

와전류검사 기술을 적용한 가압중수로 원전 압력관 비파괴검사

Nondestructive Examination of PHWR Pressure Tube Using Eddy Current Technique

이희종*[†], 최성남*, 조찬희*, 유현주*, 문균영*

Hee-Jong Lee*[†], Sung-Nam Choi*, Chan-Hee Cho*, Hyun-Joo Yoo* and Gyoon-Young Moon*

초 록 중수로 원자로는 한 개의 원자로용기로 구성된 경수로와는 달리 약 380여개의 연료채널(fuel channel)로 구성되어 있다. 연료채널을 구성하는 압력유지 기기인 압력관(pressure tube)은 지르코늄 합금(Zr-2.5wt% Nb) 재질로서 치수는 내경이 103.4 mm, 두께가 약 4.19 mm, 길이가 6.36 m인 튜브 형태의 관이다. 압력관은 내부에 핵연료 다발과 냉각재가 내장되며 압력관의 기능은 연료를 지지하고 열수송 유체인 중수(D₂O)를 이송한다. 압력관의 단순한 기하학적인 형상으로 인하여 자동화 비파괴검사가 가능하고 접근성이 우수하다. 연료채널은 경수로형 원전과 동일하게 설치전과 운전중에 원자력안전위원회 법령 요건에 따라 주기적으로 엄격한 비파괴검사를 수행하여 건전성을 확인한다. 연료채널의 주기적 비파괴검사에는 초음파탐상 및 와전류탐상검사 기법을 적용한 체적 비파괴검사 기술이 적용된다. 이 중에서 와전류탐상검사 기법은 초음파탐상검사에서 검출된 결함의 확인을 위한 보충검사기술로 적용되고 있지만 표면결함에 대한 검출능이 초음파탐상검사 기법보다 우수한 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 압력관 내부 표면 비파괴검사에 적용되고 있는 와전류탐상검사 기술의 압력관 내면에 발생할 수 있는 결함의 검출 및 깊이 측정 특성에 대한 연구결과를 기술하였다. 즉, 와전류검사 기술은 압력관 내면에 발생할 수 있는 아주 미세한 결함을 매우 우수한 분해능으로 검출할 수 있으므로 초음파탐상검사 결과 확인을 위한 보충기술로서 매우 유용하지만, 결함의 깊이 측정은 오차가 매우 크게 발생하므로 결함 깊이 측정에는 적합하지 않고 오직 표면결함 검출에만 적용하는 것이 바람직하다.

주요용어: 가압중수로 압력관, 와전류탐상검사, 결함, 비파괴검사

Abstract A pressurized heavy water reactor (PHWR) core has 380 fuel channels contained and supported by a horizontal cylindrical vessel known as the calandria, whereas a pressurized water reactor (PWR) has only a single reactor vessel. The pressure tube, which is a pressure-retaining component, has a 103.4 mm inside diameter × 4.19 mm wall thickness, and is 6.36 m long, made of a zirconium alloy (Zr-2.5 wt% Nb). This provides support for the fuel while transporting the D₂O heat-transfer fluid. The simple tubular geometry invites highly automated inspection, and good approach for all inspection. Similar to all nuclear heat-transfer pressure boundaries, the PHWR pressure tube requires a rigorous, periodic inspection to assess the reactor integrity in accordance with the Korea Nuclear Safety Committee law. Volumetric-based nondestructive evaluation (NDE) techniques utilizing ultrasonic and eddy current testing have been adopted for use in the periodic inspection of the fuel channel. The eddy current testing, as a supplemental NDE method to ultrasonic testing, is used to confirm the flaws primarily detected through ultrasonic testing, however, eddy current testing offers a significant advantage in that its ability to detect surface flaws is superior to that of ultrasonic testing. In this paper, effectiveness of flaw detection and the depth sizing capability by eddy current testing for the inside surface of a pressure tube, will be introduced. As a result of this examination, the ET technique is found to be useful only as a detection technique for defects because it can detect fine defects on the surface with high resolution. However, the ET technique is not recommended for use as a depth sizing method because it has a large degree of error for depth sizing.

Keywords: Pressurized Heavy Water Reactor Pressure Tube, Eddy Current Testing, Flaw, Nondestructive Examination

[접수일: 2014. 2. 14, 수정일: (1차: 2014. 6. 9, 2차: 2014. 6. 16), 게재확정일: 2014. 6. 17] **한수원중앙연구원, [†]Corresponding Author: KHNP Central Research Institute, 1312-70, Yuseungdaero, Yuseung-Gu, Daejeon 305-343, Korea (e-mail: leehj@khnp.co.kr)

1. 서론

중수로 원자로는 한 개 원자로용기로 구성된 경수로와는 다르게 약 380여개의 연료채널(fuel channel)로 구성되어 있다(Fig. 1참조). 원자로 내의 압력유지기인 압력관은 지르코늄 합금(냉간가공 Zr-2.5wt% Nb, 비저항: $56 \mu\Omega\text{cm}$) 재질로서 내경이 103.4 mm, 두께 약 4.19 mm, 길이가 6.36 m인 튜브 형태의 관이다. 압력관은 내부에 핵연료 다발과 냉각재가 내장되며 경수로 원전의 원자로용기에 해당되며, 압력관의 기능은 연료를 지지하고 열수송 유체인 중수(D₂O)를 이송한다.

압력관의 단순한 기하학적인 형상으로 인하여 자동검사가 가능하고 접근성이 용이하다. 연료채널은 경수로형 원전과 동일하게 설치전과 운전중에 원자력안전위원회 관계법령 요건에 따라 주기적으로 엄격한 비파괴검사를 수행하여 건전성을 확인한다. 중수로 원전 가동중검사에는 캐나다 표준인 CAN/CSA-N285.4)을 적용하며, 연료채널의 주기적 검사에는 초음파탐상 및 와전류탐상 검사 기법을 적용한 체적 비파괴검사 기술을 적용하며, 압력관 건전성평가를 위한 비파괴검사는 발전소 계획예방정비 정지기간 중에 압력관 내부의 연료를 제거한 후 압력관 내면에서 수행한다. 현재 압력관의 결함 검출 및 특성화, 결함의 단면 형상화에는 초음파탐상검사 기술이 일차적으로 적용되고 와전류탐상검사는 초음파검사 결과 검출된 결함을 확인하기 위한 보충기술로 적용한다. 현재 국내 중수로 원전에 도입되어 운영 중인 해외사 검사시스템의 노후로 국산화 개발을 위한 국산화 개발을 추진하고 있다. 이에 따라, 본고에서는 압력관 내면 비파괴검사에 적용되는 와전류탐상검사 기술의 결함 검출 및 깊이측정 특성에 대한 연구결과를 기술하였다.

2. 와전류검사 탐촉자 설계 및 제작

2.1. 탐촉자 설계 이론

압력관 내면 전체(길이 약 6.6 m)를 검사하기 위해서는 일정한 피치의 나선형 주사가 필요하다

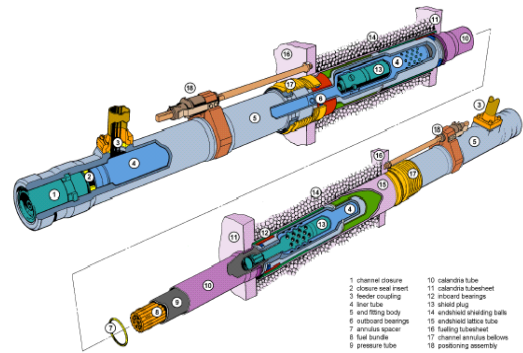


Fig. 1 Fuel channel in PHWR

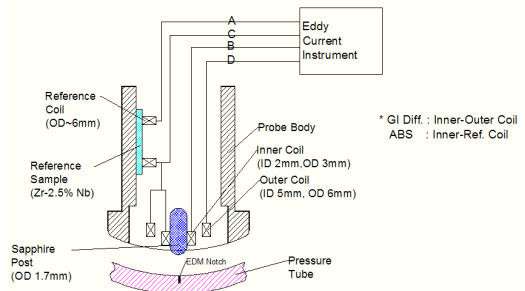


Fig. 2 Configuration of ET probe for pressure tube in PHWR

다. 와전류탐상검사에 의한 결함특성화는 원격으로 이루어지며, 와전류탐상검사 체적결함 검출 및 특성화, 결함의 단면형상화를 위한 와전류탐상검사는 60 RPM, 2 mm이하의 피치로 압력관 전장을 나선형으로 주사하여 신호를 수집한다. 검출된 결함의 특성화는 지시가 발견된 특정부위에 대해 1차검사 피치보다 작은 1 mm 피치로 나선형 주사하여 수집된 데이터를 이용한다. 압력관 내면의 와전류탐상검사에 사용되는 와전류탐촉자는 코일이 동심으로 유지되는 차동형 권케익코일(Fig. 2)을 사용한다. 이 탐촉자의 운전모드는 차동형과 절대형으로서 탐촉자 코일과 압력관 표면 사이에 발생할 수 있는 공극율(lift-off)이 보상되는 특징을 가지며, 표면 근처에 존재하는 작은 결함에 대해 특별하게 민감하다. 또한 이 탐촉자는 결함신호가 공극율 신호에 대해 수직되도록 설계한다. 차동모드는 주로 결함 검출에 사용되며, 결함 검출은 교정시편의 깊이 0.15 mm 근처에서 발생한 신호 진폭의 문턱값을 이용한다.

1) CAN/CSA N285.4 : Periodic Inspection of CANDU nuclear power plant components

와전류탐상검사 시 고려해야 할 중요한 사항은 적용 운전주파수이다. 비자성체 열교환기 전열관 와전류검사에 적용되는 운전주파수는 일반적으로 f_{90} (지시 검출주파수)을 이용하는데 이 주파수에서는 KEPIC 교정시험편의 20% 튜브 내면(I.D.) 그루브(360°)와 10% 외면(O.D.) 그루브(360°) 신호 사이에 90°의 위상각 분리가 발생한다. 결함 검출주파수는 아래와 같은 식으로 나타낸다[1].

$$f_{90} = K \frac{\rho}{t^2} \quad (1)$$

여기에서 f_{90} = 검출주파수(kHz), ρ = 전기 비저항 ($\mu\Omega\text{cm}$), t = 튜브 벽두께(mm), K (상수) = 3이다.

또한 검출주파수에 추가하여 더 높은 주파수를 적용할 수 있다. 이 주파수를 사용할 경우 KEPIC 100% 관통구멍과 4-20% 평저구멍신호 사이에 최소 90°의 위상각 분리가 발생한다. 이 주파수를 최적주파수라 부르며 지시평가에서 위상각분석이 필요할 때 사용된다. 최적주파수는 아래의 식으로 나타낸다[1].

$$f_o = K \frac{\rho}{t^2} \quad (2)$$

여기에서 f_o = 최적주파수(kHz), ρ = 전기 비저항 ($\mu\Omega\text{cm}$), t = 튜브 벽두께(mm), K (상수) = 6.45이다.

2.2. 압력관 와전류검사 탐촉자의 설계

가압중수로 압력관 내면 와전류탐상검사 탐촉자 설계에 적용된 와전류탐상검사 장비는 캐나다 R&D Tech.사 TC-5700 와전류신호수집장치를 사용하였다. 중수로 압력관 내면 와전류탐상검사 탐촉자 설계에는 다음과 같은 검사 조건을 고려하여 현장 검사에 최적인 변수를 설정하였다.

- ① 압력관의 검사 관심부위는 내면으로 압력관에 일반적으로 발생할 수 있는 지시의 특성을 고려하여 표면으로부터 약 1 mm 이내 깊이로 국한한다.
- ② 압력과 내면에 발생할 수 있는 미세 지시에 대한 감도가 우수해야 한다.
- ③ 검사를 위해 탐촉자 전면이 압력관 내면에 밀착되어 스파이럴형태로 고속(60 rpm) 주사되기 때문에 내마모성이 우수해야 한다.
- ④검사가 원자로 격납건물 외부에서 원격으로 수

행되기 때문에 탐촉자 케이블의 길이가 길다 (약 110 m).

- ⑤ 검사는 압력관 내부에 중수가 충전된 고 방사선 조사상태에서 이루어진다.

이와 같은 검사조건과 환경을 고려하여 와전류 검사 탐촉자를 다음과 같이 설계하였다. 식(1)과 (2)에서 압력관 재질의 비저항($\rho = 1.972 \times 10^6$)과 표준침투깊이 약 1 mm를 이용하여 와전류탐상검사 운전주파수를 구한 결과 검출주파수(f_{90})는 약 150 kHz, 최적주파수(f_o)는 약 350 kHz로 계산되었다. 압력관 내면에 발생하는 결함의 깊이는 연료 장전시 발생하는 흠집이 대부분으로서 최대 1 mm 깊이 이내이므로 표준침투깊이는 약 1 mm로 설정하였다. 탐촉자의 재질은 고 방사선 조사 환경과 수중을 고려하여 엔지니어링 플라스틱인 PEEK®를 선정하여 제작하였다. 탐촉자 코일의 전면은 압력관 내면에 밀착되어 스파이럴 형태로 고속 주사되기 때문에 내마모성을 고려하여 코일 중심에 직경이 약 2 mm인 사파이어 팁을 사용하여 내면주사시 내마모성을 증진시켰다.

탐촉자 케이블은 내방사선 동축케이블로서 원자로 격납건물 외부에서 원격검사 수행에 필요한 길이가 110 m인 Gore®사 이중 동축케이블을 사용하였다. 와전류 탐촉자를 구성하는 팬케익코일의 직경은 검출 가능한 결함의 최소길이에 영향을 미치는 인자로서 일반적인 경험법칙에 따라 결함 길이 근처 또는 이하로 선정한다. 이에 따라 중수로 압력관에 주로 발생하는 지시는 연료 다발에 의해 발생하는 스크래치, 마모 등으로서 최소 치수는 약 3 mm로 보고되기 때문에 코일의 직경은 약 3 mm로 선정하였다. 탐촉자 운전 주파수는 일반적으로 공진주파수보다 낮은 주파수에서 운전하게 된다. 탐촉자 케이블의 길이가 길어짐에 따라 커패시턴스가 증가하여 공진주파수가 낮아지게 되는데 공진주파수 근처나 그 이상에서는 코일의 기능이 약해지게 된다. 코일의 전기적특성은 케이블을 연결한 상태에서 검사 최적주파수인 350 kHz 근처에서 공진이 형성되도록 코일의 권선수를 조정하였다. 코일의 권선은 직경이 약 0.056 mm(43 AWG)인 에나멜동선을 사용하여 약 200회를 권선하였다. 탐촉자의 공진 주파수는 길이가 약 110 m인 동축케이블(MIL RG-158 coaxial cable)을 탐촉자 코일에 연결하여 측정하였다(Table 1 참조).

Table 1 Electrical characteristics of pancake coil for ET probe

Turns	Coil OD (mm)	Inductance (H)	Resistance (Ω)	Resonance Frequency
230	3.2	55	9.2	350kHz (Cable 110m)



Fig. 3 Prototype ET probes for pressure tube

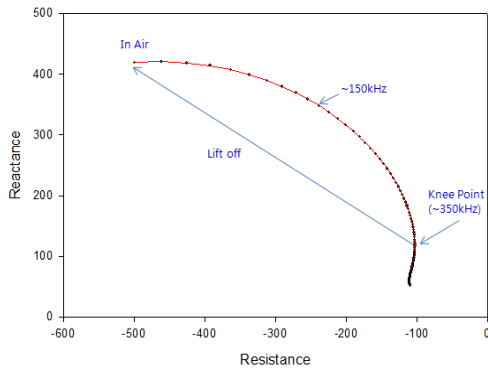


Fig. 4 Impedance curve of ET coil

또한 임피던스 평면 곡선 상에서 탐촉자 코일의 운전점은 탐촉자 코일을 압력관 내면 상에 위치시킨 후 40 ~ 580 kHz 범위의 주파수를 스위핑하여 임피던스를 측정하였다. 탐촉자 코일의 운전점은 Fig. 4에서와 같이 임피던스 선도 상에서 주파수가 약 350 kHz 근처인 무릎점(knee point)에 위치하는 것을 확인하였다. 임피던스 선도 상의 무릎점은 리프트업 신호와 결함 신호 사이의 위상각 차이가 최대로 발생하는 점(주파수)으로서 잡음과 결함 신호의 구분이 가장 우수한 주파수에 해당되므로 탐촉자 코일 설계에 있어서 매우 중요하게 고려해야할 사항이다.

2.3. 압력관 와전류검사 실험장치 구성

현장에서 수행하는 중수로 압력관 비파괴검사

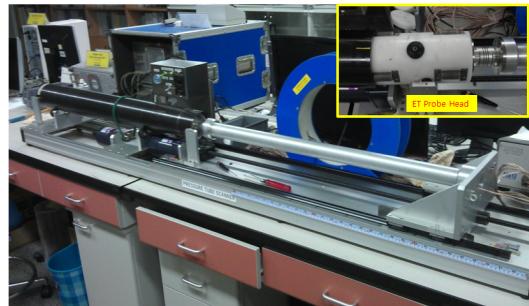


Fig. 5 ET scanner for pressure tube

Table 2 EDM notches in pressure tube

Specimen	Notch No.	Type	Length (mm)	Width (mm)	Depth (mm)
Calibration Specimen	1	ID Axial	6.0±0.5	0.15±0.05	1.50±0.05
	2	ID Axial	6.0±0.5	0.15±0.05	0.75±0.05
	3	ID Axial	6.0±0.5	0.15±0.05	0.10±0.05
Flaw Specimen	1	ID Axial	6.0±0.5	0.15±0.05	1.20±0.05
	2	ID Axial	6.0±0.5	0.15±0.05	0.90±0.05
	3	ID Axial	6.0±0.5	0.15±0.05	0.80±0.05
	4	ID Axial	6.0±0.5	0.15±0.05	0.70±0.05
	5	ID Axial	6.0±0.5	0.15±0.05	0.40±0.05
	6	ID Axial	6.0±0.5	0.15±0.05	0.25±0.05
	7	ID Axial	6.0±0.5	0.15±0.05	0.07±0.05

조건을 모의하기 Fig. 5에서와 같은 압력관 주사 장치를 사용하였다. 실험의 용이성을 위해 와전류탐촉자를 회전시키는 대신 속도 조절이 가능한 직류모터를 사용하여 일정 속도로 압력관을 회전시키고 검사헤드를 선형 직선 이동시켜 나선형 주사 조건을 모의하였다.

와전류탐촉자 특성 평가를 위해 2개의 시험편을 제작하였다. 이 중에서 1개 시험편은 결함 크기 측정을 위해 필요한 교정곡선을 작성하기 위한 교정시험편이며, 다른 1개는 결함 검출과 크기 측정 정확도를 평가하기 위한 결함시험편이다. 교정시험편 내면에는 각각 깊이가 다른 총 3개의 내면 축방향 노치를 가공하였으며, 결함시험편에는 7개의 깊이가 다른 축방향 노치를 가공하였다 (Table 2참조). 전기방전기계가공(EDM) 노치는 모두 폭이 0.15±0.05 mm, 길이가 6.0±0.5 mm이고 깊이는 0.15~0.75 mm 범위로서 아래 표에서와 같이 각각 치수가 다르다.

3. 결함 검출 및 깊이 측정

와전류탐상검사 기술에 의한 압력관 결함 검출 및 크기 측정 성능을 평가하기 위해 결함시험편의 깊이가 다른 노치를 이용하여 각 노치에 대한 검출능과 깊이 측정 오차를 다음과 같이 평가하였다.

3.1. 결함 검출(Flaw Detection)

와전류탐상측자의 결함 검출능은 결함시험편에 가공된 7개 내면(I.D.) 노치에 대한 와전류신호의 피크전압(Vpp)을 측정하여 평가하였다[Fig. 6(c) 참조]. 각 노치에 대한 전압은 각 내면 노치 신호를 각각 10회 측정하여 평균값을 구하였다. 가장 작은 깊이(0.07 mm)의 #1 노치를 포함하여 검사 대상 7개 노치 신호가 모두 검출되었으며 각 노치 신호 진폭은 깊이에 따라 거의 선형적으로 변화하였다(Table 3 참조).

7개 노치신호 중에서 가장 작은 깊이(0.07 mm)의 #1 노치는 신호진폭이 작았지만 잡음과 구분이 가능할 정도의 감도로 검출이 가능[그림 6(a) 참조]하여 와전류검사 기법이 압력관 내면 표면 결함 검출에 매우 유용한 비파괴검사 기법으로 적용될 수 있다는 것을 알 수 있다. 깊이가 가장 작은 #1 노치는 연료관에 연료 장전시 발생할 수 있는 흠집(스크레치성)과 유사한 지시이다.

3.2. 결함 깊이 측정(Flaw Depth Sizing)

압력관 내면 결함의 깊이 측정의 정확도 평가는 압력관 결함시험편에 포함된 7개의 노치 신호의 위상각을 측정하여 깊이를 추정하였다. 깊이 측정 정확도는 3개의 적용 주파수와 노치 깊이별로 평가하였다. 노치 깊이의 추정은 교정시험편에 포함된 3개 노치 신호의 위상각을 이용하여 교정곡선을 작성하고 이에 따라 7개 노치 결함의 깊이를 추정하였다.

적용 주파수에 따른 깊이 측정 정확도는 7개 노치 신호의 위상각을 10회 측정한 평균값을 노치의 실제 깊이와 비교하여 오차를 구하였다. 깊이 측정 오차는 최적 운전주파수인 350 kHz에서 0.365로 가장 작게 발생하고 50 kHz에서 0.621로 가장 크게 발생하였다(Fig. 7 참조). 이것은 압력관 내면 결함 깊이 평가시 350 kHz 신호를 평가

Table 3 Amplitude & phase angle of each notch's signal

Notch No.	Type	Depth (mm)	Amplitude (Volts)	Phase Angle (Degree)
1	ID Axial	1.20±0.05	4.654	40
2	ID Axial	0.90±0.05	4.192	39
3	ID Axial	0.80±0.05	2.558	35
4	ID Axial	0.70±0.05	0.782	28
5	ID Axial	0.40±0.05	0.749	28
6	ID Axial	0.25±0.05	0.711	29
7	ID Axial	0.07±0.05	0.711	26

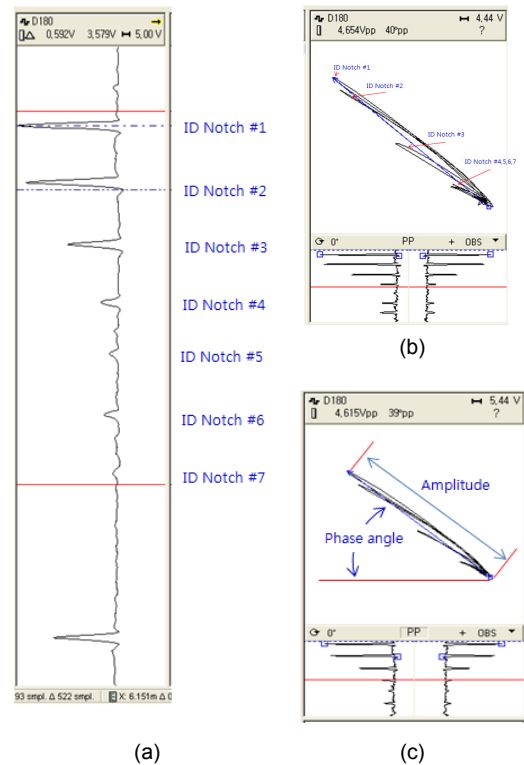


Fig. 6 ET signals of notch. (a) ET strip chart (b) ET Lissajous signals (c) amplitude & phase angle of ET signals

에 이용하는 것이 바람직하다는 것을 의미한다. 또한 노치 깊이에 따른 깊이 측정 정확도 평가에서도 동일하게 7개 노치 신호의 위상각을 10회 측정하여 구한 깊이의 평균값을 노치의 실제 깊이와 비교하여 오차를 구하였다. 노치 깊이별 평균 측정오차는 0.649로서 노치 깊이에 비해 상대적으로 크게 발생하는 것으로 평가되었다. 따라서

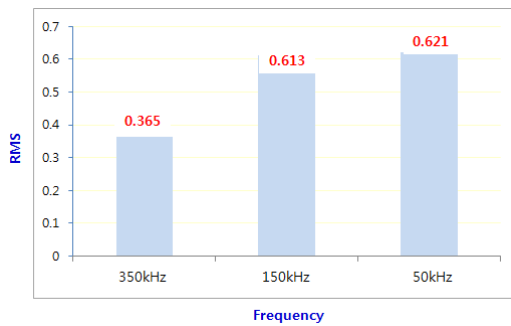


Fig. 7 Estimated RMS error at three frequency

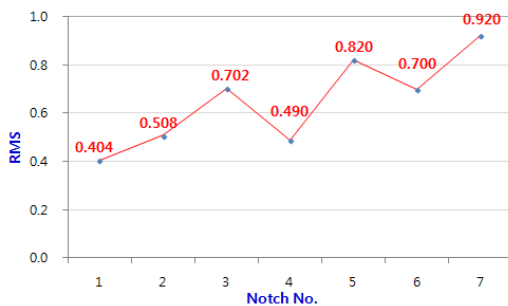


Fig. 8 Estimated RMS error of individual notch

위상각에 의한 압력관 내면 결함 깊이 측정기법은 측정오차가 크기 때문에 압력관 내면결함 검사에 적용이 매우 부적합한 것으로 판단되었다. 특히 깊이가 가장 얇은 #7 노치의 경우 측정오차가 0.92로서 매우 큰 것으로 평가되었다(Fig. 8 참조).

4. 결론

가압중수로형 압력관 내면에 발생할 수 있는 표면결함의 검출과 크기 측정을 위한 와전류검사 기술의 결함 검출능과 깊이 측정 정확도를 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 와전류검사 기술은 압력관 내면에 발생할 수 있는 스크래치성의 아주 미세한 결함(최소 깊이 0.07 mm)을 매우 우수한 분해능으로 검출할 수 있으므로 초음파탐상검사 결과 검출된 표면지시의 확인을 위한 보충기술로서 매우 유용하

다. 결함 검출을 위한 최적 주파수는 탐촉자 케이블(약 110 m 동축케이블)을 연결한 조건에서 약 350 kHz이다.

둘째, 와전류검사 기술은 결함의 깊이 측정 오차가 매우 크게 발생하므로 압력관 내면 결함의 깊이 측정에는 부적합하고 오직 표면결함 검출에만 적용하는 것이 바람직하다.

본 연구를 통해 개발된 와전류검사 탐촉자와 기술은 현재 개발 중에 있는 가압중수로형 압력관 비파괴검사 시스템에 채택되어 현장에 적용될 예정으로 와전류검사 기술의 국산화 자립에 기여할 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] ASME, "Nondestructive Examination," 2010 Edition Article 8, Mandatory App. II "Eddy Current Examination of Nonferromagnetic Heat Exchanger Tubing": American Society of Mechanical Engineers
- [2] H. J. Lee, M. W. Nam, C. H. Choi, S. N. Choi, H. J. Yoo, B. S. Yoon and S. H. Yang "Development of Inservice Inspection Technology for Major Components in Nuclear Power Plant," Final Research Report, KEPRI, pp. 151-162 (2010)
- [3] H. J. Lee, M. W. Nam, C. H. Choi, Y. S. Kim and B. S. Yoon, "Development of NDE Technology for Rod Control Cluster Assembly (RCCA) in Nuclear Power Plant," Final Research Report, KEPRI, pp. 181-210 (1997)
- [4] H. J. Lee, C. H. Choi, M. W. Nam, Y. S. Kim, B. S. Yoon, H. J. Yoo, Y. B. Jo, J. S. Lee, G. Y. Moon, I. C. Kim, G. Y. Chun and T. H. Lee, "Development of Eddy Current Testing System for Steam Generator in Nuclear Power Plant," Final Research Report, KHNP CRI, pp. 250-321 (2013)