

SS41 용접재의 잔류응력장내에서의 피로균열 성장거동에 관한 연구

최 병 기

조선대학교 기계공학부

(2002. 1. 2. 접수 / 2002. 2. 28. 채택)

A Study on the Fatigue Crack Growth Behavior in Residual Stress Field of the SS41 Welding Material

Byung-Ki Choi

Department of Mechanical Engineering, Chosun University

(Received January 2, 2002 / Accepted February 28, 2002)

Abstract : SS41 material is welded automatically and is investigated some effects of the welding residual stress on the growth and propagation of fatigue crack, so as to study the fatigue behaviour in the welding residual stress field. The summarized results are as follows; 1) In case of the load amplitude is constant, as the stress ratio is changing to 0.1, 0.33 and 0.5 the propagation life is constant but the initiation life decreases. And then, when maximum load or minimum load is constant, as the stress ratio increases the initiation life and propagation life. 2) It was shown that the fatigue crack propagation ratio da/dN was almost constant regardless of the stress ratio change at constant load amplitude and that the larger stress ratio, the slower was the fatigue crack propagation ratio. 3) The opening ratio U is influenced by K_{max} but it isn't only the function of K_{max} because data range is very large. 4) The fatigue life of the specimens on tensile compressive residual stress field was decreased and increased respectively more than that of the base metal.

Key Words : fatigue behaviour, load amplitude, stress ratio, initiation life, propagation life, opening ratio

1. 서 론

용접시 발생하는 국부적인 급열, 급냉에 의해 용접부에는 소성변형이 발생하고, 이러한 국부적인 소성변형으로 잔류응력이 발생하는데, 이를 용접 잔류응력이라 한다.

용착금속부에는 기공, 비금속 개재물 등의 용접 결함이 존재할 가능성이 높다. 이러한 결함이나 비금속 개재물은 피로균열의 발생기점이 되므로,¹⁾ 이러한 용착금속부와 취화된 열영향부 등에 잔류응력은 인장응력으로 작용하여 피로균열의 발생 및 전파를 용이하게 하며, 용착금속부나 열영향부에서 발생한 피로균열에 의한 급작스런 파단이나 파손 등의 파괴사고가 많이 보고되어 있다.²⁾

Kapadia 등³⁾은 응력확대계수범위 ΔK 가 커질수록 잔류응력이 미치는 영향이 작아진다고 보고하였으

며, 피로균열의 발생이 총응력진폭에만 관련되므로 인장잔류응력과 압축잔류응력은 둘 다 발생수명에 무관하며, 압축잔류응력은 피로균열 전파속도를 지연시키는 효과를 나타내지만 응력비가 높을 경우에는 압축잔류응력의 지연 효과가 없다고 보고하였다.

용접구조물들의 피로수명에 발생수명이 차지하는 비율이 상당히 높은 경우도 많지만,⁴⁾ 용착금속부, 열영향부, 모재부 등 기계적 성질⁵⁾과 결정립의 크기가 서로 다른 부분들이 연속되어 있고, 내재된 결함의 크기와 분포에 대한 일관된 정보를 얻기 힘들기 때문에 발생수명을 정확히 예측하기란 매우 어려운 일이다.⁶⁾

잔류응력장내에 있는 피로균열의 전파거동을 보다 명확히 하기 위해서 피로균열 개구거동에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

따라서, 본 연구에서는 피로균열의 전파수명에 미치는 잔류응력의 영향을 연구하기 위해서는, 잔류응력이 존재하는 시험편과 잔류응력이 존재하지 않

는 시험편을 비교하여 잔류응력의 특성을 보다 정확히 파악하기 위하여 잔류응력이 존재하지 않는 재료에서의 피로균열 개구거동과 잔류응력장을 가진 재료에서의 피로균열 전파거동과 개구거동에 대하여 비교·검토하였다.

2. 실험

2.1. 시험편 및 실험방법

본 실험에 사용한 재료는 일반구조용 압연강재 SS41로서 재료의 화학적 성분과 기계적 성질을 각각 Table 1 및 2에 나타내었다.

본 연구에서 사용한 시험편은 용접하지 않은 모재 시험편 및 용접을 통해 잔류응력이 존재하는 시험편 두 종류의 시험편으로서 모재 시험편은 균열 개구거동에 대한 기초적인 사항을, 잔류응력 시험편은 잔류응력장내의 피로거동을 고찰하기 위하여 제작하였다.

모재 시험편과 잔류응력 시험편은 둘 다 Fig. 1과 같은 형태의 SEN 시험편(Single Edge Notched Specimen)이다.

용접잔류응력장내를 피로균열이 전파하는 시험편을 제작하기 위하여 압연방향으로 길이 150mm, 폭 80mm, 두께 6mm의 평판을 I자형 맞대기 이음으로 용접하였다. 용접으로 인해 판재내에 생기는 잔류응력의 크기 및 분포가 재연성을 갖도록 하기 위해, 입열량을 임의로 일정하게 조절할 수 있는 서브머지드 아크 용접기를 사용하여 구속상태에서 용접하였다. 사용한 용접와이어는 지름 4mm의 EH-14이며, 용접조건은 Table 3과 같다.

본 연구에서는 피로균열이 인장잔류응력장에서 발생·전파하는 시험편과 압축잔류응력장에서 발생·전파하는 시험편을 제작하기 위하여 Fig. 2와 같

Table 1. Chemical compositions of SS41 material (wt%)

C	Si	Mn	P	S
0.13	0.25	0.60	0.019	0.010

Table 2. Mechanical properties of SS41 material(Annealed at 860°C for 1 hr)

Yield Stress (MPa)	Tensile Stress (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Hardness (Hv)
297.2	393.1	198.3	0.3	165.1

Table 3. Welding conditions

	Voltage (V)	Current (A)	Speed (cm/min)
Fore	35	450	35
Back	30	400	35

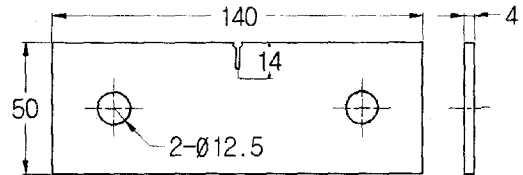


Fig. 1. Dimensions of SEN Specimen

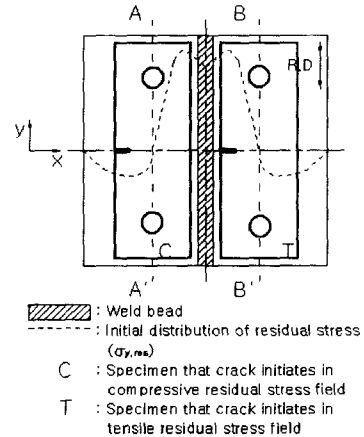


Fig. 2. Location of specimen with residual stress

은 위치에서 시험편을 채취하여 인장잔류응력장과 압축잔류응력장내에 노치를 가공하였다.

또한 인장잔류응력장에서 피로균열이 발생·전파하도록 설계된 시험편은 T1 시험편이라 하고 압축 잔류응력장에서 피로균열이 발생 전파하도록 설계된 시험편은 C1 시험편이라 칭하였다.

시험편에 가공한 노치의 길이는 14mm, 폭은 0.14mm로서 노치길이 12mm까지는 두께 1mm의 휠 커터를, 노치길이 12mm에서 14mm까지는 두께 0.14mm의 휠 커터를 사용하여 노치를 가공하였다.

본 실험에 사용한 시험기는 용량 ±10ton의 전기유압식 서보시험기를 이용하였다.

2.2. 실험방법

본 실험에 사용된 하중 제어방식은 페루프(close-

Table 4. Kinds of specimen along stress ratio

Specimens	R	Pmax (kN)	Pmin (kN)	ΔP	Method
B1	0.1	9.8	0.98	8.82	Method 1 (ΔP constant)
B2	0.3	13.23	4.41	8.82	
B3	0.5	17.64	8.82	8.82	
B4	0.2	19.6	3.92	15.68	Method 2 (Pmin constant)
B5	0.3	11.76	3.92	7.84	
B6	0.5	7.84	3.92	3.92	
B7	0.1	9.8	0.98	8.82	Method 3 (Pmax constant)
B8	0.3	9.8	2.94	6.86	
B9	0.5	9.8	4.9	4.9	

loop)식 제어기구를 응용한 것으로 설정하중과 수시로 검출(검출간격: 10msec)되는 로드셀의 신호를 컨트롤러 안에 내재된 A/D 변환기를 통해서 소형 컴퓨터에 입력해 오차를 보정하는 방법을 택함으로써 고정도의 실험이 가능하도록 하였다.

균열의 측정은 시험편의 전면에서 클립게이지로 측정된 균열개구변위를 이용하여 계측하였으며, 정밀도는 컨트롤러 안에 내재된 12bit A/D 변환기의 분해능(resolution)을 고려하면 균열개구변위의 측정 정밀도가 대략 0.0001mm 정도이며, 이를 균열길이로 환산하면 0.01mm 정도가 된다. 반복하중은 하중제어에 의한 정형파형, 주기는 10Hz를 사용하였다.

피로균열 개구거동을 명확히 해석하기 위해 우선 모재 시험편에 대하여 세가지 방법으로 응력비를 변화시켜, 각 하중변수가 균열개구비에 미치는 영향을 고찰하였다. 응력비의 변화방법은 하중진폭을 일정하게 하고 응력비를 변화시키는 방법(시험편 B1, B2, B3), 최소하중을 일정하게 하고 최대하중을 변화시켜 응력비를 변화시킨 방법(시험편 B4, B5, B6)과 최대하중을 일정하게 하고 최소하중을 변화시켜 응력비를 변화시키는 방법(시험편 B7, B8, B9)을 사용하였다. 사용한 응력비는 0.1(0.2), 0.3, 0.5이다. 각 시험편에 사용한 하중 모델과 시험편의 종류는 Table 4와 같다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 균열길이 a와 하중 반복수 N의 관계

모재에 대하여 여러 가지 하중조건에서 실험하여

얻은 균열길이와 하중반복수의 관계는 Figs. 3~5와 같다.

Fig. 3은 하중진폭이 8.82kN로 일정하고 응력비가 0.1, 0.3, 0.5인 세 가지 실험을 통해 얻은 결과이다. 피로수명은 응력비 변화에 따라 거의 차이를 보이지 않았다. 따라서 하중진폭이 동일한 경우에는 응력비에 의한 피로수명의 차이는 거의 없다고 생각된다.

Fig. 4, 5는 최소하중이 3.92kN으로 일정, 최대하중이 9.8kN으로 일정한 결과 모두 응력비가 증가할수록 피로수명이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 3~5에서의 결과를 피로균열 발생수명, 전파수명으로 나누어 도시한 것이 Fig. 6이다. 여기서 균열길이란 노치선단에서부터 균열선단까지 균열길이를 말한다.

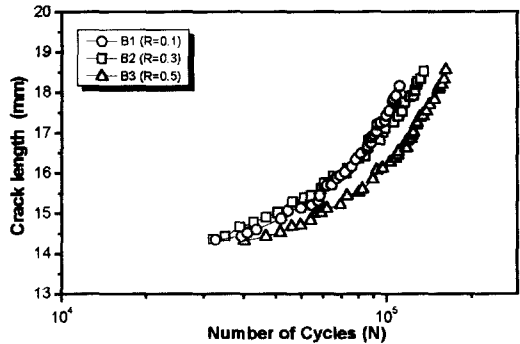


Fig. 3. a-N relations for $\Delta P(8.82kN)$ constant

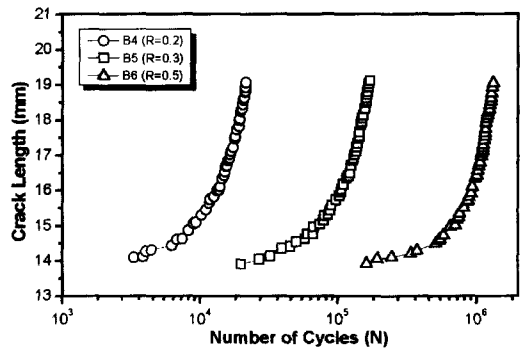


Fig. 4. a-N relations for $P_{min}(3.92kN)$ constant

하중진폭이 8.82kN으로 일정하고 응력비가 0.1, 0.3, 0.5인 B1, B2, B3 시험편에서의 발생수명 및 전파수명은 응력비에 관계없이 거의 일정하다고 생각된다.

최소하중이 3.92kN으로 일정하고 응력비가 0.2, 0.3

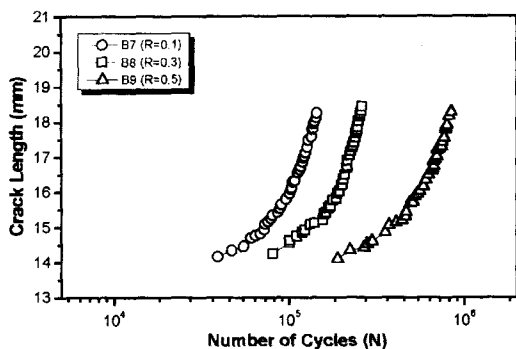


Fig. 5. a-N relations for Pmax(9.8kN) constant

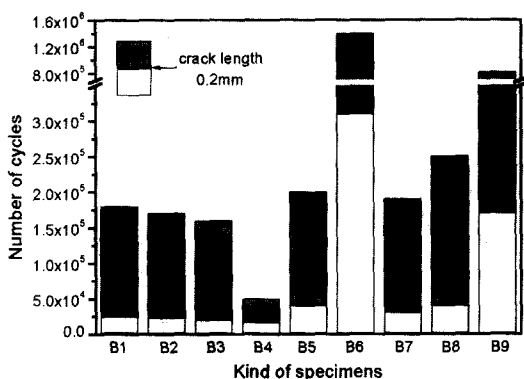


Fig. 6. The comparison of fatigue life at 0.2mm crack length and final fracture

0.5인 B4, B5, B6 시편에서의 발생수명과 전파수명은 응력비가 증가할수록 증가한다. 이러한 경향은 최대 하중이 9.8kN으로 일정하고 응력비가 0.1, 0.3, 0.5인 B7, B8, B9 시편에서도 동일하다.

이러한 원인은 응력비를 증가시키기에 따라 하중진폭 ΔP 가 작아지기 때문이라 생각된다.

3.2. 피로균열 전파속도 da/dN 과 응력확대계수범위 ΔK 의 관계

Figs. 7, 8, 9는 하중진폭 일정조건, 최소하중 일정조건, 최하중 일정조건에서 응력비를 변화시킨 경우에 있어서 피로균열 전파속도 da/dN 과 응력확대계수범위 ΔK 의 관계를 나타내었다.

하중진폭이 일정하고 응력비가 다른 경우에 대한 Fig. 7을 살펴보면, 응력비의 변화에 따른 피로균열 전파속도 da/dN 의 변화가 거의 없다는 것을 알 수 있었다.

최소하중이 일정하고 응력비가 다른 경우에 대한

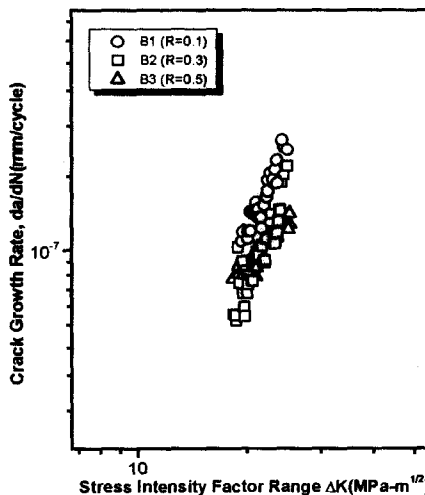


Fig. 7. $da/dN-\Delta K$ relations for SS41($\Delta P=8.82kN$)

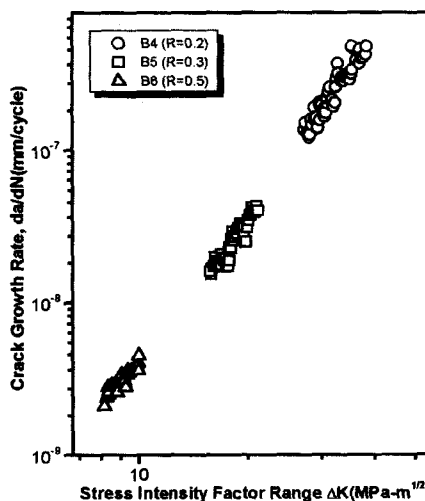


Fig. 8. $da/dN-\Delta K$ relations for SS41($P_{min}=3.92kN$)

Fig. 8에서는 응력비가 클수록 피로균열 전파속도 da/dN 이 느리다는 것을 알 수 있었다.

최하중이 일정하고 응력비가 다른 경우에 대한 Fig. 9에서는 응력비가 클수록 피로균열 전파속도 da/dN 이 느리다는 것을 알 수 있었다.

3.3. 개구비 U와 최대응력확대계수 K_{max} 와의 관계

Hudak 등⁷⁾은 Al합금과 스테인레스강에 대해, 응력비 0.1에서 0.7 사이에서 식(3-1)의 관계가 있다고 보고하였다.

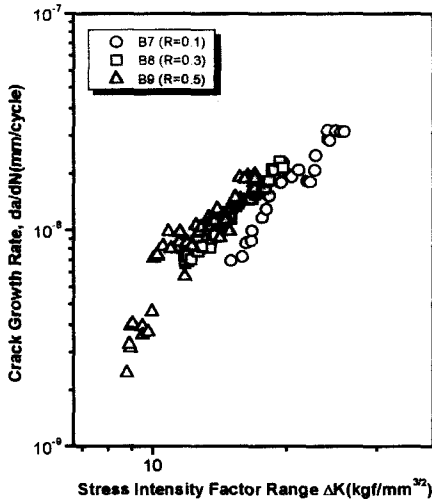


Fig. 9. $da/dN-\Delta K$ relations for SS41 ($P_{max} 9.82kN$)

$$U = A - B / K_{max} \quad (3-1)$$

그러나 개구비 U의 최대응력확대계수 K_{max} 에 대한 의존성에 대하여는 일관된 경향이 없다. 즉, 최대응력확대계수 K_{max} 가 증가하면, 개구비가 증가한다는 결과,⁸⁾ 일정하다는 결과⁹⁾와 감소한다는 결과¹⁰⁾가 있어, 이에 대한 연구가 더 필요하다고 생각된다.

본 연구에서는 여러 가지 응력비에서 개구비 U와 최대응력확대계수 K_{max} 의 관계를 검토하였다.

실험에서 얻은 데이터를 최대응력확대계수 K_{max} 의 역수 $1/K_{max}$ 와 개구비 U의 관계로 정리하여 Hudak 등이 사용한 식(3-1)과 같은 형태로 정리하여 Fig. 10

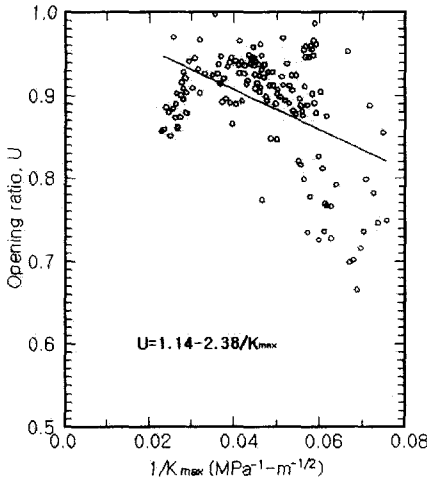


Fig. 10. $U-1/K_{max}$ relation from elastic compliance method

8에 나타내었다.

Fig. 10을 살펴보면, 최대응력확대계수 K_{max} 가 클수록 개구비 U가 대체적으로 크게 나타났다.

그러나, 데이터의 산포가 매우 크기 때문에 Hudak이 제안한 식을 만족하기 힘들다고 생각된다.

3.4. 잔류응력장내에 있는 피로균열의 전파 거동

Fig. 11(a)와 11(b)는 각각 인장잔류응력장과 압축 잔류응력장에 노치를 가공한 시험편의 잔류응력 분포를 나타내고 있다.

T1 시험편과 C1 시험편을 사용하여 얻은 실험결과를 하중반복수 N과 균열길이 a의 향으로 나타낸 것이 Fig. 12과 Fig. 13이다. T1 시험편에 대한 결과인 Fig. 13을 살펴보면 인장잔류응력장내에서의 피로수명은 잔류응력이 없는 모재보다 23.8% 정도 짧게 나타났다.

T1 시험편의 경우 피로수명이 모재 시험편의 피로

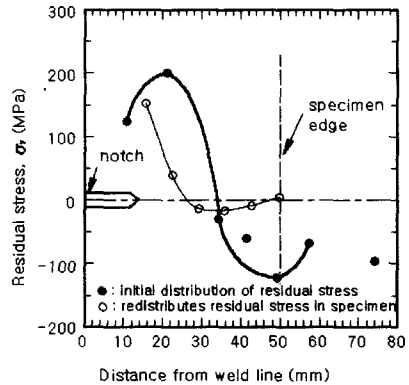


Fig. 11(a). Residual stress in T1 specimen

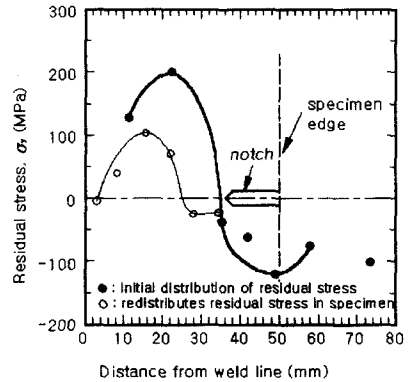


Fig. 11(b). Residual stress in C1 specimen

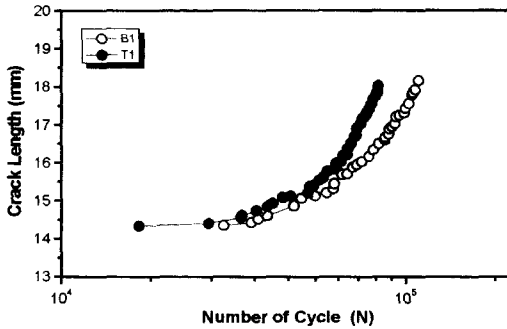


Fig. 12. a-N relations for T1 specimen

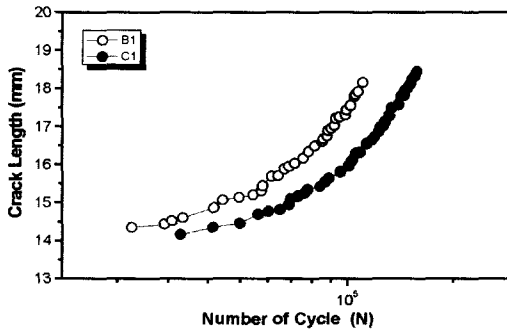


Fig. 13. a-N relations for C1 specimen

수명보다 짧은 이유는 용접시 발생한 인장잔류응력장이 피로수명을 단축시킨 것으로 사료된다.

C1 시험편의 경우는 모재 시험편의 피로수명보다 35.7% 정도 높게 나타내고 있는데, 이러한 이유는 용접시 발생한 압축잔류응력의 영향이 피로균열 전진거동을 지연시킨 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 용접잔류응력장내에서 발생하는 피로균열의 거동을 검토하기 위하여, 탄소강재를 자동용접하고, 그 용접된 부분을 중심으로 용접잔류응력이 피로균열 발생·전파에 미치는 영향을 조사하였다.

얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 하중진폭이 일정(8.82kN)한 경우, 응력비가 0.1, 0.33, 0.5로 증가함에 따라 발생수명은 감소하나 전파수명은 일정하고, 최대하중과 최소하중이 일정한 경우는 응력비의 증가에 따라 발생수명과 전파수명이 모두 증가하였다.

2) 하중진폭이 일정한 경우 응력비의 변화에 관계없이 피로균열 전파속도 da/dN 이 거의 일정했으며,

최소하중과 최대하중이 일정한 경우 응력비가 클수록 피로균열 전파속도 da/dN 이 느리게 나타났다.

3) 개구비 U는 최대응력확대계수 K_{max} 의 영향을 받지만, 데이터의 산포가 매우 크기 때문에 개구비 U는 최대응력확대계수 K_{max} 만의 함수는 아니다.

4) 용접잔류응력내에서 피로수명은 인장잔류응력장에서는 모재에 비해 수명이 짧게 나타났으며, 압축잔류응력장에서는 모재에 비하여 피로수명이 길게 나타났다.

참고문헌

- 1) 宋 森弘, 國尾 武, “高强度鋼のミクロ領域における疲労き裂生成過程,” 日本機械學會論文集, Vol. 40, No. 334, pp. 1503~1510, 1974.
- 2) W. W. chonherr, “Analysis based on cases of damage involving brittle fracture collocated by the SCXD of the IIW,” The Japan Welding Society, pp. 5~11, 1971.
- 3) B. M. Kapadia, “Influence of Residual Stresses on Fatigue Crack Propagation in Electroslag Welds,” Fatigue Testing of Weldment, ASTM STP 648, pp. 244~260, 1978.
- 4) H. S. Reemsnyder, “Development and Application of Fatigue Data for Structural Steel Weldments,” Fatigue Testing of Weldment, ASTM STP 648, pp. 3~21, 1978.
- 5) 김두환, “극한조건하 강구조 부재 이음부의 파괴거동해석,” 산업안전학회지, Vol. 13, No. 4, pp. 213 ~220, 1998.
- 6) 차용훈, “압력용기 보강재의 용접 형태에 따른 피로균열성장거동에 관한 연구,” 산업안전학회지, Vol. 16, No. 3, pp. 1~6, 2001.
- 7) S. J. Hudak, and D. L. Davidson, “The dependence of crack closure on loading variables,” ASTM STP 982, pp. 121~138, 1988.
- 8) W. Elber, “The significance of fatigue crack closure,” Damage Tolerance in Aircraft Structure, ASTM STP 486, pp. 230~242, 1971.
- 9) H. U. Staal, J. D. Ellen, “Crack Closure and Influence of Cycle Ratio on Fatigue Crack Growth in Type 304 Stainless Steel at Room Temperature,” Engineering Fracture Mechanics, Vol. 11, pp. 275 ~283, 1979.
- 10) 村上理一, 秋園幸一, “銲接殘留應力での疲労き裂成長速度の評價,” 銲接學會論文集, Vol. 2, No. 4, pp. 144~150, 1984.