

철도용 사장교의 주탑 케이블 정착부에 관한 연구

A Study on Pylon Cable Anchor System in Cable-Stayed Railway Bridge

공병승* 한성관**
Gong, Byung Seung Han, Sung Gwan

ABSTRACT

Set in constant increase and period current of lively technical development of railroad use and construction of cable stayed bridge railway bridge, one of bridge form of most suitable that think side police officer and the material enemy of bridge that use long rail, is increasing laying stress on the foreign countries.

Main tower fixing department of this cable stayed bridge is consisted of main tower flange that support bearing plate, bay ring plate bearing plate, support end rib and diaphragm etc, as stress transmission mechanic that tensility of cable socket into normal force of main tower, and is used this time.

These structural elements is very complex the structure and direction of load delivered from socket specially calbe particularly be different, and need FEM analysis that use Thick Shell element for suitable arrangement of mutual stress flowing grasping and absence that follow hereupon because all of the each support plate angle that suport this differ.

1. 서론

철도 사용의 꾸준한 증가와 활발한 기술개발 이라는 시대적 흐름에 맞춰 장대레일을 이용한 교량의 경관 및 재료적 측면을 생각한 최적의 교량 형식중의 하나인 사장교 철도교의 가설이 해외를 중심으로 증가하고 있다. 이러한 사장교의 주탑 정착부는 케이블 소켓의 인장력을 주탑의 수직력으로 변환시키며, 이때 사용되는 응력 전달기구로서 베어링 플레이트, 베이링 플레이트 지지판, 지지종리브 및 다이아프램 등을 지지하는 주탑 플랜지로 구성되어 있다.

이러한 구조부재들은 그 구성이 매우 복잡하며 특히 소켓으로부터 전달되는 하중의 방향이 케이블 별로 상이하며, 이를 지지하는 각각의 지지 플레이트 각도가 모두 다르므로 이에 따르는 상호간의 응력흐름 파악과 부재의 적절한 배치를 위해서 Thick Shell요소를 이용한 FEM해석이 필요하다.

국부적인 강재의 응력집중 및 변형을 조사하기 위해 3차원 FEM해석을 사용하였으며 구조가 강교로서 강재의 판으로 사용하고 있으므로 Thick Shell요소를 사용하였다.

본 연구에서는 정착부와 이를 지지하는 주변 구조부재들로서 이 부근의 응력변동경향을 파악하기 위해서 국부적인 응력전달에 영향이 없도록 정착부에서 충분한 거리를 두어 경계조건을 도입하였다.

* 책임저자, 정회원, 동서대학교 토목공학과 부교수·공학박사

E-mail : kongbs@dongseo.ac.kr

TEL : (051)320-1821 FAX : (051)320-1821

** 동서대학교 토목공학과 석사과정

2. 주탑 케이블 정착부 FEM 해석

2.1 해석개요

(1) 검토목적

주탑 정착부는 케이블 소켓의 인장력을 주탑의 수직력으로 변환시키며, 이때 사용되는 응력 전달기구로서 베어링 플레이트, 베어링 플레이트 지지판, 지지종리브 및 다이어프램 등을 지지하는 주탑 플랜지로 구성되어 있다.

이러한 구조부재들은 그 구성이 매우 복잡하며 특히 소켓으로부터 전달되는 하중의 방향이 케이블 별로 상이하며, 이를 지지하는 각각의 지지 플레이트 각도가 모두 다르므로 이에 따르는 상호간의 응력흐름 파악과 부재의 적절한 배치를 위해서 Thick Shell요소를 이용한 FEM해석이 필요하다.

(2) 검토방법

국부적인 강재의 응력집중 및 변형을 조사하기 위해 3차원 FEM해석을 사용하였으며 구조가 강교로서 강재의 판으로 사용하고 있으므로 Thick Shell요소를 사용하였다.

조사의 착안지점은 정착부와 이를 지지하는 주변 구조부재들로서 이 부근의 응력변동경향을 파악하기 위해서 국부적인 응력전달에 영향이 없도록 정착부에서 충분한 거리를 두어 경계조건을 도입하였다.

표 2.1 사용재료에 따른 허용응력

강종	허용응력(kgf/cm ²)	
	일반부	집중부
	$f_a' = 1.2f_a$	$f_a' = 0.8f_a$
SM520	2520	2880
SM400	1680	1920

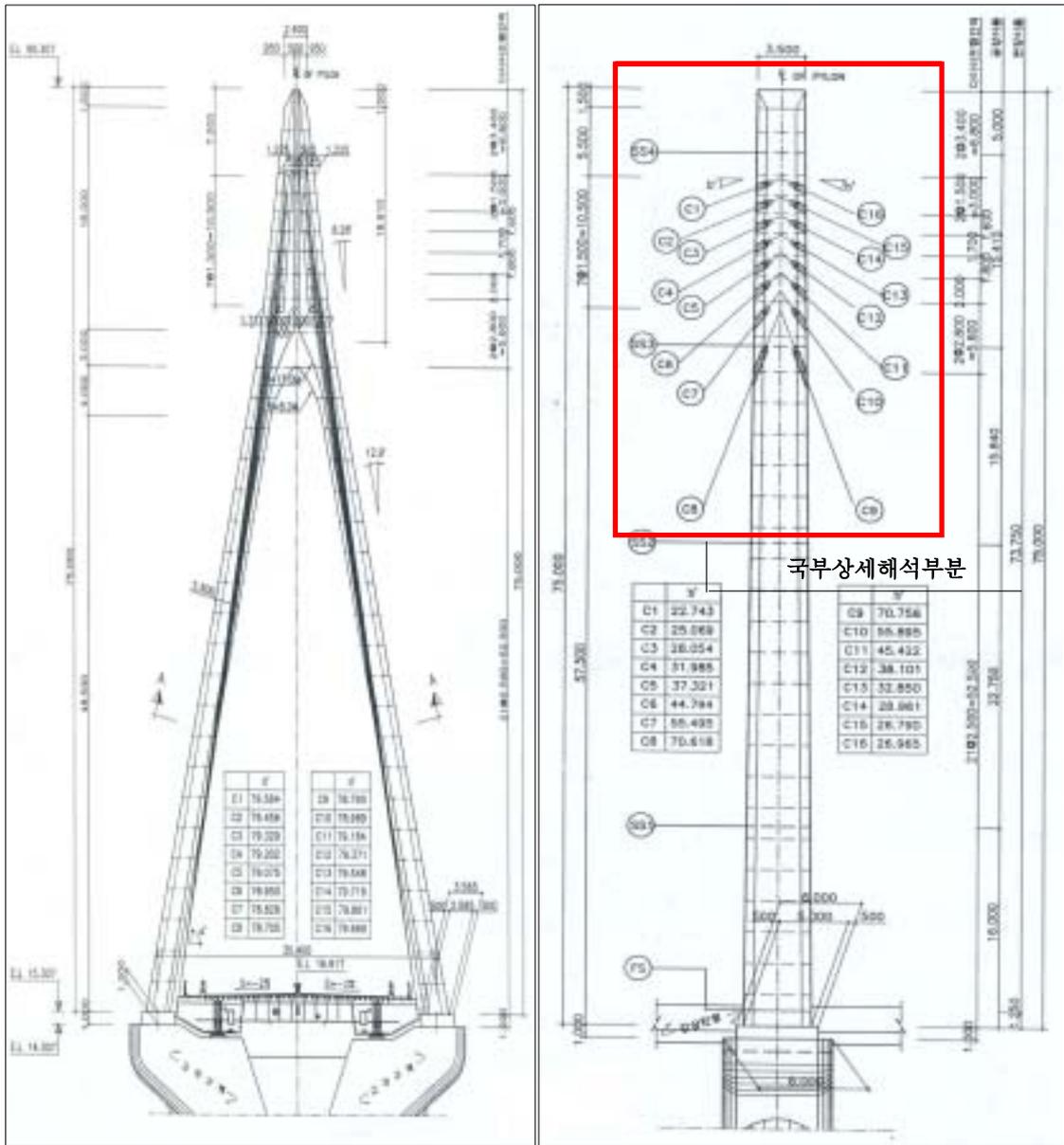


그림 2.1 주탑 케이블 정착부 검토 위치

(3) 사용강재 두께

표 2.2 사용강재 두께

부재	주탑				케이블 정착부			
	플랜지	복부판	수직보강재	다이아 프 램	Bearing Plate	정착판	복부판	복부판 보강재
두께 (mm)	14, 20, 28	14, 20, 28	18, 22, 24	14, 10	106	36	50	50

(4) 경계조건 설정

본 주탑정착부의 경계조건은 주탑 케이블 정착부의 국부응력이 충분히 일반의 응력으로 변환될 수 있는 길이 즉, 국부적인 경계조건이 부재 응력에 영향을 미치지 않는 부분에 강결조건을 주어 국부해석을 수행한다.

또한 Y-Z평면의 대칭성을 이용하여 대칭되는 절점의 Dx, Ry, Rz를 구속하여 Half Modeling으로 국부해석을 수행하였다.

2.2 주탑 케이블 정착부 상세 구조해석결과

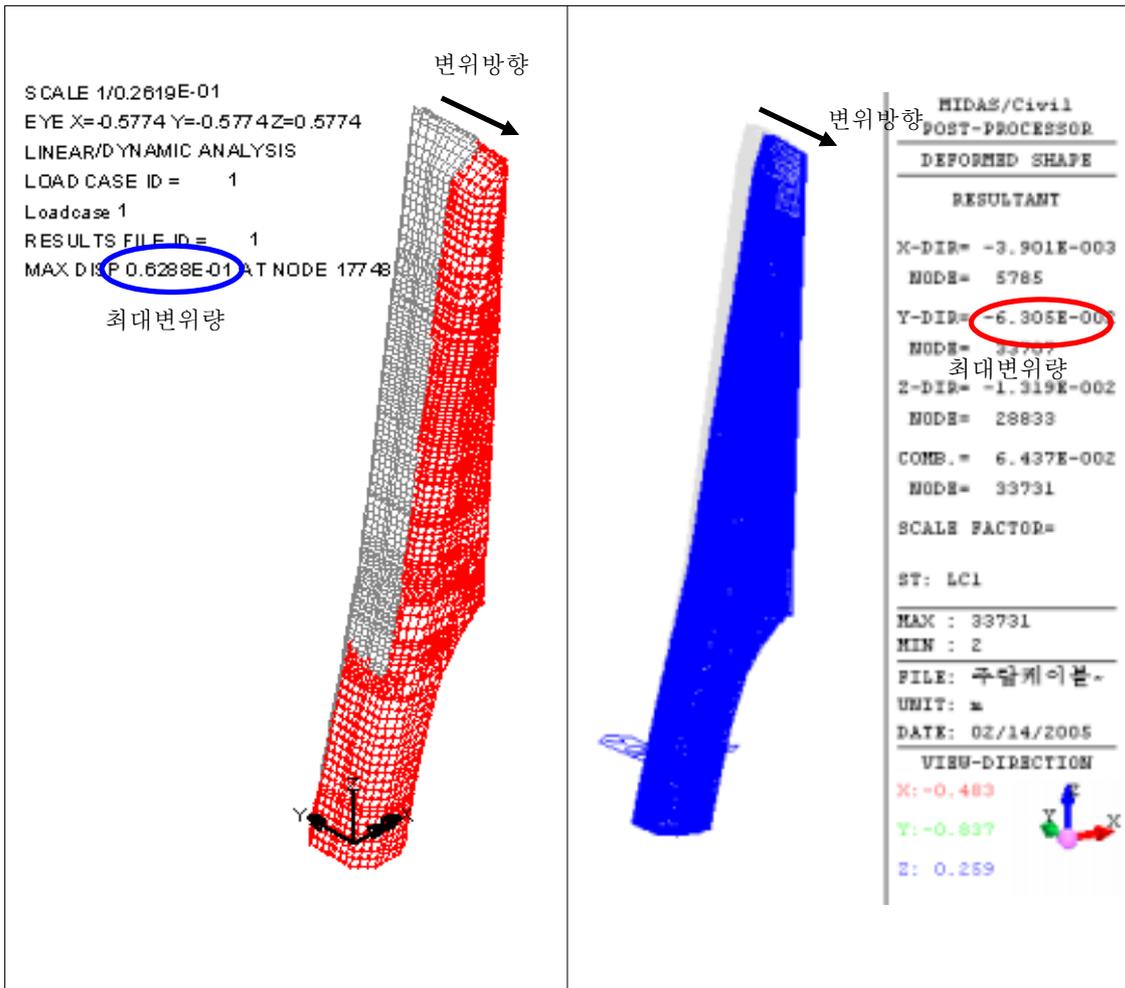


그림 2.2 LUSAS와 MIDAS/CIVIL의 변형도 비교

그림 2.2의 케이블 장력에 의한 변형도를 보면, 두 프로그램은 비슷한 결과값을 보이고 있으며, C1~C8(좌측케이블)보다 C9~C16(우측케이블)의 케이블 장력이 상대적으로 크게 재하되었으므로 Y방향으로 6.3cm의 변형이 생긴 것으로 사료된다. 주탑 케이블 정착부는 케이블 장력의 수직하중은 보강판의 압축응력을, 수평하중은 다이아프램에 인장응력을 유발할 것으로 예상된다. 그러나 각 케이블 정착부의 각도는 상이하며, 케이블 장력 또한 케이블별로 다르므로 세부적인 응력확인 필요할 것으로 사료된다.

(1) 케이블 정착부 최대주응력(LUSAS) 및 최소주응력

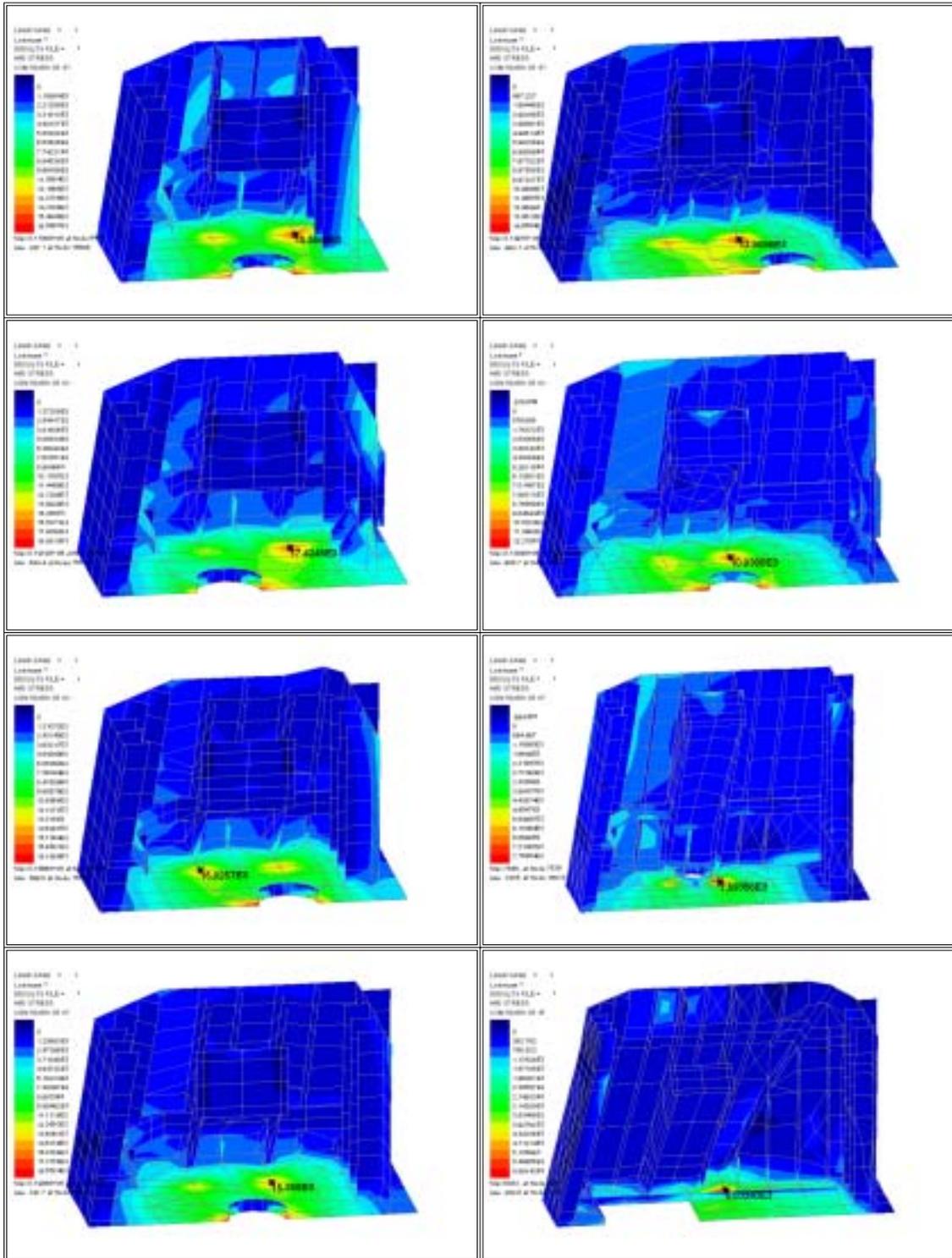


그림 2.3 C1~C8 케이블 정착부의 최대인장응력 Contour (케이블 순서↓ ↓)

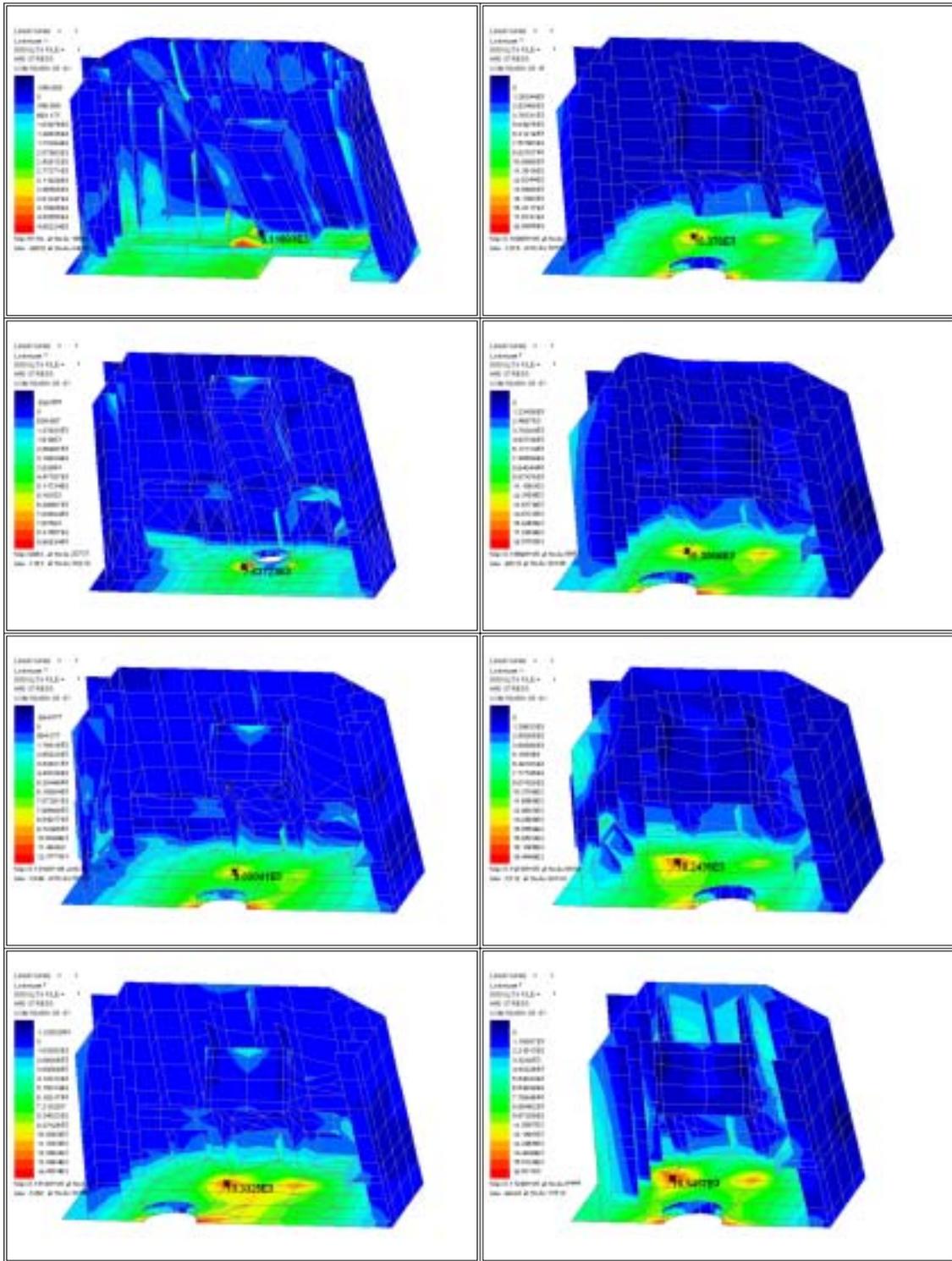


그림 2.4 C9~C18 케이블 정착부의 최대인장응력 Contour (케이블 순서↓ ↓)

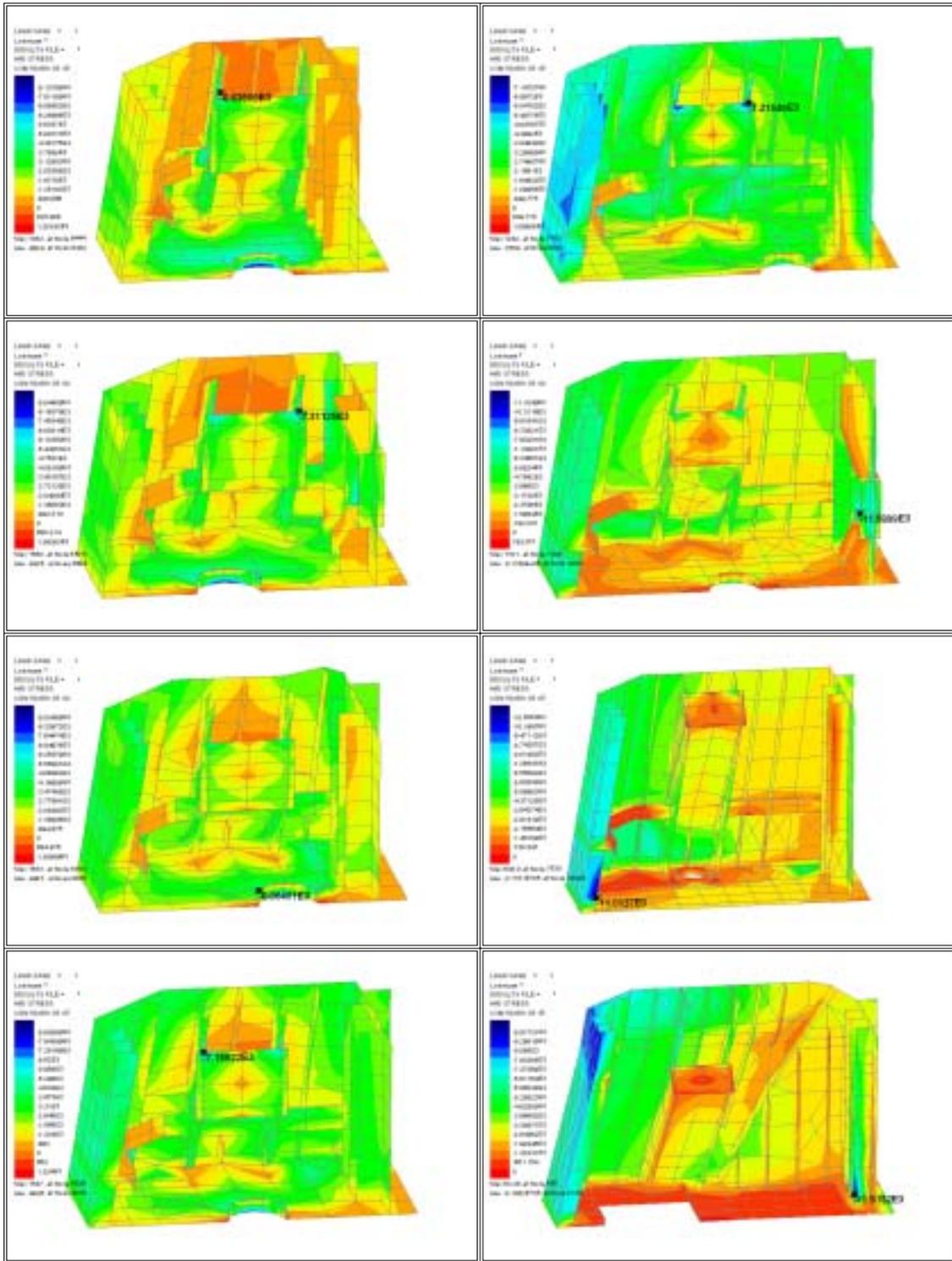


그림 2.5 C1~C8 케이블 정착부의 최대압축응력 Contour (케이블 순서↓ ↓)

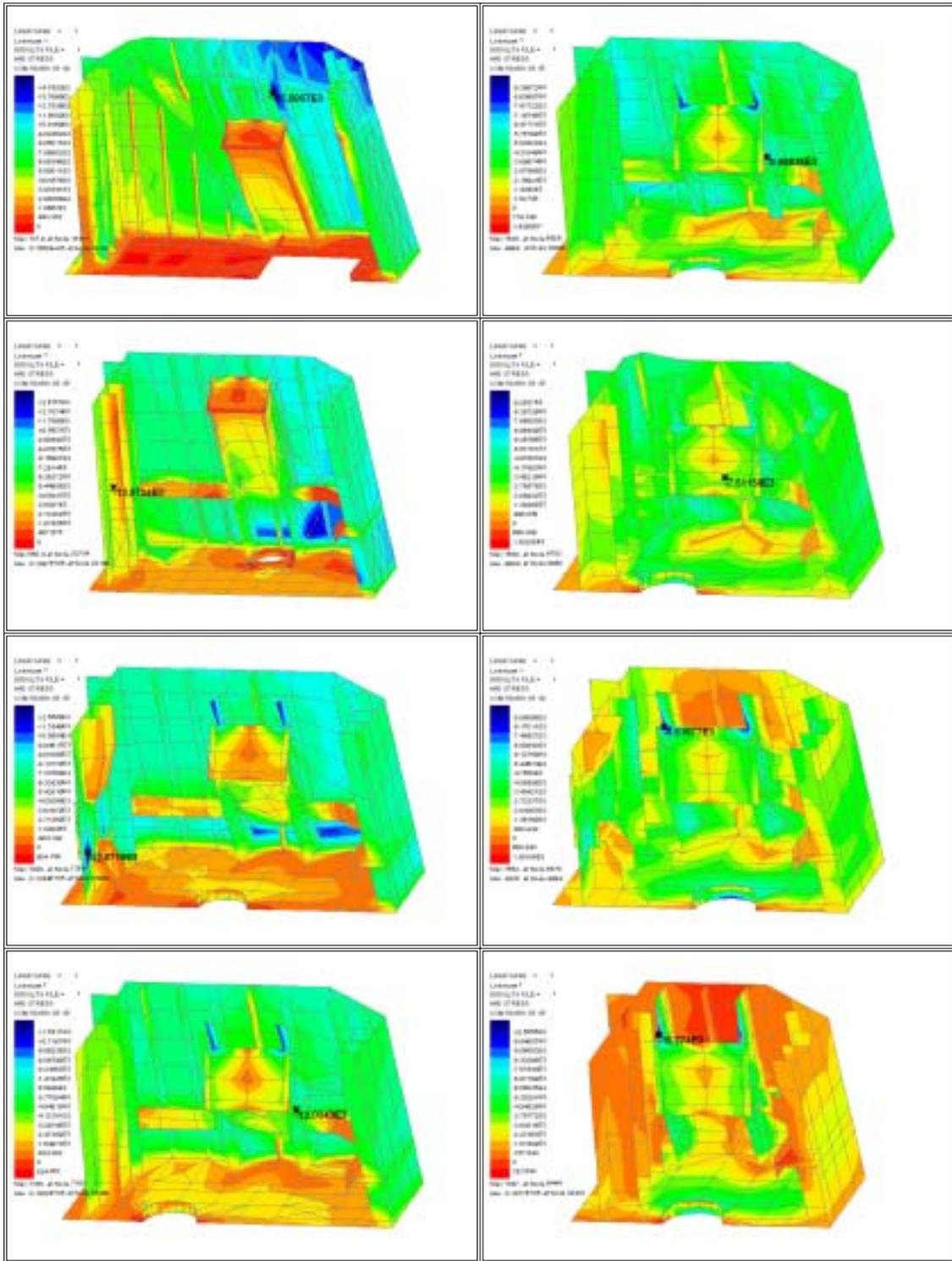


그림 2.6 C9~C18 케이블 정착부의 최대압축응력 Contour (케이블 순서↓ ↓)

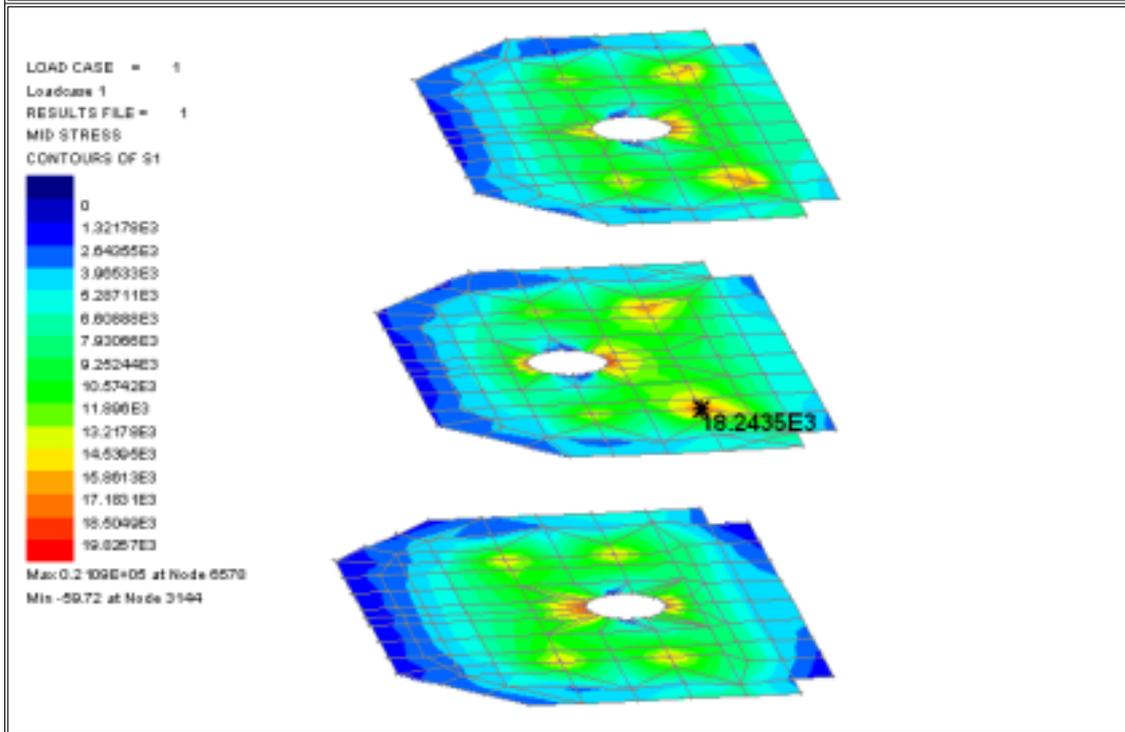
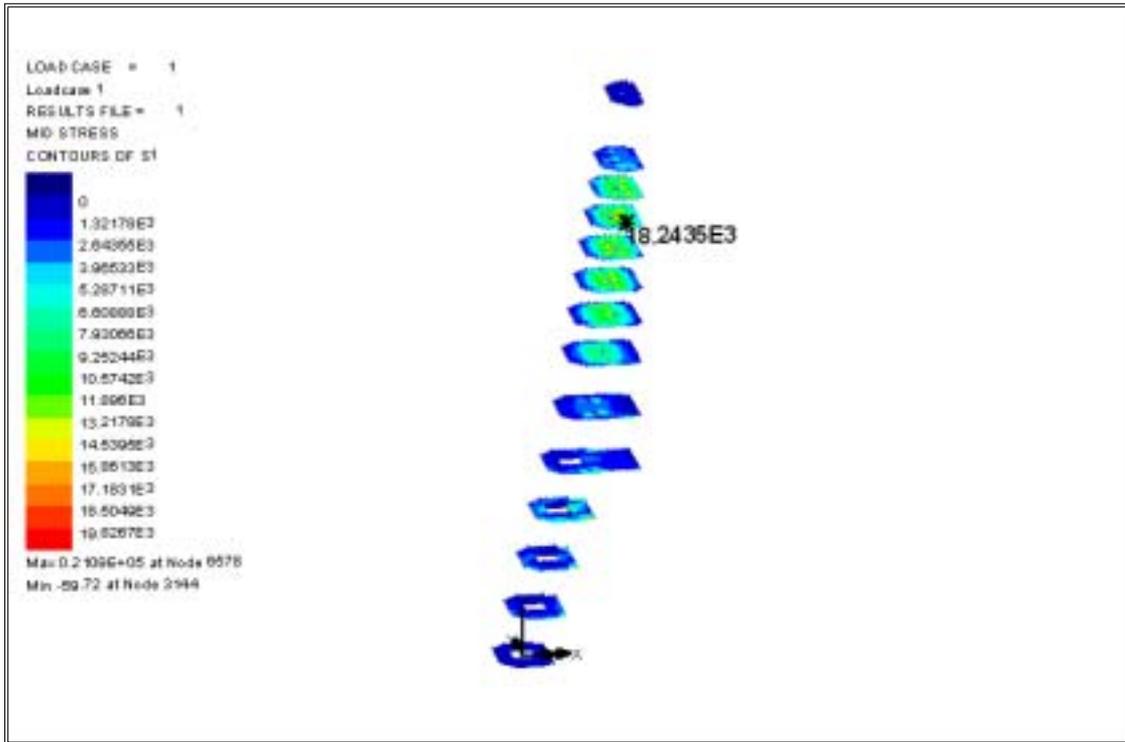


그림 2.7 LUSAS를 이용한 주탑 다이어그램의 최대 주응력(S1)

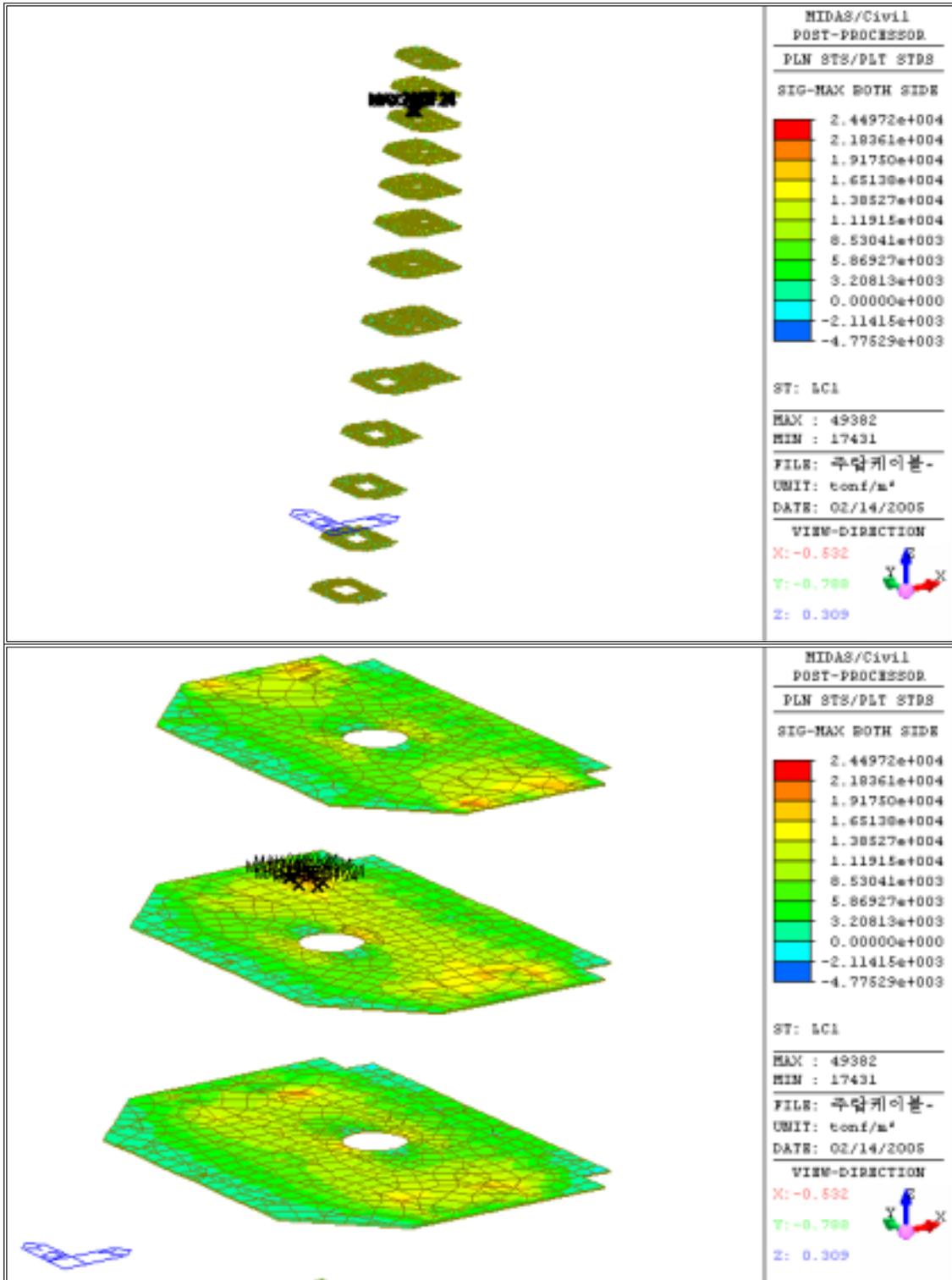


그림 2.8 MIDAS/CIVIL의 최대주응력 비교

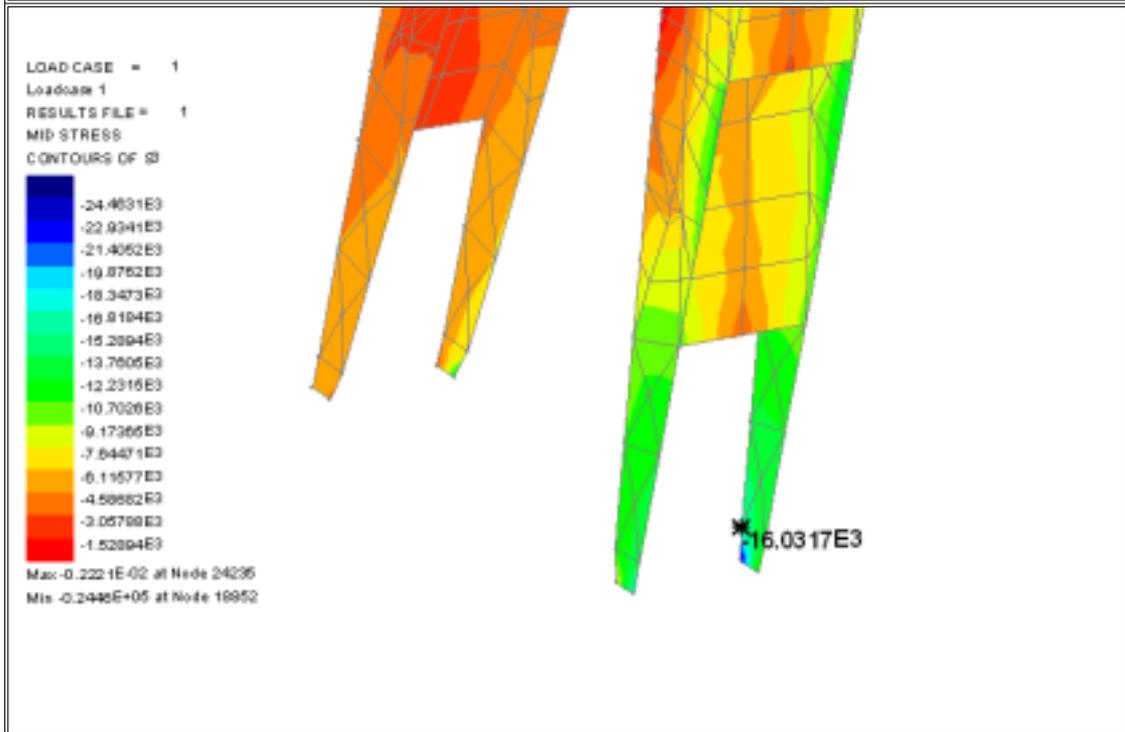
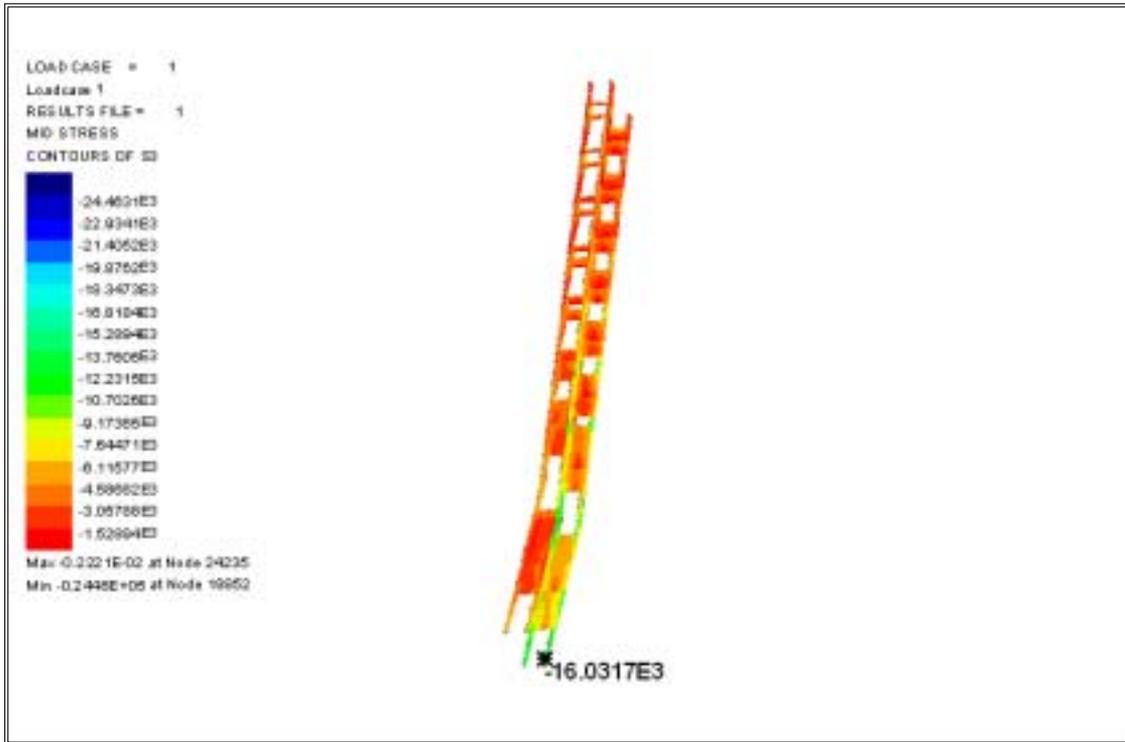


그림 2.9 LUSAS를 이용한 주탑 수직보강판의 최소주응력(S3)

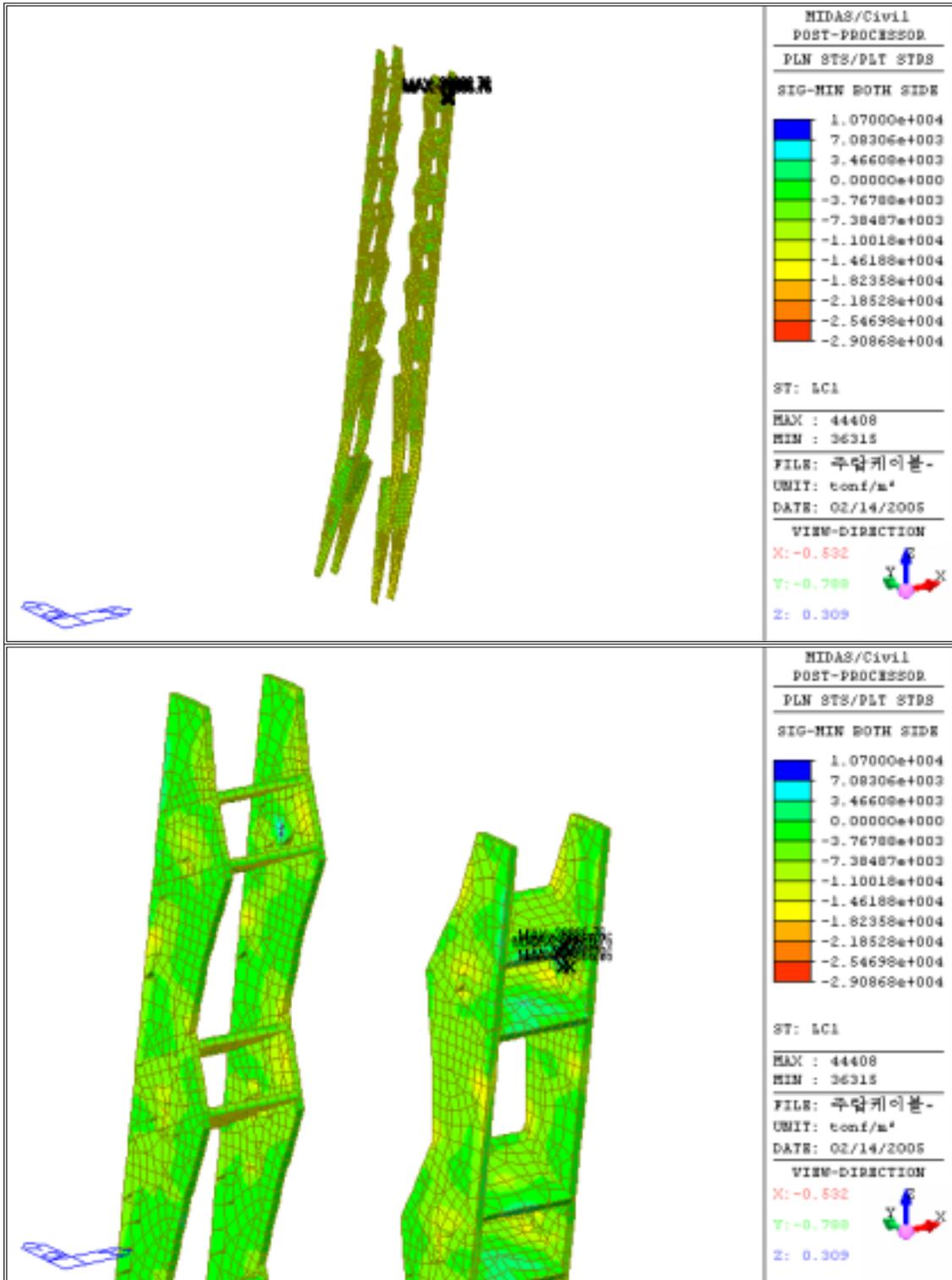


그림 2.10 MIDAS/CIVIL의 최소주응력 비교

(2) 최대주응력의 지배영역

MIDAS의 FEM 해석결과에서 최대주응력, 즉 최대인장응력은 그림 2.11~그림 2.14에서 보는 바와 같이 크게 4가지 형태로 발생하였다. 그림 2.11은 케이블 No 1에서 발생하여 전체적으로 상부케이블에서 발생하였으며 LUSAS 해석시에는 발생하지 않았다. 그림 2.12에서 발생한 집중응력은 LUSAS 해석에서도 볼 수 있는 응력집중으로 케이블 수직 보강판과 다이아프램이 직교하는 부분에서 발생하였으며, 그림 2.13에서는 다이아프램의 Man hole부분에서 발생하였으며 LUSAS 해석시에도 동일하게 큰 인장응력이 발생하였다. 그림 2.14에서는 케이블 수직 보강재에서 발생하였으며, LUSAS에서는 압축응력이 주로 발생하는 것을 확인할 수 있다.

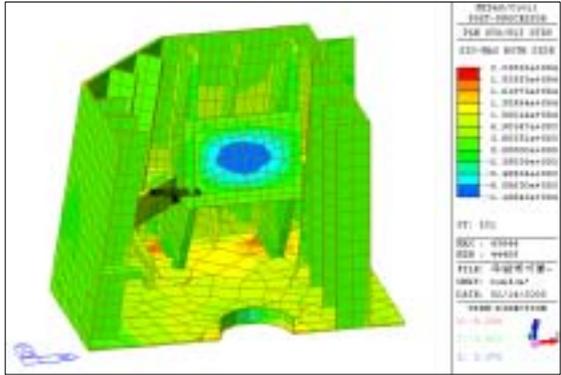


그림 2.11 최대주응력 Case 1(C1)

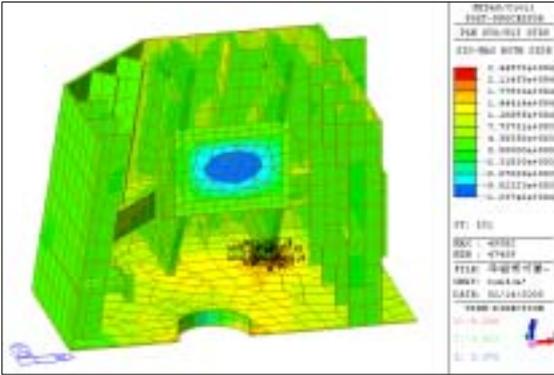


그림 2.12 최대주응력 Case 2(C2)

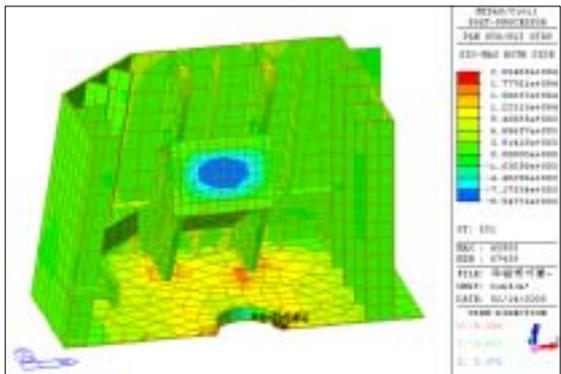


그림 2.13 최대주응력 Case 3(C4)

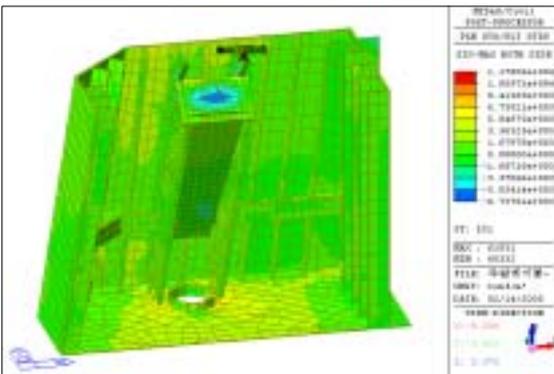


그림 2.14 최대주응력 Case 4(C7)

(3) 최소주응력의 지배영역

최소주응력, 즉 최대압축응력은 크게 4가지의 유형으로 관찰되었다. 그림 2.15과 그림 2.18는 다이아프램과 연결되는 케이블 수직 보강재의 상부의 바깥쪽에서 발생하였다. 그림 2.17와 그림 2.18은 LUSAS의 결과에서도 확인할 수 있었던 응력집중으로 케이블 정착판과 수직 보강재가 연결되는 부분에서 발생하였으며, 앞으로 향후 연구 시 집중적으로 다루어져야 할 것으로 판단된다.

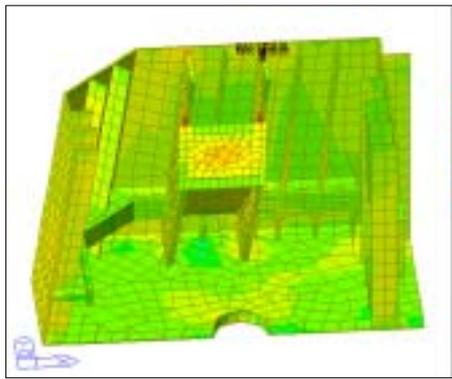


그림 2.15 최소주응력 Case 1(C6)

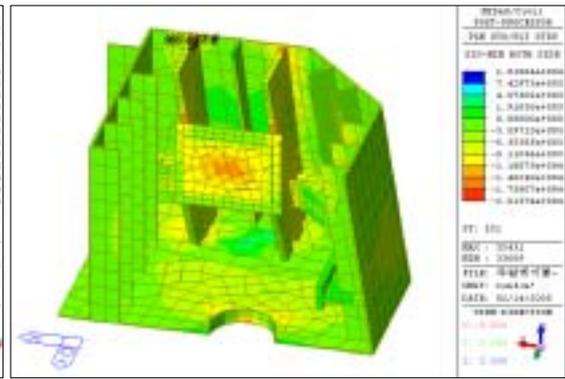


그림 2.16 최소주응력 Case 1(C16)

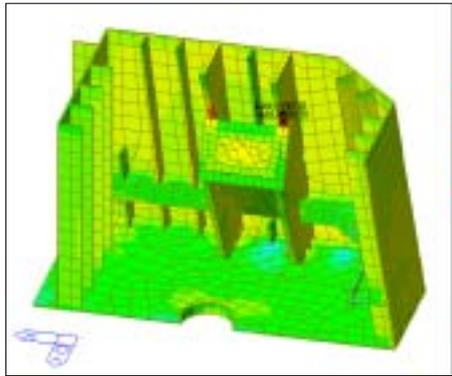


그림 2.17 최소주응력 Case 2(C11)

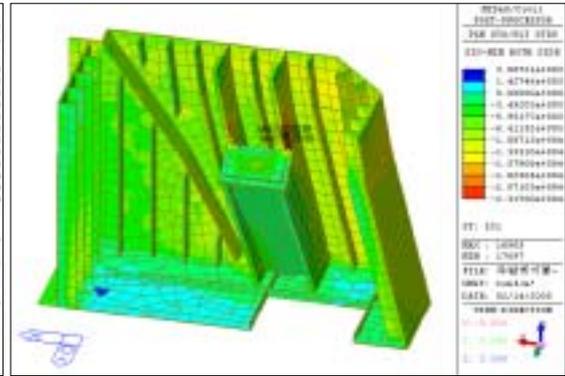


그림 2.18 최소주응력 Case 2(C9)

(4) 해석결과 비교

표 2.3 케이블장력에 의한 주탑의 최대·최소 주응력 비교

케이블 NO	케이블장력 (tf/m ²)	MIDAS/CIVIL		LUSAS				비고
		최대주응력 (+)	최소주응력 (-)	최대주응력(+)		최소주응력(-)		
C 1	1801.2	22393.2	25698.0	15556.5	(13300.0)	6635.1	(9509.0)	
C 2	2015.1	24497.0	18338.2	17424.5	(24497.0)	7311.3	(12548.0)	
C 3	1630.5	23568.3	13602.1	15025.7	(15791.0)	6064.0	(11117.0)	
C 4	1683.0	20548.5	13855.0	15358.0	(16783.0)	7159.2	(11750.0)	
C 5	1531.6	20640.8	15871.0	13909.6	(11019.0)	7215.5	(11747.0)	
C 6	1319.5	17611.0	14186.0	10838.9	(9441.0)	11589.9	(10210.0)	
C 7	1029.7	11781.0	16349.0	7593.56	(5382.0)	11013.7	(13793.0)	
C 8	862.7	8173.0	14350.0	6033.45	(8173.0)	10515.2	(9650.0)	
C 9	789.9	9292.0	23170.0	5118.93	(6761.0)	15595.7	(23170.0)	
C 10	853.9	11131.0	21210.1	7637.23	(11131.0)	13972.4	(19861.0)	
C 11	1111.9	17935.0	18961.0	9500.41	(8576.0)	12871.6	(18961.0)	
C 12	1549.5	24306.0	17834.0	13332.5	(11404.0)	12004.3	(11239.0)	
C 13	1649.5	22283.0	20509.0	15378.0	(14036.0)	9988.4	(11781.0)	
C 14	1725.5	20898.0	18676.0	15305.6	(14257.0)	7511.5	(13913.0)	
C 15	1994.2	21147.0	20137.0	18243.5	(15193.0)	8619.8	(14188.0)	
C 16	2390.2	35410.0	29087.0	16545.7	(11669.0)	10774.0	(15880.0)	

※ ()는 LUSAS 최대·최소주응력발생지점의 동일위치에서의 MIDAS/CIVIL의 최대·최소주응력을 나타낸 값이다.

표 2.4 다이아프램 및 케이블 정착부 보강판의 최대·최소 주응력 비교

구 분	MIDAS/Civil		LUSAS				비고
	최대주응력(+)	최소주응력(-)	최대주응력(+)		최소주응력(-)		
다이아프램	24497.2	-	18243.5	(20242.0)	-	-	
케이블정착부 보 강 판	-	29086.8	-	-	16031.7	(19172.0)	

최대주응력, 즉 인장응력이 주로 발생하는 부분은 그림 2.3과 그림 2.4에서 보듯이 다이아프램과 케이블정착부 수직보강판이 연결되는 부분에서 발생한 것을 볼 수 있다. 이것은 마주보고 있는 케이블장력의 수평성분이 다이아프램에 강력한 인장력을 유발하며, 또한 케이블장력의 수직성분에 의한 압축력이 다이아프램에 면외변형을 유발하여 다이아프램에 응력집중을 유발한 것으로 판단된다.

최소주응력, 즉 압축응력이 주로 발생하는 부분은 그림 2.5와 그림 2.6에서 보듯이 케이블 정착부 보강판에서 발생한다.

2.7 결 론

(1) 보강형 케이블 정착부

표 2.5 보강형의 처짐형상 비교

	케이블C1	케이블C7	케이블C8	Gusset	브라켓 정착구
X축 처짐값 (mm)	0.5	1	0.5	0.5	1.3
Y축 처짐값 (mm)	6.3	6	7.4	6.5	6.2

표 2.6 정착구의 응력 비교

부재	케이블 C1 파이프정착구 (단위:kgf/cm ²)	Gusset 정착구 (단위:kgf/cm ²)	브라켓 정착구 (단위:kgf/cm ²)	비 고
다이아프램	1049.4	628.7	645.7	
횡리브	1181.5	516.2	542.9	
정착구	2108.6	2415.1	1488.6	
웹	1616	1430.0	1193.5	

① LUSAS로 구조해석을 확인한 결과, 각 부분마다의 응력의 위치는 변하였지만 대부분 비슷한 부분에서 응력 집중현상을 보였고, 정착구의 유효응력은 전부 허용응력을 만족하였다.

하지만 파이프 정착구의 문제점을 해결하는 방안으로 정착구의 교체를 제안하여 그에 따른 응력 변화를 검토하고 비교한 표 2.4에 의하면 다른 정착구의 응력들이 파이프 정착부에 비해 작은 응력이 발생

함을 알 수 있다. 각각의 응력 집중 위치가 틀린것은 힘의 전달 경로에 따른 응력 분포가 다르기 때문인 것으로 사료 된다. 그리고 변형률도 거의 비슷한 결과를 보인다. 브라켓 정착구의 경우 Dx방향으로 큰 변화를 보이지만 허용치 이하인 것을 알 수 있다. 본 보고서에서 파이프 정착부의 문제점에 대한 대책으로 여러가지 형식의 정착구를 완도대교에 적용하여 FEM 해석한 결과 Pipe형 정착구 보다 다른 형식의 정착구가 응력분포에 더 유리하다는 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 Gusset 정착구의 경우 케이블 정착구 역시 원형으로 되어있다는 점이 제작상의 문제로 야기될 수 있을 것이다.

② 브라켓 정착구의 경우 정확한 설계사례를 적용하지 못하고 파이프 정착구와의 비슷한 치수를 대입하여 비교 분석하였고 외측 웹브와의 연결을 강철 연결하여 완전 결합 조건으로 하였기 때문에 용접에 대한 주의가 야기된다.

각각의 정착구의 피로 검토는 거의 비슷한 결과를 보인다. 주형이 되는 부분의 형상이 먼저 파괴되고, 다이어프램이나 횡리브의 경우 응력이 큰 부분에서 먼저 파괴에 도달함을 보인다. 이로 인해 정착부의 형상이 다름으로 인해 구조물에 미치는 영향은 거의 동일하다고 사료된다.

(2) 주탑 케이블 정착부

① 전체적으로 발생한 최대·최소 주응력이 사용재료에 따른 허용응력이하인 것으로 보아 안전한 것으로 판단된다. MIDAS/CIVIL의 해석자료와 비교한 결과, 최대주응력의 크기는 비슷한 것으로 해석되지만 발생위치는 상이한 것을 알 수 있었다. MIDAS의 경우는 최대주응력이 케이블 수직보강판과 수평보강판 접합부에서 응력집중이 발생하였으며, 국부최소주응력이 주탑 수직보강판의 상부에서 발생한 것을 그림 2.10에서 확인할 수 있다. LUSAS의 경우는 주탑 수직보강판의 하단에서 발생한 것을 그림 2.8에서 확인할 수 있다. 일반적으로 힘의 전달경로상 최대압축응력은 주탑 수직보강판의 하부에서 발생하는 것이 타당하다고 판단된다.

② 최대주응력은 마주보는 케이블장력의 수평성분으로 인하여 주탑 다이어프램부에 발생하였다. 발생위치는 케이블 C4의 하부 다이어프램이며, 그 크기는 $F_{s1} = 15358.0 \text{ tf/m}^2$ 이다.

마이더스로 FEM 해석을 실시한 주탑 케이블 정착부에서 발생하는 응력집중현상은 크게 최대, 최소 합이 6가지로 나타났으나 그림 2.11~2.18, LUSAS를 이용한 FEM 해석시는 크게 세 부분에서 응력집중현상이 발생하였다. 인장지배영역으로 각 케이블 정착부의 다이어프램에서 발생하였으며, 케이블 수직보강판과 직교 연결되는 부분에서, 다이어프램의 Man hole부분에서 주로 발생한다. 압축지배영역으로는 주탑 케이블 수직 보강재에서 발생하며, 케이블 정착판의 강력한 케이블 장력에 의해 발생하는 것으로 판단된다.

■ 참고문헌

1. 대한토목학회(2000), “특수교량기술세미나 논문집 현수교 및 사장교”.
2. 마이더스아이티(2001), “사장교의 케이블 정착부 국부해석 기술자료”
3. 삼성중공업 주식회사(2002) “강바닥관교의 설계 및 시공성 향상방안 연구최종보고서”
4. 현대건설기술연구소 “제2진도대교 가설공사 주탑 케이블 정착부 설계 검토” 2004
5. (주)청석엔지니어링, 김재혁, 최인덕, 이원철(2005), “세계의 철도교”, 구미서관.
6. 마이더스아이티 “사장교의 케이블정착부 국부해석 기술자료”
7. 일본 도로교 시방서 II.