

강판의 압연 방향과 인장하중 방향의 상대 각도에 따른 피로 균열 진전 특성

이용복*, 오병덕⁺

(논문접수일 2005. 3. 14, 심사완료일 2005. 5. 4)

Characteristics of fatigue crack propagations with respect to the angles between rolling and tensile loading directions of steel plates

Yong-Bok Lee*, Byung-Duck Oh⁺

Abstract

Steel plates used for common structures are manufactured by rolling processes in general. The rolling direction traces generated during the processes have significant influences on mechanical properties and fatigue behavior of the plates. The objective of present study is to investigate those directional characteristics for the enhancement of steel structure safety. SS400 steel plates of 3 mm thickness are tested in this study. When the angles between the tensile loading direction and the rolling direction of the plates are increased, their yield strengths are increased and elongations are rather decreased. It is also shown that fatigue crack growth rates in the plates can be increased according to the changes of those mechanical characteristics. For the safety of the structures, therefore, it is critical to decrease the angles between the rolling direction and the tensile loading direction.

Key Words : Rolling Direction(압연방향), Fatigue Crack Behavior(피로균열거동), Ultimate Tensile Strength(인장강도), Yield Strength(항복강도), Elongation(연신률), Fatigue Strength(피로강도), Loading Direction(하중방향), Crack Growth Rate(균열진전속도), Stress Intensity Factor Range(응력확대계수폭)

1. 서 론

산업의 발전과 더불어 모든 기계와 산업구조물에 대한 정밀성, 기능성, 효율성 및 내구성 등의 향상을 꾀하고 있고 이들 구조물에 적합한 새로운 재료 개발과 메카니즘(mechanism)

개발을 꾸준히 수행해 오고 있다. 또한, 사용조건이 가혹해짐에 따라 산업재해 문제가 대두되고, 설계상 안전성 확보와 신뢰성을 향상시킬 필요성이 증대되고 있다. 이에 부응하기 위해서는 재료의 제조과정 및 가공과정에서 발생하는 결함의 존재여부와 응력집중 및 방향성에 의한 기계적 특성을 정

* 홍익대학교 기계·시스템디자인공학과 (yblee@wow.hongik.ac.kr)

주소: 121-791 서울시 마포구 상수동 72-1

⁺ 홍익대학교 대학원 기계공학과

확히 파악하여 이들 구조물 재료로서 최적조건하에 사용하도록 하는 것이 바람직하다⁽¹⁻³⁾. 그리고 이들 결과를 토대로 용접부의 피로강도와 리벳접합, 볼트결합 등으로 구축된 각종 구조물 재료의 강도를 심도있게 평가하고 적합한 강도설계를 위한 기초 자료로 활용하는 것이 바람직하다^(4,5). 이와 관련하여 현재 강 재료에서의 경도와 인장강도와의 관계 그리고 이들 기계적 성질과 피로한도와의 관계에 대한 자료는 실제로 기계구조물 설계 자료로서 활용되고 있다⁽⁶⁻⁸⁾. 그러나 강판의 압연방향에 따른 탄성계수, 항복강도, 인장강도 및 연신율 등 일반적인 기계적 성질의 파악에 대한 연구는 몇몇 연구자료 등이 있으나 미흡한 상태이고 특히 압연방향에 따른 피로균열진전특성을 깊이 있게 연구한 자료는 찾아볼 수 없는 실정이다⁽⁹⁻¹²⁾. 그리고, 본 연구자가 그동안 유사 재료를 사용한 용접부의 잔류 응력과 조직 변화 등을 고려한 피로거동을 파악하고자 했을 때 항상 필요성을 느껴 왔고, 특히 용접 비드 방향과 하중방향 사이의 각도에 따른 피로특성을 심도 있게 파악하고자 할 때 우선 압연방향의 영향을 명확하게 파악해야 할 필요성이 요구되어 왔다^(13,14). 따라서, 본 연구를 통하여 상기의 특성들을 정확하고 심도 있게 파악할 수 있는 기초 자료를 얻기 위한 연구로서 일반적으로 기계 및 용접 구조물 재료로서 많이 사용되고 있는 SS400 열간 압연강판 재료를 사용하여 압연재료의 방향성에 따른 일반적인 기계적 특성과 피로진전균열특성을 실험적으로 규명하고 이들 특성간의 상관관계에 대하여 고찰해 보고자 하였다.

2. 실험

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용한 시험편 재료는 일반기계와 용접구조물 등에 많이 사용하고 있는 SS400 강재로 3mm 두께의 열간 압연강판을 선택하였다. 그리고 일반적인 기계적 성질을 파악하기 위하여 Fig. 1과 같이 KS 5호 시험편 규격에 따라 인장시험편을 제작하였다. 재료의 압연방향에 따른 기계적 성질을 알아보기 위하여 하중방향(시험편길이방향)에 대한 방향각도(θ°)를 0°, 30°, 45°, 60° 및 90°가 되도록 구분하였고, 0.01mm이내의 오차범위로 와이어절단가공(wire cutting)하였다. 피로균열진전특성을 알아보기 위하여 피로균열시험편은 Fig. 2와 같이 50×300mm로 기계 가공(wire cutting)하여 인장시험편과 같이 하중방향에 대하여 압연방향이 0°, 30°, 45°, 60° 및 90°가 되도록 구별하였고, 중앙에 $\phi 2$ mm의 구멍을 뚫고, 구멍으로부터 양쪽 균열진전방향으로 각각 2mm 길이로 0.1mm의 슬릿(slit)을 방전 가공하였다. 그리

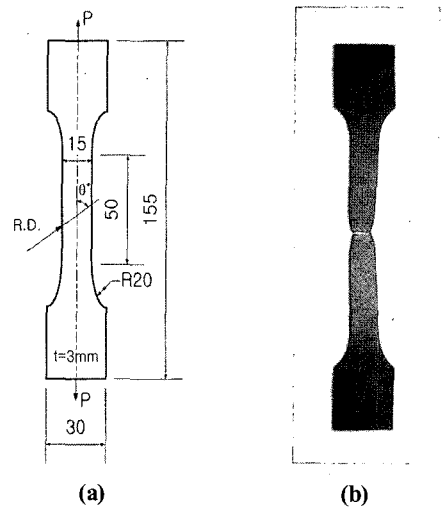


Fig. 1 Configuration of tensile specimen (a) size (b) photograph

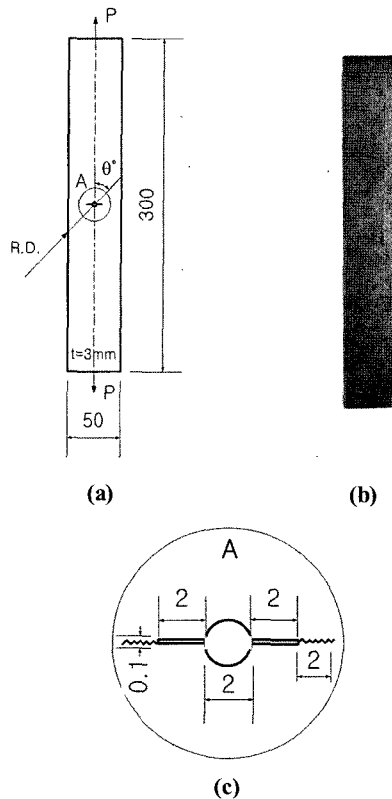


Fig. 2 Configuration of fatigue specimen (a) size (b) photograph (c) detailed notch

고 시험하중 5%이내의 범위에서 양쪽 슬릿으로부터 2mm의 예비 균열을 진전시킨 후 피로시험을 수행할 수 있도록 준비하였다. 시험편 재료의 화학성분은 Table 1과 같다.

2.2 실험장치 및 방법

인장시험편으로부터 재료의 일반적인 기계적 성질을 알아보기 위하여 10톤 용량의 인장시험기(UTM : MODEL T48-0)를 사용하였고, Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 하중방향에 대한 시험편재료의 방향을 $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 및 90° 로 구분하여 각각 3편씩 시험편 중앙 위치에 표점거리 50mm를 표시하고 준정적하에서 공칭응력(stress)-변형률(strain)선도를 구하였다. 피로균열진전시험을 위하여 5톤 용량의 피로시험기(Instron 8511)를 사용하였고, 앞에서 설명한 바와 같이 준비된 피로균열진전 시험편 중에서 하중방향에 대한 시험편재료의 압연 각 방향별로 각각 3편씩을 선정하여 응력비 $R=0$, 최대하중 2,400kgf, 반복수 10Hz로 양쪽으로 1mm의 피로균열을 진전시킨 후 시험을 행하였고 균열 진전 길이는 일정하중 사이클마다 독취 현미경을 사용하여 1/100mm의 정확도로 측정하였다. 인장시험기 및 피로시험기는 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다.

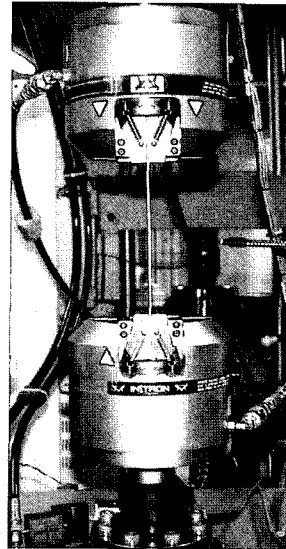


Fig. 4 Apparatus for fatigue test (Instron 8511)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 재료의 압연방향에 따른 기계적 성질

하중방향에 대한 시험편 재료의 압연방향각도에 따라 인장시험결과를 나타내면 Fig. 5의 (a), (b), (c), (d), (e)와 같고, 항복강도는 실험곡선의 하향복점 위치의 0.2% 옴셋으로 구하고, 인장강도는 곡선상의 최대점 그리고 연신율은 표점거리에 대한 신장량을 백분율로 구하여 종합해서 나타내면 Fig. 6 및 Table 2와 같다. 이들 결과는 각 경우 3편의 시험결과에 대한 평균값을 나타낸 것이다. 항복강도는 하중방향과 압연방향이 90° 인 경우가 가장 높게 나타나고, $45^\circ, 60^\circ, 30^\circ, 0^\circ$ 의 순으로 높게 나타나고 있다. 인장강도는 $45^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 의 순으로 높게 나타나고 있다. 이들 결과로부터 인장강도와 항복강도 모두 재료의 압연방향이 하중방향에 대하여 45° 와 90° 의 경우 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 경우보다 높게 나타나고 있는데, 인장강도는 6~7%, 항복강도는 18~25% 높게 나타나고 있다. 그리고 인장강도는 압연방향에 따라 45° 및 90° 의 경우가 다소 높게 나타나고 있으나 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 의 경우는 0.7%이내의 차이이므로 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 그러나 항복강도는 인장강도에 비하여 각도에 따라 변화가 크게 나타나며 45° 의 경우를 제외하고 하중방향에 대한 압연 방향 각도가 커짐에 따라 높게 나타나는 경향을 보이고 있다. 이로부터 하중방향과 압연방향이 45° 및 90° 인 경

Table 1 Chemical compositions of specimen

Material	Chemical compositions (wt.%)					
	C	Si	Mn	P	S	Fe
SS 400	0.13	0.14	0.70	0.003	0.045	Bal.

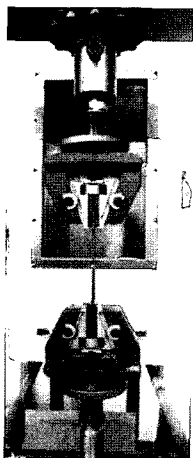


Fig. 3 Apparatus for tensile test (UTM : MODEL T48-0)

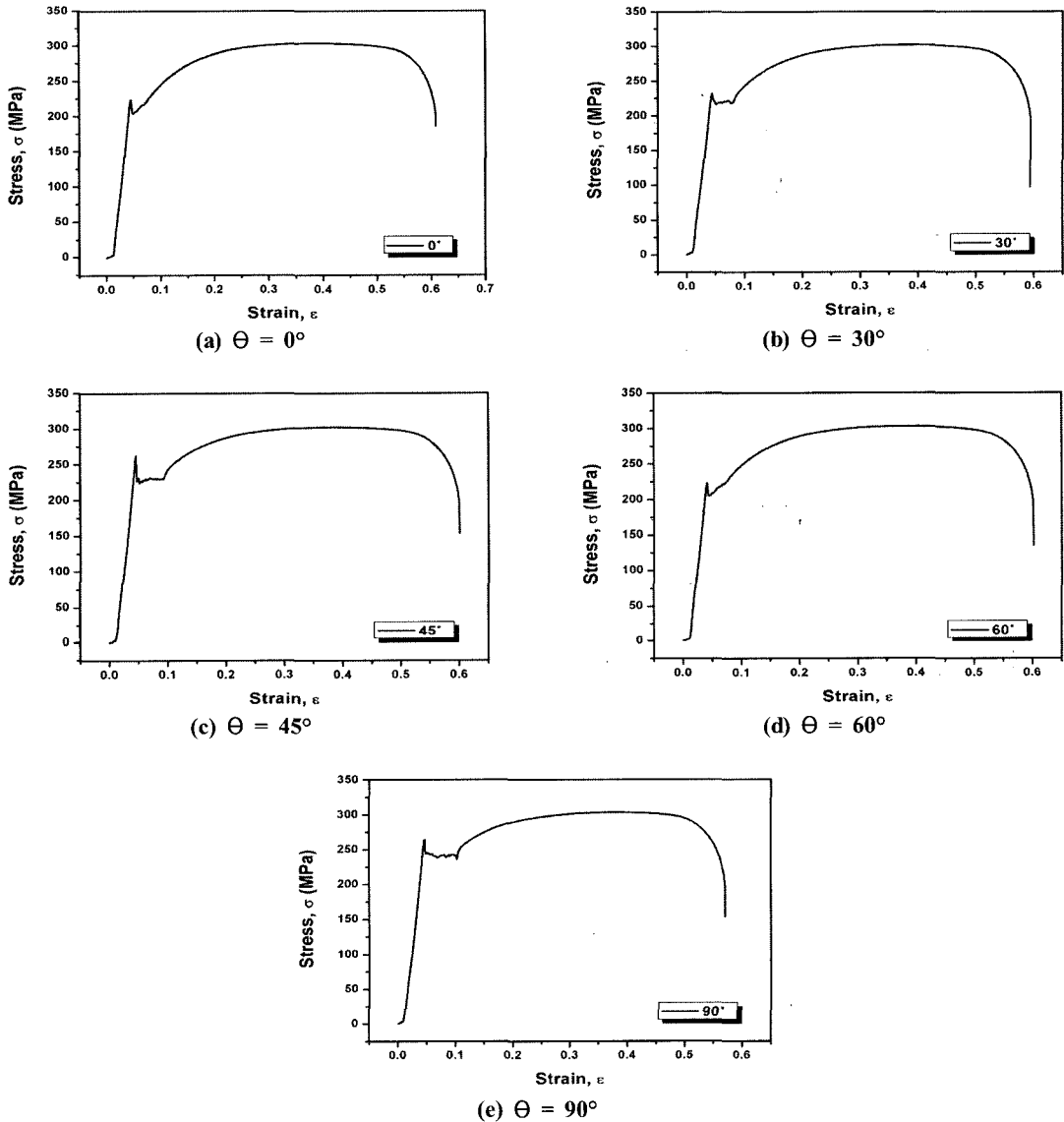


Fig. 5. Stress-strain diagrams of tensile specimens

우 인장강도 및 항복강도가 다른 시험편(0° , 30° , 60°)에 비하여 높게 나타나는 것은 특이하다. 압연강판재료에서 하중 방향에 대한 압연 방향의 각도가 45° 인 경우 항복강도가 일반적인 경향과는 다르게 높게 나타난 것은 Fig. 5(c)의 응력-변형을 선도에서 나타나는 바와 같이 항복점에서 상항복점과 하항복점의 높이차이가 다른 시험편에 비하여 크고 전반적인 항복위치가 높게 나타나고 있는 것과 관련지을 수 있지 않을까 생각된다. 이를 확인하기 위하여 각각 같은 6개의 시

험편들을 더 시험하여 확인한 결과도 유사한 경향을 나타내었다. 이는 일반적으로 연성의 강 재료에서 나타나는 45° 경사면의 최대전단응력과 슬립(slip)에 의한 전단 파괴 현상에 대응하는 저항력이 크게 작용하는 결과가 아닌가 사료된다. 연신율은 하중방향과 압연방향각도가 커질수록 낮게 나타나고 있는데, 이는 항복강도가 보편적으로 각도가 커질수록 높게 나타나고 있는 것과 상반된 경향을 보이고 있다.

Table 2 Test results of σ_y , σ_u and Elongation

specimen		Yield strength σ_y (MPa)	Ultimate tensile strength σ_u (MPa)	Elongation (%)
0°	1	219.9	313.6	48.8
	2	222.2	309.3	49.4
	3	219.9	309.3	48.8
	Avg.	220.7	310.7	49.0
30°	1	226.5	309.3	48.3
	2	227.8	309.3	48.6
	3	229.5	309.3	48.9
	Avg.	227.9	309.3	48.6
45°	1	261.4	333.2	46.7
	2	261.4	331.0	46.7
	3	260.0	331.0	46.4
	Avg.	260.9	331.7	46.6
60°	1	239.5	309.3	46.6
	2	237.4	307.0	46.2
	3	233.0	309.3	45.2
	Avg.	236.6	308.5	46.0
90°	1	274.4	331.0	43.9
	2	276.6	328.9	44.2
	3	274.4	328.9	43.9
	Avg.	275.1	329.6	44.0

3.2 피로균열특성

하중방향과 재료의 압연방향각도에 따른 피로균열시험결과를 종합적으로 나타내면 Fig. 7 및 Fig. 8과 같다. Fig. 7은 하중 사이클 수에 대한 균열진전길이의 관계를 나타내며, 균열진전길이가 90°, 60°, 45°, 30°, 0°의 순으로 하중방향에 대한 압연방향각도가 클수록 각 사이클 지역에서 균열진전길이가 크게 나타나고 있다. Fig. 8은 응력확대계수 폭(ΔK)에 대한 균열진전속도(da/dN)를 대수 좌표 상에 나타낸 것이며 90°, 60°, 45°, 30°, 0°의 순으로 균열진전속도가 응력확대계수폭의 전 구간에서 높게 나타나고 있다. 이들 결과로부터 피로균열진전속도는 하중방향과 롤링방향사이의 각도가 클수록 빠르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 Fig. 6의 기계적 특성과 관련하여 피로균열진전속도는 인

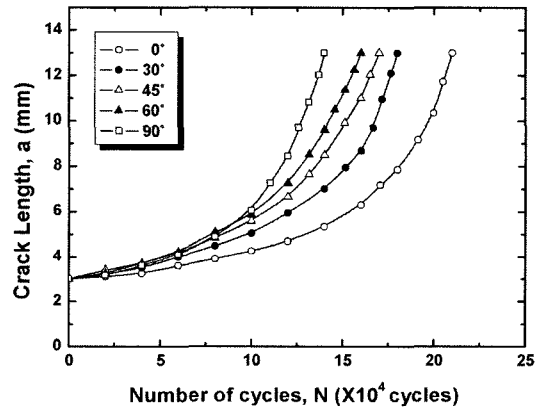


Fig. 7 Crack length vs. number of cycles

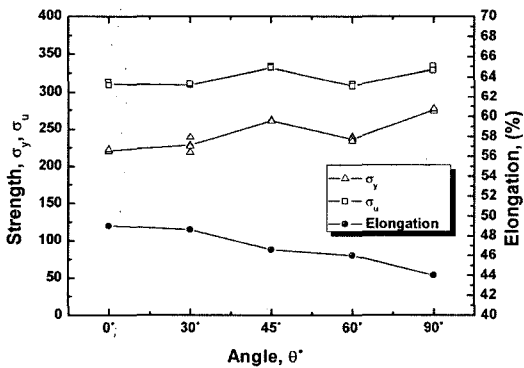


Fig. 6 σ_y , σ_u and elongation with respect to the angles between rolling and tensile loading direction

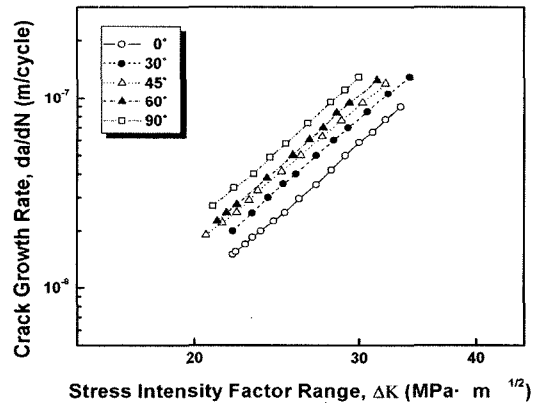


Fig. 8 Crack growth rate vs. stress intensity factor range

Table 3 Material constants by Paris law

specimen	C	m
0°	2×10^{-14}	4.3575
30°	3×10^{-14}	4.2985
45°	5×10^{-14}	4.2148
60°	3×10^{-14}	4.3807
90°	2×10^{-14}	4.5529

장강도와는 크게 관련성이 없어 보이며, 주로 항복강도 및 연신율과 관련되고 있음을 알 수 있고, 연신율(elongation)이 낮을수록 피로균열진전속도가 높게 나타나고 있고, 항복강도가 높으면 피로균열진전속도가 높게 나타나고 있다는 것을 알 수 있다. Fig. 8의 결과를 Paris 식을 이용하여 재료상수를 나타내면 Table 3과 같다⁽¹⁵⁻¹⁷⁾. 이들 결과로부터 전체 시험편에서 응력확대계수폭의 전 구간에 대한 피로 균열진전속도변화를 나타내는 재료상수 m값은 5% 이내로 별로 차이가 없으나 피로균열진전속도는 하중방향과 압연방향사이의 각도가 클수록 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 압연강재를 사용하는 구조물의 경우 작용하중이 재료의 압연 방향과 일치 하도록 하여 설계하는 것이 피로강도상 바람직하다고 생각된다.

4. 결 론

일반구조물 재료로 많이 사용하고 있는 열간 압연강판(SS400)을 강도 및 안전설계상 효율적으로 사용하기 위해서는 재료의 기계적 특성과 반복하중에 의한 피로균열진전 특성을 정확히 파악하는 것이 중요하므로 본 연구를 통하여 아직 연구 자료가 부족한 강판의 압연방향에 따른 기계적 특성과 피로균열진전특성에 대하여 심도 있게 고찰하고 이들 결과로부터 강구조물 설계상 피로강도향상방법을 제시하고자 하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 강판의 하중방향과 압연방향각도에 따른 인장강도 및 항복강도는 45°와 90°의 경우 모두 높게 나타나고 있는데, 인장강도는 큰 차이(6~7%)가 없으나, 항복강도는 다소 큰 차이(18~25%)를 보이며, 각도차이가 커질수록 증가하는 경향을 나타낸다.
- (2) 강판의 연신율은 하중방향에 대한 압연방향각도가 커질수록 감소하는 경향을 보이며, 항복강도가 커질수록 상대적으로 감소하는 경향을 나타낸다.
- (3) 피로균열진전특성은 하중방향에 대한 압연방향각도가

커질수록 피로균열진전이 빠르게 나타나는데 이러한 경향은 재료의 연신율이 낮을수록 피로균열이 빠르게 진전함을 알 수 있다. 따라서 피로균열진전 속도는 강도보다는 연신율과 더 밀접한 관계가 있다고 생각된다.

이들 결과로부터 압연재를 사용하는 구조물 설계상 하중 방향에 대한 압연방향 각도를 작게 하여 설계하는 것이 바람직하다. 그러나 상기 결과와 관련하여 강재료의 압연에 따른 조직변화와의 상관관계에 대하여 깊이 있는 고찰이 더 필요하다고 사료된다

후 기

이 논문은 2003년도 홍익대학교 교내연구비에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

- (1) Green, O. V., 1930, "Stress Intensity Factor due to the Initial Residual Stress in Weldments," *Trans. of American Society for Steel Treating*, Vol. 18, p. 369.
- (2) Irwin, G. R., 1957, "Analysis of Stress and Strains Near the End of a Crack Traversing a plates," *Trans. ASME*, Vol. 24, p. 361.
- (3) Lee, Y. B., Chung, C. S., and Cho, N. I., 1996, "A Study on Fatigue Behavior Considering Effects of Redistributing Tensile Residual Stress and Crack Closure in SS330 Weldment," *J. of KSME(A)*, Vol. 20, No. 7, pp. 2234~2245.
- (4) Lee, Y. B., Chung, C. S., Kim, H. K., Cho, N. I., and Park, S. H., 1997, "A Study on Fatigue Behavior concidering Effects of Redistributing Compressive Residual Stress and Crack Closure in SS330 Weldment," *J. of KSMTE*, Vol. 6, No. 2, pp. 26~33.
- (5) Lee, Y. B., Chung, C. S., Kim, Y. H., and Kim, H. K., 1997, "A Study on the Fatigue Crack Propagation Behavior of Spot Welds under Tensile-Shear Load," *J. of KSMTE*, Vol. 6, No. 4, pp. 27~33.
- (6) Juvinall, R.C., 1967, *Engineering Considerations of Stress Strain and Strength*, McGraw-Hill.
- (7) Collins, J. A., 1981, *Failure of Materials in Mechanical Design*, Willy Interscience.
- (8) Osgood, C. C., 1982, *Fatigue Design* 2nd ed.,

- Pergamon Press.
- (9) Isida, M., 1930, "On the Determination of Stress Intensity Factors for Some Common Structural Problems," *Eng. Fracture Mechanics*, Vol. 2, No. 1, p. 61.
- (10) Devine, M. K., 1992, "The Magnetic Detection of Materials Properties," *J. of Material*, Vol. 44(10), pp. 24~30.
- (11) Newman Jr. J. C., 1975, "Fracture Analysis of Surface and Through Cracked Sheets and Plates," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 5, pp. 667~689.
- (12) Irwin, I. R., 1962, "Crack Extension Force for a part-Through Crack in a Plate," *J. of Applied Mech.*, Vol. 29, No. 4, pp. 651~654.
- (13) Kim, S. C., and Lee, Y. B., 1987, "The Application of Forman Equation for Fatigue Crack Propagation in Welding Residual Stress Region," *J. of the Korean Welding Society*, Vol. 5, No. 1, pp. 42~56.
- (14) Lee, Y. B., Chung, C. S., and Park, Y. K., and Kim, H. K., 1998, "Effect of Redistributing Residual Stress on the Fatigue Behavior of SS330 Weldment," *Int. J. Fatigue*, Vol. 20, No. 8, pp. 565~573.
- (15) Paris, P., and Erdogan, F., 1963, "A Critical Analysis of Crack Propagation Law," *J. of Basic Eng., Trans. of ASME*, Vol. 8 pp. 528~534.
- (16) Lee, Y. B., Cho, N. I., and Park, K. E., 1996, "A Study on Surface Fatigue Crack Behavior of SS400 Weldment," *J. of KWS*, Vol. 14, No. 2, pp. 124~129.
- (17) Forman, R. G., and Kearney, V.E., 1967, "Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic Loaded Structures," *J. of Basic Eng., Trans. of ASME*, Vol. 9, pp. 459~464.