

# 소규모 공작기계용 소재공급장치의 이송 셔틀 시스템에 관한 구조해석

강대성\*, 정은익\*, 김경희\*\*, 백일천\*\*, 이중섭\*\*\*,#

\*(주)티에스테크, \*\*한국산업기술시험원, \*\*\*한국승강기대학교

## Structural Analysis of a Carriage Shuttle System : A Material Supply Device for Small-Scale Machine Tools

Dae-Sung Kang\*, Eun Ik Jung\*, Kyung-Heui Kim\*\*, Il-Cheon Baek\*\*, Chung-Seob Yi\*\*\*,#

\*TS-Tech.,LTD., Research and Development Center,

\*\*Korea Testing Laboratory, Mechanical Safety Technology Center,

\*\*\*Korea Lift College, School of Lift Engineering

(Received 9 November 2018; received in revised form 14 November 2018; accepted 15 November 2018)

### ABSTRACT

The aim of this study was to interpret the structure and dynamics of a transfer shuttle system as a material supply device for small machine tools. The following conclusions were obtained by performing a structural interpretation of the material supply equipment with respect to workload and the dynamical interpretation of a flexible multibody carriage shuttle. When a 1,000-kg workload was applied to a fork lift, the safety factor was approximately 1.86. To conservatively assess the integrity of the structure, a 1,000-kg workload would be proper. In the case of a deflection of the fork system, the width increased with increasing time. The greatest deflection occurred at 5.5 s, which was the largest increase in the time point of the fork system.

**Key Words** : Machine Tool(공작기계), Carriage Shuttle(이송셔틀), Structure Analysis(구조해석)

## 1. 서 론

최근 산업현장의 물류량 증가에 따라 기업경쟁력의 핵심 요소인 물류관리 시스템에 대한 관심이 높아지고 있다. 산업현장이나 창고 등 물류량이 집합되는 곳의 최대 고민은 공간 활용이다. 한정된 공간에 적재 능력을 극대화하기 위해 적재 구조

물 사이의 간격을 좁히고 적재 구조물을 높게 만들어야 한다. 이렇게 구성할 경우 기존의 지게차와 같은 운반 수단으로는 제한된 공간에서 원활한 적재 작업을 수행할 수 없다. 따라서 좁은 공간에서도 원활한 적재 작업을 수행할 수 있도록 소재 공급 및 이송장치를 도입하고 있는 추세이며, 전용 장비의 활용으로 창고의 안정성 및 공간 효율성을 극대화할 수 있다<sup>1-4)</sup>.

소규모의 공작기계로 가공생산을 하고 있는 영세업체의 경우 인력낭비와 잦은 가공물 교체로 인

# Corresponding Author : [cs\\_yii@hanmail.net](mailto:cs_yii@hanmail.net)

Tel: 82-55-949-2216, Fax: 82-55-949-2200



**Fig. 1 Material supply device for small scale machine tool**

한 Loss Time이 매우 커 장비의 사용 효율이 낮다. 공작기계의 가공효율을 높이기 위한 파렛트 공급, 교환 및 완성품의 이송, 저장장치의 활용도가 지속적으로 증가되고 있는 현실이다. Cell 구조의 범용 모듈화된 파렛트 공급, 교환 및 완성품의 이송, 저장장치를 공작기계와 연계하여 쉽고 편리하게 적용 할 수 있도록 개발이 요구된다.

현재 공작기계 공작물의 가공 및 교환효율을 높이기 위한 소재공급 Cell 단위의 Unit 장치로 사용되는 소재, 공작물의 공급 교환 장치의 사용이 공작기계와 연계되어 많이 사용되고 있다. 이러한 방법을 자동 파렛트 교환장치(APC : Automatic Pallet Changer)라고 하며 방법에는 크게 슬라이딩에 의한 방법과 로봇을 이용하여 가공물을 직접 집어 올리는 포크 리프트형(로봇형)으로 구분된다. Cell화된 공작기계 공작물의 공급, 가공, 수집, 저장장치를 한 Unit 화 하는 기술이며, Cell조합을 대규모 공작기계 라인 구성 및 System화가 매우 수월하게 할 수 있다<sup>[5-8]</sup>.

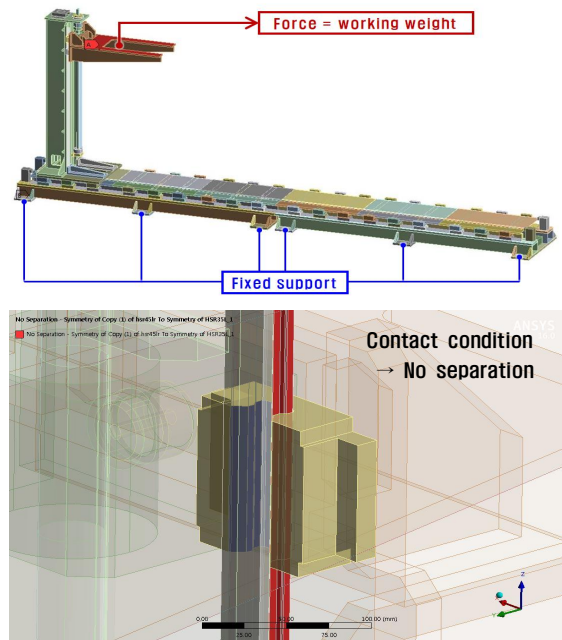
본 연구는 소규모 공작기계에서 단위 Cell로 적용할 수 있는 소재공급장치 시스템에 대한 구조해석과 이송셔틀 시스템의 유연 다물체 동역학해석을 통해 이송셔틀의 최대 신장시화물의 적재량을 설계 변수로 설정하고, 각각의 하중변수에 따라 발생하는 등가응력과 처짐량을 통해 포크 시스템의 설계 타당성을 확인하고자 한다.

## 2. 이송장치 구조해석

본 연구대상인 이송장치는 Fork system과 조립되

며, Fork system의 작업 하중은 최대 1,000 kg이다. 따라서 이송장치는 Fork system의 자중과 작업 하중을 동시에 견딜 수 있도록 설계되어야 한다. Fork system에 작용하는 하중이 커질수록 이송장치가 받는 하중과 작용하는 모멘트는 커지며, 이에 대한 구조적 안전성이 충분히 검토되어야 한다.

하중조건 및 구속조건 설정은 해석을 수행할 모델에 대해 외부적으로 가해지는 물리적인 힘이나 압력, 모멘트 등의 조건을 설정하는 것이다. 하중조건 및 구속조건을 정확히 이해하고 설정해야만 정확한 해석 결과를 얻을 수 있다. 따라서 해석 모델의 움직임과 지지부위, 그리고 외부에서 가해지는 하중의 크기 등에 대해 정확하게 알고 있어야 한다.



**Fig. 2 Boundary conditions**

**Table 1 Material properties**

Density (kg/m <sup>3</sup> )	Modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)
7,860	200	0.33	207	400

이송장치는 2개의 LM가이드 위에서 병행운동의 조합으로 운동한다. 따라서 LM가이드와 접촉하는 요소를 No separation 조건을 부여하여 축방향으로 운동할 수 있도록 해석 환경을 부여하였다. 이송장치는 지면에 단단히 고정되어 있으므로 이송장치 밑면은 움직일 수 없도록 6방향 자유도를 완전히 구속시킨 완전구속조건(fixed support)을 Fig. 2와 같이 경계조건을 부여하였다. 이송장치와 같은 대형 구조물은 자중에 의한 처짐 및 하중을 반드시 고려해야 한다. 따라서 carriage system 전체에 중력방향 가속도  $9,806.6 \text{ mm/s}^2$ 을 부여하여 자중을 고려하였다. Fork system에 작용하는 작업 하중을 변수로 설정하여 4가지 작업 하중(500kg, 1,000kg, 1,500kg, 2,000kg)으로 구분하여 부여하였으며, 이송장치에 대한 구조해석을 위한 소재는 일반구조용 압연 강재인 SS410을 적용하였으며, 그 물성치는 Table 1과 같다.

Fig. 3은 작업하중 2,000kg일 경우 응력분포와 변형량 분포를 나타내고 있다. 구조해석 결과 수평방향 이송부 LM가이드에서 약 202Mpa의 응력이 발생함을 확인할 수 있었고, 최대 변형량은

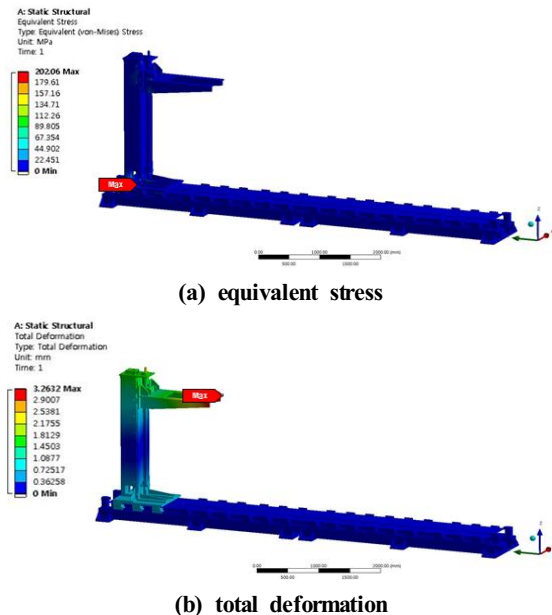


Fig. 3 Results of equivalent stress and total deformation

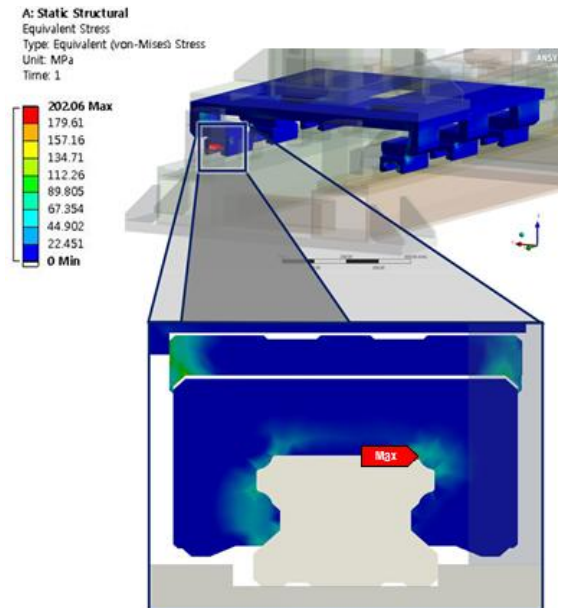


Fig. 4 Results of equivalent stress at horizontal LM guide

Fork lift의 끝 부분에서 약 3.26mm가 발생함을 확인할 수 있었다. 결과적으로 하중 2,000kg일 경우 항복응력에 거의 도달한 것으로 판단된다.

Fig. 4는 수평방향 이송부 LM가이드 부분에 대한 등가응력분포를 나타내고 있다. 그림에서 보는 것과 같이 LM가이드에서 전체 하중을 지지하고 있기 때문에 가장 높은 응력이 발생하는 것을 확인할 수 있었고, LM가이드 상부면에서 하중을 지지하고 있기 때문에 가장 높은 응력이 발생하는 것으로 나타났다.

Table 2의 경우 하중변화에 따른 등가응력, 전체변형량과 안전율에 대한 구조해석 결과를 나타

Table 2 Results of stricture analysis

Load (kg)	Equivalent stress (MPa)	Total deformation (mm)	safety
500	65.50	1.05	3.16
1,000	111.33	1.80	1.86
1,500	156.55	2.50	1.32
2,000	202.06	3.26	1.02

내고 있다. 등가응력의 경우 하중이 증가할수록 응력이 증가함을 확인할 수 있었고, 특히, 하중 2,000kg의 경우 구조해석에서 항복응력 이내로 발생하여 안전율이 1.02가 확보되었지만 실제 시스템에서 이 하중까지 적용하기에는 어려울 것으로 판단된다.

안전율은 인장강도/허용응력으로 나타낼 수 있으며 이 값이 반드시 1 이상을 가져야 구조적으로 안전하다고 판단할 수 있다. 다양한 변수에 대한 구조해석 결과 Fork lift에 작업하중 1,000kg이 작용할 때 안전율 약 1.86을 가지며, 구조의 건전성을 보수적 관점에서 판단할 때, 작업하중 1,000kg 이상 사용은 피해야 한다고 판단된다.

### 3. 이송셔틀 동역학 해석

#### 3.1 동력학 해석방법

이송셔틀 시스템은 화물적재 및 이송과정에서 화물의 자중과 LM Guide(레일)·슬라이더(Slider)의 1차원 미끄럼 운동 간 표면력에 의한 응력이 발생되며, 이 때 발생하는 응력은 포크 시스템 각각의 구성요소에 변형현상을 초래한다. 특히, 포크 시스템 최대 신장시 화물의 적재량에 따라 처짐(deflection) 현상이 상이하게 발생되며, 이 때 발생하는 과도한 처짐 현상은 장비의 운용뿐만 아니라 시스템의 기능 상실로 귀결될 수 있다.

전·후로 미끄러져 움직이는 이송셔틀 시스템의 경우 적재물의 하중에 의해 발생하는 등가응력과 처짐량은 단순 강체동역학적 해석만을 수행해서는 적절히 파악될 수 없고, 구조해석과 동역학 해석이 결합된 형태의 유연 다물체 동역학해석(Multi-body Flexible dynamics analysis, MBFD)을 통해 시간에 따른 포크 시스템 주요구성품의 등가응력 및 처짐량을 확인해야만, 해당 시스템설계의 타당성을 확인 할 수 있다.

우선 이송셔틀 시스템에 대한 강체동역학적 해석을 통해 구성품간 발생하는 반력을 도출하고, 그 결과 값을 경계조건으로 활용하여, 유연 다물체 동역학해석을 수행하였다.

본 연구에서는 물체를 강체로 가정하지 않고

주요 고려 영역이 탄성범위 이내이므로 주요 구성품을 선형 탄성체(Linear elastic materials)로 정의하였고, 포크 시스템 해석에 적용된 재료는 연성 재료로 가정하고, 이에 따라 최대 전단 변형에너지이론(Maximum distortion energy theory)을 고려하였으며, 이를 통해 등가응력을 규정하였다.

#### 3.2 동력학 해석 프로세스

이송셔틀의 유연 다물체 동역학해석은 유한요소법(FEM, finite element method)을 기반으로 수행하였음 포크 시스템에 실제 적용된 서보모터는 구동 속력이 저속이며, 모터에 의해 등속운동하기 때문에 관성 및 감쇠 효과를 고려하지 않았다.

이송셔틀의 3D 모델링을 바탕으로 해석의 수렴에 영향을 미치는 필렛(Fillet), 홀(Hole)과 같은 요소를 수정하는 전처리 과정(Pre-processing)을 거친 후 유한요소망을 생성하였다. 이 후 각 구성품의 물성치를 입력하고 실제 작동 환경과 유사한 경계조건을 부여한 후 유연 다물체 동역학해석을 수행하였고, 후처리(post-processing) 과정을 통해 포크 시스템에서 발생하는 등가응력(equivalent stress) 및 처짐량(deflection)을 확인하였다.

시간의 변화에 따른 이송셔틀 시스템의 신장량과 적용된 하중조건에 따라 시스템에 발생하는 등가응력 및 처짐량을 파악하고, 최종적으로 설계 타당성 및 구조적 안정성을 검토하고자 한다.

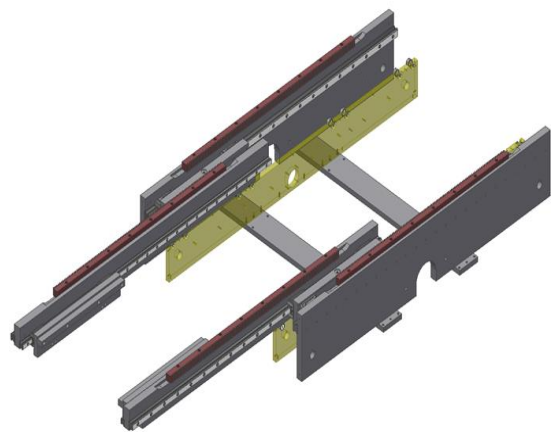


Fig. 5 3D modeling of carriage shuttle system

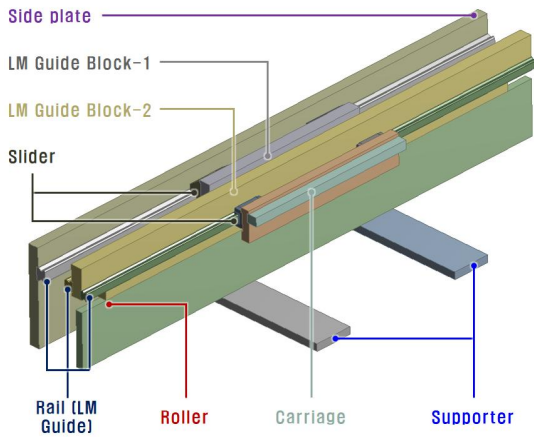


Fig. 6 Part names of carriage shuttle system

### 3.2 경계조건 및 하중조건

이송셔틀 시스템의 설계목표 하중은 최대 1,000kg 이지만, 여러 작업 환경에서의 설계 타당성을 확인하기 위해 최소 500kg부터 최대 2,000kg 까지 500kg 간격으로 유연 다물체 동역학해석을 수행하였다. 이에 따라 이송셔틀 시스템에 걸리는 적재하중은 중력가속도를 적용하여 Fig. 7과 같이 5,000N, 10,000N, 15,000N, 20,000N으로 가정하여 하중을 부여하였다.

구속조건으로는 이송셔틀 시스템 해석에 있어 변위 조건은 Fig. 8과 같으며, 최대 이송의 스트로크는 1,350 mm이다. 또한 이송셔틀 시스템의 지지대는 리프트에 볼트로 체결되는 방식이므로 Fig. 9와 같이 이송셔틀 시스템 하단 면에 6자유도 구속조건인 Fixed support를 부여하였다.

고정된 롤러와 이를 통해 1차원 직진운동을 하는 이송장치 간의 결합(Contact) 조건은 접촉 평면에 대해 선형 조건(No-separation)을 부여하였고, 이송장치의 슬라이더와 LM Guide 간의 접촉면은 비선형 조건(Frictionless)을 부여하였다. 이외 주요 구성품간의 결합은 볼트로 이루어지므로 완전 접촉조건인 Bonded 조건을 부여하였다.

본 연구에서는 해석결과의 정확성을 높이기 위해 물체의 거동(behavior of solids)에 따른 비선형 해석조건 중 기하 비선형과 접촉을 고려했으며, 해당 시스템에서는 재료 비선형은 고려하지 않았다.

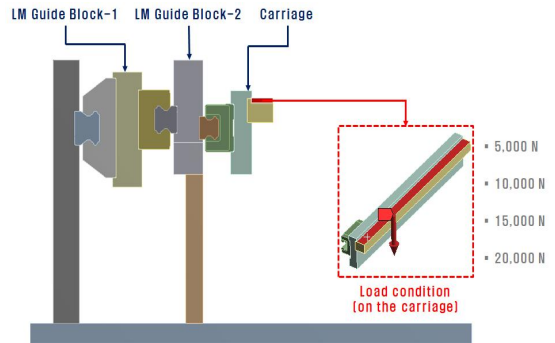


Fig. 7 Load conditions for carriage shuttle system

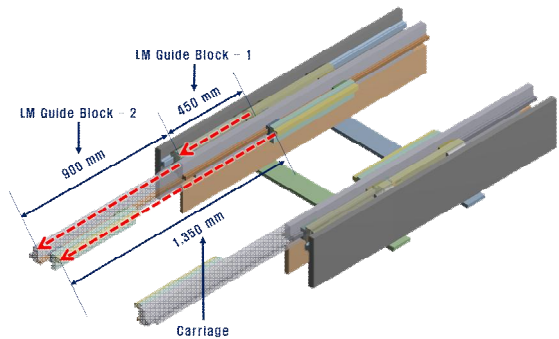


Fig. 8 Displacement condition of carriage shuttle system

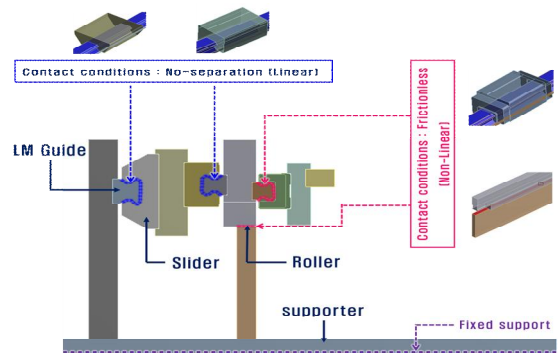


Fig. 9 Contact conditions of LM guide and slider

### 3.3 해석결과 및 고찰

Fig. 10은 이송셔틀에서 레일이 최대로 이동하였을 경우 하중 2,000kg일 때 응력분포와 처짐량을 나타내고 있다. 그림에서 보는 것과 같이 하중



을 지지하는 LM가이드에서 약 230MPa로 가장 높은 응력이 발생함을 확인할 수 있었다. 또한 처짐량을 보면 서틀 바깥부분에서 최대 5.3mm의 처짐이 발생함을 확인할 수 있었다.

Fig. 11은 하중에 따른 응력분포를 나타내고 있으며, Fig. 12는 하중변화에 따른 이송셔틀 이송시 처짐량을 나타낸 것이다. 해석 결과 값을 분석해보면, 작용하중 500kg에서는 포크 시스템에 발생하는 최대 등가응력은 57.8 MPa이며, 최대 처짐량은 1.34 mm이고, 발생된 등가응력과 재료가 가지는 항복응력비로 계산한 결과 안전율 약 3.6을 확보하는 것을 확인할 수 있었다.

작용하중 1,000kg에서는 포크 시스템에 발생하는 최대 등가응력은 114.8 MPa이며, 최대 처짐량은 2.68 mm이고, 발생된 등가응력과 재료가 가지는 항복응력비로 계산한 결과 안전율 1.8을 확보

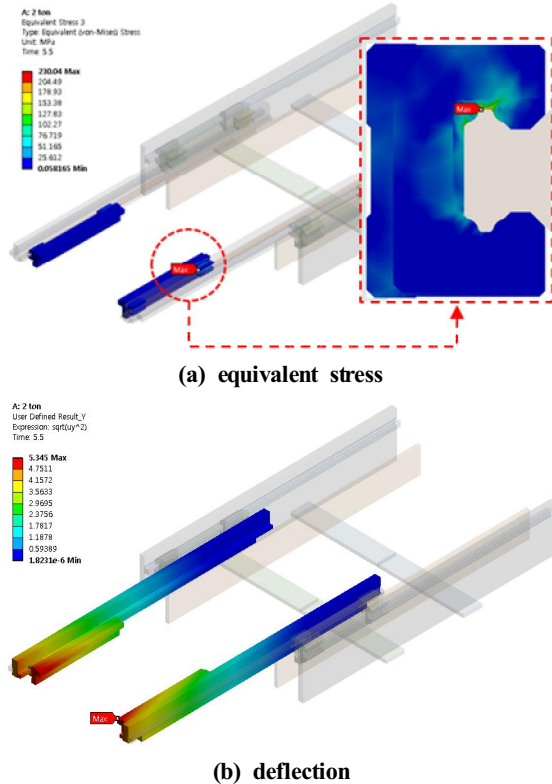


Fig. 10 Results of equivalent stress and deflection at carriage shuttle system(load : 2,000kg)

하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 작용하중 1,500kg에서는 포크 시스템에 발생하는 최대 등가응력은 172.2 MPa이며, 최대 처짐량은 4.02 mm이고, 발생된 등가응력과 재료가 가지는 항복응력비로 계산한 결과 안전율 1.2를 확보하는 것을 확인할 수 있었다.

작용하중 2,000kg에서는 포크 시스템에 발생하는 최대 등가응력은 230 MPa이며, 최대 처짐량은 5.35 mm이고, 발생된 등가응력과 재료가 가지는 항복응력비로 계산한 결과 안전율 0.9로써 최소 안전율 1 미만의 결과 값이 도출되었다.

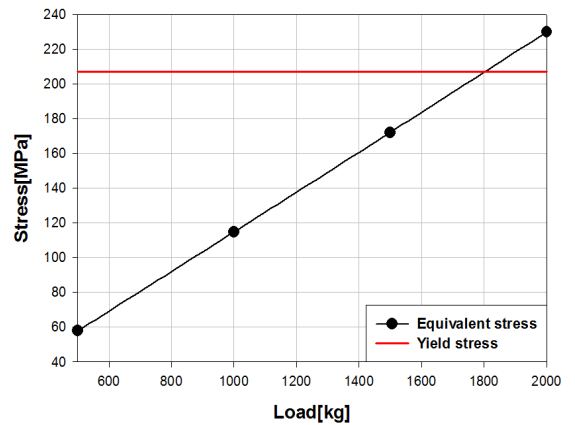


Fig. 11 Distributions of equivalent stress and yield stress

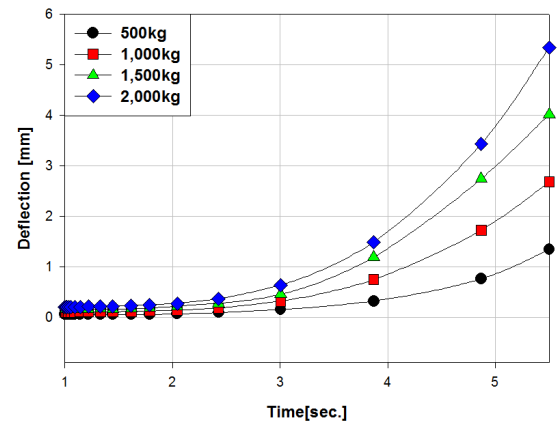


Fig. 12 Comparison of deflection according to working loads

## 4. 결 론

적재하중에 대한 소재공급장치에 대한 구조해석과 이송셔틀에 대한 유연 다물체 동역학해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 소재공급장치에 대한 구조해석 결과 Fork lift에 작업하중 1,000kg이 작용할 때 안전율을 약 1.86을 가지며, 구조의 건전성을 보수적 관점에서 판단할 때, 작업하중 1,000kg 정도가 적절한 것으로 판단된다.
2. 최대 등가응력은 모든 하중조건에서 동일하게 슬라이더와 LM guide 접촉면에서 발생하였다.
3. 작용하중에 대한 포크 시스템의 안전율을 도출한 결과 1,500kg까지는 모두 안전율이 1 이상을 확보하여 설계 적으로 안전할 것으로 사료되나, 설계상 허용하중의 2배인 2,000kg이 포크 시스템에 작용할 경우 안전율이 1 이하로 충분한 안전성을 확보하지 못할 것으로 판단된다.
4. 포크 시스템의 처짐량은 시간에 따라 점차 증가되는 폭이 커지며, 또한 포크 시스템의 최대 신장 시점인 5.5 초에서 최대 처짐이 발생함을 확인 할 수 있었다.
5. 유연 다물체 동역학해석 결과 슬라이더와 LM Guide의 형상변경을 통해 등가응력이 집중적으로 발생하는 현상을 완화 시켜 구조적으로 보다 안전한 설계안을 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 2016년 중소기업청 구매조건부신제품개발사업(S2450830)의 지원에 의해 수행되었습니다.

## REFERENCES

1. Hong, J. P., Gong, B. C., Choi, S. D., Choi, H. J., Lee, D. S., "Study on Structure Design of High-Stiffness for 5-Axis Machining Center",

- Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers,, Vol. 10 No. 5, pp. 7-12, 2011.
2. Kim, D. H., Lee, C. M., "The Static and Dynamic Analysis of a 45,000rpm Spindle for a Machine Tool and Evaluation of Its Stiffness", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 28 No. 4, pp. 422-426, 2011.
  3. Kim, S. H., Kim, B. H., Choi, W. G., "A Study on the Measurement Method and Uncertainty Factors for Precision Inspection to Feed Unit of High Precision Machine Tool", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11 No. 4, pp. 55-61, 2012.
  4. Lee, C. H., Choi, J. W., "Evaluation of Thermal Characteristics for a Feeding Axis of Machine Tools Using Finite Element Analysis, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 22 No. 3, pp. 380-287, 2013.
  5. Cha, S. K., Yoon, J. Y., Hong, J. K., Kang, H. G., Cho, H. C., "The System Architecture and Standardzation of Production IT Convergence for Smart Factory", Journal of the Korean Society for Precision, Vol. 32 No. 1, pp. 17-24, 2015
  6. Son, I. S., Kim, C. H., Bae, S. H., Lee, J. Y., "Rescue Lift Development Using Structural Analysis", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14 No. 1, pp. 111-116, 2015.
  7. Nam, K. S., Choi, K. K., Choi, H. M., Kim, J. K., Yeum, S. H., Lee, S. S., "Study on the Improvement of Strength of Excavator Attachments Considering the Field Environment", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15 No. 1, pp. 122-128, 2016.
  8. Lee, I. S., Kim, H. J., Kim, N. K., "A Study on the Application of Machine Simulation and Angle Milling Head of a 6-Axis Parallel Kinematic Machine", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers Vol. 16 No. 5, pp. 47-54, 2017.