

동적하중과 정적하중을 이용한 막구조의 거스트 계수 산출 방법

The method using dynamic load and static load figures out gust factor of the membrane structure

왕 본 강* 정 재 용** 유 기 표*** 김 영 문****
Wang, Ben-gang Jeong, Jae-yong You, Ki-Pyo Kim, Young-Moon

요 약

본 논문은 풍동실험과 정적하중 실험을 실시하여 강풍 설계시 대공간 구조물의 막구조 동적응답을 확인하여 거스트 계수(gust factor)를 산출해 보고자한다. 이를 위해 섬유재료의 변형률에 따라 하중을 구할 수 있는 막재료 성능실험과 4가지(saddle형, wave형, arch형, point형) 막구조 모형에 따른 횡방향 동적하중과 동적변형응답을 측정할 수 있는 풍동실험, 동적변형응답에 따라 정적하중을 구할 수 있는 정적하중실험을 실시함으로써 거스트 계수(gust factor)를 산출하였다.

Abstract

The thesis is for gust factor needing when calculate the wind resistance design. For the gust factor, to the membrane structural model, carry through the wind tunnel test and the static load test. Therefore, at first through the tensile test of the fabric material, designate the material of the membrane structural model. Then, to saddle, wave, arch and point four kinds of basic shape membrane structural models, carry on the wind tunnel test, determine their dynamic load and distortion on lateral direction. Finally, according to distort situation of the membrane structure in the wind tunnel test, carry on the static load experiment outside of the wind tunnel, calculate static load which corresponding with distort. According to dynamic load and the static load, figure out gust factor of these kinds of basic membrane structure.

키워드 : 거스트 계수, 변형률, 횡 방향, 동적 하중, 정적 하중

Keywords : gust factor, Strain, lateral direction, dynamic load, static load

1. 서론

자연계 바람은 시간적, 공간적으로 끊임없이 변동하고 있으므로 구조물에 가해지는 풍하중의 평가는 이러한 사실을 반드시 고려하여야한다. 특히 대공간 막구조물의 경우는 구조물 자체가 공간적으로 큰 규모를 가지고 있고, 막구조의 유연성과 경량성에 따른 풍하중 등의 영향이 커지게 되므로 설계시 풍하중을 중심으로 고려하여야 한다. 초고층 건물과 달리 대공간 막구조물에 작용하는 설계용 풍하중을 산정하기

위하여 국내외에서 풍동실험한 풍압값을 이용한다. 측정된 평균풍압에 거스트 계수를 곱하는 방법과 최대풍압계수를 면에 대해서 평균하여 산정하는 방법이 주로 사용되고 있다. 하지만 막구조의 거스트 계수의 산정에 대한 이론연구와 실제공정상의 연구는 지금까지 적절한 연구방법이 미비하다. 본 연구에서는 4가지(saddle형, point형, wave형 arch형) 막구조 기본형태를 가지고 풍동내 동적 횡 하중과 정적하중을 이용하여 막구조의 거스트 계수(Gust factor) 산출 방법을 제안하고 대공간 막구조의 강풍설계 시 거스트 계수 산정을 위한 한 방법을 제공하고자 한다.

2. 모형제작 및 섬유실험

본 실험은 그림 1과 같이 가장 기본적인 4 가

* 학생회원, 전북대학교 건축도시공학과 박사과정

Tel: 063-270-2279 Fax:063-270-2285

E-mail : happyfreely@chonbuk.co.kr

** 학생회원, 전북대학교 건축도시공학과 석사과정

*** 정회원, 전북대학교 건축도시공학과 조교수 공학박사

**** 정회원, 전북대학교 건축도시공학과 교수 공학박사

지 (saddle형, point형, wave형 arch형) 형태의 막 구조물의 모형에 대하여 실험을 실시하였다. 우선 막구조 모형제작하기 전에 비교적 적당한 섬유 재료를 선택 하여야한다. 선택 될 재료는 양쪽 방향에 대해서 비교 근사적으로 동등하게 선형 식으로 탄력(변형)이 있어야 한다. 그래서 모형을 제작하기 전에 섬유재료의 탄성계수의 실험이 필요하다. 이런 테스트를 통해서 실제 막재료와 비교하여 나중에 적절한 탄성축척을 확인 할 수 있다. 섬유재료의 변형을 통해 변형률과 응력을 구하여 탄성계수를 구하였다. 사진 1은 섬유재료의 탄성계수측정 실험하는 모습을 나타내고 있다. 실험을 통하여 측정된 섬유재료의 변형률, 응력, 탄성계수를 표1에 나타내었으며, 응력-변형률 곡선을 그림 2에 나타내었다.

응력 변형률 그래프를 살펴보면 응력과 변형률 근사적으로 선형관계가 성립된다. 따라서 섬유재

	무게	변형된	변형된	평균 변형된 길이	변형률	응력	탄성계수
		길이	길이				
	P(g)	dL1	dL2	dL	dL/L	σ (Pa)	
1	453.6	6.2	6.3	6.25	0.0543	194.47	3.578
2	680.4	8.9	9	8.95	0.0778	291.71	3.748
3	907.2	11.4	11.7	11.55	0.1004	388.95	3.873
4	1134	14.3	13.9	14.1	0.1226	486.18	3.965
5	1360.8	16.5	16.3	16.4	0.1426	583.42	4.091
6	1587.6	18.3	18	18.15	0.1578	680.66	4.313
					평균	탄성계수	3.928

표 1. 섬유의 응력 변형률 테스트

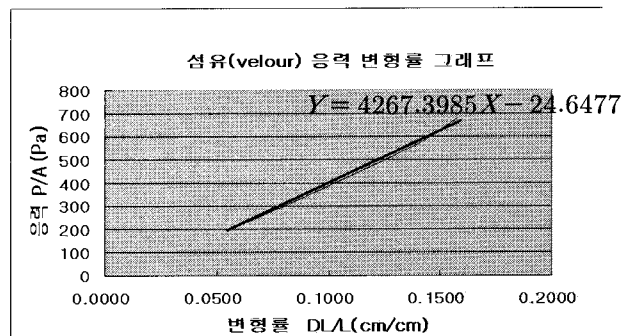


그림 2. 섬유응력 변형률

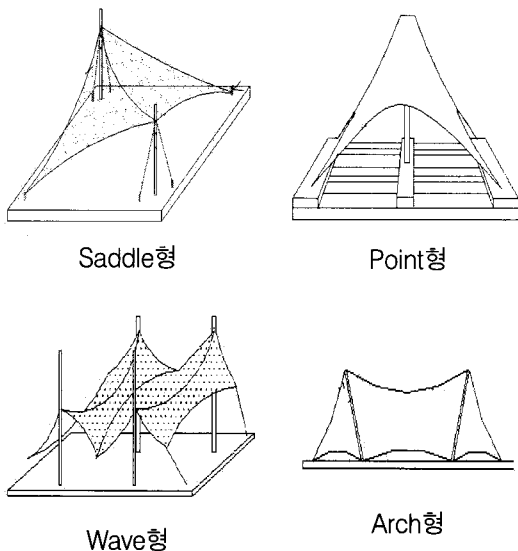


그림 1. 4 가지 형태의 막구조 기본 모형

료 하중을 받을 때 생기는 변형에 따라 변형률을 구 할 수 있고 표1 과 그림2 를 이용하며 응력을 산정할 수 있다. 응력을 알면 면적을 이용하여 받던 하중을 구 할 수 있다.

실험모형 제작에 있어서 우선 섬유재료에 대하여 가로와 세로가 25×25mm인 격자 눈금을 그린 후 모형제작을 하였다. 이렇게 모형제작 되면 이는 모형제작된 섬유재료에 대하여 하중을 받을 때 섬유에 각각 사각형 격자를 통하여 늘어난 길이(변형)를 쉽게 눈으로 확인 할 수 있다. 섬유의 응력 변형률 그래프에 따라 제작된 모형의 응력을 측정하여 섬유재료의 동적 횡 하중과 정적하중을 구하였다.

3. 동적하중과 정적하중실험

3.1 풍동내 모형의 동적응답

풍동내 실험테이블 위에 섬유로 제작된 Saddle형, Point형, Wave형, Arch형 4가지 형태의 모형

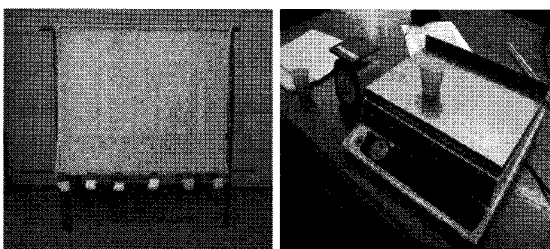
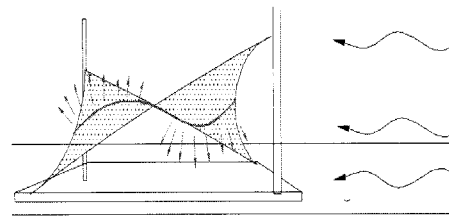


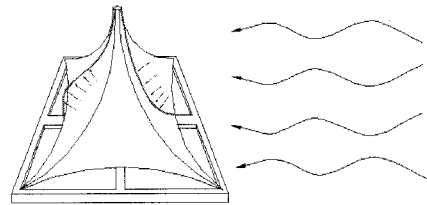
사진1 (a)

사진1 (b)

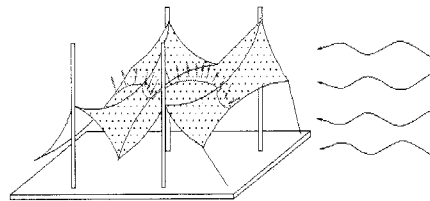
을 각각 설치하여 바람을 4.5m/s, 6.7m/s, 7.6m/s 풍속으로 설정하여 모형의 횡 방향에 대하여 동적실험을 실시하였다. 실험 모형의 동적 응답의 모습을 캠코더로 동영상상을 기록하였다. 실험 동영상상을 30초 간격으로 샘플링을 하며 각각의 모형의 동적응답을 관찰하면서 분석하였다. 그러나 동적응답실험을 통한 막구조 고유진동수를 측정하기에는 다소 문제가 있다. 그 이유는 형태가 달라 막구조물에 똑같은 풍속으로 측정해도 흔들거리는 회수가 다르기 때문이다. 또는 막재료가 한 탄성재료라서 바람이 불어올 때 풍속이 증가함에 따라 막재료의 표면의 팽압이 증가하여 막의 변형이 유발되며 변형이 증가함에 따라 진동수가 떨어진다. 또한 모형실험은 풍속이 증가함에 따라 막의 진동수가 증가하며 변형(진폭)의 일정한 정도로 떨어진다. 막재료의 이런 탄성성질 때문에 이런 응답거동이 이루어진다. 따라서 관찰방법으로 막구조의 고유진동수를 추산할 수 없다. 그림3 에 풍동내 4 가지 형태의 섬유모형의 동적응답 모습을 관찰한 동적응답거동의 모습을 나타내고 있다.



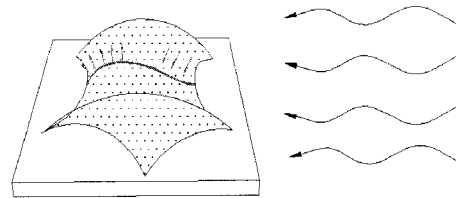
풍동내 Saddle형 모형 동적응답 모습



풍동내 Point형 모형 동적응답 모습



풍동내 Wave형 모형 동적응답 모습



풍동내 Arch형 모형 동적응답 모습

그림 3. 풍동내 막구조 모형 동적응답 모습

3.2 동적 횡 하중실험

3.2.1 거스트 계수(Gust factor)

거스트 계수(Gust factor)는 바람이 불때 바람의 난류와 상호 작용을 하는 구조물의 하중 증폭이 원인이 되는 동적응답계수이다. 강풍설계시 일반적인 풍하중은 동적하중의 등가정적하중으로써 정적하중으로 전환시킨다. 전환시킬 때 등가정적하중에 거스트 계수 곱하여야한다. 이 연구에서 거스트 계수는 정적하중에 대한 동적하중의 비이며 식(1)과 같이 나타내었다. 이 연구에서 등가정적하중에 대한 섬유재료의 변형과 풍동내 동적 횡 하중실험에 대한 섬유진동의 진폭(변형)을 똑 같이 하여 실험을 진행하였다.

$$G = F_y / F_s \quad (1)$$

여기서: F_y : 동적하중

F_s : 정적하중

3.2.2 고무줄 실험

풍동내 동적 횡 하중실험은 고무줄을 사용해서 섬유재료로 제작된 막구조의 횡방향 동적풍하중을 측정하는 실험이다. 우선 고무줄의 탄성계수 실험을 실시한다. 고무줄의 한쪽방향은 지지대에 잘 고정시키고 다른 한쪽방향에 저울추를 걸어서 저울추 무게가 증가할 때마다 고무줄이 얼마나 늘어나는지를 측정한다. 이렇게 하여 고무줄의 늘어난 길이에 따라 고무줄의 변형률을 구하였다. 또한 고무줄 단면적(A)과 저울추의 중량(m)에 따라 응력을 구하였다. ($\sigma = F/A$, $F = mg$). 변형률과 응력에 따라 탄성계수(E)를 구할 수 있다. ($E = \sigma/\epsilon$). 다음 고무줄의 변형률, 응력, 탄성계수가 표 2 와 같이 나타내었으

며, 응력 변형률의 그래프와 관계식은 그림 4 와 같이 나타내었다. 고무줄의 응력과 변형률이 근사적인 선형관계를 확인 할 수 있다.

무게 (g)	dL (cm)	dL/L	σ (MPa)	E 탄성계수
		변형률	응력	
226.8	2.7	0.27	0.2778	1.029
340.2	6	0.59	0.4164	0.706
453.6	9.5	0.94	0.5557	0.591
567	13	1.28	0.695	0.542
680.4	18	1.77	0.8336	0.471
			탄성계수	0.6678

표 2. 고무줄의 응력 변형률 테스트

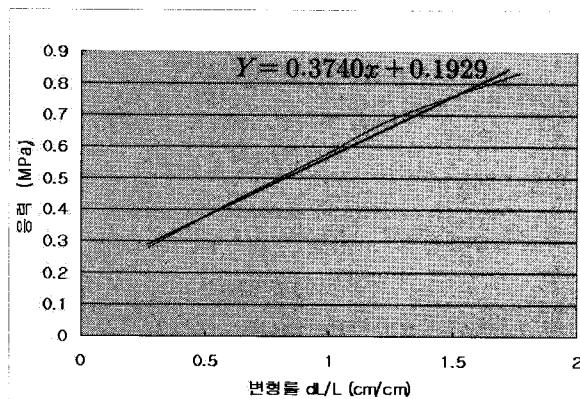


그림 4. 고무 줄의 응력 변형률 그래프

3.2.3 동적 횡 하중실험

풍동내에서 각 모형은 밑판에 바퀴를 달고 매끄러운 실험테이블 위에 설치하였다. 그리고 모형의 기초(base)판은 고무줄로 풍동내 바람이 불어오는 방향에 대하여 한 점과 연결하였다. 그림 5는 풍동내 동적 횡 하중실험을 하기 위해 설치된 모습을 나타내고 있다. 동적 횡 하중을 측정 시 먼저 각각의 모형의 섬유가 없이 기초(base)판만 설치하여 실험을 실시하고 다음에 섬유재료 모형을 체계대로 설치하며 동적 횡 하중실험을 실시하였다. 모형기초판에 대해 늘어난 고무줄 길이(변위Base)와 섬유재료로 제작된 막구조 모형전체에 대하여 늘어난 고무줄의 길이(변위Model)를 확인 하였다. 실제적인 동적 횡 하중실험에서는 섬유재료에 따른 고무줄의 늘어난 길이를 얻어야 한다. 즉, 식(2)

와 같이 늘어난 길이(변위Model)에 기본길이(변위Base)를 빼어 계산하였다.

$$\text{변위(Net)} = \text{변위(Model)} - \text{변위(Base)} \quad (2)$$

섬유재료로 제작된 막구조 모형은 풍동내 횡방향에 따라 동적하중을 고무줄의 응력과 변형률 그래프에 의하여 구하였다. 풍속 V=7.6m/s 측정된 동적 횡 하중은 다음 표3 과 같이 구하였다.

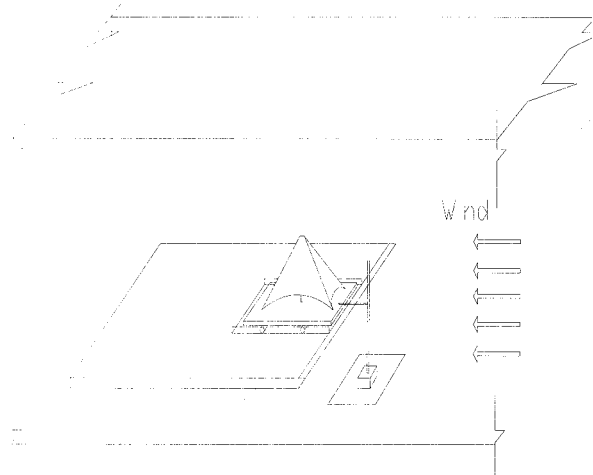


그림 5. 풍동내 동적 횡 하중실험 모형 설치한 모습

모형	변위 (model)	변위 (Base)	변위 (Net)	동적 횡 하중
	mm	mm	mm	g
saddle	11.5	4.5	7	176.9
point	9	4.5	4.5	169.96
wave	9	4.5	4.5	169.96
arch	6	2.5	3.5	167.18

표 3. 풍속 V=7.6m/s 때 동적 횡 하중

3.3 등가 정적 하중 실험

풍동 바깥에 실험용 프레임에서 모형에 설치해 놓은 다음에 낚시 줄로 한 쪽에 섬유표면에 균등하게 연결하여 한 쪽에 종이컵 안에 무게를 넣어 걸어 놓았다. 사진2는 풍동밖에 프레임에 설치된 모습을 나타내고 있다. 전에 풍동내 동적하중응답을 통하여 섬유모형표면에 확인 되어진 변형과 정적하중에 섬유표면이 생기는 변형을 똑같이 맞출 때 정적하중을 측정 할 수 있다. 정적하중실험은 2

가지 형식으로 실험을 실시하였으며. 실험 1은 단지 Saddle형 모형과 Wave형 모형에 대해서 실험을 실시한다. 실험 2는 4가지 모형에 대해서 실험을 실시한다. 실험 1과 실험 2를 통하여 정적하중을 측정한다. 실험 1과 실험 2 설치한 모습을 그림6(a),(b)와 같이 나타내고 있다.

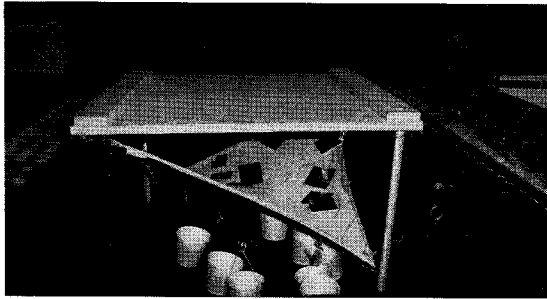


사진2 모형 풍동 밖에 프레임에 설치한 모습

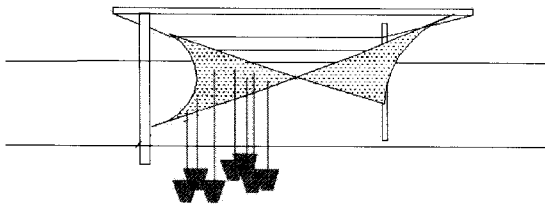


그림 6 (a). 섬유모형에 정적 하중 실험 1

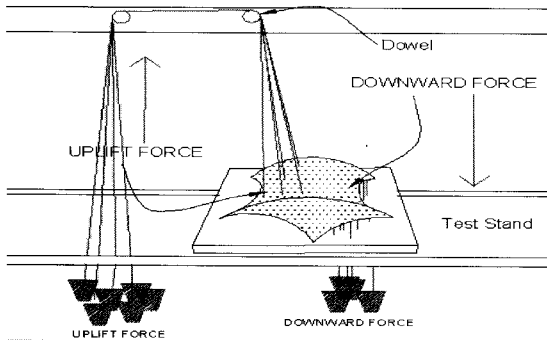


그림 6 (b). 섬유모형에 정적 하중 실험 2

정적 하중실험을 통하여 정적 하중을 구한 후 앞에 구했던 동적 횡 하중과 식(1)에 따라 거스트 계수(Gust factor)를 구할 수 있다. 정적하중과 거스트 계수를 표 4에 나타내고 있다.

본 연구에 산출된 평균 거스트 계수가 풍동내 노풍도구분 없이, 바람의 층류(laminar flow) 상태에 측정하는 것이다. 실제 자연풍의 난류를 고려하여야 한다. 그래서 이 거스트 계수에 수정계수를 곱하여야 한다.

ACSE 7-02에 따라 노풍도 구분B 상황에 수정계수 0.8을 선정하고 노풍도 구분C, D상황에는 수정계수 0.85를 선정한다. 수정계수 큰 경우를 선택하여 노풍도 구분에 있어서 더 적용하여 0.85를 선택한다. 이에 따라 최종 산출되어진 근사 값의 거스트 계수는 1.4이다.

모형	프리스트레스 kPa	동적 횡 하중 g	정적 하중 g	거스트 계수
Saddle	1.93	176.90	103.45	1.71
Point	1.93	169.96	104.91	1.62
Wave	1.93	169.96	107.57	1.58
Arch	1.93	167.18	109.99	1.52
평균거스트 계수				1.61

표 4. 거스트 계수 (Gust factor) 산출

4. 결론

동적 횡 하중과 정적하중을 이용한 막구조물의 거스트 계수를 산출하여 다음과 같은 연구결과를 얻었다.

- (1) 풍동내 막구조 모형에 대해 동적응답실험을 통하여 막구조 동적응답모습을 확인하였다. 막구조재료 유연한 탄성재료 때문에 같은 형태의 모형이 풍속에 따라 진동수와 진폭이 다르다.
- (2) 풍속이 증가함에 따라 풍압이 증가하고, 이는 변형이 증가함을 유발한다. 변형이 증가함에 따라 막구조물의 진동수가 감소한다. 그래서 고유진동수를 풍동내 정확하게 관측 할 수 없었다.

(3) 4가지 형태 막구조모형 동적실험을 통해서 Saddle형 모형은 동적하중에 대한 동적응답이 나머지 3가지 형태 막구조 모형 보다 훨씬 더 크게 보인다.

(4) 동적하중과 정적하중을 이용한 Saddle형, Point형, Wave형, Arch형 4가지 기본 형태의 막구조의 평균 거스트 계수는 1.4를 얻었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호#06 R&D B03)에 의해 수행되었습니다)

참고문헌

1. Huntington, C.2003. The Tensioned Fabric Roof; ACSE Publications
2. Isyumov, N. ed. 1999. Wind Tunnel Studies of Buildings and Structures. American society of Civil Engineers Publication
3. Koch, K. M. 2004. Membrane Structures. Prestel
4. Leonaed, W. J. 1998. Tension Structures: Behavior and Analysis. New York: McGraw-Hill Inc.
5. Liu, H. 1991. Wind Engineering: a Handbook for Structural Engineers. Englewood Cliffs, N. J. : Prentice Hall
6. Matthews, L 2005. Numerical modeling of separated fluid flow over flexible structural membranes. Department of Architecture and Civil engineering
7. Mehta, K, Delahay, J. 2004. Guide to the Use of the Wind load provisions of ASCE7-02, ASCE Press
8. Schierle, G. G. Rau, S. 1995. Vernacular Forms: Wind Tunnel Tests and Computer Simulation.
9. Selection of Local peak pressure coefficient for wind tunnel studies of buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 13: p.477-488
10. Schierle, G. G. 1986. Design Consideration for Lightweight Structures. Proceedings, International Symposium Lightweight Structures in Architecture (LSA 86), Sydney
11. Schierle, G. G. 1997. Inter-disciplinary Design Optimization : A Search Method. Journal for Optimization Theory and Application, September 1997
12. Scheuermann, R. Boxer, K.1996. Tensile Architecture in the Urban Context. Bath Press Colourbooks, Glasgow
13. 김영문 역 「실무자를 위한 건축물 풍동실험 가이드북」, 한국풍공학회, 1998
14. 김영문 외 2인 역, 「건축물의 내풍설계」, 한림원, 2002