

## 니켈 합금 용접이 금형 표면의 균열 발생에 미치는 영향

정해동<sup>+</sup>, 이지훈<sup>++</sup>, 홍민성<sup>\*</sup>

(논문접수일 2011. 06. 07, 수정일 2011. 06. 15, 심사완료일 2011. 06. 17)

### Influence of Nickel Alloy Weld on the Mold Surface Cracks

Hyaе-Dong Jeong<sup>+</sup>, Ji-Hoon Lee<sup>++</sup>, Min-Sung Hong<sup>\*</sup>

#### Abstract

Cast mold has low wear-resistance comparing with other alloyed molds which result in lower production rate and high cost of products. Recently, various weld methods are being applied to increase the wear-resistance of molds and to extend mold life. Among them, nickel alloy weld process increases the hardness irrelevant to its machinability and creates very uniform structures. In addition, it causes better wear-resistance and reduces shrinkage defects.

In this paper, we analyze the mold surface cracks welded by nickel alloy and propose the methods to improve the mold surface and its wear-resistance. It has been found that nickel alloy weld does not affect the inside crack of mold but has an influence on the surface crack seriously. Results show that the start and growth of fatigue cracks have been delayed about 3 times and reduced approximately 75%, respectively, and the mold surface cracks are decreased about 5.7 times.

**Key Words** : Nickel alloy weld(니켈합금용접), Wear-resistance(내마모성), Fatigue(피로), Shrinkage(수축), Crack(균열)

### 1. 서론

일반적으로 대형 터빈(turbine) 제조업체들이 주물계열의 금형을 사용하고 있으나, 금형제조를 위한 기계가공 후 피로균열에 취약함을 드러내고 있다. 그러므로 금형의 수명을 늘리고 경제성을 높일 수 있는 방법에 대한 연구가 절실히 요구된다. 최근에는 취약부위의 내마모성을 높이기 위해 니켈 합금 용접(nickel alloy weld)으로 보완하고 있다<sup>(1)</sup>.

합금의 첨가로 인해 내마모성이 좋아지고 수축에 의한 결함이 적어지는 등 기계적 성질이 향상되며, 또한 한 가지 합금원소 보다는 여러 원소와 함께 조합하여 사용하면 상승효과를 가져올 수 있다. 합금 원소 중 니켈은 가공성과 무관하게 경도를

를 증가시키며 다면변화가 심한 주물에 매우 균일한 조직을 만든다.

그러나 아직까지 금형 수명을 개선하기 위해 니켈 합금 용접을 통한 내마모성의 향상과, 이에 따른 평가방법에 관한 연구가 부족한 실정이다.

본 논문은 미국 Emhart사의 I. S. 6-MACHINE TYPE-E을 이용하여 피로시험을 실시하고 이를 초음파 탐상 검사, 침투 탐상 검사 및 자분 탐상 검사 등의 재료 시험법을 통하여 니켈 합금 용접이 금형 표면의 균열 발생에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다.

+ 아주대학교 산업대학원 기계공학과  
++ 아주대학교 대학원 기계공학과  
\* 교신저자, 아주대학교 기계공학부 (mshong@ajou.ac.kr)  
주소: 443-749 경기도 수원시 영통구 원천동 산5번지

## 2. 이론적 배경

### 2.1 피로해석 이론

대부분의 파괴 사례는 어떠한 형태이든 간에 피로 및 환경 파괴에 기인한다고 할 수 있다. 결함(defects), 흠집(flaws), 개재물(inclusions) 등을 기점으로 하여 재료의 항복응력 이하의 작은 응력에서도 균열은 서서히 성장하여 최종적으로는 급속한 파괴를 초래하게 된다. 피로파괴란 구조부재가 반복되는 응력 또는 변형을 지속적으로 받으면 부재의 항복응력이나 설계 응력보다 훨씬 작은 응력 하에서 파괴되는 현상으로 균열발생 단계(제1단계), 균열성장단계(제2단계), 최종파단단계(제3단계)로 이루어지는 일련의 과정으로 정의할 수 있다<sup>(2)</sup>.

### 2.2 피로파괴 과정

재료의 내부는 반복하중을 받으면 금속피로가 발생하고 저 응력하에서도 파단에 이른다. 피로과정의 대부분은 피로균열의 발생 성장에 소비되는 것으로 인식되어, 이 피로균열의 성장에 착안한 파괴역학적 방법이 유력한 정량적 평가방법으로써 주목되어 활발한 연구가 진행되고 있다. 피로파괴 과정을 도식적으로 나타내면 Fig.1과 같다<sup>(3)</sup>.

### 2.3 피로균열의 성장

피로파괴는 보통 반복응력에 의해 응력집중 영역인 노치나 단면의 변화부, 그리고 개재물과 같은 재료적 불연속부에서 국부적인 응력집중으로 인해 피로균열이 생성되고 성장한 후 최종파단에 이른다<sup>(4)</sup>. 반복응력이 거듭됨에 따라 재료표면(free surface)에서는 슬립(slip) 현상에 의해 돌출부와 활(滑, intrusion)이 생기고, 이러한 국부적인 응력집중 장소에서 균열이 생성되며 초기 단계에는 최대인장응력과 약 4-5° 기울어진 슬립면을 따라 균열이 성장하게 된다. 슬립면 균열과 벽면 균열이 혼재하는 영역을 통과한 피로 균열은 조직적 인자에

는 거의 영향을 받지 않고 역학적 인자에 의해 지배된다. 균열은 응력축에 수직방향으로 진전하게 되고 마침내 개구형의 안정 성장으로 이행하게 되고 파단에는 스트라이에이션(striation)이라는 피로파괴 특유의 줄무늬 양상을 형성한다. 스트라이에이션의 형성과정을 지나면 균열성장은 가속되고 재료는 불안정 파괴에 이르며, 이 단계에서 형성된 파면형태는 정적 파단에 의해서 형성된 것과 유사한 딩플(dimple), 벽개(cleavage) 및 입계(intergranular)형 균열모양으로 특징지어진다<sup>(5)</sup>.

### 2.4 피로수명의 산정

피로균열 발생 및 성장에 영향을 미치는 요인으로는 재료의 성분이나 역학적 특성 부재 제작중에 포함되는 결함, 부재 연결부 등의 기하학적인 불연속부, 부재 중앙단면 등과 같은 응력 집중부, 또는 용접성이 부족한 용접연결부 등의 내적 요인과 하중조건, 주위환경 등의 외적 요인이 있다. 파괴역학에서는 이 2단계의 스트라이에이션을 수반하는 피로균열의 성장과정을 대상으로 하여 그 성장 속도  $da/dN$ 를 파괴역학 파라미터로 특성 짓는다. 여기서  $a$ 는 균열성장 길이이고  $N$ 은 반복횟수이다. 큰 균열에 대하여 소규모 항복조건이 만족되면 그 성장 속도는 Fig. 2와 같이 응력확대계수범위(threshold stress factor range)로 특성 지을 수 있다. 이 성장특성은 3영역으로 나눈다<sup>(5)</sup>.

응력확대계수  $\Delta K$ 가 작은 영역(제 I 영역)에서는 그 이하에서 균열이 성장하지 않는 하한계 응력확대계수범위  $\Delta K_{th}$ 가 존재하고, 또 그 근방에서는 균열성장속도가 급속히 감소한다. 이 영역에서는 재료, 환경, 응력비의 영향이 현저히 떨어지게 된다. 피로수명은 하중, 변위 또는 열응력의 반복 작용으로 인하여 부재의 손상이나 파괴가 일어나는 현상을 피로라고 하며, 구조부재가 피로로 인하여 파괴될 때까지의 하중, 변위 또는 열응력의 반복횟수를 피로수명이라 한다. 이러한 피로수명은 세 가지 종류로 나눌 수 있다<sup>(5)</sup>.

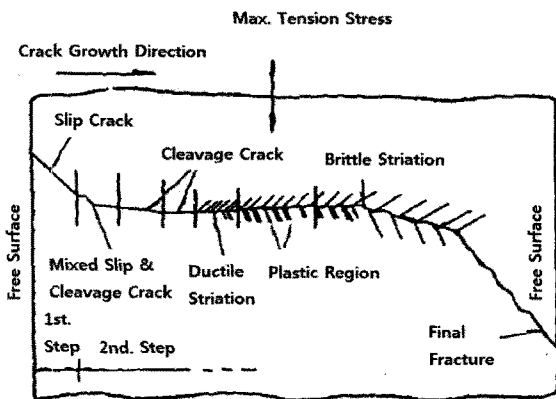


Fig. 1 Process of fatigue failure

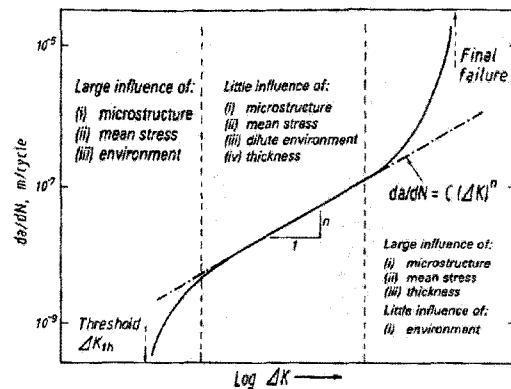


Fig. 2 Threshold of stress factor

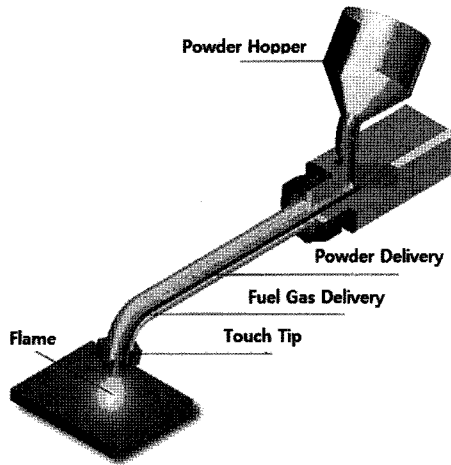


Fig. 3 Acetylene powder welding process

- (1) 피로로 인하여 재료 안의 미세결합에서 균열이 발생하다가 필연적으로 존재하는 용접 결합 또는 가스절단부의 표면에 존재하는 노치 밑에서 균열이 성장하기 시작하는 피로균열 발생수명 :  $N_c$
- (2) 부재 또는 시험편이 피로에 의하여 파단 될 때까지의 반복횟수의 파단수명 :  $N_f$
- (3) 부재에서 피로균열이 성장하고 있는 기간의 응력반복회수인 피로균열 성장수명 :  $N_p$

위의 세 피로수명 사이에는 다음과 같은 식 (1)의 관계가 성립된다.

$$N_p = N_f - N_c \quad (1)$$

### 2.5 아세틸렌 분말 용접

아세틸렌(acetylene) 분말 용접은 아세틸렌 가스와 산소 가스를 토치(touch)를 통해 혼합하여 고온의 산소 아세틸렌 염(flame)을 발생 시키며, 니켈 합금이 아세틸렌 염에 용융되고, 고온으로 아세틸렌 염이 모재를 용융시키면서 원하는 모양으로 토치를 이동하며 니켈 합금이 모재에 용착되고, 모재의 일부를 융합하여 니켈 합금 용접을 만든다. Fig. 3은 아세틸렌 분말 용접 공정을 보여준다.

## 3. 실험 및 결과

### 3.1 시편의 형상 및 성질

실험에 사용 되어지는 시편의 재료는 FCD50K이다. FCD50K의 특징은 Table 1과 같다.

Table 1 Properties of FCD50K

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Area reduction (%)
379.5 ±6.9	585.7 ±24.6	7.0±1.3	6.7±0.8
Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	Strength modulus (MPa)	Strain-hardening exponent
172.3±0.9	0.284 ±0.004	1024.16 ±23.68	0.1772 ±0.0038

Table 2 Properties of Nickel alloy 226

Normal chemical analysis(%)			
B	Si	Ni	Other
0.80	2.20	BAL	P=1.90
Rockwell Hardness (C scale)	Density (Approx)	Melting Point(°C) (Approx)	
16~21	8.58	935	

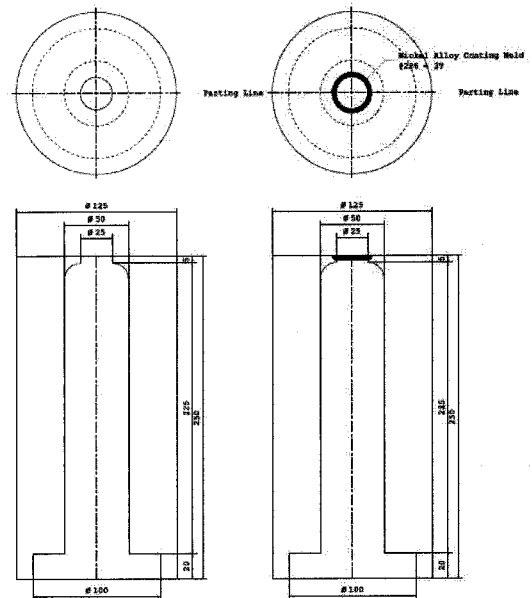


Fig. 4 Scheme of specimen

니켈 합금 용접은 합금 종류 중 226으로 용접한다. Table 2와 같이 226의 특징은 부품수리에 사용되며 금이 가거나 파이기 쉬운 주철 부품에 사용하며, 고온에서의 작업에 유리한 특징이 있다.

니켈 합금 용접 시편의 형상은 Fig. 4와 같으며 시편 준비 방법은 다음과 같다.

- (1) 피로가 가해지는 시편부위를 3mm의 깊이로 절삭한다.
- (2) 오븐을 통하여 모재의 온도를 약 500℃ 이상으로 유지한다.
- (3) 절삭한 부위에 아세틸렌 분말 용접으로 절삭 깊이만큼 용접한다.
- (4) 서냉을 통해 내부 잔류응력을 최소화한다. 만약 급냉을 한다면 용접을 한 부위가 접합이 되지 않고 떨어지거나 가공 시 깨질 위험이 크다.
- (5) 용접부위를 원하는 형상으로 절삭한다.

### 3.2 피로시험

피로시험은 Emhart(U.S.A)사의 I.S. 6-MACHINE TYPE-E 을 이용하여 실험재료의 윗부분에 약 4.25kg의 실험재료와 동일 재질의 형태로 203mm(8 inch)의 길이의 축으로 부채꼴형식의 낙하로 이루어지며 약 8-8.6초의 간격을 두고 충격을 가한다. 1시간 기준으로 약 410-450번의 피로가 가해진다. 낙하하는 시간은 약 0.3초 이다. 충격은 약 46.0MPa이다. 실험 시편의 종류는 니켈 합금 용접과 하지 않은 것으로 나누며 피로의 횟수는 약 10,000, 30,000, 50,000, 100,000의 충격을 가증한 것으로 한다.

실험을 위하여 용접을 하지 않은 실험재료 중 10,000회는 #1, 30,000회는 #3, 50,000회는 #5, 100,000회는 #10으로 각각 표기하였고, 용접을 한 실험재료 중 10,000회는 W#1, 30,000회는 W#3, 50,000회는 W#5, 100,000회는 W#10으로 각각 표기하였다.

### 3.3 초음파 탐상검사 및 결과

초음파 탐상 검사는 주파수가 높은 음파, 즉 초음파를 시험체내로 보내어 시험체내에 존재하는 불연속을 검출하는 방법이다. 이때 초음파를 사용하는 이유는 초음파가 지닌 성질인 지향성이 우수하고, 동일재질에서의 속도가 일정하고, 온도변화에 대해 속도변화가 거의 없다. 또한, 재질이 다른 경계면 등에서는 반사하며, 진행거리에 따라 초음파 빔의 감쇠가 발생하는 등의 특성을 이용하여 정확하고 정량적인 검사를 수행할 수 있기 때문이다<sup>(6)</sup>.

KSD0248 판정기준으로 저면 반사파에 의한 초음파 탐상 검사를 실시한 결과 시편 내부의 균열에 의한 결함 지시는 나타나지 않았다.

### 3.4 침투탐상검사 및 결과

침투탐상검사는 표면에 열려있는 불연속부만을 검출할 수 있으며 침투액, 현상액, 세척액 등 이 세 종류의 약품을 사용하여 결함을 찾아내는 검사 방법이다. 거의 모든 재질, 제품에 가능하며, 검사방법이 간편하고 결과를 즉시 알 수 있고, 시험

Table 3 Number of cracks by penetration inspection

Item	Number of Cracks	Item	Number of Cracks
#1	0	W#1	0
#3	0	W#3	0
#5	Not Identified	W#5	0
#10	Not Identified	W#10	0

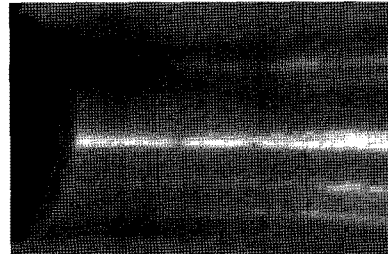


Fig. 5 Surface crack by penetration inspection

체의 크기, 형상에 크게 영향을 받지 않는다. 그러나 결함내부의 형상, 크기를 아는 것은 불가능하며, 매우 근접하여 존재하는 결함을 분리된 결함지시모양으로 나타내기가 곤란하다<sup>(6)</sup>.

표면 균열 검사를 위하여 VC-S(용제 제저를 이용한 염색 침투 탐상검사)를 사용하였고, 판정기준은 KSD0816을 적용하였다. Table 3의 실험 결과 #5와 #10에서 미세하게 균열이 보였으나 표면의 균열이 판정기준인 0.5mm이하로 Fig. 5와 같이 육안으로는 식별이 불가능하였다.

### 3.5 자분탐상검사 및 결과

자분 탐상 검사는 철강재료와 같은 강자성체의 표면 또는 표면 하에 있는 불연속부를 검출하기 위하여 피검사체를 자화시켜 결함부의 위치, 크기, 형태 및 넓이 등을 검사하는 방법이다<sup>(6)</sup>.

형광습식 요크법(wet fluorescence yoke method)을 통하여 Table 4와 같이 검사를 수행하였고 판정기준은 KSD0213을 적용하였다. 그 결과 Fig. 6와 같이 W#1을 제외한 모든 실험재료에서 미세균열이 발견되었다.

용접을 하지 않은 시편에서는 최초 균열이 10,000회부터 시작되며, 30,000회 이후부터 급속도로 균열이 진행된다. 니켈 합금 용접을 실시하였을 경우 최초 균열은 30,000회 시작되며 균열의 진행은 용접을 하지 않은 경우보다 균열의 시작은 2배 이상의 충격을 받을 경우 발생하고, 균열의 성장은 #1→#3, W#3→W#5 구간에서 1/2의 균열 성장과, #3→#5, W#5→W#10에서는 1/4의 균열성장이 발생하였다.

검사 결과 균열의 성장은 Fig. 7과 같은 특성을 가지며, Fig. 8은 W#10과 #10의 충격 지역과 표면 균열들을 각각 보여준다. 균열의 판정기준은 일러스트(illust)를 사용하여 표면을 촬영한 후 1:1로 크기를 조정한 격자를 0.5mm 간격으로 하여

Table 4 Number of cracks by magnetic particle inspection

Item	Number of Cracks	Item	Number of Cracks
#1	5	W#1	0
#3	36	W#3	3
#5	215	W#5	17
#10	Countless	W#10	68

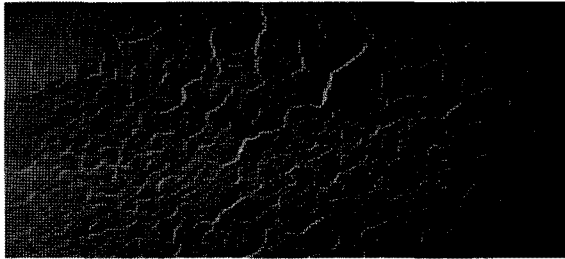


Fig. 6 Surface crack by magnetic particle spection

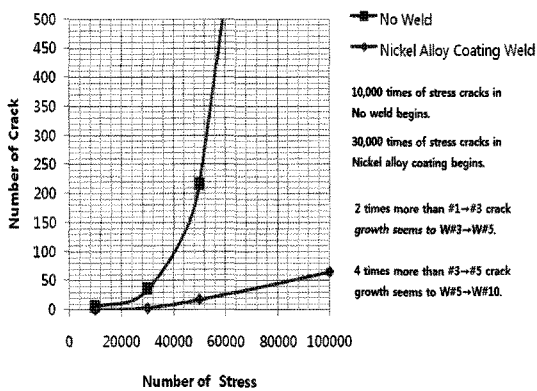


Fig. 7 Nickel alloy coating weld vs. no weld

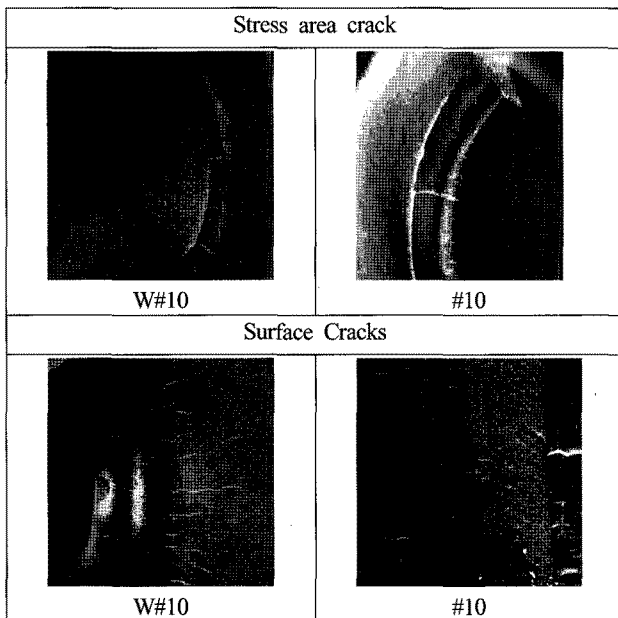


Fig. 8 Cracks inspected by magnetic particle test

격자의 크기보다 큰 것을 균열로 판단하였다. W#10은 모재에 니켈 합금을 아세틸렌 용접으로써 용착시킨 것이기 때문에 용접부위 전체적으로 균열이 생성되어 균열 자체가 크고 깨지거나 금이간다. 균열은 주로 충격부위에서 생성되며 표면에서는 균열을 찾아보기 힘들다. 그러나, #10 시편에서는 깨지거나 떨어지는 등 표면에 균열이 생성된다.

#### 4. 결론

본 연구는 니켈 합금 용접을 적용한 시편의 피로 균열 실험을 실시하였고, 실험의 결과에 따라 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 표면의 균열에서는 용접을 하지 않은 시편과 니켈 합금 용접한 시편이 많은 차이를 보이고 있으나, 육안으로는 잘 보이지 않는 미세 균열이며, 내부 균열의 검사에서는 양쪽 시편에서 균열이 검사 되지 않았다. 즉, 니켈 합금 용접은 금형 내부 균열에는 영향을 미치지 않았지만 표면 균열에 많은 영향을 주었다.
- (2) FCD50K의 항복 강도는  $379.5 \pm 6.9\text{MPa}$ 이나 그보다 훨씬 적은  $45\text{MPa}$ 의 반복적 충격에서 약 10,000 회부터 피로 균열이 생성되기 시작하였다. 니켈 합금 용접한 시편에서는 약 30,000 회부터 균열이 시작되었다. 따라서, 니켈 합금 용접을 통하여 피로 균열 생성 시점이 3배 이상 증가됨을 알 수 있었다.
- (3) 용접을 하지 않은 시편에서는 약 30,000 회부터 급격히 균열이 증가 되어 최소 균열이 생성되었을 때부터 균열이 급속도로 성장한다. 그러나 니켈 합금 용접을 실시하였을 경우, 균열이 시작되었을 때부터 다음 실험 검사 결과인 #1→#3과 W#3→W#5 때까지 균열의 성장이 용접을 하지 않은 시편보다 약 1/2의 피로 균열 성장을 보여주었다. 검사 결과 #3→#5와 W#5→W#10 경우는 약 1/4의 피로 균열 성장을 보여주었다.

#### 후기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술 인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

#### 참고 문헌

- (1) Colmonoy Technical Data Sheet, 1990, *Colmonoy Hard-Surfacing Flux Available in Powder or Paste Form*, Ancil-1 pp. 1~2.
- (2) Barsom, J. M., and Rolof, S. T., 1987, *Fracture and*

- Fatigue Control in Structures Application of Fracture Mechanics, 2nd Ed.*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- (3) Kim, J. M., 1996, *A Study on the Fatigue, Fracture and Crack Propagation in Welded Steel Structure*, Master Thesis, Suwon University, Republic of Korea..
- (4) Rolof, S. T., and Barsom, J. M., 1986, *Fracture and Fatigue Control in Structures - Application of Fracture Mechanics*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- (5) Bannanitne, J. A., Comer, J. J., and James, L., 1990, *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- (6) Hyundai Inspection Tech., 2006, *BT, MT, UT Educational Report*, Hyundai Inspection Tech. Co., pp. 2~15.