

굽힘 하중하의 고장력강 용접 연결부의 피로 평가

이명우* · 김윤재* · 박준협**†

* 고려대학교 기계공학과, ** 동명대학교 메카트로닉스공학과

Fatigue Assessment of High Strength Steel Welded Joints Under Bending Loading

Myeong-Woo Lee*, Yun-Jae Kim* and Jun-Hyub Park**†

* Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ.,

** Dept. of Mechatronics Engineering, Tongmyong Univ.

(Received February 20, 2014 ; Revised August 6, 2014 ; Accepted August 18, 2014)

Key Words: Fatigue Bending Test(피로 굽힘 시험), Welded Specimen(용접 시편), B10 Life(B10 수명), High Strength Steel(고장력강), Stress Concentration(응력 집중), FEM(유한요소법)

초록: 본 연구에서는 자동차 서스펜션 구조에 일반적으로 사용되는 용접부 형상에 대하여 굽힘 하중에 의한 피로수명을 예측할 수 있는 절차를 개발하였다. 이종 재료로 이루어진 실제 제품 용접 연결부의 피로수명 예측을 위해, 복잡한 형상의 제품을 단순화한 용접 시편을 설계하고 이에 대한 굽힘 피로 시험을 진행한 후 모멘트-피로수명(M-N) 선도를 제시하였다. 응력 집중에 의한 영향을 분석하기 위해 시편의 형상을 모델링 한 후 정적 하중에 대한 유한요소해석을 수행하여 균열 발생부의 응력을 구하고 응력-피로수명(S-N) 선도를 제시하였다. 유한요소해석을 통해 구한 응력과 이론 계산을 통해 구해진 응력을 이용하여 응력집중계수를 계산하였고, 응력집중부의 피로평가 방법 개선을 위해 보편적으로 사용되는 피로노치계수 평가법과 굽힘 피로 시험 결과를 비교 검토하였다. 그 결과, 이종 재질 용접 연결부의 정확한 피로 수명평가를 위해서는 기하형상을 고려한 피로노치계수 평가 분석뿐만 아니라 두 소재의 맞대기 용접 시편에 대한 피로 시험을 수행해 주어야 할 것으로 판단된다.

Abstract: In this study, a fatigue assessment method for vehicle suspension systems having welded geometries was established under a bending loading condition. For the fatigue life estimation of the actual product's welded joints made of different steels, bending fatigue tests were performed on welded specimens with a simplified shape for obtaining the moment-fatigue-life plot. Further, geometry modeling of the simplified welded specimens was conducted. Results of finite element analysis were used to obtain the stress-fatigue-life plot. The analysis results were also used to calculate the stress concentration factors for notch-factor-based fatigue life estimation. The test results were compared with results of the general notch-factor-based fatigue life estimation for improving fatigue assessment. As a result, it was concluded that both the welded fatigue tests and the notch-factor-based fatigue life estimation are necessary for accurate fatigue assessment.

1. 서론

용접기술의 발달로 인한 작업의 편이성과 강도 증진 및 생산자동화 용이성으로 인해 오늘날 많은 분야에서 구조물 간의 용접 연결을 많이 활용하고

있다. 특히 자동차 산업에 있어서 차량 경량화 경향으로 인해 용접 연결 방식에 관한 많은 수요가 존재한다. 그러나 용접연결 부에는 용접 시 발생하는 열 유입과 급속 냉각으로 인한 급속의 미세 구조 변화로 용접부의 물성에 변화를 주고, 용접 시 생성되는 응력불연속부의 영향으로 응력집중이 발생하여 제품의 손상 취약부로 작용하게 된다. 특히 자동차의 주요부품 중 하나인 서스펜션 시스템은 자체의 무게를 지지하고 주행 중 타이어의

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계학술대회 (2014. 2. 26.-28., 제주대) 발표논문임

† Corresponding Author, jhyubpark@korea.com

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

접지 면에서 발생하는 충격을 흡수하여 차량의 안정성을 높여주는 부품으로 차체의 진동에 따른 충격을 일차적으로 받기 때문에 내구성 확보가 중요하다.

서스펜션 시스템은 사용환경조건과 주행 중에 발생하는 복합적이고 반복적인 하중에 의해서 취약부위로부터 하중의 누적에 의한 피로 파손이 발생하게 된다.^(1~3) 서스펜션 시스템의 파손은 차량의 기능적 손실을 초래할 뿐만 아니라 차량 탑승자의 안전에도 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 설계개발과정에서 제품에 대한 충분히 신뢰할 수 있는 피로평가가 이루어져야 하고, 피로 파괴에 영향을 줄 수 있는 인자들에 대한 연구가 필요하다. 또한 차량의 서스펜션 시스템은 복잡한 하중 하에서 사용되기 때문에 다양한 하중 조건에 대한 피로평가가 요구된다.^(4,5)

이와 관련하여 주로 용접부의 잔류응력 및 형상에 따른 응력집중을 고려할 수 있는 Hot-Spot 응력이나 구조응력, 노치변형률 등이 연구되었다.^(6~8) 그러나 사용되는 설계과정 상 복합 하중 조건 및 용접 형상에 대한 정확한 평가에 어려움으로 인해 경험 및 해석을 바탕으로 한 제품 설계 후 실 제품의 피로평가 방식이 주로 적용되고 있으며 이는 제품 개발 시간 및 비용 측면에서 큰 부담으로 작용하고 있다. 따라서 초기 설계 시 적용 가능한 새로운 피로 평가 방법에 대한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 서스펜션 시스템이 받는 주요 하중 모드 중 하나인 굽힘 하중에 대한 용접 연결 부의 피로 수명 평가시험을 진행하고, 이를 응력집중계수를 고려한 피로수명 평가 방법과 비교해봄으로써 제품 설계과정에서의 피로 평가 절차를 개선해보고자 한다.

2. 굽힘 피로 시험

2.1 시편 소재 및 형상

자동차 서스펜션 시스템은 사용 중 계속적으로 큰 하중을 받기 때문에 높은 소성응력 및 파단응력을 가지는 고장력강과 고강도 저합금강을 이용해 제작된다. 따라서 본 연구에서는 실제 제품에 많이 사용되는 JIS 규격의 SPFH 590 소재의 판재와 EN 10149-2 규격의 HSLA 700 소재의 직관을 사용하여 용접 시편을 제작하였다. Table 1, 2에 각 시험소재의 화학 조성 및 기계적 물성을 나타냈다.

실제 서스펜션 제품의 용접 연결부의 형상은 많은 곡면을 포함하는 복잡한 형상을 가지고 있어 피로시험에 적합하지 않는 형상을 가지고 있다.

Table 1 Chemical properties of test materials [wt%]

Mat.	C	Si	Mn	P	S	Mo	Al	B
SPFH 590	≤ 0.15	1.45~1.55	≤ 0.025	≤ 0.003	-	-	-	-
HSLA 700	≤ 0.12	≤ 0.3	≤ 3.1	≤ 0.025	≤ 0.01	≤ 0.5	≤ 0.015	≤ 0.005

Table 2 Mechanical properties of test materials.

Mat.	Young's modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
SPFH 590	205	549	608
HSLA 700	225	730	821

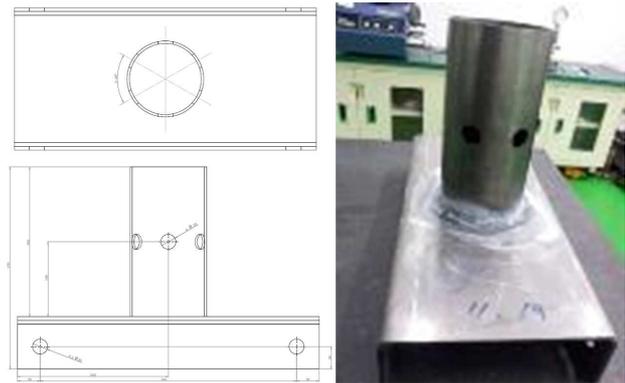


Fig. 1 Structure of suggested simplified specimen

따라서 실제 제품에 사용되는 용접부의 형상을 유지하면서 곡면을 제거하여 단순화 시켜준 용접 시편을 설계하였다. 대부분의 피로 파손은 용접 연결부에서 발생하기 때문에 제품의 다른 부분의 형상은 피로 파손에 큰 영향을 미치지 않는다고 가정하였다. 본 연구에서 설계한 용접 시편의 형상은 Fig. 1과 같다.

시험 시편은 트레일링 암(Trailing arm)을 단순화한 HSLA 700 소재 파이프와 액슬 빔(Axle beam)을 단순화한 SPFH 590 소재의 ㄷ자 강관을 GMAW(Gas Metal Arc Welding) 방식으로 용접하여 제작하였다. 용접조건은 전류 145 A, 전압 18 V이다. 파이프의 치수는 외경 101.6 mm, 두께 3.2 t이고, ㄷ자 강관의 두께는 5.0 mm이다. 용접 연결부의 비드(Bead) 크기는 4~6 mm로 용접방식의 한계로 인해 상당한 편차를 보인다.

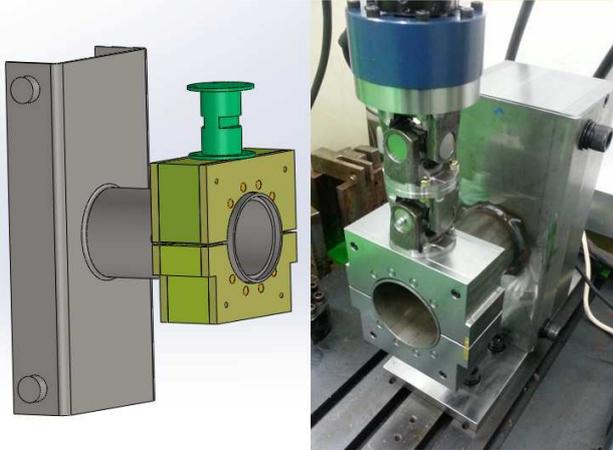


Fig. 2 Fatigue testing machine and jig

2.2 사용 시험기 및 시험 방법

앞에서 설계해준 용접연결 부 시편에 대한 피로 시험을 수행하기 위해 굽힘 시험 지그를 설계하였다. 굽힘 피로시험 시 시험기 구동부에 전단하중이 발생하지 않도록 핀 조인트를 이용해 시편과 시험기를 연결하였고, 그 때의 시험기와 설치된 지그의 형상은 Fig. 2 와 같다. 시험에 사용된 시험기는 2 ton 의 하중용량을 가진 유압식 구동부와 3 ton 의 용량을 가진 하중 센서로 이루어져 있다.

시편 체결 시 시험기가 용접 연결부에 충분한 굽힘 모멘트를 가할 수 있도록 용접 연결부에서 160 mm 간격을 가지도록 연결한다. 단축으로 하중을 적용하여 굽힘 피로시험을 진행하였고 이때의 하중 비는 표준 피로 하중 표기 방식으로 사용되는 $R = -1$ 인 완전교변응력 조건을 사용하였다. 시험 데이터 반복 하중의 속도는 시험기 유압식 구동부의 속도를 감안하여 2 Hz 를 사용하였다. 적용하중은 사용 소재 중 낮은 인장강도를 보이는 SPFH 590 소재의 인장강도의 75 %에서 시작하여 감소시켜 가면서 하중제어 방식으로 시험하였다.

3. 용접 연결부 유한요소해석

3.1 용접 연결부 형상 모델링

굽힘 피로 시험 후 시편의 크랙이 발생한 지점의 중심부 비드 크기를 측정하여 응력해석을 위한 모델링 시 사용하였다. 4 ~ 6 mm 의 용접 비드 길이 중 상대적으로 높은 응력집중을 발생시키는 4 mm 크기를 선정하여 비드를 모델링 하였고 용접 비드의 형상은 단일 반경을 가지게 설계하였다 (Fig. 3). 이후 상용 프로그램인 Solidworks 와 Hypermesh 를 사용하여 유한요소해석을 위한 모델링 작업을 수행하였다. 하중 방향에 따른 굽힘 응

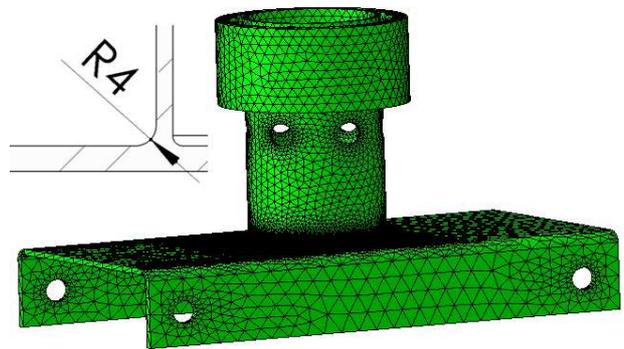


Fig. 3 Welded specimen modeling

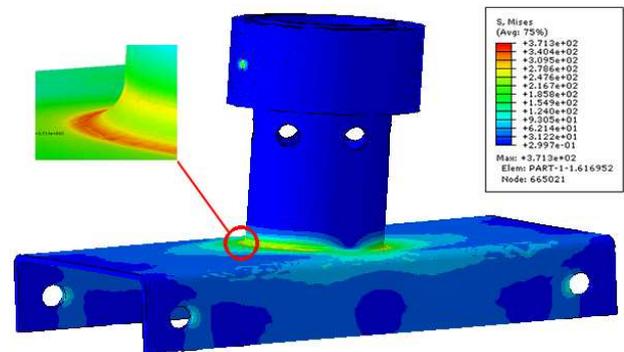


Fig. 4 Finite method analysis result

력을 고려하기 위하여 Solid 요소인 C3D10 요소를 사용하였고, 두께 방향으로 3 개 이상의 요소를 가지도록 하였다. 시험기의 지그 형상에 따른 영향을 고려하기 위하여 시편 접촉부의 형상을 같이 만들고 contact-pair 조건을 사용하였다. 유한요소해석에 사용된 총 요소의 수는 204,275 개이다. 유한요소해석 시 사용한 재료의 물성은 용접 전 소재의 물성으로 Table 1 에서 나타냈다. 용접부의 물성은 보수적 평가를 위해 두 사용 소재 물성의 중 낮은 물성을 사용하였고, 용접 시 발생하는 열 유입에 의한 물성열화는 고려하지 않고 해석을 진행하였다.

3.2 용접 연결부 응력해석

용접 연결부 형상에 따른 응력집중을 고려한 작용 응력 계산을 위하여 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 를 사용해 응력해석을 수행하였다. 모델링해준 시험기 지그 형상에 굽힘 피로시험 하중과 동일한 하중을 부가하여 해석을 수행하였고, 이 때 손상 지점에서의 응력을 작용 응력으로 정의하였다. 응력해석 결과 시험결과와 동일하게 낮은 항복 응력을 갖는 SPFH 590 판재 부분의 용접 비드 끝 단에서 최대응력이 발생하였다. 굽힘 시험 하중에 의해 발생하는 최대 응력은 두 소재



Fig. 5 Crack location of the welded specimens.

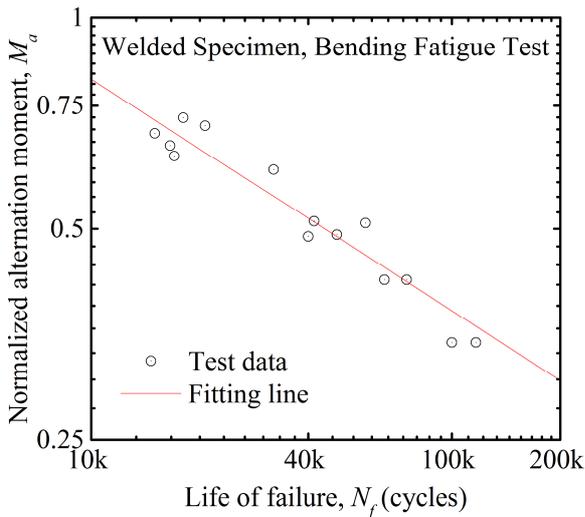


Fig. 6 Normalized moment-fatigue life (M-N) diagram

의 항복점보다 낮은 값을 보여 탄성해석과 동일한 응력해석 결과를 얻을 수 있다. 개별 시험 시편에 대한 해석을 수행하지 않고 최고 취약 시편의 형상을 고려한 해석 결과를 이용하였다. 해석을 통해 구해진 응력과 이론적으로 계산한 굽힘 응력을 이용하여 (1)의 식을 사용하여 응력집중계수(K_t)를 산출하였고, 그 값은 3.1이다.

$$K_t = \frac{\sigma_{FEA}}{\sigma_{cal}} \quad (1)$$

σ_{FEA} : 유한요소해석을 통해 구한 응력

σ_{cal} : 이론식을 이용하여 구한 굽힘응력

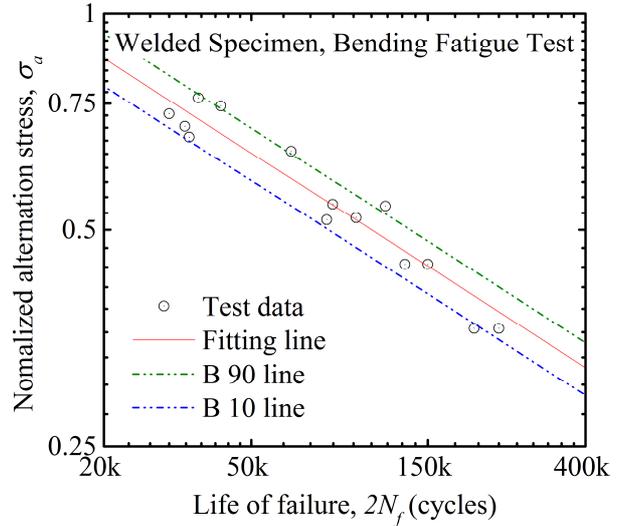


Fig. 7 Normalized stress-fatigue life (S-N) diagram

4. 굽힘 피로시험 결과 및 분석

4.1 굽힘 피로시험 결과

자동차 부품의 피로 수명 평가는 신뢰성을 높이기 위하여 일반적으로 통계적 분석 방법을 이용한 S-N 선도를 사용한다. 특히 차량의 안전에 직접적으로 연관된 서스펜션 시스템의 경우 통계적 분석을 이용하여 10%의 고장 수명(B10 life)에 대한 S-N 선도를 구해 피로 수명 평가에 사용한다. 시험 결과를 사용하여 B10 수명 계산하기 위해서, 각 시험 결과를 (2)의 식을 사용하여 맞춰줌으로써 (fitting) 피로강도계수(σ'_f) 및 피로강도지수(b , Basquin's exponent)를 계산한다. 이후 정규분포함수를 이용하여 시험 결과에 대한 10% 고장 수명을 구해준다.

본 연구를 위해 수행한 굽힘 피로 시험 결과 Fig. 5 와 같이 용접 연결부의 SPFH 590 판재 쪽 용접 비드 끝 부분에서 균열이 발생하였다. 총 14 개 시편에 대한 시험 결과를 바탕으로 $10^4 \sim 10^5$ 범위에 대한 모멘트-피로수명 선도(M-N diagram)을 구하였고, 이를 사용해 B10 life S-N 선도를 산출하였다. 이 때 응력은 유한요소해석 기법을 사용하여 산출하였다. 이 결과는 Fig. 6 과 Fig. 7 에 나타났다.

실험 결과는 약 9,000 cycle 에서의 피로 모멘트 및 피로강도를 이용하여 Normalized 되었다.

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (2)$$

굽힘 피로시험 결과를 통해 구해진 피로강도지

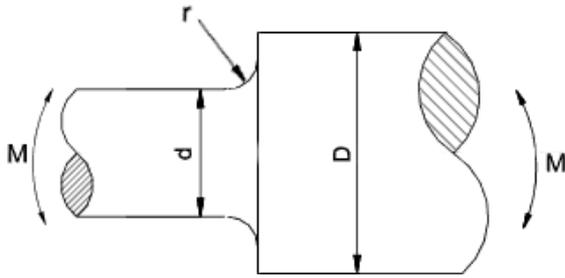


Fig. 8 Stepped shaft geometry⁽⁹⁾

수는 -0.330 으로 SPFH 590 의 피로강도지수 -0.085 와 HSLA 700 의 피로강도지수 -0.091 과 비교해 보았을 때 매우 낮은 값을 보인다. 이는 용접 시 열 유입에 의한 소재의 열화 및 용접 연결부 구조에 따른 응력집중의 영향으로 판단할 수 있다.

4.2 용접 연결부 형상 응력집중영향 분석

응력-피로수명 선도를 이용한 피로평가 시 노치의 효과는 피로노치계수(K_f)로 설명될 수 있다. 피로노치계수는 응력집중계수와 다르게 재료에 따른 영향을 받기 때문에 이를 고려하기 위해 노치감도계수(q)의 개념을 도입하여 이론적 응력집중계수 값을 통해 피로노치계수를 계산할 수 있게 하였다. 본 논문에서는 다양한 피로노치계수 평가 식 중 일반적으로 가장 많이 사용되는 (3)의 Peterson 의 피로노치계수(K_f) 식을 이용하여 본 시험 형상에 대한 피로수명을 예측해 보았다.⁽⁹⁾

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \tag{3}$$

$$q = \frac{1}{\left(1 + \frac{a}{r}\right)}, \quad a = 0.0254 \left(\frac{2068.42}{S_u (MPa)} \right)^{1.8}$$

용접부의 기하학적 형상에 따른 응력집중을 노치에 의한 응력집중과 유사하게 작용하는 것으로 가정하여 노치감도계수를 계산하는데 있어 유사하다고 판단되는 Stepped shaft 형상(Fig. 8)에 대해 (4)의 식을 이용하여 본 시험과 동일 응력집중계수를 가지는 반경을 선정하여 사용하였다.⁽¹⁰⁻¹²⁾

$$K_t \approx B \left(\frac{r}{d} \right)^a \tag{4}$$

where B = 0.879, a = -0.332 at D/d=6

1,000 cycle 에 해당하는 응력에서의 피로노치계수(K'_f)는 피로노치계수와 실험적 보정값을 통해 계산해 줄 수 있는데 그 관계는 Fig. 9 와 같다. 유

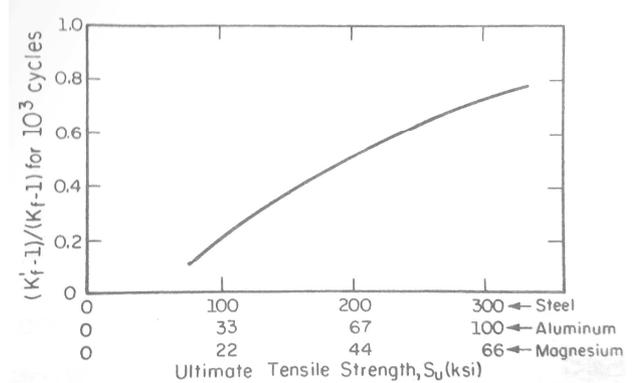


Fig. 9 Relationship of K_f and K'_f ⁽¹⁰⁾

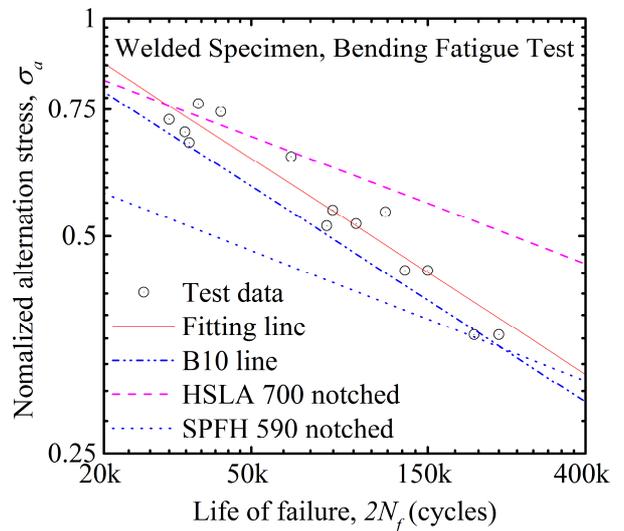


Fig. 10 Fatigue life estimation using Peterson's fatigue notch factor

한요소해석을 통해 구해진 용접시편의 응력집중계수(K_t)는 3.1 이므로 이에 상응하는 노치의 반경(r)은 2.28 mm 이다. 이를 통해 피로노치계수(K_f)와 1,000 cycle 피로노치계수(K'_f)를 계산해주면 2.91 과 1.38 의 값을 갖는다.

앞에서 구해진 피로노치계수와 제조사에서 공시한 피로강도계수 및 피로강도지수를 이용하여 피로수명을 예측해보면 Fig. 10 과 같다. Peterson 식을 이용한 평가결과를 보면 SPFH 590 소재와 HSLA 700 소재의 피로노치계수 수명평가 결과 사이에 굽힘 하중에 의한 용접 연결부의 피로 시험 결과가 위치하는 것을 확인할 수 있다. 이 중 파단이 발생한 SPFH 590 소재의 S-N 선도를 보면 용접 연결부의 기하학적 형상에 의한 물성의 변화가 10^5 범위에서 유사한 값을 보이는 것을 확인할 수 있으니 다른 범위에서는 상당한 편차를 보이는 것을 확인하였다.

이와 관련하여 용접 전 소재의 피로강도지수를 바탕으로 평가한 S-N 선도의 기울기 보다 시험을 통해 구해진 S-N 선도의 기울기가 더 가파르다는 것을 확인할 수 있다. 노치의 영향으로 인해 나타나는 기울기의 변화 폭에 비해 많은 기울기 차이를 보이는 것은 기계적 물성이 다른 두 소재를 용접하는 과정에서 나타나는 현상으로 판단된다. 따라서 이종 용접 연결부의 피로평가를 위해서

기하학적 형상만을 이용한 평가는 신뢰도가 떨어진다. 피로노치기법으로 더 정확한 물성을 평가하기 위해서는 두 소재를 맞대기 용접한 시편에 대한 피로 시험결과를 이용해야 한다고 판단된다.

본 연구에서 수행된 굽힘 하중에 의한 용접 연결부의 시험을 통한 피로수명 평가를 바탕으로 실차 실험을 통해 획득한 하중이력을 적용하면 좀더 정확하게 제품의 피로수명을 평가할 수 있을 것으로 예상되며, 차후 동일 형상의 시편에 대한 비틀림 하중에 의한 피로평가 및 비틀림-굽힘 복합 하중에 대한 시험을 수행함으로써 앞으로의 실차 하중 이력에 대응하는 차량 서스펜션 시스템 설계를 위한 신뢰할 수 있는 피로수명 평가 절차를 정립할 수 있을 것으로 생각된다.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 굽힘 하중에 대한 이종 금속간의 용접 연결부에 대한 피로시험을 수행하였고, 용접부 형상에 의한 응력집중요소가 피로수명에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 시험소재에 대하여 -0.330 의 피로강도지수를 구하였다. 이 수치는 용접 전 모재의 피로물성을 이용해서 산출한 피로강도지수와 많은 차이를 보였다. 이를 바탕으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 실제 제품의 형상을 단순화하여 설계한 용접시편을 제작하여 굽힘 피로시험을 진행하였고, 이를 통해 M-N 선도를 얻을 수 있었으며, 피로균열이 상대적으로 낮은 물성을 가진 SPFH 590 판재 위의 응력불연속부인 용접 비드(Bead) 끝단에서 발생하는 것을 확인하였다.

(2) 균열발생부의 비드 크기를 측정하여 단순화한 용접시편에 대한 모델링 및 해석을 실시하여 응력불연속부에 발생하는 응력을 구하였고, 이를 이용하여 S-N 선도를 얻을 수 있었으며, 응력집중계수 계산을 통한 피로노치계수 평가법을 이용해 용접 연결부 피로수명에 기하학적 형상이 미치는 영향을 파악하였다.

(3) 용접 연결부 시편의 굽힘 피로 시험결과에

따른 피로수명평가와 기하학적 형상에 피로노치계수 평가 결과를 비교해 본 결과 이종 소재의 용접 연결부에 대하여 신뢰할 수 있는 피로 평가를 하기 위해서는 기하학적 형상에 의한 피로노치계수 피로평가 방법뿐만 아니라 이종 용접제 피로 시험을 통한 용접제의 물성 변화영향에 대한 고려가 필요하다.

후 기

이 논문은 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 선도연구센터 지원 사업입니다. (NRF-2007-0056094)

참고문헌 (References)

- (1) Kim, J. G., Lee, J. W. and Choi, J. H., 2012, "Study on the Enhancement of the Accuracy in Estimating Fatigue Life and Failure Mode of a Rear Torsion Beam Axle Using Modal Superposition Method," *KSAE*, November, pp. 780~784.
- (2) Karolczuk, A. and Macha, E., 2005, "A Review of Critical Plane Orientations in Multiaxial Fatigue Failure Criteria of Metallic Materials," *Int. J. of Fracture*, Vol. 134, pp. 267~304.
- (3) Kim, J. Y., Kim, S. S., Kim, G. Y., Park, S. C. and Kim, C. K., 2012, "Research on Fatigue Life Prediction of Muffler with Weld-zone Shape," *J. of the Korea So. of Marine Engng*, Vol. 36, No. 1, pp. 85~93.
- (4) Sonsino, C. M. and Kueppers, M., 2001, "Multiaxial Fatigue of Welded Joints Under Constant and Variable Amplitude Loadings," *Fatigue Fract Engng Mater Struct.*, Vol. 24, pp. 309~327.
- (5) Kueppers, M. and Sonsino, C. M., 2002, "Critical Plane Approach for the Assessment of the Fatigue Behaviour of Welded Aluminium Under Multiaxial Loading," *Fatigue Fract Engng Mater Struct.*, Vol. 26, pp. 507~513.
- (6) Han, J. W., Han, S. H., Shin, B. C. and Kim, J. H., 2004, "Fatigue Life Estimation of Welding Details by Using a Notch Strain Approach," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 28, No. 7, pp. 977~985.
- (7) Kim, D. J., Seok, C. S., Koo, J. M., Seo, J. W. and Goo, B. C., 2005, "Fatigue Strength Assessment of the Cruciform Fillet Welded Joints Using Hot - spot Stress Approach," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 29, No. 11, pp. 1488~1493.
- (8) Hong, J. K., 2012, "Development and Application of the Battelle Structural Stress Method for Fatigue Evaluation of Welded Automotive Structures," *Journal of KWWJ*, Vol. 30, No. 2, pp. 126~134.

- (9) Bannantine, J. A., Comer, J. J. and Handrock, J. L., 1989, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Chapter 4 Notches," *Prentice Hill*, pp. 137~195.
- (10) Radaj, D., 1996., "Review of Fatigue Strength Assessment of Nonwelded and Welded Structures Base on Local Parameters," *Int. J. of Fatigue.*, Vol. 18, No. 3, pp. 153~170.
- (11) Yung, J. Y. and Lawrence, F. V., Jr., 1986, "Prediction the Fatigue Life of Welds Under Combined Bending and Torsion," *Biaxial and Multiaxial Fatigue, EGF3*, Mechanical Engineering Publications, London, pp. 53~69.
- (12) Peterson, R. E., 2008, "Stress Concentration Factors," *John Wiley and Sons*, New York, pp. 135~151.