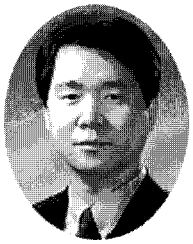
바람과 대공간 구조물

Wind and Large Span Roof Structures



金 大 英*
Kim, Dae-Young

金 志 英**
Kim, Ji-Young

金 相 大***
Kim, Sang-Dae

1. 서론

고대부터 수많은 군중이 모일 수 있는 장소를 만드는 것은 건축계획상의 꿈이었으며, 천후에 좌우되지 않는 지붕을 만들어 쾌적한 환경을 창조하는 것은 건축 기술자들에게 굉장한 매력을 지닌 끊임없는 도전의 대상이었다. 이러한 흐름이 최근에 와서 재료, 구조기술, 시공법의 급속한 발달로 인해 그 지역을 상징할 만한 건축물로서의 대스팬 건축물의 보급 및 대규모화를 한층 가속화 시키고 있다.

2002년 월드컵을 계기로 국내에서도 대스팬 구조물의 건설이 크게 증가되었으며, 구조기술자의 입장에서 보면 대공간 지붕 구조물이 가지는 경량성 및 유연성으로 인해 바람에 대한 구조설계가 무엇 보다 중요해지게 된다. 이에 따라, 대공간 지붕 구조물에 대한 설계용 풍하중을 산정하기 위하여 국내에서도 많은 풍동실험이 이루어졌다.

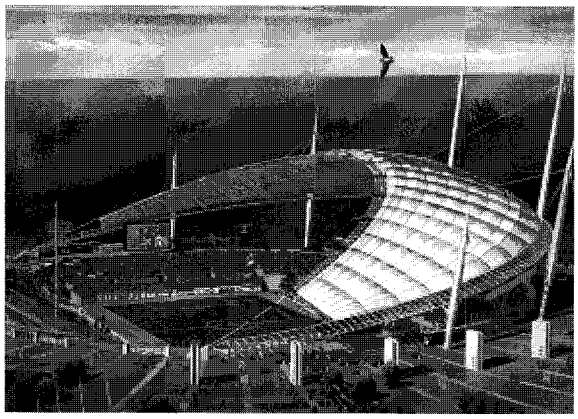
초고층 건물의 경우 국내에서 많은 풍동실험과 풍하중산정을 통해 경험이 축적되어 있으나, 대스팬 지붕 구조물의 풍하중 산정에 대해서는 선진외국과 비교하여 다소 기술력 축적이 부족한 상태이다. 초고층 건물과 달리 대스팬 지붕구조물의 경우 구조물에 작용하는 설계용 풍력을 산정하기 위하여 풍동실험을 통해 측정된 풍압을 이용한다. 국내의 경우 대부분 실험을 통해 측정된 평균풍압에 거스트계수를 곱하는 방법과 최대풍압계수를 면평균하여 산정하는 방법이 주로 사용되고 있다. 따라서 국내의 경우 풍동실험을 통해서 풍하중을 산정하는 일반적인 과정이 구조물의 설계대상이 되는 하중효과나 구조물의 동적특성을 충분히 반영하지 못하므로 인해서 경제적이면서 안전한 지붕 골조 설계용 풍하중을 산정하는데 경우에 따라서는 다소 불합리한 측면이 발생할 수도 있다. 본 기사에서는 기존에 주로 적용되어온 풍하중 산정기법에 대한 문제점을 살펴보고 이러한 문제점을 개선하기 위하여 새롭게 개발된 풍하중 산정기법을 소개하고자 한다.

2. 국내 대공간 지붕구조물의 건설현황

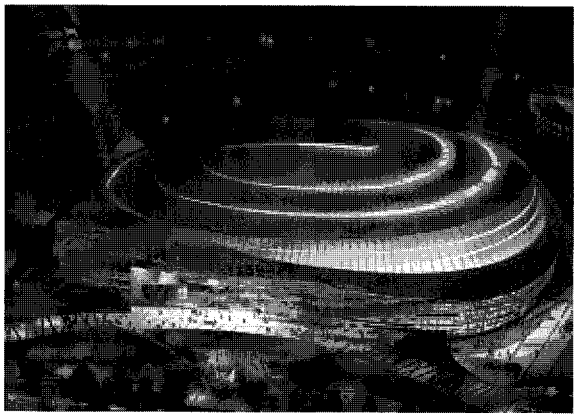
국내에서는 88올림픽을 계기로 체조경기장 등 많은 대공간 구조물이 건설되었으며, 더욱이 2002

* 정회원, (주) 대우건설 기술연구소 책임연구원, 건축구조기술사
** 정회원, (주) 대우건설 기술연구소 선임연구원
*** 고려대학교 건축공학과 교수

년 월드컵 개최에 발맞추어 많은 대공간 구조물이 건설되었다. 월드컵 경기장은 규모 자체만으로도 상징적인 면이 있지만, 지붕구조를 통해 상징성과 아름다움을 극대화할 수 있다. 이번 월드컵 경기장 건설에서도 월드컵이 개최되는 각 지방의 상징성을 반영한 지붕구조를 지니는 경기장이 건설되었다. 또한 현재에도 광명 경륜돔의 건설이 거의 완공단계에 있으며, 향후 잠실지역에도 돔구장의 건설이 계획 중에 있는 것으로 알고 있다.



(a) 서귀포월드컵 경기장



(b) 광명돔 경기장

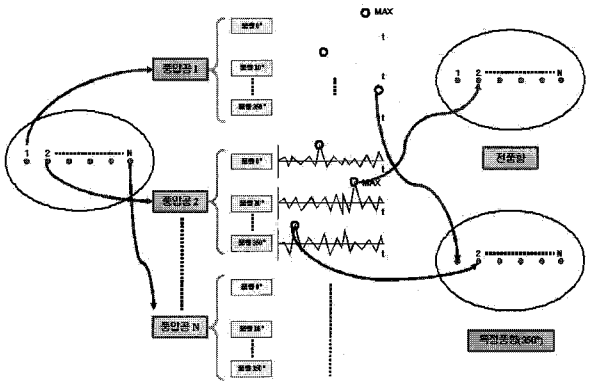
〈그림 1〉 대공간 구조물

월드컵 경기장에 대한 풍동실험보고서를 검토한 결과에 따르면 국내와 국외의 대공간구조물의 풍하중 산정법에는 상당한 차이가 있었으며, 국내의 경우에는 주로 외장재 설계용 풍하중 산정법과 유사한 최대풍압계수에 의해 골조용 풍하중을 산정하였다. 이러한 방법은 풍하중을 과대평가하면서도 풍하중과 골조의 거동에 대한 상관관계 및 골조의 동적거동을 고려하지 않았기 때문에 경우에 따라서 불합리한 하중이 산정되었을 수도 있다. 따라서 국가적 재산인 월드컵 경기장의 장기적인 유지관리와 보존을 위해서는 종래의 풍하중 산정법이 가지는 불합리성을 개선한 새로운 풍하중산정법에 따라 설계풍하중에 대한 재검토가 필요하다고 사료된다.

3. 기존 풍하중 산정법의 불합리성

자연풍은 시간적, 공간적으로 끊임없이 변동하고 있으므로 구조물에 가해지는 풍력의 평가는 이러한 사실을 반드시 고려해야한다. 특히 대스팬 지붕구조물의 경우는 구조물 자체가 공간적으로 큰 규모를 가지고 있고, 구조물의 경량화 및 이에 따른 풍진동 등의 영향이 커지게 되므로 규모효과 및 공진효과를 고려하여 설계해야 한다.

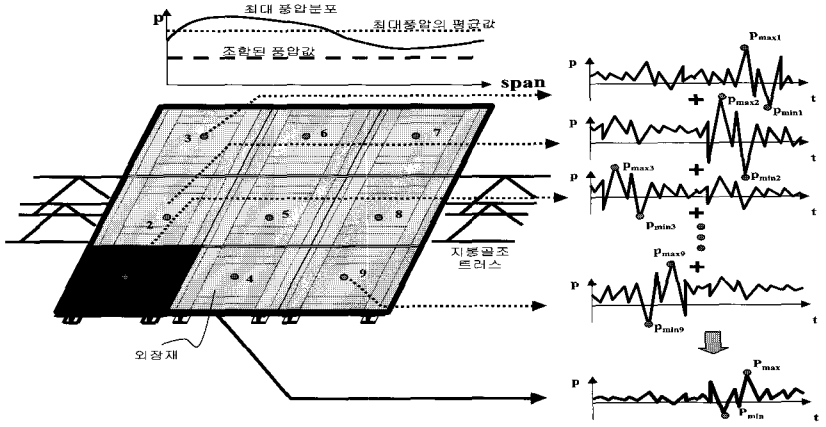
일반적으로 국내에서는 <그림 2>와 같이 주로 실험을 통해 지붕면에서 측정된 최대풍압의 면적가중치 평균값을 설계용 풍하중으로 사용한다.



〈그림 2〉 최대풍압계수에 의한 골조용 풍하중 평가

그러나 외장재와 달리 지붕골조트러스의 거동은 <그림 3>과 같이 한 지점의 국부적인 풍압에 의해 영향을 받는 것이 아니라 일정한 면적에 동시에 작용하는 풍압이 조합된 풍력에 의해 영향을 받는다.

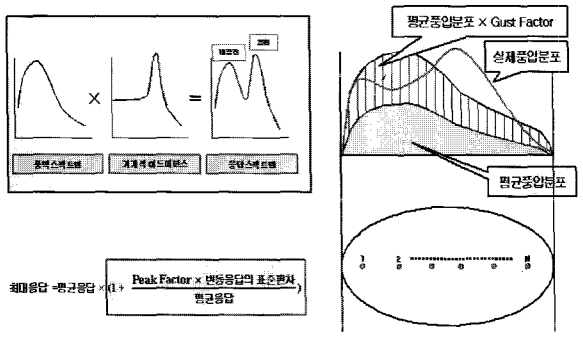
<그림 3>에서 각각의 외장재는 해당 면적에 작용하는 시간이력 풍압 데이터 중에서 최대 풍압값으로 설계된다. 그러나 지붕골조트러스를 기준으로 보면 각 해당면적에 작용하는 최대풍압이 골조의 전체 분담면적 내에서 동시에 발생하지 않으므로 각 면적에 작용하는 최대풍압을 평균하여 골조 설계에 반영할 경우 과대설계가 되는 경우가 발생할



〈그림 3〉 지붕골조에 대한 풍압의 영향

수 있다. 따라서 <그림 3>의 지붕 골조의 경우 9개의 면에 작용되는 풍압을 동시측정하고 이를 동일한 시간대에서 면적에 대한 가중치를 반영하여 조합된 풍압을 골조 설계에 반영하는 것이 보다 합리적일 것이다.

이와 함께 지붕골조용 풍하중에 적용되는 방법으로는 <그림 4>와 같이 지붕면의 평균풍하중에 거스트 계수(G)를 곱하는 방법이 있다. 거스트 계수는 최대응답에 대한 평균응답의 비로 산정되며, 거스트 계수로는 해석을 통해 산정된 값이 적용되거나 경험적인 값이 사용되기도 한다. 이 방법을 사용할 경우 풍력의 변동성분뿐만 아니라 유연한 지붕구조물일 경우 동적영향에 의한 추가적인 풍력(지붕의 진동에 의한 관성력)도 함께 고려할 수 있다. 그러나 이 방법은 지붕에 작용하는 변동풍력의 형상이 평균풍력의 형상과 동일하다는 가정 하에 이루어지는 것이므로 변동풍력에 의한 하중의 형상이 평균 풍하중과 일치하지 않는 경우 부적절한 형상의 지붕 골조용 풍하중이 산정될 수 있다.



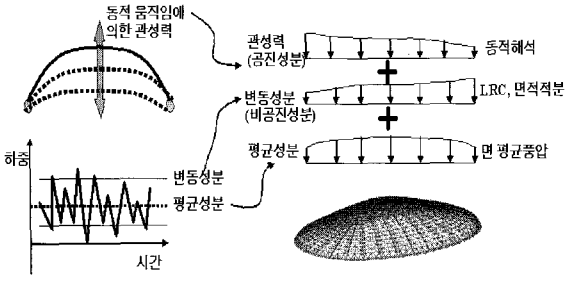
〈그림 4〉 거스트 계수를 이용한 지붕골조용 풍하중 산정

4. 최근의 풍하중산정 기술

최근에는 대공간 지붕구조물의 풍하중산정에 있어서 변동풍하중의 하중영향과 함께 구조물의 공진에 의한 추가적인 관성력을 고려하려는 연구를 수행하고 있다.

4.1 지붕골조용 풍하중의 구성성분

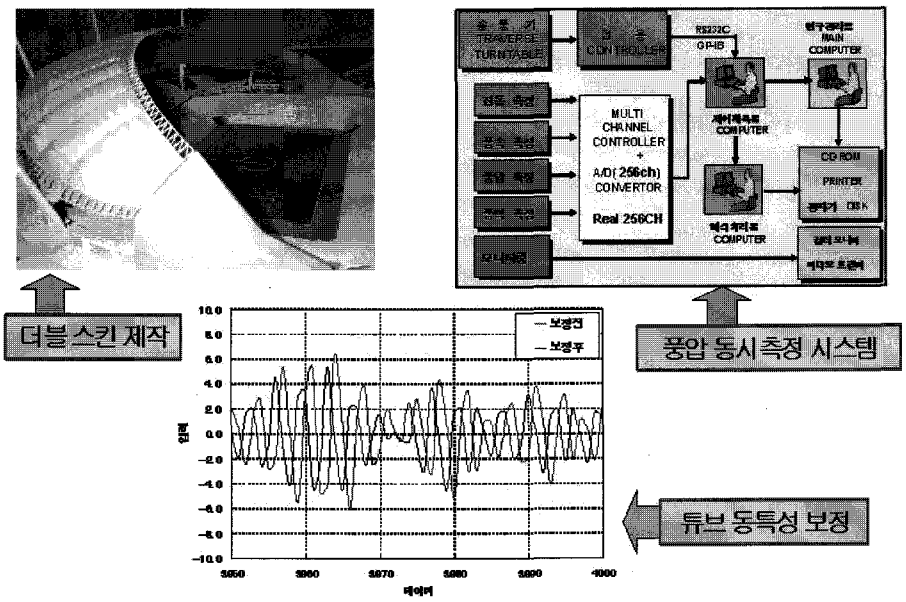
지붕골조용 풍하중은 <그림 5>과 같이 평균성분, 변동성분(비공진성분) 및 관성력(공진성분)으로 구성된다. 평균성분은 시간에 관계없이 일정하게 작용하는 하중성분이며, 변동성분은 풍속의 변동성분에 의해 시간에 따라 변화하는 하중성분이다. 그리고 관성력은 풍하중의 변동성분에 의해 발생하는 구조물의 진동에 의한 가속도가 질량에 작용하여 발생하는 하중성분이다.



〈그림 5〉 대공간 구조물의 지붕에 작용하는 풍하중의 구성성분

4.2 새로운 풍동실험 시스템

지붕골조용 풍하중을 평가하기 위해서는 다점풍압 동시측정 시스템과 튜브동특성 보정이 요구된다.



〈그림 6〉 대공간 지붕구조물 하중산정 시스템

<그림 6>과 같이 지붕면에 작용하는 풍압을 전 점에서 동시에 측정하여야 골조에 작용하는 하중의 동시성을 고려할 수 있다. 또한 모델에 설치된 풍압공은 비닐튜브를 통해 풍압센서와 연결되는데 이 때 비닐튜브의 동특성에 의해 풍압의 위상과 진폭이 변조된다. 따라서 이러한 비닐튜브의 동특성에 의해 변조된 풍압을 지붕면에서 측정된 원래의 값으로 보정하는 절차가 필요하다. 그리고 경우에 따라서는 <그림 6>의 모델과 같이 지붕의 일부가 개방되어 상·하면의 풍압을 동시에 측정하여야 할 경우가 발생하는데 이를 위해 상·하면 풍압을 동시에 측정할 수 있는 모델 제작기술이 요구된다.

4.3 하중 영향(Load Effect) 해석

대스팬 구조물의 설계 시 동일한 크기의 하중이라도 지붕에 작용하는 풍하중의 분포에 따라 지붕의 안전성에 영향을 미치는 정도가 달라질 수 있다. 따라서 지붕에 작용하는 풍하중의 하중영향(E, Load Effect)을 평가하여 골조용 설계하중을 산정하는 것이 필요하다. <그림 7>과 같은 캔틸레버 지붕일 경우 골조 설계에 가장 중요한 하중영향은 고정단의 모멘트가 된다. 각 풍압공의 풍하중이 하중영향인 고정단 모멘트에 기여하는 정도를 영향계수(C)라고 하면 <그림 7>의 캔틸레버 지붕에 작용하는 하중영향(E_M, 단부모멘트)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_M = \frac{BL}{4} \sum_{i=1}^{4} (C_i P_i(t)) \quad (1)$$

여기에서

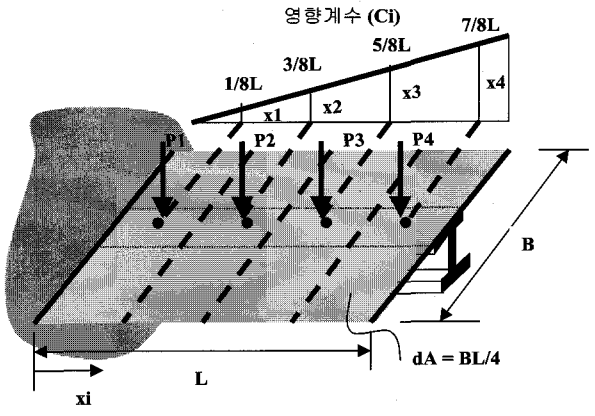
$C_i = \frac{2i-1}{8}$, (영향계수)

$B =$ 지붕의 단위 폭

$L =$ 지붕의 길이

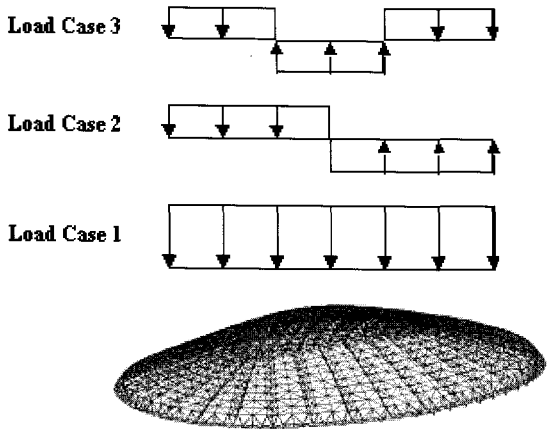
$P_i(t) =$ 단위면적 내의 풍압시간이력

이다.



〈그림 7〉 캔틸레버 지붕의 하중영향(Load Effect) 평가

이러한 풍하중과 구조물의 상호관계를 반영한 영향계수에 의해 <그림 8>과 같이 합리적인 설계하중이 산정될 수 있다.



〈그림 8〉 하중영향 평가에 의한 Load Case

4.4 LRC 법(Load-Response Correlation Method)

LRC 법은 하중영향해석에 기초한 방법으로서 구조물의 응답과 하중의 상관관계에 대한 평가를 통해 풍력의 평균성분과 비공진 성분을 산정하는 기법이다. <그림 9>와 같이 지붕구조물에 작용하는 풍압을 실험을 통해 측정하고 각각의 풍압을 임의의 응답에 대한 상관계수와 조합하여 지붕면에 작용하는 풍하중을 산정하게 된다.

LRC 법을 사용하게 되면 구조물의 임의의 하중영향(최대처짐, 최대응력, 최대 모멘트 등)에 대한 풍하중을 산정할 수 있다. 그러나 LRC 법은 공진의 영향이 큰 지붕구조물에 대해서는 공진성분의 풍하중 요소를 별도로 고려하여야 한다.

4.5 CS 법(Conditional Sampling Method)

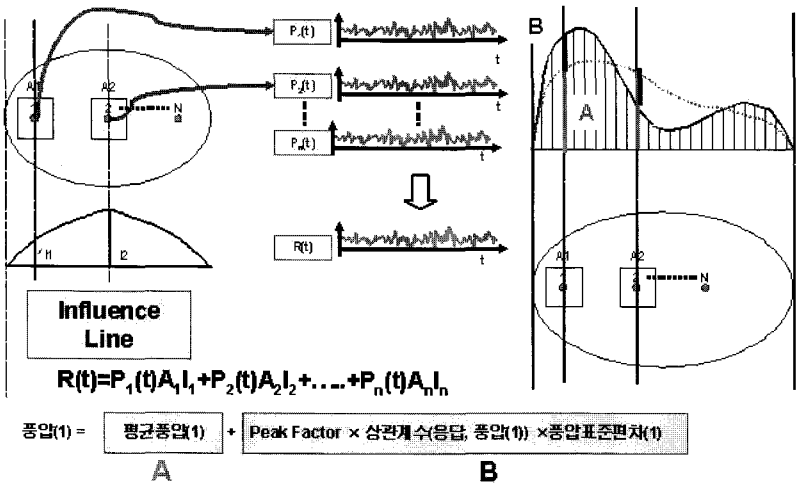
CS 법은 하중영향평가 또는 LRC 해석을 통해 얻어진 시간이력응답 중에서 최대의 응답이 발생한 시간대에 지붕전면에 가해진 풍압분포로부터 설계용 풍하중을 산정하는 방법이다. 이 방법 역시 임의의 하중영향에 대한 설계용 풍하중 조합을 산정할 수 있으나, 공진성분의 풍하중은 별도로 고려하여야 한다. 그리고 정상과정인 불규칙 변동의 최대값을 직접 선택하게 되므로 설계용 하중을 도출하기 위해서는 수회의 샘플에 대한 평균화가 요구된다.

4.6 DAF 법(Dynamic Amplification Factor Method)

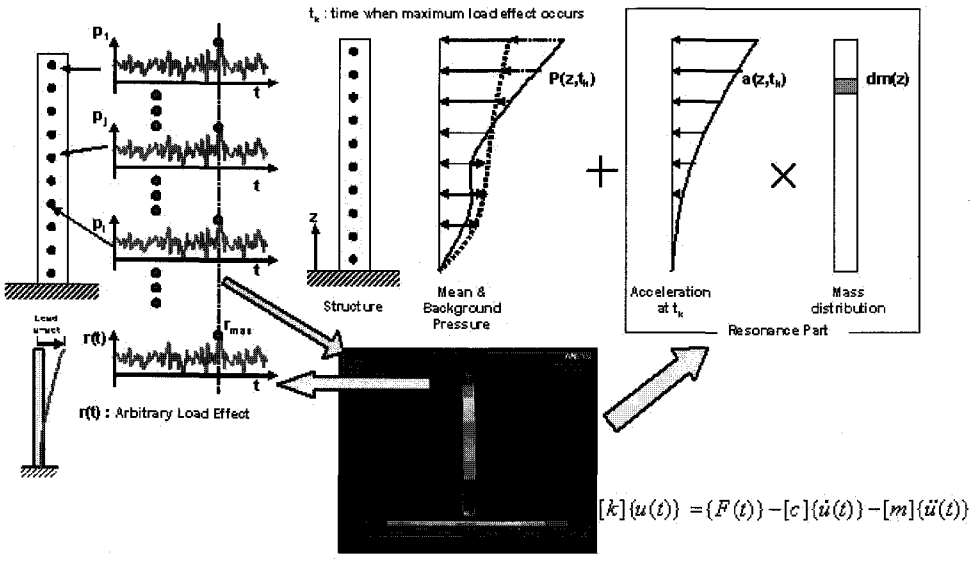
하중영향평가를 통해 지붕골조에 작용하는 평균성분 및 비공진 성분의 풍하중을 구하고 식 (2)와 같이 비공진성분 풍하중에 대한 공진성분 풍하중의 증폭비를 구하여 설계용 풍하중을 산정하는 방법이다.

$$DAF = \frac{\sigma_{bk} + \sigma_r}{\sigma_{bk}} \qquad (2)$$

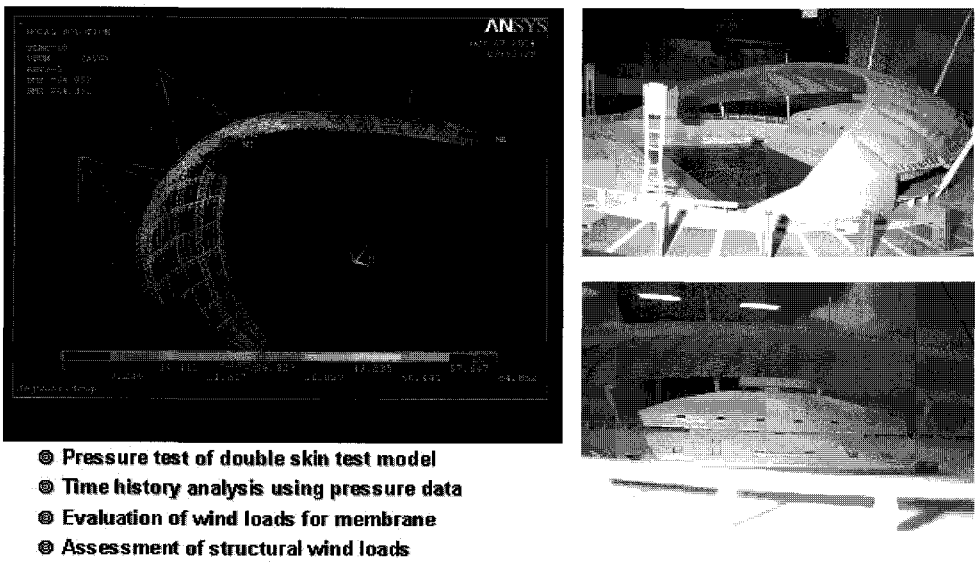
여기에서, σ_{bk}는 비공진 응답의 표준편차이며, σ_r은 공진 응답의 표준편차이다. 이 방법은 풍하중과



〈그림 9〉 LRC법에 의한 지붕구조물의 풍하중산정



〈그림 10〉 ACS법의 개요



〈그림 11〉 서귀포월드컵 경기장의 내풍설계

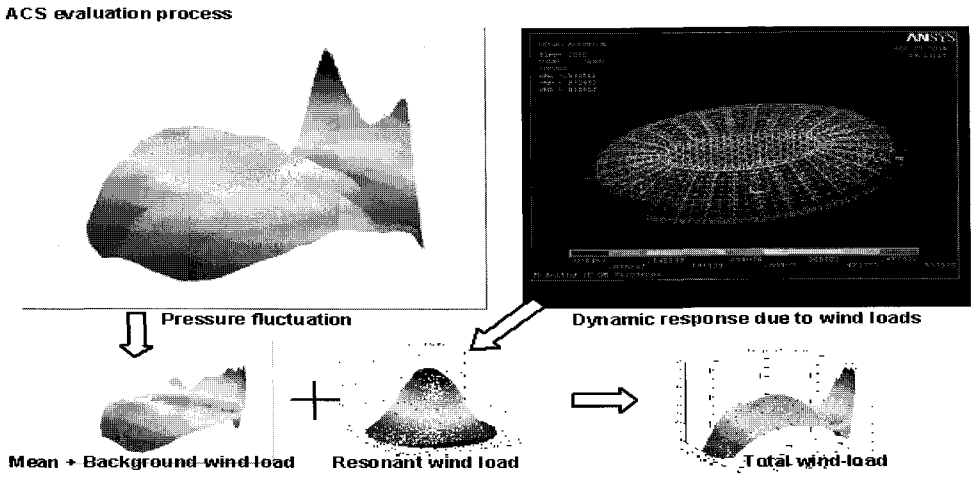
공진이 발생하는 유연한 구조물에 적용할 수 있는 방법이지만 하중과 응답의 상관관계에 대한 평가가 불명확한 측면이 있다.

5. 새로운 풍하중 산정법 개발

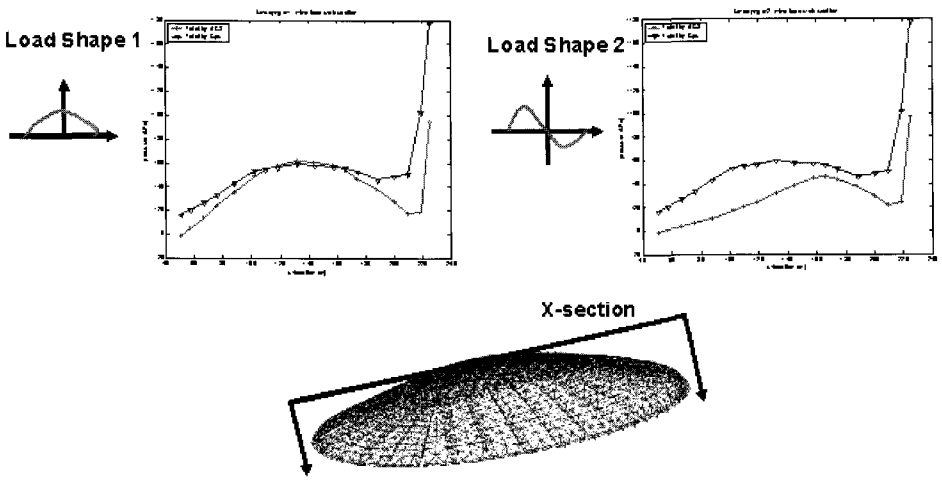
최근 대공간 지붕의 골조설계용 풍하중 산정 시 적용되고 있는 기술의 문제점을 해결하기 위하여 새로운 풍하중 산정법인 ACS법(Advanced Conditional Sampling Methdod)을 개발하였으며, 이에 대한 기술개발 내용을 기술하면 다음과 같다.

5.1 ACS법의 개요

<그림 10>에서처럼 4.2절의 새로운 풍동실험시스템을 이용하여 풍압실험을 통해 구한 풍압의 시간이력데이터를 FEM 모델에 직접 하중으로 적용하여 동적시간이력해석을 수행함으로써 하중효과(Load Effect)의 시간이력데이터를 구하고, 하중효과가 최대인 순간의 풍압분포 및 구조물의 관성력을 구하여 최종적으로 풍하중을 산정하게 된다. 이 방법은 지금까지 개발된 방법과 비교하여 임의의 하중영향에 대하여 가장 정확한 설계용



〈그림 12〉 광명돔 경기장 내풍설계



〈그림 13〉 기존방법과 ACS법으로 산정된 풍하중 분포의 비교

등가정적하중을 산출할 수 있으며, 하중평가와 동시에 응답의 평가가 이루어질 수 있다.

5.2 ACS법의 적용

5.2.1 서귀포월드컵 경기장

태풍피해로 인한 서귀포월드컵 경기장의 보수공사를 위해 지붕구조물의 구조시스템이 변경되었고 이에 따라 지붕구조물의 풍하중의 산정 및 풍하중에 대한 구조물의 거동평가가 ACS법을 적용하여 <그림 11>에서처럼 수행되었다.

5.2.2 광명돔 경기장

현재 거의 완공단계인 광명돔 경기장의 지붕구조물의 내풍설계를 위해 <그림 12>에서처럼 ACS법을 적용하여 하중평가 및 구조물의 거동평가를 수행함으로써 가장 경제적이면서도 안전한 내풍설계를 수행할 수 있었다.

<그림 13>에서 알 수 있는 것처럼 각각의 하중 CASE에 대하여 기존의 방법으로 산정된 하중 값과 ACS법으로 산정된 하중은 하중의 분포 및 크기에서 큰 차이가 있는 것을 알 수 있다.

6. 결론

초고층 건물의 풍하중 산정에 대해서는 국내에서도 많은 연구와 적용이 이루어져 어느 정도 평가기법이 확립된 상태이다. 그러나 대공간 지붕구조물에 대한 풍하중 산정기법은 최근에 실무에서 많

은 요구가 발생하면서 관심이 증가되고 있는 상황이지만 일반화된 절차가 정립되어 있지 않다. 특히, 풍동실험보고서 검토결과 월드컵 경기장의 지붕구조물에 대한 풍하중 산정의 경우 초기 단계의 산정기법이 적용되어 경우에 따라서는 다소 불합리한 풍하중이 산정된 경우도 있을 것으로 추정된다.

국외의 경우 지붕골조의 하중 구성 성분을 구분하고 구조물과 풍하중의 상관관계 및 풍하중 자체의 고유특성을 반영하여 풍하중을 산정하고 있다. 국내에서는 최대풍압을 이용하거나 평균풍력에 거스트계수를 적용하여 풍하중을 산정하는 방법을 주로 사용하고 있으나 이러한 방법은 구조물의 거동과 지붕면에 작용하는 풍하중의 특성을 제대로 반영할 수 없으므로 과대하면서도 구조적 안정성에 불리한 풍하중을 산정할 가능성도 있다.

따라서 국내에서도 현재의 기술동향을 바탕으로 국내여건에 부합되는 대공간 지붕구조물의 풍하중 산정기술을 정립하는 것이 필요하다고 사료된다. 이를 위해 본 기사에서 소개된 ACS법과 같은 고급 내풍설계기술을 보다 많이 실무에 적용하고 그 결과를 피드백시켜서 보다 실용적인 방법으로 일반화하기 위해 추가적인 기술개발이 추진되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. H. Liu, Wind Engineering, Prentice Hall, 1991.
2. J. E. Cermak, etc, Wind Tunnel Studies of Buidings and Structures, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 67, ASCE, 1999.
3. J.D. Holmes, 'Effective Static Load Distribution in Wind Engineering', Journal of Wind Engineering and Indstrial Aerodynamics, 90(2002), 91-109
4. 川村純夫, 建築風工學. 技報堂出版, 1997.
5. 김영문, 윤성원, 정영배, 건축물의 내풍설계, 한림원, 2002.
6. 日本建築センタ, 實務者ための建築物風洞實驗ガイドブック, 日本建築センタ, 平成 6
7. 김대영, 김지영, 김한영, 이명호, 김상대, 대스팬 지붕구조물의 바람에 의한 동적거동을 고려한 풍하중 평가에 관한 연구/제7분과: 구조Ⅱ,대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집(구조계), (2004-04)
8. 김대영, 김지영, 이명호, 김한영, 김상대, 대스팬 지붕구조물의 등가정적 풍하중 산정에 관한 연구, 한국쉘공간구조공학회 춘계학술발표대회 논문집, (2004-05)