

## 초음파 탐상시험 실증을 위한 피로결합시험편 제조법



**홍 재 근**

(KIMM 시험평가센터)

'95 성균관대학교 금속공학과(학사)  
'97 성균관대학교 금속공학과(석사)  
'97 - 현재 한국기계연구원 연구원



**송 상 우**

(KIMM 시험평가센터)

'95 한양대학교 금속학과(학사)  
'97 한양대학교 금속학과(석사)  
'97 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



**박 반 옥**

(KIMM 시험평가센터)

'78 서울대학교 기계공학과(학사)  
'88 한국과학기술원 재료공학(석사)  
'80 한국기계연구원 기술감리부  
'90 한국원자력안전기술원 선임연구원  
'93 - 현재 한국기계연구원 책임연구원

### 1. 서 론

가동중인 원자력발전소(이하 원전)의 안전성등급 기기는 기기의 건전성 및 발전소의 안전성 확보를 위하여 기기의 재질, 형상 및 예상되는 결합 등을 고려한 비파괴검사법을 적용하여 검사 주기에 따라 검사를 실시하고 있다.<sup>[1-3]</sup>

원전의 가동중검사는 접근가능성이 제한적이고, 수명 예측 및 기기의 안전성 평가에 중요한 결과를 제공함으로써 결합탐지능력이 실증되고 높은 신뢰도를 가지는 비파괴검사방법의 적용이 요구된다. 특히, 초음파탐상검사법(이하 UT)과 와전류탐상검사법(이하 ECT)의 결합탐지능력에 대한 실증은 현재까지는 기계가공법을 사용한 모의 시편을 사용하여 왔으나, 실제 결합의 탐지능력에 의구심을 일으킨 많은 사례가 발생되었다.

이에 따라 미국은 2000년도부터 원전기에 예상되는 실제결합을 실현한 모의시편을 사용하여 원전기에 적용되는 비파괴검사의 결합탐지능력을 검증하도록 기량검증(Performance Demonstration)을 제도화하여 적용하였고,<sup>[3]</sup> 우리나라도 2003년부터 UT 및 ECT 기량검증을 적용하기 위하여 규제기관과 원전소유주를 중심으로 "한국형 기량검증 시스템"을 개발하고 있다.

원전에 적용되는 기술기준(ASME Section XI, Appendix VIII)에서 요구되고 있는 비파괴실증시험편은 기계적 피로균열(mechanical fatigue crack)과 열피로균열(thermal fatigue crack) 또는 입계부식균열(intergranular corrosion cracking) ;

IGSCC) 등이 포함되어야 한다.<sup>[3, 10, 11]</sup>

시험편에 결함을 삽입하는 방법으로는 In-Situ Implant법, Coupon Implant법, Weld-solidification 법 등이 있으나<sup>[4-9,11]</sup> In-Situ Implant법이 초음파 특성상 가장 뛰어나고 경제적인 이점이 있기 때문에 본 연구에서는 FlawTech사에서 개발한 In-Situ Implant법을 수정, 보완하여 UT 기량검중에 사용되는 시험편중의 하나인 기계적 피로균열을 실현한 시험편을 제작하고자 하였다

원전의 안전성등급 배관에 사용되는 SA-106 Gr.B(seamless carbon steel pipe for high-temperature service)재료의 배관을 사용하여 피로균열을 발생시켜 용접으로 피로균열 시험편을 완성하였다. 완성된 피로균열 시험편에 대하여 비파괴검사를 통하여 피로균열의 크기와 위치를 측정하여 설계된 위치와 크기로 피로균열이 발생되었는지를 확인하였다.

## 2. 결함시험편 제조법

### 2.1 In-Situ Implant법

In-Situ Implant법은 thermal 또는 mechanical fatigue crack의 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 기계적피로(mechanical fatigue)조건

을 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 접합용접(seal welding)을 수행하고, 용접개선부는 용접절차에 따라 용접을 수행하여 시험편을 완성한다.

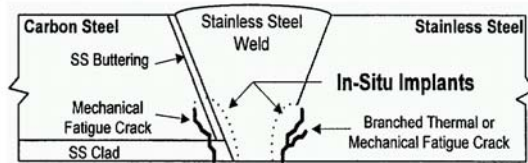


그림 1. In-Situ implant 법

### 2.2 Coupon Implant

이 방법은 작은 쿠폰에 원하는 결함을 생성시켜 시험편 모형에 쿠폰을 삽입(implant)하는 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 지나지는 단점을 가지고 있다.

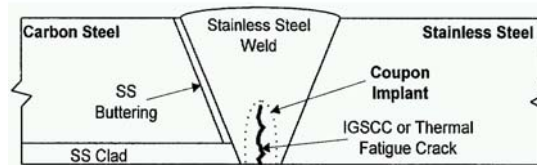


그림 2. Coupon implant 법

### 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, 결함의 범위에 대한 정확한 정보를 얻을 수 없다는 단점이 있다.<sup>[4, 5]</sup>

### 3. 실험방법

결함생성방법 중에서 In-Situ Implant법은 초음파빔이 용접부를 지나지 않고 결함에 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 사용하였다.<sup>[4-9]</sup> 개략적인 실험의 순서도는 그림 3과 같다.

시험편으로 사용된 재질은 원전의 주증기배관(main steam system piping) 및 급수라인(feed water system piping)에 사용되는 재질인 SA-106 Gr. B 탄소강관(6" Sch160, t : 18.24mm)을 사용하였다. 재료의 기계적특성을 확인하기 위한 화학성분 및 인장시험결과는 표 1

에 나타내었다. 또한, 기계적 피로균열을 제조하기 위한 반복인장하중은 피로시험기(INSTRON 8501/8502)를 이용하였다.

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

#### 3.1 시험편과 고정지그의 설계

시험편의 형상은 원하는 위치에 결함이 발생할 수 있도록 설계되어야 하는데 판재를 이용한 실험을 통해 그림 4와 같이 인장하중을 이용한 시험편이 가장 적합한 것으로 나타났다. 시험편의 설계시 결함의 형상비( $l:a = 3:1$ ,  $l$ : 결함의 길이,  $a$ : 결함의 깊이), 시험편에 가공한 노치 및

표 1. SA-106재료의 화학성분 및 기계적 특성

Elements	C	Si	Mn	P	S
Composition(wt%)	0.19	0.20	0.82	0.012	0.005
Tensile strength	68.3 ksi				
Yield strength	40.6 ksi	0.012	0.005		

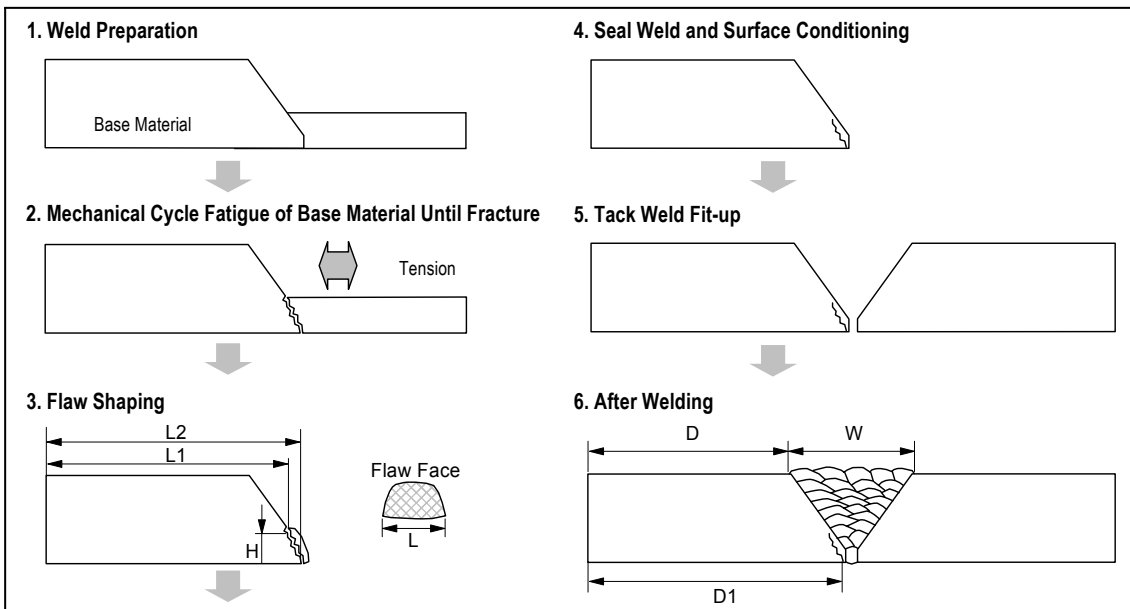


그림 3. 기계적피로균열 생성방법의 순서도

용접 개선면의 가공 등이 고려되었다. 시험편은 파이프를 길이방향으로 4등분하여 설계하였다.

인장하중용 고정지그는 그림 5와 같이 6인치 Sch 160(t : 18.24mm) 시험편에 적용될 수 있도록 설계하였다. 파이프와 동일한 곡율을 가지고 있어 6인치 파이프는 모두 실험이 가능하도록 하였다.

균열은 바(bar)와 모재가 만나는 부분(노치가 공한 부분)에서 형성되도록 하였고 노치의 깊이 및 방향을 조절하여 균열의 깊이와 길이를 결정하도록 설계하였다. 또한, 생성된 균열이 용접완

료 후 열영향부에 위치할 수 있도록 설계하였다.

3.2 피로결함의 생성

SA-106 Gr.B는 인장강도가 68.3ksi(47.84 kgf/mm<sup>2</sup>), 항복강도는 40.6ksi(28.54 kgf/mm<sup>2</sup>)의 기계적 특성을 가지고 있다. 원하는 피로균열의 표면조도(roughness)를 얻기 위하여 인가하중, 주파수 및 응력반복수(cycle)등을 변화시켜 가며 최적 조건을 확보하고자 하였다. 피로균열을 생성하기 위한 최적조건은 실험을 통하여 표 2의 조건을 확보하였다.

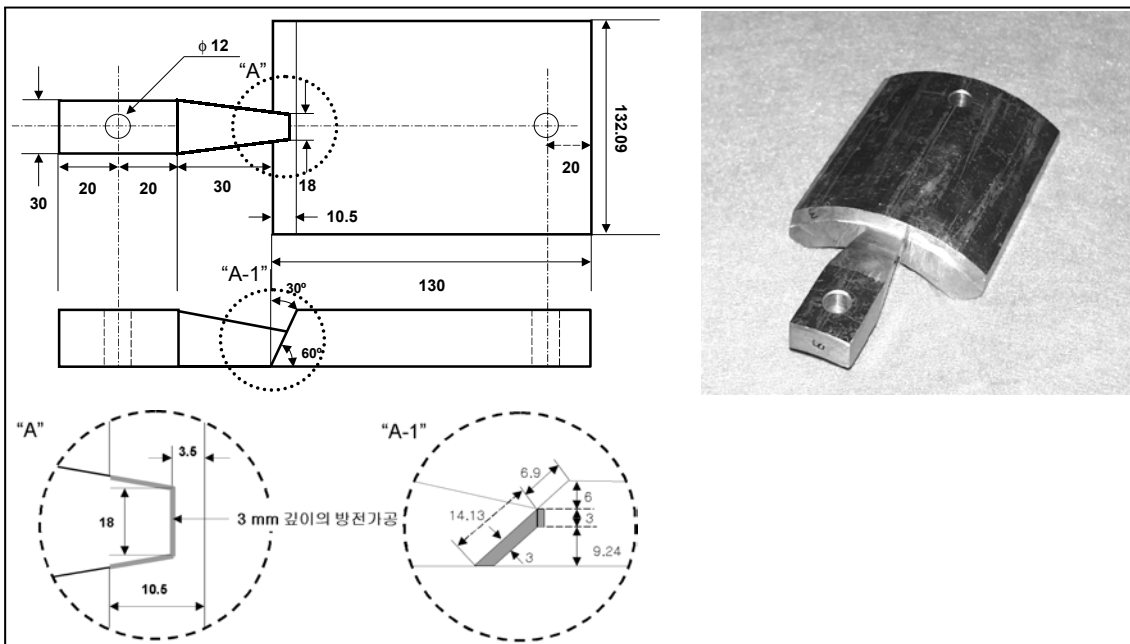


그림 4. 피로균열시험편의 형상 및 크기

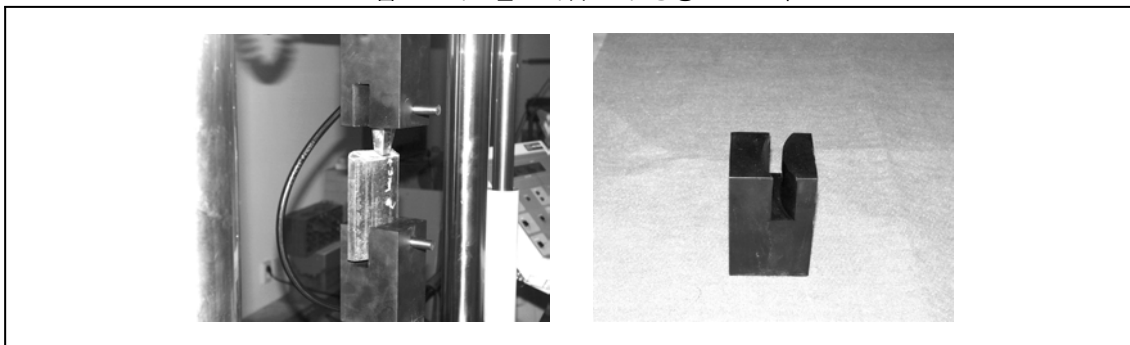


그림 5. 인장하중용 고정지그의 형상

표 2. 피로균열 형성조건

단계	인가하중 (Kg/mm <sup>2</sup> )	주파수 (Hz)	사이클
1	21	5	200,000
2	16	5	200,000
3	12	10	100,000
4	9	5	100,000

### 3.3 피로결함 시험편의 용접

시험편에 피로균열이 생성되면 균열의 크기 및 위치를 실측하였다. 결함생성부를 모재에 내밀 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.

용접덧살 및 용접루트부의 기계가공을 위해서 용접조건에 따른 내밀용접시의 용융깊이를 측정하였다.

그림 6의 (a)는 전류 200mA, 전압12V 일 때 용융깊이는 2.1mm이고 (b)는 전류 180mA, 전압 12V 일 때 용융깊이는 1.6mm이다.

균열의 정확한 가공 및 측정을 위하여 기밀용접에 의해 용융된 깊이는 측정된 깊이 만큼 기계가공으로 절단하여 균열의 정확성을 확보하였다.

### 3.4 피로결함에 대한 비파괴검사

용접 후 기계가공이 완료된 시험편에 대하여

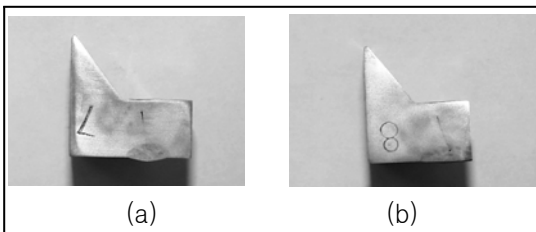


그림 6. 기밀용접조건에 따른 용융깊이

비파괴검사를 통하여 결함의 위치 및 크기를 확인하였다.

방사선투과검사를 통하여 피로균열의 위치 및 길이를 확인하였고 액체침투탐상검사로 표면에 열려있는 결함의 길이를 측정하였다. 또한 수동 초음파탐상검사를 통하여 결함의 길이와 깊이를 확인하였다.

## 4. 실험 결과 및 고찰

### 4.1 피로결함 생성

피로균열의 적정한 표면조도를 얻기 위하여 표 2의 조건에 따라서 실험한 결과 그림 7과 같은 피로결함의 파단면을 얻을 수 있었다. 피로균열이 생성된 뒤 하중을 감소시키며 균열을 성장시켜 소성변형이 없이 균열이 성장되었다. 피로결함의 파단면을 SEM으로 관찰한 결과를 그림 8에 나타내었다. 그림 8의 (a)는 18배로 전체적인 파단면을 나타내고 있다. "A" 구간은 방전가공으로 형성된 노치이고 "B"구간은 피로균열이 처음 발생하는 구간이고(표 2의 단계1에 해당) "C" 구간은 인가되는 하중이 변경된 표 2의 단계2에 해당하는 구간이다. 그림 8의 (b)는 "B"구간을 2000배로 촬영한 결과이고, (c)는 "B"와 "C"경계부, (d)는 "C" 구간을 촬영하였다.

4개의 시험편에 대하여 초기에 얻고자 하였던 결함의 길이는 15~18mm이고 깊이는 5~8mm로 설계되었었다. 생성된 결함의 길이를 실측한 결과 설계된 길이와 거의 일치함을 보였다.

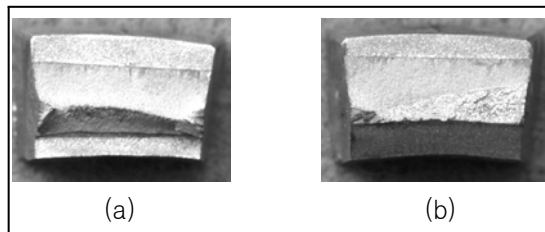


그림 7. 인장하중에 의한 피로파단면

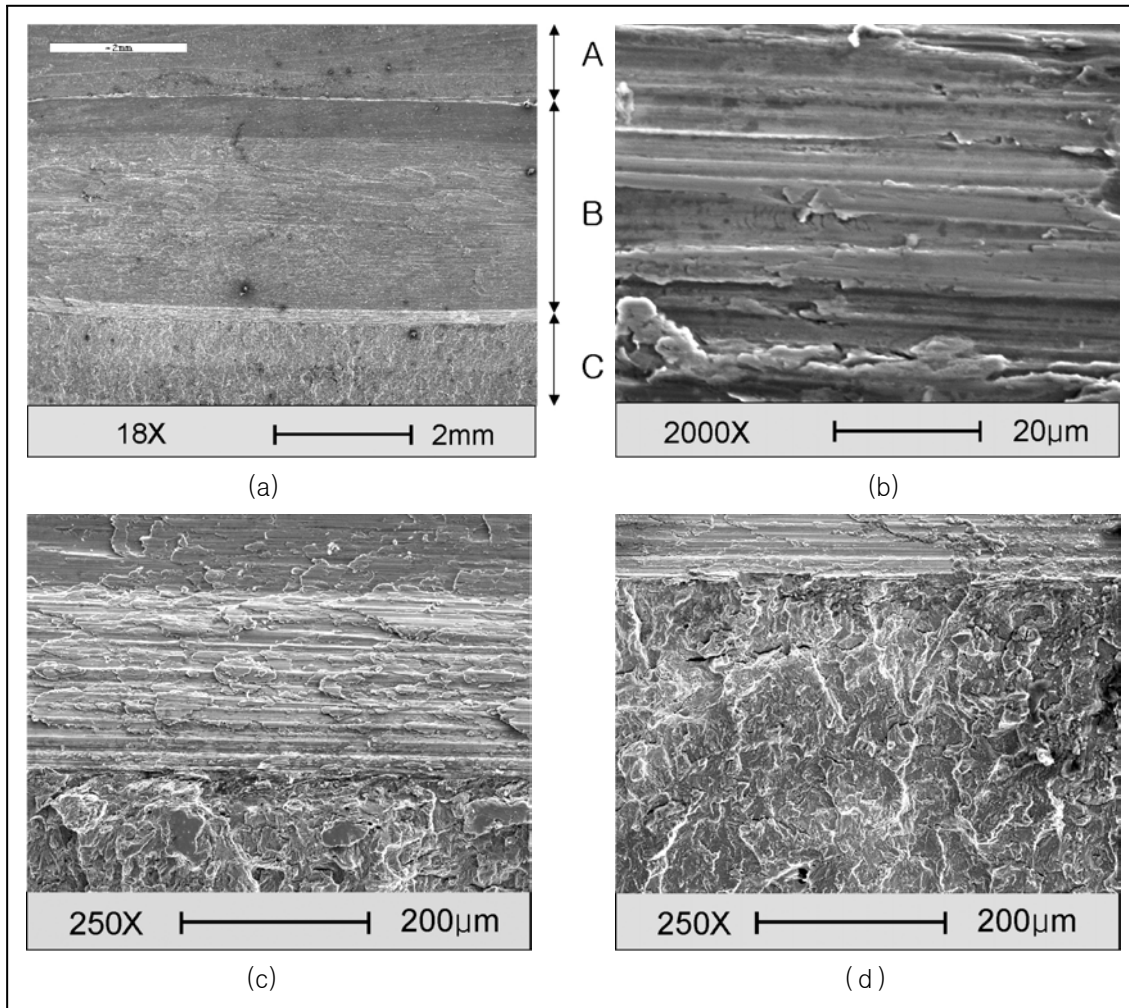


그림 8. 피로균열 파단면의 SEM 촬영결과

#### 4.2 피로균열 삽입된 시험편의 완성

피로균열을 기밀 용접한 후 초층은 GTAW 용접법으로 본용접은 FCAW 용접법으로 실시하고 기계가공을 실시하여 피로균열시험편을 완성하였다. 사용된 자동용접기는 그림 9와 같다.

#### 4.3 피로결함의 크기검증

완성된 시험편에 대하여 방사선투과검사 및 액체침투탐상검사를 실시한 결과, 설계된 위치에

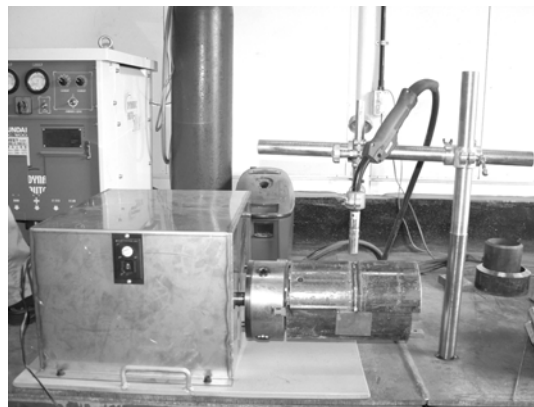


그림 9. 피로균열시험편의 용접에 사용된 자동용접기

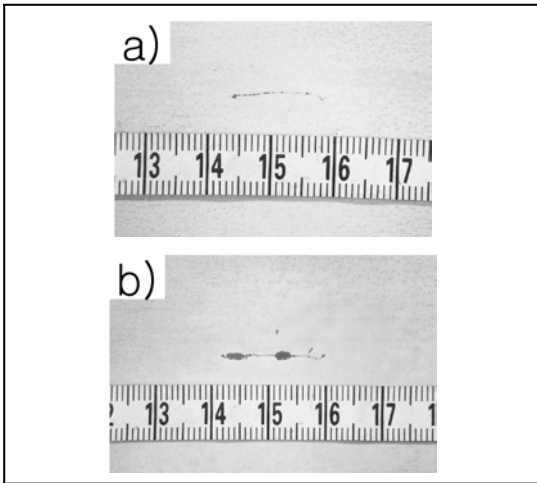


그림 10. 피로균열시험편의 액체침투탐상시험결과

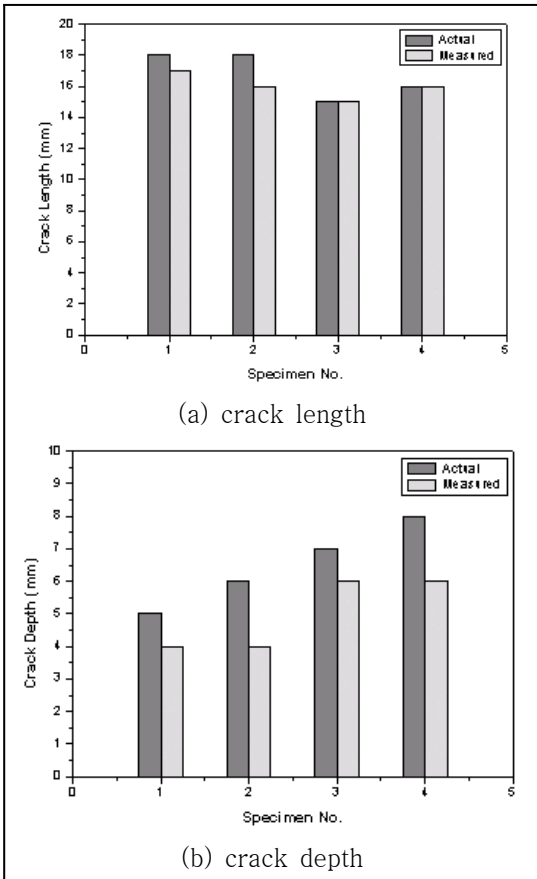


그림 11. 초음파탐상에 의한 피로결함 크기측정결과

설계된 크기로 삽입되어 있음을 확인하였다. 표면에 열려 있는 결함의 크기를 측정된 결과 용

접 전에 실측한 결함과 일치함을 확인하였고 액체침투탐상결과를 그림 10에 나타내었다.

또한, 초음파탐상검사를 통하여 균열의 길이는 6db drop 법을 사용하여 측정하였고 균열의 깊이는 Tip echo 법을 사용하여 측정하였다. 측정된 결과 피로균열을 생성한 후 실측한 크기와 거의 일치함을 확인하였다.

15~18mm로 설계하였던 결함길이는 실측결과 15~18mm의 길이를 가지고 있었고, 초음파탐상검사를 통하여 측정된 길이는 2mm이내의 오차를 가지고 있었다.

결함깊이는 5~8mm로 설계하였고 실측한 결과 2mm 이내의 오차를 가지고 있었다. 초음파탐상검사결과 4~7mm의 결함깊이를 가지고 있었다.

초음파탐상결과와 실측한 결함의 크기는 그림 11과 같다.

## 5. 결 론

(1) 파면이 적절한 표면조도를 가지는 피로균열을 생성시키기 위한 인가하중, 주파수 및 사이클의 최적조건을 확보하였다.

(2) 설계된 시험편의 형상이 피로균열을 발생시키기 적합한 형상임을 확인하였다.

(3) 파이프 시험편의 설계된 위치에 피로균열을 재현성 있게 생성할 수 있었다.

(4) 피로결함 시험편을 제작할 수 있는 용접조건을 확보하였다.

(5) 초음파탐상검사를 통하여 완성된 시험편에 존재하는 피로균열은 초기에 설계된 길이와 깊이를 가지고 있음을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

1. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Rules for Construction of

- Nuclear Power Plant Components, The American Society of Mechanical Engineers(1995)
2. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section V, Nondestructive Examination, The American Society of Mechanical Engineers(1995)
  3. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI, Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, The American Society of Mechanical Engineers(1995)
  4. R.L. Edwards, P.D. Watson, 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)
  5. R. Edwards, G. Gruber, 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)
  6. A.L. Pherigo, 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)
  7. G.L. Pherigo, A.L. Pherigo, "Implanting Flaws for NDT Validation", 4th Structural Materials Technology IV: an NDT Conference, pp. 323~328, Mar. (2000)
  8. 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)
  9. 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)
  10. 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)
  11. 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)