'99 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

외삽 차동형 탐촉자를 사용한 연구로용 핵연료봉의 와전류탐상 시스템 개발

Development of Eddy Current Testing System using Encircling Differential Probe for Research Reactor Fuel Elements

이윤상, 이돈배, 김정도, 우윤명, 김창규

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

연구로인 하나로의 핵연료봉은 제작시 피복 부위에 품질관리 절차에서 규정한 크기 이상의 결함이 없도록 와전류탐상법을 사용하여 품질검사를 하도록 되어 있다. 와전류탐상시스템을 개발하기 위하여 외삽 차동형 와전류탐촉자 및 표준시험편을 설계 제작하였다. 제작된 탐촉자에 대해서는 임피던스 분석기를 사용하여 주파수에 따른 임피던스 값을 측정하고, 요구되는 결함 크기를 검출할 수 있는가를 조사하였다. 그 결과 이 탐촉자를 사용하여 길이 2 mm 피복 두께 대비 깊이 10 % 인공 노치를 검출할 수 있었으며, 조사시험을 위한 연구로용 핵연료봉의 제조 시 피복 부위에 존재하는 결함을 성공적으로 검사할 수 있었다.

Abstract

The cladding area of HANARO(Research Reactor) fuel elements should be checked not to have any defects larger than the size required at QA documents by using eddy current testing method during fabrication process. To develop eddy current testing system, encircling differential probes and standard specimen were designed and fabricated. The impedance of the fabricated probes was measured with impedance analyzer and the detectability of this probes was investigated. The developed probes could detect artificial notch with 2mm length 10 % depth of cladding thickness in cladding. In addition, the probe was successfully applied to detect the defects in cladding during fabrication of the irradiation test fuels.

1. 서론

연구로인 하나로의 핵연료봉은 제작시 피복 부위에 결함이 없도록 와전류탐상법을 사용하여 품질검사를 하도록 되어 있다.[1] 연구로용 핵연료 제작 시 U_3Si와 Al 분말을 혼합한 핵연료 심재에 순수 알루미늄(AA1060)을 압출하여 피복관을 제작하는 바 여기에서 발생할 수 있는 결함들(개재물, 표면 scratch, lamination 등)을 검출하기 위하여 와전류탐상 시스템을 개발하였다. 하나로의 품질관리절차에 의하면, 표면 결함의 최대 허용 크기는 핀을 제외한 몸체 부분에서 0.13 mm(0.005")를 초과하지 말아야 한다. 이와 같은 결함을 검출하기 위해서는 핀에 의한 탐촉자 흔들림 신호(Wobbling 신호)를 최대한 억제할 수 있는 차동형 외삽형 탐촉자를 설계 제작하였고, 그 탐촉자의 분해능을 조사하여 품질관리을 충족하는 결함을 검출하는가를 조사하였다. 검사대상체의 제원은 다음과 같다.

- 피복관: Al(AA1060/0.76mm - 1.19mm)을 동심 압출
- 발생 가능 결함: - 피복관 내의 개재물(Inclusion)
  - 외면 결함(Scratch 등)
  - 피복관의 핀 아래부위의 Lamination
  - 피복관과 심재 사이의 Gap

2. 검사주파수 선정

와전류탐상에서 시험주파수는 결함의 검출 가능성 여부와 결함 평가의 신뢰도에 크게 영향을 미치는 매우 중요한 변수이다.

와전류의 표준 침투 깊이는 다음과 같이 구해지며 시험체가 정해지면 표준 침투 깊이는 주파수의 함수이다. 따라서 주파수를 변화시킴으로써 와전류 침투 깊이를 인위적으로 조정할 수 있다.

$$\delta = 50\sqrt{\frac{\rho}{f\,\mu_r}}$$

여기서 $\mu_r = 1$
f = 시험주파수
ρ = 전기비저항($\mu\Omega - cm$)

일반적으로 결함을 검출하기 위해, 내면 결함과 외면 결함과의 위상이 90도 정도 벌어지는 검사주파수를 기본 주파수로 사용한다. ASNT NDT Handbook[2,3] 에서는 얇은 관의 검사시 결함을 검출할 목적으로 사용하는 시험주파수는 다음 수식을 사용해서 구하도록 추천하고 하고 있다.

$$f = \frac{3\rho}{T^2} = \frac{3\times 2.8}{(0.76)^2} = 14.5\,kHz \simeq 15\,kHz$$

여기서 ρ = 전기비저항 ($\mu\Omega$-cm)
T= 피복관의 두께(mm)

따라서 기준 주파수를 15 kHz로 선택하였다.

3. 와전류탐촉자 설계

핵연료봉을 검사할 수 있도록 허용 공차를 감안하여 탐촉자의 내경을 10.1mm로 제작하였으며, 탐촉자의 형태는 외삽 차동형 (Encircling Differential Type)으로 제작하였다.

코일의 임피던스를 와전류탐상장비 MIZ-40A의 매칭 임피던스인 100 Ω으로 제작하기 위하여 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$Z = 2\pi fL$$

여기서 Z = Impedance
L = Inductance
f= 시험주파수

따라서 원하는 임피던스 값을 얻기 위해서는 적절한 인덕턴스 값을 알아야 하는데 인덕턴스 값은 탐촉자의 형상 및 코일의 턴수에 따라 아래 수식에 의해 결정된다.[4,5]

$$L = \frac{0.8\,(rN)^2}{6r + 9l + 10b}$$

여기서, L=self-inductance in microhenries(μH)
N= total number of turns
r=mean radius in inches
b=coil depth or thickness in inches
l= length of coil

이 수식을 사용하면 15 kHz에서는 250회를 얻는다. 따라서 탐촉자를 제작하기 위해 코일 선재의 직경 0.08mm를 사용하여 250회 감았다. 코일 간격은 2 mm로 하였다. 탐촉자와 커넥터는 동축케이블(RG174)을 사용하여 연결하였으며, 길이는 1 m이다. 이와 같이 설계한 와전류탐촉자 설계도면은 그림 1과 같다.

제작된 탐촉자의 장비와의 임피던스 매칭을 확인하기 위해 HP4194A Impedance Analyzer를 사용하여 임피던스 값을 측정하였다. 그림 2는 250회(#1) 및 80회(#2)에 대한 임피던스 측정 결과이다. 250회 감은 탐촉자의 15 kHz에서의 임피던스 값은 약 103옴으로 이론식에 계산 결과와 근접하는 값을 얻을 수 있었고, 장비의 임피던스 매칭 범위가 20 Ω ~ 150 Ω과 같이 매칭임피던스 범위가 있기 때문에 사용하는데 문제가 없다.

4. 표준시험편

표준시험편의 재료는 하나로 핵연료봉의 동심압출 피복관과 동일한 재료로 화학조성 및 열처리 상태가 같아야 한다. 핵연료봉 제조 시 Al 1060으로 동심압출하므로, 표준시험편도 Al 1060을 동심압출한 Dummy 봉을 사용하였다. 표준시험편은 와전류탐상 시스템을 보정하기 위한 인공결함 신호를 가져야 한다.[6] 이러한 인공결함은 방전가공(Electro-Discharge Machining)으로 가공을 하였으며, 그림 3 및 표 1과 같이 표면으로부터 관 두께 0.76 mm 대비 100%, 80%, 60%, 40%, 20% 깊이의 결함을 갖도록 가공하였다.

표 1. 표준시험편의 인공결함 크기

결함명칭	A	B	C	D	E	F	G
결함크기	100% Φ0.76	100% Φ1.0	100% Φ1.2	80% Φ1.2	60% Φ1.2	40% Φ1.5	20% Φ1.5

5. 와전류시험 결과

5.1 표준시험편 신호

제작된 탐촉자 및 표준시험편을 사용하고, 검사 장비는 MIZ-40A를 사용하여 와전류신호를 수집하였다. 그림 4는 시험주파수 15 kHz를 사용한 100%에서 20%까지의 인공결함 신호를 보여준다. 이 때 100% 인공결함 신호는 위상각 40도에 맞췄고, 게인값은 42에 맞췄다.

5.2 결함 검출능 시험

제작된 탐촉자의 결함 검출능을 시험하기 위해, 길이 2 mm 폭 0.2 mm의 EDM notch 시험편 그림 5와 같이 제작하였고, 이들에 대해 결함에 대한 반응도를 조사하였다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 외면결함에 대해서는 15 kHz에 대해 길이 2mm 폭 0.2mm의 인공결함(EDM Notch)에 대해 10%에서 50%까지 모든 결함을 검출할 수 있었다.

5.3 핵연료봉 제조공정 중 와전류시험 결과

위에서 제작된 탐촉자 및 표준시험편에 사용한 Fuel Element의 와전류탐상검사 절차서를 작성하여 이에 따라 연구로용 핵연료봉 제조 공정 중 와전류탐상검사를 수행하였다.
제작 중 외면 scratch 또는 피복재 내부에 발생한 inclusion 등을 검출하였으며, 그림 7에 inclusion의 와전류 신호는 그림 7에 나와있고, 이 결함신호에 대해 결함의 형태를 X-ray Radiography로 확인한 사진은 그림 8에 나와있다.

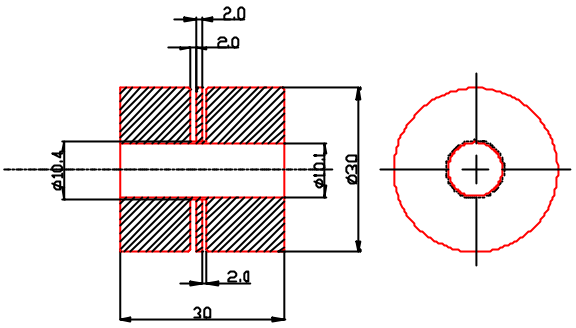
6. 결론

1) 충전율이 55% 미만인 핀이 달린 연구로용 핵연료봉의 검사에서 외삽 차동형 와전류탐촉자를 사용하여 요구하는 크기 이상(길이 2mm 17% 외면결함)의 결함 및 클래딩 내부에 존재하는 개재물 등도 잘 검출함을 확인할 수 있었다.
2) 임피던스 매칭 방법에 의하여 검사주파수에서 원하는 임피던스를 가진 탐촉자를 제작할 수 있었다.
3) 설계 제작한 탐촉자 및 표준시험편을 이용하여 하나로 핵연료 제조 공정 중 핵연료봉에 대한 와전류탐상검사를 수행할 수 있었다.

감사의 글: 본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 중장기사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌:

[1] General Procedure for Eddy Current Testing, AECL NFFF Inspection Procedure, 94.
[2] Nondestructive Testing Handbook, 2nd Ed. Vol. 4 Eletromagnetic Testing , ASNT 1986 pp449-457
[3] Nondestructive Testing Handbook, 2nd Ed. Vol. 4 Eletromagnetic Testing , ASNT 1986 pp440
[4] ASNT-SG-ET3-83, "Level III Study Guide, Eddy Current Method", 1983, p17
[5] 곽성우 외, "와전류신호에 미치는 탐촉자 설계 변수 영향 평가 및 조사 핵연료 검사용 와전류 탐촉자 개발", 99 춘계학술발표요약집, 한국원자력학회, p76
[6] ASME Section V, Article. 8, Appendix I



Coil turn = 250
Coil diameter=0.08
Cable length=1 meter

그림 1. 연구로용핵연료 와전류 탐촉자 설계도

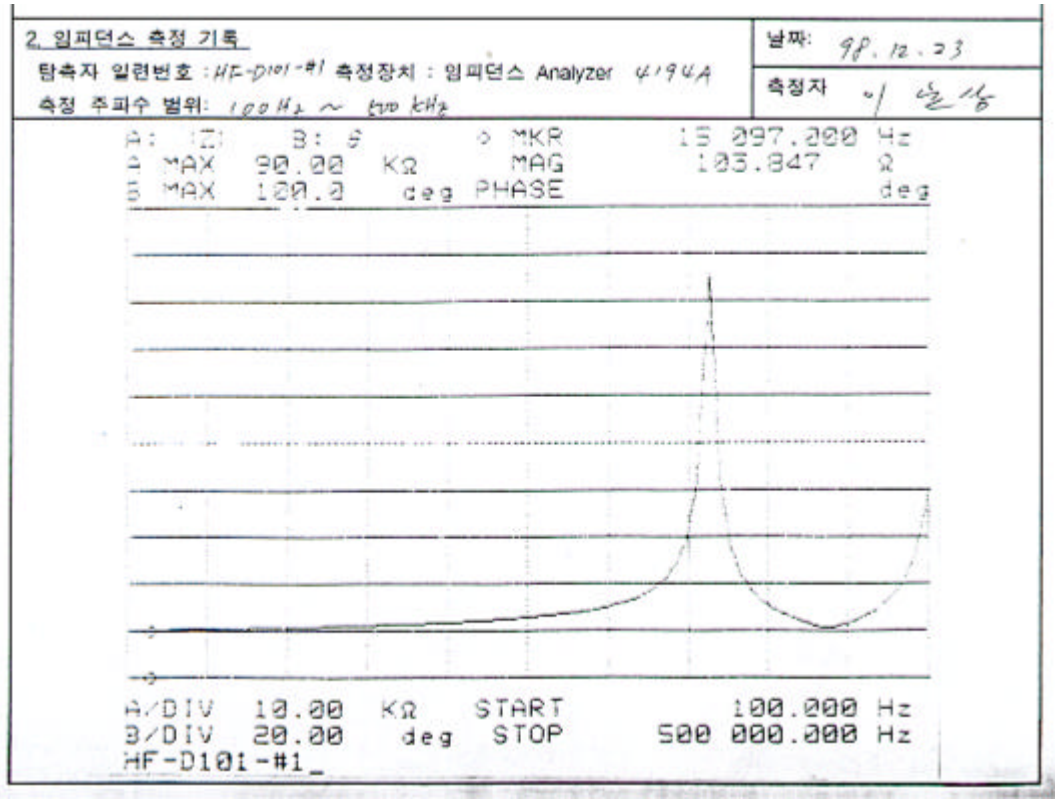


그림 2. 250회 감은 탐촉자의 임피던스

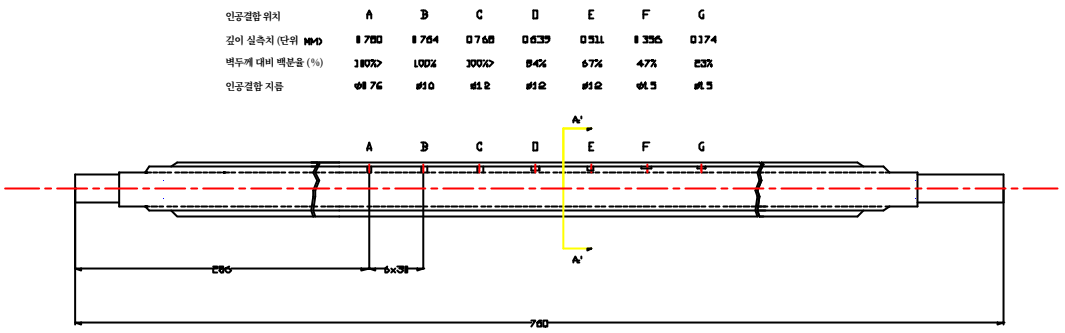
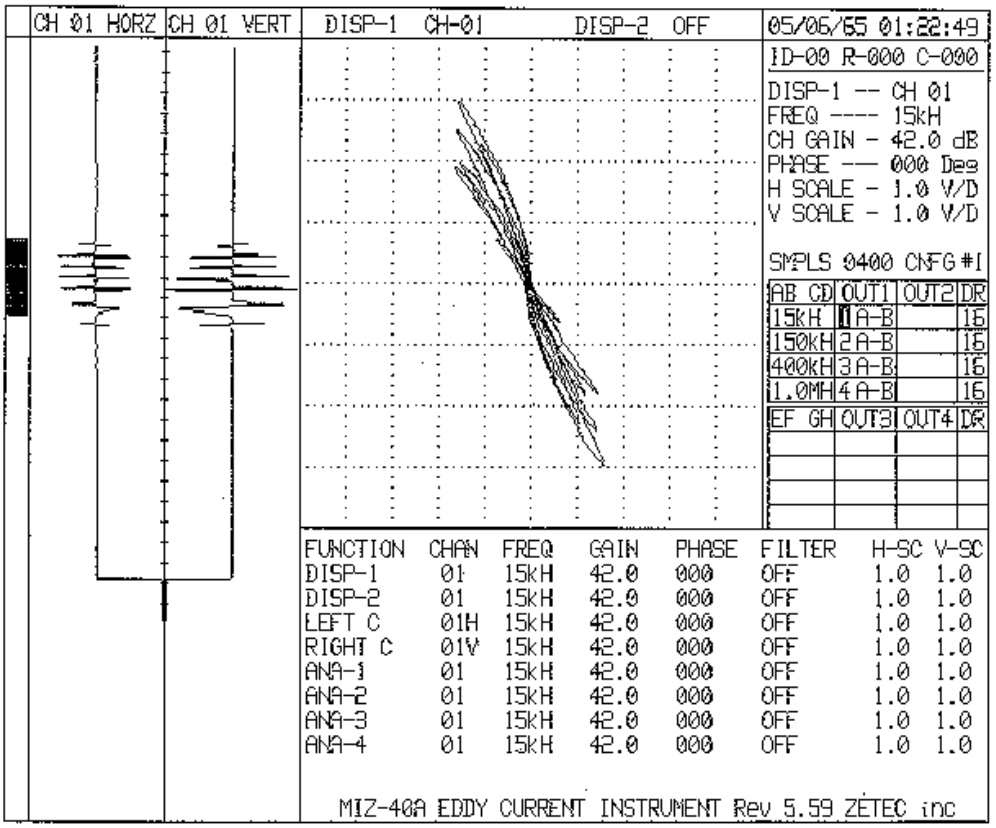


그림 3. 표준시험편 제작 도면



그

림 4. 표준시험편의 인공결함 신호

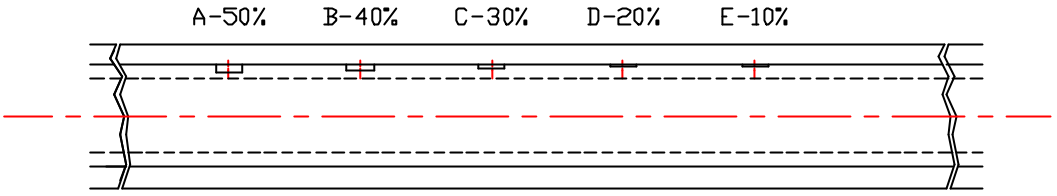
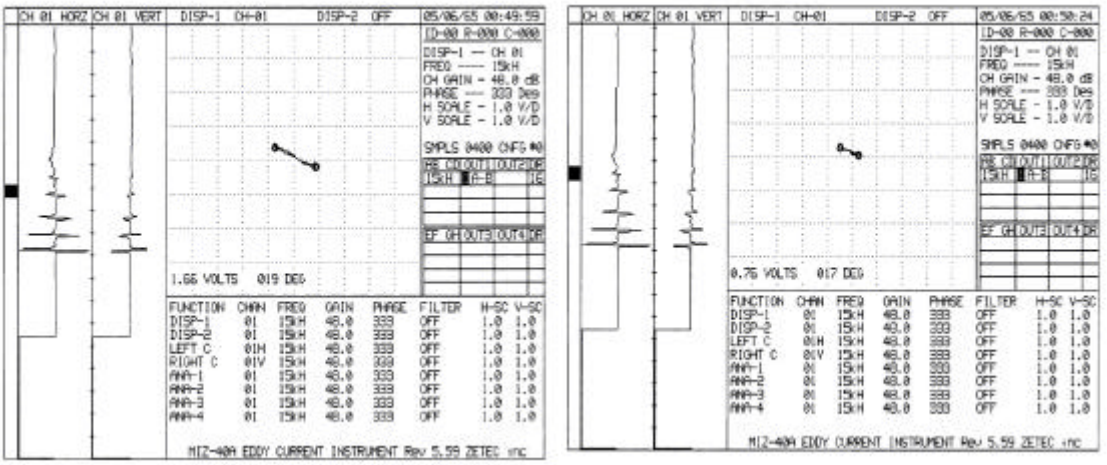


그림 5. EDM -Notch 시편



a) 20% 외면결함신호

b) 10% 외면결함신호

그림 6. EDM-Notch 신호