

## 평판형 와전류 표준 시험편의 개발 및 교정

### Development and Calibration of a Plate Type Eddy Current Standard

김영주\*<sup>†</sup>, 김영길\*, 안봉영\*, 윤동진\*

Young-Joo Kim\*<sup>†</sup>, Young-gil Kim\*, Bongyoung Ahn\* and Dong-Jin Yoon\*

초 록 절대형 와전류 탐촉자 인증 시험에 사용되는 인공 결함이 포함된 와전류 표준 시험편을 개발하였다. 개발된 표준 시험편은 ASTM E 1629에서 규정한 전기 전도도를 지니고 인공 결함을 포함하며 전체 형상과 규격, 인공 결함의 규격을 만족한다. 인공 결함의 규격은 너비 0.1 mm, 깊이 0.5 mm이다. 이 인공 결함은 기존에는 양 측 끝단만 측정이 가능하고 중간 부위의 측정이 불가능하여 가운데 부위의 인증이 불가능하였으나 초음파 기술을 적용하는 새로운 방법을 도입하여 15  $\mu$ m 정도의 불확도로 측정을 하여 교정이 가능하도록 하였다.

주요용어: 와전류, 탐촉자, 표준, 시험편, 절대형 탐촉자, 인공 결함, 깊이측정

**Abstract** Eddy current standard including an artificial slot for the calibration of absolute type surface probe was fabricated. Developed eddy current standard has the electric conductivity and dimensions, and contains artificial slot as established in ASTM E 1629. The width and depth of artificial slot are 0.1 mm and 0.5 mm respectively. This slot was only possible to measure the depth on the two side edges, and impossible for the middle part with general measurement tools. The ultrasonic test method was applied for measuring depth of the middle part of the artificial slot in the standard. Using this method the dimension could be measured successfully with uncertainty about 15  $\mu$ m. Calibration of eddy current standard for the absolute probe can be performed by this technique.

**Keywords:** Eddy Current, Standard, Probe, Absolute Probe, Artificial Slot, Depth Measurement

#### 1. 서론

와전류 탐상은 비파괴 검사 분야에서 매우 비중 있는 방법으로서 항공기, 발전소, 화학 플랜트, 기계, 금속 부품 산업 등에서 널리 사용되고 있다. 그러나 탐상 방법이나 탐상 장비에 대한 표준화가 미흡하여 검사 결과에 대한 신뢰도를 떨어뜨리고 있다. 예를 들어 같은 결함에 대해서도 다른 탐상기와 탐촉자를 사용하면 결과가 다르게 나올 수 있고 같은 장비를 사용할 경우라도 기준 시험편의 전기 전도도나 인공 결함의 너비, 깊이 등의 규격이 일

정하지 않다면 판정 기준이 달라질 수 있게 된다. 따라서 와전류 장비와 탐촉자는 표준 절차에 의하여 주기적으로 교정(시험)을 시행하여야 하며 기준 시험편 또한 표준 절차에 의하여 제작하고 주기적으로 교정하여야 한다. 그러나 와전류 탐상 장비는 매우 복잡한 전자 장비로서 표준화된 시험 절차를 마련하기 매우 어렵다. 따라서 아직까지 표준화된 국제 규격이 제정되지 못하고 있으나 다행이 ISO 규격 제작이 진행되고 있으며 그 초안은 2006년에 공개되어진바 있다[1-3]. 탐촉자의 경우는 다양한 종류에 대한 모든 시험 절차가 마련 되지는 못했으

나 표면 검사용 절대형 탐촉자에 대해서만 미국에서 그 시험 절차를 제정하여 사용하고 있는 실정이다[4,5]. 우리나라에서는 와전류 탐상 장비, 탐촉자 그리고 시험편 어느 것도 아직까지 시험 절차가 미비한 실정이며 시험이 필요한 경우 외국의 장비 제조사나 미국으로 보내어 시험을 하고 있으나 그것도 자체 기준에 의한 것일 뿐 표준 절차에 의한 것은 아니다. 본 연구는 와전류 탐상 장치들의 시험 절차 확립을 위한 첫 단계로서 표면 검사용 절대형 탐촉자의 시험을 위하여 표준 시험편을 제작하고 제작된 표준 시험편의 전기전도도, 인공 결함의 규격을 정밀 측정 하고 표준 시험편의 교정 체계를 구축하였다.

2. 표준 시험편 제작

절대형 표면 검사용 탐촉자를 검사하기 위해서는 표준 시험편이 요구된다. 미국의 시험 측정 표준 규격 중에서 와전류 탐촉자 시험에 관한 ASTM E 1629[4]에서는 절대형 탐촉자에 대한 시험 절차 및 표준 시험편을 정의하고 있어 본 연구에서도 많은

부분 미국 규격에 따라 시험 절차를 확립하고자 하였다. ASTM E 1629에서 합의된 시험편은 전기전도도가 30~35 %IACS인 알루미늄 T 7075 재료를 이용하여 Table 1의 규격을 지니도록 하였다.

Table 1의 규격에 의하여 알루미늄 7075 T 판재를 이용하여 시험편을 제작하였다. 이 재료의 전기전도도를 측정한 결과는 Table 2와 같다. 측정 방법은 직류 저항 측정법을 이용한 것으로 국가표준에 소급되는 인증 값으로서 측정은 가공된 시편의 10 point를 측정하여 평균값과 불확도를 평가한 것이다[7]. 일반적으로 사용되는 와전류법 전기저항도 측정하였는데 직류저항법과 유사하게 나타났으며 그 값을 같이 병기하였다. 측정 결과 사용한 재료의 전기전도도는 기준에 적합했으며 전기전도도의 부위별 분포 또한 고르게 나타났다.

제작된 표준 시험편의 형상은 Fig. 1과 같다. 와전류 표준 시편을 미국과 국내 업체에 가공을 의뢰하여 제작된 시편을 5 mm 간격으로 절단하여 인공 결함의 깊이를 측정한 결과 처음에는 미국에서 가공한 결함만 ASTM에서 규정한 치수를 만족하고 국내 가공품은 규정치를 만족할 수 없었으나 수차례 시행착오를 거쳐 국내 제작에 성공하였다. 미국에서 가공한 시험편의 인공 결함의 단면은 Fig. 2(a)와 같이 결함 끝이 평면을 이루지 못하여 결함 깊이 측정에 어려움이 있었으나 국내 제작품의 경우는 Fig. 2(b)와 같이 결함 끝 단면이 깨끗하게 가공되어 미국 가공품에 비하여 더욱 정교하게 제작되었다.

Table 1 Dimensions of the standard block

thickness	length	width	slot depth	slot width
19 mm 이상	50 mm 이상	50 mm 이상	0.5 mm ±0.025 mm	0.1 mm ±0.01 mm

Table 2 Measured electric conductivity of the eddy current standard

전기비저항	전기전도도	도전율	와전류법
$\mu$ Ohm-cm	mS/cm	%IACS	%IACS
5,376	0.1860	32.07	31.9-32.1
확장 불확도 (k=2) 0.4%			

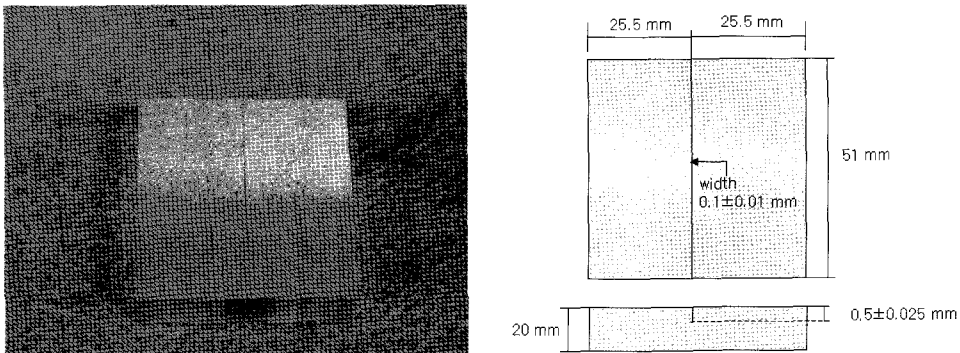


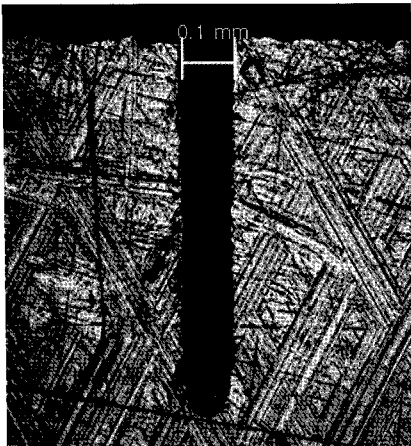
Fig. 1 Eddy current standard block

결함의 폭은 0.1 mm로서 모두 규격에 만족한다.

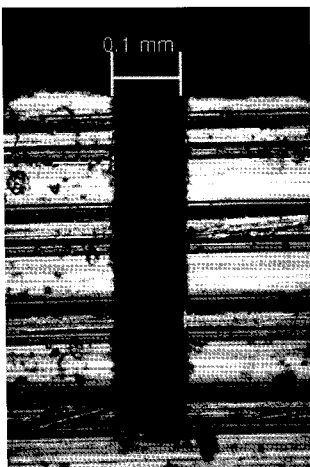
와전류 시험에 있어 0.5 mm 결함 끝에서의 형상이 둥글거나 각이 지는 것은 신호에 별 영향은 없다. 그러나 둥글 경우 각진 형상 보다 깊이 측정에 더 큰 불확도 요인으로 작용하여 표준 물질로서의 품질 저하를 유발한다. 표준 물질이란 정해진 규격을 소비자가 믿고 사용할 수 있게 정해진 규격대로 제작-인증-판매-주기적 교정이 이루어져야하는 것으로 어느 것이 성능에 좋게 미치는지 하는 차원이 아니며 규격에 가장 가깝게 제작하고 그 규격을 인증할 수 있는 것이 가장 좋은 표준이라 하겠다. 측정초기 가공에 실패는 방전 가공과 wire cutting 등을 이용하였는데 이 방법의 단점은 깊이 들어가면서 폭이 확대 되거나 고르게 가공되지 않고 끝단

의 형상이 불규칙한 단점이 있었다. 본 연구에서는 wheel cutting을 이용하였으며 이 방법이 가공된 표준 결함의 균일성에 더 좋은 것으로 판단된다.

제작된 인공 결함의 너비와 깊이는 결함의 절단면에 한하여 측정 현미경을 이용하여 정밀하게 측정할 수 있다. 그러나 와전류 표준 시편에 가공된 인공 결함은 결함 끝단이 아닌 중간 부위에서 탐촉자를 위치하여 시험하여야 하므로 중간 부위의 결함 깊이를 측정하여야 한다. 그런데 시편을 절단하지 않은 상태에서는 깊이 측정이 불가능하였다. 깊이 측정 기술로는 레이저를 이용한 방법과 탐침(stylus)를 이용한 방법이 있으나 와전류 시편에 가공된 결함은 너비가 0.1 mm, 깊이가 0.5 mm로 좁고 깊어서 두 가지 기술 모두 적용할 수 없다. 이러한 문제로 미국에서 발행된 와전류 표준 시편의 인증서 또한 결함의 끝단을 측정 현미경으로 측정한 깊이만을 표시하고 있는 실정이다. 결함 끝단의 깊이와 중간 부위의 깊이가 같다고 할 수 없으므로 와전류 표준 시편은 불완전한 표준이 된다. 본 연구에서는 개발된 표준 시편의 인공 결함의 중간 부위에서도 결함 깊이를 측정하여 인증할 수 있도록 하기 위하여 초음파법을 적용하여 인공 결함의 정밀 측정을 시도하였다.



(a) made in USA



(b) made in Korea

Fig. 2 Images of the machined slots in the specimens

### 3. 인공 결함 깊이 측정

인공 결함의 깊이 측정은 Kim 등[6]의 초음파를 이용한 방법을 적용하였다. 초음파를 이용하여 결함 깊이를 측정하기 위하여 사용된 탐촉자는 사용 주파수가 20 MHz인 탐촉자이다. 측정 방법을 소개하면 다음과 같다. 우선 기준 시험편에서의 초음파 속도를 알아야 결함 깊이를 환산할 수 있다. 일반적으로 어떤 재료내의 초음파 속도를 재기 위해서는 표면에서 반사한 파와 바닥에서 반사한 파의 시간차이와 두께를 재면 시험편에서의 속도를 구할 수 있다. 그러나 재료내의 초음파 속도를 더욱 정밀하게 측정하기 위하여 1차 바닥 반사파와 2차 바닥 반사파를 이용하였다. 그것은 초음파 펄스가 여러 개의 peak로써 이루어져 있고 표면 반사파와 바닥 반사파의 형상과 위상은 Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)와 같이 다르기 때문에 본 연구에서 요구되는 정밀한 속도 계산을 위한 시간 차이를 구하는데 적합하지 않다. 그러나 1차 바닥 반사파, Fig. 3(b)와 2차 바닥 반사파 Fig. 3(c)는 그 파형과 위상이 거의 같아 정

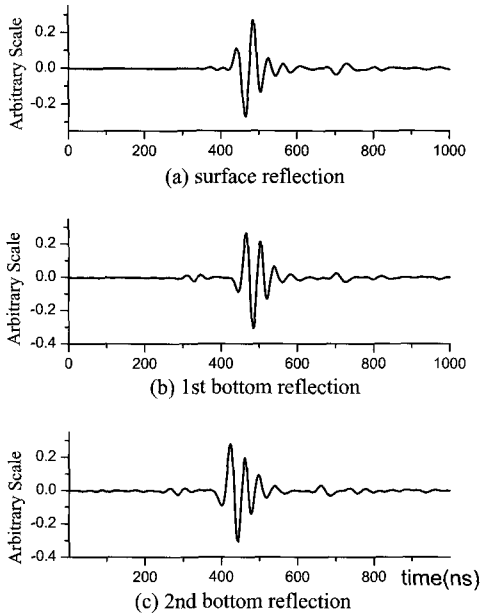


Fig. 3 Waveforms reflected on the top and bottom of the reference block

밀한 시간 차이를 구할 수 있었다. 본 연구에서 개발된 국산 시험편의 경우 두께 19.1 mm, 시간 차이는 6074 ns로 측정 되었다. 이로부터 구한 표준 시험 재료의 초음파 속도는 6290 m/s 이다.

구해진 초음파 속도와 주파수로부터 구해진 초음파의 파장은 약 314  $\mu\text{m}$ 로서 측정하고자 하는 결함 폭보다 3 배 더 길다. 따라서 결함에서 반사되는 반사파는 매우 미세하다. 반대로 재료 표면에서 반사되는 반사파는 매우 크다. 두 반사파가 0.5 mm 거리에서 발생되므로 결함에 의한 반사파는 재료 표면의 반사파에 묻혀 잘 관찰되지 않을 수 있어 일반적인 결함 탐지를 위한 초음파 탐사에 비하여 정밀한 시험이 필요하였다. Fig. 4는 인공 결함 위에서 시험한 초음파 C-scan 결과이다. 이를 바탕으로 C-scan 이미지 상에서 가운데 일직선을 따라

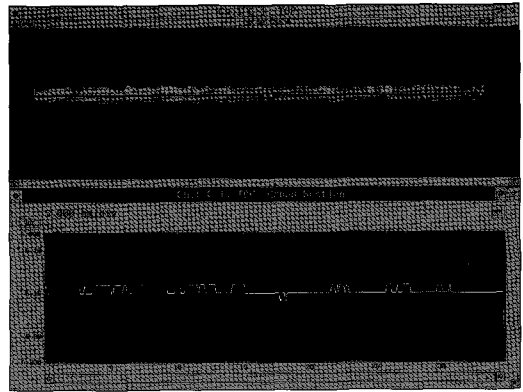


Fig. 4 Ultrasonic C-scan result of eddy current standard block

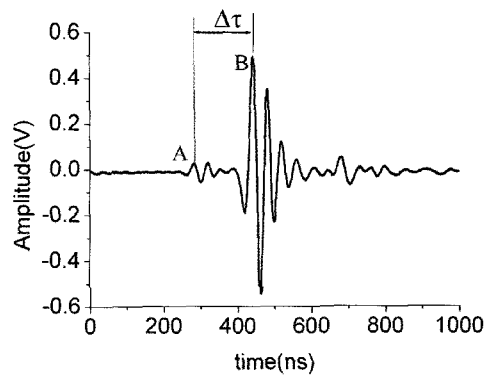


Fig. 5 UT signal captured by a digital oscilloscope

TOF(time of flight)를 측정하여 재료 표면에서의 TOF와의 차이로써 결함 깊이를 환산하였다. 여기서 일반 초음파 탐상기가 나타내주는 TOF는 낮은 해상도로 인하여 사용될 수 없고 10 GHz 이상의 sampling time 기능이 있는 디지털 오실로스코프를 사용하였다. Fig. 5는 디지털 오실로스코프로 얻은 결함과 바닥에서의 파형이며 그림상의 A, B는 결함과 바닥에서의 peak point를 가리킨다. 이 두 포인트 간의 시간 차이를 측정하여 초음파 속도를 이용하여 환산하면 결함 깊이를 계산할 수 있다. 이

Table 3 Depths measured by UT and measuring microscope methods

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Time diff. (ns)	154.8	155.6	155.8	155.8	156.4	156.0	156.2	155.8	157.2	156.4
Measured depth by UT (mm)	0.487	0.489	0.490	0.490	0.492	0.491	0.492	0.490	0.494	0.492
Measured depth by microscope (mm)	0.5	0.499	0.496	0.501	0.496	0.5	0.499	0.5	0.498	0.5
Difference	0.013	0.011	0.010	0.011	0.008	0.009	0.008	0.010	0.006	0.008

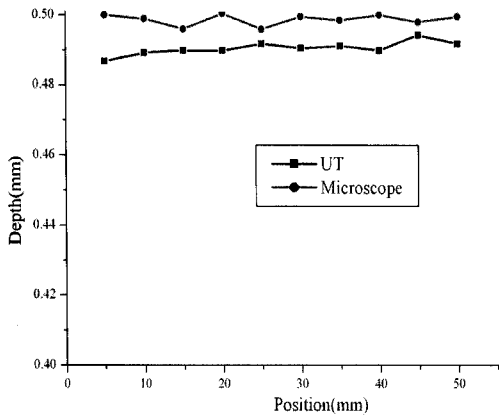


Fig. 6 Measured depths by UT and a measuring microscope

러한 파형을 C-scan 상의 결함 이미지에서 5 mm 간격으로 반복 측정하였다. Table 3는 위치별로 시간 차이를 구한 후 깊이를 구한 값을 나타낸다. 초음파로 깊이를 구한 값의 정확도는 현재 10  $\mu\text{m}$  이하의 오차로 측정 가능한 것으로 판단된다. 그러나 현미경 판독과 시편 표면의 거칠기 등으로 인하여 약간의 불확도가 더해져 전체적으로 15  $\mu\text{m}$  정도의 불확도를 나타낸다고 판단된다.

Table 3과 Fig. 6에서 나타낸 바와 같이 결함 위치별 깊이는 설계된 0.5 mm보다 최고 13  $\mu\text{m}$  정도 차이가 난다. 그리고 전체적으로 초음파에 대한 결과가 현미경에 의한 결과 보다 깊이가 얇게 측정되어 있는데 이는 표면 거칠기에 의한 것으로 판단된다. 즉 현미경 측정 시에는 거칠기의 중간정도를 표면으로 설정하지만 초음파는 표면으로부터 가장 깊은 위치에서 반사되므로 가장 깊은 곳이 표면이 된다. 이를 고려하여 현미경 측정시 표면을 가장 깊은 곳으로 설정 한다면 차후에는 그 측정 편차가 줄어들 것으로 판단된다. 현미경을 이용한 판독시 측정불확도를 포함하더라도 25  $\mu\text{m}$  의 허용 오차를 규정한 ASTM의 규격을 만족하는 것으로 국내 제작한 시편의 우수성을 입증한다.

#### 4. 표준 시편의 교정

개발된 표준 시편은 측정 현미경으로 두께, 결함 너비 등을 측정하고 개발된 초음파 깊이 측정법을 이용하여 깊이를 측정하게 된다. 각 측정은 1차 표준 기관에 소급된다. 또한 전기전도도는 전기전

도도 측정기를 이용하여 측정되며 이 또한 1차 표준 기관에 소급되어진다. 이러한 방법으로 교정된 표준 시편은 각종 산업 현장에 보급되어 와전류 탐촉자의 교정에 사용되어 질 수 있다.

#### 5. 결론

와전류 탐촉자 교정에 사용될 수 있는 와전류 탐상 표준 시편을 개발하였으며 개발된 표준시편의 교정을 위한 측정 기술은 초음파 측정 방법을 적용하였다. 깊이 측정 기술은 미세 폭의 깊은 결함의 깊이를 정밀하게 측정한 것으로 와전류 표준 시편의 인증 기술로서 유망할 것으로 기대된다. 본 연구 결과는 장차 국제 규격이 확정 공포되어질 경우 표준 시편의 수요가 증가할 것에 대비하고 판형 뿐만 아니라 튜브형 시편 개발의 기초 기술로서 사용될 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

- [1] Draft International Standard ISO/DIS 15548-1, "Non-destructive Testing-Equipment for Eddy Current Examination-Part 1: Instrument Characteristics and Verification" (2006)
- [2] Draft International Standard ISO/DIS 15548-2, "Non-destructive Testing-Equipment for Eddy Current Examination-Part 2: Probe Characteristics and Verification" (2006)
- [3] Draft International Standard ISO/DIS 15548-3, "Non-destructive Testing-Equipment for Eddy Current Examination-Part 3: System Characteristics and Verification" (2006)
- [4] ASTM E1629 "Standard Practice for Determining the Impedance of Absolute Eddy-Current Probes" R(2001)
- [5] ASTM E1004 "Standard Practice for Determining Electrical Conductivity Using the Electromagnetic (Eddy-Current) Method," (1999)
- [6] Young-Joo Kim et al. "Measurement of the depth of narrow slotted sections in eddy current reference standards," *Metrologia* 44 pp. 53-56 (2007)
- [7] 한국표준과학연구원, 측정 불확도 표현 지침 (KRISS-99-070-SP) (1999)