

## 복합재 대차프레임의 볼트 체결부 내구성 향상을 위한 인서트 영향에 관한 연구

김준환\* · 신광복\*\*† · 김정석\*\*\*

\* 한밭대학교 기계설계공학과, \*\* 한밭대학교 기계공학과, \*\*\* 한국철도기술연구원

### Effect of the Insert Shape on the Improvement of Durability of Bolted Joints Applied to Composite Bogie Frames

JunHwan Kim\*, KwangBok Shin\*\*† and JungSeok Kim\*\*\*

\* Graduate School of Mechanical Design Engineering, Hanbat Nat'l Univ.

\*\* Dept. of Mechanical Engineering, Hanbat Nat'l Univ.

\*\*\* Korea Railroad Research Institute

(Received March 20, 2014 ; Revised May 19, 2014 ; Accepted May 20, 2014)

**Key Words:** Bolt Joint(볼트 체결), Composite Bogie(복합재 대차), Insert(인서트), Sub-Modeling(서브모델링)

**초록:** 본 논문에서는 복합재 대차프레임 볼트 체결부의 내구성 향상 방안에 대한 연구를 다루고 있다. 이를 위해, 인서트와 나사산 유무에 따른 3가지 경우를 고려하여 볼트 체결부에 대한 시험 및 해석을 통해 인서트 형태 및 유무에 미치는 영향을 평가하였다. 제안된 볼트 체결부의 구조 성능은 ASTM D5961에 의거한 시험을 통해 비교 평가하였다. 시험결과, 나사산이 없는 인서트를 갖는 볼트 체결부가 가장 적합한 것으로 확인되었다. 또한, 볼트 체결부를 고려한 복합재 대차프레임에 대한 구조 안전성 평가를 JIS E 4207에 의거하여 유한요소해석을 통해 평가하였다. 복합재 구조물은 Tsai-Wu 파손기준식에 의해 파손평가를 적용하였고, 볼트 체결부와 같은 금속재 구조물은 Von-Mises 파손기준식에 의해 평가하였다. 이때, 볼트 체결부의 경우에는 상세한 구조해석 결과 검토를 위해 서브모델링 기법을 적용하였다. 구조해석결과, 나사산이 없는 인서트가 적용된 볼트 체결부의 경우에는 볼트 체결부 주위의 복합재 구조물에 발생하는 Tsai-Wu 파손지수가 다른 경우에 비해 약 50% 감소하는 경향을 보였는데, 이는 나사산이 없는 인서트 형상이 복합재 대차프레임 볼트 체결부의 내구성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

**Abstract:** This paper describes the study on a method for improving the structural durability of bolted joints applied to a composite bogie frame. In this study, three bolted joints with and without inserts and screw threads were selected for determining the effect of the inserts, using experiment and analysis. The structural performances of the proposed bolted joints were compared and evaluated using the test method prescribed by the ASTM D5961 standard. The results revealed that the bolted joint having an insert shape without the screw thread offered improved durability for application to a composite bogie frame. Furthermore, the structural integrity of the frame comprising the bolted joints was evaluated using finite element analysis according to the JIS E 4207 standard. The Tasi-Wu and Von-Mises failure criteria were used for determining the failure of the composite structure and bolted joints, respectively. A sub-modeling technique was introduced for investigating the performance of the bolted joints in greater detail. The analysis results demonstrated that the Tasi-Wu failure index of the composite structure near the bolted joints was reduced by approximately one-half after applying an insert without the screw thread. This implies that the structural durability of the bolted joints of a composite bogie frame could be improved by using a metal insert without the screw thread.

#### 1. 서 론

최근 고유가 및 환경문제가 전 세계적으로 대두됨

에 따라 에너지 절감 및 친환경 기술개발에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 친환경 운송수단인 철도 분야에서도 추가적인 에너지 절감 및 CO<sub>2</sub> 배출을 줄이기 위해 철도차량 경량화 요구가 증대하고 있다. 이에, 국가연구개발사업을 중심으로 복합재료를 적용한

† Corresponding Author, [shin955@hanbat.ac.kr](mailto:shin955@hanbat.ac.kr)

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

철도차량 경량화 연구가 증대되고 있는 추세이다.<sup>(1)</sup>

현재 국내의 경우 틸팅열차, 초고속자기부상열차, 바이모달 트램 등의 철도차량 전두부, 내장재 및 차체에 복합재료를 적용한 경량화 연구는 활발히 진행되었으나, 철도차량에서 부피대비 가장 무거운 대차에 대한 복합재료 적용 연구는 선진국에 비해 매우 부족한 실정이다.

국외에서는 독일 MBB, 프랑스의 Alstom 등에서 유리섬유 강화 복합재를 적용하여 기존대비 최대 약 30% 경량화를 달성한 연구사례가 있다.<sup>(2,3)</sup> 이에, 한국철도기술연구원에서는 강재로 제작된 기존의 도시철도차량용 대차프레임을 신소재인 복합재료로 대체하는 대차 경량화 연구개발을 수행하고 있다.<sup>(4)</sup>

대차프레임은 철도차량의 차체를 지지하는 핵심 구조물로서 현수장치, 제동장치 및 동력장치 등의 다양한 부품들과의 체결된다.<sup>(5)</sup> 이때, 복합재 대차프레임과 부품은 볼트 체결로 이루어지며, 이러한 볼트 체결은 국부적으로 복합재료의 강도를 저하시키고 체결부 주위에 높은 응력 집중현상을 발생시키게 된다.<sup>(6,7)</sup>

이에, 볼트 체결에 따른 복합재의 표면손상 및 내부로의 균열 진전으로 인한 내구성 저하를 방지하기 위해 금속재 인서트를 통한 파손방지 방안에 대한 연구가 필요한 실정이다. 특히, 대차와 같이 동적 거동을 나타내는 구조물의 경우 볼트 체결부에 인서트를 적용함으로써 국부적인 복합재 손상을 최소화시켜 구조물의 내구성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 한국철도기술연구원에서 개발된 복합재 대차프레임 볼트 체결부의 내구성 향상을 위해 시험 및 해석적 방법을 사용하여 인서트 형태 및 적용 유무에 따른 영향을 평가하였다. 이때, 체결부의 단위 모듈 시험편을 제작하여 시험을 수행하여 인서트의 적용 유무 및 인서트의 나사산 적용 유무에 따른 구조적 특성을 상호 비교하였다.

대차프레임 볼트 체결부에 단위 모듈 시험을 통해 선정된 인서트 형상을 적용하여 볼트 체결부의 구조 안전성을 평가하였으며, 이때, 볼트 체결부의 상세 해석을 위해 서브모델링 기법(sub-modeling method)을 적용하였다.

## 2. 인서트 형상 결정을 위한 구조시험

### 2.1 복합재 대차프레임의 구조

복합재 대차프레임은 차량의 하중을 지지하고

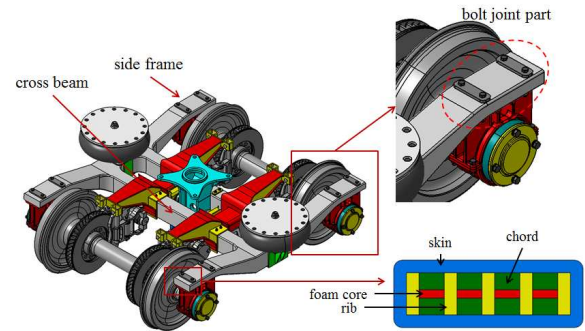


Fig. 1 The configurations of a composite bogie frame and bolt joint part

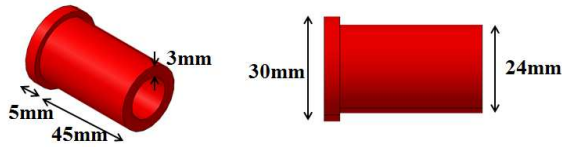
축상의 연결을 위한 사이드 프레임(side frame)과 제동장치의 체결을 위한 크로스 빔(cross beam)으로 구성된다. 이때, 복합재 대차프레임의 내/외부 면재(skin)는 유리섬유/에폭시 4매 주자직 적층 복합재(glass fiber/epoxy 4-harness woven laminate composite)가 적용되었으며, 내부 심재에는 PVC 폼 코어(PVC foam core)가 적용되었다.

복합재 대차프레임의 체결부는 차륜연결을 위해 부속품과 볼트 체결로 결합되며, 이때 볼트는 고장력 M18 볼트가 사용되었다. Fig. 1은 복합재 대차프레임의 구성 및 볼트 체결부를 보여준다.

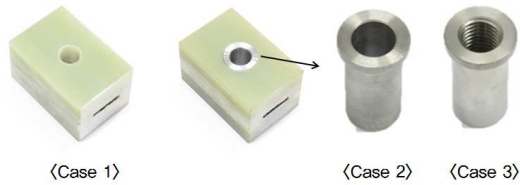
### 2.2 볼트 체결부 단위 모듈 시험편에 의한 시험 평가

본 연구에서는 제작의 효율성을 고려하여 Fig. 2와 같이 볼트 홀에 끼워 맞춤이 가능한 인서트 형상을 선정하였으며, 인서트가 미적용된 시험편(Case 1), 인서트에 나사산이 미적용된 시험편(Case 2) 그리고 인서트와 나사산이 모두 적용된 시험편(Case 3)에 대해 시험평가를 수행하였다. 또한, 복합재 대차프레임의 외피(outer skin) 두께를 고려하여 인서트의 머리 두께를 5mm로 선정하였으며, 고장력 M18의 볼트 머리(27mm)가 인서트위에 위치할 수 있도록 인서트 머리 지름 30mm로 선정하였다. Fig. 2는 볼트 체결부 시험 종류 및 인서트 치수를 보여준다.

복합재 대차프레임 볼트 체결부 시험은 별도의 규정이 존재하지 않아 적층 복합재 체결부 시험 규정인 ASTM D5961/D5961M<sup>(8)</sup>을 참고하였으며, 인서트 한 개를 갖는 단위 모듈 시험편을 제작하여 시험을 수행하였다. 이때, 시험편은 실제 제작된 복합재 대차의 사이드프레임을 절단하여 제작하였다. Fig. 3은 볼트 체결부 단위 모듈 하중시험을 위한 시험 지그 형상 및 시험편을 나타낸다.

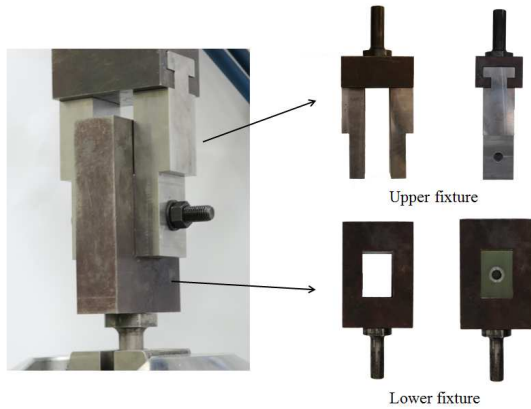


(a) Dimensions of insert

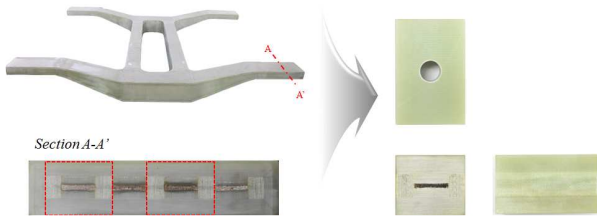


(b) Test cases

Fig. 2 The test cases and dimensions of insert



(a) Test fixtures

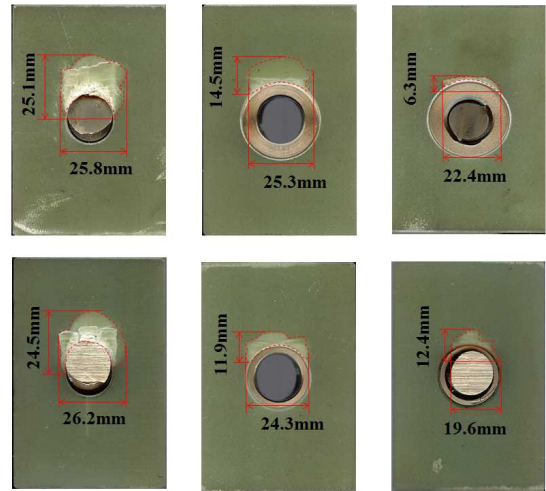


(b) Specimens

Fig. 3 The test fixtures and specimens

볼트 체결부 단위 모듈 하중시험은 50ton 용량의 만능재료시험기를 사용하였으며, 2mm/min 속도로 시험을 수행하였다. 이때, 에어토크렌치를 사용하여 고장력 M18 표준토크인 270N·m를 동일하게 부여하였다.

2.3 인서트 형상에 따른 체결부 구조 시험 결과 복합재 대차프레임의 볼트 체결부 시험결과 인서트가 미적용된 경우(Case 1)와 인서트에 나사산



(a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3

Fig. 4 Failure modes of specimens

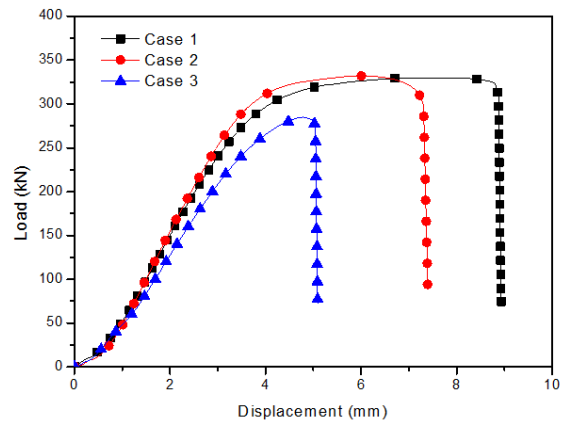


Fig. 5 The load-displacement curves

이 미적용된 경우(Case 2) 각각 330kN과 332kN의 비슷한 최대하중이 발생하였으며, 인서트와 나사산이 모두 적용된 경우(Case 3)는 비교적 낮은 285kN의 최대하중이 나타났다. 이때, 최대 변위는 Case 1이 8.9mm, Case2는 7.4mm 그리고 Case 3는 5.1mm로 발생하였다.

특히, 인서트의 영향으로 Case 2와 Case 3에서는 볼트 체결부 주변의 복합재 파손 발생이 감소되는 경향을 보였으나, 나사산이 적용된 Case 3의 경우에는 나사산의 영향으로 Case2에서는 볼수 없는 볼트 파손이 낮은 하중에서 발생하였다. 이에, 복합재의 파손형상 및 볼트의 파손하중을 고려하여 나사산이 없는 인서트 형상(Case 2)이 복합재 체결부에 추천된다. Fig. 4는 시험편의 파손형상들을 나타내며, Fig. 5는 하중-변위 선도를 보

여준다.

### 3. 볼트 체결부의 구조 내구성 평가

볼트 체결부의 단위 모듈 시험을 통해 선정된 나사산이 미적용된 인서트를 실제 대차프레임 모델에 적용하여 구조 해석을 수행하였다. 이때, 복합재 대차프레임 볼트 체결부의 구조 내구성 평가는 먼저 운영 하중 하에서 전체 대차프레임에 대한 구조해석을 수행한 후 볼트 체결부에 대한 상세한 구조 거동을 관찰하기 위해 서브모델링 기법을 적용하여 다시 구조해석을 수행하는 순서로 진행하였다. 서브모델링 기법은 Saint Venant의 이론을 기반으로 하고 있으며, 전체모델에서 관심부분만 따로 상세히 모델링하고 이미 해석한 전체 모델의 해석 결과를 경계조건으로 대입함으로써 상세한 결과를 얻는 유한요소기법이다. 이를 통해 상대적으로 높은 효율로 정확한 해석을 수행할 수 있는 장점을 가진 것으로 알려져 있다.<sup>9)</sup> 본 연구에서는 ANSYS v.13에서 제공하는 서브모델링 기법을 적용하였다.

복합재 대차프레임 전체 모델에 대한 유한요소 해석은 볼트 체결부를 생략한 간략화 모델을 사용하여 구조 안전성을 평가하였다. 이때, 하중조건은 JIS E 4207<sup>(10)</sup>에 의거하여 수직, 전후, 비틀림 하중을 모두 적용한 극한조건에 대해 수행하였다. Fig. 6은 복합재 대차프레임에 대한 구속조건 및 하중조건을 보여주며, Table 1은 구조해석에 사용된 재료들의 물성으로 복합재의 경우는 시험을 통해 구하였으며, 금속재 볼트는 제작사에서 제공된 물성을 사용하였다.

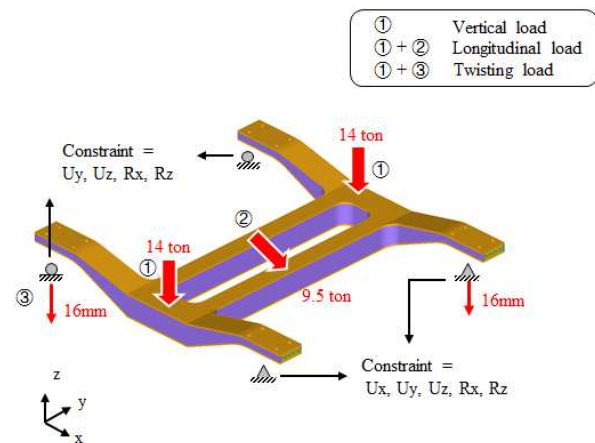


Fig. 6 Boundary and load conditions of a composite bogie frame

복합재 대차프레임 볼트 체결부에 대한 서브모델링의 경우 전체 모델에서 생략된 볼트, 홀, 인서트 그리고 금속 플레이트를 실제와 동일하게 고려하였고, 상세한 결과를 위해 요소밀도를 조밀하게 적용하였다. 또한, 전체 복합재 대차 모델과 서브모델의 경계면으로부터 변위결과를 보간 (cut-boundary interpolation)하여 수행하였다. 이때, 볼트 체결부 구조시험과 동일하게 볼트 체결력을 부여하였으며, 인서트 적용 유무에 따른 결과를 얻기 위해 인서트가 미적용된 경우와 단위 모듈 모델 해석을 통해 선정된 인서트가 적용된 경우에 대해 결과를 비교하였다. Fig. 7은 복합재 대

Table 1 The mechanical properties of materials

Properties		Glass/Epoxy composite	Foam core	Bolt
Elastic modulus (GPa)	E <sub>x</sub>	34.42	45×10 <sup>-5</sup>	205
	E <sub>y</sub>	13.19		
	E <sub>z</sub>	10.66		
Shear modulus (GPa)	G <sub>xy</sub>	7.05	-	-
	G <sub>yz</sub>	1.40		
	G <sub>zx</sub>	1.40		
Poisson's ratio	ν <sub>xy</sub>	0.24	0.32	0.3
	ν <sub>yz</sub>	0.24		
	ν <sub>xz</sub>	0.24		

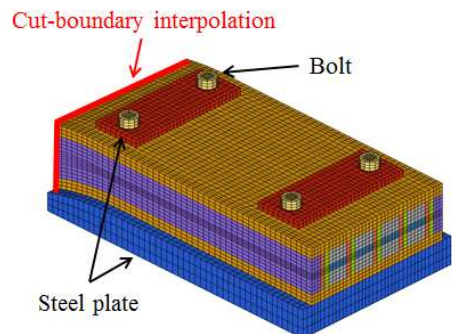
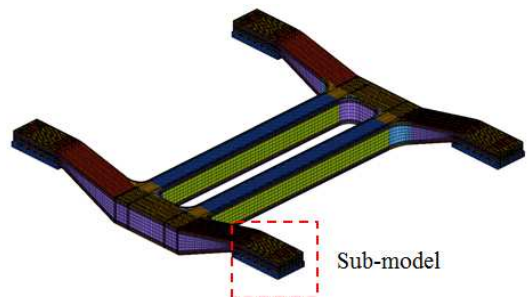


Fig. 7 Finite element sub-model of bolted joints

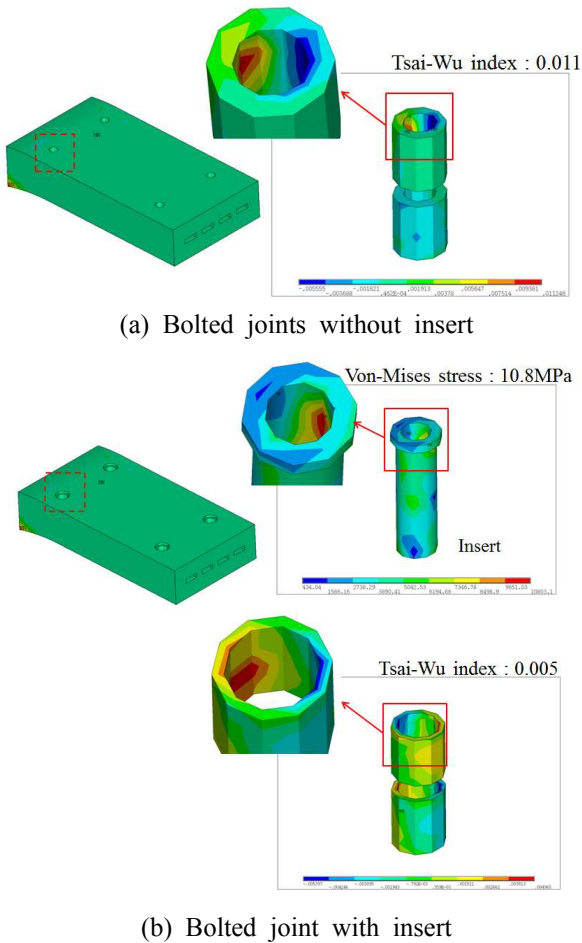


Fig. 8 The results of structural analysis for bolted joints

차프레임 볼트 체결부의 서브모델을 보여준다.

서브모델링기법을 이용한 볼트 체결부의 구조 해석은 복합재의 경우 Tsai-Wu 파손식<sup>(11)</sup>을 적용하여 구조 안전성을 검증하였으며, Tsai-Wu 파손식은 식 (1)과 같이 표현된다. 또한, 볼트 및 인서트의 경우에는 Von-Mises 응력을 통해 구조안전성을 평가하였다.

$$F_i + F_{ij}\sigma_i\sigma_j = 1 \quad (\text{where } i, j = 1 \dots 6) \quad (1)$$

여기서  $F_i$ 와  $F_{ij}$ 는 2차와 4차의 강도 텐서(strength tensor)이며,  $\sigma_i, \sigma_j$ 는 응력 텐서(stress tensor)이다. 식 (1)의 좌변은 Tsai-Wu 파손지수를 나타내며, 1보다 크거나 같으면 파손이 발생함을 의미하고, 1보다 작으면 구조물이 안전하다고 판단한다.

복합재 대차프레임의 볼트체결부 해석 결과 인서트가 미적용된 볼트 체결부의 경우에는 볼트 홀 주위에서 최대 0.011의 Tsai-Wu 파손지수가

발생하였으며, 인서트가 적용된 경우에는 볼트 홀 주위에서 최대 0.005의 Tsai-Wu 파손지수로 각각 수렴하였다. 이때, 인서트에서의 최대응력은 10.8MPa(항복강도기준 345MPa)로 구조적으로 안전함을 확인하였다.

복합재 대차의 운영 환경 하에서 볼트 체결부의 인서트 유무에 따른 복합재 부분의 응력 해석 결과, 인서트가 적용된 모델에서 약 50% 정도 Tsai-Wu 파손지수가 줄어들음을 확인하였다. 이에, 인서트가 적용된 볼트 체결부의 내구성이 상대적으로 우수할 것으로 판단된다. Fig. 8은 볼트 부분을 제외한 홀 주위 Tsai-Wu 파손지수 및 인서트 응력결과를 보여준다.

#### 4. 결론

복합재 대차프레임의 볼트 체결부 내구성 향상을 위한 인서트 형상에 대한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 복합재 대차프레임의 볼트 체결부 단위 모듈 시험편에 대한 체결부 시험을 통해 인서트 유무와 인서트의 나사산 유무에 따른 구조적 특성을 비교하였다. 이때, 체결부 주변의 복합재 파손형상 및 볼트의 파손을 고려할 때 나사산이 미적용된 인서트 형상이 구조적으로 가장 우수함을 확인하였다.

(2) 시험을 통해 도출된 인서트 형상을 복합재 대차프레임 모델에 적용하여 대차 프레임과 볼트 체결부의 구조 안전성을 해석적 방법으로 평가하였다. 이때, 대차 프레임은 JIS 규정에 따라 해석을 수행하여 구조적으로 안전함을 확인하였다. 볼트 체결부에 대한 구조안전성 평가는 전체 모델로 평가할 경우 상세응력결과를 얻기 어려워 서브모델링 기법을 이용하여, 인서트 유무에 따른 해석 결과를 비교하였다. 그 결과, 인서트가 적용된 모델의 볼트 홀 주변의 복합재에서 약 50% 정도 Tsai-Wu 파손지수가 감소하였다. 이는 상대적으로 인서트가 있는 경우, 복합재 체결부 내구성이 향상될 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 한국철도기술연구원의 지원으로 수행된 “복합소재 대차프레임의 볼트 체결부 내구성 향상을 위한 인서트 최적 설계 연구”의 위탁 과제 결과이며, 지원에 진심으로 감사드립니다.

참고문헌  
(References)

- (1) Jang, H. J., Shin, K. B., Ko, H. Y. and Ko, T. H., "A Study on the Standardized Finite Element Models for Carbody Structures of Railway Vehicle Made of Sandwich Composites," *Journal of The Korean Society for Railway*, Vol. 13, No. 4, pp. 382~388.
- (2) Leo, R. and Guenther, C., 1983, "New Technologies for Bogies Prototype of the First Fiber Composite Material(FVW) Bogies," *ZEV-Glas. Ann.*, Vol. 110, No. 6/7, pp. 193~202.
- (3) Maurin, L., Boussoir, J., Rougeault, S., Bugaud, M., Ferdinand, P., Landrot, A.G., Grunevald, Y. H. and Chauvin, T., "FBG-based Smart Composite Bogies for Railway Application," 2002, *Optical Fiber Sensor Conference Technical Digest conference*, Vol. 1, pp. 91~94.
- (4) Kim, J. S. and Yoon, H. J., 2011, "Structural Behaviors of a CFRP Composite Bogie Frame for Urban Subway Trains under Critical Load Conditions," *ICM11*, Vol. 10, pp. 2375~2380.
- (5) Lee, S. R., Lee, H. J., Han, S. W., Kim, J. Y., Cha, J. H., Kang, J. Y. and Park, C. K., 2000, "Fatigue Design and Fatigue Strength Evaluation of Bogie Frame," *Spring Conference of The Korean Society for Railway*, pp. 234~341.
- (6) Kim, S. Y., Kim, Y. S., Kwon, H. W., Choi, J. H., Koo, J. M. and Seok, C. S., 2010, "Prediction of Fatigue Life for Hole-notched Weave CFRP Plate," *Journal of The Korean Society for Composite Materials*, Vol. 23, No. 3, pp. 1~6.
- (7) Choi, J. M., Chun, H. J. and Byun, J. H., 2005, "Effect of Various Parameters on Stress Distribution Around Hole in Mechanically Fastened Composite Laminates," *Journal of The Korean Society for Composite Materials*, Vol. 18, No. 6, pp. 9~18.
- (8) ASTM International, 2005, Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates, ASTM D5961/D5961M.
- (9) Kim, J. H., Shin, K. B., Ko, H. Y. and Kim, J. S., 2010, "A Study on Optimum Design Analysis of Bolt Locations for Metal Joint Parts of Railway Composite Bogie Frames using Sub-modeling Method," *Journal of The Korean Society for Composite Materials*, Vol. 23, No. 6, pp. 19~25.
- (10) Japanese Industrial Standard(JIS), 2004, Truck Frames for Railway Rolling Stock General Rules for Design, JIS E 4207
- (11) Tsai, S. W. and Wu, E. M., 1971, "A General Theory of Strength for Anisotropic Materials," *Journal of Composite materials*, Vol. 5, No. 1, pp. 58~80.