

LMTT용 Shuttle Car의 Frame 강도 및 강성에 미치는 Cross Beam의 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 : 세계 컨테이너 무역 규모가 연간 7%씩 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 Shuttle car의 frame부는 컨테이너를 지탱하는 outer beam, frame의 뼈대가 되는 inner beam, 두 beam을 연결시켜 보강하는 cross beam으로 구성되어 있으며, 본 연구에서는 이러한 frame을 설계하기 위하여 cross beam의 개수, 하중 제하 위치 및 inner beam의 위치가 따른 outer beam과의 거리 비 등이 frame의 강도 및 강성에 미치는 영향을 유한요소해석을 통하여 고찰하였다.

핵심용어 : LMTT, shuttle car, 항만하역시스템, 유한요소해석

ABSTRACT : According as the quantity of goods transported by ship is increasing about 7% per year, 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) consist of three parts which are outer beam, inner beam and cross beam. Outer beam supports a container and inner beam is a framework and cross beam reinforces outer and inner 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.

KEY WORDS : LMTT, shuttle car, port loading and unloading system, finite element analysis

1. 서 론

* 정회원, mortars77@hanmail.net 051)200-6989

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

*** 정회원, kslec@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@korca.com 051)200-6989

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 예상된다. 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 운영 시스템의 연계 등

여러 분야가 있는데, 본 논문에서는 그 중에서 LMTT(Linear Motor-based Transfer Technology)를 통한 이송 장치의 고속화, 자동화를 위한 구조물 설계에 대한 내용을 다루고자 한다. 기존의 터미널 내의 컨테이너 이송장치 자동화를 위한 해결 방안으로 AGV(Automated Guided Vehicle)가 거론되고 있으며 네덜란드 ECT항에서는 이미 운영 중이며, 싱가포르, 독일, 중국 등에서는 적용을 앞두고 있다. 그러나 AGV는 운전 속도가 5m/s 정도이며, 그 외 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 linear motor를 이용한 컨테이너 이송장치를 개발하여 시운전을 앞두고 있는 상태이다. LMTT는 수직·수평 이동이 가능하도록 설계된 mover의 wheel 구조와 격자구조의 rail로 구성되어 있으며, LSM(Linear Synchronous Motor) 방식으로써 영구자석편이 설치되어 mover(shuttle car)와 rail 사이에 일정한 간격으로 설치된 stator module에 의해 구동된다. LMTT용 shuttle car를 설계하기 위해서는 frame, stator module, wheel, rail의 형상에 관한 연구 및 컨테이너의 충격에 대한 평가, linear motor에서 발생하는 열에 관한 연구 등 다양한 연구가 진행되어야 한다(Sakamoto *et al.*, 1997).

Shuttle car의 frame부는 컨테이너를 지탱하는 outer beam, frame의 뼈대가 되는 inner beam, 두 beam을 연결시켜 보강하는 cross beam으로 구성되어 있으며, 본 연구에서는 이러한 frame을 설계하기 위하여 cross beam의 개수, 하중 재하 위치 및 Inner beam의 위치에 따른 Outer beam과의 거리 비 등이 frame의 강도 및 강성에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

2. 유한요소해석 모델 및 해석방법

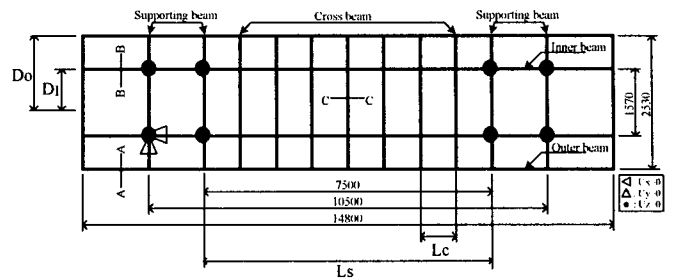
2.1 해석모델 및 경계조건

1) 해석모델

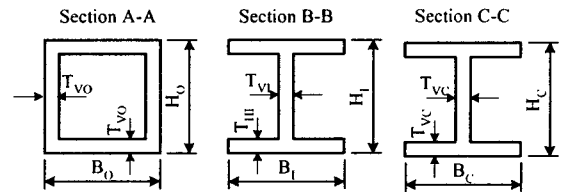
본 연구에서 유한요소해석을 위해 사용된 재료는 연강으로써 기계적 성질은 Table 1과 같다. 그리고 LMTT를 위한 shuttle car의 frame은 전체 구조물의 뼈대가 되는 inner beam, container를 지탱하는 outer beam, inner beam과 outer beam을 연결시켜 보강하는 cross beam의 세 부분으로 구성되며, 각 단면의 형상은 Fig. 1과 같고 치수는 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of mild steel

Items	Values
Elastic modulus	210GPa
Poisson's ratio	0.29
Density	7.8510^{-9} Ns ² /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

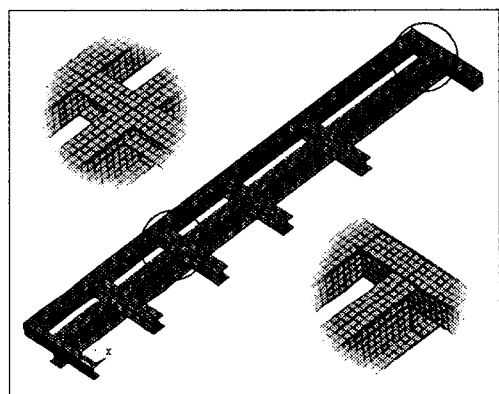


Fig. 2 Meshed shape of a quarter of frame of the shuttle car for LMTT

2) 하중 및 경계조건

본 연구에서 해석을 위한 구속조건은 Fig. 1에서와 같이 inner beam에 단순지지경계조건을 적용하였으며, frame의 대

칭면에 대칭경계조건을 적용하였다. 하중은 40ton을 3가지 하중 재하 조건에 따라 40ft-container의 길이에 해당하는 12.192mm에 걸쳐 분포하중으로 환산하여 작용시켰으며 기하학적 형상과 경계조건을 고려할 때 frame의 길이 방향과 폭 방향이 대칭이므로 유한요소해석을 위해 frame의 1/4만 모델링 하여 해석 시 대칭경계 조건을 사용하였으며, 각 절점에 3-d.o.f (Ux, Uy, Uz)를 갖는 8-node brick 요소를 사용하여 요소분할을 하였다. 해석모델의 메시된 형상을 Fig. 2에 나타내었다.

2.2 설계변수

1) Loading position of a container(LP)

하중 재하 위치(LP)는 40ton의 컨테이너 하중을 40ft-container의 길이에 해당하는 12.192mm에 분포하중으로 환산하여 작용시키는 위치로서 outer beam에만 작용시킨 경우(case I), outer beam과 inner beam에 동시에 작용시킨 경우(case II), inner beam에만 작용시킨 경우(case III)의 3가지를 설정하였다.

2) Number of cross beam(Nc)

Cross beam의 개수(Nc)는 cross beam의 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) Distance ratio of inner beam(R_i)

Frame 중심에서 inner beam사이 거리(D_i)를 고정되어 있는 outer beam의 거리(D_o)에 대한 비(R_i)로써 식(2)와 같이 정의하였으며, 0.1에서 0.8까지 0.1단위로 8가지를 설정하였다.

$$R_i = \frac{D_i}{D_o} \quad (2)$$

3. 해석결과 및 고찰

3.1 Maximum von Mises stress of the frame

Fig. 3은 컨테이너 하중이 inner beam과 outer beam 모두에 작용하는 경우 (case II)에 cross beam의 개수가 5개 일 때 frame에 발생하는 von Mises 응력 분포를 나타내며, 하중 재하 위치와 cross beam의 개수에 따른 frame의 maximum von Mises stress를 Table 3에 나타내었다. Fig. 3에서 point A는 frame의 중심으로서 최대 굽힘응력이 발생하는 지점이며, point B는 지지점으로서 최대 압축응력이 발생하는 지점이다.

Table 3 Maximum von Mises stress of the frame with respect to the number of cross beam (Nc) and the loading position of container (LP) at the point A as shown in Fig. 1

Nc	Loading position (LP)		
	Outer beam only (Point A / Point B)	Both of them (Point A / Point B)	Inner beam only (Point A / Point B)
1	133.28 / 131.80	82.13 / 139.71	45.04 / 143.33
3	78.92 / 144.00	57.52 / 145.66	47.81 / 147.77
5	64.13 / 148.63	50.98 / 148.58	45.01 / 143.59
7	56.48 / 152.14	47.31 / 151.10	43.24 / 151.07
9	51.87 / 154.26	45.02 / 152.59	42.93 / 151.93

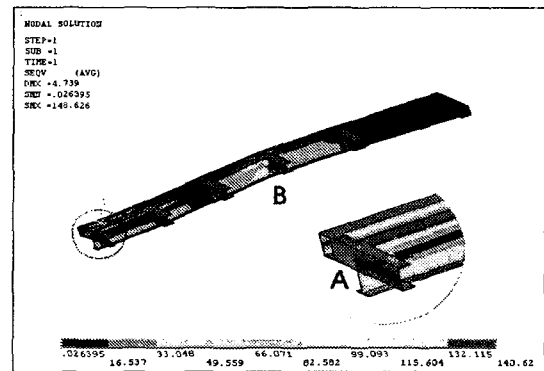
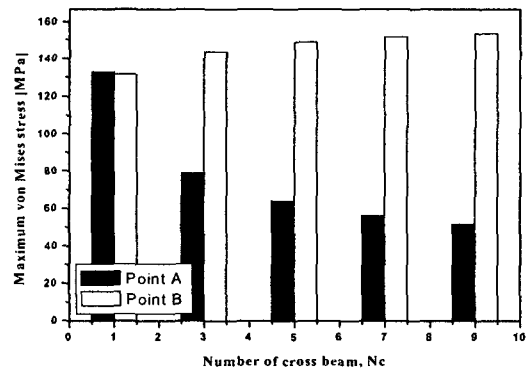
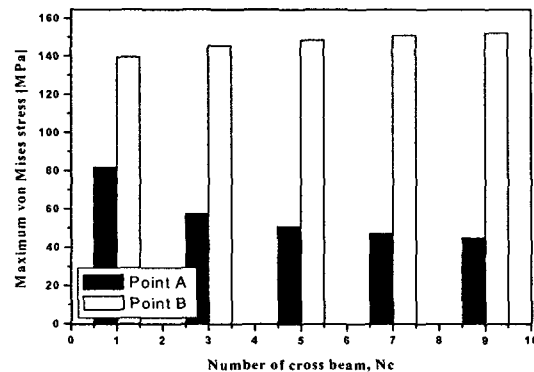


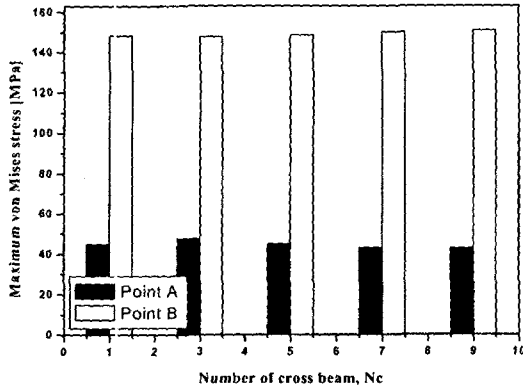
Fig. 3 Stress distribution of the frame as the number of cross beam is 5 and the loading position is applied on both of them



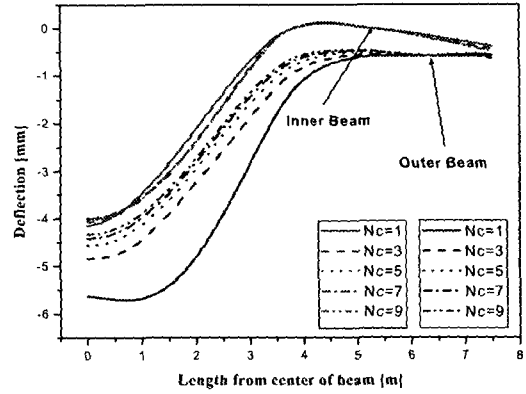
(a) The loading position of container is applied on outer beam



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



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



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

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 cross beam의 개수에 따른 frame의 Point A와 B의 maximum von Mises stress를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4를 살펴보면, cross beam의 개수가 증가할수록 frame의 최대 굽힘응력을 나타내는 point A에서의 maximum von Mises stress는 감소하였으나, 최대 압축응력을 나타내는 point B에서의 maximum von Mises stress는 오히려 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 하중 재하 위치가 outer beam에서 inner beam으로 이동함에 따라 point A에서의 maximum stress는 감소하였으며, point B에서는 조금씩 증가하다가 cross beam의 개수 5개를 기준으로 오히려 감소하는 것을 알 수 있다.

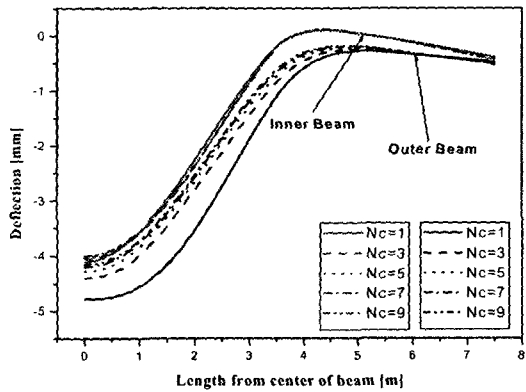
3.2 Maximum deflection of the frame

하중 재하 위치와 cross beam의 개수에 따른 frame의 maximum deflection을 Table 4에 나타내었다.

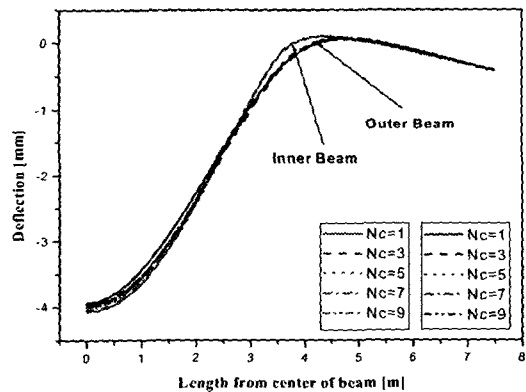
Table 4 Maximum deflection of the frame with respect to the number of cross beam (Nc) and the loading position of container (LP)

Nc	Loading position (LP)		
	Outer beam only	Both of them	Inner beam only
1	6.38	5.00	4.15
3	5.10	4.53	4.11
5	4.74	4.35	4.06
7	4.56	4.26	4.04
9	4.45	4.21	4.02

각각의 하중 재하 위치에서 cross beam의 개수에 따른 frame에서의 inner beam과 outer beam의 deflection curve를 Fig. 5에 나타내었다.



(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 outer beam에서 inner beam으로 이동함에 따라 outer beam의 deflection curve는 inner beam의 deflection curve와 점점 유사하게 나타나는 것을 알 수 있으며, 각각의 하중 재하 위치에서 cross beam의 개수가 증가함에 따라 outer beam의 deflection curve는 inner beam의 deflection curve와 비슷하게 나타남을 알 수 있다.

적정 cross beam의 개수를 결정하기 위하여 각각의 하중 재하 위치에서 cross beam의 개수에 따른 inner beam의 처짐과 outer beam의 처짐 사이의 상관관계를 비교하였다.

컨테이너 하중이 outer beam에만 작용하는 경우 cross beam의 개수에 따른 inner beam과 outer beam의 처짐 사이의 상관관계를 Fig. 6에 나타내었으며, 각각의 cross beam의 개수에서 1차식으로 fitting한 결과를 Table 5에 나타내었다.

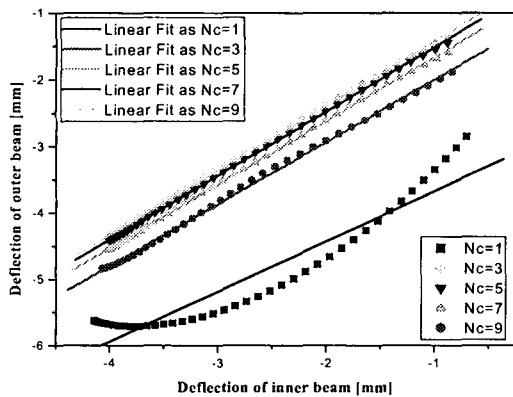


Fig. 6 Correlation between the deflection of inner beam and that of outer beam in the frame with respect to the number of cross beam as the loading position of container is applied on outer beam

Table 5 Linear fitting data between the deflection of outer beam and the deflection of inner beam with respect to the number of cross beam as the loading position of container is outer beam only

Nc	F(x)=Ax+B		R ²	SD
	A	B		
1	0.757	-2.916	0.94637	0.29218
3	0.934	-1.067	0.99927	0.03737
5	0.956	-0.708	0.99976	0.02147
7	0.963	-0.549	0.99985	0.01688
9	0.967	-0.458	0.99987	0.01611

container 하중이 outer beam에만 작용하는 경우에 cross beam의 개수에 따른 outer beam과 inner beam의 처짐 값에 대한 상관관계를 linear fitting한 결과를 나타낸 Table 5를 살펴보면, 모든 경우에 있어서 correlation coefficient (R²)는 0.946이상으로 높게 나타났으며, standard deviation (SD)는 cross beam의 개수가 7개 이상일 때 0.02 이하로 나타남을 알 수 있다.

컨테이너 하중이 inner beam과 outer beam에 동시에 작용하는 경우와 inner beam에만 작용 할 경우를 위와 같은 과정을 통하여 분석해본 결과 container 하중이 inner beam과 outer beam 모두에 작용하는 경우에는 correlation coefficient (R²)는 0.946이상으로 높게 나타났으며, standard deviation (SD)는 cross beam의 개수가 5개 이상일 때 0.02 이하로 나타났으며

하중이 inner beam에 작용 할 경우는 correlation coefficient (R²)는 0.946이상으로 높게 나타났으며, standard deviation (SD)는 cross beam의 개수가 3개 이상일 때 0.02 이하로 나타남을 알 수 있다.

3.3 Inner beam의 거리 비(R_D)에 따른 영향

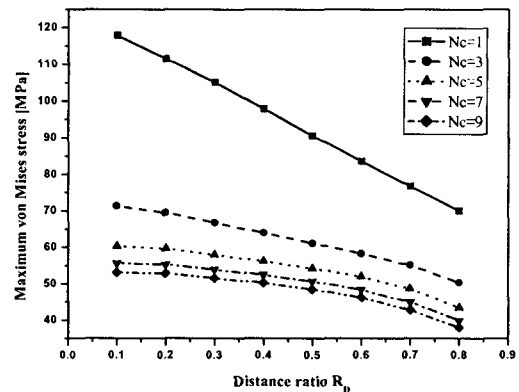


Fig. 7 Maximum von Mises stress of the frame with respect to the distance ratio(R_D) of inner beam from center and the number of cross beam(Nc)

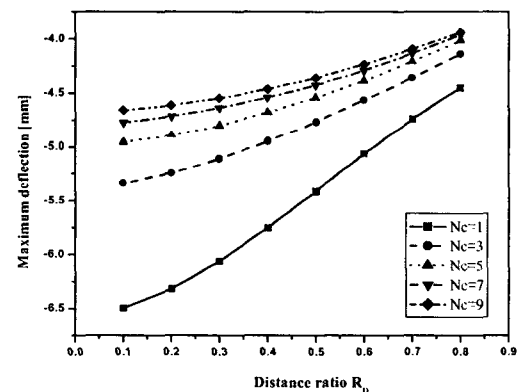


Fig. 8 Maximum deflection of the frame with respect to the distance ratio(R_D) of inner beam from center and the number of cross beam(Nc)

Frame에 발생하는 응력과 처짐을 고려할 때 container의 하중을 inner beam과 outer beam 모두에 작용시키는 것이 frame의 설계에 가장 적절하다고 판단되며, 이러한 조건하에서 cross beam의 개수가 1에서 9까지 5단계로 증가함에 따라 frame의 중심으로부터 위치가 고정되어 있는 outer beam의 거리에 대한 inner beam과 frame의 중심에서의 거리 비(R_D)가 0.1에서 0.8까지의 변화에 따른 maximum von Mises stress와 maximum deflection을 Fig. 9와 Fig. 10에 각각 나타내었다.

각각의 Inner beam의 개수에 따른 inner beam의 거리 비의

영향은 Fig. 7와 Fig. 8에서 나타나듯이 거리 비가 증가 할수록 Maximum von Mises stress와 maximum deflection은 감소하였다. 그러나 cross beam 개수가 1개일 때 거리 비에 따른 Maximum von Mises 와 maximum deflection의 변화가 가장 크게 나타났으며 cross beam이 5개 이상이 되었을 경우 변화 폭이 상당히 감소하는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

LMITT용 shuttle car의 frame을 설계하기 위한 기초자료로서 하중 재하 위치에 따라 cross beam의 개수가 frame의 강도 및 강성에 미치는 영향을 유한요소해석을 통하여 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. cross beam의 개수가 증가함에 따라 최대 굽힘응력이 발생하는 frame의 중심에서 maximum von Mises stress는 점점 감소하다가 수렴하였으나 최대 압축응력이 발생하는 지지점에서 maximum von Mises stress는 증가하다가 수렴함을 알 수 있었다.
2. 하중 재하 위치가 outer beam에서 inner beam으로 이동하게 되면, 최대 굽힘응력이 발생하는 frame의 중심에서 maximum von Mises stress는 현저히 감소하였으며 최대 압축응력이 발생하는 지지점에서 maximum von Mises stress는 cross beam의 개수 5개를 기준으로 부분적으로 증가하거나 감소함을 알 수 있었다.
3. inner beam과 outer beam의 처짐 값을 비교해볼 때, 하중 재하 위치가 outer beam only일 때 적정 cross beam의 개수는 7개 이며, 하중 재하 위치가 both of them일 때 적정 cross beam의 개수는 5개 이며, 하중 재하 위치가 inner beam only일 때 적정 cross beam의 개수는 3개임을 알 수 있었다.
4. Cross beam의 개수가 inner beam의 거리 비보다 frame의 설계에서 더 중요한 요소임일 알 수 있었으며 frame에 발생하는 응력과 처짐을 고려할 때 container의 하중을 inner beam 과 outer beam 모두에 작용시키고, cross beam의 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," 한국공작기계학회지, 제 7권, 제3호, pp. 37-42.
- [2] 한근조, 안성찬, 심재준, 장활수, (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 LMITT용 Shuttle Car의 Frame 강도 및 강성에 미치는 영향," 한국항해항만학회지, 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).