

# 교차 코일을 이용한 자기자화 자왜 센서의 설계

## Design of Self-Magnetized Magnetostrictive Sensor Using Crossed-Coils

박경조\*†  
Kyung-Jo Park\*†

(Received 22 September 2020, Revision received 9 November 2020, Accepted 17 November 2020)

**Abstract :** This paper proposes an advanced technique for exciting and receiving the guided torsional wave to detect flaws in pipe systems. There are some difficulties in selecting and exciting of modes by using the nickel strip attached on pipe systems, such as qualification of residual magnetic field and multi-exciting of the unwanted modes, etc. In order to overcome these difficulties, we propose the new sensor, so-called crossed-coils sensor. We will prove that it is possible to select the modes to be excited and to find a optimal excitation condition for torsional mode by using the proposed sensor.

**Key Words :** Magnetostriction, Torsional mode, Crossed-coils, Guided wave, Pipe

### 1. 서 론

최근 구조물의 비파괴 평가 시 유도 초음파(guided wave)를 이용한 탐상기법이 널리 사용되고 있다. 일반적으로 유도 초음파 기법은 넓은 탐상범위를 가지므로 길이가 매우 긴 구조물을 효율적으로 검사할 수 있는 장점을 갖고 있다. 이러한 유도 초음파의 발생 및 측정을 위한 트랜스듀서로는 압전 트랜스듀서(piezoelectric transducer)가 널리 사용되나, 최근 들어 자왜 또는 자기변형 트랜스듀서(magnetostrictive transducer)를 이용한 예들이 자주 보고되고 있다.<sup>1,2)</sup> 자기변형 트랜스듀서는 측정대상과의 물리적인 접촉 없이 구조물에 진행하고 있는 탄성파를 측정할 수 있고, 상대적으로 큰 출력을 낼 수 있어 원거리탐상에 유리하

다. 또한 구조가 간단하기 때문에 비용이 저렴하여 경제적인 면에서도 장점을 가지고 있다.

MsSR-2020은 미국 Southwest 연구소(SwRI)에서 개발한 장비로서 일반적으로 유도초음파를 이용한 강제나 금속 구조물의 비파괴 검사에 사용된다.<sup>3)</sup> 이 장비의 특징은 커플란트(couplant)를 사용하지 않고 피검사체 전체로 유도파가 진행하게 되어 피검사체 전체를 하나의 리본 센서로 검사할 수 있다는 점이다. MsSR-2020의 원리는 니켈 스트립(nickel strip)을 이용하여 유도 비틀림 초음파를 보내고 받을 수 있는 구조이다. 니켈 스트립을 원주방향으로 부착시킨 후 영구자석 등을 이용하여 원주 방향으로 자화시키고, 니켈 스트립이 자화된 후 축 방향으로 자기장이 걸리도록 리본 센서에 교류전류를 흘려 니켈 스트립의 기계적

\*† 박경조(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-2957-3342>)  
교수, 전남대학교 기계설계공학부  
E-mail : [kjpark40@jnu.ac.kr](mailto:kjpark40@jnu.ac.kr), Tel : 061-659-7221

\*† Kyung-Jo Park(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-2957-3342>) : Professor, Department of Mechanical Design Engineering, Chonnam National University.  
E-mail : [kjpark40@jnu.ac.kr](mailto:kjpark40@jnu.ac.kr), Tel : 061-659-7221

변형을 일으켜 비틀림 초음파를 발생시킨다. 그러나 이 방식은 파이프의 둘레 방향으로의 니켈 스트립의 예자화(premagnetization)량과 축방향으로의 솔레노이드 내의 자기장의 세기가 적절하지 않으면 비틀림과 이외에 다른 유형의 파가 발생하는 문제점이 있다. 또한 니켈 스트립이 연질의 자성 재료이므로 긴 시간에 걸쳐 실험을 하는 데는 다시 예자화를 해야 하는 번거로움이 있다.

이런 문제점을 개선하기 위하여 이 연구에서는 이중 구조를 갖는 교차 코일을 제안한다. 교차 코일은 원주방향의 자기장을 생성하는 토로이달 코일(toroidal coil)과 축 방향의 자기장을 생성하는 솔레노이드 코일로 구성되어 있다. 이 코일의 특징은 코일의 위치 및 코일에 흐르는 전류의 크기를 적절히 조절함으로써 가진 출력의 방향과 크기를 정량화 할 수 있다는 점이다.

## 2. 자왜 현상의 모델링

1842년 Joules은 자기적 성질을 가진 물체에 전류를 흘렸을 때 자화방향으로 길이가 늘어나고 자화방향에 수직인 길이는 줄어드는 것을 발견하였는데, 자화에 대해 길이가 변하는 현상을 자왜(magnetostriction)라고 한다. 자화가 되기 전엔 자구(magnetic domain)의 모양도 일정하고 크기도 똑같이 방향성을 갖고 있지 않지만, 자화가 되기 시작하면 자구의 모양이 방향을 띠게 되면서 모양도 자화가 되는 방향으로 늘어나게 된다. 그런데 이 모양을 보면 자기장과 동일한 방향으로 확장되는 자구들과 자기장과 반대 방향으로 확장되는 자구들이 있다. 이런 자구들이 회전을 하여 자기장의 방향과 같아지는 최종적인 모양은 한 방향으로 배열되게 되는데, 이때의 모양을 자기 포화라 하며 전체적인 모양을 보면 약간의 길이가 늘어나 있음을 알게 된다. 이것이 자왜 현상이다.<sup>4)</sup>

자구의 크기 변화와 자기장 방향으로의 배열은 외부 에너지에 의해 일어나고, 이 변화는 탄성적인 변화에 기인한다. 자구가 원래 모양으로 되는 과정에서 에너지가 방출된다. Jiles-Atherton은 에

너지와 자구의 상관관계에 의해서 자성체의 히스테리시스를 분석하였다.

자왜 현상을 수학적으로 해석하기 위해서는 히스테리시스의 특성을 해석해야 한다. 히스테리시스를 해석하는 모델은 크게 현상적인 분포에 의해서 즉, 실험을 통하여 얻은 데이터를 통해서 해석하는 Preisach 모델과 물리학적으로 에너지 보존 법칙에 따른 자기에너지와 자기 모멘트의 관련식에 의해 히스테리시스의 관련 식을 유도하여 해석하는 Jiles-Atherton 모델 두 가지가 있다.<sup>5)</sup> Preisach 모델은 Jiles-Atherton 모델에 비해 정확하긴 하나, 시간이 많이 걸리는 단점이 있다. 그래서 빠른 분석을 위해 Jiles-Atherton 모델을 적용한다.

자구 내의 분자들이 열역학적 평형을 유지한다고 가정할 때 나타나는 각 자구의 자성 모멘트는 방향을 가지고 있고, 이것들의 배열은 온도의 함수를 이용하여 나타낼 수 있다.  $T$ 라는 온도에서 평균 모멘트는

$$M = \frac{\int_0^\pi M_s \cos\theta e^{-E_d(\theta)/k_B T} \sin\theta d\theta}{\int_0^\pi e^{-E_d(\theta)/k_B T} \sin\theta d\theta} \quad (1)$$

로 표현할 수 있다. 여기서  $\theta$ 는 자성 모멘트의 방향을 나타내며,  $k_B$ 는 Boltzman 상수를 나타내고 온도의 단위는 켈빈(Kelvin)이다.  $E_d(\theta)$ 는 다른 자구와의 상호 작용 및 외부 자기장  $H$ 에 기인하는 자구의 에너지로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_d(\theta) = -\mu_0 m H_e \cos\theta \quad (2)$$

여기서  $\mu_0$ 는 진공에서의 투자율,  $m$ 은 자구의 자화 모멘트,  $H_e$ 는 자기장을 나타내는데, 이는 외부의 자기장과 내부 자구에 의한 자기장의 합이며 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_e = H + \alpha M \quad (3)$$

여기서  $\alpha$ 는 평균자기장 파라미터이고, 식 (1)의 적분형은

$$M = M_S [\coth(H_c/a) - a/H_c] \equiv M_a \quad (4)$$

로 나타내며, 여기서  $a = \frac{Nk_B T}{\mu_0 M_S}$  이고,  $N$ 은 단위 부피당 자구를 의미한다. 식 (4)의 자기장 모멘트를 이용하여 교차코일에 의한 자기장의 분포를 예측할 수 있다. 지금까지 서술된 반 히스테리시스 특성은 외부 자기장에서 자구의 크기는 변함이 없고, 자화의 방향만 회전하는 상태이다. 자구의 회전은 완벽한 가역변화로서 히스테리시스를 고려하지 않는다.

### 3. 교차 코일의 자기장 분포

교차 코일에 의한 자기장의 분포 및 방향을 확인하기 위해서 Ansys(v. 13)를 이용하여 3차원 해석을 수행하였다. Fig. 1에 교차 코일의 구조를 나타내었다. 그림에서 교차 코일은 원주방향의 자기장을 생성하는 토로이달 코일과 축 방향의 자기장을 생성하는 솔레노이드 코일로 구성되어 있다. 솔레노이드 코일은 배관의 축 방향으로 자기장을

생성할 수 있는 방향으로 감겨져 있다. 토로이달 코일은 균등하게 분포하며 니켈 스트립을 중심으로 감겨져 있다. 강자성체(ferromagnetic material)에 축방향이나 원주방향으로 유도기전력이 가해지면 비더만 효과(Wiedemann effect)에 의해 비틀림 파동이 발생한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 따라서 교차코일을 이용하여 배관에 비틀림 유도파를 발생시킬 수 있음을 확인할 수 있다.<sup>6)</sup>

유한요소모델은 1,350,277개를 사용하여 모델링하였는데 이 중 110,400개 요소는 스트립을 모델링하기 위해, 192개 요소는 토로이달 코일을 모델링하기 위해 사용하였고 1개의 요소를 사용하여 솔레노이드 코일을 모델링하였다. 스트립의 상대 투자율(relative permeability)은 상자성(paramagnetic) 재료인 코발트의 투자율 250을 사용하였다. 솔레노이드 코일에 가해지는 입력전류는 16 A로 고정하고, 토로이달 코일에 인가되는 전류를 0에서 1.2 A까지 0.1 A씩 증가시키면서 자기장의 분포를 확인하였다.

토로이달 코일에 인가되는 입력 전류가 0 A일 때 나타나는 교차코일의 자기장 분포를 Fig. 2(a)에 나타내었다. 자기장의 분포는 축방향으로만 나타나는데, 이는 토로이달 코일에 가해지는 전류가 없기 때문에 나타나는 당연한 결과이다. 자기장의

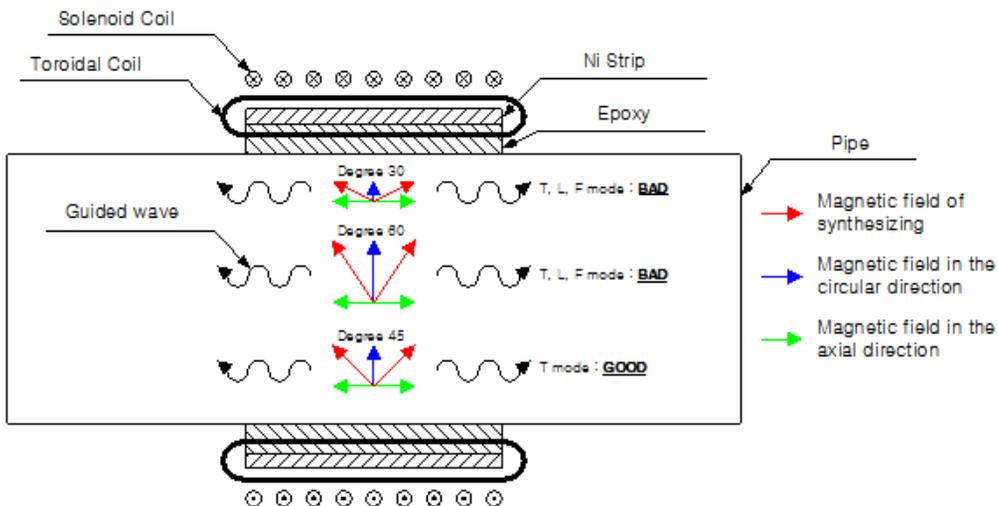
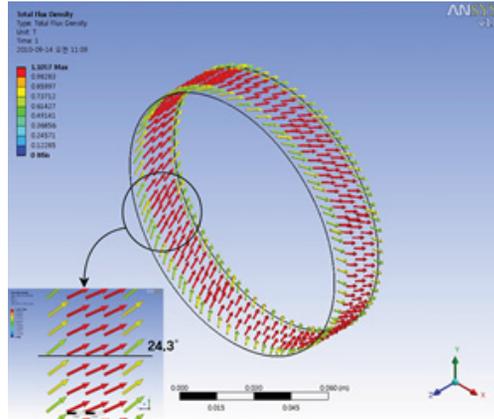


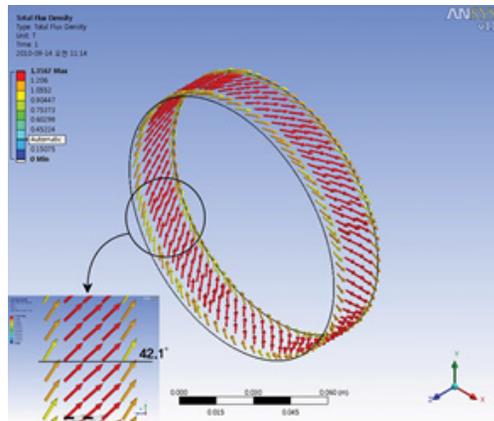
Fig. 1 Configuration of the proposed crossed--coils

자속 밀도(flux density)는 1.0087 T(Tesla)로 계산된다. 토로이달 코일에 가해지는 입력 전류가 증가하면 자기장의 크기와 방향이 변하기 시작하는데, 이는 토로이달 코일에 가해지는 전류가 0.4, 0.8 A 일 때의 결과인 Fig. 2(b)와 (c)에서 확인할 수 있다. 그림에서 입력 전류가 증가할수록 원주방향의 자기장 성분이 커지는 것을 알 수 있다. 입력 전류가 0.4 A일 때 자기장의 방향이 축방향과 이루는 각도는 24.3°, 0.8 A일 때 자기장의 방향이 축방향과 이루는 각도는 42.1°이다. 자속 밀도도 크기가 1.105, 1.3567 T로 증가하였다.

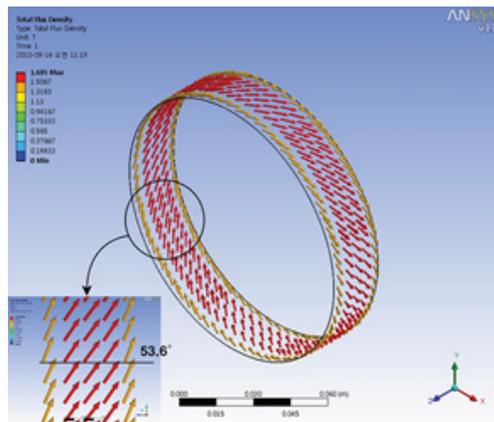
솔레노이드 코일과 토로이달 코일을 흐르는 두 전류의 벡터 합에 의해 최종 자기장이 형성되기 때문에 전류의 크기가 달라지면 자기장의 방향도 변한다는 것을 쉽게 알 수 있다. 해석 결과에서 입력 전류가 0.8 A일 때 축방향과 이루는 각도가 42.1°이었는데, 이는 비틀림파를 가진하는데 가장 이상적인 각도라고 알려진 45°에 매우 근접한 각도이다. 그러나 Fig. 2(d)에서 보듯이 전류가 1.2 A로 더 증가하면 축방향과 이루는 각도가 53.6°가 되어 이상적인 비틀림파를 가진하기가 더 어려워진다는 사실을 알 수 있다. 즉 토로이달 코일에 인가되는 전류를 조절하면 교차코일의 자기장 방향을 조절할 수 있으며, 최적의 입력 전류는 0.8~1.0 A 사이에 존재한다는 사실을 알 수 있다.



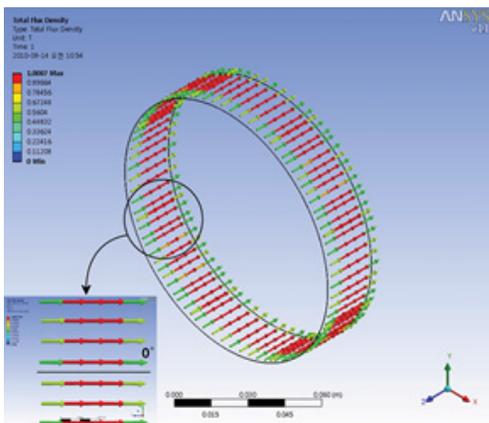
(b) Input current is 0.4 A



(c) Input current is 0.8 A



(d) Input current is 1.2 A



(a) Input current is 0 A

Fig. 2 Distribution of the flux density as the input current to toroidal coil increases

## 4. 배관 결함 반사 신호

### 4.1 실험장치 및 실험방법

제안된 교차코일을 이용한 배관의 비틀림과 가진장치의 유효성을 입증하기 위해 실험을 수행하였다. 이 연구에서 사용된 배관의 규격은 외경 80 mm, 두께 3.65 mm, 길이 2 m인 강관이다. 교차 코일의 결함검출 능력을 검증하기 위해 배관에 교차 코일로부터 1 m 지점에 크기 9 mm인 원주방향 인공 결함을 가공하였다.

배관에 비틀림파를 송수신하여 결함을 검출하기 위한 시스템은 Fig. 3과 같다. MsSR-2020을 사용하여 솔레노이드 코일에 신호를 송신하면 교류 자기장이 생성되고, 전원장치를 이용하여 일정한 바이어스 전류를 가하면 원주방향으로 일정한 자기장이 생성된다. 솔레노이드 코일과 토로이달 코일에서 발생된 각각의 자기장은 중첩의 원리가 적용되어 일정한 각도를 가지는 자기장이 되고 이 자기장이 니켈스트립에 가해져 자왜현상을 발생시킨다. 이로 인해 강관에 비틀림파가 발생하게 되고 발생된 비틀림파는 축 방향을 따라서 진행하며, 결함이나 종단면에서 반사하고 교차 코일을 통과하게 되면 역자왜현상을 일으키게 된다. 이로 인해 코일에는 유도 자기장이 발생하고 그 때문에 기전력이 유도된다.

이 연구에서 사용된 니켈스트립은 원주방향의 자기장을 생성하는 토로이달 코일이 약 1000회 감겨 있으며, 폭 25 mm, 길이 280 mm, 두께 0.15 mm이다. 니켈스트립에서 발생하는 비틀림 파가

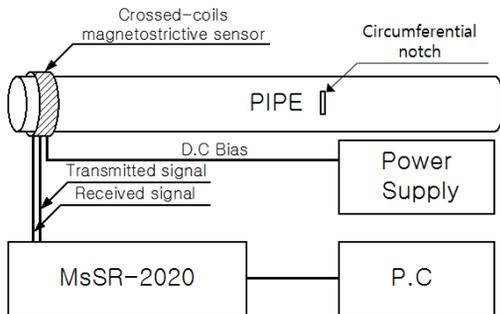


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup



Fig. 4 Toroidal coil wound around the nickel strip attached to the pipe

강관에 원활하게 전달될 수 있도록 많은 양의 에폭시를 사용하여 강관에 고정하였다(Fig. 4 참조). 실험에 사용된 신호의 주파수는 128 kHz이고 정현파이며 3 cycle을 가진다.

### 4.2 실험결과

먼저 예자화 방법으로 배관의 결함을 검출한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 파이프 종단면의 전압은 1.35 V이고 결함부분의 전압은 0.41 V이다. 결함까지 거리를 계산하는 공식은 다음과 같다.

$$d = c \times \frac{\Delta t}{2} \quad (5)$$

여기서  $c$ 는 비틀림파의 속도이며  $\Delta t$ 는 비틀림파의 진행시간이다. 대상 강관의 비틀림파 속도는 3250 m/s이고 결함까지의 왕복시간이 645  $\mu$ s이므로 식 (5)에 대입하여 거리를 계산하면 1.04 m이다. 실제 결함까지의 거리는 1 m이므로 4.6%의 오차를 갖는다는 것을 알 수 있다.

교차 코일의 유용성을 확인하기 위해 같은 강관에 교차 코일을 부착하고 예자화와 동일한 실험을 수행하였다. 토로이달 코일의 전류를 0 A에서 2.5 A까지 0.1 A씩 증가시킬 때, 결함에서 반사된 신호의 파형을 Fig. 6에 나타내었다.

각각의 토로이달 코일의 입력전류에서 나타나는 결함 및 종단면의 유도전압을 Table 1에 나타내었다. 또한 각각의 토로이달 코일의 입력전류에서 나타나는 결함까지의 왕복시간 및 이에 따른 계산거리와 오차를 Table 2에 나타내었다.

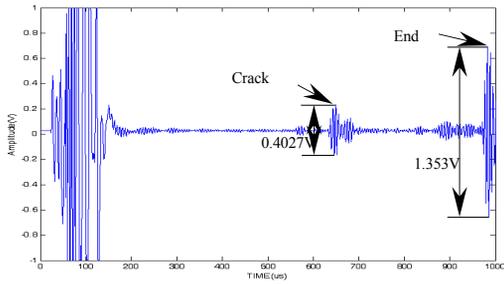
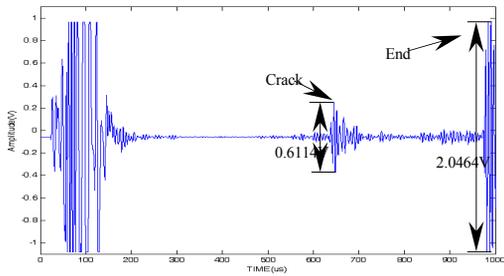
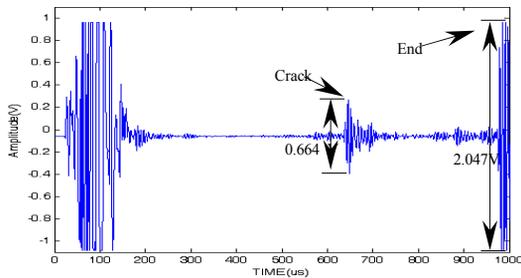


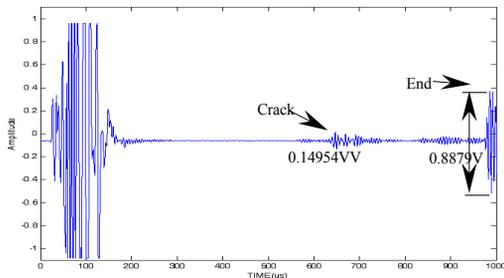
Fig. 5 Crack detection using pre-magnetization



(a) input current is 0.5 A



(b) input current is 1 A



(c) input current is 2.5 A

Fig. 6 Crack detection using crossed-coils as the input current to toroidal coil increases

토로이달 코일의 입력전류가 0.5~1 A일 경우 결함의 유도전압과 종단면의 유도전압이 각각 51.8~64.9%와 51.2%가 상승하였다. 그리고 0 A와 2.5 A의 입력전류를 가질 경우는 결함 및 종단면의 유도전압이 각각 89.4%, 88.5%, 62.9%, 34.3% 강하한 것으로 나타났다. 또한 0 A의 오차는 다른 입력전류를 가지는 파형의 오차 4.59%~4.89%보다 상대적으로 높은 7.59%를 나타낸 것으로 보아 비틀림 유도파와 함께 다른 모드가 가진 된 것으로 판단되었다.<sup>7,8)</sup> 즉, 0.5~1A사이의 전류가 토로이달 코일에 입력될 경우 비틀림 유도파가 최적으로 가진됨을 알 수 있다. 또한 위와 같은 최적조건으로 가진된 비틀림 유도파는 장거리를 전파할 가능성이 높은 것을 알 수 있다. T(0, 1) 모드의 전파시간은 모든 전류에서 비슷한 값을 나타내고 있으며, 이를 식 (5)에 대입하면 결함의 위치를 정확하게 계산할 수 있음을 알 수 있다.

Table 1 Voltage drop due to cracks and pipe end

| Current (Amp.) | Voltage drop due to crack(V) | Voltage drop due to pipe end(V) |
|----------------|------------------------------|---------------------------------|
| Pre-mag.       | 0.4027                       | 1.3530                          |
| 0 A            | 0.0427                       | 0.1551                          |
| 0.5 A          | 0.6114                       | 2.0464                          |
| 0.7 A          | 0.6086                       | 2.0467                          |
| 1 A            | 0.6640                       | 2.0470                          |
| 2.5 A          | 0.1495                       | 0.8879                          |

Table 2 Estimation error for crack position

| Current (Amp.) | Traveling time of T(0,1)( $\mu$ s) | Estimated position of crack(m) | Error (%) |
|----------------|------------------------------------|--------------------------------|-----------|
| Pre-mag.       | 645                                | 1.048                          | 4.59      |
| 0 A            | 666                                | 1.082                          | 7.59      |
| 0.5 A          | 645                                | 1.048                          | 4.59      |
| 0.7 A          | 646                                | 1.049                          | 4.74      |
| 1 A            | 646                                | 1.049                          | 4.74      |
| 2.5 A          | 647                                | 1.051                          | 4.89      |

## 5. 결 론

이 연구에서는 원통형 배관의 결함검출을 위한 최적의 비틀림 T(0,1) 모드를 발생 및 수신할 수 있는 자왜센서를 설계하는 방법을 제안하고 실험을 통해 이를 입증하였다.

시뮬레이션 결과를 통해 솔레노이드 코일과 토로이달 코일에 전달되는 전류의 양을 조절함으로써, 가진되는 유도 초음파의 크기와 방향을 조절할 수 있음을 확인하였다. 또한 강관에 대한 결함검출 실험을 통해 원주방향 자기장을 형성하는 토로이달 코일과 축방향 자기장을 형성하는 솔레노이드 코일로 구성된 교차 코일을 사용하면 비틀림 유도파를 장거리로 보내면서도 작은 크기의 결함도 정확하게 검출할 수 있음을 확인하였다.

## References

1. P. Cawley, M. Lowe, D. Alleyne and P. Wilcox, 2003, "Practical long range guided waves testing: Application to pipe and rail", *Material Evaluation*, Vol. 61, No. 1, pp. 66-74.
2. Y. W. Kim and K. J. Park, 2016, "Detection of axial defects in pipes using chirplet transform", *Journal of The Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 26-31. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2016.20.4.026>)
3. H. Kwun, 2002, Method and apparatus generating and detecting torsional wave inspection of pipes or tubes, US Patent, No. US 6429560 B1.
4. D. C. Jiles and D. L. Atherton, 1986, "Theory of ferromagnetic hysteresis", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 61, No. 2, pp. 48-60. (<https://doi.org/10.1063/1.333582>)
5. M. J. Sabik and D. C. Jiles, 1993, "Coupled magneto-elastic theory of magnetic and magnetostrictive hysteresis", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 29, No. 5, pp. 2113-2123. (<https://doi.org/10.1109/20.221036>)
6. A. Vinogradov, 2009, Method and system for the generation of torsional guided waves using a ferromagnetic strip sensor, US Patent, No. US 7573261 B1.
7. C. Y. Kim and K. J. Park, 2015, "Mode separation and characterization of torsional guided wave signals reflected from defects using chirplet transform", *NDT & E International*, Vol. 74, No. 1, pp. 15-23. (<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2015.04.006>)
8. F. Yang, L. Jiang, W. Zhang and H. Ma, 2016, "Experimental and numerical studies of the oblique defects in the pipes using a chaotic oscillator based on ultrasonic guided waves", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 347, No. 4, pp. 218-231. (<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.02.014>)