

마그네틱 필드를 이용한 배관 두께 측정 방법론 개발

김미나[†] · 채장범^{*} · 박일한^{**} · 김에녹^{*}

Development of Methodology to Measure the Thickness of Pipes using Magnetic Field

Mi Na Kim[†], Jang Bom Chai^{*}, Il Han Park^{**} and E Noch Kim^{*}

ABSTRACT

In this research project, development of methodology to measure the thickness of pipes in the wide range using magnetic field. The magnetic field spreading in the sensor and the plate was modeled in the cases of the various thicknesses in plate. Based on the analysis, sensors were designed, manufactured and tested to optimize the specifications of the sensor. The sensor can be used in high temperature through calibration. And the uncertainty of the sensor was estimated.

Key Words : Degradation(감육), Magnetic field(마그네틱 필드), Monitoring(감시), Pipe(배관)

기호설명

v = Voltage
 i = Current
 R = Resistance of coil
 $L(i)$ = Inductance
 λ = Flux linkage

1. 서론

원자력 발전소의 안전한 운영을 위하여 발전소에 설치된 설비의 상태를 점검하고 진단하는 일이 중요한 관심사가 되고 있다. 발전소에서 쓰이는 설비 중 배관의 경우는 발전소에서 가장 많은 부분을 차지하고 있으며 발전소의 안전과 수명에 핵심이 되는 부품이다. 따라서 발전소에서는 주기적으로 배관의 상태를 감시하고 사고를 예방하려는 노력을 하

고 있다.

현재 발전소에서 배관의 상태를 감시하기 위하여 초음파 신호, 전압/전류 신호, 진동 신호 등을 이용하고 있다. 초음파 신호를 이용하는 방법은 비교적 정확한 두께를 측정할 수 있지만 감시 범위가 좁기 때문에 많은 감시 점에 대하여 측정을 하여야 한다. 전압/전류 신호를 이용하는 방법은 배관 두께의 변화에 따라 전기 저항도 변하는 현상을 이용하여 측정한다. 이 방법은 넓은 범위를 한 번에 측정하여 배관 전체 평균의 변화를 감지하여 배관의 상태를 평가한다. 진동 신호를 이용하는 방법은 배관에 진동을 가하면 두께에 따라 진동 신호의 전파 특성이 달라지는 점을 이용하여 결함을 감지하는 방법이다.

배관의 상태를 상시 감시하고 배관에서 발생하는 문제를 사전에 예방하기 위해서는 원자력 발전소 운전 중에도 감시가 가능하여야 하고 국부적으로만 감시하지 않고 비교적 넓은 범위를 한 번에 측정하여 측정에 소요되는 인력과 시간을 줄일 수 있는 방법이 요구되어진다.

이를 이루기 위하여 마그네틱 필드를 이용하는 새로운 방식의 방법론에 대한 연구를 진행하였다. 연

[†] 책임저자, 회원, 아주대학교 대학원 기계공학과
E-mail : llrorall@ajou.ac.kr
TEL : (031)219-2930 FAX : (031)219-2930

^{*} 아주대학교 기계공학부

^{**} 성균관대학교 정보통신공학부

구 과정에서 다양한 두께와 결합을 구현한 평판 및 배관에 대한 실험 및 검증이 수행되었으며 마그네틱 필드를 인가하고 동시에 그 변화를 감지할 수 있도록 마그네틱 센서도 개발되었다.

본 논문에서는 마그네틱 필드를 이용하여 두께를 측정할 수 있는 방법론에 대하여 설명하고 이 방법론을 실제 평판에 적용하여 실험하고 검증한 과정을 알아본다. 또한 실제 배관이 설치된 현장의 온도 변화가 심한 것을 고려하여 연구된 보정 기술과 그 결과도 함께 알아본다.

2. 원리 및 이론

2.1 자기 회로

마그네틱 센서는 자기 회로와 자성체의 자화 특성 이론을 이용하여 배관의 감육을 감지하게 된다. 전자 기기의 자기 회로는 강자성 재료와 공극으로 구성되어 있다. 권선에 전류가 흐를 때 그 주위에는 자계가 형성되고, 자속은 철심 내부에서 제한된다. 강자성 재료에 코일을 감고 전원을 인가하면 자속이 발생한다. 전원의 전압 크기를 계속 증가시키면 자속은 계속 증가하다가 어느 시점부터 더 이상 증가하지 않는 현상이 나타나는데 이를 자기 포화라 한다. 자기 포화는 자속이 생길 수 있는 대상의 두께와 형상에 따라 다르게 나타나는데 마그네틱 센서는 이러한 자화 특성을 이용하여 시편의 상태를 평가하도록 개발되었다.

마그네틱 센서를 등가 회로로 표현하고 전압 방정식을 나타내면 Eq. (1)과 같다.

$$v = Ri + L(i) \frac{di}{dt} \quad (1)$$

마그네틱 센서의 구동 코일에 흐르는 전류에 따라 자성체의 포화 정도가 다르기 때문에 인덕턴스도 전류의 함수로 표현된다. 이 때 인덕턴스는 Eq. (2)와 같이 정의 된다.

$$L(i) = d\lambda/di \quad (2)$$

따라서 전압을 일정하게 증가시키면 Fig. 1(a)와 같이 자기 포화 구간에서 인덕턴스가 감소하게 되

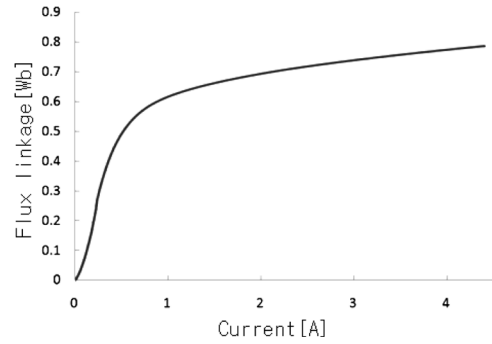


Fig. 1(a) Nonlinear correlation of current and magnetic flux

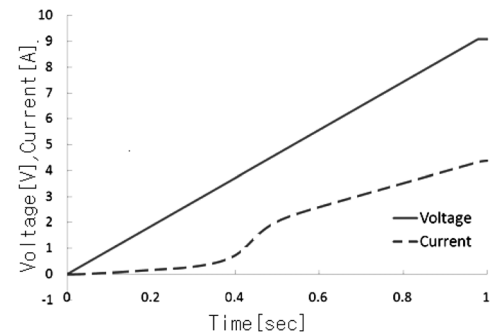


Fig. 1(b) Current and Voltage curves in time domain

므로 전체 임피던스는 작아지고 전류는 Fig. 1(b)와 같이 상승할 것이다. 이와 같이 마그네틱 센서를 시편과 밀착시킨 후 전압을 인가하면 시편의 두께 및 형태에 따라서 전기 회로와 자기 회로의 회로 정수들이 변하게 되고, 그 변화는 입력 전압에 따른 출력 전류의 변화를 가져온다. 따라서 센서에 감긴 코일에 전압을 인가하고 코일을 통해 흐르는 전류를 측정함으로써 시편의 두께 측정 및 손상을 감지할 수 있다.

2.2 마그네틱 센서의 구조

마그네틱 센서는 시편을 자화시킬 수 있는 자기 회로와 센서 동작 시 신호를 측정할 수 있는 계측기로 구성된 장치이다. 그림은 마그네틱 센서의 기본 구조를 나타낸다. 마그네틱 센서의 본체는 ‘C’ 자 모양의 철심을 적층한 철판에 권선이 감겨져 있고, 이 권선에 전원을 인가하는 전원부가 연결되어 자기 회로를 구성하게 되며 이 때 전원의 전압과 전류를 측정하기 위한 계측기가 연결된다. 이와 같이 구

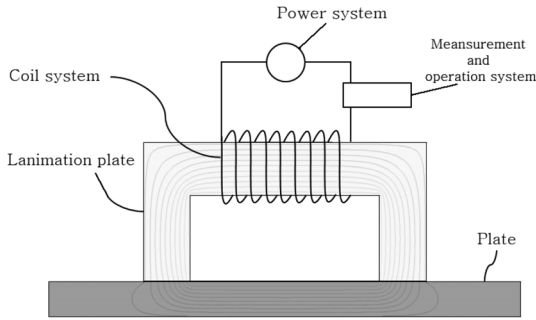


Fig. 2 The development of basic structure of magnetic sensor

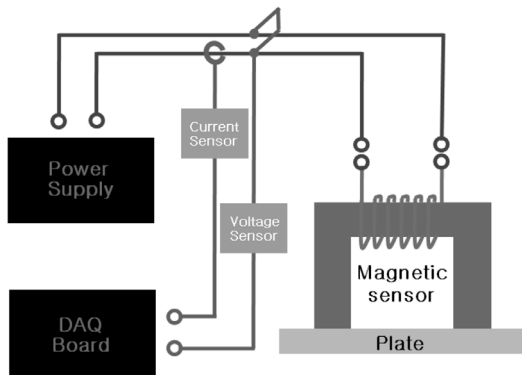


Fig. 3 Experimentation system of outline drawings

성된 마그네틱 센서를 시편과 밀착시킨 후 전압을 인가하면 시편의 자화 특성에 따라 전류 신호가 변하게 되고 이 신호를 측정 및 분석하여 시편의 상태를 판별하게 된다.

3. 실험 장치 및 결과

3.1 실험 장치

실험 장치는 마그네틱 센서, 전원 공급 장치, 전압 센서, 전류 센서, 그리고 신호 수집 장치로 구성된다. 전원 공급 장치는 마그네틱 센서를 동작시키기 위해 전압을 인가하는 장치이다. 프로그래밍을 통하여 사용자가 필요로 하는 형태의 전원을 공급할 수 있으며, 마그네틱 센서를 위해서 서서히 증가하다 일정하게 유지되는 형태의 전원을 공급하게 된다. 전원 공급 장치에서 출력되는 전원의 전압을 측정하기 위해서는 일반적으로 전압 센서가 필요하다. 전류 센서는 마그네틱 센서의 전원 선에 연결되어 시편의 포화 특성에 따라 변화하는 전류를 측정

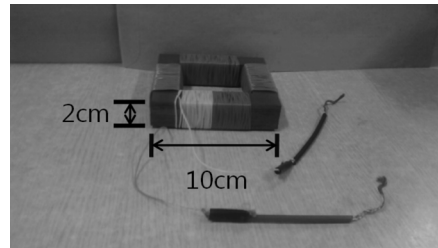


Fig. 4(a) Material of sensor (S60)

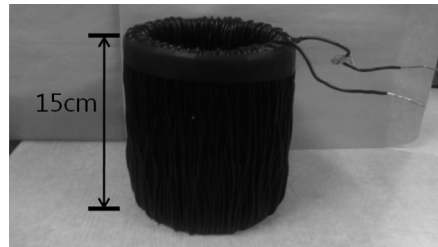


Fig. 4(b) Material of pipe (S25C)

하게 된다. 신호 수집 장치는 컴퓨터로 제어되며 마그네틱 센서에 공급되는 전원의 전압과 전류를 실험 전반에 걸쳐 수집하여 컴퓨터로 전달해 준다. 컴퓨터는 전달된 신호로부터 진단에 필요한 정보를 계산하고 이를 이용하여 평가를 수행한다.

3.2 실험 재료의 B-H 커브 측정

실험을 진행하기에 앞서 실험에 사용될 매질의 특성을 파악하기 위하여 B-H 커브를 측정하였다. 마그네틱 센서의 투자율이 감옥이 진행된 시편 또는 배관의 투자율보다 작다면 자기 포화는 센서에서 먼저 발생하게 되고 이에 따라 마그네틱 센서는 시편 또는 배관의 감옥을 감지할 수 없게 된다.

와전류의 영향이 없는 주파수 범위의 전압을 인가하고 이에 따른 전류를 측정하여 B-H 커브를 측정할 수 있다. 일반적으로 배관에 사용되는 재질인 S25C와 센서의 재질인 S60의 B-H 커브를 실험을 통하여 얻고, 얻은 결과를 바탕으로 실험에 사용될 재질의 타당성을 확인하였다. 센서의 재질인 S60은 와전류에 의한 영향을 최소화하기 위해서 얇은 판을 적용하였다. 그리고 배관 재질은 실제 일반적으로 사용되는 배관을 실험에 적합한 크기인 15cm로 잘라내어 코일을 감아 실험에 사용하였다.

Fig. 5는 센서 재질과 배관 재질의 B-H 커브를 함께 나타낸 것이며, 배관은 약 0.35 T에서 포화가 이

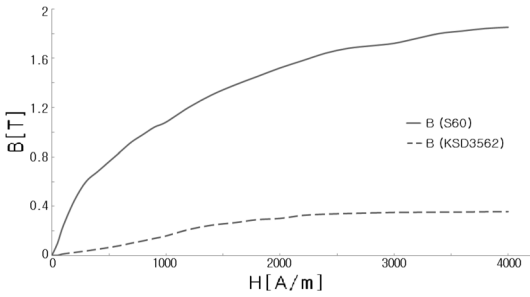


Fig. 5 Comparison of B-H curve S60 vs S25C

루어지는 반면에 센서 재질은 약 1.9 T에서 포화가 이루어지는 것을 알 수 있다. 센서 재질이 배관 재질에 비하여 포화가 천천히 발생하기 때문에 센서 재질로 S60을 사용하는 것이 타당하다. 또한 센서는 얇은 판을 적층하여 제작하였기 때문에 와전류가 발생하더라도 그 효과는 아주 적다는 장점이 있다.

3.3 센서 설계

일반적인 배관의 재질은 투자율이 센서의 투자율보다 작은 값을 가진다. 그러나 배관의 재질이 좋을 경우를 대비하여 평판의 경우 실제 배관보다 투자율이 높은 SS400 재질을 채택하였다. 그리고 센서의 재질은 S60으로 투자율이 높은 재질을 채택하였다.

센서의 크기는 실험에 사용될 시편의 크기와 감속의 폭에 의해 결정하였다. 실험에 사용된 시편은 길이 200mm, 폭 100mm, 두께 8 mm이다.

마그네틱 센서에 인가한 전압은 와전류의 영향이 거의 없을 것으로 추정되는 9 V/sec의 기울기를 가진 램프 형태의 전압으로 최대 약 9 V의 크기를 가진다. 권선에 흐르는 전류의 크기가 자기 포화가 충분히 발생할 수 있도록 권선의 직경은 1mm로 선정

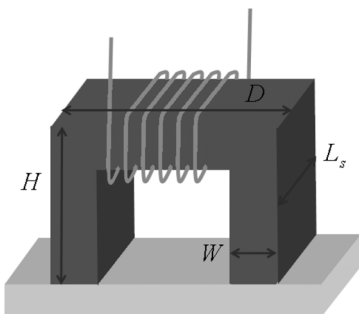


Fig. 6 Magnetic sensor

Table 1 Specifications of the magnetic sensor

Label	Value	Label	Value
Maximum Voltage	10 V	Thickness(W)	20mm
Winding resistance	2.06 Ω	length(L _s)	40mm
Winding number	500 turn	height(H)	50mm
Material of coil	S60	width(D)	80mm

하였다. 이때, 권선에 흐르는 최대 전류는 약 4.5 A이다. 평균 자로의 길이는 약 0.22m이고 이로부터 발생하는 마그네틱 필드의 세기 H는 약 11,000 A/m로 실험을 통하여 얻은 B-H커브를 통해서 자기 포화를 충분히 발생시킬 수 있음을 알 수 있다.

3.4 두께별 실험

시편에 전체적인 감속이 일어나는 현상을 모사하기 위하여 두께를 다르게 하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 시편의 두께는 1mm 씩 2~8mm이며 폭과 길이는 각각 100mm, 200mm이다.

Fig. 7은 실험 시 인가한 전원의 전압 그래프를 시편 두께별로 함께 나타낸 것이다. 그래프 상에서 1초가 되는 시점부터 실험이 시작되었으며 실험 시작 후 약 1초 동안 전압이 0 V에서 약 8.8 V까지 천천히 증가하는 방식이다.

Fig. 8은 Fig. 7과 같은 전압의 전원을 인가하였을 경우에 측정된 전류 그래프를 시편 두께별로 함께 나타낸 것이다. 실험 시작 후 약 1초 동안 0 A에서 약 4.2 A까지 천천히 증가하는 모양이며 증가하기 시작하면서부터 약 0.6초 동안에 7 종류의 두께별로 전류가 다르게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 시편 두께 차이에 따른 포화 특성에 의해 나타난 결과이다.

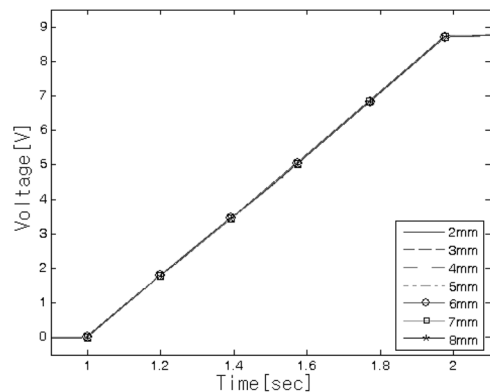


Fig. 7 Input voltage, under various thicknesses

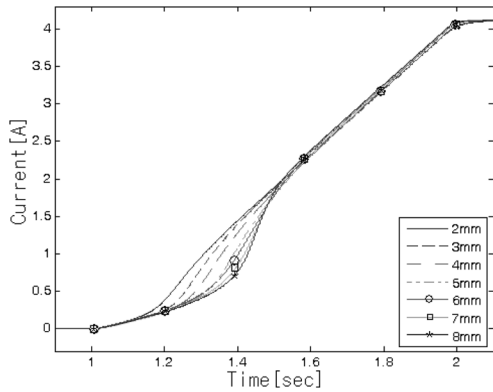


Fig. 8 Measured current, under various thicknesses

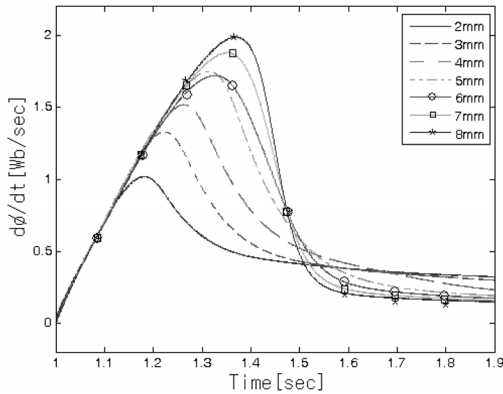


Fig. 9 Increase rate of flux, under various thicknesses

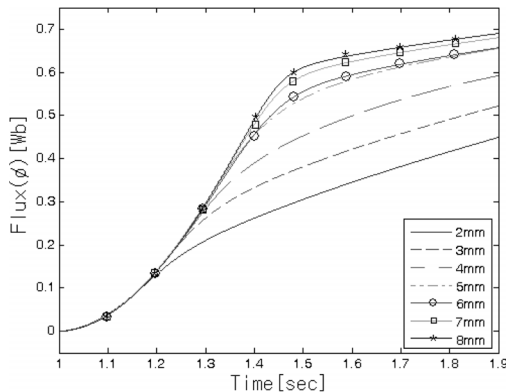


Fig. 10 Flux, under various thicknesses

Fig. 9는 실험 시 Fig. 7의 전압 신호와 Fig. 8의 전류 신호로부터 계산된 자속의 증가율 그래프를 시편 두께별로 함께 나타낸 것이다. 실험 전반에 걸쳐 자속의 증가율은 양의 값을 나타낸다. 특히 자속 증가율은 계속 증가하지 않고 실험 시작 후 약 0.15초

부터 0.4초 사이까지 급격히 증가하다가 다시 증가율이 작아지는 것을 볼 수 있다. 이는 포화가 어느 정도 일어나면 자속이 증가하기 어려워지므로 증가 속도가 떨어지기 때문이다. 7 종류의 시편 두께별로 자속 증가율의 크기와 모양이 다른 것은 시편의 두께에 따라 자속이 증가하는 속도나 양이 제한되기 때문이다.

Fig. 10은 실험 시 Fig. 9의 자속 증가율 신호로부터 계산된 자속 그래프를 시편 두께별로 함께 나타낸 것이다. 실험 전반에 걸쳐 자속은 계속 증가한다. 실험 시작 후 약 0.15초부터 0.4초 사이까지 급격히 증가하지만 그 이후에는 증가 속도가 줄어들어 결국 천천히 증가하게 되는 것을 볼 수 있다. 이는 자속 증가율의 경우와 같이 포화가 어느 정도 일어나면 자속이 증가하기 어려워지므로 증가 속도가 떨어지게 되어 자속이 천천히 증가하게 되기 때문이다. 시편의 두께에 따라 최대 자속의 양이 제한되고 자속이 증가하는 속도가 영향을 받기 때문에 그래프의 모양에서 차이를 보인다.

3.5 온도별 실험

마그네틱 센서는 배관에 접촉하여 사용하게 된다. 배관의 온도는 흐르는 유체에 의해 변할 수 있으며 현장 여건에 따라서 주변 온도도 변하게 된다. 따라서 마그네틱 센서는 온도가 항상 일정하지 않고 상황에 따라 변하게 된다. 마그네틱 센서의 권선은 온도에 따라 저항이 변하게 되고 배관도 온도에 따라 포화 특성이 변하게 된다. 따라서 마그네틱 센서를 이용한 진단 수행 시 온도 변화에 따른 실험 결과의 보정이 필요하다.

온도 보정에 대한 정보를 구하기 위하여 항온조를 이용한 온도 변화 실험을 수행하였다. 실험에는 두께 8mm, 폭 100mm, 길이 200mm의 시편을 사용하였다. 온도는 상온부터 150℃까지 10℃ 간격으로 변화 시켰다. 항온조에서 설정 한 온도에 도달한 후 충분한 시간을 두어 시편과 센서 모두 동일한 온도에 도달하도록 하였다.

실험은 약 1초 동안 전압이 천천히 증가할 때 측정되는 전류를 비교하였다. Fig. 11(a)는 온도별로 전류의 그래프를 함께 나타낸 것이다. 동일한 시편에서의 실험이지만 온도에 따라 전류가 다른 것을 확인할 수 있다. 이는 온도에 따라 코일의 저항이 바

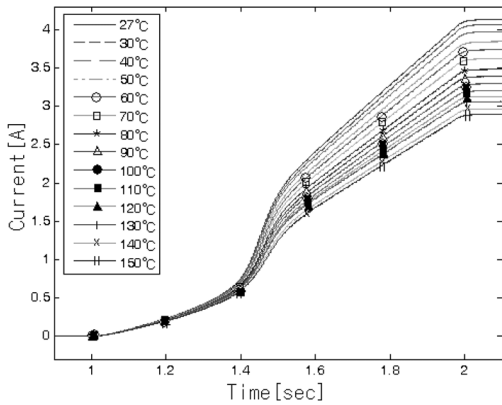


Fig. 11(a) Measured current, under various temperatures (before calibration)

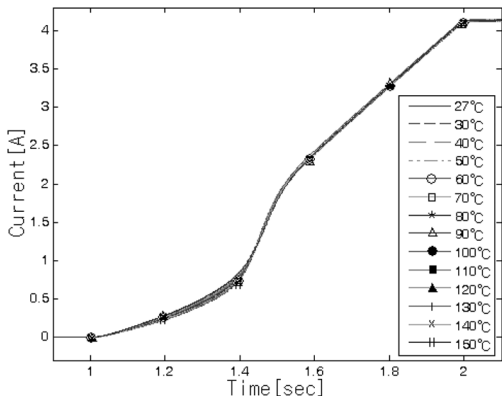


Fig. 11(b) Measured current, under various temperatures (after calibration)

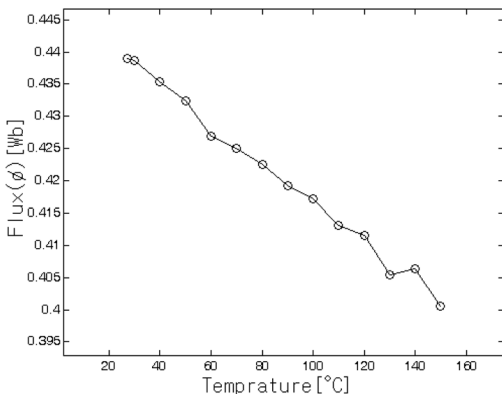


Fig. 12 Flux at maximum increase rate of flux, under various temperatures

꾸므로 전류의 크기가 크게 변하게 된 것이다.

Fig. 11(b)는 온도에 따라 변한 저항의 영향을 보

정한 전류 그래프이다. 실험별로 전압과 전류로부터 저항을 계산할 수 있으므로 상온에서의 저항과 비교하여 그 비율만큼 보정한 것이다. 온도 보정 전보다 실험간 경향 차이를 확실히 알 수 있다.

Fig. 12는 온도에 따른 자속 증가율 최대 시 자속을 나타낸 것이다. 온도 변화에 따라 자속 증가율 최대 시 자속이 선형적으로 변하는 것을 알 수 있다. 따라서 실험시 온도와 기준 시험시의 온도와 비교하면 보정된 결과를 얻을 수 있는데, 온도에 대한 정보는 직접 측정하지 않아도 저항의 변화로 예측이 가능하므로 실험 데이터 분석만으로 보정을 할 수 있다.

3.6 불확도 실험

불확도 평가를 위해서 여러 두께의 평판에 대하여 반복 실험을 수행하였다. 사용한 평판 시편은 두께가 1mm 간격으로 2~8mm 이며 폭과 길이는 각각 100mm, 200mm이며 각 시편에 대해서 30번씩 210번의 반복 실험을 수행하였다.

이때 수행된 모든 실험은 센서의 시편 접촉 부위의 불균일성과 온도 영향을 최소화하는 방법을 모두 고려하여 수행하였다.

각 실험별로 얻은 결과에 대하여 불확도 산출 공식에 의하여 그 값을 계산하였으며 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Value of Uncertainty

Thickness	Value
2~8mm	± 4.58% Reading

4. 결론

본 논문에서는 마그네틱 필드를 강판 시편에 발생시키면 시편 내부에 자속이 생성되어 포화되는 현상과 시편의 두께에 따라 포화되는 자속의 크기가 달라지는 현상을 이용하여 시편의 상태 변화를 감지하는 방법을 개발하였다. 위의 방법을 현장에 적용하기 위한 가능성을 타진하기 위해 두께가 다른 평판을 이용한 실험을 하였다. 실험 결과, 평판 두께에 따라 최대 자속의 양이 제한되고 이에 따라 자속이 증가하는 속도가 영향을 받았으며 연구를 통하여 개발한 마그네틱 센서를 이용하여 자속 발생 변화를 감지할 수 있었다. 이러한 마그네틱 필드를

이용한 두께 측정 방법은 2~8mm의 평판의 경우 실험을 통하여 4.58% 불확도를 가지고 있음을 확인하였다. 또한 온도의 변화에 따라 마그네틱 센서의 코일이 영향을 받아 흐르는 전류의 값이 달라지는데, 측정 데이터로부터 저항 변화를 계산하여 온도에 따라 값을 보정 할 수 있도록 방법론을 개발하였다.

위와 같이 본 연구를 통하여 마그네틱 필드를 이용한 두께 측정 방법의 현장 적용 가능성을 확인하였다. 또한 본 연구에서 개발하여 사용한 마그네틱 센서는 그 구조가 간단하여 만드는 비용이 적고, 상시로 장착하여 측정이 가능하다는 장점이 있기 때문에 발전소나 산업 현장에서 배관의 상태 변화를 감지하는데 더욱 효과적으로 사용할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Mi Na Kim, Jang Bom Chai, Il Han Park and E Nock Kim, 2010, "Study on the monitoring sensor for pipe degradation using magnetic field", *Proceedings of The Korea Society of Pressure Vessels and Piping*, pp. 127-128.
2. Young-Chul Choi, Jin-Ho Park, Doo-Byung Yoon, Chang-Ho Sohn and Il-Soon Hwang, 2006, "Monitoring Method for Pipe Thinning using Accelerometers", *Semiannual of The Korean Society for Noise and Vibration Engineering*.
3. Jin-Hyun Kim, Bong-Min Song, Dae-Hoon Lee and Joon-Hyun Lee, 2007, "Nondestructive Evaluation of Corrosion in Piping System Using Laser Based Ultrasound", *The Korean Society for Mechanical Engineers*, pp. 72-76.
4. Nathan Ida, 2003, "Engineering Electromagnetics", Springer.
5. G. R. Slemonm A. Straughen, 1982, "Electric Machines", Addison-Wesley publishing company.
6. David J. Griffiths., 2006, "Introduction to Electrodynamics", Prentice Hall.
7. William H. Hayt, 2006, "Engineering Electromagnetics", McGraw-Hill.
8. Robert L. Boylestad, 2004, "Essentials of circuit analysis", Prentice Hall.