http://dx.doi.org/10.7735/ksmte.2016.25.6.471

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2508-5107(Online) / ISSN 2508-5093(Print)

철도 인프라 적용 교량형 조립식 모듈의 경량화 설계

임재문[a], 신광복[b*], 박재현[c]

Lightweight Design of a Modular Bridge for Railway Infrastructure Systems

Jae Moon Im[a], Kwang Bok Shin[b*], Jae Hyun Park[c]

[a] *Graduate school of Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, 125, Dongseo-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34158, Korea*
[b] *Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, 125, Dongseo-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34158, Korea*
[c] *Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang, Gyeonggi-do, 16105, Korea*

ARTICLE INFO

Article history:

Received	8	August	2016
Revised	21	October	2016
Accepted	1	November	2016

Keywords:
Modular bridge
Lightweight design
Structure integrity
Railway infrastructure system

ABSTRACT

This paper describes a method to design a lightweight modular bridge for a railway infrastructure system. A lightweight design was achieved using the material selection method. Aluminum extrusions and honeycomb sandwich composites were selected as the best materials to reduce the weight of the upper structure of a conventional modular bridge made of carbon-steel material. The structural integrity of the lightweight modular bridge was evaluated under vertical and wind loads. The twisting and bending natural frequencies were also evaluated to investigate its dynamic characteristics. The results showed that the structural integrity and natural frequencies of the lightweight modular bridge, made of aluminum extrusion and sandwich composites, satisfied the design requirements. Moreover, it was found that the weight of the conventional modular bridge made of carbon steel could be reduced by a maximum of 47% using lightweight materials.

1. 서 론

최근의 산업은 각 제품별 맞춤형 부품을 제작하여 생산하는 방식에서 탈피하여 모듈화 기술(modular technique)을 적용해 제품을 생산하는 방식으로 전환되고 있다. 모듈화 기술이란 제품의 조립군이 다른 부품의 조립군과 구조적, 기능적으로 독립적이면서 표준화되어 다른 제품에도 범용적으로 이용될 수 있는 기술을 의미한다[1]. 이는 표준화된 부품의 조립을 통해 제품을 제작하기 때문에 원가절감, 생산성 증대 및 유지보수의 편의성 등의 장점이 있어 산업의 적용 사례가 증가하고 있는 추세이다[2]. 특히 장시간의 시공기간이 소요되는 토목분야에 모듈화 기술을 적용하게 되면 표준모듈의 조합으로 교량 등이 설계 및 제작되어 현장에서 즉시 시공을 할 수 있게 된다. 이런 모듈화 교량(modular bridge)은 시공기간의 단축과 건설 폐기물의 최소화 등의 장점이 있어 사용 중 교량에 결함이

* Corresponding author. Tel.: +82-42-821-1156
Fax: +82-42-821-1587
E-mail address: shin955@hanbat.ac.kr (Kwang Bok Shin).

발생될 경우, 결함이 발생된 해당 모듈만 교체할 수 있기 때문에 유지보수 측면에서도 매우 유리하다.

토목분야에서는 모듈화 교량의 연구가 많이 진행되고 있다. Zhang 등[3]은 유리섬유 복합재와 알루미늄을 적용한 교량형 모듈을 설계하고 해석과 시험적 방법을 통해 구조안전성을 평가하였으며, 주봉철 등[4]은 모듈화 교량에 적용되는 연결 슬래브를 설계하고 피로시험을 통해 안전성을 평가하였다. 그리고 이정미 등[5]은 시험적 방법을 통해 모듈화 교량 연결부의 형상이 휨 거동에 미치는 영향을 연구하였다.

토목분야에서 모듈화 교량 연구 동향은 기존의 교량과 같이 반영구적으로 사용될 목적으로 개발하는 것이 대부분이다. 그러나 모듈화 교량의 장점을 극대화시키기 위해서는 기존의 교량과 같이 사용하는 것이 아니라 기계 부품과 같이 독립적으로 해체 및 재활용이 가능하도록 설계하여 일시적 교통수요가 필요한 곳에 신속히 대응하고 이후 교통 수요 감소 시 설치된 인프라를 빠르고 간편하게 해체 할 수 있도록 하여야 한다. 현재 사용되고 있는 모듈은 보관, 운송, 설치 그리고 해체 시 많은 비용과 시간이 소요되어 교량형 조립식 모듈을 실제로 활용하기 위해서는 경량화 설계가 고려된 연구가 추가적으로 필요하게 되었다.

본 연구에서는 모듈화 교량의 장점을 이용하여 해체 및 재활용이 가능한 교량형 조립식 모듈에 대한 경량화 설계를 제시하고자 한다. 이에 경량 교량형 조립식 모듈은 기존 교량형 조립식 모듈을 바탕으로 40% 이상의 경량화를 목표와 보관 시 부식 방지를 목표로 연구를 수행하였다. 알루미늄 압출재(aluminum extrusion)와 샌드위치 복합재(sandwich composite)는 부식에 대한 문제를 해결함과 동시에 기존의 철도차량 차체 경량화를 위해 최적화 설계 기법을 통해 도출된 단면 구조를 적용할 수 있기 때문에 최적의 경량 재료로 판단되었다. 제시된 경량 교량형 조립식 모듈의 설계는 설계 요구조건을 토대로 해석적 방법을 통해 적용 재료별 구조 강도 및 강성, 고유진동수 등을 평가하여 구조안전성을 검증하였다.

2. 교량형 조립식 모듈의 구조

2.1 기존 교량형 조립식 모듈의 문제점

교량형 조립식 모듈은 올림픽 등의 국가적 행사, 재난, 재해 등으로 발생되는 일시적인 교통수요에 빠르게 대응할 수 있으며 수요 감소 시 해체하여 보관 및 기타 수요로 전환이 가능하도록 설계하는 것을 목적으로 하고 있다. 해체 및 재활용이 가능한 모듈화 교량의 대표적인 사례는 육군에서 운용중인 장간조립교가 있으며, Fig. 1은 M2 장간조립교의 설치 모습을 보여준다.

반영구적으로 사용되는 모듈화 교량과 전쟁 등의 특수상황에 사용되는 모듈화 교량은 모두 높은 구조 안전성을 확보해야 하기 때문에 보수적 설계가 되어왔고, 이로 인해 기존의 교량 건설보다는 신속하지만 운송, 보관, 설치 및 해체 등에 많은 시간이 소요되어 일시적 교통 수요에 빠르게 대응하기에는 어려운 단점을 가지게 되었다. 이에 한국철도기술연구원에서는 탄소강 재질을 적용한 교량형 조립식 모듈을 연구한 사례가 있으나 이 역시 독립적인 해체 및 재활용이 가능한 모듈 구조의 기능과 조립 방법 개발에만 연구가 이루어져 경량화를 고려하지 못하였다. 기존 한국철도기술연구원에서 수행된 탄소강 교량형 조립식 모듈은 중량이 11.3 톤으로 매우 높아 특수 운송을 통해 운반해야 하며 설치 및 해체 시 많은 장비 및 인력이 필요해 시간과 비용의 소모가 매우 크다. 또한 강재질의 특성상 부식을 방지하기 위해 방청에 대한 관리의 어려움이 있다.

Fig. 1 M2 bailey bridge

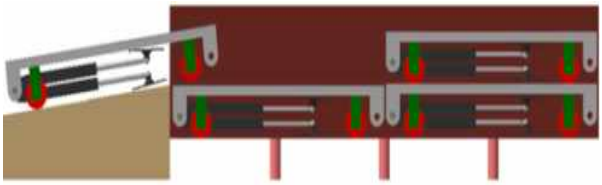


Fig. 2 Loading process for modular bridges in container

2.2 설계 요구조건

본 논문에서 제시하는 해체 및 재활용이 가능한 교량형 조립식 모듈은 박람회, 동계올림픽 등과 같이 일시적이고 단기간 발생하는 교통수요의 필요 지점에 즉각 설치가 가능한 임시 도로 구축장치로 일반 교량과 달리 설치 지형에 영향을 받지 않고 설치되도록 설계되었다. 따라서 지형에 따라 높이 조절이 가능하고 설치 지형의 경사에도 유연하게 대응할 수 있어야 하며 신속한 구축을 위해 설치 프로세스가 단순한 구조이어야 한다. 또한 미사용 시에는 보관 및 운송의 용이성을 위해 크기와 중량이 제한되어야 한다. 이에 3축 평판 트레일러를 이용한 일반 운송과 보관이 가능하도록 폭 2,430 mm, 길이 12,190 mm 그리고 높이 2,580 mm의 적재공간을 갖는 범용 약 1.2 m(40 ft) 컨테이너에 최대 4개의 조립식 모듈을 적재할 수 있는 크기로 설계되었고 높이 조절이 가능하도록 모듈의 구조 치수를 선정하였다. Fig. 2는 40 ft 컨테이너에 교량형 조립식

모듈을 적재하는 모습을 도식화하여 보여준다.

교량형 조립식 모듈은 전용 차량의 운행을 고려해야 하므로, 차량 중량 5 톤에 안전율 1.4를 적용하여 하중 조건(7 톤)을 고려하였다. 수직 하중을 받는 알루미늄 압출재는 처짐을 고려하여 하중의 반대방향으로 캠버(camber)를 주는데 길이에 1/1,000 이상의 캠버를 주는 것은 구조물에 취약점으로 작용할 수 있으며 승차감도 저하 될 수 있다. 이를 고려하여 처짐 기준은 충분한 구조 강성을 갖도록 철도차량 차체 구조물의 하부 처짐 기준인 길이의 1/1,000을 적용하여 6 mm 이내로 선정하였다.

또한 교량형 조립식 모듈 상부에 운행하는 차량의 승차감과 안정성을 확보하기 위해 10 Hz 이상의 고유진동수를 갖도록 기준을 고려하였다[6]. 추가적으로 교량형 조립식 모듈은 일반 지형과 산악지형에 모두 설치되도록 고안되었기 때문에 풍하중에 대한 영향 역시 고려되어야 한다. 풍하중에 의한 영향을 고려하기 위해 철도설계 기준 2013(강교 및 강합성교)의 풍하중 기준을 적용하였으며[7], 풍속은 교량형 조립식 모듈이 설치될 수 있는 지역 중 가장 높은 풍속인 45 m/s (Type IV)를 선정하였다[8]. Table 1은 본 연구에서의 수행중인 교량형 조립식 모듈의 설계요구조건을 보여주고 Table 2는 지역별 기본 풍속 데이터를 보여준다.

2.3 경량화를 위한 설계 제안

기존의 탄소강을 적용한 교량형 조립식 모듈의 형상은 Fig. 3에서 보듯이 상부 구조물(upper structure), 체결 후크(joint hook), 체결봉(joint shaft), 다리 구조물(leg structure), 유니버셜 조인트(universal joint) 그리고 지면 지지부(ground supporter)로 구성된다. 한국철도기술연구원에서 수행된 교량형 조립식 모듈은 탄소강 재질이 적용되어 중량이 11.3 톤으로 고중량의 구조물이다. 이는 앞에서 언급하였듯이 보관, 운송, 설치 그리고 해체 시 비경제적이기 때문에 경량화 설계가 수행되어야 한다. 또한 알루미늄 압출재를 적용할 경우, 탄소강을 적용하는 것보다 약 23%의 제작비를 절감할 수 있고 보관시 도색, 표면처리 등의 추가적인 관리가 필요하지 않는 장점이 있다. Fig. 4는 탄소강 모듈에서 가장 큰 중량을 차지하는 상부 구조물의 형상을 보여준다. 상부 구조물의 경우 조립식 교량의 전체 중량에서 53%를 차지하므로 경량화의 주요 대상이 되는 구조물이다.

구조물의 경량화를 달성하는 방법은 크게 최적화 설계기법과 경량 재료 사용의 두 가지 방법이 있는데 본 연구에서는 경량 재료인 알루미늄 압출재와 샌드위치 복합재를 적용한 경량화 방안을 선택하였다. 알루미늄 압출재와 샌드위치 복합재는 철도차량의 차체 경량화를 위해 많은 연구가 수행되어 큰 경량화 효과를 도출한 사례가 있으며[9-11], 최적화 설계를 통해 최적의 경량 단면 형상에 대한 연구 결과[12]가 있어 이를 활용하고자 한다. 교량형 조립식 모듈의 상부구조물은 철도차량 차체의 언더프레임과 구조 및 하중 형태가 유사하여 기존 철도차량 차체의 언더프레임 형상을 기초로 설계를 수행하였다. 알루미늄 압출재는 수직방향의 하중을 받는 교량형 조립식 모듈의 특성을 고려하여 수직방향의 리브를 적용하였고 4개의 압출재를 용접을 통해 접합하여 제작하는 형태를 고려하였다.

Table 1 Design specifications of modular bridge

Width (mm)	2,400
Length (mm)	6,000
Height (mm)	2,000 ~ 4,500
Design load (ton)	7
Wind load (kN/m^2)	1.5
Deflection (mm)	6
Natural frequency(Hz)	> 10

Table 2 Regional basic wind speed

Type	Region	Wind speed
I	Inland	30 m/s
II	West coast	35 m/s
III	West-South coast South coast East-South coast	40 m/s
IV	East coast Jeju	45 m/s
V	Special region	50 m/s

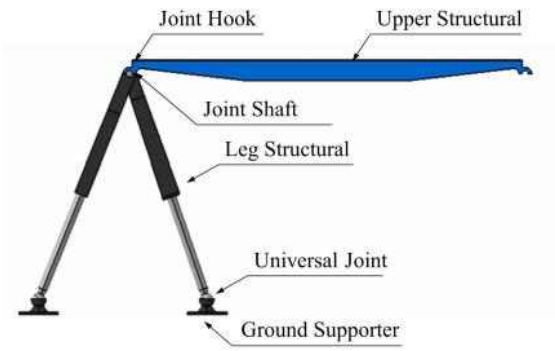


Fig. 3 Basic design of modular bridge

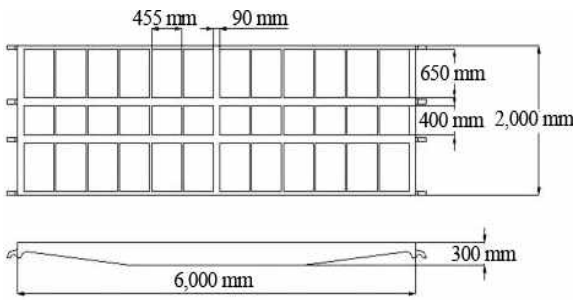
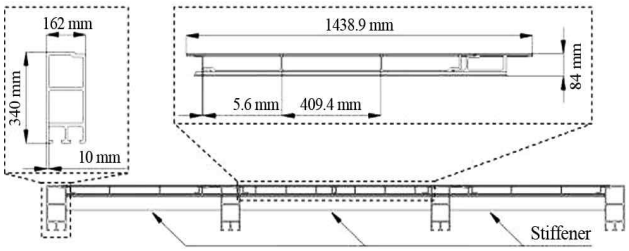


Fig. 4 Upper structure made of steel

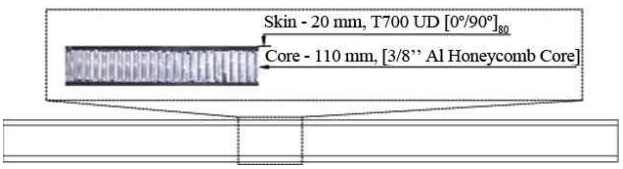
샌드위치 복합재는 한국형 틸팅열차의 복합재 차체에 적용된 T700급 카본/에폭시 복합재 면재(skin)와 3/8 inch 알루미늄 허니콤 심재(aluminum honeycomb core)로 갖도록 상부 구조물을 설계하였다. 샌드위치 복합재는 카본/에폭시 복합재 면재를 진공백 성형법을 통해 제작하고 접착제를 통해 심재와 접합하는 제작공정을 고려하였다. Fig. 5(a)는 알루미늄 압출재가 적용된 상부 구조물의 단면 형상을 보여주고, Fig. 5(b)는 샌드위치 복합재가 적용된 상부 구조물의 단면 형상을 보여준다.

Table 3은 탄소강, 알루미늄 압출재 그리고 샌드위치 복합재가 적용된 상부 구조물의 주요 제원을 비교한 것이다. Table 3에서 보듯이 알루미늄 압출재와 샌드위치 복합재 상부 구조물의 경우 기존의 탄소강 소재 대비 약 88%의 경량화 효과를 얻고 있음을 알 수 있다.

기존의 탄소강 재질이 적용된 모듈의 다리 구조물은 적재 및 보관을 위해 접기에 불편한 형상을 가지고 있어 손쉬운 사용을 위해 형상을 변경하였다. 변경된 다리 구조물은 Fig. 6(a)와 같이 모듈의 설치나 해체 시 서로 간섭이 발생하지 않는 폴딩 구조를 갖는다. 또한 교량형 조립식 모듈의 경우 신속한 설치와 해체를 위해 모듈 간의 조립 공정을 단순화해야 하며, 이를 위해 본 연구에서는 모듈의 전방부에 설치된 결합봉을 이용하여 모듈간 조립이 가능하도록 설계하였다. Fig. 6(b)와 같이 후크와 결합봉 그리고 체결링이 볼트를 통해 체결되어 조립되게 하였고, 후크의 형상은 결합봉과 조립 시 소요되는 시간을 최소화하기 위한 형상으로 설계하였다. 이로 인해 저하되는 체결의 불완전함은 체결링과 후크의 볼트 체결을 통해 보완하였다.



(a) Aluminum extrusion structure



(b) Sandwich composite structure

Fig. 5 Cross-section of upper structure

Table 3 Specification of upper structure

Materials	Dimensions (mm)	Weight (ton)
Steel	6,000×2,000×300	6.00
Al Extrusion	6,000×2,000×150	0.67
Sandwich Composite		0.71

3. 교량형 조립식 모듈의 구조 안전성 평가

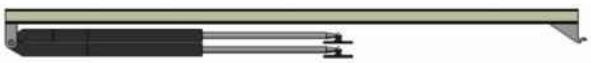
알루미늄 압출재 및 샌드위치 복합재가 적용된 경량 상부 구조물의 설계(안)은 철도차량 차체에 적용되어 구조안전성이 검증된 구조이지만, 교량형 조립식 모듈에 적용되기 위해서는 풍하중 및 수직 하중 조건 등이 다르므로 교량형 모듈의 요구조건에 맞게 구조안전성을 재평가해야 한다.

3.1 유한요소모델

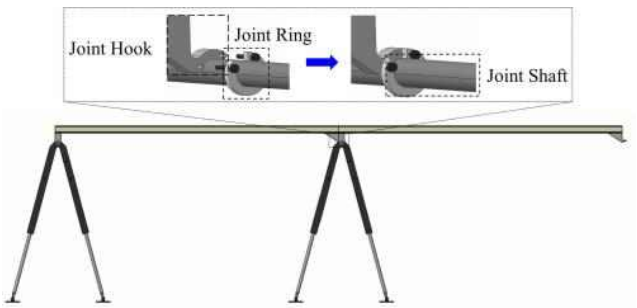
경량화된 교량형 조립식 모듈의 유한요소모델링은 ANSYS v.13.0을 사용하여 수행하였으며 알루미늄 압출재와 샌드위치 복합재의 면재는 Shell 181 요소(4-node structural shell)를 적용하였고 샌드위치 허니콤 심재와 다리구조물, 지면 지지부는 Solid 185 요소(3D 8-node structural solid)를 적용하였다. 이때, 결합봉은 Beam 188요소(3D linear finite strain beam)를 적용하여 단순화시켰다. 본 연구에서 제시된 유한요소모델은 장형진 등[9]의 연구를 통해 검증된 모델로서, 알루미늄 압출재와 샌드위치 복합재 면재의 경우 쉘 요소를 사용하고, 샌드위치 허니콤 심재의 경우 솔리드 요소를 사용하는 것이 정확한 해석결과를 도출할 수 있다는 연구 결과를 토대로 요소 타입을 선정하였다.

3.2 유한요소의 크기 도출

유한요소모델의 요소 크기는 정확한 해석 결과 도출 및 경제적인 해석 수행을 위해 매우 중요한 인자이다. 일반적으로 유한요소 크



(a) Folding state



(b) Standing state

Fig. 6 Modified leg structure and joint part of modular bridge

기의 감소와 수가 증가함에 따라 정확한 해를 도출하지만 너무 작거나 많은 수의 유한요소를 사용할 경우, 해석시간과 후처리 시 많은 시간이 소요되어 경제적인 해석을 위해 최적의 유한요소 크기의 도출이 필요하다. 이에 본 연구에서는 요소 크기에 따른 변위와 응력 결과의 수렴성을 검토하였다. 유한요소 해석의 결과는 요소의 크기에 따라 큰 차이가 발생되는데 Fig. 7과 같이 30 mm와 40 mm 요소 크기에서의 결과와 같이 크게 변동될 수 있어 반드시 확인이 필요하다. 요소 크기에 따른 변위와 응력 결과의 수렴성 검토를 통해 20 mm의 유한요소 크기를 선정하였다. 이로 인해, 알루미늄 압출재가 적용된 유한요소모델은 249,931개의 절점과 232,686개의 요소로 구성되었고, 샌드위치 복합재가 적용된 유한요소모델은 293,304개의 절점과 241,892개의 요소로 구성되었다. Fig. 8(a)는 알루미늄 압출재가 적용된 모듈의 유한요소모델을 나타내고, Fig. 8(b)는 샌드위치 복합재가 적용된 모듈의 유한요소모델을 보여준다.

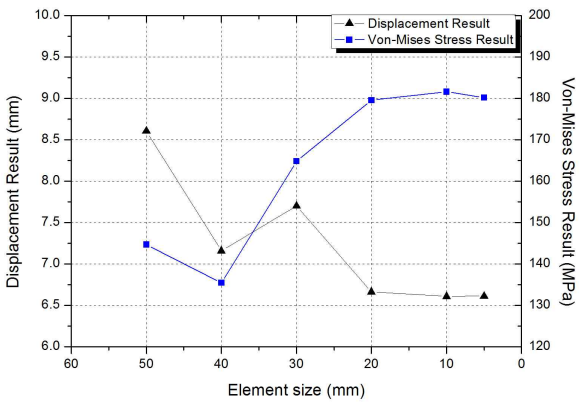
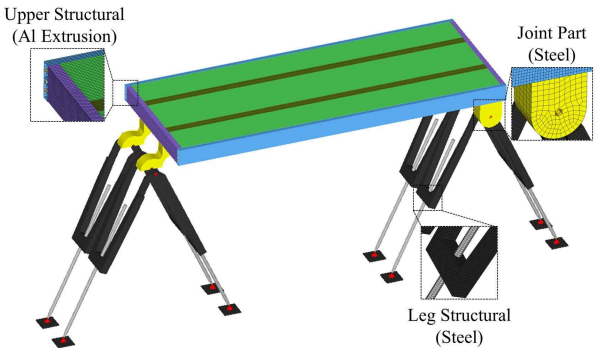
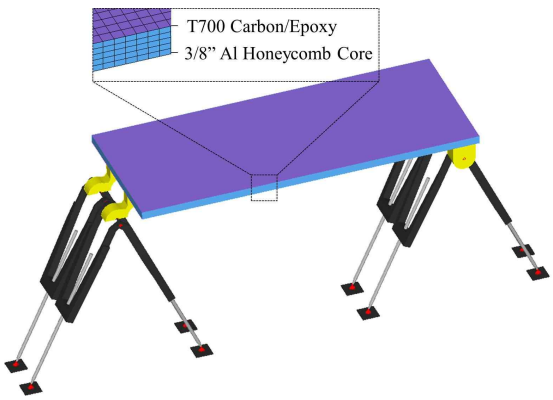


Fig. 7 Convergence analysis according to mesh size



(a) Aluminum extrusion structure

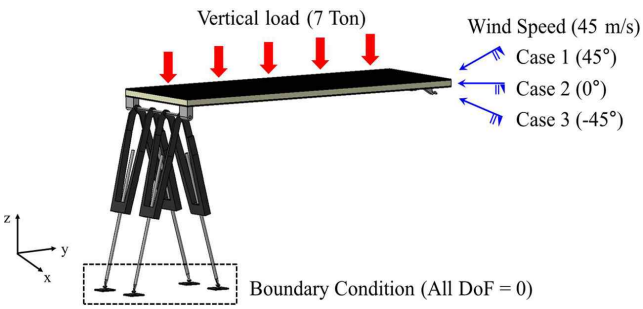


(b) Sandwich composite structure

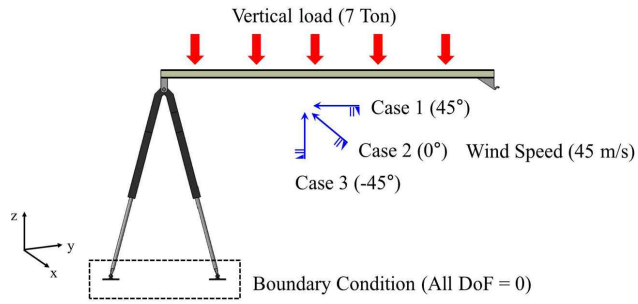
Fig. 8 Finite element models of modular bridge

3.3 하중 및 구속조건

교량형 조립식 모듈의 구조안전성 평가를 수행하기 위해 적용된 하중 조건은 모듈의 상부에 운행될 전용차량의 중량 5 톤과 안전율 1.4를 고려하여 7 톤의 수직하중을 분포하중으로 부과하였으며 중



(a) Isometric view



(b) Front view

Fig. 9 Load and boundary conditions

Table 4 Mechanical properties[10,13]

		Steel	Al Extrusion	Carbon /Epoxy	Al Honeycomb Core
E (GPa)	E_x	210	70	134.6	0.001
	E_y			7.6	0.001
	E_z			7.6	0.105
G (GPa)	G_{xy}	-	-	3.6	0.001
	G_{xz}			3.6	0.032
	G_{yz}			3.2	0.032
Poisson's ratio	ν_{xy}	0.3	0.33	0.3	0.33
	ν_{xz}			0.3	0.0001
	ν_{yz}			0.5	0.0001

력가속도를 적용해 구조물 자중에 의한 효과도 고려하였다. 철도설계기준에 의거해 풍하중을 적용하기 위해 측면에 1.5 kPa의 압력을 적용하였다. 또한 풍향의 영향을 확인하기 위해 45°, 0° 그리고 -45°의 3방향을 고려하였다. 또한 모듈은 4개의 앵커를 통해 지면과 완전 체결되기 때문에 지면 지지부의 하부 자유도를 완전 구속하는 조건을 부여하였다. Fig. 9는 구조해석에 적용된 구속 및 하중 조건을 보여주고, Table 4는 구조해석에 사용된 적용 재료별 기계적 물성을 나타낸다. 이때, 알루미늄 압출재와 샌드위치 복합재의 기계적 물성은 참고문헌[10,13]의 결과를 활용하였다.

3.4 구조해석 결과

교량형 조립식 모듈의 구조안전성 평가를 위한 강도 기준은 금속재의 경우 식 (1)과 같이 연성 재료의 von-Mises 항복 기준식을 적용하였고, 복합재의 경우 식 (2)의 Tsai-Wu 이론을 적용하여 Tsai-Wu 파손지수가 1 미만일 때 안전한 것으로 기준을 선정하였다.

$$(\sigma_x-\sigma_y)^2+(\sigma_y-\sigma_z)^2+(\sigma_z-\sigma_x)^2=2\sigma_{yield}^2 \quad (1)$$

$$F_i\sigma_i+F_{ij}\sigma_i\sigma_j=1,(i,j=1,2,3,\cdots,6) \quad (2)$$

여기서 σ_x, σ_y, σ_z는 각 방향별 주응력을 나타내며 σ_{yield}는 재료의 항복응력을 나타내고, F_i와 F_{ij}는 각각 2차 및 4차 강도텐서를 나타낸다.

7 톤의 수직하중과 각 방향별 풍하중을 적용한 구조해석 결과, Table 5와 같이 수직방향의 풍하중 성분을 갖는 Case 1의 경우에서 가장 취약한 결과를 보이나 설계 기준인 6 mm 이하의 처짐, 재료항복강도 이하의 von-Mises 응력 그리고 1 이하의 Tsai-Wu 파손지수가 발생하여 구조적으로 안전한 것을 확인하였다.

Fig. 10은 Case 1의 하중 적용 시 탄소강, 알루미늄 압출재 그리고 샌드위치 복합재가 적용된 교량형 조립식 모듈 상판의 강성 비교 결과를 보여준다. 탄소강을 적용한 상부 구조물의 강성이 가장 높게 나타났으며 알루미늄 압출재와 샌드위치 복합재가 적용된 상부 구조물의 강성은 유사한 경향을 보였다. 처짐 결과는 모두 6 mm 이내로 구조 강성 조건 역시 재료에 무관하게 만족함을 확인하였다.

교량형 조립식 모듈 상부 구조물의 길이방향에 따른 처짐 결과, 샌드위치 복합재를 적용한 모듈에서 5.01 mm의 가장 큰 처짐 결과가 발생하였고 알루미늄 압출재를 적용한 모듈에서는 4.92 mm의 처짐이 발생하였다. 알루미늄 압출재를 적용한 모듈은 Fig. 5(a)

Table 5 Structural analysis results

		Steel	Al Extrusion	Sandwich Composite
Case 1	Deflection	1.81 mm	4.92 mm	5.01 mm
	Von-Mises Stress	43.27 MPa	99.97 MPa	0.53*
Case 2	Deflection	1.78 mm	4.92 mm	4.98 mm
	Von-Mises Stress	42.54 MPa	99.48 MPa	0.52*
Case 3	Deflection	1.78 mm	4.93 mm	4.97 mm
	Von-Mises Stress	42.38 MPa	99.37 MPa	0.52*
Mass		11.3 ton	5.9 ton	6.0 ton

*Tsai-Wu Index

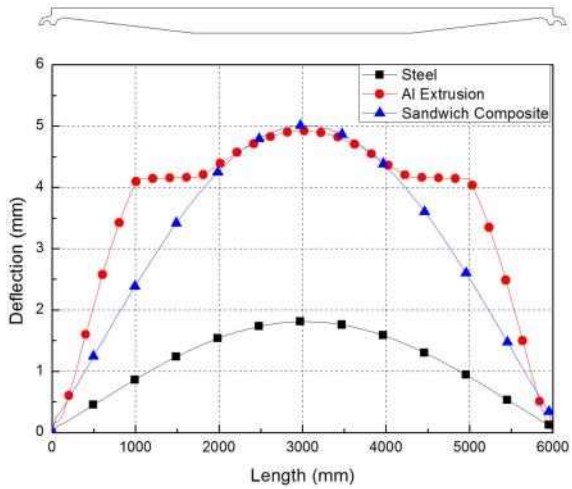
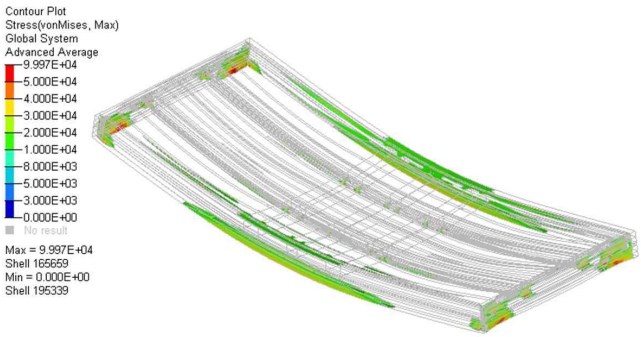
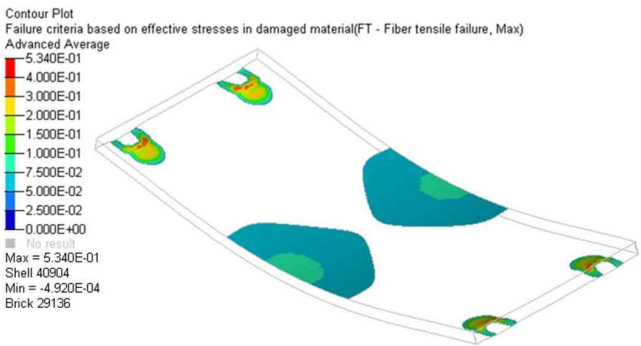


Fig. 10 Analysis results for deflection (Case 1)



(a) von-Mises stresses contours for aluminum extrusion



(b) Tsai-Wu index contours for sandwich composite

Fig. 11 Analysis results for stresses (Case 1)

Fig. 12 Concept image of modular bridge made of aluminum extrusion

에서 보듯이 1,000 mm, 2,000 mm, 4,000 mm 그리고 5,000 mm 위치에 보강재가 위치하여 중앙부위 처짐이 2,000 mm와 4,000 mm 사이에서 집중되는 형상을 보이고 있다. 반면 길이방향으로 단면이 일정하고 보강재가 없는 샌드위치 복합재 적용 상부 구조물과 선형적으로 단면이 넓어지는 탄소강 적용 상부 구조물은 처짐 결과가 전형적인 포물선 형태를 갖고 있음을 확인할 수 있다. 이에 구조 강성 측면에서는 같은 최대 처짐량을 갖더라도 샌드위치 복합재 구조보다는 처짐의 기울기 값이 적은 알루미늄 압출재 구조가 유리한 것으로 판단된다. 또한 Fig. 10을 통해 상부 구조물에 적용한 보강재의 처짐 억제에 대한 기여도를 확인할 수 있으며 상부 구조물의 중앙부인 3,000 mm 위치에 보강재를 추가할 경우, 최대 처짐량이 감소할 수 있는 것을 확인하였다.

Case 1 하중 적용 시 상부 구조물에 발생된 von-Mises 응력과 Tsai-Wu 계수는 조립부와 체결되는 부위에 응력 집중 현상으로 인해 각각 99.97 MPa과 0.53으로 가장 높게 발생하였으나 구조 강도 측면에서도 안전함을 확인하였다. Fig. 11(a)는 알루미늄 압출재가 적용된 상부 구조물의 von-Mises 응력 분포를 보여주고 Fig. 11(b)는 샌드위치 복합재가 적용된 상부 구조물의 Tsai-Wu 파손지수 분포를 보여준다.

또한, 상부에 운행하는 차량의 승차감 확보를 위한 고유진동수 해석을 수행하였으며 알루미늄 압출재를 적용한 모듈은 19.43 Hz, 샌드위치 복합재를 적용한 모듈은 30.00 Hz로 모두 10 Hz 이상의 고유진동수를 갖는 것을 확인하였다.

구조해석을 통한 알루미늄 압출재와 샌드위치 복합재를 적용한 경량 교량형 조립식 모듈의 구조안전성 평가 결과, 구조적으로 안전한 것을 확인하였으며 기존의 탄소강 재질의 모듈보다 약 47%의 경량화를 달성한 것을 확인하였다. 알루미늄 압출재와 샌드위치 복합재 두 소재 모두 구조물의 경량화에 유리하지만 알루미늄 압출재 상부 구조물을 적용하는 것이 약 23%의 제작 단가 절감과 표면처리 및 비파괴검사를 통한 층간분리 및 결함 검사 등의 유지보수 비용이 발생되지 않아 상대적으로 유리할 것으로 판단된다. Fig. 12는 경량 설계 기법으로 도출된 알루미늄 압출재 교량형 조립식 모듈의 3차원 형상을 렌더링한 그림이다.

4. 결 론

본 논문에서는 철도 인프라 적용 교량형 조립식 모듈의 경량화를 위해 알루미늄 압출재와 샌드위치 복합재를 적용한 설계 기법에 대한 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 올림픽이나 박람회 등의 행사나 재난, 재해 등과 같은 일시적인 교통 수요에 대해 빠르게 대응하고 교통 수요의 감소 시 인프라를 쉽게 해체, 보관 및 기타 수요에 재활용 할 수 있는 교량형 조립식 모듈의 경량화 설계를 도출하였다.

(2) 기존 탄소강 재질의 교량형 조립식 모듈의 경량화를 위해 재료 선택법을 이용한 경량화 설계방안을 도입하였으며, 알루미늄 압출재와 샌드위치 복합재를 최적의 재료로 선정하여 경량화 설계를 수행하였다.

(3) 수직하중과 풍하중 조건을 고려한 구조해석 결과, 설계 요구조건을 만족하여 구조안전성을 확인하였으며, 10 Hz 이상의 1차 고유진동수를 가져 승차감 및 동적 특성에서도 우수함을 확인하였다.

(4) 알루미늄 압출재와 샌드위치 복합재를 적용한 경량화 설계는 약 88%의 상부구조물 경량화를 달성하였으며 전체 모듈은 약 47%의 경량화를 달성하였으나 제작 단가나 유지보수 비용을 고려하였을 때 알루미늄 압출재를 적용하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

(5) 본 연구를 통해 도출된 교량형 조립식 모듈의 경량 설계 기법과 모듈의 메카니즘에 대해 구체적인 연구를 수행한다면 일시적 교통수요에 대응 가능한 모듈로 유용하게 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

References

[1] Lee, P. G., Park, C. H., Jung, E. J., 2013, R&D in Modular Bridges, Journal of the Korea Concrete Institute, 25:2 16-20.

[2] Lee, S. Y., 2011, Major Differences between the Precast and Modular Bridges, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 59:11 90-91.

[3] Zhang, D. D., Zhao, Q., Huang, Y., Li, F., Chen, H., Miao, D., 2014, Flexural Properties of a Lighetweight Hybrid FRP-Aluminum Modular Space Truss Bridge System, Composite Structure, 108:1 600-615.

[4] Joo, B. C., Song, J. J., Lee, S. Y., 2013, Flexural & Fatigue Evaluation of Link Slab for Continuous Girder-type Precast Modular Bridge, Journal of the Korea Concrete Institute, 25:5 517-528.

[5] Lee, J. M., Lee, S. Y., Song, J. J., Park, K. H., 2015, Static Load Test on Flexural Strength and Crack Serviceability of Longitudinal Joint for the Slab-type Precast Modular Bridges, Journal of the Korea Concrete

Institute, 27:2 137-145.

[6] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2015, Railway Safety Law,, Rep. of Korea.

[7] Korea Rail Network Authority 2013, Standard of Railway Design (Roadbed), 11-B551219-000022-01, Rep. of Korea.

[8] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2012, Standard of Highway Bridge Design, 11-1611000-002161-14, Rep. of Korea.

[9] Jang, H. J., Shin, K. B., Ko, H. Y., Ko, T. H., 2010, A Study on the Standardized Finite Element Models for Car body Structures of Railway Vehicle Made of Sandwich Composite, Journal of the Korean Society for Railway, 13:4 382-388.

[10] Ko, H. Y., Shin, K. B., Jeong, J. C., 2009, A Study on the Comparison of Structural Performance Test and Analysis for Design Verification of Bimodal Tram Vehicle Made of Sandwich Composites Journal of the Korean Society for Railway, 12:4 518-525.

[11] Kang S. G., Shin, K. B., Park, k. J., Lee, E. K., Yoon, I. R., 2014, A Study on the Weight-Reduction Design of High-Speed Maglev Carbody made of Aluminum Extrusion and Sandwich Composite Roof Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, 38:10 1093-1100.

[12] Jang, H. J., Shin, K. B., Ko, H. Y., 2012, A Study on the Lightweight Design of Hybrid Modular Carbody Structures Made of Sandwich Composites and Aluminum Extrusions Using Optimum Analysis Method Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, 36:11 1335-1343.

[13] Kim, J. H., Shin, K. B., Hwang, T. K., 2014, Progressive Failure Analysis of Adhesive Joints of Filament-Wound Composite Pressure Vessel Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, 38:11 1265-1272.