

## 기계적 피로결함 시험편 제조 및 결함 크기 평가

### Fabrication of Mechanical Fatigue Flawed Specimen and Evaluation of Flaw Size

홍재근\*<sup>†</sup>, 김우성\*, 손영호\*, 박반옥\*

Jae-keun Hong\*<sup>†</sup>, Woo-Sung Kim\*, Young-Ho Son\* and Ban-Uk Park\*

초록 원자력발전소의 안전성등급 기기에 적용되는 비파괴검사는 실제 결함을 실현한 시험편을 사용하여 결함 탐지능력을 검증하도록 하는 기량검증이 요구되고 있다. 가동중인 원전에서 발생 가능한 균열으로는 기계적 피로균열, 열 피로균열 및 입계부식균열 등이 있으나 본 연구에서는 기계적 피로균열을 대상으로 하였다. 인장 피로하중을 사용하여 기계적 피로결함을 제조하기 위해서 시험편을 설계하였고 원하는 피로결함 파면의 조도를 얻기 위해서 인가하중의 크기 및 사이클 수를 조절하여 피로결함을 발생시켰다. 발생된 결함에 대한 정확한 크기와 위치에 대한 물리적 정보를 얻은 후에 결함이 설계된 크기와 위치에 존재하도록 기밀용접을 실시하였다. 기밀용접 후 잔여 용접 흠은 가스 텅스텐 아크용접 및 플럭스 코어드 아크용접으로 채워졌다. 최종 완성된 피로결함 시험편을 방사선투과검사 및 초음파탐상검사를 통하여 검사한 결과, 설계된 길이와 깊이로 피로결함이 형성되었음을 확인하였다.

**주요용어:** 피로결함, 기량검증, 결함시험편, 초음파탐상검사

**Abstract** Performance demonstration with real flawed specimens has been strongly required for nondestructive evaluation of safety class components in nuclear power plant. Mechanical or thermal fatigue crack and intergranular stress corrosion cracking could be occurred in the in-service nuclear power plant and mechanical fatigue crack was selected to study in this paper. Specimen was designed to produce mechanical fatigue flaw under tensile stress. The number of cycles and the level of stress were controlled to obtain the desired flaw roughness. After the accurate physical measurement of the flaw size and location, fracture surface was seal-welded in place to ensure the designed location and size. The remaining weld groove was then filled by using gas-tungsten arc welding(GTAW) and flux-cored arc welding(FCAW). Results of radiographic and ultrasonic testing showed that fatigue cracks were consistent with the designed size and location in the final specimens.

**Keywords :** fatigue flaw, performance demonstration, flawed specimen, ultrasonic testing

#### 1. 서론

기기는 기기의 건전성 및 발전소의 안전성확보를 위하여 기기의 재질, 형상 및 예상되는 결함 등을 가동중인 원자력발전소(이하 원전)의 안전성등급 고려한 비파괴검사법을 적용하여 주기적으로 결함

을 탐지하고 있다[1].

원전의 가동중검사는 접근가능성이 제한적이고, 수명 예측 및 기기의 안전성 평가에 중요한 결과를 제공함으로써 결함탐지능력이 실증되고 높은 신뢰도를 가지는 비파괴검사방법의 적용이 요구된다. 특히, 초음파탐상검사법(이하 UT)과 와전류탐상검사법(이하 ECT)의 결함탐지능력에 대한 실증은 종래에는 기계가공법을 사용한 모의 시편을 사용하여 왔으나, 실제 결함의 탐지능력에 의구심을 일으킨 많은 사례가 발생되었다. 또한 최근의 연구들에 의해 실제결함과 인공결함의 초음파 특성 차이가 많이 발생한다는 보고들이 있었다. 피로결함 특히, 스테인레스강의 입계부식균열(intergranular stress corrosion cracking; IGSCC)은 기존의 경사각 탐촉자(45o, 60o, 70o)로는 정확한 탐지 및 평가가 어렵고 특수탐촉자(예: SwRI SLIC-40/70 transducer)를 이용해야 정확한 결함 탐지 및 평가가 가능하다[2,3].

이에 따라 미국은 2000년도부터 원전기기에 예상되는 실제결함을 실현한 모의시편을 사용하여 원전기기에 적용되는 비파괴검사의 결함탐지능력을 검증하도록 기량검증(performance demonstration)을 제도화하여 적용하였고[1], 우리나라도 2004년부터 UT 및 ECT 기량검증을 적용하기 위하여 규제기관과 원전소유주를 중심으로 "한국형 기량검증 시스템"을 개발하고 있다[4].

원전에 적용되는 기술기준(ASME Section XI, Appendix VIII)에서 요구되고 있는 실증시험편은 기계적 피로균열(mechanical fatigue crack)과 열피로균열(thermal fatigue crack) 또는 입계부식균열 등이 포함되어야 한다[1,10].

본 연구에서는 UT 기량검증에 사용되는 시험편 중의 하나인 기계적 피로균열을 실현한 시험편의 제조방법을 개발하고자 하였다. 시험편에 결함을 삽입하는 방법으로는 In-Situ Implant법, Coupon Implant법, Weld-solidification법 등이 있으나 In-Situ Implant법이 초음파특성상 가장 뛰어나기 때문에 본 연구에서는 In-Situ Implant법을 응용한 피로균열 시험편 제조법을 연구하였다[5-9].

완성된 피로균열 시험편에 대하여 초음파탐상검사를 통하여 피로균열의 크기와 위치를 측정하고자 하였다.

## 2. 결함시험편 제조법

### 2.1. In-Situ Implant법

In-Situ Implant법은 열피로 또는 기계적 피로결함의 제조에 사용되고 있다. 이 방법은 결함이 모재에서 발생하기 때문에 초음파빔이 용접부를 지나지 않고 직접 결함에 도달한다는 장점이 있어 초음파빔이 용접부에 의하여 왜곡되지 않는다. 또한 결함을 시험편에 삽입(implant)하기 전에 결함의 크기와 결함면에 대한 정보를 얻을 수 있어 보다 정확한 결함에 대한 정보를 얻을 수 있다. 또한 이 방법의 가장 큰 특징으로는 여러 갈래로 갈라진(branched) 결함을 발생시킬 수 있기 때문에 IGSCC로부터의 초음파신호를 가장 잘 모사할 수 있다.

먼저 결함생성위치에 바(bar)를 가공하여 인장력을 가한 상태에서 가열/냉각을 반복하여 열피로(thermal fatigue) 조건을 만들거나, 인장/압축을 반복하여 기계적 피로(mechanical fatigue) 조건을 만든다. 원하는 결함의 표면조도(roughness)를 얻기 위하여 인가되는 하중의 사이클(cycle) 수를 조절하여 피로균열이 열영향부에 완전히 성장하게 한 후, 결함의 위치 및 크기에 대한 물리적인 정보를 얻는다. 그리고 원하는 크기로 가공한 후 기밀용접(seal welding)을 수행하고, 용접 개선부는 용접절차에 따라 용접을 수행하여 시험편을 완성한다.

### 2.2. Coupon Implant

이 방법은 작은 쿠폰에 원하는 결함을 생성시켜 시험편 모형에 쿠폰을 삽입하는 방법으로 탄소강 용기, 노즐 등에 결함을 삽입할 때 자주 사용되는 방법이다. 제조방법은 간단하지만, 정확한 결함 치수를 알 수 없고, 쿠폰이 용접금속으로 둘러싸여 있어 초음파 빔이 용접부를 지나는 단점을 가지고 있다.

### 2.3. Weld-Solidification법

용착금속 내에 결함을 제조할 때 사용되며, 원하는 부위의 화학조성을 다르게 하여 용융된 용접부를 오염(contaminating)시켜 결함을 발생시킨다. 이 방법은 결함표면의 사진을 얻을 수 없고 방향, 크기,

결합의 범위에 대한 정확한 정보를 얻을 수 없다는 단점이 있다[2,3].

### 3. 실험방법

결합생성방법 중에서 In-Situ Implant법은 초음파법이 용접부를 지나지 않고 결합에 도달할 수 있어 초음파 특성이 가장 뛰어나다. 따라서 본 연구에서는 이 방법을 응용하여 용접 열영향부(HAZ)에 균열을 삽입하기 위해서 In-Situ Implant법을 수정, 보완하여 노치가공법에 의한 피로균열시험편제조법을 개발하였다[5-7]. 개략적인 제조방법의 순서도는 Fig. 1과 같다.

#### 3.1. 시험편의 재질 선정

시험편으로 사용된 재질은 원전의 주증기배관(main steam system piping) 및 급수라인(feed water system piping)에 사용되는 재질인 SA-106Gr. B 탄소강관(6" Sch.160, t : 18.24mm)을 사용하였다. 재료의 기계적 특성을 확인하기 위한 화학성분 및 인장시험결과는 Table 1에 나타내었다. 또한, 기계적 피로균열을 제조하기 위한 반복인장하중은 피로시험기(INSTRON 8502)를 이용하여 가하였다.

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of SA-106 Gr.B steel

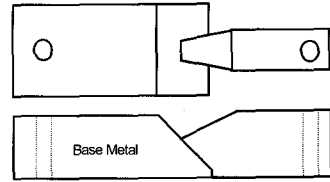
Elements	C	Si	Mn	P	S
wt. %	0.19	0.20	0.82	0.012	0.005
Tensile strength	469.1 MPa				
Yield strength	279.8 MPa				

#### 3.2. 시험편과 고정지그의 설계

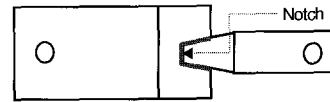
기계적 피로균열을 시험편에 삽입하기 위해서는 시험편의 형상 및 크기, 노치 가공조건, 피로 주기 및 인가하중 등이 실험변수로 고려된다.

시험편의 형상은 원하는 위치에 결합이 발생할 수 있도록 설계되어야 하는데 몇 차례의 실험을 통해 Fig. 2와 같이 균열이 바와 모재가 만나는 부분(노치가공한 부분)에서 형성되도록 하였다. 시험편은 파이

#### 1. Weld Preparation and Flaw design



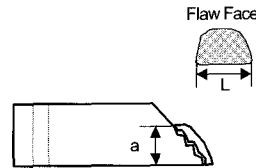
#### 2. Notch Processing



#### 3. Apply Mechanical Fatigue Until Fracture



#### 4. Flaw Shaping



#### 5. Seal Welding and Surface Conditioning



#### 6. Fit-up and Final Welding

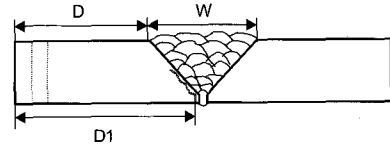


Fig. 1 Fabrication Process of mechanical fatigue flawed specimen

프를 1/2, 1/4로 절단하여 예비실험을 통해 인가하중 및 노치 가공조건 등의 실험변수를 확보한 후 전체 크기(full size)의 시험편에 피로균열을 발생시켰다.

또한, Fig. 3과 같이 균열발생 예상부에 노치를 가공하여 원하는 피로 파단면을 가지도록 하였고 생성된 균열이 용접완료 후 열영향부에 위치할 수 있도록 설계하였다.

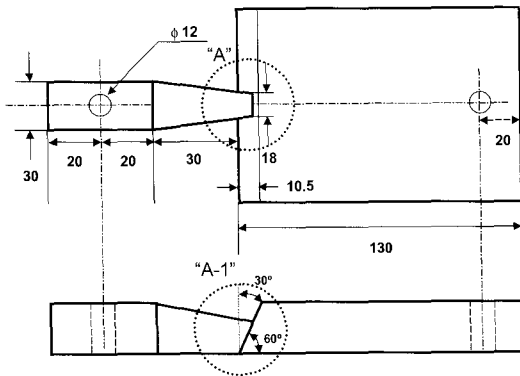


Fig. 2 Dimension and shape of specimen before tension

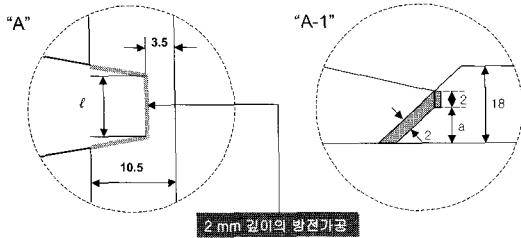


Fig. 3 Detailed geometry of the notched area

시험편의 설계시 결합의 형상비, 노치가공 조건 및 용접 개선면의 가공 등이 고려되었다. 이때, 노치가공은 방전가공으로 하였고 가공깊이 및 가공각도 등을 실험변수로 하였다.

인장하중용 고정 지그는 Fig. 4와 같이 6인치 Sch. 160(t : 18.24mm) 시험편에 적용될 수 있도록 파이프와 동일한 곡율을 가지도록 하였고 인장피로하중을 적용할 수 있도록 설계하였다. 파이프의 크기에 따라 지그의 가공두께만 바꾸어 주면 피로균열 생성 실험이 가능하도록 하였다.

### 3.3. 피로결합의 생성

SA-106 Gr.B는 인장강도가 469.1 MPa(68.3ksi), 항복강도는 279.8 MPa(40.6ksi)의 기계적 특성을 가지고 있다. 원하는 피로균열의 표면조도(roughness)를 얻고 소성변형을 최소화하기 위해 인가하중, 주파수 및 응력 반복수 등을 변화시켜가며 최적 조건을 확보하고자 하였다.

피로균열을 생성하기 위한 최적조건은 예비실험을 통하여 Table 2의 조건을 확보하였다. 예비실험시 상

기재료에 대한 균열발생을 위해서 초기응력을 245.1 MPa 이상으로 가하면 파면은 거칠고 불균일한 양상을 나타내었고 147.1 MPa 이하로 하면 균일하고 부드러운 파면을 얻을 수 있었으나 피로균열의 성장을 위해 필요한 사이클수가 많이 요구되었다. 주파수 10 Hz 이상에서는 최종 파단부의 파괴양상을 조절하기 어려워 파면의 적정 거칠기 및 파괴의 양상을 얻기 위해서 4~5 Hz 로 조절하였다. 상기의 조건을 고려하여 인가하중의 최적조건을 항복강도의 70/50/30%의 단계로 정량화 하였다. 이때, 반복피로하중은 응력비(R) 0.1의 조건으로 하였다.

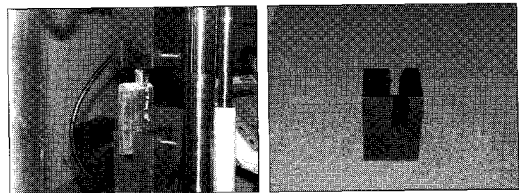


Fig. 4 Photographs of jig for bending stress

Table 2 Conditions for fatigue flaw initiation and growth

step	stress MPa	frequency (Hz)	cycle
1	205.9	4	200,000
2	147.1	5	150,000
3	88.2	4	200,000

### 3.4. 피로결합 시험편의 용접

시험편에 피로균열이 생성되면 균열의 크기 및 위치를 실측하였다. 결합생성부를 모재에 기밀 용접(seal welding)한 후 용접개선면을 기계가공하고 본 용접을 수행하였다. 이때, 초층은 가스 텅스텐 아크 용접(GTAW)으로 본 용접은 플럭스 코어드 아크 용접(FCAW)을 실시하였다.

### 3.5. 피로결합에 대한 비파괴검사

용접 후 기계가공이 완료된 시험편에 대하여 비파괴검사를 통하여 결합의 위치 및 크기를 확인하였다. 방사선투과검사를 통하여 피로균열의 위치 및 길이를 확인하였고 다른 용접결합의 유무를 확

인하였다. 또한 초음파탐상검사를 통하여 결함의 길이와 깊이를 확인하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1. 파단면 분석

피로균열의 적절한 표면조도를 얻기 위하여 Table 2의 조건에 따라서 실험한 결과 Fig. 5와 같은 피로결합의 파단면을 얻을 수 있었다. 또한, Table 3의 노치 가공조건에 따라서 파괴의 양상이 상이한 결과를 얻을 수 있었다. 균열발생예상부에 노치를 가공한 시험편(Fig. 5 (a),(b),(d))은 평면변형 파괴를 나타내었고 노치가공을 하지 않은 시험편(Fig. 5 (c))은 혼합파괴양상을 나타내었다. 평면변형 파괴를 나타낸 시험편은 균열의 성장이 파이프의 외부에서 내부로(두께방향) 성장하였고 혼합파괴양상을 나타낸 시험편은 두께방향 및 두께방향에 수직하게 균열이 성장하였음을 Fig. 6과 같이 주사전 자현미경(SEM)으로 관찰하였다.

즉, 노치가공 조건에 따라서 스트라이션(striation)의 방향이 상이하게 관찰되었고 노치가공의 조건에 따라서 균열의 발생과 전파의 양상을 조절할 수 있었다. 이때, 설계된 피로균열은 길이와 깊이의 비(aspect ratio)가 2:1 이상으로 하였다.

파단된 피로결합에 대하여 결함의 길이와 깊이를 실측한 결과 설계된 크기로 형성되었음을 확인하였다

4.2. 기밀용접(seal welding) 및 본용접(final welding)

용접덧살 및 용접루트부의 기계가공을 위해서 용접조건에 따른 기밀용접시의 용융깊이를 측정하였다. 전류 200mA, 전압 12V 일 때 용융깊이는 2.1mm이고 (Fig. 7의 (a)), 전류 180mA, 전압 12V 일 때 용융 깊이는 1.6mm이다.(Fig. 7의 (b)) 균열의 정확한 가공 및 측정을 위하여 기밀용접에 의해 용융된 깊이는 측정된 깊이 만큼 기계가공으로 절단하여 균열의 정확성을 확보하였다.

기밀용접 후 최종용접(final welding)을 수행하기 위한 기계가공을 실시하고 최종용접을 수행하였다. 최종용접시 초층은 가스텅스텐아크용접(GTAW)으로 나머지는 플럭스코어드아크용접(FCAW)으로 실시하였다.

Table 3 Conditions for notch processing

노치위치 시험구분	A	B	C	D
(a)	3mm	3mm	3mm	2mm
(b)	5mm	3mm	3mm	×
(c)	×	×	×	3mm
(d)	2mm	2mm	2mm	3mm

\* 상기 치수는 노치 가공깊이  
\* ×는 노치 가공 없음

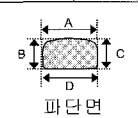
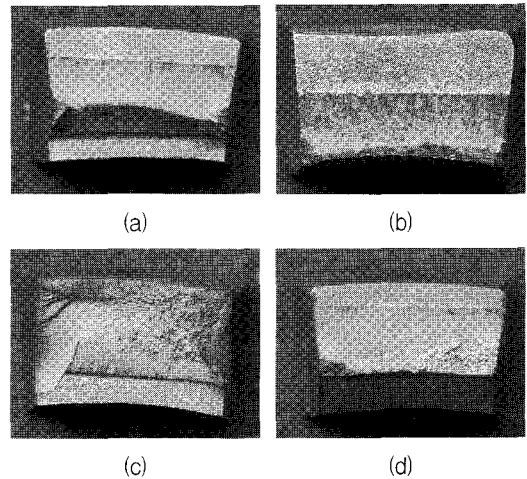



Fig. 5 Photographs of fracture surface resulted from different notch condition

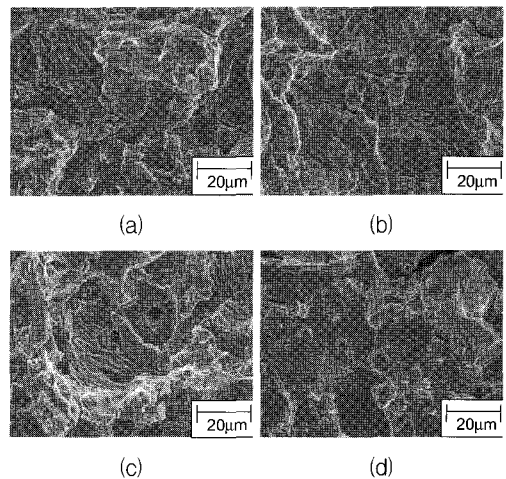


Fig. 6 SEM fractographs with different notch condition

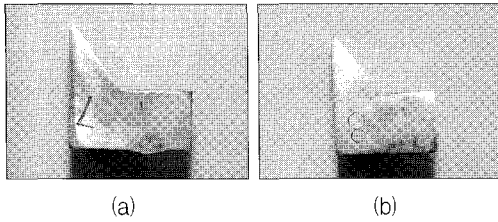


Fig. 7 Fusion depths resulted from seal welding with different welding condition

4.3. 용접부의 건전성

완성된 시험편에 대하여 방사선투과검사 및 액체 침투탐상검사를 실시한 결과 설계된 위치에 설계된 크기로 삽입되어 있음을 확인하였다. 표면에 열려 있는 결함의 크기를 측정한 결과 용접 전에 실측한 결함과 일치함을 확인하였고 액체침투탐상 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 또한 Fig. 9는 방사선투과검사를 통해서 용접부에 피로결함 이외의 결함이 존재하지 않음을 보여준다. 이 결과는 최종용접조건이 열영향부에 위치하고 있는 피로결함을 손상시키지 않았음을 보여준다.

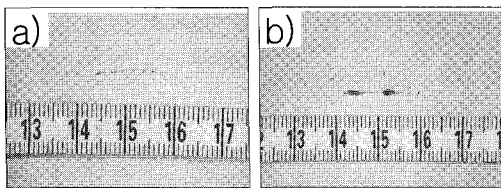


Fig. 8 Results of liquid penetrant testing for fatigue flaw

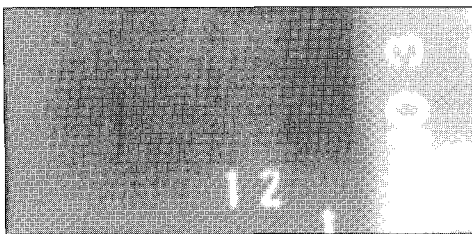


Fig. 9 Result of radiographic testing for fatigue flaw

4.4. 피로결함의 크기 검증

초음파탐상검사를 통하여 완성된 시험편의 피로결함의 크기를 측정하였다. 균열의 크기는 6db drop 법을 사용하여 측정하였다. 측정된 결과 피로균열을

생성한 후 실측한 크기와 거의 일치함을 확인하였다.

실측된 결함길이는 설계하였던 12~17mm의 길이를 가지고 있었고 초음파탐상검사를 통하여 측정된 길이는 2mm 이내의 오차를 가지고 있었다.

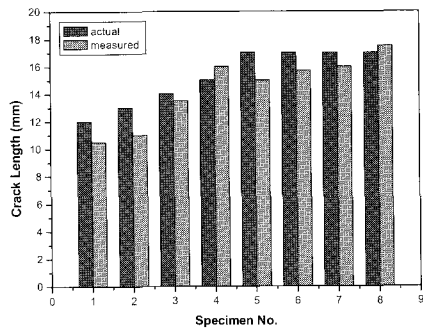
결함깊이는 3~8mm로 설계하였고 실측한 결과 1mm 이내의 오차를 가지고 있었다. 초음파탐상검사결과 1.5mm 이내의 오차를 가지고 있었다.

측정한 결과에 대한 RMS 오차는 다음의 식 (1)에 의해 구하였다.

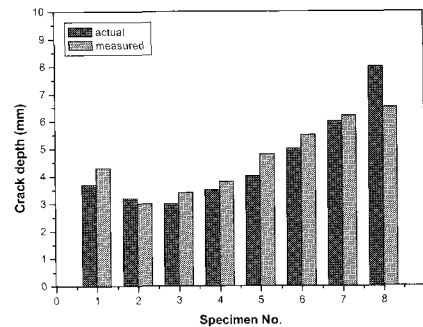
$$RMS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - t_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (1)$$

여기서  $m_i$ 는 결함크기 측정값,  $t_i$ 는 실제결함 크기이고  $n$ 은 측정된 결함 개수이다. 결함길이의 RMS오차는 1.19mm (ASME Sec.XI 의 합격기준 : 19mm), 결함깊이의 RMS오차는 0.14mm(ASME Sec. XI 의 합격기준 : 3.2mm)로 나타났다.

초음파탐상시험 결과와 실측한 결함의 크기는 Fig. 10과 같다.



(a) crack length



(b) crack depth

Fig. 10 Comparison of crack size from the physical and the ultrasonic measurements

## 5. 결 론

원자력발전소에 사용되는 탄소강관(SA-106)을 대상으로 하여 원하는 위치 및 설계된 크기로 피로결함을 형성하여 초음파탐상검사용 결함시험편을 제조한 결과 아래와 같은 주요결과를 얻었다.

- (1) 본 연구에서 설계한 시험편의 형상에서 파면이 적정한 표면조도 및 원하는 파괴양상을 가지는 피로균열을 생성시키기 위한 노치가공, 인가하중, 주파수 및 사이클의 최적조건을 확보하였다.
- (2) 설계된 시험편의 형상이 피로균열을 발생시키는 데 적합한 형상임을 확인하였고 노치가공에 의해 평면변형파괴 및 혼합파괴양상을 조절할 수 있었다.
- (3) 초음파탐상검사를 통해 완성된 시험편에 존재하는 피로균열은 설계된 위치에 설계된 길이와 깊이를 가지고 있음을 확인하였다. 따라서, 본 실험에서 제시된 기계적 피로균열시험편의 제조방법 및 결함평가법은 적합한 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부에서 지원된 기본사업 “원전기기 비파괴시험 실증을 위한 결함시험편제조 및 평가기술개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI, Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, The American Society of Mechanical Engineers (1995)
- [2] R. L. Edwards, P. D. Watson and G. J. Gruber, "Fabrication of Specimens With Controlled Flaws for Procedure Development and Personnel Training and Qualification," 12th International Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, pp. 93-100 (1994)
- [3] R. Edwards, G. Gruber and P. Watson, "Fabrication of Performance Demonstration Initiative Specimens with Controlled Flaws", 13th International Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, pp. 167-176, (1995)
- [4] 장기상, "한국형기량검증 System 준비현황", 원전 ISI Workshop 발표논문집, pp. 2-16 (2002)
- [5] A. L. Pherigo and G. L. Pherigo, "Flaw Implant Techniques Used to Manufacture Specimens for ASME Section XI, Appendix VII-VIII," The 1993 Pressure Vessels and Piping Conference, vol. 57, pp. 87-91 (1993)
- [6] G. L. Pherigo and A. L. Pherigo, "Implanting Flaws for NDT Validation," 4th Structural Materials Technology IV: an NDT Conference, pp. 323-328, Mar. (2000)
- [7] G. L. Pherigo, A. L. Pherigo, "Using Flaw Implants to Qualify Nuclear NDE Personnel," 12th International Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, pp. 81-84 (1994)
- [8] G. L. Pherigo, "Flawed Specimen Design and Manufacture for ASME Section XI, Appendix VII-VIII," 11th International Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, pp. 225-230 (1992)
- [9] G. L. Pherigo, "Performance Demonstration Testing at the EPRI NDE Center for Intergranular Stress Corrosion Cracking in BWR Piping," NDE in the Nuclear Industry, pp. 45-48 (1987)
- [10] P. Watson, R. L. Edward, "Fabrication of Test Specimens Simulating IGSCC for Demonstration and Inspection Technology Evaluation," 14th International Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, pp. 165-168 (1997)