

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.2.203

철도차량용 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재의 피로수명 향상 방안 연구

고희영* · 신광복** · 김정석**

* 한밭대학교 기계설계공학과, ** 한국철도기술연구원 철도구조연구실

A Study on Improving the Fatigue Life for a Woven Glass Fabric/Epoxy Laminate Composite Applied to Railway Vehicles

Hee Young Ko*, Kwang Bok Shin** and Jung Seok Kim**

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

** Division of Railroad Structure Research, Korea Railway Research Institute

(Received October 29, 2009 ; Revised December 23, 2009 ; Accepted December 23, 2009)

Key Words: Fatigue Life(피로수명), Woven Glass Fabric/Epoxy Laminate Composite(직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재), Railway Vehicle(철도 차량), Failure Strength(파손강도)

초록: 본 연구는 철도차량에 적용되는 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재의 피로특성 및 피로수명에 대해 평가하였다. 이때, 피로시험은 0.1의 응력비(R)와 5Hz의 주파수에서 인장-인장 하중 조건이 고려되었으며, 시험편은 카본/에폭시 플라이가 보강된 시험편과 보강되지 않은 시험편 두 가지 타입을 고려하였다. 또한, 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재의 피로수명을 평가하기 위해 철도차량 차체와 언더프레임에 주로 사용되는 알루미늄 6005와 비교하였다. 본 연구를 통하여 3장의 카본/에폭시 플라이가 보강된 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재 시험편이 보강되지 않은 기본 시험편보다 피로강도 및 피로수명이 크게 향상됨을 확인하였다.

Abstract: In this study, the fatigue characteristics and life of a woven glass fabric/epoxy laminate composite applied to railway vehicles was evaluated. The fatigue test was conducted using a tension-tension load with a stress ratio R of 0.1 and frequency of 5 Hz. Two types of woven glass fabric/epoxy laminate composite was used in the fatigue test: with and without carbon/epoxy ply reinforcement. In addition, the fatigue life of the woven glass fabric/epoxy laminate composite was compared with that of aluminum 6005, which is used in the car body and underframe structures of railway vehicles. The test results showed that the failure strength and life of the woven glass fabric/epoxy laminate composite reinforced with three carbon/epoxy plies had a remarkable improvement compared with that of the bare specimen without reinforcement.

1. 서 론

오늘날 항공우주분야 뿐만 아니라 지상운송 수단 등에서 널리 활용되고 있는 복합재료는 기존 금속재 구조물에 비해 비강도 및 비강성이 높은 기계적 특징을 갖고 있어 그 적용 분야가 점차 확대 되고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 이에 국내 철도차량 분야에서도 복합재료의 적용을 통하여 구조물의 경량화 효과를 통해 에너지 소비효율의 극대화 및 승차 인원 증대뿐만 아니라, 현가장치 및 제동장치 등과 같은 부품들의 수명향상 효과를 얻고자 한다.⁽⁵⁾ 현재 국내에서 개발되고 있는 복합재료 적용 철도차량은 많은 연구를 통하여 기존

내장재 및 차체 전두부와 같은 2차 부재에 국한되던 복합재료를 하중을 직접적으로 지탱하는 차체 구조물뿐만 아니라 대차 프레임과 같은 1차 부재에 적용하고 있다.⁽⁶⁾

철도차량에 주로 적용되는 복합재료는 직조된 강화섬유에 수지를 이용하여 적층한 후 사용하게 되는 적층 복합재로서, 강화섬유에는 탄소섬유 및 유리섬유가 주로 사용된다. 이에 국내에서 개발되어 현재 시험운행 중인 저상버스, 자동무인 경전철, 바이모달 트램 등에는 국내에서 생산이 가능하며, 차체 제작비용을 낮추기 위해 유리섬유가 적용되었다.⁽⁷⁻⁹⁾

이러한 적층 복합재료가 적용된 차체 구조물은 승객하중 및 실내외 설비 하중들에 따른 구조적

† Corresponding Author, shin955@hanbat.ac.kr

안전성을 확보해야 하며, 이에 기계적 물성 시험을 통해 특성 평가가 수행된다. 또한, 철도차량은 일반적으로 약 30년 동안의 장기간 피로하중 환경 하에서 운행되며, 이로 인해 운행 중 발생하는 진동 및 외부의 반복 하중에 의해 차체의 운행수명에 큰 영향을 받게 된다. 따라서, 구조물의 파손에 주된 원인이 되는 피로 특성에 대한 평가는 반드시 수행되어야 하며, 이에 따라 경량화를 위해 철도차량에 적용되는 적층 복합재료도 피로 시험을 통해 특성을 평가하고 구조물의 안전성 여부를 판단해야 한다.

적층 복합재의 피로현상에 관한 연구는 1970년대부터 본격적인 연구가 수행되었으며, 초기의 연구는 피로시험을 기초로 한 분석을 통하여 기존 금속재에 적용되는 식이나 통계적 방법을 사용하였다.^(10~12) 또한, 시험적 관찰을 통한 잔류강도와 잔류강성에 의한 피로수명의 저하로부터 손상모형과 피로수명 예측방법에 관한 연구가 수행되었다.^(13~15) 그리고 이러한 복합재료의 피로수명을 향상시키기 위해 섬유 및 모재의 재질변화와 적층 각도의 변화에 따른 피로시험을 수행하였으며, 보강재의 적용을 통한 피로특성 평가를 통한 피로수명 향상방안에 대해 제시하였다.^(16~18)

본 연구에서는 철도차량 차체 구조물 및 대차 프레임의 경량화 효과를 얻기 위해 적용되는 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재(woven glass fabric/epoxy laminate composite)의 피로특성을 평가하고, 이를 기존 철도차량 적용 알루미늄 6005 재료와 비교하였다. 또한, 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재의 피로수명을 향상시키기 위해 직물 카본/에폭시 플라이를 1~3장 보강하여, 플라이 수 증가에 따른 피로특성과 수명향상을 평가하였다.

2. 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재와 알루미늄 6005의 피로특성 평가

2.1 시험편 제작

직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재와 알루미늄 6005의 피로시험에 사용된 시험편은 Fig. 1에 나타내었다. 이때, 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재 시험편은 0.5mm의 두께를 갖는 프리프레그(prepreg)를 적층하여 제작하였다. 시험편의 성형은 오토클레이브를 이용하여 80°C, 121°C의 온도 이력과 2.5bar의 압력을 적용하였다.⁽¹⁹⁾

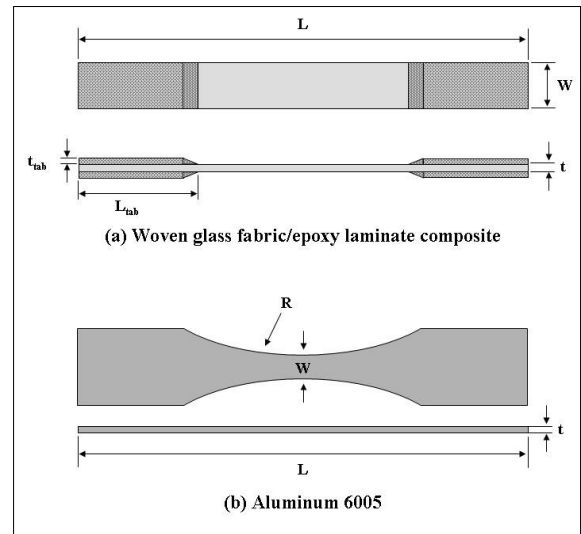


Fig. 1 Configuration of fatigue test specimen

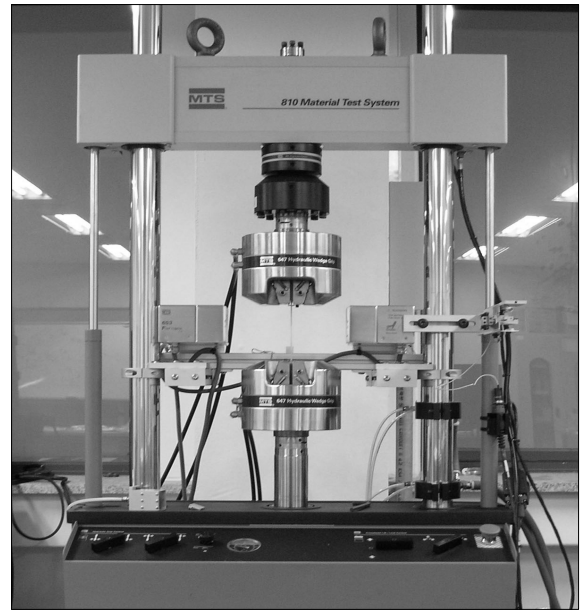


Fig. 2 Fatigue test machine

2.2 시험 방법 정의

피로시험에 적용되는 파손강도(S_u)를 얻기 위해 만능재료시험기(Instron 4484)를 통해 인장시험을 각각 수행하였다. 이때, 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재는 ASTM D3039 규정에 의거하여 시험을 수행하였으며, 알루미늄 6005는 ASTM E 8 규정에 의거하여 시험을 수행하였다.

피로시험은 Fig. 2에 나타나 있는 동적피로시험기(MTS 810)를 사용하였다. 이때, 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재는 ASTM D3479 규정에 의거하여 피로시험을 수행하였으며, 시험 조건은 일

반적으로 많이 수행되는 인장-인장 하중이 적용되었다. 그리고 시험중에 시험편 내부의 온도상승을 거의 무시할 수 있는 5Hz의 주파수를 적용하였으며,⁽²⁰⁾ 응력비($R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$)는 0.1을 적용하였다. 하중단계는 인장시험을 통해 얻은 파손강도를 기준으로 각 하중단계에서 5개의 시험편에 대해 시험을 수행하였으며, 일반적으로 복합재 피로 시험에서 적용되는 10^7 사이클을 기준으로 피로한도를 선정하였다. 알루미늄 6005의 피로시험은 ASTM E 466 기준에 의거하여 시험을 수행하였으며, 유리섬유/에폭시 적층 복합재와 동일하게 주파수는 5Hz, 응력비(R)는 0.1을 적용하여 10^7 사이클의 피로한도까지 시험을 수행하였다.

2.3 피로시험 결과

직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재는 파손강도 값인 408.6MPa을 기준으로 20~90% 사이에서 8단계의 하중을 선정하여 피로시험을 수행하였으며, 알루미늄 6005의 피로시험은 파손강도 값인 260.0MPa을 기준으로 65~85% 사이에서 5단계의 하중을 선정하여 시험을 수행하였다.

Fig. 3은 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재와 알루미늄 6005의 피로시험을 통해 얻은 S-N 선도를 하중비에 대해 나타낸 것으로서, 각 하중 단계에서 재현성이 우수한 피로수명 결과를 보여준다. 이때, 피로수명이 10^7 사이클을 기준으로 피로한도가 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재에서는 20%의 하중단계에서 확인된 반면, 알루미늄 6005는 65%의 하중단계에서 확인되었다. 이는 유리섬유/에폭시 적층 복합재의 피로특성이 알루미늄 6005에 비해 45% 낮은 하중비를 갖는 것을 보여준다.

Fig. 4는 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재와 알루미늄 6005의 피로시험을 통해 얻은 S-N 선도를 최대응력에 대해 나타낸 것이다. 이때, 피로한도에서의 최대 응력 값은 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재가 알루미늄 6005에 비해 87.6MPa 낮은 값을 갖는 것을 확인하였다.

이때, 하중비에 따른 결과에 비해 최대응력에 따른 결과에서 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재와 알루미늄 6005의 피로수명 차이가 적게 발생하는 현상을 보였는데, 이는 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재가 알루미늄 6005에 비해 파손강도가 1.57배 높기 때문으로 사료된다.

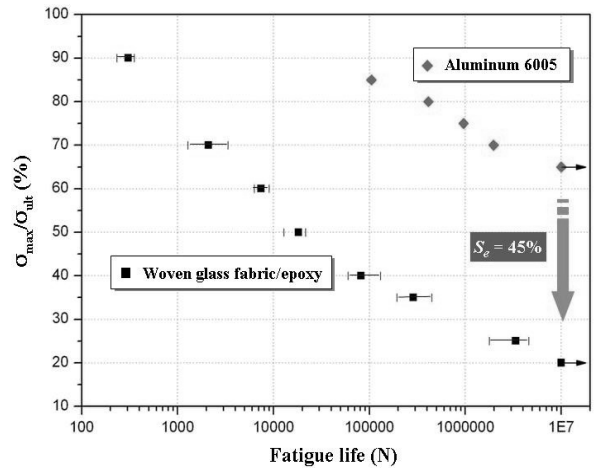


Fig. 3 Normalized stress ratio vs fatigue life for woven glass fabric/epoxy laminate composite

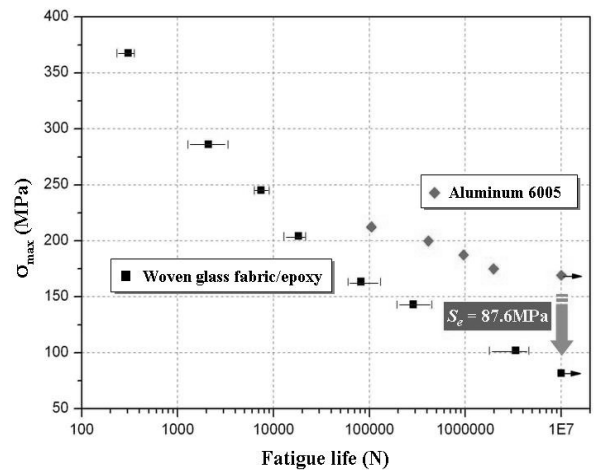


Fig. 4 Maximum stress vs fatigue life for woven glass fabric/epoxy laminate composite

다음은 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재와 알루미늄 6005의 피로시험을 통해 얻은 S-N 선도를 이용하여 피로수명을 계산하는 식에 적용하여 나타냈다. 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재는 식 (1), 알루미늄 6005는 식 (2)와 같으며, 이때, 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재의 피로수명은 시험에서 나타난 $300 \sim 10^7$ 사이클의 범위를 갖으며, 알루미늄 6005는 $10^5 \sim 10^7$ 사이클의 범위를 갖는다.

$$S_{(G/E)} \approx 3.24 S_{u(G/E)} N^{-0.185} \quad (1)$$

$$S_{(Al)} \approx 1.11 S_{u(Al)} N^{-0.039} \quad (2)$$

여기서, $S_{(G/E)}$ 는 직물 유리섬유 에폭시 적층

복합재의 최대적용응력을 나타내며, $S_{u(G/E)}$ 는 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재의 파손강도, S_{Al} 는 알루미늄 6005의 최대적용응력, $S_{u(Al)}$ 는 알루미늄 6005의 파손강도, N 은 피로수명을 나타낸다.

Fig. 5는 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재와 알루미늄 6005에 대해 평균 응력식인 Goodman 선도를 이용하여 나타낸 것이다. Goodman 선도는 식 (3)과 같이 정의되며, 피로시험에 적용되는 평균응력(σ_m) 식 (4)과 응력진폭(σ_a) 식 (5)에 의해 피로수명을 예측하는 방법이다⁽²¹⁾. 이때, 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재는 알루미늄 6005에 비해 파손강도는 높은 반면, 피로한도가 낮아 두 선도가 서로 교차함을 확인할 수 있었다. 이로 인해 두 선도가 교차하는 지점에서의 평균응력인 200MPa를 기준으로 그 이하에서는 알루미늄 6005

가 피로특성이 다소 우수한 특성을 갖는 반면, 200MPa 이상에서는 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재가 피로특성이 우수한 것으로 판단되었다.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_e} = 1 \tag{3}$$

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{max} + \sigma_{min})}{2} \tag{4}$$

$$\sigma_a = \frac{(\sigma_{max} - \sigma_{min})}{2} \tag{5}$$

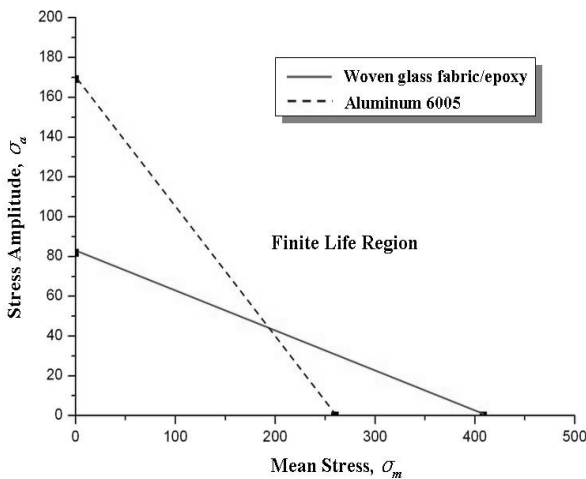


Fig. 5 Goodman diagram for woven glass fabric/epoxy laminate composite and aluminum 6005

Fig. 6은 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재의 피로시험을 통해 발생한 대표적인 파손 모드를 보여 주며, 피로하중에 의해 기지균열(matrix cracking), 섬유파손(fiber breakage), 섬유와 모재간의 분리(debonding), 층간분리(delamination) 등의 형태가 확인되었다. 시험편의 파손부위는 시험편 중앙부분 및 탭부분에서 전체적으로 발생하였으며, 각 파손 위치에 따른 피로수명 결과에 대한 오차가 적음을 확인하였다. 이때, 일반적인 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재의 파손모드는 정하중 작용 시에는 파단변형률이 큰 모재의 파손은 섬유가 파단된 이후에 발생하며, 피로하중 작용 시에는 저 사이클(low cycle) 영역에서는 정하중시와 같이 섬유의 파손이 먼저 일어나는 반면, 고 사이클(high cycle) 영역에서는 모재의 파손이 먼저 발생하게 된다.⁽²²⁾

직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재의 피로시험을 통한 평가를 통하여 피로특성이 기존 철도차량 적용 금속재인 알루미늄 6005에 비해 낮음을 확인하였다. 따라서, 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재의 철도차량 차체 구조물에 적용을 위해서는 향상된 피로특성이 필요한 것으로 판단되었다.

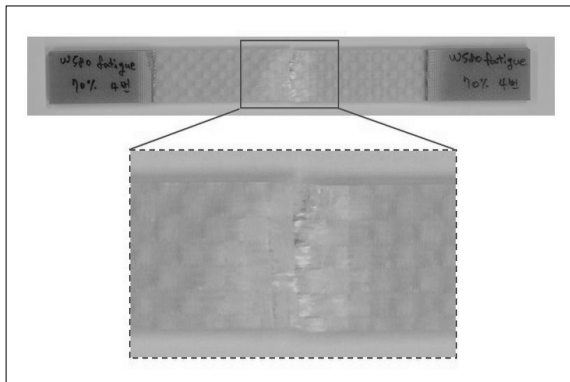


Fig. 6 Fatigue failure mode of woven glass fabric/epoxy laminate composite

3. 탄소섬유/에폭시 보강 적층 복합재의 피로특성 평가

3.1 피로특성 향상방안 제시

직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재는 기존 철도차량에 적용되는 알루미늄 6005와의 피로시험을 통해 비교적 낮은 피로수명을 갖고 있음이 확인되었다. 따라서, 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재를 장기간의 피로하중 환경에서 운영되는 철도차량 1차 부재로 적용하기 위해서는 향상된 피로수명이 요구된다. 이에 본 연구에서는 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재의 피로특성 향상을 위해

기계적 특성 및 피로 특성이 우수한 직물 카본/에폭시 플라이를 보강하여 피로수명 향상 방안을 제시하였다. 이때, 시험편은 Fig. 7과 같이 카본/에폭시 플라이를 삽입 보강하여 제작하였다. 이때, 적용된 카본섬유는 비교적 가격이 저렴하고 구조재로 널리 사용되는 T300 계열을 선정하였다.

3.2 강도특성 평가 결과

Fig. 8은 카본/에폭시 보강 유무에 따른 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재의 응력-변형률 선도를 보여준다. 이때, 기본 시험편인 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재의 파손강도인 408.6MPa을 기준으로 피로특성 향상을 위해 카본/에폭시가 1 플라이 보강된 시험편은 402.8MPa, 2 플라이 보강된 시험편은 436.9MPa, 그리고 3 플라이 보강된 시험편은 519.0MPa이 각각 확인되었다. 이때, 기본 시험편을 기준으로 카본/에폭시가 2 플라이 보강된 시험편은 강도가 6.9%, 3 플라이 보강된 시험편은 강도가 27.0%가 각각 향상됨을 확인하였다. 반면, 카본/에폭시가 1 플라이 보강된 시험편에서의 파손강도는 기본 시험편에 비해 강도가

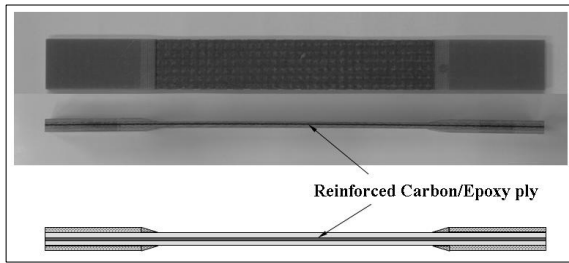


Fig. 8 Reinforced specimen by carbon/epoxy ply

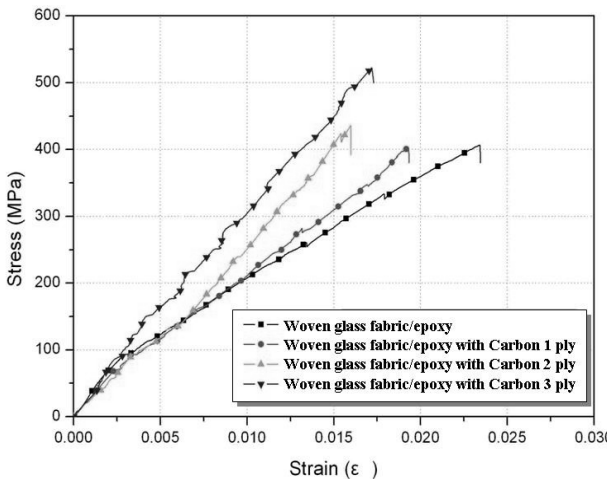


Fig. 7 Stress-strain curve for specimen with the reinforced carbon/epoxy ply

1.4% 낮게 확인되었으며, 이는 유리섬유와 보강된 카본섬유의 물성차이로 인해 면내의 층간분리에 의한 파손모드가 많은 영향을 미쳐 이와 같은 결과가 나타난 것으로 판단된다.

3.3 피로특성 평가 결과

카본/에폭시가 보강된 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재에 대한 향상된 피로수명을 비교 평가하기 위해 Fig. 9에 보이듯이 50%와 60%의 하중단계에서 피로시험을 수행하였다. 이때, 카본/에폭시가 1 플라이 보강된 시험편은 기본 시험편에 비해 60%에서 1.3배, 50%에서 3.4배의 피로수명이 향상됨을 보였고, 2 플라이가 보강된 시험편은 60%에서 5.4배, 50%에서 6.8배 향상됨을 보였으며, 3 플라이가 보강된 시험편은 60%에서 13.1배, 50%에서 29.5배의 향상된 결과를 각각 보였다.

Fig. 10은 카본/에폭시가 보강된 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재의 피로시험을 통해 얻은 S-N 선도를 최대응력에 대해 나타낸 것이다. 이때, 카본/에폭시가 2 플라이 적층된 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재의 50% 하중단계에서의 피로수명과 알루미늄 6005의 85% 하중단계에서의 피로수명이 비슷한 결과를 보임을 확인하였다.

이때, 하중비에 따른 결과에서 카본/에폭시 보강 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재에 비해 알루미늄 6005 피로특성이 다소 우수함을 보였으나, 최대응력에 따른 결과에서는 카본/에폭시가 2 플라이 이상 보강된 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재의 피로특성이 알루미늄 6005에 비해 우수함을 보였다. 이는 카본/에폭시 플라이가 보강된 시험편의 파손강도가 알루미늄 6005에 비해 높기 때문이다.

따라서, 본 연구에서는 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재를 철도차량 차체 구조물 및 대차프레임에 적용 시 피로 특성을 향상시키기 위한 방안으로 기계적 특성 및 피로 특성이 우수한 카본/에폭시 플라이를 보강하는 방법을 제안한다. 이때, 현재 수행된 연구에서는 카본/에폭시 플라이를 삽입 보강한 방법만을 적용하였으나, 추후 추가적인 연구를 통하여 카본/에폭시 플라이를 외피에 보강하는 방법 또는 카본/에폭시 대신에 합성고무(SRB rubber) 등과 같은 다른 보강재를 적용하는 방법 등도 좋은 방안이라 사료된다. 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재를 철도차량 1차 부

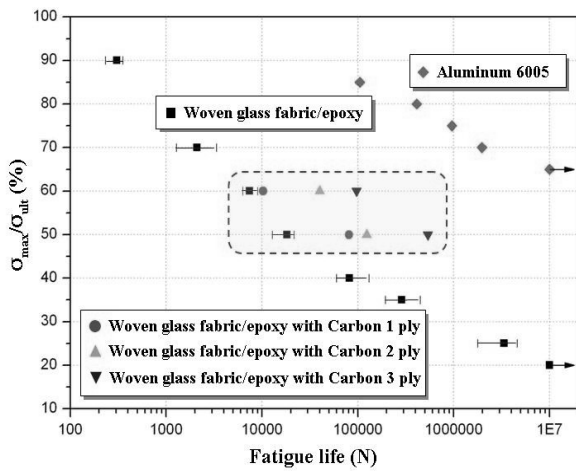


Fig. 9 Normalized stress ratio vs fatigue life for specimen with the reinforced carbon/epoxy ply

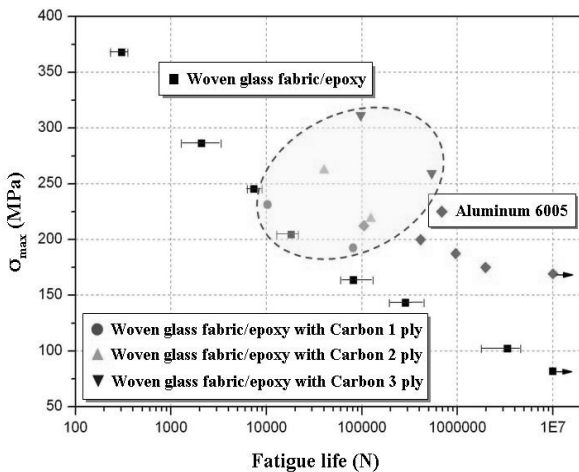


Fig. 10 Maximum stress vs fatigue life for specimen with the reinforced carbon/epoxy ply

재료 사용하기 위해서는 위의 제시된 방법들을 통해 피로수명을 향상시켜 구조적 안전성을 확보해야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 철도차량에 적용되는 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재와 알루미늄 6005의 피로시험을 통한 특성 평가 및 피로수명 향상을 위한 방안을 제시하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재와 알루미늄 6005소재의 피로시험을 10⁷ 사이클까지 수행하여 피로특성과 수명을 예측하였다. 그러나, 기존 철도차량에 적용되는 알루미늄 6005의 피로

시험 결과에 비해 직물 유리섬유/에폭시 복합재의 하중비 및 최대응력에 따른 결과에서 모두 피로수명이 낮음을 확인하였다.

(2) 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재를 철도차량 구조물에 적용하기 위해서는 피로수명 향상이 요구되며, 이에 본 연구에서는 카본/에폭시 플라이를 삽입 보강하는 방안을 제시하였다.

(3) 피로수명 향상을 위해 적용된 카본/에폭시 보강 유리섬유/에폭시 적층 복합재의 인장시험을 통하여 파손강도가 2장의 플라이가 보강된 시험편에서는 6.9%, 3장의 플라이가 보강된 시험편에서는 27.0%가 각각 향상됨을 확인하였다.

(4) 카본/에폭시가 3장의 플라이가 보강된 유리섬유/에폭시 적층 복합재의 10⁷ 사이클 피로시험을 통하여 50%의 하중단계에서는 29.5배, 60%의 하중단계에서는 13.1배의 피로수명이 향상됨을 확인하였다. 또한, 최대응력 결과에서는 알루미늄 6005보다 피로수명이 우수함을 확인하였다.

(5) 철도차량 차체 구조물 및 대차프레임 등에 직물 유리섬유/에폭시 적층 복합재의 적용 시에 피로수명 향상을 위해 카본/에폭시 등과 같은 보강재를 적용하는 방법이 좋은 대안이 될 것으로 사료된다.

후기

본 연구는 지식경제부 산업기술연구회에서 지원한 일반연구사업 “복합소재의 철도차량 적용에 관한 연구”의 일부입니다. 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Lmielinska, K., Guillaumat, L., Wojtyra, R. and Castings, M., 2008, "Effects on Manufacturing and Face/Core Bonding on Impact Damage in Glass/Polyester-PVC Foam Core Sandwich Panels," *Composite Part B: Engineering*, Vol. 39, pp. 1034~1041.
- (2) Shin, B., You, Y. H. and Suk, H. S., 2002, "Application of Composite Materials for Rolling Stock System," *Korean Society for Composite Materials*, Vol. 15, No. 5, pp. 66~71.
- (3) Kim, S. Y., Choi, W. J., Park, S. Y. and Moon, C. R., 2005, "Thermal Residual Stress Behavior in Fiber Metal Laminates," *Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 33, No. 6,

- pp. 39~44.
- (4) Chi, C. H. and Yang, J. H., 2001, "Effect of Graphite/Epoxy(CFRP) Surface Treatment on 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., Han, J. W., Lee, S. J., Kim, S. C. and Seo, S. I., 2006, "Structural Characteristics of a Hybrid Composite Carbody of Korean Tilting Train by Weight Load," *The Korean Society for Railway*, Vol. 9, No. 3, pp. 251~256.
- (6) Shin, K. B., You, Y. H. and Suk, H. S., 2002, "Application of Composite Materials for Rolling Stock System," *Korean Society for Composite Materials*, Vol. 15, No. 5, pp. 66~71.
- (7) Lee, J. Y., Shin, K. B. and Lee, S. J., 2007, "A Study on Failure Evaluation of Korean Low Floor Bus Structures made of Hybrid Sandwich Composite," *The Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 15, No. 6, pp. 50~61.
- (8) 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.
- (9) 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," *Korean Society of Composite Materials*, Vol. 21, No. 5, pp. 15~22.
- (10) Lee, C. S. and Hwang, W. B., 1994, "Fatigue Analysis of Composite Materials," *Trans. of the KSME*, Vol. 34, No. 5, pp. 372~383.
- (11) Awerbuch, J. and Han, H. T., 1977, "Fatigue and Proof Testing of Unidirectional Graphite/Epoxy Composite," *Fatigue of Filamentary Composite Materials*, ASTM STP 636, pp. 248~266.
- (12) Yang, J. N. and Jones, D. L., 1981, "Load Sequence Effects on the Fatigue Unnotched Composite Materials," *Fatigue of Fibrous Composite Materials*, ASTM STP 723, pp. 213~232.
- (13) Kim, J. K. and Kim, D. S., 1993, "The Fatigue Strength and the Fatigue Life Prediction in Plain Woven Glass/Epoxy Composite Plates," *Trans. of the KSME*, Vol. 17, No. 10, pp. 2475~2482.
- (14) Ming-hwa, R. J., Hsu, J. M. and Hwang, D. G., 1990, "Fatigue Degradation in Centrally Notched Quasi-Isotropic Laminates," *Composite Materials*, Vol. 24, pp. 823~838.
- (15) 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.
- (16) Yoon, H. K., Kim, Y. K., Park, J. S., Lee, K. B., 1996, "A Study on Fatigue Life of Al 7075/CFRP Multilayered Hybrid Composite Materials," *The Korean Society of Ocean Engineers*, Vol. 10, No. 4, pp. 92~102.
- (17) Kawai, M. and Hachinohe, A., 2002, "Two-stress Level Fatigue of Unidirectional Fiber-Metal Hybrid Composite: GLARE 2," *International Journal of Fatigue*, Vol. 24, pp. 567~580.
- (18) Cornelia E. Demers, 1998, "Tension-Tension Axial Fatigue of E-Glass Fiber-Reinforced Polymeric Composites : Fatigue Life Diagram," *Construction and Building Materials*, Vol. 12, pp. 303~310.
- (19) Shin, K. B., Lee, S. J. and Han, S. H., 2005, "A Study on Manufacturing Technology of Hybrid Composite Carbody Structures using Autoclave Molding Process," *Korean Society for Composite Materials*, Vol. 18, No. 2, pp. 52~58.
- (20) Hwang, W. and Han, K. S., "Fatigue of Composites Fatigue Modulus Concept and Life Prediction," *Journal of Composite Materials*, Vol. 20, 1986, pp. 154~165.
- (21) Julie A. Bannantine, 1999, "Basic of Fatigue Analysis," *Cheong Moon Gak*.
- (22) Lee, C. S. and Hwang, W. B., "Fatigue Analysis of Composite Materials," *Trans. of the KSME*, Vol. 34, No. 5, 1994, pp. 372~383.