건축용 타워크레인 마스트의 횡방향 지지요소인 월타이 부재력 특성곡선

Wall Tie Member Force Curve for the Construction Tower Crane

고 광 일[1] · 오 우 훈[2] · 이 은 택[3],†

Ko, Kwang-IL · *Oh, W. H.* · *Lee, E. T.*

요 약 : 타워크레인의 횡방향 지지와 마스트의 횡강성 및 강도를 확보하기 위하여 횡하중 저항요소로서 사용되는 것이 월타이(wall tie)이다. 본 연구에서는 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 독일 립헬사의 T형 타워크레인(기종 290HC, 작업반경: 70m, 인양하중: 12tf)을 대상으로 하고 마스트 및 월타이의 사용부재는 H형강보 구조의 구조물을 모델로 선정하여 월타이의 부재력, 월타이의 각도변화 및 각도범위에 따른 부재력의 변화를 분석하여, 실용적이고 안전한 월타이의 각도범위를 제안하여 현장기술자가 최적의 월타이를 배치할 수 있도록 하였다. 본 연구를 통하여 건축용 타워크레인의 축크양정을 증대시키기 위하여 설치되는 횡방향지지요소인 월타이의 부재력 계산식을 구하고, 이를 프로그래밍하여 마스트 중심과 월타이 브라켓 간 거리를 변화시키면서, 월타이 각도별 월타이 부재력을 반복계산하여 월타이 부재력 특성곡선을 그리고 이를 분석하였다.

ABSTRACT : Tower crane's wall tie is generally used for extending of mast height according to rising of lifting height. In order to get wall tie member force this problem, this study concerning wall tie is based on load data described in manual book of 290HC model. This study made the equation of wall tie member force and computer programming for calculating wall tie member force and then get $\theta - P$ curves(angle-wall tie force). After considering the θ-P curves, optimum angle range (48.4° ~77.2°) about wall ties Ⓐ, Ⓒ members was obtained. Member force of wall tie Ⓑ was changed from tension to compression or from compression to tension at 74^o in service and 54^o in out of service. When both horizontal force(H_A) and torsional moment (M_D) were varied from (+) to (-), wall tie force(A, B, C) were changed almost symmetrically about $\theta -$ axis. Because this study was based on wall tie analysis conditions, wall tie members in symmetric and ideal geometry shape used for analizing wall tie of tower crane, it is necessary to have more careful verification in order to apply generally the results of this study.

핵 심 용 어 : 월타이, 부재력, $\Theta - P$ 곡선, 타워크레인

KEYWORDS : wall-tie, member force, $\Theta - P$ curve, tower crane

1. 서 론

현재 건설산업은 고층화, 대형화, 복합화가 이루어지고 있는 추세이다. 이러한 현상에다 인건비의 상승과 사회적 3D업종 기피현상에 대한 대책으로 건설 장비를 사용하고 있다. 지속적인 건설 장비 성능의 발전으로 작업의 효율성이 제고되고, 경제성이 보장되면서 안전성이 확보되는 기계화 시공이 보편화되었다. 특히나 고층건물 시공 시 가장 큰 비중을 차지하고 있는 장비가 타워크레인(tower crane)이다. 최근 공동주택이나 주상복합빌딩과 같은 고층공사의 수요가 늘어남에 따라 타 양중장비에 비해 작업 생산성과 효율성이 높은 타워크레인의 활용이 증가추세를 보이고 있다.

그러나 타워크레인을 이용한 양중계획(박길재 등, 2001; 주진호 등, 1994)에 대한 연구에 편중되어 있어 가장 중요한 구조적인 안정성(장동일 등, 1992)에 관한 국내외 연구가 미흡한 실정이다. 타워크레인의 횡방향 지지와 마스트의 횡강성 및 강도를 확보하기 위하여 횡하중 저항요소로서 사용되는 것이 월타이(wall tie)이다. 월타이에 대하여 근원적

1) 정회원, 중앙대학교 대학원 건축학과 박사과정(kiko7600@hanmail.net)
2) 정회원, 중앙대학교 대학원 건축학과 박사과정(sonne77@nate.com)
3) 교신저자. 정회원, 중앙대학교 건축학부 부교수
(Tel: 02-820-5340, Fax: 02-812-4150, E-mail : etlee@cau.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2007년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

인 구조검토를 실시하도록 되어있으나, 구조설계가 경험적으로만 실시하고 있으며, 이에 대한 연구가 부족한 실정이다.

본 연구에서는 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 독일 립헬사의 T형 타워크레인(기종 290HC, 작업반경: 70m, 인양하중: 12tf)을 대상으로 하고 마스트 및 월타이의 사용부재는 H형강보구조의 구조물을 모델로 선정하여 월타이의 부재력, 월타이의 각도변화 및 각도범위에 따른 부재력의 변화를 분석하여, 실용적이고 안전한 월타이의 각도범위를 제안하여 현장기술자가 최적의 월타이를 배치할 수 있도록 실용성 있는 기초자료를 제시하고자 한다.

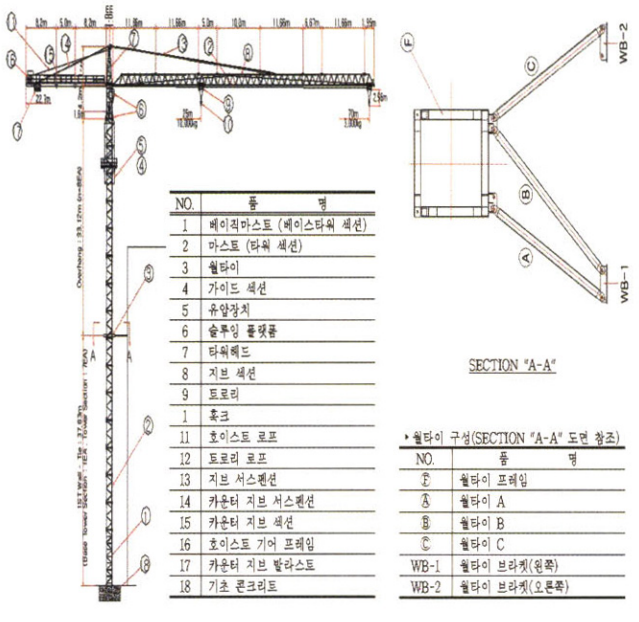
2. 기존연구동향

타워크레인 국내, 국외 연구개발 동향을 살펴보면 센싱, 거리계측, 제어기술 등을 활용하여 작업정보 및 양중위치를 제공하는 장비의 개념모델 및 프로토타입 개발에 관한 연구(김덕재 등, 2000)가 수행된 바 있다. 또한 타워크레인 양중작업의 효율성 및 안전성 향상을 위하여 GPS(global positioning system), 머신비전(machine vision)(이정호 등, 2002), 유전자 알고리즘(genetic algorithms)(이웅균 등, 2004)등의 기술을 활용하여 양중 프로세스 개선과 타워크레인과 야적장의 위치 및 해당 현장에 필요한 붐의 길이선정에 이용하도록 하는 연구가 수행되었다. 또한 건설공사의 양중작업의 효율성 향상, 양중계획의 최적화 및 합리화 내지는 타워크레인 사고원인 분석과 붕괴사고(이명구 등, 2001)의 구조적 분석에 관한 논문이 주류를 이루고 있다.

본 연구의 대상인 건축용 타워크레인의 월타이에 관한 설계·개발은 주로 1950년대 이래 독일 렙헬사(A.G., 1989; Norm, 1984), 프랑스 포테인사 등 제조메이커가 주도하여 왔다. 각 사마다 월타이의 형태나 계산식이 다소 차이가 있으며, 표준프레임을 제조사가 설계하고, 월타이는 현장특성에 맞게 장비설치사용자가 경험적 방법으로 설계하여 제작·설치하도록 유도하여왔다. 국내에서도, 외국으로부터 기술도입한 제조사가 월타이에 대한 설계를 하여 사용자에게 공급하여 왔다. 그러나 1997년말 이후로 제조사의 설계기술 부분의 취약화로 인하여 사용자가 임의로 현장제작한 월타이를 사용하여 시공된 타워크레인이 대부분이었다. 2002년 이후에 최대풍속을 가진 태풍에 의해 타워크레인 수십여 대가 전도 붕괴되는 자연재해사고를 겪으면서 타워크레인의 안전에 대한 사회적 인식이 강하게 요구되고 있다. 특히 초고층 건물공사 계획 시 건축계획과 장비계획이 초기단계에서부터 종합적으로 검토되어 건축시공의 합리화와 타워크레인 작업의 안전성 제고, 공사완료 후 건축용 타워크레인 해체작업 기술에 관한 연구 또한 반드시 이루어져야한다.

3. 타워크레인에 작용하는 하중

타워크레인에 작용하는 하중은 일반적으로 건축물에 작용하는 하중과 같이 정적하중, 동적하중, 횡하중으로 나눌 수 있으며, 본 연구에서는 지진하중에 대해서는 고려하지 않았다. 타워크레인의 구성요소 특성상 월타이에 작용하는 하중은 크레인 가동시에는 월타이 프레임에 수평력(H_A)과 비틀림모멘트(M_D)를 동시에 받지만, 비가동시에는 단지 수평력만 받고, 비틀림모멘트는 "0"이 된다. 비틀림모멘트는 타워크레인이 가동되어 회전운동 시 관성에 의하여 일어나는 모멘트이며, 크레인의 자중과 외력의 하중조합에 의하여 월타이 설치지점의 마스트 단면에서 수직력, 수평력, 비틀림모멘트가 발생하게 된다.



NO.	품 명
1	베이직마스트 (베이스타워 섹션)
2	마스트 (타워 섹션)
3	월타이
4	가이드 섹션
5	유압장치
6	슬루잉 플랫폼
7	타워헤드
8	지브 섹션
9	트롤리
1	훅크
11	호이스트 로프
12	트롤리 로프
13	지브 서스펜션
14	카운터 지브 서스펜션
15	카운터 지브 섹션
16	호이스트 기어 프레임
17	카운터 지브 발라스트
18	기초 콘크리트

▸월타이 구성(SECTION "A-A" 도면 참조)

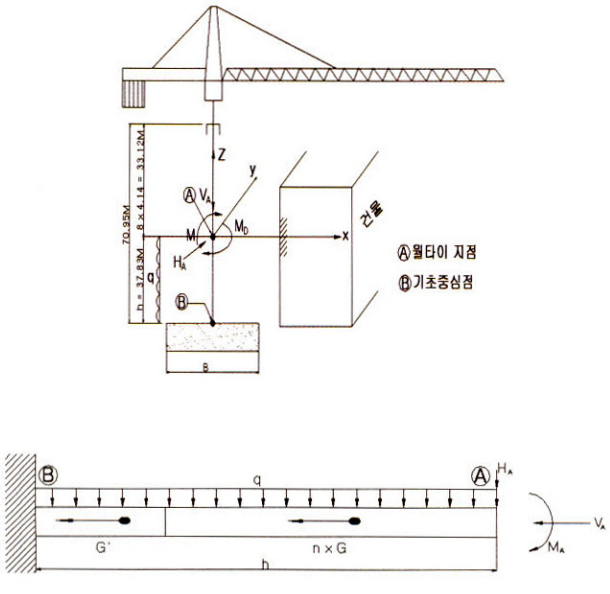
NO.	품 명
Ⓔ	월타이 프레임
Ⓐ	월타이 A
Ⓑ	월타이 B
Ⓒ	월타이 C
WB-1	월타이 브라켓(왼쪽)
WB-2	월타이 브라켓(오른쪽)

그림 1. 독일렙헬사의 290HC 조립도

본 연구의 대상 타워크레인인 작업반경 70m 베이직 마스트 8.85m 독일 렙헬사 290HC의 조립된 형상을 그림 1에 표현하였으며, 크레인 제조사에서 제공하는 작용하중 매뉴얼(A.G., 1989; Norm, 1984)을 참고하여 타워크레인의 기초하중(foundation loading, 표 1. 참고)을 계산사용 하였으며, 월타이의 안전성평가를 위한 검토작업은 가동 시와 비가동 시 기초하중표에서 월타이 설치지점에서의 해당하중 및 모멘트값과 풍하중을 각각 구분하여 월타이 프레임에 작용하는 수평력을 계산하고, 크레인 가동 시에는 비틀림모멘트가 고려되지만, 비가동 시에는 크레인의 회전운동이 없으므로 비틀림모멘트는 고려하지 않는다.

표 1. 립헬사 매뉴얼의 기초하중표

Qty. of. tow. sec.	Hook Height	크레인 가동 시			크레인 비가동 시		
M (KNm)	H (KN)	V (KN)	M (KNm)	H (KN)	V (KN)	M (KNm)	H (KN)
0	12,4	1829	17	707	1627	33	677
1	16,6	1904	19	730	1863	42	700
2	20,7	1986	20	753	2179	51	723
3	24,8	2075	22	776	2444	56	746
4	29,0	2170	23	798	2787	64	768
5	33,1	2289	50	821	3112	70	791
6	37,3	2447	52	844	3460	75	814
7	41,4	2633	55	867	3831	81	837
8	45,5	2829	56	890	4225	86	860
*9	49,7	2954	58	913	4297	87	883
		M_D = 478 KNm			M_D = 0 KNm		



V_A: 월타이 지점 Ⓐ에서의 수직력
(기초하중표에서 구함)
H_A: 월타이 지점 Ⓐ에서의 수평력
(기초하중표에서 구함)
M_A: 월타이 지점 Ⓐ에서의 전도모멘트
(기초하중표에서 구함)
M_D: 월타이 지점 Ⓐ에서의 비틀림모멘트
(가동시: M_D= 478kNm, 비가동시: M_D=0)
$\dot{q}$: 마스트 단위 길이당 풍하중
(가동시: 0.38kN/m, 비가동시: 1.67kN/m)
n: 마스트 개수

G: 마스트 1개의 자중
G′: 베이직 마스트의 자중

그림 2. 구조계 스케치도

3.1 월타이 지점 및 기초중심점에서의 반력계산

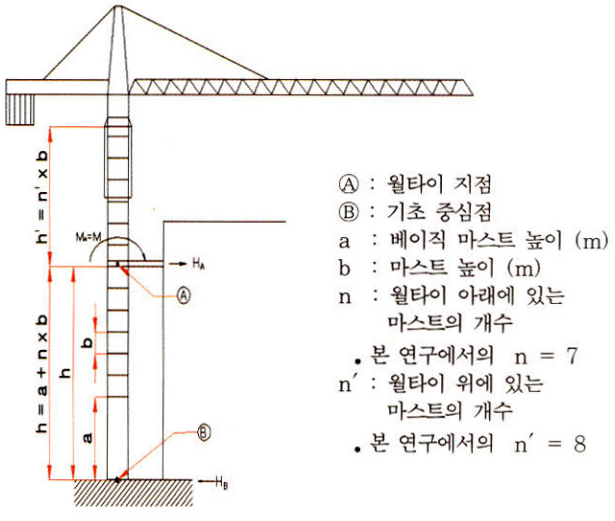


그림 3. 타워크레인의 지점반력

간단한 재료역학의 기본원리인 평형방정식을 이용하여 Ⓐ, Ⓑ 지점에서의 지점반력은 다음과 같은 과정을 거쳐 계산된다.

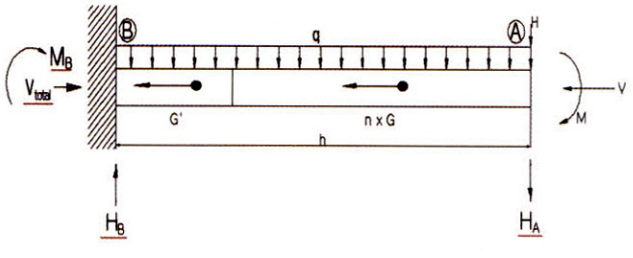


그림 4. 타워크레인의 하중도

전도모멘트(M)에 의한 Ⓐ, Ⓑ 지점에서의 반력과 반력모멘트를 계산하면 아래와 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$\frac{R_A \times h^3}{3EI} = \frac{M \times h^2}{2EI} \rightarrow R_A = \frac{3M}{2h}, \quad R_B = \frac{3M}{2h}$$

$$\sum M_B = 0$$

$$M_B + M - \frac{3M}{2h} \times h = 0 \quad \therefore M_B = \frac{M}{2}, \quad M_A = M$$

이와 유사하게 풍하중(q)과 수평력(H)에 의한 Ⓐ, Ⓑ 지점에서의 반력과 반력모멘트 그리고 수직력(V)와 마스트 자중(G, G')에 의한 수직반력 (V_{total})을 평형방정식과 자유물체도를 이용하여 구할 수 있으며, 그 식은 아래와 같이 얻어진다.

$$V_{total} = V + n \circ G + G'$$

$$H_A = H + \frac{3qh}{8} + \frac{3M}{2h}$$

$$H_B = \frac{3M}{2h} - \frac{5qh}{8}$$

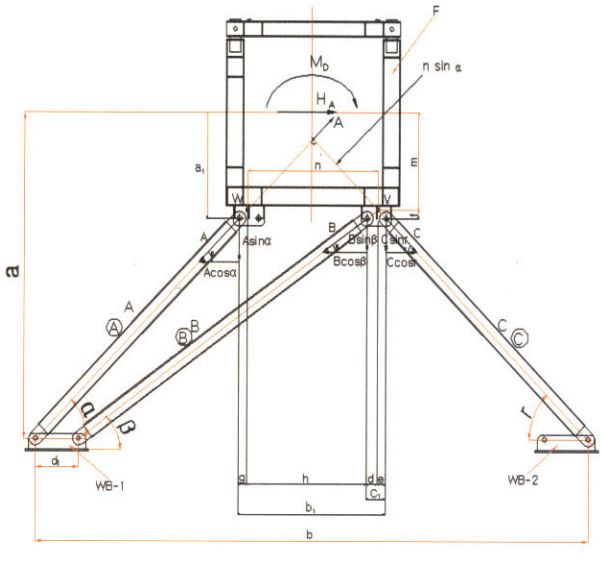
$$M_A = M$$

$$M_B = -0.5M + \frac{qh^2}{8}$$

3.2 비틀림 모멘트(M_D)

타워크레인의 가동 중 선회 시에 발생할 수 있는 비틀림모멘트 (M_D)는 본 연구의 대상 크레인의 제조사인 림헬사에서 제공하는 매뉴얼의 기초하중표 (표 1)에 의해 구해지며, 크레인의 비가동중에는 '0'이 된다.

4. 월타이에 작용하는 부재력(A, B, C)



A : 월타이 Ⓐ의 부재력
B : 월타이 Ⓑ의 부재력
C : 월타이 Ⓒ의 부재력
F : 월타이 프레임
Ⓐ : 월타이 부재
Ⓑ : 월타이 부재
Ⓒ : 월타이 부재
WB-1 : 월타이 브라켓
WB-2 : 월타이 브라켓
V : 월타이 부재 Ⓑ와 월타이 부재 Ⓒ가 만나는 교점
W : V점에서 월타이 프레임의 하단수평부재와 나란하게 그은 선이 월타이 부재 Ⓐ의 연장선과 만나는 교점
m : 월타이 프레임 중심에서 $\overline{WV}$에 내린 수직거리
n : W점과 V점을 연결한 수평거리

그림 5. 월타이 프레임과 어셈블리도

4.1 기하학적 형상을 고려한 조건으로부터 m, n 계산식 유도

기하학적 형상을 고려한 조건에서 m과 n을 다음과 같은 과정으로 유도한다.

$$d \cdot tan\beta = e \cdot tan\gamma \rightarrow e = \frac{d \cdot tan\beta}{tan\gamma}$$

$$d + e = c_1 \quad (1)$$

$$d + \frac{d \cdot \tan\beta}{\tan\gamma} = c_1 \ , \ d\left(\frac{\tan\beta + \tan\gamma}{\tan\gamma}\right) = c_1$$

따라서,

$$d = \frac{c_1 \cdot \tan\gamma}{\tan\beta + \tan\gamma} \quad (2)$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하면,

$$\frac{c_1 \cdot tan\gamma}{tan\beta + \tan\gamma} + e = c_1$$

$$\Leftrightarrow e = c_1\left(1 - \frac{\tan\gamma}{tan\beta + \tan\gamma}\right)$$

따라서,

$$f = e \cdot tan\gamma = c_1 \cdot tan\gamma\left(1 - \frac{tan\gamma}{tan\beta + tan\gamma}\right)$$

$$= c_1\left(tan\gamma - \frac{tan^2\gamma}{tan\beta + tan\gamma}\right) \quad (3)$$

$$m = a_1 - f$$

$$= a_1 - c_1\left(tan\gamma - \frac{tan^2\gamma}{tan\beta + tan\gamma}\right)$$

$$= a_1 - c_1\left(\frac{tan\beta\ tan\gamma + tan^2\gamma - tan^2\gamma}{tan\beta + tan\gamma}\right)$$

$$= a_1 - c_1\frac{tan\beta\, tan\gamma}{tan\beta + tan\gamma} = a_1 - c_1\frac{1}{\frac{1}{tan\gamma} + \frac{1}{tan\beta}}$$

$$= a_1 - c_1\frac{1}{\cot\beta + \cot\gamma} \quad (4)$$

$$g + n = b_1 - e$$

$$= b_1 - c_1\left(1 - \frac{tan\gamma}{tan\beta + tan\gamma}\right)$$

$$\Leftrightarrow n = b_1 - c_1\left(1 - \frac{\tan\gamma}{\tan\beta + \tan\gamma}\right) - g \quad (5)$$

$$g \cdot tan\alpha = f$$
$$= c_1(tan\gamma - \frac{tan^2\gamma}{tan\beta + tan\gamma})$$
$$\Leftrightarrow g = c_1(tan\gamma - \frac{tan^2\gamma}{tan\beta + tan\gamma})\ \frac{1}{tan\alpha} \quad (6)$$

식 (6)을 식 (5)에 대입하면 아래와 같이 정리되어질 수 있다.

$$\begin{aligned} n &= b_1 - c_1(1 - \frac{tan^2\gamma}{tan\beta + tan\gamma}) - g \\ &= b_1 - c_1(1 - \frac{tan\gamma}{tan\beta + tan\gamma} + \frac{tan\gamma}{tan\alpha} - \frac{tan^2\gamma}{tan\alpha(tan\beta + tan\gamma)}) \\ &= b_1 - c_1\frac{tan\alpha\ tan\beta + tan\beta\ tan\gamma}{tan\alpha(tan\beta + tan\gamma)} \\ &= b_1 - c_1\frac{tan\alpha\ tan\beta + tan\beta\ tan\gamma}{tan\alpha\ tan\beta + tan\alpha\ tan\gamma} \\ &= b_1 - c_1\frac{\frac{1}{tan\gamma} + \frac{1}{tan\alpha}}{\frac{1}{tan\gamma} + \frac{1}{tan\beta}} \\ &= b_1 - c_1\frac{cot\alpha + cot\gamma}{cot\beta + cot\gamma} \end{aligned} \quad (7)$$

따라서, 기하학적 조건에 따라 식(4)와 식(7)과 같이 계산식 m, n은 다음과 같이 얻어진다.

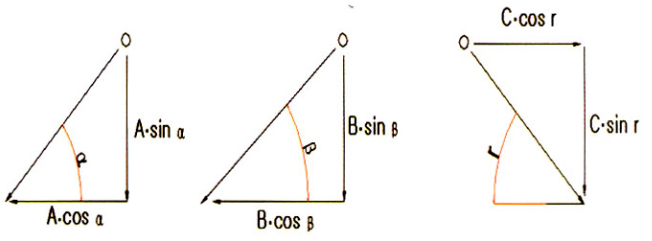
$$\therefore\ m = a_1 - c_1\frac{1}{\cot\beta + \cot\gamma}$$
$$n = b_1 - c_1\frac{\cot\alpha + \cot\gamma}{\cot\beta + \cot\gamma}$$

4.2 월타이 부재력(A, B, C) 계산식

그림 5의 각 월타이의 부재력 A, B, C는 평형방정식의 조건 중 $\Sigma M_V = 0$ (월타이 Ⓑ와 Ⓒ가 만나는 교점 V에 대한 모우멘트 평형조건)으로 구할 수 있다.

$$M_D + m \cdot H_a - A \cdot n \cdot \sin\alpha = 0$$
$$\Leftrightarrow A = \frac{M_D + m \cdot H_A}{n \cdot \sin\alpha} \quad (8)$$

크레인의 월타이부재들은 핀으로 구속되어있으므로 트러스의 해석시의 가정과 마찬가지로 A, B, C 부재가 모두 인장력을 받는다고 가정한다. 또한, 월타이부재력(A, B, C)을 힘의 합성과 분해의 원리를 이용하여 분해하면 다음과 같다.



월타이부재 'A' 월타이부재 'B' 월타이부재 'C'

그림 6. 월타이 부재력 분해도

힘의 평형조건으로부터 아래와 같은 기본식을 얻을 수 있으며,

$$\Sigma F_x = 0 : -A \cdot \cos\alpha - B \cdot \cos\beta + C \cdot \cos\gamma + H_A = 0 \quad (+\rightarrow) \quad (9)$$

$$\Sigma F_y = 0 : -A \cdot \sin\alpha - B \cdot \cos\beta + C \cdot \cos\gamma = 0 \quad (+\uparrow) \quad (10)$$

식 (9) × sinγ+식 (10)× cosγ로하여 연립방정식을 풀면 아래와 같은 과정을 거치게 되며, 부재력 'B'를 구할 수 있다.

$$-A \cdot \sin\gamma\ \cos\alpha - B \cdot \cos\gamma\ sin\gamma + C \cdot \sin\gamma\ cos\gamma + H_A \cdot \sin\gamma = 0 \quad (11)$$

$$-A \cdot \cos\gamma\ \sin\alpha - B \cdot \cos\gamma\ sin\beta - C \cdot \cos\gamma\ sin\gamma = 0 \quad (12)$$

$$-A(\sin\alpha\ cos\gamma + cos\alpha\ \sin\gamma) - B(\sin\beta\ cos\gamma + cos\beta\ sin\gamma) + H_A \cdot \sin\gamma = 0$$
$$-A \cdot \sin(\alpha + \gamma) - B \cdot \sin(\beta + \gamma) + H_A \cdot \sin\gamma = 0$$

따라서,

$$B = \frac{H_A \cdot \sin\gamma - A \cdot \sin(\alpha + \gamma)}{\sin(\beta + \gamma)} \quad (13)$$

식 (4)으로부터,

$$C \cdot \cos\gamma = -H_A + A \cdot \cos\alpha + B \cdot \cos\beta \quad (14)$$

식 (13)을 식 (14)에 대입하면 부재력 'C'가 얻어진다.

$$C=\frac{1}{cos\gamma}(-H_A+A\cdot\cos\alpha+\frac{H_A\cdot\sin\gamma-A\cdot\sin(\alpha+\gamma)}{\sin(\beta+\gamma)}cos\beta) \quad (15)$$
$$=\frac{-H_A\cdot sin\beta\ cos\ \gamma-A\cdot\sin\alpha\ cos\gamma\ cos\beta+A\cdot\cos\alpha\ cos\gamma\ sin\beta}{cos\gamma\ sin(\beta+\gamma)}$$
$$=\frac{-H_A\sin\beta-Asin(\alpha-\beta)}{\sin(\beta+\gamma)}$$

월타이의 A, B, C 부재력을 계산하여 각각의 부재력에서 ⊕값이면 그 부재는 인장 하에 있고, ⊖ 값이면 압축 하에 있다. 아래 지금까지 유도한 월타이의 부재력과 반력을 종합하여 정리하였다.

◎ 반력

Vtotal = V + n ◦ G +G′

$$HA = H+\frac{3qh}{8}+\frac{3M}{2h}$$

$$HB = \frac{3M}{2h}-\frac{5qh}{8}$$

MA = M

$$MB = -0.5M+\frac{qh^2}{8}$$

◎ 부재력

$$A=\frac{M_D+m\cdot H_A}{n\cdot sin\alpha}$$

$$B=\frac{H_A\cdot sin\gamma-A\cdot\sin(\alpha+\gamma)}{sin(\beta+\gamma)}$$

$$C=\frac{-H_A\cdot sin\beta-A\cdot\sin(\alpha-\beta)}{sin(\beta+\gamma)}$$

$$m=a_1-c_1\frac{1}{\cot\beta+\cot\gamma}$$

$$n=b_1-c_1\frac{\cot\alpha+\cot\gamma}{\cot\beta+\cot\gamma}$$

5. 월타이 각도변화에 따른 $\theta-P$ 곡선

5.1 해석을 위한 가정

월타이 부재력(A, B, C) 계산은 다음과 같은 해석을 위한 가정을 전제로 수행된다. 월타이 프레임과 월타이 그리고 월타이 브라켓은 서로 연결점이 핀으로 체결되어 어셈블리를 이루어 연결점에서 비틀림모멘트가 발생하지 않으며, 월타이 프레임과 조립되는 타워크레인의 수직부분인 마스트의 중심점은 월타이 프레임의 회전중심점과 일치되고 회전중심점의 이동은 없고 단지 회전만 가능하도록, 마스트는 충분한 휨강성을 가지며, 월타이의 각 세부 부재의 가정은 아래와 같다.

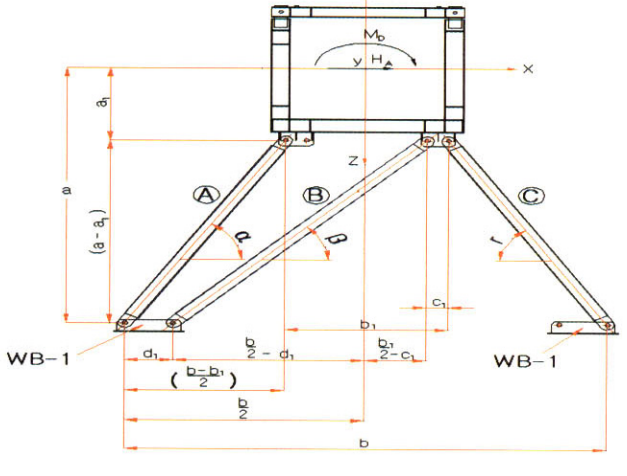
5.1.1 월타이 프레임(wall tie frame)

수평력과 비틀림모멘트를 지지하는데 있어 마스트로부터 들어오는 외력인 수평력과 비틀림모멘트를 지지하는데 있어서 충분한 휨강성과 회전강성을 가져야하고, 월타이 프레임과 월타이 접합부는 충분한 강도의 핀 체결과 자유로운 회전이 보장되어야 한다. 또한, 월타이 프레임은 강성체(rigid body)를 유지하며 미소변형(small deformation)을 가진다고 본다.

5.1.2 월타이(wall tie)

① 월타이는 양단의 경계조건이 힌지로 가정한다.
② 정적해석을 수행한다.
③ 부재 Ⓐ와 Ⓒ는 동일한 부재각을 가진다.
④ 월타이 부재 Ⓑ의 부재각(β)은 중심거리 a 치수와 월타이 Ⓐ, Ⓒ가 가지는 부재각($\alpha=\gamma$)에 따라 변하는 종속된 값을 가진다.
⑤ 건설현장의 설치조건과 경제성을 고려하여 월타이 허용축력은 400kN 이하로 제한한다.
⑥ 부재각은 a값에 따라 현장에서 설치가능하고 경제적인 범위에 있는 각도범위만 검토한다.

그림 7은 월타이 조립도로서 마스트중심과 월타이 브라켓 사이의 중심거리(a)를 일반적으로 많이 사용하는 7m, 8m, 9m를 검토하기 위하여 나타낸 그림으로서 월타이 프레임에 수평력과 비틀림모멘트인 H_A와 M_D가 외력으로 작용하게 되면, 월타이에는 월타이 각도에 따라 부재력 A, B, C가 생기게 된다. 또한 그림 7에 기입한 치수는 건설현장의 실용적인 월타이 배치조건을 고려하여 마스트 중심과 월타이브라켓 사이의 거리 a는 7m에서 9m까지로 제한하고, 월타이부재 Ⓐ의 월타이브라켓 WB-1과 월타이부재 Ⓒ의 월타이브라켓 WB-2 사이의 수평거리 b는 최저 2.8m에서 최대 20m까지로 제한한다.



$a_1 = const,\quad b_1 = const$
$c_1 = const,\quad d_1 = const,\quad \alpha = \gamma$
$a = 7m, 8m, 9m$
a : 마스트중심에서월타이브라켓까지거리
b : 월타이브라켓 WB-1과WB-2사이수평거리
WB-1:월타이브라켓
WB-2:월타이브라켓

그림 7. 월타이의 조립도와 실용치수 범위도

5.2 월타이강도에 영향을 주는 변수와 월타이 부재력 계산을 위한 하중 경우의 수

5.2.1 마스트 중심과 월타이 브라켓 핀 중심까지의 거리(a)

타워크레인이 설치될 건축 공사현장에서 최적위치가 선정되면 마스트의 중심점이 확정되고 이에 따라 중심거리(a)가 결정된다.

5.2.2 월타이 앙카 지점간거리(b)

지점간 거리가 증가하면 월타이 부재각이 감소하고, 지점간 거리가 감소하면 월타이 부재각이 증가한다.

5.2.3 부재각(α, β, γ)

월타이 부재각의 변화에 따라 월타이 부재력 A, B, C가 변한다.

5.2.4 부재길이

월타이 부재는 양단힌지의 인장 또는 압축재로서, 압축력 작용 시는 좌굴응력을 반드시 고려해야 한다.

5.2.5 수평력(H_A) 방향

수평력의 방향에 따라 월타이에 발생하는 부재력이 변하고, 동시에 인장과 압축 상태가 바뀔 수 있다.

5.2.6 비틀림모멘트(M_D)의 방향

비틀림 모우멘트의 방향에 따라 월타이 부재력과 인장과 압축 상태가 바뀔 수 있다.

5.2.7 하중의 경우의 수

① 크레인 가동 시	② 크레인 비가동 시
Load Case 1 $H_A(+X)$, $M_D(+)$	
Load Case 2 $H_A(-X)$, $M_D(+)$	*Load Case* 5 $H_A(+X)$, $M_D=0$
Load Case 3 $H_A(+X)$, $M_D(-)$	*Load Case* 6 $H_A(-X)$, $M_D=0$
Load Case 4 $H_A(-X)$, $M_D(-)$	

5.3 월타이에 작용하는 수평력과 비틀림 모멘트 계산

본 연구의 대상모델인 타워크레인 기종 290HC에서 표 1.로부터 월타이 상부에 8개의 마스트가 놓일 때 월타이 지점에 작용하는 V, H, M 값은 클라이밍 장치가 상부에 핀 조립되었고, 베이직 마스트의 높이(약 마스트 2개 높이)를 고려하여 마스트의 개수가 6개일 때의 기초하중값을 적용하고 표. 2에 정리된 반력 및 부재력에 의해 아래와 같이 계산된다.

5.3.1 수평력(H_A)

- 크레인 가동 시 = 154.417 kN
- 크레인 비가동 시 = 235.884 kN

5.3.2 비틀림모멘트(M_D)

M_D = 478 kNm (메뉴얼로부터)

5.3.3 월타이 배치와 월타이 각도(α, β, γ)

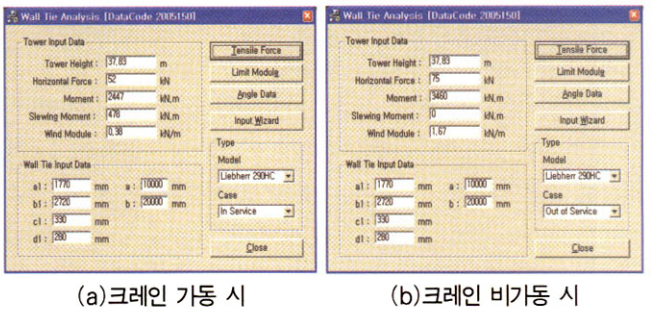
그림 7.의 기하학적 형상에 의해 월타이 각도 계산식은 다음과 같으며, 월타이의 부재력은 4장에서 유도한값과 같다.

$$\tan\alpha = \tan\gamma = \frac{2(a-a_1)}{b-b_1} \tag{16}$$

$$\tan\beta = \frac{a-a_1}{(\frac{b}{2}-d_1)+(\frac{b_1}{2}-c_1)} \tag{17}$$

5.4 월타이 부재력 계산을 위한 프로그래밍

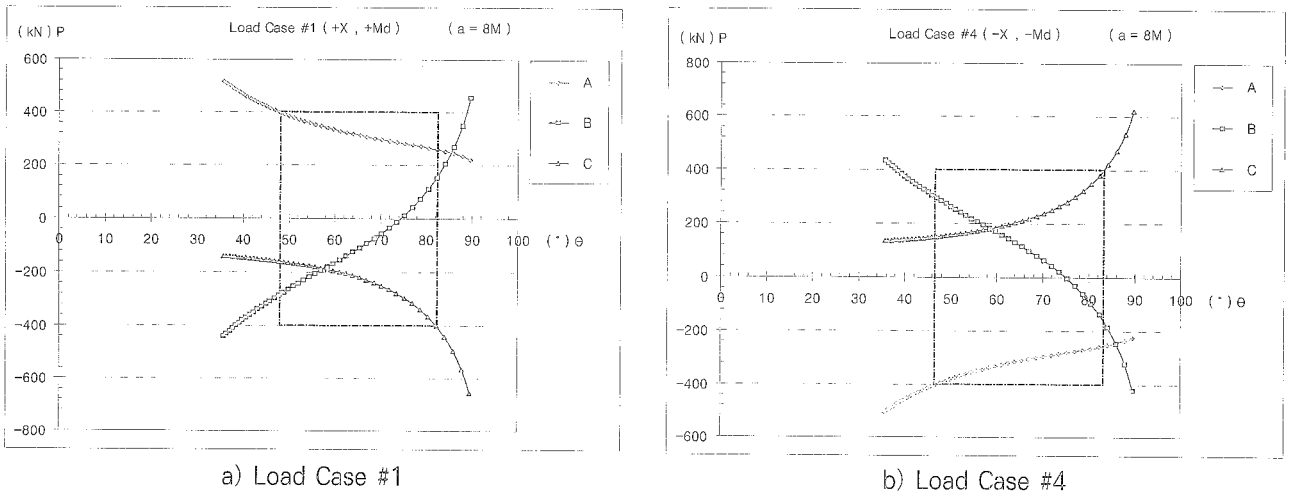
마스트 중심거리(a)와 월타이 브라켓트 간 거리(b)에 따른 월타이각도(α, β, γ)와 월타이 부재력(A, B, C) 계산식을 Visual Basic으로 프로그래밍하여 매개변수의 값을 넣고, 반복연산하여 얻은 데이터를 엑셀 프로그램을 이용하여, 월타이 배치와 각도, 월타이 부재력, 월타이 부재력곡선 얻을 수 있다.



(a)크레인 가동 시 (b)크레인 비가동 시

그림 8. 입력데이터

5.5 월타이 θ-P 곡선 (월타이 부재력 곡선)



a) Load Case #1 b) Load Case #4

그림 8. a=8m 일때의 월타이 부재력 ($\theta-P$ 곡선) Load Case #1&4

월타이 부재	월타이 부재력 (kN)	α=γ (°)	Load Case 별 월타이 부재력 분포 L/C #1	L/C #2	L/C #3	L/C #4	L/C #5	L/C #6
Ⓐ	최대 394.9 kN	48.9 °	394.9 / 267.9	133.9 / 114.1			276.6 / 125.1	
	최소 -385.5 kN	48.9 °			-107.6 / -124.5	-262.5 / -385.5		-100 / -221.1
Ⓑ	최대 318.3 kN	80.5 °			318.3 / 238.5	273.9 / -95.3	286.2 / -136.4	109 / -230.3
	최소 -303.3 kN	80.5 °	110.3 / -275.1	-237.9 / -303.3				
Ⓒ	최대 348.7 kN	80.5 °		157.8 / 69.7		348.7 / 154.1		306.8 / 127.6
	최소 -384 kN	78.7 °	-162.5 / -367.7		-78.1 / -176.8		-159.7 / -384	

월타이 부재	월타이 부재력 (kN)	α=γ (°)	Load Case 별 월타이 부재력 분포 L/C #1	L/C #2	L/C #3	L/C #4	L/C #5	L/C #6
Ⓐ	최대 399.4 kN	48.3 °	399.4 / 267.9	135.6 / 115.6			249.5 / 127.4	
	최소 -389.9 kN	48.3 °			-126	-262.5 / -389.9		-101.8 / -199.4
Ⓑ	최대 334.8 kN	80.3 °			334.8 / 239.7	280.1 / -95.3	271.2 / -98.1	78.4 / -216.8
	최소 -319.3 kN	80.3 °	110.9 / -281.6	-239.5 / -319.3				
Ⓒ	최대 350.2 kN	80.3 °		174.8 / 73.7		350.2 / 147.7		299.1 / 131.2
	최소 -374.3 kN	77.2 °	-156 / -369.9		-82 / -194.5		-164.2 / -374.3	

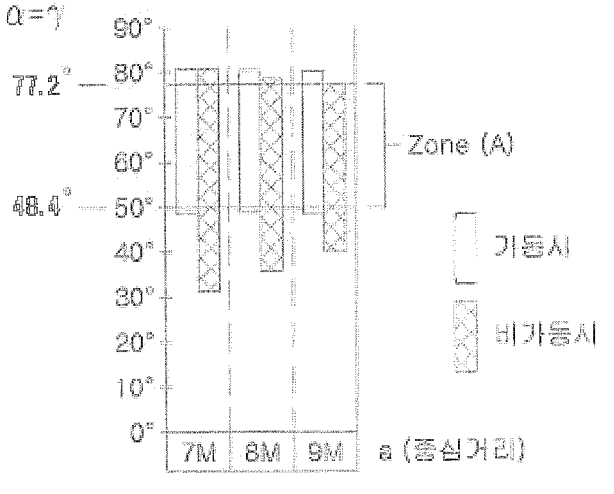
a) a = 8 M일 경우 b) a = 9 M일 경우

그림 9. Load Case 별 월타이 부재력 분포 현황 (A, B, C ≤ 400 kN)

마스트 중심과 월타이 브라켓 핀 중심까지의 거리 a에 따라 월타이의 각도별 부재력(A, B, C)을 한 개의 그래프에 그렸고, 각도에 따라 월타이 부재력의 분포를 쉽게 읽을 수 있도록 구성하였다. 특히 그림 8에서는 a=8m 일 때 각 Load case중 #1과 #4의 경우만의 월타이 부재력($\theta-P$)곡선을 나타내었다. 이상에서 얻어진 부재력($\theta-P$)곡선을 분석하면 다음과 같은 결론을 얻어낼 수 있다.

1) 월타이 각도변화에 따른 부재력 곡선의 결과분석은 건설현장에 월타이부재로서, 사용되는 H형강보의 부재규격과, 좌굴응력, 슬래브와 월타이 브라켓을 고정하는 앵커볼트, 쉬어콘넥터 등의 전단내력을 고려하여 월타이 부재응력을 400kN 이하로 제한할 경우의 $\alpha=\gamma$의 각도범위를 a(마스트 중심거리)에 따라 분석하고 종합하여 막대그래프 그림 10을 작성한 결과 건설현장에서 a와 무관하게 월타이 부재력을 400kN이하로 구조계획시 최적의 각도범위는 48.4°~77.2° 범위이다.

2) 월타이 각 부재가 Load Case 별 하중 데이터를 그림 9.에서 분석한 결과, 월타이 각 부재는 수평력(H_A)와 비틀림모멘트(M_D)의 조합에 따라서 인장력 또는 압축력을 받는다.
3) $\theta-P$ 곡선을 분석한 결과 Load Case #1과 Load Case #4의 부재력 곡선($\theta-P$ 곡선)이 θ축에 대하여 거의 대칭곡선을 가진다.
4) $\theta-P$ 곡선을 분석한 결과, 월타이 Ⓑ부재는 크레인 가동 시 수평력(H_A)와 비틀림모멘트(M_D)가 동시에 '정(+)'의 방향이거나 동시에 '부(-)'의 방향일때, Ⓑ부재의 부재력이 인장에서 압축으로 또는 압축에서 인장으로 바뀌는 전환각도 ($\alpha=\gamma$)가 약 74°이며, 또한 크레인 비가동 시에 수평력이 '정(+)'의 방향이든, 부(-)의 방향이든 항시 월타이 Ⓑ의 부재력이 인장에서 압축 또는 압축에서 인장으로 바뀌는 전환각도($\alpha=\gamma$)는 약 54°가 되는 것을 확인하였다.



* Zone(A)는 a(중심거리)에 무관하게 월타이의 부재력을 400kN 이하로 설계할 수 있는 각도($\alpha=\gamma$)의 범위이다. ($48.4° \leq \alpha=\gamma \leq 77.2°$)

그림 10. 부재력($\theta-P$)곡선 분석결과

6. 결 론

본 연구는 건축용 타워크레인의 훅크양정을 증대시키기 위하여 설치되는 횡방향지지요소인 월타이의 부재력 계산식을 구하고, 이를 프로그래밍하여 마스트 중심과 월타이 브라켓 간 거리를 변화시키면서, 월타이 각도별 월타이 부재력을 반복계산하여 월타이 부재력 특성곡선을 그리고 이를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 월타이가 마스트 중심과 월타이 브라켓 간 거리 (a)에 따른 월타이의 최적각도($\alpha=\gamma$)는 허용축력을 400kN 이하로 제한할때, 다음과 같다. a=7m (48.4°~80.9°), a=8m (48.9°~78.7°), a=9m (48.3°~77.2°) 전반적으로 a에 무관하게 월타이 각도를 제안한다면, $\alpha=\gamma$가 48.4°~77.2° 범위이내로 계획하는 것이 실용적이라 사료된다.
(2) 월타이 각 부재는 수평력과 비틀림모멘트의 하중조합에 따라 인장력 또는 압축력을 받으므로, 반드시 각각의 부재에 대하여 좌굴응력을 검토하여야 한다.
(3) 수평력(H_A)와 비틀림모멘트(M_D)의 부호가 동시에 (+)에서 (-)로 또는 (-)에서 (+)로 변환되는 경우 월타이의 $\theta-P$ 곡선이 $\theta-$축에 대하여 거의 대칭곡선을 가진다.
(4) 월타이 Ⓑ의 부재력이 인장력에서 압축력 또는 압축력에서 인장력으로 전환되는 각도는 크레인 가동 시는 $\alpha=\gamma \fallingdotseq 74°$이며, 크레인 비가동 시는 $\alpha=\gamma \fallingdotseq 54°$일 때로 확인되었다.

그러나 본 연구로부터 얻은 결과를 타워크레인 전반에 적용하는데 있어서는 가정한 해석조건 즉 좌·우 월타이의 대칭성 문제, 월타이부재의 좌굴 및 2차응력, 월타이 브라켓을 슬래브에 고정방법에 사용되는 앵커볼트와 쉬어컨넥터의 평균응력의 문제, 그리고 건물 측 월타이 브라켓 고정 부위 등에 대한 구조적 검토 및 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2006학년도 중앙대학교 교내 학술연구비 지원에 의한 것으로 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

김덕윤(1995), "실용 크레인 편람", 태광서림.
김덕재, 이은택(2000), "강구조이론과 한계상태설계", 기문당.
대한건축학회(1998), "강구조 한계상태 설계기준 및 해설".
대한건축학회(2000), "건축물 하중기준 및 해설".
박길재, 장명훈, 이현수(2001), "고층건축공사에 있어 자재양중계획의 최적화방안", 대한건축학회 논문집.
서울대학교 출판부(1999), "구조안정론".
이명구, 노민래(2000), "기초앵커 불량시공에 따른 타워크레인 사고의 원인분석", 한국산업안전학회 추계 학술논문발표회 논문집.
이명구, 노민래(2001), "타워크레인 붕괴사고의 구조적 분석",

한국산업안전학회지 논문집.
이웅균, 김재엽, 서덕석, 강경인(2004), "유전자 알고리즘 모델을 활용한 양중계획 합리화 방안", 대한건축학회 논문집.
이정호, 박성진, 오세욱, 김영석(2002), "GPS 및 머신비전을 활용한 타워크레인 양중작업 효율화방안", 대한건축학회 논문집.
이현수, 채희동, 장명훈(2002), "고층건축공사의 타워크레인 계획 프로세스 개발", 대한건축학회 논문집.
일본규격협회(1994), "JIS B 8821, 크레인 강구조 부분의 설계기준".
장동일, 박용진(1992), "인장부재의 취성파괴로 인한 타워크레인 붕괴원인규명에 관한 연구", 한국강구조학회 논문집.
주진호, 이덕찬, 신현식(1994), "고층건축공사에 있어서 타워크레인의 최적위치선정 방안에 관한 연구", 대한건축학회 학술발표논문집.
한국강구조학회(2006), "KBC2005 강구조설계".
한국산업안전공단(2002), "타워크레인 작업안전 지침서(T형)".
AISC(1989), *Manual of Steel Construction*, 8th Edition.
Deutsche Norm(1984), *DIN 15018, Cranes Steel Structures Verification and Analysis.*
Gaylord, E.H, Gaylord, C.N, and Stallmeyer, J.E, *Design of Steel Structures*, 3rd Ed, McGraw-Hill.
Liebherr, A, G(1989), *290HC Manual*, Germany.
Schodek, Daniel L. *Steel Structures*, 3rd Ed, Prentice Hall.
Timoshenko, S.P. and Goodier, J.N.(1970), *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill.
Timoshenko, S.P. and S. Woinowsky-Krieger, *Theory of Plates and Shells*, 2rd Ed, McGraw-Hill.

(접수일자 : 2006. 7. 14 / 심사일 2006. 8. 7 / 심사완료일 2006. 9. 18)