

## PRT 차량용 수직이송장치의 개발을 위한 구조강도 평가

강석원\*† · 엄주환\* · 정락교\* · 송준현\*\*

\* 한국철도기술연구원 신교통연구본부 미래교통시스템연구실, \*\* 현대엘리베이터(주) S/S 개발부

### Structural Strength Evaluation for Development of a Vertical Transfer Device for a Personal Rapid Transit (PRT) Vehicle

Seok-Won Kang\*†, Ju-Hwan Um\*, Rag-Gyo Jeong\* and Joon-Hyun Song\*\*

\* Future Transportation Systems Research Division, New Transportation Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute,

\*\* System Solution Development Dept., HYUNDAI Elevator Co., LTD.

(Received October 16, 2014 ; Revised March 27, 2015 ; Accepted August 4, 2015)

**Key Words:** Finite-Element Method(FEM: 유한요소법), Personal Rapid Transit(PRT:수요응답형 순환교통시스템), Static Structural Analysis(정적 구조 해석), Vertical Transfer(수직이송), Stress Deformation(응력변형)

**초록:** 본 논문에서는 PRT(Personal Rapid Transit) 차량의 수직이송을 위한 장치를 개발하는 과정에서 수행된 주요 구조물의 정적 구조적 안전성 평가 결과를 다룬다. 지금까지 노선상에서 승객이 탑승한 상태에서 운영중인 차량의 수직이송에 대한 연구는 전무하며, 이는 기존의 2 차원 적인 교통운영 체계의 한계를 극복하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 특히, 본 연구에서 제안된 수직이송장치는 순환컨베이어 방식으로 연속 이송이 가능해서 통행량이 많은 지역에도 적용이 가능하다. 본 시스템이 물류분야에서 많이 사용되어 왔지만, 수직이동 시 차량의 무게에 의한 하중은 일반적인 물류의 수송과는 다르게 집중하중 형태로 컨베이어에 가해지기 때문에 이에 대한 구조적 안정성 평가는 필수적이다. 본 논문에서는 상용 유한요소 해석 프로그램인 Ansys®를 이용해서 수직이송 장치의 기본 설계(안)의 구조적 안정성을 수치해석적 방법에 의해 평가하고자 한다.

**Abstract:** This paper presents numerical results of static structural stability analysis in development of a vertical transfer device of a PRT(Personal Rapid Transit) vehicle. The vertical transfer of a fully occupied vehicle operating on a road network is the first attempt, which is expected to contribute to overcome the limitations of conventional 2-dimensional operation mode. In particular, the vertical transfer apparatus designed based on vertical circulating conveyors is capable of continuous transfer without time delay so that it enables to accommodate a high traffic density. This system has been frequently used in a logistics field; however, it is essential to assess a structural integrity because an external force by a vehicle weight is exerted on the conveyors in the form of a concentrated load unlike a conventional logistic transport. In this study, prior to the production process, the structural performance of the pilot design in an early stage is numerically evaluated using the commercial finite element method (FEM) solver (i.e., Ansys®).

## 1. 서론

최근 세계적으로 지구온난화에 능동적으로 대응하기 위한 다각적인 노력이 이루어지고 있는 가운데, 친환경적이고 에너지효율이 높은 새로운 대중교통수단의 활성화 필요성이 대두하고 있다. 이에 기존 철도나 버스와 같은 대중교통의 접근성의 약점을 보완하여 소형교통수단인 택시 및 자가용 수준의 접근성을 가능케 하고, 이와 더불어 대기시간을 최소화할 수 있는 새로운 개념의 대중교통수단인

† Corresponding Author, swkang@krii.re.kr

PRT(Personal Rapid Transit) 시스템이 미래형 대중 교통수단으로 재조명받고 있다.<sup>0</sup> 4~6 인용의 PRT 시스템은 네트워크로 구성된 다수의 루프(Loop)를 가진 전용노선에서 출발지에서 목적지까지 운전자 없이 무정차(Nonstop) 자율주행을 하는 미래형 신 교통수단으로 정의할 수 있다.<sup>(1~3)</sup>

세계적으로 다양한 종류의 PRT 시스템에 대한 연구개발이 진행되고 있는 가운데, 최근 영국과 아랍에미리트(UAE)에서는 독자적인 시스템으로 시범운영 중이다.<sup>0</sup> 이와 함께 국내에서도 최근 PRT 시스템의 운행 및 제어기술, PRT 차량의 전력공급시스템, 그리고 적용대상 지역 선정을 위한 정책적 검토 등 활발한 연구가 이루어지고 있다.<sup>(1,3,4)</sup> 이러한 PRT 시스템의 가장 큰 특징 중 하나는 문전수송(Door to Door)을 들 수 있는데 이를 위해 기존 교통시스템과의 연계·환승을 위한 건물 내·건물 간 신속한 이동에 대한 중요성도 함께 주목받고 있다. 하지만 연계·환승을 목적으로 승객을 동반한 PRT 차량을 수직 이송시키는 사례는 세계적으로 없는 실정이며, 국내에서 처음으로 연구개발을 통한 적용성이 시도되고 있다. 지금까지 PRT 차량의 수직이송에 관한 연구는 주로 개념설계 및 모형제작을 통한 기능구현에 대한 실험적 연구가 다수 진행되어 왔다.<sup>(4,5)</sup>

본 연구에서는 기존의 개념 및 모형시험 연구<sup>(4,5)</sup>를 바탕으로 실물 제작을 위한 해석적 연구를 수행하였다. 여기서는 PRT 차량의 수직이송용 컨베이어시스템에서 승객의 안전 및 승차감 측면에서 가장 중요한 부분인 수직 컨베이어에 대한 해석적 검토를 수행하였다. 총 377 개의 부품에 대해 3 차원 유한요소 모델링을 통하여 체인의 지지조건별 정적해석을 수행하고 수직 컨베이어시스템의 거동특성을 분석하였으며, 또한 각 재료의 허용응력과 비교검토를 통한 구조 안전성을 확인하고자 하였다.

## 2. 구조해석 조건 및 방법

### 2.1 수직이송장치의 제원 및 하중조건

현재 개발중인 수직이송장치는 다수의 슬랫바(Slat Bar)로 이루어진 슬랫패널(Slat Panel)이 고무 체인에 연결되어 순환하는 컨베이어(Circulating conveyor) 방식에 의해 PRT 차량을 수직으로 이송하도록 설계되어 있다. 하나의 수직이송장치에 설치될 수 있는 슬랫패널의 수는 같은 경로상에서 운행중인 차량들의 연속이송 및 운행 시격(Headway)을 고려하여 결정된다. Fig. 1 은 수직이송장치를 이용한 차량의 이송 개념을 나타낸다. 차량이 진입용 수평 컨베이어 위에 정차하면 수직 이송을 위한 컨베이어로 차량이 이송된다. 수직 이송 후 다시 차량은 다음 진행을 위해 수평 컨베이어로 이송된다. 수직이송을 위한 컨베이어는 수직이송장치 내에서 순환하면서 다음 차량을 이송하기 위해 준비한다. 수직이송장치의 모든 움직임은 차량의 운행을 통제하는 운영센터와 연동되어 무인으로 제어된다.<sup>0</sup>

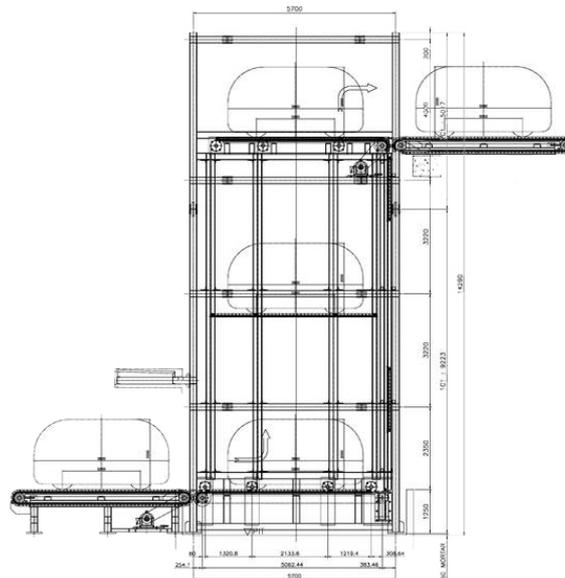
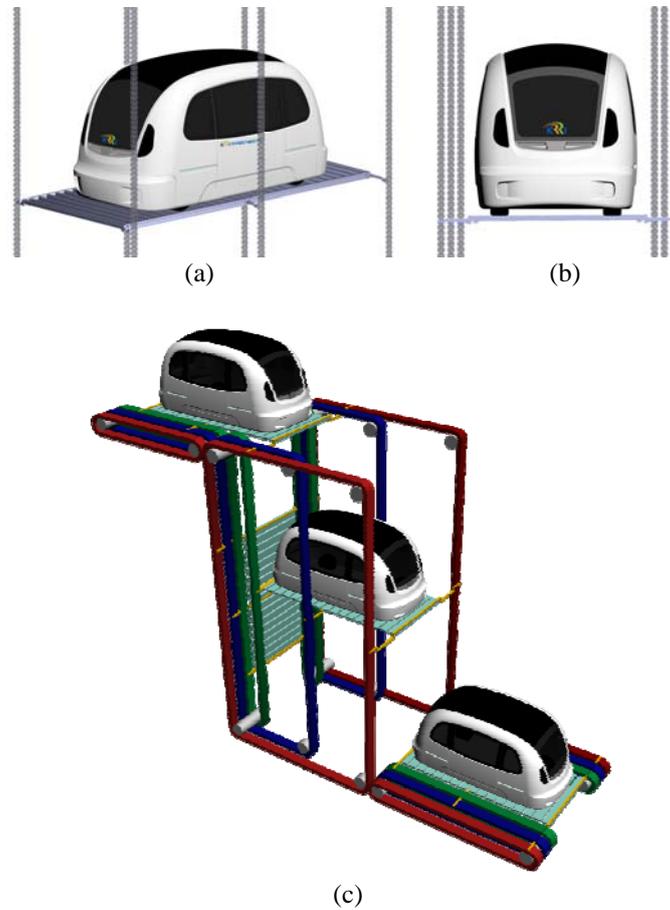


Fig. 1 2D Lay-out design of the vertical transfer device for the PRT vehicle



**Fig. 2** Schematic configuration of the vertical conveyor system: (a) perspective view, (b) front view, (c) operational concept

슬랫패널의 각 모서리 및 중간 지점에는 차량의 수직 이송 시 차량에 의해 가해지는 하중을 지지하고 수평을 유지하면서 수직으로 이송하기 위하여 고무체인이 연결되어 있다(Fig. 2(a) 참조). 이 고무체인은 중앙부에 스틸(Steel) 강선이 심어져 있어 강한 장력에도 견딜 수 있도록 설계되어 있다. 개발 차량의 제원은 Fig. 2 에 보이는 바와 같이 길이 3.8 m, 폭 1.8 m, 높이 2.0 m 이며, 만차 중량은 대략 1,300 kg 정도 된다. 그리고 차량의 운거 및 축거는 각각 1.2 m, 2.3 m 인데 패널의 자체 하중의 영향을 최소화하기 위하여 슬랫바의 간격은 차량의 바퀴가 놓여지는 부분에만 좁은 간격(예: 5mm)으로 설치되고 나머지 부분은 115mm 로 설치되었다.

정확한 해석을 위하여 슬랫패널에 걸리는 하중의 크기 및 위치, 작용면적 등을 검토하였다. 차량의 만차하중은 대략 1,300 kg (12,740 N)이며, 전륜부와 후륜부의 무게배분은 6:4 정도 된다. 따라서, 전륜 및 후륜에 가해지는 하중은 각각 3,822 N, 2,548 N 정도로 계산된다. 슬랫패널에 가해지는 하중의 면적(접지면적: A)은 타이어의 공기압(P)과 하중(N)에 의한 압력이 같다는 조건을 통해서 계산된다.

$$P = \frac{N}{A} \quad (1)$$

타이어의 공기압(P)가 대략 30 psi (206,842 N/m<sup>2</sup>)정도 이기 때문에, 전륜과 후륜의 접촉 면적(A)는 대략 18,478 mm<sup>2</sup>, 12,319 mm<sup>2</sup>으로 계산된다. PRT 차량의 타이어 폭은 155 mm 이기 때문에 Fig. 3 에 보이는 바와 같이 하중이 작용한다고 정의할 수 있다.

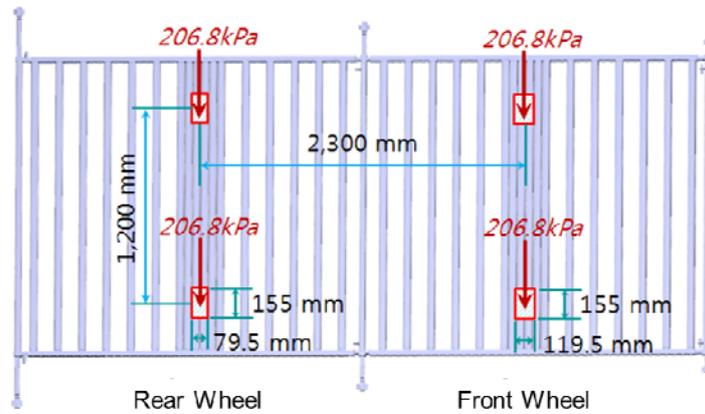


Fig. 3 Schematic of loading exerted on the slat panel by the PRT vehicle

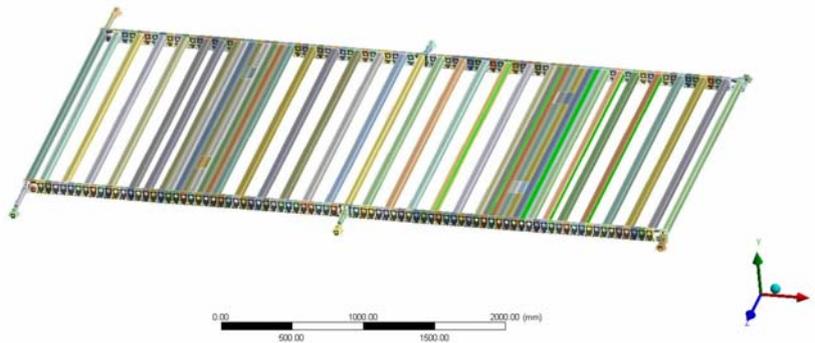


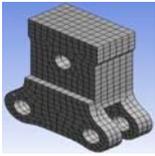
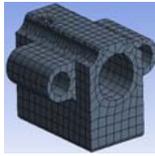
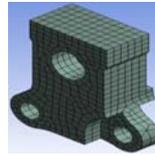
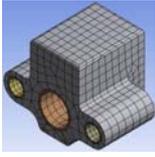
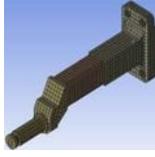
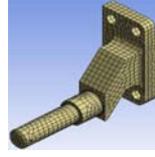
Fig. 4 Solid model of the slat panel for numerical analysis with Ansys®

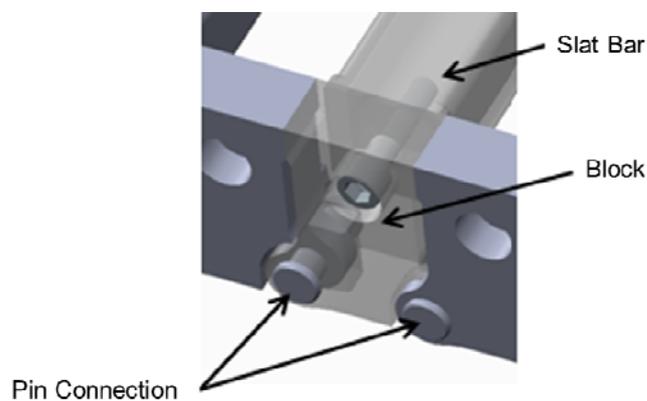
2.2 수직이송장치 해석모델

본 수치해석의 목적은 정적 하중 하에서 구조물이 일으키는 응력 및 변위를 예측하고, 이에 따라 구조적 취약점을 확인하고 이를 보완설계에 반영하는데 있다. 설계된 각 부품도면에 대해서 3-D CAD 프로그램(Solidworks)을 이용하여 수치해석 모델을 제작하였으며, 유한요소해석(FEM: Finite Element Method) 프로그램은 Ansys® Workbench Ver. 14 를 사용하였다. Ansys®는 다양한 분야에서 구조해석을 수행하는데 사용되고 있기 때문에 정확한 해석 조건만 주어진다면 해석결과를 신뢰하는데 문제가 없을 것으로 판단된다.<sup>0</sup> 또한, Fig. 4 에 보이는 바와 같이 Hex-dominant 기법을 적용하여 해석 격자를 생성하였다. Table 1 은 각 구성요소의 형상과 수치해석용 모델링의 작업결과를 보여준다.

경계조건(Boundary conditions)은 Fig. 2 와 Fig. 4 에 보이는 바와 같이 슬랫패널의 고무블록 체인과 연결되는 부분은 평형을 유지하는 상태(고정 지지)에서 슬랫패널을 구성하고 있는 슬랫바에 앞 에서 계산된 차량에 의한 하중이 가해지는 것으로 고려한다. 다만, 고정조건은 지지점 6 개소 모두 지지하는 경우와 중앙 2 개소를 뺀 4 개소만 지지하는 2 가지로 분리해서 해석하였다. 슬랫패널을 구성하는 슬랫바 연결 블록의 핀 연결부(Fig. 5)는 실제 조건에 가장 가깝게 구현하기 위하여 접촉조건을 마찰(Friction) 조건으로 가정하였으며, 마찰계수는 0.3 을 사용하였다. 실제로, 핀(Pin) 연결부는 슬랫바에 가해지는 하중을 분산하기 위하여 회전하도록 설계되어 있기 때문이다.

**Table 1** Solid modeling of each component for numerical analysis

Materials	Components and Number of Grids		
S45C			
	2,716	4,130	2,473
			
	3,114	633	
Scr415H			
	8,375	6,110	5,699
SS400			
	10,360	9,020	7,530

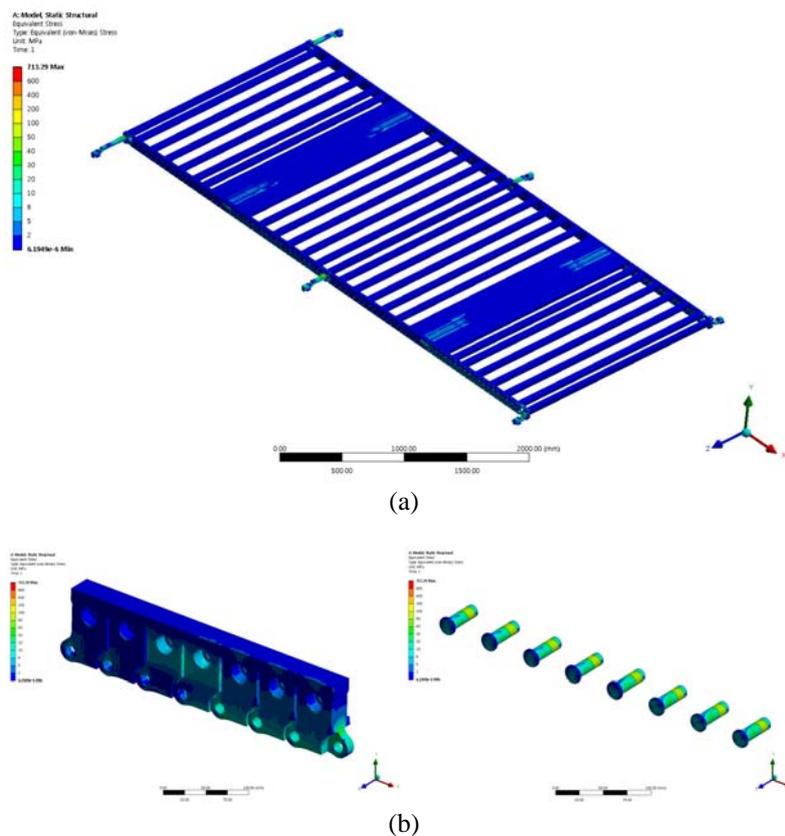


**Fig. 5** Pin connections between blocks in the slat panel

각 부품 재질별 물성치는 아래 Table 2 와 같으며, Ansys<sup>®</sup> 소프트웨어에서 제공하는 기본 물성치 외에 MatWeb<sup>0</sup>에서 제공하는 데이터베이스로부터 얻은 값들이다. 체인과의 연결부를 제외한 슬랫패널을 구성하는 대부분의 주요부품은 SS400(예: 슬랫바) 및 S45C(연결 블록 및 핀 등)로 되어 있다.

**Table 2** Material properties for numerical analysis

Material	Density [ton/m <sup>3</sup> ]	Poisson's ratio	Modulus of Elasticity [GPa]
S45C	7.85	0.29	205
SCr415H	7.87	0.29	200
SS400	7.865	0.285	200
SCM435	7.85	0.29	205

**Fig. 6** Stress distributions exerted on (a) the slat panel and (b) its components (i.e., connecting blocks and pins) in support of 6 fixed points

### 3. 구조강도 평가 결과

#### 3.1 해석 결과

2 절에 언급된 해석 조건에 따라서 정적 구조강도 해석을 수행하였고, 6 개 지지점을 가진 경우에 대한 전체적인 응력 분포는 Fig. 6 와 같이 나타났다. 그 결과, 차량으로부터 슬랫바에 가해지는 외력이 연결 블록으로 전파되어 하중이 타이어가 위치하는 부분을 중심으로 슬랫패널에 고르게 분포됨을 확인하였다. 또한, 하중이 연결 블록을 따라서 전파됨에 따라 가장 큰 응력이 연결 블록과 연결 핀 사이에 위치했음을 알 수 있다.

Fig. 6(a)에 보이는 바와 같이 슬랫패널의 대부분의 영역에서 약 10Mpa 정도의 응력이 발생하였으며, 중앙을 중심으로 응력이 대칭적으로 나타났다. 하지만, Fig. 6(b)에 보이는바 와 같이 마찰조건으로

주어진 연결 블록의 하부 홀의 모서리 부분에 최대응력(대략 600MPa)이 나타났으나, 전반적으로 응력이 분포하는 형태가 아닌 격자의 한 노드(Node)에서 국소적으로 응력의 특이성이 나타났다. 이는 해석 방법이나 재료의 물성치가 탄성해석 조건에 국한되면서 나타난 비이상적인 결과로 여겨진다. 그 외 블록을 연결하는 핀과 슬랫바를 연결하는 볼트에서의 응력은 각각 10MPa 및 90Mpa 이하로 나타났다.

또한, Fig. 7 은 4 개 지지점일 때의 결과를 나타내는데, 6 개의 지지점과 비교해서 응력에서의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 참고로, 그림 상으로는 6 개의 지지점이 모두 있는 것으로 보이지만, 가운데 위치한 2 개의 지점에는 고정지지(Fixed support) 조건이 적용되지 않았다.

변형량(Deformation)의 경우에는 최대 변형(대략 0.56mm)이 타이어와 접지하는 위치(슬랫바)에 나타났으며, 그 외 모든 부분에서는 변형률이 0.25mm 이하로, 그로 인해 차량이 움직이거나 수직이송의 안정성을 해칠 정도로 운영하는데 어려움이 있을 것으로 판단되지는 않았다. Fig. 8 은 각각 6 개 및 4 개 지지점 조건에서 전체 시스템의 변형량을 나타낸다. 응력분포에서는 큰 차이가 없었으나 최대 변형량은 4 개 지지점 조건에서 약간 크게 나타났다(Table 3 참조).

3.2 성능 향상을 위한 결과 고찰

Table 3 은 앞에서 언급된 수치해석의 결과를 정리한 표이다. 비록, 국소적인 특이성을 제외하고 전체적으로 응력 분포가 항복응력 이하였지만, 승객이 탑승된 상태의 차량을 수직으로 이송하기 위해서는 안전율이 10 이상이어야 하지만 이를 충족하지는 못하는 것으로 밝혀졌다.

이에 본 시스템을 실제 구현하기 위해서는 고강도 경량 소재를 사용하거나 응력이 연결블록에 집중되는 것을 방지하기 위하여 외력이 슬랫바에 보다 분배되도록 설계를 변경하는 등의 노력이 필요할 것으로 보인다.

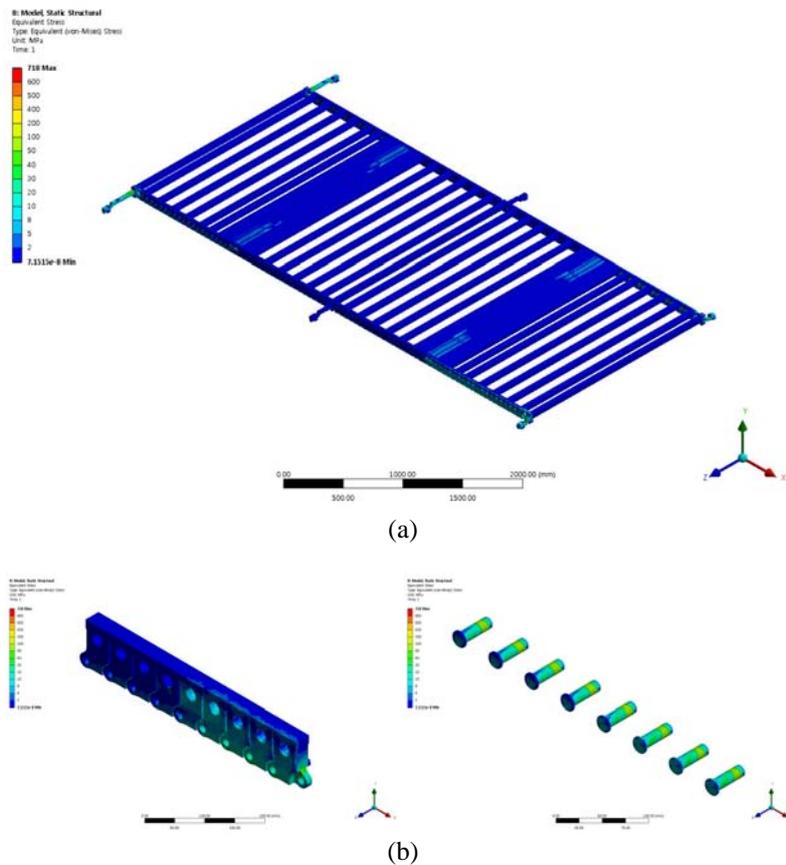
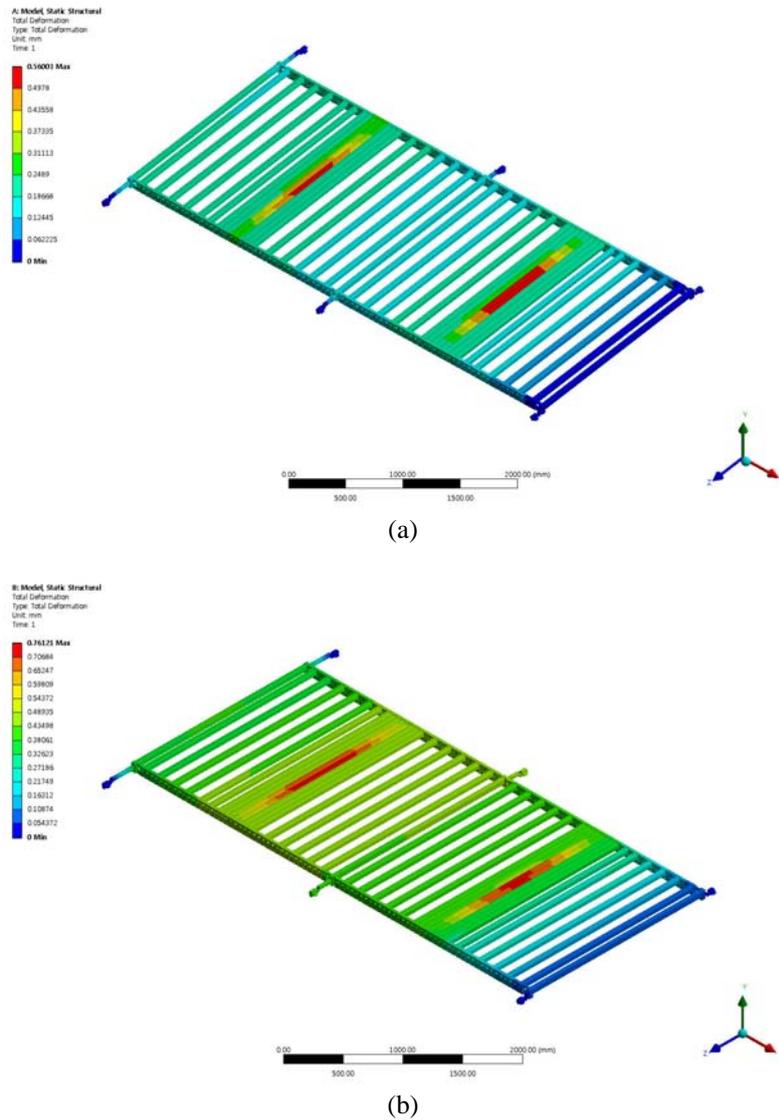


Fig. 7 Stress distributions exerted on (a) the slat panel and (b) its components (i.e., connecting blocks and pins) in support 4 fixed points

**Table 3** Summary of simulation results and comparison with yield strength

Simulation Case	Maximum Deformation [mm]	Maximum Stress [MPa]	Yield Strength [MPa]
6 Fixed Points	0.56	90	490 (S45C)
4 Fixed Points	0.76	89	



**Fig. 8** Strain distributions over the slat panel in support of (a) 6 and (b) 4 fixed points

예를 들어, 현재는 슬랫바의 형상이 직사각형 단면이지만, 슬랫바 간 응력을 상호 지지하는 형상으로 제작하면 연결블록에 보다 적은 응력이 가해질 것으로 예상된다. 강도 외의 설계 요구사항으로는 슬랫패널이 고무블록체인에 연결되어 수직이송장치 내에서 순환할 때 수프라켓(Sprocket)을 중심으로 회전하는데도 문제가 없어야 하며, 제작 가능성이나 형상의 특이성으로 인한 응력집중(Stress concentrations) 등에 대해서도 고려가 필요하다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 실제 하중 조건에서의 PRT 차량용 수직이송장치의 정적 구조강도 해석 결과에 대해서 기술하였다. 주요 결론은 아래와 같이 요약할 수 있다.

(1) 차량의 하중이 집중하중의 형태로 슬랫패널을 구성하는 슬랫바에 가해짐에 따라 이를 연결하는 연결블록에 응력이 집중됨을 확인하였다.

(2) 다만, 지지점이 6 개일 때 보다 안정적일 것으로 예상했지만, 4 개일 때와의 차이점은 크지 않았다.

(3) 또한, 응력 특이점 외에 모든 영역의 응력 분포는 허용 응력(Yield strength)값 이하였지만, 안전율(대략 5)이 일반 승강기에 적용되는 안전율(10)을 충분히 만족하지는 못했기 때문에 이에 대한 설계 변경이 필요할 것으로 판단되었다.

추후, 본 논문의 결과를 활용하여 설계를 보완한 후 추가해석 및 제작/시험을 수행할 예정이다.

#### 후 기

본 연구는 미래창조과학부에서 지원하는 한국철도기술연구원의 기관주요사업 과제의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

#### 참고문헌 (References)

- (1) Lee, J.-S. and Kim, K.-T., 2011, "PRT Application Study Using Corridor Analysis: Focused on Nan-Gok Area," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 14, No. 2, pp. 188~193.
- (2) Irving, J. H., Bernstein, H., Olson, C. L. and Buyan, J., 1978, *Fundamentals of Personal Rapid Transit*, D.C. Health and Company, Lexington M.A.
- (3) Kim, M.-W. and Lee, H.-Y., 2009, "Status of PRT Technology Development and Guide-Way R&D," *DAEWOO Engineering Company Report*, pp. 83~103.
- (4) Kang, S.-W., Um, J.-H., Jeong, R.-G. and Kim, J.-S., 2013, "A Development of the Apparatus for Vertical Transfer of a PRT Vehicle Operating on a Road Network," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 14, No. 6, pp. 2604~2611.
- (5) Um, J.-H. Jeong, R.-G., Kang, S.-W., Kim, B.-H. and Seo, S.-I., 2013, "Methodology for Realization of Minimum Headway Time in the Vertical Transfer of a PRT Vehicle," *International Journal of Digital Content Technology and its Applications(JDCTA)*, Vol. 7, No. 11, pp. 345~351.
- (6) Kim, Y.-H., Bae, S.-Y., Jo, Y.-D. and Moon, K.-M., 2008, "Structural Design and Analysis of Autonomous Underwater Vehicle by Fiber Reinforced Plastics," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 32, No. 11, pp. 937~942.
- (7) <http://www.matweb.com/>