

SG Tube 축방향 노치 균열의 정량적 EC 신호평가

Quantitative EC Signal Analysis on the Axial Notch Cracks of the SG Tubes

민경만*[†], 박중암*, 신기석**, 김인철**

Kyong Mahn Min*[†], Jung Am Park*, Ki Seok Shin** and In Chul Kim**

초 록 원자력발전소의 1차측 및 2차측 냉각계의 장벽 역할을 하는 핵심 설비중 하나인 증기발생기(steam generator, SG) 전열관은 공공의 사회적 안전성과 효율적인 발전 용량을 유지하기 위해 구조적 건전성을 유지하여야 한다. 또한 결함을 함유하고 있는 전열관은 해당결함을 조기에 검출, 정량적으로 결함을 평가하여 필요한 경우에는 보수조치를 수행하여야 한다. 이러한 결함의 검출 및 정량화를 위해서 검사관련 고시 및 강화된 SG 관리프로그램(SGMP)에 근거하여 와전류탐상검사법(eddy current testing, ECT)을 적용, 검사를 수행하고 있다. SG 전열관에서 검출되고 있는 결함중 응력부식균열(stress corrosion cracking, SCC)은 미세한 경우 결함의 검출이 어려울 뿐 아니라 생성된 결함의 성장속도가 빠르기 때문에 SG 전열관의 건전성을 위협하는 주요 결함 기구중 하나로 분류하고 있다. 본 논문에서는 다양한 결함 깊이 및 길이별로 방전가공(electric discharge machining, EDM)된 축방향 ODSCC에 대해 pancake, +point 및 shielded pancake 코일 등이 탑재된 3 coil 형태의 +PT MRPC(motorized rotating pancake coils)를 적용하여 결함의 검출가능 여부 및 크기 측정을 위한 검사를 수행하였으며 본 실험결과를 통해 SG 전열관의 건전성 및 원전 운전의 안전성을 진단하는 공학적 평가 자료로서의 활용 가능성 뿐 아니라 와전류탐상검사의 신뢰도 향상을 도모하고자 하였다.

주요용어: 증기발생기, 와전류탐상검사, 축방향 응력부식균열, MRPC

Abstract Steam generator(SG) tube, as a barrier isolating primary to the secondary coolant system of nuclear power plants(NPP), must maintain the structural integrity for the public safety and its efficient power generation capacity. And SG tubes bearing defects must be timely detected and taken repair measures if needed. For the accomplishment of these objectives, SG tubes have been periodically examined by eddy current testing(ECT) on the basis of administrative notices and intensified SG management program(SGMP). Stress corrosion cracking(SCC) on the SG tubes is not easily detected and even missed since it has lower signal amplitude and other disturbing factors against its detection. However once SCC is developed, that can cause detrimental affects to the SG tubes due to its rapid propagation rate. Accordingly SCC is categorized as prime damage mechanism challenging the soundness of the SG tubes. In this study, reproduced EDM notch specimens are examined for the detectability and quantitative characterization of the axial ODSCC by +PT MRPC probe, containing pancake, +PT and shielded pancake coils apart in a single plane around the circumference. The results of this study are assumed to be applicable for providing key information of engineering evaluation of SCC and improvement of confidence level of ECT on SG tubes.

Keywords: Steam Generator, Eddy Current Testing, Axial Stress Corrosion Cracking, MRPC

1. 서론

SG 전열관의 내·외면에 나타나는 결함은 매우 다양하며 크게 전열관 2차축 지지 구조물 또는 이 물질 등과 전열관 간의 상대적인 진동에 의해 형성되는 마모결함과 같은 체적성(volumetric) 결함과 전열관 2차축의 화학적 부식 분위기와 해당 영역에 대한 국부적인 응력집중에 의한 SCC 등으로 분류할 수 있다. 이중 SCC는 결함발생 초기에는 작은 신호진폭(amplitude)이 나타나며 이후 급격한 성장속도를 가짐으로써 SG 전열관의 건전성에 악영향을 끼치게 된다. 특히 결함의 성장속도 및 전열관의 구조적 안전성은 결함의 깊이 및 방향성과 밀접한 관련이 있다. SCC 중 축방향 균열의 경우 결함의 길이를 정량적으로 측정, 그 결과를 기준으로 별도의 보수기준을 적용하고 있으므로 결함 길이에 대한 정량적인 측정은 매우 중요하다[1]. 따라서 본 논문에서는 EDM에 의해 전열관 외면에 축방향으로 노치결함을 가공하여 axial ODSCC 결함을 모사하였으며 이들 결함에 대한 와전류신호평가를 통해 이미 형성된 또는 잠재성을 갖고 있는 균열결함에 대한 검출능을 향상시키고 아울러 정량화를 통해 SG 전열관의 구조 건전성 및 안전성을 평가할 수 있는 공학적 해석의 자료를 제공하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1. 시편 제작

검사에 적용한 시편은 Inconel 600 MA재질의 전열관으로써 현재 국내 가동중 원전의 SG 전열관과 동일한 재질이며 전열관 외경 및 두께가 각각

0.875 및 0.05인치이다. 그리고 확관 천이부에 존재하는 결함에 대한 검출능과 정량적인 결함의 크기 측정을 위해 각각 확관시편과 무확관시편 등 2종류 시편 외면에 축방향 ODSCC를 모사한 EDM 노치를 가공하였다. 결함은 약 200 μm의 폭으로 관벽 두께 대비 25, 50, 75 및 100%의 결함을 축방향으로 2, 4, 6, 8 mm 사양으로 가공하였다. 또한 결함 길이 증가에 따른 와전류 신호의 진폭변화 경향을 관찰하기 위해 100%결함에 대해서 추가적으로 10, 12, 14, 16 mm 까지 그 길이를 확대하여 가공하였다. Fig. 1은 이번 실험에 적용한 확관 및 무확관시편들의 사진을 나타낸 것이다.

2.2. 신호 수집 및 평가

와전류 신호 수집을 위한 주파수 발전장비 및 소프트웨어는 미국 Zetec사 제품인 MIZ-30 RDAU 및 Eddyner 11i를 사용하였으며, 탐촉자는 MRPC를 적용하였다. MRPC 탐촉자는 unshielded pancake (P115A), +PT(PP11A) 및 shielded high frequency pancake(SB080B) 코일 등 3개의 코일이 동일 평면에 원주방향으로 120°단위로 탑재되어 있다. 탐촉자의 주요 사양 및 실제 사진[2]은 Fig. 2에 나타내었으며 본 실험에 적용한 검사주파수를 비롯한 세부적인 사항은 Table 1에 나타낸 바와 같다.

본 실험에서 적용하고 있는 신호수집의 세부조건 및 검사시스템은 현재 가동중인 국내의 원전 SG 전열관 ECT에 적용하고 있는 검사 기준과 동일하며, 신호수집 및 평가를 수행하기 위한 신호 보정은 EPRI PWR SG Examination Guidelines Rev. 6에서 제시하는 ETSS(examination technique specification sheet)를 기준으로 작성된 (주)유엠아이 검

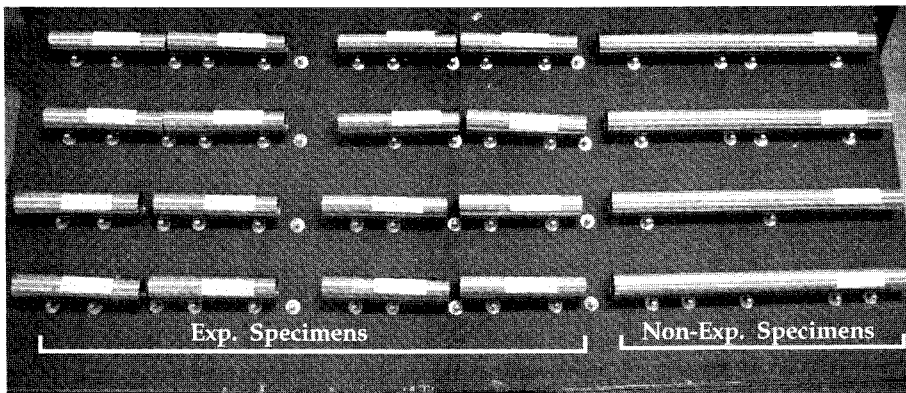


Fig. 1 EDM OD axial notch specimens

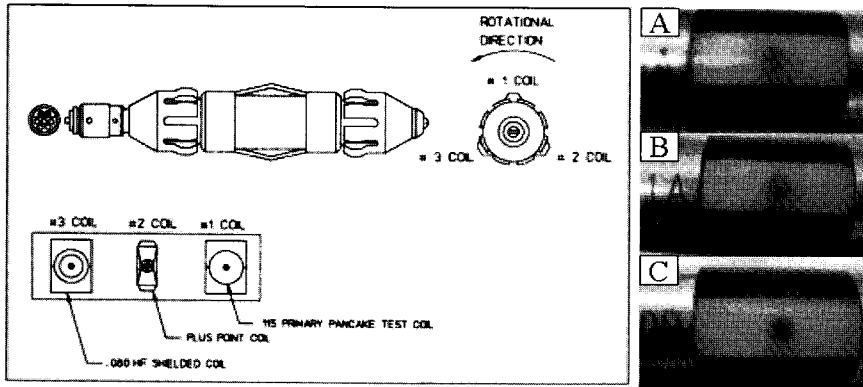


Fig. 2 Configurations of 3-coil +PT MRPC
(A : unshielded pancake, B : +PT, C : shielded pancake coil)

Table 1 Specific conditions of EC data acquisition

Data Acq. Apparatus & Proc.		Data Acq. Parameters	
Freq. Generator	MIZ-30 RDAU	Applied Freq.(kHz)	400,300,100,20,700
Acq. Software	Eddynet 11i	Probe	+PT-720-3C
Push_puller	PM1, 4D	Motor Unit	610-9D
Procedure	UMI-NDT-800-2	Test Speed	500RPM, 0.2IPS
Work Station	HP B2600	Sample Rate	1391Sample/Sec

사절차서(UMI-NDT-800-2)를 적용하였다.

한편 EDM 노치 결함에 대한 검출능을 고찰함과 아울러 정량적인 결함의 크기 측정을 위한 신호평가 기본 주파수는 +PT 및 pancake 코일의 최적주파수인 300 kHz를 적용하였다. 특히 결함의 크기를 정량화하기 위하여 각 결함에 대해 300 kHz pancake 채널인 4번에서 펄스별로 위상각과 진폭을 측정하였으며, 이 중 위상각은 결함의 내·외면을 판단하는 기준으로 활용하였다.

3. 실험 결과

3.1. 균열결함의 검출능

다양한 길이 및 깊이를 갖는 EDM 노치 결함에 대한 +PT MRPC 탐촉자를 적용하여 결함의 검출능과 검출한계를 고찰하였다. 특히 확관 천이부와 같은 기하학적 형상변화가 나타나는 위치에서 이로 인한 잡음신호의 영향을 고려하기 위해 기계식 확관후 천이부에 결함을 가공하여 결함 깊이별, 길이별 균열결함에 대한 평가를 수행하였다.

25%의 깊이를 갖는 2 및 4 mm 길이의 결함시편

은 결함의 검출이 거의 불가능 하였다. 이러한 이유는 표피효과에 의한 결함위치에서의 와전류 밀도의 감쇄와 더불어 짧은 결함 길이 때문인 것으로 판단된다[3]. 그러나 같은 깊이를 갖는 6 mm 이상의 결함인 경우에는 리사쥬(Lissajous) 윈도우에서는 결함신호가 명확히 구분되지 않았으나 c-scan에서는 결함 신호의 검출이 가능했다. C-scan은 결함의 방향성을 보다 명확히 2차원적으로 각 펄스에 대해 나타내므로 균열성 결함에 대한 검출시 주로 활용된다. 한편 확관 천이부의 영향을 배제한 무확관 시편의 경우 보다 상대적으로 명확한 리사쥬 및 c-scan 신호가 나타났다. 결함의 검출은 pancake 및 +PT 코일에 의해서 검출되고 정량화되는데 일반적으로 결함의 검출능은 pancake 코일에 비해 +PT 코일이 우수한 것으로 알려져 있다. +PT 코일은 두개의 코일이 각각 원주방향과 축방향으로 차동식(differential)으로 감겨져 하나의 쌍을 이루는 양방향성(bi-directional)을 띄고 있다[4]. 이러한 코일 특성으로 인해서 결함의 검출능이 우수할 뿐 아니라 결함의 방향성에 대한 판별 또한 용이하다.

한편 50% 이상 깊이의 결함시편은 결함길이에 상관없이 pancake 및 +PT 코일에서 결함의 검출이

가능했을 뿐 아니라 결함의 크기를 정량화 할 수 있는 결함의 진폭 및 위상각 측정이 가능하였다. 다음 Fig. 3 및 4는 각각 6 mm 길이의 25 및 50% 깊이 결함에 대한 EC 그래픽(Lissajous 및 c-scan)을 나타낸 것이다. 이중 A 및 B는 각각 확산시편의 pancake 및 +PT 코일 신호이며, C 및 D는 각각 무확관시편의 pancake 및 +PT 코일 신호이다.

3.2. 균열결함 깊이별로 길이에 따른 진폭측정 결과

3.2.1. 50 및 75% 깊이 결함 시편의 결함 길이별 진폭 측정

각 결함에 대한 pancake 코일의 각 펄스별 신호 진폭을 측정함으로써 결함의 길이를 보다 정량적으로 나타내고자 확산판부가 없는 결함 시편중 결함의 검출이 가능하고 결함 신호의 진폭 측정이 가능한 50% 이상의 결함 깊이를 갖는 시편에 대해서 결함 길이별(2, 4, 6, 8 mm)로 결함신호의 진폭을 측정하였다. 이 결과 같은 50%의 결함깊이를 갖는 시편임에도 불구하고 결함의 길이가 긴 시편일수록 평균 진폭값이 크게 나타났다[5]. 각 펄스별 신호 진폭값의 증감경향을 보면 결함 길이 방향으로 진

폭값이 증가하거나 감소하지 않는 거의 일정한 값을 나타내는 4 mm 결함 시편을 중심으로 2 mm 시편은 결함의 중심 펄스에서 신호의 진폭이 뚜렷이 감소하는 현상이 나타난 반면 6 및 8 mm 시편은 오히려 결함의 중심 펄스에서 최대 진폭을 나타내는 결과를 얻을 수 있었다.

일반적으로 시험체에 흐르는 와전류의 흐름은 이에 여기된 자장의 영역에 제한되며 이는 검사코일의 크기(geometry)의 함수로 표현될 수 있으며 결함에 대한 민감도(sensitivity)는 검사 코일의 직경과 밀접하게 관련이 있다. 아울러 결함을 검출하고 이를 나타내기 위해서는 최소한 코일의 직경은 예상되는 결함의 길이보다 같거나 작아야 한다[6]. 본 실험에 적용된 pancake 코일의 직경은 약 2.9 mm 이므로 2 mm 결함에 대해서는 코일직경의 범위 안에 있으므로 결함성분만을 충분히 나타낼 수 없으며, 실제 검사코일의 직경보다 작은 결함은 코일의 중심에 위치할 경우 진폭값은 최소가 되는 것으로 알려져 있다[7]. 한편 75% 결함 시편에 대한 신호진폭 측정결과 50% 결함시편과 유사한 신호의 진폭 증가 경향을 나타내었으나 각 펄스별 신호진폭은 50%에 비해 상대적으로 크게 나타났다. 이러한 이유는 결함의 깊이가 증가됨에 따라 와전류의

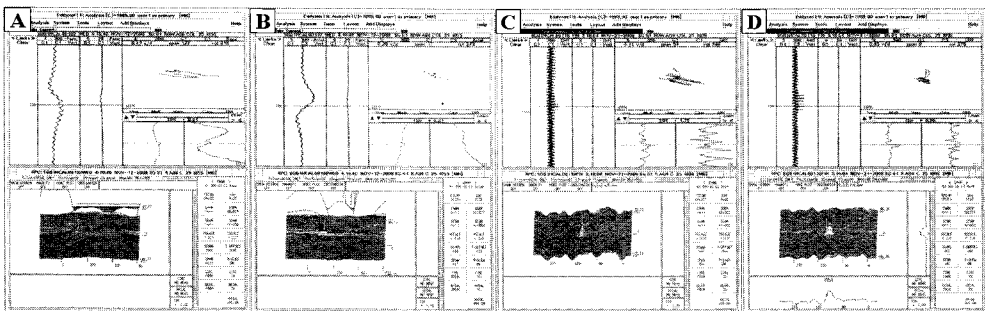


Fig. 3 Lissajous and c-scan signals of 25%, 6mm axial OD EDM notch

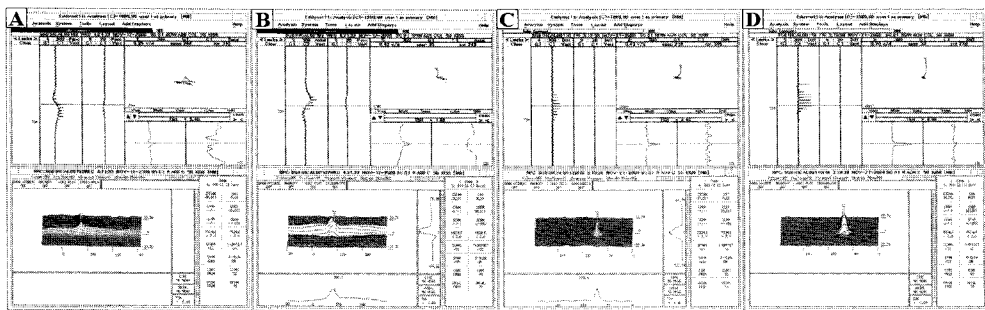


Fig. 4 Lissajous and c-scan signals of 50%, 6mm axial OD EDM notch

흐름을 방해하는 저항 성분이 증가되어 임피던스 값이 커지게 되고 결국 신호진폭 값의 증가가 나타나기 때문인 것으로 판단된다. 또한 위에서 설명한 코일직경과 결합의 크기와의 상관관계는 탐촉자와 접촉한 표면이 개방된 결합에 대한 것이므로 50 및 75% OD 결합에 대해 본 실험결과를 반영할 경우 결합의 최소 유효길이는 코일의 직경보다 더 길어야 할 것으로 예상된다. Fig. 5 및 6은 각각 50 및 75% 깊이를 갖는 결합시편의 결합 길이별 진폭값을 측정된 결과를 나타낸 것이다.

3.2.2 100% 관통결합 시편의 결합 길이별 진폭 측정(1)

100% 관통 결합에 대한 각 펄스별 신호진폭 측정결과를 분석한 결과 50 및 75% 결합 시편에서 보여준 신호진폭의 변화경향과는 다르게 나타났다. 결합 길이별(2, 4, 6, 8 mm)로 pancake 코일신호의 크기를 측정된 결과 건전부에서 균열결합의 선단으로 갈수록 진폭이 증가한 후 임의의 펄스에서 최대 진폭값을 나타낸 후 신호진폭이 결합 길이방향의 중심부로 갈수록 감소하였으며 이후 서서히 증가하여 진폭값이 회복된 후 감소하는 전형적인 대칭형

의 새들(saddle)모양을 나타내었다. 그리고 결합의 길이가 증가할수록 중심부에서의 진폭값의 기울기는 완만해 지는 현상이 나타났다. 결합 길이별 진폭변화 경향의 원인을 살펴보면 2 mm 결합시편의 경우 앞서 3.2.1절에서 나타난 바와 같이 결합의 길이가 코일의 직경에 비해 작기 때문인 것으로 판단되나 이보다 긴 결합인 경우에도 결합의 중심부에서 신호진폭 감소현상이 나타나는 것과 결합이 길어짐에 따라 완만해 지는 현상은 이와는 다른 원인에 기인하는 것으로 판단된다.

결합의 길이가 증가함에 따라 진폭값의 변화 기울기가 결합의 중심부에서 완만해지는 현상은 결합 길이에 대한 검사코일의 유효감지영역(effective sensing area)과 관련이 있으며 이는 V. S. Cecco 등이 표면이 개방된 plate형태의 결합시편에 대한 실험결과 얻은 다음의 식을 통해 확인할 수 있었다[6].

$$D_{eff} = D_c + 4\delta \tag{1}$$

여기서 D_{eff} 는 검사 코일의 유효 직경(effective diameter), D_c 는 검사 코일의 직경, δ 는 표준 침투 깊이(standard depth of penetration)를 나타낸다. 위 (1)식에 본 실험에서 적용한 300 kHz에 해당하는 $\delta(=0.91 \text{ mm})$ 와 D_c 를 대입하면 검사 코일의 유효 직경, D_{eff} 는 약 6.6 mm가 된다. 따라서 본 실험 결과 8 mm이상 길이의 결합 시편에서 결합 중심부 진폭값의 변화 기울기가 완만해 지거나 다소 포화되는 경향이 나타난 원인은 검사 코일의 유효 감지 영역을 나타내는 D_{eff} 에 기인하는 것임을 알 수 있었다. Fig. 7은 100% 깊이를 갖는 결합 시편의 결합 길이별(2, 4, 6, 8 mm) 진폭 측정 결과를 나타낸 것이다.

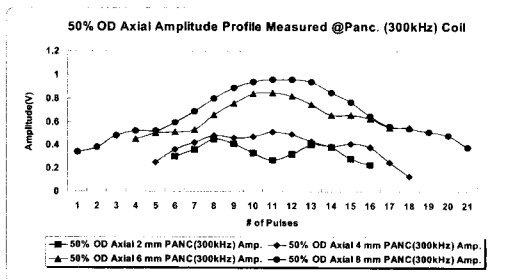


Fig. 5 The amplitude profile of 50% OD axial notch (measured @ 300 kHz pancake coil)

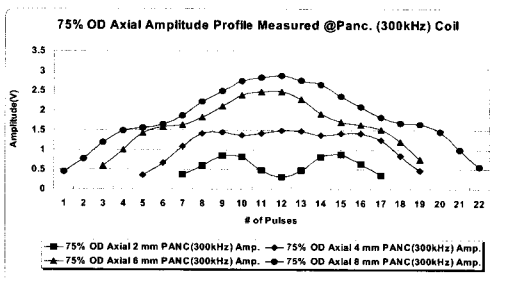


Fig. 6 The amplitude profile of 75% OD axial notch (measured @ 300 kHz pancake coil)

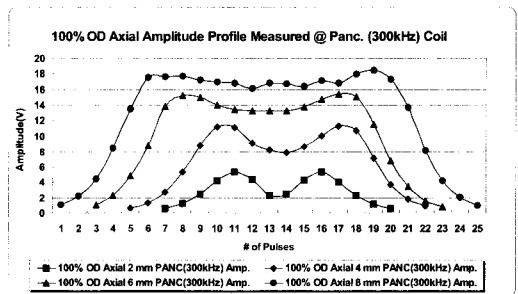


Fig. 7 The amplitude profile of 100% OD axial notch (1) (measured @ 300kHz pancake coil)

3.2.3 100% 관통결함 시편의 결함 길이별 진폭 측정(II)

탐촉자 유효감지영역에 대한 정량적인 진폭측정을 위해 추가적으로 10, 12, 14 및 16 mm의 100% 축방향 결함을 가공하여 각 결함의 펄스별로 진폭을 측정하였으며 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 앞의 3.2.2항의 식 (1)의 결과에 의해서 나타난 바와 같이 검사코일의 유효직경은 약 6.6 mm이며 이는 Fig. 7 및 8의 결과를 통해서도 알 수 있듯이 8 mm 결함에서는 결함부의 중앙에서 진폭이 다소 감소하거나 변화가 없었지만 10, 12, 14, 16 mm 등의 결함시편에서는 결함부의 중앙에서 거의 진폭감소가 나타나지 않았다. 이러한 결과는 검사코일 유효직경 이상의 길이를 갖는 결함인 경우 임피던스에 영향을 미치는 각 위치별 결함요소들의 합이 포화된 일정한 값을 나타내기 때문인 것으로 판단되며 각 위치별 결함요소는 결함의 길이 뿐 아니라 결함의 폭과 파단면의 형상 등이 포함된다.

한편 결함의 길이별로 각 펄스별 진폭 값 중 가장 큰 값을 비교한 결과 결함의 길이가 증가할수록 진폭값의 증가경향이 둔화되거나 포화되는 비선형적인 증가경향을 나타내었으며 16 mm 결함시편에서 거의 진폭값이 포화됨을 확인하였다. 각 결함 길이별로 측정된 최대 진폭 및 포화되는 최대진폭값을 기준으로 한 백분율(%)을 Fig. 9에 나타내었다. 각 결함의 길이에 대하여 탐촉자의 직경에 따른 진폭값의 변화에 대한 연구결과 결함의 길이가 탐촉자의 직경과 같을 경우 신호의 진폭범위는 검사주파수와 탐촉자의 직경에 따라 무한히 긴 결함의 1/3 또는 2/3 정도의 진폭범위를 나타낸다고 알려져 있으며[6] 이러한 사실은 본 실험을 통해서

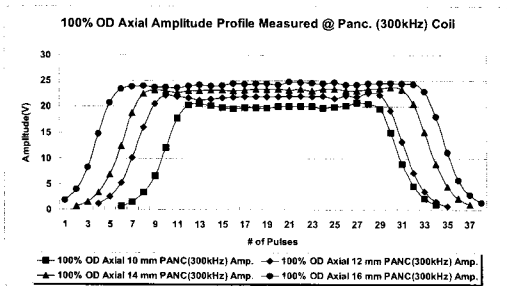


Fig. 8 The amplitude profile of 100% OD axial notch (II) (measured @ 300kHz pancake coil)

확인할 수 있었다. 즉, 진폭값이 포화되는 최대결함 길이를 16 mm로 설정하였을 때 이 결함의 최대진폭값은 24.73 Volts이며, 이 값의 1/3 값인 8.24 Volts와 코일 직경에 해당되는 3 mm 결함의 진폭값인 8.33 Volts를 비교하였을 때 거의 일치함을 알 수 있다. Fig. 10은 V. S. Cecco 등이 수행한 실험결과 얻어진 결함의 길이, 탐촉자직경 및 주파수에 따른 진폭값의 변화경향 등을 나타낸 것이다[6].

3.3. Look-Ahead 및 Look-Behind 신호에 대한 고찰

검사코일이 검사체인 전열판의 건전부에서 결함으로 접근함에 따라 결함의 선단에 도달하기 이전 어느 정도 떨어진 거리에서 이미 결함을 감지하기 시작하여 결함신호를 형성하는 것으로 알려져 있다 [8]. 이를 일반적으로 look-ahead 또는 look-behind 신호로 칭하여 부르고 있다. Look-ahead 신호는 검사 코일이 결함의 선단에 접근하는 신호이며, look-behind 신호는 결함의 종단으로부터 건전부

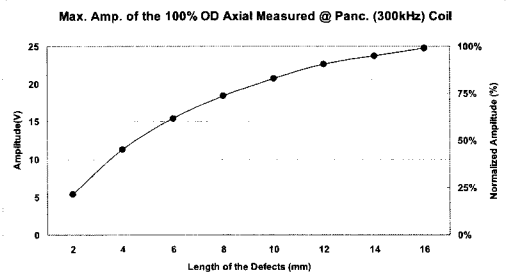


Fig. 9 Max. amplitude variation of 100% OD axial notch length

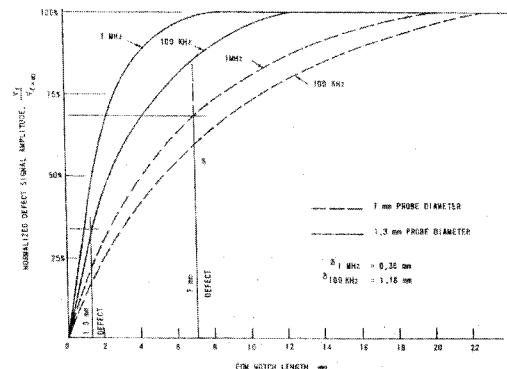


Fig. 10 Effect of defect length (quoted from Ref. [6] p. 78)

빠져 나가는 신호를 일컫는다.

이러한 현상에 대한 설명은 C. V. Dodd 등에 의해 제안된 와전류현상의 해석을 근거로 W. A. Simpson 등에 의해 만들어진 프로그램을 기초하여 가능하다[9-11]. 검사코일의 임피던스 변화에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 결과 코일의 공칭반경에 따라 코일과 결함사이의 간격을 0에서 시작하여 코일의 중심에서 r , $2r$, $3r$ 로 증가시킬 때 결함의 영향에 의한 코일의 임피던스 변화를 거리의 함수로 plot 하면 약 $3r$ 의 거리에 결함이 있을 때부터 코일은 이를 감지하여 임피던스의 변화가 나타나기 시작하며 거리가 가까워짐에 따라 임피던스가 증가하여 거리 r 에 결함이 위치할 때 최대값을 타나내고 결함이 코일반경 안으로 이동함에 따라 감소하여 결함이 코일 중심에 오게 되면 임피던스의 변화가 0이 된다[7]. 즉 결함의 선단으로부터 검사코일반경의 3배 위치에서 결함을 감지하기 시작함을 의미한다. 100% 관통결함에 대한 진폭변화를 나타낸 Fig. 7 및 8에서 알 수 있듯이 결함에 대한 진폭값이 최대로 되는 시점이 결함과 코일이 r 의 거리를 유지하는 최대 임피던스 변화를 나타내는 위치로 판단된다. 이러한 신호의 진폭변화를 이해함으로써 결함의 선단과 종단의 위치를 알 수 있으며 궁극적으로 결함의 길이를 정량적으로 측정하게 된다. Fig. 7 및 8에서 보여주고 있는 바와 같이 검사코일의 직경보다 작은 2 mm 결함을 제외한 각 결함 시편이 최대 진폭값에 도달하기까지 측정된 펄스 수를 보면 대부분 6~8펄스 수를 보였으며 10 mm 이상 결함 길이를 갖는 시편은 대부분 8펄스 수를 보였고 여기에 각 펄스별 거리인 0.53 mm를 곱한 결과 약 4.2 mm의 look-ahead 거리가 나타났다. 검사 코일 반경의 3배값(4.35 mm)과 거의 일치하며 look-behind 신호 역시 대칭적으로 look-ahead 신호와 거의 같은 경향을 나타내었다.

3.4. 진폭 변화에 의한 결함의 길이 측정

3.4.1. 50, 75% 깊이 결함시편의 진폭변화에 의한 결함의 길이 측정

앞의 3.2.1항 및 Fig. 5에서 보여주고 있는 바와 같이 pancake 코일이 결함에 접근함에 따라 펄스별로 신호 진폭의 크기가 증가한 후 약 2펄스 정도 진폭값의 증가 없이 일정한 값을 유지한 후 2 mm

시편은 감소하기 시작하여 결함의 중앙부에서 최소값을 보여주지만 이외의 시편은 다시 증가하기 시작하여 결함의 중앙부에서 최대값을 보이는 경향을 나타내었다. 비록 100% 관통결함에서 보여주고 있는 것처럼 진폭값이 결함의 선단에서 최대값을 보여 주지는 않지만 해당위치에서 결함의 존재로 인한 임피던스 값의 변화로 인해 경계면이 나타났다. 한편 결함영역에서 100% 관통결함에서 보여지는 진폭값의 포화 또는 감소는 나타나지 않고 지속적으로 결함의 중심부까지 증가하는 원인은 표면이 개방되지 않음으로 인해 검사코일과 결함 간에 일정한 lift-off를 유지함으로써 주파수가 낮아지는 효과로 판단되며 이로 인해 검사 코일의 유효직경이 증가되는 현상으로 이해된다. 즉 50 및 75% 결함의 길이를 본 실험에 사용한 길이보다 훨씬 길게 가공하여 진폭을 측정할 경우 100% 관통결함에서 나타나는 검사코일의 유효 직경값이 얻어질 수 있을 것으로 사료된다. 이는 Fig. 10에서 검사주파수별 결함길이에 대한 신호의 진폭값의 변화 경향을 통해 알 수 있다. 본 실험에서는 탐촉자가 전열관의 건전부로부터 결함이 시작되는 결함의 선단에 도달하는 순간 진폭값의 변화가 나타나기 시작하며 결함의 종단에서도 역시 같은 진폭값의 변화가 나타나므로 각각의 시작점과 종결점 사이의 거리를 전열관의 길이로써 측정하였다.

3.4.2. 100% 깊이 결함 시편의 진폭 변화에 의한 결함의 길이 측정

100% 관통결함 시편의 경우 앞서 3.2.2 및 3.2.3항에서 기술한 바와 같이 50 및 75%의 경우와는 달리 결함부의 중앙에서 진폭값이 감소하거나 포화되는 경향을 나타내었다. 즉 검사코일이 전열관의 건전부로부터 결함 선단에 접근, 개방된 결함에 접촉함으로써 인해 검사코일의 유효직경보다 작은 결함 길이를 갖는 시편은 진폭값이 감소하기 시작하여 결함 중심부에서 최소가 되는 경향을 보였으며, 검사코일의 유효직경보다 큰 결함길이를 갖는 시편은 결함선단에서 최대 진폭값을 보여주고 이후 진폭값이 포화되었다. 이러한 결과는 탐촉자 유효직경 이상의 결함인 경우 임피던스에 영향을 미치는 각 위치별 결함요소들의 진폭의 합이 포화된 일정한 값을 나타내기 때문인 것으로 판단된다. 100% 관통결함에 대한 결함의 정량적 길이 측정방법은 3.4.1

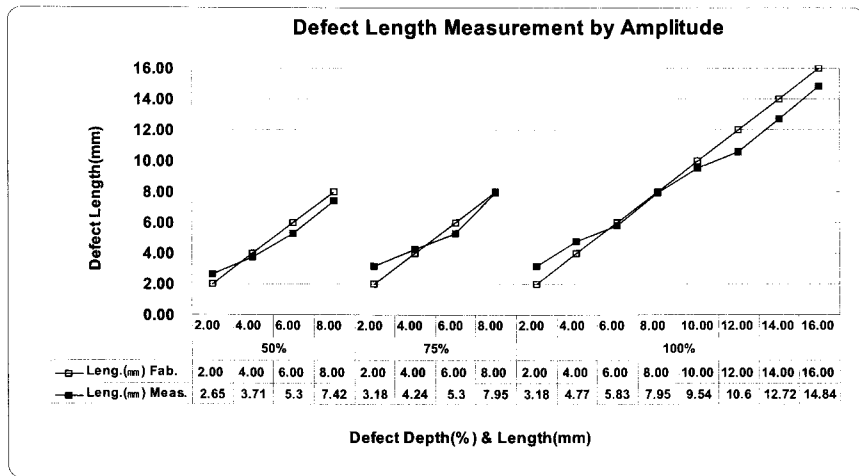


Fig. 11 The results of the defect length measurement by amplitude

에서 나타낸 것과 동일하게 신호 진폭값의 천이지역을 찾아 각각 결함 선단의 시작점과 결함 종단의 종결점으로 지정하여 그 사이 거리를 측정하였다. 이러한 방법에 의해 측정된 50, 75 및 100% 결함의 길이 측정 결과는 다음 Fig. 11에 나타낸 바와 같다. 길이 측정 결과 모든 결함 깊이의 시편의 경우 2 mm 길이의 시편은 실제 가공 길이와 측정 길이간의 오차가 약 50% 정도로 과대평가되었으며 나머지 길이의 시편은 깊이에 상관없이 ±10% 내외의 오차범위 이내에서 비교적 정확히 평가되었다.

4. 고찰 및 결론

전열관 외면에 가공된 다양한 결함 깊이 및 길이를 갖는 EDM 노치 결함에 대한 검출능 및 크기 정량화를 위한 와전류 신호 분석 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 25% 이하의 결함깊이를 갖는 결함 시편중 결함 길이가 4 mm 이하인 경우 결함 검출이 거의 불가능하였다. 특히 무확관시편보다는 확관부에 결함을 가공한 시편의 경우 확관부의 기하학적 형상의 변화와 이로 인한 잡음신호로 인해 결함의 검출이 어려웠다. 한편 6 mm이상의 결함인 경우 결함의 길이증가와 아울러 우수한 균열결함 검출능을 갖는 +PT 코일과 c-scan을 활용함으로써 결함의 검출이 가능하였다. 그러나 결함의 크기를 정량화 하기 위한 결함성분의 진폭

측정에는 어려움이 있었다.

- 2) 50% 이상의 결함은 모든 결함 길이에 대해서 pancake 코일 및 +PT 코일에서 결함 신호의 검출이 가능하였으며 진폭 측정 또한 가능하였다. 일반적으로 결함의 검출능과 방향성은 +PT 코일이 pancake 코일에 비해 우수한 것으로 알려져 있으나 +PT 코일은 원주방향과 축방향으로 감겨진 두개의 코일이 차동식으로 감겨져 있으므로 인해 결함 성분 자체에 대한 정량화는 다소 한계가 있다. 따라서 본 실험에서는 pancake 코일에 의해 결함신호의 진폭을 측정하였다.
- 3) 균열 결함의 깊이별로 결함의 길이를 보다 정확히 정량적으로 평가하기 위해 무확관시편에 가공된 50 및 75%의 결함에 대한 진폭 측정 결과 2 mm 결함 길이 시편은 코일의 직경 (약 2.9 mm)에 비해 작으므로 각 펄스별로 결함요소에 대한 신호 진폭값을 충분히 나타내지 못했으며 결함의 중심부에서 진폭값이 최소가 되었다. 이는 결함이 코일의 중심에 위치함으로 인해 최소 진폭값을 나타낸 것으로 판단된다. 한편 4 mm 이상의 시편은 2 mm와 같은 진폭감소 현상이 나타나지 않았으며 결함의 중심부에서 최대 진폭값을 나타내었다. 그리고 결함의 깊이가 증가함에 따라 신호의 진폭값이 증가하였다.
- 4) 한편 100% 관통결함에 대한 결함 길이별 진폭 측정결과 2~8 mm 시편의 경우 결함의 선단에서 최대값을 보인 후 진폭이 감소하여 결함의 중심부에서 최소값을 보인 후 서서히 증가하여

진폭값이 회복되는 이른바 새들 모양의 진폭값의 변화를 얻을 수 있었다. 이는 결함의 길이가 검사코일의 유효직경보다 작은 원인에 의한 것이며 이보다 큰 길이의 결함인 10~16 mm 길이의 시편에서는 결함부의 중앙에서 거의 진폭 감소가 나타나지 않았다.

- 5) 결함의 길이가 탐촉자의 직경과 같을 경우 신호의 진폭범위는 검사주파수와 탐촉자의 직경에 따라 무한히 긴 결함의 1/3 또는 2/3 정도의 진폭범위를 갖는 것으로 알려져 있으며 본 실험을 통해 코일직경을 3 mm로 하고 무한히 긴 결함의 길이를 16 mm의 결함으로 선정하여 확인한 결과 이에 부합하는 결과를 얻을 수 있었다.
- 6) 검사코일이 검사체의 건전부에서 결함의 선단에 도달하기 전 탐촉자 반경의 3배 위치부터 결함에 대한 임피던스 변화가 나타나는 것으로 이전에 수행한 연구결과에서 알려졌으며 본 실험결과로부터도 이러한 사실을 확인하였다. 흔히 MRPC 검사에서 이러한 현상의 신호가 결함의 깊이가 깊고 결함표면이 개방된 결함일수록 현저히 나타나는데 이러한 신호는 이른바 look-ahead 또는 look-behind 신호로 칭하고 있다.
- 7) 진폭 변화에 의한 결함의 길이를 측정함에 있어 50 및 75% 결함 깊이가 시편은 전열관의 건전부와 결함 선단의 경계 위치, 그리고 결함 종단과 건전부의 경계 위치에서 신호 진폭값의 증가(6, 8mm) 또는 감소(2, 4 mm)가 나타나는 천이지역이 형성되는데 이 두 지점 사이의 펄스수를 측정 후 펄스간 거리를 곱하여 결함의 길이를 측정하였다. 한편 100% 관통결함의 경우 탐촉자가 전열관의 건전부와 결함의 선단, 결함의 종단과 전열관의 건전부 경계면에서 결함의 진폭이 포화(8~16 mm)되거나 감소(2~6 mm)하는 천이지역이 형성되는데 이 두 지점간 펄스 수에 펄스간 거리를 곱하여 결함의 길이를 측정하였다. 각각 결함의 깊이에 따라서 결함의 길이를 측정 한 결과 모든 결함 깊이의 시편 중 2 mm 길이의 시편은 실제 가공길이와 측정 길이간의 오차가 약 50% 정도로 과대평가되었으나 나머지 길이의 시편은 $\pm 10\%$ 내외의 오차범위에서 정확히 평가되었다.

참고문헌

- [1] H. P. Kim et. al., "A state of the art on primary side stress corrosion cracking in nuclear power plant," KAERI/AR-556/2000, pp. 31-35, (2000)
- [2] Zetec, Probe Catalog, pp. 6-10, (2007)
- [3] Hugo L. Libby, "Introduction to electromagnetic nondestructive test methods," John Wiley & Sons, Inc., pp. 24-26, (1979)
- [4] Zetec, Product Info. & User Guide, (1995)
- [5] K. M. Min, J. A. Park, S. H. Kwon and H. S. Han, "RPC data analysis development of reproduced SG tube cracks," Proceedings of KHNP Nuclear Technology Workshop, pp. 347-353, (2008)
- [6] V. S. Cecco, G. Van Drunen and F. L. Sharp, "Advanced manual for eddy current test method," CAN/CGSB-48.14-M86, pp. 77-78, (1986)
- [7] Y. M. Cheong, et. al., "Development of non-destructive testing technology for the crack of SG tubes", KAERI/RR-1183/92, pp. 40-41, (1992)
- [8] K. M. Min, J. A. Park and D. J. Go, "EC signal characteristics of materials and spacing of loose parts contacted on the SG tube secondary side," Proceedings of 2008 KPVP Annual Conference, pp. 381-382, (2008)
- [9] C. V. Dodd, W. E. Deeds, J. W. Luquire and W. G. Spoeri, "Analysis of eddy current problems with a time-sharing computer," Materials Evaluation, pp. 165-168, (1969)
- [10] C. V. Dodd, W. E. Deeds, J. W. Luquire and W. G. Spoeri, "Some eddy current problems and their integral solutions," ORNL-4384, (1969)
- [11] W. A. Simpson, C. V. Dodd, J. W. Luquire and W. G. Spoeri, "Computer programs for some eddy current problems," ORNL-TM-3295, (1971)