

외삽 차동형 탐촉자를 사용한 연구로용 핵연료봉의 와전류탐상

Eddy Current Testing using Encircling Differential Probe for Research Reactor Fuel Rods

이운상*, 김창규*

Yoon-Sang Lee* and Chang-Kyu Kim*

초 록 연구로인 하나로의 핵연료봉은 제조 시 피복층에 품질 관리 절차에서 규정한 크기 이상의 결함이 없도록 와전류탐상 검사를 하도록 되어 있다. 와전류탐상검사 절차를 수립하기 위하여 외삽 차동형 와전류탐촉자 및 표준시험편을 제작하였다. 임피던스 분석기를 사용하여 제작된 탐촉자에 대한 임피던스값을 측정하여 검사주파수 영역에서 최대 감도를 얻도록 제작되었는지를 조사하였고, 이 탐촉자 및 MIZ-40A 와전류탐상기를 사용하여, 요구되는 결함 크기를 검출할 수 있는가를 조사하였다. 그 결과 이 탐촉자를 사용하여 길이 2mm 피복 두께 대비 깊이 10%인 인공 노치를 검출할 수 있었으며, 연구로용 핵연료봉의 제조 시 피복층에 존재하는 결함을 성공적으로 검사할 수 있었다.

주요용어: 와전류탐상, 연구로용핵연료봉, 외삽형탐촉자

Abstract: The cladding area of HANARO Research Reactor fuel rods 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 apply eddy current testing inspection to the fuel rods, encircling differential probes and standard specimen were designed and fabricated. The impedance of the fabricated probes was measured with impedance analyzer in order to check that the probe has a suitable impedance for the inspection frequency, and with this probe and MIZ-40A eddy current equipment, the detectability of this probes was investigated. The developed probes could detect artificial notch with 2mm length 10% depth of cladding thickness in cladding area. In addition, the probe was successfully applied to detect the defects in cladding area during fabrication of the research reactor rods.

Keywords: eddy current testing, research reactor fuel rods, encircling differential probe

1. 서 론

연구로용 핵연료봉은 연구로 가동 중에 발생하는 열을 효과적으로 전달하고, 냉각수의 흐름을 좋게 하기 위해 핵연료 심재를 감싸는 피복층이 필요하다. 핵연료 심재는 U3Si와 Al 분말을 혼합한 후, 압출하여 지름 6.35mm의 봉을 만들고, 피복층은 AA1060 알루미늄을 압출하여, 핵

연료 심재 외부를 두께 0.76mm로 피복하며, 그 외부에는 열전달을 좋게 하기 위한 높이 1.02mm 두께 0.76mm의 8개의 핀이 달려있으며 전체 길이는 760mm이다.(Fig. 1) 알루미늄 피복 압출은 압출 die 중심에 핵연료 심재를 통과시키면서 알루미늄 빌렛을 500 ~ 520℃로 가열하여 압력을 가하여 피복을 하는 것으로, 이러한 공정에서는 표면 scratch, pin hole, blister, dent 등의 결함이 발생할

수 있으며, 핵연료 심재와 피복층 사이의 gap이 발생하거나 또는 핵연료 분말 입자가 inclusion 형태로 존재할 수 있다.

피복층에 존재하는 결함은 연구로 가동 중에 핵분열 물질이 누출되어 냉각수를 오염시킬 수 있기 때문에 핵연료봉 제조 시 와전류탐상 검사(ECT: Eddy current testing)를 하도록 되어 있다.[1] 하나로의 품질관리절차에 의하면, 표면 결함은 길이 2mm 깊이 0.13mm(피복 두께 0.76mm 대비 17%)를 초과하지 말아야 한다.

이와 같은 품질검사 요건을 만족시키는 와전류탐상 절차를 수립하기 위해 외삽 차동형 탐촉자를 설계 제작하였고, 길이 2mm 깊이 0.13mm의 결함을 검출할 수 있는가를 조사하였다.

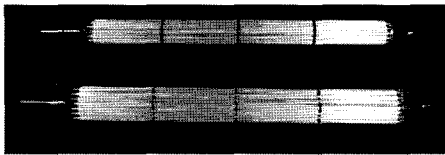


Fig. 1 HANARO Fuel Assembly

2. 검사주파수 선정

와전류탐상에서는 와전류의 침투깊이를 고려하여, 검사의 기본주파수를 선정하게 된다. 일반적으로 결함을 검출하기 위해, 내면 결함과 외면 결함과의 위상이 90도 정도 벌어지는 주파수를 기본 주파수로 사용한다. 기본 검사주파수는 식 (1)을 사용하여 계산하였다[2].

$$f = \frac{3\rho}{T^2} = \frac{3 \times 2.8}{(0.76)^2} = 14.5 \text{ kHz} \approx 15 \text{ kHz} \dots\dots\dots (1)$$

- 여기서 ρ = 전기비저항 ($\mu\Omega$ -cm)
- T = 피복관의 두께(mm)
- 알루미늄의 비저항 = $2.8 \mu\Omega$ -cm

이 계산 결과에 의해 기준 주파수를 15kHz로 선택하였다.

3. 와전류 탐촉자 제작

핵연료봉을 검사할 수 있도록 허용 공차를 감안하여

탐촉자의 내경을 10.1mm로 제작하였으며, 탐촉자의 형태는 외삽 차동형 (Encircling Differential Type)으로 하였다.(Fig. 2)

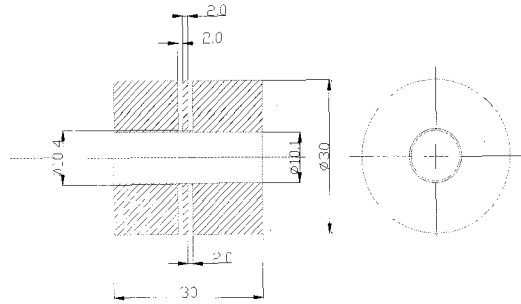


Fig. 2 Probe body dimension

식 (2)에 와전류탐상 장비 MIZ-40A의 매칭 임피던스인 100Ω 및 검사주파수 15kHz를 대입하면, 요구되는 인덕턴스 값을 계산할 수 있다.

$$Z = 2\pi fL \dots\dots\dots (2)$$

- 여기서 Z = Impedance
- L = Inductance
- f = 시험주파수

따라서 제작하고자 하는 탐촉자의 턴수(권선수)는 식 (3)에 탐촉자의 형상 및 인덕턴스 값을 대입하면 계산할 수 있다.[3]

$$L = \frac{0.8 (rN)^2}{6r + 9l + 10b} \dots\dots\dots (3)$$

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

계산결과 기본검사주파수 15 kHz에 대해 턴수는 250회가 된다. 탐촉자와 커넥터는 동축케이블(RG174)을 사용하여 연결하였으며, 길이는 1m로 하였다. HP4194A Impedance Analyzer를 사용하여 제작된 탐촉자의 임피던스 값을 측정하였다.(Fig. 3) 250회 감은 탐촉자의 15kHz에서의 임피던

스 값은 약 103Ω으로 이론식에 대입한 100Ω에 근접한 값을 얻을 수 있었다.

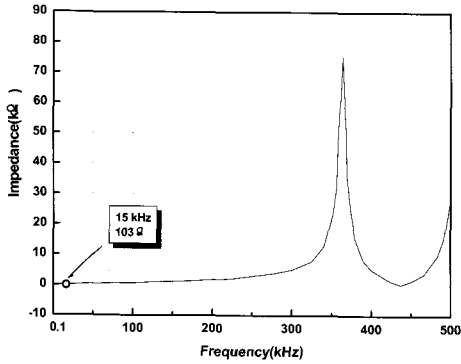


Fig. 3 Impedance of fabricated probe at various frequencies.

4. 표준시험편

표준시험편(standard rod)의 재료는 Al 1060을 동심 압출한 Dummy봉을 사용하였다. 표준시험편은 와전류탐상 시스템을 보정하기 위한 인공결함 신호를 가져야 한다.[4] 이러한 인공결함은 방전가공(EDM : Electro-Discharge Machining) 방법으로 가공하였으며, Fig. 4와 같이 피복 표면으로부터 관 두께 0.76mm 대비 100%, 80%, 60%, 40%, 20% 깊이의 홀 및 17% 깊이의 노치를 갖도록 가공하였다.

A	B	C	D	E	F
0.76	0.608	0.456	0.304	0.152	0.129
100%	80%	60%	40%	20%	17%
∅0.76	∅1.0	∅1.0	∅1.0	∅1.2	L=2.0

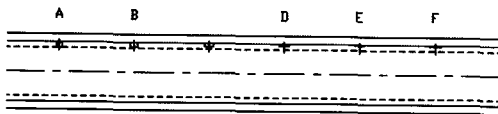


Fig. 4 Dimension of standard defects

5. 와전류탐상 결과

5.1. 표준시험편 신호

제작된 탐촉자 및 표준시험편을 사용하고, 검사 장비는

MIZ-40A를 사용하여 와전류신호를 수집하였다. Fig. 5는 시험주파수 15kHz를 사용한 100%에서 17%까지의 인공 결함 신호를 보여준다. 이 때 100% 인공결함 신호는 위상각 40도에 맞췄고, 게인값은 45dB에 맞췄다.

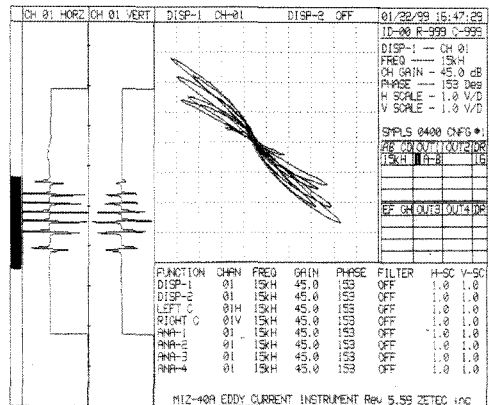


Fig. 5 Eddy current testing signals for standard artificial defects

5.2. 결함 검출능 시험

제작된 탐촉자의 결함 검출능을 시험하기 위하여, 피복 두께 0.76mm 대비 10 ~ 50% 까지 10% 단위의 깊이로 길이 2mm 폭 0.2mm의 notch를 방전 가공하여 검출능 시험용 시험편을 제작하였다. 이 시험편의 모든 결함을 잘 검출할 수 있었으며, Fig. 6는 가장 작은 10%의 인공 결함에 대한 와전류탐상 신호이다.

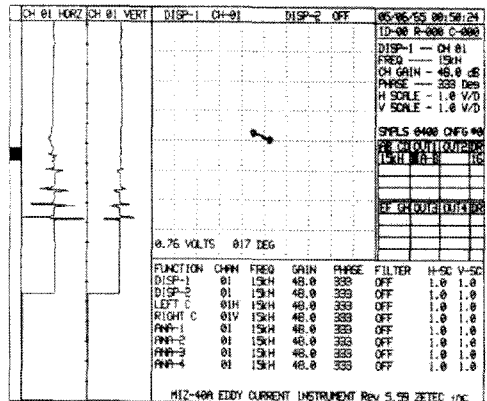


Fig. 6 10% notch signal for ECT of notch specimen

5.3. 외전류탐상 결과

제작된 탐촉자 및 표준시험편을 사용하고, 외전류탐상 기로는 MIZ-40A를 사용하여 연구로용 핵연료봉 제조 공정 중 외전류탐상 검사를 수행하였다. 검사주파수는 기본 주파수인 15kHz 및 30kHz를 사용하였다.

검사 결과, 외부 scratch 및 피복재 내부에 발생한 inclusion을 검출할 수 있었다. Fig. 7은 외부 scratch 신호로, 위상각이 40도 미만으로 외부 결함임을 알 수 있다. Fig. 8은 inclusion의 신호이며, BIR사의 Actis RTR 장비를 사용하여, X-ray Radiography로 피복층에 inclusion이 존재함을 확인하였다. (Fig. 9)

6. 결 론

연구로용 원자로인 하나로 핵연료봉에 대해 외전류탐상 검사를 하는데 필요한 탐촉자 및 표준시험편을 제작

하였고, 품질 검사 요건에 만족하는지를 시험하기 위해 인공 노치 시험편을 만들어 결함탐지능을 시험한 결과 품질 검사 요건에서 규정한 결함 크기보다 작은 결함을 검출할 수 있었다. 이 탐촉자를 제조된 핵연료봉에 적용하여 scratch 및 inclusion 등의 결함을 검출함으로써 만족할 만한 외전류탐상 절차를 확립하였다. 그러나, 만족할 만한 품질 검사를 수행할 수 있다 하더라도, 보다 정밀한 검사를 위해, 앞으로는 팬케익 코일을 사용하는 검사 방법을 개발하여, 두 방법을 함께 사용해보고자 한다.

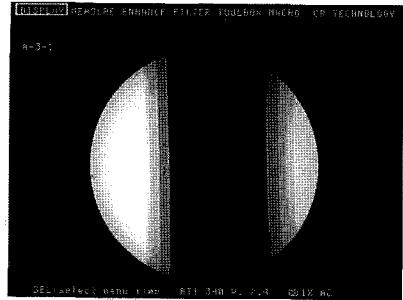


Fig. 9 X-ray radiography for inclusion on cladding of fuel rod

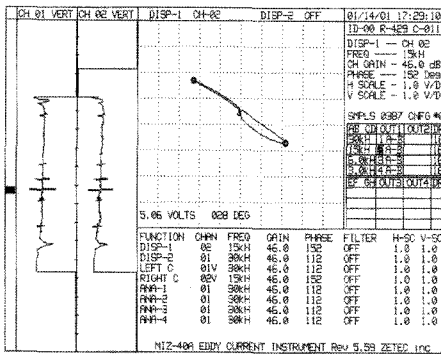


Fig. 7 Scratch signal for ECT of fuel rod

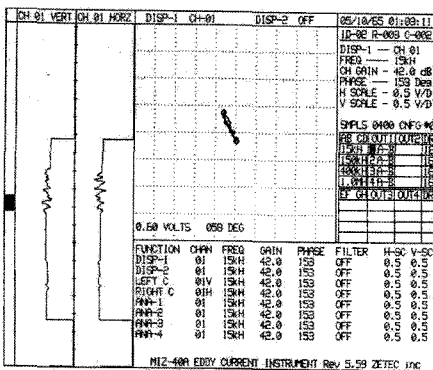


Fig. 8 Inclusion signal for ECT of fuel rod.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 중장기사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] C.T. Hubble, "General Procedure for Eddy Current Testing", AECL NFFF Inspection Procedure Rev. 1, AECL Research Fuel Fabrication Branch, Chalk River Laboratories, Canada, (1994)
- [2] ASNT, Nondestructive Testing Handbook, 2nd Ed. Vol. 4 Electromagnetic Testing, pp440, 452, (1986)
- [3] A.L. Lucero, "Level III Study Guide, Eddy Current Method", p17, American Society for Nondestructive Testing, Inc., Columbus, OH, USA, (1983)
- [4] ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, "ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section V, Article 8 Eddy Current Examination of Tubular Products 1998 Edition", I-881, p163, The American Society of Mechanical Engineers, New York, New York, (1998)