

자왜 스트립 도파변환기에서 스트립의 자기적 특성이 변환기 감도에 미치는 영향

Magnetic Property Effects of the Strip on Transducer Sensitivity in a Magnetostrictive Strip Type Guided Wave Transducer

김성준*, 최명선*†

Sung-Joon Kim* and Myoung-Seon Choi*†

초 록 파이프라인의 원거리 초음파검사를 위한 자왜 스트립형의 비틀림 모드 도파 변환기에 널리 사용되는 니켈 스트립과 철 코발트합금 스트립의 자기이력곡선을 측정하고 스트립의 자기적 특성이 변환기의 감도에 미치는 영향을 분석하였다. 최적화된 철 코발트합금 변환기의 감도는 니켈 변환기의 그것보다 약 30 배 정도로 우수하였다. 이는 두 자왜물질의 잔류자화 및 보자력의 차이에 주로 기인함이 밝혀졌다.

주요용어: 원거리 초음파검사, 도파, 비틀림 모드, 자왜스트립, 잔류자화

Abstract Magnetic hysteresis loops of a nickel strip and a Fe-Co alloy strip, which have been used in magnetostrictive strip type guided wave transducers for long range ultrasonic testing of pipelines, were measured and then magnetic property effects of a strip on transducer sensitivity were analyzed. The sensitivity of an optimized Fe-Co strip transducer was superior to that of the nickel strip transducer by a factor of about 30. It was shown that this was mainly attributed to the differences in remanence magnetization and coercivity of the two magnetostrictive materials.

Keywords: Long Range Ultrasonic Testing, Guided Wave, Torsional Mode, Magnetostrictive Strip, Remanence

1. 서론

산업시설물들은 운전연수가 증가함에 따라 부식, 마모, 균열 등의 결함들로 인해 심각한 사고가 발생할 수 있다. 따라서 시설물의 손상 없이 결함을 탐지하고 평가할 수 있는 다양한 비파괴검사기술이 개발되어 왔다. 그 중에서도 초음파검사기술은 우수한 결함탐지능력을 가지고 있어 그 이용이 증가되고 있는 추세이다. 특히 원자력발전소, 석유화학 플랜트, 그리고 도시가스시설들은 판, 봉, 튜브, 배관과 같은 구조물을 많이 포함하고 있다. 이러한

구조물들의 원거리초음파검사를 위해 최근 도파기술에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

도파검사기술은 구조물 전체를 보다 경제적으로 검사할 필요가 있을 때 적합하다. 배관과 같은 실린더 형태의 구조물의 검사를 위해서는 그 전파속도가 주파수에 따라 변하지 않아, 즉 분산(dispersion) 특성이 없어, 해석이 용이한 신호들을 제공하는 기본비틀림(fundamental torsional, T(0,1)) 모드가 가장 유리한 것으로 알려져 왔다[1-4]. 이 도파 모드의 효율적인 발생과 탐지를 위해 스트립 형태의 자왜변환기(magnetostrictive transducer)가

1990년대 초반부터 미국 Southwest Research Institute의 주도로 개발되어왔다[5]. 이 변환기는 구조물의 원주를 따라 접착되는 니켈 또는 철 코발트합금과 같은 우수한 자왜특성을 갖는 얇은 스트립과 이 스트립/구조물 부위를 감싸며 도파의 송/수신을 담당하는 하나의 RF 코일로 구성된다. Wiedermann효과[11]에 의존하는 이 변환기의 운영을 위해서는 스트립 길이방향의 바이어스 정자기장(bias static magnetic field)이 요구된다. 대부분의 실제 검사에서는 주로 포화자화 후의 잔류자화가 바이어스 자기장으로 이용된다. 로렌츠 전자기음향 변환기 혹은 압전변환기에 비해, 자왜스트립변환기는 구조물과의 면접촉이 용이하여 단일모드 운영이 가능하다는 장점을 갖는다[6-10]. 이들 자왜스트립 변환기는 스트립 재질에 따라 그 감도가 현저한 차이를 보이고 있으나 아직 그 원인이 명확히 아직 밝혀지지 않고 있다. 본 연구에서는 자왜스트립 도파변환기에 널리 사용되고 있는 니켈 스트립과 철 코발트합금 스트립의 자기이력곡선을 측정하고 잔류자화, 보자력 등의 자기적 특성이 변환기감도에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험 방법

Table 1에 나타낸 두 종류의 자왜스트립이 금번 실험에 사용되었다. 스트립 A는 영국 Good Fellow 사가 제공한 0.125 mm 두께의 니켈 201이었고 스트립 B는 미국 Carpenter Technology 사가 제공한, 하이퍼코 50HS로 불리는, 0.1 mm 두께의 철(48%), 코발트(48%), 바나듐(2%) 합금이였다. 스트립 제조과정에서 발생하는 응력의 제거와 우수한 자기적 성질들을 얻기 위한 열처리는 각 스트립의 제조 회사에서 수행되었다.

미국 Lake Shore 사의 VSM(vibrating sample magnetometer, model 662)을 이용하여 자왜스트립의 자기이력곡선을 측정하였다. 이 측정에서 사용된 시편들은 다이아몬드 와이어 톱을 사용하여 스트립

Table 1 Material list of magnetostrictive strips used in experiment

Sample	Material	Brand (Marker)	Thickness (mm)
A	Nickel	Ni 201 (Good Fellow)	0.125
B	Iron-cobalt alloy	HyperCo 50HS (Carpenter)	0.100

을 Fig. 1과 같이 절단함으로써 만들어졌다. 모든 시편의 폭 h 와 길이 w 는 각각 2 mm와 5 mm이었다. 시편의 두께 t 는 스트립의 두께이었고 시편의 길이방향은 스트립의 그것과 같았다. 외부자기장 H 는 시편의 길이방향으로 가해졌다. 니켈 시편과 철 코발트합금 시편에 가해진 외부자기장의 최대크기는 1500 Oe 이었다.

Fig. 2는 자왜스트립 T(0,1)모드 도파 변환기의 감도측정을 위한 펄스 에코 실험장치를 도식적으로 보여준다. 펄스/리시버 시스템은 미국 Southwest Research Institute의 MsSR 2020D이었고 시편은 길이 3 m, 내경 50 mm, 두께 5 mm인 탄소강 파이프였다. 이 파이프 시편은 그 한쪽 끝으로부터 0.5 m 위치에 파이프 단면적의 10%에 해당되는 크기의 인공결함을 포함하고 있다. 파이프에 접착된 자왜스트립과 이 스트립/파이프 부위를 감싸는 솔레노이드 형태의 RF 코일로 구성되는 도파변환기를 파이프 시편의 다른 한 끝으로부터 1 m 위치에 설치하였다. 스트립의 폭은 12 mm이었고 RF

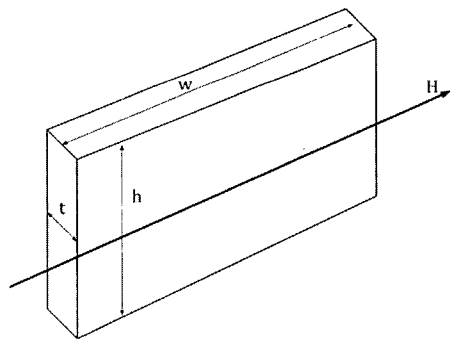


Fig. 1 Geometry of the samples used for measurement of magnetic hysteresis loop

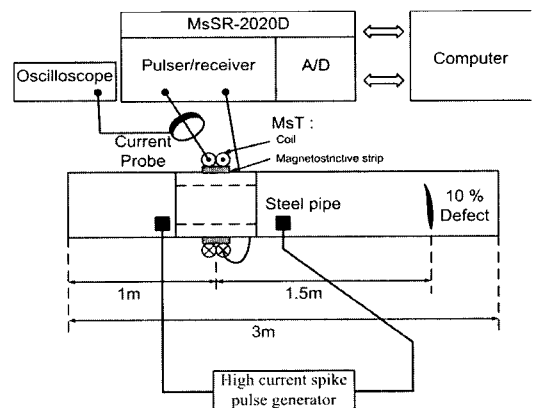


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

코일은 직경이 0.2 mm인 에나멜동선을 사용하여 권선수가 40이 되도록 만들어졌다. 도파발생과정에서 RF 코일에 흐르는 전류(즉, 송신전류)펄스를 측정할 수 있는 프로브(Pearson Current Monitor 110)와 스트립길이방향으로의 자화를 위해 파이프 길이방향으로 큰 전류(즉, 바이어스 전류)펄스를 가할 수 있는 고전류발생기가 또한 설치되었다. 바이어스전류펄스를 1 2회 가한 후 자왜스트립 내에 형성되는 잔류자화가 T(0,1)모드 도파 변환기의 운영을 위해 요구되는 스트립길이(즉, 파이프 원주방향) 방향으로의 바이어스 정자기장으로 이용되었다. 고전류발생기와 연결되는 파이프 위에서의 두 도선 사이의 거리는 약 300 mm 이었다. 출력전압펄스의 진폭을 조정하는 단자들을 제외한 MsSR 2020D 시스템의 모든 단자들은 금번 실험에서 다음과 같이 고정되었다: 전압펄스의 파형 = 싸인 곡선, 중심주파수 = 128 kHz, 사이클 수 = 1, 리시버 증폭이득 = 40 dB, 필터 중심주파수 = 128 kHz. 파이프 시편에서 T(0,1)모드 도파의 전파속도는 약 3070 m/s 이었고 자왜스트립의 폭 12 mm는 128 kHz에서 이 도파의 1/2파장에 해당된다.

실험절차는 다음과 같았다: (1) 니켈스트립 변환기를 파이프에 설치한 후, 송신전류진폭이 0.8 A가 되도록 MsSR 2020D 전압펄서의 출력진폭을 조정하였다. (2) 파이프를 따라 1.0 kA 진폭의 바이어스 전류펄스를 1 2회 흘린 후, MsSR 2020D 리시버에 의해 탐지된 신호들을 컴퓨터에 저장하였다. (3) 바이어스전류진폭을 2.7 kA, 4.5 kA, 5.9 kA, 7.3 kA로 증가시키면서 도파신호를 수집 및 저장하였다. (4) RF 코일에서의 송신전류진폭이 0.1 A가 되도록 MsSR 2020D 전압펄서의 출력진폭을 조정하였다. (5) 파이프를 따라 7.3 kA의 바이어스전류펄스를 1 2회 흘린 후 도파신호를 수집 및 저장하였다. (6) 송신전류진폭을 0.2 A, 0.4 A, 0.8 A, 1.6 A, 2.7 A, 4.5 A, 5.4 A로 증가시키면서 과정 (5)를 반복하였다. (7) 니켈스트립을 철-코발트합금 스트립으로 대체한 후 위의 모든 과정을 반복하였다.

3. 결과 및 논의

3.1. 자왜 스트립의 자기적 특성

Fig. 3은 철-코발트합금 재료의 시편 B에 대해 측정된 자기이력곡선을 보여준다. 측정된 데이터는

제조사가 제공하는 데이터와 큰 차이가 있었다. 이는 측정과정에서 외부자기장의 반대방향으로 발생하는 자기소거장에 기인함이 밝혀졌다. Fig. 1에 나타난 기하를 갖는 시편에서 이 자기소거장의 크기 (H_d)는 다음 식과 표현될 수 있음이 알려져 왔다 [12]: $H_d = 4\pi MN$, 여기서

$$N = \frac{2t}{\pi w} \sqrt{\frac{2h}{w}}$$

이고 M은 시편 내에서의 자화(magnetization)를 나타낸다. 시편의 길이에 대한 두께 혹은 폭의 비 (t/w 혹은 h/w)가 충분히 작지 않을 때 자기소거장 효과가 중요함을 알 수 있다. 이 효과를 고려하여 수정된 자기이력곡선은 제조사가 제공하는 데이터와 매우 유사하였다. 니켈 201 재료의 시편 A의 경우에도 자기소거장 효과는 상당히 컸다. Fig. 4는 이 효과를 고려하여 수정된 니켈스트립의 자기이력곡선을 보여준다.

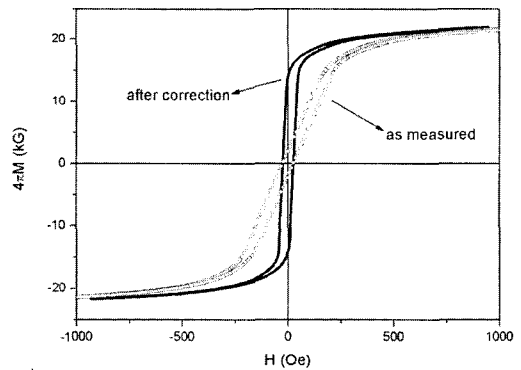


Fig. 3 Comparison between as measured hysteresis loop and the loop after correction for the demagnetization effect on the sample B

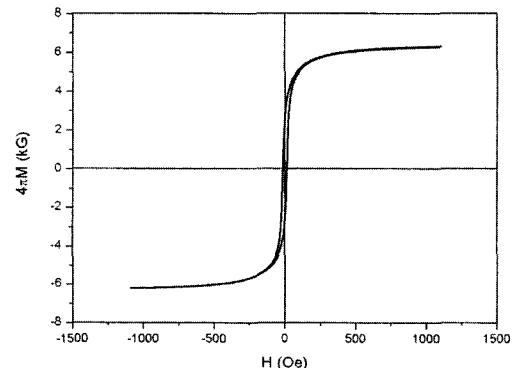


Fig. 4 Hysteresis loop for the sample A

Table 2는 두 시편의 자기이력곡선으로부터 측정된 포화자화($4\pi M_{Max}$), 잔류자화($4\pi M_R$), 보자력(H_C) 그리고 잔류자화 근처에서의 상대투자율(μ/μ_0)을 나타낸다. 철-코발트합금 시편이 니켈 시편보다 훨씬 큰 값의 자기적 특성들을 갖는다는 것을 알 수 있다. 특히, 비틀림모드 도파 변환기에서 바이어스자기장으로 사용되며 변환기 성능에 매우 중요한 영향을 미치는 잔류자화의 크기는 약 5배 정도의 큰 차이를 보이고 있다.

Table 2 Measured magnetic properties of the samples

Sample	$4\pi M_{Max}$ (kG)	$4\pi M_R$ (kG)	H_C	μ/μ_0
A	6.3	2.8	14	90
B	22	14	25	150

3.2. T(0,1)모드 도파신호 측정

Fig. 5는 펄스-에코 실험에서 측정된 비틀림모드 도파 신호들의 전형적인 예를 보여준다. 신호 1과 2는 파이프의 양쪽 끝으로부터의 반사에, 신호 3은

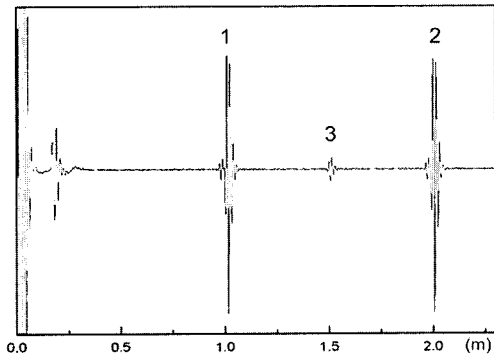


Fig. 5 A typical example of T(0,1) mode ultrasonic guided wave signals

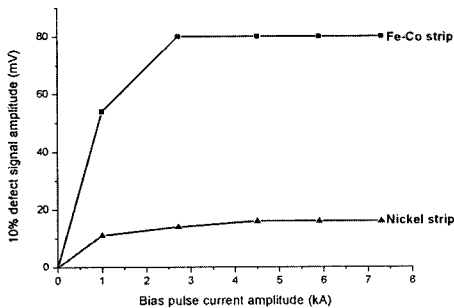
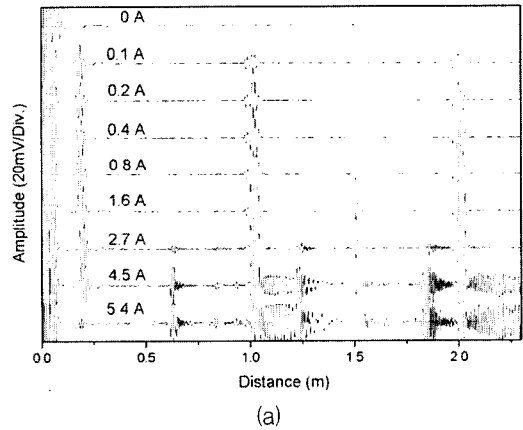


Fig. 6 Variation of the 10 % defect signal amplitudes with bias currents

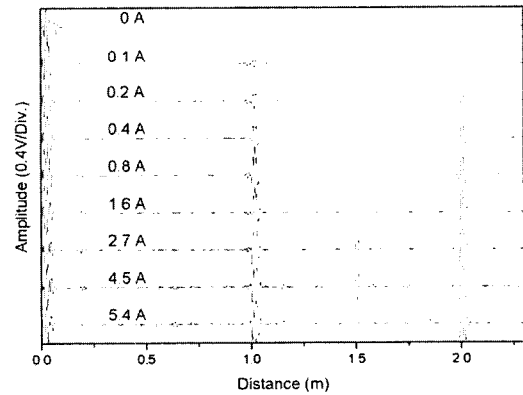
인공결함으로부터의 반사에 기인된다.

Fig. 6은, RF 코일에서의 송신전류진폭이 0.8 A 일 때, 바이어스전류진폭에 따른 신호 3의 진폭변화를 보여준다. 두 변환기의 감도는 바이어스전류와 함께 급격히 증가하다가 곧 포화됨을 알 수 있다. 이는 스트립 내에서의 잔류자화의 크기변화에 주로 기인하는 것으로 추측된다. 이는 변환기의 감도가 스트립 내에서의 잔류자화의 크기에 비례한다는 것을 암시한다. 철-코발트합금 변환기의 포화감도가 니켈 변환기의 그것보다 4배 정도 크다. 이 또한 Table 2에 나타내었던 두 재료의 잔류자화의 차이에 주로 기인하는 것으로 생각된다.

Fig. 7(a)와 (b)는 각각 니켈 스트립과 철-코발트합금 스트립이 포화자화 후의 잔류자화 상태에 있을 때 RF 코일에서의 송신전류진폭에 따른 도파신호의 변화를 보여준다. 송신전류진폭이 증가함에 따라 도파신호들의 크기도 대체로 증가한다. 그러



(a)



(b)

Fig. 7 Variation of guided wave signals with AC currents in the RF coil for (a) nickel strip and (b) Fe-Co strip transducers

나 니켈스트립 변환기의 경우, 2.7 A 이상의 교류 전류를 가할 때 0.6 m, 1.2 m, 1.8 m 위치에 다른 신호들이 관측된다. 이들은 교류자기장의 세기가 증가함에 따라 스트립 길이방향의 잔류자화를 형성하는 자구(magnetic domain)들의 일부가 교류자기장에 의해 스트립 폭방향으로 재배열하게 되어 발생하는 종(longitudinal) 모드들에 기인하는 것으로 보여진다. 따라서 니켈스트립변환기가 T(0,1) 모드만을 송수신하도록 하기 위해서는 교류전류의 진폭을 1.6 A 이하로 제한해야 한다. 철-코발트합금 스트립 변환기의 경우에는 큰 교류전류펄스가 가해져도 종모드 신호들이 발생하지 않았다. 이는 철-코발트 스트립의 보자력이 니켈스트립에 비해 2배 정도 컸었기 때문인 것으로 생각된다. 다만 2.7 A 이상의 교류전류에 대해서는 주기적인 작은 신호들이 관측된다. 파이프의 원주길이와 거의 같은 이 주기로부터 이들은 T(0,1) 모드와 같은 속도를 갖고 파이프의 원주방향으로 진행되는 기본수평형파(SH₀) 모드에 기인한 것임을 알 수 있다. 이 수평형파는 스트립이 그 폭방향으로 공진할 때 스트립의 양끝 부위에서 주로 발생하는 것으로 추측된다. 스트립의 폭을 1/2파장길이로부터 약간 벗어나게 함으로써 스트립 공진에 기인한 주기적인 신호들이 발생을 크게 줄일 수 있었지만 이에 대한 보다 자세한 설명은 본 연구의 주제를 벗어나므로 다른 곳에서 제공될 것이다. 사실 니켈스트립 변환기도 이 수평형파를 발생시켰지만 그 감도가 매우 낮아 쉽게 관측되지 않았을 뿐이다.

Fig. 8은 인공결함에 대한 두 변환기의 감도를 RF 코일에서의 송신전류의 진폭의 함수로 보여준다. 니켈스트립 변환기의 감도는 전류진폭이 1.6 A

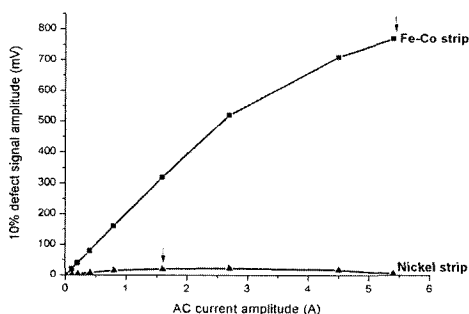


Fig. 8 Sensitivity variation of the two transducers for the 10 % defect as a function of AC current amplitude

일 때 최대값을 갖는다. 전류진폭의 증가와 함께, 철-코발트합금스트립 변환기의 감도도 증가하지만 그 증가율은 감소한다. 화살표로 표시된 두 지점에서의 감도를 비교하면, 두 변환기의 최대감도 차는 약 30배 정도임을 알 수 있다.

4. 결론

원거리초음파검사를 위한 자왜스트립 도파변환기에 널리 사용되는 니켈 스트립과 철-코발트합금 스트립의 자기이력곡선을 VSM을 이용하여 측정하였다. 정확한 자기이력곡선은 측정과정에서 외부자기장의 반대방향으로 발생하는 자기소거효과를 고려하여 측정결과를 수정함으로써 얻어질 수 있었다. 실제검사 상황에서도 자기소거효과가 발생하므로 요구되는 세기의 동자기장을 발생시키기 위해서는 자기이력곡선에 따른 예측보다 훨씬 큰 송신전류를 RF 코일에 가해야 한다는 것을 알 수 있다.

T(0,1)모드 도파의 송/수신을 위해 요구되는 바이어스 정자기장으로 스트립길이방향의 잔류자화를 사용할 때, 변환기의 감도는 잔류자화 혹은 동자기장의 크기와 함께 비례적으로 증가한다. 그러나 종모드의 발생을 방지하기 위해 동자기장의 크기는 잔류자화보다 훨씬 작도록 제한되어야 한다. 스트립 재질의 보자력이 작을수록 이 제한은 심각해진다.

본 논문에서는 상온에서 자왜스트립 변환기의 감도에 대해서 조사하였다. 차세대원전 배관계통의 상시 감시 및 진단을 위해서는 고온(약 500 °C)에서 사용될 수 있는 자왜스트립 변환기에 대한 연구가 필요한 시점인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력중장기연구개발사업 “원전배관손상 비파괴진단 신기술개발”과제의 연구비지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] H. Kwun, S. Y. Kim and G. Light, "Long range guided wave inspection of structures using the magnetostrictive sensor," J.

- Korean Soc. NDT. Vol. 21, No. 4, pp. 383-390, (2001)
- [2] H. Kwun and C. M. Teller, "Magnetostrictive generation and detection of longitudinal, torsional, and flexural waves in a steel rod," *Mat. Eval.* Vol. 52, No. 4, pp. 503-507, (1994)
- [3] H. Kwun, S. Y. Kim and M. S. Choi, "Experimental comparison of analytical modeling of a guided wave interaction with a notch in a pipe," *J. Korean Phys. Soc.* Vol. 45, No. 2, pp. 380-385, (2004)
- [4] H. Kwun and A. E. Holt, "Feasibility of under-lagging corrosion detection in steel pipe using the magnetostrictive sensor technique," *NDT&E International.* Vol. 28, Issue 4, pp. 211-214, (1995)
- [5] H. Kwun and K. A. Bartels, "Magnetostrictive sensor technology and its applications," *Ultrasonics*, Vol. 36, pp. 171-178, (1998)
- [6] M. S. Choi and S. J. Kim, "Reflection and transmission of normal SH_0 waves at a lap joint consisting of two plates of the same material and thickness," *J. Korean Phys. Soc.* 46, 1352 (2005)
- [7] B. Ahn, Y. J. Kim, Y. G. Kim and S. S. Lee, "Characteristics of magnetostrictive sensor for detecting the flaws in pipe," *J. Kor. Soc. NDT*, Vol. 20, No. 1, pp. 46-53, (2000)
- [8] H. Kwun and S. Y. Kim, "Magnetostrictive sensor for generating and detecting plate guided waves," *J. Pressure Vessel Tech.* Vol. 127, Issue 3, pp. 284-289, (2005)
- [9] H. Kwun and C. Dynes, "Long-range guided wave inspection of pipe using the magnetostrictive sensor technology feasibility of defect characterization," *SPIE.* 3400, 236 (1998)
- [10] H. Kwun, K. A. Bartels and C. Dynes, "Dispersion of longitudinal waves propagating in liquid-filled cylindrical shells," *J. Acoust. Soc.* Vol. 105, No. 5, pp. 2601-2611, (1999)
- [11] N. S. Tzannes, "Joule and Wiedemann Effects - The simultaneous generation of longitudinal and torsional stress pulses in magnetostrictive materials," *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics.* SU-13, 2 (1966)
- [12] R. C. O'Handely, *Modern Magnetic Materials*, ch. 5, Willey, New York, (2000)