

# 압력용기 보강재의 용접 형태에 따른 피로균열성장 거동에 관한 연구

차용훈<sup>†</sup> · 김하식<sup>\*</sup> · 성백섭<sup>\*\*</sup>

조선대학교 기계공학부 · <sup>\*</sup>조선이공대학 기계공학부 · <sup>\*\*</sup>목포대학교 기계선박해양공학부  
(2000. 7. 21. 접수 / 2001. 8. 28. 채택)

## A Study on the Fatigue Crack Growth Behaviour for the Welded Configuration in Pressure Vessel Stiffener

Yong-Hoon Cha<sup>†</sup> · Ha-Sig Kim<sup>\*</sup> · Back-Sub Sung<sup>\*\*</sup>

Department of Mechanical engineering, Chosun University

<sup>\*</sup>Department of Computer Application Mechanical Engineering, Chosun College

<sup>\*\*</sup>Department of Mechanical Engineering, Mokpo National University

(Received July 21, 2000 / Accepted August 28, 2001)

**Abstract :** The study is to investigate the influence on the fatigue crack growth behaviors for the welded configuration in pressure vessel stiffener. In order to perform this goal, the automatic welded specimens were prepared. The material is ASTM A516 grade 60 steel used in pressure vessel mainly. In skip welding of pad-on-plate, continuous fillet welding and PWHI specimen, fatigue crack is generally initiated at the starting and end weld toe zone, and ruptured at the starting weld toe zone. The fatigue life of pad-on-plate of the continuous fillet welding specimen is larger than that of pad-on-plate skip fillet welding specimen about 85% under low load, about 20% under high load, and less than that of two-pad continuous fillet welding specimen about 85%. In  $da/dN$ - $\Delta K$  curve under low load, skip fillet welding specimen of pad-on-plate showed retardation on the initial crack, and the fatigue crack growth rate at the low region of  $\Delta K$  greater specimen  $E(3.8 \times 10^{-6} \text{mm/cycle})$ . And the fatigue life of welding specimen was smaller than that of PWHI specimen.

**Key Words :** pressure vessel, fatigue crack growth behaviors, skip fillet welding, continuous fillet welding

### 1. 서 론

용접에 의한 접합은 단조나 리벳이음 등 다른 접합방법에 비하여 높은 이음효율, 재료 및 경비의 절감, 뛰어난 유밀성, 기밀성 등의 많은 장점들이 있어 현대산업에서는 적용이 확대되어 왔다. 현재 원자력 발전소와 같은 거대한 설비를 비롯하여 자동차, 조선, 압력용기 등의 기계공업분야에 널리 이용되고 있으며, 특히 항공기, 미사일, 로켓 등 항공우주산업에 필수적인 수단이 되고 있다. 그러나, 용접시 발생하는 용입불량, 기공, 불순물혼입 및 균열 등의 영향으로 용접부위에 균열이 발생되어 취성파괴를 초

래하기도 한다. 또한, 단시간의 국부적인 가열에 따라 용접부위 근방에는 열응력, 냉각시의 수축으로 인한 잔류응력 및 뒤틀림 발생 등이 문제가 되고 있다.<sup>1-5)</sup>

LPG, LNG 등의 수요증가에 따라 이 가스들을 수송 또는 저장하는 용기, 즉 압력용기에 대한 용접부의 강도 문제가 중요한 연구 대상이 되고 있다. 균열이 존재하거나 발생이 예상되는 압력용기구조물의 파괴방지를 위해서는 최소허용잔류강도와 최대허용균열길이 등을 알 수 있어야 합리적인 검사와 보수대책을 수립할 수 있다. 또한, 압력용기 구조물의 내압이나 수직 진동하중과 수평설계하중 및 정적하중 등의 응력상태에 있으므로, 이를 보강하는 패드에 대한 평가는 아주 중요하다고 할 수 있다. 압력용기 구조물은 좌굴저항을 향상시키기 위하여

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
yhcha@mail.chosun.ac.kr

하복부에 패드를 필릿용접하여 보강되고 있다. 이러한 용접부는 용접형상과 용접결함에 의존되며, 또한 이러한 요인들로 인하여 균열이 발생되고 파괴를 일으킬 수 있다. 그러나 용접이음의 피로강도에 미치는 용접결함과 용접토우노치의 영향<sup>9~11)</sup>에 대하여 최근 많은 연구가 진행되고 있지만, 실제 압력용기 구조물에서 사용되고 있는 보강재 패드 필릿용접부의 피로강도에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 압력용기용 구조물 및 보강재에 많이 사용되는 ASTM A516 grade 60강 패드 용접부의 피로강도를 평가하기 위하여 패드용접시험편을 제작하여 보강재의 용접형태에 따른 피로균열성장거동 및 용접(as-weld)시험편과 용접후열처리(PWHT) 시험편에 대한 용접토우부의 피로강도에 미치는 영향에 대하여 고찰하고자 한다.

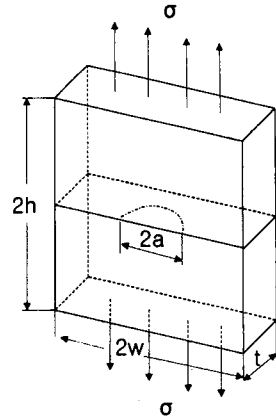


Fig. 1. center semi-elliptic crack configuration

$$\frac{b}{t} < 1, 0.2 \leq \frac{b}{a} \leq 1 \text{ and } \frac{a}{W} < 0.5$$

## 2. 반타원균열과 관통균열의 $\Delta K$ 의 계산

용접토우부에서 형성되는 대부분의 피로균열은 반타원 형태를 하고 있기 때문에 용접이음에서 발생하는 상당균열은 반타원 균열로 가정하고, 반타원 균열의 응력확대계수를 구하였다.

가장 일반적인 방법인 수치적인 식은 다음과 같다.

$$K_{I_f} = \sigma \frac{\sqrt{\pi b}}{E(K)} F_S \quad (1)$$

여기서

$$F_S = [M_1 + M_2(b/t)^2 + M_3(b/t)^4] g f_\varphi f_w \quad (2)$$

$$M_1 = 1.13 - 0.09(b/a)$$

$$M_2 = -0.54 + \frac{0.89}{0.2 + (b/a)}$$

$$M_3 = 0.5 - \frac{1}{0.65 + (b/a)} + 14(1 - b/a)^{24}$$

$$g = 1 + [0.1 + 0.35(b/t)^2](1 - \sin \varphi)^2$$

$$f_\varphi = [(b/a)^2 \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi]^{1/4}$$

$$f_w = [\sec(\frac{\pi a}{2W} \sqrt{b/t})]^{1/2}$$

$$E(K) = [1 + 1.464(b/a)^{1.65}]^{1/2} \quad (3)$$

이다. Fig. 1에서 반타원 표면균열 중심으로부터 판의 형상을 a, b, t, W,  $\varphi$ 로 나타내고 있다.

위 식의 적용을 위해서는 다음과 같은 조건이 주어진다.

파단 표면 해석 결과로 b/a비는 반타원 균열성장에서는 거의 변화하지 않는다고 가정하였다. 균열 성장에 관한 값은 실험데이터에서는 유용하지 않기 때문에 정해진 b/a비는 실험결과에 대하여 선형보간법을 사용하였으며, 계산은 반타원균열이 관통에 이를 때 끝난다.

관통균열이 성장할 때 응력확대계수는 식(1)에 의해서는 더이상 예상할 수 없으므로 이러한 조건에서는 응력확대계수 계산을 위한 일반적인 식이 없기 때문에 중심균열과 관통균열이 존재하는 무한평판에 대한 식은 다음과 같은 근사식을 사용한다.

$$K_{I_f} = \sigma \sqrt{\pi a} F_I(\alpha) \quad (4)$$

여기서

$$\alpha = \frac{2a}{W}$$

$$F_I = (1 - 0.025\alpha^2 + 0.06\alpha^4) \sqrt{\sec(\alpha\pi/2)}$$

이다. a는 1/2 균열길이이며, W는 판폭이다.

각하중에 대한 1/2 균열길이의 함수로 응력확대계수를 계산한다.

## 3. 시험편 및 실험

본 실험에 사용된 재료는 압력용기에 사용되는 두께 6mm 열간압연 강판 ASTM A516 grade 60강을 사용하였다.

시험편재료의 기계적성질을 파악하기 위해서 KS B 0801 13A호 인장시험편을 제작하였으며 그 화학

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 (kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Young's Modulus (kg/mm <sup>2</sup> )
22.5	42.88	46.13	20740

적성분과 기계적 성질은 각각 Table 1과 Table 2에 나타냈다.

Fig. 2, 3는 피로시험을 위해 300×50×6의 A516 강판 위에 105×25×6, 80×25×6 크기의 강판과 동일재료의 패드를 단속 및 연속 필릿용접하여 제작한 피로 시험편의 형상과 크기를 나타낸 것이다. 시험편 제작은 하중방향을 압연방향과 일치시키고, 피로균열성장 방향이 압연방향과 수직이 되도록 판재를 band saw로 절단한 후 밀링과 드릴로 지그에 고정할 볼트홀을 가공하고 연삭을 하였다. 용접시 열변형 발생을 억제하기 위하여 지그를 사용하여 시험편에 구속을 준 상태에서 필릿용접을 하였다. 시험편의 길이는 시험편에 균일한 공칭응력 분포가 작용하도록 폭에 대한 길이의 비가 3배가 되도록 하였다.

용접은 AC 서보모터 구동식인 CO<sub>2</sub> 산업용 로봇 자동용접기로 실시하였으며, 용접봉은 고려용접봉(주)의 지름 1.2mm인 고장력강용 K-71T(플릭스 코

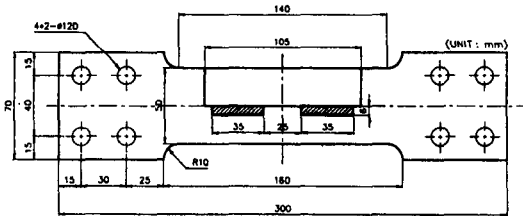


Fig. 2. Skip fillet welded specimen

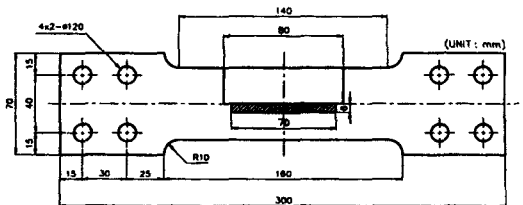


Fig. 3. Continuous fillet welded specimen

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/min)
CO <sub>2</sub>	150	20	36	1	20

어드 와이어)를 사용하였다. 용접봉의 화학적 성분과 용접조건은 Table 3 및 Table 4와 같다.

피로시험은 ±10ton 용량의 서보유압식 피로시험기(Shimadzu Co. Japan)를 사용하였다. 피로균열길이 측정은 하이트게이지로 0.5mm 간격으로 슬립마킹한 후 OSM을 부착한 배율이 50배인 이동식 현미경으로 균열성장길이를 관찰하면서 측정하였다.

피로시험의 조건은  $\Delta P$ -일정 하중제어 방식으로 하중비(R)는 0.1, 파형은 정현파형, 주파수는 5Hz, 실험 온도는 상온에서 행하였다. 실험시 최대하중(Pmax)은 3500kg으로, 최소하중(Pmin)은 350kg으로 하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1. a-N 관계 고찰

Figs. 4~6은 용접이음에서 용접토우부가 피로수명에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 저하중으로 실험한 결과를 반복수에 대한 균열성장길이, 즉 a-N 관계를 나타낸 그림이다.

Fig. 4는 단속 및 연속필릿용접 시험편을 비교한 그림이다. 단속필릿용접 시험편은 약  $1.40 \times 10^6$ 회, 연속필릿용접 시험편은 약  $2.59 \times 10^6$ 회에서 파단되었으며, 피로수명은 약 85% 크게 나타났다. 이러한 원인은 연속필릿용접이 단속필릿용접보다 용접토우부에서의 압축잔류응력이 높게 작용하여 초기균열의 발생이 지연되었기 때문으로 생각된다.

Fig. 5는 용접후열처리한 단속필릿용접과 연속필릿용접 시험편을 비교한 것이다. 단속필릿용접 시험편은 약  $8.30 \times 10^5$ 회, 연속필릿용접 시험편은 약  $1.52 \times 10^6$ 회에서 파단되어, 단속필릿용접이 연속필릿용접에 비해 피로수명은 약 83% 크게 나타났다.

Fig. 6은 용접 시험편과 용접후열처리 시험편을 비교한 것이다. 피로수명은 단속필릿용접 시험편이

가장 길었으며, 단속필릿용접처리의 경우가 가장 짧게 나타났다. 이러한 이유는 인장-인장 반복하중 조건하에서 용접잔류응력은 초기의 피로균열개시에 큰 영향을 미치지만, 피로균열성장에는 영향을 미치지 않기 때문이라고 생각된다. 또한 피로균열은 용

접시작과 끝단부에서 개시하여 용접시작 토우부에서 파단되었다. 이것은 용접시작부가 끝단부에서 보다 높은 압축잔류응력이 생성되어 응력집중 현상이 나타났기 때문이며, 용접이 끝단부에서 파단되는 경우는 그 부분에서 용접결합 존재의 영향이라 생각된다.

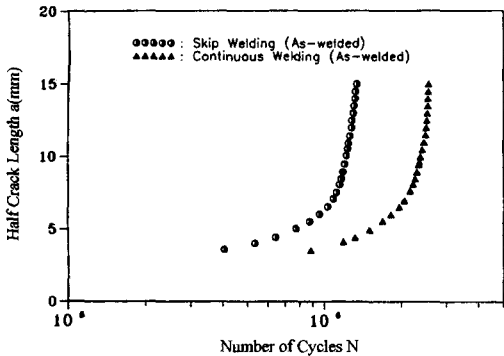


Fig. 4. a-N curves in skip and continuous fillet welded specimens(as-weld)

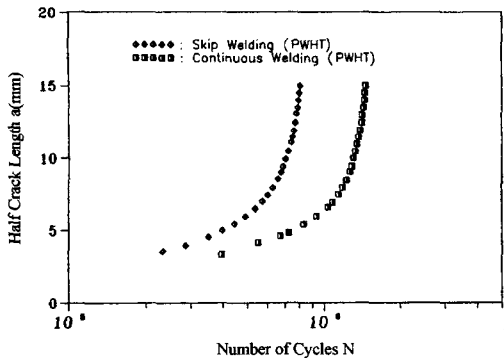


Fig. 5. a-N curves in skip and continuous fillet welded specimens(PWHT)

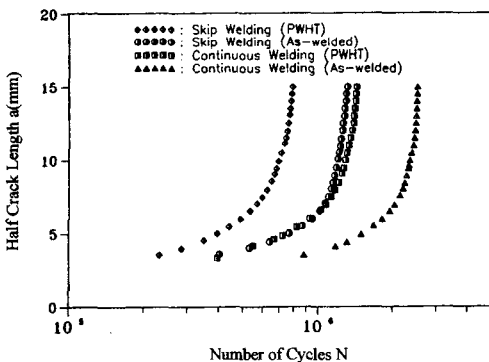


Fig. 6. a-N curves in skip and continuous fillet welding specimens (as-weld and PWHT)

## 4.2. 피로균열성장거동 고찰

Figs. 7~9는 용접토우 노치부의 피로균열성장 거동을 고찰하기 위하여 a-N 관계로부터 피로균열성장속도 da/dN와 응력확대계수변동 폭  $\Delta K$ 에 대하여 log-log 선도에 도시한 것이다.

Fig. 7은 용접시험편에서의 단속 및 연속필릿용접의 da/dN- $\Delta K$  관계를 비교한 것이다. 초기피로균열개시 구간에서 지연현상이 나타났으며, 피로균열성장속도는  $\Delta K$ 의 값이  $22.39 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$  영역에서 단속필릿용접에서는  $3.8 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$ , 연속필릿용접에서는  $2.0 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$ 로 차이가 크게 나타났다. 그리고 피로균열이 판표면에서 관찰되기 시작하는 판통균열에 가까워질수록 그 차이는 좁아져 판통균열에 이르러서는 거의 같게 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 8은 용접후열처리 시험편에서의 단속 및 연속필릿용접을 비교한 것이다. 피로균열성장속도는  $\Delta K$ 의 값이 약  $22.39 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$  영역에서 연속필릿용접에서는  $4.0 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$ , 단속필릿용접에서는

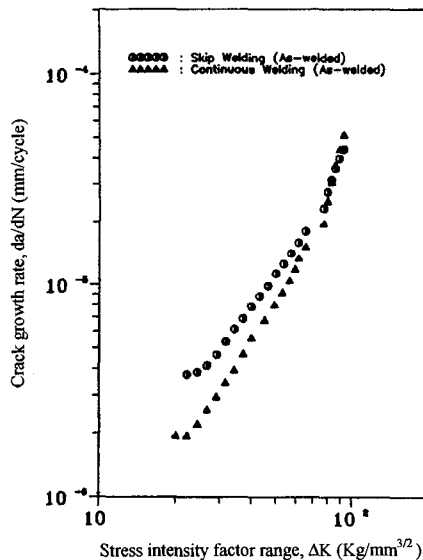


Fig. 7. da/dN- $\Delta K$  relations of skip and continuous fillet welded specimen(as-weld)

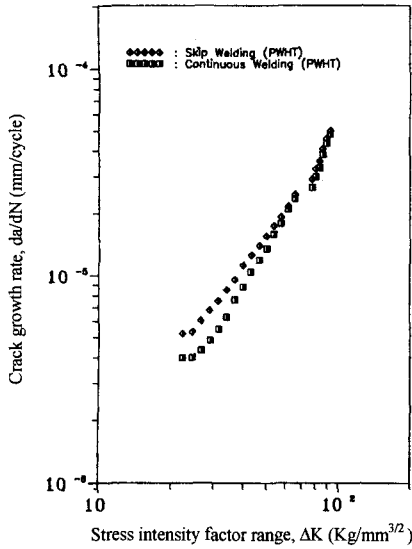


Fig. 8. da/dN-ΔK relations of skip and continuous fillet welded specimen(PWHT)

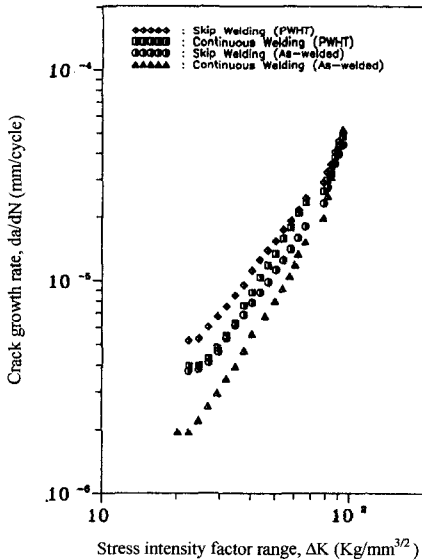


Fig. 9. da/dN-ΔK relations of skip and continuous fillet welded specimen(as-weld and PWHT)

$5.2 \times 10^{-6}$  mm/cycle로 연속필릿용접상태가 낮게 나타났다.

Fig. 9는 용접 시험편과 용접후열처리 시험편의 결과를 비교한 것이다. 피로균열성장속도는 ΔK의 값이 약  $22.39 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$  범위에서 단속필릿용접과 용접후열처리 연속필릿용접이 거의 같게 나타났으나, ΔK의 값이 약  $40 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$  이후에서 용접후열

처리 연속필릿용접이 피로균열성장속도가 높아지는 것을 알 수 있었다. 용접 시험편과 용접후열처리 시험편은 균열발생 초기에 지연현상을 보였으며, 낮은 ΔK 영역에서 피로균열성장속도의 차이가 크게 나타났다. 또한 용접후열처리 시험편이 용접 시험편에서 보다 피로균열성장속도가 높게 나타나는 원인은 열처리로 용접잔류응력이 제거되어 용접토우부의 압축잔류응력이 용접시험편의 피로균열성장을 상당 부분 지연시키기 때문이라 생각된다.

### 5. 결 론

압력용기 구조용강의 용접토우 노치부에 대한 피로균열개시 및 성장거동에 대한 연구결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 단속, 연속필릿용접 시험편과 열처리한 시험편의 피로균열개시는 용접의 시작과 끝 토우부에서 발생하여 대부분 용접시작 토우부에서 파단되었다.
- 2) 피로수명은 연속필릿용접이 단속필릿용접 보다 85% 높게 나타났는데, 이것은 연속필릿용접의 경우가 단속필릿용접보다 용접시작 토우부의 압축 잔류응력이 더 높아 전체적인 피로수명에 영향을 미친 것으로 생각된다.
- 3) da/dN-ΔK 관계에서 용접 시험편은 초기균열에서 지연현상이 나타났으며, 낮은 ΔK 범위에서 피로균열성장속도는 단속필릿용접 시험편이  $3.8 \times 10^{-6}$  mm/cycle로서 연속필릿용접 시험편의  $2.0 \times 10^{-6}$  mm/cycle보다 높게 나타났다. 또한 용접후 열처리 시험편이 용접시험편에 비하여 피로균열성장속도가 높게 나타났다.

감사의 글 : 본 논문은 한국과학재단 지정 지역 협력 연구센터인 조선대학교 수송기계부품 공장자동화 연구센터의 첨단연구과제 연구비 지원에 의해 연구되었음.

### 참고문헌

- 1) Maddox, S. J. "Improving the fatigue strength of welded joints by peening", Metal Construction, April, 1985.
- 2) K. Masubuchi, "Analysis of Welded Structures", International Series on Material Science and Technology, Vol. 33, pp. 1~10, 1980.
- 3) Radaj, D., "Design and Analysis of Fatigue Resis-

- tant 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 殘溜應力的 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  $10^{-8}$  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.