

## 壓力容器 페드部の 疲勞龜裂進展에 關한 破壞力學的 研究

### A Fracture Mechanics Study on the Fatigue Crack Propagation of the Pressure Vessel Pad Weldment

차 용 훈\* · 김 하 식\*\*  
 Cha Young-Hoon · Kim Ha-Sig  
 (1996년 4월 6일 접수, 1996년 12월 14일 채택)

#### ABSTRACT

In studying the fatigue strength of fillet welded the section of pressure vessel pad, this study was to evaluate the effect of weld toe notch and to compare the results of numerical analysis with the results of fatigue experiments of fillet welded A516 grade 60 steel specimens. The fatigue life for the Bead welded specimen was about 1.4 times as much it as the 1Pad welded specimen. Also, The fatigue life for the 2Pad welded specimen was about 1.5 times as much it as the 1Pad welded specimen. In  $da/dN-\Delta K$  curve, the fatigue crack growth rate for the 1Pad welded specimen appeared higher than that of the 2Pad welded specimen in the same initial region of  $\Delta K$ , had a similar inclination in the stabled region.

#### 1. 서 론

구조물에 있어서 파괴나 손상의 대부분은 피로에 의해서 발생되며 위험한 재료를 저장하거나 수송하는데 사용되는 압력용기 구조물은 좌굴저항을 향상시키기 위하여 하복부에 용접 스패브강재에 의해서 강화되므로 용접이음의 피로거동을 평가하는 것은 매우 중요하다.

그리고 용접시 용착금속의 용융 및 응고시에 생

기는 국부적인 내부응력과 소성변형에 의해 강도가 저하하며 용착금속부에 접하고 있는 부분의 온도가 급격하게 변화하여 취하되므로 취성파괴의 원인이 되며 용접재에서는 용접경계부 주위의 용착금속부와 열영향부, 모재부의 기계적 성질들이 서로 차이를 보이며 용접시 금속의 용융과 응고 과정 중에 용접잔류응력의 발생으로 재료의 피로강도 저하 등의 원인이 된다<sup>11-13)</sup>.

Glinka 및 Nelson<sup>9,10)</sup>은 실험을 통하여 용접부의

\* 조선대학교 공과대학 기계공학과(수송기계부품공정자동화, 1구센터)

\*\* 조선대학교 공업전문대학 기계공학과

잔류응력이 피로균열전파에 미치는 영향에 대한 연구를 발표하였다.

그러므로, 용접이음부의 피로강도에 미치는 용접잔류응력과 용접토우노치의 영향에 대해 최근 많은 연구가 진행되고 있으나<sup>14-16)</sup> 압력용기에 필렛용접한 패드부의 피로강도에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 논문에서는 압력용기 패드부의 피로강도에 미치는 용접토우노치(weld toe notch)의 영향과 이에 관한 수치해석결과를 비교하여 등가균열(equivalent crack)의 개념을 공학적인 피로해석을 위한 수단으로 도입하여, 용접이음부의 피로거동에 대한 선형탄성파괴역학적 개념에 의해서 근사적으로 예상되는 피로균열진전과정을 고찰하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험편

실험에 사용된 재료는 실제 압력용기에서 사용되는 저탄소강인 판두께 7mm의 열간압연(hot-rolled)한 ASTM A516 grade 60강을 사용하였다.

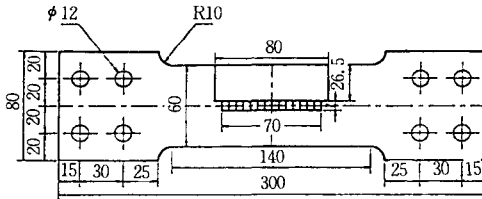


Fig. 1 1Pad-on-plate specimen

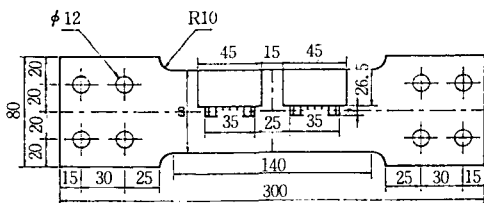


Fig. 2 2Pad-on-plate specimen

시험편 패드의 형상과 크기는 Fig. 1, 2, 3과 같으며, 판재를 밴드소모로 절단후 밀링가공 및 연삭작업을 한 후 패드부에 필렛용접과 시험편에 비

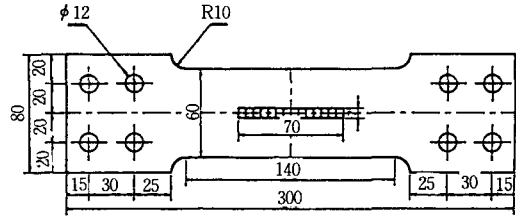


Fig. 3 Bead-on-plate specimen

Table 1 Chemical compositions of A516 grade 60 steel (Wt %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V
0.09	0.24	0.67	0.02	0.008	0.02	0.002	0.03	0.012	0.008

Table 2 Mechanical properties of A516 grade 60 steel

Stress at 0.2% Yield (kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation(%)
13.78	42.88	46.13

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 procedures

Welding Method	Welding Current (A)	Welding Voltage (V)	Welding Speed (mm/min)	Amplitude	Gas	
CO <sub>2</sub>	1P/2P	190/190	17/17	5/3	1/3	CO <sub>2</sub>

이드용접을 하였으며 용접후 시험편의 표면 및 용접부는 #400~#1200을 사용하여 연마를 하였다.

A516 grade 60강의 화학적 성분과 기계적 성질은 각각 Table 1, 2에 제시하였다.

용접봉은 고려용접봉(주) 직경 1.2mm인 고장력 강용인 K-71T(플럭스 코오드 와이어)를 사용하여 AC서보모터 구동식 CO<sub>2</sub> 산입용 로봇 용접기로 용접변형을 방지하기 위하여 지그로 구속한 상태에서 용접을 실시 하였다.

용접봉의 화학적 성분과 용접조건은 Table 3, 4와 같다.

### 2.2 실험장치

본 실험에 사용된 시험기는 10ton 용량의 서보유압식 피로시험기(SHIMADZU Co. JAPAN)이며,

피로균열길이는 OSM을 부착한 배율이  $\times 50$ 인 이동식 현미경을 사용하여 균열의 성장을 관찰하고 길이를 측정하였다.

그리고 피로실험은  $\Delta P$ -일정 하중제어 방식을 사용하고 파형은 정현파형(sine wave), 하중비  $R=0.1$ , 하중반복수는 5Hz, 실험실 온도는 상온에서 행하였다. 시험편의 하중방향은 압연방향과 일치시키고 균열성장방향이 압연방향과 수직이 되도록 가공하여 피로실험을 행하였다.

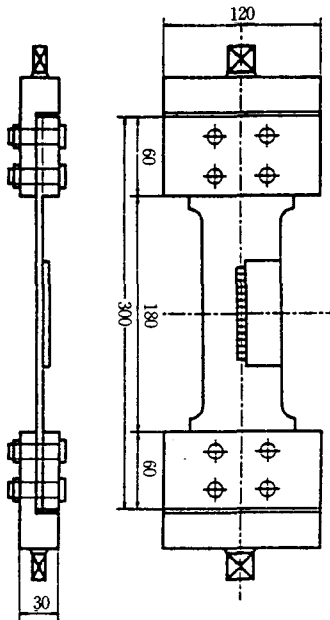


Fig. 4 Configuration of grip

Fig. 4와 같이 그림에 판시험편을 4개의 볼트로 죄어 판시험편 전체에 등분포하중이 작용하도록 하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

일정하중폭( $\Delta P = \text{const.}$ )하에서의 피로시험결과를 반복사이클수(N)에 대한 균열성장길이(a)로 나타내면 Fig. 5~Fig. 9와 같다. Fig. 5 및 Fig. 6은 1패드, 2패드용접시험편에 대한 피로시험결과와 수치해석 결과를 비교하여 나타낸 것이며 1패드용접시험편에서는 비슷한 양상을 나타내고 있으나, 2패드용접시험편에서는 약간의 차이가 나타날 수 있다.

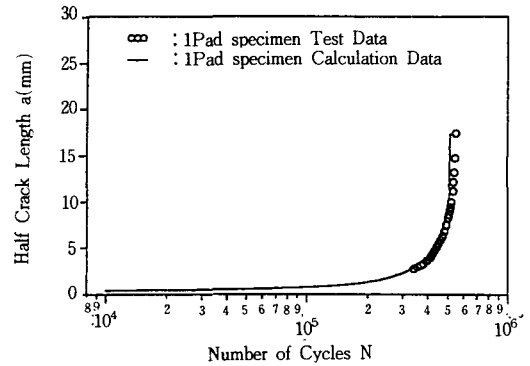


Fig. 5 a-N curves for experimental and calculation results

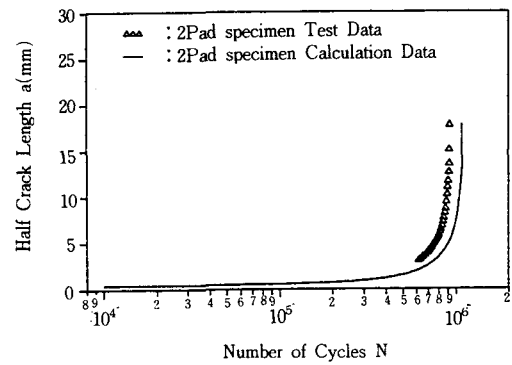


Fig. 6 a-N curves for experimental and calculation results

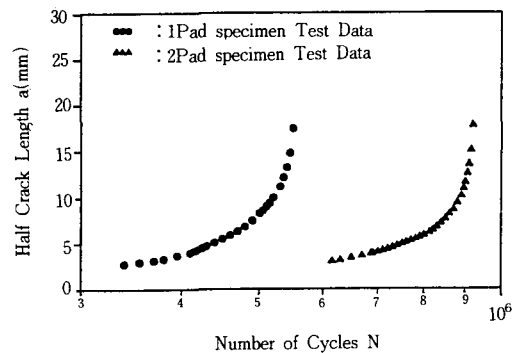


Fig. 7 Experimental a-N curves in the 1Pad and the 2Pad fillet welding specimen

Fig. 7은 1패드, 2패드용접시험편의 a-N관계를 비교하여 plot한 것으로 2패드용접시험편이 1패드용접시험편에 비하여 피로수명이 약 1.5배 증가

되었으며, 이와같은 이유는 2패드용접 토우부에서 응력집중이 분산된것으로 생각된다. Fig. 8은 비이드용접시험편에 대한 피로시험 결과를 수치해석한 결과와 비교한 것으로 근사적으로 일치함을 알 수 있었다.

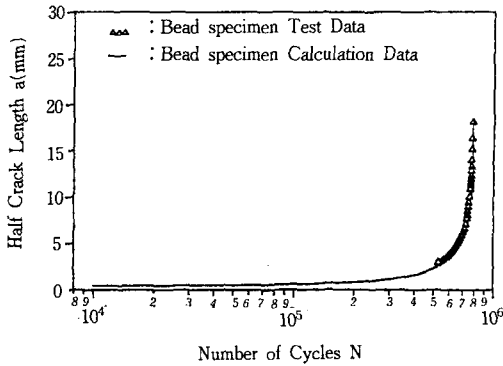


Fig. 8 a-N curves for experimental and calculation results

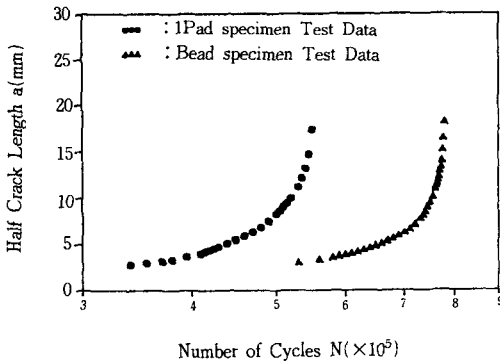


Fig. 9 Experimental a-N curves in the 1Pad and the Bead specimen

1패드용접시험편의 피로수명에 대하여 비이드용접시험편과 비교한 것이 Fig. 9이다. 그림에서 나타난 것과 같이 피로수명이 약 1.4배의 증가를 보이는 것은 시험편 및 용접형상의 차이로 생각되며, 필렛용접과 단순 비이드용접의 균열개시와 피로수명의 경향을 비교하고자 하였다.

Fig. 10 및 Fig. 11은 실험을 통해 얻어진 a-N관계로부터 피로균열성장속도( $da/dN$ )를 응력확대계수 변동폭( $\Delta K$ )에 대하여 Log-Log좌표로 나타낸 것이다.

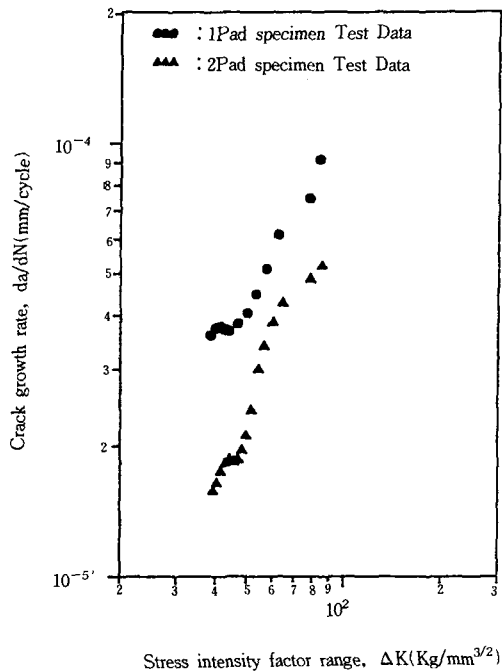


Fig. 10  $da/dN$ - $\Delta K$  relations to the 1Pad and the 2Pad fillet welding specimen

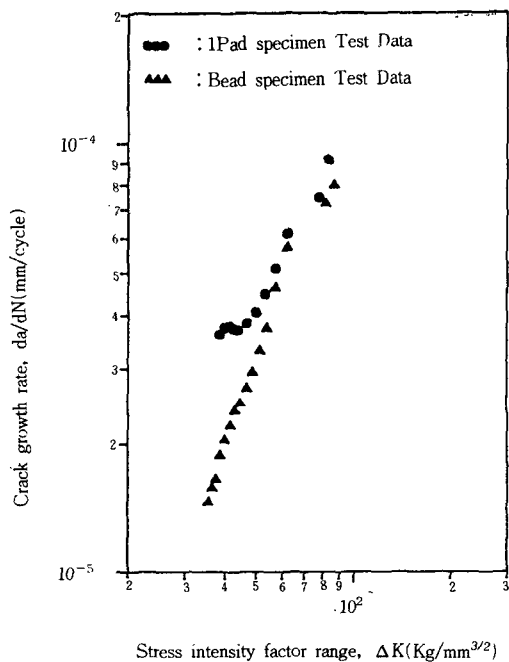


Fig. 11  $da/dN$ - $\Delta K$  relations to the 1Pad and the Bead specimen

Fig. 10과 같이 전범위의  $\Delta K$ 영역에서 1패드용 접시시험편의 피로균열성장속도가 2패드용접시시험편에 비하여 높게 나타나는 것은 2패드 토우부에서 응력집중이 분산되어 초기 미시균열이 발생되기 때문으로 생각된다. 저 $\Delta K$ 영역에서는 열영향부에서 다소 지연현상이 나타나지만 그 이후 안정성장 영역에서는 피로균열성장속도가 거의 선형적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 고 $\Delta K$ 범위에서는 판통균열식을 적용하였으므로 균열성장속도가 약간 차이가 있게 나타났다. 그러므로 용접토우노치 영향은 피로균열 성장과정에 있어서 중요한 역할을 한다고 생각된다.

Fig. 11은 1패드용접시시험편과 비이드용접시시험편을 비교한 것으로 비이드용접시시험편의 초기피로균열 성장속도가 낮게 나타나는 것은 용접형상과 패드용접부에 비하여 응력집중이 낮게 나타남을 알 수 있었다. 그러나 안정성장구간에서는 피로균열 성장속도가 거의 같게 나타났다.

#### 4. 결 론

- 1) 패드, 비이드용접시시험편의 균열은 용접 토우부에서 시작하여 파단되었다.
- 2) a-N곡선에서 1패드용접시시험편의 경우 수치해석과 비슷한 양상을 나타내고 있으나, 2패드용접시시험편에서는 약간의 차이가 나타났다.
- 3) 비이드용접시시험편이 1패드용접시시험편보다 피로수명이 약 1.4배 증가를 나타냈으며 2패드용접시시험편이 1패드용접시시험편보다 피로수명이 약 1.5배 증가하였다.
- 4) da/dN- $\Delta K$ 선도에서 1패드용접시시험편이 2패드용접시시험편에 비해 초기 동일한  $\Delta K$  영역에서 피로균열성장속도가 높게 나타났으며, 열영향부에서 지연현상과 안정성장구간에서는 선형적으로 증가하는 경향을 나타냈다.

본 논문은 1995년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었으며 그 지원에 감사 드립니다.

#### 참 고 문 헌

1) 鈴木春義, “改訂 最新銲接工學”, コロナ社,

pp. 1~3, 1980.

- 2) K. Masubuchi, “Analysys of Welded Structures”, International Series on Materials Science and Technology, Vol. 33, pp. 1~10, 1980.
- 3) J. F. Lancaster, “Metal9lurgy of Welding”, Third Edition, pp. 1~5, 1980.
- 4) 이광주, “疲勞強度에 미치는 銲接缺陷의 影響”, 大宇船舶工業株式會社 技術 紙(大宇船舶技術), Vol. 3, No. 10, pp. 19~32, 1986.
- 5) Radaj, D. Design and Analysis of Fatigue Resistant Welded Structures, Halsted Press, 1990.
- 6) Wenyn Shen, “Effects of Residual Stress, Weld Toe Notch and Weld Deffects on Fatigue of Welded Steel Structures”, a Dissertation Submitted to the Faculty of the Oregon Graduate Institute of Science & Technology in Partial Fulfillment of the Degree Dotor of Philosophy in Materials Science and Engineering, April, 1992.
- 7) D. V. Nelson, “Effect of Residual Stress on Fatigue Crack Propagation”, ASTM STP 776, pp. 172~194, 1982.
- 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) G. Glinka, “Effect of Residual Stresses on Fatigue Crack Growth in Steel Weldments under Constant and Variable Amplitude Loads”, ASTM STP 677, pp. 198~214, 1979.
- 10) D. V. Nelson, “Effect of Residual Stress on Fatigue Crack Propagation”, ASTM STP 776, pp. 172~194, 1982.
- 11) Irwin, G. R., “Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate”, Trans. ASME, J. Appl. Mech., Vol. 24, pp. 361~364, 1957.
- 12) Westergaard, H. M., “Bearing Pressures and Cracks”, Trans. ASME J. J. Appl. Mech., Vol. 6, pp. 49~53, 1939.
- 13) P. C. Paris, M. P. Gomez and W. E.

- Anderson, "A Rational Analytic Theory of Fatigue", The Trend in Engineering, Vol. 13, pp. 9~14, 1961.
- 14) Maddox, S. J. "Assessing the significance of flaws in welds subject to fatigue" Welding Research Supplement pp. 401s~409s, September, 1974.
- 15) Gurney, T. R. Fatigue of Welded Structures, 2nd edition, Cambridge University Press, 1979.
- 16) Booth, G. S. "The fatigue life of ground or peened fillet welded steel joints-the effect of mean stress" Metal Construction, February, 1981.