

LMTT용 셔틀 카의 프레임 강도 및 강성에 미치는 크로스 빔의 영향

임종현* · 한근조** · 이권순*** · 한동섭**** · 심재준***** · 이성욱***** · 전영환*****

*동아대학교 기계공학과 대학원, **동아대학교 기계공학과 교수, ***동아대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수,
****, ***** , 동아대학교 기계공학과 대학원, ***** 한국컨테이너부두공단

The Effect of Cross Beam on the strength and Stiffness of the Frame in Shuttle Car for LMTT

J. H. Lim* · G. J. Han** · K. S. Lee*** · D. S. Han**** ·

J. J. Shim***** · S. W. Lee***** · Y. H. Jeon*****

*Graduate school of Donga University, Busan 604-714, Korea

**Division of mechanical engineering, Donga University, Busan 604-714, Korea

***Division of Electrical, Electronics and Computer engineering, Donga University, Busan 604-714, Korea

****, ***** , Graduate school of Donga University, Busan 604-714, Korea

*****Korea Container Terminal Authority, Busan 601-801, Korea

요 약 : 컨테이너 무역 규모가 매년 증가함에 따라 항만 환경이 급격히 변화하고 있다. 이러한 항만의 변화에 성공적으로 대처하기 위해 차세대 항만하역시스템인 LMTT(Linear Motor-based Transfer Technology)의 연구가 진행되고 있다. LMTT용 셔틀 카의 프레임부는 내부 빔, 내부 빔, 크로스 빔으로 구성되어 있으며, 본 연구에서는 프레임을 설계하기 위하여 크로스 빔의 개수, 하중 재하 위치 및 내부 빔의 위치에 따른 외부 빔과의 거리 비 등이 프레임의 강도 및 강성에 미치는 영향을 유한요소 해석을 통하여 하중이 외부 빔과 내부 빔에 동시에 작용하고 크로스 빔이 5개일 때가 최적의 조건이라는 결론을 얻을 수 있었다.

핵심용어 : LMTT, shuttle car, 항만하역시스템, 유한요소해석

Abstract : According as the quantity of goods transported by ship is increasing, a port environment is rapidly changing. To meet this situation successfully, the development of the next generation port loading and unloading system(LMTT) is studied. A Frame of shuttle car for LMTT(Linear Motor-based Transfer Technology) consists of three parts which are outer beam, inner beam and cross beam. In this study, we carried out the finite element analysis for the effect of cross beam on the strength and stiffness of the frame according to the number of cross beam, loading position of container, the distance ratio of inner beam from center. The result is as follow ; When the load is applied on outer beam and inner beam concurrently and the number of cross beam is 5, that is the optimum condition in frame design.

Key words : LMTT, Shuttle car, Port loading and unloading system, Finite element analysis

1. 서 론

세계 컨테이너 무역 규모가 연간 7.3%씩 증가함에 따라 초대형 컨테이너선(Ultra Large Container Ship)의 출현 등 항만 환경이 급격히 변화하고 있는 추세이며, 20년 이내에 15,000 ~18,000 TEU급의 초대형 컨테이너선의 출현이 예상

된다. 이러한 항만의 변화에 성공적으로 대처하기 위해 각국은 새로운 개념의 초고속, 자동화된 차세대 항만하역시스템 개발에 총력을 기울이고 있다(Lin et., 2001). 항만 자동화를 위해서는 컨테이너 하역과 이송장치, 게이트 및 운영시스템의 연계 등 여러 분야가 있는데, 본 논문에서는 그중 LMTT(Linear Motor-based Transfer Technology)를

* 대표저자 : 임종현(정회원), mortars77@hanmail.net 051)200-6989

** 정회원, gjhan@daunet.donga.ac.kr 051)200-7650

*** 정회원, kslee@daunet.donga.ac.kr 051)200-7739

**** 정회원, dshan@donga.ac.kr 051)200-6989

***** 정회원, shimjj@donga.ac.kr 051)200-6989

***** 정회원, lsw1126@korea.com 051)200-6989

***** 정회원, yhjeon@donga.ac.kr 051)200-6989

통한 이송 장치의 고속화, 자동화를 위한 구조물 설계에 대한 내용을 다루고자 한다. 기존의 터미널 내의 컨테이너 이송장치 자동화를 위해 가 거론되고 있는 AGV(Automated Guided Vehicle)는 네덜란드 ECT항에서는 이미 운영 중이며, 싱가포르, 독일, 중국 등에서는 적용을 앞두고 있다. 그러나 AGV는 운전 속도가 5m/s 정도이며, 센서의 불확실성, 부 시스템들의 조합으로 인해 발생하는 여러 가지 문제들을 가지고 있다. 따라서 이런 문제들을 해결하고, 자동화를 쉽게 달성하기 위하여 LMTT가 새로운 해결책으로 제안되고 있으며, 이미 독일의 Hamburg항에서 대형 리니어 모터(linear motor)를 이용한 컨테이너 이송장치를 개발하여 시운전을 앞두고 있는 상태이다. LMTT는 수직·수평 이동이 가능하도록 설계된 휠(wheel) 구조와 격자 구조의 레일(rail)로 구성되며, LSM(Linear Synchronous Motor) 방식으로 영구자석편이 설치되어 셔틀 카(shuttle car)와 레일 사이에 일정한 간격으로 설치된 stator module에 의해 구동된다. LMTT용 셔틀 카를 설계하기 위해서는 프레임(frame), stator module, 휠, 레일의 형상에 관한 연구 및 리니어 모터에서 발생하는 열에 관한 연구 등 다양한 연구가 진행되어야 한다(Sakamoto *et al.*, 1997). 셔틀 카의 프레임부는 컨테이너를 지탱하는 외부 빔(outer beam), 프레임의 뼈대가 되는 내부 빔(inner beam), 두 빔을 연결시켜 보강하는 크로스 빔(cross beam)으로 구성되어 있으며, 본 연구에서는 이러한 프레임을 설계하기 위하여 크로스 빔의 개수, 하중 재하 위치 및 내부 빔의 위치에 따른 외부 빔과의 거리 비 등이 프레임의 강도 및 강성에 미치는 영향을 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 살펴보고자 한다.

2. 유한요소해석 모델 및 해석방법

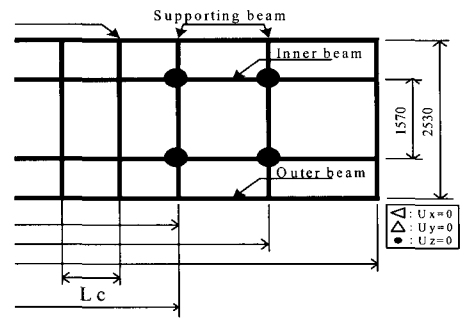
2.1 해석모델 및 경계조건

1) 해석모델

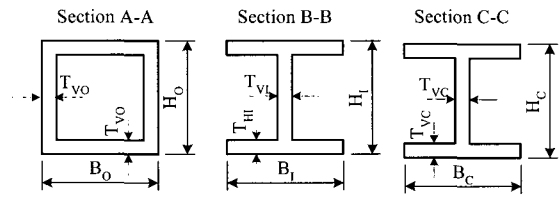
본 연구에서 유한요소해석을 위해 사용된 재료의 기계적 성질은 Table 1과 같다. 그리고 LMTT를 위한 셔틀 카의 프레임은 전체 구조물의 뼈대가 되는 내부 빔, 컨테이너를 지탱하는 외부 빔, 내부 빔과 외부 빔을 연결시켜 보강하는 크로스 빔의 세 부분으로 구성되며, 각 단면의 형상은 Fig. 1과 같고 치수는 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of SM45C

Items	Values
Elastic modulus	210GPa
Poisson's ratio	0.29
Density	$7.8510^{-9} \text{Ns}^2/\text{mm}^4$
Yield strength	206MPa
Tensile strength	519MPa



(a) Dimensions and boundary conditions of the frame



(b) Section shape of each beam

Fig. 1 Schematic of the frame used for analysis in a shuttle car for LMTT

Table 2 Dimensions of cross section of each beam in the frame (KS D 3503-82)

Items	B	H	TH	Tv
Outer beam	200mm	200mm	12mm	12mm
Inner beam	200mm	400mm	12mm	8mm
Cross beam	200mm	200mm	12mm	8mm

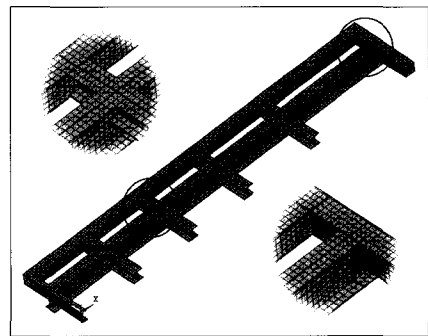


Fig. 2 Meshed shape of a quarter of frame of the shuttle car for LMTT

2) 하중 및 경계조건

본 연구에서 해석을 위한 구속조건은 Fig. 1에서와 같이 내부 빔에 단순지지경계조건을 적용하였으며, 하중은 40ton을 3가지 하중 재하 조건에 따라 40ft 컨테이너의 길이에 해당하는 12.192mm에 걸쳐 분포하중으로 환산하여 작용시켰다. 또한 기하학적 형상과 경계조건을 고려할 때 프레임의 길이 방향과 폭 방향이 대칭이므로 유한요소해석을 위해 프레임의 1/4만 모델링 하여 해석 시 대칭경계 조건을 사용하였으며, 각 절점에 3자유도(Ux, Uy, Uz)를 갖는 8절점 육면체 요소를 사

용하여 요소분할을 하였다. 해석모델의 메시된 형상을 Fig. 2에 나타내었다.

2.2 설계변수

1) 하중 재하 위치(LP)

하중 재하 위치(LP)는 40ton의 컨테이너 하중을 40ft 컨테이너의 길이에 해당하는 12.192mm에 분포하중으로 환산하여 작용시키는 위치로서 외부 빔에만 작용시킨 경우(case I), 외부 빔과 내부 빔에 동시에 작용시킨 경우(case II), 내부 빔에만 작용시킨 경우(case III)의 3가지를 설정하였다.

2) 크로스 빔의 개수(Nc)

크로스 빔의 개수(Nc)는 크로스 빔의 간격(Dc)에 대한 고정단 사이의 길이(Ls)의 비로써 식(1)과 같이 정의하였으며, 1, 3, 5, 7, 9개의 5가지를 설정하였다.

$$N_c = \frac{L_s}{L_c} - 1 \quad (1)$$

3) 내부 빔의 거리 비(RD)

프레임 중심에서 내부 빔사이 거리(DI)를 고정되어 있는 외부 빔의 거리(DO)에 대한 비(RD)로써 식(2)와 같이 정의하였으며, 0.1에서 0.8까지 0.1단위로 8가지를 설정하였다.

$$R_D = \frac{D_I}{D_O} \quad (2)$$

3. 해석결과 및 고찰

3.1 프레임의 최대 상당 응력

Fig. 3은 컨테이너 하중이 외부 빔과 내부 빔 모두에 작용하는 경우(case II)에 크로스 빔의 개수가 5개 일 때 프레임에 발생하는 응력 분포를 나타내며, 하중 재하 위치와 크로스 빔의 개수에 따른 프레임의 최대 상당응력을 Table 3에 나타내었다. Fig. 3에서 A지점은 프레임의 중심으로서 최대 굽힘응력이 발생하는 지점이며, B지점은 지지점으로써 최대 압축응력이 발생하는 지점이다.

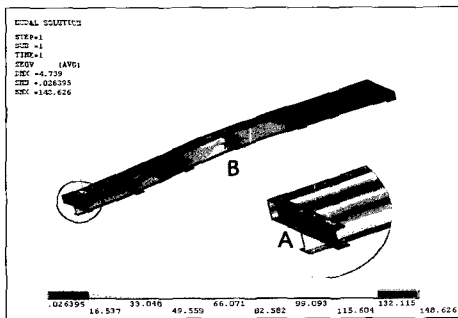
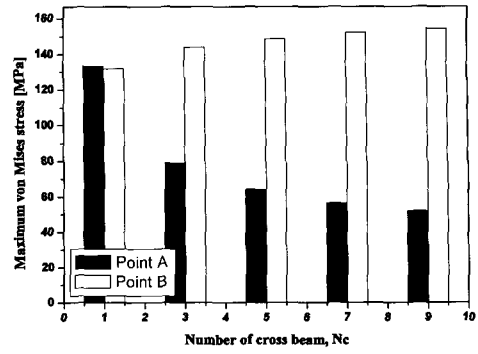
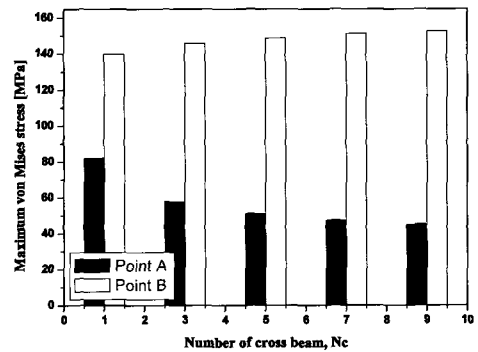


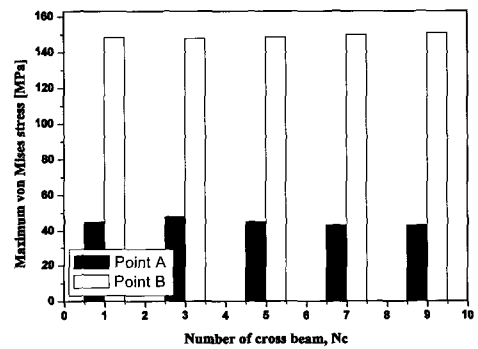
Fig. 3 Stress distribution of the frame as the number of cross beam is 5 and the loading position is applied on both of them



(a) The loading position of container is applied on outer beam



(b) The loading position of container is applied on both of them



(c) The loading position of container is applied on inner beam

Fig. 4 Maximum von Mises stress of the frame with respect to the number of cross beam (Nc) at point A and B

각각의 하중 재하 위치에서 크로스 빔의 개수에 따른 프레임의 A지점과 B지점의 최대 상당응력을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4를 살펴보면, 크로스 빔의 개수가 증가할수록 프레임의 최대 굽힘응력을 나타내는 A지점에서의 최대 상당응력은 감소하였으나, 최대 압축응력을 나타내는 B지점에서의 최대 상당응력은 오히려 증가하는 것을 알 수 있다. 그 이유는 크로스 빔의 개수가 증가한 만큼 프레임의 자중이 증가하기 때문이다. 따라서 굽힘응력을 줄이기 위해 크로스 빔의 개수를 무한정 늘려서는 안 된다는 것을 알 수 있다. 또한 하중 재하 위치가 외부 빔에서 내부 빔으로 이동함에 따라 A지점에서의 최대 응력은 감소하였으며, B지점에서는 조금씩 증가하다가 크로스 빔의 개수 5개를 기준으로 오히려 감소하는 것을 알 수 있다.

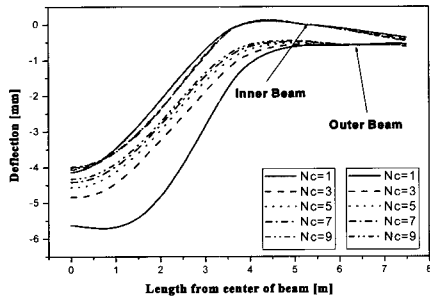
3.2 프레임의 최대 처짐

하중 재하 위치와 크로스 빔의 개수에 따른 프레임의 최대 처짐을 Table 3에 나타내었다.

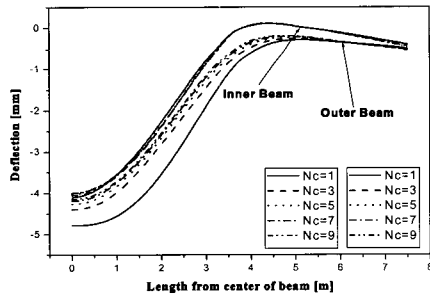
Table 3 Maximum deflection of the frame with respect to the number of cross beam (Nc) and the loading position of container (LP)

Nc	Loading position (LP)		
	Outer beam only	Both of them	Inner beam only
1	6.08mm	5.00mm	4.15mm
3	5.10mm	4.53mm	4.11mm
5	4.74mm	4.35mm	4.06mm
7	4.56mm	4.26mm	4.04mm
9	4.45mm	4.21mm	4.02mm

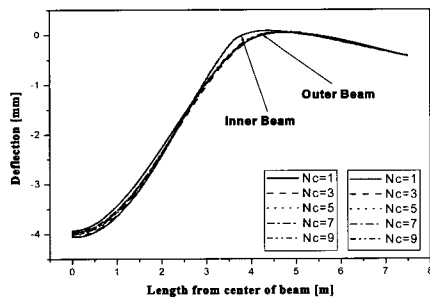
각각의 하중 재하 위치에서 크로스 빔의 개수에 따른 외부 빔과 내부 빔의 길이 방향에 대한 프레임 전체의 처짐 곡선을 Fig. 5에 나타내었다.



(a) as the loading position of container (LP) is outer beam only



(b) as the loading position of container (LP) is both of them

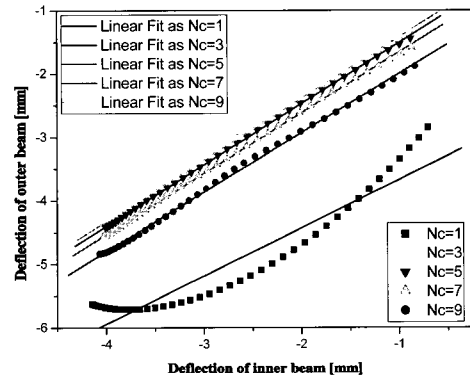


(c) as the loading position of container (LP) is inner beam only
Fig. 5 Deflection curves inner beam and outer beam in the frame with respect to the number of cross beam (Nc)

Fig. 5를 살펴보면, 하중 재하 위치가 외부 빔에서 내부 빔으로 이동함에 따라 외부 빔의 처짐 곡선은 내부 빔의 처짐 곡선과 점점 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. 그 이유는 프레임에서 내부 빔의 하단이 지지되어 있기 때문이다. 각각의 하중 재하 위치에서 크로스 빔의 개수가 증가함에 따라 외부 빔의 처짐 곡선은 내부 빔의 처짐 곡선과 비슷하게 나타남을 알 수 있다. 이것은 크로스 빔의 외부 빔과 내부 빔을 결속시키는 역할을 담당하기 때문에 크로스 빔의 거동이 점점 일치하게 된다.

적정 크로스 빔의 개수를 결정하기 위하여 각각의 하중 재하 위치에서 크로스 빔의 개수에 따른 외부 빔의 처짐과 내부 빔의 처짐 사이의 상관관계를 비교하였다.

컨테이너 하중이 외부 빔에만 작용하는 경우에 크로스 빔의 개수에 따른 외부 빔과 내부 빔의 처짐 값에 대한 상관관계를 선형 피팅한 결과를 나타낸 Fig. 6을 살펴보면, 모든 경우에 있어서 상관계수(R^2)는 0.946이상으로 높게 나타났으며, 표준 편차(SD)는 크로스 빔의 개수가 7개 이상일 때 2%이하로 나타남을 알 수 있다.

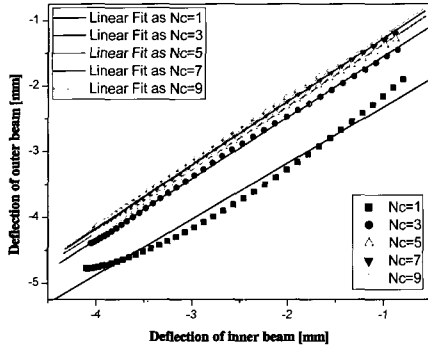


Nc	F(x)=Ax+B		R^2	SD
	A	B		
1	0.757	-2.916	0.94637	29.21%
3	0.934	-1.067	0.99927	3.73%
5	0.956	-0.708	0.99976	2.15%
7	0.963	-0.549	0.99985	1.68%
9	0.967	-0.458	0.99987	1.61%

Fig. 6 Correlation between the deflection of inner beam and that of outer beam in the frame with respect to the number of cross beam as the loading position of container is applied on outer beam

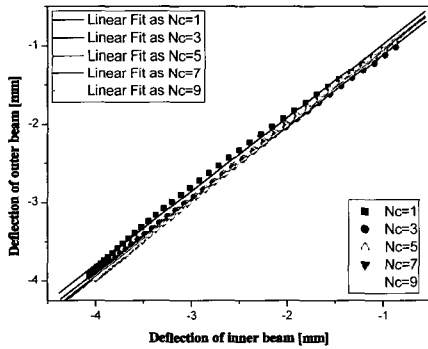
컨테이너 하중이 외부 빔과 내부 빔에 동시에 작용하는 경우 크로스 빔의 개수에 따른 외부 빔과 내부 빔의 처짐 사이의 상관관계를 Fig. 7에 나타내었다. 하중이 외부 빔과 내부 빔 모두 작용하는 경우에는 상관계수(R^2)는 0.946이상으로 높게 나타났으며, 표준편차는 크로스 빔의 개수가 5개 이상일 때 2% 이하로 나타났으며 하중이 내부 빔에 작용 할 경우의

두 빔의 처짐 사이의 상관관계를 선형 피팅한 결과는 Fig. 8에 나타내었으며 하중이 내부 빔에만 작용할 경우도 상관계수(R^2)는 0.946이상으로 높게 나타났으며, 표준편차는 크로스 빔의 개수가 3개 이상일 때 2% 이하로 나타남을 알 수 있다.



Nc	F(x)=Ax+B		R ²	SD
	A	B		
1	0.851	-1.477	0.99097	12.50%
3	0.931	-0.624	0.99971	2.34%
5	0.956	-0.409	0.99981	1.90%
7	0.966	-0.313	0.99988	1.56%
9	0.972	-0.258	0.99989	1.44%

Fig. 7 Correlation between the deflection of inner beam and that of outer beam in the frame with respect to the number of cross beam(Nc) as the loading position of container(LP) is applied on both of them



Nc	F(x)=Ax+B		R ²	SD
	A	B		
1	0.940	-0.036	0.99870	5.01%
3	0.928	-0.181	0.99986	1.63%
5	0.956	-0.111	0.99983	1.79%
7	0.969	-0.077	0.99989	1.47%
9	0.977	-0.059	0.99992	1.29%

Fig. 8 Correlation between the deflection of inner beam and that of outer beam in the frame with respect to the number of cross beam(Nc) as the loading position of container(LP) is applied on inner beam

3.3 내부 빔의 거리 비(RD)에 따른 영향

프레임에 발생하는 응력과 처짐을 고려할 때 컨테이너의 하중을 외부 빔과 내부 빔 모두에 작용시키는 것이 프레임의 설계에 가장 적절하다고 판단되며, 이러한 조건하에서 크로스 빔의 개수가 1에서 9까지 5단계로 증가함에 따라 프레임의 중심으로부터 위치가 고정되어 있는 외부 빔의 거리에 대한 내부 빔과 프레임의 중심에서의 거리 비(R_D)가 0.1에서 0.8까지의 변화에 따른 최대 상당응력과 최대 처짐을 Fig. 9와 Fig. 10에 각각 나타내었다.

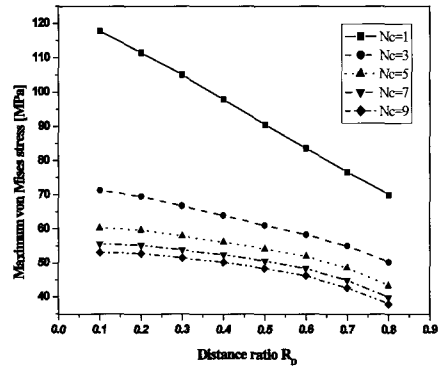


Fig. 9 Maximum von Mises stress of the frame with respect to the distance ratio(R_D) of inner beam from center and the number of cross beam(Nc)

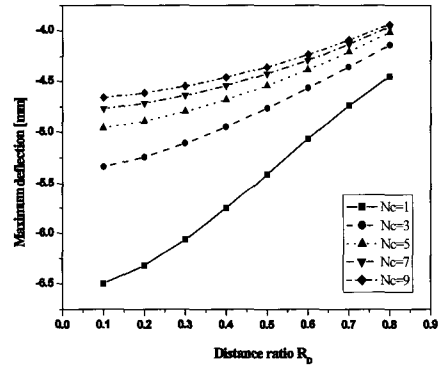


Fig. 10 Maximum deflection of the frame with respect to the distance ratio(R_D) of inner beam from center and the number of cross beam(Nc)

각각의 크로스 빔의 개수에 따른 내부 빔의 거리 비의 영향은 Fig. 9와 Fig. 10에서 나타나듯이 거리 비가 증가 할수록 최대 상당응력과 최대 처짐은 감소하였다. 그러나 크로스 빔 개수가 1개일 때 거리 비에 따른 최대 상당응력과 최대 처짐의 변화가 가장 크게 나타났으며 크로스 빔이 5개 이상이 되었을 경우 변화 폭이 상당히 감소하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

LMTT용 셔틀 카의 프레임을 설계하기 위한 기초 자료로

써 하중 재하 위치에 따라 크로스 빔의 개수가 프레임의 강도 및 강성에 미치는 영향을 유한요소해석을 통하여 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 크로스 빔의 개수가 증가함에 따라 최대 굽힘응력이 발생하는 프레임의 중심에서 최대 상당응력은 점점 감소하다가 수렴하였으나 최대 압축응력이 발생하는 지지점에서 최대 상당응력은 증가하다가 수렴함을 알 수 있었다.
2. 하중 재하 위치가 외부 빔에서 내부 빔으로 이동하게 되면, 최대 굽힘응력이 발생하는 프레임의 중심에서 최대 상당응력은 현저히 감소하였으며 최대 압축응력이 발생하는 지지점에서 최대 상당응력은 크로스의 개수 5개를 기준으로 부분적으로 증가하거나 감소함을 알 수 있었다.
3. 외부 빔과 내부 빔의 처짐 값을 비교해볼 때, 하중 재하 위치가 외부 빔일 때 적정 크로스 빔의 개수는 7개이며, 하중 재하 위치가 동시 작용일 때 적정 크로스 빔의 개수는 5개이며, 하중 재하 위치가 내부 빔일 때 적정 크로스 빔의 개수는 3개임을 알 수 있었다.
4. 크로스 빔의 개수가 내부 빔의 거리 비보다 프레임의 설계에서 더 중요한 요소임을 알 수 있었으며 프레임에 발생하는 응력과 처짐을 고려할 때 컨테이너의 하중을 외부 빔과 내부 빔 모두에 작용시키고, 크로스 빔의 개수를 5개로 설정하는 것이 최선을 선택임을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학기술부지정 국가지정연구실사업의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

[1] 양영수, 이세환, 이천수, (1998), "유한요소법을 이용한 AGV 구조물의 강도해석," 한국공장기계학회지, 제 7권, 제3호, pp. 37-42.

[2] 한근조, 안성찬, 심재준, 장철수, (2000), "보강판의 설계 변수 변화에 따른 평판구조물의 보강효과에 관한 연구," 대한기계학회 2000년도 추계학술대회논문집 A, pp. 807-812.

[3] 한동섭, 한근조, 이권순, 심재준, 김태형, (2004), "Inner Beam의 두께비 및 높이비가 LMTT용 Shuttle Car의 Frame 강도 및 강성에 미치는 영향," 한국항해항공학회지, 제28권, 3호, pp.207-211.

[4] Chapra, S. C. and Canale, R. P., "Numerical Methods for Engineers," McGraw-Hill, pp. 438-472, (1998).

[5] Franke, Klaus-Peter, "Boosting Efficiency of Split Marine Container Terminals by Innovative technology," IEEE Intelligent Transportation System Conference Proceedings, pp. 774-779, (2001).

[6] Lin F-t., Wai R-J., and Hong C-M, "Hybrid Supervisory Control using Recurrent Fuzzy Neural Network for Tracking Periodic Inputs, IEEE Trans. on Neural Network, Vol. 12, No. 1, pp. 68-90, (2001).

[7] Sakamoto T. and Shiromizu T., "Propulsion Control of Superconducting Linear Synchronous Motor Vehicle," IEEE Trans. on Magnetic, Vol. 33, No. 5, pp. 3460-3462, (1997).

[8] Timoshenko, S. P., and Goodier, J. N., "Theory of Elasticity," McGraw-Hill, pp. 80-83, (1982).

[9] Ugral, A. C., and Fenster, S. K., "Advanced Strength and Applied Elasticity," Elsevier, 2nd ed., (1981).

[10] Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., ' The Finite Element Method," 4th. ed., McGraw-Hill, Vol. 1, pp. 260-287, (1989).

원고접수일 : 2004년 11월 6일
 원고채택일 : 2005년 2월 2일