

## 스테이터 모듈의 열해석을 고려한 이동체의 구조설계

이정명\* · 한동섭\*\* · 이성욱\* · 한근조\*\*\* · 이권순\*\*\*\*

\*동아대학교 대학원 기계공학과, \*\*동아대학교 BK21 총괄사업단, \*\*\*동아대학교 기계공학부, \*\*\*\*동아대학교 전기공학과

## Structural Design of a Mover considering the Thermal Analysis of a Stator Module

J. M. Lee\* · D. S. Han\*\* · S. W. Lee\* · G. J. Han\*\*\* · K. S. Lee\*\*\*\*

\*Department of Mechanical Engineering, Graduate school of Dong-A University, Busan 604-714, Korea

\*\*Institute of BK21, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

\*\*\*Department of Mechanical Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

\*\*\*\*Department of Electrical Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

**요 약** : 선형모터의 설계에 있어서 열적 거동의 파악은 모터의 연속 추력 및 열변형과 관련하여 중요한 고려요소 중의 하나이다. 본 연구에서는 항만자동화를 위한 차세대 컨테이너의 수평이송시스템인 LMTT (Linear Motor-based Transfer Technology)용 선형모터의 설계를 위해 고정자의 코일에서 발생하는 열에 의한 이동체의 온도분포를 분석하여 고정자 모듈의 열해석을 고려한 이동체의 구조설계에 관한 연구를 수행하였다. 먼저, 선형모터의 주요부품의 치수를 설계하고, 다음으로 고정자 모듈의 발열을 고려한 이동체의 온도분포를 분석하여 열-구조 연성해석을 수행하였다.

**핵심용어** : 리니어모터, 이동체, 고정자 모듈, 리니어모터운송시스템, 열해석

**ABSTRACT** : When we design a linear motor, the thermal behavior investigation is one of great important considerations with respect to uniform thrust force and thermal deformation of a linear motor. In this study, we conduct the research for the structural design of the linear motor for LMTT(Linear Motor-based Transfer Technology) which is the next generation of container horizontal transfer system in order to automate a container terminal. After the dimensions of main parts for a linear motor were set up, we carried out the thermal-structural analysis of the linear motor considering the thermal analysis of the stator module.

**KEY WORDS** : linear motor, mover, stator module, linear motor-based transfer technology, thermal analysis

### 1. 서 론

리니어모터(Linear Motor)는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 회전형모터의 회전자(Rotor), 고정자(Stator) 및 공극(Air Gap)을 각각 축 방향으로 잘라서 펼쳐놓은 형태로, 회전형모터가 전기에

너지를 회전운동에너지로 변환시키는 것에 비해, 리니어모터는 전기에너지를 직선운동에너지로 변환시켜 직선적인 추력을 발생시킨다. 직선운동을 필요로 하는 곳에 리니어모터를 사용하면 회전형모터를 사용할 때 부가되는 스크류, 체인, 기어 등의 기계적인 에너지변환장치가 전혀 필요치 않아 구조가 간단하고 마찰

\* 대표저자 : 이정명(비회원), jmlee@donga.ac.kr 051)200-6989

\*\* 비회원, dshan@dau.ac.kr 051)200-6989

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

\*\*\* 정회원, gjhan@dau.ac.kr 051)200-7650

\*\*\*\* 정회원, kslee@dau.ac.kr 051)200-7739

에 의한 에너지 손실이나 소음이 발생하지 않으며 운전속도에도 제한을 받지 않는 등 특유의 이점이 많기 때문에 오늘날에 육상운송에서의 자기부상열차나 리니어모터카, 대규모의 공장이나 산업시설에서의 컨베이어 시스템, 승강기, 크레인, 자동문, 항만자동화에서의 리니어모터운송시스템 등 광범위한 분야에 필수적인 직선추력 발생장치로 응용·개발되고 있다.

그 중 항만자동화에서의 리니어모터운송시스템(LMTT, Linear Motor-based Transfer Technology)은 컨테이너를 격자구조의 레일을 따라 수평으로 이송시키는 기술로 동기식 리니어모터(Linear Synchronous Motor)에 의해 구동하며 이동체의 가로빔 및 세로빔에 설치된 영구자석과 고정자 모듈(Stator Module)의 철심에 코일을 감아서 만든 전자석의 상호작용에 의해 발생하는 자기력으로 이동체를 부상(Levitation) 또는 흡입(Suction)시켜 균일한 추력을 발생시킨다. 이러한 LMTT에 대한 연구는 Inner Beam의 두께비 및 높이버가 LMTT용 셔틀카 프레임 강도 및 강성에 미치는 영향, LMTT용 셔틀 카의 프레임 강도 및 강성에 미치는 크로스 빔의 영향, 크레인 LMTT용 이동체의 구조최적설계, 순차적 크리깅 근사모델을 이용한 LMTT 이동체의 구조최적설계, 리니어 모터의 전기적 특성을 고려한 LMTT용 이동체의 최적설계 등 LMTT용 리니어모터의 구조에 관한 연구는 다양하게 이루어지고 있다. 하지만 리니어모터의 설계 시 고정자 모듈의 발열은 균일한 추력의 발생과 이동체의 열변형에 큰 영향을 주고 있고 실제로 고정자 모듈의 발열문제가 리니어모터의 실용화에 가장 큰 걸림돌이 되고 있는 실정이다 보니 리니어모터의 고정자 모듈의 발열이 이동체에 미치는 영향에 대한 연구가 필수적으로 이루어져야 한다. 그러므로, 본 연구에서는 LMTT용 동기식 리니어모터의 설계를 위해 리니어모터의 주요 부품의 치수를 설정하고, 다음으로 고정자 모듈의 발열을 고려한 이동체의 온도를 해석하여 리니어모터에 대한 열-구조 연성 해석을 수행하여 고정자 모듈의 발열이 LMTT용 리니어모터의 이동체에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 리니어모터의 구조

LMTT용 동기식 리니어모터의 작동 메카니즘은 다음과 같다.

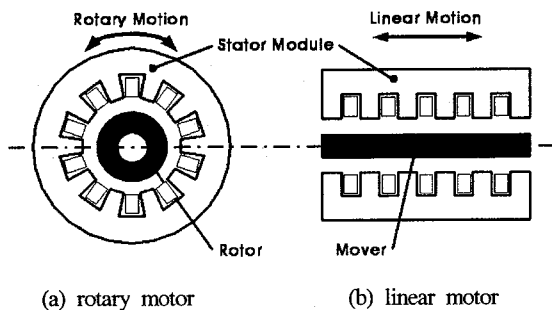


Fig. 1 Conceptual diagram of rotary motor and linear motor

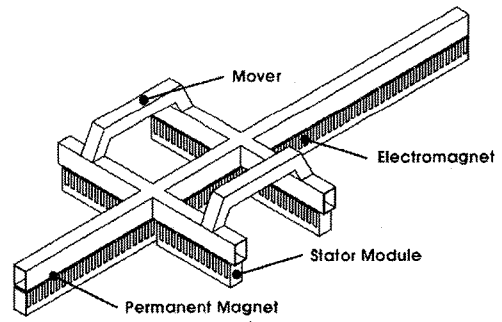


Fig. 2 Schematic diagram of linear synchronous motor

이동체 위에는 프레임이 고정되어 있는데 컨테이너가 프레임 위에 놓이면 이동체의 가로빔 및 세로빔에 설치된 영구자석과 고정자 모듈에 장착된 전자석 간의 상호작용에 의해 자기력이 발생한다. 이 때 자기력이 이동체에 부상력(Levitation force) 또는 흡입력(Suction force)으로 작용하여 컨테이너를 격자구조의 레일을 따라 균일한 추력으로 이송시키게 된다.

LMTT용 동기식 리니어모터는 크게 셔틀카(Shuttle car), 레일부(Rail part), 제어부(Control part)로 이루어지는데 셔틀카는 다시 프레임(Frame)과 이동체(Mover)로 구성되어 있다. 이동체는 가로빔(LB, Longitudinal Beam), 세로빔(TB, Transverse Beam), 휠 빔(WB, Wheel Beam)으로 구성되어 있으며 이동체의 경량화를 위해 각 빔은 사각의 중공빔으로 되어 있다. 이동체 및 고정자 모듈에 사용된 재료는 구조용강으로 Table 1에 기계적 성질을 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of structural steel

Mechanical Property	Symbol	Value
Elastic modulus	E	200 GPa
Poisson's ratio	$\nu$	0.3
Density	$\rho$	7.85e-6 kg/mm <sup>3</sup>
Yield strength	$\sigma_y$	250 MPa
Tensile strength	$\sigma_t$	460 MPa

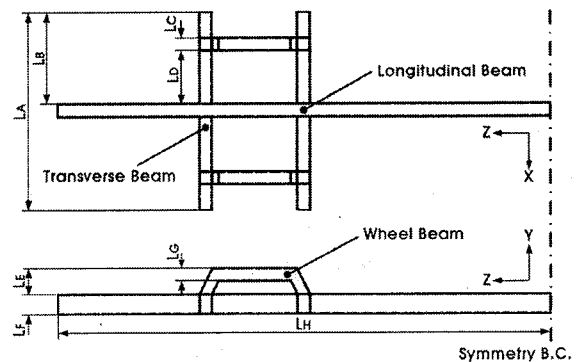


Fig. 3 Shape and Dimensions of each beam in mover

유한요소해석을 위한 이동체의 형상은 Fig. 3과 같고 치수는 Table 2에 나타내었다. 이동체는 형상과 하중조건 및 경계조건이 대칭으로 되어있기 때문에 전체모델의 1/2만 모델링하여 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS Workbench를 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 사용된 요소는 프리즘 요소이며 수렴해석을 통하여 요소의 크기는 50 mm로 설정하였고, 이 때 요소 수는 22,615 개, 절점 수는 50,739 개이다. Fig. 4는 LMTT용 리니어모터의 메시된 형상을 나타낸다.

Table 2 Dimensions of each beam in mover

Symbol	Value	Symbol	Value
LA	3000 mm	LE	400 mm
LB	1400 mm	LF	300 mm
LC	200 mm	LG	200 mm
LD	815 mm	LH	7500 mm

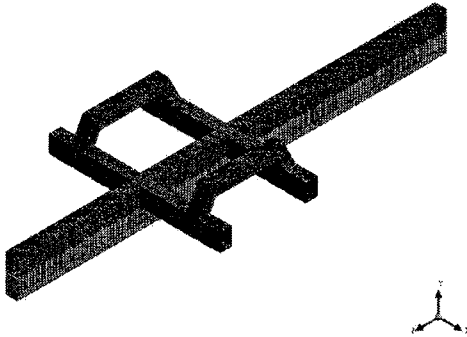


Fig. 4 Meshed shape of model for analysis

### 3. 고정자 모듈의 열해석

#### 3.1 열해석을 위한 하중 및 경계조건

LMTT용 동기식 리니어모터의 설계를 위해 고정자 모듈의 발열이 이동체에 미치는 영향을 분석해보았다. 해석과정에서 전류가 흐르면 구리권선의 저항에 의해서 전압강하가 일어나고 전기에너지의 손실이 발생되는데 손실된 전기에너지는 열로 변환되며 이것을 Joule 발열량 또는  $I^2R$  발열량이라고 부르며 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = I^2R = \dot{Q} \quad (1)$$

여기서 P는 전력(W), I는 전류(A) 그리고 R은 저항( $\Omega$ )이다. 발열량은 전류의 저항에 관계되므로 일정 길이의 전선에서의 열손실은 절연여부와 관계없이 일정하다. 또한 구리의 권선저항은 아래 식으로 계산할 수 있다.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2)$$

여기서  $\rho$ 는 권선의 고유저항( $\text{mm}\Omega$ ), l은 권선의 길이(mm), A는 권선의 면적( $\text{mm}^2$ )이다. 본 연구에서 고정자 모듈로 입력되는 전류는 1400 A, 구리코일의 고유저항은  $1.73 \times 10^{-8} \text{ mm}\Omega$ , 권선의 길이는  $60 \times 10^3 \text{ mm}$ , 권선의 면적은  $65.3 \times 10^{-6} \text{ mm}^2$ 이므로 구리의 권선저항은  $0.01618 \Omega$ 이 되며 식(1)에 의해 Joule 발열량은 31712.8 W가 발생한다. 따라서, 구리권선의 단위 체적당 발생하는 열량  $\dot{q}$ 는 식(3)에 의해 계산할 수 있다.

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{V} \quad (3)$$

여기서  $\dot{Q}$ 는 발열원(Heat sources)인 고정자 모듈의 구리권선으로부터 발생하는 Joule 발열량이고 V는 구리권선의 체적이다. 구리권선의 면적이  $1.594 \times 10^8 \text{ mm}^3$ 이므로 단위체적당 발생하는 열량  $\dot{q}$ 는  $1.989 \times 10^{-4} \text{ W/mm}^3$ 이 된다.

열전달계수는 열해석 시 가장 접근하기 어려운 파라미터인데 그 이유는 이 계수가 매우 다양한 변수를 가진 실험상수이기 때문이다. 다시 말하면, 열전달계수는 물체의 특성이 아니라 대류에 영향을 주는 모든 변수들, 유체의 종류(기체 또는 액체), 유동형태(층류 또는 난류), 물체의 기하학적 형상과 유로 면적, 유체의 물리적 성질, 평균온도, 주류의 속도, 표면조도, 물체의 표면상의 위치, 그리고 특히 강제대류인가 자연대류인가에 따라 달라진다. 본 연구에서 발열원인 고정자 모듈의 구리권선으로부터 발생한 열은 대류나 복사에 의해 외부공기로 방출되는데 공기로 방출되는 대류의 형태는 리니어모터의 정지 시에는 자연대류에 의해서 그리고 직선구동 시에는 강제대류에 의해서 일어난다. 따라서, 본 연구에서는 고정자 모듈의 열해석에 강제대류일 때 공기의 열전달계수인  $5e-5 \text{ W/mm}^2\text{C}$ 의 값을 적용하였으며 LMTT용 리니어모터는 일반적으로 항만자동화에서 컨테이너를 이송시키기 위해 사용되기 때문에 기상청의 기후자료인 부산의 2005년 일평균 기온을 조사하여 그 중 가장 낮은 때인 12월의 기온  $-10\text{C}$ 를 외부공기의 온도로 적용하였는데 그 이유는 외부 공기의 온도가 가장 낮을 때 고정자 모듈의 구리권선이 발열하기 가장 힘들다고 판단되었기 때문이다.

#### 3.2 고정자 모듈의 열해석 결과분석

강제대류일 때 공기의 열전달계수인  $5e-5 \text{ W/mm}^2\text{C}$ 의 값을 적용하고 외부공기의 온도  $-10\text{C}$ 를 하여 적용하여 열해석을 수행한 결과 고정자 모듈에 발생하는 온도분포를 Fig. 5에 나타

내었다. 발열원인 고정자 모듈의 구리권선으로부터 발생하는 Joule 발열량으로 인해 고정자 모듈은 65.2 ~ 92.74 °C의 온도 분포를 보였다. 고정자 모듈 또한 이동체와 마찬가지로 형상과 하중조건 및 경계조건이 대칭으로 되어있어 전체모델의 1/2만 모델링하여 해석을 수행하였기에 대칭면을 포함해서 거의 대부분이 89.67 ~ 92.74 °C의 온도분포를 보였지만 고정자 모듈의 끝단은 74.32 ~ 89.67 °C로 구리권선에서 발생한 열이 외부공기로 쉽게 방출되었기 때문에 온도분포가 낮게 나타남을 알 수 있다.

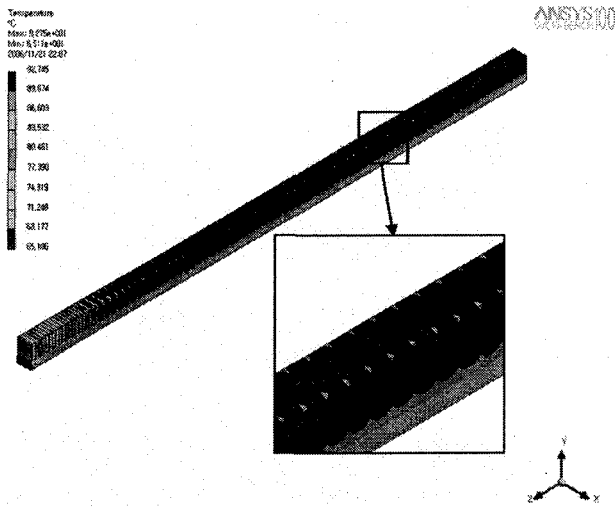


Fig. 5 Thermal distribution of stator module

또한 이동체에 외부공기의 열전달계수  $5e-5 \text{ W/mm}^2\text{°C}$ , 외부공기의 온도  $-10 \text{ °C}$  그리고 고정자 모듈의 열해석 결과로 얻은 온도 중 최고온도인  $92.74 \text{ °C}$ 를 적용하여 이동체에 대해 열해석을 수행하였다. Fig. 7은 열해석 결과 이동체에 발생하는 온도분포를 나타낸 것이다.

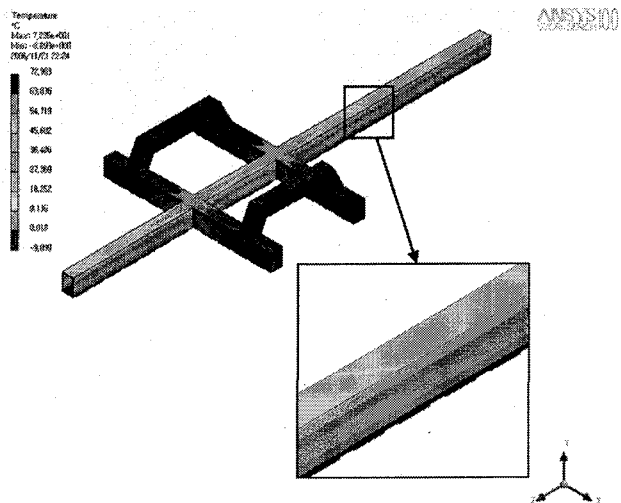


Fig. 6 Thermal distribution of mover

해석 결과 이동체는 전체적으로  $-9.1 \sim 72.95 \text{ °C}$ 의 온도분포를 보였다. 하지만 이동체의 하부평판은  $63.84 \sim 72.95 \text{ °C}$ 로 이동체의 다른 부분에 비하면 온도가 가장 높았다. 이것은 이동체가 외부공기의 영향보다 고정자 모듈의 구리권선으로부터 발생하는 Joule 발열의 영향을 더 많이 받는다는 것을 의미한다.

#### 4. 이동체의 열-구조 연성해석

##### 4.1 연성해석을 위한 하중 및 경계조건

컨테이너가 프레임 위에 놓이면 이동체의 네 부분에 설치된 충격흡수장치(Damper)에서 프레임의 하중 10 ton과 컨테이너의 하중 40 ton을 동시에 받게 되고 컨테이너의 이송방향에 따라 이동체의 영구자석과 고정자 모듈의 전자석 사이에 발생한 자기력이 30 ton의 힘으로 이동체를 부상시키거나 흡입시키게 된다. 이동체의 열-구조 연성해석을 위해 다음과 같이 세 가지로 나누어 구조해석의 하중조건으로 적용하였고 휠(Wheel)에 의해 이동체의 두 부분이 단순지지되므로 Y방향의 변위만 구속하였으며 전체모델의 1/2만 모델링하였기 때문에 축대칭조건을 구조해석의 경계조건으로 적용하였다.

[Case 1] 프레임과 컨테이너 하중 50 ton

[Case 2] 프레임과 컨테이너 하중 50 ton + 부상력 30 ton

[Case 3] 프레임과 컨테이너 하중 50 ton + 흡입력 30 ton

이와 더불어 앞의 2장의 열해석에서 적용한 하중조건 및 경계조건을 동일하게 연성해석의 경계조건으로 적용하였다. Fig. 7은 이동체의 연성해석을 위한 하중조건과 경계조건을 나타낸 것이다. 이동체의 구조해석을 먼저 수행하였고 열해석의 경계조건 및 하중조건을 더해서 열-구조 연성해석을 수행한 후 이동체에 발생하는 상당응력과 -Y방향 변위값을 비교하였다.

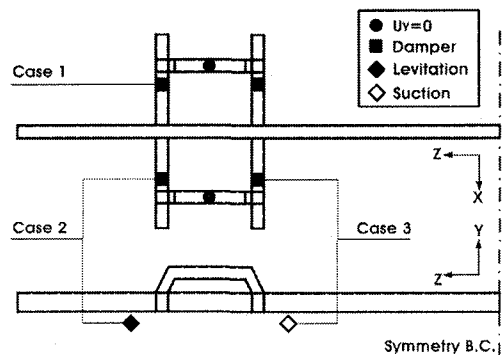


Fig. 7 Load and boundary condition for thermal-structure analysis

#### 4.2 이동체의 열-구조 연성해석 결과분석

이동체에 대한 구조해석과 열-구조 연성해석을 수행하여 고정자 모듈의 발열량이 LMTT용 리니어모터의 이동체에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 8과 9는 하중조건 Case 3에서 이동체에 발생하는 상당응력분포와 Y방향 변위를 나타낸 것이고 Table 3과 Table 4는 구조해석과 연성해석 시 하중조건에 따라 이동체에 발생하는 최대상당응력과 -Y방향 최대변위값을 나타낸 것이다. 구조해석 및 연성해석 시 발생하는 최대상당응력을 비교해보면 Case 1일 때 각각 -1.46 mm, 3.98 mm, Case 2일 때 각각 129.30 MPa, 159.55 MPa이며 Case 3일 때 각각 245.77 MPa, 366 MPa 로 나타났다.

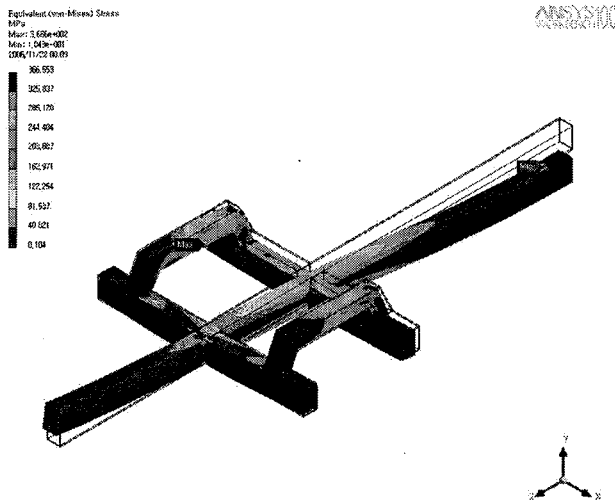


Fig. 8 Stress distribution of move (Case 3)

또한 Y방향 최대변위를 비교해보면 Case 1일 때 각각 -1.46 mm, -3.98 mm, Case 2일 때 각각 -1.19 mm, -1.12 mm, Case 3일 때 각각 -15.27 mm, -18.33 mm로 나타났다.

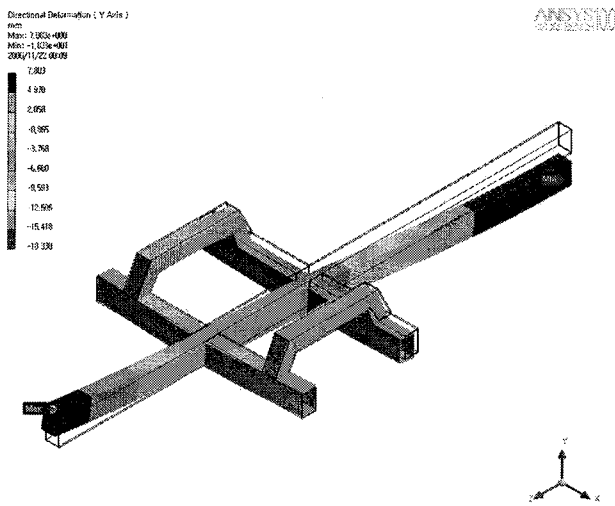


Fig. 9 Y directional deformation of mover (Case 3)

Table 3 Maximum equivalent stress of mover with respect to load case

Items	Case 1	Case 2	Case 3
Structural	100.28 MPa	129.30 MPa	245.77 MPa
Ther-Struc	206.39 MPa	159.55 MPa	366.55 MPa

Table 4 Y directional maximum deformation of mover with respect to load case

Items	Case 1	Case 2	Case 3
Structural	-1.46 mm	-1.19 mm	-15.27 mm
Ther-Struc	-3.89 mm	-1.12 mm	-18.33 mm

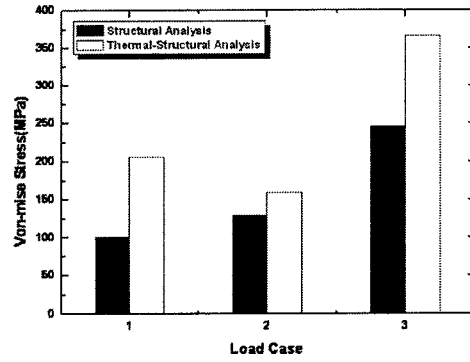


Fig. 10 Maximum equivalent stress of mover with respect to analysis case and load case

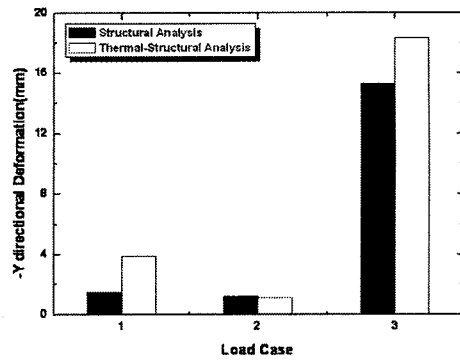


Fig. 11 -Y directional maximum deformation of mover with respect to analysis case and load case

또한 구조해석과 연성해석 시 하중조건에 따라 이동체에 발생하는 최대상당응력과 -Y방향 최대변위값의 변화추이를 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. 구조해석과 연성해석 시 이동체에 발생하는 최대상당응력은 Case 3일 때 가장 높게 나타났는데 이것은 프레임과 컨테이너 하중 50 ton이 이동체의 영구자석과 고정자 모듈의 전자석 사이에 발생하는 자기력이 30 ton의 힘으로 이동체를 흡입시키기 때문에 이동체는 80 ton의 하중을

동시에 받게 되기 때문이다. Case 3일 때 구조해석과 연성해석의 최대상당응력값은 각각 245.77 MPa, 366.55 MPa로 120.78 MPa의 차이를 보였는데 이것은 고정자 모듈의 구리권선으로부터 발생하는 Joule 발열량이 열하중으로 작용하여 이동체에 영향을 미치고 있기 때문에 이동체의 최대상당응력이 더 높게 나타난 것이다. 따라서 LMITT용 리니어모터의 설계 시 이동체의 구조해석만 수행하는 것보다 이와 더불어 구리권선의 발열을 고려한 고정자 모듈의 열해석을 고려한 이동체의 연성해석은 필수사항이라 하겠다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 LMITT용 동기식 리니어모터의 설계를 위해 리니어모터의 주요부품의 치수를 설정하고, 다음으로 고정자 코일의 발열을 고려한 이동체의 온도를 해석하여 리니어모터에 대한 열-구조 연성해석을 수행하여 고정자 모듈의 발열이 LMITT용 리니어모터의 이동체에 미치는 영향을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고정자 모듈의 열해석 결과 고정자 모듈에 발생하는 온도 분포를 분석할 수 있었고 이 때 고정자 모듈의 최고온도는 92.74 °C였다.
2. 이동체의 열해석 결과 이동체에 발생하는 온도분포를 분석할 수 있었고 이 때 이동체의 최고 온도는 72.95 °C였다.
3. 고정자 모듈의 발열을 고려한 이동체의 연성해석에서 최대상당응력은 프레임과 컨테이너 하중과 흡입력이 작용하는 경우였으며 이 값은 구조해석에서의 최대상당응력보다 120.78 MPa 더 크게 나왔다.
4. LMITT용 리니어모터의 설계 시 구조해석과 더불어 고정자 모듈의 발열을 고려한 열해석도 필요하다는 것을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 한국과학기술부(MOST)지정 국가지정연구실사업(NRL)의 지원에 의한 것입니다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김능수(1989), 리니어모터의 기술현황 및 응용, 산업연구원
- [2] 한동섭, 한근조, 이권순, 심재준, 김태형(2004), Inner Beam의 두께비 및 높이비가 LMITT용 셔틀카의 프레임 강도 및 강성에 미치는 영향, 한국항해항만학회지 28권 3호, pp. 207-211
- [3] 임중현, 한근조, 이권순, 한동섭, 심재준, 이성욱, 전영환(2005), LMITT용 셔틀카의 프레임 강도 및 강성에 미치는 크로스 빔의 영향, 한국항해항만학회지 29권 1호, pp. 77-82
- [4] 이권희, 박형욱, 한동섭, 한근조(2006), 순차적 크리깅 근사모델을 이용한 LMITT 이동체의 구조최적설계, 한국항해항만학회지 29권 5호, pp. 415-420
- [5] 이태원, 정재한(2004), 리니어모터의 유한요소해석과 기하학적 최적설계, 한국정밀공학회지 21권 12호 pp. 67-74
- [6] 은인용(2002), FEM을 이용한 동기식 리니어모터의 열특성의 해석, 대한기계학회논문집 A 26권 8호, pp. 1461-1471
- [7] 은인용, 이춘만, 정원지, 최영휴(2001), 단열재에 의한 리니어모터의 열특성의 향상, 대한기계학회 2001년도 추계 학술대회논문집 A, pp. 785-890