

ECT를 이용한 마르텐사이트 재질의 균열결함 깊이측정 연구

김왕배[†] · 천근영^{*}

A Study on the Crack Depth Sizing Using ECT Technique for Martensitic Stainless Steel

Wang-Bae Kim[†], Keun-Young Cheon^{*}

ABSTRACT

The flaws detected by the non-destructive surface test methods shall be sized by means of the volumetric test such as an UT(ultrasonic test) or an ECT(eddy current test) for the purpose of analyzing and repairing them. It is generally known that the ECT is a comparatively effective technique for the small size cracks which are located shallowly from the surface. On this study, the ECT technique was tried to size the depth of the crack-like EDM notches, and it is identified that the ECT is an appropriate depth sizing technique for the shallow cracks less than 3mm in the Martensitic CA6NM material.

Key Words : ECT(와전류탐상검사), NDT(비파괴검사), Martensitic Stainless Steel(마르텐사이트계 스테인레스 강), Surface test(표면검사), Volumetric test(체적검사)

1. 서 론

원자력발전소의 주요 기기 및 구조물은 가동중 검사 프로그램에 따라 비파괴검사를 수행하여 건전성을 확인하고 있다. 검사 과정에서 결함 발견 시 보수 필요성 여부 판단 및 보수방법을 결정하기 위한 해석이 수행되어야 하며, 이러한 결함해석을 위해서는 정확한 깊이 측정이 전제되어야 한다.

가동중검사에 적용되는 비파괴검사 방법 중 체적검사의 경우 검사과정에서 취득된 신호를 이용하여 결함의 검출 및 크기(길이 및 깊이)측정이 모두 가능하나, 표면검사로는 결함의 깊이측정이 불가능하여 표면검사서 발견되는 결함에 대한 깊이 측정은 초음파탐상검사 또는 와전류 탐상검사와 같은 별도의 체적검사 기법을 적용하여 수행되어야

한다.

검사종류 및 기법의 선정은 피검사체 형상, 재질의 특성, 결함의 종류와 형태 등 주요 검사 관심사항을 고려하여 선정한다. 초음파탐상검사 방법은 피검사체에 대한 침투가 양호하여 비교적 두꺼운 재질의 큰 결함 깊이측정에 유리한 반면 접촉식에 따른 표면상태의 신호 영향과 근거리음장 효과에 따라 얇은 결함에 대한 정확한 깊이 측정이 곤란하다. 반면 와전류탐상검사의 특징은 비접촉식으로 빠르게 결함의 위치와 크기를 알아낼 수 있으며, 작은 결함에 대해서도 민감하게 반응하는 등 비교적 얇은 결함에 대한 정확한 크기측정이 가능하다. 이러한 특징으로 인하여 와전류탐상검사는 원자력발전소 증기발생기 튜브, 열교환기 튜브 및 핵연료봉과 같은 튜브류의 검사에 주로 사용되어 왔으며, 검사기법도 이들 기기의 검사조건 및 특성에 맞추어 개발되어 왔으나, 그 외 기기에 대한 표면검사 적용기법에 대해서는 많은 추가연구가 필요할 실정이다.

[†] 책임저자, 회원, 한국수력원자력(주) 원자력발전기술원

E-mail : wbkim@khnp.co.kr

TEL : (042)870-5022 FAX : (042)870-5029

* 한국수력원자력(주) 원자력발전기술원

국내 원자력발전소 2차계통 주요기기인 주급수 펌프, 보조급수펌프 및 복수펌프 등에 사용되는 재질 중 케이싱 및 임펠러 등에 주로 사용되는 마르텐사이트 재질, 특히 주조(Casting)용 CA6NM 재질에서 균열 결함이 발견되고 있으며, 이러한 결함의 보수필요성 여부 판단 및 보수방법 결정을 위한 해석을 위해서 결함의 정확한 깊이측정이 요구되고 있다.

본 연구에서는 주조(Casting)용 마르텐사이트 재질인 CA6NM 재질의 균열 결함 깊이측정에 대한 와전류신호 평가분석 실험을 수행하여, 최적의 깊이측정 방법과 깊이측정 결과의 신뢰성을 검증함으로써 향후 발전소 현안 발생시 기술지원에 활용하고자 한다.

2. 실험조건

2.1 재질 특성

마르텐사이트 스테인레스 강은 부식 저항성과 높은 강도 및 경도가 요구되는 계통에 적합한 특성을 가지고 있어 터빈 블레이드, 볼트, 밸브, 펌프 등 원자력발전소에 폭넓게 사용되고 있으며 비교적 만족스러운 기능을 발휘하는 반면 에이징에 따른 경년열화와 부적절한 열처리 등의 경우 높은 경도와 SCC(Stress Corrosion Cracking)에 대한 과도한 민감성으로 인해 균열결함이 발생할 수 있다.¹⁾

마르텐사이트 스테인레스 강 중 몇몇 종류는 운전온도에서 에이징에 의한 취성과파괴 결함이 발생된다. 실험에 따르면 Type 403, 410, 414, CA15와 같은 니켈 1%이하의 마르텐사이트는 약 575°F, 300,000시간의 운전조건에서도 취성과파괴에 심각하지 않은 반면 Type 431(16%Cr, 2%Ni)과 CA6NM(13%Cr, 4% Ni, 0.7%Mo)은 에이징에 따라 쉽게 취성과파괴 되고, SCC민감도가 증가되며, 이러한 현상은 운전온도가 높아지면 높아질수록 더 심해진다.²⁾ 아래의 Table 1은 마르텐사이트 스테인레스 강 중 주조용으로 사용되는 재질의 화학조성을 나타낸다.

주조용 마르텐사이트 강인 CA6NM 재질은 국내 원자력발전소 2차계통에 설치된 주급수펌프, 보조급수펌프 및 복수펌프 등에 사용되고 있으며,³⁾ 최

Table 1 Chemical compositions of casting Martensitic Stainless Steel (Unit : wt%)

조성 종류	C	Mn	P	S	SI	Cr	Ni	Mo
CA6NM	0.06 max.	1.00 max.	0.04 max.	0.03 max.	1.00 max.	11.5 ~14.0	3.5 ~4.5	0.4 ~1.0
CA15	0.15 max.	1.00 max.	0.04 max.	0.04 max.	1.50 max.	11.5 ~14.0	1.00 max.	0.50 max.
CA40	0.20 ~0.40	1.00 max.	0.04 max.	0.04 max.	1.50 max.	11.5 ~14.0	1.00 max.	0.50 max.

근 몇몇 펌프에서 균열결함이 발견되고 있다.

마르텐사이트 스테인레스 강은 자성체 재질로서 강한 투자율의 영향으로 와전류의 침투가 어렵고 위상각 퍼짐이 약하여 비 자성체 재질인 증기발생기 전열관 검사와는 다른 와전류탐상검사 특성을 가진다.

2.2 적용 검사기법

와전류탐상검사는 피검사체에서 발생하는 와전류의 흐름이 결함과 같은 불연속부의 영향을 받아 흐름이 방해되거나 변화되면, 와전류의 자장 변화에 따른 탐상코일의 임피던스가 변하는 것을 측정함으로써 결함이나 재료의 특징을 파악하는 비파괴 검사법이다.

체적검사법의 하나로 분류된 와전류탐상검사에 사용되는 와전류의 침투깊이는 피검사체의 투자율, 전도도 및 주파수 등에 따라 차이는 있지만 통상 2~3mm를 넘지 않는 경우에 적용되며, 따라서 와전류 탐상검사는 튜브류의 체적검사에 주로 사용된다.

본 실험의 대상이 되는 마르텐사이트 CA6NM 강의 경우 Casting용으로 사용되는 자성체 재질로서 강한 투자율의 영향으로 와전류의 침투 및 위상각 퍼짐이 약하여 깊은 결함에 대한 분석은 불가능하며, 따라서 연구대상 범위를 표면으로부터 3mm이내의 결함을 대상으로 하고자 한다. 이 영역은 초음파탐상검사시 근거리 음장 및 표면파의 간섭 영향으로 깊이 측정이 어려운 영역⁴⁾이므로 현장 적용 시에는 3mm이내의 얇은 결함은 와전류탐상검사 방법으로 그리고 3mm 이상의 깊은 결함에 대한 깊이 측정은 초음파탐상검사를 적절히 보완 적용함으로써 정확한 깊이측정이 가능할 것으로 판단된다.

2.3 실험장치 구성

균열결합 깊이 측정 및 분석을 위하여 와전류 주파수 발생장치와 신호취득 및 분석 프로그램 설치 워크스테이션으로 구성된 검사장비와 Plus point 탐촉자 및 EDM 노치 인공결합이 가공된 시편으로 실험 장치를 구성하였다.

2.3.1 검사장비

실험에 사용한 와전류 주파수발생장치는 미국 ZETEC사의 MIZ-70을 사용하였으며, 신호분석 및 평가 프로그램은 Eddynet-11i를 사용하여 장비를 구성하였다. 이 검사장비는 현재 국내 원자력발전소 증기발생기 전열관 검사에 사용되는 대표적 와전류탐상검사 장비로 32가지의 주파수 지원과 최고 40개의 탐촉자 및 최대 640채널 운영이 가능하며, 원자력발전소 증기발생기 가동중검사에 사용되는 검증된 장비를 사용함으로써 장비의 불확실성으로 인한 실험결과에 미치는 영향을 배제하였다.

2.3.2 탐촉자

와전류탐상검사의 탐촉자 코일 형태는 피 검사체의 형상과 재질특성을 반영하여 설계 제작된다. 통상적인 튜브류 검사시에는 내삽형인 Bobbin 코일 또는 외삽형인 Encircling 코일 탐촉자를 사용하는 반면 표면검사시에는 Pancake 또는 Plus(+) point 탐촉자를 사용한다.

본 실험을 위하여 준비한 plus point형 탐촉자는 굴곡형상의 피검사체에 대한 원활한 스캐닝을 위하여 직경 3.5mm의 작은 크기로 제작하였다. 또한 자성체재질인 마르텐사이트의 투자율에 의한 영향에도 불구하고 가능한 침투깊이를 증가시키기 위하여 탐촉자 중심부에 페라이트 Core를 적용하였다. Fig. 1은 본 실험에 사용한 탐촉자의 코일 형상을 나타낸다. EDM 노치에 대한 ECT신호 취득시 탐촉자의 2개 코일 중 하나는 노치의 방향과 수직되게 스캐닝 되어야 한다. 연구결과에 따르면 Plus point 탐촉자가 균열결합을 스캐닝 할 때 결합의 방향과 탐촉자 코일의 방향이 직각으로 교차할 때 신호가 가장 강하게 취득되며, 동일방향일 경우는 와전류의 흐름에 영향이 없으므로 신호가 취득되지 않는다.

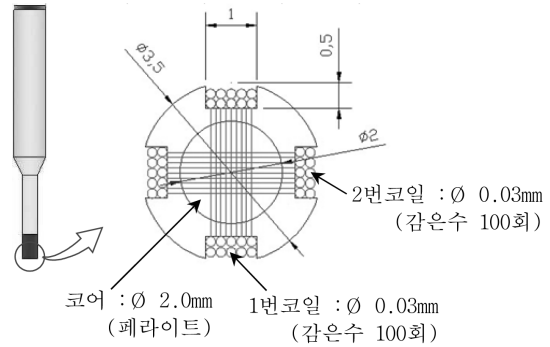


Fig. 1 Plus point probe configuration

2.3.3 실험시편

본 실험을 위하여 2가지 종류의 시편을 제작하였다. 하나는 Calibration block으로 사용하기 위한 것이며, 다른 하나는 균열깊이 측정의 신뢰도를 검증하기 위한 Test block으로 재질은 모두 Martensite CA6NM강을 발전소에서 확보한 현장기기와 동일한 재질이다.

Calibration block용 시편에는 0.5mm부터 5.5mm까지 6개의 EDM Notch를 인공결합으로 가공하였으며, 노치 깊이에 따른 와전류 신호를 1mm 간격으로 취득하여 Calibration curve를 작성하였다. Table 2는 Calibration block에 가공된 노치의 크기를 나타내며, Fig. 2는 Calibration block 시편의 인공결합 가공 형상으로 이것은 Test block 시편에도 동일한 형상으로 가공하였다.

Test block용 시편에는 1mm, 2mm, 3mm 및 5mm, 7mm, 9mm의 6개 EDM Notch를 인공결합

Table 2 Calibration block notch specifications (Unit : mm)

Notch 구분	①	②	③	④	⑤	⑥
Length	15	15	15	50	50	50
Width	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Depth	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5

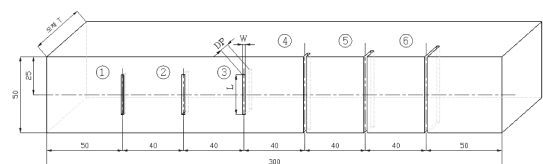


Fig. 2 Calibration/Test block EDM notch configurations

Table 3 Test block notch specifications (Unit : mm)

Notch 구분	①	②	③	④	⑤	⑥
Length	15	15	15	50	50	50
Width	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Depth	1.0	2.0	3.0	5.0	7.0	9.0

으로 가공하였으나 본 실험의 목적에 따라 1mm, 2mm, 3mm의 3개 노치만 실험에 사용하였다. Table 3은 Test block에 가공된 노치의 크기를 나타낸다.

2.4 신호취득 모드

와전류탐상검사는 중점 관심요소, 피검사체의 특성 및 탐촉자 등 검사여건을 고려하여 다양한 모드의 신호취득이 가능하다. 본 실험에서는 위치를 알고 있는 결함의 깊이측정을 고려하여 자기보상(Self compensated) 차동형 모드를 적용하였다.

자기보상 차동형 모드는 2개의 코일 자장에 의해 영향을 받는 부위에서 발생한 전기적 특성 신호를 서로 비교, 상쇄하여 차이값만을 가지고 평가하는 검사방법이다. 만약 2개의 코일이 시험체의 동일한 조건에 의해서 영향을 받게 되면 서로 상쇄되어 신호는 발생하지 않게 되며, 또한 두 코일이 매우 인접되어 있고 동일 부위에 와전류가 유도되기 때문에 점진적으로 발생하는 진도도, 투자율 변화 및 Lift-off 등 검사조건에 따른 영향을 최소화 시킬 수 있다.

3. 실험 및 고찰

3.1 깊이측정 기법 및 주파수 선정

와전류탐상검사 기법을 활용한 결함의 깊이측정은 위상각을 이용하는 방법과 신호의 진폭값을 활용하는 방법이 있다. 위상각법은 결함의 깊이에 따른 와전류 침투 및 응답시간의 차이로 발생하는 신호 위상각의 변화를 이용하는 방법이며, 진폭법은 결함의 깊이에 따른 와전류 응답신호의 크기 차이를 이용하는 깊이 측정 방법이다.

Fig. 3은 주파수별 Calibration block의 노치 깊이별 신호의 위상각 퍼짐을 알아보기 위한 신호의 모양이다. 채널 1번 800kHz부터 채널 8번 100kHz까지 100kHz 간격으로 8개의 채널을 정하고 각 채널에서 Calibration block에 있는 0.5mm부터 5.5mm까지 6개의 노치 신호를 취득하여 각 주파수에서 동일 노치의 진폭값을 비교하였다. Table 4에서 알 수 있는 바와 같이 깊이가 같은 노치에 대한 ECT신호 진폭값이 600kHz에서 가장 크게 취득, 평가되어 600kHz를 기본주파수로 정하였다.

에서 Calibration block에 있는 0.5mm부터 5.5mm까지 6개의 노치 신호를 취득하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 동일 주파수에서 결함 깊이별 위상각 변화가 없어서 위상각법은 적용할 수 없었다. 이것은 자성체재질인 마르텐사이트의 투자율을 고려할 경우 이론적으로 예상된 것과 같은 결과이다. 따라서 깊이측정 기법은 결함깊이에 따른 진폭 변화가 분명한 진폭법을 적용하는 것으로 하였다.

실험에 사용한 탐촉자는 100kHz부터 800kHz까지를 공진주파수 대역으로 제작되었다. 그러나 실험에 사용할 기본주파수 선정을 위하여 채널 1번 800kHz부터 채널 8번 100kHz까지 100kHz 간격으로 8개의 채널을 정하고 각 채널에서 Calibration block에 있는 0.5mm부터 5.5mm까지 6개의 노치 신호를 취득하여 각 주파수에서 동일 노치의 진폭값을 비교하였다. Table 4에서 알 수 있는 바와 같이 깊이가 같은 노치에 대한 ECT신호 진폭값이 600kHz에서 가장 크게 취득, 평가되어 600kHz를 기본주파수로 정하였다.

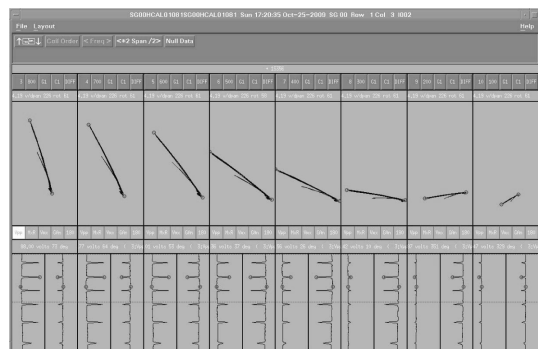


Fig. 3 ECT signals of the Calibration block notches

Table 4 ECT amplitude data of calibration block notches (Unit : Volt)

Notch 주파수	0.5mm	1.5mm	2.5mm	3.5mm	4.5mm	5.5mm
800kHz	48.7	78.9	87.1	92.3	89.7	79.0
700kHz	50.4	82.0	90.6	96.4	93.6	82.5
600kHz	50.6	82.9	91.6	97.9	95.0	83.8
500kHz	48.6	80.3	88.8	95.4	92.3	81.5
400kHz	43.8	73.2	81.0	87.4	84.6	74.7
300kHz	35.6	60.6	67.1	72.7	70.4	62.1
200kHz	24.0	42.5	47.0	51.1	49.6	43.5
100kHz	10.5	20.1	22.2	24.2	23.5	20.5

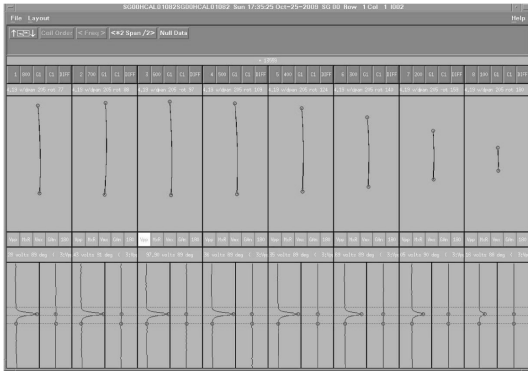


Fig. 4 ECT amplitude data of 3.5mm notch

3.2 깊이측정 실험

3.2.1 진폭-깊이 곡선

임의의 ECT신호 진폭값을 깊이로 평가하기 위하여 진폭-깊이 곡선을 작성하였다. Calibration block 노치로부터 취득한 ECT 신호 진폭값 중 실험범위에 해당하는 0.5mm부터 3.5mm까지 4개의 노치에 대한 ECT신호 진폭값 및 “0”점 등 5개의 점을 기준값으로 하였으며 Table 5는 진폭-깊이 곡선 작성에 사용된 노치신호 진폭값이다.

곡선은 EddyNet-11i 프로그램의 Calibration Curve 기능을 이용하여 작성한 곡선과 보간법으로 깊이를 측정하는 곡선 등 2가지로 작성하여 비교 실험하였다. EddyNet-11i 프로그램의 Calibration Curve 기능을 이용하여 작성한 진폭-깊이 곡선은 취득된 5회의 진폭값 중 평균값에 근접한 신호를 기준점으로 하였으며, 깊이는 5mm를 100%로 가정하여 10%, 30%, 50%, 70%로 작성하였다. 보간법 곡선은 Table 5의 평균값을 기준점으로 작성하였다. Fig. 5는 EddyNet-11i 프로그램의 기능을 이용하여 작성한 곡선이며, Fig. 6은 보간법을 적용하기 위하여 작성한 곡선이다.

3.2.2 깊이 측정

깊이측정을 위하여 Test block에 있는 1mm, 2mm, 3mm 등 3개의 노치에 대하여 각각 5회씩 신호를 취득 분석하였다. 각각 취득된 ECT신호의 진폭값을 EddyNet-11i 프로그램의 Calibration Curve에 대응하여 평가된 깊이값을 “프로그램 곡선” 값으로, 그리고 보간법 곡선에 대입하여 평가된 깊이값을 “보간법 곡선” 값으로 하여 비교 평가한 것

Table 5 ECT amplitude data for calibration curve

	1회	2회	3회	4회	5회	평균
0.5mm	48.03	46.23	50.55	46.04	49.57	48.08
1.5mm	80.05	82.85	79.12	77.01	81.83	80.17
2.5mm	87.41	90.17	91.62	91.23	88.99	89.88
3.5mm	97.64	96.71	95.46	96.59	97.95	96.87

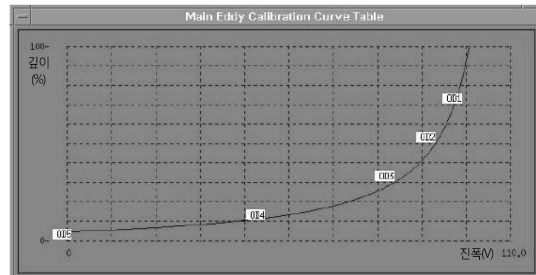


Fig. 5 Amplitude-Depth curve of the EddyNet-11i program

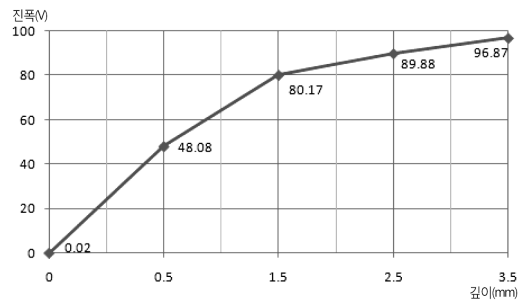


Fig. 6 Amplitude-Depth interpolation curve

을 Table 6에 정리하였다.

평가결과 EddyNet-11i 프로그램의 Calibration curve를 이용한 결함의 깊이 평가값은 실제 노치의 깊이에 비하여 전반적으로 작게 평가된 반면 보간법을 이용한 깊이 평가값은 실제값에 매우 근접하게 평가되었다. 이를 통하여 자성체 재질의 3mm 이하 침투깊이 범위에서는 와전류의 전류밀도가 거의 선형적으로 거동하는 것을 알 수 있으며, 주조용 마르텐사이트 CA6NM 강의 3mm 이내의 결함에 대하여 Plus point 탐촉자를 이용한 와전류탐상 검사 깊이 측정시 보간법이 현장 적용에 적절함을 확인하였다.

EddyNet-11i 프로그램 곡선을 이용한 평가값의 RMS 오차가 약 5%, 보간법을 이용한 평가값의 RMS 오차 약 1%로 실제값에 근접하게 평가되었

Table 6 The depth sizing results obtained by applying amplitude calibration curves

		1회	2회	3회	4회	5회	평균
1mm 노치	진폭값 (V)	65.36	64.33	68.14	62.78	64.58	65.04
	프로그램곡선 (mm)	0.9	0.85	0.95	0.8	0.85	0.87
	보간법곡선 (mm)	1.02	1.00	1.06	0.98	1.01	1.01
2mm 노치	진폭값 (V)	86.94	85.77	86.34	88.42	84.68	86.43
	프로그램곡선 (mm)	1.95	1.85	1.9	2.10	1.75	1.91
	보간법곡선 (mm)	2.05	2.02	2.03	2.08	1.99	2.03
3mm 노치	진폭값 (V)	92.88	91.42	93.78	91.66	92.39	92.43
	프로그램곡선 (mm)	2.75	2.5	2.95	2.55	2.65	2.68
	보간법곡선 (mm)	2.98	2.94	3.01	2.94	2.97	2.97

지만 이는 실험실 조건에서 Calibration block과 Test block의 실험상태가 매우 유사한 상태에서 얻어진 것으로 실제 현장에서는 이보다는 더 큰 오차가 발생될 것으로 예상된다. 또한 탐촉자 코일과 결함의 각도 및 검사자의 스캐닝 조건 등 미세한 영향에 따라 와전류 신호가 변화함을 고려할 경우 실제 현장 검사시에는 동일한 검사조건에서 여러 번 신호를 취득하여 깊이를 평가한 후 가장 크게 평가된 깊이값을 적용함이 보수적 관점에서 타당할 것으로 판단된다.

4. 결론

주조용 마르텐사이트 강인 CA6NM 재료의 균열 결함에 대한 와전류탐상검사법을 이용한 결함 깊이 측정 연구결과 다음의 결론을 도출하였다.

1. 자성체로서 높은 투자율을 가지는 마르텐사이트 스테인레스 강의 균열결함 깊이 측정을 와전류 탐상검사기법으로 하고자 할 경우 위상각법 보다는 진폭법이 더 정확하다.

2. Plus point 탐촉자를 사용한 와전류탐상검사법을 적용할 경우 주조용 마르텐사이트 CA6NM 강의 깊이 3mm 이내 표면결함까지 깊이 측정이 유효함을 확인하였다.

3. 진폭법을 이용한 결함의 깊이 평가시 사용되는 진폭-깊이 곡선은 Eddytest-11i 프로그램의 Calibration curve 기능을 사용하는 것 보다 보간법을 적용함이 더 적합함을 확인하였다.

실험을 통하여 확인한 결과 Plus point 탐촉자를 이용한 와전류 신호 취득시 스캐닝 각도, 검사자 기법 등 미세한 변화에도 신호 진폭값이 민감하게 반응함에 따라 현장 검사시 여러 번의 신호 취득 후 최대값을 가지고 평가함이 보수적 관점에서 타당할 것으로 판단된다.

본 실험 결과는 국내 원자력발전소 2차계통 주급수펌프, 보조급수펌프 등 마르텐사이트 CA6NM 재료의 표면결함 검출시 깊이 측정 기술지원에 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

1. EPRI TR-1014481, 2006, "Materials Handbook for Nuclear Plant Pressure Boundary Applications", p.18
2. M. Tsubota, et al., 1992, "Characterization of Long Term Aged Martensitic Stainless Steels", pp. 305-310
3. 한국수력원자력(주), 2006, "가동원전 기기 사양 편람", pp.44-45, 126-134
4. 박철용, 김진희, 2009, "펌프 Diffuser vane 표면결함 깊이 측정 기법 개발" 압력공학회지