

초음파 공명시험에 의한 조사핵연료봉의 결함 탐상

**The Defect Inspection on the Irradiated Fuel Rod
by Ultrasonic Resonance Examination**

구대서, 주영상, 석호천, 전용범, 최명선
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

조사 핵연료봉의 결함탐상을 위하여 초음파 공명시험 시스템을 제작하고, 표준시편을 사용하여 그 시스템을 교정하고 시험조건을 설정하였다. 본 시스템의 신뢰성 검증하기 위하여 고리 1호기에서 3주기 동안 연소한 핵연료봉(최종 방출 연소도:37,840 MWD/MTU)에 대하여 초음파 공명시험을 수행하고, 나아가 이 조사 핵연료봉의 건전성을 평가하였으며, 이결과, 초음파 공명시험에 의한 결함 탐상법의 신뢰성이 양호함을 확인하였다.

Abstract

An apparatus of ultrasonic resonance examination system was developed in order to examine irradiated fuel rods. The calibration and test condition of the apparatus were established by using standard specimens. An ultrasonic resonant examination on fuel rods irradiated in the PWR of Kori-1 unit was performed to evaluate the reliability of the apparatus, where the discharge burnup of the fuel rod is 37,840 MWD/MTU. Also, the integrity of irradiated fuel rods was evaluated. It was concluded that the reliability of ultrasonic resonant examination apparatus is very good reliable for the examination of irradiated fuel rods.

1. 서 론

핵연료 피복관의 결함을 통하여 원자로 냉각수가 핵연료봉안으로 침투하여 원자로 안전성을 위협하게 된다. 원자로 핵연료 집합체의 refueling 및 reconstitution시 결함 핵연료봉을 조기에 검출하고 핵연료 건전성을 평가하는 방법으로써 초음파 시험법을 이용하고 있다[1]. 이 방법은 초음파가 피복관의 내면에서 반사 될 때의 에너지 손실로써 핵연료봉내의 수분의 함유 여부를 결정 하는 것이다. 이 초음파 에너지 손실은 핵 연료봉내의 물의 존재뿐 아니

라 피복관 내면 및 외면의 상태와 센서의 특징이나 정렬 등의 요인에도 민감하게 나타난다. 국내에서 기존의 초음파 감쇄신호에 의하여 핵연료봉의 수분 함유 여부 및 수분 함유 위치를 탐상하는 방법을 개선하여 초음파 공명시험에 의한 핵연료봉 결함검사 기술을 개발하여 왔다[2-4].

본 연구에서는 초음파 공명시험 시스템을 제작하고 표준시편에 의하여 초음파 공명시험시스템의 시험조건을 설정하였다. 고리 1호기에서 3주기 동안 연소한 핵연료봉(최종 방출 연소도:37,840 MWD/MTU)에 대하여 초음파 공명시험을 수행하고 조사 핵연료봉의 건전성을 평가하였다. 초음파 공명시험에 의한 결함 탐상법의 신뢰성을 확인하였다.

2. 시험장치 및 측정

그림 1은 초음파 공명시스템의 개략도를 나타낸 것이고 그림 2는 초음파 공명시험시스템을 나타낸 것이다. 초음파 공명시험을 위하여 펄스발생기 및 수신증폭기(Matec 7700, Tektronix AWG2101), 파형디지타이저(Tektronix RTD 710A), 초음파탐촉자(Panametrics Video Scan Series, 0.5MHz-10MHz), PC 및 소프트웨어(Tektronix SPD) 로 초음파 스펙트럼스코피 시스템을 구성하였다. 초음파 공명시험은 조사후 시험시설의 시험/해체폴(8m(L)x6m(W)x15m(H))에서 수행하였다. 수조내에서 핵연료집합체를 해체하여 시험대상 핵연료봉을 guide and support의 깔데기 속으로 삽입하여 바로 아래에 장착된 3개의 센서들 중 맨 아래쪽 센서에 의하여 시험이 수행된다. 위쪽에서 2개의 센서들이 기존의 와전류검사 및 초음파검사를 위한 센서들이고 가장 아래쪽의 센서가 초음파 공명시험을 위해 설치된 센서이다. 이 센서의 공칭주파수는 2.25MHz이고 대역폭은 약 80%이다. 조사 핵연료봉에 대한 시험을 수행하여 monostatic 펄스-에코 방법으로 후방 산란 에코들을 수집하고 분석하였다.

그림 3은 초음파 탐촉자를 나타낸 것이다. 진동수 2.25MHz, 직경 25.4mm인 수침형 탐촉자 1개로 초음파 송신 및 수신을 겸하는 Monostatic Pulse-Echo(MPE) 방법으로 시험을 수행하였다. 핵연료봉 피복관 중심을 지나는 선을 z축으로 잡을 때, 초음파 펄스는 x축 방향으로 핵연료봉에 입사하여 후방산란 에코들이 탐지된다. 건전한 핵연료봉인 경우는 초음파 펄스의 공명후방산란에 의해 여기된 탄성원주파가 주기적인 에코로 나타나지만, 핵연료봉 피복관 내면에 수분을 함유한 경우는 소결체 표면에서 산란된 파동에 의해 원주파가 강하게 섭동되어 주기적인 에코들이 모두 사라진다. 이와 같이 초음파의 탄성 원주파에 의하여 핵연료봉의 수분함유, 수분함유위치 및 핵연료봉 물성특성변화 등에 대한 정보를 얻게 된다.

그림 4는 지르칼로이 피복관과 감손 우라늄 펠렛으로 표준시편을 제작한 것을 나타낸 것이다. 한 쪽은 물을 넣어 수분이 함유된 상태이고 다른 쪽은 공기가 함유된 상태이다. 표준시편을 사용하여 초음파 공명시험시스템의 시험조건을 설정하였다.

3. 조사 핵연료봉에 대한 초음파 공명 시험

그림 5의 (a)는 건전한 표준 핵연료봉 및 (b)는 인공결함 조사 핵연료봉에 대한 초음파 공명신호를 나타낸 것이다. (a) 그림에서 건전한 표준 핵연료봉은 초음파 펄스의 공명후방산란에 의해 여기된 탄성원주파가 주기적인 에코로 나타난다. 반면에 (b) 그림에서 인공결함 조사 핵연료봉은 피복관으로 침투한 수분에 의하여 원주파가 강하게 섭동되어 주기적인 에코들이 모두 사라짐을 볼 수 있다.

그림 6의 (a)는 조사 핵연료봉 J14-E11 하단으로부터 500 mm 및 (b)는 핵연료봉 하단의 초음파 공명신호를 나타낸 것이다. (b) 그림에서 핵연료봉 하단에서 분명한 초음파 공명신호가 관측됨으로 핵연료봉이 파손되지 않음을 알 수 있다. (a) 그림에서 핵연료봉 하단으로부터 500 mm 에서 초음파 공명신호는 점점 약해짐을 볼 수 있다.

그림 7의 (a)는 조사 핵연료봉 J14-E11 하단으로부터 3,600 mm 및 (b)는 1,700mm 의 초음파 공명신호를 나타낸 것이다. (b) 그림에서 핵연료봉 하단으로부터 1,700mm에서 초음파 공명신호는 더욱 약해지다가 (a) 그림의 핵연료봉 하단으로부터 3,600mm에서 초음파 공명신호가 다시 나타남을 볼 수 있다. 이와 같이 핵연료봉 축방향 위치에 따라 초음파 공명신호의 구조가 다른 것은 산화층 형성에 따른 피복관의 상태가 다른 것에 기인하는 것으로 추정된다.

이상에서 조사 핵연료봉 J14-E11에 대한 초음파 공명신호를 판단하여 볼 때 이 핵연료봉은 건전한 것으로 추정된다. 핵연료봉의 결함에 의한 핵연료봉내 수분을 함유한 영역에서는 초음파 공명신호가 소멸되고 반면에 핵연료봉의 건전한 영역에서는 초음파 공명신호가 뚜렷하게 생성되기 때문에 초음파 공명시험에 의하여 핵연료봉 파손 여부를 쉽게 판별할 수 있다. 따라서 조사 핵연료봉의 결함유무를 판별하는 초음파 공명시험의 신뢰성은 초음파 탄성원주파 신호의 감쇄에 의하여 핵연료봉 결함유무를 판별하는 기존 초음파 결함탐상시험의 신뢰성보다 더욱 양호함을 확인하였다.

4. 결 론

1. 초음파 공명시험시스템을 제작하여 Monostatic Pulse-Echo(MPE) 방법으로 고리 1호기에서 3주기 동안 연소한 핵연료봉에 대하여 초음파 공명시험을 수행하였다.
2. 고리1호기에서 3주기 연소한 핵연료봉 J14-E11(최종방출연소도:37,840MWD/MTU)대한 초음파 공명신호를 판단할 때 이 핵연료봉은 건전한 것으로 추정된다. 이 핵연료봉에 대한 초음파 공명신호는 하단 및 상부에서는 크게 나타나고 핵연료봉 중앙부에서는 상대적으로 더 두꺼운 산화층 형성에 따른 피복관 상태의 차이에 의하여 공명신호가 약하게 나타난 것으로 생각된다.

3. 초음파 공명시험을 통하여 초음파 탄성 원주파 신호의 감쇄에 의하여 핵연료봉 결함 유무를 판별하는 기존 초음파 시험보다 초음파 공명시험의 신뢰성이 양호함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구가 과학기술부의 원자력사업의 일환으로 수행되었음

참고 문헌

- [1] 최명선 외, “초음파 공명현상을 이용한 사용중/후 원전 연료봉 검사기술개발,” KAERI/RR-1545/94, pp. 1-4, 73-80(1994).
- [2] F. D’Annuncci and R. Scharpenberg, “Operational Experience of Ultrasonic Testing on Fuel Assemblies with FFRDS,” Nuclear Europe, Vol. 5, pp. 23-24(1985).
- [3] M. S. Choi, H. C. Kim, and M. S. Yang, “ Propagation Characteristics of Elastic Circumferential Waves in Nuclear Fuel Cladding Tubes,” Ultrasonic, Vol. 30, pp. 213-219(1992).
- [4] M. S. Choi, M. S. Yang and H. C. Kim, “ Detection of Leak-Defective Fuel Rods using the Circumferential Lamb Waves Excited by the Resonance Backscattering of Ultrasonic Pulses,” Ultrasonic, Vol. 30, pp. 221-223(1992).

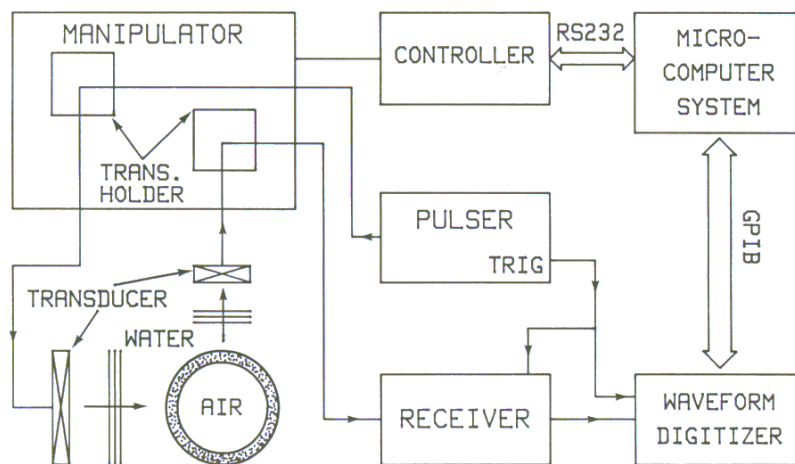


Fig.1. Schematic Diagram of Experimental Setup.

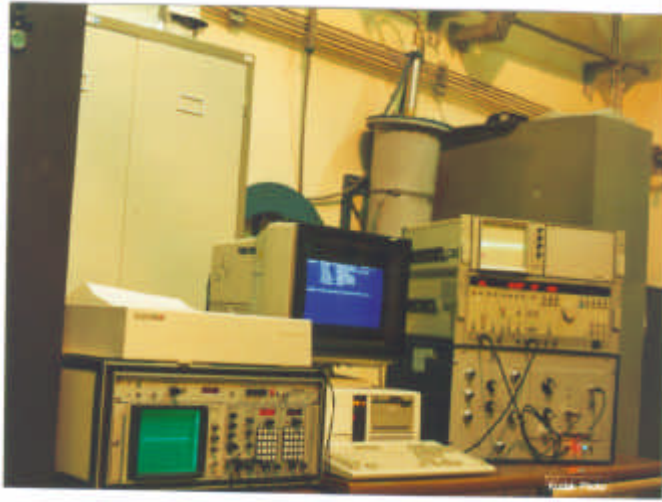


Fig.2. Ultrasonic Resonance Examination System.



Fig.3. Ultrasonic Probe Device.

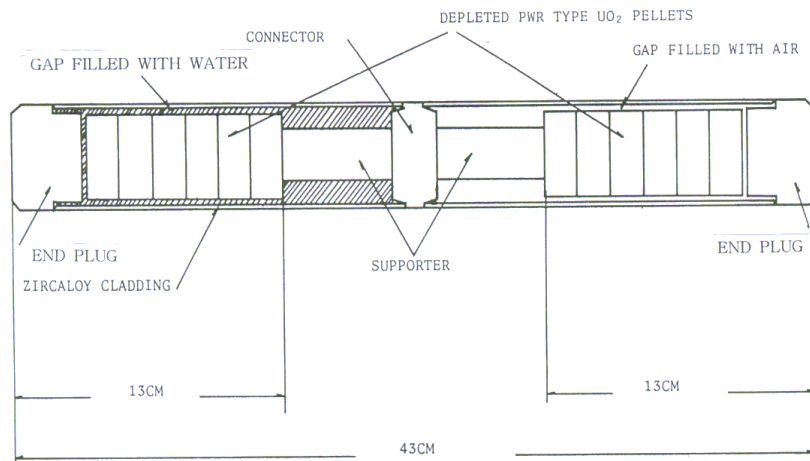


Fig.4. Ultrasonic Resonance Examination Specimen.

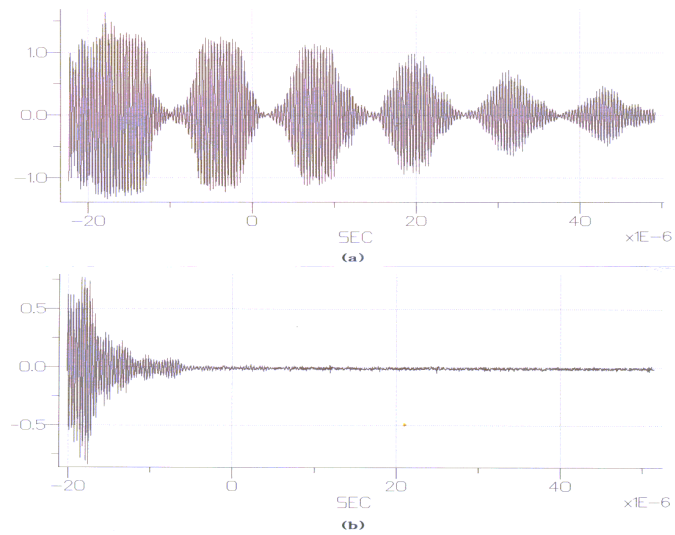


Fig.5. The Ultrasonic Resonance Signals of (a) Sound Specimen and (b) Artificial Defective Fuel Rod.

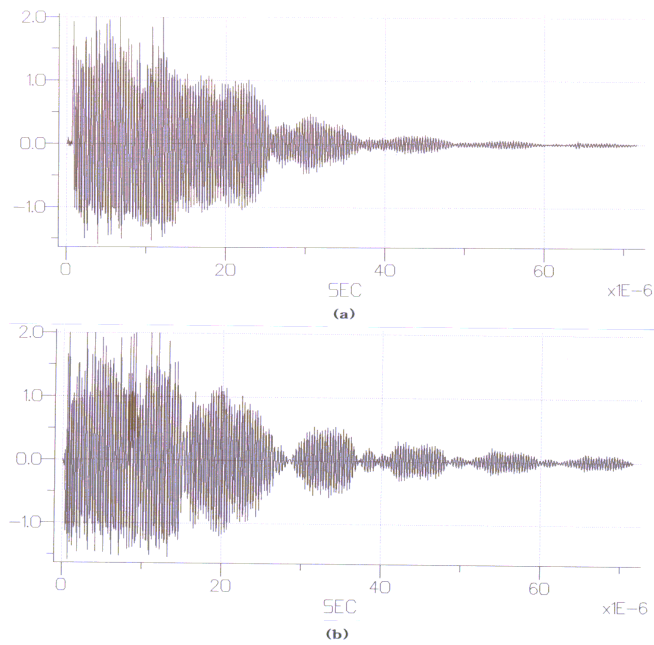


Fig. 6. The Ultrasonic Resonance Signals at
 (a) 500mm from Bottom End and
 (b) Bottom End of J14-E11 Fuel Rod.

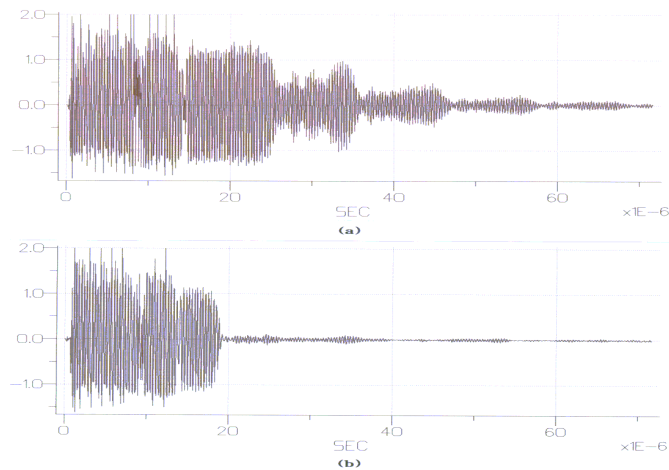


Fig. 7. The Ultrasonic Resonance Signals at
 (a) 3600mm and (b) 1700mm from Bottom
 End of J14-E11 Fuel Rod.