

## 봉단 용접부 와전류탐상의 기초적인 연구

서동만\*, 심기섭\*\*, 권우주\*\*\*, 김정하\*\*\*, 박춘호\*\*\*

\* 군장공업대학 전기과

\*\* 한국원자력연구소 원자로/핵연료 개발그룹

\*\*\* 한국원전연료주식회사 기술연구원

**요 약** 핵연료 제작과정에서 봉단마개 용접부는 완벽한 품질이 요구되고 있다. 본 연구에서는 와전류탐상방법을 이용하여 봉단마개 용접부의 검사를 위한 기초적인 방법을 연구하였다. 봉단마개 용접부 와전류탐상을 위한 주사속도와 와전류신호의 최대주파수를 찾았고 잡음신호제거를 위해 대역통과여파기(0-250Hz)를 사용하였다. 이러한 와전류탐상방법은 직경 0.35mm의 작은 핀홀결함에서도 좋은 감도를 얻을 수 있었다.

### 1. 서론

핵연료는 완벽한 품질관리가 요구되고 있어 핵연료 집합체 제조공정에서 헬륨누설검사를 실시하고 있다. 그러나 일부 핵연료 집합체는 제작중 헬륨누출검사를 통과하였음에도 불구하고 원자로내에서 연소중에 봉단마개 용접부에서 결함이 가끔 발견되고 있다. 이러한 결함으로 인해 핵연료가 원자로 냉각수에 누출되는 사고로 이어지고 있어 원전의 커다란 문제로 대두되고 있다. 현재까지 이러한 문제가 발생하는 횟수는 상대적으로 적다. 그러나 문제가 되는 점은 우라늄(UO<sub>2</sub>) 찌꺼기가 함유된 용접부위의 약한 부분이 조립단계의 누설검사에서는 누설이 일어나지 않지만 마지막 단계의 원자로 시험에서 커다란 영향을 끼칠 수 있는데 이러한 문제는 용접부에 존재하는 미세한 결함을 누설검사방법으로 검출하기 어렵기 때문이다.

이러한 문제로 캐나다에서는 발전소와 규제기관으로부터 지난 20년동안(70년대와 80년대) 봉단마개 용

접부에 대해 수행된 헬륨누설검사보다 더 완벽한 품질관리가 요청되었다<sup>1,2)</sup>. 따라서 비파괴검사 방법중 검사속도가 빠르고 접촉매질이 필요하지 않는 와전류탐상검사방법이 연구되어 실용화단계까지 이르고 있는 바<sup>3)</sup> 본 연구에서는 와전류탐상법을 봉단마개 용접부에 적용하기 위한 기초적인 연구를 수행하였다. 핵연료 봉단마개에 존재하는 미세한 결함의 검출에 와전류탐상방법을 적용하기 위해서 핵연료 봉단마개와 동일한 재료에 직경 0.35mm의 매우 작은 핀홀을 방전가공(EDM)방법으로 가공하여 이러한 작은 결함의 검출가능성을 알아보았다. 또한 작은 결함 검출을 위해서 잡음신호의 제거가 필요하여 본 연구에서는 대역통과여파기를 사용하여 잡음신호를 제거하였으며, 검사속도와 와전류신호의 최대주파수 그리고 표본화율의 상호관계를 알아보았다. 제 2장에서는 봉단마개 용접부에 대하여 설명하였고 제 3장에서는 시험편제작과 실험장치의 구성에 대하여 기술하였다. 또한 주사속도와 와전류신호의 최대주파수의 관계를 설명하였다. 그리고 제 4장에서는 실험결과와 고찰을 논하

였고, 끝으로 제 5장에서는 결론을 논하였다.

## 2. 봉단마개 용접부

가압중수로(pressurized heavy water reactor)에서는 핵연료(UO<sub>2</sub>)를 피복하는 재료로 지르칼로이(Zircaloy-4)를 사용하고 있다. 지르칼로이 피복재에 핵연료를 채우고 봉단마개와 피복재를 저항용접으로 밀봉시킨다. Fig. 1은 이러한 피복재와 봉단마개를 간략하게 그린 것이다. 이렇게 밀봉된 핵연료 피복재의 용접부는 미세한 결함도 허용해서는 안된다. 그러나 이러한 제작과정에서 핵연료(UO<sub>2</sub>)의 찌꺼기가 봉단마개 용접부에 묻어 있을 경우 불완전한 용접으로 인한 미세한 결함이 발생된다. 봉단마개와 피복재의 용접부위를 좀더 도식적으로 나타내면 Fig. 2와 같다. Fig. 2(a)는 용접하기 전의 모습이고 Fig. 2(b)는 용접후 봉단마개 용접부를 편편하게 가공한 것이다.

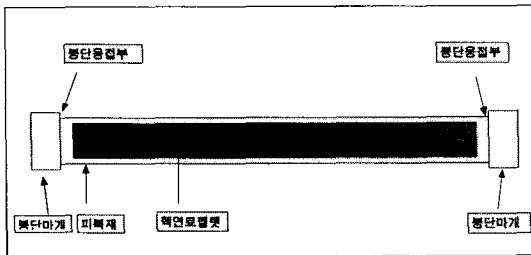


Fig. 1. Zr-4 sheath and end cap

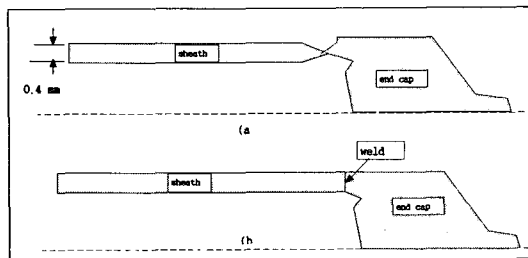


Fig. 2. (a) Geometry of the resistance butt welding end cap/sheath  
(b) End cap/sheath after the resistance butt welding

## 3. 실험

### 3.1. 시험편 제작

와전류탐상법의 결함 검출 능력을 알아보기 위해 Fig. 3(a),(b)와 같은 시험편을 제작하였다. 시험편의 재질은 지르칼로이로 봉단 용접에 사용된 재질과 같다. 시험편은 두께가 1.2mm인 지르칼로이 평판에 직경이 0.35mm이고, 깊이가 시험편 두께의 100%, 80%, 60%, 40%, 20%인 홈을 각각 15개씩 Fig. 3(a)와 같이 방전가공(EDM)기법으로 제작하였으며, 100%, 80%, 60%, 40%, 20%의 홈을 Fig. 3(b)와 같이 제작하였다.

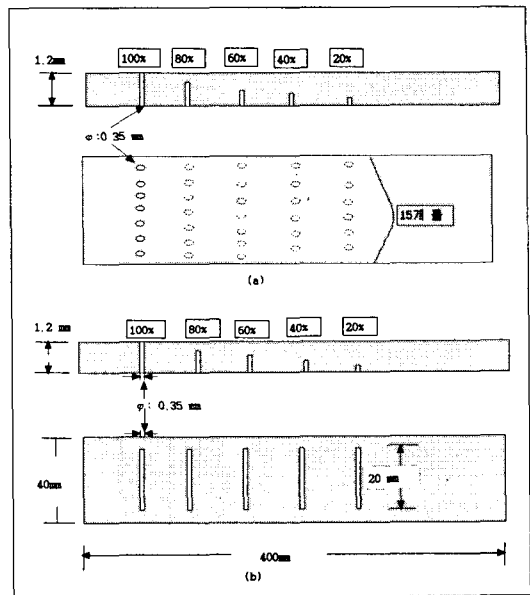


Fig. 3. Test specimen

### 3.2. 실험장치

실험에 사용된 와전류검사장비는 MIZ-40이고 사용된 프로브는 봉단마개 용접부 검사용으로 특수하게 제작된 탐촉자를 사용하였다. MIZ-40의 주요기능은 다중주파수로 검사할 수 있고 여파기 기능이 있으며 RS-232로 외부 컴퓨터를 이용하여 조작이 가능하다. 또한 각 채널별로 아날로그 출력을 외부 기기를 이용하여 입력시켜 수집할 수 있다. 특히 MIZ-40은 최대 6MHz로 신호를 수집할 수 있으며

1초당 1000개의 데이터를 디지털로 수집할 수 있다. 탐촉자는 Zetec사에 주문 제작하여 구입하였는데 차동코일형이고 코일직경은 1.27mm(0.05인치)이다. 실험장치의 블록도는 Fig. 4와 같으며 디지털신호수집장치로 Tektronix TDS360 디지털 오실로스코프를 사용하였고 소프트웨어는 Matlab을 이용하였다.

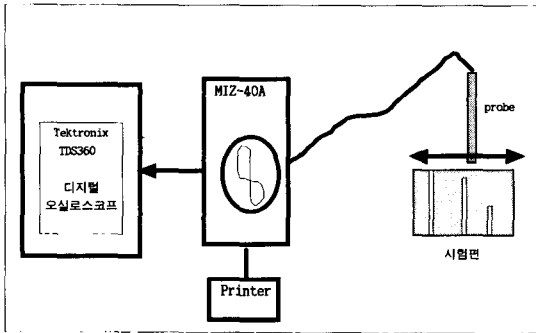


Fig. 4. Block diagram of the experimental system

3.3. 주사속도와 와전류신호의 최대주파수 특성

제작된 시험편과 와전류탐촉자를 이용하여 신호를 수집하였다. 시험주파수는 주로 1MHz를 사용하여 Fig. 3(a),(b)의 시험편에서 신호를 수집하였는데 표본화율은 1000Hz로 정하였고 주사속도(scanning speed)는 120mm/sec로 설정하였다. 또한 시험편의 100% 홀과 두께대비 80%, 60%, 40%, 20%의 홀로부터 신호를 수집하였다.

봉단마개 용접부에서 발생될 수 있는 결함은 매우 작다. 이렇게 작은 결함은 헬륨누설검사에서는 누설반응을 보이지 않지만 가동중에 핵연료의 누출을 일으키기 때문에 작은 결함까지도 검출이 가능하여야 한다. 이러한 작은 결함을 검출하기 위해서 신호수집시 여러 가지 신호수집 조건을 만족하여야 한다. 와전류시험에서 디지털에 의한 신호수집시 고려해야 할 사항에 대해 ASME Section XI(1992 Edition) Appendix IV<sup>4)</sup>에서 언급하고 있으며, 신호수집시 계수화율(digitizing rate)의 영향에 대해서는 Houserman<sup>5)</sup>과 Dodd<sup>6)</sup>에 의해 발표되었다. 본 연구에서는 Houserman과 Dodd에 의해 발표된 주사속도와 와전류신호의 최대주파수의 상호관계를 실험을 통해 증명하려고 한다. 우선 와전류신호의 디지털신호수집시 검출이 요구되는 최소의 결함의 크기에 따

른 계수화율의 결정방법을 아래와 같이 제시하였다. 그리고 계수화율과 표본화율의 관계와 검사속도에 따른 와전류신호의 최대주파수는 다음과 같다.

- (1) 표본화 간격(sampling spacing): 결함의 크기에 따른 표본화 갯수 즉 검출을 요하는 결함의 크기에 따른 표본화 간격  

$$\text{표본화 간격(mm/sample)} < \text{검출하고자하는 결함의 크기(mm)} / 2(\text{sample}) \dots\dots\dots (1)$$

즉, 표본화 간격은 최소한 검출하고자하는 결함의 크기의 1/2보다 작아야 한다.

- (2) 계수화율(digitizing rate): 단위 길이당 표본화 갯수  

$$\text{계수화율(samples/mm)} = 1 / \text{표본화 간격} \dots\dots (2)$$

- (3) 주사속도(scanning speed): 검사 속도

$$\text{주사속도(mm/second)} = \text{표본화율} (\text{sampling rate}) / \text{계수화율(samples/mm)} \dots\dots (3)$$

- (4) 최대주사속도(maximum scanning speed): 최대검사속도

$$\text{최대주사속도(mm/second)} = \text{표본화율} / \text{최소 계수화율} \dots\dots\dots (4)$$

- (5) 최대주파수(maximum frequency): 와전류 신호의 최대주파수<sup>1)</sup>

$$F_{\text{max}}(\text{Hz}) = 0.4 (\text{Hz} \cdot \text{second/mm}) \times \text{최대주사속도(mm/second)} \dots\dots (5)$$

위의 식에서 알 수 있듯이 와전류 신호 수집시 최대주사속도는 표본화율과 관계가 있고 또한 최대주파수(Fmax)는 최대주사속도와 관계가 있다. 예를 들어 최소계수화율을 8(samples/mm)로 정하였을 경우 최대주사속도와 표본화율의 관계는 Fig. 5와 같다.

제작된 시험편의 0.35mm 결함으로부터 신호를 수집하고자 할 때 계수화 간격은 0.35mm에서 적어도 2개 이상의 계수화가 가능하여야 한다. 따라서 시험편에서 신호수집시 계수화율은 8(samples/mm)로 정

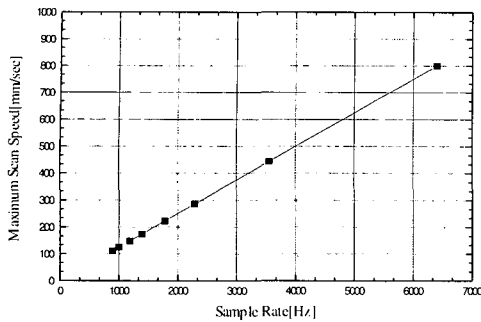


Fig. 5. Relation between sample rate and maximum scan speed

하였다. 따라서 표본화율을 1000Hz로 하면 주사 속도는 식(4)에 의해 약 120mm/second가 된다. 따라서 최대주사속도 120mm/second에 따른 와전류신호의 최대주파수는 식(5)에 의해 48Hz가 된다. 이와 같이 이론적으로 계산된 최대주파수와 실험에 의한 최대주파수를 찾아 비교하였다. 주사속도를 약 120, 250, 500, 750, 1200mm/second로 시험편 3(a)(b)에서 와전류신호를 수집하였다. 수집된 와전류신호의 임피던스도에서 수평축(Hor.)과 수직축(Ver.)의 신호를 고속푸리에변환(FFT)하여 얻어진 스펙트럼으로부터 최대주파수(Fmax)를 측정하였다. Fig. 6(a), (b)는 주사속도 약 120mm/sec로 수집된 수평과 수직축의 2개의 신호이며 이 신호들의 신호스펙트럼을 고속푸리에변환을 통해 구하면 Fig. 6(c)와 같다. Fig. 6(c)에서 최대주파수(Fmax)를 구하였는데 주파수에 따른 최대진폭(정규화된 크기)의 10% 이하에 해당하는 주파수를 측정하였다. Fig. 6(c)에서는 약 50Hz를 나타내고 있다. 이와 같은 방법으로 각각의 주사속도에 따른 최대주파수(Fmax)를 측정된 결과는 Fig. 7과 같고 이러한 최대주파수(Fmax)값은 이론적으로 계산한 값과 거의 일치함을 보였다.

따라서 주사속도의 증가에 따라 최대주파수가 증가함을 알 수 있는데 주사속도를 약 500mm/sec로 하여 Fig. 3(b) 시험편의 20, 40, 60, 80, 100%의 홀로부터 신호를 수집하고 최대주파수를 측정된 결과 200Hz가 됨을 알 수 있었다.(Fig. 8) 이러한 결과를 이용하여 MIZ-40의 대역통과여파기 기능을 활용하였는데, 차단주파수(cut-off frequency)를 0-250Hz로 정하고, Fig. 3(a)의 40%홀로부터 대역여파기 기능을

이용하여 신호를 수집한 결과, Fig. 9와 같이 잡음이 개선된 와전류신호를 얻을 수 있었다.

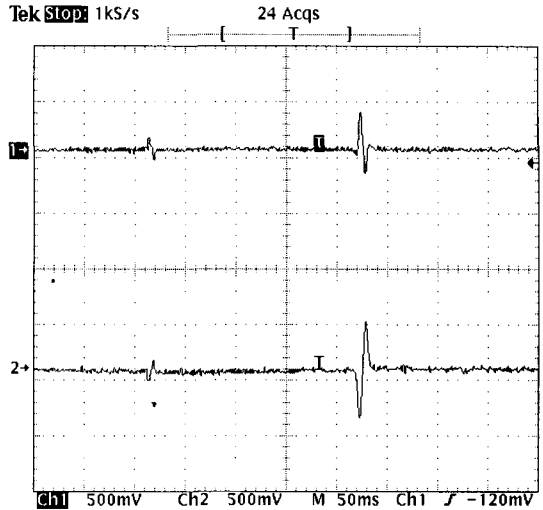


Fig. 6. ECT signals at 120mm/sec from test specimen (a) horizontal signals (b) vertical signals

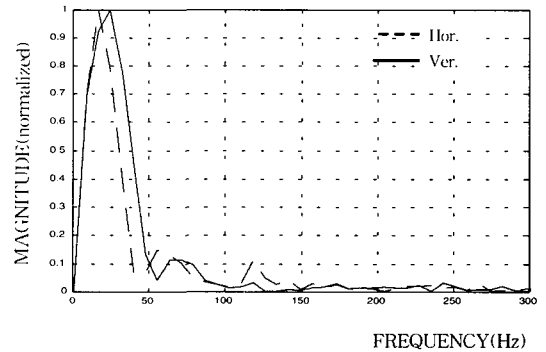


Fig. 6(c). Frequency response of ECT signals(Fig. 6(a),(b))

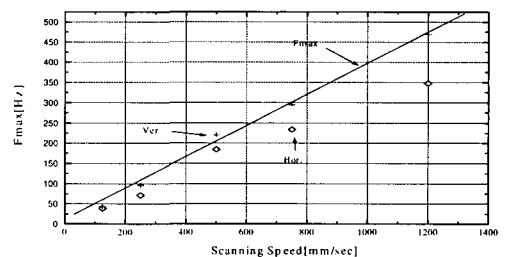


Fig. 7. Relation between scanning speed and maximum frequency(Fmax)

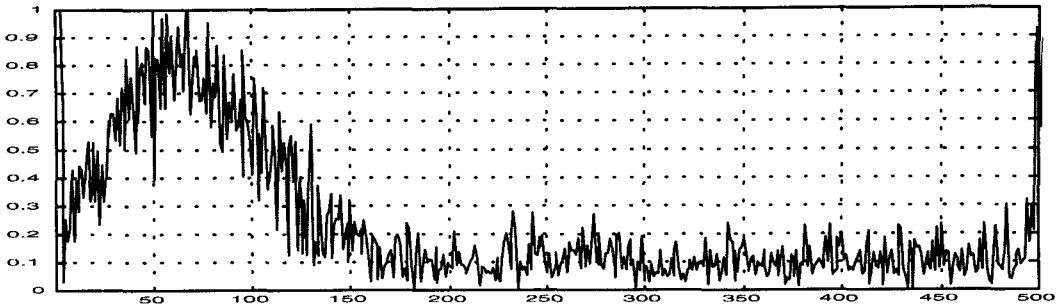
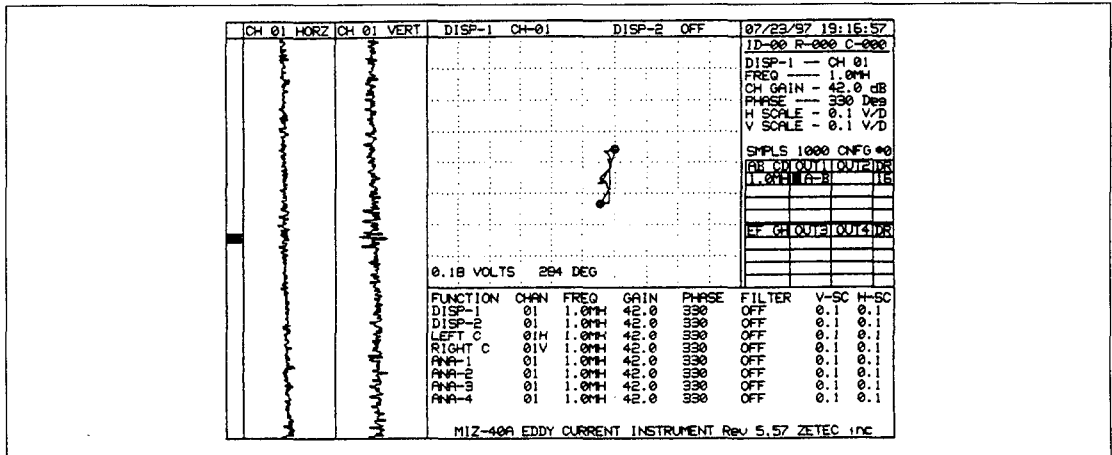
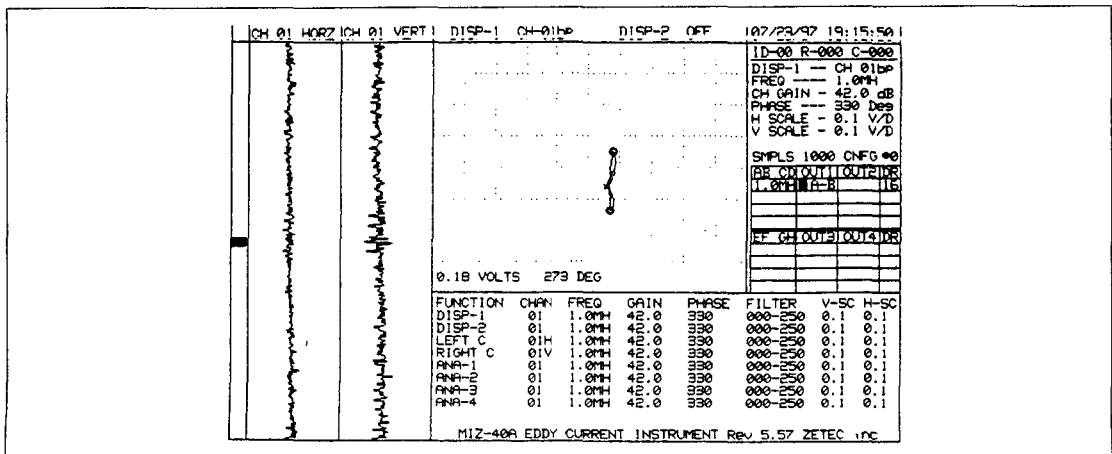


Fig. 8. Frequency response of the defect signals(20, 40, 60, 80, 100% slit).  
(scanning speed of 500mm/sec., vertical signal)



(a) ECT signals from 40% hole at test frequency 1MHz without bandpass filter



(b) ECT signals from 40% hole at test frequency 1MHz with 0-250Hz bandpass filter

Fig. 9. ECT signals from test specimen

#### 4. 실험결과 및 고찰

본 연구를 통해 주사속도와 와전류신호의 최대주파수관계를 알 수 있었다. 시험편에서 디지털신호수집시 계수화율(digitizing rate)을 결정하여야 하는데 계수화 간격(digitizing space)을 고려하여 결정하여야 한다. 즉 검출하고자 하는 결함의 크기에 따라 계수화 간격을 적절히 설정하여야 함을 알 수 있었다. 또한 와전류신호의 최대주파수가 식(5)에 의해 계산한 값과 수직축에서는 거의 일치함을 보였지만 수평축 값에서는 높은 주파수 성분이 많아짐을 알 수 있었는데 이것은 1MHz의 고주파를 사용함으로써 lift-off의 영향이 크기 때문이며 주사속도를 높였을 때 최대주파수도 높게 나타남을 알 수 있었다. 그리고 이러한 lift-off의 영향으로 발생하는 고주파수 신호성분을 제거하기 위해 MIZ-40의 대역통과여파기(0-250Hz) 기능을 활용하였다.

본 연구에서는 봉단마개 용접부 와전류탐상에 대한 기초적인 실험을 수행하였다. 그러나, 실제 봉단마개 용접부에 대한 실험에서는 자동화장치를 이용하지 못하여 좋은 결과를 얻을 수 없었다. 따라서 이러한 연구를 바탕으로 다음 연구에서는 컴퓨터와 MIZ-40와의 인터페이스를 통하여 좀 더 안정적인 실험장치를 구성하고 핵연료 봉단마개 용접부를 자동으로 검사할 수 있는 장치를 제작하여 미세한 결함검출에 활용할 수 있도록 하고자 한다.

#### 5. 결 론

핵연료 봉단마개 용접부의 미세 결함을 검출하기 위한 기초적인 연구를 수행하였다. 제작된 시험편에서 신호를 수집해 주파수특성을 조사한 결과 주사속도 120mm/sec에서 50Hz의 최대주파수를 나타냄을 알 수 있었다. 이것은 이론적인 값과 일치함을 보였으며 또한 다양한 주사속도로 신호를 수집해 최대주파수를

측정한 결과 값이 계산에 의한 최대주파수와 일치함을 보였다. 따라서 신호수집시 계수화율(digitizing rate)을 결정할 때 계수화간격(digitizing space)을 고려하여야 하며, 최대주사속도에 따른 표본화율의 적절한 선정이 있어야 함을 알 수 있었다. 그리고 직경 0.35mm의 홀 결합에 대한 와전류탐상 결과, 1.2mm 시험편에서 두께대비 40% 결합까지 검출할 수 있었고 0-250Hz 대역의 대역통과여파기 기능을 활용하여 잡음신호를 제거할 수 있었다.

#### 참고 문헌

- 1) 한국원자력연구소, 중수로용 개량핵연료 시범 집합체 제조, 한국원자력연구소, KAERI/RR-1627/95, (1995)
- 2) A. E. McCorry and N. A. Graham, Non-Destructive Testing of End Cap Welds, ZPI Report No. ZPI-004, Port Hope, Ontario, April (1992)
- 3) J. D. Allinson, An Eddy Current Test Procedure for Defective End Cap Welds-Preliminary Report, Zircatec Precision Industries Inc., (1992)
- 4) ASME Section XI-Appendix IV-1992 Edition, 1992 Addenda, "Eddy Current Examination of Nonferromagnetic Steam Generator Heat Exchanger Tubing"
- 5) H. E. Houserman, "The Effect of Digitizing Rates on Motorized Rotating Pancake Coil MIRPC Inspections," 13th Steam Generator Workshop, July 25-27, (1994)
- 6) C. V. Dodd, "The Effect of Digitization Rates on the Analysis of Eddy current Signals," 7th Annual Steam Generator NDE Workshop, June 7-9, (1988)

## A Basic Study on Eddy Current Testing of End-Cap Welds

D. M. Suh\*, K. S. Sim\*\*, W. J. Kwon\*\*\*, J. H. Kim\*\*\* and C. H. Park\*\*\*

\* Dept. of Electric, Kunjang Technical Junior College, Kunsan 573-840

\*\* Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon 305-353

\*\*\* Korea Nuclear Fuel Co., Taejon 305-353

**Abstract** In nuclear fuel manufacturing process, end-closure welding has long been recognized as requiring very high integrity. In this basic study, ECT(eddy current testing) method for end-closure welding has been developed to detect end cap weld discontinuities for nuclear fuel safety. In order to improve the inspection reliability, the maximum scanning speed and the maximum frequency is investigated for end-closure welding inspection. The bandpass filter(0-250Hz) is used for removing noise effects. This study shows that ECT method is effective and sensitive for the detection of small defect(0.35mm diameter).