

Crossed-Coils를 이용한 자기자화 MsS센서의 설계

Design of Self Magnetization MsS Sensor Using Crossed Coils

김이곤* · 박경조** · 문홍식* · 김재현*** · 안현진*** · 강우석** · 오은경**
Yi-Gon Kim* · Kyung-jo Park** · Hong-Sik Moon* · Hyun-jin Ahn*** · Jae-hyun kim*** · Woo-Seok Kang** Un-Kyung Oh**

* 전남대학교 전기 및 반도체 공학과
** 전남대학교 자동차 시스템 공학과
*** 전남대학교 전기공학과

요 약

이 논문은 파이프의 결함을 진단하기 위해서 파이프에 유도 비틀림파를 가진하고 수신하는 개선된 방법을 제시한다. 기존에 니켈 스트립을 파이프에 부착하고 잔류자계를 이용한 Mode 선택 가진 방법에서 나타난 잔류자계의 정량화 문제점, 다른 모드가 동시에 가진되는 문제점 등을 해결하기 위해서 새로운 형태의 Crossed Coils센서를 제안한다. 제안된 센서를 통해 모드 선택이 가능함을 확인하였고, 차후 모드분석을 통하여 Torsional Mode의 최적 가진 조건을 찾을 수 있음을 보인다.

키워드 : 자왜현상, 비틀림파, 교차코일, 유도파, 파이프

Abstract

This paper propose a 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 there 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

국내 석유 유화 관련업체는 설립연도가 대부분 30년 이상의 노후화된 시설을 보유하고 있다. 이들 시설 중에서 화학 공정상 유독화학물질 배송용 파이프 시설의 비중이 매우 높다. 화학물질의 특성상 배관의 부식 정도가 운송 물질에 따라 다르기 때문에 예측이 불가능하고 부식의 진도가 빨라 유독가스 누출 등의 위험한 사고 발생의 주요 원인이 되기도 한다.

최근 구조물의 비파괴 평가시 유도 초음파(Guided Wave)를 이용한 탐상기법이 널리 사용되고 있다. 일반적으로 유도 초음파 기반 기법은 넓은 탐상범위를 가지므로 길이가 매우 긴 구조물을 효율적으로 검사 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 유도 초음파의 발생 및 측정을 위한 트랜스듀서로는 압전 트랜스듀서(Piezoelectric Transducer)가 널리 사용되나, 최근 들어 자기변형 트랜스듀서(Magnetostrictive Transducer)를 이용한 예들이 자주 보고 되고 있다. 자기변형 트랜스듀서는 측정대상과의 물리적인 접촉 없이 구조물에 진행하고 있는 탄성파를 측정할 수 있고, 상대적으로 큰 출력을 낼 수 있어 원거리 탐상에 유리하다. 또한 구조가 간단하기 때문에 비용이

저렴하여 경제적인 면에서도 장점을 가지고 있다.[1]

MsSR-3030은 미국 텍사스주 샌안토니오에 소재해 있는 Southwest 연구소(SwRI)에서 개발한 장비로서 일반적으로 유도초음파(Guided Wave)를 이용하여 주로 강재나 금속 구조물의 비파괴 검사에 사용된다. MsSR-3030의 특징은 커플란트를 사용하지 않고 피검사체 전체로 유도파가 진행하게 되어 피검사체 전체를 하나의 리본 센서로 검사할 수 있다는 것이다. MsSR-3030의 원리는 니켈 스트립(Strip)을 이용하여 유도 비틀림파를 보내고 받을 수 있는 구조이다. 니켈 스트립을 축 원주 방향으로 부착시킨 후, 영구자석 등을 이용하여 원주 방향으로 자화시킨다. 니켈 스트립이 자화된 후 축 방향으로 자기장이 걸리도록 리본센서에 교류전류를 흘려 니켈 스트립의 기계적 변형을 일으켜 비틀림 초음파를 발생시킨다. 그러나 이 방식은 파이프의 둘레 방향으로의 니켈 스트립의 예자화(Pre-magnetization)량과 축 방향으로의 솔레노이드내의 자기장의 세기가 적절하지 않으면 비틀림파 이외에 다른 유형의 파가 발생하는 문제점이 있다. 또한 니켈 스트립이 연질자성재료(Soft magnetic material)이므로 긴 시간에 걸쳐 실험을 하는데는 다시 예자화를 해야 하는 번거로움이 있다.

이런 문제점을 개선하기 위하여 본 연구에서는 이중 구조를 가지는 Crossed-coils를 제안한다. Crossed-coils은 원주방향의 자기장을 생성하는 Toroidal-coil과 축방향의 자기장을 생성하는 Solenoid-coil로 구성되어 있다. 이 코일의 특징은 코일의 위치 및 고일에 흐르는 전류의 크기를 적절히 조절함으로써 가진 출력의 방향과 크기를

접수일자 : 2008년 3월 31일

완료일자 : 2000년 11월 1일

감사의 글 : 본 연구는 2007년도 한국산업기술재단 지역혁신인력양성사업의 일부지원 받았습
니다.

정량화 할 수 있다.

2. 자왜 현상과 자왜 현상의 수학적 모델링

1842년, Joules 은 자기적 성질을 가진 물체에 전류를 흘렸을 때 자화 방향으로 길이가 늘어나고 자화방향에 수직인 길이는 줄어드는 것을 발견하였는데 자화에 대해 길이가 변하는 현상을 자왜(magnetostriction)라고 한다. 자화가 되기 전엔 Domain의 모양도 일정하고 크기도 똑같이 방향을 가지고 있지 않지만, 자화가 되기 시작하면 Domain의 모양이 방향을 띄게 대면서 모양도 자화가 되는 방향으로 늘어나게 된다. 그런데 이 모양을 보면 자기장과 동일한 방향으로 확장되는 Domain들과 자기장과 반대 방향으로 확장되는 Domain들이 있다. 이런 Domain들이 회전을 하여 자기장의 방향과 같아지는 최종적인 모양은 한 방향으로 배열 되게 되는데 이때의 모양을 자기 포화(Magnetic Saturation)라 하며 전체적인 모양을 보면 약간의 길이가 늘어나 있음을 알게 된다. 이것이 자왜(Magnetostriction) 현상이다.[2]

Domain의 크기의 변화와 자기장 방향으로의 배열은 외부 에너지에 의해 일어나고, 이 변화는 탄성적인 변화에 기인한다. Domain이 원래 모양으로 되는 과정에서 에너지가 방출된다. Jiles-Atherton은 에너지와 Domain의 상관관계에 의해서 자성체의 히스테리시스를 분석하였다.[3]

이 현상은 히스테리시스 특성과 관련이 있는데 이 특성은 어떤 물체가 처음 조건만으로 정해 지지 않고, 변화하는 상태에 따라 영향을 받는데 이는 입력과 출력의 관계가 비선형적인것을 의미한다. 자왜 현상은 이런 비선형적인 히스테리시스 특성으로부터 기인한다.

자왜 현상을 수학적으로 해석하기 위해서는 히스테리시스의 특성을 해석해야한다. 히스테리시스를 해석하는 모델은 크게 현상적인 분포에 의해서 즉 실험을 통하여 얻은 데이터를 통해서 해석하는 Preisach모델과 물리학적으로 에너지 보존법칙에 따른 자기에너지와 자기 모멘트의 관련 식에 의해 히스테리시스의 관련 식을 유도하여 해석하는 Jiles-Atherton 모델 두 가지가 있다.[4] Preisach 모델은 Jiles-Atherton 모델에 비해 정확하긴 하나, 시간이 많이 걸리는 단점이 있다. 그래서 빠른 분석을 위해 Jiles-Atherton 모델을 적용한다.

Domain 내의 분자들이 열역학적 평형을 유지한다고 가정할 때 나타나는데 각 Domain의 자성 모멘트는 방향을 가지고 있고, 이것들의 배열은 온도의 함수를 이용하여 나타낼 수 있다. T라는 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. k_B 는 Boltzman 상수를 나타내고, 온도의 단위는 Kelvin 이고, $E_d(\theta)$ 는 다른 Domain과의 상호 작용 및 외부 자기장 H 에 기인하는 Domain의 에너지로

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

나타 낼수 있으며, μ_0 는 진공에서의 투자율, m 은 Domain의 자화 모멘트, H_e 는 자기장을 나타내는데 이는 외부의 자기장과 내부 Domain에 의한 자기장의 합이며,

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

으로 나타낼 수 있다. α 는 평균자기장 파라미터이고, (1)

의 적분형은

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

로 나타내며, $a = \frac{Nk_B T}{\mu_0 M_s}$ 으로 정의 되어 있고, N 은 단위 부피당 Domain을 의미한다. 지금까지의 서술된 반히스테리시스 특성은 외부 자기장하에서 Domain의 크기는 변함이 없고, 자화의 방향만 회전하는 상태이다. Domain의 회전은 완벽한 가역변화로서 히스테리시스를 고려하지 않는다.

3. 유체함입 파이프의 기본모드

파이프의 축방향으로 전파될 수 있는 유도파에는 세가지 종류가 있다. 즉 종파(longitudinal wave), 비틀림파(torsional wave), 휨파(flexural wave)가 있다. 각 모드의 특성을 결정하는 인자는 주파수, 위상속도(phase velocity) 그리고 감쇠이다. 유도초음파의 전파특성을 이해하고 비파괴탐상에 적용하기 위해서는 주어진 진동수 영역에서 존재 가능한 모드를 찾고 각 모드의 분산특성을 이론적으로 예측하는 것이 우선적으로 행해져야 한다.

파이프에서 나타나는 파는 종파, 횡파, 비틀림파 3가지이며, 종파는 파의 진행방향과 입자의 운동방향이 평행한 파로 운동양식은 뱀이나 지렁이의 근육이동 방식과 같이 밀한부분과 소한부분이 연속하며 진행하며 각 입자는 평형상태에서 인접입자에게 에너지를 전달하게 되는데 입자사이의 탄성력이 이 파의 전달을 가능케 한다.

밀한부분과 소한부분이 압축되어 나아가므로 압축파, 파의 진행방향과 운동방향이 평행하다고 종파로 불리며, 음파의 파형중 가장 빠르며, 발생시키기도 쉬어 가장 널리 사용되며 특수한 경우를 제외하고는 이 파의 변환을 이용하여 횡파, 표면파, 또는 판파를 발생시켜 탐상에 이용하고 있다. 횡파는 원주방향으로 늘어났다 줄어들었다 하는 파로 진행방향과 진동방향이 다른 파이다. 이 횡방향모드는 분산성이 심하고 감쇠가 크기 때문에 가진하는 에너지가 토양으로 다 흡수해 버리기 때문에 사용하지 않는다.

비틀림파는 비틀면서 진행하는 파로서 예전에는 잘 사용되지 않았지만, 비축대칭인 결함의 반사등으로 인하여 비축대칭인 모드 즉 휨모드가 생성될 수 있기 때문에 비축대칭 모드에 대한 연구가 필수적이기도 하며, 자왜센서는 비틀림을 발생하기 쉽기 때문에 본 논문에서는 비축대칭(비틀림)모드의 특성을 규명하였다.

Long 등은 지하에 매설된 강철 파이프를 따라 전파되는 모드 중 축대칭 종파 모드의 특성을 규명하였는데 그 중에서도 특히 위상속도의 특성에 대해 자세히 조사 하였다.[5]

논문에서 제시하는 분산선도(dispersion curve)결과는 영국 Imperial college에서 개발한 파동해석 소프트웨어인 Disperse를 이용하여 구하였다. 이 프로그램은 유체가 함입되어 있거나 지하에 매설되어 있는 파이프의 유도파 특성을 자세하게 살펴볼 수 있는 매우 강력한 프로그램으로 알려져 있다.

4. 대상 파이프의 분산선도

파이프의 재질은 Steel, 두께는 5mm로 일정하게하고 파이프의 직경만 5,15,30cm로 다르게 하여 분산선도를 구해본 결과 T모드의 분산선도는 동일하였고, 파이프의 두께를 10mm, 15mm로 바꿔서 분산선도를 구하였다. T(0,1)모드는 동일하였으나 T(0,2)~T(0,n)까지의 모드는 분산선도가 나타나는 주파수영역이 파이프의 두께를 크게 할수록 낮아지는 것을 알 수 있었다. (Fig1 ~ Fig3)

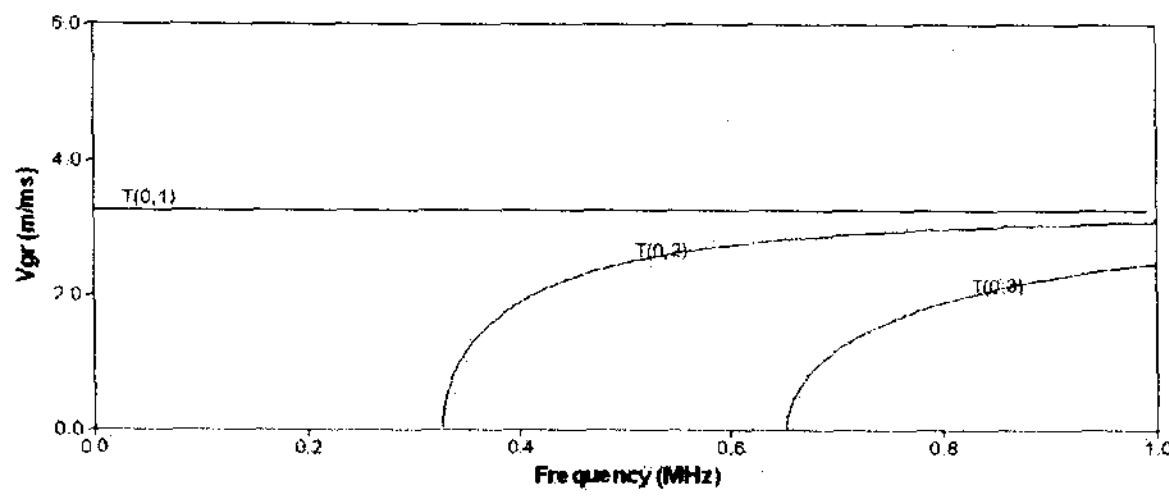


Fig 1. Ri=20mm, 70mm and 145mm, T=5mm 내·외부유체가 없는 Group velocity dispersion curves

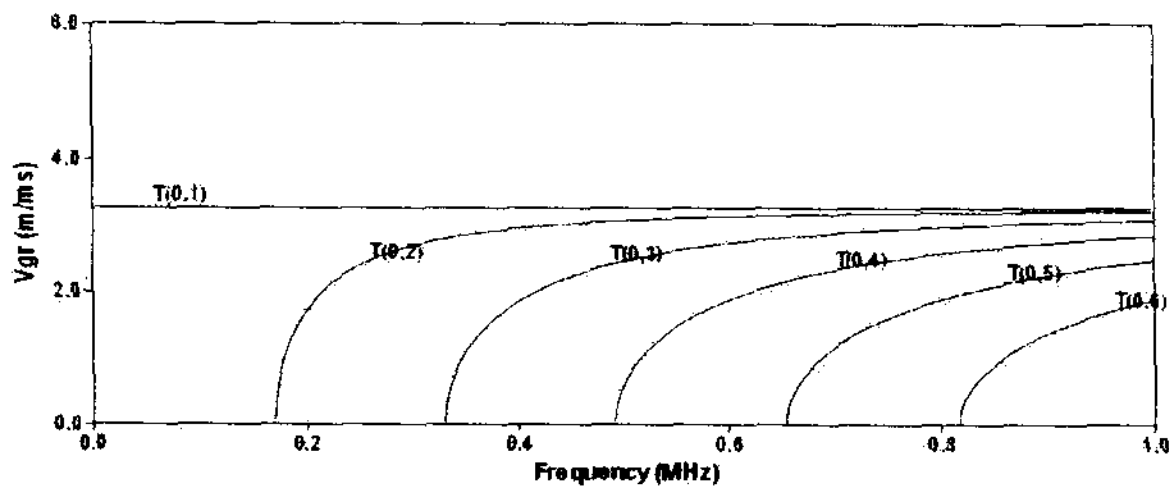


Fig 2. Ri=15mm, T=10mm 내·외부유체가 없는 Group velocity dispersion curves

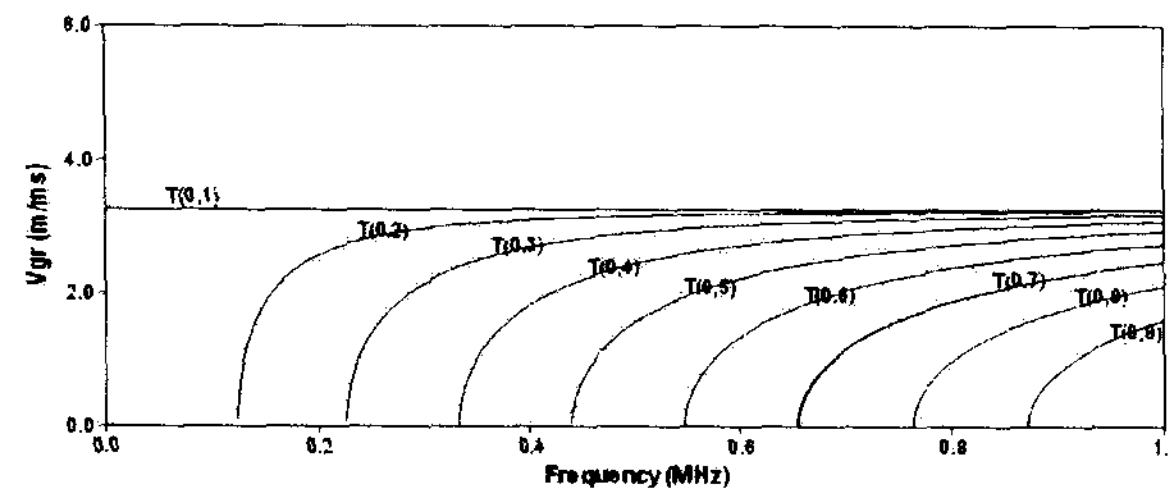


Fig 3. Ri=10mm, T=15mm 내·외부유체가 없는 Group velocity dispersion curves

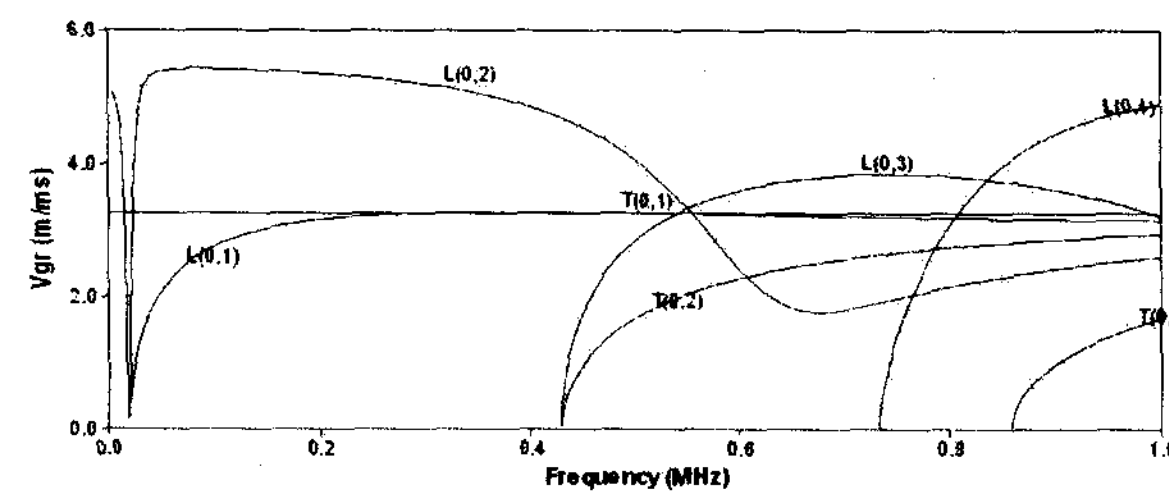


Fig 4. Ri=40.825mm, T=3.8mm 내·외부유체가 없는 Group velocity dispersion curves

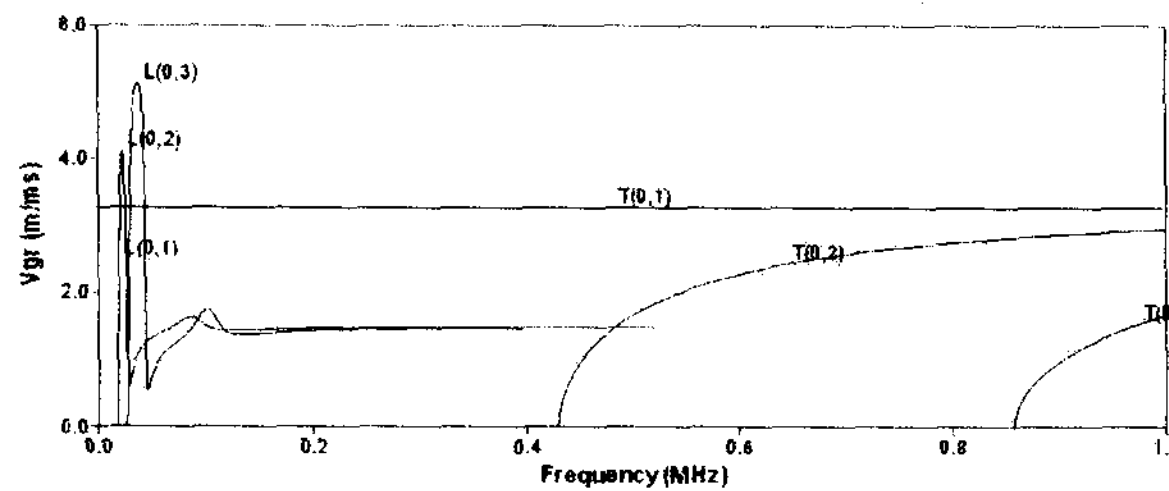


Fig 5. Ri=40.825mm, T=3.8mm 내부유체가 있는 Group velocity dispersion curves

파이프내부에 유체를 함입하지 않았을 경우와 함입하였을 경우로 나누어 분산선도를 구해보았으나 T모드의 경우에는 두 분산선도가 동일한 것을 알 수 있다. 하지만, L모드 경우에는 분산선도가 다르다는 것도 알 수 있다. (Fig 4 ~ Fig5)

땅속에 파이프를 매립하지 않은 경우와 땅속에 파이프를 매립한 경우(토양의 특성에 따라 soft와 hard로 구분) 그리고, 유체 함입한 경우(파이프 내부와 외부로 나누어서 구분)와 함입하지 않을 경우로 구분하여 분산선도를 구해보았다. T모드의 경우에는 모든 분산선도가 동일하였고, L모드의 경우에는 조건에 따라 변화가 심하였다. 파이프의 재질과 외경을 다르게 하고 두께만 동일하게 한 경우의 분산선도를 구해보니 T모드는 동일하였다. T(0,1)모드를 가장 최적의 모드로 판명하였고, 이유는 다음과 같다.

- 1) 주파수에 상관없이 일정한 군속도 특성을 나타냄 따라서 주파수 변화에 상관없이 일관성 있는 실험 결과의 도출이 가능
- 2) 고차의 T(0,2)~T(0,n)모드보다 군속도가 크다. 따라서 결함으로부터 반사되는 신호에서 가장 먼저 도달하는 신호. 이로부터, T(0,1)모드를 다른 모드와 구별하기 쉽고, 이 모드의 도착시간으로부터 결함의 위치를 판별하기 쉬움.
- 3) 모드형상이 주파수에 상관없이 일정하기 때문에 주변 매질로의 에너지 누설이 적다. 따라서 장거리를 전파할 수 있는 가능성이 크다.

5. Crossed-coils의 자기분포 시뮬레이션

Crossed-coils의 시뮬레이션은 전자기학 계산 및 해석용 전산 프로그램 MAFLO code를 사용하여 시뮬레이션하였다. MAFLO code는 한국 핵융합연구센터(NFRC)의 이덕교 박사님께서 20여 년간 미국 Oak Ridge National Lab에서 magnetic fusion 및 플라즈마 물리 연구를 위해 개발 하여 탁월한 성능으로 업적상을 수여받은바 있고, 1997년 귀국 후 한국핵융합 연구 장비 KSTAR의 설계 및 연구개발에 활용하며 개선/확장한 것으로 계산의 정확도와 속도가 높고 사용하기가 편리한 것으로 알려져 있다.[6]

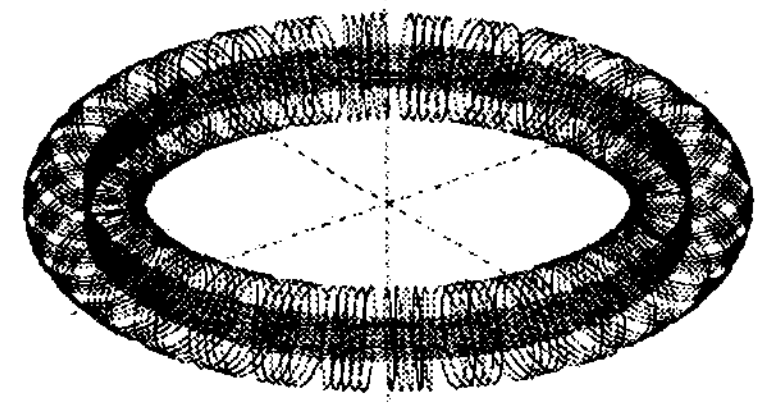


Fig 6. Crossed-coils의 구조

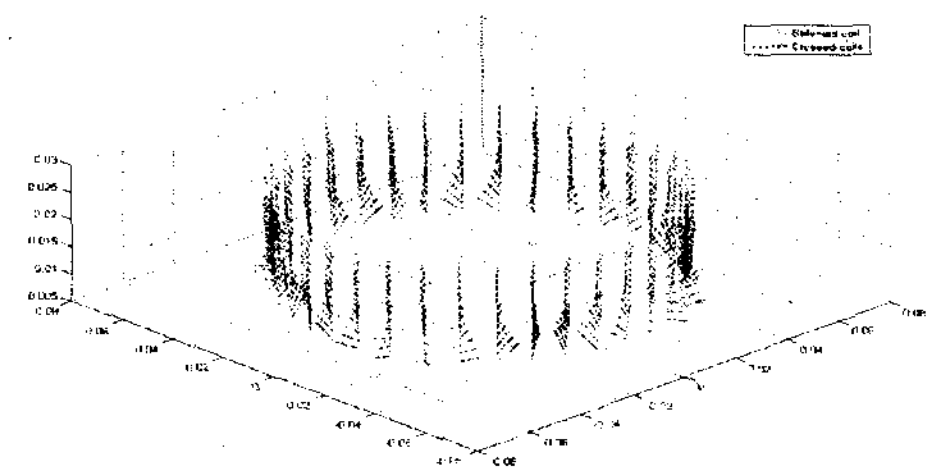


Fig 7. Crossed-coils 자기분포 시뮬레이션

그림6은 Crossed-coils의 구조를 나타내는 그림이다. 그림에서 Crossed-coils은 원주방향의 자기장을 생성하는 Toroidal-coil과 축방향의 자기장을 생성하는 Solenoid-coil로 구성되어 있다. Solenoid-coil은 파이프의 축방향으로 자기장을 생성할 수 있는 방향으로 감겨져 있다. Toroidal-coil은 균등하게 분포하며 Solenoid-coil을 중심으로 감겨져 있다.

그림 7은 MAFLO code의 해석결과를 MatLab으로 나타낸 그림이다. 그림 8은 그림7의 해석 결과를 확대한 그림이다. 그림8에서 보는 것과 같이 Crossed-coils에 의해 발생된 자기장은 Solenoid-coil에 의해 발생된 자기장에 비하여 일정한 각도를 가지는 것을 알 수 있다.

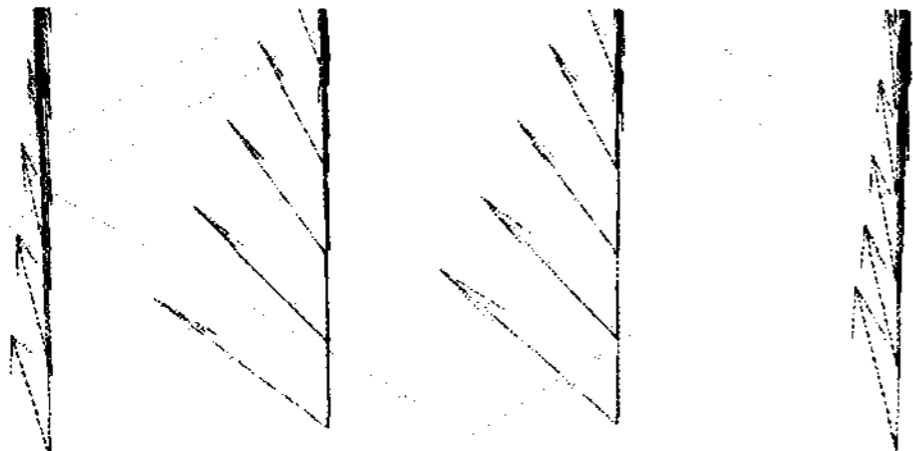


Fig 8. 자기분포 시뮬레이션의 확대

6. 결 론

연구의 목적은 원통형 파이프시스템의 결함검출을 위한 T(0,1)모드 파를 발생 및 수신할 수 있는 최적의 센서의 설계 조건을 찾고자 했다.

시뮬레이션 결과를 통해 두 코일의 전류로 유도파의 모드를 제어할 수 있는 가진 초음파 진행 방향을 조절할 수 있음을 보여주고 있다. 따라서 시뮬레이션결과를 통해 제안하고자하는 이중 구조를 가지는 Crossed-coils (원주방향의 자기장을 생성하는 Toroidal-coil과 축방향의 자기장을 생성하는 Solenoid-coil)로 구성된 자기자화 자왜센서의 유용성이 확인되었다.

참 고 문 헌

- [1] 김윤영, "자왜 트랜스 듀서를 이용한 유도 비틀림파의 발생 및 배관의 이상진단" 한국소음진동공학회 2003년도 추계학술대회논문집, pp.544~548
- [2] Joule, J. P., 1847 "On the effect of magnetism upon the dimensions of iron and steel bars", *Phi. Mag.* III, 30, pp.76.
- [3] D. C. Jiles and D. L. Atherton, "Theory of ferromagnetic hysteresis," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 61, pp. 48-60, 1986.
- [4] M. J. Sablik and D. C. Jiles, "Coupled magnetelastic theory of magnetic and magnetostrictive hysteresis," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 29, pp. 2113-2123, 1993.
- [5] R. Long, M.J.S Lowe and P. Cawley, 2003, "Acoustic Wave Propagation in Buried Iron Water Pipes," *Proceedings of Royal Society London*, pp.351~356
- [6] http://dklee.knfp.net/EM_code.doc

저 자 소 개



김 이 곤 (Yi-Gon Kim)

1992년 : 일본 동경대학교 객원연구원
 1993년 : 전남대학교 대학원 전기공학과 졸업.(공학박사)
 2000년~2001년 : 미국 아이오와 주립대 교환교수.
 2002년 : 한국과학재단 우수연구성과 30선 선정.

1995년~전남대학교 전기 및 반도체 공학과 교수.
 2008년~현재 한국지능시스템학회 회장.
 관심분야 : 시스템 모델링인공지능, 지능제어, 고장진단.

E-mail : yigon@chonnam.ac.kr

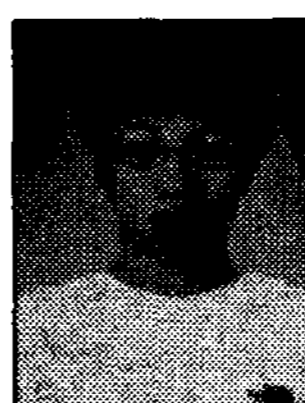


박 경 조 (Kyung-jo Park)

1993년 한국과학기술원 기계공학과 졸업.(공학박사)
 2004년~2005년 : British Columbia Univ (Canada) Visiting Professor.
 1997년~현재 전남대학교 자동차 시스템 공학과 교수.

관심분야 : 비파괴, 진동, 소음

E-mail : kjpark40@chonnam.ac.kr



문 홍 식 (Hong-Sik Moon)

2007년 전남대학교 전기 및 반도체 공학과 졸업.(학사)
 2007년~현재 동 대학원 전기 및 반도체 공학과 석사과정.

관심분야 : 퍼지 이론, 비파괴검사, 자왜센서.

E-mail : mhs99co@nate.com



안 현 진 (Hyun-jin Ahn)

2004년 전남대학교 전기공학과 졸업(학사).
 2007년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정

관심분야 : 인버터설계, 제어시스템.

E-mail : zook1052@nate.com



김 재 현 (Jae-hyun Kim)

2006년 조선대학교 제어계측학과 졸업.(학사)
 2007년~현재 전남대학교 전기공학과 석사과정.

관심분야 : 인버터설계, 제어시스템.

E-mail : kjhyun80@nate.co



강 우 석 (Woo-Seok Kang)

2004년 여수대학교 자동차 시스템 공학과 졸업.(학사)
 2007년~현재 동 대학원 자동차 시스템 공학과 석사과정.

관심분야 : 비파괴, 진동, 소음.

E-mail : srainbo2@lycos.co.kr



오 은 경 (Un-Kyung O)

2004년 여수대학교 자동차 시스템 공학과 졸업.(학사)
 2005년~현재 동 대학원 자동차 시스템 공학과 석사과정.

관심분야 : 비파괴, 진동, 소음.

E-mail : eun0001451@lycos.co.kr