

피로강도해석을 위한 용접잔류응력 이완의 정량적 평가

한승호[†] · 이탁기^{*} · 신병천^{*}
(2001년 12월 26일 접수, 2002년 8월 1일 심사완료)

A Quantitative Estimation of Welding Residual Stress Relaxation for Fatigue Strength Analysis

Seungho Han, Takkee Lee and Byungchun Shin

Key Words: Welding Residual Stress(용접잔류응력), Welded Component(용접구조물), Fatigue Load(피로하중), Stress Relaxation(응력이완)

Abstract

It is well known that the strength and the fatigue life of welded steel components are affected extensively by welding residual stresses distributed around their weldments under not only monotonic but also cyclic loads. The externally applied loads are to be superimposed with the welding residual stresses, so that unexpected deformations and failures of the components might occur. These residual stresses are not kept constant, but relaxed or redistributed during in service. Under monotonic loads the relaxation takes place when the sum of external and welding residual stress exceeds locally the yield stress of material used. By the way, it is shown that under cyclic loads the welding residual stress is considerably relieved by the first or the early cycles of loads, and then gradually relaxed with increasing loading cycles. Although many investigations in this field have been carried out, the phenomenon and mechanism of the stress relaxation are still not clear, and there are few comprehensive models to predict amount of relaxed welding residual stress. In this study, the characteristics of the welding residual stress relaxation under monotonic and cyclic loads were investigated, and a model to predict quantitatively amount of welding residual stress relaxation was proposed.

1. 서론

용접구조물에서 용접열에 의해 발생한 잔류응력은 구조물의 강도 및 피로수명에 큰 영향을 준다. 이러한 이유로 피로해석시 용접연결부 주변에 분포하는 용접잔류응력이 피로강도에 미치는 영향은 평균응력 효과로서 고려되고 있다. 그러나, 용접잔류응력은 구조물의 사용기간 동안 일정한 크기로 유지되지 않고, 이완되거나 재분포

되므로⁽¹⁻³⁾ 초기 잔류응력 크기만을 고려하여 단순히 평균응력 효과로 평가할 수 없으며, 특히 변동하중이 가해지는 경우 고하중에 의하여 용접잔류응력이 모두 이완되어 설계코드에 의한 피로수명이 과소평가되는 경우가 빈번하다. 보다 정량적이고 신뢰도가 높은 피로수명평가를 수행하기 위하여 용접잔류응력 이완도를 어떻게 평가하는가가 가장 중요한 문제로 대두되고 있으나, 현재까지 피로하중을 받는 용접구조물의 잔류응력 이완도를 평가할 수 있는 일반화된 모델은 제시되지 못한 실정이다.

피로하중을 받는 용접구조물의 잔류응력 이완에 미치는 주요한 인자는 응력범위과 하중반복수이고, 그 이외의 인자에 의한 영향은 무시할 수 있다고 알려져 있다.⁽⁴⁾

[†] 책임저자, 회원, 한국기계연구원 구조연구부

E-mail : seungho@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7433 FAX : (042)-868-7418

^{*} 회원, 한국기계연구원 구조연구부

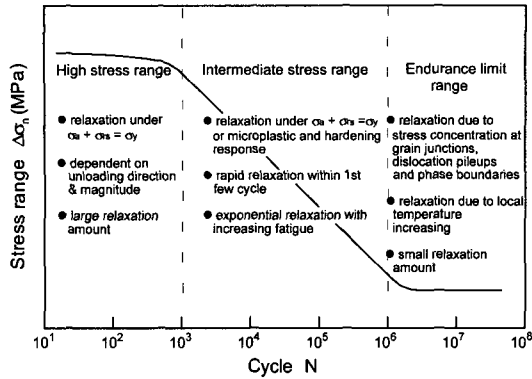


Fig. 1 The mechanism of residual stress relaxation according to fatigue stress range

Fig. 1은 하중반복수 N 에 따른 공칭응력범위 $\Delta\sigma_r$ 을 세 영역으로 구분하여 잔류응력 이완기구를 설명한 모식도이다. 고응력이 가해지는 영역에서 잔류응력 이완의 주요 기구는 작용응력과 잔류응력의 합이 재료의 항복응력을 초과함에 따라 나타나는 국부적인 소성변형이다. 시간강도 영역에서의 잔류응력 이완 특성은 첫 번째 또는 수 번째 하중반복 사이클에서 이완이 크게 발생하며, 사이클 수의 증가와 함께 지수적 혹은 대수적으로 이완량이 감소한다.^(1,2,5-7) 첫 번째 사이클 후 잔류응력 이완은 고응력이 가해지는 영역에서의 기구로 설명될 수 있으나, 하중반복수에 따른 이완기구⁽⁸⁾는 아직 명확하지 않다. 최근 Smith 등⁽⁹⁾은 하중반복수에 따른 잔류응력 이완을 multi-linear kinematic model을 이용한 수치해석기법으로 평가한바 있으나, 해석치와 실험치의 오차가 크게 나타났다. 외하중에 의한 작용응력과 잔류응력의 합이 사용 강재의 항복응력보다 매우 낮은 피로한도 영역에서도 잔류응력 이완이 발생한다. 아직까지 명확한 연구결과가 나와 있지는 않지만, 이 영역에서의 잔류응력 이완기구는 미시적 수준의 응력집중이 주요한 기구로서 설명되고 있다.⁽¹⁰⁾

용접구조물의 정도 높은 수명평가를 위하여 사용기간 중 이완 또는 재분포되는 용접잔류응력의 특성이 정량적으로 평가되어야 한다. 본 연구에서는 피로하중하 잔류응력 이완에 가장 큰 영향을 미치는 응력범위와 사이클 수를 고려한 용접잔류응력 이완량 예측모델을 제시하고자 한다.

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of SM490B

Chemical Composition (wt%)							
C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
0.155	1.304	0.0166	0.0104	0.423	0.032	0.038	0.018
Mechanical Properties							
σ_v (MPa)	UTS (MPa)		el. (%)				
352	514		29				

이를 위하여 다양한 크기의 정하중하에서 초기 잔류응력 크기에 따른 이완량을 계측하였고, 피로하중을 부하한 상태에서 실험적으로 얻어진 이완지수로부터 예측모델을 도출하였다.

2. 시험편 및 시험방법

2.1 시험편

사용재료는 용접구조용 강재인 두께 12mm의 SM490B이고, 이의 화학적 성분과 기계적 특성은 Table 1과 같다. 시험편 종류는 모재 및 용접시험편으로 구분하였다. 모재시험편은 용접작업 공정을 제외하면 용접시험편과 동일하다. 용접시험편의 제작공정은 다음과 같다. 강재를 104(폭)x400(길이)x12(두께)mm으로 가공하고, 용접선을 따라 7(폭)x10(깊이)mm의 Grooving 작업을 실시하였다. 용접시험편의 수축과 변형을 방지하기 위하여 시험편 고정용 지그를 Fig. 2와 같이 제작하여 용접을 수행하였고, 동판을 이면비드 용락 방지용으로 사용하였다. 사용된 용접법은 CO₂-가스 용접이며 자동용접 조건을 구현하기 위하여 볼스큐류를 이용한 모터이송장치에 용접기를 장착하는 방식을 채택하였다. 용접조건은 300A, 30V, 240mm/min이고, CO₂-유량은 18ℓ/min으로 고정하였으며, $\Phi 1.2$ 의 용접와이어를 사용하였다. 용접작업시 모재와 노즐간의 거리는 18mm로 일정하게 유지하였다. 입열량은 약 22,500J/cm이다. 용접작업이 완료된 후 시험편 온도가 150 ~ 200°C 사이에서 고정용 볼트를 풀고 시험편을 분리하였다. 이 시험편을 Fig. 3과 같이 제작하였다. 모재와 용접 시험편 모두 시편 중앙에 $\Phi 14$ 홀을 가공하여 피로시험시 균열발생위치를 모재로 국한시킴으로써 용접시험편의 경우 균열발생시 열영향부(Heat Affected Zone) 영향을 배제할 수 있었다.

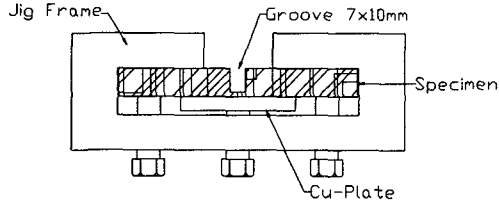


Fig. 2 Jig configuration for welding process

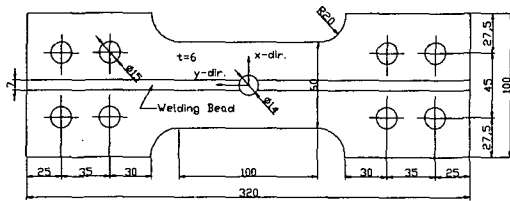


Fig. 3 Specimen configuration(unit:mm)

2.2 시험방법

정· 피로하중 부하를 위하여 용량이 25ton인 MTS사의 만능시험기를 이용하였다. 피로시험의 경우 하중비 R=0.1, 하중주파수 10Hz인 일정진폭 하중을 시험편에 가하였다.

용접 시험편의 잔류응력을 계측하기 위하여 단면절단법^(7,11)을 이용하였다. 단면절단법은 잔류응력 계측부위에 스트레인 게이지를 부착하고 단면을 절단시키면서 이완되는 스트레인 값으로 잔류응력을 계측하는 방법이다. 스트레인 게이지 부착위치와 절단면의 위치를 Fig. 4에 모식도로 나타내었다. 시험편 절단은 Hand Sawing으로 실시하였으며, 절단작업시 Thermocouple(Module 80TK FLUKE)을 절단면을 기준으로 스트레인 게이지 반대쪽에 부착하여 온도변화를 계측하였다. 이때 계측된 온도는 25~38°C로서 스트레인 게이지의 STC(Self Temperature Compensation)영역에 놓여, 절단시 발생한 열에 의한 스트레인 신호의 오차가 없음을 확인하였다. 각각의 스트레인 게이지에서 얻어진 신호로부터 측정된 잔류응력은 아래 식을 이용하여 계산하였다.

$$\sigma_{res,y} = -E \cdot (\epsilon_y + \mu \epsilon_x) / (1 - \mu^2) \quad (1)$$

$$\sigma_{res,x} = -E \cdot (\epsilon_x + \mu \epsilon_y) / (1 - \mu^2) \quad (2)$$

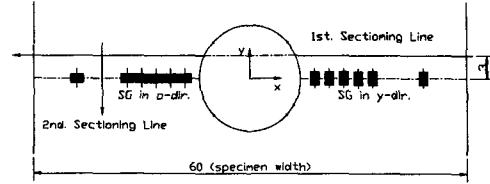


Fig. 4 Location of strain gages and sectioning lines(unit:mm)

피로하중 부하시 하중반복수에 따른 잔류응력 이완을 보다 효율적으로 계측하기 위하여 단면절단법 이외에 비파괴식 측정법인 자화식 응력측정법을 병행하였다. 사용된 장비는 Stresstech사의 STRESSSCAN 500C로서 잔류응력을 Magneto-elastic Interaction에 의한 Barkhausen Noise강도로 나타낼 수 있다.

3. 시험결과

3.1 용접잔류응력이 피로강도에 미치는 영향

모재 및 용접시험편에 대하여 실시한 피로시험 결과를 공칭응력범위 $\Delta\sigma_n$ 와 시험편 파단 하중반복수 N 의 관계로 Fig. 5에 나타내었고, $N=A \cdot \Delta\sigma_n^m$ 로 표기되는 S-N 선도도 함께 도시하였다. S-N 선도의 기울기 m 은 모재와 용접시험편의 경우 각각 8.78 및 5.97로 차이를 보이나, 시간강도 영역에서의 피로강도 준위는 서로 비슷한 경향을 보이고 있다. 두 선도는 $\Delta\sigma_n=250\text{MPa}$ 정도에서 교차하고, 그 이하의 영역에서 용접시험편의 피로강도가 현저히 감소하고 있다. 모재의 경우 $N=2 \times 10^6$ cycles에 대한 피로한도 값은 202MPa로 계측되었으며, 용접재의 피로한도는 172MPa로 낮게 나타났다. 용접시험편의 경우 균열발생 위치가 시험편의 열영향부를 벗어난 $\phi 14$ 홀 선단이므로 모재와 비교하여 재료물성 차이에 의한 영향을 배제 할 수 있어, 두 시험편의 피로강도 차이는 용접잔류응력에 기인한다고 판단된다. $\Delta\sigma_n \geq 250\text{MPa}$ 영역에서는 용접시험편의 잔류응력이 외력에 의하여 모두 이완되어 모재와 용접재가 동일한 거동을 보이고, $\Delta\sigma_n < 250\text{MPa}$ 영역에서는 용접시험편에 존재하는 잔류응력이 완전히 이완되지 못하고 부분적으로 남아, 이 잔류응력이 외력과 중첩되어 파단수명을 감소시킨다.

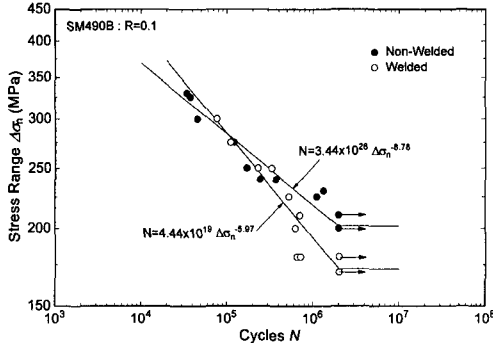


Fig. 5 Fatigue test results

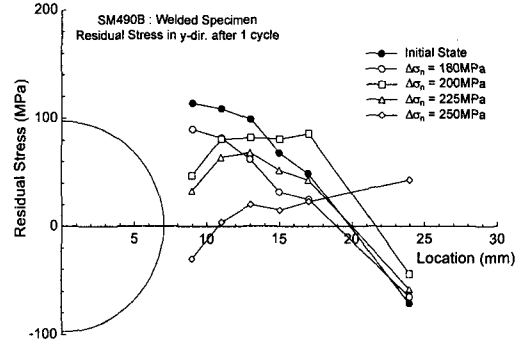


Fig. 6 Residual stress in y-dir. after 1 cycle load

3.2 정하중 부하시 용접잔류응력 이완

부하하중 크기에 따른 잔류응력 이완 정도를 평가하기 위하여 하중크기를 변화시키면서 잔류응력을 단면절단법으로 계측하였다. $\Delta\sigma_n=180, 200, 225, 250\text{MPa}$ 에 준하는 하중을 1회 가한 후 잔류응력(하중방향) 계측결과를 Fig. 6과 같이 나타내었다. 하중을 가하지 않은 초기상태에서 잔류응력은 홀 선단 $2\text{mm}(x=9\text{mm})$ 에서 120MPa 정도의 인장응력이고, 이곳에서 멀어질수록 급격히 감소하면서 $x=24\text{mm}$ 에서는 -70MPa 정도의 압축응력으로 존재하였다. $\Delta\sigma_n$ 의 크기가 증가할수록 홀 근방의 잔류응력은 줄어들었으며, $\Delta\sigma_n=250\text{MPa}$ 에 준하는 하중을 가한 후에는 인장잔류응력이 모두 소멸되어 결국에는 -40MPa 정도의 압축응력으로 변화하였다. 이 현상은 앞서 설명한 Fig. 5의 피로 시험 결과와 일맥상통하다. 즉, $\Delta\sigma_n=250\text{MPa}$ 을 중심으로 이 이하의 응력수준에서는 시험편 홀 근방에 인장 잔류응력이 계속 남아있고, 이는 외력과 중첩되어 피로수명을 감소시키는 주요한 원인이 된다.

외력에 의한 잔류응력 이완이 어떤 기구에 의하여 진행되는지를 평가하기 위하여, 외력을 가했을 때 홀 주변에 응력집중을 고려한 실제 작용응력 σ_{app}/σ_y 를 FEM 해석으로 구하고, Fig. 6의 초기 잔류응력 분포를 항복응력으로 표준화한 값 $(\sigma_{res})_{ini}/\sigma_y$ 와 공칭응력 $\Delta\sigma_n$ 를 1회 가한 후의 잔류응력 분포 σ_{res}/σ_y 를 Fig. 7에 나타내었다. 잔류응력 이완은 중첩응력 $\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y$ 가 1을 넘는 시점부터 발생하며, $\Delta\sigma_n$ 이 크면 홀 근방에 작용하는 중첩응력이 광범위하게 1을 넘어서며 잔류응력 이완이 크게 일어난다. 이를 통해 외력에 의한 잔류응력 이완량은 외력과 잔류응력의 중첩응력

크기로서 정량화 할 수 있음을 확인하였다.

Fig. 8은 외력에 의한 잔류응력 이완 정도를 정량적으로 평가하기 위하여, Fig. 7에서 $\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y \geq 1$ 인 결과를 $(\sigma_{res})_{1cycle}/(\sigma_{res})_{ini}$ 과 $\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y$ 로 나타낸 결과이다. $\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y < 1$ 영역에서는 잔류응력 이완현상은 없고, $\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y$ 이 1을 초과함에 따라 잔류응력이 이완된다. $\Delta\sigma_n=250\text{MPa}$ 의 일부 실험결과를 제외하고 $\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y$ 가 증가함에 따라 $(\sigma_{res})_{1cycle}/(\sigma_{res})_{ini}$ 은 선형적으로 감소한다. 완전한 잔류응력 이완을 위해서는 $\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y$ 이 1.625를 초과해야 하고, 그 이상에서는 인장 잔류응력이 압축으로 변한다. 이상의 결과로부터 하중크기에 따른 잔류응력 이완 추정모델을 다음과 같이 제안하였다.

$$\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y < 1 : (\sigma_{res})_{1cycle}/(\sigma_{res})_{ini} = 1 \tag{3}$$

$$\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y \geq 1 : (\sigma_{res})_{1cycle}/(\sigma_{res})_{ini} = -1.6[\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y] + 2.6 \tag{4}$$

제안된 모델을 Iida 등⁽⁶⁾이 실시한 SUS 316에 대한 잔류응력 이완실험 결과와 비교해본 결과 Fig. 8에서 보듯이 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 이는 제안된 모델이 작용응력 및 잔류응력을 사용 강재의 항복응력으로 표준화하여 항복응력이 서로 다른 다양한 강종의 잔류응력 이완량 예측에 확장 가능함을 의미한다.

3.3 피로하중 부하시 용접잔류응력 이완

하중반복수에 따라 이완된 잔류응력 분포를 파

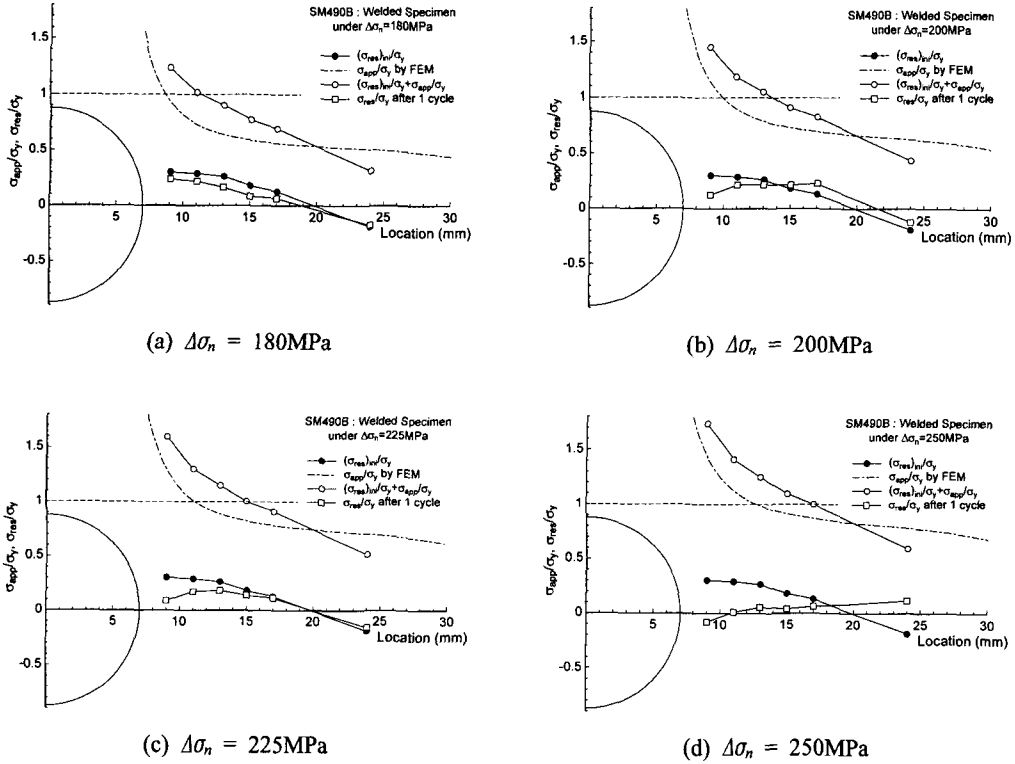


Fig. 7 σ_{app}/σ_y and σ_{res}/σ_y in y-dir. before and after 1 cycle load

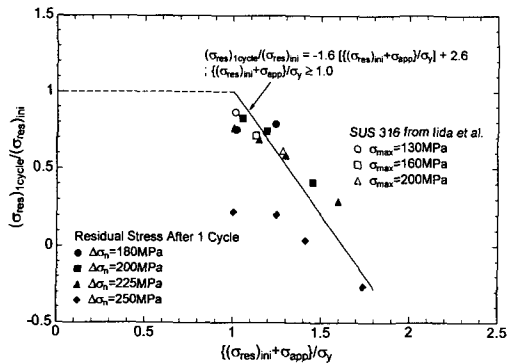
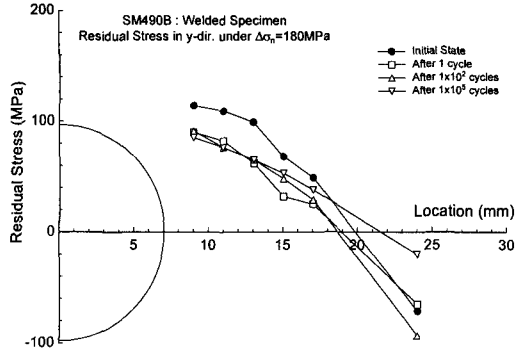


Fig. 8 Change of $(\sigma_{res})_{1cycle}/(\sigma_{res})_{ini}$ due to $\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y$

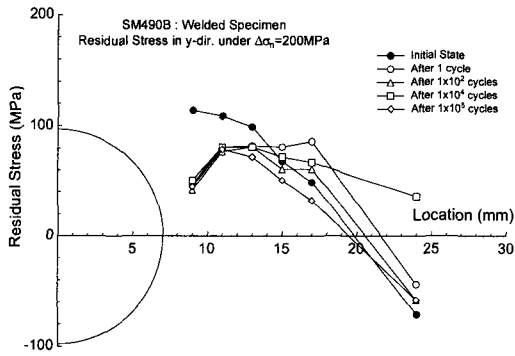
악하기 위하여 단면절단법을 적용하였다. Fig. 9는 $\Delta\sigma_n=180, 200\text{MPa}$ 의 낮은 응력수준에서 하중반복수에 따른 잔류응력 변화를 계측한 결과이다. 두 경우 모두 잔류응력은 첫 번째 사이클에서 큰 폭으로 이완되고, 이 후 반복되는 사이클 수에서

는 큰 변화가 관찰되지 않았다.

Fig. 9의 결과 중 홀 선단($x=9\text{mm}$)의 계측결과를 첫 번째 사이클 후의 결과로 나눈 $(\sigma_{res})_{relax}/(\sigma_{res})_{1cycle}$ 을 y-축으로 하고, 이를 사이클 수 N 으로 정리하여 Fig. 10에 나타내었다. $(\sigma_{res})_{relax}/(\sigma_{res})_{1cycle}$ 값은 $N=10^5$ cycles에 도달될 때까지 큰 변화 없이 1에 머무름을 알 수 있다. 잔류응력 계측에 적용된 단면절단법은 파괴적인 방법으로, 한 시험편에 대하여 정해진 사이클 수에 대한 시험결과가 얻어지므로 피로하중 부하에 따른 잔류응력 이완 거동평가에 적용하기에 많은 어려움이 따른다. 하중반복수에 따른 보다 효과적인 잔류응력 이완량 계측을 위하여 비파괴 계측법의 일종인 자화식 응력측정법을 부하응력 범위가 용접시험편 피로한도영역인 $\Delta\sigma_n=160, 180$ 및 200MPa 에 적용하였다. 홀 선단($x=9\text{mm}$)의 계측결과를 단면절단법의 결과와 같이 Fig. 10에 도시하였다.



(a) $\Delta\sigma_n=180\text{MPa}$



(b) $\Delta\sigma_n=200\text{MPa}$

Fig. 9 Residual stress relaxation in y-dir. due to loading cycles

$(\sigma_{res})_{relax}/(\sigma_{res})_{1cycle}$ 는 하중반복수 N 이 10^7 cycles에 도달 될 때까지 점진적으로 감소하는 경향을 보였다. $(\sigma_{res})_{relax}/(\sigma_{res})_{1cycle} \cdot N$ 의 관계는 다음과 같은 멱함수의 형태로 표현할 수 있다.

$$(\sigma_{res})_{relax}/(\sigma_{res})_{1cycle} = N^{-k} \quad (5)$$

연강에 대한 일정변형을 시험하의 반복평균응력 이완거동에 대한 연구^(4,12)에서도 식 (5)와 유사한 형태의 표현식을 찾아 볼 수 있다. 식 (5)의 k 는 이완지수로서 하중반복수에 따른 잔류응력 이완도를 결정한다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 이완지수 k 는 0.004로 얻어졌다.

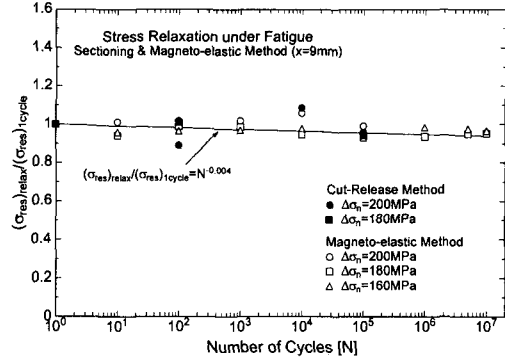


Fig. 10 Residual stress relaxation under fatigue loads

4. 고찰

4.1 피로하중하 용접잔류응력 이완모델

정하중 및 피로하중 부하시 잔류응력 이완량을 추정할 수 있는 식 (3), (4) 및 (5)를 고려하면 하중 부하에 따른 잔류응력 이완량 $(\sigma_{res})_{relax}$ 를 외응력과 초기 잔류응력의 합인 $\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y$ 의 향으로 식 (6) 및 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y < 1 : \quad (\sigma_{res})_{relax} = (\sigma_{res})_{ini} \cdot N^{-0.004} \quad (6)$$

$$\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y \geq 1 : \quad (\sigma_{res})_{relax} = (\sigma_{res})_{ini} \cdot (-1.6[\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y] + 2.6) \cdot N^{-0.004} \quad (7)$$

$\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y < 1$ 의 경우, 시험편에 가해지는 응력 수준이 재료의 항복응력 보다 낮으므로 잔류응력 이완은 결정립 경계, 전위 집적부 그리고 변형된 결정립에서 발생하는 응력집중 및 변형을 경화에 의한 미세 소성변형에 의해 결정된다.^(2,9) 본 연구에서 제안한 부하 사이클 수에 따른 잔류응력 이완모델은 저응력 수준에서의 이완기구는 포함되어있지 않으며, 단지 인장피로 실험에 의한 현상학적인 특성만을 고려한 경험식이다. 따라서, 향후 항복응력이 서로 다른 강종에 대하여 변동하중이 부하되는 경우에 대한 연구가 진행될 예정이다.

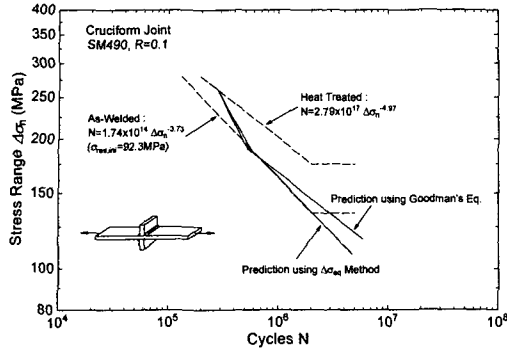


Fig. 11 S-N curves considering influence of residual stress relaxation due to magnitude of applied stress

4.2 용접잔류응력 이완을 고려한 Hot-spot 응력 기준 피로강도 평가

Hot-Spot 응력(구조적 응력) 개념은 다양한 형상의 용접연결부에 대해 하나의 S-N 선도를 얻을 수 있으므로^(13,14) 여러 피로설계 기준이나 코드에서 채택하고 있다.⁽¹⁵⁻¹⁸⁾ 그러나, 이 S-N 선도는 잔류응력의 크기는 물론 이완을 고려하지 않고, 이 효과가 공칭응력 기준 S-N 선도를 실험적으로 구할 때 포함되어 있다고 진제하고 있기 때문에, 잔류응력 이완에 의한 평균응력 효과가 나타나는 경우는 묘사하지 못한다. 저자 등은 본 연구에서 얻어진 잔류응력 이완 특성식을 이용하여 초기잔류응력 및 피로하중하 이완도를 고려한 용접부 피로수명평가법($\Delta\sigma_{eq}$ -Method)⁽¹⁹⁾을 개발하고 있다. 이 평가법을 검증하기 위하여, Cruciform Joint에 대한 공칭응력 기준 S-N 선도를 활용하였다. Cruciform Joint의 경우 용접비드 선단의 구조적 응력집중계수 K_S 는 1로서 공칭응력과 Hot-Spot 응력이 서로 같은 크기를 갖게 되어, 여기서 얻어진 결과는 Hot-Spot응력 기준 피로강도 평가를 위한 기본자료로서 활용할 수 있다. 용접 잔류응력을 제거하기 위하여 열처리를 실시한 Cruciform Joint에 대한 S-N 선도를 실험적으로 구하였다. 이 S-N 선도의 결과를 기준으로 식 (6), (7) 및 $\Delta\sigma_{eq}$ -Method를 적용하면 Fig. 11과 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림에서 $\Delta\sigma_{eq}$ -Method로 예측된 결과를 as-welded 상태의 Cruciform Joint의 것^(13,14)과 비교해 본 결과 잔류응력 이완이 발생하는 영역 이하에서 서로 잘 일치함이 관찰되었다. 잔류응

력 이완 영역은 $\Delta\sigma_r=250\sim 180\text{MPa}$ 으로 Fig. 6의 결과와도 동일하였다. 반면 Goodman의 평균응력 효과를 고려하여 예측된 S-N 선도는 작용응력이 작아짐에 따라 기울기가 커지면서 as-welded 상태의 Cruciform Joint 피로강도를 과대평가하는 경향이 있다.

잔류응력 이완영역을 본 연구에서 제안한 잔류응력 이완식으로 평가할 수 있다면, 용접구조물의 초기 잔류응력 크기 및 사용 기간 중 발생하는 잔류응력 이완정도를 고려한 피로수명 평가가 가능하리라 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 작용하중 크기에 따라 용접잔류응력 이완에 미치는 영향 그리고 피로하중하 응력진폭과 사이클 수의 영향을 고려하여 용접부 잔류응력 이완을 정량적으로 평가하는 기법을 제안하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 피로한도 영역에서 용접재의 피로강도는 모재에 비해 낮게 나타나는데, 이는 용접재의 잔류응력이 이완되지 못하고 외부응력과 중첩되어 평균응력이 상승되었기 때문이다.

(2) 정하중하 용접잔류응력 이완은 잔류응력과 외부응력의 합이 강재의 항복응력에 도달되었을 때 발생하며, 합응력의 크기에 따라 이완량도 결정된다. 이를 토대로 잔류응력 이완 예측모델을 제시할 수 있다.

(3) 피로하중하 용접잔류응력은 첫 번째 사이클에서 대부분 이완되고, 이후 계속되는 하중반복수에 따라 지수적으로 이완된다. 이완지수 k 는 0.004로 얻어졌다.

(5) 본 연구에서 제안된 용접잔류응력 이완식은 잔류응력을 평균응력 효과로 고려한 피로수명 평가에 적용할 수 있다.

후 기

본 연구내용은 과학기술부 국가지정연구실과제인 대형용접구조물의 피로수명예측기술개발의 일부로 연구수행에 지원을 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Vöhringer, O., 1987, "Relaxation of Residual Stress by Annealing or Mechanical Treatment," *Advances in Surface Treatment : Technology-Applications-Effects*, pp. 367~396.
- (2) James, M. R., 1987, "Relaxation of Residual Stress an Overview," *Advances in Surface Treatment : Technology-Applications-Effects*, pp. 349~365.
- (3) Manjoine, M. J., 1982, "Stress Relaxation Characteristics and Data Utilization," *Residual Stress and Stress Relaxation*, Plenum Press, pp. 519~530.
- (4) Jhansale, H. R. and Topper, T. H., 1973, "In Cyclic Stress-Strain Behavior-Analysis, Experimentation and Failure Prediction," *ASTM STP 519*, pp. 246~270.
- (5) Trufiakov, V. I., Guscha, O. I. and Kudriavzev, Y. F., 1981, "Alternation of Residual Stresses in Welded Joints at Cyclic Loading," *IIW Doc. XIII-1031-81*.
- (6) Iida, K. and Takanashi, M., 1997, "Relaxation of Welding Residual Stresses by Cyclic Zero-To-Tension Loading," *IIW Doc. XIII-1685-97*.
- (7) Iida, K., Yamamoto, S. and Takanashi, M., 1997, "Residual Stress Relaxation by Reversed Loading," *Welding in the World*, Vol. 39, No. 3, pp. 138~144.
- (8) Kodama, S., 1971, "X-Ray Study on Strength and Deformation of Metals," *Soc. of Matls. Sci. of Japan*, pp. 43~47.
- (9) Smith, D. J., Farrahi, G. H., Zhu, W. X. and McMahon, C. A., 2001, "Experimental Measurement and Finite Element Simulation of the Interaction between Residual Stresses and Mechanical Loading," *Int. J. of Fatigue* 23, pp. 293~302.
- (10) Nelson, D. V., Ricklefs, R. W. and Evans, W. P., 1970, "Achievement of High Fatigue Resistance in Metals and Alloys," *ASTM STP 467*, pp. 228~253.
- (11) Lu, J., 1996, "Handbook of Measurement of Residual Stresses," *Society for Experimental Mechanics, Inc.*, pp. 49~70.
- (12) Skorupa, M., 1990, "Fatigue Crack Initiation Life Prediction for Welded Joints by Low Cycle Fatigue Approach," *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 13, No. 6, pp. 597~613.
- (13) Han, S., Han, J. and Shin, B. 1998, "Fatigue Strength Estimation and Fatigue Design of Welded Members under Hot-Spot Stress Concept," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 22, No. 11, pp. 2072~2083.
- (14) Han, S. and Shin B., 2000, "The Use of Hot Spot Stress for Estimating the Fatigue Strength of Welded Components," *Steel Research* 71, No. 11, pp. 466~473.
- (15) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 1968, Section III Nuclear Vessels; Section VIII, Div. 2 Alternative Rules for Pressure Vessels, American Society of Mech. Eng.
- (16) Iida, K., 1983, "Application of the Hot Spot Strain Concept to Fatigue Life Prediction," *Doc. IIS/IIW-780-83*.
- (17) AWS-D1-1, 1981, "Structural Welding Code, Part 10, Design of New Tubular Structures," American Welding Society.
- (18) API-RP2A, 1981, "Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms," American Petroleum Institute.
- (19) Lee, T., Nam, Y., Han, S. and Shin, B., 2002, "A New Model for the Fatigue Life Prediction considering Residual Stress Relaxation," *Proc. of the 12th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Japan, pp. 214~219.