

## ’10 추계학술대회 우수 논문

서브모델링 기법을 이용한 철도차량 복합재 대차프레임의  
금속재 체결부 볼트 위치 최적화 해석 연구김준환\*, 신광복<sup>\*\*\*</sup>, 고희영\*, 김정석<sup>\*\*\*</sup>A Study on Optimum Design Analysis of Bolt Locations for Metal Joint Parts of  
Railway Composite Bogie Frames using Sub-modeling MethodJun-Hwan Kim\*, Kwang-Bok Shin<sup>\*\*\*</sup>, Hee-Young Ko\*, and Jung-Seok Kim<sup>\*\*\*</sup>

## ABSTRACT

This paper describes the optimum design of bolt locations for metal joint parts of railway bogie frame made of glass fiber/epoxy 4-harness satin woven laminate composite and PVC foam core. The optimum design analysis was done by sub-problem approximation method using Ansys Parameter Design Language(APDL). The sub-modeling method was introduced to conduct the detailed recalculation for the only target parts and reduce calculating time. The structural analysis for composite bogie frame was performed according to JIS E 4207. The results showed that the optimum design analysis using sub-modeling method was able to obtain faster and more precise results than that of the entire model by the control of mesh size for the target parts, and the maximum Von-Mises stress has been reduced in comparison with its original dimensions due to the optimum design of bolt locations.

## 초 록

본 논문은 유리섬유/에폭시 4-매 주자직 적층 복합재와 PVC 폼 코어로 제작된 철도차량용 복합재 대차프레임의 금속재 체결부 볼트 위치 최적화 연구에 대해 서술했다. 최적화 해석은 APDL(Ansys Parameter Design Language)을 이용한 서브모델링 기법을 적용하였으며 부분문제 근사방법에 의한 최적화를 수행하였다. 이때, 최적화 해석에 적용된 서브모델링 기법은 관심영역을 포함한 부분모델에 대한 계산을 재수행 함으로써 해석에 소요되는 시간을 절약하고 상세한 결과를 도출 할 수 있다. 복합재 대차프레임의 구조해석은 JIS E 4207에 의거하여 수행하였다. 서브모델링 기법을 적용한 복합재 대차프레임의 최적화 해석은 전체모델에 대한 결과에 비해 요소망 밀도의 조절을 통한 해석시간 절약과 상세한 결과를 얻을 수 있으며, 또한 볼트위치의 최적화로 인해 보다 낮은 Von-Mises 응력값이 나타남을 확인하였다.

**Key Words :** 복합재 대차(Composite bogie), 최적화 설계(Optimum design), 서브모델링(Sub-modeling), 부분문제 근사법 (Sub-problem approximation method)

## 1. 서 론

앞으로 철도차량에서 복합재료의 활용은 차체 경량화에 따

른 열차 속도향상, 에너지 효율 그리고 피로내구성 향상 등의 효과로 구조재로서의 사용이 널리 증대되고 있는 추세이다[1]. 이에 국내의 경우 복합재를 차체에 적용한 틸팅열차(TTX), 자

접수: 2010년 11월 11일, 게재승인: 2010년 12월 8일 (추계학술대회 우수논문으로 무심사)

\* 국립한밭대학교 기계설계공학전공, 경량구조 및 CAE 실험실

<sup>\*\*\*</sup> 국립한밭대학교 기계설계공학전공 교수, 교신저자(E-mail: shin955@hanbat.ac.kr)

<sup>\*\*\*</sup> 한국철도기술연구원 책임연구원

동무인경전철(AGT), 바이모달 트램(Bimodal tram)이 개발되어 시험운행 중에 있다. 이처럼 복합재료를 차체에 적용한 연구 개발은 활발히 이루어지고 있으나, 철도차량에 큰 비중을 차지하는 대차프레임에 대한 경량화 연구는 미흡한 실정이다[2,3].

기존의 대차프레임을 구성하는 금속재(강재)를 복합재로 대체 할 경우 경량화 효과뿐만 아니라 승차감 향상, 소음 절감의 파급효과를 얻을 수 있다. 이에 국외의 경우 1990년대 후반부터 적층 복합재를 적용한 대차 경량화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 프랑스 알스톰(Alstom)의 TER 대차(TER bogie)와 유레카(EUREKA)의 EURO 대차(EURO bogie)에 적층 복합재 적용을 통한 경량화를 수행하였다. 이때, TER 대차의 경우 기존 금속재 대차프레임에 비해 22% 경량화 효과를 얻음을 확인하였다[4,5]. 그러나, 국내의 복합재 대차프레임에 대한 연구개발 실적은 미비한 상태이며, 이에 한국철도기술연구원에서는 도시철도차량용 대차프레임을 복합재로 적용한 경량 대차프레임에 대한 연구개발을 시작하게 되었다.

대차프레임은 철도차량의 차체를 지지하는 핵심 구조물로서 현수장치, 제동장치 및 동력전달 장치 등의 다양한 부품들이 연결되며, 차체와 승객하중에 의한 정적하중, 운행 중 발생하는 동하중 등의 하중을 받는다[6]. 이때, 대차프레임과 각 장치들이 연결되는 금속재 체결부는 구조적으로 취약하여 외부하중에 의한 파손이 빈번히 발생함에도 불구하고 금속재 체결부의 볼트위치 선정을 경험과 단순한 구조해석만으로 결정해 왔다. 또한, 기존 금속재 대차프레임과 달리 복합재가 적용된 대차프레임의 경우 볼트체결을 위하여 가공되는 원공부의 섬유불연속과 응력집중에 따른 파손이 발생하게 된다[7,8]. 이에, 새롭게 개발되는 복합재 대차프레임에 대해서는 금속재 체결부에 대한 설계 완성도와 구조적 안전성을 향상시키기 위해 기존에 경험적으로 사용된 체결부 볼트위치를 최적화 해석을 수행하여 최적의 볼트 위치를 선정하여 제시할 필요가 있다.

따라서, 본 논문에서는 복합재 대차프레임의 금속재 체결부에 대한 최적의 볼트위치를 선정하기 위해 APDL(Ansys Parameter Design Language)을 이용한 최적화 해석을 수행하였다. 하중조건은 JIS E 4207[9]에 따른 수직 및 전후하중을 적용하였으며, 체결부의 상세한 결과를 도출하기 위해 체결 볼트의 체결력(pre-tension)을 각각 고려하여 해석을 수행하였다. 이때, 전체모델에 대한 최적화 해석은 각각의 변수에 대해 해석을 수행하는데 많은 시간이 소요되므로 해석 시간 절약과 원하는 영역에 대한 상세 해석을 위해 서브모델링 기법(sub-modeling method)을 적용하여 수행하였다.

## 2. 도시철도차량용 복합재 대차프레임 구성

### 2.1 대차프레임의 구성

한국철도기술연구원에서 개발 중인 도시철도차량용 대차프레임은 차량의 하중을 지지하고 축상의 연결을 위한 사이드

빔(side beam)과 제동장치의 체결을 위한 크로스 빔(cross beam)으로 구성된다. 복합재 대차프레임의 사이드 빔과 크로스 빔의 내/외부 면재는 유리섬유/에폭시 4-매 주자직 적층 복합재(glass fiber/epoxy 4-harness woven laminate composite)가 적용되었으며, 차량의 하중을 직접적으로 지지하는 사이드 빔의 경우 수직방향의 강성을 확보하기 위하여 적층 복합재 리브(rib)와 보강재(reinforcement)를 추가하였다. 이때, 리브와 보강재 사이의 공간은 PVC 폼 코어(PVC foam core)를 적용하였다. Fig. 1은 복합재 대차프레임의 실제 제작형상을 나타낸다.

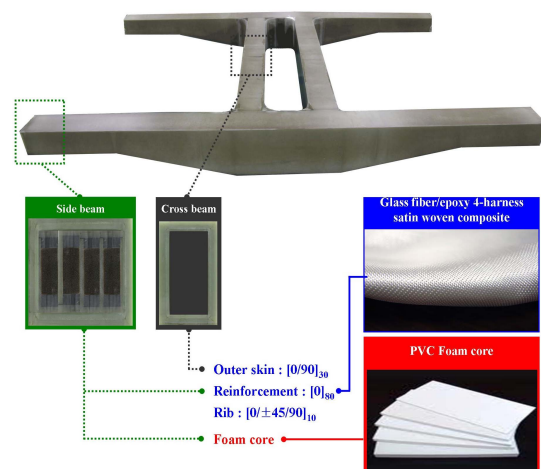


Fig. 1 The shape and material compositions of composite bogie frame.

### 2.2 대차프레임 적용 재료의 물성

복합재 대차프레임의 금속재 체결부 볼트위치 최적화 해석을 수행하기 위한 적용 재료의 기계적 물성은 시험을 통해 Table 1과 같이 구하였다.

Table 1 The mechanical properties of materials applied to the bogie frame

Properties		4-harness satin	Foam core	SKD11
Elastic modulus(GPa)	$E_x$	34.42	$45 \times 10^{-5}$	205
	$E_y$	13.19		
	$E_z$	10.66		
Shear modulus(GPa)	$G_{xy}$	7.05	-	-
	$G_{yz}$	1.40		
	$G_{xz}$	1.40		
Poisson's ratio	$V_{xy}$	0.24	0.32	0.3
	$V_{yz}$	0.24		
	$V_{xz}$	0.24		

대차프레임을 구성하는 재료는 유리섬유/에폭시 4-매 주자직 적층 복합재, PVC 폼 코어로 구분되며, 금속재 체결부에 적용된 재료는 구조용강인 SKD11을 적용하였다. 이때, 이방성 재료인 적층 복합재의 경우 인장(ASTM D 3039[10]), 압축

(ASTM D 3410[11]), 전단(ASTM D 5379[12]) 시험을 수행하였으며, PVC 폼 코어의 경우 압축(ASTM C 365[13])시험을 수행하였다. 금속재 재질인 SKD11의 기계적 물성은 참고 문헌[14]을 통하여 확인하였다.

### 3. 서브모델링 기법을 이용한 금속재 체결부의 최적화 해석

#### 3.1 최적화 해석 프로세스

복합재 대차프레임의 금속재 체결부에 대한 최적화 해석은 Fig. 2와 같은 프로세스에 의해 수행하였다.

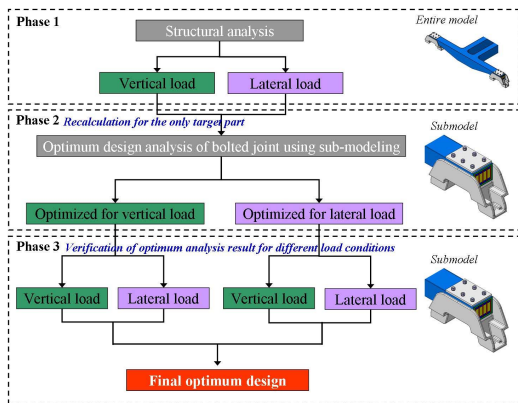


Fig. 2 The process of optimum design for composite bogies.

첫 번째 단계(phase 1)는 대차프레임 기본설계에 대한 구조 안전성 평가로써 JIS E 4207의 주운용하중조건인 수직 및 전후하중에 대한 구조해석을 수행한다. 두 번째 단계(phase 2)는 구조해석을 통하여 구조 안전성이 확인된 기본설계에 대해 최적화가 요구되는 볼트 체결부에 대해서만 서브모델링을 수행하고 부분문제 근사방법(sub-problem approximation method)을 통한 최적화 해석을 수행한다. 마지막 단계(phase 3)로써 수직 하중에 대한 볼트위치 최적화 해석 결과를 전후하중조건에 적용하고, 전후하중에 대한 볼트위치 최적화 해석 결과를 수직 하중조건에 적용함으로써 각각 하중조건의 최적화 해석 결과를 상호 검증하여 최적의 결과를 제시하게 된다. 이때, 모든 프로세스(phase 1~3)에서 Fig. 3과 같이 APDL 프로그램을 사용하여 해석별로 형상과 변수(경계 및 하중조건, 설계치수 등)의 변화를 자동적으로 반영도록 일괄코딩(batch coding) 하였다.

#### 3.2 대차프레임의 구조해석(Phase 1)

최적화 해석 전에 기본설계에 대한 대차프레임의 구조안전성은 미리 검증하여야 한다. 이에, 본 연구에서는 JIS E 4207

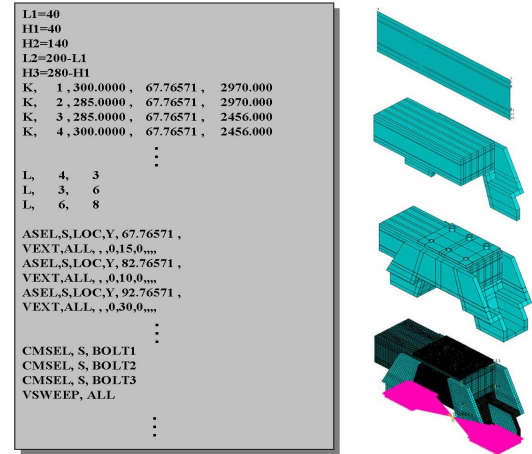


Fig. 3 The batch codes of optimum design analysis using APDL.

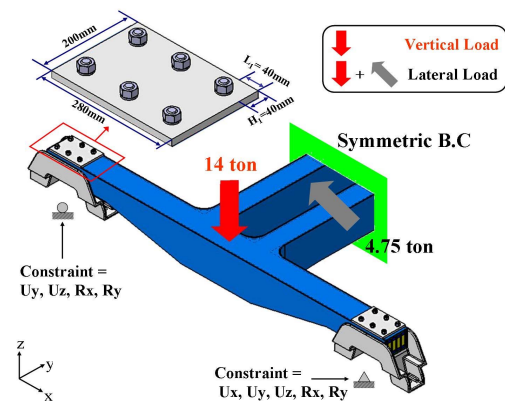


Fig. 4 Boundary and Load conditions for structural analysis.

에서 제시하는 주운용하중조건인 수직 및 전후하중에 대하여 구조해석을 수행하였다. 이때, 금속체결부의 볼트 위치는 기존 금속재 철도차량 대차프레임 설계에서 경험적으로 적용되고 있는 설계방법을 적용하였다. Fig. 4에서 보듯이 금속재 플레이트의 치수 기준점인 모서리로부터  $H_1=40\text{mm}$ ,  $L_1=40\text{mm}$ 가 되도록 하였으며, 각 볼트 사이의 간격은  $100\text{mm}$ 를 갖도록 하였다. 이때, 구조해석단계에서는 프로그램의 코딩 시간과 효율적인 계산 수행을 위해 볼트부와 금속재의 필렛 부분을 생략하였으나, 다른 주요부분을 모두 상세히 모델링하였다. 대차프레임의 유한요소 모델은 크로스 빔을 기준으로 좌우가 대칭임을 감안하여 1/2모델을 적용하였으며, 적층 복합재를 모사하기 위해 3차원 적층 솔리드 요소(3-D layered structure solid)와 폼 코어 및 금속재를 모사하기 위한 3차원 솔리드 요소(3-D structure solid)를 적용하였다. 유한요소 모델에 사용된 절점과 요소의 개수는 각각 1,916,093개와 1,720,708개이다. 이때, 각 접촉면에 마찰계수

가 고려된 접촉조건을 부여하였다. 대차프레임 체결부에 적용된 볼트는 M18의 육각볼트이며 식 (1)에 따라 계산된 체결력을 볼트 중앙부에 적용하였다.

$$N = \frac{T}{k \cdot d} \quad (1)$$

여기서, N은 체결력, k는 토크 계수, T는 토크, d는 볼트 호칭 직경을 나타낸다.

Fig. 4는 금속재 체결부를 포함한 대차프레임의 구조 안전성 평가를 위한 구속조건과 하중조건을 나타낸다.

**Table 2** Results of structural analysis for bogie frame according to JIS E 4207

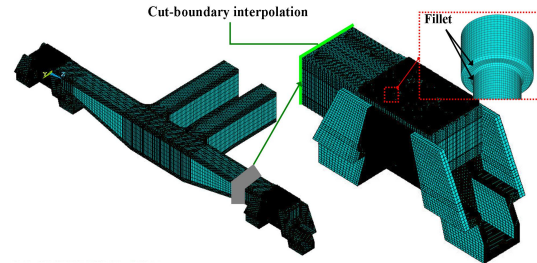
Load condition		Von-Mises stress(MPa)	Tsai-Wu failure index(Value)
Vertical load	*Bolt	988	-
	*Plate	591	-
	Composite	-	0.23
Lateral load	*Bolt	978	-
	*Plate	593	-
	Composite	-	0.29

\*Yield Strength : Bolt - 1,100MPa, Plate - 750MPa

Table 2는 각 하중조건에 따른 금속재 체결부를 포함한 대차프레임의 구조해석 결과를 나타낸다. 기본설계 모델의 구조해석 결과 각 하중조건에 따른 볼트와 금속재 플레이트의 Von-Mises 응력결과가 적용 소재의 허용응력 보다 낮게 나타남을 확인하였다. 또한, Tsai-Wu 파손 기준식[15]을 바탕으로 적용 복합재의 파손평가를 수행하였다. 각 하중조건에 따른 적용 복합재의 파손평가 결과 수직 및 전후하중에서 Tsai-Wu 파손평가 기준인 1보다 낮은 0.23과 0.29로 나타남을 확인하였다. 이에, 금속재 체결부를 포함한 대차프레임의 기중모델이 각 하중조건에 대하여 구조 안전성을 만족함을 확인하였다.

### 3.3 서브모델링 기법에 의한 볼트부 최적화 해석 (Phase 2)

일반적으로 대차프레임과 같이 요소수와 접촉면이 많은 대형구조물의 경우 해석에 소요 시간이 길어 전체 모델에 대한 최적화 해석은 비효율적인 방법이며, 관심부분에 대한 상세한 결과도출이 어려운 단점을 지닌다. 이에, 대형구조물의 경우 전체의 해석결과를 바탕으로 관심구간을 포함한 부분모델의 해석을 재수행하는 서브모델링 방법을 주로 사용하고 있다[16]. 이러한 서브모델링 기법은 Saint Venant의 이론[17]을 기반으로 전체모델 중 요구되는 부분만 따로 상세히 모델링하고 이미 해석한 전체 모델의 해석 결과를 경계조건으로 대입함으로써 관심부분의 상세한 결과를 얻을 수 있으며, 이를 통해 상대적으로 높은 효율로 정확한 해석을 수행



**Fig. 5** Sub-model for bolt joint parts.

할 수 있는 장점을 지닌다. 따라서, 본 연구에서는 대차프레임 금속재 체결부 볼트위치 최적화 해석 수행 시 상세한 결과 확인과 해석시간을 단축하기 위하여 서브모델링 기법을 이용하였다.

최적화 해석을 위한 서브모델의 경우 구조 안전성 평가 모델에서 생략된 볼트와 홀 부위의 필렛(fillet)을 고려하였으며, 정확한 결과를 도출하기 위해 요소망(mesh) 밀도를 조밀하게 적용하였다. 서브모델을 이용한 최적화 해석의 구속 및 하중조건은 구조해석 결과를 바탕으로 서브모델과 구조해석 모델의 경계면으로부터 변위결과를 보간(cut-boundary interpolation)하여 수행하였다. Fig. 5는 최적화 해석을 위한 볼트 체결부의 서브모델을 나타낸다.

#### 3.3.1. 부분문제 근사방법에 의한 최적화 해석

부분문제 근사방법은 도함수가 아닌 오직 종속변수의 값을 필요로 하는 영계법(zero-order method)의 발전된 형태로써 광범위 설계문제에 효과적으로 적용할 수 있는 일반적인 방법이다[18]. 또한, 부분문제 근사방법은 제약최적설계문제에 적합한 방법이며, 벌칙함수를 이용하여 제약조건을 비제약 조건으로 전환한다. 식 (2)는 제약조건 최적설계 문제를 나타내며, 식 (2)의 제약조건식을 벌칙함수를 이용하여 비제약 조건식으로 전환하면 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize} && \hat{f} = \hat{f}(x) \\
 & \text{Subject to} && \\
 & \underline{x}_i \leq x_i \leq \overline{x}_i && (i = 1, 2, 3, \dots, n) \\
 & \hat{g}_i(x) \leq \hat{g}_i + \alpha_i && (i = 1, 2, 3, \dots, m_1) \\
 & \underline{h}_i - \beta_i \leq \hat{h}_i(x) && (i = 1, 2, 3, \dots, m_2) \\
 & \underline{w}_i - \gamma_i \leq \hat{w}_i(x) \leq \overline{w}_i + \gamma_i && (i = 1, 2, 3, \dots, m_3) \\
 & \hat{\cdot} : \text{approximation function}
 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $f(x)$ 는 목적함수,  $x$ 는 설계변수,  $n$ 은 변수의 수를 나타내고,  $\hat{g}_i, \hat{h}_i, \hat{w}_i$ 는 각각 제약함수를 나타내고 있다. 또한,  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 는 오차를 나타낸다.

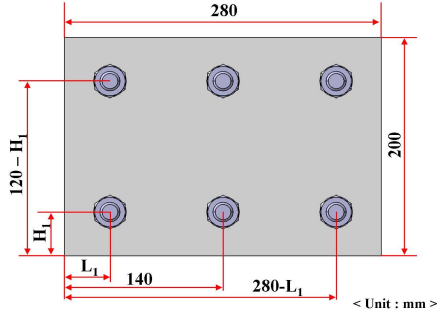


Fig. 6 Optimum design parameters of bolt location.

$$F(x, p_k) = \hat{f} + f_0 P_k \left[ \sum_{i=1}^n X(x_i) + \sum_{i=1}^{m_1} G(\hat{g}_i) + \sum_{i=1}^{m_2} H(\hat{h}_i) + \sum_{i=1}^{m_3} W(\hat{w}_i) \right] \quad (3)$$

여기서,  $X$ 는 설계변수 제약조건의 벌칙함수이고  $G, H, W$ 는 상태변수 제약조건의 벌칙함수이다. 또한,  $p_k$ 는 응답표면 계수(response surface parameter)를 의미한다.

부분문제 근사방법의 수렴은 목적함수 및 설계변수의 공차보다 작으면 만족한다. 이를 식으로 나타내면 식(4)와 같다.

$$\begin{aligned} |f^{(j)} - f^{(j-1)}| &\leq \tau \\ |f^{(j)} - f^{(b)}| &\leq \tau \\ |x_i^{(j)} - x_i^{(j-1)}| &\leq \rho_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \\ |x_i^{(j)} - x_i^{(b)}| &\leq \rho_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $\tau$ 와  $\rho$ 는 각각 최적화 해석의 목적함수와 설계변수의 공차를 의미한다.

### 3.3.2 주운용하중별 볼트위치 최적화 해석

복합재 대차프레임의 금속재 체결부 볼트위치 최적화 해석을 위한 설계변수는 기준점인 금속재 플레이트의 모서리로부터 볼트 중심의 수직 길이( $H_1$ )와 볼트 중심까지의 수평 길이( $L_1$ )로 선정하였다. 이때, 볼트가 사이드 빔의 리브와 리브 사이의 구간에서만 변화가 가능하도록  $H_1$ 의 허용범위를 정하였고,  $L_1$ 의 허용범위는  $\pm 10\text{mm}$ 로 정하였다. 이때, 최적화 해석의 목적함수는 구조 안전성 평가에서 재료의 허용응력에 근접한 볼트와 금속재 플레이트의 Von-Mises 응력을 최소화하도록 선정하였다. 대차프레임의 금속재 체결부 볼트위치 최적화 문제를 정식화하여 나타내면 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \text{Find}[X] & \quad (L_1, H_1) \\ \text{Minimize} & \quad \text{Von-Mises stress of bolt and plate} \end{aligned}$$

$$\text{Subject to} \quad S_{\max} \leq \text{Yield stress} \quad (5)$$

$$\text{Constraint} \quad 30\text{mm} \leq L_1 \leq 40\text{mm}$$

$$\text{Constraint} \quad 37\text{mm} \leq H_1 \leq 43\text{mm}$$

대차프레임 금속재 체결부 볼트위치 최적화 해석은 기본 설계를 바탕으로 12번의 반복 해석을 수행하고 최적의 볼트 위치를 도출하였다.

Fig. 6은 금속재 체결부 볼트위치 최적화를 위한 설계변수를 보여준다.

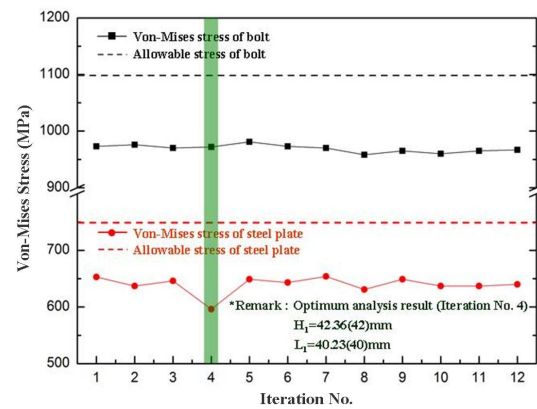


Fig. 7 Results of optimum design analysis under vertical load condition.

Fig. 7은 수직하중에 의한 체결부 볼트위치 최적화 해석 결과를 나타낸다. 수직하중에 의한 볼트위치 최적화 해석결과 볼트부에 발생하는 Von-Mises 응력이 8번째 단계에서 958MPa로 가장 작게 나타났고, 금속재 플레이트의 경우 4번째 단계에서 596MPa로 가장 작았다. 이때, 목적함수인 볼트와 금속재 플레이트의 Von-Mises 응력을 동시에 고려한 경우 4번째 단계에서 높은 감소폭을 나타냄에 따라 이를 수직하중에 의한 최적화 해석 결과로 선정하였다. 수직하중에 의한 최적화 볼트위치는  $L_1=42.36(42)\text{mm}$ ,  $H_1=40.23(40)\text{mm}$ 임을 확인하였다.

Fig. 8은 전후하중에 의한 볼트위치 최적화 해석결과를 나타낸다. 전후하중의 최적화 해석결과는 11번째 단계에서 볼트에 발생하는 Von-Mises 응력이 960MPa로 최소가 되었고, 금속재 플레이트의 경우 수직하중과 동일한 4번째 단계에서 596MPa로 최소가 됨을 확인하였다. 전후하중 최적화 해석결과 볼트와 금속재 플레이트의 Von-Mises 응력을 동시에 고려하여 4번째 단계의 결과를 최적화 볼트위치로 선정하였으며, 이는 수직하중과 동일한  $L_1=42.36(42)\text{mm}$ ,  $H_1=40.23(40)\text{mm}$ 의 치수를 확인하였다.

수직 및 전후하중에 의한 최적화 해석결과 구조해석에 사용된 기준모델과 동일한 볼트위치를 갖는 1번째 단계의 결과에 비해 최적화 해석 수행에 따른 결과인 4번째 단계에서 금속재



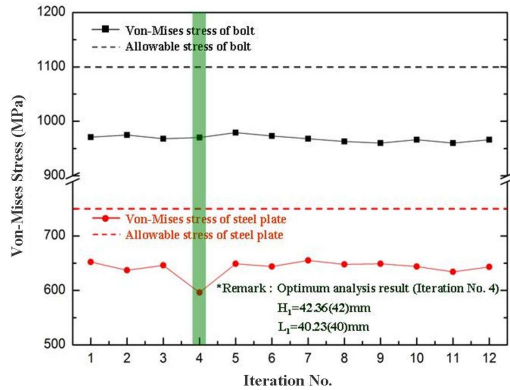


Fig. 8 Results of optimum design analysis under lateral load condition.

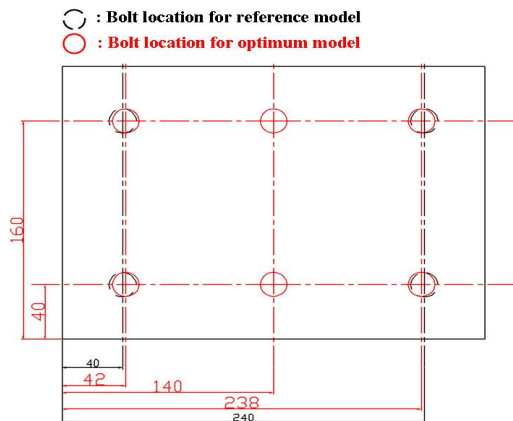


Fig. 9 The optimized bolt locations of metal joint parts.

플레이트에 발생하는 Von-Mises 응력이 최대 8.9% 감소함을 확인하였다. 이러한, 대차프레임 금속재 체결부의 응력감소는 기준모델에 비해 보다 높은 수준의 구조적 안전성을 확보하고 기존의 체결부 볼트위치 설계방법인 경험적 설계와 달리 이론적인 접근을 통하여 설계 완성도를 높일 수 있다.

### 3.4 최적설계 제시(Phase 3)

최적화 해석 프로세스의 마지막 단계(phase 3)인 최적설계 제시는 최적화 해석을 통하여 도출된 모델을 바탕으로 타 하중조건에 대한 구조해석을 수행하고 이를 비교 검증함으로써 최적의 형상을 제시하는 단계이다. 이러한, 최적설계 제시는 하중조건 변화에 따른 각기 다른 최적화 결과를 갖는 구조물의 설계 완성도를 높이고 보다 적합한 최적설계 모델을 제시하기 위하여 반드시 필요한 과정이다.

본 연구에서는 주운용하중조건인 수직 및 전후하중에 대한 볼트 위치 최적화 해석 결과가 동일한 결과를 나타남에 따라 서로 다른 하중조건에 대한 상호 검증 과정은 생략하였

다. 그러나, 대차프레임의 형상, 적용소재, 복합재의 적층순서가 수정되거나 추가적인 하중조건(비틀림하중, 좌우하중, 제동력하중 등)을 고려할 경우 볼트위치의 최적화 결과가 조건별로 다를 수 있으므로, 이럴 경우에는 반드시 상호검증을 통해 최종의 최적설계안을 제시해주어야 한다.

Fig. 9는 수직 및 전후하중조건에 대한 최적화 해석을 통하여 도출된 최종의 볼트위치 최적설계 모델을 나타낸다. 이때, 수직 및 전후하중에 의한 최적화 해석 결과 모델의 볼트위치는 각각  $L_1=42.36\text{mm}$ ,  $H_1=40.23\text{mm}$ 이나, 제작성 및 경제적인 설계를 반영하기 위해 설계치수를  $L_1=42\text{mm}$ 와  $H_1=40\text{mm}$ 로 선정하였다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 금속재 체결부를 갖는 복합재 대차프레임의 볼트위치 최적화 해석을 수행하고 이를 바탕으로 최적설계 모델을 제시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 대차프레임 금속재 체결부 볼트위치 최적설계 제시를 위하여 최적화 해석 프로세스에 따른 구조 안전성 평가와 최적화 해석을 수행하였다. 이때, 모든 해석은 APDL 프로그램 언어를 사용하여 대차의 형상과 설계변수(경계 및 하중조건, 설계치수 등)의 변화를 자동적으로 반영하는 일괄 코딩(batch coding)을 수행하였다.
- 2) 복합재 대차프레임의 기준모델에 대한 주운용하중조건(JIS E 4207)에 따른 구조해석을 수행하고 구조적 안전성을 평가하였다. 이때, 각 하중조건에 따른 해석결과가 구조적 안전성을 만족함을 확인하였다.
- 3) 대차프레임 금속재 체결부 볼트위치 최적화는 부분문제 근사방법을 적용하였으며, 또한 서브모델링 기법을 이용한 해석을 통하여 관심영역에 대한 결과값을 보다 빠르고 정확하게 얻을 수 있었다. 또한, 이 방법은 기존의 설계방법인 경험적 설계와 달리 이론적인 접근을 통하여 복합재 대차프레임의 설계 완성도를 높이는데 기여하였다고 판단된다.
- 4) 본 연구에서 제시한 서브모델링 기법을 이용한 최적화 해석방법은 적용대상과 관심영역에 제한이 없어 다양한 구조물에 쉽게 적용하여 공학설계 수준향상에 기여할 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 산업기술연구회에서 지원한 일반연구사업 “복합소재의 철도차량 적용에 관한 연구”가 지원한 연구과제로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) K. B. Shin, J. Y. Lee, and S. J. Lee, "A Study on Low-velocity Impact Characterization of Various Sandwich Panels for the Korean Low Floor Bus Application," *Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 31, No. 4, 2007, pp. 506-516.
- 2) J. S. Kim, H. J. Yoon and K. B. Shin, "Design of a Composite Side Beam for the Railway Bogie Frame," *The 7th Pacific Rim International Conference(PRICM7)*, 2010, pp. 2676-2679.
- 3) B. H. Park, N. P. Kim, J. S. Kim, K. Y. Lee, "Bogie Frame Design Considering Fatigue Strength and Minimize Weight," *Autumn Conference of The Korean Society for Railway*, 2004, pp. 131-136.
- 4) 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," *Optical Fiber Sensor Conference Technical Digest conference*, Vol. 1, 2002, pp. 91-94.
- 5) J.P. Hou, J.Y. Cherruault, I. Nairne, G.Jeronimidis and R.M. Mayer, "Evolution of the eye-end design of a composite leaf spring for heavy axle load," *Composite Structure*, 2007, Vol. 78, pp. 351-358.
- 6) S. R. Lee, H. J. Lee, S. W. Han, J. Y. Kim, J. H. Cha, J. Y. Kang and C. K. Park, "Fatigue Design and Fatigue Strength Evaluation of Bogie Frame," *Spring conference of The Korean Society for Railway*, 2000, pp. 234-341.
- 7) S. Y. Kim, Y.S. Kim, H.W. Kwon, J.H. Choi, J.M. Koo and C.S. Seok, "Prediction of Fatigue Life for Hole-notched Weave CFRP Plate," *Journal of Korean Society for Composite Materials*, 2010, Vol. 23, No. 3, pp. 1-6.
- 8) J. M. Choi, H.J. Chun and J.H. Byun, "Effect of Various Parameters on Stress Distribution around Hole in Mechanically Fastened Composite Laminates," *Journal of Korean Society for Composite Materials*, 2005, Vol. 18, No. 6, 2005, pp. 9-18.
- 9) Japanese Industrial Standard (JIS) E 4207 : Truck Frames for Railway Rolling Stock General Rules for Design.
- 10) ASTM D3039 : Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
- 11) ASTM D3410 : Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading.
- 12) ASTM D5379 : Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method.
- 13) ASTM C396 : 76 Method of Test for Compressive Strength of Chemically Setting Silicate and Silica Chemical-Resistant Mortars.
- 14) C.E. Becze, M.A. Elbestawi, "A chip formation based analytic force model for oblique cutting," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, Vol. 42, pp. 529-538.
- 15) S.W. Tsai, E.M. Wu, "A General Theory of Strength for An-isotropic Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 5, 1971, pp. 58-80.
- 16) T.W. Kim, G.M. Lee, W.S. Choi, K.H. Jeong, K.K. Kim and J.I. Kim, "Application of Submodel Method for the Structural Analysis of Integral Reactor Internal," *Transaction of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*, 2005.
- 17) de Saint-Venant, A.J.C.B., "Me'moire sur la Flexion des Prismes," *J. de Mathematiques de Liouville Ser. II* 1, 1856, pp. 87-189.
- 18) ANSYS Training Manual 12.0, 2009.