

가압 중수로형 원자력발전소 압력관 비파괴검사기술의 상호비교

Intercomparison of Techniques for Pressure Tube Inspection of Pressurized Heavy Water Reactor

이희종^{*†}, 김용식^{*}, 윤병식^{*}, 이영호^{**}

Hee-Jong Lee^{*†}, Yong-Sik Kim^{*}, Byung-Sik Yoon^{*} and Young-Ho Lee^{**}

초 록 본 논문은 가압 중수로형 원자력발전소 압력관의 건전성 평가에 적용하고 있는 각 비파괴검사기술의 특징을 평가하기 위해서 IAEA (International Atomic Energy Agency) 주관으로 세계 6개국이 참여하여 수행한 다자간 비교시험(Round-Robin Test) 결과를 분석한 내용이다. 이 다자비교시험에는 세계적으로 현재 가압 중수로형 원자력발전소를 운영하고 있는 한국, 캐나다, 인도, 아르헨티나, 루마니아, 중국 등 총 6개국이 참여하였으며, 시험에는 한국에서 제작한 인공결함시험편(시험편명 : "KOR-1")이 사용되었다. 본 연구를 위해 참여 6개국에서 적용한 비파괴검사 기술은 현재 압력관의 건전성 평가에 적용되고 있는 초음파검사와 와전류검사 등의 2가지 기술이다. 결함시험편에는 균열성 노치, 마모 등의 총 12개의 인공결함이 포함되어 있으며, 이 인공결함은 발전소 운전중 발생 가능성이 있는 결함과 유사한 형태를 가지고 있다. 다자비교시험 결과 참여 6개국에서 두 가지 비파괴검사법을 적용하여 시험편내에 포함되어 있는 총 12개의 모든 인공결함을 검출하였으며, 결함 검출도는 초음파검사법이 와전류검사법보다 우수하였다. 또한 압력관 시험편 내경측 결함이 외경측 결함보다 용이하게 검출되었으며, 크기 측정 정확도는 결함 검출도와 동일하게 시험편 내경측 결함의 크기가 외경측 결함보다 더 정확하게 측정되었다.

주요용어: 중수로 압력관, 결함, 비파괴검사, 와전류검사, 초음파검사

Abstract This paper describes the analysis results of a series of Round-Robin test that was performed to intercompare inspection and diagnosis techniques for characterization of pressure tube of a pressurized heavy water reactor under the Coordinated Research Project(CRP) of IAEA's Nuclear Power Programme. For this test, six nations, Korea, Canada, India, Argentina, Rumania, and China that currently have pressurized heavy water reactors under operation involved, and the "KOR-1" pressure tube sample prepared by Korea was used. Two kinds of NDE technique, ultrasonic and eddy current test, were applied for these tests. The "KOR-1" pressure tube sample contains total 12 artificial flaws such as crack-like EDM notches, wear that is similar to the real flaws and can be produced on the pressure tubes during plant operation. Test results showed that seven laboratories from six nations detected all twelve flaws in "KOR-1" specimen by using ultrasonic and eddy current test methods, and ultrasonic test method was more accurate than eddy current test method in flaw detection and sizing. ID flaws in pressure tube sample were more easily detected and accurately sized than OD flaws.

Keywords: PHWR pressure tube, flaw, nondestructive testing, eddy current testing, ultrasonic testing.

1. 서 론

가압 중수로형 원자로 압력관의 건전성은 원자로 안전성 확보에 핵심적 요소이다. 중수로형 원자로의 두께가 얇은 지르코늄 압력관은 가압 중수로형 원자로발전소의 주된 특징 중 하나이며, 중수로는 현재 한국, 아르헨티나, 캐나다, 인도, 파키스탄, 루마니아, 중국에서 가동중에 있다. 각 원자로는 수백개의 지르코늄 합금 압력관으로 구성되어 있으며 압력관은 원자로 내에서 핵연료를 지지한다. 원자로의 일차냉각수는 이 압력관을 통과하게 되어 연료로부터 열에너지를 흡수하며, 압력관은 약 40년의 설계수명 기간 동안 고온 고압 및 고 중성자 속 등의 환경에서 고 신뢰도를 유지하면서 가동된다.

지르코늄 합금 압력관의 건전성에 대한 복합적 평가는 압력관 산화막 두께 및 수소(중수소) 농도 측정과 hydride blister와 같은 여러 형태의 결함에 대한 비파괴검사 등을 포함하고 있다. 이와 같은 결함 특성화를 위한 비파괴검사 및 측정기술은 압력관의 기하학적 형상 및 치수에 따른 제한사항을 수용할 수 있도록 개발되는 것이 필요하다. 이에 따라 IAEA에서는 가압 중수로형 원자로 압력관의 유지보수와 교체와 관련된 정보와 경험을 교류하기 위해 6개 중수로 운영국이 참여하는 국제 협력과제를 수행하게 되었다. 본 국제 협력 연구과제의 목적은 중수로 운영국이 보유하고 있는 압력관 특성화 비파괴검사 및 진단기술들의 특징을 상호 비교하는 것이다.

압력관 결함의 특성화는 압력관 채널에 대한 비파괴검사의 중요한 분야로 남아 있다. 압력관은 가동중에 마찰손상(fretting damage), 이물질 손상(debris damage) 및 미세균열과 같은 결함이 발생할 수 있으며, 이와 같은 결함의 발생 원인과 크기를 특성화하는 것이 필수적이다. 압력관 가동중검사에 적용이 가능한 기술과 장비를 사용하여 IAEA 주관하에 6개 중수로 운영국이 참여하는 일련의 다자비교시험을 수행하였다. 이를 위해서 6개 참여국이 각각 1개의 결함시험편을 제작하여 시험에 활용하며, 한국이 첫 번째로 시험편을 제작한 후 이를 이용한 다자비교시험을 수행하였다. IAEA에서는 본 다자비교시험 결과에 따라 가장 효율적이고 정확한 검사방법을 확인하고 가압중수로 압력관 특성화요건을 완전하게 만족하기 위한 향후 R&D 수행 분야를 선정할 예정이다.

2. 가압 중수로형 원자로 개요(2)

가압 중수로형 원자로발전소 원자로는 Fig. 1에 나타낸바와 같이 몰속에 잠겨 있는 원통형 구조물로서 내부에는 Fig. 2에서와 같은 380개의 핵연료 채널 집합체를 내장하고 있다. 양쪽 끝은 양단 차폐체가 설치되어 콘크리트 구조물인 원자로실(calandria vault)에 얹혀져 있다. 원자로 내부에는 감속재인 중수가 채워져 있으며 압력관 내부의 냉각재 중수와는 분리되어 있다. 양단 차폐체는 원자로 용기를 지지하고, 핵분열 반응에 의하여 생성된 감마선과 중성자의 축방향 누설을 방지하며, 원자로 운전 정지시 핵연료 교환기실로의 작업자 접근을 용이하게 하고, 주변기기들의 방사화를 최소화하는 역할을 한다. 원자로실은 콘크리트 구조물로서 양단 차폐체를 지지하고 내부는 경수로 채워져 있고, 이 경수는 열차폐와 원자로 반경방향의 방사선 차폐역할을 한다. 압력관을 포함한 중수로형 원자로 기기의 건전성을 평가하기 위해서 CSA 285.41) 코드요건에 따라 일정 주기별로 검사를 수행하고 있다.

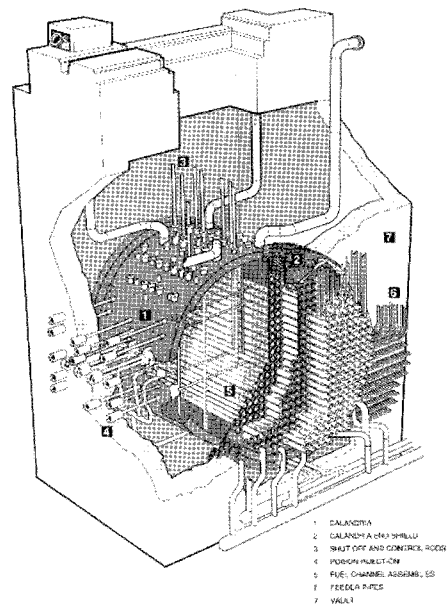


Fig. 1 Overview of internal structures in PHWR reactor

1) CSA 285.4 : A National Standard of Canada, Periodic Inspection of CANDU Nuclear Power Plant Components

2.1. 압력관 (Pressure Tube)

압력관은 원자로(calandria)를 수평으로 관통하고 있는 380개의 핵연료 채널마다 설치되어 있다. 압력관내에 장전되어 있는 핵연료를 지지하는 기능을 가지고 그 내부에 냉각재 중수가 흐르고 있으며 압력관은 1차 압력경계를 이룬다. 내부에 핵연료 다발과 냉각재를 내장하며 이는 경수로형 발전소의 원자로 용기에 해당한다. 양끝은 엔드피팅과 확관 연결(rolled joint)되어 냉각재 압력을 견딘다. 재질은 기계적 성질이 우수하고 방사선 및 부식에 대한 저항성이 좋으며 중성자 흡수 단면적이 적어 중성자의 경제성이 우수한 것으로 제작된다. 재질은 냉간가공 Zr + 2.5 wt% Nb 합금이며 총 수량은 380 개로서 내경이 4.07 inches(103.4 mm), 중앙부 두께가 0.165 inches(4.19 mm)이고 길이는 250.50 inches(6.36 m)이다.

2.2. 원자로관 (Calandria Tube)

원자로관은 Fig. 2에서와 같이 환형기체, 가터스프링, 압력관을 내장하고 외부에 감속재와 접하며, 양끝은 칼란드리아측 튜브 시트에 확관 설치되어 있다. 재질은 seal welded, annealed zircaloy-2이며 내경은 중앙부가 5.077inches(129.0 mm), rolling 부위가 5.502 inches이며 두께는 중앙부가 0.054 inches(1.37 mm), Rolling부위가 0.0490 inches 이고 총 길이는 236.2 inches(6 m)이다.

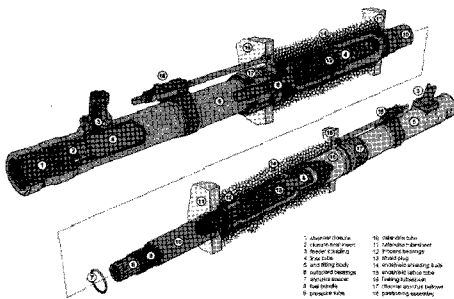


Fig. 2 Fuel channel structure in PHWR reactor

원자로관은 냉각재 계통의 일부로서 원자로 내부에서 연료다발을 지지해 주며, 내부에 냉각재 중수가 흐르면서 6.5 Mw/연료관의 열을 증기발생기에 전달한다. 총 380개의 채널로 구성되며, 한 개의 연

료관은 12개의 연료다발이 장전되고 압력관과 2개의 엔드피팅으로 구성되어 있다. 압력관은 원자로관 내에 있고 원자로관은 감속재로부터 압력관을 분리시켜 준다. 압력관과 원자로관 사이의 간격을 환형공간이라 하며, 열전달을 방지하기 위해 CO₂ 가스로 채워져 있다. 압력관은 엔드피팅과 확관 연결되어 있으며, 엔드피팅은 베어링에 의하여 지지되어 있다. 냉각재 공급자관은 Grayloc에 의해 엔드피팅과 연결되며, 엔드피팅 끝에는 연료관 마개가 설치되어 있다.

2.3. 중수로 원자로 가동중검사 코드요건[1]

중수로는 구성기기의 건전성을 평가하기 위해서 캐나다 코드요건에 따라 아래와 같이 일정 주기별로 비파괴검사를 수행한다.

- 적용코드 : CSA N285.4의 12.8항(압력관 재질 검사 관련 가동중검사)
- Baseline 검사
 - 검사시기 : 최초 유효 출력 이후 9년 경과 후 2년 이내에 수행
 - 검사수량 : 6개 이상의 압력관에 대해 baseline 검사 수행
- Baseline 검사 이후 가동중 검사
 - 검사주기 : baseline 검사후 3년을 초과하지 않는 주기로 계속 수행
 - 검사수량 : baseline 측정을 위해 선정된 6개 압력관중 3개를 선정하여, 순차적으로 1개씩 수행함
 - 검사내용 : 수소 동위원소 농도측정 및 blister 형성시점 분석

3. 압력관 비파괴검사 기술

중수로 압력관 비파괴검사에는 초음파검사기술이 일차 검사기술로 적용되고 있으며, 와전류검사기술이 보조적으로 적용되고 있다.

3.1. 코드요건

중수로 압력관의 주기적 비파괴검사는 캐나다 국가 표준인 CAN/CSA N285.4-94 코드 요건에 따라

- 2) 선정된 3개의 채널을 순차적으로 수행함. 즉, 같은 채널에 대해서 3주기(9년)마다 한번씩 수행함.

수행한다. 본 코드에서는 연료 채널 상태에 열화가 더 이상 발생하지 않음을 확인하기 위해서 연료 채널에 대한 주기적인 비파괴검사와 종파와 횡파기법과 같은 초음파검사기술을 사용한 체적검사(volumetric method)를 수행토록 요구하고 있다. 이때 초음파검사법을 대체하여 다른 비파괴검사법 또한 적용이 가능하다. 보통 압력관내 체적검사의 결합 검출은 사각 횡파빔을 사용하고, 관두께 검사는 종파 수직빔을 사용한다. 일차적인 대부분의 결합검출은 횡파검사에 의해 이루어지며, 와전류검사에 의한 압력관 체적검사는 표면탐촉자를 사용하여 수행한다. 최근에는 초음파검사법과 와전류검사법이 중수로 압력관 비파괴검사에 서로 보완적으로 적용되고 있다.

3.2. 압력관 비파괴검사기술

본 연구에는 압력관 결합시험편("KOR-1")내 포함된 인공결함을 특성화하기 위해 참여 6개국에서 초음파검사법과 와전류검사법 두 가지를 적용하였다. 이들 적용 비파괴검사법에 대한 세부내용을 Table 1에 나타내었으며 인공결함에 대한 세부내용은 Table 2에 나타내었다. 압력관 비파괴검사를 위한 다자비교시험에 참여한 6개국 중에서 5개국이 한 가지 비파괴검사법(초음파검사 또는 와전류검사법)을 적용하였으며, 캐나다가 두 가지 방법(초음파검사와 와전류검사법)을 적용하였다. 시험편내 인공결함의 실제치수는 표면 형상검사(profilometry)에 의해 측정하였으며, 형상검사를 위해 캐나다 AECL에서 표면 복제용 탁본(replicas)을 채취하였다.

Table 1 Applied inspection methods for KOR-1 sample

| 참여연구소 | 적용 비파괴검사 기법 | 비고 |
|-------|--|----|
| A | ■ UT(shear wave pulse echo) | |
| B | ■ UT(shear wave pulse echo and shear wave pitch catch, 10 & 20MHz normal beam) ■ ET(differential probe) ■ Profilometry | |
| C | ■ UT(shear wave pulse echo) | |
| D | ■ UT(shear wave pulse echo and shear wave) | |
| E | ■ ET(pitch-catch probe) | |
| F | ■ UT(shear wave pulse echo and shear wave) | |
| F1 | ■ ET(orthogonal) | |

3.2.1. 초음파검사 기술[4]

중수로 압력관 건전성평가를 위한 초음파검사에 는 아래와 같은 초음파빔이 사용된다.

- 횡파(shear beam) : 압력관 두께방향 재질내 부에 존재하는 불연속으로부터 반사되는 신호 검출 (보통 코너신호)
- 수직빔 종파(normal beam) : 재질내부 불연속 으로부터 반사되는 신호검출과 저면 반사신호 상실 검출

결합검사 중 압력관 표면검사는 高 초점 수직빔 을 사용하여 이루어진다. 횡파검사는 Fig. 3에서와 같이 2개 원주방향 및 2개 축방향의 네 방향에서 이루어지며, 원주방향으로 조준된 빔은 축방향 결 함에 대해 민감하고 축방향으로 조준된 빔은 원주 방향결함에 대해 민감하다. 원주 및 축방향으로 조 준된 탐촉자는 2스킵 거리만큼 이격되어 있으며 Fig. 3에 초음파에 의한 다섯개 방향이 나타나 있 다. 두 개의 사각횡파빔은 압력관 축방향 결함을 검출하기 위해서 원주방향으로 조준되어 있으며, 두 개는 압력관 원주방향 결함을 검출하기 위해서 축방향으로 조준되어 있다. 원주 및 축방향빔을 구 성하는 각 두개의 빔은 결합이 표면과 이루는 각도 에 따라 반사가 더욱 크게 일어나거나 덜 되도록 서로 마주보도록 반대방향으로 향해 있다. 이와 같 이 두개 빔을 서로 반대방향으로 향하게 하므로써 결합검출 신뢰도가 높아지게 되며, 탐촉자 위치를 더욱 정확하게 조정하여 결합 특성화를 위한 재검 사시 더 많은 융통성을 가질수 있다. 압력관 결합 검출을 위한 수직빔은 위와는 달리 한 방향으로 이 루어지며 라미나형 결합과 관 재질 내부결함에 대 해 민감하다. 압력관 검사장비는 다중 채널(6) 초음 파검사장치를 사용하며 이들 채널은 검사시 순차적 으로 트리거링 된다. 압력관내에 존재할 수 있는 결함을 검출하기 위해서 네 방향의 사각횡파빔과 수직빔을 사용하며, 일차적인 결합 검출은 대부분 횡파를 사용하여 이루어진다.

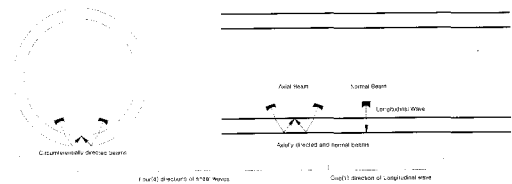


Fig. 3 Five direction of UT flaw detection

3.2.2. 와전류검사 기술

와전류검사에 의한 중수로 원자로 압력관 비파괴 검사는 초음파검사 및 와전류검사 신호분석과 평가 기능이 일체적으로 통합된 검사계통을 통해서 이루어진다. 중수로 압력관 와전류검사에는 Fig. 4에서와 같은 "G1" 탐촉자가 사용되며, 이 탐촉자는 차동형(differential)으로서 탐촉자와 압력관 표면에 발생할 수 있는 lift-off 가 보상되는 특징이 있으며, 표면근처에 존재하는 작은 결함에 대해 특별하게 민감하다. 또한 이 탐촉자는 결함신호가 Lift-off 신호에 대해 수직이 되도록 설계되어 있다. Fig. 5에 시험편내 가공된 EDM 노치로부터 발생한 신호진폭이 나타나 있다. 각 차동형모드는 주로 결함검출에 사용되며, 결함검출은 교정시험편의 깊이 0.15 mm 노치에서 발생한 신호진폭의 문턱값(threshold)을 이용한다. 만약 차동모드에서 얻어진 와전류검사 신호진폭이 이 문턱값을 초과할 경우 결함 또는 거짓지시인지 여부를 구분하는 것이 필요하다. 예를 들어 페로마그네틱 신호로부터 결함신호를 구분하기 위해서 탐촉자에 다중주파수를 적용할 수 있다. 즉 주파수를 100 kHz에서 50 kHz로 저하시킬 경우 "G1"신호는 시계방향으로 회전하므로 결함신호와 구분이 가능하다. 절대형 임피던스모드신호를 관찰할 경우 판별에 도움이 된다. "G1"신호에 부가적으로 사용이 가능한 절대형신호가 Fig. 5에 나타나 있다. 절대형 임피던스모드는 Lift-off에 더욱 민감하며, fueling track에 의해서 발생할 수 있는 압력관내부 표면의 기하학적 변화 또는 상태에서 신호해석이 더 용이하다.

와전류검사 신호가 결함에서 발생한 신호로 확인되었을 경우 결함형태 확인이 필요하다. 결함으로 확인된 신호는 크기측정 및 프로파일 검사 알고리즘에 따라 구분된다. 여러 가지 결함형태는 균열, debris fret, 비정상적인 연료지지부 마모 등의 결함이 있다. 결함에 관련된 정보는 압력관내 결함의 원주 및 축방향위치, 상대적인 방향 등이 포함된다. 이와 같은 정보는 취득한 데이터를 분석할 경우 용이하게 얻어진다. 즉 X 및 Y 채널 및 C-scan display 등을 통해서 관련 정보를 얻을 수 있다.

결함크기와 프로파일에 관한 보다 상세한 정보는 취득한 데이터를 더욱 정밀하게 분석할 경우 취득이 가능하다. 예를 들어 체적결함(volumetric flaw)은 균열성지시와는 별도로 취급한다. 균열성지시의

분석은 축방향 위치에서 지시신호의 진폭을 측정하면서 시작된다.

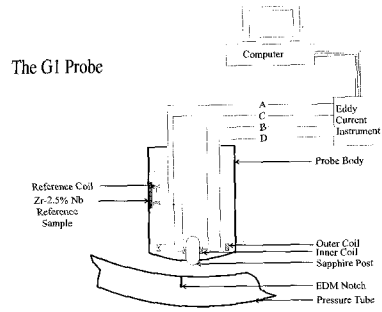


Fig. 4 G1 ECT probe configuration

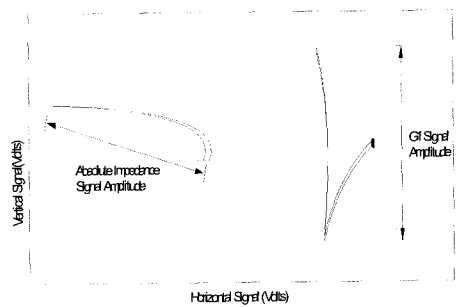


Fig. 5 Absolute impedance obtained at 300 kHz and G1 signals obtained at 100 kHz from a single pass over a 15mm long, 1.5 mm deep and 0.12 mm wide EDM notch in a Zr-2.5% Nb pressure tube.

3.3. 결함 시험편

3.3.1. 결함시험편 설계 및 제작 적용요건

본 연구에 사용된 결함시험편은 압력관과 동일한 재료와 형상을 가진 Zr-2.5% Nb 합금관을 사용하여 Fig. 6에서와 같은 결함 시험편(3)을 제작하였다. 시험편내에 가공된 인공결함의 설계 및 제작은 IAEA 시험편 제작지침과 캐나다 표준인 CSA N285.4-94 코드요건을 적용하였다. 중수로 원자로 운전결과 발생이 가능한 결함형태인 마모손상 및 균열성 노치와 같은 인공결함을 압력관내에 가공하였다. 이들 결함은 관심대상인 발생 가능 실제결함을 최대한 복제한 형태이다. 각 지시들의 위치는 압력관 끝쪽 선단의 펀치마크를 기준으로 표시하였으며, 원주방향 위치는 펀치마크를 기준으로 시계

방향으로 나타내었다. 지시들의 축방향 위치는 편 치마크를 기준점으로 떨어진 거리를 mm 단위로 나타내었다.(Fig. 7)



Fig. 6 Pressure tube flaw specimen(KOR-1)

3.3.2. 인공결함의 형태 및 치수

결함 시험편의 치수는 내경이 100 mm, 길이가 605 mm이고 두께가 약 4.1 mm로서 방사선으로 오 염되지 않은 재질이다. 결함 시험편 제작에 필요한

소재는 원자력발전소 협조를 얻어 압력관과 동일한 사양을 가진 재질을 확보하였으며, 이 재질은 관 내 외부면에 취급시 부주의로 인해 발생한 6개의 스크 래치가 포함되어 있다. 결함 시험편의 세부적인 치 수와 형상이 Fig. 8에 나타나 있으며, 내면 4개, 외 면 8개 등 총 12개의 인공결함을 가공하였다. 이들 12개 인공결함은 Table 2에 나타낸바와 같이 균열성 노치 9개, 마모성 결함 3개로 구성되어 있다. 결함 시험편의 외면에 가공된 결함들이 보이지 않도록 플라스틱 재질의 커버를 씌워서 봉인하였다. 시험편 내외면의 모든 인공결함들은 방전기계가공에 의 해서 가공하고, 이들 인공결함들의 크기, 방향을 Fig. 7에 나타내었다. 인공결함 가공 후 최종 위치 및 형 상 확인을 위해서 파이버스코프를 사용하여 각 결 함을 촬영하였다. Table 2 결함들의 모든 치수는 방 전기계가공후 실시한 표면복제에 의한 형상검사 결 과를 기준으로 나타내었다. 발전소 현장에서 압력관 원소재 취급시 압력관 내외면에 취급 부주의로 인 해 발생한 스크래치들은 파이버스코프를 사용하여 사진 촬영하였으며 위치를 별도로 기록하였다. 본 시험편에 대한 다자비교시험 결과 몇 개 연구소에 서 스크래치로 인해 발생한 지시를 보고하였다.

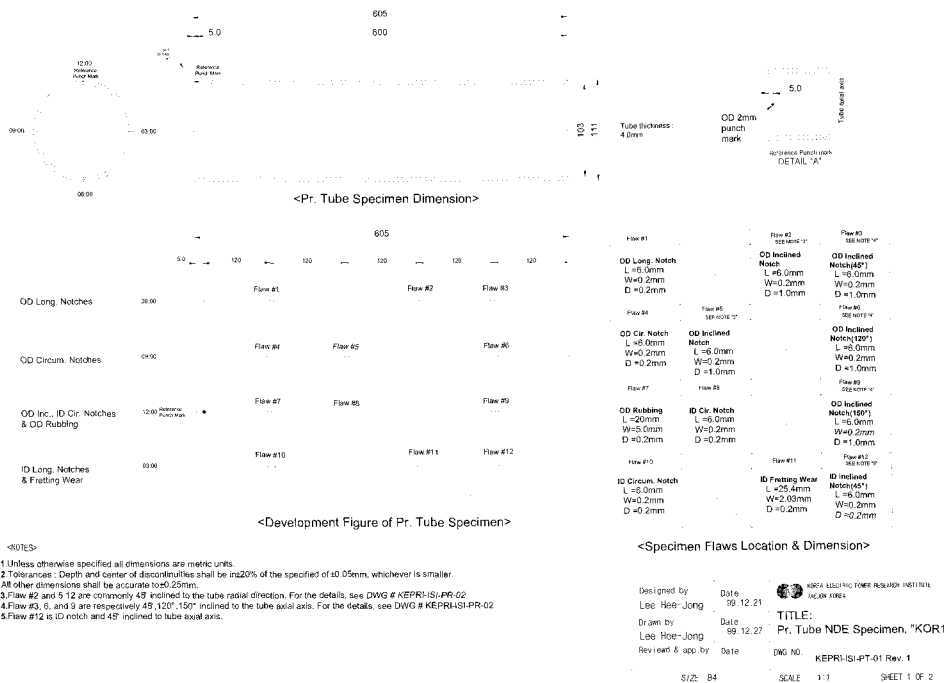


Fig. 7 Number and location of flaws in specimen(KOR-1)

Table 2 Dimensions of artificial flaws in the "KOR-1" specimens

| 면 | 결함형태 | 결함 수량 | 길이 | 폭 | 깊이 | 비고 |
|----|---------|-------|------|--------|------|---------|
| 외면 | 축방향 노치 | 1 | 6.0 | 0.3 | 0.47 | Flaw#1 |
| | 원주방향 노치 | 1 | 6.0 | 0.3 | 0.41 | Flaw#2 |
| | 경사 노치 | 5 | 6.0 | 1.0 | 0.93 | Flaw#3 |
| | | | 6.5 | 0.3 | 1.01 | Flaw#4 |
| | | | 6.0 | 1.0 | 0.98 | Flaw#5 |
| | | | 6.5 | 0.3 | 1.04 | Flaw#6 |
| | 6.0 | 0.4 | 1.07 | Flaw#7 | | |
| | 기계적 마모 | 1 | 20.0 | | | Flaw#8 |
| 내면 | 원주방향 노치 | 2 | 6.0 | | | Flaw#9 |
| | | | 6.0 | | | Flaw#10 |
| | 경사 노치 | 1 | 6.5 | | | Flaw#11 |
| | 기계적 마모 | 1 | 25.5 | | | Flaw#12 |
| 합계 | | 12 | | | | |

4. 다자비교시험 (Round-Robin Test)결과[3]

4.1 결함 검출 (Flaw Detection)

시험편의 결함 검출결과는 "KOR-1" 시험편내에 포함된 인공결함 중 참여 7개 연구기관에서 두 가지 비파괴검사기술을 적용하여 결함 종류별로 검출한 결함의 갯수를 기준으로 하였다. "KOR-1" 결함

시험편에는 총 12개의 인공결함이 포함되어 있다. 이들 인공결함에 대한 각 연구기관의 검출결과를 아래 Table 3에 나타내었으며, 결함검출결과 분석을 위해서 참여 6개국의 7개 연구기관에서 작성한 8개의 검사결과를 사용하였다. 이 중에서 6개 연구기관은 각각 1개의 결과를 생산하였으며, 카나다는 초음파검사법과 와전류검사법에 의한 2개의 검사결과를 제출하였다. 참여 연구기관의 결함검출결과는 참여 7개 연구기관중 5개 연구기관에서 "KOR-1" 압력관 시험편내에 포함된 12개의 모든 인공결함을 검출하였으며, 초음파검사법을 적용한 1개 연구기관에서 12개중 10개 결함을, 와전류검사법을 적용한 2개 연구기관에서 각각 12개중 6개와 4개의 결함을 검출하였다.

"KOR-1" 압력관 시험편에 대한 다자비교시험 결과를 Table 3과 Fig. 9, 10에 요약하여 나타내었으며, 초음파검사와 와전류검사의 압력관 내외면 결함위치와 결함 종류별 검출도를 분석하였다. 압력관 외면 결함에 대한 초음파검사의 결함검출도는 균열성 노치(압력관 내면에 수직방향)가 100%, 경사 노치(압력관 내면에 경사방향)가 56%, rubbing mark가 100%의 검출확률을 가지며, 와전류검사의 검출도는 균열성 노치(압력관 내면에 수직방향) 33%, 경사 노치(압력관 내면에 경사방향) 53%, rubbing mark 33%의 검출 확률을 갖는 것으로 분석되었다.

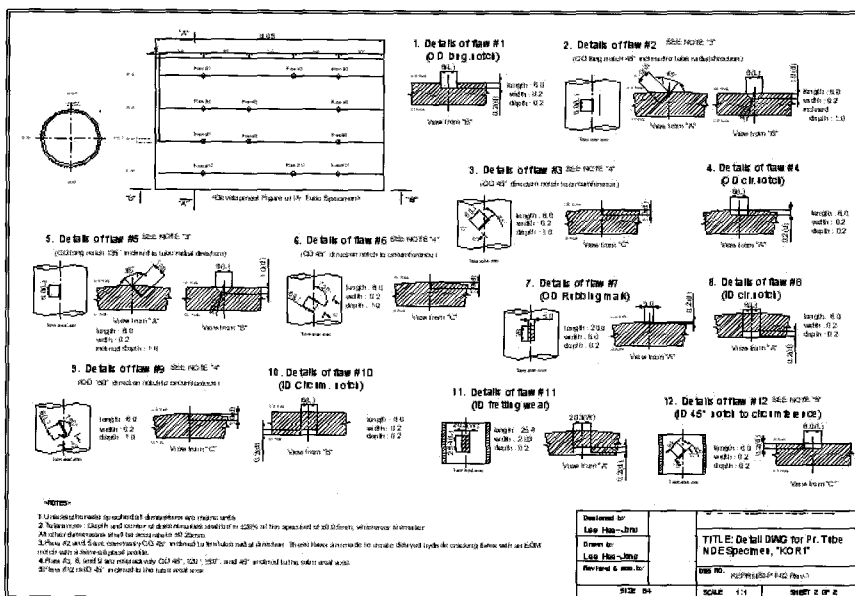


Fig. 8 Shapes of flaw in specimen

Table 3 Flaw detectability of each participant

| Laboratory | Applied Techniques | Flaw Detected (Out of 12) | Additional Indication Detected | Remarks |
|------------|------------------------|---------------------------|--------------------------------|--|
| A | UT | 10 | 3 | not detected flaw : #9, 12 |
| B | UT | 12 | 2 | |
| | ET (Differential Coil) | 4 | 2 | not detected flaw : #1,2,3,4,5, 6,7,9, |
| C | UT | 12 | 9 | |
| D | UT | 12 | 7 | |
| E | ET(Send-Receiver Coil) | 6 | - | not detected flaw : #1,3,4,7,8, 9 |
| F | UT | 12 | 5 | |
| F1 | ET (Orthogonal Coil) | 12 | 3 | |

또한 압력관 내면결함에 대한 초음파검사의 결함 검출도는 균열성 노치(압력관 내면에 수직방향) 100%, 경사 노치(압력관 내면에 경사방향) 56%, rubbing mark가 100%의 검출확률을 가지며, 와전류검사의 검출도는 균열성 노치(압력관 내면에 수직방향) 33%, 경사 노치(압력관 내면에 경사방향) 53%, rubbing mark 33%의 검출 확률을 갖는 것으로 분석되었다.

Fig. 11에 나타낸바와 같이 초음파검사법의 압력관 외면측 결함의 평균검출도는 85%, 내면측 결함은 93%의 검출 확률을 나타내었으며, 와전류검사법은 외면측 결함이 40%, 내면측 결함은 83%의 확률을 가지는 것으로 분석되었다. 이와 같이 압력관 결함검출에 적용된 두 가지 비파괴검사법 모두 공통적으로 외면측 결함보다 내면측 결함에 대해 상대적으로 높은 검출확률을 나타내었으며, 초음파검사법의 결함검출도는 결함의 내외면 위치에 상관없이 와전류검사법에 비해 높은 검출확률을 가지는 것으로 분석되었다. 특히 와전류검사법은 초음파검사법에 비해 외면측 결함에 대한 검출확률이 낮게 분석되었다.

6개 연구기관에서 실제로 압력관에 포함된 설계 결함 이외의 추가적인 지시들을 보고하였으며, 이 지시들은 파이버스코프로 확인한 결과 깊이가 0.1 mm 이상인 내면 스크래치로 확인되었다. 결론적으로 "KOR-1" 압력관시험편에 대한 다자비교시험결과 특히 초음파검사법이 우수한 결함 검출도를 나타내었다.

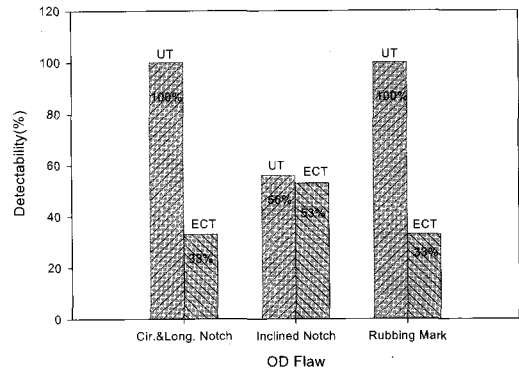


Fig. 9 Detectability of each OD flaw type by UT & ECT

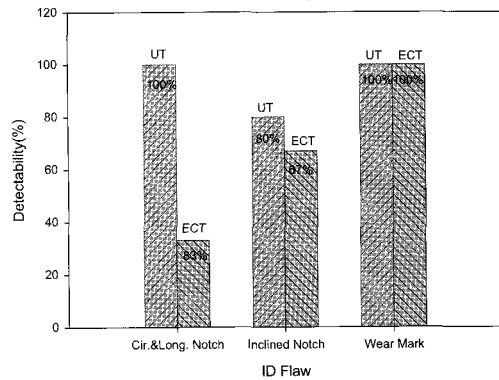


Fig. 10 Detectability of each ID flaw type by UT & ECT

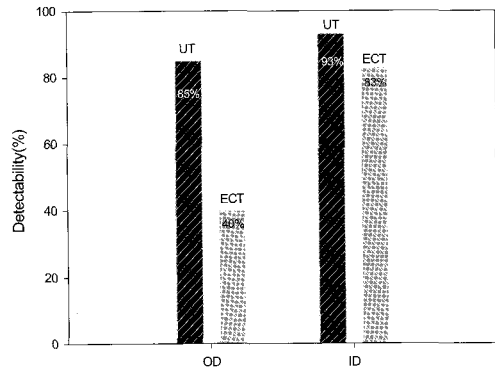


Fig. 11 Flaw detectability depending on flaw position by UT & ECT

4.2. 결함 크기 측정 (Flaw Sizing)

결함 크기 측정결과는 "KOR-1" 시험편내에 포함된 인공결함에 대한 크기측정 정확도를 기준으로 하였다. 다자비교시험 결과의 분석을 위해서 인공 결함의 길이, 폭 및 깊이에 대한 측정 정확도를 고려하였다. 두 가지 비파괴검사기법을 적용한 각 참여기관의 결함 측정정확도를 RMS⁴⁾오차로 표시하여 Table 5에 나타내었다. 결함 측정정확도는 회귀 선기울기, 회귀계수 및 RMS오차 등의 세가지 회귀 분석 요소를 계산하여 결정하였다. Fig. 11과 Table 5에 나타낸바와 같이 초음파검사기법에 의한 5개 참여기관의 결함측정의 RMS 오차는 길이가 1.309 mm, 폭이 0.802 mm, 깊이가 0.258 mm 이다. 또한 와전류검사기법에 의한 3개 참여기관의 결함측정의 RMS 오차는 길이가 1.656 mm, 폭이 1.003 mm, 깊이가 0.497 mm 이며, 초음파검사기법의 결함 측정 정확도가 와전류검사법보다 우수하였다. 각 검사법의 전체적인 결함 측정 정확도는 각각 초음파검사법이 0.789 mm, 와전류검사법이 1.052 mm이다.

Table 5 Flaw sizing accuracy of each participant & NDE method

| NDE Methods | Laboratories | RMS Error of Flaw Sizing (mm) | | | Remarks |
|-------------|--------------|-------------------------------|-------|-------|--------------|
| | | Length | Width | Depth | |
| UT | A | 1.104 | 0.569 | - | 0.258 (Mean) |
| | B | 0.612 | 0.285 | 0.136 | |
| | C | 1.294 | 1.775 | 0.592 | |
| | D | 2.757 | 0.158 | 0.150 | |
| | F | 0.778 | 1.221 | 0.153 | |
| ECT | B1 | 2.045 | 1.476 | 0.062 | 0.497 (Mean) |
| | E | 1.658 | 1.237 | 1.265 | |
| | F1 | 1.265 | 0.295 | 0.164 | |

다자비교시험 참여 7개 연구소의 전체적인 결함 크기 측정정확도는 Fig. 12에 나타낸바와 같이 길이가 1.584 mm, 폭이 0.843 mm, 깊이가 0.382 mm로 분석되었다. 결함의 측정정확도 중에서 특히 결함의 깊이에 대한 측정정확도가 가장 우수하였으며, 길이 측정정확도가 가장 나쁜 결과를 나타내었다.

인공결함의 압력관 내외부 위치에 따른 크기 측정 정확도는 Fig. 13에서와 같이 압력관 내측결함의 측

정정확도가 외측결함 측정정확도보다 우수하였다. 압력관 외측 결함의 RMS 측정오차는 각각 길이가 1.584 mm, 폭이 0.843 mm, 깊이가 0.386 mm이며, 내측결함에 대한 RMS 측정오차는 길이가 1.294 mm, 폭이 1.075 mm, 깊이가 0.113 mm로 분석되었다.

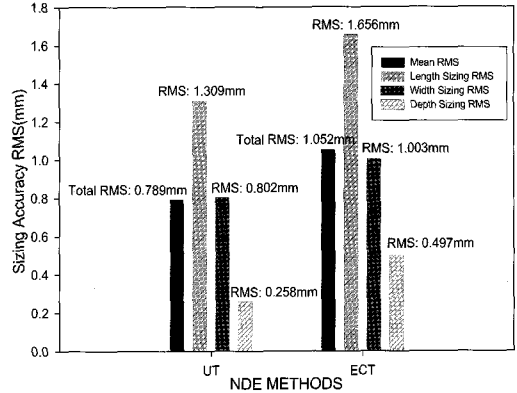


Fig. 12 Sizing error of each NDE method

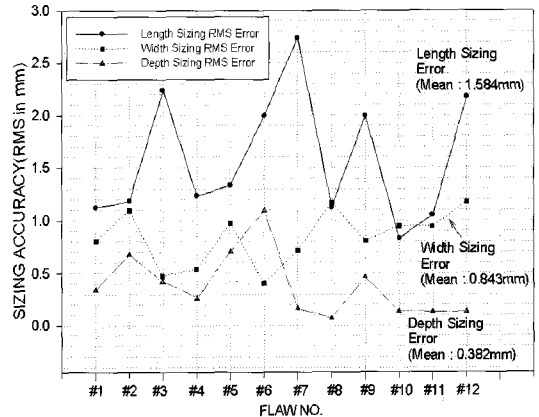
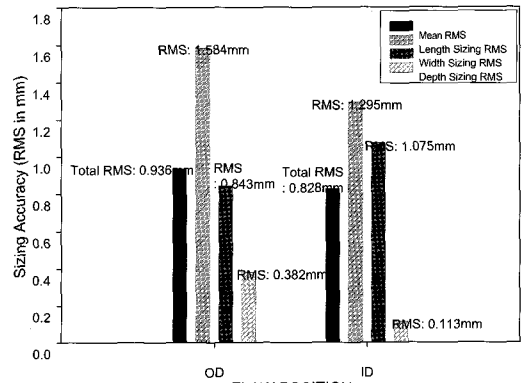


Fig. 13 Sizing RMS error of three types of flaw dimension



4) RMS : Root Mean Square Error

"KOR-1" 압력관 시험편에 포함된 결함 형태에 따른 결함크기정확도는 Fig. 14에 나타낸바와 같이 세 가지 결함 형태중 마모결함의 크기측정정확도가 나머지 두 가지보다 보다 우수하였으며, 이 중에서 경사 노치가 가장 나쁜 측정 정확도를 나타내었다. 시험편에 포함된 세 가지 결함 형태중에서 마모결함이 다른 두 가지 결함형태보다 더욱 정확하게 측정되었으며, 이 중에서 마모결함의 측정정확도는 길이가 0.947 mm, 폭이 0.415 mm, 깊이가 0.074 mm RMS 오차이내이며, 경사 노치결함은 길이가 1.431 mm, 폭이 0.737 mm, 깊이가 0.725 mm이내의 RMS 오차로 측정되었다. 축방향과 원주방향 노치결함의 크기 측정정확도는 길이가 1.163 mm, 폭이 0.882 mm, 깊이가 0.198 mm 이내의 RMS 오차를 나타내었다.

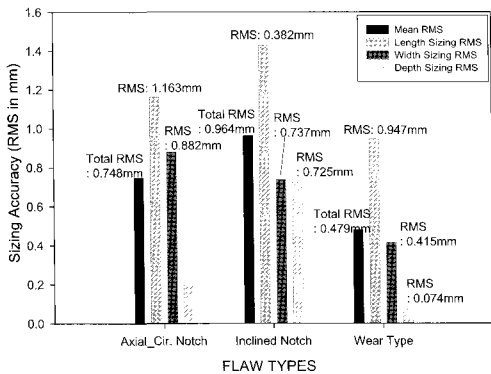


Fig. 15 Sizing accuracy of each flaw type

5. 결 론

가압중수로형 원자로 압력관 비파괴검사에 적용되고 있는 각 비파괴검사법의 특징을 비교하기 위해서 현재 가압 중수로형 원자로를 운영 중에 있는 세계 6개국의 7개 연구기관이 참여하여 일련의 다자비교시험을 수행하였다. 본 다자비교시험에는 참여 6개국 중 처음으로 한국에서 제작한 "KOR-1" 압력관시험편이 사용되었으며, 얻어진 시험결과를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) "KOR-1" 압력관 시험편에 대한 비파괴검사 수행 결과 초음파검사기술로는 시험편에 포함된 인공 결함들이 모두 검출되었지만, 와전류검사기술은 외면 결함검출에 기술적으로 한계를 갖는 것으로 분석되었다. 결론적으로 초음파검사법이 와전류검사법보다 우수한 검출도를 나타내었으며, 압력관 시험편 내측결함에 대한 검출도가 외측결함보다 우수하였다.

- (2) 압력관 결함시험편 내에 포함된 결함 검사에 적용된 두 가지 비파괴검사법은 매우 우수한 결함 크기 측정능력을 가진 것으로 확인되었으며, 다자비교시험에 참여한 6개국 7개 연구기관의 결함 크기측정 전체 RMS 오차는 길이가 1.587 mm, 폭이 0.843 mm, 깊이가 0.382 mm 이었다. 일반적으로 모든 결함의 크기가 실제보다 더 크게 측정되는 결과를 나타냈다. 다자비교시험에 적용된 두가지 비파괴검사법 중 초음파검사법의 크기 측정 정확도가 와전류검사법보다 우수하였다. 결함의 치수 중에서 깊이가 가장 정확하게 측정되었으며, 길이가 가장 나쁜 측정 정확도를 나타내었다.

- (3) 압력관 시험편의 내경 및 외경측 결함 중에서 내경측 결함이 외경측 결함보다 더 정확하게 크기가 측정되었다. 외경측 결함의 RMS 크기 측정 오차는 0.936 mm, 내경측 결함은 0.828 mm 이내의 오차로 측정되었다.
- (4) 압력관 시험편 내에 포함된 세 가지 형태의 결함 중에서 마모결함이 다른 두가지 형태의 결함보다 정확하게 측정되었으며, 경사진 노치결함이 가장 나쁜 크기측정 정확도를 나타내었다. 마모결함의 RMS 크기 측정 정확도는 0.479 mm, 경사진 노치결함이 0.964 mm, 원주 및 축방향 노치가 0.748 mm로 분석되었다.

후 기

본 논문은 IAEA(국제원자력기구) 국제협력과제의 일환으로 작성되었다.

참고문헌

- [1] IAEA, "Summary report of the first research coordination meeting," held at the IAEA headquarters, Viena, 5-7 July 1999
- [2] 원자력연수원, "중수로형 원자력발전소 계통이론" (2001)
- [3] 이희중, 남민우, 김용식, "Sample Summary Report for KOR-1 Sample," IAEA Coordinated Research Programme on Intercomparison of Techniques for Pressure Tube Inspection and Diagnostics" CRP:13.30.10, (2004)
- [4] 전력연구원, "중수로 압력관 비파괴검사," (2001)