

원자로 제어봉 용접부 비파괴검사 기술에 관한 연구

A Study on the NDE Technique for Rod Cluster Control Assembly Welds of Reactor

박희상*, 정창호*, 강철식*, 이영호*, 윤병식**, 이희중**

*충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단

** 한국전력공사 전력연구원

1. 서론

원자로 제어봉집합체(RCCA, Rod Cluster Control Assembly)의 봉단마개 용접부는 원자로 운전중 내부에서 고속으로 흐르는 1차 냉각수에 의해서 지속적으로 진동이 발생할 수 있으며 중성자가 조사된다. 이와 같은 운전조건에 의해서 제어봉집합체 봉단마개 원주방향 용접부에 균열이 발생할 수 있으며, 어떤 경우에는 균열이 발생하여 봉단마개가 완전히 절단될 수 있다. 현재 제어봉집합체 피복관의 마모를 검사할 수 있는 기술이 개발되어 적용되고 있지만, 봉단마개 용접부의 균열 발생여부를 검사할 수 있는 기술이 개발되어 있지 않다.

이에 따라 본 연구를 통해서 봉단마개 용접부에 발생할 수 있는 균열을 검출하고 크기를 측정하고 균열신호와 스크래치 신호를 구분할 수 있는 와전류검사 기술을 개발하였다. 이 기술은 특별하게 설계된 표면 와전류검사 탐촉자를 사용하며, $\pm 5.31\%$ RMS 오차범위 이내로 원주방향 균열의 깊이를 측정할 수 있다. 본 논문에서는 결함 크기측정 결과와 적용된 기술적 접근방법에 대해 논하였다.

2. 실험방법 및 결과

본 장에서는 제어봉집합체 봉단마개 용접부 비파괴 검사에 사용되는 특수 와전류검사 탐촉자와 기술에 대해 설명하였다. 적용된 와전류검사 시스템은 미국 Zetec사의 MIZ-30 와전류검사 주파수 발생기, EddyNet 98 신호 취득 및 평가프로그램, 교정 표준 시험편, 다중배열 와전류검사 탐촉자 등으로 구성되어 있다.

2.1 다중배열 와전류검사 탐촉자의 설계

일반적으로 내삽형 와전류검사 코일은 튜브에 발생할 수 있는 원주방향 균열을 고 신뢰도로 검출할 수 없다. 따라서, 본 연구를 수행하여 경수로형 원자로 제어봉집합체 봉단마개 용접부에 발생할 수 있는 균열을 검출하고 크기를 측정할 수 있는 특수 와전류검사 탐촉자를 설계하였으며, 이 특수 탐촉자는 총 8개의 팬케익 코일로 구성되고 4x1 다중배열 표면 탐촉자라 칭한다. 이 8개의 팬케익 코일은 피복관과 접촉하는 탐촉자 내면의 원주방향으로 일정한 간격으로 배치되며 각 코일은 리프트 유효효과를 최소화시켜 감도를 증대시키기 위해서 코일 후방에 스프링이 장착된다. 다중배열 와전류검사 탐촉자의 세부적인 형상이 그림 1에 나타나 있다.

이 특수 와전류검사 탐촉자를 사용하여 봉단마개 용접부에 발생할 수 있는 균열을 검출하고 크기를 측정할 수 있는 신호평가기술을 개발하였다.

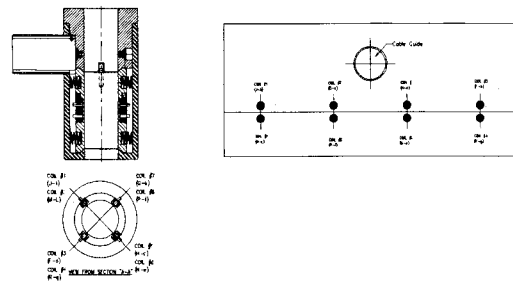


Fig. 1. Schematic diagram of 4*1 multi-surface riding coil probe

2.2 결함 시험편 설계

균열성 인공결함을 포함하는 결함시험편을 설계하여 제작하였다. 시험편은 재질이 스테인레스 304인 실제 제어봉집합체 피복관을 사용하여 제작하였다. 제어봉집합체 피복관의 치수는 외경이 9.68mm, 두께가 0.45mm, 길이가 1,000mm이며, 방사선에 조사

되지 않은 재료이다. 제어봉집합체 봉단마개 용접부에 실제로 발생할 수 있는 원주방향 노치를 튜브 단면에 가공하였다. 시험편 내에 가공된 결함의 자세한 치수와 형상이 표 1에 나타나 있다. 튜브 외면에 가공된 모든 인공 결함은 직사각형 형상을 가진 EDM 노치들이다.

2.3 결함신호 분석 결과

결함신호 분석은 와전류신호의 위상각 변화와 신호 형성 패턴을 기초로 하였다. 본 실험을 통해서 결함 및 마모신호와 스크레치 신호를 구분할 수 있는 기법을 개발하였다. 관찰된 신호형상과 형성 패턴이 그림 2에 나타나 있다.

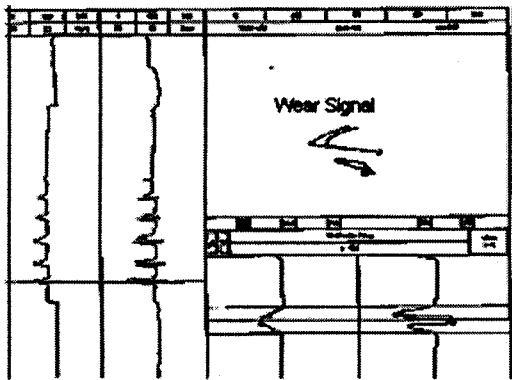


Fig. 2-a, Signal pattern of wear defect at 400kHz frequencies using external differential coil.

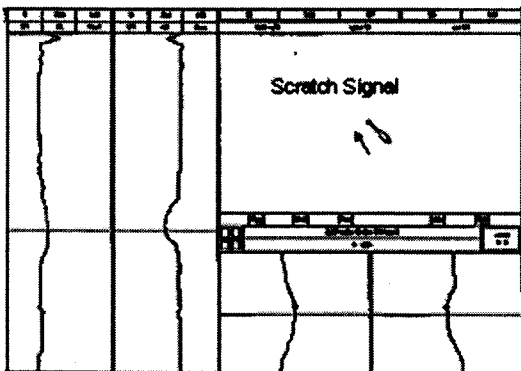


Fig. 2-b Signal pattern of scratch at 400kHz frequencies using external differential coil.

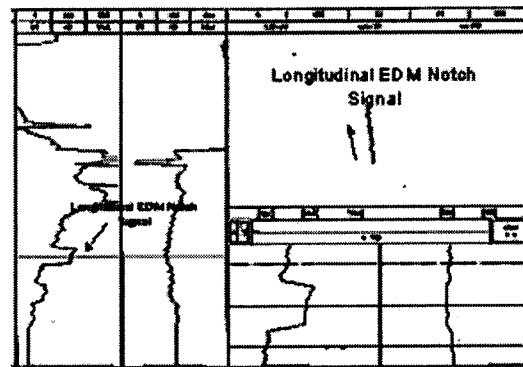


Fig. 2-c. Signal pattern of crack like longitudinal EDM notch at 400kHz frequencies using the external differential coil

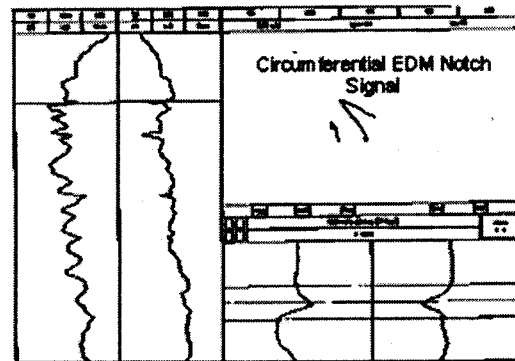


Fig. 2-d. Signal pattern of crack like circumferential EDM notch at 400kHz frequencies using the external differential coil

2.4 결함 깊이 측정 결과

결함 크기측정은 결함 시험편에 가공된 인공결함에 대한 측정 정확도를 기준으로 하였으며, 스크레치는 제외하였다. 결함 크기는 와전류신호의 위상각-대-깊이 관계를 이용하여 측정하였으며, 결함 측정 정확도를 그림 3에 나타내었다. 결함 크기측정 정확도는 RMS 오차로 표현하였다. 결함 크기측정 정확도는 회귀선의 기울기, 상관계수 및 RMS 오차 등의 3가지 선형 회귀 분석 성분을 계산하여 결정한다. 그림 3에 나타낸바와 같이 결함의 깊이 측정 RMS 오차는 5.31% 이다.

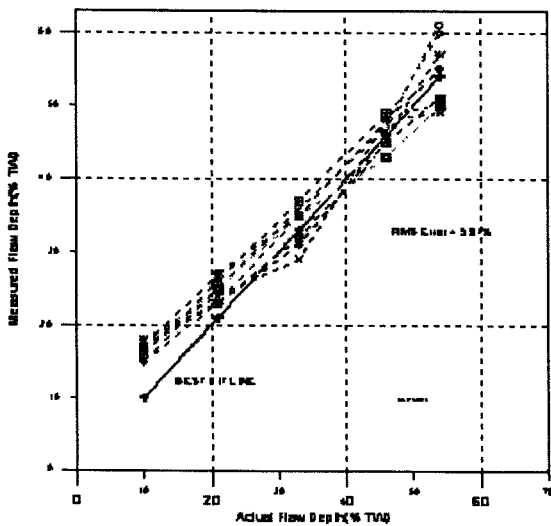


Fig. 3. Crack depth sizing result of 4*1 Multi-surface riding coil probe

3. 결론

본 연구를 수행하여 경수로형 원자로 제어봉집합체 봉단마개 용접부에 발생할 수 있는 균열을 검출하여 크기를 측정하고 균열신호와 스크레치 신호를 구분할 수 있는 와전류검사 탐촉자와 신호평가기술을 개발하였다. 연구 결과를 아래와 같이 요약하였다.

- (1) 스크레치 신호는 와전류검사 신호 형상과 형성 과정을 관찰하여 마모, 균열신호로부터 분리가 가능하다.
- (2) 본 연구수행을 통해서 개발된 4x1 다중배열 표면 와전류검사 탐촉자를 사용하여 제어봉집합체 봉단마개 용접부 시험편내에 가공된 모든 인공결합들을 성공적으로 검출하여 크기를 측정할 수 있음을 확인하였다. 개발된 탐촉자는 高 신뢰도의 균열 검출 및 크기측정 능력을 가지고 있으며, 결함의 깊이 측정 RMS 오차는 5.31% 이다.

참고문헌

[1] EPRI "Life time of PWR Silver-Indium-Cadmium Control Rods", EPRI NP-4512(1986), pp 7~19.
 [2] Chalk River Nuclear Lab., Eddy Current manual(1981), pp 68~72.