

경량 복합재 대차프레임의 피로수명 및 강도 평가

전광우* · 신광복*† · 김정석**

* 한밭대학교 기계설계공학과, ** 한국철도기술연구원 구조연구실

An Evaluation of Fatigue Life and Strength of Lightweight Bogie Frame Made of Laminate Composites

Kwang Woo Jeon*, Kwang Bok Shin*† and Jung Seok Kim**

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

** Dept. of Railway Structure Research, Korea Railway Research Institute

(Received December 27, 2010 ; Revised May 31, 2011 ; Accepted July 12, 2011)

Key Words: 4-Harness Satin Woven Laminate Composite(4-매 주자직 적층 복합재), Composite Bogie Frame(복합재 대차프레임), Fatigue Strength(피로강도), Fatigue Life(피로수명)

초록: 본 논문은 4-매 주자직 유리섬유/에폭시 적층 복합재가 적용된 철도차량 경량 대차프레임의 피로수명 및 강도 평가에 대해 기술한다. 대차프레임 경량화 재질로 적용된 유리섬유/에폭시 4-매 주자직 적층 복합재료의 피로특성 평가를 위하여 경사, 위사 그리고 0°/90° 방향으로 적층된 시험편에 대하여 인장-압축 피로시험을 수행하였다. 유리섬유/에폭시 4-매 주자직 적층 복합재료의 피로시험은 5Hz의 주파수, -1의 응력비(R), 10⁷의 피로수명을 갖도록 하였다. 또한, JIS E 4207의 하중조건에 따른 대차프레임의 피로강도 평가를 Goodman 선도를 통하여 수행하였다. 유리섬유/에폭시 적층 복합재 경량 대차프레임의 피로수명 및 강도 평가기준을 만족하였으며, 무게를 고려할 경우 기존 대차프레임 재질인 SM490A 금속재에 비하여 우수한 피로특성을 갖는다.

Abstract: We describe the evaluation of the fatigue life and strength of a lightweight railway bogie frame made of glass fiber/epoxy 4-harness satin-woven composites. To obtain the S-N curve for the evaluation of the fatigue characteristics of the composite bogie frame, we performed a tension-compression fatigue test for composite specimens with different stacking sequences of the warp direction, fill direction, and 0°/90° direction. We used a stress ratio (R) of -1, a frequency of 5 Hz, and an endurance limit of 10⁷. The fatigue strength of the composite bogie frame was evaluated by a Goodman diagram according to JIS E 4207. The results show that the fatigue life and strength of the lightweight composite bogie satisfy the requirements of JIS E 4207. Given its weight, its performance was better than that of a conventional metal bogie frame based on an SM490A steel material.

1. 서론

최근 자가 차량 증가에 따른 교통혼잡과 대기오염이 심각한 문제로 대두됨에 따라 이를 해결하기 위한 지상운송 수단인 철도차량의 관심이 증대되고 있는 실정이다. 철도차량은 지상운송 수단 중 높은 단위 수송능력과 에너지 효율의 이점을 갖는 친환경적 운송수단으로 알려져 있으며, 이러한 이점을 극대화하기 위한 설계 개선이 지속적으로 수행되고 있다. 특히, 철도차량의 경

량화는 속도의 향상, 유효탑재량 증가, 승차감 개선의 파급효과를 가지므로 설계단계에 있어 필수적인 요구 사항으로 인식되고 있다.^(1,2) 철도차량의 보편적인 경량화 방법으로는 최적화 설계와 소재 대체를 통한 경량화가 있으며, 기존의 최적화 설계의 경우 제한된 경량화 효과를 얻는 반면, 소재 대체를 통한 경량화는 높은 무게절감을 기대할 수 있다.⁽³⁾ 최근 철도차량의 경량화는 기존 차량 적용 소재를 보다 가벼운 소재로 대체하는 경량화 연구가 활발히 진행되고 있다.

최근 각광받는 철도차량의 경량화 소재인 복합재(composite)는 전통적인 차량 소재인 강재(steel)

† Corresponding Author, shin955@hanbat.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

와 알루미늄(aluminum)에 비하여 높은 비강성 및 비강도 특성을 가지고 있어 그의 사용이 점차 확대되고 있다.⁽⁴⁾ 철도차량의 복합재 적용은 과거 내장재, 전두부 등과 같이 직접적인 하중을 받지 않는 2차 부재에 제한적으로 사용되어 왔으나 1990년대 이후 루프(roof), 사이드 구조(side structure), 차체(carbody)와 같이 하중을 직접 지지하는 1차 부재까지 확대 적용되었다. 이에, 국내의 경우 바이모달 트램(bi-modal tram), 틸팅열차(TTX), 자동무인경전철(AGT) 등의 차체에 복합재를 적용한 3세대 철도차량으로 개발되어 시험운행 중에 있다.⁽⁵⁻⁷⁾

그러나 철도차량 중량 중 많은 부분을 차지하는 대차프레임은 복합재 적용을 통한 경량화 효과가 높음에도 불구하고 보수적인 설계로 인해 적용사례가 드문 실정이다. 국외의 경우 2001년도에 프랑스의 알스톰(Alstom)에서 개발된 200km/h급 TER 대차(TER bogie)에 부분적으로 복합재가 적용된 사례가 있으나, 국내의 경우는 복합재 적용을 통한 대차프레임의 경량화 연구가 전무한 실정이다.⁽⁸⁾ 이에, 현재 한국철도기술연구원은 철도차량의 경량화 효과를 극대화하기 위하여 대차프레임에 적층 복합재를 적용한 도시철도차량용 경량 대차프레임에 대한 연구 개발이 수행되고 있다.

일반적으로 대차프레임은 차체와 승객하중을 지지하는 핵심 구조물로 25년 이상의 긴 수명이 요구되고 있다. 이러한 대차프레임은 장시간 운행에 따른 차체의 진동과 휠셋의 상호작용에 의한 동적하중을 받게됨에 따라 피로파손이 주로 발생하게 된다.⁽⁹⁾ 이에, 대차프레임의 경우 개발 단계에서 적용 재료에 대한 피로특성 평가와 대차프레임의 피로강도 평가가 정밀하게 이루어져야 한다. 특히, 금속재의 피로파손과 달리 피로과정에서의 강성저하와 반복하중에 의한 잔류강도 저하가 발생하는 복합재료의 경우 설계단계에서 소재의 특성과 구조물에 미칠 영향을 분석하고 안전성을 확보하여야 한다.⁽¹⁰⁾

따라서, 본 연구에서는 현재 한국철도기술연구원에서 연구 개발중인 도시철도차량용 경량 대차프레임의 피로안전성 확보를 위하여 적용 소재인 유리섬유/에폭시 4-매 주자직 적층 복합재의 인장-압축 피로시험을 수행하고 각 방향에 따른 Goodman 선도들을 도출하였으며, 이를 바탕으로

복합재 적용 경량 대차프레임의 피로강도평가를 JIS E 4207⁽¹¹⁾에 의거하여 수행하였다.

2. 대차프레임의 구성 및 적용 복합재의 피로평가

2.1 복합재 대차프레임의 구성과 제작

현재 한국철도기술연구원에서 개발중인 도시철도차량용 대차프레임의 경량화 소재로 유리섬유/에폭시 4-매 주자직 적층 복합재(glass fiber/epoxy 4-harness satin woven laminate composite)가 적용되었다. 유리섬유/에폭시 4-매 주자직 적층 복합재는 경사(warp)와 위사(fill)가 4회를 주기로 반복되는 형태로서 경사방향의 높은 기계적 특성을 갖으며, 단일방향 적층 복합재에 비하여 우수한 평면 특성을 갖는 이방성 재료이다. 이러한 4-매 주자직 적층 복합재는 설계자의 요구 조건에 따라 적층방향의 선택을 통하여 구조물에 강성 및 강도의 조절이 가능하며 일체성형에 따른 기존 금속재 대차프레임이 갖는 용접부의 물성저하가 발생하지 않는 이점을 가지므로 대차프레임에 소재로 선택하였다.

대차프레임의 구성은 차량과 승객하중을 지지하고 축상을 연결하기 위한 사이드 빔(side beam)과 제동장치와 체결되는 크로스 빔(cross beam)으로 구분된다. 이때, 차체와 승객하중을 직접적으로 지지하는 대차프레임의 주 구조물(main structure)인 사이드 빔의 경우 충분한 강성과 강도를 확보하기 위하여 적층 복합재 리브(rib)와 보강재(reinforcement)를 하중의 수직방향으로 추가하였다. 또한, 대차프레임을 구성하는 각각의 사이드 빔과 크로스 빔의 내부는 PVC 폼 코어 적용을 통하여 구조물의 굽힘강성이 향상되도록 하였다. Fig. 1은 적층 복합재 적용 경량 대차프레임의 설계 개념도를 보여준다.

대차프레임의 제작은 사이드 빔과 크로스 빔을 각각 제작하고 이를 결합하는 방법으로 수행되었다.⁽¹²⁾ 적층 복합재가 적용된 대차프레임의 각 부분은 유리섬유/에폭시 4-매 주자직 프리프레그(prepreg)를 설계된 치수에 맞게 적층하고 일정한 온도와 압력의 이력곡선을 갖는 오토클레이브(autoclave)공법을 통하여 성형하였다. 이때, 사이드 빔과 크로스 빔의 내부 면재와 보강재의 경우 구조물의 강성과 강도를 높이기 위하여 프레임의 길이방향과 경사방향이 동일한 각도를 갖도록 적

층하였으며, 외부 면재는 균형적인 평면특성을 얻기 위하여 경사방향이 적층 층에 따라 수직하게 교차된 형태로 적용하여 0°/90° 방향을 갖도록 하였다. Fig. 2는 오토클레이브를 이용한 복합재 적용 대차프레임의 제작과정을 보여준다.

2.2 대차프레임 적용 복합재의 피로시험

대차프레임에 적용된 경량화 소재인 유리섬유/에폭시 4-매 주자직 적층 복합재료의 피로특성을 확인하기 위해 피로시험을 수행하였다. 대차프레임과 같이 인장-압축의 교번하중(alternating load)이 반복되는 구조물에 적층 복합재를 적용할 경

우 압축 하중에 의한 균열열림현상(crack-tip open)과 층간분리(delamination)가 발생함에 따라 금속재와는 달리 인장-인장 피로수명에 비해 인장-압축 피로수명이 낮은 경향을 나타내게 된다.⁽¹³⁾ 이에, 대차프레임에 적용된 적층 복합재의 피로시험은 인장과 압축 하중이 반복되는 응력비($R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$) -1로 수행하였으며, 시험 주파수는 반복 하중에 의한 시험편 내부의 온도상승을 무시할 수 있는 5Hz로 선정하였다.⁽¹⁴⁾ 유리섬유/에폭시 4-매 주자직 적층 복합재의 인장-압축 피로시험을 위한 파손강도(S_u)는 인장과 압축의 기계적 물성 시험을 통해 확인하였다. 적층 복합재의 기계적 물성시험은 ASTM D 3039, ASTM D 3410의 규정에 의거하여 수행하였으며, 기계적 물성 시험을 통해 얻은 파손강도를 기준으로 65~20% 범위 내에서 피로 하중단계를 선정하고 하중단계 별 5개의 시험편에 대하여 피로시험을 수행하였다.

이때, 일반적으로 대차프레임 적용 소재의 피로한도는 2×10^6 으로 규정하고 있으나 운행시간을 고려하여 본 연구에서는 10^7 으로 선정하였으며, 각 방향에 따른 적층 복합재의 피로특성을 평가하기 위해 경사, 위사 그리고 0°/90° 방향으로 구분하여 피로시험을 수행하였다.⁽¹⁵⁾ 또한, 인장-압축 피로시험 시 압축하중에 의한 시험편의 좌굴(buckling)을 방지하기 위하여 Curtis⁽¹⁶⁾가 제안한 좌굴방지지지(anti-buckling jig)를 인장-압축 피로시험에 적용하였다. 이때, 제안한 좌굴방지지지(anti-buckling jig)는 시험편의 고정과 하중에 의한 유격을 방지하기 위해 스페이서(spacer)와 시험편의 탭(tab)을 이용하였

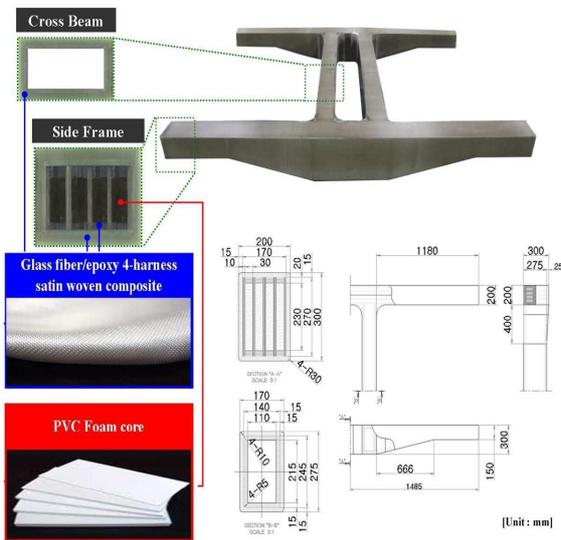


Fig. 1 Desing and manufacturing concept of composite bogie frame

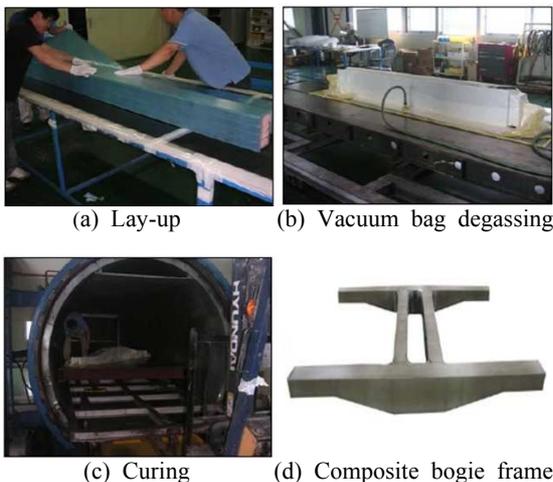


Fig. 2 Manufacturing procedures of composite bogie frame using autoclave

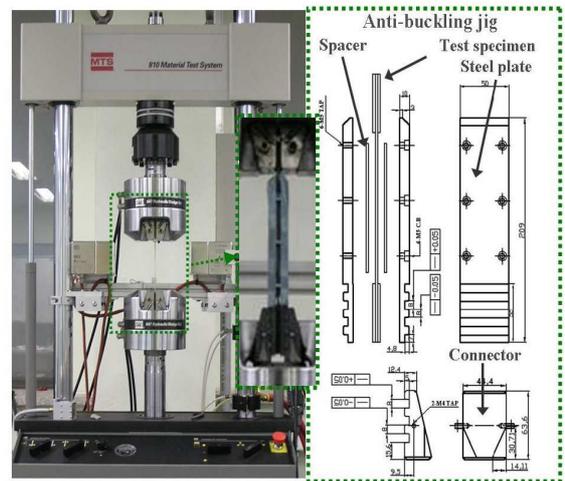


Fig. 3 The fatigue test machine and anti-buckling jig

으나 시험기기 치부에 따른 각 부분의 간섭이 발생 할 수 있는 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 각 시편의 상단, 중앙 그리고 하단의 별도의 지지핀을 추가하여 간섭과 유격을 최소화하고 시편과의 접촉면에 널링(knurling)가공을 통하여 미끌림 현상을 방지하였다. Fig. 3은 대차프레임 적용 적층 복합재의 인장-압축 피로시험과 좌굴방지지지그를 보여준다.

2.3 대차프레임의 적용 복합재의 피로특성

Fig. 4는 대차프레임 적용 소재인 유리섬유/에폭시 4-매 주자직 적층 복합재의 인장-압축 피로 시험을 통하여 얻은 S-N 선도를 최대응력에 대하여 나타낸 것이다. 이때, 전통적인 대차프레임 소재인 SM490A와 피로특성을 비교 평가하였다. 적층 복합재의 피로시험은 각 방향에 따라 다른 피로특성을 가지므로 경사, 위사 그리고 0°/90° 방향에 따라 각각 수행하였다. 이때, 적층 복합재의 피로한도인 10⁷ 사이클에서의 최대응력이 경사방향으로는 141.4MPa, 위사방향으로는 21.4MPa 그리고 0°/90°방향으로는 89.3MPa로 나타남을 확인하였다. 또한, 경사방향 적층 복합재에서 각 하중단계의 피로수명이 전통적인 대차프레임 소재인 SM490A와 비슷한 결과를 보였으나, 무게를 고려할 경우 적층 복합재의 피로특성이 금속재에 비해 다소 우수한 것으로 판단된다.

또한, 금속재 대차프레임의 경우 제작 시 판재를 용접한 형태로 프레임을 구성하게 되며, 용접 가공 시 발생하는 열에 의한 변형 및 잔류응력으로 인한 피로강도가 나타난다. 이에, 금속재 대차프레임 피로강도 평가는 용접부와 모재부로 나누어 평가하게 된다. 도시철도차량 대차프레임의 평가기준인 JIS E 4207에서 제시된 SM490A의 피로강도 값이 모재부가 155MPa이고, 그라인딩 처리된 용접부에서는 110MPa 그리고 그라인딩 처리되지 않은 용접부에서는 70MPa로 규정하고 있다. 반면, 적층 복합재의 경우 일체성형이 가능하여 용접등에 의한 피로특성 저하가 발생하지 않음으로 경사방향과 0°/90° 방향에서 SM490A 금속재 용접부의 피로강도 값에 비해 높아 우수한 피로 특성을 갖는 것으로 확인되었다.

Fig. 5는 각 방향에 따른 적층 복합재의 S-N 선도를 바탕으로 도출된 Goodman 선도를 나타낸다. 이때, 적층 복합재의 각 방향 Goodman 선도

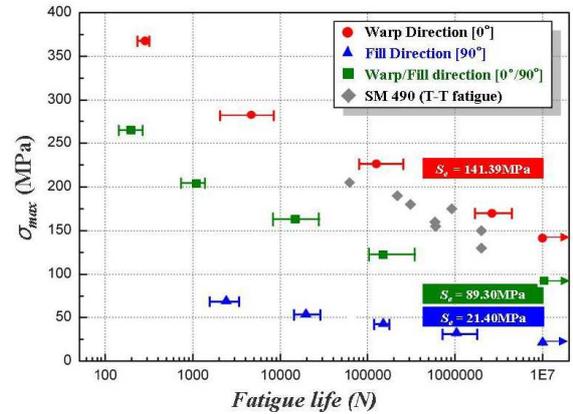


Fig. 4 Maximum stress vs fatigue life for glass fiber/epoxy 4-harness satin woven laminate composite

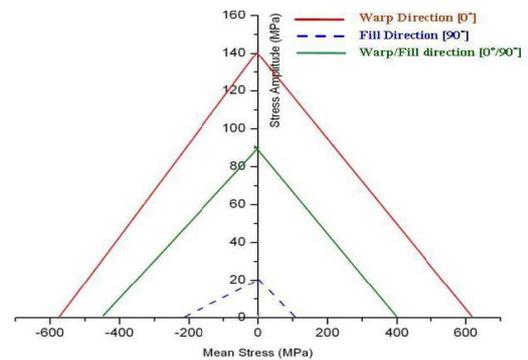


Fig. 5 Goodman diagram for glass fiber/epoxy 4-harness satin woven laminate composite

는 식 (1)에 의해 얻었으며, 평균응력(σ_m)은 식 (2), 응력진폭(σ_a)은 식 (3)에 의해 각각 도출되었다.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1 \tag{1}$$

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{max} + \sigma_{min})}{2} \tag{2}$$

$$\sigma_a = \frac{(\sigma_{max} - \sigma_{min})}{2} \tag{3}$$

여기서, σ_{max} 와 σ_{min} 는 각각 최대 및 최소응력을 의미하며, S_u 는 소재의 파손강도, S_e 는 피로한도에서의 응력결과를 의미한다.

각 방향에 따른 적층 복합재의 Goodman 선도의 경우 기계적 특성과 피로한도에서의 강도값이

뛰어난 경사방향 적층 복합재에서 가장 넓은 무한수명 영역을 나타내었으며, 0°/90°과 위사방향의 경우 경사방향에 비하여 비교적 적은 무한수명 영역을 갖음을 확인하였다.

3. 대차프레임의 피로수명 및 강도평가

일반적으로 대차프레임의 설계 규정은 KS R 9210, JIS E 4207/4208, UIC 515/615-4등에 의거하여 수행된다. 철도차량용 대차프레임의 피로강도 평가는 JIS E 4207과 UIC 614-4에서 제시하는 조합하중에 의한 피로강도 평가를 주로 수행하였으나, 최근에는 보다 넓은 범위의 하중조건을 포함하고 있는 EN 13749에 의한 피로강도 평가 또한 수행되고 있다. 그러나, 본 연구에서 개발된 경량 대차프레임은 기존 도시철도차량 대차프레임과 피로수명 및 강도를 비교하기 위해 JIS E 4207에 의거하여 피로강도 평가를 수행하였다. 경량 대차프레임의 피로강도 평가는 수직, 좌우, 비틀림, 제동력 하중 등에 의한 정적 구조해석을 수행하고 응력결과를 바탕으로 조합하중에 의한 피로응력으로 나타낸다. 이때, JIS E 4207는 등방성 금속재 대차프레임의 피로평가 방법으로서 각 방향에 따른 피로강도 평가를 고려하지 않는다. 따라서, 이방성 적층 복합재가 적용된 대차프레임의 경우 각 방향에 따른 응력결과를 바탕으로 피로강도 평가가 수행되어야 한다. 이에, 본 연구에서는 각 하중조건에 의한 응력결과를 바탕으로 위사, 경사방향 응력과 주응력으로 구분하고 이를 조합하중에 의한 피로응력으로 나타내어 피로수명 및 강도 평가를 수행하였다.

3.1 대차프레임의 정적 하중에 의한 구조해석

적층 복합재 적용 경량 대차프레임의 정적 구조해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 Ansys v11.0을 이용하였다. 유한요소 모델은 유리섬유/에폭시 4-매 주사직 복합재가 적용된 내/외부 면재, 리브 그리고 보강심재에 적층 솔리드(structure layered solid 46) 요소를 사용하였으며, PVC 폼 코어에 3차원 솔리드(structure solid 45) 요소를 사용하였다. 구조해석에 사용된 유한요소모델의 질점수와 요소수는 각각 144,515개와 158,176개이다. Fig. 6은 정적 구조해석에 사용된 대차프레임의 유한요소 모델을 보여준다.

Table 1 Load cases for the bogie frame according to JIS E 4207

Load case	Load symbol	Stress symbol	Load(kg)
Vertical load	F _{V1.0}	A	14,000
	F _{V1.3}	B	18,200
Twisting load	F _{T1}	C ₁	-
	F _{T2}	C ₂	-
Lateral load	F _{A1}	D ₁	9,500
	F _{A2}	D ₂	9,500

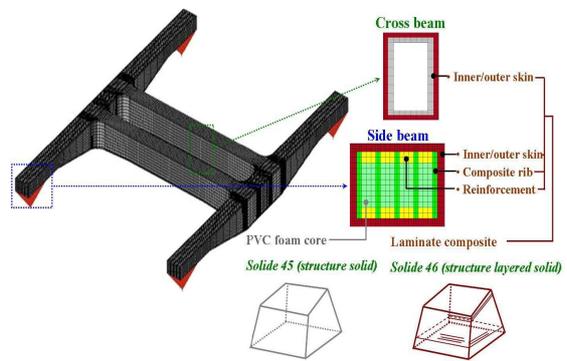


Fig. 6 Finite element models for composite bogie frame

대차프레임의 구조해석에 적용된 하중 및 구속조건은 JIS E 4207에 의거하였다. 이때, 적용 하중의 경우 대차프레임 운행 시 발생하는 주하중조건인 수직, 좌우 그리고 비틀림 하중조건을 고려하였다.

Table 1은 경량 대차프레임 구조해석에 적용된 하중과 응력기호를 나타낸다. 각 하중조건은 도시철도차량안전기준에 의거 차량의 제원을 산출하고 공차중량, 승객하중, 만차중량, 스프링 하중에 의해 도출하였다.

Fig. 7은 대차프레임의 Tsai-Wu 값에 대한 결과를 나타낸다. 이때, 복합재 대차프레임의 파손 평가는 Tsai-Wu 파손 기준식을 통하여 확인하였으며, 각 하중조건에 따른 대차프레임의 Tsai-Wu 파손지수를 Table 1과 같이 정리하였다. Tsai-Wu 파손 기준식에 의한 복합재료의 평가는 해석에 의한 지수가 1이하로 나타날 경우 모재와 섬유와의 파손이 발생하지 않으므로 구조적으로 안전한 것으로 판단한다. 정적 구조해석 결과 각 하중조건에 따른 Tsai-Wu 파손지수가 수직하중 하에서는 0.35, 비틀림하중 하에서는 0.38, 그리고 좌우하중 하에서는 0.30으로 나타나 대차프레임에 적용된

Table 2 Analysis result of the lightweight bogie frame

Load case	Index value
Vertical load	0.35
Twisting load	0.38
Lateral load	0.30

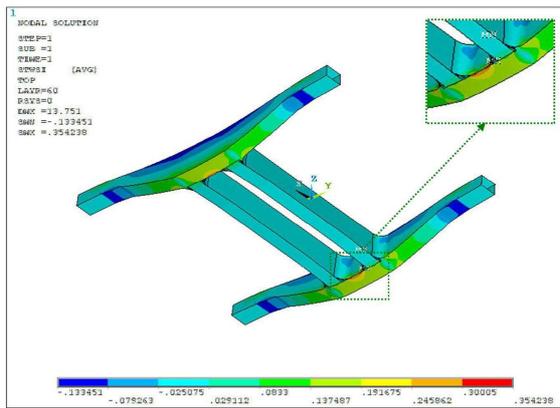


Fig. 7 The contours of Tsai-Wu index of composite bogie frame

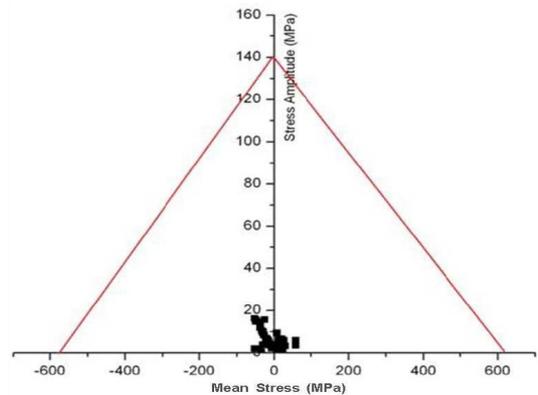
복합재의 모재와 섬유에 파손이 발생하지 않음을 확인하였다. 이에, 복합재가 적용된 경량 대차프레임이 각 하중조건에 대하여 구조적 안전성을 만족함을 확인하였다.

3.2 대차프레임의 피로수명 평가

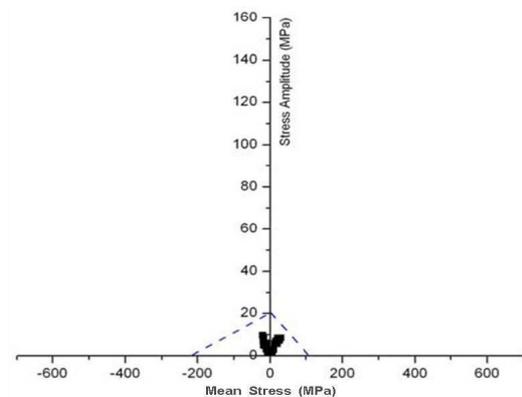
적층 복합재가 적용된 대차프레임의 피로강도평가를 위해 JIS E 4207에 명시된 각 하중조건에 따른 정적 구조해석을 수행하고 이때 발생하는 응력 결과를 바탕으로 평균응력과 응력진폭을 도출하였으며, 이를 각 방향별 Goodman 선도에 적용하여 피로강도를 평가하였다. 이때, 적층 복합재의 각 방향에 따른 피로특성을 고려하여 위사, 경사방향 응력과 주응력으로 구분하여 결과를 확인하였으며, 적층 구분에 따라 최대 주응력이 발생하는 위치 질점들에 대한 응력결과를 식 (4)와 식 (5)를 통하여 평균 응력과 응력진폭으로 나타내었다. 이때, 각 기호들은 Table 1에서 명시한 응력 기호를 나타낸다.

$$\sigma_m = A + \frac{(C_1 + C_2)}{2} + \frac{(D_1 + D_2)}{2} \tag{4}$$

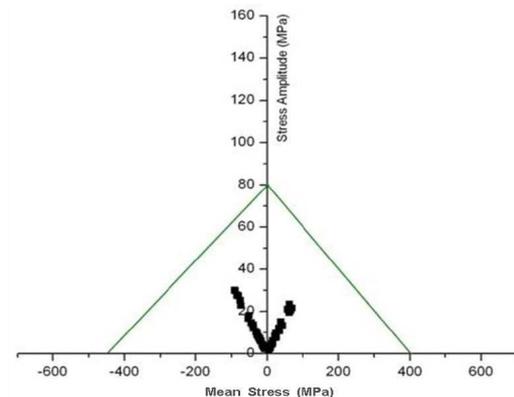
$$\sigma_a = \sqrt{(B - A)^2 + \left[\frac{(C_1 + C_2)}{2}\right]^2 + \left[\frac{(D_1 - D_2)}{2}\right]^2} \tag{5}$$



(a) Warp direction



(b) Fill direction



(c) 0°/90° direction

Fig. 8 Comparisons of Goodman diagram with endurance limit of 10⁷ cycle for composite bogie frame

Fig. 8은 경량 대차프레임의 평균응력과 응력진폭 결과를 적층 방향별로 Goodman 선도에 나타낸 것이다. 일반적으로 금속재 대차프레임은 등방성 재질로써 피로한도에 따른 Goodman 선도를 한 개의 선도로 나타내고 이를 평가하나 이방성 재질인 적층 복합재가 적용된 경량 대차프레임의

경우 각 방향에 따른 Goodman 선도를 도출하고 이를 통한 피로강도 평가를 수행하여야 한다. 이에, 본 연구에서는 단일방향으로 적층된 보강 심재와 크로스 빔의 내부 면재를 경사와 위사방향의 Goodman 선도 적용을 통하여 피로강도를 평가하였으며, 외부 면재는 0°/90° 방향의 Goodman 선도를 통하여 피로강도를 평가하였다.

적층 복합재 적용 경량 대차프레임의 피로강도 평가 결과 대차프레임에 발생하는 평균응력과 응력진폭은 0°/90° 방향으로 적층된 외부 면재에서 가장 높게 나타남을 확인하였으며, 단일방향으로 적층된 보강 심재와 크로스 빔의 내부 면재에서 0°/90° 방향에 비해 비교적 낮은 결과를 나타냄을 확인하였다. 이때, 대차프레임에 발생하는 모든 평균응력과 응력진폭이 복합재의 각 방향별 Goodman 선도의 피로한도 보다 낮은 결과를 나타냄을 확인하였다. 이는, 유리섬유/에폭시 4-매 주자직 적층 복합재가 적용된 대차프레임이 피로한도 기준인 10^7 사이클 이상의 수명을 갖는 것을 의미하며, 금속재 대차프레임에 비하여 1/3의 경량화 효과를 얻으면서 동일 수준의 피로강도를 만족할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구는 현재 한국철도기술연구원에서 연구 개발중인 도시철도차량 경량 복합재 대차프레임의 피로강도 평가를 위하여 유리섬유/에폭시 4-매 주자직 적층 복합재의 인장-압축 피로시험을 수행하였으며, 시험을 통하여 도출된 각 방향에 따른 Goodman 선도(경사, 위사, 0°/90°)들을 이용하여 대차프레임의 피로강도평가를 수행하고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 유리섬유/에폭시 4-매 주자직 적층 복합재가 적용된 경량 대차프레임의 피로강도 평가를 위하여 적용 소재의 각 방향을 고려한 인장-압축 피로시험을 수행하고 경사, 위사 그리고 0°/90° 방향별 Goodman 선도를 각각 도출하였다.

(2) 적층 복합재의 인장-압축 피로시험 시 압축하중에 의한 시편의 좌굴을 방지하기 위하여 수정된 좌굴방지지그(anti-buckling jig)를 고안하고 이를 피로시험에 적용하였으며 4-매 주자직 적층 복합재의 피로특성이 SM490A 금속재에 비하여 무게대비 우수한 피로특성을 나타냄을 확인하였다.

(3) 경량 대차프레임의 피로강도평가 결과 피로한도 보다 낮은 평균응력과 응력진폭을 나타남을 확인하였다. 이는, 적층 복합재 적용 경량 대차프레임이 10^7 사이클 이상의 수명을 갖을 것으로 판단되며, 전통적인 금속재 대차프레임 대비 60% 가량의 중량 감소 효과를 얻을 수 있고 동일 수준의 피로안전성을 갖음을 확인하였다. 이는, 향후 철도차량의 경량화 효과를 극대화하기 위해 복합재 적용을 통한 대차프레임의 복합재 적용 경량화가 가능할 것으로 사료된다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Jung, N. Y. and Lee, S. B., 1997, "Light Weight by Application of Aluminum Honeycomb Sandwich Panels in End Door of Rolling Stock," *Autumn Conference of The Korean Society of Machine Tool Engineers Conference*, pp. 284~291.
- (2) Shin, K. B., Koo, D. H., Han, S. H. and Park, K. J., 2004, "A Study on Material Selection of the Carbody Structure of Korean Tilting Train eXpress(TTX) through the Verification of Design Requirements," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 7, No. 2, pp. 77-84.
- (3) Choi, J. M., 1995, "Light weight design of bodysell by material substitution", *Korea Institute of Machinery and Materials*.
- (4) Chi, C. H. and Yang, J. H., 2001, "Effect of Graphite/Epoxy(CFRP) Surface Treatment on 8 the Shear Strength of CFRP/Metal Composites," *Korean Institute of Surface Engineering*, Vol.34, No. 3, pp. 225~230.
- (5) Kim, J. S., Jeong, J. C., Cho, S. H. and Seo, S. I., 2006, "Analytical and Experimental Studies on the Natural Frequency of a Composite Train Carbody," *The Korean Society for Mechanical Engineers*, Vol. 30, No. 4, pp. 473~480.
- (6) Ko, H. Y., Shin, K. B. and 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," *The Korean Society for Railway*, Vol. 12, No. 4, pp. 518~525.
- (7) Ko, H. Y., Shin, K. B., Cho, S. H. and Kim, D. H., 2008, "An Evaluation of Structural Integrity and Crashworthiness of Automatic Guideway Transit (AGT) Vehicle made of Sandwich Composites," *The Korean Society of Composite Materials*, Vol. 21, No. 5, pp. 15~22.
- (8) Maurin, L., Boussoir, J., Rougeault, S., Bugaud, M., Ferdinand, P., Landrot, A. G., Grunevald, Y. H. and Chauvin, T., 2002, "FBG-based Smart Composite Bogie for Railway Applications," *IEEE Conference*, Vol. 1, pp. 91~94.
- (9) Kim, W. J., Song, S. Y., Park, G. S. and Park, H. S., 2007, "Evaluation of static and fatigue strength applying European Standard for the bogie frame of Diesel Multiple Unit," *Autumn Conference of The Korean Society for Railway*, pp. 797~804.
- (10) Jang, S. S., 2007, "A Reliability Analysis on the Fatigue Life Prediction in Carbon/Epoxy Composite Material," *The Korean Society of Industrial Application*, Vol. 10, No. 3, pp.143~147.
- (11) JIS E 4702 : Truck frames for railway rolling stock.
- (12) Kim, J. S., Yoon, H. J. and Shin, K. B., 2010, "Design of a Composite Side Beam for the Railway Bogie Frame," *PRICM 7*, pp.2676~2679
- (13) Gamstedt, E. K. and Sjoegren, B. A., 1999, "Micromechanisms in tension-compression fatigue of composite laminates containing transverse plies," *Composites Science and Technology*, Vol. 59, pp. 167~178.
- (14) Hwang, W. and Han, K. S., 1986, "Fatigue of Composites Fatigue Modulus Concept and Life Prediction," *Journal of Composite Materials*, Vol. 20, pp. 154~165.
- (15) Park, J. S., Seok, C. S., Koo, J. M., Kim, D. J., Shin, J. H. and Goo, B. C., 2004, "Fatigue Characteristics of SM490A Welded Joints for Bogie Frame," *Journal of Korea Society for Precision Engineering*, Vol. 21, pp. 146~153
- (16) Bryan, H., 2003, "Fatigue Composite Materials," *CRC Press*.