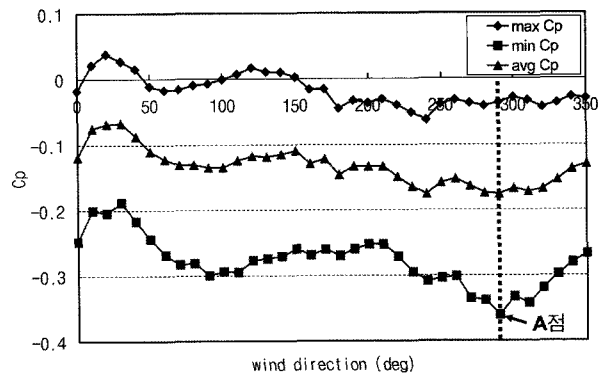
건물에 작용하는 모든 풍향에 대하여 시간이력해석을 수행하는 것은 비경제적이므로 풍압과 영향계수를 고려하여 구조물에 미치는 정적 하중효과가 가장 큰 풍방향을 선정하였다.

본 지붕 구조물의 영향계수 분포는 <그림 8>과 같으며, 각 풍향별 가중면적적분결과를 분석하여 정적 하중 효과가 가장 큰 풍방향으로 <그림 9>의 290°(A점)가 선정되었다. 이 풍향에 대해 시간이력 해석을 수행하였다.

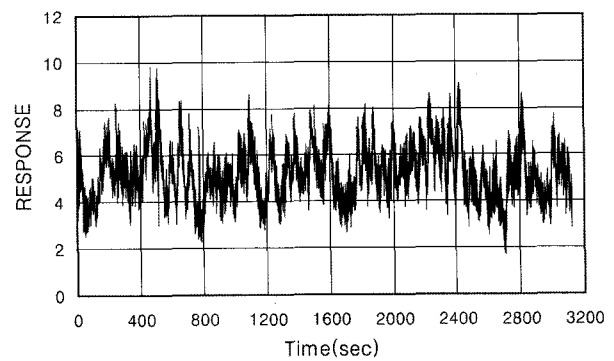
<그림 10>과 같이 시간이력해석을 통해 각 샘플의 길이가 10분 이상인 5개의 하중효과 샘플을 획득하였다. 구조물의 시간이력해석을 실시할 경우 해



<그림 8> 영향계수 분포



<그림 9> 각 풍향별 가중적분 결과



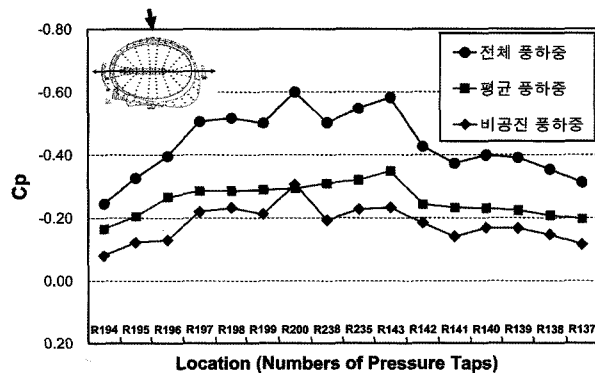
<그림 10> 시간이력 응답해석결과

석결과의 초반부는 충격하중에 의한 영향으로 비정상진동(Non-stationary Vibration) 영역을 포함하므로 2-3분 정도 시간이력해석 초반에 나타나는 응답은 샘플 취득에서 제외하고 정상상태의 응답으로부터 응답 샘플을 취득하였다.

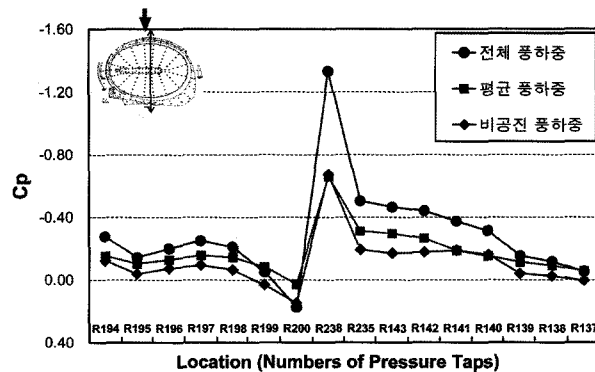
6. 결과분석

6.1 GF법과 ACS법의 비교

GF법은 최대응답에 상응하는 등가정적하중의 분포가 평균풍하중의 분포와 같은 형태를 가질 경우 적용이 가능하다. 그러나 <그림 11, 12>에서 평균풍하중과 ACS법으로 구한 비공진 풍하중의 조합인 전체 풍하중의 형상은 Gust Factor를 적용하여 산정하기가 어렵다는 것을 알 수 있다. 따라서 GF법은 공기역학적으로 준정적 가정이 유효한 작은 구조물이나, 캔틸레버 구조물에 대해서는 비교적 정확한 하중을 산정할 수 있기 때문에 많은 기준에서 채택되고 있지만 풍하중의 영향이 복잡한 대스팬 구조물에 적용하는 것은 적절하지 않다고 판단된다.



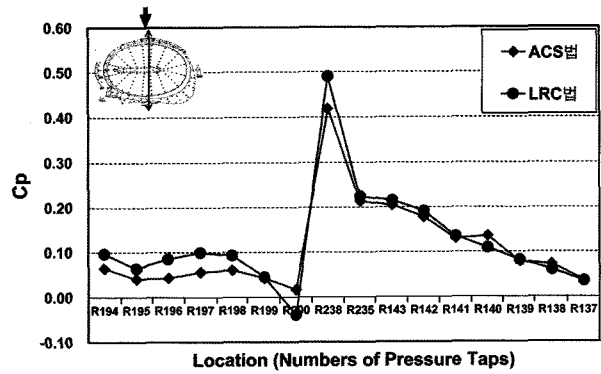
<그림 11> ACS법에 의한 하중조합 (X방향)



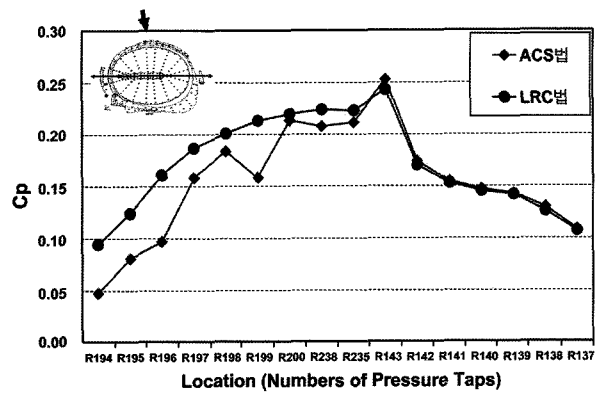
<그림 12> ACS법에 의한 하중조합 (Y방향)

6.2 LRC법과 ACS법의 비교

<그림 13, 14>은 5회 앙상블 평균한 ACS법과 LRC법으로 구한 비공진 풍압 분포를 나타낸 그림



<그림 13> 풍압 분포 (Y방향)



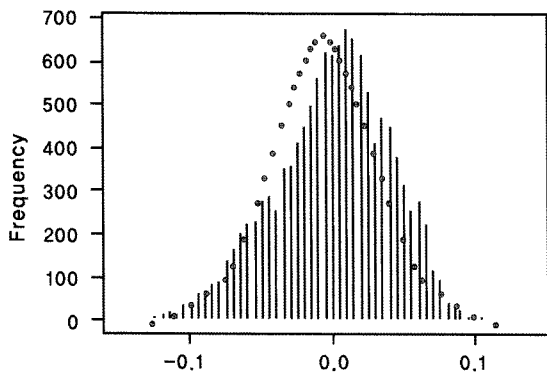
<그림 14> 풍압 분포 (X방향)

이다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 박리 후류영역 즉 정규분포영역에서는 ACS법과 LRC법이 잘 일치하지만, 박리영역 즉 비정규분포 영역의 경우는 ACS법과 LRC법이 일치하지 않음을 알 수 있다.

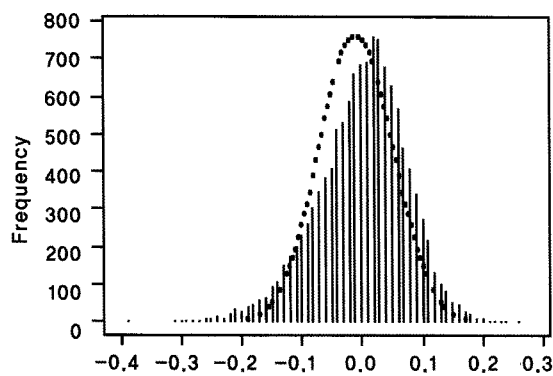
풍압의 박리영역에서는 일반적으로 정규분포(Gaussian Distribution)가 아닌 비정규분포(Non-gaussian Distribution) 특성을 나타내게 되고 이러한 풍압이 주된 하중으로 작용하여 나타내게 되는 하중효과 역시 비정규 분포 특성을 나타내게 된다.

<그림 15>는 <그림 10>의 시간이력해석결과를 상대빈도분포로 나타낸 그림이다. 응답의 상대빈도 분포가 정규분포로부터 비대칭성(skewness)을 나타내는 비정규 분포 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

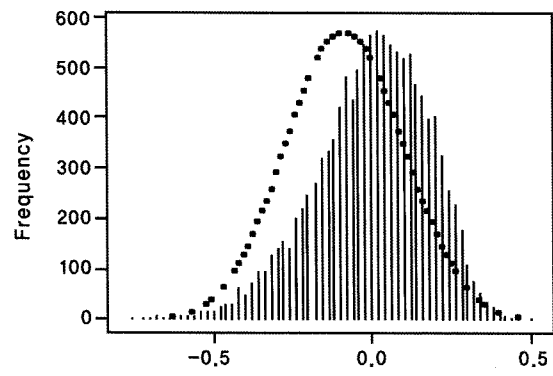
<그림 16>는 <그림 7>의 R194, R238, R137 풍압공의 상대빈도분포를 나타낸 그림이다. 바람의 박리영역에 있는 풍압공 R194와 R238은 정규분포로부터 큰 비대칭도(skewness)를 나타내는 비정규분포 특성을 보이고 있지만 박리후류의 재부착 영역에 있는 R137은 정규분포를 나타내고 있음을 알 수 있다.



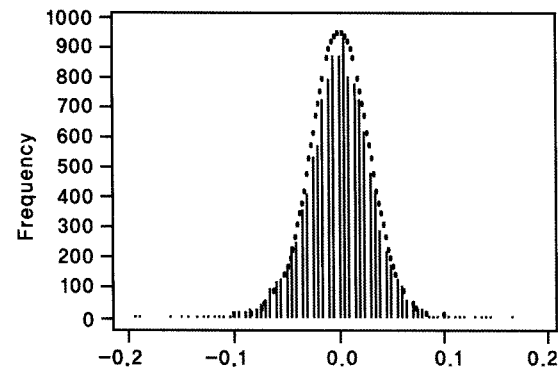
〈그림 15〉 응답의 상대빈도분포



(a) R194



(b) R238



(c) R137

〈그림 16〉 풍압의 상대빈도분포

따라서 정규분포로 가정하여 확률적으로 시간평균특성을 가지는 LRC법으로는 복잡하게 변동하는 박리영역에서의 순간적인 풍압분포를 표현하기에는 어려움이 있음을 알 수 있다¹⁰⁾.

따라서 LRC법의 경우에는 결과값이 실제의 풍하중 분포와 차이를 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

그러나 ACS법은 실제 비공진 풍하중이 시간이력 하중 데이터에서 직접 샘플링되므로 순간적인 분포 특성이 하중 평가에 반영될 수 있다.

7. 결론

대스팬 지붕 구조물의 풍동실험 결과를 이용하여 GF법, LRC법과 ACS법을 적용할 경우 다음과 같은 결론을 얻었다.

ACS법을 이용한 실제 풍하중 분포를 고려한 풍하중 산정법을 개발했다.

대스팬 돔구조물의 경우 1차모드만을 고려하여 평균풍압분포에 Gust Factor를 적용하여 풍하중을 산정하기에는 상당한 무리가 있는 것으로 나타났다. 대스팬 돔구조물에서와 같이 상당한 영역이 비정상성의 특성을 가지는 비정규 분포(non-Gaussian) 풍압 영역이 될 경우 응답(하중효과)도 비정상성을 나타내므로 정상확률과정의 가정하에 산출된 풍하중은 실제와 상이하게 평가될 수도 있다.

따라서, 박리영역에서처럼 비정규분포(non-Gaussian) 영역의 풍압 분포는 확률적으로 시간평균특성을 가지는 LRC법으로는 복잡한 박리영역에서의 순간적인 풍압분포를 표현하기가 어렵지만, ACS법에 의해서 비정규분포 특성을 고려할 수 있다.

참고문헌

1. J.D Holmes, Effective Static Load Distributions in Wind Engineering, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90, 2002, 91~109
2. A.G. Davenport, Gust Loading Factors, *ASCE Journal of Structural Division*, 93, 1967, 11~34
3. J. D. Holmes, M. J. Syme, M. Kasperski, Optimised design of a low-rise industrial building

- for wind loads, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 57, 1995, 391~401
4. M. Kasperski et. al, The L.R.C(load-response-
orrelation)-Method a General Method of
Estimating Unfavourable Wind Load Distributions
for Linear and Non-linear Structural Behaviour,
*Journal of Wind Engineering and Industrial
Aerodynamics*, 41~44, 1992, 1753~1763
 5. A. Yoshida, et al, Effects of bends in a tubing
system for pressure measurement, *Journal of
Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*,
89, 2001, 1701~1716
 6. J.D Holmes, Optimised Peak Load Distributions,
*Journal of Wind Engineering and Industrial
Aerodynamics*. 41, 1992, 267~276
 7. Y. Tamura, et al, Actual Extreme Pressure
Distribution and LRC Formula, *Journal of
Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*,
90, 2002, 1959~1971
 8. Ahsan Kareem, Measurements and Analysis of
Pressure Fluctuations on Prismatic Structures
in Turbulent Boundary Layer Flows, International
Colloquium on Bluff Body Aerodynamics
and Its Application, *Journal of Wind Engineering
and Industrial Aerodynamics*, No. 37, October
1988
 9. J. S. Bendat et al, Random Data, 3rd ed.,
John Wiley & Sons, Inc., 2000
 10. Y. U matsu, M. Yamada, A. Inoue and T.
Hongo, Wind loads and wind-induced dynamic
behavior of a single-layer latticed dome, *Journal
of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*,
66, 1997, 227~248
 11. Y. Uematsu, O. Kuribara, M. Yamada, A.
Sasaki and T. Hongo, Wind-induced dynamic
behavior and its load estimation of a single-
layer latticed dome with a long span, *Journal
of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*,
83, 1999, 1671~1687
 12. Y. Tamura, K. Hibi., Quasi-static Wind Load
Combinations for Low- and Middle-rise
Buildings, *Journal of Wind Engineering and
Industrial Aerodynamics*, 91, 2003, 1613~1625.
 13. ANSYS Inc. ANSYS Manual, 2004