

누설자속탐상법의 결함검출능력 향상에 관한 연구

이진이*

Improvement in Probability of Detection for Leakage Magnetic Flux Methods

Jinyi Lee*

Key Words: Leakage Magnetic Flux Method (누설자속탐상법), Magnetic Camera (자기카메라), Magnetic Lens (자기렌즈), Probability of Detection (결함검출능력), Hall Sensor (홀센서), Magnetic Fluid (자성유체)

Abstract

It is important to estimate the distribution of intensity of a magnetic field for application of magnetic method to industrial nondestructive evaluation. Magnetic camera provides the distribution of a quantitative magnetic field with homogeneous lift-off and same spatial resolution. Leakage magnetic flux near the crack on the specimen could be amplified by 3-dimensional magnetic fluid and zoom in and out of measurement area. This study introduces the experimental consideration of the effects of lens for concentrating of magnetic flux. The experimental results showed that the magnetic fluid has sufficient lens effect for magnetic camera and effect of improvement in probability of detection.

1. 서론

기호설명

DSV: 균열의 유무에 따른 전압차
 p-p전압 : peak-to-peak 전압
B, H: 자속밀도, 자계의 세기
V_H: 홀전압
x: 시험편의 길이방향. 자화방향
y: 시험편 평면의 수직방향
z: 시험편의 폭방향. 균열의 길이방향
 $\partial V_H / \partial x$: 홀전압의 x축에 대한 미분치

비파괴 검사중 누설자속을 이용하는 방법은 강자성체 구조물의 표면 및 표면근방의 균열을 탐상하는데 매우 유익한 방법이다. 또한, 누설자속을 이용하여 균열을 평가하기 위해서는 균열근방의 자장 분포를 정량적으로, 그리고 빠른 시간내에 취득하는 것이 필요하다. 그러나, 지금까지 많은 경우, 정량적인 자장분포를 취득하기 위해서 스캔 방식⁽¹⁾을 이용하고 있으며, 이것은 균일한 lift-off를 얻기 위한 정밀한 자동 이송장치를 필요로 하였다. 또한 1개의 센서에 의하여 스캐닝하고, 자장분포의 2차원 데이터를 취득하여 해석하므로, 많은 측정시간과 별도의 평가시간을 필요로 하였다.

또한, 자장의 세기를 고감도로 측정하기 위해서 센서의 감도를 높이고, 출력을 증폭하는 연구

*조선대학교 전자정보공과대학 정보제어계측공학과
 E-mail : jinyilee@mail.chosun.ac.kr
 TEL : (062)230-7101 FAX : (062)230-7101

가 수행되어 왔다. 한편 자기자켓을 응용한 강자성체 평판을 이용하여 자속집속효과를 얻고자 하는 연구^(2,3)가 있었으나, 스캔 방식에서 벗어나지 못하였고, 특히 강자성체 금속에 의한 잔류자화와 자기 히스테리시스 현상을 고려하지 않고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위하여, (1) 다수의 고감도 자기센서를 2차원 또는 3차원으로 배열하여 일정한 lift-off와 실시간 자장분포의 정량적인 취득을 가능하게 하고, (2) 자속집속효과가 있으면서 잔류자화와 자기히스테리시스현상을 무시할 수 있는 3차원 형상의 자성유체, 즉 자기렌즈를 도입한 자기카메라^(4~6)가 제안되었다.

여기에서 자기렌즈로써 자성유체⁽⁷⁾를 사용하는 이유는 잔류자화와 자기 히스테리시스 현상이 적은 것도 한 이유지만, 3차원 형상의 상자성체 용기에 채우는 간단한 작업에 의하여 3차원 형상의 강자성체를 구현할 수 있으며, 또한 용기를 바꾸어 채움으로써 재이용이 가능하고, 나아가 고무와 같은 탄력성이 있는 재질의 용기에 채워 다양한 3차원 형상으로의 변환이 용이하기 때문이다.

본 연구에서는 수치해석에 의하여 얻어진 기존의 정보중에서 자성유체에 의한 감도와 균열검출 능력 향상효과를 실험적으로 증명하였다.

2. 기본원리

2.1 자기카메라

자기카메라는 그림 1과 같이 자원과 대상물, 2차원 배열의 자기센서와 3차원 형상의 자기렌즈, A/D converter와 Computer 및 Monitor로 구성된다. 이들 구성에 의하여 대상물의 형상 또는 시험편의 균열 주위의 자장을 자기렌즈로 집속하여 자기센서 배열에 의하여 전기신호로 변환함으로써 육안으로는 볼 수 없는 자기분포를 실시간 가시화하고, 기록하며, 해석하기 위한 정량적인 기초 데이터를 제공한다. 여기에서 자원으로서는 그 대상이 강자성체인가, 또는 상자성체 금속인가에 따라 전자석, 유도전류, 헬름홀츠 코일, 지자기등을 이용한다.

본 논문에서는 강자성체 금속의 표면 또는 표면 근방에 위치하는 균열을 탐상하고 평가하기 위해서, Yoke magnetic coil에 의하여 시험편을 자화하고, 균열에 의해 발생하는 누설자속을 자기렌즈에 의하여 집속한 후, 그 분포를 취득하는 것을 가정한 자기카메라 및 자기렌즈의 효과에 대하여 고찰한다.

2.2 자기렌즈와 자성유체

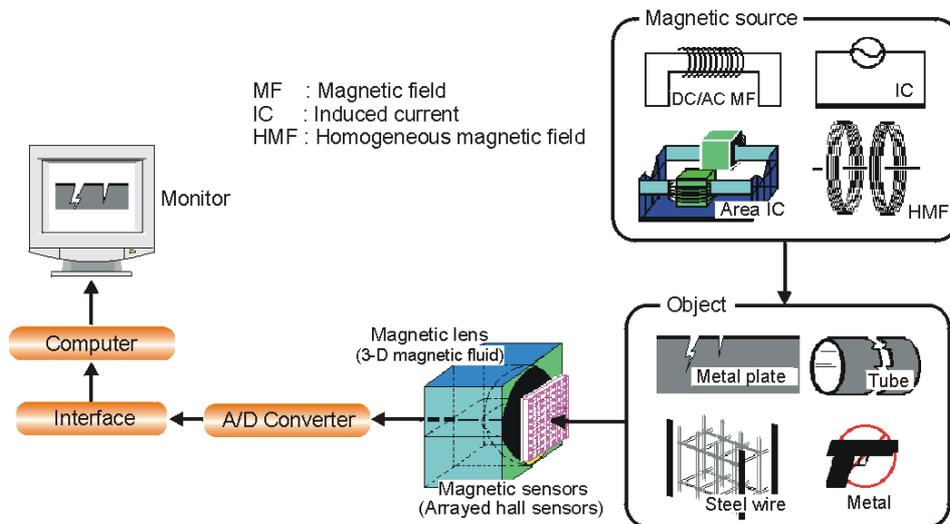
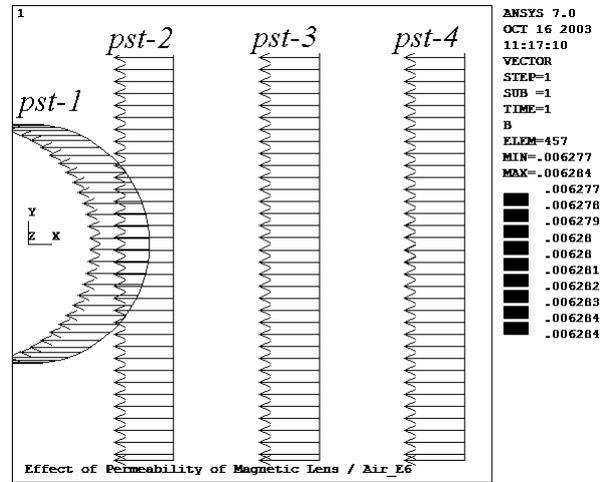


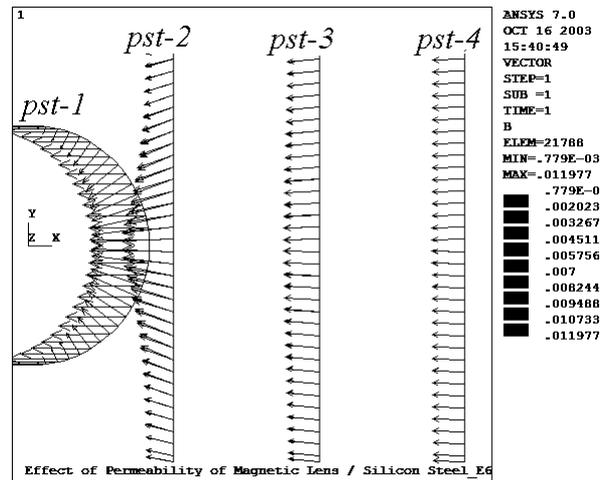
Fig. 1 Schematics of magnetic camera

그림 2는 자기렌즈를 각각 공기와 규소강으로 설정하였을 때의 자기렌즈 표면 및 거리에 따라 자속밀도가 어떻게 분포하는가를 해석한 결과이다. 그림 2(a)에서 알 수 있듯이 자기렌즈가 공기(즉, 자기렌즈가 없을 경우)일 때 솔레노이드의 중심부에서는 일정한 자계가 발생하며, 따라서 자속밀도가 일정한 크기 및 방향을 가진다. 한편, 그림 2(b)는 자기렌즈로써 규소강을 도입하였을 때, 상기 그림 2(a)의 일정자장이 투자율이 높은 자기렌즈에 집중되는 현상을 보여준다. 또한, 자기렌즈의 표면근방에서 증폭효과가 매우 크고, 거리가 멀어짐에 따라 증폭효과가 적음을 알 수 있다. 한편, 자성유체는 계면활성제에 의하여 직경 수십 nm 정도의 강자성체 미립자를 hydrocarbon, ester, ether, water 등과 같은 유체에 분산시킨 것이다. 따라서 자성유체는 단자구 구조를 갖는 초상자성체⁽⁷⁾로 취급되며, 자화곡선은 히스테리시스를 거의 갖지 않는다. 즉, 잔류자화와 자기이력현상이 거의 없다. 또한, 유체이기 때문에 3차원 형상의 용기에 채우는 간단한 작업에 의하여 간단히 3차원 형상의 강자성체를 구현할 수 있다. 그리고, 용기를 바꾸어 채움으로써 재이용이 가능하다. 밀도도 7880kg/m³인 철에 비하여 1277kg/m³(Ferrotec Co., EXP92017)로써 약 16%정도에 해당하는 경량이며, 나아가 고무와 같은 탄력성이 있는 재료의 용기에 채워 다양한 3차원 형상으로의 변환이 용이하다는 특징이 있어, 상술한 자기렌즈로써 적합한 material이다.

자기렌즈의 중심선상에서 재료의 변화(즉, 투자율의 변화)에 따른 최대 자속밀도의 변화(수평성분)를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 거리(Position 1 - Position 4)에 따라 자속밀도는 큰 차이를 보이고 있으나, 비투자율이 20인 자성유체나 1500인 방향성 규소강의 경우 증폭효과가 약 95%로써 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 즉, 자속밀도의 증폭효과를 얻기 위하여 강자성체인 자기렌즈를 도입함에 있어서, 자성유체를 도입하더라도 규소강등과 같이 큰 비투자율을 가지는 재료를 사용하는 것과 비슷한 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.



(a) magnetic lens is air



(b) magnetic lens is silicon steel

Fig. 2 The results of analyzing how the magnetic flux density would be distributed

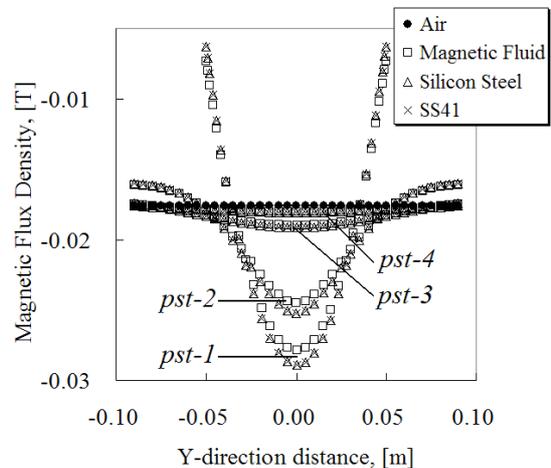


Fig. 3 Results of analyzing the magnetic flux density at each location

2.3 누설자속의 시뮬레이션

그림 4에 누설자속 발생장치 모델을 나타낸다. 누설자속 발생장치의 코어 재질은 JIS SS41로 가정하였고, 흠은 10mm로 가정하였다. 그림 5는 사각형 자기렌즈의 형상에 따른 누설자속의 수치 해석 결과로써, 자계의 세기(Strength of Magnetic Field, H)를 나타낸다. 그림에서 Air란 자성유체가 없을 경우를, M.F는 자성유체를 도입하였을 경우를 나타낸다. 또한 PST-5, 6, 7은 각각 lift-off가 0, 5, 10mm인 경우를 나타낸다. 수치해석 결과로부터 자기렌즈가 없을 경우(Air)에 비하여 전체적으로 자기렌즈에 의한 집중 및 증폭효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이것은 고온에서의 측정등 lift-off를 될 수 있는 데로 확보하고자 할 경우에 본 자기카메라가 유용함을 알 수 있다.

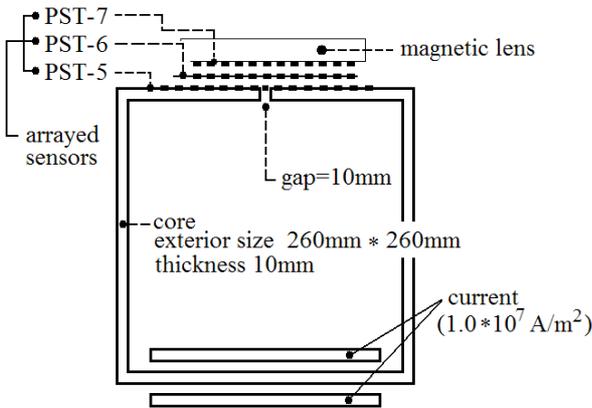


Fig. 4 Leakage magnetic generating model

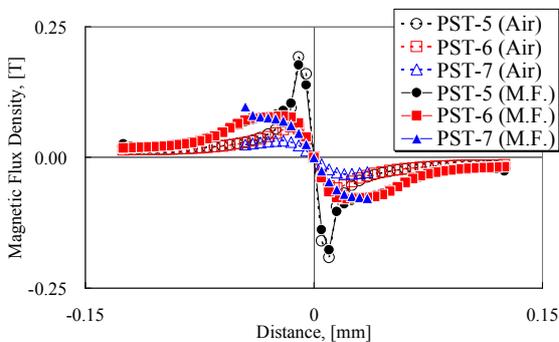


Fig. 5 Distribution of magnetic flux density according to the rectangular magnetic lens

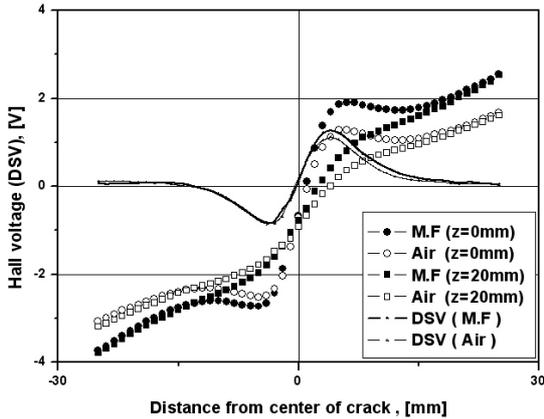
3. 실험 및 고찰

본 연구는 자기렌즈효과의 실증에 역점을 두고 있는 관계로 한 개의 자기센서를 정밀하게 스캔하는 방식을 취하였다. 또한 자기센서로서 홀센서(HW101A)를 도입하였으며, 차동증폭회로에 의한 출력을 AD 변환기(16bit resolution, ± 10V full range)를 통하여 컴퓨터에 받아들여 저장(10,000 sampling/sec, 1000 data/point)하였다.

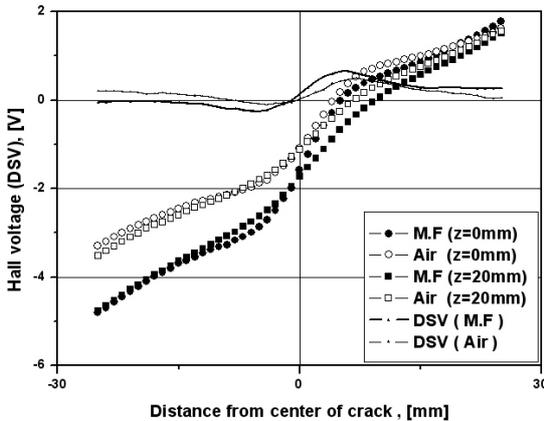
시험편(SS41)은 폭 100mm, 길이 200mm, 두께 5mm의 평판재이며, 연삭가공에 의하여 인공결함을 도입하였다. 시험편의 길이방향을 x, 폭방향을 z, xz평면에 수직인 방향을 y로 한다. 시험편의 중심에 도입한 인공결함은 폭 0.9mm, 길이 10mm, 중심깊이 3mm의 타원형이며, 그 길이방향은 z축과 동일하다. 자화장치는 극간거리 250mm, 권수 4000으로써 직류전원에 의하여 0.82A의 전류를 입력하여 시험편을 자화하였다.

그림 6은 자화장치의 입력전류를 0.82A로 하고, 자화장치와 시험편의 위쪽에 자기렌즈로서 13× 13× 9mm의 자성유체(Ferrotech Inc., EXP.92017)의 유무에 따른 홀전압 분포를 나타낸다. 각각의 그림에서 ●과 ■은 자기렌즈가 있는 경우를, ○과 □은 자기렌즈가 없는 경우를 나타낸다. 또한 동일한 lift-off에서 균열의 중심선상(z=0mm, ●, ○)에서의 홀전압분포와 균열로부터의 누설자속의 영향이 거의 없다고 판단되는 위치(z=20mm, ■, □)에서의 홀전압분포를 비교하였다. 한편, 실선은 동일한 lift-off 및 조건(즉, 자기렌즈의 유무)에서 균열의 유무에 따른 전압차(이하 DSV, distribution of subtracting value)를 나타낸다. lift-off가 5mm(그림 6(a)), 8mm(그림 6(b)) 및 10mm(그림 6(c))인 모든 경우에 자기렌즈의 도입(●, ■)에 의하여, 홀전압분포의 기울기가 증가하고 있음을 알 수 있다. 여기에서 곡선의 기울기는 입력에 대한 출력의 비, 즉 감도를 나타내므로, 자기렌즈의 도입에 의하여 감도가 약 30% 증가하였음을 알 수 있다. 또한, 균열의 유무에 따른 전압차(DSV, 실선)는 균열의 검출능력을 의미하므로, peak-to-peak 전압(이하 p-p 전압)으로부터 균열의 검출능력이 약 8.5%(lift-off 5mm)에서 50%(lift-off 8mm)

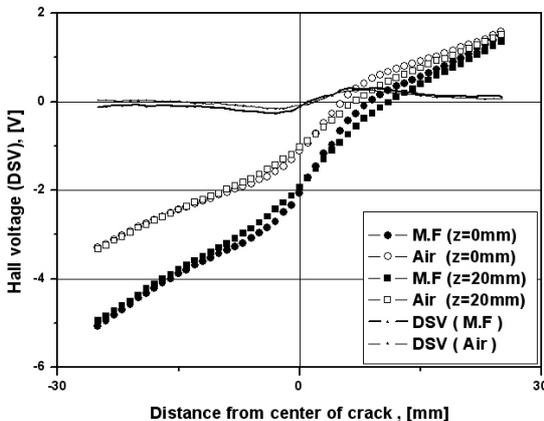
까지 증가하였음을 알 수 있다. 한편, 그림 6에서 균열이 없어 누설자속의 영향이 적다고 생각되어지는 영역($z=20\text{mm}$)에서는 홀전압 분포가 거의 선형적으로 변화하며, 균열영역($z=0\text{mm}$)에서는 균열근방($x=\pm 5\text{mm}$)에서는 홀전압 분포가



(a) lift-off 5mm



(b) lift-off 8mm



(c) lift-off 10mm

Fig. 6 Distribution of leakage magnetic flux density

급격하게 변화하고 있음에 주목한다. 이것은 균열 유무의 판단기준으로써 그림 7과 같은 홀전압의 x축에 대한 미분치($\partial V_H/\partial x$)를 이용할 수 있음을 보여준다. 여기에서 $\partial V_H/\partial x$ 의 최고치(이하 최고미분치)는 또 다른 균열의 검출능력을 의미하며, 자기렌즈의 도입에 의하여 균열의 검출능력이 약 12% (lift-off 5mm)에서 45% (lift-off 10mm)까지 증가하였음을 알 수 있다. 이러한 감도 및 균열의 검출능력은 차후 자기렌즈 형상의 최적화에 의하여 보다 향상될 수 있을 것으로 기대된다.

한편, 홀센서와 같은 자기센서는 외부자장이 없다고 하더라도 오프셋 전압이 발생하며, 높은 lift-off에서의 누설자속과 같이 미약한 신호를 높은 배율로 증폭하기 위해서는 이러한 오프셋 전압을 제거할 필요가 있다. 또한 경우에 따라서 자기센서의 주변에 누설자속이외의 외부자장이 발생하는 경우를 배제할 수 없다. 이러한 정적인 잡음은 비교전압에 의한 차동증폭과 같이 회로상에서 오프셋전압을 처리할 수도 있지만, 자기센서에 수직자장을 인가하여 전체적인 자속밀도분포를 조정할 수 있을 것이다. 여기에서는 후자의 경우를 상정하여 실험하였다. 즉, 자성유체 (Ferrotech Inc., EXP.92017)를 용기에 수납($13 \times 13 \times 9\text{mm}$)한 자기렌즈의 주변에 소형코일(중공 크기 $13.5 \times 13.5 \times 19.0\text{mm}$, 코일직경 0.2mm, 500turn)을 배치하여 전류의 인가여부에 따른 오

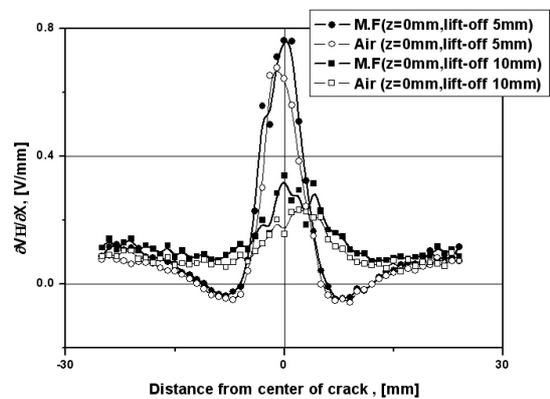


Fig. 7 Distribution of $\partial V_H/\partial x$ at lift-off 10mm

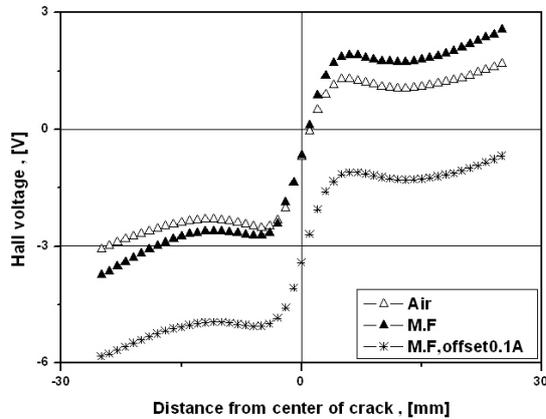


Fig. 8 Effects of combination magnetic field for elimination of Hall offset voltage (lift-off 5mm)

프셋 효과를 알아보았다. 그림 7은 lift-off가 5mm인 영역에서 자기렌즈가 없는 경우(Δ)와 자기렌즈가 있는 경우(\blacktriangle), 그리고 자기렌즈 외곽의 코일에 0.1A의 전류를 인가한 경우(*)에 있어서, 균열근방에서의 홀전압의 분포를 나타낸 결과이다. 전술한 바와 같이 자기렌즈의 도입에 의하여 감도 및 균열검출능력($x=\pm 5\text{mm}$ 에서 곡선의 기울기에 주목)이 향상되었으며, 특히 오프셋 조정을 위한 제2의 정자기장 인가에도 불구하고 홀전압분포의 형태는 크게 변하지 않는다. 이러한 결과로부터, 센서면에 수직하게 인가한 제2의 정자기장에 의하여 감도 및 결함검출능력에 영향을 거의 미치지 않고 오프셋을 조정할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

$13 \times 13 \times 9\text{mm}$ 의 용기에 자성유체를 수납한 자기렌즈의 도입유무에 따른 감도 및 균열검출능력 향상효과에 대하여 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 자기렌즈의 도입에 의하여 약 30%의 감도 향상효과가 있다.
- (2) 균열의 유무에 따른 누설자속밀도차의 분포에서 peak-to-peak 전압은 결함검출능력을 나타

내며, 자기렌즈의 도입에 의하여 최대 약 50%의 향상효과가 있다.

- (3) 누설자속밀도분포의 미분치는 결함검출능력을 나타내며, 자기렌즈의 도입에 의하여 최대 약 45%의 향상효과가 있다.

- (4) 센서면에 수직하게 인가한 제2의 정자기장에 의하여 감도 및 결함검출능력에 영향을 거의 미치지 않고 오프셋을 조정할 수 있다.

참고문헌

- (1) Yamada K., Yamaguchi K., Toyooka S. and Isobe Y., 2001, "Magnetic and optical nondestructive evaluations for iron-based materials", *Nondestructive Characterization of Materials X*, pp.333-340
- (2) Kuze N. and Shibasaki I., 1997, "MBE research and production of Hall sensors", *III-Vs Review*, Vol.10, No.1
- (3) Sekine K. and Iizuka A., 1996, "An improved method of magnetic flux leakage inspection for far-side corrosion type defects of ferromagnetic specimens", *Proc. 14th WCNDT*, pp.1250-1253
- (4) Lee J. Y., Choi W. H., Kim M. S., Kim D. J., Kang M. P., 2004, "Magnetic flux density apparatus for, E. G., Detecting an internal crack of a metal or a shape of the metal", *US patents* 6,683,452 B2
- (5) Lee J. Y., Seo D. W. and Shoji T., 2004, "Numerical Consideration of Magnetic Camera for Quantitative Nondestructive Evaluation", *Key Engineering Materials*, Vol.270-273, pp.630-635
- (6) Lee J., Kim M. S., Kang M. P., Kim D. J., Choe W. H., Shoji T., Kato H. and Kageyama K., 2001, "Development of Magnetic Camera Using 2-D Arrayed Hall Elements", *The Japan Society of Mechanical Engineers*, No.01-203, pp.222-227
- (7) Kamiyama S., 1999, "Introduction to Magnetic Fluid", *Sangyo-tosyo*, Tokyo