

## 증기발생기 전열관 2차측 응력부식균열의 실험실적 모사 방법

이재민<sup>1</sup> · 김성우<sup>1,†</sup> · 황성식<sup>1</sup> · 김홍표<sup>1</sup> · 김홍덕<sup>2</sup><sup>1</sup>한국원자력연구원, 원자력재료안전연구부<sup>2</sup>한국수력원자력(주) 중앙연구원, 기계재료연구소

(2014년 6월 24일 접수, 2014년 6월 27일 수정, 2014년 6월 27일 채택)

## Laboratorial technique for fabrication of outer diameter stress corrosion cracking on steam generator tubing

Jae-Min Lee<sup>1</sup>, Sung-Woo Kim<sup>1,†</sup>, Seong-Sik Hwang<sup>1</sup>, Hong-Pyo Kim<sup>1</sup>, and Hong-Deok Kim<sup>2</sup><sup>1</sup>Nuclear Materials Safety Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute<sup>2</sup>Machinery & Materials Laboratory, KHNP Central Research Institute

(Received June 24, 2014; Revised June 27, 2014; Accepted June 27, 2014)

In this work, it is aimed to develop the fabrication method of axial stress corrosion cracking (SCC) defects having various sizes, on the outer diameter surface of the steam generator (SG) tubings. To control the length of the artificial SCC defect, the specific area of the SG tubing samples was exposed to an acidic solution after a sensitization heat treatment. During the exposure to an acidic solution, a direct current potential drop (DCPD) method was adopted to monitor the crack depth. The size of the SCC defect was first evaluated by an eddy current test (ECT), and then confirmed by a destructive examination. From the comparison, it was found that the actual crack length was well controlled to be similar to the length of the surface exposed to an acidic solution (5, 10, 20 or 30 mm in this work) with small standard deviation. From in-situ monitoring of the crack depth using the DCPD method, it was possible to distinguish a non-through wall crack from a through wall crack, even though the depth of the non-through wall crack was not able to be precisely controlled. The fabrication method established in this work was useful to simulate the SCC defect having similar size and ECT signals as compared to the field cracks in the SG tubings of the operating Korean PWRs.

**Keywords :** direct current potential drop method, eddy current test, non-through wall crack, steam generator tubing, stress corrosion cracking, through wall crack

## 1. 서 론

가압경수로형 원전의 고온 고압 수환경에서 부식 저항성이 큰 Alloy 600과 Alloy 690 등의 니켈 합금은 주요 기기 및 부품으로서 다양하게 사용된다. 그러나 원전 가동중에 특수한 수화학 환경, 재료 상태, 응력 조건에 따라 응력부식균열(SCC, stress corrosion cracking), 입계부식(intergranular corrosion), 공식(pitting), 부식피로(corrosion fatigue) 등의 매우 다양한 부식 손상이 발생하는 것으로 보고되고 있다.<sup>1-5)</sup> 이러한 부식 손상은 증기발생기(SG, steam generator) 전열관의 경우, 1차측 냉각수가 2차측으로 누설되어 계통을

오염시키는 사고의 원인이 될 수 있으며, 심한 경우 전열관 파열사고<sup>6)</sup>를 유발하므로 발전소의 가동 안전성을 크게 위협하는 인자로 작용할 수 있다.

따라서, 각 발전소에서는 매 주기마다 증기발생기 전열관(steam generator tubing)에 대해 와전류 탐상 검사(ECT, eddy current test)와 같은 비파괴 검사를 실시하고 있으며, 이 자료를 근거로 전열관의 균열 결함을 검사하여, 손상이 발견될 경우 결함 크기 및 건전성 평가 결과에 따라 계획정비 기간 중 관막음(plugging)과 같은 보수 조치를 취하고 있다. 그러므로 와전류 탐상 검사의 신뢰성이 매우 중요한데, 그 신뢰성은 전열관의 결함을 탐지하고 그 크기를 측정하는 정확도에 달려있다. 이는 곧 균열 결함의 길이 및 깊이 제한치 등의 전열관 보수기준과 직결되기 때문에

† Corresponding author: kimsww@kaeri.re.kr

가동 안전성을 좌우하는 핵심 사안이 되고 있다.

비파괴 검사의 신뢰성을 개선하기 위해서는 실제 가동중 원전에서 발견된 자연균열을 포함한 전열관 건본이 다량 요구되지만, 충분한 건본 수량 확보가 매우 어렵고, 인출된 시편을 이용한 실험 도중 연구자의 피폭 문제 등의 한계가 있다. 따라서, 현재 비파괴 검사 신호의 민감도 측정 및 교정을 위하여 전열관 시편 표면에 방전가공(EDM, electric discharge machining)으로 모의 균열 결함을 만든 표준 시험편을 주로 사용하고 있다. 그러나 방전가공으로 제작된 모의 균열 결함은 틈이 최소 150  $\mu\text{m}$  이상이므로 탐지가 용이하나, 실제 자연균열 결함은 틈(opening)이 10  $\mu\text{m}$  이하로 매우 좁으며 입계를 따라 전파하는 특성이 있다. 그러므로 방전가공으로 제작된 모의 균열 결함의 경우 결함의 존재를 비파괴 검사로 쉽게 확인할 수는 있으나, 실제 자연균열 결함에서 취득되는 비파괴 신호 특성을 정확히 모사할 수 없는 단점으로 인하여 결함 평가의 신뢰성을 검증하고 개선하는데 한계를 갖고 있다<sup>7)</sup>. 따라서 실제 자연균열 결함과 유사한 특성을 가진 인공균열 결함을 고온/고압 환경에서 구현, 제작하는 기술 개발이 요구되고 있다.

증기발생기 전열관의 SCC와 같은 자연균열 결함을 모사하기 위해 다양한 실험실적 SCC 가속화 방법이 개발된 바 있다. 그 대표적인 기술로서, 예민화 열처리된 전열관의 내면 또는 외면의 일부를 상온에서 산성의 부식용액에 노출시키고, 전열관의 내부에 100 기압이상의 가스를 주입하여 전열관의 내면 또는 외면에 인장응력을 인가함으로써, SCC 결함 생성을 가속화하는 기술이다. 이 방법은 대략 1-4 주의 짧은 기간에 SCC 결함을 제작할 수 있다는 장점이 있으나, 산성의 부식환경에서 SCC 발생 민감도를 높이기 위해 전열관 재료를 예민화 열처리해야 하므로, 자연균열 결함과는 달리 SCC 결함 주위에 체적성 결함(volumetric defect)인 입계부식이 나타날 수 있고, 단일 균열이 아닌 다수 개의 균열들이 발생할 수 있으므로, 비파괴검사 신호를 왜곡할 가능성이 크고, 결함이 있는 전열관의 누설율과 파열 압력 실험결과에도 영향을 줄 수 있는 단점이 있다.

또 다른 SCC 가속화 방법으로서, 초고온 증기 분위기에서 SCC 생성을 가속화하는 기술이 개발된 바 있다. 그러나, 이 기술의 경우 전열관의 내면에 SCC를 생성시키기에는 유리하지만, 외면에 SCC를 생성시키기에는 적용하기 어려운 단점이 있다. 즉, 전열관 외면에 축방향 응력부식균열의 생성/성장을 가속화하기 위해서 부식환경인 초고온 증기분

위기에 전열관 외면이 노출되어야 하는데, 전열관 외면에 인장응력을 인가하기 위해서는 전열관 내부의 온도와 압력이 외부에 비해 높게 유지하여야 한다. 따라서 균열이 존재하는 전열관의 파열압력이 400  $^{\circ}\text{C}$  이상 고온에서 급격히 감소하는 특성을 고려할 경우, 고온 고압 설비 및 장치 설계의 어려움이 있다.

이러한 균열 가속화 기술과 더불어 전열관의 특정 지역에 다양한 크기를 갖는 단일 축균열을 인공적으로 제작하기 위해서는, 균열의 위치 및 형상을 제어할 수 있는 기술이 필요하다. 또한 다양한 깊이를 갖는 축균열을 제작하기 위해서는 균열의 깊이를 가속 실험 중 실시간으로 측정하는 기술 또한 필수적으로 개발되어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 다양한 크기를 갖는 단일 축균열 결함을 증기발생기 전열관 외면에 제작하기 위해서 균열의

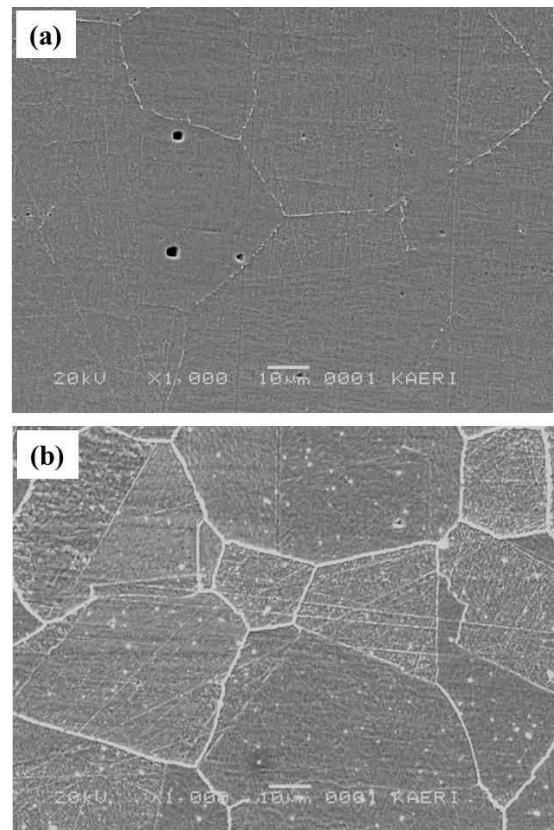


Fig. 1. SEM images of (a) as-received Alloy 600 HTMA SG tubing and (b) sensitized tubing at 600  $^{\circ}\text{C}$  for 30 h in nitrogen atmosphere, after a bromine etching in 2 % bromine and 98 % methanol solution.

Table 1. Chemical composition of Alloy 600 HTMA SG tubing

Elements	Ni	Cr	Fe	C	Si	Mn	Ti	Co	Cu	P
(wt%)	74.19	15.52	9.30	0.025	0.19	0.21	0.29	0.018	0.012	0.005

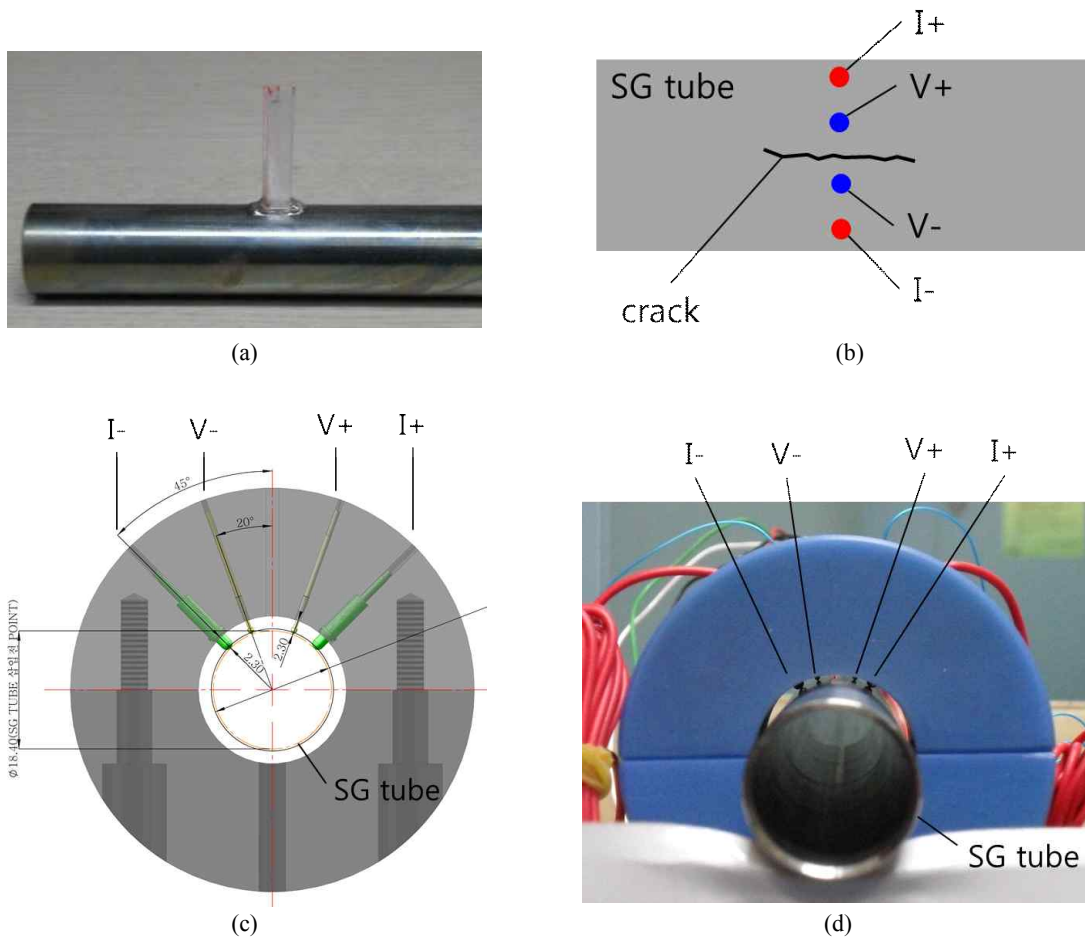
깊이를 실시간으로 측정하는 기술을 개발하였고, 이 기술을 이용하여 다양한 크기를 갖는 SCC 결함을 실험실적으로 제작하였다. 이를 위하여, 예민화 열처리된 Alloy 600 전열관의 외면에 산성의 부식 용액을 노출시켜 SCC 생성을 가속화하는 기술을 적용하였고, 가속화 실험 과정에서 DCPD (direct current potential drop) 방법을 사용하여 균열의 깊이를 실시간으로 탐지하는 기술을 적용하였다. 다양한 크기를 갖는 SCC 결함에 대하여 비파괴 검사를 통한 길이와 깊이 예측값과, 파괴 검사를 통한 실제값을 비교 분석하고, 최종적으로 가동중 원전의 증기발생기 전열관에서 발생하는 자연균열 결함을 실험실적으로 모사하여 제작하는 방법을 제안하였다.

## 2. 연구방법

결함 제작에 사용된 증기발생기 전열관은 Alloy 600 HTMA (high temperature mill annealed) 재료로서 주요

화학적분은 Table 1에 제시하였다. 상기 전열관은 상온에서 산성의 부식용액에 노출되었을 때 SCC 생성이 가속화되도록 600 °C에서 30 시간 동안 질소 분위기에서 예민화 열처리를 수행하였다. Fig. 1에서 예민화 열처리에 따른 Alloy 600 전열관 재료의 미세구조 변화를 도시하였다. Fig. 1(a)는 전형적인 Alloy 600 HTMA 재료의 미세구조 특성을 보이는데, 입계에 미세한 Cr 탄화물들이 불연속적으로 분포하고 있다. 이에 비해 예민화 열처리한 재료(Fig. 1(b))는 입계에 조대한 Cr 탄화물들이 다량 석출되었다. 이는 Alloy 600 HTMA 재료의 예민화 열처리시 나타나는 일반적인 현상으로서, 입계 주위의 Cr 농도가 결핍되고, 산성용액에서 SCC 생성이 가속화되는 것으로 알려져 있다<sup>8)</sup>.

예민화 열처리된 전열관 외면에 축균열을 생성시키기 위해서 시편의 특정 표면에 1 M Na<sub>2</sub>S<sub>4</sub>O<sub>6</sub> 부식용액을 노출시켰다. 입계부식과 같은 의도하지 않은 결함 생성을 방지하고, 단일 SCC 결함을 제작하기 위하여, 폭 0.5 mm의 슬릿 (slit)을 갖는 마스킹 테이프로 부식용액을 국부적으로 노출



**Fig. 2.** (a) Photograph of the SG tubing sample with a transparent plastic container for acid solution, (b) schematic drawing of a configuration of spring pins across a crack, (c) a fixture with spring pins for current and voltage probe for a DCPD measurement, and (d) photograph of the SG tubing sample equipped with the fixture.

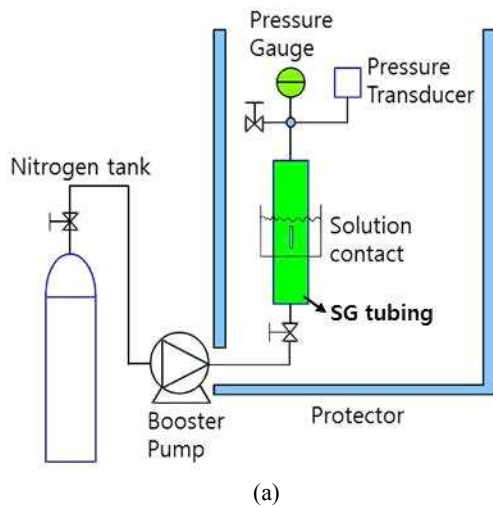


Fig. 3. (a) Schematic drawing and (b) photograph of the SCC fabrication facility.

시켰다. 이때 슬릿의 길이는 5, 10, 20 및 30 mm로 다양하게 제작하여 축균열의 길이를 제어하였다. 슬릿을 통해 부식용액이 시편 표면에 원활히 공급되기 위하여, Fig. 2(a)와 같이 투명 플라스틱 용기를 전열관의 표면에 부착하고, 내부에 부식용액을 주입하였다.

또한 다양한 깊이를 갖는 축균열을 제작하기 위해서 DCPD 방법을 적용하여 균열의 깊이를 실시간으로 측정하였다. DCPD 방법은 결함 주위에 전류를 인가하고 전압의 차이를 관찰하여 결함의 깊이를 측정하는 기술로서, ASTM (American Society for Testing and Materials) E647 절차서에 상세 사항이 수록되어 있다<sup>9)</sup>. 이 DCPD 방법은 일정한 전류가 흐르는 영역에서 균열이 발생하였을 때 전류 이동 단면적이 감소하므로, 이에 따른 저항 증가, 즉 전압 증가를 측정하고, 전압과 결함 크기의 상관관계식을 이용하여 결함 크기를 예측하는 방법이다 (Fig. 2(b)). 이를 위하여 기존에는 전류 인가 및 전압 측정용 도선을 시편의 표면에 용접하는 방법을 사용하고 있는데, 용접법은 전열관의 표면을 손상시켜 비파괴 검사 신호의 왜곡을 가져올 수 있으므로, 본 연구에서는 비용접식 접촉 방법을 적용하였다. Fig. 2(c) 및 (d)와 같이 전류 인가 및 전압 측정을 위한 단자들이 장착된 치구(fixture)를 설계 제작하였고, 이 단자들은 스프링 장력에 의해 접촉력을 유지하는 스프링 핀이다. 특히 전류 인가 단자의 경우 최대 5A까지 흐를 수 있도록 접촉 전기저항을 최소화하여 설계하였다. 치구의 내부에 전열관 시편을 삽입, 고정한 후, 부식용액 노출면의 양측에 +5 A와 -5 A의 전류를 순차적으로 인가하며 전압 차이를 측정하였다. 상기 전류는 균열의 길이 변화를 측정하기 위하여 실시간으로 인가되며, 이때 균열 양 저항의 증가로 인한 전압 차이는 통상 수 mV 정도로서 부식 반응에는 큰 영향을 주지 못하므로 균열 발생 및 성장에는 기여하지 않는다. 또한 균

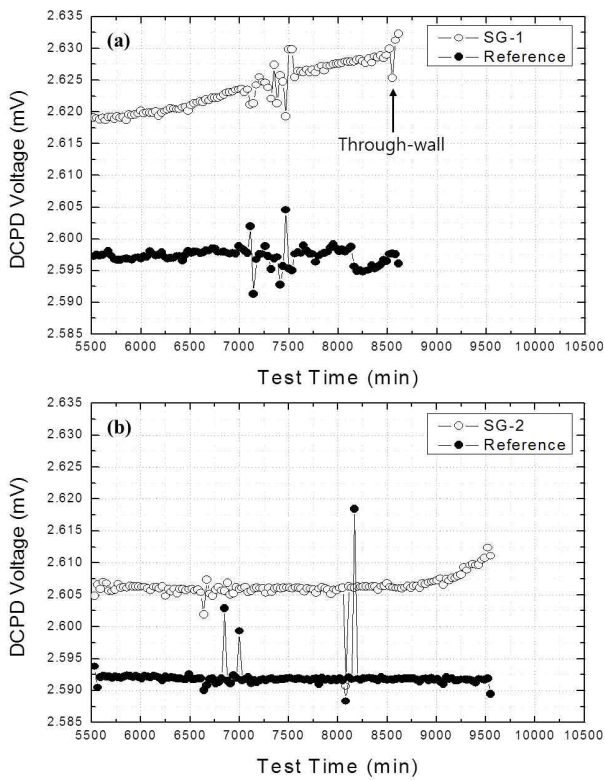
열 성장에 따른 전압 상승을 관찰하기 위하여, 균열이 없는 일반 전열관 시편이 전압 변화를 DCPD 방법으로 동시에 적용하였는데, 균열이 없는 일반 전열관 시편의 전압 변화는 표준 편차 1nV 정도의 오차를 가질 정도로 매우 정밀하다.

본 연구에서 개발된 축균열 제작 장치의 개략도 및 사진을 Fig. 3에 제시하였다. 전열관을 장치에 장착한 후 부스터(booster) 펌프를 이용하여 전열관의 내부에 14MPa의 압력으로 질소 가스를 충전함으로써 전열관 외부 표면에 인장 방향의 원환(circumferential) 응력을 인가하였다. 결함 제작중 전열관 시편의 내압 변화를 관찰하여 SCC 결함의 관통 유무를 판정하였다.

결함 제작 실험이 종료된 후, 축균열이 제작된 전열관 시편을 인출하여 축균열의 생성 유무를 ECT 방법으로 검사하였다. ECT 검사는 인출된 전열관 시편의 내부에 MRPC (motorized rotating probe coil) 탐촉자를 삽입하여 수행하였고, 결함지시가 발견되면 그 길이와 깊이를 평가하였다. ECT 검사 조건은 탐촉자의 회전수 300 rpm, 검출 주파수 300 kHz 였으며 시험속도는 5.08 mm/s 였다. 축균열 결함의 길이와 깊이는 파괴 검사를 통해 검증하였는데, 축균열을 파단시킨 후 SCC 파면을 주사전자현미경(SEM, scanning electron microscopy)으로 관찰하였다.

### 3. 연구결과 및 고찰

축균열이 제작된 전열관 시편 SG-1 및 2의 SCC 결함 제작 과정에서 측정한 DCPD 전압의 변화를 Fig. 4에 도시하였다. SG-1 시편의 경우 약 8,500 분(5.9 일) 동안 산성 부식 용액에 노출시켜 관통 균열로 제작하였다. 관통 균열의 여부에 대한 일차적인 판단은, 결함 제작 과정 중 전열관 내부에 충전된 질소가스가 균열이 관통됨에 따라 누설되어



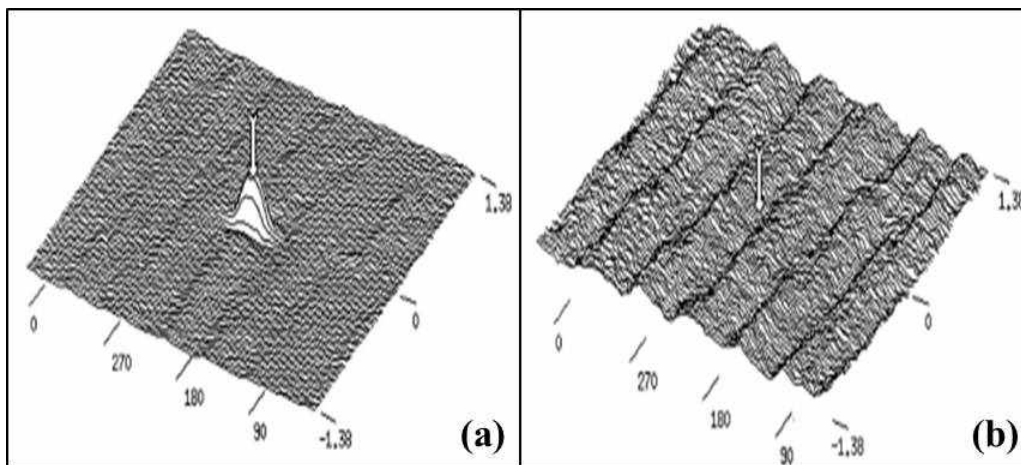
**Fig. 4.** Change in the DCPD voltage during the SCC fabrication test measured from (a) SG-1 and (b) SG-2 samples.

부식용액이 주입된 투명 용기내에서 기포가 발생하는 것으로부터 탐지하였다. Fig. 4(a)와 같이 결함이 없는 표준 시편에서 얻어지는 DCPD 전압 상승에 비해, SG-1 시편은 결함이 관통됨에 따라 약 10 nV의 DCPD 전압 상승이 관찰되었고, SCC 결함이 전열관 외면에 개시됨에 따라 DCPD 전압 상승이 시작된다고 가정할 경우, 균열 개시후 1-2 일

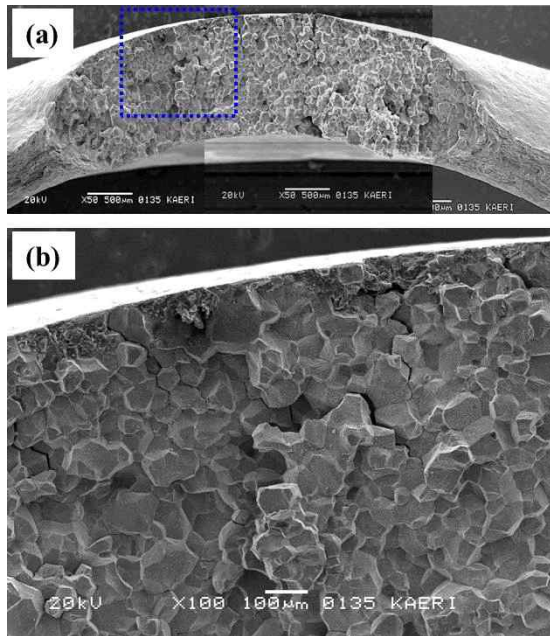
이내에 관통 균열로 성장한다는 것을 알 수 있었다. 상기 결과를 바탕으로, SG-2 시편은(Fig. 4 (b)) 9,500 분(6.6 일) 이후에 약 5 nV의 DCPD 전압 상승이 관찰되었을 때 임의로 실험을 중단하여, 미관통 결함을 제작하고자 하였다. SG-2 시편의 경우 실험 도중 투명 용기내에서 기포가 발생하지 않았으며, 이로부터 미관통 균열일 것으로 예상되었다.

SG-1 및 2 시편들의 외면에 생성된 균열의 관통 여부를 확인하기 위해 ECT 검사를 수행하였고, 그 결과를 Fig. 5(a)와 (b)에 각각 도시하였다. 관통 균열이 생성되었을 것으로 예상되는 SG-1 시편은 Fig. 5(a) (signal amplitude span: 59)와 같이 0.8 V의 높은 진폭을 갖는 결함 지시가 발견되었다. 미관통 균열이 생성되었을 것으로 예상되는 SG-2 시편은 Fig. 5(b)와 같이 결함 지시가 검출되지 않았다. 이는 상기 실험 조건에서 결함이 생성되지 않았거나, 통상적인 ECT 검출 한계보다 작은 크기의 SCC 결함이 생성되었기 때문으로 예측할 수 있다.

SG-1 및 2 시편의 실제 균열 길이 및 깊이를 측정하기 위해 축균열을 파열 시킨 후 파면을 SEM을 통해 관찰하였다. 균열은 파열 시험 시 Fig. 6(a)와 같이 소성 변형을 하게 되므로, 이를 고려하여 균열 길이는 전체 파면중 입계를 따라 성장하는 특성을 보이는 SCC 파면의 양단간 직선거리로 계산하였다. SG-1 시편의 SEM 파면 분석결과(Fig. 6(a)), 균열의 길이는 약 4.76 mm, 최대 깊이는 1.02 mm로서 100 % 관통 균열임을 확인하였다. Fig. 6(b)는 SG-1 시편의 파면에 대한 고배율 SEM 사진으로, 결함은 전형적인 입계 형태를 가지는 SCC 결함으로 확인되었다. SG-2 시편은 축균열 결함 제작시 측정된 DCPD 전압 및 ECT 검사 결과로부터 미관통 균열일 것으로 예상되었는데, Fig. 7의 파면 분석결과에서 균열의 깊이는 0.1-0.2 mm 로 관



**Fig. 5.** C-scan plots of (a) SG-1 tubing sample with signal amplitude span of 59 and (b) SG-2 tubing sample with signal amplitude span of 14, measured by ECT with MRPC probe at 300 kHz.

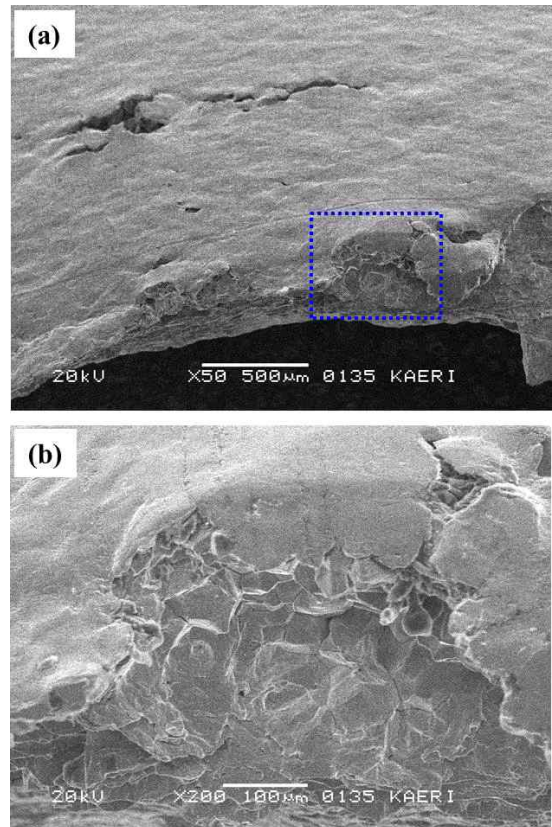


**Fig. 6.** SEM images of the fractured surface of (a) total area of SCC defect on SG-1 tubing sample, and (b) magnified area marked by dotted rectangle.

열 개시 초기 단계인 것으로 나타났으며, 부식용액에 노출된 표면에서 하나가 아닌 여러 개의 미세 균열이 개시되었다. 균열의 크기에 대한 ECT 검출능을 고려할 때, Fig. 5(b)에서 도시한 바와 같이 ECT 검사에서는 균열 개시 초기 단계의 결함이 발견되지 않은 것으로 판단되었다.

전열관 시편 SG-1 및 2의 축균열 결함 제작 및 분석 결과를 바탕으로, 다양한 크기를 축균열 결함을 제작하였다. 본 연구에서 목표 균열 길이가 5 및 10 mm일 경우, 결함 제작 시 DCPD 방법을 적용하여 균열의 깊이를 실시간으로 모니터링 하였지만, 20 및 30 mm 길이의 균열의 경우 DCPD 단자 설치의 어려움으로 이를 적용하지 않았다. 축균열 결함 전열관 제작후 ECT 검사를 수행하였고, 파괴 검사를 통하여 실제 균열의 길이 및 깊이를 측정하였다. 그 결과는 Table 2에 정리하여 나열하였다.

파괴검사를 통해 측정된 목표 균열 길이 대비 실제 균열의 길이 분포를 Fig. 8에 도시하였다. Fig. 8(a), (b), (c)와 같이, 목표 균열 길이를 5, 10 및 20 mm로 제작된 전열관들에서 실제 균열의 평균 길이는 각각 5.7, 8.1 및 19.5 mm, 표준편차는 모두 1.6 mm 이내로 목표치와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그에 비해 목표 균열 길이를 30 mm로 제작된 전열관 시편들에서 실제 균열의 길이는, Fig. 8(d)에 도시한 바와 같이, 평균값 26.0 mm, 표준편차 5.9 mm로 목표 균열 길이에 비해 다소 차이가 크게 나타났다. 이 전열관 시편들의 일부에서 단일 SCC 결함이 아닌 다중 결함이 축 방향으로 나란하게 개시되어 성장하면서 교차됨을 SEM 파



**Fig. 7.** SEM images of the fractured surface of (a) total area of SCC defect on SG-2 tubing sample, and (b) magnified area marked by dotted rectangle.

면 분석을 통해 알 수 있었으며, 이로 인하여 목표치에 비해 실제 균열 길이가 차이나는 것으로 판단되었다.

증기발생기 전열관 시편의 외면에 축균열 결함 제작시 실시간으로 측정된 DCPD 전압 상승값과 파괴 검사를 통해 실제 측정된 균열의 깊이 관계를 Fig. 9에 도시하였다. DCPD 상승값이 약 10 nV 이상일 경우 SCC 결함은 관통 균열로 성장하는 것을 확인할 수 있으며, 미관통 균열을 제작하기 위해서는 DCPD 상승값을 7 nV 이내로 제어해야 함을 알 수 있었다. 이와 같이 본 연구에서 개발된 SCC 결함 제작 방법은, 균열의 길이를 제어하기 용이하며, 관통 균열과 미관통 균열을 구분하여 제작할 수 있는 장점이 있었다. 다만, 실제 실험에서 축균열 개시 이후 1-2 일 이내에 관통 균열로 빠르게 성장하고, 시편간의 편차를 고려할 때, 미관통 축균열의 깊이를 다양하게 제어하기는 어렵다는 것을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 다양한 크기를 갖는 단일 축균열 결함을 증기발생기 전열관 외면에 제작하기 위한 기술을 개발하였

**Table 2. Specifications and test results from SG tubing samples with SCC defect**

Specimen number	Target length (mm)	DCPD voltage (nV)	ECT	Destructive analysis	
			RPC (V)	Length (mm)	Depth (%)
SG-1	5	10	0.80	4.76	100
SG-2	5	5	ND	0.5	20
SG-3	5	15	0.84	5.32	100
SG-4	5	10	0.45	5.39	100
SG-5	5	8	0.65	5.75	100
SG-6	5	19	NA	5.79	100
SG-7	5	32	0.75	7.59	100
SG-8	5	6	0.37	4.58	87
SG-9	5	23	1.05	6.06	100
SG-10	5	15	0.83	5.72	100
SG-11	5	8	1.27	6.09	100
SG-12	5	10	0.56	5.7	100
SG-13	5	6	0.56	5.25	100
SG-14	5	22	1.09	7.11	100
SG-15	5	14	0.79	6.3	100
SG-16	5	22	NA	6.56	100
SG-17	5	7	NA	5.72	86
SG-18	10	17	0.60	6.87	100
SG-19	10	15	1.23	7.29	100
SG-20	10	11	NA	7.69	100
SG-21	10	29	NA	8.67	100
SG-22	10	21	NA	9.99	100
SG-23	20	NA	NA	19.15	100
SG-24	20	NA	NA	19.43	100
SG-25	20	NA	NA	17.67	100
SG-26	20	NA	NA	21.98	100
SG-27	20	NA	NA	19.08	100
SG-28	30	NA	NA	19.15	100
SG-29	30	NA	NA	29.09	100
SG-30	30	NA	NA	29.76	100

ND : Non detectable  
 NA : Non available

다. 예민화 열처리된 전열관 시편의 표면에 산성의 부식용액을 노출하여 SCC 생성을 가속화하였는데, DCPD 방법 및 부식용액 노출 면적 제어를 통하여 다양한 길이와 깊이를

갖는 축균열을 제작하였다. DCPD 방법을 통하여 실시간으로 측정된 축균열의 발생 유무와 균열의 크기 정보는, 축균열 제작 후 인출한 전열관 시편에 대한 ECT 검사를 통한

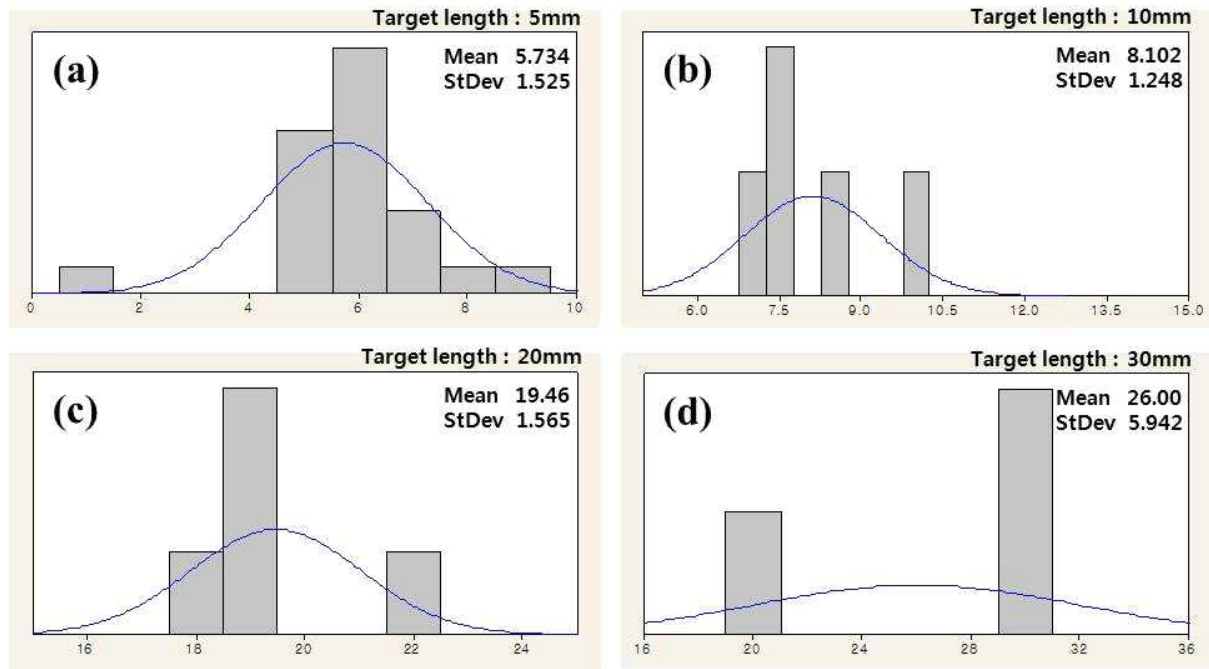


Fig. 8. Distribution of crack length measured by destructive test for SG tubing samples exposed to an acidic solution on the surface area with the length of (a) 5 mm, (b) 10 mm, (c) 20 mm, and (d) 30 mm.

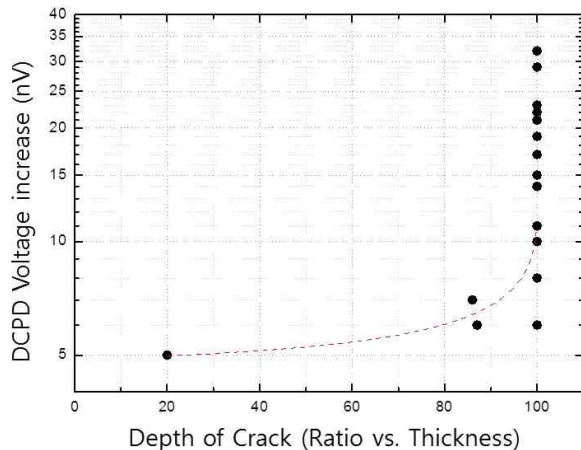


Fig. 9. Plot of the DCPD voltage increase vs. depth of SCC in the SG tubing samples measured by destructive test.

균열 크기 평가 결과, 그리고 시편의 파괴 검사를 통한 파면 분석 결과와 비교하였다. 비교 분석 결과, 본 연구에서 개발된 균열 제작 방법은 축균열의 길이는 전반적으로 잘 제어할 수 있으며, 깊이는 관통 결함과 미관통 결함을 구분할 수 있는 것으로 나타났다. 다만, 균열의 길이가 30 mm 이상으로 큰 경우 다중 결함의 생성으로 균열 길이 제어가 어려웠으며, 미관통 균열의 경우 다양한 깊이 제어의 한계가 있음을 알 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 미래창조과학부의 원자력기술개발사업의 일환으로 수행되었고, 일부 산업통상자원부의 원전기술혁신 기술개발사업의 지원을 받았으며 이에 감사를 드립니다.

### References

1. S. S. Hwang, H. P. Kim and J. S. Kim, *Corrosion*, **59**, 821 (2003).
2. S. W. Kim and H. P. Kim, *Nucl. Eng. Technol.*, **41**, 1315 (2009).
3. D. J. Kim, H. W. Kim and H. P. Kim, *Corros. Sci. Tech.*, **10**, 118 (2011).
4. S. W. Kim and H. P. Kim and S. S. Hwang, *Corros. Sci. Tech.*, **12**, 85 (2013).
5. Y. J. Lee, S. W. Kim, H. P. Kim and S. S. Hwang, *Corros. Sci. Tech.*, **12**, 93 (2013).
6. P. E. MacDonald, V. N. Shah, L. W. Ward and P. G. Ellison, *Steam Generator Tube Failures*, (NUREG/CR-6365), U.S.NRC (1996).
7. D. H. Hur, M. S. Choi, D. H. Lee and J. H. Han, *J. Korean Soc. Nondest. Test.*, **20**, 451 (2000).
8. R. Bandy, R. Roberge, and R. Newman, *Corrosion*, **39**, 391 (1983).
9. American Society for Testing and Materials, E 647 *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*, ASTM International (2013).