

탄소강 후판용접부의 피로수명 및 잔류응력에 미치는 열처리 영향

안익태* · 김원태* · 조종래** · 문영훈*

*부산대학교 정밀기계공학과, **해양대학교 기계공학부

The Effects of Heat Treatment on the Fatigue Life and Welding Residual Stress of Welded Carbon Steel Plates

I. T. An*, W. T. Kim*, J. R. Jo** and Y. H. Moon*

*Dept. of Mechanical Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

**Division of Mechanical Engineering, Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

Abstract The effects of heat treatment on the fatigue life and welding residual stress of welded plates were investigated in this study. The plates were welded by flux cored arc welding process, and post weld heat treated at 600°C for 1 hour. The residual stresses of welded plates before and after post weld heat treatment were measured by hole drilling method. To measure the fatigue life of welded plates, low cycle fatigue tests under strain control and high cycle fatigue tests under load control were performed respectively, by using cylindrical specimens containing weld metal and heat affected zone. The obtained result shows that the post weld heat treatment reduces the residual stress, and resultantly changes the fatigue life of welded plate. Goodman diagrammatic analysis has also been performed to study the effect of post weld heat treatment on the high cycle fatigue life.

(Received April 5, 2003)

Key words: FCAW(flux cored arc welding), PWHT(post welded heat treatment), Residual Stress, Hole drilling method, LCF(low cycle fatigue), Strain control, Strain ratio, Goodman line, Gerber line

1. 서 론

일반적으로 철강구조물은 여러 가지 용접 이음형식과 하중조건을 갖는 용접이음부재로서 구성되어 있다. 용접에 의한 결함 방법은 높은 이음 효율, 재료의 절감, 우수한 밀봉성, 작업 공정의 간편성 등과 같은 장점들이 있어 널리 사용되고 있으나 제작과정에서 용입불량, 기공, 불순물 혼입 및 균열 등이 발생할 수 있다. 용접시 발생하는 국부적인 열과 탄성 구속 및 수축에 의해 항복응력에 준하는 인장 잔류응력이 발생할 수 있으며 형상 변형, 응력집중현상 등이 나타날 수 있다. 용접 연결부는 구조물의 형상에 따라 서로 다른 용접 형태를 가지게 되어 용접 구조물의 설계를 위해서는 용접 형태에 따른 많은 실험들을 필요로 한다. 특히 용접잔류응력은 용접 구조물의 피로강도, 좌굴강도, 파괴강도 등에 영향을 미칠 뿐 아니라 여러 가지의 용접균열이나 응력부식 균열의 원인이 된다. 용접시 발생하는 인장 잔류응력은 피로수명을 급격히 감소시키기 때문에 잔류응력의

제거와 그 효과가 구조물의 수명에 미치는 영향을 규명하기 위한 연구[1,3]가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 탄소강(SM400B) 용접부 피로수명에 열처리가 미치는 효과를 규명하기 위해서 저주기 영역과 고주기영역에서 열처리의 영향에 따른 피로수명을 연구하였고 피로수명에 미치는 잔류응력효과를 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1 용접시료의 준비

용접시험편은 Fig. 1과 같은 형상으로 FCAW방식으로 용접하였으며 용접조건은 Table 1에 나타내었고 화학조성은 Table 2에 나타내었다.

2.2 잔류응력 측정법

잔류응력을 측정하는 방법에는 여러 가지가 있으나, 본 연구에서는 Fig. 2에 보인 아주 작은 원통형 구멍을 뚫어 잔류응력을 국부적으로 제거시키는 과정

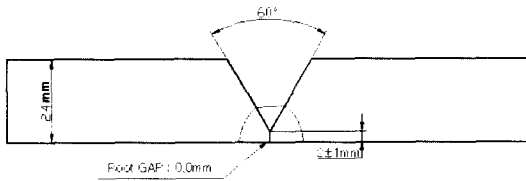


Fig. 1. Schematic drawing of welded joint.

Table 1. FCAW Welding condition

Current (A)	Voltage (V)	Welding Speed (cm/min)	Polarity
150~430	23~37	15~60	DCRP

Table 2. Chemical composition of base metal

C	Si	Mn	P	S
0.2 이하	0.35 이하	0.60~1.40	0.035 이하	0.035 이하

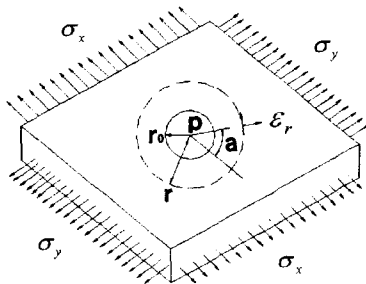


Fig. 2. Strain relaxation at point P due to the introduction of a hole.

에서 측정되는 변형률 값으로부터 역으로 잔류응력을 결정하는 구멍뚫기방법(Hole drilling method)을 사용하였다. 구멍뚫기방법은 Mathar[4]에 의해 처음으로 제안되었으며 다음과 같은 원리에 기초를 둔다. 잔류응력이 존재하는 물체에 아주 작은 구멍을 뚫으면 구멍의 벽면은 자유표면이 되어, 벽면에서의 수직응력성분과 전단응력성분이 0이 되므로 구멍주위의 응력이 완화된다. 이와 같은 응력상태변화로 인해 발생하는 변형률의 변화를 구멍주위의 표면에 부착된 Fig. 3과 같은 45°로젯형식의 스트레인 게이지를 이용하여 변형률을 측정하게 되고 이를 Kirsch's solution을 기본으로 하여 잔류응력을 결정하게 된다 [5].

$$\epsilon_r = \sigma_x(A + B \cos 2a) + \sigma_y(A - B \cos 2a) \quad (1)$$

여기서,

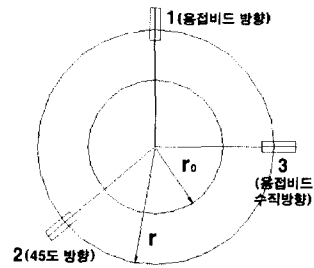


Fig. 3. Strain gage rosette for the hole-drilling method.

$$A = -\frac{1+\nu}{2E} \frac{1}{\gamma^2}$$

$$B = -\frac{1+\nu}{2E} \left[\left(\frac{4}{1+\nu} \right) \frac{1}{\gamma^2} - \frac{3}{\gamma^4} \right]$$

ϵ_r : σ_x 방향으로부터 a만큼 회전한 반경방향 변형률
 σ_x, σ_y : 주응력 γ 스트레인 게이지 반경/hole 반경
 E, ν : 탄성계수와 포아송 비

A와 B는 이완상수라고 한다. 실제 실험에 사용하는 A와 B는 스트레인 게이지 제작회사의 데이터로 주어진다. 구멍을 뚫은 후, 각 스트레인 게이지에서 이완되는 반경방향 변형률 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 를 측정하고 식 (1)을 이용하면 주응력과 주응력의 방향을 결정할 수 있다. 본 연구에서의 Hole Drilling 시험은 ASTM E837[6]규정에 따랐으며 잔류응력 측정장치는 Fig. 4와 같이 M-M사 제품인 RS-200 드릴링 머신 셋트, 스트레인 계측장치인 M-M사의 P-3500 스트레인 인디케이트와 062RK 타입의 스트레인게이지로 구성하였다. 실험은 먼저 시험편을 평평하게 하고 표면을 연마지 #400까지 연마 후 스트레인 게이지를



Fig. 4. Configuration of instrument on residual strain measurement.

부착하고자 하는 부위를 산화제와 중화제를 이용하여 표면을 깨끗이 하고 스트레인 게이지를 부착한다. 부착된 스트레인 게이지를 7step으로 구멍을 뚫어 그때의 변형율을 측정한다.

2.3 피로시험 시험편 제작 및 실험방법

피로시험을 위한 시험편의 종류는 모재와 용접후열처리, 미열처리의 3가지 시험편으로 구성된다. 시험편의 형상은 ASTM E606[7]규격에 따라 제작하였으며 형상은 Fig. 5에 나타내었다. 실험장비는 Fig. 6에 나타낸 것 처럼 25 ton급 MTS 810 만능재료시험기와 표점거리 25 mm(full scale 1.5%)인 MTS사의 신울계를 사용하여 행하여 졌다. 대부분의 금속들은 저사이클 피로시험이 $\pm 0.2\% \sim \pm 2.0\%$ 사이의 전 변형률 진폭으로 행해진다[8]는 점을 감안하여 전체 변형률제어(Total strain control) 방식으로 전체 변형률범위(Total strain range)를 0.3~0.9% 범위로 strain ratio(R)가 0인 삼각파형으로 실시하였다.

반복속도는 0.2 Hz로 하였으며 시험편은 완전히 파단시 까지의 반복수를 파단수명(N_f)으로 하였다[9]. HCF 실험은 전체하중제어(Total load control) 방식

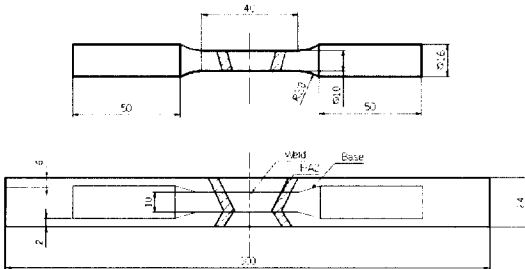


Fig. 5. Fatigue specimen.

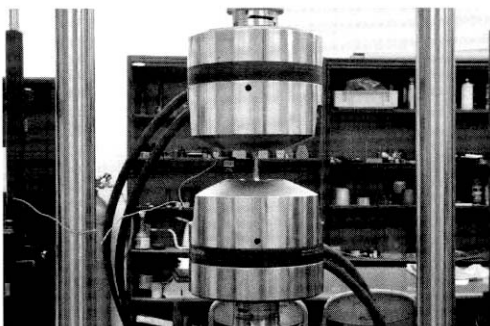


Fig. 6. MTS 810 material test system.

의 R = 0인 sine파형, 반복속도 10 Hz로 실험하였다. 또한 기계가공에 의해 발생한 가공흔의 노치효과를 없애기 위해 연마지로 #2000까지 길이방향으로 연마하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 금속조직의 변화

용접부의 미세조직을 관찰하기 위해 연마지 #2000까지 연마한 후 0.05 μm 알루미나 분말을 이용하여 최종 연마하였다. 이렇게 연마된 표면에 나이트랄 3%(HNO₃, 3% + Methanol 97%)에 10초간 에칭시킨 후 100배율로 각각의 소재에 대해 미세조직을 관찰하였다. Fig. 7은 용접부위에서 얻어진 미세 조직사진을 나타내었다. 모재는 밴딩구조를 갖는 열간압연강판의 특성을 선명하게 나타내주고 있으며

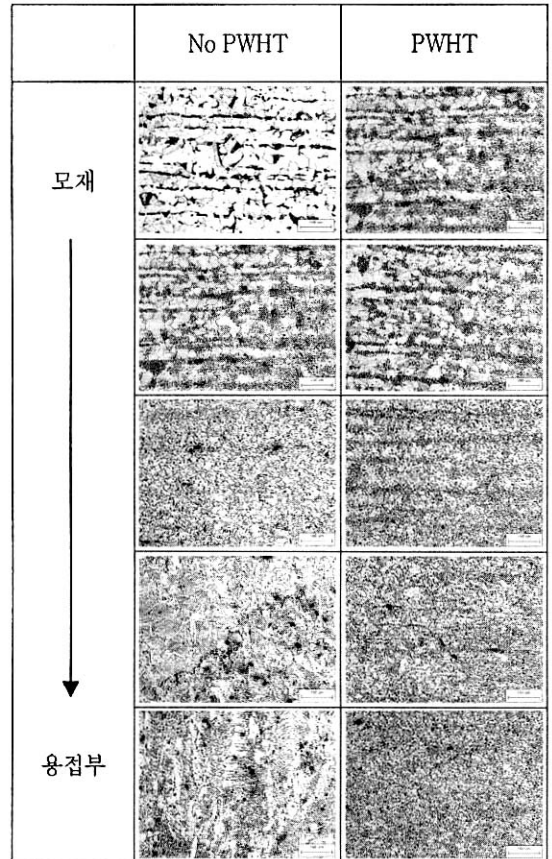


Fig. 7. Microstructure of weldment.

페라이트와 퍼얼라이트 밴딩조직이 나타난다. HAZ부는 베이나이트와 침상의 페라이트 조직으로 구성되어 있고 Weld부는 주조직의 특성을 보이며 침상의 페라이트, 입계 페라이트, 베이나이트가 혼재하고 있다. 열처리후의 미세조직적 변화는 모재부에서는 뚜렷이 차이를 보이지 않으나 HAZ와 용접부의 경우에 오스테나이트 입계상에 나타나는 입계 페라이트의 vein이 열처리시 사라지는 경향을 나타내었다.

3.2 잔류응력의 분포

측정한 변형률 값을 Kirsch's solution에 의한 관계식으로 계산한 응력값 중 최대값을 Fig. 8에 나타내었다. 미열처리시에 용접부와 HAZ부는 각각 약 68 Mpa과 30 Mpa의 인장잔류응력을 기지부는 약 8 Mpa의 인장잔류응력을 보였다. 이는 열처리시 용접부와 HAZ부에서 20 Mpa과 22 Mpa로 인장잔류응력이 상당히 감소하며 기지부의 압축잔류응력은

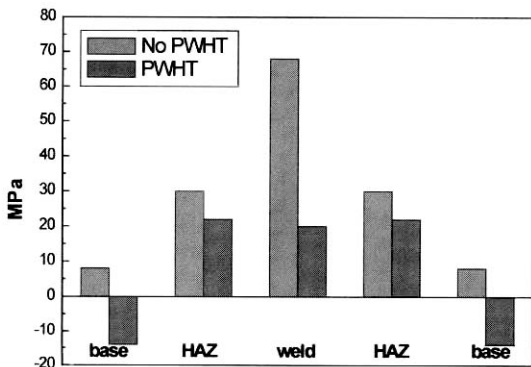


Fig. 8. Residual stress values for weldment.

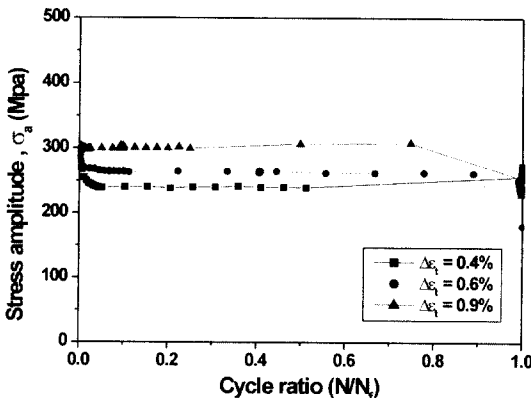


Fig. 9. Cyclic stress response curves for SM400B.

14 Mpa로 증가하였다. 특히 HAZ, 용접부의 감소폭이 크게 나타났으며 힘의 평형을 유지하기 위해 용접부에서 기지부 쪽으로 갈수록 인장잔류응력이 압축잔류응력으로 변화되고 있다. 열처리에 의한 이와 같은 효과는 표면부에서 균열이 진행되는 피로특성상 피로수명이 증가하는 효과를 가져 올 것으로 기대된다.

3.3 저주기 피로(LCF) 특성

3.3.1 싸이클 비에 따른 응력진폭의 변화

Fig. 9는 SM400B강의 모재에 대해 싸이클 비 (cycle ratio, N/N_f)에 대한 응력진폭의 변화 관계를 나타낸 것이다. Fig. 10과 Fig. 11은 용접부의 열처리가 피로수명에 미치는 효과를 보인 그래프이다. 열처리시 완전 파단되기 전 약 $N/N_f = 0.9$ 부터 재료의 급격한 응력감소 현상이 일어남을 알 수가 있다. 이러한

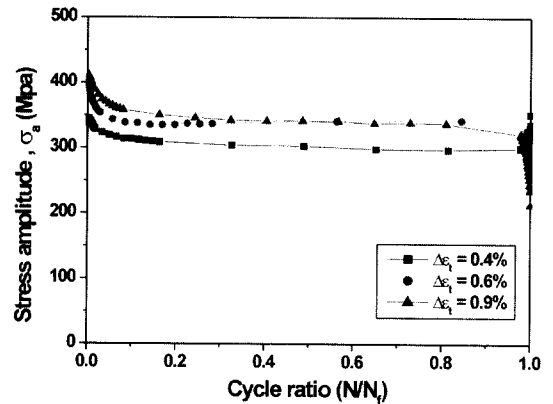


Fig. 10. Cyclic stress response curves for No PWHT.

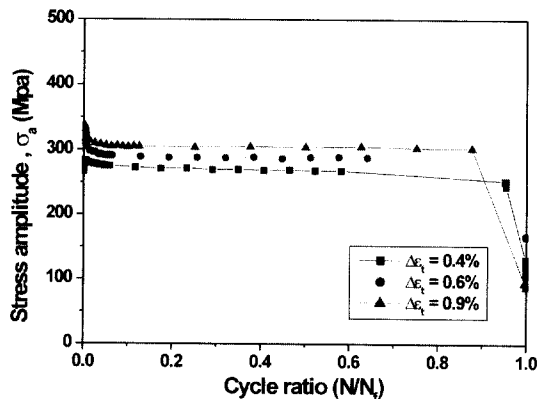


Fig. 11. Cyclic stress response curves for PWHT.

현상은 열처리시에 의해 증가된 연신율에 기인한 현상으로 사료된다. 또한 각각의 소재에 대해 공통적으로 사이클이 진행되는 동안 응력이 감소하는 반복연화 현상이 나타났고 이후 응력은 안정화되었다.

3.3.2 저사이클 피로수명 특성

일반적으로 평균변형률은 그 값이 상당히 크지 않다면 평균응력이 동반될 경우에만 피로거동 및 수명에 영향을 미치며, 인장평균응력은 피로수명을 단축시키고 압축평균응력은 피로수명을 연장시키는 것으로 알려져 있다[10]. 본 실험에서는 $R_f = 0$ 상태에서 일정한 진폭으로 변형률제어시 미열처리와 열처리시의 피로수명을 비교하여 보았다. Fig. 12는 LCF 실험시 대표적으로 나타낼 수 있는 ϵ -N 선도이다. 용접부에 대한 저사이클 피로수명을 나타내며 동일한 변형률 폭 상에서 열처리 소재가 미 열처리 소재에 비해 피로수명이 향상된 것을 알 수 있다. 연성의 증가로 인한 동일 변형률 폭 상에서 상대적으로 큰 응력진폭의 부담에 기인하였다. 이는 열처리 소재가 미열처리 소재보다 변형률 제어하의 반복적인 소성변형에 대한 우수한 저항성을 보여 보다 긴 피로수명을 보이고 있다. 이는 열처리로 인한 미세조직의 안정화에 일차 기인하며 잔류응력 실험에서 보인 바와 같이 열처리시 감소한 인장 잔류응력과 증가된 압축 잔류응력도 기인하는 것으로 사료된다.

3.4 고주기피로(HCF) 특성

고주기 피로는 낮은 응력하에서 긴 사이클이 경과

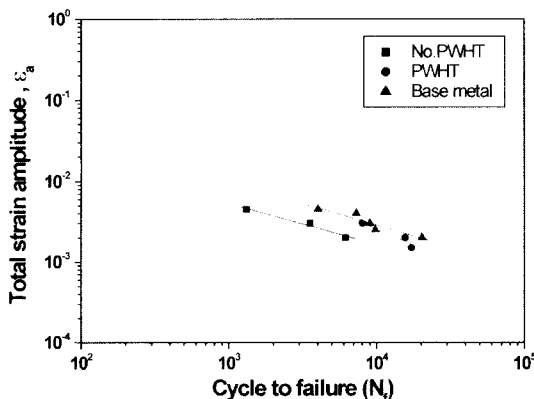


Fig. 12. Strain-life curves for weldment.

된 후 피로파괴되므로 본 연구에서는 10⁷ 사이클에서의 피로강도에 근거하여 열처리 효과를 고찰하였다. 평균응력은 피로수명에 중요한 영향을 주며 기계 구조물의 피로수명은 평균변형률 또는 평균응력에 의하여 많은 영향을 받는다. LCF영역에서 평균응력은 이완된다는 가정에 기초를 두고 있으므로 상당변형률 방법은 평균응력효과를 정확히 설명하지 못한다. HCF영역에서는 Goodman과 Gerber의 수정된 선도를 적용함으로써 평균응력을 설명할 수 있다. 실제 실험결과는 기본 S-N 데이터에 적용되는 수정계수 [11]로서 다음과 같이 계산된다.

먼저 미열처리 시험편에 대해서 수정된 피로한도는 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$S_e = S_e' C_L C_g C_s$$

$$= (241 \text{ Mpa})(1)(0.951)(0.9) = 206.27 \text{ Mpa}$$

$$S_e' \approx 0.5 \times S_u$$

$$C_L: \text{load factor} = 1$$

$$C_g: \text{size factor} = 1.189 \times d^{-0.097} = 0.951$$

$$C_s: \text{surface factor} = 0.9$$

이와 같은 수정된 피로한도에 잔류응력의 보정이 필요하게 된다. 잔류표면응력은 Goodman 식과 Gerber 식으로 설명될 수 있는데 이는 평균응력과 잔류응력을 조합할 수 있기 때문이다.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m + \sigma_r}{S_u} = 1 \tag{2}$$

여기서 σ_a 는 변동응력, S_e 는 수정된 피로한도, S_u 는 인장강도, σ_m 은 평균응력, σ_r 은 잔류응력을 뜻한다.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{\sigma_m + \sigma_r}{S_u} \right)^2 = 1 \tag{3}$$

(2)는 수정된 Goodman식을 (3)은 Gerber식을 나타낸다. $R=0$ 이므로 변동응력과 평균응력은 동일한 값을 갖는다. σ_r 의 값은 파단이 일어난 지지부의 잔류응력값을 대입한다. 미열처리 시험편과 열처리 시험편에 대해 각각의 계수들을 Goodman 식과 Gerber 식에 적용하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다. Table 4에 각각의 식에 대한 σ_{max} 를 나타내었으며 σ_r 는 Fig. 13에서처럼 실험시 10⁷ 사이클에서의 피로강도 값을 나타내었다.

Table 3. Stress values for each specimens

	No PWHT (Mpa)	PWHT (Mpa)
Tensile stress (S_u)	482	468
Residual stress (σ_r)	8	-14
S_c	206.27	200.28

Table 4. Fatigue stress for each method

	Goodman, σ_{max}	Gerber, σ_{max}	σ_f , at 10^7 cycle
No PWHT (Mpa)	284.1	352	280
PWHT (Mpa)	289.7	352.5	350.2

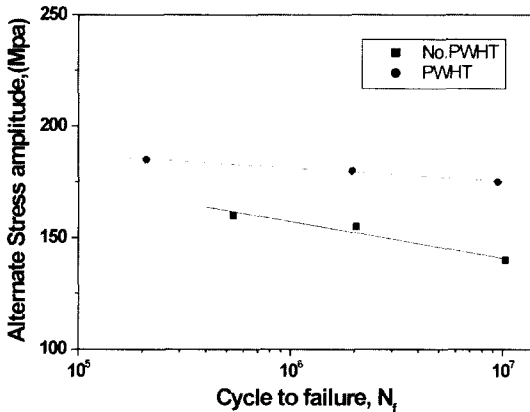


Fig. 13. Stress-life curves for weldment.

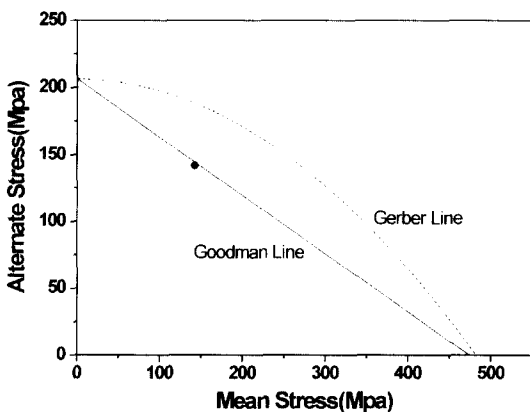


Fig. 14. Relation between mean stress and alternate stress for fatigue limit (No PWHT).

열처리시 10^7 cycle에서의 피로강도가 미열처리 시에 비해 약 20%정도 증가하였으며 Goodman식과

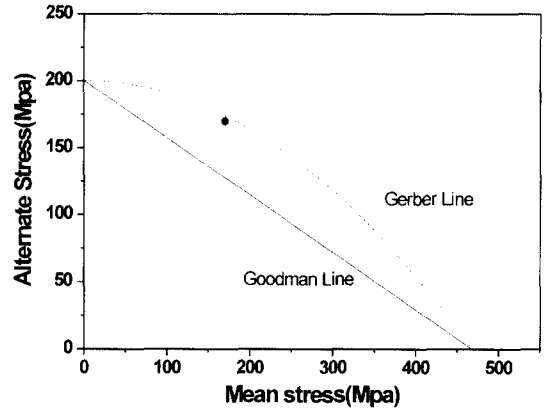


Fig. 15. Relation between mean stress and alternate stress for fatigue limit (PWHT).

Gerber식에서의 해석값과 실험값이 거의 일치하는 경향을 나타냈다. Fig. 14와 Fig. 15에서 보듯이 미열처리시 피로해석의 경우에는 Goodman선도의 피로한도 영역 내에서 시험결과가 있으며 열처리 시에는 Gerber선도의 영역내에 시험결과가 나타남을 알 수가 있었다. 그러므로 본 연구에서는 미열처리 시에는 수정된 Goodman식을, 열처리 시에는 Gerber식을 이용하여 피로해석을 하는 것이 더 적합하다는 것을 알 수가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 탄소강과 용접부 열처리의 기계적 특성평가를 위한 실험을 통해 열처리에 따른 효과를 미열처리 소재와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 잔류응력을 측정된 결과 열처리에 의해 용접부와 HAZ부의 인장잔류응력이 크게 감소하였으며 용접부에서 기지부로 갈수록 인장잔류응력이 압축잔류응력으로 변화하였다.
- (2) LCF 시험시 동일 변형률 조건에서의 피로수명은 열처리, 미열처리 소재순으로 나타났다.
- (3) HCF 시험시 10^7 사이클상에서 열처리 시에는 미열처리시의 소재보다 약 20%정도 피로강도가 상승하는 효과를 가져왔다.
- (4) 평균응력에 따른 피로한도 곡선에서 용접부의 미열처리 시에는 Goodman곡선을, 열처리시에는

Gerber 곡선을 사용하는 것이 가장 좋은 결과를 가져올 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Tso-Liang Teng, Chin-Ping Fung, Peng-Hsiang Chng, Wei-Chun Yang, 2001, "Analysis of residual stresses and distortions in T-joint fillet welds", International Journal of Pressure Vessels and Piping 78, pp.523~538.
2. Masahito Mochizuki, Toshio Hattori, Kimiaki Nakakado, 2000, "Residual Stress Reduction and Fatigue Strength Improvement by Controlling Welding Pass Sequences".
3. 성요경, 1994, "선체구조 용접이음부의 피로강도 평가에 대한 검토", 대한용접학회지, 제12권 제3호.
4. Mathar, J., 1934, "Determination of initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Holes", Trans. ASME, Iron & Steel, Vol.56, pp.249~ 254.
5. Measurement Group, 1985, "Measurement of Non-uniform Residual Stresses Using the Hole-drilling Method", Measurement Group Tech. Note, TN-503-1, pp.1~14.
6. ASTM, 1999, "Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method", Annual Book of ASTM Standards, E 837-99.
7. ASTM, 1992, "Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing", Annual Book of ASTM, E606-92.
8. Raske, D, T. and Morrow, J. D., 1969, "Mechanics of Materials in Low Cycle Fatigue Testing", Manual on Low Cycle Fatigue Testing, ASTM STP 465, pp. 1~25.
9. Ralph I.Stephens, Ali fatemi, Robert R.Stephens, Henry O.Fuchs, Metal Fatigue in Engineering, 2001.
10. Koh, S. K and Stephens, R. I., 1991, "Mean Stress Effects on the Low Cycle Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures", Vol. 14, No. 4, pp.413~428.
11. Julie A. Bannantine, Jess J. Comer, James L. Handrock, 1990, Fundamentals of metal fatigue analysis, Chapter 1.