한국전산구조공학회
1998년도 봄학술발표회 논문집

입체요소를 이용한 현수교 주단강품의 유한요소해석 : 스트랜드슈와 행어소켓

FE Analysis of Forged Parts of Suspension Bridge : cases of Strand Shoe and Hanger Socket

최 창 근* 이 태 열** 노 혁 천** 김 재 철***
Choi, Chang-Koon Lee, Tae-Yeol Noh, Hyuk-Chun Kim, Jae-Cheol

ABSTRACT

In suspension bridges, the axial forces in the wires are transferred by side pressure on the semicircular face, and further from the strand shoe through rods to a base plate fixed to the massive concrete part of the anchor block. For prefabricated strands the most common way of anchoring is by socketing the ends of the strands. In this study, strand shoe and hanger socket are analyzed for various load conditions using Finite Element Method. The finite element models are built using MSC/PATRAN and analysis is carried out using MSC/NASTRAN. Results are again completely processed using MSC/PATRAN. From the results of the analysis, trends of deformation and stress distribution are reviewed and important factors to consider in the design of strand shoe and hanger socket are discussed.

1. 서 론

케이블은 현수교의 가장 중요한 구조요소로 현수구조 부분의 사하중 전부와 활하중의 대부분을 지지하는 역할을 한다. 현수교에서는 케이블이 주부재이므로 이 연결을 합리적으로 설계하는 것이 중요한 관건이 된다. 이러한 연결부를 설계함에 있어 일반적으로 관용법에 의한 설계를 하게 되는데 이는 응력집중과 같은 국부적 거동(local behavior)을 고려하기에 어려움이 있다. 유한요소법은 이러한 문제점을 극복하여 보다 정확한 해석 결과를 산출할 수 있는 효율적인 방법으로써 인식되어 왔으며 많은 연구자들에 의해 다양한 형태의 해석기법과 이를 위한 요소개발이 수행되어 왔다.

본 연구에서는 현수교의 주요 부재인 스트랜드슈(strand shoe) 및 행어소켓(hanger socket)에 대한 정밀한 유한요소해석을 수행하였다. 전·후처리기로는 MSC/PATRAN 소프트웨어를 사용하였고 해석은 MSC/NASTRAN 을 통하여 수행하였다.

2. 스트랜드슈와 행어소켓

스트랜드슈와 행어소켓은 케이블을 연결하는 부재 중 하나이다. 그림 1은 현수교 시스템의 앵커부를 표시한 그림이다. 주케이블은 여러가닥의 소선으로 구성되어 있으며 소선의 장력은 측압에 의해 스트랜드슈의 반원상(半圓狀)의 표면으로 전달되고, 다시 앵커 볼트에 전달된다.

* 한국과학기술원 토목공학과 교수
** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정
*** 한국중공업 기술연구원 구조강도연구팀

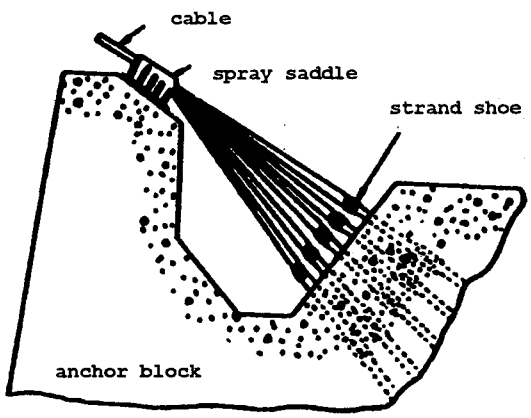


그림 1 케이블 앵커부

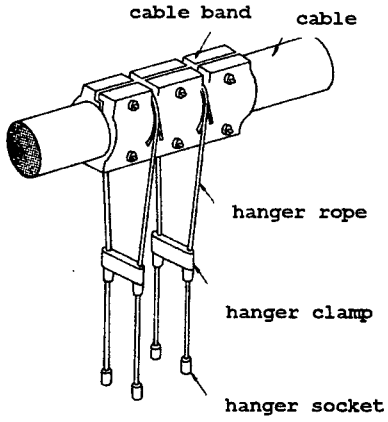


그림 2 케이블 관계의 각 부분의 명칭

그림 2는 케이블에 관련된 여러 구조부재를 표시한 그림이다. 행어(hanger)는 보강거더의 하중을 케이블에 전달하는 역할을 하며, 보통 등간격으로 하여 케이블과 보강거더 사이를 연직으로 연결한다. 이때 행어의 단부는 소켓으로 고정된다. 행어에 인장력이 작용하면 소켓 안에 금속이 쐐기 작용으로 인해 삼축응력 상태로 되어 소선의 인장력이 효율 좋게 소켓에 전달된다.

본 연구에서는 이러한 여러가지 부재 중에서 특히 스트랜드슈와 행어소켓을 주된 연구대상으로 한다.

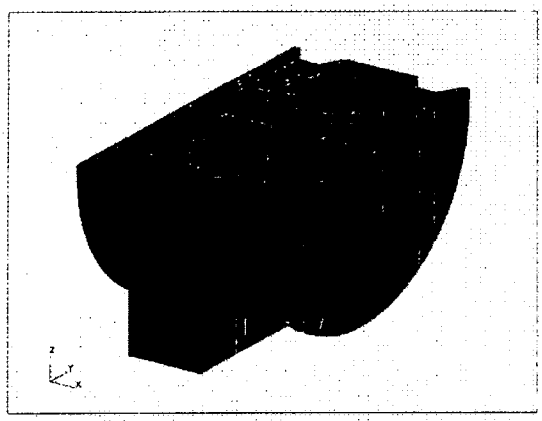


그림 3 스트랜드슈의 형상

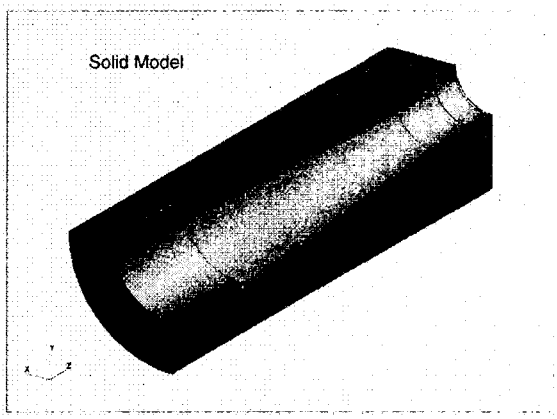


그림 4 행어소켓의 형상(1/4)

그림 3은 해석대상 구조물인 스트랜드슈의 형상이다. 중앙부의 2 개의 구멍을 통해 로드(rod)가 볼트로 체결되며 이를 통해 케이블의 하중이 콘크리트 앵커블럭(anchor block)에 전달되게 된다. 그림 4는 행어소켓의 형상을 1/4 만 표시한 것으로써 중앙의 홈을 통해 행어가 고정되어진다.

3. 유한요소 모델링

본 연구에서 수행한 유한요소해석에서 사용된 총 절점수 및 요소수를 표 1에 나타내었다. 요소망을 구축함에 있어서 특히 응력이 집중되리라 예상되는 부분들은 요소의 왜곡(distortion)을 최소화 함으로써 보다 정확한 해석이 되도록 도모하였다. 표 2는 해석에 사용된 재료상수값들이다.

표 1 모델의 구성

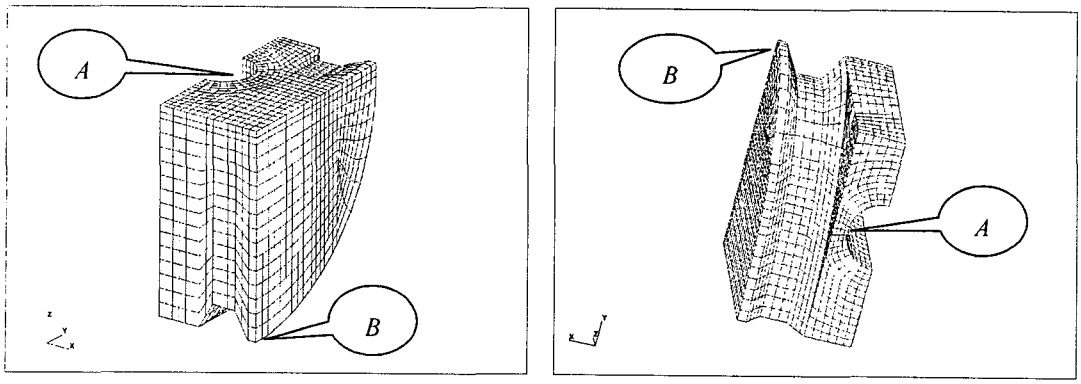
	모델	요소수	절점수
스트랜드 슈	모델 1	6172	7596
	모델 2	7512	9021
Hanger 소켓	축대칭모델	911	1952
	입체모델	3648	4689

표 2 재료상수

재료상수		상수값
탄성계수	E	2.1×10^{4} kgf/mm^2
포아송비	ν	0.3
전단계수	G	8.077×10^{3} kgf/mm^2
단위중량	ρ	7.85×10^{-6} kgf/mm^3

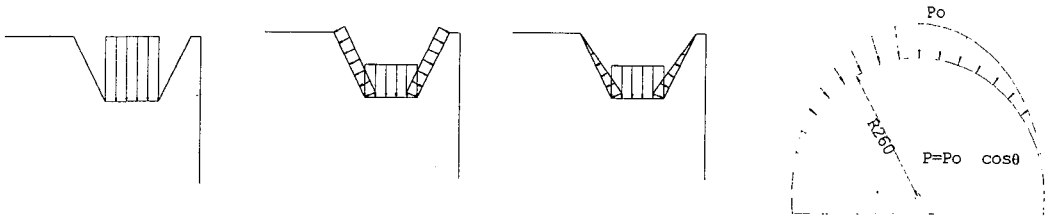
3.1 스트랜드슈

스트랜드슈는 그림 3에서 보는 바와 같이 2 면에 대하여 완전히 대칭인 구조이다. 따라서 효율적인 유한요소 해석을 위하여 1/4 모델링을 하였다(그림 5). 실제로 스트랜드가 스트랜드슈에 걸리면서 야기되는 하중은 원호상을 따라서 등분포하중이 걸리는 경우와 그림 6 (d)와 같이 원호상으로 Cosine 분포를 이루는 경우의 중간에서 형성된다고 볼 수 있다. 스트랜드슈를 설계함에 있어서 일반적으로 보다 설계에 안전측인 원호상의 Cosine 분포로 설계된다. 따라서 본 연구에서는 적용하는 하중은 그림 6 (d)와 같이 원호상으로 Cosine 분포를 가정하였으며, 홈에 걸리는 하중분포효과는 3 가지의 분포상황을 가정하였다. Load Case 1 은 A 부분이 Chair Plate 와 접하고 Nut 로 체결되면서 발생할 것으로 예상되는 응력집중을 검토하기 위하여 가정한 Load Case 이다(그림 6 (a)). Load Case 2 와 Load Case 3 은 상대적으로 얇은 B 부분의 국부적인 파괴여부를 고려하기 위하여 고려한 하중이다(그림 6 (b), (c)). 특히 Load Case 3 의 경우는 경사면에 변하는 하중을 고려하였기 때문에 그림 5 (b)와 같이 경사면은 요소를 더 세분화하여 해석의 정도 향상을 도모하였다.



(a) 모델 1 (Load Case 1, Load Case 2) (b) 모델 2(Load Case 3)

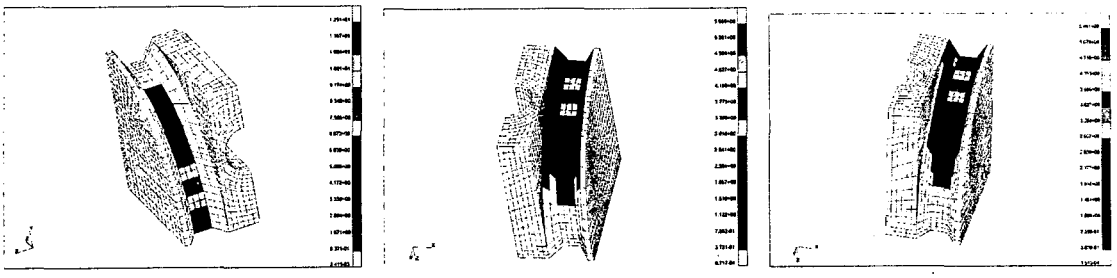
그림 5 스트랜드슈의 모델링



(a) Load Case 1 (b) Load Case 2 (c) Load Case 3 (d) cosine 분포

그림 6 스트랜드슈의 하중가정

그림 6에서 가정한 하중을 실제 유한요소모델에 적용하여 나타내면 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 특히 그림 7 (c)의 경우는 홈의 경사면을 따라서도 변하는 압력하중을 발생시킨 경우인데 이 때 경사면을 따라서 요소를 더 세분화 하였기 때문에 보다 적절히 하중을 묘사할 수 있음을 알 수 있다.

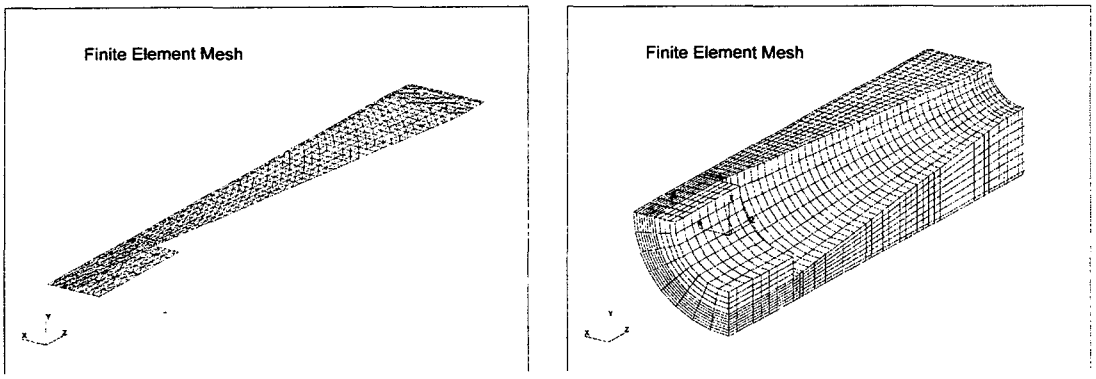


(a) Load Case 1 (b) Load Case 2 (c) Load Case 3

그림 7 스트랜드슈의 하중 적용

3.2 행어소켓

행어소켓은 그림 4와 같이 축대칭 구조를 하고 있으므로 축대칭모델을 하였으며, 아울러 1/4 입체모델을 통해 해석 결과를 검증하였다. 그림 8 (a)에 축대칭 모델을 표시하였고, 그림 8 (b)에는 1/4 입체모델을 표시하였다.



(a) 축대칭 모델 (b) 입체모델

그림 8 Hanger 소켓의 모델링

행어소켓에 작용하는 하중은 소켓의 내부를 채우고 있으면서 행어의 소선을 고정시키고 있는 주입합금(Zn(98%)+Cu(2%))에 의하여 전달되는 압력하중이다. 관용설계의 경우 이 하중은 소켓의 내부 면에 작용하는 압력하중으로 계산되며 소켓의 전 부분에 걸쳐 등분포 하는 것으로 가정된다. 이러한 가정은 socket과 주입 합금간의 완전한 부착과 일정한 변형 및 그 외의 이상적인 가정에 기본한 것으로 볼 수 있으며 가장 간단한 수준의 압력분포라고 할 수 있다.

그러나 실제의 경우 이러한 가정들은 적절하다고 할 수 없다. 우선 주입합금과 소켓은 축방향을 따라서 다른 압력 작용면을 가지며 그에 따라 변형정도 또한 다르게 나타날 것으로 쉽게 예측할 수 있다. 또한 소켓과 주입합금간의 불균등한 부착으로 인한 압력하중의 불균등을 예상할 수 있다 그러므로 이들 두개의 다른 재료 사이에 발생할 수 있는 하중은 위치에 따라서 다를 것이다. 그림 9는 이러한 가정에 대하여 개략적으로 설명하고 있다.

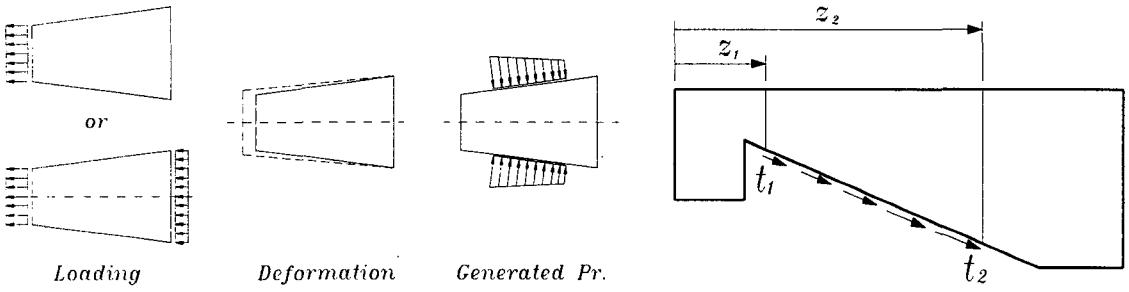
그림 9 (a)에서 좌측의 두 그림은 행어에 의하여 주입합금에 작용하는 하중을 나타내고 있는데,

상부의 것은 소켓 끝부분에서 압력이 작용하지 않는 것으로 가정한 것이며 하부의 그림은 선형변화하면서 끝부분에도 일정한 정도의 하중이 가해지는 경우를 나타내고 있다. 이들 하중에 의하여 유발되는 변형의 중앙부에 나타나고 있으며 이에 따른 예측되는 압력분포상황이 우측에 표시되어 있다. 또한 접선방향의 힘 성분을 나타낸 것이 그림 9 (b)이다.

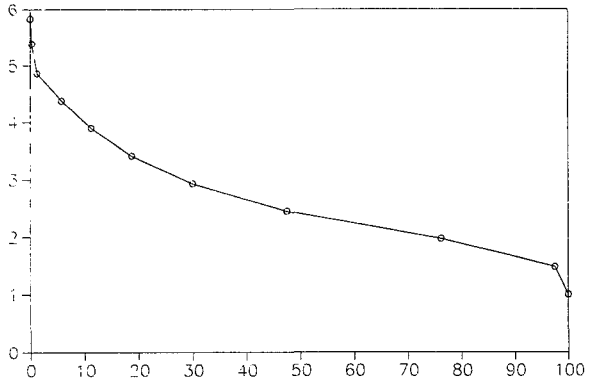
실제의 압력하중 발생분포를 알아보기 위해 소켓을 강체로 보고 행어에 작용되는 인장하중을 등분포 압력하중으로 작용시켜서 해석하였다. 그 결과를 그림 9 (d)에 표시하였고 최소값을 1 로하여 각각의 응력값들을 상대적으로 나타내면 그림 9 (c)와 같다.

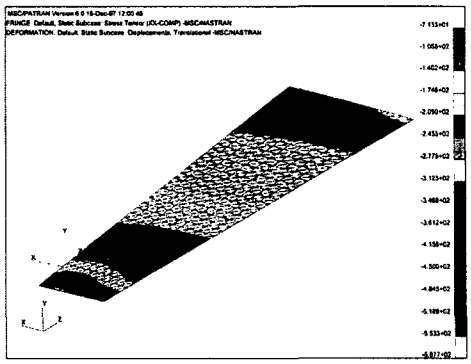
따라서 본 연구에서는 주입합금에 의한 압력하중의 분포를 선형변화(linear varing)하는 것으로 가정하여 하중분포를 모델링하여 해석을 수행하였다.

표 3 과 표 4 는 여러가지 하중 조합 및 경계조건의 조합에 의한 해석 모델의 명칭이다.



(a) 연직압력하중 (b) 접선압력하중





(c) 연직압력하중의 분포 (d) 실제 해석 결과

그림 9 Hanger 소켓의 하중

표 3 모델명칭 (등분포압력하중)

등분포 압력하중	모델명칭	지압부 B/C	사용요소
측경간	Lmfr_axi	Roller	Axisymmetric(6)
	Lmfx_axi	Fixed	Axisymmetric(6)
	Lmfr_qua	Roller	Solid(8)
	Lmfx_qua	Fixed	Solid(8)
일반부	Smfr_axi	Roller	Axisymmetric
	Smfx_axi	Fixed	Axisymmetric
	Smfr_qua	Roller	Solid
	Smfx_qua	Fixed	Solid

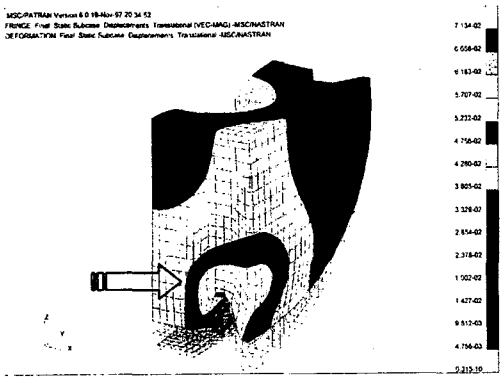
표 4 모델명칭 (선형변화압력하중)

선형변화 압력하중	모델명칭	지압부 B/C	사용요소
측경간	Lfrv_axi	Roller	Axisymmetric(6)
	Lfxv_axi	Fixed	Axisymmetric(6)
	Lfrv_qua	Roller	Solid(8)
	Lfxv_qua	Fixed	Solid(8)
일반부	Sfrv_axi	Roller	Axisymmetric
	Sfxv_axi	Fixed	Axisymmetric
	Sfrv_qua	Roller	Solid
	Sfxv_qua	Fixed	Solid

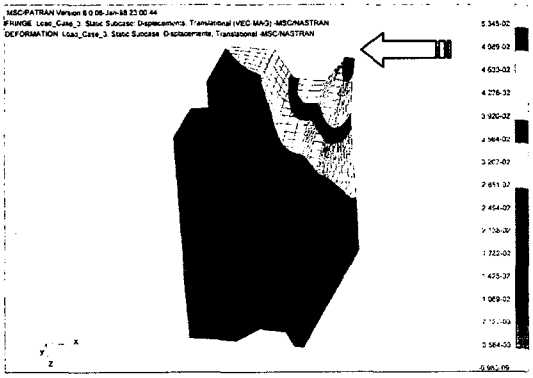
4. 해석 결과 및 고찰

4.1 스트랜드슈

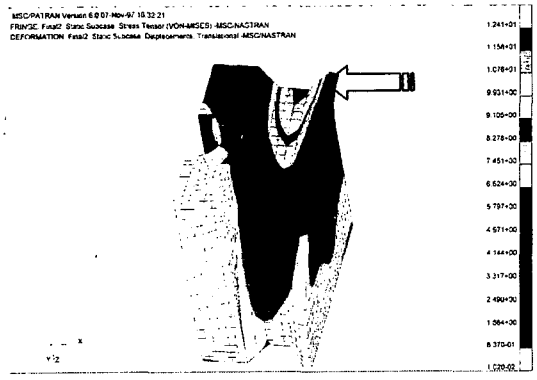
스트랜드슈의 해석결과 중 일부를 발췌하여 그림 10 에 나타내었다. Load Case 1 을 적용한 경우는 그림 10 (a)에서 보는 바와 같이 최대변형은 스트랜드가 걸리는 홈의 중앙부에서 발생함을 알 수 있다. 실제하중분포와 가장 근사한 Load Case3 을 적용한 경우는 최대변형이 발생하는 위치가 그림 10 (b)에서와같이 중앙에서 외각부로 이동됨을 알 수 있다. 그림 10 (c)는 Von-Mises 응력분포를 나타낸 것으로써, 스트랜드가 걸리는 홈에서 최대 응력이 발생하였다. 반면에 최대 전단응력은 로드가 볼트로 체결되는 연결부에서 발생하였다 (그림 10(d)). 표 5 에 여러가지 하중에 대한 해석결과를 정리하였다.



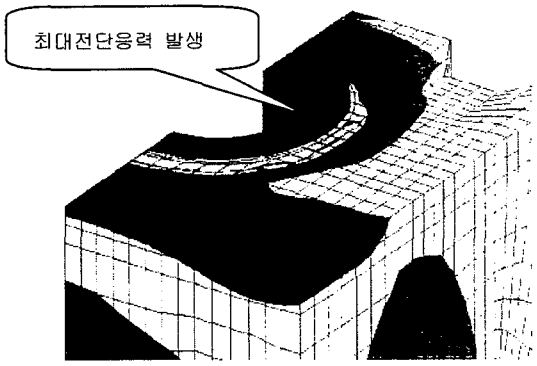
(a) 변형 (모델 1, Load Case 1)



(b) 변형 (모델 2, Load Case 3)



(c) Von Mises 응력(모델 1, Load Case 2)



(d) 최대전단응력 (모델 1, Load Case 1)

그림 10 스트랜드 슈의 해석 결과 (발췌)

표 5 해석결과(스트랜드 슈) (변위: mm×10^{-2}, 응력: kg/mm^2)

	Load Case 1 (모델 1)	Load Case 2 (모델 1)	Load Case 3 (모델 2)
최대 변위	7.134	8.996	5.345
최대 Von Mises 응력	14.46	12.41	12.87
최대 전단 응력	8.115	6.922	7.083

4.2 행어소켓

실제의 하중분포에 가까운 선형변화 하중의 경우가 오히려 구조의 거동에는 등분포 하중에 비하여 적은 영향을 미치는 것으로 나타나고 있다. 하중 case I을 등분포 압력하중을 가했을 경우, 하중 case II를 선형변화 압력하중을 가했을 경우라고 하고 해석 결과를 정리하면 다음과 같다(표 6, 그림 10 참조).

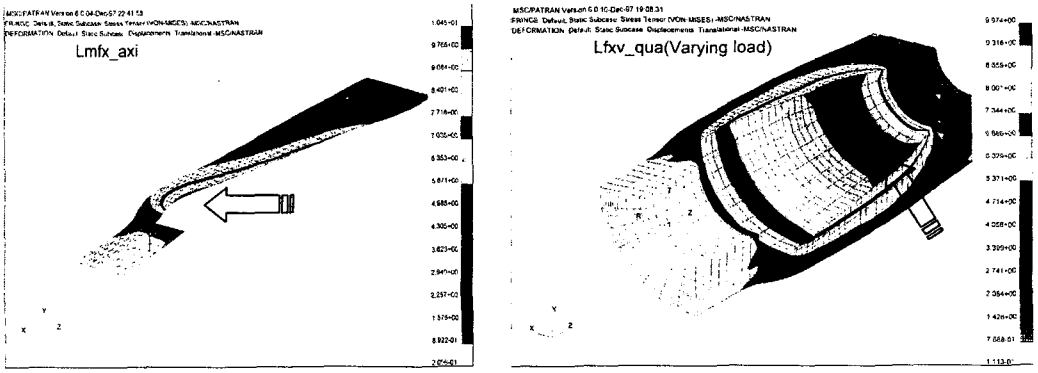
- 변위 : case II의 경우 case I에 비하여 변위가 구조에 전체적으로 분포하는 경향을 나타내고 있으며 변위의 양은 case I보다 작게 나타나고 있다. 변위의 양은 약 20% 정도 감소하고 있다.
- Von-Mises 응력 : 하중 case가 I에서 II로 바뀌면서 최대의 응력이 발생하는 위치는 socket의 상부로 이동하고 있다. 소켓 상부는 두께가 두꺼운 부분으로 등분포 하중이 보다 임계하중에 가까움을 나타내고 있다. case II의 경우 응력은 약 7%정도의 감소를 나타내고 있다.
- 둘레방향 응력 : 둘레방향 응력에 있어서도 최대응력 발생위치의 상부로의 이동이 보이며 응력의 감소는 약 15% 정도로 나타나고 있다.
- 최대전단응력 : Von-Mises 응력 및 둘레방향 응력과 같은 양상을 보이며 응력 감소는 7%정도로 나타나고 있다.

불안전측의 작용 하중인 등분포 하중을 작용할 경우 최대응력의 발생위치는 주로 소켓의 최소 두께 부분인 하중면의 최하부로 나타나고 있다.

표 6 해석결과(Hanger 소켓) (변위: mm×10^{-2}, 응력: kg/mm^2)

일정분포 압력하중 작용						
모델	변위	Von-Mises	XX	YY	ZZ	Max-Shear
Smfr_axi	5.763	9.278	-2.802	6.575	-6.325	4.904
Smfx_axi	5.720	9.276	-2.944	6.575	-8.654	4.903
Smfr_qua	6.189	9.574	-2.334	6.594	-5.330	5.319
Smfx_qua	6.122	9.573	-2.657	6.594	-7.041	5.319
Lmfr_axi	7.170	10.45	-2.828	7.493	-6.857	5.577
Lmfx_axi	7.122	10.45	-2.828	7.493	-9.458	5.576
Lmfr_qua	7.686	10.79	-2.357	7.505	-5.797	6.004
Lmfx_qua	7.631	10.79	-2.910	7.505	-7.713	6.003

선형변화 압력하중 작용(선형변화계수α = 4.0)						
모델	변위	Von-Mises	XX	YY	ZZ	Max-Shear
Sfrv_axi	4.672	9.222	-4.658	5.764	-6.825	4.956
Sfxv_axi	4.628	9.274	-4.663	5.785	-9.209	4.979
Sfrv_qua	4.899	9.277	-3.503	5.837	-5.555	5.149
Sfxv_qua	4.849	9.335	-3.514	5.859	-7.245	5.179
Lfrv_axi	5.769	9.645	-4.688	6.080	-7.381	5.167
Lfxv_axi	5.720	9.703	-4.694	6.100	-10.01	5.198
Lfrv_qua	6.274	9.904	-3.512	6.117	-6.347	5.542
Lfxv_qua	6.214	9.974	-3.524	6.142	-8.363	5.580



(a) Von Mises 응력(고정경계, 등분포압력하중) (b) Von Mises 응력(고정경계, 선형변화하중)

그림 10 Hanger 소켓의 해석 결과(발췌)

5. 결론

본 연구에서는 현수교의 주요연결부재인 스트랜드슈 및 행어소켓에 대하여 다양한 모델을 통하여 유한요소해석을 수행하고 결과를 고찰하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 스트랜드슈는 그 형상이 복잡하므로 관용설계법에 의한 설계를 하더라도 정밀한 3 차원 유한요소해석을 수행하여 응력집중분포양상을 검토할 필요가 있다.
2. 행어소켓에 걸리는 압력하중을 산정할 때 관용설계에서 일반적으로 채택하는 등분포압력하중을 채택하는 것이 선형으로 변하는 압력하중을 고려하는 것 보다는 더 안전한 설계가 되리라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국중공업 주식회사의 연구비 지원으로 이루어진 것으로, 이에 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

1. "현대의 현수교", 방명석, 도서출판 건설도서, 1994.
2. "강구조편람 제 5 권", 사단법인 한국강구조학회, 1995.
3. "도로교표준시방서-설계/시공 및 유지관리편-", 사단법인 대한토목학회, 1996.
4. "최신교량공학", 황학주, 동명사,1996.
5. "강교설계의 기초", 방명석, 도서출판 건설도서, 1997.
6. "Structural Steel Designers' Handbook", Edited by Frederick S. Merritt,1972.
7. "Cable Supported Bridges – Concept & Design", Niels J. Gimsing, JOHN WILEY & SONS, 1997.
8. "유한요소법", 최창근, 집문당, 1992.
9. "Finite Element Modeling for Stress Analysis", Robert D. Cook, JOHN WILEY & SONS, 1995.
10. " MSC/NASTRAN Quick Reference Guide", Michael Reymond and Mark Miller, Macneal–Schwendler Corporation, 1994.