

Inner Beam의 두께비 및 높이비가 LMTT용 Shuttle Car의 Frame 강도 및 강성에 미치는 영향

한동섭* · 한근조** · 이권순*** · 심재준**** · 김태형*****

*동아대학교 기계공학과 대학원, **동아대학교 기계산업시스템공학부 교수, ***동아대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수,
****동아대학교 기계공학과 대학원, *****경남정보대 기계자동차산업학부 교수

The Effect of Thickness Ratio and Hight Ratio of Inner Beam on Strength and Stiffness of Frame in Shuttle Car for LMTT

GD. S. Han* · G. J. Han** · K. S. Lee*** · J. J. Shim**** · T. H. Kim*****

*Graduate school of Dong-A University, Busan 604-714, Korea

**Division of Mechanical, Industrial and Systems Engineering Dong-A University, Busan 604-714, Korea

***Division of Electrical, Electronics and Computer Engineering Dong-A University, Busan 604-714, Korea

****Graduate school of Dong-A University, Busan 604-714, Korea

*****Subdivision of Mechanical & Automotive Industry Kyungnam college of Information & Technology, Busan 617-701, Korea

요 약 : LMTT(Linear Motor-based Transfer Technology)는 항만 자동화를 위한 컨테이너 터미널용 수평 이송 장치이며, rail과 shuttle car(mover)에 부착된 stator module로 구성된 PMLSM(Permanent Magnetic Linear Synchronous Motor)에 의해 구동된다. 본 논문은 inner beam과 outer beam의 높이비가 LMTT용 shuttle car의 frame 강도 및 강성에 미치는 영향을 살펴보았다. 설계변수는 inner beam의 단면형상 및 높이비로 설정하였으며, 유한요소해석을 통하여 설계변수가 frame의 강도 및 강성에 미치는 영향을 살펴보았다.

핵심용어 : LMTT, 유한요소해석, 하역장비, 초대형컨테이너선

Abstract : The final goal of this research is to establish the relative dangerousness D/B for factors on seakeeping performance. This D/B is essential to develop the seakeeping performance evaluation system built-on-ship. The system is composed of the apparatus for measuring a vertical acceleration to be generated by the ship's motions, computer for calculating the synthetic seakeeping performance index and monitor for displaying the evaluating diagram of navigational safety of ship. In this paper, a methodology on the establishment of the relative dangerousness D/B for factors on seakeeping performance is presented by a numerical simulations, playing an important role on the algorithm of the program for calculating the synthetic seakeeping performance index. Finally, It is investigated whether the relative dangerousness D/B can be realized an accurate values according to the loading conditions, weather conditions, wave directions and present ship's speed of a model ship.

Key Words : Linear Motor based Transfer Technology(LMTT), Finite Element Method, Cargo-working System, Ultra Large Container Ship (ULCS)

1. 서 론

세계 컨테이너 무역 규모가 연간 7.3%씩 증가함에 따라 초대형 컨테이너선(Ultra Large Container Ship)의 출현 등 항만의 환경이 급격히 변화하고 있는 추세이며, 20년 이내에 15,000~18,000 TEU급의 초대형 컨테이너선의 출현이 예상된다. 초대형 컨테이너선의 출현은 물류 중심항(Hub-port)과 주변항(Feeder-port)으로 세계 항만을 양분시

키는 지각변동을 예고하고 있다. 이러한 항만의 변화에 성공적으로 대처하기 위해 각국은 새로운 개념의 초고속, 자동화된 차세대 항만하역시스템 개발에 총력을 기울이고 있다(Lin et al., 2001). 항만 자동화를 위해서는 컨테이너 하역과 이송장치, 게이트 및 운영 시스템의 연계 등 여러 분야가 있는데, 본 논문에서는 그 중에서 LMTT를 통한 이송장치의 고속화, 자동화를 위한 구조물 설계에 대한 내용을 다루고자 한다.

* 대표저자: 한동섭(비회원), dshan@donga.ac.kr 051)200-6989

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

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

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

***** 비회원, kimth@kit.ac.kr 051)320-1377

기존의 터미널 내의 컨테이너 이송장치 자동화를 위한 해결 방안으로 지금까지 AGV(Automated Guided Vehicle)가 거론되어 오고 있다. 네덜란드 ECT항에서는 이미 운영중이며, 싱가포르, 독일, 중국 등에서 적용을 앞두고 있다. 그러나, AGV는 운전 속도가 5m/s 정도이며, 그 외 센서의 불확실성, 부시스템들의 조합으로 인해 발생하는 여러 가지 문제들을 가지고 있다. 따라서, 이런 문제들을 해결하고, 자동화를 쉽게 달성하기 위하여 LMTT가 새로운 해결책으로 제안되고 있으며, 이미 독일의 Hamburg항에서는 대형 linear motor를 이용한 컨테이너 이송장치를 개발하여 시운전을 앞두고 있는 상태이다.

LMTT는 수직·수평 이동이 가능하도록 설계된 mover의 wheel구조와 격자구조의 rail로 구성되어 있으며, LSM(Linear Synchronous Motor) 방식으로써 영구자석편이 설치된 mover(shuttle car)와 rail 사이에 일정한 간격으로 설치된 stator module에 의해 구동된다. LMTT용 shuttle car를 설계하기 위해서는 inner beam과 outer beam의 높이비에 따른 영향, container의 충격에 대한 평가, cross beam의 개수 및 위치에 따른 영향 등 다양한 연구가 진행되어야 한다(Sakamoto *et al.*, 1997). 본 연구에서는 mover의 구조설계를 위한 기초 자료로서 shuttle car에서 inner beam의 형상 및 높이비가 frame의 강도 및 강성에 미치는 영향을 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 7.0을 이용하여 살펴보고자 한다(Zienkiewicz *et al.*, 1989).

2. Frame의 유한요소해석

2.1 해석모델 및 경계조건

유한요소해석을 위해 사용된 재료는 연강으로써 기계적 성질은 Table 1과 같다.

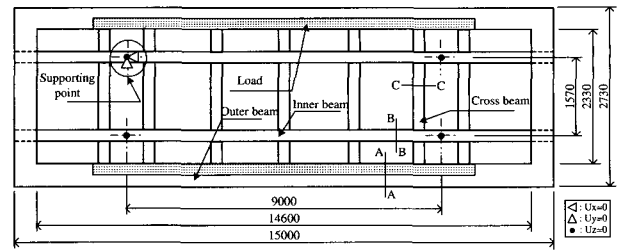
Table 1 Mechanical properties of mild steel

Items	Symbol	Value
Elastic modulus	E	210 GPa
Poisson's ratio	ν	0.29
Density	ρ	$7.85 \times 10^{-9} \text{ N s}^2/\text{mm}^4$
Yield strength	σ_y	206 MPa
Tensile strength	σ_t	519 MPa

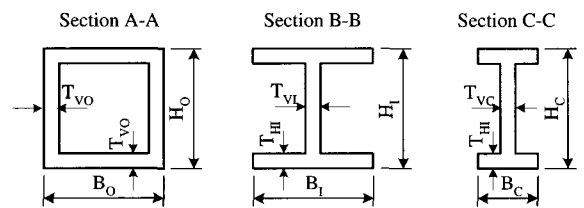
LMTT를 위한 shuttle car의 frame을 전체 구조물의 뼈대가 되는 Inner beam, container box를 지탱하는 Outer beam, inner beam과 outer beam을 연결시켜 보강하는 Cross beam의 세 부분으로 나누었으며 각 단면의 형상은 Fig. 1과 같고 치수는 Table 2에 나타내었다.

본 연구에서 유한요소해석을 위해 각 절점에 3-자유도(Ux, Uy, Uz)를 갖는 8절점 육면체요소를 사용하여 요소분할을 하였으며, 유한요소해석에 사용된 요소 수는 39,806~

41,696개, 절점 수는 66,464~70,280개이다. Fig. 2는 Frame의 메시된 형상을 나타낸다.



(a) schematic of shuttle car for LMTT



(b) outer beam (c) inner beam (d) cross beam

Fig. 1 Dimensions of cross section of each beam in frame of shuttle car

Table 2 Dimensions of cross section of each beam [unit:mm]

Items	B	H	T _H	T _V
Outer beam	200	200	20	20
Inner beam	200	250~400	20	20~50
Cross beam	100	200	20	20

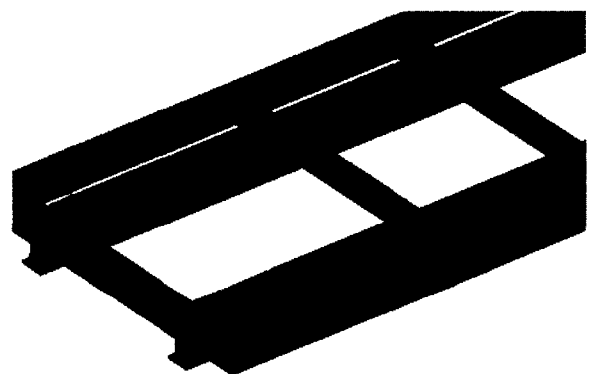


Fig. 2 Meshed shape of model for analysis (R_T=0.25, R_H=2.0)

해석을 위한 구속조건은 Fig. 1에서와 같이 Inner beam의 아랫부분의 wheel과 결합되는 네 부분 중 한 부분은 3-자유도(Ux, Uy, Uz)를 고정하였고, 나머지 세 부분은 1-자유도(Uz)를 고정하였다. 하중(W)은 40ton을 Outer beam 위에 40ft-컨테이너박스의 길이에 해당하는 12,192mm에 걸쳐 분포하중으로 환산하여 작용시켰다.

2.2 설계변수

Inner beam이 frame의 강도 및 강성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 Inner beam의 두께비 및 높이비를 설계변수로 설정하였다(한 등, 2000), (양 등, 1998).

2.2.1 Inner beam의 두께비(R_T)

Inner beam의 두께비(R_T)는 Inner beam의 폭(B_I)에 대한 수직부재의 두께(T_{VI})의 비로서 식(1)과 같이 정의하였으며, 해석을 위해 0.1, 0.15, 0.2, 0.25의 4가지를 설정하였다.

$$R_T = T_{VI} / B_I \quad (1)$$

2.2.2 Inner beam의 높이비(R_H)

Inner beam의 높이비(R_H)는 Outer beam의 높이(H₀)에 대한 Inner beam의 높이(H_I)의 비로서 식(2)와 같이 정의하였으며, 해석을 위해 1.25, 1.5, 1.75, 2.0의 4가지를 설정하였다.

$$R_H = H_I / H_0 \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

Inner beam의 두께비(R_T)와 높이비(R_H)에 따른 frame의 최대 발생응력과 최대 처짐 값을 Table 3과 4에 각각 나타내었으며, Inner beam의 두께비(R_T) 0.25, 높이비(R_H) 2.0인 frame에 발생하는 응력분포를 Fig. 3에 나타내었다.

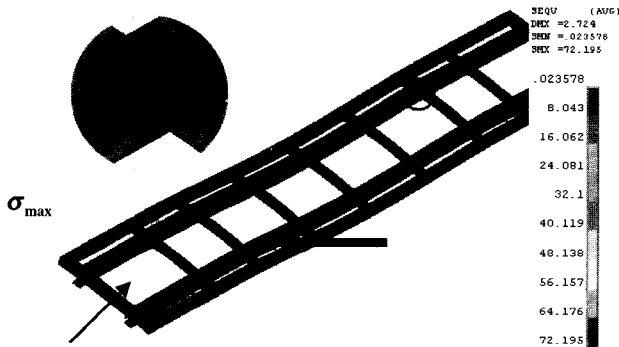


Fig. 3 Stress distribution of frame as R_T=0.25, R_H=2.0

Table 3 Maximum equivalent stress of frame with respect to the thickness ratio and the height ratio [MPa]

R _H \ R _T	0.10	0.15	0.20	0.25
1.25	137.952	129.740	121.620	112.381
1.50	113.294	106.484	101.391	95.668
1.75	94.916	89.300	86.002	82.441
2.00	82.307	77.129	74.648	72.195

Table 4 Maximum deflection of frame with respect to the thickness ratio and the height ratio [mm]

R _H \ R _T	0.10	0.15	0.20	0.25
1.25	5.592	5.269	5.007	4.784
1.50	4.603	4.299	4.056	3.850
1.75	3.875	3.595	3.376	3.191
2.00	3.338	3.084	2.888	2.724

Fig. 3에서와 같이 최대응력은 frame 중에서 wheel과 결합되는 Inner beam의 아래쪽 지지단(Fig. 3에서 확대된 부분)에서 발생하였다. 이는 지지단의 반력으로 인해 응력이 집중되는 현상이 발생하였기 때문이다. 최대처짐은 컨테이너 하중을 받는 Outer beam의 중앙부에서 발생하였다.

3.1 두께비(R_T)와 높이비(R_H)에 따른 응력공식

40ton의 하중이 frame에 작용할 때 Inner beam의 두께비(R_T)와 높이비(R_H)에 따라 frame에 발생하는 최대 상당응력(von Mises stress or equivalent stress)의 변화추이를 Fig. 4와 5에 각각 나타내었다.

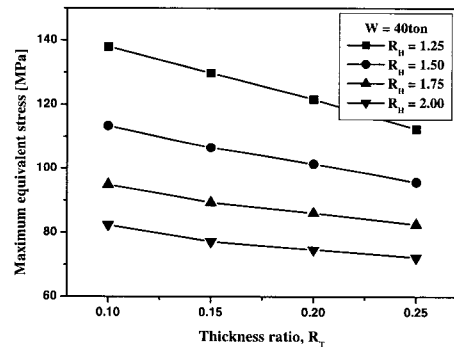


Fig. 4 Maximum equivalent stress of frame with respect to the thickness ratio

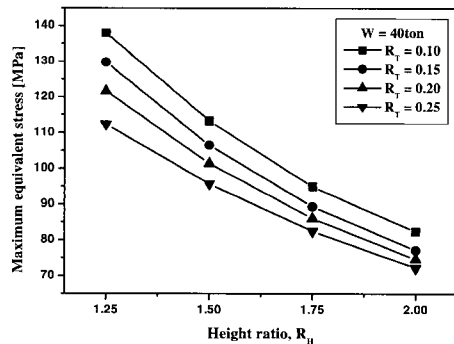


Fig. 5 Maximum equivalent stress of frame with respect to the height ratio

Frame에 발생하는 최대상당응력은 Inner beam의 두께비가 증가할수록 선형적으로 감소하였으며, 높이비가 증가할수록 비선형적으로 감소하다가 일정한 값에 수렴하게 되는 형태를 보였다. 또한 두께비 보다 높이비에 따른 영향이 지배적으로 나타났다. 16가지의 모델에 대한 결과를 바탕으로 Inner beam의 두께비(R_T)와 높이비(R_H)에 따른 Frame의 최대상당응력공식을 도출하기 위해 먼저, 식(3)과 같이 최대상당응력을 높이비에 관한 3차식으로 정의하였다. 높이비(R_H)에 따른 최대상당응력 값을 나타낸 그래프(Fig. 5)를 fitting하여 얻은 각 항의 계수를 Table 6에 나타내었다.

$$\sigma_{e, \max} = A_0 + A_1 R_H + A_2 R_H^2 + A_3 R_H^3 \quad (3)$$

Table 6 Coefficients of stress formula with respect to the thickness ratio(R_T)

R_T	A_0	A_1	A_2	A_3
0.10	373.327	-273.243	74.768	-5.451
0.15	374.165	-302.150	99.408	-11.296
0.20	323.540	-244.919	77.360	-8.587
0.25	265.911	-179.567	52.128	-5.387

각항의 계수를 다시 두께비(R_T)에 관한 3차식으로 fitting하여 나타내면,

$$A_0 = 39.43 + 6443.023 R_T - 36968.0 R_T^2 + 59278.7 R_T^3$$

$$A_1 = 356.6 - 11677.4 R_T + 64237.1 R_T^2 - 104421.4 R_T^3$$

$$A_2 = -288.6 + 6597.55 R_T - 35440 R_T^2 + 58005.3 R_T^3$$

$$A_3 = 64.16 - 1243.52 R_T + 6549.33 R_T^2 - 10752 R_T^3$$

이 된다.

3.2 두께비(R_T)와 높이비(R_H)에 따른 처짐공식

40ton의 하중이 frame에 작용할 때 Inner beam의 두께비(R_T)와 높이비(R_H)에 따라 frame에 발생하는 최대처짐의 변화추이를 Fig. 6과 7에 각각 나타내었다.

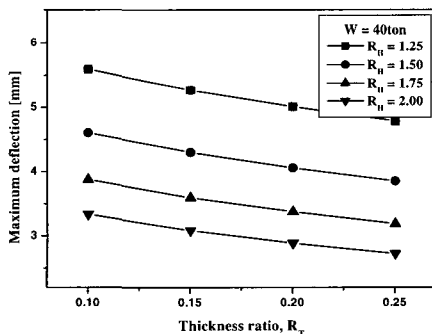


Fig. 6 Maximum deflection of frame with respect to the thickness ratio

Frame에 발생하는 최대처짐은 최대상당응력 결과와 비슷하게 Inner beam의 두께비가 증가할수록 선형적으로 감소하였으며, 높이비가 증가할수록 비선형적으로 감소하다가 일정한 값에 수렴하게 되는 형태를 보였다. 또한 최대상당응력과 같이 두께비 보다 높이비에 따른 영향이 지배적으로 나타났다.

16가지의 모델에 대한 결과를 바탕으로 Inner beam의 두께비(R_T)와 높이비(R_H)에 따른 Frame의 최대처짐공식을 도출하기 위해 먼저, 식(4)와 같이 최대처짐을 높이비에 관한 3차식으로 정의하였다. 높이비(R_H)에 따른 최대처짐 값을 나타낸 그래프(Fig. 7)를 fitting하여 얻은 각 항의 계수를 Table 7에 나타내었다.

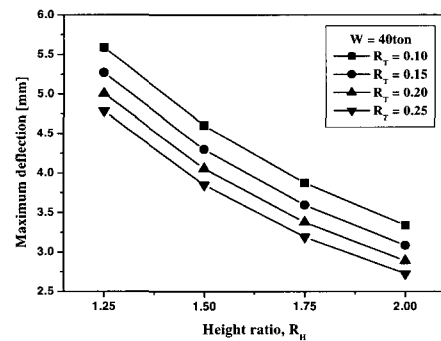


Fig. 7 Maximum deflection of frame with respect to the height ratio

$$\delta_{\max} = B_0 + B_1 R_H + B_2 R_H^2 + B_3 R_H^3 \quad (4)$$

Table 7 Coefficients of deflection formula with respect to the thickness ratio(R_T)

R_T	B_0	B_1	B_2	B_3
0.10	16.902	-14.691	5.448	-0.747
0.15	16.664	-14.939	5.632	-0.779
0.20	16.592	-15.401	5.960	-0.843
0.25	16.484	-15.707	6.184	-0.885

각항의 계수를 다시 두께비(R_T)에 관한 3차식으로 fitting하여 나타내면,

$$B_0 = 18.684 - 30.57 R_T + 154.4 R_T^2 - 269.3 R_T^3$$

$$B_1 = -16.32 + 37.86 R_T - 265.2 R_T^2 + 494.2 R_T^3$$

$$B_2 = 6.5 - 25 R_T + 177.6 R_T^2 - 330.7 R_T^3$$

$$B_3 = -0.99 + 5.58 R_T - 38.4 R_T^2 + 71.12 R_T^3$$

이 된다.

3.3 응력공식을 이용한 Inner beam의 적정 치수

LMTT용 shuttle car의 frame은 AGV에 비해 구조가 간단하며 부품간 변형으로 인한 간섭이 거의 발생하지 않으므로 본 연구에서 도출된 Inner beam의 두께비(R_T)와 높이비(R_H)에 따른 응력공식인 식(3)을 이용하여 Inner beam의 치수를 결정할 수 있다.

Table 1에서의 재료의 항복응력을 설계기준응력으로 두고, 안전율을 2로 하였을 때 허용응력은 103MPa이 된다. 식(3)에서 Inner beam의 높이가 250mm($R_H=1.25$)일 때, Inner beam의 두께비(R_T)는 0.279이 된다. 즉 Inner beam의 두께비는 flange 폭(200mm)에 대한 web 두께의 비로서 web 두께는 55.8mm가 된다. Inner beam의 높이가 300mm($R_H=1.5$)일 때, Inner beam의 두께비(R_T)는 0.155가 되어 Inner beam의 web 두께는 31mm가 된다. Inner beam의 높이가 350mm($R_H=1.75$)일 때, Inner beam의 두께비(R_T)는 0.048이 되어 Inner beam의 web 두께는 9.6mm가 된다. Inner beam의 높이가 400mm($R_H=2.0$)일 때, Inner beam의 두께비(R_T)는 0.015가 되어 Inner beam의 web 두께는 3mm가 된다.

Inner beam은 I형 beam으로서 40ton의 하중에 대한 Inner beam의 적정 치수는 높이 300mm, web의 두께 30mm로 하는 것이 가장 효율적인 구조가 된다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

LMTT용 shuttle car의 frame을 설계하기 위한 기초자료로서 Inner beam이 frame의 강도 및 강성에 미치는 영향을 유한요소해석을 통하여 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Inner beam의 두께비가 증가할수록 최대상당응력과 최대처짐은 정비례에 가깝게 선형적으로 감소하였으며, 높이비가 증가할수록 최대상당응력과 최대처짐은 반비례에 가깝게 비선형적으로 감소하였다.

2. LMTT용 shuttle car에서 Inner beam의 두께비(R_T)와 높이비(R_H)에 따른 Frame에 발생하는 최대상당응력과 최대처짐식을 3차식으로 정의하여 각각 유도하였다.

3. 본 연구에서 도출한 응력공식을 이용할 때, 40ton의 하중에 대한 Inner beam의 적정 치수는 높이 300mm, web의 두께 30mm로 하는 것이 가장 효율적인 구조가 된다는 것을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학기술부지정 국가지정연구실사업의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] 양영수, 이세환, 이권순(1998), "유한요소법을 이용한 AGV 구조물의 강도해석," 한국공학기계학회지, 제 7권, 제 3호, pp. 37-42.
- [2] 한근조, 안성찬, 심재준, 장활수(2000), "보강관의 설계 변수 변화에 따른 평판구조물의 보강효과에 관한 연구," 대한기계학회 2000년도 추계학술대회논문집 A, pp. 807-812.
- [3] Lin F-J., Wai R-J., and Hong C-M.(2001), "Hybrid Supervisory Control using Recurrent Fuzzy Neural Network for Tracking Periodic Inputs," IEEE Trans. on Neural Network, Vol. 12, No. 1, pp. 68-90.
- [4] Sakamoto T. and Shiromizu T.(1997), "Propulsion Control of Superconducting Linear Synchronous Motor Vehicle," IEEE Trans. on Magnetis, Vol. 33, No. 5, pp. 3460-3462.
- [5] Zienkiewicz O. C., Taylor R. L.(1989), "The Finite Element Method," 4th. ed., McGraw-Hill, Vol. 1, pp. 260-287.

원고접수일 : 2003년 10월 24일

원고채택일 : 2004년 2월 4일