

용접구조물 용접토우부의 잔류응력이 피로강도에 미치는 영향 평가

차용훈*, 김하식**, 김일수***, 성백섭***

Evaluation of Influence on the Fatigue Strength of Residual Stresses at the Welded Toe of Welded Structure

Yong-Hoon Cha*, Ha-Sig Kim**, Ill-Soo Kim***, Back-Sub Sung***

Abstract

This study is to investigate the influence of weld residual stresses on the fatigue crack growth behaviors in pressure vessel reinforcement. In order to perform this study, the automatically welded specimens are prepared. The material is ASTM A516 grade 60 steel used in pressure vessel mainly.

For pad-on-plate of skip welding, continuous welding and PWHT specimen, fatigue crack initiation is generally initiated at weld starting and end toe zone, and ruptured at weld starting toe zone. Fatigue life of pad-on-plate continuous specimen is increased more than that of pad-on-plate skip fillet welding specimen about 85% under low load, about 20% under high load, and decreased than that of two-pad continuous welding specimen about 85%. In $da/dN - \Delta K$ curve under low load, pad-on-plate skip fillet welding specimen showed retardation on the initial crack, and the fatigue crack growth rate at the low region of ΔK greater specimen $E(3.8 \times 10^{-6} \text{mm/cycle})$. And the fatigue life of welding specimen was smaller than that of PWHT specimen.

Key Words : Pressure Vessel(압력용기), Fatigue Crack Growth Behaviors(피로균열성장거동), Skip Fillet Welding(단속필릿용접), Continuous Fillet Welding(연속필릿용접)

1. 서 론

최근 각종 가스들을 저장하거나 수송하는 목적으로 압력용기의 수요가 급증하고 있는데, 각종 압력용기는 상대

부품과 용접을 실시하여 장착 또는 보강되고 있다. 용접에 의한 접합은 단조나 리벳이음 등 다른 접합방법에 비하여 높은 이음효율, 재료 및 경비의 절감, 뛰어난 유밀성, 기밀성 등의 많은 장점들이 있어 현대산업에서 적용

* 조선대학교 기계공학부(yhcha@lycos.co.kr)
** 조선이공대학 컴퓨터용용기계공학부
*** 목포대학교 기계선박해양공학부

이 확대되어 왔다. 그러나 용접시 발생하는 용입불량, 기공, 불순물혼입 및 균열 등의 영향으로 용접부위에 균열이 발생되어 취성파괴를 초래하기도 한다. 또한, 단시간의 국부적인 가열에 따라 용접부위 근방에는 열응력, 냉각시의 수축으로 인한 잔류응력 및 뒤틀림 발생 등이 문제가 되고 있다. 이 중에서도 특히 잔류응력은 피로균열의 성장거동에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 파괴역학적인 해석의 대상이 되고 있다.^(1~5)

용접잔류응력의 발생은 오래 전부터 문제시되어 왔으며, 이에 대하여 많은 연구가 활발히 진행되어 왔지만 아직도 문제점들이 많이 남아있는 실정이다. 이와 관련하여 연구자들은 용접시에 발생한 잔류응력의 해석 및 측정 방법을 제시하여 왔다.^(6~8) 특히, 용접이유된 구조물은 반드시 잔류응력이 존재하게 되는데, 이 잔류응력은 좌굴강도의 저하, 응력부식균열 및 피로강도 저하 등의 원인이 된다.

또한, 균열이 존재하거나 발생이 예상되는 압력용기 용접구조물의 파괴를 예방하기 위해서는 최소허용잔류강도와 최대허용균열길이 등을 알 수 있어야 합리적인 검사와 보수대책을 수립할 수 있다. 이와 같이 용접이유된 피로강도에 미치는 용접잔류응력, 용접결합과 용접도우노치의 영향에 대하여 최근 많은 연구가 진행되고 있으나, 압력용기에 필릿용접한 패드부의 피로강도에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.^(9~11)

따라서, 본 연구에서는 압력용기용 구조물 및 보강재에 많이 사용되는 ASTM A516 grade 60강의 피로파괴 메카니즘을 규명하기 위하여, CO₂ 용접시험편을 제작하여 압력용기 패드용접부의 잔류응력을 측정하고, 이 잔류응력이 피로강도에 미치는 영향을 검토하기 위해 피로실험을 통해 용접도우부의 피로균열성장률을 고찰하여 압력용기 용접구조물의 안전성을 평가하고자 한다.

2. 시험편 및 실험

본 실험에 사용된 재료는 압력용기에 많이 사용되는 저탄소강인 판두께 9mm 열간압연 ASTM A516 grade 60강을 사용하였다.

시험편재료의 기계적성질을 파악하기 위해서 KS B 0801에 따른 13A호 인장시험편을 제작하여 인장실험을 하였다. 화학적성분과 기계적성질은 각각 Table 1 과 Table 2에 나타냈다.

Figs. 1, 2는 피로시험을 위해 300×50×6의 A516 강판 위에 105×25×6, 80×25×6의 동일재료의 패드

를 단속 및 연속 필릿용접을 실시하여 제작한 피로시험편의 형상과 크기를 나타냈다. 시험편 제작은 하중방향을 압연방향과 일치시키고 피로균열성장 방향이 압연방향과 수직이 되도록 판재를 밴드쇼어로 절단한 후 밀링 및 드릴링 작업으로 볼트홀을 가공하고 연삭을 하였다. 용접시 열에 의한 변형발생을 억제하기 위하여 지그를 사용하여 시험편에 구속을 준 상태에서 필릿용접을 하였다. 시험편의 길이는 시험편에 균일한 공칭응력 분포가 작용하도록 폭에 대한 길이의 비가 3배가 되도록 하였다.

Table 1 Chemical compositions of base metal

(wt. %)									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V
0.18	0.24	0.67	0.02	0.008	0.02	0.002	0.03	0.012	0.008

Table 2 Mechanical properties of base metal

Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Young's Modulus (GPa)
220.65	420.51	46.13	203.39

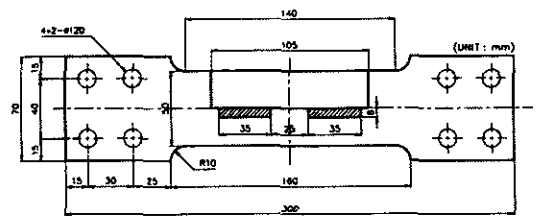


Fig. 1 One pad skip fillet welded specimen

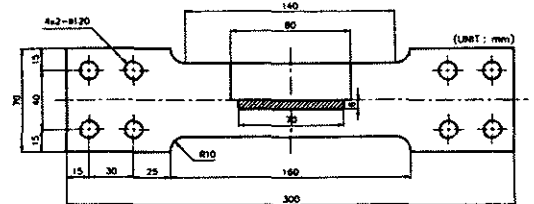


Fig. 2 One pad continuous fillet welded specimen

용접은 AC 서보모터 구동식인 CO₂ 산업용 로봇 자동 용접기로 실시하였으며, 용접봉은 고려용접봉(주)의 직경 1.2mm인 고장력강용 K-71T(플렉스 코오드 와이어)를 사용하였다. 용접봉의 화학적 성분과 용접조건은 Table 3과 Table 4와 같다.

시험편의 일부는 용접잔류응력을 제거하기 위한 용접후 열처리를 실시하였다. 용접후 열처리 조건은 냉각속도는 약 120℃/hr로서 650℃에서 1시간 유지시킨 후 노냉시켰다.

Figs. 3, 4는 용접잔류응력을 측정하기 위한 시험편으로서 피로균열성장에 따른 잔류응력의 영향을 평가하고자 피로시험편과 동일한 크기 및 두께로 A516 강판 위에 105×25×6, 80×25×6의 패드를 단속 및 연속 필릿용접하여 제작한 잔류응력 측정용 시험편을 나타낸 것이다.

용접잔류응력 측정방법은 단면법을 사용하였으며, 측정에서 사용된 시험기는 System 5000 Stress Analysis (Measurements Group, Inc.)으로 ϵ_x , ϵ_y 의 2축 방향을 측정하였다.

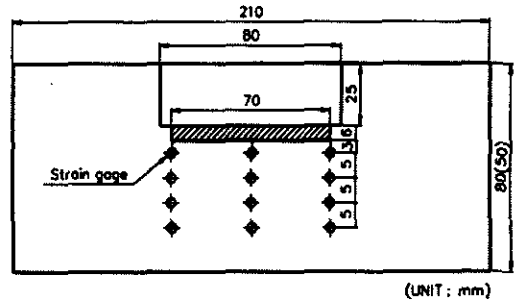


Fig. 4 Continuous welded specimen for measuring residual stress

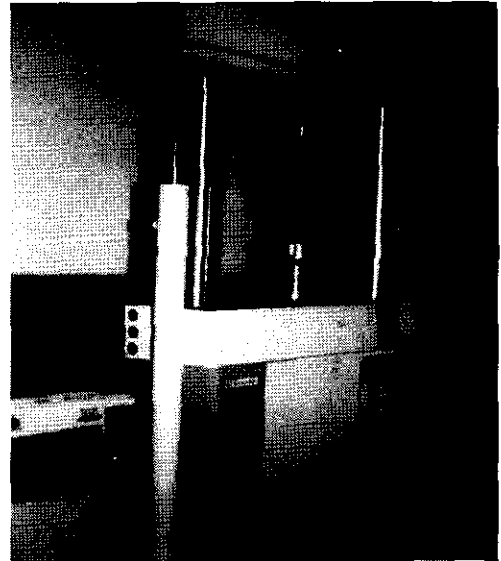


Photo. 1 Fatigue testing machine

Table 3 Chemical compositions of welding electrode

(wt. %)				
C	Si	Mn	P	S
0.05	0.53	1.43	0.015	0.012

Table 4 Welding condition

Welding method	Current (A)	Voltage (V)	Speed (mm/min)	Number	Gas flow(l)
CO ₂	150	20	36	1	20

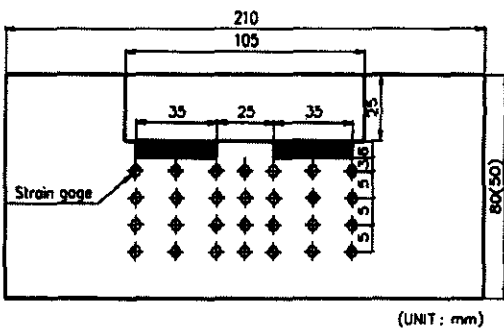


Fig. 3 Skip welded specimen for measuring residual stress

용접 시작부, 끝단부, 용접중앙부 및 비용접구간의 중심부를 용접선에서 3~5mm 간격으로 스트레인게이지를 부착하여 측정하였다. 실험에 사용된 스트레인게이지의 크기는 1mm, 게이지상수 2.14, 저항값 120 Ω을 사용하였다. 스트레인게이지로부터 약 2mm간격으로 절단응력과 열응력이 최소화 되도록 서서히 단면을 절단하면서 잔류응력을 측정하였다.

피로실험은 Photo. 1의 사진과 같이 ±10ton 용량의 서보유압식 피로시험기(Shimadzu Co. Japan)를 사용하였다. 피로균열길이 측정은 하이트게이지를 이용, 0.5mm 간격으로 슬립마킹한 후 OSM을 부착한 배율이

50배인 이동식현미경으로 균열성장을 관찰하고 길이를 측정하였으며, 피로시험 조건은 ΔP -일정 하중제어 방식으로 하중비는 0.1, 파형은 정현파형, 주파수는 5Hz, 실험 온도는 상온에서 행하였다. 실험하중은 최대하중은 7000kg, 최소하중은 700kg으로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접잔류응력의 영향

보강재의 용접이음부에서의 잔류응력을 측정하기 위하여 제작한 단속 및 연속 필릿용접 시험편에서 피로균열성장 방향인 용접선에 수직방향의 잔류응력을 단면법에 의해서 측정하였다.

Fig. 5는 단속용접 시험편에서 용접토우부, 용접중앙부 및 비용접구간의 중심부에서 잔류응력을 측정한 결과를 나타낸 것이다. 토우부와 중앙부에서는 전반적으로 압축 잔류응력을 보이고, 비용접구간의 중심부에서는 인장잔류응력이 나타났다. 이것은 용접후 냉각에 따른 금속입자가 용착금속부쪽으로 쏠렸기 때문으로 생각된다. 또한, 주위의 용접 열영향부에서 약 40mm 이후부터 인장잔류응력이 분포하고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 6은 연속용접 토우부에서의 잔류응력을 측정하여 단속용접과 비교한 그림으로서, 전반적으로 압축잔류응

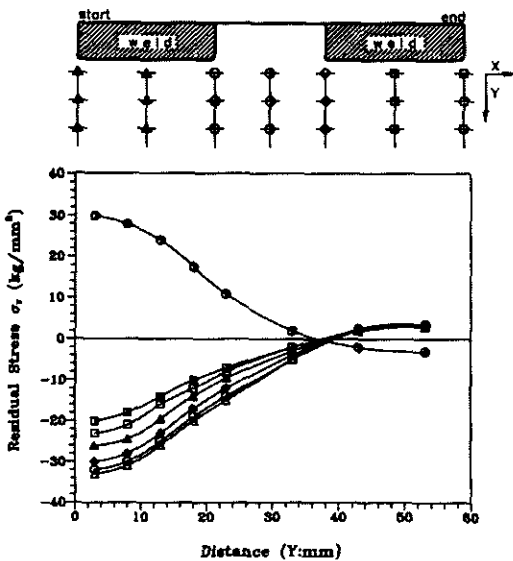


Fig. 5 Distribution of residual stress in skip fillet welding

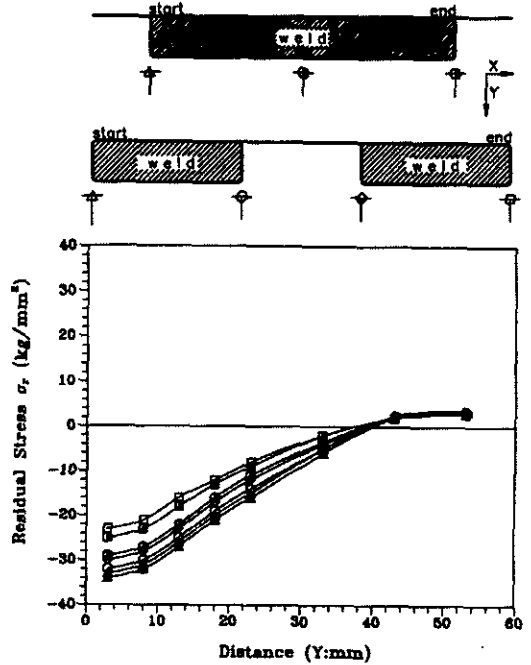


Fig. 6 Distribution of residual stress in skip and continuous fillet welding

력이 나타남을 알 수 있었다. 단속 및 연속용접 시험편 모두 용접시작부가 끝단부보다 압축잔류응력이 높게 나타났으며, 용접시작과 끝단부의 압축잔류응력의 차이가 거의 같은 수준을 보였다. 또한, 연속용접의 경우가 단속용접에 비해 용접시작 토우부의 압축잔류응력값이 높게 나타났다. 이것은 용접 시작 초기부분에서 아아크 발생이 불안정한 현상이 발생하였고, 용접조건을 일정하게 하였더라도 입열량이 용접시작과 끝 부분에서 다르기 때문으로 생각된다.

3.2 a-N 관계 고찰

Figs. 7~9는 용접시험편과 용접후 열처리 시험편의 하중 반복수에 대한 균열성장길이, 즉 a-N 관계를 나타낸 그림이다. 단속 및 연속용접 시험편 모두 예균열이 없이도 용접시작 토우 노치부에서 균열이 시작되어 최종과 단되었다. 이것은 응력집중 부위가 용접시작 토우 노치부이며, 균열 형태는 반타원 크랙으로 진전되었다.

Fig. 7은 단속용접과 연속용접 시험편의 a-N관계를 비교한 그림으로서, 단속용접의 경우 약 1.61×10^5 회, 연

속용접의 경우 약 1.93×10^5 회에서 파단되어, 연속용접의 피로수명이 약 20% 증가하였다. 이러한 원인은 용접 시작 토우 노치부에서 연속용접의 경우가 단속용접보다 압축잔류응력이 높아 피로균열개시가 지연됨에 따라 피로수명이 상대적으로 증가된 것으로 보인다. 또한 단속용접 시험편에서 용접되지 않은 부분에서 용접잔류응력이 인장잔류응력으로 측정되어 연속용접에 비하여 피로수명이 짧은 원인에 기인한 것으로 생각된다.

Fig. 8은 용접후열처리 단속 및 연속용접 시험편을 비교한 것이다. 단속용접의 경우 약 1.39×10^5 회, 연속용접의 경우 약 1.73×10^5 회에서 파단되어, 피로수명이 약 25% 증가함을 알 수 있었다. 이것은 용접시험편의 경우와 동일한 경향으로 보이며, 용접후 열처리가 피로수명

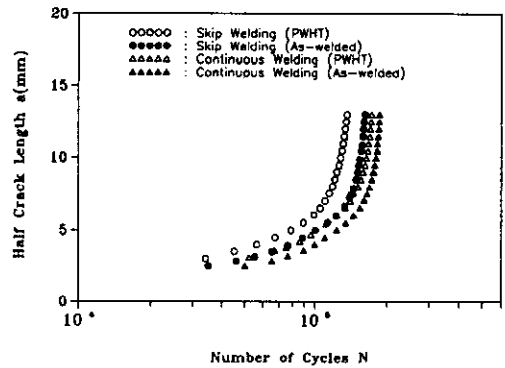


Fig. 9 a-N curves in skip and continuous welded specimen (as-weld and PWHT)

에 그다지 영향을 미치지 않았기 때문으로 생각된다.

Fig. 9는 용접 시험편과 용접후 열처리 시험편을 비교한 그림이다. 피로수명은 연속용접 시험편이 가장 길었고, 단속용접열처리 시험편이 가장 짧게 나타났다. 또한 단속용접과 연속용접열처리 시험편의 피로수명이 거의 같게 나타났으며, 이것은 연속용접 시험편의 경우 열처리로 인해 용접잔류응력의 제거 및 열영향부의 인성이 증가되었기 때문으로 생각된다.

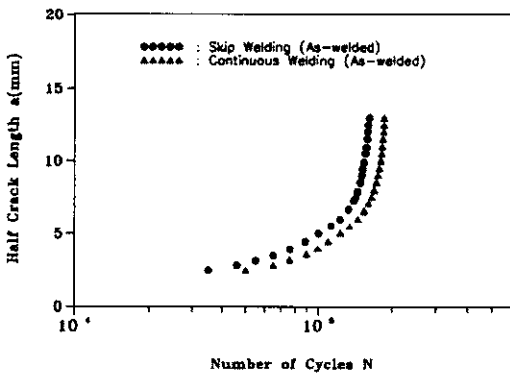


Fig. 7 a-N curves in skip and continuous fillet welded specimen (as-weld)

3.3 피로균열성장거동 고찰

Figs. 10~12는 균열선단에서 피로균열성장속도 da/dN 와 응력확대계수변동 폭 ΔK 의 관계를 log-log선도에 나타낸 그림이다.

Fig. 10은 단속용접과 연속용접 시험편의 $da/dN - \Delta K$ 의 관계를 비교한 것이다. ΔK 의 값이 약 50~73kg/mm^{3/2} 범위에서 피로균열성장속도가 약 4.5×10^{-5} mm/cycle이었으며, 이 구간에서 피로균열의 지연현상이 나타났고, ΔK 의 값이 약 75kg/mm^{3/2} 이후에서는 거의 선형적으로 안정성장을 보이는 것을 알 수 있었다.

Fig. 11은 용접후 열처리 단속용접과 연속용접 시험편의 $da/dN - \Delta K$ 의 관계를 비교한 그림이다. ΔK 의 값이 약 55~67kg/mm^{3/2} 범위에서 피로균열성장속도가 약 4.5×10^{-5} mm/cycle로 나타났으며, ΔK 의 값이 약 70kg/mm^{3/2} 이후에서는 안정성장을 보였다.

Fig. 12는 용접 시험편과 용접후 열처리 시험편의 $da/dN - \Delta K$ 관계를 비교한 것이다. 용접 시험편과 용접후 열처리 시험편이 피로균열성장속도가 비슷하게 나타

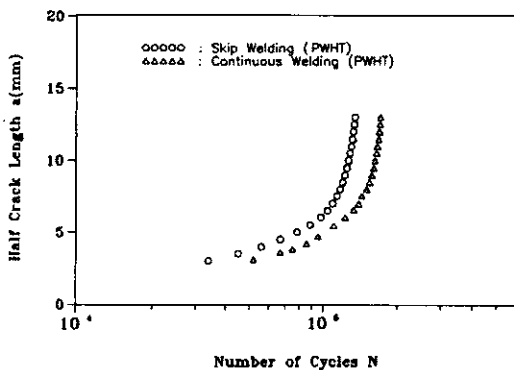


Fig. 8 a-N curves in skip and continuous fillet welded specimen (PWHT)

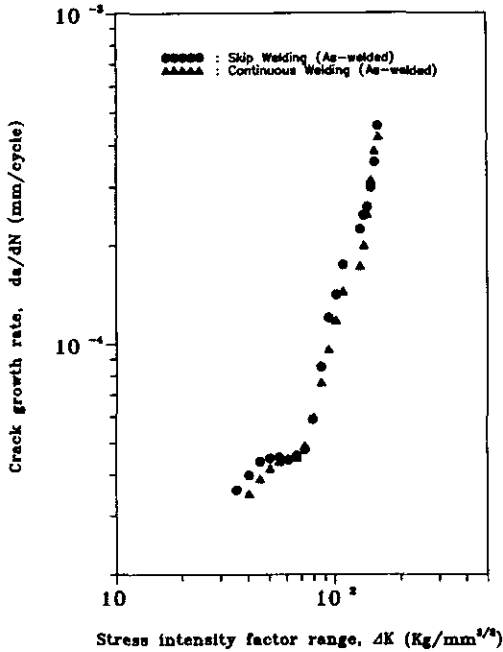


Fig. 10 da/dN- ΔK relations of skip and continuous fillet welding specimen(as-weld)

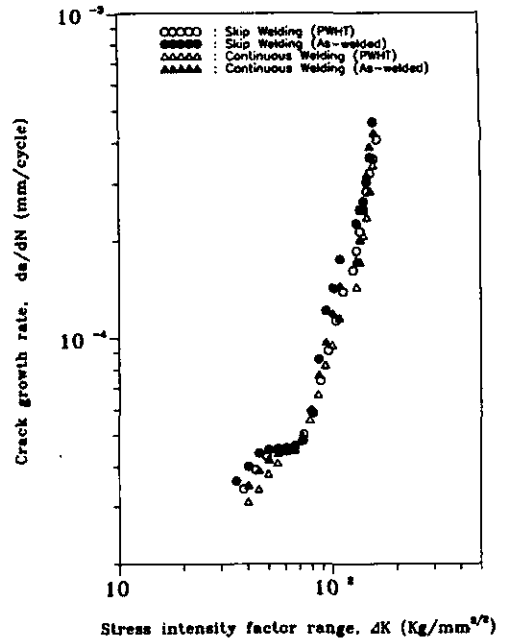


Fig. 12 da/dN- ΔK relations of skip and continuous fillet welding specimen(as-weld and PWHT)

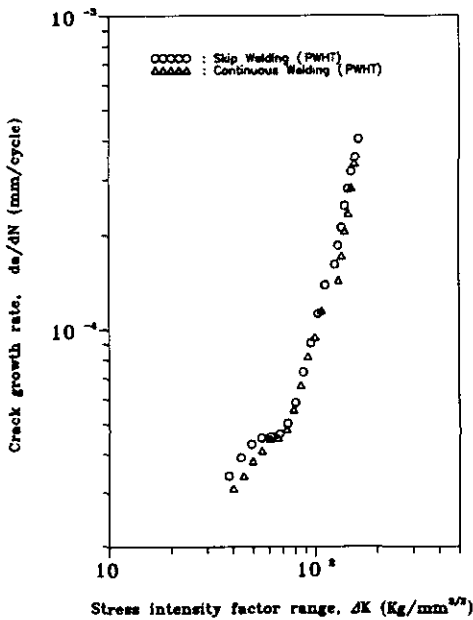


Fig. 11 da/dN- ΔK relations of skip and continuous fillet welding specimen(PWHT)

났는데, 용접시험편에서 보다 지연구간이 다소 짧게 나타난 원인은 용접후 열처리로 인해 용접잔류응력이 제거되었기 때문이라 생각되나, 본 파괴시험의 하중조건에서는 용접후 열처리가 피로수명에 영향을 미치는 지배적인 인자는 아닌 것으로 판단된다.

4. 결론

압력용기강을 단속 및 연속용접한 시험편을 제작하여, 용접토우 노치부에서의 용접잔류응력이 파괴균열개시 및 성장거동에 미치는 영향을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 단속 및 연속용접 시험편에서 용접토우 시작부가 끝단부보다 40%정도 압축잔류응력이 크게 나타났다.
- (2) 용접시험편과 열처리시험편 및 단속 및 연속용접시험편 모두 파괴균열은 용접시작과 끝단부에서 개시되고, 주 균열은 대부분 용접시작 토우부에서 성장하다가 파괴에 이르렀다.

- (3) 피로수명은 연속용접 시험편이 단속용접 시험편 보다 약 20% 증가하였는데, 이것은 연속용접 토우부의 압축잔류응력이 단속용접보다 커서 초기의 피로균열개시 구간에서 지연 현상이 발생되었기 때문으로 보인다. $da/dN - \Delta K$ 관계에서 피로균열의 지연현상은 용접 시험편의 경우 ΔK 가 50~73kg/mm^{3/2}, 용접후 열처리 시험편의 경우 ΔK 가 55~67kg/mm^{3/2}범위에서 나타났다.
- (4) 용접후 열처리 시험편과 용접시험편의 피로균열성장속도가 거의 비슷한 양상을 보였다. 피로균열성장속도에 미치는 주된 영향은 열처리에 의한 것보다는 하중조건에 더욱 민감했던 것으로 보이며, 용접후 열처리가 전체적인 피로수명에 그다지 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 사단법인 부품산업 테크노센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Maddox, S.J. "Improving the fatigue strength of welded joints by peening", Metal Construction, April, 1985.
- (2) K. Masubuchi, "Analysys of Welded Structures", International Series on Material Science and Technology, Vol. 33, pp. 1~10, 1980.
- (3) Radaj, D. "Design and Analysis of Fatigue Resistant Welded Structures", Halsted Press, 1990
- (4) 車龍勳, "CT形 變厚鎔接板材에서의 疲勞龜裂成長 舉動에 미치는 殘溜應力の 影響에 關한 破壞力學的 研究" 成均館大學校 博士 學位論文, 1991.
- (5) Wenyn Shen, "Effects of Residual Stress, Weld Toe Notch and Weld Defects on Fatigue of Welded Steel Structures", Dissertation Submitted to the Faculty of the Oregon Graduate Institute of Science & Technology in Partial Fulfillment of the Degree Doctor of Philosophy in Material Science and Engineering, April, 1992.
- (6) Majid Kaviri, "Toward More Accurate Residual Stress Measurement by the Hole Drilling Method :

- Analysis of Relieved strain Coefficients", Experimental Mechanics, pp.14~21, March, 1986.
- (7) ASTM Designation : E647-83, "Standard Test Method for Constant-Load Amplitude Fatigue Crack Growth Rate Above 10⁸ m/cycle", 1985.
- (8) S. Berge and O. I. Eide, "Residual Stress and Stress Interaction in Fatigue Testing of Welded Joint", ASTM STP 776. pp. 115-131, 1982.
- (9) McFadyen, N. B., R. Bell, O. Vosikovsky, "Fatigue crack growth of semi-elliptical surface crack", Int. J. Fracture, Vol. 12, No. 1, pp. 43~50, 1990.
- (10) Vainshotok, V., I. Varfolomeyev, "Stress intensity factor analysis for part-elliptical crack in structures", Int. J. Fracture, Vol. 46, pp. 1~24, 1990.
- (11) Fett, T., "An estimation of local stress intensity factors for semi-elliptical surface cracks", Engineering Fracture Mechanics, Vol.34, No.4, pp. 883~890, 1989.