

해상 사장교의 Pipe형 케이블 정착구에 관한 구조해석

공병승* · 홍남식**

*동서대학교 건축·토목시스템공학부 토목공학과

**동아대학교 토목해양공학부

Structural Analysis of a Cable Anchor System for a Cable-Stayed Bridge over the Sea

BYUNG-SEUNG KONG* AND NAMSEEG HONG**

*Division of Civil and Architecture, Dongseo University, Busan, Korea

**Division of Civil and Ocean Engineering, Donga University, Busan, Korea

KEY WORDS : Cable-Stayed Bridge 사장교, Cable Anchor System 케이블 정착구, Pipe Type Anchor System Pipe형 정착구, Bearing Plate Anchor 지압형 정착구

ABSTRACT : The cable connection zone of the cable-stayed bridge transfers dead-load, live-load, and second-load to the cables on the structural joint zone of the cables and the main girders are the most critical parts in which big cable tensile forces are generated by those loads. Therefore, it is necessary to thoroughly check the main girder, structurally to secure the required stability. Because of the heavy tensile force of cables linked in the connection zone of the cable-stayed bridge, locally concentrated stress, as well as the dispersion of stress, occurs in the structurally contacted point of cable and main girder thus, we need to make a thorough investigation through a detailed structural analysis. Directly delivering the tensile force to the connection zone of the cable, the consequently big effect in the tensile force fluctuation caused by the live-load will make it necessary to review the fatigue strength. As the connection zone of the cable is designed to resist the tensile force of the cable, which is applied to a connecting section as a concentrated force, thick plates are used. These plates are frequently made of welded structure, thus, the investigation of the welding workability is inevitable.

1. 서 론

사장교는 케이블을 이용한 탄성지점의 구성으로 교량에 재하된 고정하중을 케이블을 통해 주탑에 전달시킴으로서 보강형 단면에서 고정하중에 의한 영향을 최소화하고, 또한 효율적인 구조계를 형성, 고정하중 이외의 하중에 대해서도 적절하게 저항할 수 있게 구성되어 교량의 장대화를 가능케 한다. 이러한 구조계에서 보강형 거더와 정착구로 작용하는 하중 흐름을 갖게 되며, 이런 하중흐름의 과정에서 케이블 정착점에 응력집중을 유발하게 되어 이에 대한 검토가 요구된다(박연수 등, 2003).

사장교의 케이블 정착부는 케이블과 주형의 구조상의 접점에 있어서 보강형의 자중, 활하중 및 2차하중을 케이블에 전달하며, 이로 인한 큰 케이블 장력이 발생하는 중요한 부분이다(현대건설기술연구소, 2004). 정착부에는 강력한 케이블 장력이 작용하기 때문에 국부적인 응력집중 현상이 발생할 뿐만 아니라 응력교란이 심한 부분이므로 상세 구조해석에 의한 정밀 검토가 필요하다. 또한 케이블 정착부에는 케이블 장력이 직접 작용하기 때문에 활하중 작용에 의한 장력변동의 영향이 커서 피로강도의 검토를 필요로 하게 된다. 케이블 정착부는 집중력으로서 작용하는 케이블 장력에 저항해야 하기 때문에 설계상 두꺼운 판을 이용하게 되며, 그것들은 좁은 범위에 집중적으로 용접구조물이 구성되는 경

우가 많아서 용접 시공성의 확인도 필요하다(코비코리아, 2004).

완도대교에서 사용된 형식은 Pipe형식의 정착구조로서 정착부의 하단이 Girder의 하부 Flange면에서 돌출된다는 점, 대규모 사장교에서 Cable면이 경사져 있는 경우에는 Pipe가 Web면에 들어가지 않는다는 점, Pipe와 Web이 직접 용접되므로 Pipe와 Web의 용접상의 특별한 배려가 필요해진다는 점 등의 문제가 발생할 우려가 있다. 이러한 부분에 특히 국부해석을 통한 응력흐름을 파악할 필요가 있다고 사료된다(건설교통부 익산지방국토관리청, 2003).

특히 완도대교의 케이블 정착부는 외측 Web, 강바닥판, 하부 Flange, Diaphragm에 직접 강관 Pipe가 용접된 구조로 강력한 케이블 집중력을 주형에 분산, 전달하는 과정에서 용접부 부근에 큰 집중응력이 발생할 것으로 판단되어 이 부분에 대한 피로강도 감소를 위한 목적으로 FEM 해석을 통한 최적 상세를 찾기 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다(Kanzuhiko and Yasuhiro, 1991).

본 연구에서는 강바닥판교의 케이블 정착부에 대한 국부상세해석을 통하여 완도대교의 기존 구조계산서상에 케이블 정착부에 대한 안전성을 검토하고, 정착부의 안전성 확보를 위한 보강방안을 제시하고, 합리적인 설계 및 시공이 이루어 질 수 있도록 하고자 한다.

2. Pipe형 케이블 정착구의 특징 및 문제점

2.1 Pipe형 케이블 정착구의 특징

제1저자 공병승 연락처 : 부산광역시 사상구 주례2동 산69-1 051-320-1821 kongbs@dongseo.ac.kr

본 연구목표로 완도대교에 사용된 케이블 정착구의 형식은 Pipe Anchor System으로 그 구조는 Fig. 1와 같이 주형 또는 중형의 복부판에 파이프를 설치하고 여기에 케이블을 정착한다. 케이블 정착방향이 복부판에 대해 각기 각도를 가진 경우 제작이 어려운 단점이 있다.

힘의 전달경로는 Bearing Plate → 정착강관 → 하부플랜지, 복부판, 다이아프램 → 지압판 → Deck Plate이며 특징으로는 복부판과 강관의 일체화로 인해 보강구조가 간단하고 경제적이며, 노출부 최소화로 측면에서의 미관이 비교적 양호 하지만 주거더 Web와 강관 접합시 정밀 제작과 용접구조물의 피로강도 개선을 위한 조치가 필요하다. 시공사례로는 일본의 Meiko Nichi 교, Ikuchi교, 국내의 영흥대교 등이 있다(민상기와 임덕기, 2001).

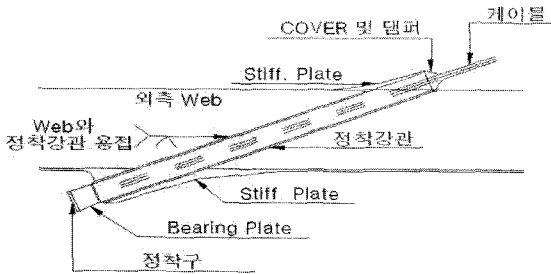


Fig. 1 A plane figure

2.2 단면 형상 및 케이블 정착강관 제원

Fig. 2는 케이블의 번호 및 위치이며, Fig. 3은 Pipe형 케이블 정착구의 측면 형상이다.

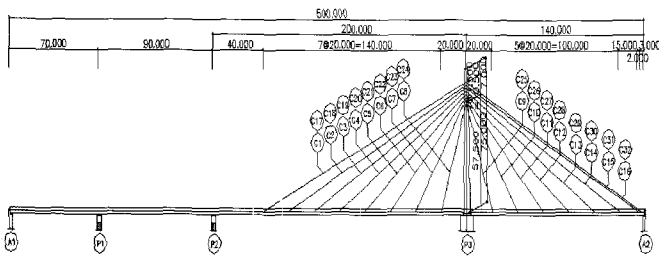


Fig. 2 Location of cable anchor system

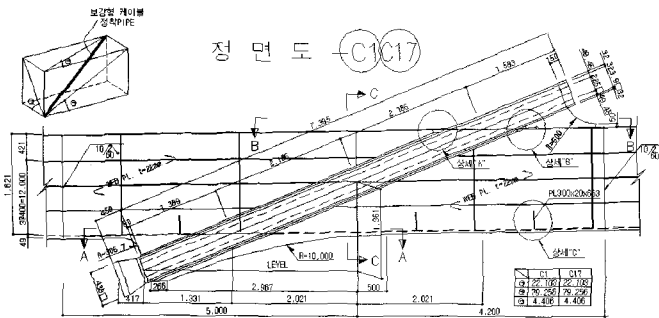


Fig. 3 Study on the side of cable anchor system

Table 1 Cable anchor pipe of Whan-Do bridge

번호	길이[m]	내경[m]	두께 [mm]	내경/ [mm]	비고
C1	7.395	323.9	32.0	5.06	
C2	6.735	323.9	32.0	5.06	
C3	6.066	323.9	32.0	5.06	
C4	5.190	323.9	32.0	5.06	
C5	4.534	323.9	32.0	5.06	
C6	3.899	323.9	32.0	5.06	
C7	3.338	244.5	32.0	3.82	N.G.
C8	2.921	244.5	32.0	3.82	N.G.
C9	3.024	244.5	32.0	3.82	N.G.
C10	3.439	244.5	32.0	3.82	N.G.
C11	3.996	273.0	32.0	4.27	N.G.
C12	4.611	323.9	32.0	5.06	
C13	5.247	323.9	32.0	5.06	
C14	5.880	323.9	32.0	5.06	
C15	6.317	355.6	32.0	5.56	
C16	6.275	368.0	32.0	5.75	
C17	7.395	323.9	32.0	5.06	
C18	6.735	323.9	32.0	5.06	
C19	6.066	323.9	32.0	5.06	
C20	5.190	323.9	32.0	5.06	
C21	4.534	323.9	32.0	5.06	
C22	3.899	323.9	32.0	5.06	
C23	3.338	244.5	32.0	3.82	N.G.
C24	2.921	244.5	32.0	3.82	N.G.
C25	3.024	244.5	32.0	3.82	N.G.
C26	3.440	244.5	32.0	3.82	N.G.
C27	3.996	273.0	32.0	4.27	N.G.
C28	4.618	323.9	32.0	5.06	
C29	5.267	323.9	32.0	5.06	
C30	5.943	323.9	32.0	5.06	
C31	6.393	355.6	32.0	5.56	
C32	6.352	368.0	32.0	5.75	

2.3 정착 강관재에 대한 문제점

평판을 이용하여 강관을 제작하게 되면 곡률도입시 잔류응력이 발생하게 된다. Table 2(일본 도로교 시방서 II)에서는 이러한 잔류응력에 의한 피해를 최소화하기 위해 관의 내측 반경이 관두께의 5배 이상이 되도록 규정하고 있다. Table 1의 비교란에 나타나는 N.G.는 이러한 규정을 만족하지 못하여 보강방안이 요구되는 항목이다.

완도대교 강관의 제작방법에 대해서는 도면에 명확히 기록되고 있지 않으나, 도면의 수량표를 기준으로 볼 때 평판을 구부러 곡률을 도입하여 제작되는 방법일 것으로 판단된다.

일본 철강 제조업체의 예를 보면, 이와 같이 내경이 작은 강관의 제조 가능(일반적으로 이용되고 있는 기성 강관)한 관 두께는 19mm 이하이며, 제조가 가능하더라도 용접의 신뢰성과 피로 강도에 대한 추가적인 검증이 실시되어야 한다(Fujii et al., 2000).

Table 2 Japanese highway bridge specification II 1.6 H14.3(translation)

3) 주요부재에 있어서 냉간압입가공을 수행하는 경우, 내측반경은 판두께의 15배이상으로 하는 것이 바람직하다. 단, 강재 규격에서 충격시험이 규정되어 있는 강종으로 JIS Z2242에 규정하는 샤류피 충격시험의 결과가 표-해 1.6.2에 나타내는 조건을 만족하고, 또한 화학성분중의 전질소량이 0.006%를 넘지 않는 재료에 관해서는, 내측반경을 판두께의 7배이상 및 5배 이상으로 하여도 좋다.

표-해 1.6.2 샤류피 흡수에너지에 대한 냉간압입가공반경의 허용치

샤류피흡수 에너지	냉간압입가공의 내측 반경	부기 기호
150이상	판두께의 7배이상	-7L, -7C
200이상	판두께의 5배이상	-5L, -5C

주)1번째의 숫자 : 최소압입반경의 판두께의 배율
2번째의 기호 : 압입가공방향(L : 최종압연 방향과 동일 방향, C : 최종압연방향과 직각방향)

즉, 원형관을 제작하는 과정에서 곡률도입을 위해 불가피하게 면의 방향의 물리적 힘이 도입되게 되므로, 이로부터 발생하는 문제점을 피하기 위해 기본적으로 강관형식의 사용을 피하는 것이 피로측면에서 유리하다고 할 수 있다.

3. 보강형 케이블 정착구의 FEM 해석

3.1 해석개요

케이블 정착부 검토를 위해서 사강교 전체계를 모델링하는 것은 전체모델링 해석시 많은 노력과 시간이 필요하며, 해석 결과의 분석 또한 어려움이 많다. 따라서 문제가 예상되는 부분만을 국부 상세해석하여 구조적 거동을 정확히 파악하는 것이 필요하다. 케이블 정착부 국부해석에서 어려운 점은 케이블 정착부가 여러 보강재들로 구성되어 있어서 실제와 가능한 근접하도록 모델링을 하고 전체 구조물의 거동을 국부 상세모델에 적절히 반영할 수 있도록 경계조건을 설정하는 것이다. 여기서는 “완도대교 구조 및 수리계산서상에 케이블 정착부 구조해석”편의 국내 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS/CIVIL을 이용하여 유한요소해석을 한 모델을 먼저 해석하여 각종 하중 및 설계제원을 결정하고(마이더스아이티, 2001), 동일한 모델을 범용 구조해석 프로그램인 LUSAS Ver. 13.6을 이용하여 FEM 해석을 실시하여 해석의 타당성을 검토하고 정착부의 안전성을 확보할 수 있는 최적의 구조상세를 제시하고자 한다.

3.1.1 사용재료에 따른 허용응력

일반적으로 FEM해석에서 사용하는 허용응력은 설계기준의 규준을 초과하며, Table 3과 같이 일반적인 부분과 집중적인 부분을 나누어 허용응력을 적용한다.

Table 3 Allowable stress for materials

강종	허용응력(kgf/cm ²)	
	일반부	집중부
	$f_a = 1.2f_{ta}$	$f_a = 0.8f_y$
SM520	2520	2880
SM400	1680	1920

3.1.2 사용강재 두께

사용강재의 두께와 강종은 Table 4와 같이 분류하여 사용되었다.

Table 4 Thickness and kinds of materials

부재	보강형									정착구
	상부 플랜지	하부 플랜지	웹	U-Rib	상부 I-Rib	하부 I-Rib	웹 I-Rib	다이아 프램	횡리 브	
두께 (mm)	10, 14	12	12, 22	8	16	14	13	12, 16	12	32
사용 강종	SM 520	SM 520	SM 520	SM 520	SM 520	SM 520	SM 520	SM 400	SM 400	SM 520

3.1.3 경계조건 설정

Main Girder 절단부의 절점들을 도심부의 단면 무게중심 점과 Rigid Link로 연결하여 전체계 구조해석에서 나온 결과 값인 처짐변위(Dx, Dy, Dz), 회전변위각(Rx, Ry, Rz)을 계산하고 국부해석모델에 강제변위로 가하여 국부해석을 수행하여야 한다. 그러나 구조계산서상의 국부해석모델은 보강형의 전면과 후면을 고정지점, Y-Z평면의 대칭성을 이용하여 대칭되는 절점의 Dx, Ry, Rz를 구속하여 Half Modeling으로 국부해석을 수행하였으므로 구조계산서상의 모델링의 타당성을 검토하기 위해서 구조계산서상의 지점조건과 동일한 조건을 적용하였다(삼성중공업주식회사, 2002).

3.1.4 작용하중

케이블 정착점 지점의 국부응력을 검토하기 위한 하중은 고정하중에 의한 케이블 반력과 활하중에 의해 발생하는 반력을 고려한 케이블 장력의 최대치를 사용하여 케이블 정착 판지점에 면하중으로 재하하고, 그 값으로, $F = 575.54 \text{ ton}$ ($4580t/m^2$ 의 하중을 Local Distributed Load로 적용)가 적용된다. 하중조합에 따른 케이블 정착부의 장력이 200 ~ 700 ton의 큰 장력 변동이 있고, 각각의 케이블 정착부 별로 케이블 장력이 달라지므로 전체해석을 통한 정확한 케이블 장력을 계산할 필요가 있을 것으로 사료된다.

3.2 보강형 케이블 정착부 국부해석 결과

3.2.1 처짐형상

보강형 케이블 정착부의 처짐형상(Deformed Mesh)을 Fig. 4에서 확인한 결과, X방향으로 $DX = 0.500217E-3 \text{ m}$, Y방향으로는 $DY = 6.3170835E-3 \text{ m}$ 의 처짐이 발생한다. 이는

보강형 케이블 정착 파이프가 3차원의 각도를 가지고 있으므로 케이블 장력이 수평하중과 수직하중으로 보강형에 전달되며 수직하중에 의해서 보강형의 처움림현상이 강하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 보강형의 처움림현상은 상하부 플랜지에 우력모멘트를 발생시킬 것으로 예상되며, 우력모멘트에 의해서 다이아프램 및 횡리브에 비틀림을 유발할 것으로 사료된다(대한토목학회, 2000).

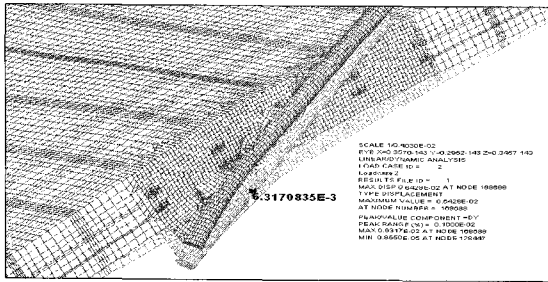


Fig. 4 Deformed Mesh

3.2.2 응력 분포도

발생한 응력은 “Maximum Distortional Energy Density Criterion”을 적용한 Von-Mises Stress(유효응력)로 평가한다. Von-Mises Stress는 다음식과 같다.

$$\sigma_{eff} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (1)$$

여기서, σ_1, σ_2 는 주축 1,2 방향의 주응력이다.

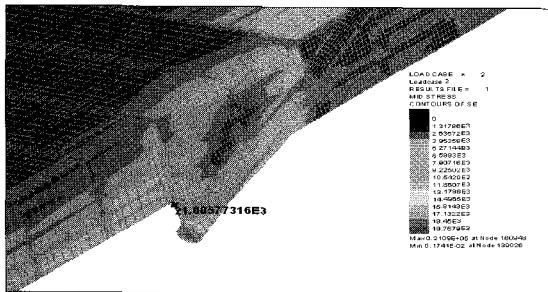


Fig. 5 All effective stresses of stiffening girder cable anchor system

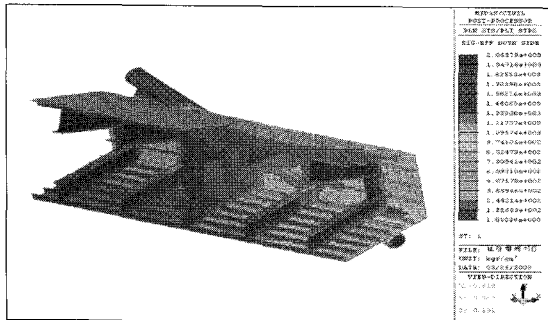


Fig. 6 MIDAS/CIVIL maximum effective stress in structural calculation book

LUSAS Ver.13.6에서는 유효응력이 SE로 표현되며 Fig. 5의 결과와 같이 전체적으로 유효응력은 케이블 정착부 웹플랜지, 케이블 정착 파이프, 파이프보강재에서 큰 유효응력이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 최대 유효응력은 케이블 정착부의 정착 파이프 보강재부분에 발생되며, $SE_{max} = 21085.773 t/m^2$ 크기의 유효응력이 발생하였다. 이는 케이블 장력의 수평성분의 영향인 것으로 판단되며 Fig. 6의 구조계산서상의 최대유효응력과 비슷한 결과를 보이는 것을 알 수 있다.

내부 다이아프램의 유효응력은 케이블 정착 파이프와 접하는 부분에서 발생하였으며, 유효응력의 크기는 $SE_{max} = 10493.8 t/m^2$ 인 것을 알 수 있다. 다이아프램부의 Man Hole부근에도 유효응력이 다소 크게 나타나는데 이 부분은 상하플랜지의 우력에 의한 비틀림으로 발생한 응력인 것으로 사료된다.

횡리브 역시 다이아프램과 비슷한 응력흐름임을 알 수 있다. 비틀림으로 인한 횡리브 내부에 응력집중을 확인할 수 있으며, 케이블 정착 파이프와 연결부에서도 응력집중을 발견할 수 있다.

3.2.3 MIDAS/CIVIL과 LUSAS해석 결과비교

보강형 케이블 정착부 부분을 LUSAS를 이용하여 수치해석한 결과 아래의 Table 5와 같다. 전체적으로 Table 3과 Table 4의 사용재료에 따른 허용응력 이하로 안전한 것으로 판단된다. MIDAS/CIVIL모델링의 경우 케이블 정착판의 면이 파이프와 직교하지 않아서 수정하여 모델링을 하였다. 이러한 이유로 결과 값이 차이를 보이는 것으로 판단된다.

Table 5 Effective stress of stiffening girder cable anchor system

위치	MIDAS 유효응력 (t/m^2)	LUSAS 유효응력 (t/m^2)	비교 (유효응력 비율 %)	허용응력 (t/m^2)
다이아프램	7920.4	12493.8	132.5	19200
횡리브	18413.0	18815.3	102.2	19200
Pipe 정착부	17344.3	19627.5	113.2	28800
정착부	20687.9	21085.7	101.9	28800

최대 유효응력은 LUSAS의 경우는 $f_{EFF} = 21085.77t/m^2$ 으로 파이프 보강재와 외측웹의 접점부분에 발생하였고 MIDAS/CIVIL모델링의 경우는 $f_{EFF} = 20687.9t/m^2$ 로 파이프 보강재 내부에 발생하였다. 이는 앞에서 언급한 정착판의 면과 파이프가 직교하지 않기 때문인 것으로 판단된다.

4. 주탑 케이블 정착부 FEM 해석

4.1 해석 개요

주탑 정착부는 케이블 소켓의 인장력을 주탑의 수직력으로 변환시키며, 이때 사용되는 응력 전달기구로서 베어링 플레이트, 베어링 플레이트 지지판, 지지종리브 및 다이아프램 등을 지지하는 주탑 플랜지로 구성되어 있다. 이러한 구조부재들은 그 구성이 매우 복잡하며 특히 소켓으로부터 전달되는 하중

의 방향이 케이블별로 상이하며, 이를 지지하는 각각의 지지 플레이트 각도가 모두 다르므로 이에 따르는 상호간의 응력 흐름 파악과 부재의 적절한 배치를 위해서 Thick shell 요소를 이용한 FEM해석이 필요하다.

주탑부에 사용된 강재의 두께는 Table 6과 같이 분류되며, 주탑부의 케이블 정착부의 위치와 국부상세 해석부분의 제원은 Fig. 7과 같다.

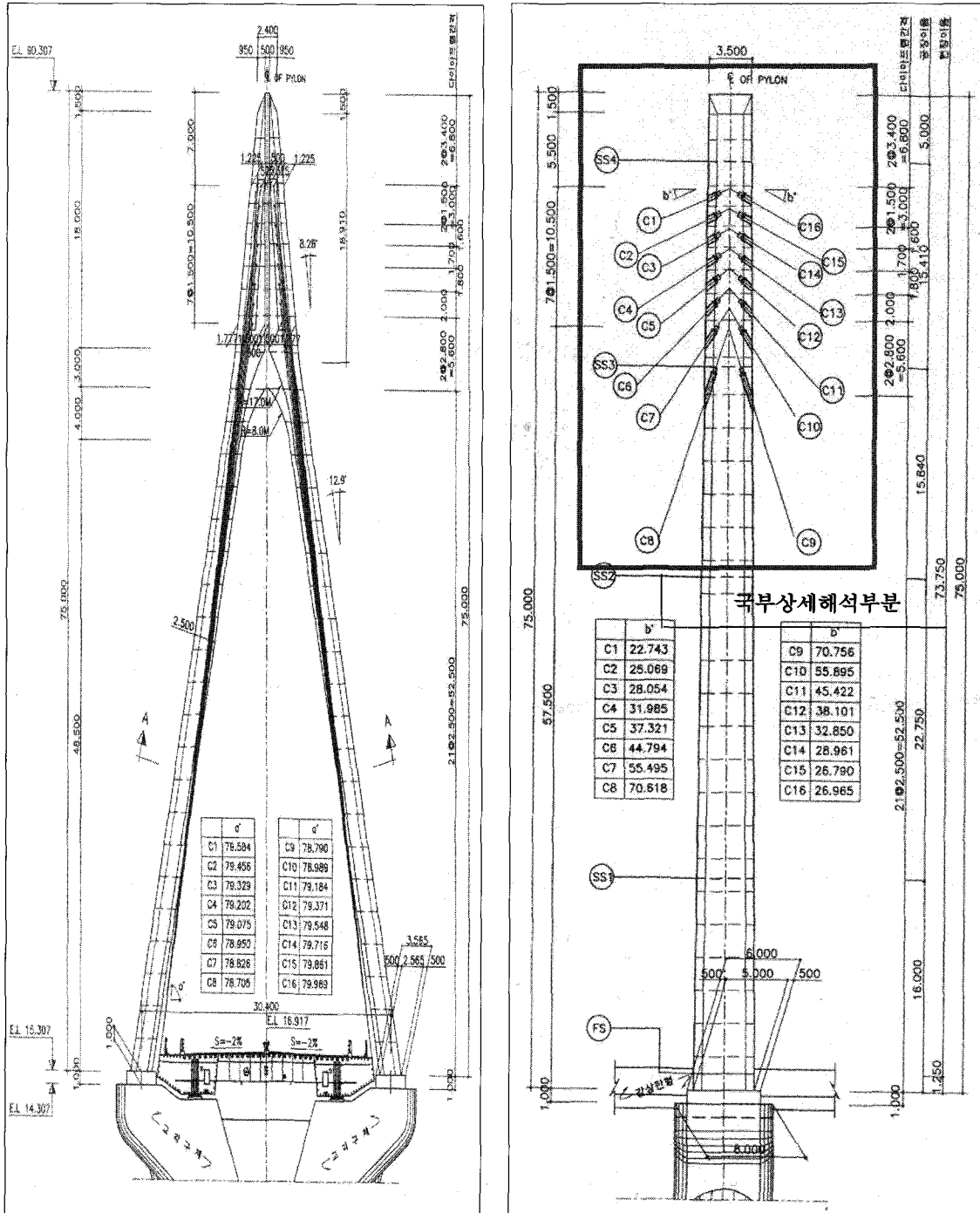


Fig. 7 Study on location for pylon cable anchor system

Table 6 Thickness of using materials

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

4.2 주탑 케이블 정착부 상세 구조해석결과

Fig. 8의 케이블 장력에 의한 변형도를 보면, 두 프로그램은 비슷한 결과값을 보이고 있으며, C1~C8(Fig. 7의 좌측케이블)보다 C9~C16(Fig. 7의 우측케이블)의 케이블 장력이 상대적으로 크게 재하되었으므로 Y방향으로 6.3cm의 변형이 생긴

것으로 사료된다. 주탑 케이블 정착부는 케이블 장력의 수직 하중은 보강판의 압축응력을, 수평하중은 다이아프램에 인장 응력을 유발할 것으로 예상된다. 그러나 각 케이블 정착부의 각도는 상이하며, 케이블 장력 또한 케이블별로 다르므로 세부적인 응력확인이 필요할 것으로 판단된다.

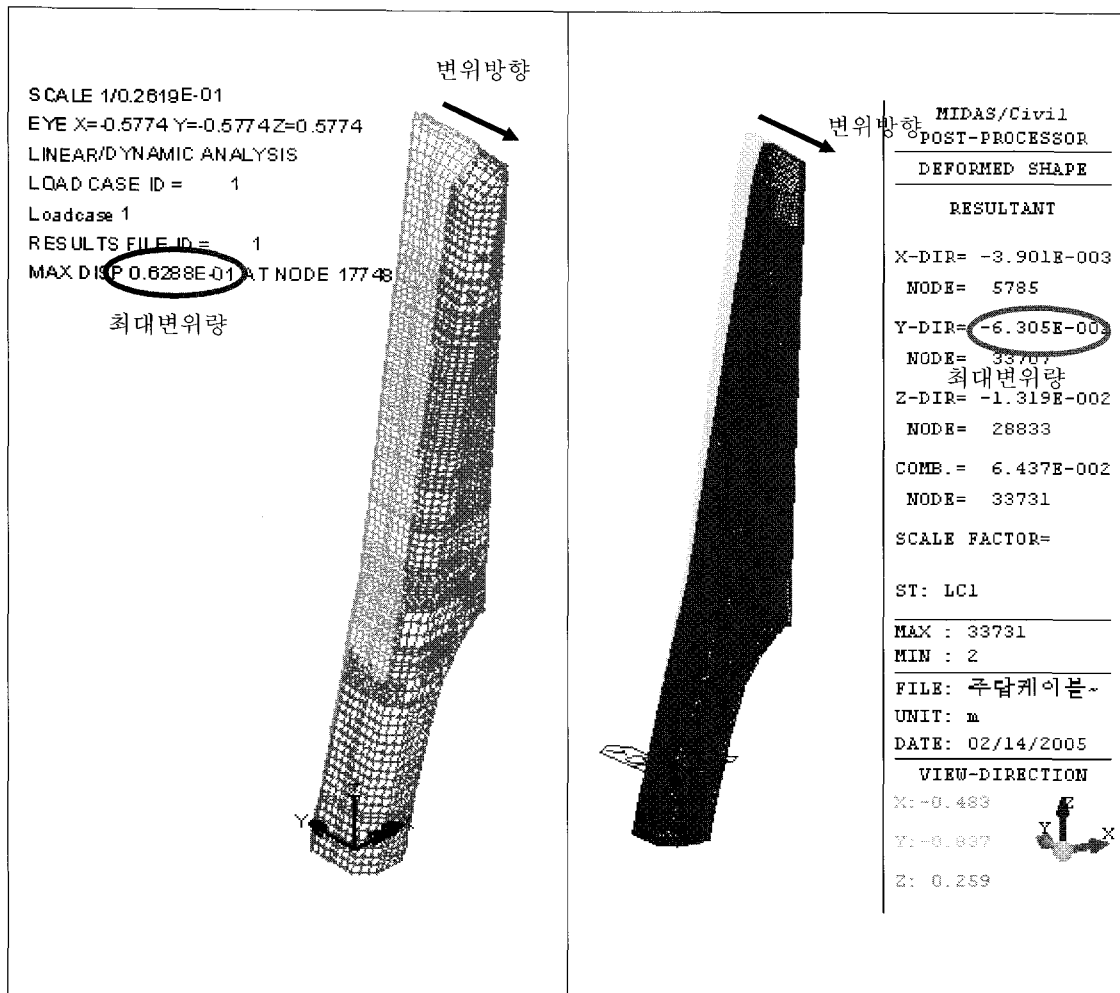


Fig. 8 Comparison between deformation of LUSAS and MIDAS/CIVIL

4.2.1 최대주응력의 지배영역

MIDAS의 FEM 해석결과에서 최대주응력, 즉 최대인장응

력은 Fig. 9~Fig. 12 보는 바와 같이 크게 4가지 형태로 발생하였다. Fig. 9은 케이블 No 1에서 발생하여 전체적으로 상부

케이블에서 발생하였으며 LUSAS 해석시에는 발생하지 않았다. Fig. 10에서 발생한 집중응력은 LUSAS 해석에서도 볼 수 있는 응력집중으로 케이블 수직 보강판과 다이아프램이 직교하는 부분에서 발생하였으며, Fig. 11에서는 다이아프램의 Man Hole부분에서 발생하였으며 LUSAS 해석시에도 동일하게 큰 인장응력이 발생하였다. Fig. 12에서는 케이블 수직 보강재에서 발생하였으며, LUSAS에서는 압축응력이 주로 발생하는 것을 확인할 수 있다.

4.2.2 최소 주응력의 지배영역

최소 주응력, 즉 최대 압축응력은 크게 4가지의 유형으로 관찰되었다. Fig. 13과 Fig. 14는 다이아프램과 연결되는 케이블 수직 보강재의 상부의 바깥쪽에서 발생하였다. Fig. 15와 Fig. 16은 LUSAS의 결과에서도 확인할 수 있었던 응력집중으로 케이블 정착판과 수직 보강재가 연결되는 부분에서 발생하였으며, 앞으로 향후 연구시 집중적으로 다루어져야 할 것으로 판단된다.

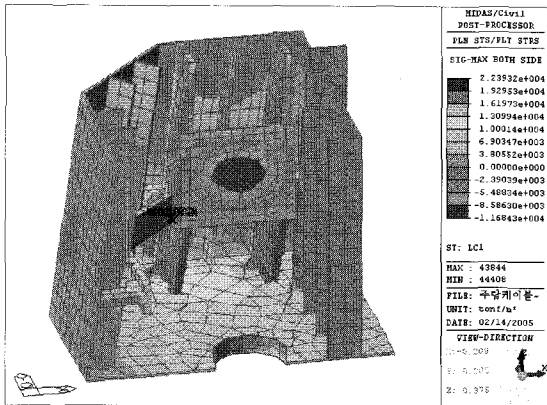


Fig. 9 Maximum principal stress Case 1(C1)

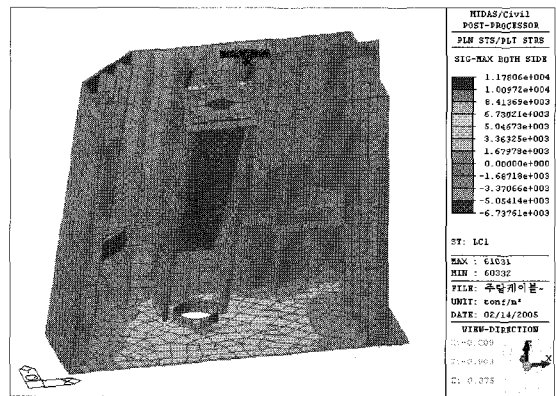


Fig. 12 Maximum principal stress Case 4(C7)

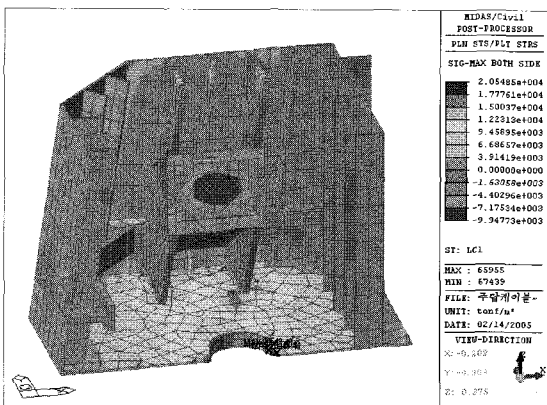


Fig. 10 Maximum principal stress Case 3(C4)

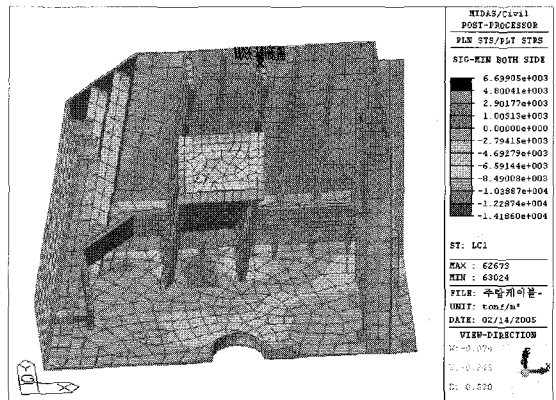


Fig. 13 Minimum principal stress Case 1(C6)

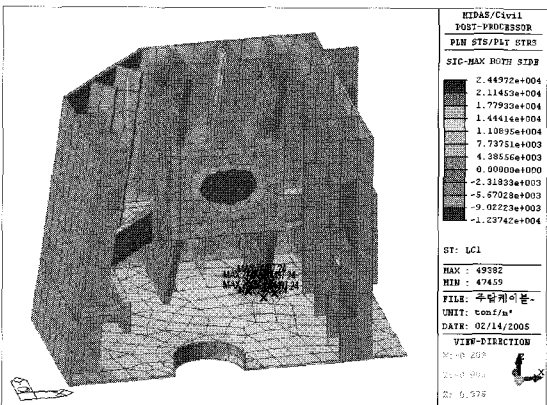


Fig. 11 Maximum principal stress Case 2(C2)

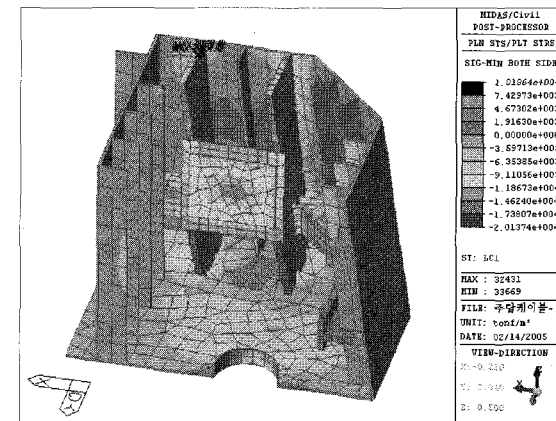


Fig. 14 Minimum principal stress Case 1(C16)

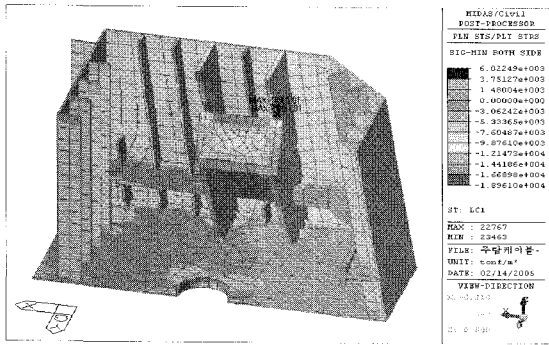


Fig. 15 Minimum principal stress Case 2(C11)

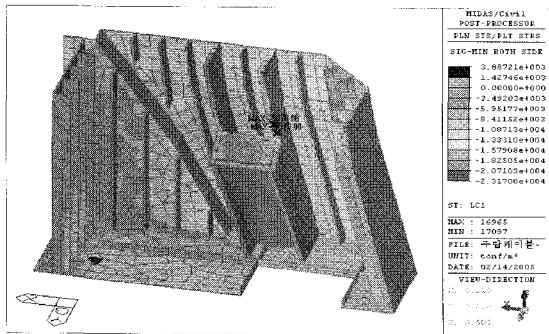


Fig. 16 Minimum principal stress Case 2 (C9)

4.2.3 해석결과 비교.

Table 7 Comparison between maximum and minimum principal stress of pylon

케이블 NO	케이블 장력 (tf/m ²)	MIDAS/CIVIL		LUSAS	
		최대주 응력(+)	최소주 응력(-)	최대주 응력(+)	최소주 응력(-)
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·최소 주응력발생지점의 동일위치에서의 MIDAS/CIVIL의 최대·최소 주응력을 나타낸 값이다.

Table 8 Comparison between maximum and minimum principal stress of diaphragm and cable anchor system

구분	MIDAS/Civil (kgf/cm ²)		LUSAS (kgf/cm ²)		비고
	최대주 응력(+)	최소주 응력(-)	최대주응력(+)	최소주응력(-)	
다이아프램	24497.2	-	18243.5 (20242.0)	-	
케이블 정착부 보강판	-	29086.8	-	-	16031.7 (19172.2)

Table 7과 Table 8의 주탑 케이블 정착부의 최대주응력(최대인장응력)과 최소주응력(최대압축응력)을 확인한 결과, 크게 두가지 사실을 확인 할 수 있다.

최대주응력 즉, 인장응력이 주로 발생하는 부분은 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 Fig. 9~Fig. 16 에서 보듯이 케이블 정착부 보강판에서 발생한다.

5. 결 론

MIDAS와 LUSAS에 의한 구조해석을 확인한 결과, 전체적으로 LUSAS의 유효응력이 MIDAS의 그것보다 다소 높은 값이지만 모두 허용응력 이하인 것을 확인할 수 있다. 최대유효응력은 케이블 정착 파이프 보강재부분에서 집중되어 발생하였다. 이는 단순히 케이블 장력의 수평성분에 의해 발생한 것으로 판단되며, 파이프 보강재의 단면형상 변화를 통해서 집중응력발생을 제어할 수 있을 것으로 사료된다. 아직 케이블 정착 파이프 보강재의 상세설계가 미비하여 케이블 정착부의 정확한 FEM 해석 모델을 모사할 수 없지만 우선적으로 이를 실질적으로 곡률을 가진 곡선형으로 처리한 경우 응력흐름에 유리하여 피로강도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 케이블 정착 강관의 경우 2.3절에서 언급한 바와 같이 규정을 만족하지 못하므로 잔류응력, 용접 및 피로강도에 관한 연구가 심층적으로 이루어져야하며, 필요시 설계변경에 의한 피로강도 증진방안을 검토하여야 할 것으로 판단된다.

주탑부에서는 전체적으로 발생한 최대·최소 주응력이 Table 3의 사용재료에 따른 허용응력이하인 것으로 보아 안전한 것으로 판단된다. 최대주응력은 마주보는 케이블장력의 수평성분으로 인하여 주탑 다이아프램부에 발생하였고, 발생 위치는 케이블 C4의 하부 다이아프램이며, 그 크기는 $F_{st} = 15358.0 t/m^2$ 이다. Fig. 9~Fig. 16에서와 같이 크게 세 부분에서 응력집중현상이 발생하는데, 인장지배영역으로 각

케이블 정착부의 다이아프램에서 발생하였으며, 케이블 수직 보강판과 직교 연결되는 부분에서, 다이아프램의 Man Hole 부분에서 주로 발생한다. 압축지배영역으로는 주탑 케이블 수직 보강재에서 발생하며, 이는 케이블 정착판의 강력한 케이블 장력에 의해 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 케이블 정착판의 복잡한 국부응력을 소회할 수 있는 보강재의 합리적인 최적의 배치와 피로응력에 의한 세밀한 추가적인 구조 검토가 필요할 것으로 판단된다.

감 사 의 글

본 연구는 삼성물산(주)와 동서대학교의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 글을 드립니다.

참 고 문 헌

건설교통부 익산지방국토관리청 (2003). 군외~남창 도로확장 공사 구조 및 수리계산서(V).
 대한토목학회 (2000). 특수교량 기술세미나 논문집 현수교 및 사장교.

마이다스아이티 (2001). 사장교의 케이블 정착부 국부해석 기술 자료.
 민상기 임택기 (2001). "[현장소개]영흥대교(사장교)건설공사" 대한토목학회지, 제 49권, 제 1호, pp94~100.
 박연수, 공강주, 전양배, 박선준, 서병철 (2003). 일선 실무자를 위한 사장교 계획과 해석, 구미서관.
 삼성중공업주식회사 (2002). 강바닥판교의 설계 및 시공성 향상방안 연구 최종보고서.
 코비코리아(주) (2004). 제2진도대교 가설공사 보강형 정착부에 대한 검토.
 현대건설기술연구소 (2004). 제2진도대교 가설공사 주탑 케이블 정착부 설계 검토.
 Fujii Y. Toshiaki D. and Hirashita T. (2000). "Damage and Repair on the Dampers of Cable-Stayed Bridge", 本四技報, Vol 24, No 93, pp26~33.
 Kanzuhiko Y. and Yasuhiro Y. (1991). "A Study on the Fatigue of Ikuchi(生口)Bridge Steel Girder", 本四技報, Vol 15, No 57, pp1~21.

2005년 8월 21일 원고 접수
 2005년 9월 30일 최종 수정본 채택