

자동차 용접구조물의 피로평가를 위한 Battelle 구조응력법의 개발 및 적용

홍 정 균*†

*Battelle 연구소 용접구조물 연구센터

Development and Application of the Battelle Structural Stress Method for Fatigue Evaluation of Welded Automotive Structures

Jeong K. Hong*,†

*Center for Welded Structures Research, Battelle, Columbus, OH., USA

†Corresponding author : hong@battelle.org

1. 서 론

구조물의 대형화와 복잡화로 인한 구조물의 안정성 평가는 재해방지뿐 아니라 경제적 고려가 필수적이다. 특히 용접구조물은 용접부의 기하학적인 불연속으로 인한 응력집중이 피로 수명에 미치는 영향이 크기 때문에 세심한 피로 설계의 고려가 요구된다. 지금까지 주로 사용된 공칭응력이나 hot spot 응력은 각 부재의 용접 접합부 형상과 이에 따른 피로시험을 수행하여 피로 수명곡선을 구하여야 하는 번거로움과 유한요소 해석시 요소의 종류, 크기, 형상, 타입 이나 분포에 민감한 결과를 초래하여 실구조물의 피로평가에 어려움이 있어왔다.

이러한 단점을 보완한, 요소에 민감하지 않은 피로 평가 방법을 미국 Battelle 연구소에서 개발하였고, 이 방법을 기존의 방법과 구별하여 Battelle 구조응력법 (Structural stress method, 이하 구조응력법이라 칭함) 이라 부르게 되었다. 이 구조응력은 용접부 토우 근처의 절점에서 계산된 등가 절점력(nodal force)을 바탕으로 역학적 평형조건을 이용하여 구하며, 용접부 토우에서의 균열 진전을 등 일련의 파괴역학적 과정을 적용해 하중 모드, 두께 및 접합부 형상을 고려한 등가 구조응력 (equivalent structural stress)이라는 피로 매개변수를 정의하였고, 이를 신뢰할 만한 많은 피로 데이터에 적용시켜 하나의 S-N 선도로 통합하여 용접부 피로 설계 및 평가에 효과적으로 사용할 수 있는 마스터 S-N 피로선도(master S-N curve) 를 개발하게 되었다.

따라서, 구조응력법을 적용하게 되면 CAE, FE 모

델링 시간을 줄이고, 피로시험을 최소화 함으로 개발 비용과 시간을 줄일 수 있게 되며, 메쉬 둔감성의 특징을 사용함으로 기존의 피로 평가법의 불확실성과 이로 인한 과도한 보수 설계를 피할 있게 되어 구조물의 경량화 및 품질관리를 가능케 할 수 있는 장점이 있다.

이러한 개발, 적용의 타당성을 인정받음으로, Battelle 구조응력법과 이를 적용한 마스터 S-N 피로선도법이 2007년 ASME B&PV Section VIII Div 2 의 용접부 피로 설계 Codes¹⁾ 및 2007년 API 579-1 / ASME FFS-1의 Fitness- For-Service Standards²⁾로 채택되었고, 2012년 현재선급기관에서도 이 방법을 적용하여 선박과 해양구조물의 피로 해석을 위한 지침(Fatigue Guidance)³⁾으로 최종 검토중에 있다.

구조응력법의 개발은 산업체 공동 프로그램 (Joint Industry Program)의 형식으로 2000년 초부터 Battelle 연구소의 주도 하에 자동차, 중장비, 해양 구조물, 원전 관련, 코드 및 인증 기관 등 다양한 산업체의 요구를 반영하며 개발되어 왔다. 현재에도 구조응력법의 적용 영역 확대를 위한 여러 분야에서 산업체와의 협력이 진행 중에 있다.

본 기고에서는 구조응력법의 간략한 소개와 자동차 구조물에 적용되어 온 fusion 용접, laser 용접, 점용접 및 최근에 사용되고 있는 weld-bond을 중심으로 현재까지 진행되어 온 구조응력법의 개발 및 적용을 보고하려 한다.

2. 용접구조물 피로해석의 일반적인 문제

일반적으로 용접구조물의 피로파괴는 주로 용접 이음

부에서 발생하며, 주로 용접부 토우에서 균열이 발생하며 용접부를 따라 균열이 진전하거나, 또는 용접부에서 균열이 발생하여 용접부로 성장한다. 일반 판재나 봉재 구조물과는 다르게 용접부의 S-N 데이터는 용접부 형상과는 무관하게 일정한 기울기를 보이며 작용하중의 하중비에 대하여 크게 영향을 받지않는 특징을 보인다.

이러한 용접부의 피로거동의 특징에도 불구하고, 용접부의 피로 해석에는 다음과 같은 두 가지의 내재적인 문제에 부딪힌다.

하나는 용접부 토우에 집중하는 응력을 결정하는 일이다. FE 해석시 용접부 토우의 노치를 고려할 때, 노치부에서의 응력은 수학적으로 불명확하게 평가된다. 따라서 그림 1에서 보는 바와 같이 하중을 받는 구조물에서 기하학적 불연속성이 나타나는 위치(토우)에서는 메쉬의 크기에 따라 응력집중이 다르게 평가된다. 일반적으로 요소의 크기가 작아지면 용접 토우에서의 응력이 급격히 커짐을 볼 수 있다. 현재, 산업계에서 널리 사용되고 있는 Hot spot 응력^{4,5)}이 있는데 이는 수치해석이나 측정으로 부터 구한 판 표면의 응력분포값을 사용하는 방법으로, 용접부로 부터 일정 거리 떨어진 두 곳의 판표면의 응력을 용접토우로 외삽하여 구한 응력이다. 이 역시 역학적인 근거가 부족한 경험적인 방법으로 용접부의 기하학적 형상에 민감함을 보인다⁶⁾.

다른 하나는 어떤 설계 S-N 선도를 사용하여 용접부의 피로평가를 하는가이다. 예를 들어 BS7608⁷⁾이나 IIW Recommendations⁵⁾를 따르면 그림 2에 보이는 바와 같이 여러 선도 중 용접유형과 작용하중에 따라 사용할 S-N 선도를 결정하여야 하는데 이 역시 경험적

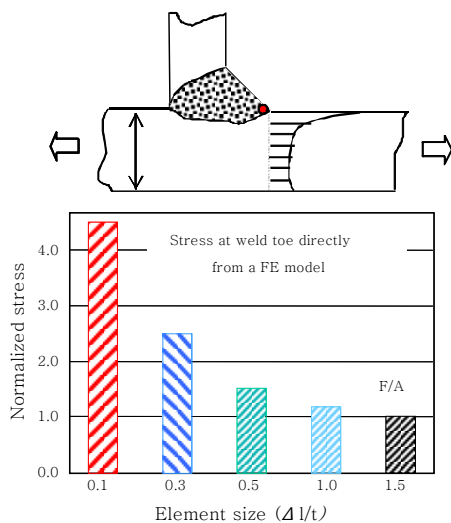


Fig. 1 Mesh-sensitivity of stresses at weld toe in FE analysis

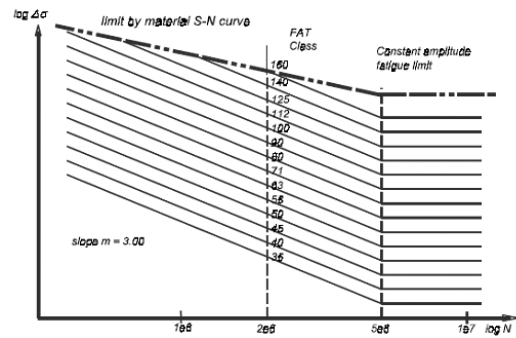


Fig. 2 Design S-N curves for weld detailed classified based on joint geometry, loading modes, etc in 2003 IIW Recommendations⁴⁾

인 요소와 판단이 요구된다. 또한 작용하중을 공칭응력의 범위로 일반적으로 표현하는데 복잡한 형상과 복잡하중의 경우에는 공칭응력의 결정이 곤란한 경우가 발생한다.

Battelle에서 개발한 메쉬에 둔감한 구조 응력법은 여러 문헌⁸⁻¹⁴⁾을 통하여 용접 구조물의 용접부 응력집중을 평형조건을 이용하여 효과적이고 일관성 있게 평가 가능함을 증명하였고, 파괴 역학적인 개념을 도입하여 다양한 이음 형태로 인한 응력집중, 하중 모드와 판 두께의 효과를 고려한 피로매개변수 (등가 구조응력)를 제안하고, 신뢰할 만한 많은 피로 데이터에 적용시켜 하나의 S-N 선도로 통합하여 용접부 피로 설계 및 평가에 효과적으로 사용할 수 있는 마스터 S-N 피로선도를 개발하였다.

구조응력의 개념은 정성적, 정량적으로 역학적 의미가 있으므로 피로 설계이외의 영역에도 적용이 용이한 특징이 있다.

3. Battelle 구조응력법

구조응력법으로 구한 구조응력은 수치해석으로 부터 구한 절점력 (nodal force)과 절점 모멘트(nodal moment)를 사용하여 구한다. 자세한 구조응력의 개발은 다양한 문헌⁸⁻¹⁴⁾을 통해 얻을 수 있으며 여기서는 기본 정의와 계산과정에 대한 간략한 설명을 하기로 한다.

구조응력은 그림 3의 2D 모델에서 보는 바와 같이 용접부 토우에서 판두께 방향으로의 가상균열면(hypothetic cut) 위에 분포한 임의의 응력장 $\sigma_x(y)$ (그림 3a)을 등가평형(equilibrium-equivalent) 구조응력부 (그림 3b)과 자기평형 (self-equilibrating) 노치응력부 (그림 3c)의 두 성분으로 분리 할 수 있다.

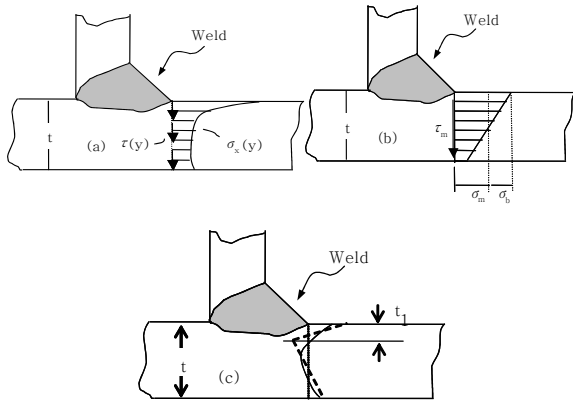


Fig. 3 Through-thickness structural stress definition: (a) Local stresses from FE model; (b) Structural stress or far-field stress; (c) Self-equilibrating stress

등가평형 구조응력, σ_s 는 가상 균열면에서 트랙션 조건을 사용하여 막응력(membrane stress)과 굽힘응력(bending stress)의 성분으로 다음과 같다.

$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b \tag{1}$$

여기서 σ_s 는 외력이 작용할 때 용접토우의 가상균열면에 대해 평형조건을 만족한다. 현재 사용되는 대부분의 FE 패키지는 변위기본 유한요소법 이론을 사용하였기에 절점력과 절점모멘트는 요소나 요소그룹에 대해 항상 평형 조건을 만족한다. 따라서, 커브형상을 한 3D 셸, 솔리드 모델에서도 절점력과 절점모멘트는 평형조건을 만족한다. 그림 4의 선형 셸 모델에서 보는 바와 같이 용접부 토우에서 두께 방향으로의 파괴를 고려하였을 때 용접선의 가상균열면을 따르는 요소의 절점력과 절점모멘트는 FE 해석의 각 요소에 대한 글로벌 좌표계(x-y-z)로 부터 국소좌표계(x'-y'-z')로 변환시키고 다음의 식 (2)를 이용하여, 용접선을 따라 각 절점에서의 선력(line force)과 선모멘트(line moment)를 구하게 된다.

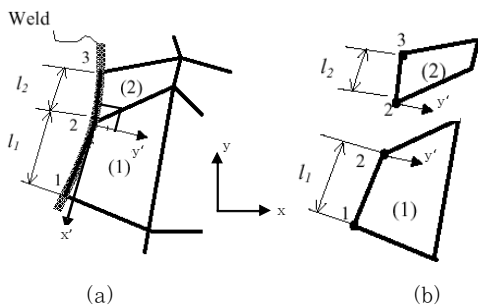


Fig. 4 Global and local coordinates for shell/plate Element

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{l_1}{3} & \frac{l_1}{6} & 0 & 0 & \dots & \dots \\ \frac{l_1}{6} & \frac{(l_1+l_2)}{3} & \frac{l_2}{6} & 0 & \dots & \dots \\ 0 & \frac{l_2}{6} & \frac{(l_2+l_3)}{3} & \frac{l_3}{6} & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \frac{l_3}{6} & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{l_n}{6} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{Bmatrix} \tag{2}$$

여기서 F_n , f_n , l_n 은 각각 n번째 절점력, 선력과 요소의 길이를 나타낸다.

트랙션을 기본으로 한 구조역학의 정의는 파괴역학의 가상균열면의 응력세기계수의 세 트랙션 성분과 일치함을 볼 수 있다. 여기서 모드 I 응력세기계수는 단순히 수직(normal) 구조응력 σ_s 에 의해, 모드 II는 횡전단 구조응력 τ_z 에 의해, 모드 III는 면내(in-plane) 전단 구조응력, τ_s 에 의해 영향을 받는다. 실제로 가상 균열면에서의 평형상태는 세 트랙션 조건 σ_s , τ_s , τ_z 과 이의 분포로 표현되어진다. 자세한 식의 유도, 계산 과정과 적용예제등은 앞에서 소개한 문헌을 통해서 볼 수 있으며, 결과적으로 각 절점에서의 σ_s , τ_s , τ_z 는 각각

$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b = \frac{f_y}{t} - \frac{6m_x}{t^2} \tag{3}$$

$$\tau_s = \tau_m + \tau_b = \frac{f_x}{t} + \frac{6m_y}{t^2} \tag{4}$$

$$\tau_z = \frac{f_z}{t} \tag{5}$$

여기에서 t, f, m는 각각 가상균열이 일어나는 판의 두께, 각 절점에서의 선력(line force)과 선모멘트(line moment)를 나타내며, 소첨자 x' , y' , z' 는 각 절점에 작용하는 선력과 선모멘트의 국소좌표계의 방향을 나타낸다.

용접부에 대한 피로평가에 적용하기 위해 응력범위(stress range)를 도입하면 식 (1)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\sigma_s = \Delta\sigma_m + \Delta\sigma_b \tag{6}$$

이 단계 균열성장 모델(two stage crack growth model) 근거로 파괴역학이론을 사용하고 식(6)을 적용하면 다음과 같은 등가구조응력 매개변수를 정의할 수 있게 된다¹⁰⁻¹⁵. 이는 이음형상에 따른 응력집중, 판두께와 하중모드의 영향을 고려하여 판이음 용접구조물, 판이음 용접구조물 등의 피로데이터의 산포를 좁은 범위내로 모이게 함으로 통합마스터 S-N선도를 구축가능

케 하는 중요한 피로 매개변수이다. 이 등가구조 응력 범위(equivalent structural stress range, DS_s)은 다음과 같이 정의한다.

$$\Delta S_s = \frac{\Delta \sigma_s}{t^{* \frac{2-m}{m}} \cdot I(r)^{\frac{1}{m}}} \quad (7)$$

여기서 $t^* = t/t_{ref}$ with $t_{ref} = 1mm$, m 은 3.6 으로 슛크랙과 롱크랙의 균열성장 데이터로부터 유도된 값이며, $I(r)^{1/m}$ 는 굽힘 응력비(r)로 표현된 무차원 함수로 하중제어 조건하에서는 다음과 같이 표현된다.

$$I(r)^{\frac{1}{m}} = 0.0011r^6 + 0.0767r^5 - 0.0988r^4 + 0.0946r^3 + 0.0221r^2 + 0.014r + 1.2233, \quad (8)$$

$$where r = \frac{|\Delta \sigma_b|}{|\Delta \sigma_m| + |\Delta \sigma_b|}$$

같은 방법으로 등가 면내 및 횡단면 구조응력 범위도 정의할 수 있다.

다양한 문헌들을 통하여 신뢰할 만한 다수의 판이음, 판이음의 용접부 피로시험 데이터가 해석되었고, 이에 따른 계산된 등가구조응력범위 (식 7)와 파괴수명의 관계가 그림 5와 같이 되었다. 그림 5을 구성한 피로 데이터는 용접부 토우균열이 일어나는 경우로 이음종류, 하중모드, 두께가 다른 800 개 이상의 데이터가 포함 되어 있다. 통계학적인 방법을 통해 구한 표준편차(σ)는 0.247로 좁은 데이터 산포도를 보인다. 이 S-N선도가 ASME¹⁾에서 채택한 마스터 S-N 피로선도이다. 마스터 S-N 선도는 중간선(mean curve, 신뢰도 50%)와 중간선으로 부터 $\pm 2\sigma$ (신뢰도 95.45%)와 $\pm 3\sigma$ (신뢰도 99.83%) 떨어진 선들로 구성되어 있다.

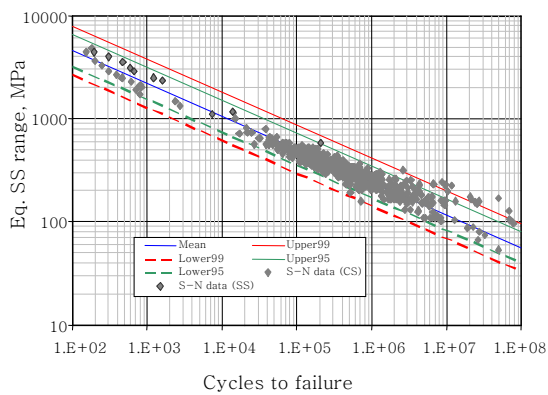


Fig. 5 Master S-N curve developed based on over 1000 weldment fatigue test data including full scale tubular joints and laboratory plate joints. The standard deviation $\sigma=0.247$

3. Fusion 용접에의 적용

여기서는 일반적인 fusion용접의 경우의 적용 예를 들기로 한다. 두 tube가 용접부로 연결되어 있고 한 tube의 끝단에 이축응력을 주기적으로 작용시키는 경

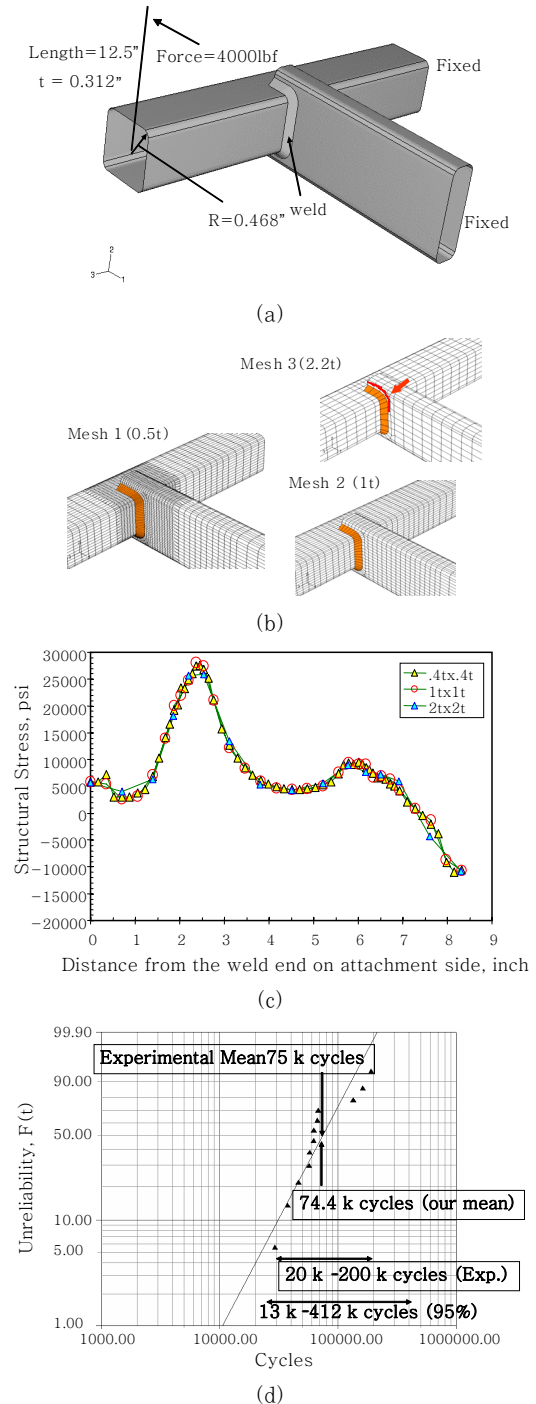


Fig. 6 Model and Results for SAE FD&E Weld Challenge I⁽⁷⁾: (a) FEA model with Loading & Boundary Conditions; (b) Meshes for sensitivity study; (c) Structural stress distribution along the top of the weld line; (d) Comparison of test data and prediction

우로 (그림 6a). 이는 SAE FD & E 위원회가 2003년에 제안하였던 용접부 피로수명 예측을 위한 Weld Challenge I Project¹⁶⁾이다. 피로시험 결과는 예측 결과 발표 시에 알려주는 blind test였고 Battelle 및 여러 다른 기관이 참여하여 피로수명과 파괴지점을 예측하였다. Battelle에서는 그림 6b와 같이 용접부 부근의 메쉬 크기를 달리한 (0.5t, 1.0t, 2.2t) 세 모델을 사용하여 해석을 하였다. 용접부 상단 도우를 따른 구조응력의 분포는 그림 6c와 같다. 그림6c에서 보는 바와 같이 용접선을 따르는 구조응력의 분포가 메쉬에 크게 영향을 받지 않음을 볼 수 있었다. 구조응력의 최대 값이 나타나는 위치는 화살표로 표시된 부위 (그림6c)로 메쉬 크기와 상관없이 동일한 위치에 비슷한 값으로 계산되었다. 이 위치가 피로 균열이 예측되는 부분으로 용접부가 곡면으로 바뀌는 부분(그림 6b의 화살표)이다. 실제 시험결과와 균열 위치가 일치하였으며 그림 6d에서 나타난 것처럼 중간 (50%) 수명 예측 계산이 실제 피로시험 결과 (중간 값)와 비교했을 때 가장 근접한 결과를 보여주었다. (자세한 내용은¹⁷⁾을 참고)

또한 A/SP (Auto/Steel Partnership)의 2008년도 Lightweight Rear Chassis Project의 보고서¹⁸⁾ (그림 7의 모델)에 따르면 구조응력법을 사용한 용접 피로 예측이 매우 정확하다고 보고하였다.

4. Laser 용접에의 적용

이번에는 laser 용접의 적용 예를 보기로 한다. 이는 차량 CAE 내구성 예측을 위한 알루미늄 차체구조물의 용접부 피로 데이터 베이스를 구축하기 위하여 구조응력법을 사용한 경우¹⁹⁾이다. 이를 위하여 그림 8과 같은 laser 용접 알루미늄 시편 (두께범위 1.5 ~ 3mm)에 단순 하중을 적용한 피로시험을 시행하였다. 시편은 lap shear joint와 coach peel joint의 형상이었고 각

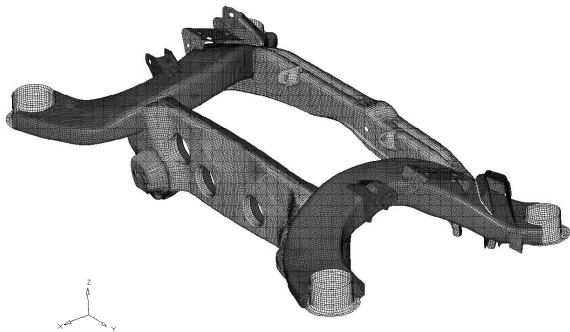


Fig. 7 Rear chassis model used in the A/SP project¹⁸⁾

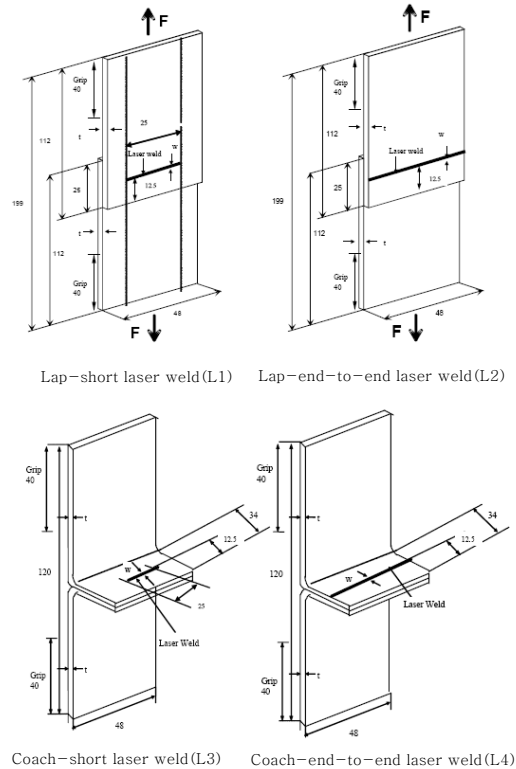
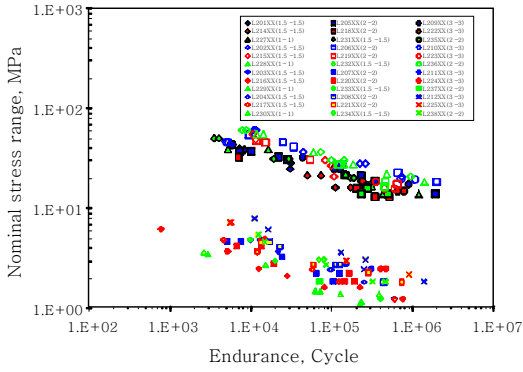


Fig. 8 Fatigue test specimen designs for laser welds - aluminum¹⁹⁾

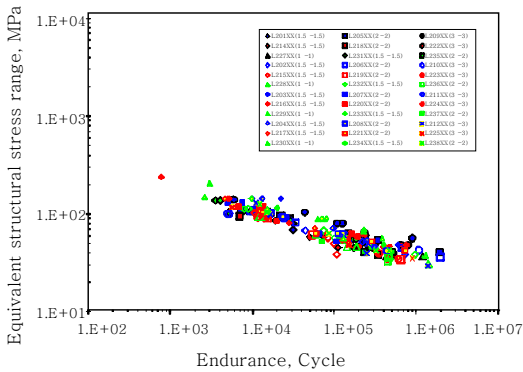
시편 형상에 용접선의 길이를 달리 - 용접선이 시편 중간에 만 위치 한 것과 용접선이 시편 양끝단까지 확장된 것- 적용하였다. 피로 시험 결과는 그림 9a에서 보는 바와 같이 일반적으로 공칭응력 범위(또는 힘 범위)로 나타내는데 시편의 형상, 그림 상태에 따라 데이터의 산포도가 커짐을 볼 수 있다. 구조응력법을 적용하여 피로 매개변수를 구하여 피로 선도로 나타내게 되면 그림 9b와 같이 산포되어 있던 피로 데이터가 좁은 범위 안으로 모여 들게 되어 한 커브로 나타낼 수 있게 된다. 이와 같은 경향은 단순 하중 하의 단순 시편에서 뿐 아니라 실제 복합하중을 받는 박스 콤포넌트 시편의 경우에도 같은 경향을 보이며 (그림 10의 □로 표시된 데이터) 단순 시편과 콤포넌트 시편의 데이터가 서로 좁은 범위 안에 잘 섞여 실제 설계에 적용이 용이한 S-N 피로 선도를 만들 수 있게 된다.

5. 점용접에의 적용

앞절의 fusion용접, laser 용접의 경우와 같은 방법으로 점용접 시편에 구조응력법을 적용하여 너겟주위의 요소에서의 절점력을 이용하여 피로 수명을 평가할 수 있다²⁰⁾. 그렇지만 실제 차체 구조물에는 많은 수의 점용접이 여러 위치에 산재하여 있으므로, 각각의 점용접



(a) Nominal stress range versus life



(b) Equivalent structural stress range versus life

Fig. 9 Summary of S-N data for L1-L4 coupons - sheet failure mode¹⁹⁾: (a) Nominal stress range versus life; (b) Equivalent structural stress range versus life¹⁹⁾

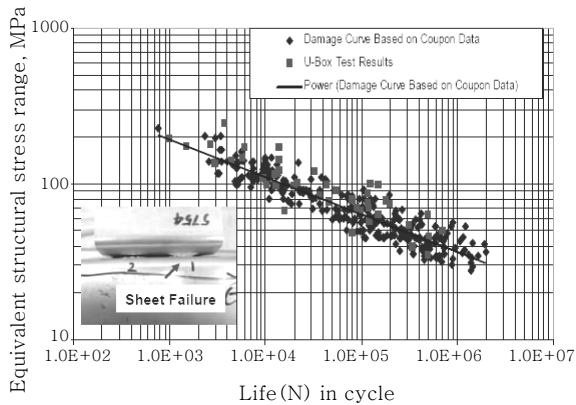


Fig. 10 Summary of validation results using box components under complex loading¹⁹⁾: laser welded box component tests versus coupon data

을 나타내기 위한 너겟의 모델링과 또 구조응력을 계산하기 위한 일련의 과정은 많은 시간과 노력이 요하게 된다. 따라서 실제적인 적용을 위해서 보다 단순화된 평가과정에 대한 요구가 증가하게 되었고 이에 단순화된 구조응력법이 개발되었다²¹⁾ 이 과정은 쉘 모델로 판

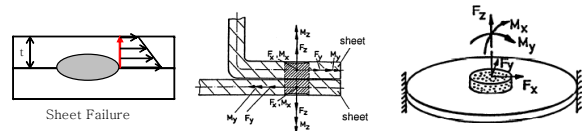


Fig. 11 The simplified models to determine structural stresses at the weld nugget for sheet failure: rigid core model for plate structural stresses

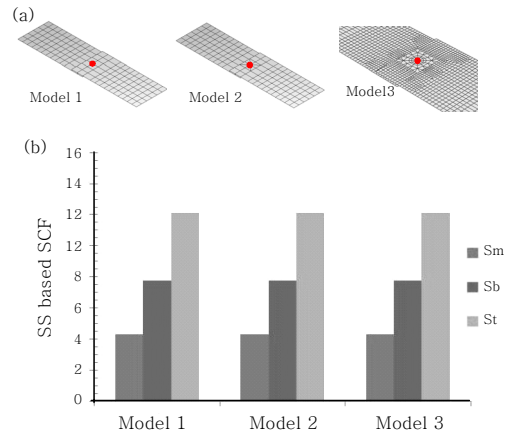


Fig. 12 Structural stress comparison using simplified Battelle structural stress procedure: (a) FE models evaluated: Model 1 - Coarse squared mesh, Model 2 - Coarse mesh with triangular mesh, Model 3- Refined mesh; (b) Structural stress comparison for sheet failure at nugget

을 나타내고 점용접부는 beam요소를 사용하여 연결하며 피로 파괴의 정의는 판 파괴 (sheet failure) - 너겟과 판의 경계면에서 판 두께 방향으로 균열 진전 - 의 경우를 가정하여 보수적으로 계산하게 된다. 단순화된 구조응력은 각 너겟의 파단위치보다는 어느 점용접부가 피로하중에 취약한가 하는 거시적인 피로 매개변수로 볼 수 있다.

그림 11에서 보는 바와 같이 점용접 단순 모델링을 위해 rigid core 모델을 사용하여 구조응력식을 보수적으로 유도하였다. 균열에 수직방향의 최대 구조응력은 다음식으로 표현된다.

$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot t} + \frac{6 \cdot M}{\pi \cdot d \cdot t^2} + 1.744 \frac{F_z}{t^2},$$

$$\text{where } F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \text{ and } M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} \quad (9)$$

자세한 식의 유도와 다른 구조응력성분 식의 유도는²¹⁾에 나타나 있다.

단순화된 구조응력도 그림 12에 표현된 것과 같이

메쉬의 형상 (삼각형요소 혹은 사각형요소) 과 크기에 둔감함을 보인다. 따라서 실제 모델링에서 너겟 주위의 요소의 크기를 하중 전달에 영향을 주지 않을 정도로 크게 할 수 있는 잇점이 있게 된다.

그림 13은 평가된 점용접 시편의 예로 다양한 종류의 항복강도의 강판으로 제작된 시편으로 시편의 두께와 너겟크기가 각각 0.8~4mm 와 5~12mm이고 피로시험은 하중제어 조건로 하중비의 범위가 -1 ~ 0.5 이었다. Lap shear 시편의 경우 너겟의 수가 1~3, H형상 시편은 점용접의 수가 8~10 개였다. 이러한 다양한 종류의 점용접시편의 공칭응력범위를 사용한 피로선도는 그림 14 로 나타난다. 두 가지 다른 FE 모델-일반적인 구조응력 계산모델 (그림 15a)과 단순화된 구조응력 계산 모델(그림 15b)-을 사용하여 등가구조응력범위 결과를 비교함으로써 단순화된 모델링의 타당성을 평가하였다. 단순화된 구조응력계산 과정을 사용한 경우가 일반적인 구조응력계산 과정을 한 경우보다 약간 더 넓은 데이터 산포를 보이지만 전반적으로 일반적인 구조응력방법과 크게 차이가 나지 않음을 볼 수 있다. 따라서 이과정으로 단순화된 점용접에 대한 피로 마스터 S-N 선도를 구할 수 있으며 이를 사용하여 실제 CAE 내구해석에 적용할 수 있다. 최근에는 단순 beam 을 사용한 모델 이외에 connector/fastener 요소를 사용한 경우에도 적용할 수 있도록 개발 되었다²²⁾.

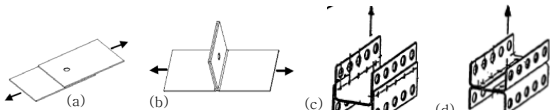


Fig. 13 Examples of spot welded fatigue specimens types and loadings evaluated; (a) Lap shear specimen; (b) Coach peel specimen; (c) H-shaped shear specimen; (d) H-shaped peel specimen

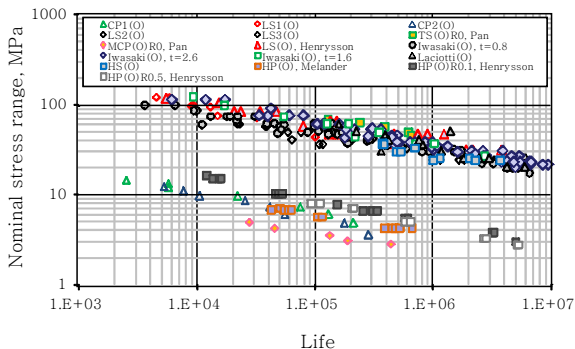


Fig. 14 S-N data for sheet failure of spot welds in terms of nominal stress range²¹⁾

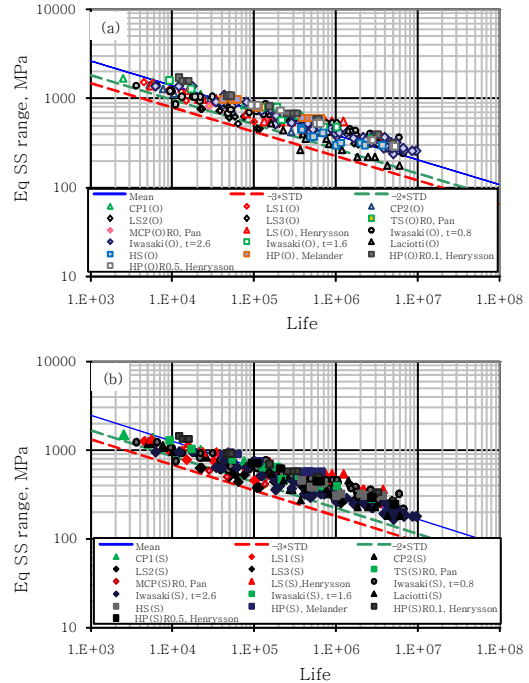


Fig. 15 Comparison of S-N data for sheet failure of spot welds²¹⁾: (a) using conventional Battelle structural stress procedure and (b) proposed simplified structural stress procedure in terms of equivalent structural stress range

6. 용접본드(weld-bond)에의 적용

용접본드(weld-bond)는 점용접과 접착제를 함께 사용하여 자동차용 판재의 접합부의 피로 내구와 강성을 증가시키는 새로운 접합방식이다. 일반적인 용접본드의 피로 파괴는 하중에 의한 접착 계면의 분리가 먼저 일어나며 이어 점용접부의 파괴가 발생한다. 현재까지 이러한 접합구조물에 대한 피로수명의 예측은 피로 균열 패스를 모델링한 단순 2차원 모델을 사용하는 경우가 있는데²³⁾ 3차원의 경우는 찾기 어려운 것 같다. 이에 구조응력법을 사용하여 최근 용접본드에 대한 피로수명 예측을 가능케 하는 계산 과정을 제시하였다²⁴⁾. 간단히 기술하면 접착제 본드 시편에 대한 마스터 S-N 선도를 구하고 점용접 시편에서의 마스터 S-N 선도를 구한 후 중첩법을 사용하여 용접본드의 피로 수명을 예측하는 방법이다. 피로파괴의 정의는 피로시험편의 파괴형상을 관찰에 근거로 되어졌으며, 접착제 본드, 점용접, 용접본드에 따라 다르게 정의된다. 자세한 방법은²⁴⁾에 설명되어 있으며, 그림 16은 두 가지 강판 시편의 수명 예측과 시험 결과의 비교한 것이다.

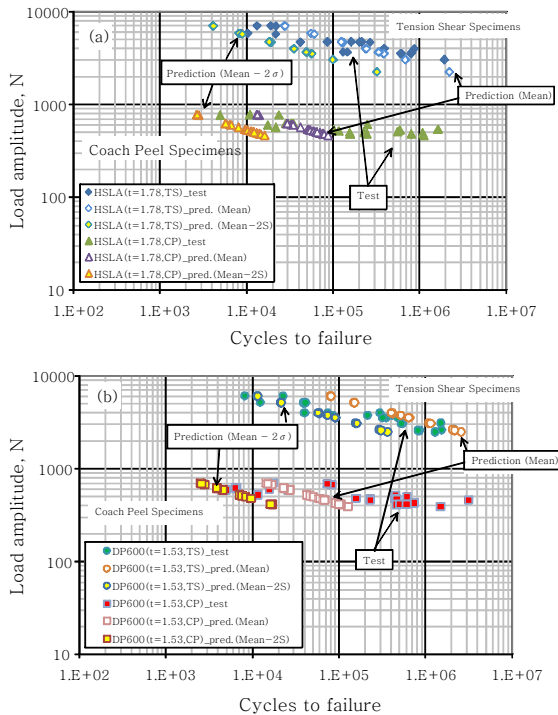


Fig. 16 Fatigue life prediction of weld bonded high strength steel specimens²⁴⁾: (a) HSLA 340; (b) DP 600

7. 결 언

메쉬에 둔감한 Battelle 구조응력법의 개발과 적용을 자동차 구조물을 중심으로 서술하였다.

Battelle 구조응력법은 자동차 구조물의 용접부 피로 내구 설계의 여러 분야에 적용이 가능하며, 현재 사용되고 있는 신뢰도가 높은 기술이다. 이 구조응력법은 전통적인 fusion 용접이 적용되거나 laser 용접이 적용되는 구조물, 점용접 조인트에서도 실질적으로 내구 설계에 사용할 수 있는 신뢰할 만한 기술이며, 용접본드 조인트에 대한 해석도 가능하여 졌다. 구조응력법은 고강도 강판 뿐 아니라 마그네슘, 알루미늄합금 등의 경량 재료의 용접부의 내구 설계에도 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

이 방법은 프로그램을 통해 자동화가 가능한 기술로 여러 분야로의 적용이 확대되리라 기대된다.

참 고 문 헌

1. 2007 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Div.2, ASME, 2007
2. API Standard 579-1/ASME FFS-1 Fitness for Service, API, 2007
3. Fatigue Analysis of Offshore Steel Structures-Battelle Structural Stress Methodology, Bureau Veritas,

- Under Final Review, 2012
4. Niemi, E., "Structural Hot-Spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components," IIW Doc. XIII-1819-00/ XV-1090-01/XIII-WG3-06-99, IIW, 2003
5. Hobbacher, A., "Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components," IIW Doc. XIII-1965-03/ XV-1127-03, IIW, 2004
6. Frick, W., "Recommended Hot-Spot Analysis Procedure for Structural Details of Ships and FPSOs Based on Round-Robin FE Analyses," International Journal of Offshore and Polar Engineering, **12** (2002), 40-47
7. BS 7608, "Code of Practice for Fatigue Design and Assessment of Steel Structures," BSI, 1993
8. Dong, P., Hong, J.K., and Cao, Z., "A Mesh-Insensitive Structural Stress Procedure for Fatigue Evaluation of Welded Structures, International Institute of Welding, IIW Doc. XIII-1902-01/ XV-1089-01, IIW, 2001
9. Dong, P., "A Structural Stress Definition and Numerical Implementation for Fatigue Analysis of Welded Joints," International Journal of Fatigue, **23** (2001), 865-876
10. Dong, P., Hong, J. K., Osage, D.A., and Prager, M., "Master S-N Curve Method for Fatigue Evaluation of Welded Components," WRC Bulletin Vol. 474, Welding Research Council, 2002
11. Dong, P., Hong, J.K., and Cao, Z., "Structural Stress Based Master S-N Curve for Welded Joints," International Institute of Welding, IIW Doc. XIII-1930-02/XV-1119-02, IIW, 2002
12. Dong, P. and Hong, J.K., "The Master S-N Curve Approach to Fatigue of Vessel and Piping Welds," Welding in the World, **48** (2003), 28-36
13. Dong, P. and Hong, J. K., "The Master S-N Curve Approach to Fatigue Evaluation of Offshore and Marine Structures," in the Proceedings of the 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - 2004 Volume 2: Safety and Reliability, Materials Technology Workshop, OMAE2004-51324, 847-855, OMAE, 2004
14. Dong, P., Hong, J. K., and De Jesus, A. M. P., "Analysis of Recent Fatigue Data Using the Structural Stress Procedure in ASME Div 2 Rewrite," Transactions of ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, **139** (2007), 355-362
15. Dong, P., Hong, J.K., and Cao, Z., "Stresses and Stress Intensities at Notches: 'Anomalous Crack Growth' Revisited", International Journal of Fatigue, **25** (2003), 811-825
16. SAE FD&E Committee communication "Weld Challenge", March 2003 (also www.fatigue.org/weld/)
17. Kyuba, H. and Dong, P., Hong, J.K., and Agrawal, H., "SAE Weld Challenge Problem," SAE Paper No. 2004-01-1234, 2004
18. "As-built Models and Development of Fatigue Analysis Methodology," ASP 601 Lightweight Rear Chassis Project, AS/P, 2008 (also http://www.asp.org/database/custom/02_04_2009_FRAME_ChassisReport.pdf

19. Dong, P., Hong, J. K., Potukutchi, R., and Agrawal, H., "Master S-N Curve Development and Validations for Aluminum MIG and Laser Weld," IIW Doc. XIII-2035-04/XV-1172-04, IIW, 2004
20. Kang, H. T., Dong, P., and Hong, J. K., "Fatigue Analysis of Spot Welds Using a Mesh-Insensitive Structural Stress Approach," International Journal of Fatigue, **29** (2007), 1546-1553
21. Hong, J. K., "The Development of a Simplified Spot Weld Model for Battelle Structural Stress Calculation," SAE International Journal of Materials and Manufacturing, **4-1**, 4602-6012 (SAE Paper No. 2011-01-0479), 2011
22. User Manual for Wldss: A Structural Stress Postprocessor, Battelle SS JIP, March, 2012
23. Melander, A., Linder, J., Stensio, H., Larsson, M., Gustavsson, A., and Bjorkman, "How Defects in an Adhesive Layer Influence the Fatigue Strength of Bonded Steel-Sheet Specimens," Fatigue and Fracture Engineering and Material Structures, **22**: 1999, 421-426
24. Hong, J. K. and Forte, T. P., "Development of Fatigue Evaluation Procedure for Weld-Bonded Joints using the Battelle Structural Stress Method," SAE Paper No. 2012-01-0477, 2012



- 홍정균
- 1965년생
- Technical Lead, Center for Welded Structures Research, Battelle, USA
- 용접 잔류응력, 변형, 피로, 파괴
- e-mail : hong@battelle.org