

## 잔류응력 이완 및 이의 평균응력 효과를 고려한 용접부 피로수명 평가

한승호\* · 한정우\* · 신병천\* · 김재훈\*\*  
(2002년 6월 14일 접수, 2002년 12월 2일 심사완료)

### Fatigue Life Estimation of Welded Components Considering Welding Residual Stress Relaxation and Its Mean Stress Effect

Seungho-Ho Han, Jeong-Woo Han, Byung-Chun Shin and Jae-Hoon Kim

**Key Words:** Fatigue Life(피로수명), Welding Residual Stress(용접잔류응력), Stress Relaxation(응력 이완), Hot-Spot Stress(Hot-Spot응력), Equivalent Stress(등가응력)

#### Abstract

The fatigue life of welded joints is sensitive to welding residual stress and complexity of their geometric shapes. To predict the fatigue life more reasonably, the effects of welding residual stress and its relaxation on their fatigue strengths should be considered quantitatively, which are often regarded to be equivalent to the effects of mean stresses by external loads. The hot-spot stress concept should be also adopted which can reduce the dependence of fatigue strengths for various welding details. Considering the factors mentioned above, a fatigue life prediction model using the modified Goodman's diagram was proposed. In this model, an equivalent stress was introduced which is composed of the mean stress based on the hot-spot stress concept and the relaxed welding residual stress. From the verification of the proposed model to real welding details, it is proved that this model can be applied to predict reasonably their fatigue lives.

#### 1. 서론

용접구조물에서 용접열에 의해 발생된 잔류응력은 구조물의 강도 및 피로수명에 큰 영향을 준다. 인장잔류응력이 작용하는 용접구조물의 경우, 잔류응력은 외력과 중첩되어 평균응력을 상승시키고, 이는 피로수명을 급격히 단축시키는 주요 원인이 된다. 일반적으로 용접잔류응력이 피로강도에 미치는 영향은 평균응력 효과로서 고려되고 있다.<sup>(1-3)</sup> 또한, 용접잔류응력은 구조물의 사용기

간 동안 일정한 크기로 유지되지 않고, 하중크기 및 하중반복수에 따라 이완되거나 재분포된다.<sup>(4,5)</sup> 특히 변동하중이 가해지는 경우, 전체 하중스펙트럼에서 수회의 고하중에 의하여 잔류응력이 모두 이완되기도 한다. 따라서 용접구조물 설계시 초기 잔류응력의 크기만을 고려하여 피로수명을 평가할 경우, 과소 평가된 결과가 도출될 수 있다.

한편, 용접구조설계에 있어서 피로취약부의 대표응력 산정과 이를 통한 피로강도평가를 위하여 Hot-Spot응력이 이용되고 있다.<sup>(6-8)</sup> Hot-Spot응력은 용접연결부의 구조적 형상에 기인한 구조적응력으로, 용접비드 형상의 영향을 배제한 대표응력의 하나이다. Hot-Spot응력을 산정하기 위하여 용접비드 단방의 응력분포를 구하고, 비드 선단에서 용접부 두께 0.5t 및 1.5t 만큼 떨어진 위치의

\* 책임저자, 회원, 한국기계연구원 구조연구부  
E-mail : seungho@kimm.re.kr

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

\* 회원, 회원, 한국기계연구원 구조연구부

\*\* 회원, 충남대학교 기계설계공학과

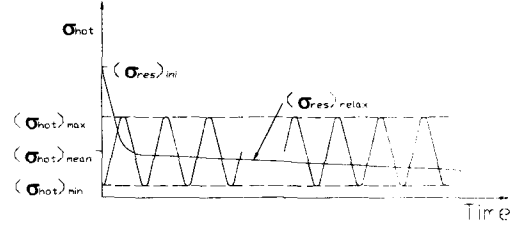
응력값을 외삽하는 방법을 활용한다. Hot-Spot 응력을 이용하면, 공칭응력 기준 S-N선도와 다르게 용접연결부 형상에 무관한 하나의 통일된 S-N선도를 산출할 수 있어, 복잡한 형태의 용접연결부에 대한 피로강도평가를 효과적으로 수행할 수 있다. 최근에 Toyosada 등<sup>(9)</sup>은 용접잔류응력, 응력비 및 용접부 구조형상이 피로강도에 미치는 영향을 모두 고려한 통일적인 S-N선도를 구한 바 있다. 이는 MIL-HDBK-5D법<sup>(10)</sup>의 개념을 도입하고, 철강재에 적용하기 위해 일부 수정한 식<sup>(11)</sup>을 이용한 것으로 초기잔류응력과 Hot-Spot응력으로 대표응력을 평가하는 방법이다. 그러나, 이 방법은 구조물의 사용 중 발생할 수 있는 용접잔류응력 이완을 전혀 고려하지 못하는 문제점을 안고 있다.

보다 정량적이고 신뢰도 높은 용접구조물의 피로수명평가를 수행하기 위하여, 피로강도에 미치는 잔류응력의 효과와 피로하중에 의한 잔류응력 이완을 모두 고려할 수 있는 방법이 개발되어야 한다. 본 연구에서는 초기잔류응력과 부하하중에 따른 이완 및 용접구조형상에 무관한 Hot-Spot응력 개념을 고려한 등가응력 산정법을 개발하였고, 또한 소형 및 대형용접구조물의 피로수명평가에 적용하여 이의 공학적 응용의 타당성을 검토하였다.

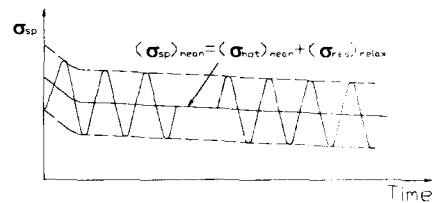
2. 등가응력 도입 및 잔류응력 이완

2.1 등가응력 도입

용접부 주변에 분포하는 잔류응력은 외력에 의해 이완되고, 이완된 잔류응력은 작용응력과 중첩되어 평균응력을 상승시킨다. Fig. 1은 시간경과에 따라 이완되는 잔류응력  $\sigma_{res}$ 와 Hot-Spot응력  $\sigma_{hot}$ 이 중첩된 중첩응력  $\sigma_{sp}$ 의 변화과정을 나타낸 모식도이다. 초기잔류응력  $(\sigma_{res})_{ini}$ 는 피로하중의 첫 번째 사이클에서 크게 감소하고, 계속되는 사이클 수에 이완되고 남은 잔류응력  $(\sigma_{res})_{relax}$ 는 지수적으로 감소하는 특성이 있다(Fig. 1(a) : 다음 절에서 자세히 설명).  $(\sigma_{res})_{relax}$ 는 Fig. 1(b)와 같이  $\sigma_{hot}$ 과 중첩된다.  $\sigma_{sp}$ -Time 선도에서 일정진폭응력 선도인  $\sigma_{hot}$ -Time 선도와 다르게  $(\sigma_{res})_{relax}$ 에 의하여 평균중첩응력  $(\sigma_{sp})_{mean}$ 이 시간에 따라 계속 변하게 된다.

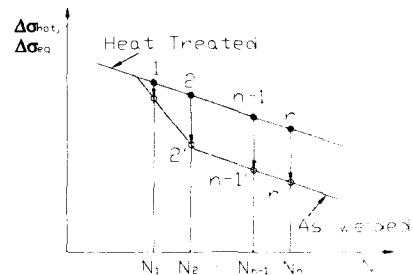


(a)  $\sigma_{hot}$  and  $(\sigma_{res})_{relax}$

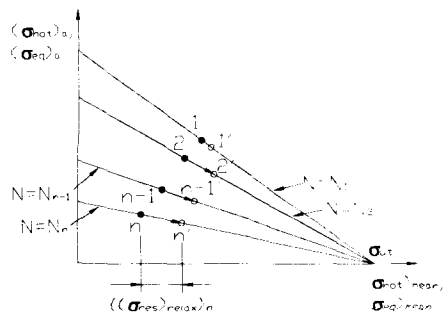


(b) Superposition of  $\sigma_{hot}$  and  $(\sigma_{res})_{relax}$

Fig. 1 Characteristic of superposed stress



(a) S-N curves of HT and AW components



(b) Constant life curves in Haigh diagram

Fig. 2 Prediction of S-N curve based on equivalent stress concept

$(\sigma_{sp})_{mean}$ 이 계속 변하는 응력장에서 이를 S-N선도로 표시하기 위하여 증가응력범위  $\Delta\sigma_{eq}$ 가 도입되었다. 여기서  $\Delta\sigma_{eq}$ 는 잔류응력이 제거된 시험편의  $\Delta\sigma_{hot}$ 과 동일한 피로수명을 갖는 잔류응력을 포함한 시험편의 응력범위이다.  $\Delta\sigma_{eq}$ 를 산정하기 위하여 응력진폭과 평균응력으로 표현되는 Haigh diagram을 이용하였고, 잔류응력에 의한 평균응력 변화가 피로강도에 미치는 영향은 식 (1)과 같은 수정 Goodman식이 활용되었다.

$$\sigma_a = \sigma_c \cdot (1 - \sigma_{mean}/\sigma_{ut}) \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_a$ 는 응력진폭,  $\sigma_c$ 는 응력비  $R = -1$ 인 응력진폭,  $\sigma_{mean}$ 은 평균응력 그리고  $\sigma_{ut}$ 는 인장강도이다. Fig. 2는 증가응력 도입을 통한 용접재의 S-N선도 추정법( $\Delta\sigma_{eq}$ -method)을 나타낸 모식도로서, Fig. 2(a)는 열처리(HT : heat treated) 및 비열처리(AW : as welded) 용접재의 S-N선도이고, Fig. 2(b)는 x-축을  $\sigma_{mean}$  그리고 y-축을  $\sigma_a$ 로 정리한 Haigh diagram이다. Fig. 2(a)의 잔류응력을 제거한 열처리 시험편의 S-N선도(응력비  $R$  일정)에서  $n$ 개의 수명( $N_1, N_2, \dots, N_n$ )에 준하는 응력범위  $\Delta\sigma_{hot}$ 을 정한다.(●도 표기) 각  $\Delta\sigma_{hot}$ 은 식 (1)의 수정 Goodman식으로부터 Fig. 2(b)의 Haigh diagram에  $n$ 개의 constant life curve 상에 ● 기호로 표기된다. 용접잔류응력의 평균응력 효과에 의해  $\Delta\sigma_{hot}$ 과 동일 수명을 갖는  $\Delta\sigma_{eq}$ 는 constant life curve 상의  $\Delta\sigma_{hot}$ 에 준하는  $(\sigma_{hot})_{mean}$ 과  $(\sigma_{hot})_a$ 가 외력에 의한 용접잔류응력 이완 후 외응력과 중첩되는 잔류응력 크기  $(\sigma_{res})_{relax}$  만큼  $(\sigma_{hot})_{mean}$ 이 변화되고, 평균응력 상승에 따라  $(\sigma_{hot})_a$ 가 감소되어 ● 기호로 표기된 위치로 이동된다. Constant life curve 상에서의 이동은 Fig. 2(a)의 S-N선도에서 동일한 수명 선상에서 수직이동과 등치된다. 즉, 각 일정수명 선도의  $(\sigma_{hot})_{mean}$ 과 잔류응력 이완이 고려된  $(\sigma_{res})_{relax}$ 로부터  $(\sigma_{eq})_{mean}$ 이 계산되면, 임의의 크기의 잔류응력을 갖는 용접연결부의 S-N선도를 예측할 수 있다. 예측된 S-N선도에서 응력이 높은 영역에서는 잔류응력 이완이 완전히 이루어져 증가응력범위  $\Delta\sigma_{eq}$ 가 열처리한 경우의  $\Delta\sigma_{hot}$ 과 같고, 이보다 낮은 응력범위에서는 부분적으로 잔류응력이 이완되어  $\Delta\sigma_{eq}$ 가  $\Delta\sigma_{hot}$  보다 작아지면서 S-N선도의 기울기가 변하게 된다. 잔류응력 이완이 매우 적은 낮은 응력범위에서는 초기잔류응력

$(\sigma_{res})_{ini}$ 이 계속되는 하중반복에도 불구하고 거의 일정하게 유지되면서  $(\sigma_{eq})_{mean}$ 을 상승시켜,  $\Delta\sigma_{eq}$ 는 열처리한 경우의  $\Delta\sigma_{hot}$ 에 비하여 현저히 감소한다.

$\Delta\sigma_{eq}$ -method를 적용하는 경우,  $\Delta\sigma_{eq}$ 의 크기는 초기잔류응력  $(\sigma_{res})_{ini}$ 과 외력에 의한 이완후의 잔류응력  $(\sigma_{res})_{relax}$ 에 의해 결정된다. 따라서, 잔류응력 이완을 고려한 엄밀한  $(\sigma_{res})_{relax}$ 의 평가가 요구된다. 다음절에서  $(\sigma_{res})_{relax}$ 의 평가모델에 대하여 설명하겠다.

### 2.2 잔류응력 이완평가

잔류응력이 존재하는 부재에 외하중이 작용할 때 외하중에 의한 작용응력과 잔류응력의 합이 사용재료의 항복응력을 초과하면, 잔류응력은 이완된다.<sup>(4,5)</sup> 피로하중을 받는 용접구조물의 잔류응력 이완에 미치는 주요한 인자는 응력범위와 하중반복수이다. 잔류응력 이완 특성을 살펴보면, 첫 번째 또는 수 번째 하중반복수에서 이완이 크게 발생하며, 이후 하중반복수의 증가와 함께 이완량이 지수적으로 감소한다.

한승호 등<sup>(7)</sup>은 일정진폭하중 하 하중반복수와 용접잔류응력의 이완에 대하여 다음과 같은 형태의 관계식을 제안한 바 있다.

$$(\sigma_{res})_{relax}/(\sigma_{res})_{cycle} = N^{-k} \quad (2)$$

여기서,  $(\sigma_{res})_{cycle}$ 는 첫 번째 반복수 후 이완되고 남은 잔류응력,  $N$ 은 하중반복수 그리고  $k$ 는 이완지수이다.  $(\sigma_{res})_{cycle}$ 는 정하중시험을 통해 초기잔류응력  $(\sigma_{res})_{ini}$ 에 대한 비로서 나타낼 수 있다. Fig. 3은 일반 용접구조용 강재인 SM490B에 대한 정하중시험결과로서,  $(\sigma_{res})_{ini}$ 과 외하중에 의한 작용응력  $\sigma_{app}$ 의 합이 사용강재의 항복응력을 초과하는 경우, 초과하는 정도에 따라 잔류응력 이완량이 결정된다. 즉,  $\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y$ 가 증가함에 따라  $(\sigma_{res})_{cycle}/(\sigma_{res})_{ini}$ 은 선형적으로 감소하고, 이는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y < 1 : \\ & (\sigma_{res})_{cycle}/(\sigma_{res})_{ini} = 1 \quad (3) \\ & \{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y \geq 1 : \\ & (\sigma_{res})_{cycle}/(\sigma_{res})_{ini} \\ & = -1.6[\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y] + 2.6 \quad (4) \end{aligned}$$

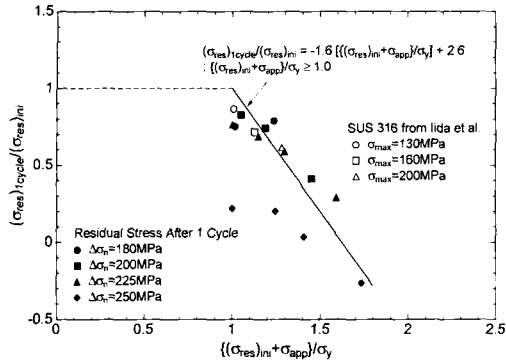


Fig. 3 Change of  $(\sigma_{res})_{1cycle}/(\sigma_{res})_{ini}$  due to  $\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y$

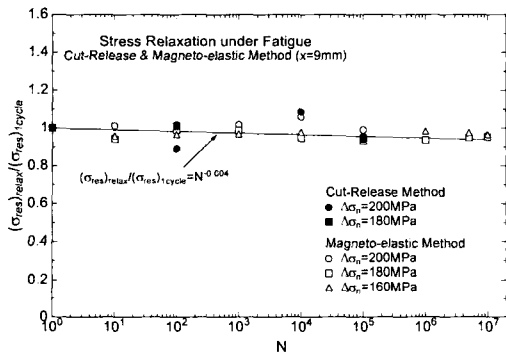


Fig. 4 Residual stress relaxation under fatigue loads

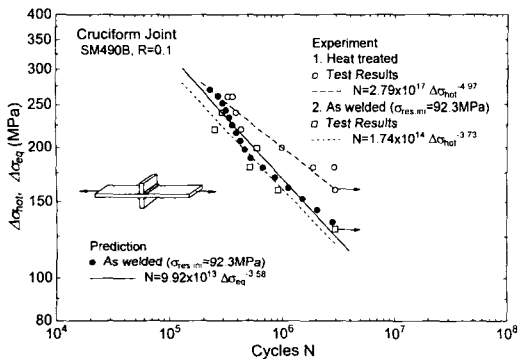


Fig. 5 Experimental and predicted S-N curves for cruciform joint

Fig. 4는 식 (2)의 이완지수  $k$ 를 구하기 위하여 피로하중을 부하하면서 잔류응력 이완크기를 측

정한 결과이다.  $(\sigma_{res})_{relax}/(\sigma_{res})_{1cycle}$ 는 하중반복수  $N$ 이  $10^7$  cycles에 도달 될 때까지 점진적으로 감소하는 경향을 보였고, 이를 통해  $k$ 는 0.004로 얻어졌다. 식 (2)에 식 (3) 및 (4)를 대입하면, 피로하중하 이완된 잔류응력 크기  $(\sigma_{res})_{relax}$ 를  $\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y$ 의 향으로 나타낼 수 있다.

$$\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y < 1 : (\sigma_{res})_{relax} = (\sigma_{res})_{ini} \cdot N^{-0.004} \quad (5)$$

$$\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y \geq 1 : (\sigma_{res})_{relax} = (\sigma_{res})_{ini} \cdot (-1.6[\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y + 2.6] \cdot N^{-0.004} \quad (6)$$

식 (5) 및 (6)으로 얻어지는  $(\sigma_{res})_{relax}$ 를 Fig. 2의 등가응력 개념에 적용하면, 잔류응력 이완이 고려된 용접연결부 S-N선도를 예측할 수 있다.

### 3. 등가응력 및 잔류응력을 고려한 S-N선도 예측

#### 3.1 소형용접시편(cruciform joint)의 S-N선도

본 연구에서 제안한  $\Delta\sigma_{eq}$ -method를 소형 cruciform joint(하중전달 십자형 용접연결부)의 S-N선도 예측을 위해 적용하였다. Cruciform joint의 경우 용접비드 선단의 구조적 응력집중계수  $K_S$ 는 1로서 공칭응력과 Hot-Spot응력이 서로 같은 크기를 갖게 되어, 이를 통해 얻어진 공칭응력 기준 S-N선도는 다른 여러 형상의 용접연결부를 대표할 수 있다. Joint의 형상과 사용장재는 한승호 등<sup>(7)</sup>에 자세히 언급되어 있다.

Cruciform joint 용접지단부의 용접잔류응력을 측정하기 위하여 단면절단법을 적용하였다. 단면절단법은 잔류응력 계측부위에 스트레인 게이지를 부착하고 단면을 절단시키면서 이완되는 스트레인 값으로부터 잔류응력을 계측하는 방법이다. 사용된 게이지는 Kyowa사의 2축용 KFG-1-120-D16-11Joint로서 시험편 폭방향으로 총 8개를 부착하였다. 길이 또는 하중부하 방향(용접비드의 수직방향) 중앙부에서 가장 큰 잔류응력 값이 계측되었고, 얻어진 값은 92.3MPa이다. 이는 항복응력의 약 30%로 비교적 낮은 수준을 보였다. 여기서 얻어진 초기잔류응력  $(\sigma_{res})_{ini}$ 로부터 식 (5) 및 (6)을 이용하여 외력에 의하여 이완되고 남은 잔류응력  $(\sigma_{res})_{relax}$ 을 추정할 수 있다.

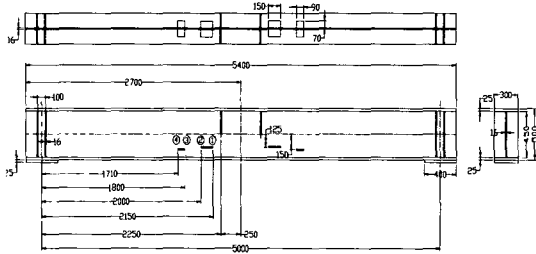


Fig. 6 Configuration of the large scaled specimen(unit:mm)

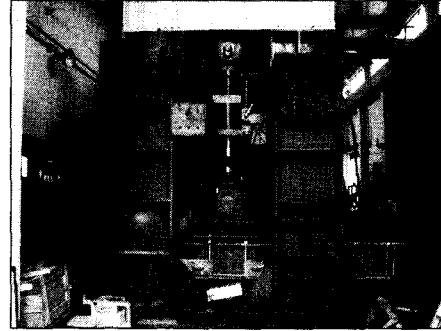


Fig. 7 Test set-up

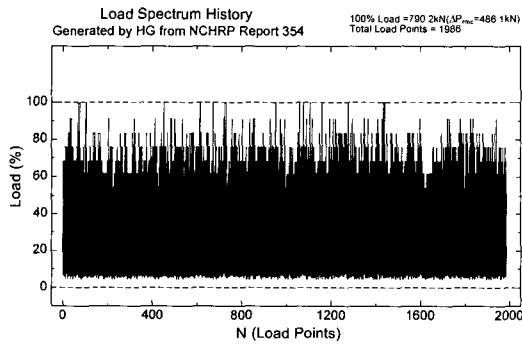


Fig. 8 Load spectrum

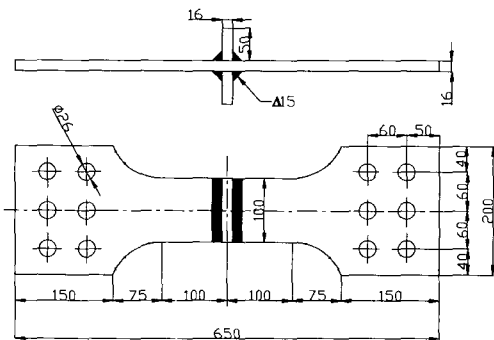


Fig. 9 Configuration of large scaled cruciform joint(unit:mm)

Fig. 5는 열처리된 소형 cruciform joint의 일정 진폭피로시험( $R=0.1$ ) 결과와 추정된  $(\sigma_{res})_{relax}$ 로부터  $\Delta\sigma_{eq}$ -method로 열처리하지 않은 joint의 S-N선도를 예측한 결과이다. 열처리한 S-N선도로부터  $n=16$ 인 일정수명선도를 구하고, 각  $(\sigma_{hot})_{mean}$ 에 추

정된  $(\sigma_{res})_{relax}$ 을 고려하여 16개의  $\Delta\sigma_{eq}$ 를 그림 중에 ●로 표기하였다.  $\Delta\sigma_{hot}$ 이 250MPa 이상인 경우 용접시편의 잔류응력은 대부분 이완되어 열처리된 시편의 피로거동과 유사하게 나타났다. 그 이하의 천이영역 ( $\Delta\sigma_{hot}=250\sim 200$ MPa)에서 잔류응력이 부분적으로 이완되고, 이는 외응력과 중첩되면서 평균응력의 점진적인 상승효과로 나타난다. 잔류응력 이완이 미약한 영역( $\Delta\sigma_{hot}<200$ MPa)에서는 초기잔류응력  $(\sigma_{res})_{ini}$  대부분이  $\Delta\sigma_{hot}$ 과 중첩되어 평균응력 효과가 크게 나타나며, 피로강도가 열처리한 시편의 경우보다 현저히 저하되었다. 그림에서 실선으로 나타낸 선도는 16개의  $\Delta\sigma_{eq}$ 를 피팅한 것이다. 이를 열처리하지 않은 S-N선도(실험치)와 비교하면, 예측된 S-N선도가 시간강도 영역에서 미소하게 실험치를 과소평가하나 피로 한도영역에서는 서로 일치하는 결과를 보였다.

잔류응력 이완을 고려한  $\Delta\sigma_{eq}$ -method로 예측된 결과를 살펴보면, 용접잔류응력 이완량에 따라 피로강도가 변화하는 영역이 세 부분으로 뚜렷하게 나타난다. 이는 열처리한 용접재에 비해 열처리하지 않은 용접재의 S-N선도 기울기 감소와 피로 한도 저하의 일반적인 현상을 설명할 수 있다.

### 3.2 대형용접시편(H-빔)의 S-N선도

$\Delta\sigma_{eq}$ -method를 소형용접시편과 동일소재로 제작된 실물크기의 대형 H-빔 용접시험편의 피로수명 평가에 적용하여 보았다. Fig. 6은 시험편 형상으로 웹의 양쪽에 8개의 종보강재를 용접작업으로 부착하였다. 종보강재는 BS5400<sup>(12)</sup>에서 F2 등급으로 그리고 AASHTO<sup>(13)</sup>는 E등급으로 규정하고 있다. 피로취약부인 종보강재 용접지단부(그림 중에

①~④)에 작용하는 Hot-Spot응력을 유한요소해석으로 구하였다.(기준하중:9.8kN, ①:1.992MPa, ②:1.834MPa, ③:1.830MPa, ④:1.727MPa) 이 결과는  $\Delta\sigma_{hot}$  기준 S-N선도 평가시 이용된다. Hole-Drilling법을 이용하여 종보강재 용접지단부 주위의 초기 잔류응력 ( $\sigma_{res}$ )<sub>ini</sub>을 계측하였고, 계측결과는 평균 123.4MPa 정도로 사용강재 항복응력의 35% 수준이다.

피로시험은 용량이 100톤인 가력기에 의한 4점 굽힘시험으로, 가력부 및 지지부는 롤러로 시험편과 접촉되도록 하였다. Fig. 7은 시험설치 후 촬영한 사진이다. 피로시험은 총 2개 시험체를 대상으로 실시하였고, 일정 및 변동진폭하중시험에 대하여 각각 1개의 시험체가 소요되었다. 일정진폭하중시험에 적용된 하중범위  $\Delta P=490kN$ 이고, 응력비  $R=0.1$ 이다. 변동진폭하중은 기존 구조물에서 얻어진 히스토그램 자료<sup>(14)</sup>를 참고하였고, 실험적용 및 해석의 용이성을 위하여 응력비는  $R=0.1$ 로 일정하게 고정하였다. Fig. 8은 본 시험에 적용한 하중스펙트럼이고, 적용된 등가하중범위  $\Delta P_{rmc}$ 는 486.1kN이다.  $\Delta P_{rmc}$ 는 식 (7)과 같이 정의한다.

$$\Delta P_{rmc} = \left[ \frac{\sum_i (n_i \cdot \Delta P_i^3)}{N_{Tot}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

여기서,  $i=8$ ,  $\Delta\sigma_i$ 는  $i$ 번째 응력범위,  $n_i$ 는  $\Delta P_i$ 의 발생빈도수 그리고  $N_{Tot}$ 는 총 발생빈도수로  $N_{Tot}=993$ 회이다.

대형용접시편에 적용된  $\Delta\sigma_{eq}$ -method의 기준 S-N 선도를 구하기 위하여 열처리한 대형 cruciform joint를 준비하여 피로시험을 수행하였다. Fig. 9는 적용된 피로시험편의 형상이다. 피로시험은 용량이 100톤인 가력기를 이용하였고, 응력비  $R$ 은 0.1로 하였다. 피로시험을 통해 얻어진 Hot-Spot응력 기준 S-N선도는  $N=5.35 \times 10^{14} \cdot \Delta\sigma_{hot}^4$ 이다. 이 선도는 용접구조형상이 다른 대형용접시편 피로취약부인 종보강재의 기준선도로서 사용할 수 있다.

Fig. 10은 대형용접시편의 피로시험 및  $\Delta\sigma_{eq}$ -method로 예측된 결과를 S-N선도 상에 나타낸 결과이다. 대형용접시편의 일정 및 변동진폭하중시험결과는 주어진 하중범위  $\Delta P$ (또는  $\Delta P_{rmc}$ )에 대한

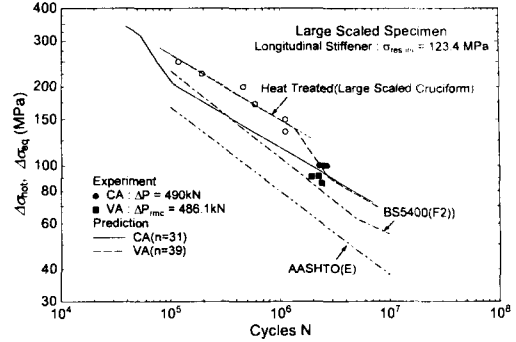


Fig. 10 Experimental and predicted S-N curves for large scaled welded specimen

Hot-Spot응력 범위  $\Delta\sigma_{hot}$ 로 정리하였다.  $\Delta P$  및  $\Delta P_{rmc}$ 가 각각 490 및 486.1kN으로 유사한 일정 및 변동진폭시험결과를 비교해보면 일정진폭시험의 피로강도가 변동진폭시험보다 크게 나타났다. BS5400<sup>(12)</sup> 및 AASHTO<sup>(13)</sup>에서 제안한 공칭응력 기준 S-N선도를 Hot-Spot응력으로 환산한 결과와 실험치를 비교하면, BS5400의 S-N선도는 실험치와 유사한 준위에 위치하였고, 이에 대하여 AASHTO의 결과는 실험치를 다소 과소평가하고 있다.

$\Delta\sigma_{eq}$ -method로 각 실험조건에 대하여 예측한 S-N선도는 실선(일정진폭시험 CA:n=31) 및 파선(변동진폭시험 VA:n=39)으로 나타내었다. 두 S-N 선도는 피로시험결과와 일치하였으나, 피로시험에서 나타나는 일정 및 변동진폭시험 간의 피로강도 차이를 묘사하지 못하고 고사이클 영역( $N > 2 \times 10^6$  cycles)에서 서로 일치하는 모습을 보였다. 이는 본 연구에서 제안한  $\Delta\sigma_{eq}$ -method가 부하하중에 따른 누적손상량이 선형적인 관계를 갖는 Palmgren-Miner법칙을 따르기 때문으로 사료된다. 실제 변동하중을 받는 구조물의 손상량은 하중순서(load sequence)에 따라 영향을 받는다는 보고<sup>(15-17)</sup>가 있고, 현재 이 분야에 대한 연구를 수행중에 있다.

예측된 두 선도간의 특징을 살펴보면, 전술하였듯이 고사이클 영역에서 두 선도가 일치하나, 저사이클 영역에서는 잔류응력 이완량의 차이로 서로 다른 거동을 보였다. 즉, 일정진폭시험의 경우 잔류응력 이완은 높은 응력준위에서 일어나고,  $\Delta\sigma_{hot} < 200MPa$  영역에서는 잔류응력 이완이 미

미하여 잔류응력의 중첩을 통한 평균응력 상승효과로 피로강도가 감소하는 현상을 보인다. 이에 대하여 변동진폭시험은 일정진폭시험과 동일한  $\Delta P_{rmc}$ 를 갖는다 하더라도 Fig. 8의 하중스펙트럼 내에서 발생하는  $P_{max}$ 값이 일정진폭시험의 경우보다 현저히 크므로, 낮은  $\Delta\sigma_{hor}$  준위에서도 잔류응력 이완이 광범위하게 발생한다. 이론적으로 잔류응력 이완이 발생하지 않는 낮은 응력 준위에서는 변동 및 일정진폭시험의 피로거동이 일치하고, 그 이상의 응력준위에서는 평균응력 상승효과가 적은 변동진폭시험 결과가 일정진폭시험 결과보다 피로수명 측면에서 유리하게 나타난다. 진술한 하중순서효과에 대한 연구가 이루어지면 실제 나타나는 현상에 대한 평가가 가능해질 것으로 사료된다.

본 연구에서 제안한  $\Delta\sigma_{eq}$ -method는 잔류응력 이완 및 이의 평균응력 효과를 고려할 수 있고, 이를 이용하여 소형 및 대형용접시험편의 S-N선도를 정량적으로 예측할 수 있었다. 본 방법론의 큰 장점으로서는 지금까지 용접구조물의 피로설계에서 고려하지 못했던 초기잔류응력 및 그의 이완에 의한 피로강도 저하문제를 비교적 정확히 평가할 수 있는 것으로, 향후 크기가 서로 다른 용접잔류응력이 분포하는 다양한 용접구조형상에 대한 실험과 평가를 통해 대형용접구조물의 피로수명기법을 정립하려 한다.

#### 4. 결 론

본 연구는 초기잔류응력과 부하하중에 따른 이완을 고려한 등가응력 산정법 개발이 목적이며, 이를 소형 및 대형용접구조물의 피로수명평가에 적용하여 타당성을 평가하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 피로하중하 용접잔류응력의 효과를 평균응력의 효과로 고려하고, 수정 Goodman식과 Hot-Spot응력 개념을 적용하여 임의 크기의 잔류응력을 갖는 용접연결부의 S-N선도를 예측할 수 있는  $\Delta\sigma_{eq}$ -method를 제안하였다.

(2) 피로하중을 받는 용접부의 잔류응력은 첫 번째 하중반복수에서 대부분 이완되고, 이후 계속되는 반복수에 따라 지수적으로 이완된다.

(3) 초기잔류응력과 외력에 의한 이완을 고려한  $\Delta\sigma_{eq}$ -method를 소형 및 대형시험편에 적용하여 예

측된 S-N선도는 피로시험결과와 잘 일치하였으며, 실제 대형용접구조물 피로수명평가에 효과적으로 적용 가능하리라 판단된다.

#### 후 기

본 연구내용은 과학기술부 국가지정연구실과제인 “대형용접구조물의 피로수명예측기술개발”의 일부로 연구수행에 지원을 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Satoh, K., Mukai, Y. and Toyota, M., 1981, "Welding Engineering," Rikokakusa Publishing.
- (2) Maddox, S. J., 1991, "Fatigue Strength of Welded Structures," Abington Publishing.
- (3) Radaj, D. and Sonsino, C. M., 1998, "Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches," Abington Publishing.
- (4) Vöhringer, O., 1987, "Relaxation of Residual Stress by Annealing or Mechanical Treatment," *Advances in Surface Treatment : Technology-Applications-Effects*, pp. 367-396.
- (5) James, M. R., 1987, "Relaxation of Residual Stress an Overview," *Advances in Surface Treatment : Technology-Applications-Effects*, pp. 349-365.
- (6) Partanen, T. and Niemi, E., 1996, "Hot-spot Stress Approach Fatigue Strength Analysis of Welded Components : Fatigue Test Data for Steel Plate Thicknesses up to 10mm," *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 19, No. 6, pp. 709-722.
- (7) Han, S., Han, J. and Shin, B., 1998, "Fatigue Strength Estimation and Fatigue Design of Welded Members under Hot-Spot Stress Concept," *Transaction of KSME A* 22, No. 11, pp.2072-2083
- (8) 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.
- (9) Toyosada, M., Gotoh, K., Yamaguchi, K., Nakashima, T. and Matsuoka, K., 1997, "Estimation Method of Residual Stress Distribution and Fatigue Life Taking the Effect of Welding Procedure Sequence into Consideration in Welded Build-Up Structures," *J. of SNAJ*, No. 182, pp.

- 715~727.
- (10) US Military Standard, MIL-HDBK-5D, 1983, pp. I-16~18.
- (11) Matsuoka, K. and Fujii, E., 1995, "An Evaluation Method on Fatigue Crack Initiation Life at Welded Joints in Steel Structures," *J. of SNAJ*, No. 178, pp. 513~522.
- (12) BS5400, 1980, "Steel, Concrete and Composite Bridges, Part10. Code of Practice for Fatigue", British Standard Institution.
- (13) NCHRP Report 286, 1986, "Evaluation of Fatigue Tests and Design Criteria on Welded Details," Transportation Research Board, National Research Council, USA.
- (14) NCHRP Report 354, 1993, "Resistance of Welded Details under Variable Amplitude Long-life Fatigue Loading," Transportation Research Board, National Research Council, USA
- (15) Hashin, Z., 1980, "A Reinterpretation of the Palmgren-Miner Rule for Fatigue Life Prediction," *J. of Applied Mechanics*, Vol. 47, pp. 324~328.
- (16) Tchankov, D. S. and Vesselinov, K. V., 1998, "Fatigue Life Prediction under Random Loading using Total Hysteresis Energy," *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, pp. 955~960.
- (17) Shang, D. and Yao, W., 1999, "A Nonlinear Damage Cumulative Model for Uniaxial Fatigue," *Int. J. of Fatigue*, Vol. 21, pp. 187~194.