

컨테이너 이송을 위한 LMTT용 셔틀 카의 프레임 치수최적설계

한동섭* · 한근조** · 이권희*** · 심재준**** · 이성욱*****

*동아대학교 대학원, **동아대학교 기계공학부 교수, ***동아대학교 기계공학부 교수, ****동아대학교 대학원, *****동아대학교 대학원

Optimum Design for the Frame of the Shuttle Car for LMTT to transfer a Container

Dong-Seop. Han* · Geun-Jo. Han** · Kwon-Hee. Lee*** ·
Jae-Joon. Shim**** · Seong-Wook. Lee*****

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

**Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

***Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

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

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

요약 : LMTT(Linear Motor based Transfer Technology)는 크게 제어 부, 셔틀 카, 레일로 구성되며, 항만의 자동화를 위한 컨테이너 부두에서 사용되는 새로운 형태의 이송장치이다. 셔틀카는 다시 프레임 부, 구동 부, 휠로 나뉜다. 이 장치를 설계하기 위하여 각 부품에 대한 다양한 연구가 수행되어져야 한다. 이 논문에서는 가로 보가 프레임의 강도에 미치는 영향에 대한 이전의 연구로부터 기초 설계된 프레임에 대해 항만설계 기준을 만족하면서 셔틀카의 무게를 최소화할 수 있는 프레임의 치수 최적설계를 수행하였다. 최적화를 위해 설계변수로 프레임 각 부재의 두께를, 목적함수로 프레임의 무게를, 제약조건으로 설계기준 응력과 처짐을 설정하였다.

핵심용어 : LMTT, 이송시스템, 셔틀카, 최적화, 항만자동화

ABSTRACT : LMTT(Linear Motor based Transfer Technology) is a new type of transfer system used in the maritime container terminal for the port automation, and largely consists of a controller, shuttle car, and rail. The shuttle car is divided into the frame part, the driving part, and wheels. In order to design this system, various researches on each part of it must be conducted. In this study, we dealt with the optimum design for the frame part of the shuttle car designed from previous studies on the strength of the frame with respect to the number of cross beams to minimize the weight of the shuttle car and to satisfy design criteria of cargo-handling systems in container terminal. For the optimization of the frame, thicknesses of each beam were adopted as design variables, the weight of the frame as objective function, and stress and deflection per unit length as constraint conditions.

KEY WORDS : LMTT, transfer system, shuttle car, optimization, port automation

1. 서 론

세계 컨테이너 무역 규모가 연간 7.3%씩 증가함에 따라 초대

형 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 세계의 항만을 양분시키는 지각변동을 예고하고 있다. 이러한 항만의 변화에 성공적으로 대처하기 위해 각 국은 새로운 개념의 초고속, 자동화된 차세대 항만하역시스템이 개발에 총력을 기울이고 있다. 항만 자동화를 위해서는 컨테

*정희원, dshan@donga.ac.kr 051)200-6989

**종신희원, gjhan@dau.ac.kr 051)200-7650

***정희원, lcekh@dau.ac.kr 051)200-7638

****정희원, jjshim@donga.ac.kr 051)200-6989

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

이너 하역과 이송장치, 게이트 및 운영 시스템의 연계 등 여러 분야가 있으며, 본 논문에서는 그 중에서 LMTT(Linear motor based transfer technology)를 통한 이송장치의 고속화, 자동화를 위한 구조물 설계에 대한 내용을 다루고자 한다(Sakamoto et al, 1997).

기존의 터미널 내의 컨테이너 이송장치 자동화를 위한 해결 방안으로 지금까지 AGV(Automated Guided Vehicle)가 거론되어 오고 있다. 네덜란드 ECT항에서는 이미 운영 중이며, 싱가포르, 독일, 중국 등에서 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 Hamburg항에서는 선형 모터(linear motor)를 이용한 컨테이너 이송장치를 개발하여 시운전을 앞두고 있는 상태이다(Yang et al, 1998, Franke, 2001).

LMTT는 항만자동화를 위해 컨테이너 터미널에서 사용되는 이송시스템으로서 크게 제어부, 셔틀카, 레일로 나뉘며, 셔틀카의 아래에 이동자(mover)와 레일사이의 고정자(stator)로 구성된 PM LSM(Permanent Magnetic Linear Synchronous Motor) 방식에 의해 구동된다. 여기서 셔틀카는 컨테이너를 적재하기 위한 프레임, 영구자석이 장착된 구동부, 가로·세로 이동이 가능한 회전형 휠로 나뉜다. 이러한 LMTT용 셔틀카를 설계하기 위해서는 구조물의 형상에 관한 연구, 컨테이너의 충격에 대한 평가, 선형모터에서 발생하는 열에 관한 연구 등 다양한 연구가 진행되어야 한다.

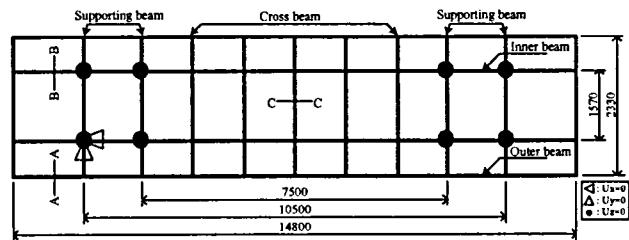
본 논문에서는 셔틀카의 구조설계를 위해 inner beam의 두께비와 높이비가 프레임의 강도 및 강성에 미치는 영향에 대한 이전의 연구(Han et al, 2004)로부터 기초 설계된 프레임에 대해 항만시설장비검사기준을 만족하면서 셔틀카의 무게를 최소화할 수 있는 프레임의 치수 최적설계를 수행하고자 한다.

2. 해석모델 및 정식화

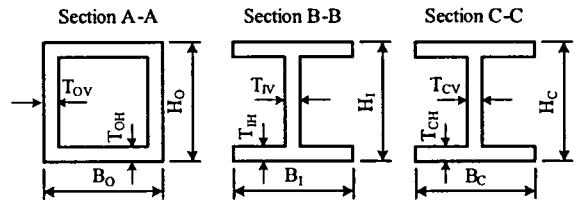
2.1 해석모델

LMTT용 셔틀카의 프레임은 외곽 사각형의 outer beam, 안쪽 2개의 inner beam, 4개의 supporting beam, 여러 개의 cross beam으로 구성된다. 40ton의 컨테이너 하중은 프레임의 상단에 분포하중으로 작용되고, supporting beam이 지나는 inner beam의 아래 부분 8곳이 구동부에 의해 지지된다. 유한요소해석을 이용하여 수행한 Frame 설계에 관한 이전의 연구에서 컨테이너의 하중재하위치가 outer beam에 작용될 때, cross beam의 적정 개수는 5개임을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 프레임의 경량화 설계를 위한 프레임의 초기모델과 각 beam의 단면 형상은 Fig. 1과 같고, 이전 연구로부터 설계된 프레임에서 각

beam의 단면 치수는 Table 1과 같다.



(a) dimensions and boundary condition for the frame



(b) cross section of each beam in the frame

Fig. 1 Schematic of the frame used for optimum design to minimize the weight of it

Table 1 Initial values for cross section of each beam in the frame designed from previous studies

Items	B _—	H _—	T _H	T _V
Outer beam (O)	200 mm	200 mm	20 mm	20 mm
Inner beam (I)	200 mm	400 mm	20 mm	40 mm
Cross beam (C)	200 mm	200 mm	20 mm	20 mm

최적화를 위한 유한요소모델은 단면의 형상을 정의할 수 있는 3차원 beam요소를 사용하였다. 본 연구에서 해석을 위해 사용된 재료는 연강으로써 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Mechanical properties of a mild steel used for the analysis in this study

Items	Value
Elastic modulus	210 GPa
Poisson's ratio	0.29
Density	7.85×10^{-9} Ns ² /mm ⁴
Yield strength	206 MPa
Tensile strength	519 MPa

2.2 프레임의 최적설계를 위한 정식화

항만하역장비의 설계기준응력과 처짐에 대한 항만시설장비 검사기준(해양수산부, 2000)을 만족하는 LMTT용 셔틀카의 경량화 설계를 위해 프레임의 무게(W_F)를 최소화하기 위한 정식

화는

$$\mathbf{X} = [T_{iv}]^T \quad i = O, I, C \quad (1)$$

Minimize:

$$W_F(\mathbf{X}) \quad (2)$$

Subject to:

$$1.5 - \left| \frac{\sigma_y}{\sigma_{i, \max}} \right| \leq 0 \quad i, C \quad (3)$$

$$\left| \frac{\delta_{i, \max}}{L_i} \right| - \frac{1}{800} \leq 0 \quad i, C \quad (4)$$

이 되고, 여기서 σ_y 는 재료의 항복강도이다(Belegundu, 2000).

각 beam의 두께변화에 대한 프레임의 치수최적화를 위해 각 beam의 폭(B_i)과 높이(H_i)는 고정하였고, 설계변수로는 각 beam의 수직부재 두께(T_{iv})를 설정하였으며, 첨자 O는 outer beam, I는 inner beam, C는 cross beam을 각각 의미한다. 각 beam의 수평부재 두께(T_{ih})는 수직부재 두께(T_{iv})에 폭 대 높이비(B_i/H_i)를 곱하여 아래와 같이 정의하였다.

$$T_{ih} = \frac{B_i}{H_i} T_{iv} \quad (5)$$

설계변수의 상·하한값 및 초기치를 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Initial values and ranges of design variables for optimum design

Design Variables	Values [mm]		
	Initial	Lower	Upper
T_{ov}	20	10	30
T_{iv}	40	30	50
T_{cv}	20	10	30

목적함수는 프레임의 무게(W_F)를 설정하였으며, 제약조건으로는 항만시설장비검사기준에 따라 각 beam에서 발생하는 최대상당응력($\sigma_{i, \text{allow}}$) 재료의 항복응력(σ_y)에 대해 1/1.5를, 각 beam의 길이(L_i)에 대한 최대처짐($\delta_{i, \text{allow}}$) 1/800을 각각 넘지 않도록 설정하였다.

3. 해석결과 및 고찰

일계법을 사용하는 ANSYS 8.1을 이용하여 프레임 각 beam의 두께를 설계변수로 하고 프레임의 무게를 최소화시키기 위한 치수최적화를 수행한 결과를 Table 4에 나타내었으며, 최적화된 모델의 응력분포도를 Fig. 2에 나타내었다.

Table 4 Summary of optimization results

Model	Design Variables [mm]			W_F [ton]
	T_{ov}	T_{iv}	T_{cv}	
Initial	20	40	20	11.125
Optimal	10.095	36.402	12.289	8.148

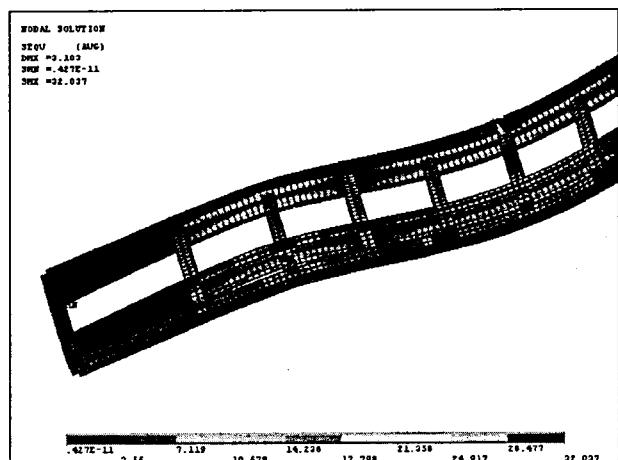


Fig. 2 Stress distribution of the optimized frame

Table 4를 살펴보면, 항만시설장비검사기준을 만족하는 최적의 프레임 치수 중 outer beam의 두께 T_{ov} 는 10.095mm로 현저히 줄었으며, inner beam의 두께 T_{iv} 는 36.402mm로 감소하였고, cross beam의 두께 T_{cv} 는 12.289mm로 감소하였다. 프레임의 무게는 11.125ton에서 8.148ton으로 약 26.7%의 감소효과를 얻을 수 있었다. 실제 사용가능한 판재의 두께를 고려하여 40ton의 컨테이너 하중을 견딜 수 있는 프레임의 최적 치수를 결정하면 Table 5와 같다.

Table 5 Optimum values for cross section of each beam in the frame designed from previous studies

Items	B_i	H_i	T_{ih}	T_{iv}
Outer beam (O)	200 mm	200 mm	10 mm	10 mm
Inner beam (I)	200 mm	400 mm	19 mm	38 mm
Cross beam (C)	200 mm	200 mm	13 mm	13 mm

이러한 결과는 프레임의 응력과 처짐에 가장 큰 영향을 미치

는 부재는 inner beam이며, outer beam은 프레임의 응력에 큰 영향력을 미치지 못하기 때문에 가장 많은 감소율을 보임을 알 수 있었다. LMTT용 셔틀카는 신속, 정확한 제어를 위해 경량화가 요구되고 있으며, 항만시설장비검사기준을 만족하면서 경량화 설계된 최적의 프레임형상을 얻을 수 있었다.

- [5] 해양수산보고서(2000), 항만시설장비검사기준, [별표 4]
- [6] Belegundu, A. D.(2000), Optimization Concepts and Applications in Engineering, Prentice Hall, New Jersey, pp. 385-419.

4. 결 론

본 연구에서는 LMTT용 셔틀카의 프레임에 대해 항만시설장비검사기준을 만족하면서 무게를 최소화시킬 수 있도록 프레임의 치수 최적설계를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 프레임에서 outer beam의 두께 T_{ov} 는 10.095mm로 현저히 줄었으며, inner beam의 두께 T_{iv} 는 36.402mm로 감소하였고, cross beam의 두께 T_{cv} 는 12.289mm로 감소하였다.
2. 경량화를 위한 최적화를 수행한 결과 프레임의 무게는 기준 11.125ton에서 8.148ton으로 약 26.7%의 감소율을 보임을 알 수 있었다.
3. LMTT용 셔틀카는 신속, 정확한 제어를 위해 경량화가 요구되고 있으며, 항만시설장비검사기준을 만족하면서 경량화 설계된 최적의 프레임형상을 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] Yang, Yeong-Soo, Lee, Se-Hwan, and Lee, Cheon-Soo (1998), A Strength Analysis of the AGV Structure using the Finite Element Method, J. of KSMTE, Vol. 7, No. 3, pp. 37-42.
- [3] Franke, Klaus Peter(2001), Boosting Efficiency of Split Marine Container Terminals by Innovative technology, 2001 IEEE Intelligent Transportation System Conference Proceedings, pp. 774-779.
- [4] Han, Dong-Seop, Han, Geun-Jo, Lee, Kwon-Soon, Shim, Jae-Joon, and Kim, Tae-Hyong(2004), The Effect of Thickness Ratio and Hight Ratio of Inner Beam on Strength and Stiffness of Frame in Shuttle Car for LMTT, Vol. 28, No. 3, pp. 207-211.