

인발성형 공정을 통한 이종재료 복합소재 프레임 개발 및 내구성 평가

이학성^{a,b}, 강신재^{a,b*}

Development and Durability Evaluation of a Bimaterial Composite Frame by Pultrusion Process

Haksung Lee^{a,b}, Shinjae Kang^{a,b*}^a Korea Institute of Carbon Convergence Technology, Advanced Material Research Division, 110-11, Banryongro Jeonju, Republic of Korea^b Chonbuk National University, Division of Mechanical Design Engineering, 390, Woojeonro Jeonju, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

| | | | |
|----------|----|----------|------|
| Received | 26 | February | 2014 |
| Revised | 31 | March | 2014 |
| Accepted | 8 | April | 2014 |

Keywords:

Composite frame
Bimaterials composite
Pultrusion mechanism
Hydro actuator
Fatigue test
S-N curve

ABSTRACT

Recently, the growing demand for weight reduction and improved structure durability for commercial vehicles has led to active research into the development and application of suitable composite materials. This study suggests a bimaterial composite frame produced by a pultrusion process to replace steel frames. We focused on the development of a composite frame consisting of two types of materials by mixing an orthotropic material with an isotropic material. The inside layer consisted of an aluminum pipe, and the outside layer was composed of a glass fiber pipe. To determine the strength and failure mechanisms of the composite material, tensile tests, shear tests, and three-point bending tests were conducted, followed by fatigue tests. After static testing, the fatigue tests were conducted at a load frequency of 5 Hz, a stress ratio (R) of 0.1, and an endurance limit of 10^6 for the S-N curve. The results showed that the failure modes were related to both the core design and the laminating conditions.

1. 서론

최근 전 세계 자동차 업체들의 개발 경향은 모듈화, 경량화, 지능화를 말할 수 있다. 이 중에서도 현재 개발되고 있는 많은 자동차 부품들이 대형화 되면서 경량화 및 모듈화로 가고 있다. 대체 연료를 사용하는 차량의 개발이 이루어지고 있고, 고유가 시대에 차량의 연비향상에 박차를 가하고 있는 시점에서 차량의 경량화는 가장 큰 이슈가 되고 있다¹⁻²⁾.

승용차뿐만 아니라 상용차에 대한 적용분야도 확산되고 있으며, 복합소재 보강 구조물의 경우 높은 좌굴강도를 가지며 이러한 좌굴

강도를 활용하여 효과적인 구조물을 개발할 수 있다. 하지만 이를 위해서는 복합재 보강 프레임의 파손 메커니즘에 대한 이해가 필요하다. 복합재 보강 프레임은 제작 방법에 따라 그 파손 특성과 최종 파손 강도가 달라지게 된다.

복합재 보강 프레임의 제작 방법으로 동시성형(Co-curing), 이차 접합(Secondary bonding), 동시 접합(Co-bonding), 기계 체결(Mechanical fastening) 등의 방법을 고려할 수 있다. 동시성형 방법은 구조물을 일체형으로 제작하므로 대개 파손강도 면에서 효과적이다. 하지만, 동시성형 방법은 적층 및 성형을 위한 치구가 복잡하고, 보강재와 같이 단면이 갖는 보강 프레임에서는 보

* Corresponding author. Tel.: +82-63-219-3725

Fax: +82-63-219-3729

E-mail address: kangsj@jbnu.ac.kr (Shinjae Kang).

강재 내부에 사용하는 금속몰드를 탈형하기 어려운 단점이 있다^[3].

이러한 문제를 극복하기 위해서 본 연구에서는, 상용차 서브프레임의 경량화 및 구조안전성을 동시에 확보하기 위한 대안으로 압출 성형된 알루미늄 합금 구조물에 추가적으로 구조물 외곽에 유리섬유(glass fiber)를 동시에 인발하는 성형방법이 고안되었다. 이로 인해 제작성이 용이하며, 금형을 탈형하는 과정이 필요 없으므로 탈형 과정의 위험을 제거 할 수 있었다. 그 외에도 추가적인 접합이나 체결이 불필요하게 되었다.

이종재료 복합소재 프레임의 경우 금속이 갖는 등방성의 성질과 복합소재의 직교이방성의 성질을 모두 지니고 있으며, 이는 차체에 인가되는 하중(비틀림, 굽힘 등)에 대하여 구조안전성 확보가 용이하다. 복합소재 적용에 따른 중량 절감 효과, 복합소재가 갖는 충격 흡수특성 및 내구한도 평가를 위한 굽힘 및 피로특성에 대한 검증이 요구되는 바이다.

본 논문은 우선적으로 인발 성형된 복합소재 프레임의 각 단품별(glass fiber, Al alloy) 물성평가를 통하여 인장강도, 전단강도 및 탄성계수 등 해석에 필요한 물성을 확보하고, 이를 바탕으로 설계된 구조에 관하여 3점 굽힘 시험 및 해석을 진행하였다. 이를 통해 선정된 설계안에 대하여 굽힘 시험과 동일한 간극(span) 기준으로 피로시험을 수행하고, 피로시험을 통해 얻은 결과 값을 바탕으로 F-N선도를 도출하였다. 이를 통하여 최종적으로 인발 성형된 이종재료 복합소재 프레임의 내구성을 검증하고, 내부 알루미늄 구조가 굽힘 하중 및 피로내구에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

2. 복합소재 프레임 인발성형 공정

2.1 인발 성형 공정

Fig. 1에 보이는 바와 같이 개발하고자 하는 복합소재 프레임의 제작 공정 및 프로파일 형상을 나타내고 있다.

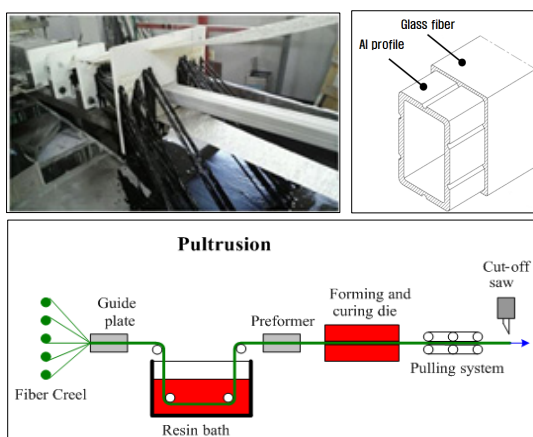


Fig. 1 Pultrusion process of the composite frame

가장 첫 번째로, 섬유 크릴(creel) 에서 나오는 섬유(fiber)와 가이드 판(guide plate)에 알루미늄 프로파일(Al profile)을 동시에 삽입하고, 삽입된 알루미늄과 유리섬유에 수지(resin)가 묻게 된다. 성형 금형(preform mold)에 알루미늄 프로파일, 유리섬유 그리고 수지(resin)가 동시에 침투되면서 알루미늄 프로파일 외곽이 레진과 유리섬유에 의해서 둘러싸여지며 사각의 형상으로 1차적으로 형상이 만들어지게 된다.

1차적으로 성형된 프로파일 형상에 대하여 경화구간(curing die)에서 2차적으로 열과 압력이 가해지며 수지가 굳어 최종형상이 만들어지게 된다. 마지막으로, 계속적으로 성형된 프로파일을 당겨주는 시스템(pulling system) 장치가 존재하며 사용 및 보관이 용이하게 알맞게 잘라진다. 인발 성형된 복합소재 외곽의 유리섬유는 약 60%의 섬유 함유량을 갖으며, 체결력 및 경제성을 고려하여 알루미늄 프로파일(profile) 두께는 5 mm로 결정하고 제작하였다.

3. 복합소재 시험

3.1 인장, 전단 시험

Fig. 2에 보이는바와 같이 복합소재 구조설계를 위한 기초물성 확보를 위한 인장 및 전단시험을 수행하였다. 시험 장비로는 MTS 810 Test Machine, 용량(capacity) 100 kN를 사용하였다. 인장 시험 시험편은 ASTM D 3039 규격에 의하여, 인발 성형품에서 가장자리를 제외하고 0°, 90° 방향의 시편을 각각 5개 이상 채취하였다. 인발방향을 0°, 인발방향의 수직방향을 90°로하고 시편은 unidirectional 유형으로 제작하였다. 시험 속도는 2.0 mm/min 기준으로 탄성계수와 인장강도를 측정하였다^[12].



(a) Tensile test of the glass fiber (0 degree)



(b) Tensile test of the glass fiber (90 degree)

Fig. 2 Experimental setup of tensile test(glass fiber composites)

전단시험 시험편은 ASTM D 5379 규격에 의하여 인장시험과 동일하게 0°, 90° 방향의 시험편을 각각 5개 이상 채취하였다. 시험 속도는 2.0 mm/min 기준으로 탄성계수 및 강도를 측정하였다. 탄성계수는 2축 스트레인게이지(strain Gauge, FCA-5-11-1L, Tokyo) 사용하였으며, ASTM D 3039 규정에 의하여 시험을 통해 확보된 Raw data의 0.002ε ~ 0.005ε(strain) 사이의 응력-변형률(stress-strain) 기울기를 통하여 계산하였다.

3.2 굴곡 시험

굴곡시험의 경우, 단품 물성 시험 및 설계, 해석을 통해 확보된 구조물에 대한 피로시험 수행을 위한 기준이 되는 하중 값을 찾기 위한 목적으로 시행되었으며, ASTM D 790 시험규격 및 장비 사양을 고려하여 제작하였다. 지점(span) 거리 300 mm, 시험종료는 파단이후의 하중표면 관찰 및 최대하중의 40% 도달 시 시험을 종료하고, 시험 속도는 5 mm/min로 진행하였다. 굽힘시험 장비로는 MTS-64.305 Test Machine, 용량(capacity)은 300 kN 장비를 사용하였다^[13].

3.3 피로 시험

굴곡시험을 통해 하중범위를 설정하고, Fig. 3에 보이는바와 같이 이에 대한 내구성을 평가하기 위한 피로시험 조건은 다음과 같다. ASTM E 466 규격을 참조 하여 굽힘시험과 동일하게 지점거리를 300 mm로 설정하고 3점 굽힘하중을 반복해서 가하는 방식을 채택하였다. 3점 굽힘에 의한 피로 시험 시 부재의 굽힘 파손은 제품 높이의 5%이상 변형(변위) 변화 발생, 표면 및 내부 파손이 있을 시 시험 종료(fail)로 정의하고 피로시험을 실시하였다. 굽힘하중이 반복되는 형태로서, 하중 비(σ_{min}/σ_{max}:R)는 0.1로 설정하였다^[14].

피로시험 장비는 MTS-810 Testing Machine, 유압액추에이터(Hydro Actuator) 구동방식으로, 용량(capacity) 100 kN 장비를 사용하였다. 시험 주파수는 반복하중에 의한 시험편 내부의 온도상승을 무시할 수 있는 5 Hz로 선정하였다^[14]. 하중조건은 ASTM D 790 규격에 의하여 수행한 굴곡강도 결과 값을 기준으로 약 40~70% 범위 내에서 피로시험을 진행하였다. 복합소재 프레임의 피로한도는 10⁶사이클(cycle) 기준으로 설정하였다.

3.4 피로수명 특성 평가

시험에서의 내구 강도를 실제 부품의 내구 강도로 적용하고, 사용하기 위한 대안이 요구되고 있다. 식 (1)과 같이 여러 개의 보정계수를 도입함으로써 가능하며, 각 보정계수는 1보다 작거나 같다.

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S'_e \quad (1)$$

여기서 S_e는 피로 한도에서의 응력, S'_e는 실험을 통해 찾아낸 내구한도, k_a는 표면계수, k_b는 크기계수, k_c는 하중계수, k_d는 온도 계수, k_e는 기타 영향들을 모두 포함한 혼합 계수이다. 이들 매개변수들에 대한 적절한 값의 선정은 피로 해석의 성공 여부를 결정짓는다. 많은 계수들이 끼치는 민감한 영향 때문에, 실제 환경에서 피로시험을 수행하는 것만이 반복 주기 하중을 받는 부품에 대한 신뢰성 있는 설계를 보장한다.

구조물의 특성상 k_b 크기계수 효과에 중점을 두어 크기계수에 관한 많은 실험적인 예로 인하여, k_b는 다음과 같이 정의된다^[17].

$$k_b = 1.0 (d \leq 8mm) \quad (2)$$

$$k_b = 1.189d^{-0.097} (8mm \leq d \leq 250mm) \quad (3)$$

$$0.0766d_{eq}^2 = 0.05bh \quad (4)$$

여기서 d는 부재의 직경이며, 시험에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 복합소재 인발제품 사각단면에 대한 등가 직경 d_{eq}를 구할 수 있다.

교번(alternating) 또는 양진 응력을 받는 부품의 N번째 사이클에서 피로 강도 S_f를 구하기 위해, 다음 식을 이용하여 S-N선도 곡선 맞춤(curve-fit)을 할 수 있다.

$$S_f = aN^b \quad (5)$$

$$\text{여기서, } a = \frac{(0.9S_{ut})^2}{S_e} \quad (6)$$

$$b = -\frac{1}{3} \log \frac{0.9S_{ut}}{S_e} \quad (7)$$

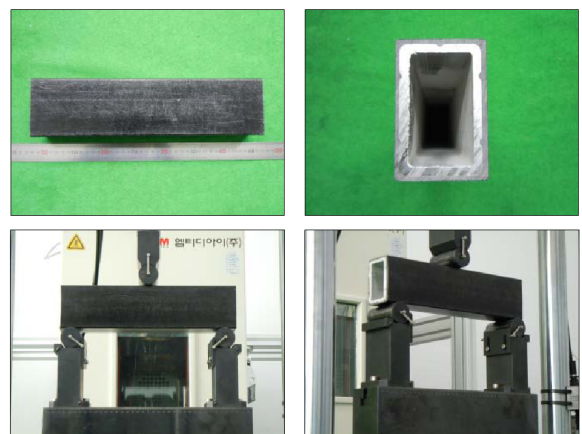


Fig. 3 Experimental setup and specimen of bending test

위 식에서 피로응력 S_e 대신에 시편의 내구한도인 S'_e 는 예측할 수 있으며, 진폭 σ_a 를 가진 양진 응력에 상응하는 수명 주기 수는 다음 식으로 계산된다.

$$N = \left(\frac{\sigma_a}{a}\right)^{1/b} \quad (8)$$

평균응력 σ_m 이 0이 아닐 때, 사이클 하중은 변동응력 (functioning stress)으로 분류되며 이러한 경우 가장 많이 사용되는 식은 goodman 수정 관계식이다.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n} \quad (9)$$

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})}{2} \quad (10)$$

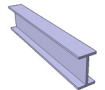
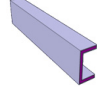
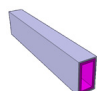

$$\sigma_a = \frac{(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}{2} \quad (11)$$

여기서, σ_{\max} 와 σ_{\min} 는 최대 및 최소응력, S_{ut} 는 재료의 극한 인장 강도이고 n은 설계를 위한 안전 계수이다. 이 관계식은 파괴 수명을 예측하는데 유용하다. 만약 파괴 기준으로 항복에 더 관심이 있으면 soderberg 관계식을 사용해야 하고, 이를 위해 극한 인장강도 S_{ut} 대신 항복강도 S_{yt} 로 대체하면 된다^[18].

3.5 복합소재 프레임 설계, 해석

인장, 전단 및 기초물성 평가를 통하여 확보된 결과 값을 바탕으로, 복합소재 프레임에 대한 단면설계를 진행하였다. 설계인자로는 단면형상 및 두께변화에 대하여 독립변수로 정하고, Table 1에서 보이는바와 같이 설계인자를 나타내었다.

Table 1 Design variable of composite frame

| No. | Design | Thickness | Material |
|-----|---|--------------------|---|
| 1 |  | 4.5 mm (2.4 Kg) | steel (reference) |
| 2 |  | 8 mm (1.15 Kg) | in:aluminum (5 mm) out:composites (3 mm) |
| 3 |  | 8 mm (1.6 Kg) | in:aluminum (5 mm) out:composites (3 mm) |
| 4 |  | 7 mm (1.47 Kg) | in:aluminum (5 mm) out:composites (2 mm) |

시험편의 외관 사이즈는 56 mm × 86 mm × 340 mm(폭*높이*길이), 굽힘하중과 동일하게 높이 방향으로 하중이 인가되는 구조이다. 단면두께는 기존 스틸(steel) 프레임 대비 동등수준의 강성을 보이는 두께를 찾기 위함이고, 단면형상은 내부와 외부의 소재선정에 따른 경량화를 고려하기 위함이다. 해석조건으로 프레임 형상 및 두께에 대한 상대비교를 위하여 한쪽 고정하고, 반대쪽 끝단에 하중(500 N)을 가하는 외팔보 형태의 해석을 진행하였다. 해석프로그램으로는 Nastran FX (midas) 사용하여 진행하였다. 메시(mesh)는 육면체(hexa-mesh)로 하였으며 메시 치수는 5 mm이다. 메시 치수는 수렴되는 값의 95%로 설정하여 해석을 수행하였다.

4. 복합소재 해석 및 시험평가

4.1 소재별 시편물성 평가

복합소재 프레임 해석을 위해 유리섬유(glass fiber) 및 알루미늄 소재에 대한 물성평가를 각각 진행하였다. Table 2에 보이는바와 같이 유리섬유의 경우 인발성형 금형에 유리섬유만을 성형하여 확보된 심재의 인장 및 전단시험을 통해 물성 값을 확보하였다. Fig. 4는 인발소재 인장시험을 통해 얻은 S-S Curve임을 확인 할 수 있다. 0도 방향의 경우, 약 500 MPa의 인장강도를 나타내며 평균 값을 기준으로 약 10%의 오차 범위를 보였다. 복합소재가 일반적으로 약 20% 가까운 편차를 보이는 경우와 비교하여 신뢰도가 높

Table 2 Results of specimen test (pultrusion composites)

| | |
|--------------------------------|-------------|
| Specific Gravity | 1.7 ~ 1.9 |
| Tensile Modulus(E_1 , GPa) | 28 ~ 34 |
| Tensile Modulus(E_2 , GPa) | 9.5 ~ 10.5 |
| Shear Modulus(G_1 , GPa) | 3.85 ~ 4.0 |
| Shear Modulus(G_2 , GPa) | 3.25 ~ 3.45 |
| Poisson's ratio (ν_{12}) | 0.28 ~ 0.30 |
| Poisson's ratio (ν_{23}) | 0.11 ~ 0.12 |

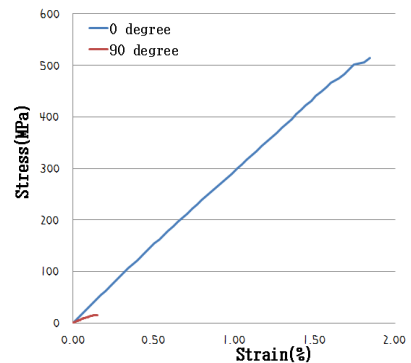


Fig. 4 S-S Curve of tensile test (pultrusion, 0/90degree)

은 결과임을 확인 할 수 있었다. 여기에서 E_1, G_1 는 0도 방향의 탄성계수, E_2, G_2 는 90도 방향의 탄성계수에 대한 물성 값이다.

90도 방향의 경우, 인장강도가 16 MPa로 약 5%의 오차범위를 보이며 0도 방향의 인장시험 대비 상대적으로 낮은 오차범위를 나타냄을 확인할 수 있었다. 이는 0도 방향은 인발 성형의 특성상 섬유 직진도 확보가 어려워 섬유방향의 기계적 물성차이를 수반하지만, 90도 방향의 경우 섬유보다 수지에 대한 영향이 지배적이어서 시험 값의 편차를 낮추는 역할을 했을 것으로 판단된다.

알루미늄 소재(Al6061) 물성은 탄성계수 69 GPa, Poisson's ratio 0.33 이며, 이를 통해 복합소재 프레임의 단면형상 및 두께를 결정하는 해석 자료로 활용되었다. 추가적으로 두 이종 재료간 전단응력은 75 MPa로 층간분리에 대한사항을 고려하였다.

4.2 이종재료 복합소재 프레임 해석

Table 1에 보이는 설계조건에 따라 이종재료 복합소재 프레임 단면 설계를 위하여 해석을 수행하였다. 우선적으로 변형량을 기준으로 형상에 대한 결정을 하고, 알루미늄과 복합소재의 두께조합에 대하여 평가하고자 하였다. Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 변위 (deformation) 및 응력(stress) 부분에서 No.1~2의 형상대비 No.3~4번의 변위 및 응력이 낮게 분포되는 것을 확인할 수 있다. 이 결과를 바탕으로 경량화 및 구조안전성 확보를 위하여 No.3~4

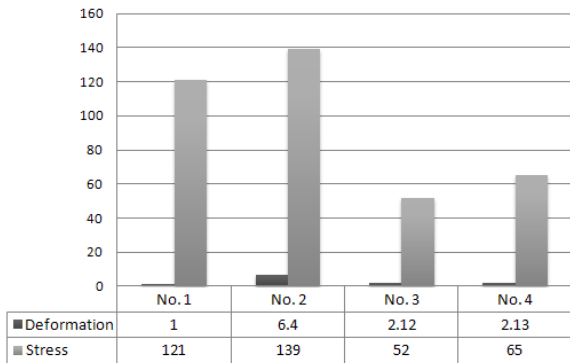
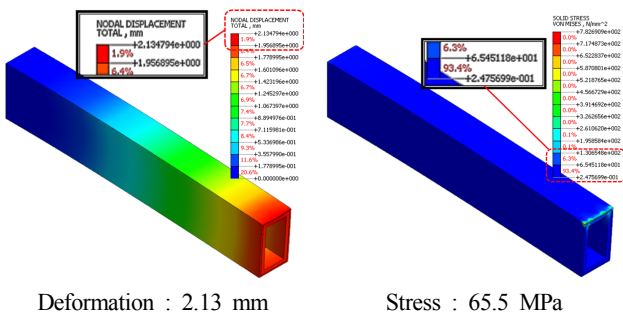


Fig. 5 Analysis result of composite frame



Deformation : 2.13 mm Stress : 65.5 MPa

Fig. 6 Deformation and stress of design No.4

번의 형상을 선택할 수 있었다. 여기에서 No.3은 외곽에 감싸지는 복합소재 두께가 3 mm, No.4는 복합소재 두께가 2 mm로 내부 알루미늄 두께는 동일하고, 외부 유리섬유복합소재 두께만 상이하다.

No.3~4의 결과 값에서 두 조건의 변위 차이는 0.01 mm로 미비하며, 응력은 안전계수 측면에서 두 조건 모두 충분한 것으로 판단되었다. 추가적으로 두 이종재료(알루미늄, 복합소재) 사이의 전단응력 75 MPa에 두 조건 모두 만족함을 확인할 수 있었다. 이에 프레임 경량화 및 경제성 측면에서 No.4를 통해 프레임을 제작하는 것으로 설계안을 결정하였다. Fig. 6은 No.4의 변위와 응력에 대한 해석 결과를 나타내고 있다.

4.3 복합소재 프레임 굽힘시험 및 피로시험 평가

해석을 통해 결정된 No. 4 설계안에 대하여 인발성형 공정을 통해 시제품을 제작하였다. 3점 굽힘 시험을 진행하였고, 굽힘 시험을 통해 확보된 하중(load)값 을 고려하여 피로시험 하중 데이터를 설정하고자 하였다.

Fig. 7는 3점 굽힘 시험결과를 나타내며, 지점거리 300 mm에서 약 104 kN의 하중 값을 보이고, 여기에서 확보된 굽힘하중에 대한 값을 기준으로 약 40~70% 하중 범위 내에서 피로시험 하중 값을 설정하였다. 피로시험은 굽힘시험과 동일한 지점거리에서 진행하였으며, 굽힘시험 특성상 압축-압축 하중이 반복되는 시험조건으로 진행하였다. 피로시험을 통해 Fig. 9~10에서 최대하중과 최대진폭하중에 대한 각각의 F-N선도를 도출하였다.

식 (12)은 Fig. 9의 피로시험 결과 값을 최대 하중 및 피로수명에 관한 로그(log)함수로 표현한 것이다. 반면, 식 (13)은 Fig. 10에 관한 함수로 압축-압축에 의한 피로 실험 결과 Fig. 9를 압축-인장에 대한 결과 값으로 즉, 평균하중을 0 kN로 조정된 진폭 하중 (amplitude force) 으로 변환하여 표현한 것이다.

이 결과 값을 통하여, 10^6 사이클을 만족하는 최대 하중은 최대 굽힘 하중 대비 약 40% 수준인 43.5 kN 임을 확인할 수 있었다. 또한 비교적 높은 하중에서의 피로시험 결과가 낮은 하중 시험 결

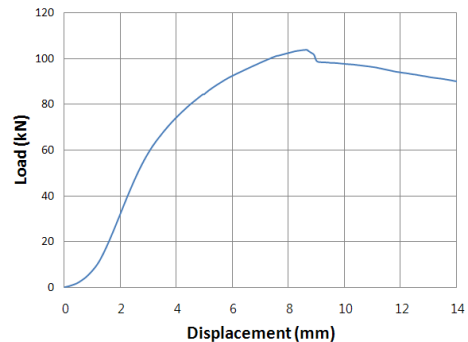


Fig. 7 F-D Curve of bending test (composite frame)

과 대비 편차가 큰 것을 확인할 수 있었다.

$$\log(F) = -0.138 \cdot \log(n) + 2.467 \quad (12)$$

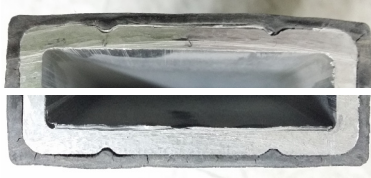


Fig. 8 Specimen after fatigue test (Load, 70 kN)

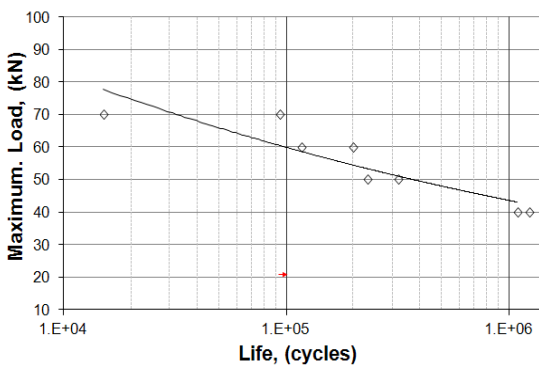


Fig. 9 F-N curves for pultrusion frame (Maximum, Force)

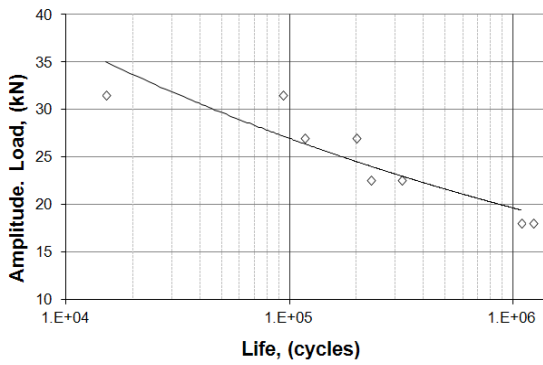


Fig. 10 F-N curves for pultrusion frame (Amplitude, Force)

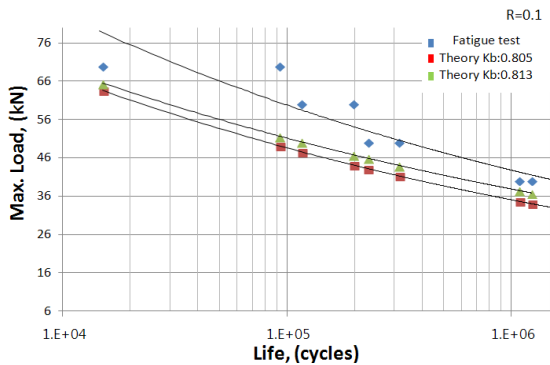


Fig. 11 Comparison of experiment with theoretical calculations

$$\log(F) = -0.138 \cdot \log(n) + 2.120 \quad (13)$$

Fig. 11은 피로시험(fatigue test)을 통해 얻어낸 데이터와 식 (2~11)에 적용하여 크기계수(k_b)에 대하여 수치적으로 풀어낸 수치 결과 데이터를 바탕으로 추세 선을 나타내어 비교한 것으로, 일반적인 피로거동의 경우처럼 낮은 하중영역에서 실험값과 이론값이 비슷한 거동을 보임을 확인할 수 있었다^[19].

Fig. 11의 추세선 그래프에서 보면 크기계수 k_b 0.813 경우는 이중재료 복합소재의 내부 알루미늄 심재에 대한 등가직경을 바탕으로 구한 값이고, k_b 0.805 경우는 프레임 전체 크기에 대한 등가 직경을 통하여 얻어진 값이다. 이를 통하여, 복합소재 프레임 피로 내구 특성에서 구조적 역할이 큰 내부 알루미늄 구조에 의한 영향이 실제 거동과 더욱 일치하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 8는 피로시험 후 시편사진으로 피로한도를 벗어난 하중영역(43.5 kN 이상)에서 이중재질 계면에서 가장먼저 파괴거동이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

이를 통하여, 크기계수 $k_b=0.813$ 반영 시, 실험값과 이론값을 비교하면 초기 높은 하중 영역을 제외하고 평균적으로 약 6~7% 오차 즉, 93~94%의 신뢰도를 갖는 결과임을 보였다.

5. 결론

상용차에 적용되는 프레임의 경량화 및 구조안전성을 동시에 만족시키기 위하여 알루미늄 심재에 유리섬유를 동시에 인발하는 공정을 통해 성형된 골조에 대한 검증을 수행하고자 하였다.

- (1) 프레임 단면 설계 및 해석을 통해 기존 스틸 두께 4.5 mm 대비 동등한 수준의 응력과 변형을 보이는 알루미늄 5 mm, 유리 섬유복합소재 2 mm가 결정되었다. 이를 통하여 약 2.33 kg/m의 경량화 효과를 도출하였다.
- (2) 선정된 설계안에 대한 시제품이 개발되었으며 이에 대한 피로 내구 특성 검증을 위하여 1차적으로 굽힘시험을 진행하였다. 굽힘시험의 40~70% 하중 범위내에서 피로시험을 진행하였으며, 10^6 회의 무한대수명을 갖는 하중이 43.5 kN임을 증명하였다.
- (3) 피로시험을 통해 확보된 시험값과 이론값과의 비교검증을 통해 k_c 및 k_b 를 검증하고자 하였다. 높은 하중 영역에서는 하중 계수 k_c 의 영향이 크며, 낮은 하중 영역에서는 크기계수 k_b 영향으로 결과 값의 차이가 나타남을 예측 할 수 있으며, 크기계수 k_b 는 상대적으로 강성이 우수한 알루미늄 심재의 크기계수만을 고려 했을때 이론값과 약 93~94%의 신뢰도를 보임을 확인하였다.

- (4) 피로시험 후 이종재료 시험편을 통해 피로한도를 벗어난 하중 영역에서 계면 분리가 두드러지는 것을 확인할 수 있었다. 추후에, 인발성형을 통해 개발된 이종재료 복합소재 프레임의 피로강도 향상을 위하여 이종 재질간 계면 결합력을 향상시킬 수 있는 구조와 표면처리 방법에 대한 연구를 진행하고자 한다.

후 기

본 논문은 산업통상자원부 호남광역경제권선도산업을 통해 연구된 결과임.

References

- [1] Lee, H. S., Kim, E. S., Oh, J. H., Kim, D. G., Lee, J. Y., Kang, S. J., 2013, Reliability Evaluation on Pultrusion Composite Sandwich Panel, KSMTE 22:3 414-420.
- [2] Hwang, T. W., Choi, C. H., You, K. M., 2006, Development of Plastic Tailgate Panel with Thermoplastics, Spring Conference of KSAE 2031.
- [3] Kim, K. S., Yoo, J. S., Ahn, J. M., Jang, Y. S., 2004, Post-buckling Failure Characteristics of Composite Stiffened Panels, KARI 3:1 213-221.
- [4] Nam, H. W., Pyun, H. J., Lee, Y. T., 2000, Characteristics of Composite Body Panel, Spring Conference of KSAE 109-114.
- [5] Jeon, T. Y., Koo, J. S., Kim, B. W., 2009, Study on the deviation of Fatigue Properties of Engineering Plastics for Fatigue Analysis, KSAE 2009 Annual Conference 2628-2632.
- [6] Jeon, K. W., Shin, K. B., Kim, J. S., 2011, An Evaluation of Fatigue Life and Strength of Lightweight Bogie Frame Made of Laminate Composites, KSME 35:8 913-920.
- [7] Park, S. O., 2004, Fatigue Life Prediction of FRP Composites under Uniaxial Tension and Pure Torsion Loadings, KSMTE 13:6 64-73.
- [8] Kim, E. S., 2012, An Evaluation of the Fatigue Properties for External Panel Using Low Density SMC, KSMTE 21:5 830-835.
- [9] Houston, D. Q., Hunt, J., Jiang, C. H., 2011, Fatigue Performance of SMC Composite Material in the Different Environmental Damage and Temperature Conditions, 2011 Automotive Composites Conference of SPE 1-10.
- [10] Corigliano, A., Rizzi, E., Papa, E., 2000, Experimental characterization and numerical simulations of a syntactic-foam/glass-fiber composite sandwich, Composites Science and Technology 60:11 2169-2180
- [11] Lauraitis, K. N., 1981, Fatigue of Fibrous Composites Materials, ASTM STP 723 291-311.
- [12] ASTM, 2000, Standard Test Method for Tensile Properties for Polymer Matrix Composite Materials, ASTM D3039
- [13] ASTM, 2002, Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Material, ASTM D 790-03
- [14] ASTM, 2002, Standard Test Method for Conducting Force Controlled Constraint Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials, ASTM E 466-96
- [15] ASTM, 1988, Damage Development during Multiaxial Fatigue of Notched and Unnotched Specimens, ASTM STP 942
- [16] ISO, 2003, Metallic Materials - Fatigue Testing - Statistical Planning and Analysis of Data, ISO 12107 Geneva
- [17] Julie, A., Bannantine, Jess, J., Comber, James, L., 1990, Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall
- [18] Vince, Adams, Abraham, Askenazi, 2009, Building better products with finite element analysis, Midasit
- [19] Schijve, J., 2009, Fatigue of Structures and materials, Springer Verlag 373-380.