

체적적분법에 의한 연구로용 핵연료봉의 외삽차동형 탐촉자 신호의  
Computer Simulation

Computer Simulation of Eddy Current Signal from Encircling Differential Probe  
for Research Reactor Fuel using Volume Integral Methods

이윤상, 이돈배, 오석진, 김창규

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

연구로인 하나로의 핵연료봉은 제조 시 피복층에 결함이 없도록 외삽 차동형 탐촉자를 사용하여 와전류탐상 검사를 하도록 되어 있다. 검사 시 검출되는 결함의 특성 및 해석을 위해서, 체적적분법 컴퓨터 simulation code인 VIC-3D를 사용하여, 이 탐촉자를 사용한 표준시험편의 결함신호를 모사하였고, 또한 피복부위의 개재물에 대해 신호를 모사하여 잘 일치하는 것을 확인하였다.

Abstract

The cladding area of HANARO Research Reactor fuel rods should be checked not to have any defects by eddy current testing method using encircling differential probe during fabrication process. For characterization and interpretation of defects signals found during eddy current testing, the signals from standard defects and the signal from inclusion on cladding area were simulated using VIC-3D computer simulation code. A good agreement was found between experiments and simulation.

1. 서론

연구로용 핵연료봉은 연구로 가동 중에 발생하는 열을 효과적으로 전달하고, 냉각수의 흐름을 좋게 하기 위해 핵연료 심재를 감싸는 피복층이 필요하다. 핵연료 심재는  $U_3Si$ 와 Al 분말을 혼합한 후, 압출하여 지름 6.35mm의 봉을 만들고, 피복층은 AA1060 알루미늄을 압출하여, 핵연료 심재 외부에 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 핵연

료 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] 이와 같은 품질검사 요건을 만족시키는 와전류탐상 절차를 수립하기 위해 외삽 차동형 탐촉자를 설계 제작하여 와전류탐상을 하였고, 이 때 검출되는 결함의 특성 및 해석을 위해서, 체적적분법 컴퓨터 simulation code인 VIC-3D를 사용하여, 표준시험편의 결함신호를 모사하였고, 또한 피복부위의 개재물에 대해 신호를 모사하였다.

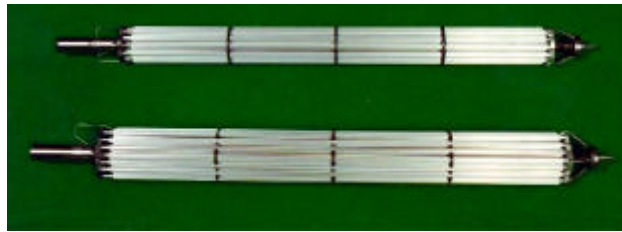


Fig. 1 HANARO Fuel Assembly

## 2. 검사주파수의 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 다음 식을 사용하여 계산하였다[2].

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

여기서  $\rho$  = 전기비저항 ( $\mu \Omega$ -cm)

$T$  = 피복관의 두께(mm)

알루미늄의 비저항 = 2.8  $\mu \Omega$ -cm

이 계산 결과에 의해 기준 주파수를 15kHz로 선택하였다.

## 3. 와전류탐촉자 및 표준시험편

검사에 사용한 와전류탐촉자는 그림 2와 같이 탐촉자 내경을 10.1 mm로 제작하였고, 코일의 turn수는 250회로 하였다.

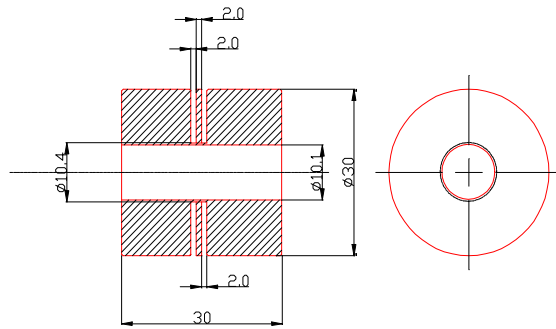


Fig. 2 Probe body dimension

표준시험편은 방전가공 방법을 사용하여 그림 3과 같이 피복 표면으로부터 관 두께(0.76 mm) 대비 100%, 80%, 60%, 40%, 20% 깊이의 홀 및 17%의 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. 3 Dimension of standard defects

#### 4. 와전류탐상 결과

제작된 탐촉자 및 표준시험편을 사용하고, 검사장비는 MIZ-40A를 사용하여 와전류 신호를 수집하였다. 그림 4는 시험주파수 15 kHz를 사용한 100%에서 17%까지의 인공 결함 신호를 보여준다. 이 때 100%의 인공결함 신호를 위상각 40도에 맞췄다.

#### 5. computer simulation

VIC-3D computer simulation 코드는 와전류 탐촉자에서 유기된 자기장과 결함과의 반응을 체적-적분법으로 계산하는 프로그램으로 간단한 형상을 지닌 비파괴 평가 문제뿐만 아니라 복잡한 형상에 대하여도 경계-적분법을 추가로 도입하여 탐상체의 와전류 신호를 예측하고 해석할 수 있게 한다. 다음 식은 체적-적분법에 관한 식을 모사한 것이다.[3]

$$E_i(\vec{x}) = E_i^0(\vec{x}) - q^2 \sum \int_v G_{ij}(\vec{x}, \vec{x}') E_j(\vec{x}') d v'$$

여기서,  $E_i^0$ 는 결함이 없는 field에서의  $i$ 번째 성분,  $G_{ij}$ 는 결함이 없는 부분에 대한 Green's tensor field의 성분,  $q^2 = \frac{2i}{\delta}$ 에서는  $\delta$ 가 재질의 skin depth를 나타내며, 적분은 결함의 체적 적분을 나타낸다.

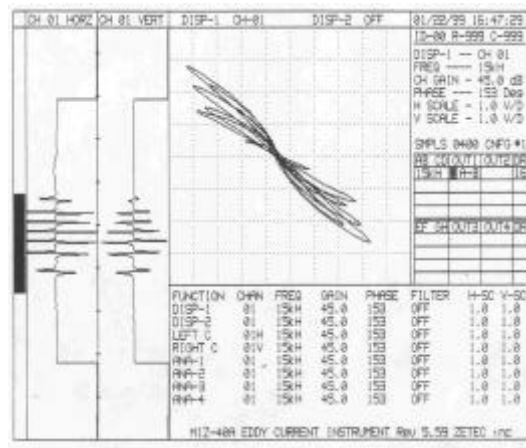


Fig. 4 Eddy current testing signals for standard artificial defects

이러한 VIC-3D code를 사용하여 표준시험편의 100% ~ 20%까지의 인공 결함신호를 모사하였다. 그림 5에 나타낸 바와 같이 그림 4의 실제 실험 신호를 유사하게 잘 모사하는 것을 알 수 있었다.

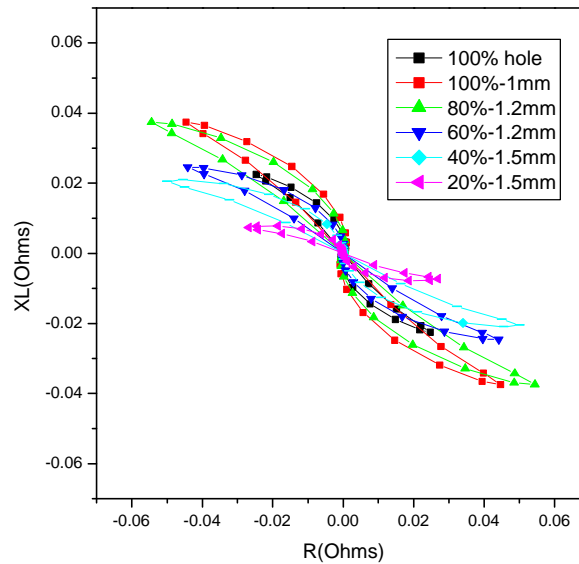


Fig. 5 Eddy current simulated signals for standard artificial defects

실험 및 computer simulation을 통해서, 외삽차동형 탐촉자의 경우, 100% 인공 결함신호의 위상각을 40도에 맞출 경우, 결함 깊이가 작아질수록 위상각이 줄어드는 것을 확인할 수 있었으며, 실험 및 computer simulation의 결과가 잘 일치함을 확인할 수 있었다.(그림 6)

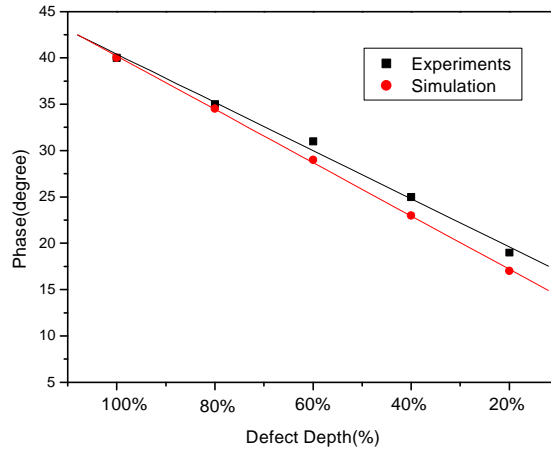


Fig. 6 Comparison of phase variation between experiments and simulated results.

## 6. 개재물 신호의 computer simulation

연구로용 핵연료봉 와전류탐상 시 발견된 개재물의 신호는 그림 7과 같고, 이를 computer simulation 한 신호는 그림 8과 같으며, 이를 통해 유사하게 모사하는 것을 알 수 있었다.

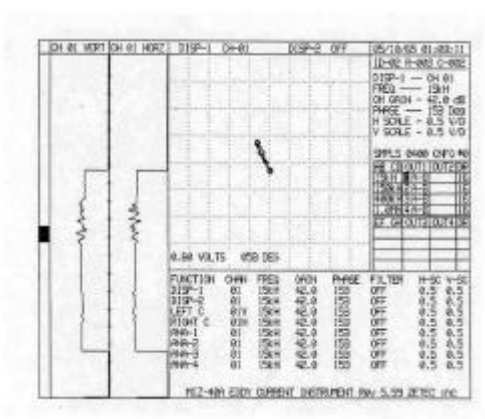


Fig. 7 Inclusion signal for ECT of fuel rod.

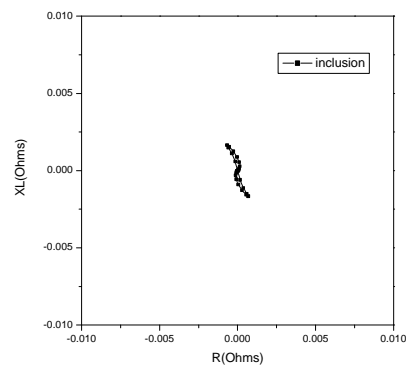


Fig. 8 Simulated inclusion signal for ECT of fuel rod.

## 7. 결론

연구로인 하나로 핵연료봉에 대한 와전류탐상 검사 시 발생할 수 있는 다양한 결함을 체적적분법 코드인 VIC-3D를 사용하여 simulation을 해 본 결과, 실제 실험에서 얻어지는 신호와 유사하게 모사하는 것을 알 수 있었고, 특히 개재물과 같이 결함 신호와 다른 거동을 하는 결함을 정확하게 모사하여, 앞으로 이 코드를 사용하면, 검사 시 발생할 수 있는 다양한 결함을 모사하여 결함 평가에 유용하게 사용할 수 있을 것이다.

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 Hand- book, 2nd Ed. Vol. 4 Electromagnetic Testing, pp440, 452, (1986)
- [3] Kim Murphy and Harold A. Sabbagh, "A Boundary Integral Code for Electromagnetic Nondestructive Evaluation," 12th Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, Mar. 18-22, 1996.