

증기발생기 전열관의 내면 축방향 균열에 대한 ECT 특성 평가

Evaluation of Eddy Current Signals from the Inner Wall Axial Cracks of Steam Generator Tubes

최명식*, 허도행*, 이덕현*, 박중암**, 한정호*

Myung Sik Choi*, Do Haeng Hur*, Doek Hyun Lee*, Jung Am Park** and Jung Ho Han*

초 록 증기발생기 전열관에서 1차측 응력부식균열의 발생빈도가 증가하고 있으므로 이의 정확한 탐지와 평가를 위해서는 균열 형상에 따른 와전류 신호특성을 규명하고 적합한 탐촉자를 선정하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 증기발생기 전열관의 내면 축방향 균열에 대한 와전류 검사의 검출능과 크기예측에 대한 신뢰도를 정량적으로 평가하고 pancake coil과 plus coil과의 신호특성 차이를 비교하였다. 이를 위하여 전열관 내면에 EDM으로 노치를 가공한 시편과 실제 증기발생기에서 1차측 응력부식균열이 발생하여 인출한 전열관을 시험편으로 사용하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를 토대로 내면 축방향 균열에 대한 와전류 검사 신뢰도 향상을 위한 방안을 제시하였다.

주요어어: 와전류검사, 팬케익 코일, 플러스 코일, 1차측 응력부식균열, 증기발생기 전열관

Abstract: For the enhancement of ECT reliability on the primary water stress corrosion cracks of nuclear steam generator tubes, of which the occurrence is on the increase, it is important to comprehend the signal characteristics on crack morphology and to select an appropriate probe type. In this paper, the sizing accuracy and the detectability for the inner wall axial cracks of tubes were quantitatively evaluated using the following specimens: the electric discharge machined notches and the corrosion cracks which were developed on the operating steam generator tubes. The difference of eddy current signal characteristics between pancake and axial coil were also investigated. The results obtained from this study provide a useful information for more precise evaluation on the inner wall axial cracks of steam generator tubes.

Keywords: eddy current test, pancake coil, plus coil, primary stress corrosion crack, steam generator tube

1. 서 론

원전 증기발생기 전열관에서는 응력부식균열, 입계부식, 핏팅 등의 부식손상과 마모 등에 의한 기계적 손상이 발생하고 있다. 이러한 손상은 전열관 검사 및 보수 비용을 증가시키고, 결함이 전열관 두께를 관통하였을 때는 방사능에 오염된 1차측 냉각수가 2차측으로 누설되어 계

통을 오염시키게 된다. 손상이 가속될 경우에는 설계 수명을 다하지 못하고 증기발생기 자체를 교체해야 하는데, 1999년 현재 전세계적으로 51개 발전소에서 증기발생기를 교체하였으며 20개 발전소에서 교체를 준비중이다[1]. 국내의 경우 가압경수로형 증기발생기 전열관은 모두 Ni-15Cr-9Fe 합금인 Alloy 600 재료로 제작되었으나, 1998년 고리 1호기 증기발생기가 전열관 손상에 의하여

Ni-30Cr-9Fe 합금인 Alloy 600 전열관 재료로 교체된 바 있다. 따라서 발전소에서는 이러한 신규 결함 발생의 탐지와 기존 결함의 성장 추이를 감시하기 위하여 보수기간 중에 와전류 검사(eddy current test, ECT)를 수행하고 있다. 이 때 대부분의 결함은 탐지가 되고 있으나, 가동중에 전열관에 누설이 발생한 뒤에야 결함의 존재가 인식되는 사례도 있다[2].

ECT 자료는 전열관의 sleeving과 같은 보수나 관막음(plugging)의 판단기준으로 사용되며 이는 곧 가동 안전성 및 경제성 확보 문제와 직결되므로 결함발생 초기에 결함의 탐지와 크기에 대한 평가가 정확하게 이뤄져야 한다. 따라서 ECT의 신뢰성을 향상시키기 위해서 전열관 검사분량의 일부를 제 3자가 재평가하는 제도를 도입하여 검사를 강화하고 있다. 또한 ECT 장비의 민감도 측정 및 교정을 위하여 전열관 표면에 EDM (electric discharge machining) 가공으로 모의 결함을 만들어 사용하고 있으나 이는 발전소에서 발생하는 부식결합과는 근본적으로 차이가 있다. 그러므로 전열관에 실제와 유사한 부식결합을 형성시키고 이를 이용하여 ECT의 신뢰성을 향상시키기 위한 연구가 진행 중에 있다[3].

국내 증기발전기 전열관에서 발생하는 가장 빈번한 손상은 1차측 응력부식균열과 마모에 의한 것이다. 특히 1차측 응력부식균열은 전열관의 내면에서 균열이 발생하여 전열관의 관두께를 따라 외면 쪽으로 균열 깊이가 깊어지는 형태의 균열이다. 이 때 균열의 길이가 전열관의 길이방향으로 성장하는 축방향 균열과 전열관의 둘레를 따라 성장하는 원주방향 균열로 나눌 수 있으며, 국내 원전에서는 두 가지 형태의 균열이 모두 발생한 바 있다 [4-6]. 그 발생위치는 주로 tube sheet 상단의 확관부위에 집중되어 있으며 U-bend 지역에서도 발생한다. 이러한 균열 발생의 응력원으로는 확관 및 전열관 굽힘(bending)에 의한 잔류응력이 가장 중요한 역할을 하며, 전열관과 tube sheet 사이의 틈새에 퇴적된 슬러지가 산화에 의하여 부피팽창을 일으킬 때 응력을 유발하기도 한다.

국내외 발전소에서 1차측 응력부식균열의 발생 빈도가 증가하고 있는 추세에 비추어 볼 때 이의 정확한 탐지와 평가를 위해서는 균열의 형상변화에 대응하는 신호특성을 이해하고, 평가 신뢰도가 높은 탐촉자 coil을 선정하는 것이 매우 중요하다. 국내의 경우 내면 균열에 대한 ECT 검사는 pancake coil을 이용하여 크기를 평가하여 왔으나 검출능이나 크기 예측에 대한 신뢰도가 정량적으로 보고

된 바 없다. 또한 plus coil과의 특성차이에 대한 이해도 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 전열관 내면에 EDM으로 가공한 노치 결함과 실제 증기발전기에서 인출한 전열관의 1차측 응력부식균열 결함을 이용하여 내면 균열의 신호 특성과 검출 신뢰도를 측정하였다. 아울러 pancake coil과 plus coil의 신호특성도 비교 평가하였다. 이를 통하여 내면균열의 평가 신뢰도 향상을 위한 기술적 방안을 제시하고자 한다.

2. 실험방법

ECT 검사 신뢰도와 coil 특성 평가를 위하여 EDM으로 노치를 가공한 시험편과 실제 부식균열을 갖는 시험편을 사용하였다. EDM 시험편은 Alloy 600 전열관의 내면에 노치를 가공하여 노치의 길이와 깊이에 따른 신호 특성을 평가할 수 있도록 하였다. 가공된 노치의 크기를 Table 1에 나타내었다. 한편 실제 부식균열에 대한 ECT 검사 신뢰도와 탐촉자 coil의 특성 평가를 위하여 가동 원전 증기발전기에서 1차측 응력부식균열이 발생하여 인출한 전열관 3개를 시험편으로 사용하였다. 이 전열관은 외경이 22.23mm, 두께 1.27mm인 Alloy 600 재료이며, 인출 직전 수행한 가동중 ECT 검사 자료[7]에 의하면 인출 전열관 A에는 6개, B에는 5개의 내면 축방향 균열이 존재하는 것으로 탐지되었으며, 전열관 C에서는 신호대 잡음비(signal to noise ratio)가 매우 낮은 신호가 탐지되었다.

EDM과 부식균열 시험편에 대한 ECT 검사 장비는 MIZ-30A Remote Data Acquisition Unit/Eddynet Data Analysis System을 사용하였으며, 탐촉자로는 모터구동형 회전탐촉자인 +Point-720-115/36/S80을 이용하였다. 이 탐촉자는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 세 종류의 coil, 즉 primary pancake test coil, plus coil, high frequency shielded coil이 탐촉자의 원주방향으로 120도 간격으로

Table 1 Dimension of the EDM notches

	depth (%)	length (mm)	notch width (μm)
EDM #1	50	3, 6, 10	130 \pm 15
EDM #2	100	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11	130 \pm 15
EDM #3	21, 43, 61, 79, 100	7	130 \pm 15

설치되어 있다[8]. Pancake coil은 직경이 2.9mm (0.115") 인 환상으로 coil이 감겨 있으므로 원형으로 와전류가 발생되며, coil의 결선방식상 절대비교법(absolute)을 적용한다. Plus coil은 각각의 coil 길이가 약 1.5mm인 두 coil이 한 층씩 직각으로 교차되게 +자 형태로 감겨 있으므로 서로 직교하는 두 개의 와전류 흐름이 발생한다. 또한 두 코일이 서로 비교하는 차동법(differential)을 적용하기 때문에 전열관의 형상변화, lift-off 변화 및 sludge 신호 등 결함 외적인 신호를 최소화할 수 있다[8]. 와전류 검사시 탐촉자의 인출속도는 0.2inch/sec, 회전속도는 300rpm, 사용 주파수는 100~400kHz였다. 본 논문에서 특별한 언급이 없는 경우는 300kHz의 주파수에서 얻어진 신호를 제시한 것이다.

ECT 신호 교정은 길이가 10mm이고 내면 깊이가 50%인 EDM 노치의 진폭신호를 pancake과 plus coil에 대해

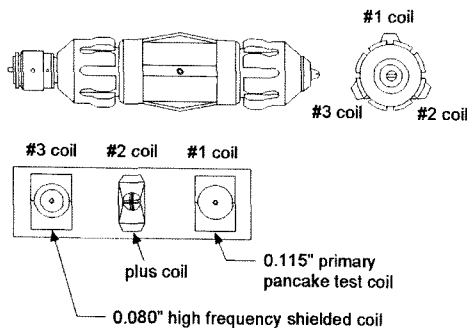


Fig. 1 Schematic of a motorized rotating probe

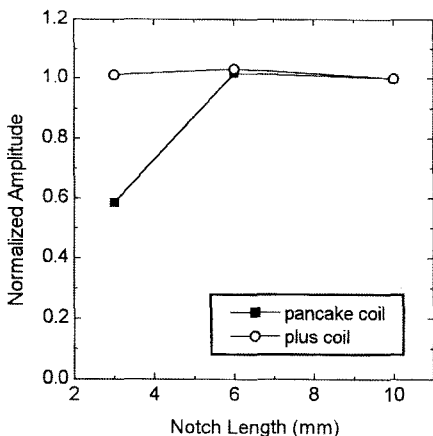


Fig. 2 Variation of ECT signal amplitude with notch length variation having 50% inner wall depth

여 동일하게 15 volt로 setting하였다. 각 결함에 대한 진폭 값은 이 setting 값을 기준으로 normalization하여 표시함으로써 상대적 크기에 대한 비교가 용이하도록 하였다. ECT 검사의 신뢰성을 평가하기 위하여 검사 종료 후 금속학적인 파괴검사를 실시하여 균열의 형상을 관찰하고 정확한 길이와 깊이를 측정하였다. 인출 전열관에 대한 상세한 파괴시험 절차와 손상원인 분석 결과는 다른 자료[4]에 제시되어 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. EDM 노치 시험편

전열관 내면에 가공된 노치의 깊이가 모두 50%인 EDM 시험편에 있어서 노치의 길이 변화에 따른 pancake coil과 plus coil의 신호 진폭 변화를 Fig. 2에 나타내었다. Pancake coil의 경우 6mm와 10mm의 길이에서는 같은 진폭 값을 나타내었으나 3mm 길이에서는 진폭 값이 대략 1/2로 감소하였다. 진폭 값은 균열성 결함의 길이, 깊이, 근접도, 표면의 저항 등에 따라 달라진다[9,10]. 이 결과는 균열 길이가 적어도 6mm 이하에서는 균열길이와 깊이가 모두 진폭에 영향을 미치지만 그 이상에서는 균열 길이 자체는 진폭에 영향을 주지 않음을 의미한다. Plus coil의 경우는 3, 6, 10mm에서 모두 동일한 진폭 값을 나타내었다. 이는 마찬가지로 적어도 3mm 이상의 균열에서는 길이 자체가 plus coil의 진폭에는 영향을 주지 않는다는 것을 의미한다. 본 논문에서는 이와 같이 진폭에 영향을 주는 최대길이를 임계 균열길이라고 정의하기로 한다. 여기서 균열의 길이가 보다 더 세분화된 노치 시험편을 제작하였다면 보다 정확한 임계 균열길이를 측정할 수 있었을 것으로 생각된다.

관통 결함, 즉 노치 깊이가 100%인 EDM 시험편의 경우에는 Fig. 3과 같이 균열 길이를 1mm 간격으로 세분화하여 제작하여 시험하였다. Pancake coil의 경우 관통된 노치의 길이가 길어짐에 따라 진폭값이 증가하다가 서서히 둔화되어 약 11mm 부근에서 포화되고 있음을 나타낸다. 따라서 진폭 값에 영향을 주는 임계 균열길이는 11mm가 된다. 반면에 plus coil에서는 노치 길이가 길어짐에 따라서 진폭값이 증가하다가 약 7mm 이상이 되면 진폭증가가 거의 없게 된다. 따라서 임계 균열길이는 7mm가 됨을 알 수 있다.

Fig. 2와 3의 결과는 임계 균열길이가 coil의 종류에 따

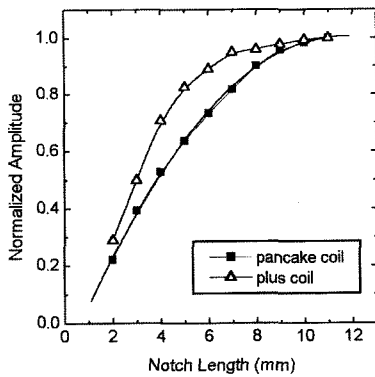
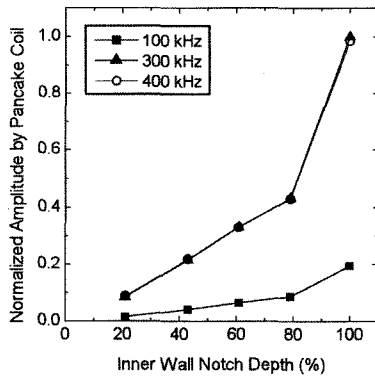
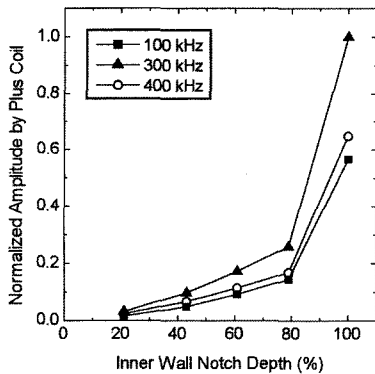


Fig. 3 Variation of ECT signal amplitude with notch length variation having 100% inner wall depth



(a)



(b)

Fig. 4 Effect of inner wall notch depth on the evolution of ECT signal amplitude; (a) pancake coil and (b) plus coil

라 달라질 뿐만 아니라 균열의 깊이에 따라라도 달라짐을 보여준다. 즉 pancake coil의 경우 균열 깊이가 50%에서 100%로 깊어질 때 임계 균열길이는 6mm에서 11mm로, plus coil의 경우는 3mm에서 7mm로 길어짐을 알 수 있다. 이에 대한 원인은 두 coil의 크기와 형상 차이에서 유추해 볼 수 있을 것이다. 사용된 Pancake coil은 직경이 2.9mm인 환상으로 coil이 감겨 있으므로 원형으로 와전류가 발생된다. Plus coil은 각각의 coil 길이가 약 1.5mm인 두 coil이 한 층씩 직각으로 교차되게 +자 형태로 감겨 있으므로 서로 직교하는 두 개의 와전류 흐름이 발생한다 [8]. 따라서 pancake coil은 와전류 분포영역이 plus coil에 비하여 상대적으로 커지므로 임계 균열길이가 길게 나타나는 것으로 생각된다. 이상의 결과로부터 단일균열에 대한 깊이의 변화를 감지하기 위해서는 길이 자체가 진폭에 영향을 주지 않아야 하므로 임계 균열길이가 작은 plus coil을 사용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

Fig. 4는 전열관 내면에 7mm 길이로 가공한 노치의 깊이에 따른 진폭 변화를 측정된 것이다. 그림에서는 가장 큰 진폭값을 나타낸 300kHz에서의 100% 관통 균열의 진폭값을 기준으로 normalization하여 표시하였다. Pancake coil의 경우 깊이가 80%까지는 진폭증가가 완만하지만 100% 깊이일 경우 급격히 증가하였으며 80% 깊이에 비하여 약 2.3배의 큰 값을 나타내었다. 이와 같은 거동은 시험에 사용된 100, 300, 400kHz의 주파수 모두에서 거의 동일한 경향을 나타내었다. Plus coil의 경우도 전체적인 거동은 pancake coil에서 얻어진 것과 유사하였다. 그러나 80% 깊이까지의 진폭증가가 훨씬 완만하였으며, 특히 주파수에 관계없이 관통 균열의 진폭값은 80% 깊이에 비하여 약 3.9배의 매우 큰 차이를 나타내었다. 본 시험에 사용된 Alloy 600 재료에 있어서 300kHz의 경우 평면파에서 정의된 표준침투깊이[10,11]를 계산하면 0.90mm, 즉 70% 깊이가 되지만, 100kHz에서는 관두께보다 더 큰 1.55mm가 된다. 그럼에도 불구하고 주파수에 관계없이 유사한 진폭 변화거동을 나타내었다. 따라서 이러한 거동은 노치의 관통 여부에 따라 나타나는 현상으로 판단된다. 즉 균열이 일정한 깊이를 가질 때는 와전류가 균열의 둘레 뿐만 아니라 밑으로도 흐르게 된다. 그러나 관통 균열일 경우에는 균열 밑으로의 와전류 흐름이 완전히 단절되어 path가 왜곡되고 길어지게 된다. 따라서 급격한 저항의 증가로 진폭값이 크게 증가하게 될 것이다. 요약하면 와전류 진폭값은 노치의 관통 여부에 따라 급격한 변화를 나타내며, 이 때 plus coil은 pancake coil에 비하여 관통

여부에 훨씬 민감하게 반응하였다. 따라서 단일균열에 있어서 균열 길이는 동일하나 현격한 진폭 증가를 보이는 경우 판통 균열일 가능성이 매우 높을 것임을 시사한다.

3.2. 응력부식균열 시험편

인출 전열관을 절개하여 주사전자현미경으로 실제 균열 길이를 관찰하고 측정한 결과 ECT 신호로 6개의 축방향 균열이 탐지되었던 전열관 A에서는 7개의 축방향 균열이 발견되었다. 전열관 B에서는 ECT에서 예측된 것과 같은 5개의 축방향 균열이 발견되었으며, 당초 신호대 잡음비가 매우 낮게 탐지된 C에서도 1개의 축방향 균열이 발견되었

Table 2 Crack length and depth measured by destructive examination

tube		crack identification						
		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
tube A	mouth (mm)	3.86	2.51	2.45	4.84	3.45	3.34	2.25
	inside (mm)	4.56	2.98	2.77	5.28	4.00	3.89	2.59
	depth (%)	80	86	80	89	100	90	87
tube B	mouth (mm)	4.56	3.67	5.59	3.86	4.48		
	inside (mm)	4.92	4.09	6.15	3.95	4.95		
	depth (%)	90	84	86	91	72		
tube C	mouth (mm)	1.7						
	inside (mm)	2.1						
	depth (%)	84						

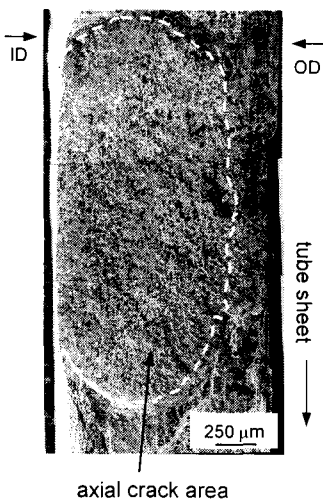


Fig. 5 A typical crack morphology showing the intergranular cracking mode and the bulging feature (tube C)

다. 인출 전열관의 파괴검사에서 측정된 모든 균열의 길이와 깊이를 Table 2에 표시하였다. 균열은 모두 1차측 응력부식균열로서 tube sheet의 hard roll transition 부위에 위치하였으며 전열관의 축방향으로 성장한 형태를 나타내었다. 균열의 전파경로는 모두 결정입계였으며, Fig. 5에 나타난 바와 같이 균열 입구의 길이가 균열 안쪽의 길이보다 0.1~0.7mm 작은 특징을 나타내었다.

Fig. 6은 전열관 A에 대한 파괴검사 결과와 ECT 신호를 표시한 것이다. 여기서 진폭은 plus coil에 의한 값이며 C-scan은 pancake coil에 의한 신호이다. 균열의 번호는 Table 2에 표시한 균열의 번호와 동일하다. #7 균열은 길이가 약 2.45~2.77mm이고 깊이가 80%이었으나 탐지되지 않았으며, ECT 신호상으로도 구별이 전혀 불가능함을 알 수 있다. 이는 #3 균열과의 원주방향 길이가 약 1mm(6°)로 근접해 있을 뿐만 아니라, pancake coil의 직경이 2.9mm이므로 분해능을 벗어났기 때문으로 생각된다. 길이가 2.51~2.98mm이고 깊이가 86%인 #2 균열이 3.95 V의 진폭을 보인데 비하여 길이와 깊이가 이보다 더 작은 #3 균열이 오히려 4.93 V의 큰 진폭을 보이는

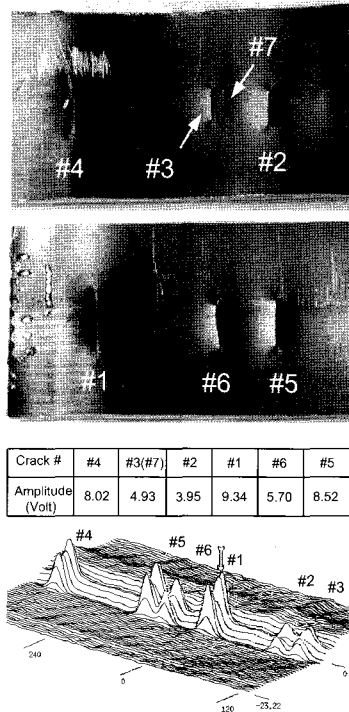


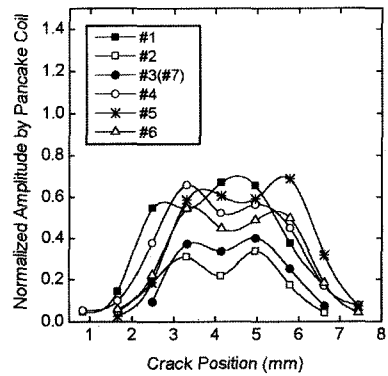
Fig. 6 Crack morphology and ECT data of the pulled tube specimen A

것은 #7의 균열이 중첩되어 있음을 증명한다. 따라서 다중균열의 근접도 관점에서 원주방향으로 적어도 1mm의 근접도를 갖는 축방향 균열은 서로 중첩되어 단일신호로 나타나므로 개별적으로 분리할 수 없음을 알 수 있다. 전열관 B에서는 모든 균열이 분명히 분리되어 나타났으며 특기할 점은 발견되지 않았다.

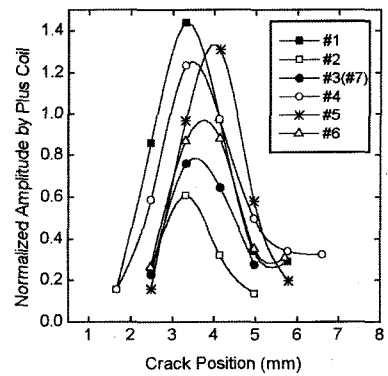
Fig. 7은 전열관 C에서의 균열과 ECT 신호를 나타낸 것이다. 전열관 C는 ECT 신호로 알 수 있듯이 신호대 잡음비가 매우 낮게 나타났으나, 파괴검사 결과 깊이가 84%이고 1.7~2.2mm 길이의 균열이 발견되었다. Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 균열이 bulging되어 있기 때문에 균열의 길이 방향으로 깊이가 모두 깊고 최대 깊이는 84%에 이르고 있다. 그럼에도 불구하고 신호가 매우 미약하게 나타나는 점으로 보아 1차측 응력부식균열을 신뢰성 있게 탐지하기 위해서는 균열길이가 2mm 이상이 되어야 할 것으로 판단된다. Coil에 따른 신호에서는 pancake coil 보다는 plus coil에 의한 신호가 보다 뚜렷한 신호대 잡음비를 나타내고 있다. 그 이유로서는 plus coil은 두 coil이 한 층씩 직각으로 교차되게 +자 형태로 감겨 있고 두 코일이 서로 비교하는 차동법을 적용하기 때문에 전열관의 형상변화, lift-off 변화 및 sludge 신호 등 결함 외적인 신호를 최소화하기 때문[8]인 것으로 생각된다.

Fig. 8은 전열관 A의 각 균열에 대하여 위치에 따른 진폭의 변화를 coil 별로 나타낸 것이다. Pancake coil에

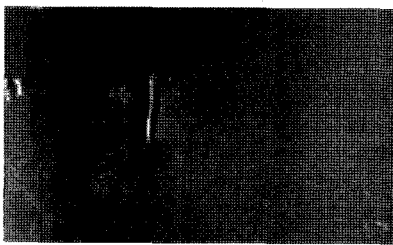
의한 진폭은 균열의 길이방향으로 M자 형태로 변화하는 분포 특성을 나타낸 반면에, plus coil의 진폭은 균열 길이 중간부근에서 최대 진폭 값을 갖는 분포 형태를 보였다. 이와 같은 특징은 Fig. 9에 제시한 바와 같이 전열관 B의 균열에서도 유사하게 관찰되었다. 균열의 길이방향에 따른 진폭분포의 특성이 coil의 종류에 따라 달리 나타나는 원인은 coil이 감겨 있는 형태에 따른 와전류 흐름의 차이에 기인된 것으로 추정되지만, 현 단계에서 분명한 결론을 제시하기는 어렵다. 한편 pancake coil에 의한 진폭 값은 균열의 위치에 따라 변화하므로 검사자에 따라 달리 평가될 가능성이 크지만, plus coil의 신호를 이용할 경우는 균열의 중간 부분에서 최대값이 존재하므로 진폭 값에 대한 평가 오차를 줄일 수 있을 것으로 기대된다.



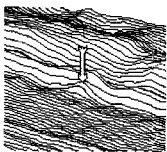
(a)



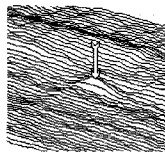
(b)



(a)



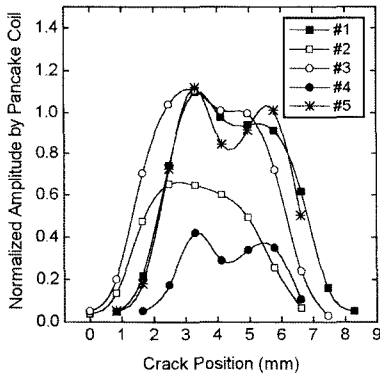
(b)



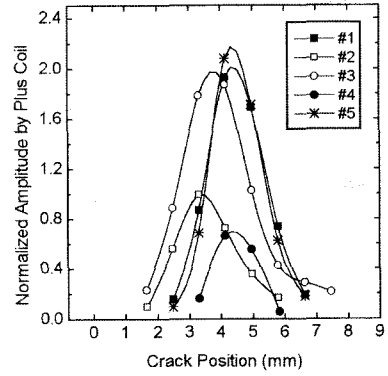
(c)

Fig. 7 Crack morphology and ECT data of the pulled tube specimen C; (a) crack, (b) C-scan by pancake coil and (c) C-scan by plus coil

Fig. 8 Variation of ECT signal amplitude with crack position of the pulled tube A; (a) pancake coil and (b) plus coil

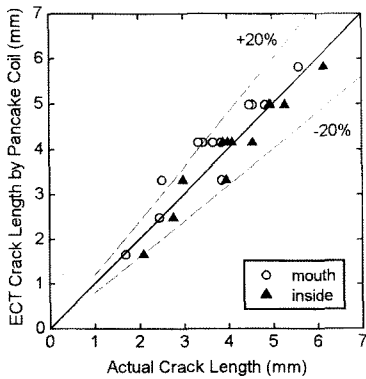


(a)

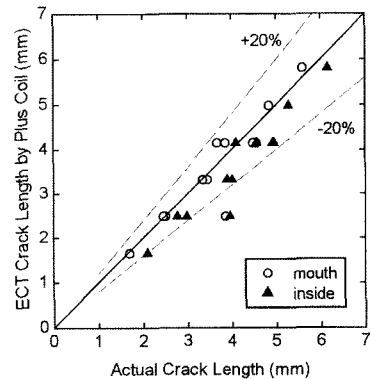


(b)

Fig. 9 Variation of ECT signal amplitude with crack position of the pulled tube B; (a) pancake coil and (b) plus coil

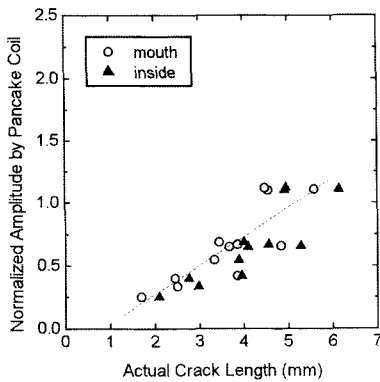


(a)

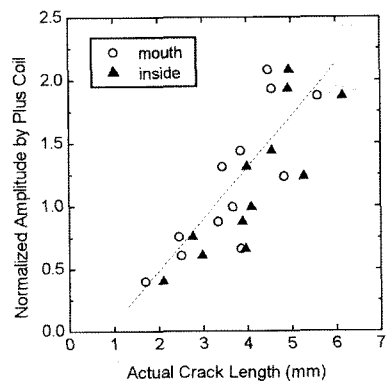


(b)

Fig. 10 Comparison of actual crack length with ECT crack length estimated by (a) pancake coil and (b) plus coil



(a)



(b)

Fig. 11 Comparison of actual crack length with ECT signal amplitude by (a) pancake coil and (b) plus coil

파괴검사에 의하여 측정된 모든 균열의 길이와 ECT로 평가한 균열 길이의 관계는 Fig. 10과 같이 나타났다. Pancake coil 및 plus coil의 신호는 대략 $\pm 20\%$ 오차범위 내에서 고르게 분포하였다. Pancake coil의 경우는 특히 균열의 내부길이에 가까운 예측결과를 나타내었고, plus coil의 경우는 균열의 입구길이에 가까운 예측결과를 나타내었다. 이 결과는 균열 입구의 길이가 균열 안쪽의 길이보다 0.1~0.7mm 짧은 형태이므로 pancake coil은 plus coil에 비하여 약간씩 길게 평가하고 있다는 의미가 된다. 사용한 pancake coil의 직경은 2.9mm이고 plus coil의 폭은 약 1.5mm가 된다. 따라서 pancake coil은 상대적으로 멀리 떨어진 위치의 결함으로부터 신호를 나타내게 되므로 plus coil에 비하여 균열 길이를 약간씩 과대 평가할 가능성이 있는 것으로 생각된다.

균열의 길이는 ECT의 진폭과 상관관계가 매우 큰 것으로 나타났다. Fig. 11에서와 같이 진폭변화는 균열길이의 변화와 직선적인 비례관계를 나타내었다. Plus coil의 경우 균열의 깊이가 50% 부근이라면 Fig. 2의 결과에 의하여 3mm 이상의 균열에서는 진폭 값이 포화되어야 할 것이나 지속적으로 증가하고 있다. 이는 다음과 같이 해석할 수 있다. Fig. 2과 3에 의하면 균열 깊이가 커질 경우 길이가 진폭에 영향을 미치는 임계 결함길이는 길어지고, 관통 균열일 때 7mm가 된다. Table 2에서와 같이 대부분의 균열은 80% 이상의 깊이를 보이고 있으므로 임계 균열길이는 7mm 보다 약간 작은 값이 될 것이다. 실제 균열의 길이가 5mm 이내이므로 모두 임계 균열길이보다 작게 된다. 따라서 plus coil에 의한 진폭 증가는 균열 길이의 증가에 의하여 지배된 것으로 해석함이 타당할 것이다. Pancake coil의 경우도 관통 여부에 관계없이 임계 결함길이에 미달되므로 진폭 증가는 결함길이의 증가에 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 한편 plus coil의 경우 pancake coil에 비하여 진폭의 분포범위가 약 2배 넓게 나타나고 있다. 따라서 50% 깊이의 EDM 노치 표준시편으로 교정할 경우 plus coil의 진폭이 균열의 길이와 깊이 변화를 보다 민감하게 반영함을 의미한다.

4. 결 론

1) 균열의 길이가 진폭값에 영향을 미치는 임계 균열길이는 coil의 종류와 균열의 깊이에 따라서 뚜렷한 차이를 나타내었다. 즉 pancake coil의 경우 균열 깊이가 50%에서 100%로 깊어질 때 임계 균열길이는 6mm에

서 11 mm로, plus coil의 경우는 3mm에서 7mm로 길어짐을 알 수 있었다. 따라서 비관통 단일균열에 대한 깊이 변화를 감지하기 위해서는 임계 균열길이가 작은 plus coil이 유리할 것으로 판단된다.

- 2) 균열의 진폭값은 pancake coil과 plus coil 모두 관통 여부에 따라 급격한 변화를 나타내었다. 따라서 단일 균열에 대하여 균열 길이는 동일하나 현저히 큰 진폭값을 보이는 균열은 관통 균열일 확률이 매우 높다.
- 3) 1차측 응력부식균열에 대한 길이 탐지한도는 2mm를 초과하며, 원주방향으로 1mm(6°)의 근접도를 갖는 축방향 균열들은 중첩되어 단일신호로 나타나므로 분리되지 않는다. 또한 길이 측정오차는 $\pm 20\%$ 이내로 신뢰도가 높았다.
- 4) 50% 깊이의 EDM 노치 표준시편으로 교정할 경우 약 5mm 이하의 내면 균열에 대하여 plus coil은 pancake coil에 비하여 진폭의 분포범위가 약 2배 넓게 나타났으며, 미소 균열에 대한 탐지능이 우수하였다.

참고문헌

- [1] J. Benson, "Steam Generator Progress Report, Rev. 14", EPRI Report TE-106365-R14 (1999).
- [2] P.E. MacDonald, V.N. Shah, L.W. Ward, P.G. Ellison, J.R. Boardman, "Steam Generator Tube Failures", NUREG/CR-6365 (1996)
- [3] D. H. Hur, M. S. Choi, D. H. Lee, J. A. Park, J. H. Han, "Fabrication and Use of Corrosion Defect Specimens for Enhancement of ECT Reliability for Nuclear Steam Generator Tubing" J. Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 20, No. 5, pp. 451-459, (2000)
- [4] KAERI, "Examination of Steam Generator Tubes Pulled from Ulchin Unit 1", Final Report, Teajon, (1999)
- [5] KAERI, "Examination of Steam Generator Tubes Pulled from Kori Unit 1", Final Report, Teajon, (1992)
- [6] KAERI, "Examination of Steam Generator Tubes Pulled from Kori Unit 2", Final Report, Teajon, (1990)
- [7] 한전기공주식회사, "울진 원자력 1호기 제 9차 증기발생기 와전류검사 최종보고서", (1999)

-
- [8] J. Siegel, "Detecting SG Tube Cracks in Difficult Places", Nuclear Engineering International, Vol. 41, No. 498, pp. 18, (1996)
- [9] V.S. Cecco, G.V. Drunen, F.L. Sharp, "Eddy Current Testing Volume 1: Manual on Eddy Current Method", AECL-7523, pp. 89, AECL, Ontario (1981)
- [10] T. Saario, J.P.N. Paine, "Effect of the Surface Film Electric Resistance on Eddy Current Detectability of Surface Cracks in Alloy 600 Tubes", Proc. 7th Int. Symp. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, pp. 177, Houston, TX, NACE (1995)
- [11] H.L. Libby, "Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods", pp. 128, R.E. Krieger Publishing Company, New York (1979)
- [12] V.S. Cecco, G.V. Drunen, F.L. Sharp, "Eddy Current Testing Volume 1: Manual on Eddy Current Method", AECL-7523, pp. 164, AECL, Ontario (1981)