

고주파 전기저항용접부 강관에서의 피로수명의 확률론적 평가

서영범[†] · 김충명* · 김철수** · 김정규***

Probabilistic Evaluation of Fatigue Life in High Frequency Electric Resistance Welded Joint of the Pipe

Young-Bum SEO, Choong-Myeong KIM, Chul-Su KIM and Jung-Kyu KIM

Key Words: High Frequency Electric Resistance Weld(고주파 전기저항 용접), Paste Weld Flaw(페이스트용접결함), Fatigue Life(피로수명), Surface Crack(표면균열), Failure Probability(파손확률)

Abstract

In this study, the optimal welding condition of the input power was selected experimentally through the ERW simulator, which is equal to welding status of ERW part in pipe. This condition is the input power 250kW in the heat treatment of the 900°C normalizing derived from the nondestructive technique and impact energy. In order to evaluate the variation of the fatigue life in the pipe, fatigue surface crack growth test of base and optimal welded metal were performed statistically. As stress intensity factor range (ΔK_S) increases, the fatigue crack propagation rate (da/dN) of the base metal is faster than that of the welded joint. The variation of the fatigue life in the ERW pipe was estimated statistically using Monte-Carlo simulation with the standard deviation of material constants (C and m) of the paris law in the specimen.

1. 서 론

천연가스(natural gas)의 공급은 효율성을 높이고 소비자들에게 모두 강관을 이용하여 수송되고 있다. 최근 강관의 소재 및 용접 시공의 비용 절감을 위하여 산업계에서는 두께의 감소 및 고강도의 배관을 사용하는 추세이다. 이를 위한 용접기법들 중에서 고주파 전기저항 용접(High Frequency Electric Resistance Weld, ERW)은 용접부의 자체 청정(self-cleaning) 효과로 인하여 용접부 결함 발생빈도가 상대적으로 작으므로 향후

많은 수요가 예상된다.

한편, ERW강관은 사용중 환경적인 요인 또는 용접공정 동안에 입열량 등으로 인하여 작은 결함을 갖게 된다. 이 결함은 일반적으로 반타원 형태의 표면 균열로 나타나며⁽¹⁾, 이는 강관의 누적 피로파손(cumulative fatigue failure)을 발생시킨다. 따라서 ERW 강관의 안전성을 향상시키기 위해서 최적의 용접 조건 설정과 그에 따른 표면균열 진전거동의 평가가 매우 중요하다.

ERW 강관에 대한 기존 연구로, Chapetti 등⁽²⁾은 ERW 송유관에서 발생하는 결함의 원인을 분석하고 이의 피로특성을 평가하였다. Kiefner 등⁽³⁾은 송유관의 건전성평가를 위한 작용압력검출 및 결함크기에 따른 수명 평가기법을 제안하였고, Beller 등⁽⁴⁾은 송유관 용접부에서 발견되는 균열 종류와 균열검출을 위한 비파괴 검사기법을 소개

† 회원, 한양대학교 대학원

E-mail : sumn77@hotmail.com

TEL : (02)2290-0442 FAX : (02)2297-6707

* 회원, (주) POSCO

** 회원, 철도대학교 철도차량기계과

*** 회원, 한양대학교 기계공학부

하였다. 또한 Bruce등⁽⁵⁾은 운용 중인 송유관의 부식으로 인한 결함발생 메카니즘을 분석하고 필렛 용접을 이용한 보수기법을 소개하였다. 이와 같이 이전의 연구들은 결정론적 입장에서 강관의 건전성을 평가하였지만, 강관의 피로수명은 재료의 불균질성 및 미세결함의 변동성 등으로 인하여 결정론적 평가보다는 확률론적 평가가 중요하다.

따라서 본 연구에서는 ERW 강관의 최적 입열량조건을 평가하고, 모재 및 용접부의 시험편을 이용하여 표면균열진전거동을 평가하고자 한다. 또한 ERW 강관의 피로수명을 파괴역학적 파라미터를 고려하여 확률론적으로 평가하고자한다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 재료는 (주)POSCO에서 개발 중인 API-X70 강관용 강재로서, 화학성분과 기계적 성질은 각각 Table 1 및 2와 같다.

Fig. 1는 본 연구에서 사용된 표면균열시험편(surface crack specimen)이다. 표면균열 시험편의 노치는 ASTM E740-88 규격⁽⁶⁾에 따라 방전 가공에 의하여 제작하였다.

강관에서의 표면균열은 주응력에 의하여 길이 방향으로 진전하고, ERW 강관의 용접 방식에 의하여 압연방향에 수직하게 용접이 되므로 이를 상사하기 위하여 시험편을 압연 방향에 수직하게 채취하였다.

2.2 피로시험 및 응력확대계수의 평가

피로균열진전시험은 상온의 대기 중에서 10ton 용 유압서어보식 피로시험기(MTS 810)에 마이크로 컴퓨터를 사용한 제어시스템(TestStar II)을 구성하고, 일정하중하에서 하중제어(load control)로 수행하였다. 이때 하중 조건은 응력비 $R=0.1$ 에서 정현파 8 Hz이다. 본 연구에서 시험편에 대한 응력확대계수(stress intensity factor of the specimen, K_S)는 식 (1)과 같이 ASTM E740-88⁽⁶⁾에서 권장하고 있는 Newman and Raju⁽⁷⁾의 식을 사용하여 평가하였다.

$$K_S = (\sigma_i + H\sigma_b) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \cdot F\left(\frac{a}{c}, \frac{a}{t}, \frac{c}{w}, \phi\right) \quad (1)$$

Table 1 Chemical composition of material (wt.%)

C	Cr	Si	P	Nb	V
0.038	0.24	0.23	0.006	0.061	0.041

Table 2 Mechanical Properties of Materials

Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
562	617	39

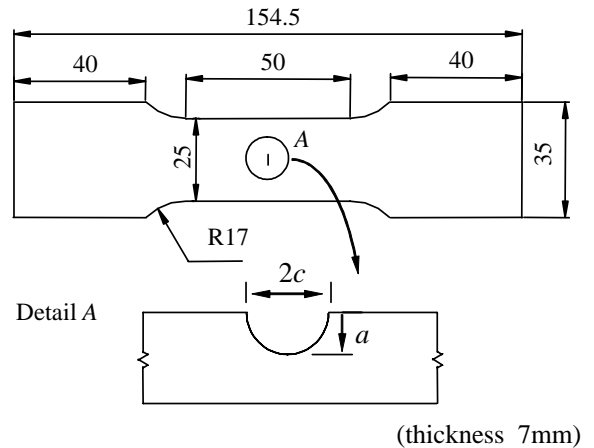


Fig. 1 Configuration of surface crack specimens

한편 강관에 대한 응력확대계수는 3차원 유한요소법에 의한 결과로부터 수식화된 Newman and Raju⁽⁸⁾의 식을 적용하여 평가하였다. 이 식은 강관에 표면 균열이 존재한다고 가정하며, 강관에서의 응력확대계수(stress intensity factor of the specimen, K_P)의 정의는 식 (2)와 같다.

$$K_P = \left(\frac{FR}{t}\right) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \cdot F\left(\frac{a}{c}, \frac{a}{t}, \frac{c}{w}, \phi\right) \quad (2)$$

이들 식에서 σ_i 는 인장응력이고, σ_b 는 굽힘응력이며, Q 는 반타원 표면 균열의 형상계수, F 는 경계수정계수이다. 그리고 PR/t 는 평균 주응력 (average hoop stress)이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 입열량에 따른 결함의 유형

ERW 강관에서 나타나는 결함들의 유형은 용접 입열량의 크기에 따라 크게 세 가지로 다음과 같이 구분된다. 이들은 입열이 낮은 냉접결함(cold weld flaw), 중간 입열량의 페이스트용접결함(paste weld flaw) 그리고 높은 입열량에서 페너트레이터결함(penetrator flaw)이다⁽⁹⁾. 이들 중에서 냉접 결함 및 페너트레이터 결함은 API 5L규격⁽¹⁰⁾에 준한 비파괴검사를 이용하여 검출되므로 이들 결함을 갖는 강관은 실제 제조공정상에 실용화할 수 없다. 따라서 ERW강관의 안전성을 검토하기 위해서는 이들 두 조건을 제외한 범위에서 결함 발생되지 않는 최적의 입열량 선정이 필요하다.

Fig. 2는 입열량에 따른 1m 길이 이내에 존재하는 결함 크기(mm/m)를 나타낸 것이다. 여기서 ERW의 입열량조건은 ERW 시뮬레이터의 최대 용량 475 kW에 대한 2 %인 9.5kW간격으로 제어하였으며, 결함의 크기는 용접 후에 육안 및 비파괴검사기법(nondestructive technique)을 이용하여 검출되었다. 이 그림으로부터 입열량 조건에 따라 ERW용접부에서 발생하는 결함유형들을 분류하면 다음과 같다. 냉접결함은 입열량 240 kW 이하의 범위에서 발생하며, 페너트레이터 결함은 입열량 260 kW이상의 범위에서 발생되었다. 따라서 결함들이 발생되지 않는 정상상태의 입열량 조건은 대략적으로 240~260 kW이다.

한편, 정상상태의 입열량 조건 구간 내에서 ERW용접부를 전자 현미경(philips XL30)으로 관찰한 결과, 미세한 Mn-Fe-Si계 복합 산화물들이 존재한다. 이들은 페이스트 용접결함으로서 강관의 피로수명의 단축을 야기한다⁽¹¹⁾. 본 연구에서는 정상상태 입열량 구간 내에서 최적의 용접조건을 얻기 위하여 각 조건에서 ASTM E23-02⁽¹²⁾에 준하여 충격에너지(impact energy)를 평가하였다. Fig. 3은 정상상태의 입열량 구간에서 용접부의 충격에너지를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 가장 높은 충격에너지를 갖는 입열량은 250kW이다. 따라서 ERW강관의 건정성을 확보하기 위해서는 결함 및 산화물이 검출되지 않으면서 높은 충격에너지를 갖는 입열량 250kW에서 ERW용접부의 피로균열진전거동의 평가가 중요하다.

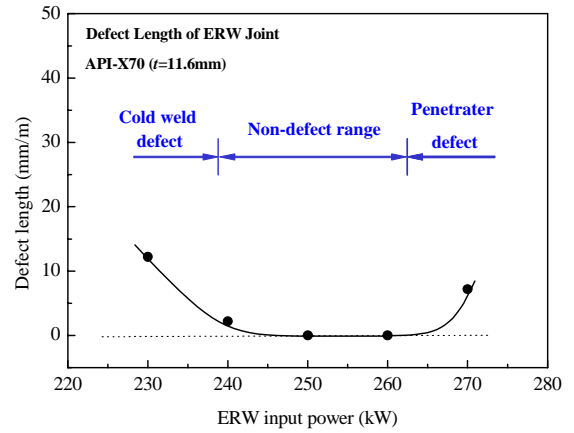


Fig.2 Defect length in the ERW joint with the input power

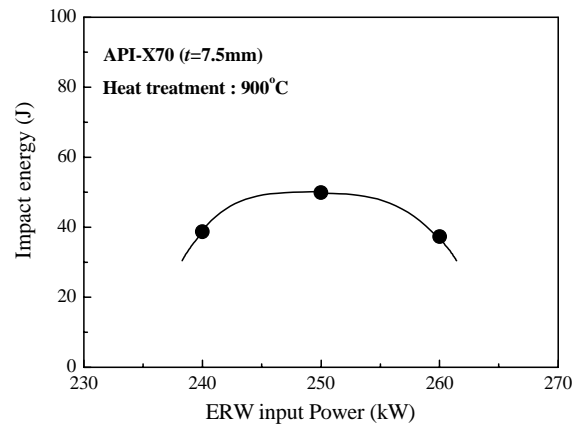


Fig. 3 Impact energy of ERW joint with the input power

3.2 피로균열진전거동 평가

미소결함을 갖는 ERW강관 자체의 피로수명 평가를 위한 실험시험은 경제 및 시간적으로 많은 비용이 예상되므로, 본 연구에서는 강관에 존재하는 미세 결함을 표면 균열로 이상화하여 모재 및 용접부의 표면균열 시험편을 이용하여 피로균열진전거동을 평가하였다. 그리고 표면균열은 3차원적으로 진전되므로 표면방향과 깊이방향의 균열진전거동을 모두 평가하기 위하여 비치마크법(beach mark method)을 이용하여 평가하였다. 파면상의 비치마크는 응력비 $R=0.1$ 및 0.5 로 변화시키면서 생성된다. 이 파단면에서 표면에 나타난 표면균열길이 c 와 균열깊이 a 의 관계는 응력비 R 에 관계없이 하나의 관계식으로 나

타낼 수 있으며, 단일매개변수 c 만으로 균열깊이 a 의 산출이 가능하다. 이의 관계식은 식 (3)과 같다.

$$a = 0.978c^{0.911} \quad (3)$$

식 (3)의 시험편의 균열 형상비는 두께가 다른 강관의 피로수명을 평가에 이용되므로 두께에 대한 균열 형상비의 변화를 고려할 필요가 있다. Fig. 4는 균열 깊이에 따른 균열 형상비 변화를 나타낸 것이다. 균열깊이 a 를 두께 t 로 무차원화된 변수 a/t 와 표면균열의 형상비 a/c 로 나타내면 식 (4)와 같다.

$$a/c = -3.58 + 4.395e^{\frac{-a/t}{180.43}} \quad (4)$$

식 (3) 및 (4)의 형상비를 이용하여 모재 및 용접부의 표면균열진전거동을 평가하였다. 균열진전속도 평가를 위하여 식 (1)의 응력확대계수범위 ΔK_s 와 균열진전속도 da/dN , dc/dN 의 관계로 나타내면 Fig. 5와 같다. 이들의 관계식은 식 (5) 및 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} da/dN &= 10^{-7.18} (\Delta K_s)^{2.54} \\ dc/dN &= 10^{-7.02} (\Delta K_s)^{2.41} \end{aligned} \quad (\text{모재부}) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} da/dN &= 10^{-9.01} (\Delta K_s)^{3.63} \\ dc/dN &= 10^{-8.69} (\Delta K_s)^{3.32} \end{aligned} \quad (\text{용접부}) \quad (6)$$

Fig. 5에서 모재와 용접부의 균열진전속도를 비교하면, 용접부의 균열진전속도가 모재의 경우보다 낮다. 일반적으로 균열진전속도는 미시조직 및 응력비의 영향이 현저하며, 미시조직의 결정립경이 클수록 균열진전에 대한 결정립계의 영향으로 인하여 균열진전이 지연된다. 따라서 용접으로 인하여 결정립경이 조대하게 되고 이로 인하여 용접부의 균열진전속도가 모재부에 비하여 저하 되었다고 할 수 있다⁽¹³⁾.

또한 Fig. 5에서 보는 바와 같이 ERW용접부의 피로균열진전거동은 동일한 입열량 조건에서 균열진전속도의 차이를 보이고 있다. Fig. 6은 용접부에 대한 피로균열진전거동의 변동성을 정량화

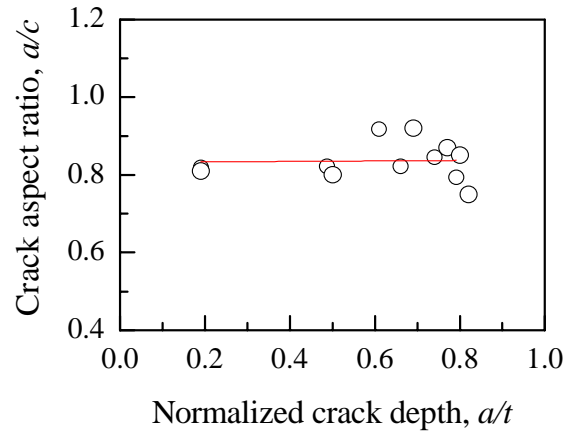


Fig. 4 Relation between the normalized crack depth, a/t and the crack aspect ratio, a/c

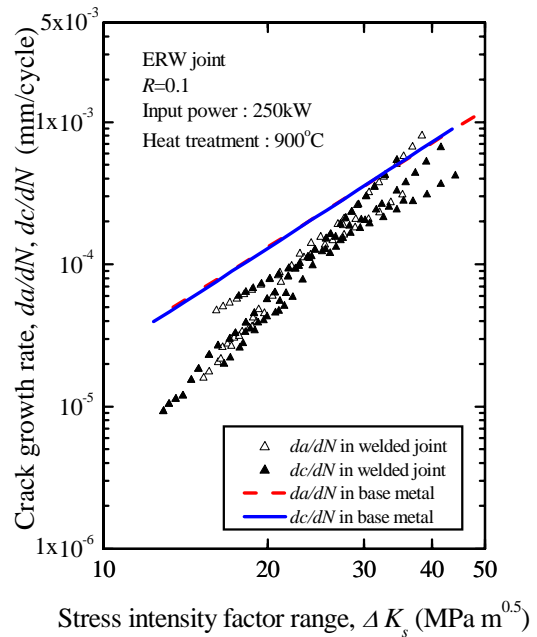


Fig. 5 da/dN , dc/dN - ΔK_s curves of the ERW joint at $R=0.1$

하기 위하여 재료상수의 평균 및 표준편차를 나타낸 것이다. 이의 원인은 용접부의 비균질성, 용접 조건의 미세한 변화 등에 기인한다⁽¹⁴⁾. 용접부의 표면방향에서 재료상수 C , m 의 표준편차는 각각 10^{-14} , 0.73이다. 따라서 용접 조건 등의 변동성으로 인한 ERW 강관의 다양한 피로수명을

정량적으로 평가하기 위해서는 재료상수 C, m 의 변동성에 따른 확률론적인 평가가 매우 필요하다.

3.3 피로수명의 확률론적 해석

피로균열진전거동의 변동성을 고려한 ERW 강관 피로수명은 몬테카를로시뮬레이션(Monte-Carlo simulation)을 이용하여 확률론적으로 평가되었다.

Table 3은 시뮬레이션에 사용된 입력조건을 정리한 것이다. 여기서 $r, t, 2c_i, a_i$ 는 각각 강관의 안지름, 강관의 두께, 표면균열의 초기길이 및 깊이이다. 표면 균열의 초기형상은 API 5L 규격⁽¹⁰⁾에서 비파괴검사(nondestructive technique)로부터 검출되는 크기이다. 그리고 피로균열진전거동의 변동성을 평가하기 위한 재료상수 C, m 은 Fig. 6의 평균 및 표준편차로부터 얻어진다.

Fig. 7은 내측 및 외측균열을 갖는 ERW강관의 파손확률(failure probability, P_f)에 따른 피로수명을 나타낸 것이다. 피로수명은 식 (7)과 같이 Paris - Erdogan 법칙⁽¹⁵⁾의 수정식으로부터 평가되었다.

$$N_f = \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C(\Delta K)^m} da \quad (7)$$

파손기준은 파괴 전 누수(Leak Before Break, LBB) 관점에서 균열 깊이가 강관의 두께를 관통하는 시점($a_f = t$)이다. 강관내부 및 외부의 표면균열이 존재하는 경우에 대한 피로수명은 각각 파손 확률 $P_f=50\%$ 에서 2.3×10^5 cycles, 2.5×10^5 cycles 이다.

4. 결 론

본 연구에서는 ERW강관의 피로수명을 평가하기 위해 표면균열 시험편을 이용하여 피로균열진전시험을 수행하고 이를 강관에 적용시켰다. 이의 결과는 다음과 같다.

- (1) 표면방향의 균열길이 c 로부터 깊이방향의 균열길이 a 를 추정하기 위하여 비치마크법이 사용되었다. 그 결과 균열깊이와 균열길이의 관계식은 다음과 같다.

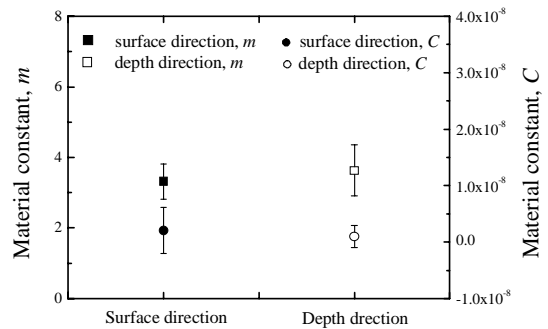


Fig. 6 Variation of material constant C, m

Table 3 Input condition for Monte-Carlo simulation

Geometric condition	Inner radius, R (mm)	605	
	Thickness, t (mm)	14.6	
	Crack length, $2c_i$ (mm)	3.2	
	Crack depth, a_i (mm)	1.6	
Variation of Material constant	C	mean	$10^{-8.69}$
		variation	10^{-14}
	m	mean	3.32
		variation	0.73
Loading condition	Maximum pressure P_{max} (MPa)	10	
	Minimum pressure P_{min} (MPa)	0	

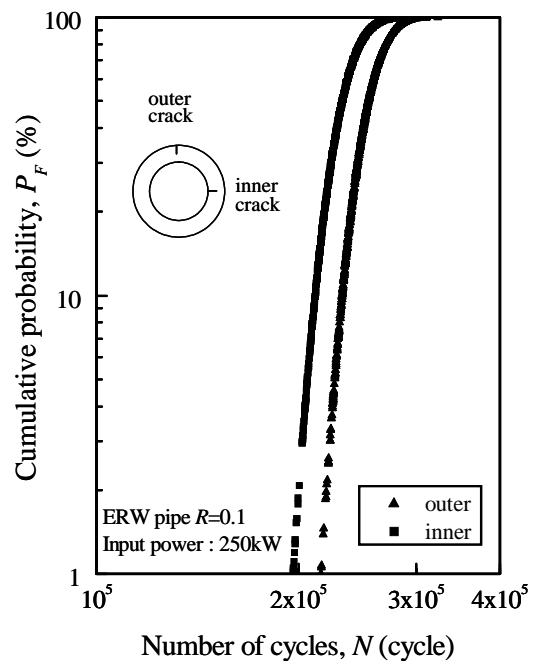


Fig. 7 Cumulative probability with the crack growth life of the ERW pipe

$$a/c = -3.58 + 4.395e^{\frac{a/t}{180.43}}$$

(2) ERW강관에서 입열량 240 kW 이하의 범위에서 냉접 결함이 발생하며, 260 kW 이상의 범위에서 페너트레이터 결함이 발생된다. 또한 정상범위인 240~260 kW 입열량에서 산화물이 관찰되며, 이 산화물이 페이스트 결함으로서 피로수명에 중요한 영향을 미친다. 이 구간내 충격에너지 시험결과로부터 최적의 용접입열량 조건은 250kW이다.

(3) 용접부의 균열진전속도가 모재의 경우 보다 낮다. 이의 원인은 용접으로 인하여 결정립경이 조대하게 되고 이로 인하여 용접부의 균열진전속도가 모재부에 비하여 저하되었기 때문이다.

(3) 소재의 피로강도 특성인 재료상수 C , m 값의 변동성을 고려하여 ERW 강관의 피로수명을 확률론적으로 평가한 결과, 강관내부 및 외부의 표면균열이 존재하는 경우에 대한 피로수명은 각각 파손확률 $P_F=50\%$ 에서 2.3×10^5 cycles, 2.5×10^5 cycles이다.

후 기

본 연구는 (주)POSCO의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Yonghak H., Joojin L., Jiwon H., 1990, *KSME*, Vol. 14, No. 1, pp.96~102
- (2) Chapetti M.D., Otegui J.L., Motylicki J., 2002, *International Journal of Fatigue*, Vol. 24, No. 1, pp.21~28.
- (3) Kiefner J.F., 2000, *API's 51st Annual Pipeline Conference & Cybernetics Symposium*, pp. 1~13.
- (4) Beller D.M., Ernie Holden, Dr neb Uzelac, 2001, *Pipes & Pipelines International*, Vol. 46, No. 6, pp. 26~34.
- (5) Bruce W.A., 2001, *Pipes & Pipelines International*, Vol. 46, No. 5, pp. 5~12.

- (6) ASTM Standards, E740-88, "Standard Practices for Fracture Testing with Surface-Crack Tension Specimens"
- (7) Newman J.C. Jr. and Raju I.S., 1983, *ASTM STP 791*, pp. I 238~265.
- (8) Newman J.C. Jr. and Raju I.S., 1982, *ASME PVP Vol. 58*, pp. 37~48.
- (9) Haga H., Aoki K. and Sato T., 1981, *Welding Journal*, pp. 104~109.
- (10) API Specification 5L Standard, 2000, 42nd Edition, pp.18 ~ 21.
- (11) Murakami Y., 2001, *KSNT/Workshop 0002*, pp. 17~36.
- (12) ASTM Standards, E23-02, "Standard Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials"
- (13) Taira, S., Tanaka, K., and Hoshina, M., 1979, *ASTM STP 675*, pp. 135~162.
- (14) Woo-sik K., 2001, *Journal of KWS*, Vol. 19, No. 3, pp. 261~266.
- (15) Dowling N.E., 1999, *Mechanical behavior of Materials*, Prentice Hall, New Jersey, pp.420~451.