

저비중 SMC 외장패널의 피로특성 평가

김은성*

(Manuscript received: Jul, 15, 2012 / Revised: Aug, 21, 2012 / Accepted: Sep, 13, 2012)

An Evaluation of the Fatigue Properties for External Panel Using Low Density SMC

Eun-sung Kim*

Abstract

A research for application of LDSMC(Low Density Sheet Molding Compound) composite is in progress for lightening the weight. This paper has performed fatigue test and simulation of external panel for Korean commercial vehicle. Before the fatigue test, static test was carried out. From the test, the structural safety was investigated using Goodman diagram. After the static test performance, the fatigue test was conducted at a range of load frequency 5Hz, a stress ratio(R) of 0.05 and an endurance limit of 10^6 to obtain the S-N curve. The S-N curve is applied to the fatigue analysis of the external panel assembly. The result of FEM analysis was in accord with the experimental result within 83% confidence. It showed that the process to set up the safety range of allowable error is required in process of the design and simulation verification.

Key Words : Low density SMC(저비중 열경화성수지), External panel(외장패널), Fatigue test(피로시험), S-N curve(응력-수명선도), Finite Elements Method(FEM, 유한요소법)

1. 서론

최근 전 세계 자동차 업체들의 개발 경향은 모듈화, 경량화, 지능화를 말할 수 있다. 이중에서도 현재 개발되고 있는 많은 자동차 부품들이 대형화 되면서 경량화 및 모듈화로 가고 있다. 환경문제가 사회적 이슈로 대두되면서 대체 연료를 사용하는 차량의 개발이 이루어지고 있고, 또한 고유가 시대에 차량의 연비향상에 박차를 가하고 있는 시점에서 차량의 경량화는 가장 큰 이슈가 되고 있다⁽⁴⁾.

이러한 이유로 복합소재 개발 및 신뢰성 있는 평가를 위한 구조적 검증에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있는 상황이다. 복합재료는 비강도, 비강성이 크고 일반적으로 피로특성이 우수하여 경량화가 요구되는 구조물 제작 시에 설계자로 하여금

설계에 유연성을 가지도록 한다. 차량 개발기간이 짧아짐에 따라 제품의 구조검증 및 내구해석을 통한 내구수명을 예측하기 위한 소재의 피로 물성 데이터를 확보하는 것이 필수적이거나 현재 복합소재에 대한 데이터가 축적되지 못한 실정이다⁽³⁾.

생산성 및 경량화를 동시에 만족시킬 수 있는 저비중 SMC의 경우 일반 SMC 대비 높은 연신율을 갖으며 인장하중보다 굽힘 하중이 지배적인 외장 패널의 경우에 적용 가능성이 높다. 그 밖에 중량 절감 효과뿐만 아니라 내구성 향상 측면에서 우수하여 내구한도 평가를 위한 피로특성 검증이 요구되는 바이다.

본 논문은 우선적으로 일반 SMC 대비 저비중 SMC의 인장, 굽힘 및 피로 물성시험을 통해 물성 데이터를 확보하고, 확보된 데이터를 바탕으로 인장-인장이 반복되는 형태의 피로시험을 수행하였다. 피로시험을 통해 얻은 결과 값을 바탕으로 S-N선

* (재)전주기계탄소기술원 (kes@jmc.re.kr)
주소: 561-844 전주시 덕진구 팔복동 2가 817

도를 도출하였으며, 이를 바탕으로 Goodman Method를 이용하여 저비중 SMC를 적용한 경량 외장 패널의 피로해석을 수행하고 피로수명 예측 및 구조적 검증이 이루어졌다.

2. 저비중 SMC 복합소재 시험

2.1 저비중 SMC 조성

일반 SMC의 경우 열경화성수지(UP:불포화폴리에스터수지)를 기본수지로하고, 다량의 탄산칼슘을 충전제로 첨가한 페이스트와 분쇄된 글라스파이버(chopped glass fiber:이하 G/F)를 보강재로 첨가하여 점도를 향상 시킨 내열성 및 기계적 강도가 우수한 고분자 복합재료를 지칭한다.

Table 1은 경량화 효과 및 구조적 특성을 만족시키기 위한 저비중 SMC 조성으로 충전제 탄산칼슘($CaCO_3$)을 밀도가 낮은 글라스버블(glass bubble:이하 G/B)로 일부 대체함으로써 비중을 1.86에서 1.46로 낮추었으며, 강도가 높은 탄산칼슘 감소에서 오는 강도저하 문제 극복을 위하여 G/F함량을 증가시킨 형태를 보여준다.

2.2 인장 시험, 굴곡 시험

강도나 강성, 내충격성, 밀도 등의 기계적 물성들은 차체 외판으로 쓰일 재료의 선택이나 설계 과정에 중요한 설계 인자이므로, 이러한 기본물성의 평가는 중요한 의미를 가지며 신뢰성 있는 물성 평가가 되어야 한다.

신뢰성 있는 물성 평가를 위하여 원재료는 300×300mm, 3t의 저비중 SMC 평판으로, 시료의 채취는 세 개의 평판으로부터 재료의 성형 시 발생이 우려되는 불 균질한 부분을 피하기 위하여 가장자리 50mm를 제외한 부분에서 각각 3개 이상의 시편을 제작하여 진행하였다. 인장시험의 경우 시험편은 ASTM D 638⁽⁹⁾ 규격에 의하여 시편 Type IV로 제작하였으며, 시험 속도는 5.0mm/min 기준으로 탄성계수 및 인장강도를 측정 하였다. 굴곡 강도 시험의 경우 ASTM D 790⁽¹⁰⁾ 규격에 준하여 Max Strain 5% 도달 시 시험을 종료하고, 시험 속도는 1.3mm/min로 진행하였다. 시험장비로는 인장시험 및 굴곡시험이 동시에 가능한 Instron Testing Machine, Capacity 100kN 장비를 사용하였다.

2.3 저비중 SMC 복합소재의 피로시험

외장 패널에 적용되는 경량 소재 저비중 SMC 복합소재의

Table 1 Low Density SMC Recipe(% by weight)

Resin		Reinforcement	Filler		etc
UP	MgO	G/F	$CaCO_3$	G/B	-
22		35	38		5

피로특성 확인을 위하여 피로시험 조건은 다음과 같다. 인장-압축의 교번하중(alternating Load)이 반복되는 구조물에 복합소재를 적용할 경우 압축 하중에 의한 층간분리(delamination)이 발생될 우려가 있어, 외장 패널에 적용되는 저비중 SMC 복합소재의 피로시험은 인장-인장 하중이 반복되는 형태인 응력비($\sigma_{min}/\sigma_{max}:R$) 0.05로 진행하였다.

피로시험은 Fig. 1과 같이 전기유압식 피로시험기인 MTS 810 만능피로시험기, 용량(Capacity)10kN 장비를 사용하였다. 시험 주파수는 반복하중에 의한 시험편 내부의 온도상승을 무시할 수 있는 5Hz로 선정하였다⁽⁵⁾. 피로시험은 ASTM E 466⁽¹¹⁾ 규격에 의하여 진행되었으며, 하중조건은 ASTM D 638 규격에 의하여 수행한 인장시험 결과 값을 기준으로 약 30~65% 범위 내에서 피로시험을 진행하였다. 피로수명은 복합소재 외장 패널 피로한도인 10^6 사이클(cycle) 기준으로 평가하였다.

2.4 저비중 SMC 복합소재의 피로수명특성 평가

일반적으로, 복합소재의 피로내구주기는 10^6 사이클과 10^7 사이클 사이에서 재료 강도가 안정되며 경험적으로 무한대의 수명을 나타낸다. 시편에서의 내구 강도를 실제 부품의 내구 강도로 사용하기 위한 방안이 요구 된다. 식 (1)과 같이 여러 개의 보정 계수를 도입함으로써 가능하며 각 보정계수는 1보다 작거나 같다.

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S'_e \tag{1}$$

여기서 S_e 는 피로 한도에서의 응력, S'_e 는 시편 내구한도, k_a 는 표면계수, k_b 는 크기계수, k_c 는 하중계수, k_d 는 온도 계수, k_e 는 기타 영향들을 모두 포함한 혼합 계수이다. 이들 매개 변수들에 대한 절한 값의 선정은 피로 해석의 성공 여부를 결정짓는다. 많은 계수들이 끼치는 민감한 영향 때문에, 실제 환경에서 피로 시험을 수행하는 것만이 주기 하중을 받는 부품에 대한 신뢰성 있는 설계를 보장한다.

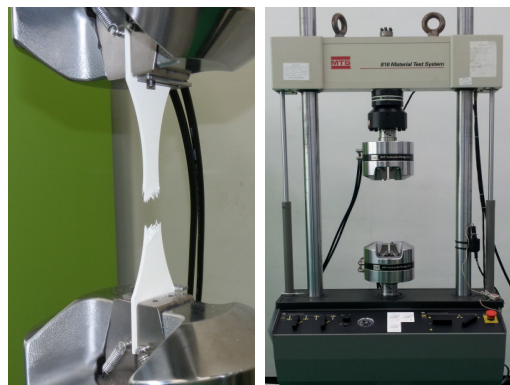


Fig. 1 Equipment and Specimen of Fatigue Test

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

$$S_f = aN^b \quad (2)$$

$$\text{여기서, } a = \frac{(0.9S_{ut})^2}{S_e} \quad (3)$$

$$b = -\frac{1}{3} \log \frac{0.9S_{ut}}{S_e} \quad (4)$$

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.

$$N = \left(\frac{\sigma_a}{a}\right)^{1/b} \quad (5)$$

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

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n} \quad (6)$$

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})}{2} \quad (7)$$

$$\sigma_a = \frac{(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}{2} \quad (8)$$

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.

2.5 저비중 SMC 복합소재의 피로해석 모델 및 조건

피로수명 예측을 위하여 내부 피로해석 소프트웨어(fatigue simulation software)를 이용, 시험을 통해 확보된 S-N 선도를 기준으로 외장 패널 조립 제품의 피로수명 예측 및 평가를 진행하였다.

Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 피로해석에 적용되는 부품은 상용차 외장패널로 구속조건은 외장패널(external panel)과 차체 접촉부위인 패널 외곽 끝단에서 10mm 안쪽(offset) 부위로 설정

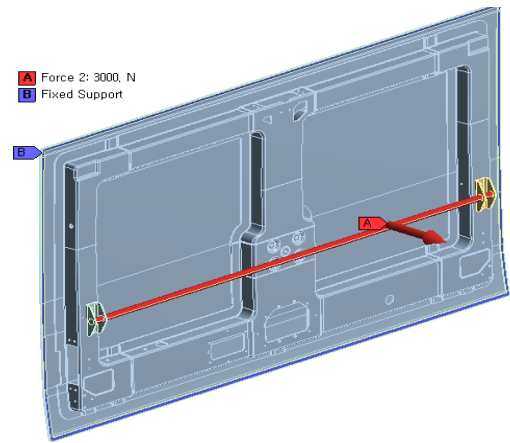


Fig. 2 Analysis constraints of external panel

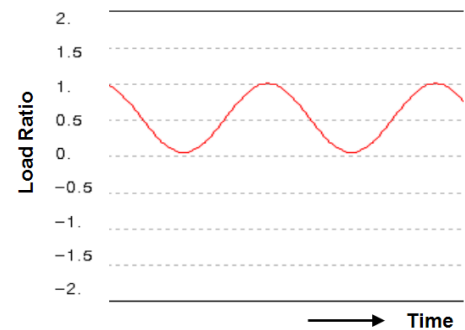


Fig. 3 Load ratio diagram of fatigue simulation

한다. 하중조건은 가이드 힌지를 강체(rigid body)로 설정하고 조립(assembly)제품에 2000N~8000N의 하중을 부여, 피로거동을 파악하고자 하였다. 메쉬(mesh)는 모델링의 수렴영역을 고려하여 요소(element) 약 25만개, 절점(node) 약 13만개를 기준으로 해석 작업을 수행하였다. 조립 제품에 2000N 하중을 가장 낮은 하중으로 부여하는 것은, 실제 도어 반복 개/폐 피로 내구시험 하중조건 $100kg_f \approx 980N$ 에 안전계수를 2이상 확보하고자 설정한 값이다.

Fig. 3은 피로해석 시험조건으로 응력 비(stress ratio) 0.05를 기준으로 설정한 그래프를 보여주고 있으며, 평균 해석 이론(mean stress theory)은 피로시험 데이터와 가장 근사한 값을 보이는 Goodman 수정 관계식을 이용하였다.

3. 저비중 SMC 복합소재 시험평가

3.1 인장, 굽힘 시험 특성평가

Table 2는 일반 SMC의 기계적 물성이며 Table 3과 Table 4는 저비중 SMC 시험결과 값을 보여주고 있다. 저비중 SMC의 시험 결과 인장강도는 일반 SMC대비 낮은 수준인 약 80% 수준이며, 굽힘 강도 및 연신율은 일반 SMC대비 높은 수준의

결과를 기록함을 확인 할 수 있었다.

인장강도의 경우는 일반 SMC대비 충전제(filler) 탄산칼슘 감소로 인해 수지와 G/F간 함침력 감소에서 오는 강도저하로 예상 할 수 있으며, 여기서 나타나는 연신율 증가는 G/F에 의한 영향보다는 수지 및 G/B의 높은 연신율에 의하여 일반 SMC 대비 높은 값을 나타내는 것으로 보인다. 굽힘 강도의 경우 저비중 SMC의 경우가 약 10%이상 높은 결과 값을 보이는 반면 굴곡 탄성계수(flexural modulus)는 약 30%정도 낮은 값을 보이고 있다.

매트 형태로 제작되는 SMC 제품의 경우, 시트(sheet)에 약 25mm 길이로 분쇄되어 함침 되는 유리섬유의 방향이 굽힘 방향으로 강도향상 및 연신율 증가에 도움을 주는 것으로 보인다. 따라서, 이번 연구에서 적용되는 외장 패널이 인장보다는 굽힘

방향이 지배적이므로 저비중 SMC 외장 패널을 적용 할 경우, 비중감소에 따른 중량절감 효과뿐만 아니라 안전성 향상이 기대되는 측면이 있다.

3.2 저비중 SMC 복합재의 피로특성 평가

Fig. 4, Fig. 5는 외장패널 적용 저비중 SMC 복합소재의 인장-인장 피로시험을 통하여 얻은 S-N선도를 최대응력과 최대진폭에 대해 각각 나타낸 것이다.

식 (9)는 Fig. 4의 피로시험 결과 값을 최대 응력 및 피로수명에 관한 로그(log)함수로 표현한 것 이다. 반면, 식 (10)은 인장-인장에 의한 피로 실험 결과 Fig. 4를 인장-압축에 대한 실험 결과 값 Fig. 5로 즉, 평균응력을 0MPa로 조정 한 진폭 응력(amplitude stress)으로 변환하여 표현한 것 이다.

이 결과 값을 통하여, 10^6 사이클을 만족하는 최대 진폭 응력은 약 22.7MPa 임을 확인 할 수 있으며, 식 (10)에 의하여 S-N 선도를 로그 함수로 표현하면 다음과 같다.

Table 2 Mechanical Properties of SMC

Specific Gravity	1.86
Tensile Stress(MPa)	90~110
Tensile Modulus(GPa)	13~14
Flexural Stress(MPa)	150~160
Flexural Modulus(GPa)	11~12

Table 3 Results of Tensile Test(LDSMC)

No	Tensile Stress(MPa)	Tensile Modulus(GPa)
1	86.05	12.72
2	68.33	9.76
3	80.23	11.46
4	80.30	11.47
5	72.64	10.38
6	67.94	9.99
7	81.05	11.58
8	75.83	10.83
Mean	76.50	11.02

Table 4 Results of Bending Test(LDSMC)

No	Flexural Stress(MPa)	Flexural Modulus(GPa)
1	181	8.44
2	170	7.45
3	174	8.11
4	168	8.23
5	166	7.55
6	172	7.50
7	178	7.52
8	162	7.47
Mean	171.4	7.78

Fatigue test result

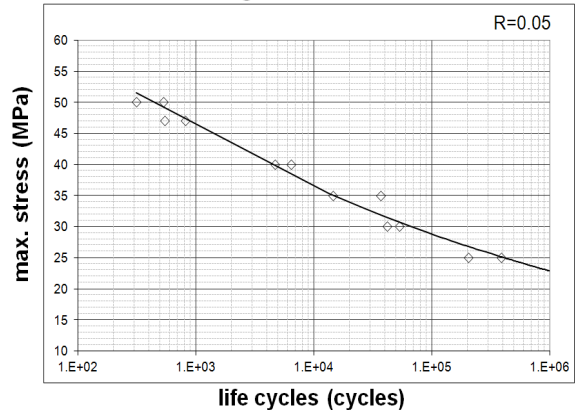


Fig. 4 S-N Curves for Low Density SMC(Max. Stress)

Fatigue test result

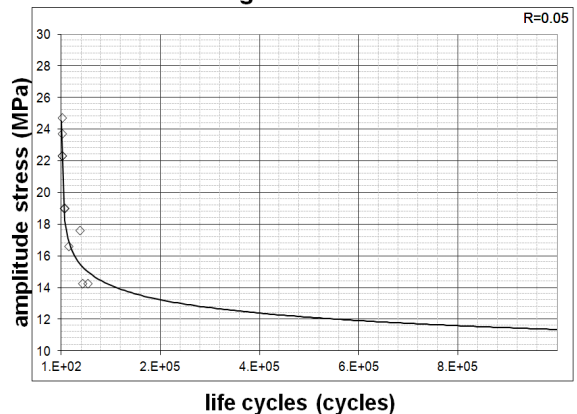


Fig. 5 S-N Curves for Low Density SMC(Amp. Stress)

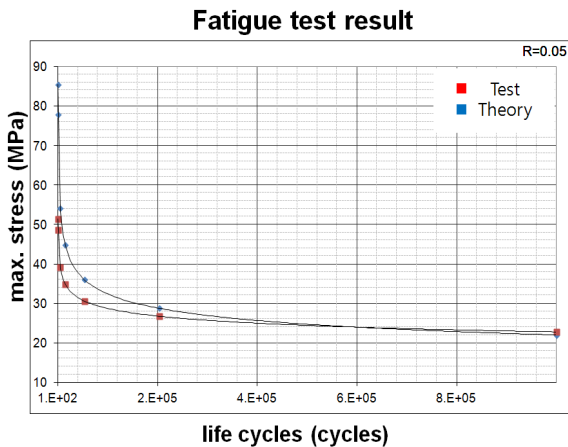


Fig. 6 Comparison of experimental results with theoretical calculations

$$\log(\sigma) = -0.1011 \cdot \log(n) + 1.9633 \quad (9)$$

$$\log(\sigma) = -0.0951 \cdot \log(n) + 1.6278 \quad (10)$$

Fig. 6은 피로시험(fatigue test)을 통해 얻어낸 데이터와 식 (2-4)에 적용하여 수치적으로 풀어낸 수치 결과 데이터를 바탕으로 두 개의 추세 선을 나타내어 비교한 것으로, 일반적인 피로거동의 경우 높은 응력(high stress)영역에서 실험값과 이론값이 비슷한 거동을 보인다⁽²⁾. 반면, 저비중 SMC 복합소재 피로시험 결과는 낮은 응력(low stress) 영역에서 S-N선도 그래프의 경향이 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

초기 높은 응력 영역에서는 피로수명의 가장 큰 영향을 미칠 것으로 파악되는 하중계수 k_c , 온도 계수 k_d 의 영향으로 결과값의 차이가 나타남을 예측 할 수 있으며, 이는 저비중 SMC 정적강도 편차에 의한 고유성질의 영향으로 파악 된다. 낮은 응력 영역에서는 결과 값의 차이가 미비하여 보정계수 중 하중계수 k_c 제외하곤 온도 계수 k_d 영향에 의하여 그 결과 값의 차이가 나타나는 것으로 예측할 수 있으며, 이는 시험 주파수는 반복하중에 의한 시험편 내부의 온도상승을 무시할 수 있는 5Hz로 선정한 것에 기인한다⁽⁵⁾.

실험값과 이론값을 비교하면 평균적으로 약 17% 오차 즉, 83%의 신뢰도를 갖는 결과임을 확인할 수 있다. 이를 통하여 제품 설계 시, 피로내구 안전계수를 확보하여 제품을 검증하는 과정이 필요함을 확인하였다.

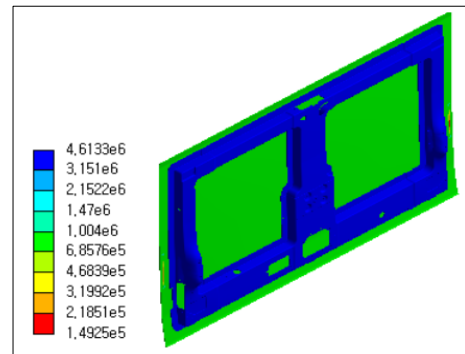
3.3 외장 패널의 피로수명 예측 및 평가

Fig. 7(a), (b)는 외장 패널 피로해석 결과로서, 3000N의 하중이 작용했을 때 피로수명 및 안전계수 결과를 보여주고 있다. 2000N~2100N 하중이 작용했을 때 10^6 사이클을 만족하는 결과를 확인할 수 있었다. 시험을 통해 확보된 데이터를 가지고

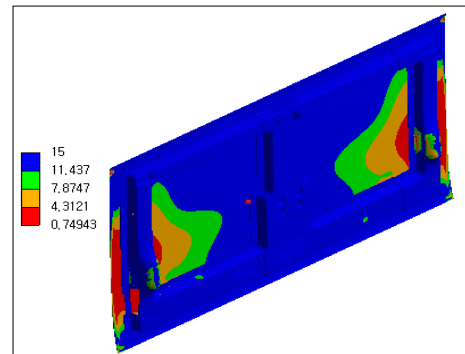
해석 검증한 결과 피로수명을 예측할 수 있었으며, 최종적으로 검증된 제품을 A사 도어 반복 개/폐 피로내구시험에 의뢰한 결과 10^6 사이클을 만족하는 시험결과를 확인 할 수 있었다. 이는 피로시험 및 피로해석과정의 신뢰성을 입증 하는 결과이다.

Fig. 8은 하중별(2000N~8000N) 외장패널의 피로해석결과 값을 나타내며, 식 (11)은 결과 값을 하중에 대한 힘과 수명 (F-N)에 대한 선도를 로그 함수로 표현한 것이다.

$$\log(F) = -0.189 \cdot \log(n) + 4.4545 \quad (11)$$



(a) Life Cycle of Fatigue Simulation



(b) Safety Factor of Fatigue Simulation

Fig. 7 Results of Fatigue Simulation(3,000N)

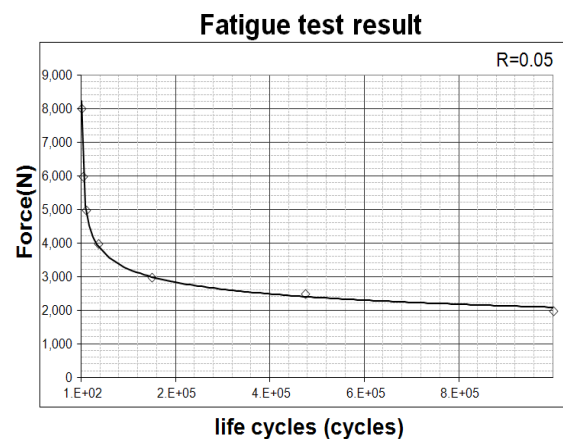


Fig. 8 Fatigue Simulation Data of External Panel

4. 결론

외장 패널에 적용되는 저비중 SMC의 인장, 굽힘, 피로시험을 통하여 확보된 데이터를 검증함으로써, 피로수명을 예측하고자 하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 외장 패널에 적용된 저비중 SMC 복합소재의 정적 강도의 편차는 소재의 고유성질로 금속재료 대비 편차가 큼을 확인할 수 있었으며, 피로시험 결과에도 영향을 미침을 확인하였다.
- (2) 피로시험을 통해 얻은 데이터를 통하여 높은 응력(high stress) 영역에서는 보정계수 중 하중계수와 온도계수의 영향이, 낮은 응력(low stress) 영역에서는 보정계수 중 온도계수의 영향에 의하여 그 결과 값의 차이가 나타나는 것으로 예측할 수 있었다.
- (3) 실험값과 이론값을 비교하면 평균적으로 약 17% 오차 즉 83%의 신뢰도를 갖는 결과임을 확인할 수 있었으며, 이를 바탕으로 제품 설계 및 해석 검증과정에서 오차범위를 안전계수로 확보 하는 과정이 필요함을 보여준다.
- (4) 피로시험을 통해 파악된 S-N선도를 바탕으로 피로해석 검증을 통하여 2000N 하중이 작용했을 시 10^6 사이클의 피로수명을 예측할 수 있었으며, 실차 시험의뢰결과 동일하게 만족하는 결과를 얻어 신뢰성 있는 결과 값을 입증하였다.

References

- (1) Fish, J., and Belytschko, T., 2007, *A First Course on Finite Elements*, Wiley, New York.
- (2) Schijve, J., 2009, *Fatigue of Structures and materials*, Springer Science Business Media, Netherlands, pp. 373~380.
- (3) Adams, V., Askenazi, A., 2010, *Building Better Products with Finite Element Analysis*, pp. 41~54.
- (4) Nam, H. W., Pyun, H. J., and Lee, Y. T., 2000, "Characteristics of Composite Body Panel," *KSME*, Vol. 1, No. 1, pp. 109~114.

- (5) Hwang, T. W., Choi, C. H., and You, K. M., 2006, "Development of Plastic Tailgate Panel with Thermoplastics," *Spring Conference of KSAE*, pp. 2031.
- (6) Jeon, T. Y., Koo, J. S., and Kim, B. W., 2009, "Study on the deviation of Fatigue Properties of Engineering Plastics for Fatigue Analysis," *KSAE 2009 Annual Conference*, pp. 2628~2632.
- (7) Jeon, K. W., Shin, K. B., and Kim, J. S., 2011, "An Evaluation of Fatigue Life and Strength of Lightweight Bogie Frame Made of Laminate Composites," *KSME*, Vol. 35, No. 8, pp. 913~920.
- (8) Park, S. O., 2004, "Fatigue Life Prediction of FRP Composites under Uniaxial Tension and Pure Torsion Loadings," *KSMTE*, Vol. 13, No. 6, pp. 64~73.
- (9) Houston, D. Q., Hunt, J., and Jiang, C. H., 2011, "Fatigue Performance of SMC Composite Material in the Different Environmental Damage and Temperature Conditions," *2011 Automotive Composites Conference of SPE*, pp. 1~10.
- (10) Talreja, R., 1981, *Fatigue of Fibrous Composites Materials*, ASTM STP 723, Philadelphia, pp. 291~311.
- (11) ASTM, 1995, *Standard Test Method for Tensile Properties for Plastics*, ASTM D 638-93, American Society for Testing and Materials.
- (12) ASTM, 2002, *Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Material*, ASTM D 790-03, American Society for Testing and Materials.
- (13) ASTM, 2002, *Standard Test Method for Conducting Force Controlled Constraint Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials*, ASTM E 466-96, American Society for Testing and Materials.
- (14) ISO, 2003, *Metallic Materials - Fatigue Testing - Statistical Planning and Analysis of Data*, ISO 12107, International Organization for Standardization, Geneva.