

실린더형 구조물의 원거리 초음파검사용 나선형 코일 자왜 스트립 변환기

Spiral Coil Magnetostrictive Strip Transducers for Long Range Ultrasonic Testing of Cylindrical Structures

허원녕*, 최명선*†

Won-Nyoung Heo* and Myoung-Seon Choi*†

초 록 전자기음향변환기 분야에서는 나선형 RF 코일이 솔레노이드 코일보다 훨씬 널리 사용되고 있다. 그러나 실린더 구조물의 원거리 초음파검사용 자왜 스트립 도파변환기 분야에서는 솔레노이드 코일이 주로 사용되어왔다. 이는 아마도 낮은 주파수의(즉, 치수가 큰) 나선형 코일의 제작의 어려움에 기인하는 것 같다. 본 논문에서는 FFC(flexible flat cable)로 나선형 코일 자왜 스트립 도파변환기를 제작하는 방법을 기술한다. 기존의 솔레노이드 코일 변환기와의 비교실험을 통하여 나선형 코일 변환기가 훨씬 우수한 성능(감도, 신호-대-잡음 비, 도파방향조정능력)을 갖는다는 것을 실증한다.

주요어: 원거리 초음파검사, 나선형 코일, 자왜 스트립 변환기

Abstract In EMAT field, spiral RF coils are much more widely used when compared with solenoid coils. In the field of the magnetostrictive strip transducers for long range ultrasonic testing of cylindrical structures, however, solenoid coils has been used. This seems to be attributed to the difficulty in fabricating low frequency (*i.e.*, large size) spiral coils. In this paper, we describe a method for fabricating spiral coil magnetostrictive strip guided wave transducers from FFC (flexible flat cable). It is demonstrated through a comparison experiment that the spiral coil transducer has much superior performance (sensitivity, SNR, and guided wave direction control capability) than the previous transducer with solenoid coils.

Keywords: Long Range Ultrasonic Testing, Spiral Coil, Magnetostrictive Strip Transducer

1. 서 론

원거리 초음파검사(long-range ultrasonic testing, LRUT)는 판, 셸, 봉, 로프, 튜브, 파이프 등과 같이 경계면을 갖는 구조물 요소에서 그 경계면에 의해 안내되어 멀리 전파될 수 있는 탄성도파(guided elastic waves)를 이용하여 구조물 두께 내부에 존재할 수 있는 결함들을 원거리에서 탐지함으로써 구조물 안전성을 진단 및 감시하고자 하는

최신의 초음파 비파괴검사 방법이다. 현재 압전(piezoelectric)형 및 자왜(magnetostrictive)형 시스템의 두 가지 원거리 초음파검사 시스템들이 사용되고 있다. 압전변환기를 사용하는 전자는 영국 Imperial College의 Cawley 교수 팀[1]에 의해 개발되었으며 영국의 GUL(Guided Ultrasonics Limited)[2]에 이전되었다. 자왜변환기를 사용하는 후자는 미국 SwRI(Southwest Research Institute)의 Kwun 박사 팀[3]에 의해 개발되었다.

실린더형 구조물의 LRUT에는 구조물 내/외면에 존재할 수도 있는 유체에 영향을 받지 않고, 분산(dispersion) 특성이 없으며, 불연속부위에서의 모드 변환가능성이 상대적으로 낮은 기본 비틀림(fundamental torsional, T(0,1)) 모드가 매우 유용하며 자왜 스트립 도파변환기가 이 모드를 효율적으로 송/수신할 수 있다는 것이 입증되어왔다[4-8]. 이 자왜 스트립 도파변환기는 구조물의 원주방향으로 접착되는 얇은 자왜 스트립과 이 스트립을 감싸는 솔레노이드 코일로 구성된다. T(0,1)모드의 송/수신을 위해서는 자왜 스트립 내부에 스트립 길이방향(구조물 원주방향)의 바이어스 정자기장이 요구되며, 대부분의 경우, 구조물에 접착된 스트립의 표면을 따라 U형 영구자석을 2-3회 이동시키면서 제거할 때 스트립 내에 남는 잔류자화가 바이어스 자기장으로 이용된다. 그리고 솔레노이드 코일은 리본케이블과 어댑터로 이루어진다[9].

EMAT(electromagnetic acoustic transducer) 분야에서는 솔레노이드 코일보다는 PCB(printed circuit board) 기술을 사용하여 제작된 나선형 코일이 도파를 보다 효율적으로 송/수신할 수 있다는 것이 잘 알려져 왔다[10]. 그러나 T(0,1) 모드를 송/수신하는 자왜 스트립 도파변환기 분야에서 나선형 코일의 사용이 보고된 바는 아직 없다. 그 이유는 아마도 대형구조물의 LRUT를 위해 요구되는 낮은 주파수의, 치수가 큰, 나선형 코일의 제작의 어려움 때문인 것으로 생각된다.

본 논문에서는 전자산업분야에서 널리 사용되고 있는 FFC(flexible flat cable)로 나선형 코일을 설계 및 제작하는 방법을 기술한다. 그리고 T(0,1)모드 LRUT에의 응용을 위한 2채널 나선형 코일 자왜 스트립 도파변환기의 시작품을 제작하고 그 성능을 평가한다.

2. FFC로 만들어지는 겹쳐진 2채널 나선형 코일

FFC는 절연테이프에 의해 보호되어 있는 얇고 평평하며 서로 나란한 다수의 도체(conductor)들로 구성된 유연한 케이블로서 컴퓨터, 프린터, 스캐너, 휴대폰 등의 다양한 전자기기들에 널리 사용되고 있다. Fig. 1에서 보여진 바와 같이, 각 FFC는 케이블의 길이(L), 폭(W_{ffc}), 두께(t_{ffc}), 도체의 피치(P), 폭(W_c), 두께(t_c), 절연체의 두께(t_i), 절연체가 입혀져 있지 않은 부분의 도체길이(S_1, S_2), 도체양

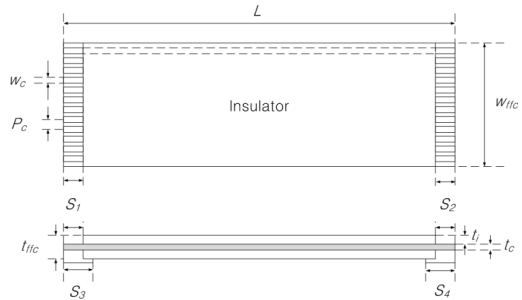


Fig. 1 Plane view and side view of FFC

Table 1 Conductor dimensions in commercial FFCs

Pitch, P_c (mm)	0.5	0.8	1.0	1.25	1.27	2.0	2.5	2.54
Thickness, t_c (mm)	0.1 0.05 0.035		0.1 0.05 0.035		0.1 0.05		0.1	
Width, W_c (mm)	0.32	0.5	0.65	0.8	0.8	0.8	0.8	1.27

단의 보호테이프 부분의 길이(S_3, S_4) 등에 의해 특성화된다. 도체 개수와 케이블 두께는 각각 다음과 같이 주어진다: $N = W_{ffc}/P_c$, $t_{ffc} = t_c + 2t_i$. 그리고 Table 1은 상용의 FFC에서 사용되고 있는 도체의 치수를 보여준다[11].

Fig. 2는 PCB 기술로 제조되어 판 구조물의 높은 주파수 도파검사에 널리 사용되고 있는 겹쳐진 2채널 나선형 코일을 도식적으로 보여준다[12]. 각 코일의 한쪽다리가 상대방코일의 두 다리 사이의 중앙에 위치되도록 동일한 두 코일이 서로 겹쳐져 있다. 여기서 W_{sc} 와 W_i 는 각각 코일의 폭과 코일 다리의 폭을 나타낸다. 각 코일에서 두 다리 사이의 중심거리(d_i)는 도파 파장(λ)의 1/2에 해당된다. 그래서 $W_{sc} = W_i + \lambda/2$ 이고 두 코일 사이의 오프셋(offset) 거리는 $\lambda/4$ 가 되며 부분적으로 겹쳐진 두 코일의 전체 폭은 다음과 같이 표현된다: $W_{osc} = W_i + 3\lambda/4$. 예를 들어 $W_i = \lambda/4$ 이면, $W_{osc} = \lambda$ 가 된다. 이같이 겹쳐진 2채널 코일을 위상배열이론[13]에 따라 운영할 때, 도파의 송/수신 방향을 조절할 수 있으며 이는 손쉬운 신호해석을 가능하게 하는 단순한 예구조를 제공한다.

이 장의 나머지 부분은 FFC를 사용하여 겹쳐진 2채널 나선형 코일을 제조하는 방법에 대해 기술한다. 먼저 도파의 전파속도(v)와 주파수(f)를 고려하여 파장을 결정하고 이 파장과 거의 같은 폭을 갖는 FFC를 선택한다: $W_{ffc} = NP_c \approx \lambda$. 도체 피치

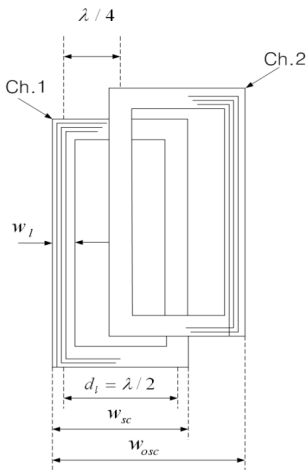


Fig. 2 Overlapped 2 channel spiral coils

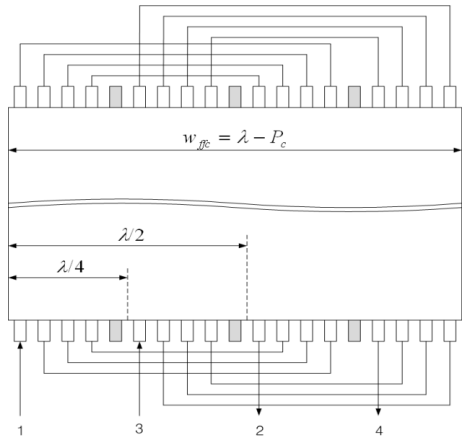


Fig. 3 Example of the 2 channel spiral coils made from FFC ($N=19, n=4, m=1$)

(P_c)의 선택에 따라 도체의 수(N)가 달라진다. N 이 4의 정수(n) 배인 경우, FFC의 모든 도체들을 2채널 코일의 네 다리에 균등하게 배분한 후 배분된 도체들을 절연전선을 사용하여 적절히 연결함으로써 나선형 코일이 완성된다. 그러나 Table 1에 나타내었듯이, 현재 상용으로 공급되는 FFC의 도체 피치는 0.5 mm ~ 2.54 mm 사이의 몇몇 값으로 크게 제한되어있다. 그래서 대부분의 경우 $N=4n$ 의 조건은 만족되기 쉽지 않다. $N \neq 4n$ 인 경우, 한 두 피치 넓거나 좁은 FFC를 사용하거나 코일의 다리와 다리 사이에 이용되지 않는 동일한 수(m)의 도체들을 두고 나머지 도체들을 코일의 네 다리에 균등하게 배분한다: $N-3m=4n$. Fig. 3은 $W_{ffc} = \lambda - P_c$ 이고 $N=19$ 인 FFC를 사용하여 만들어지는 겹쳐진 2채널 나선형 코일의 예($n=4,$

$m=1$)를 보여준다. 여기서 1과 2는 채널1 코일의 양끝을, 3과 4는 채널2 코일의 양끝을 나타낸다.

3. 실험

Fig. 4는 T(0,1)모드 도파의 송수신을 위한 펄스에 코 실험장치를 도식적으로 보여준다. 펄서/리시버 시스템은 SwRI의 MsSR-2020D 이었고 시편은 길이 3000 mm, 외경 100 mm, 두께 5 mm인 탄소강 파이프이었다. 자왜변환기는 에폭시를 사용하여 파이프 시편 길이의 약 1/3 위치에 부착된 니켈스트립과 FFC를 사용하여 니켈스트립을 감싸도록 만들어진 겹쳐진 2채널 나선형 코일로 구성되었다. 니켈스트립과 코일의 두께는 각각 0.10 mm와 0.12 mm이었고 이들의 폭은 둘 다 97.5 mm이었다. 니켈에서의 횡파속도(3100 m/s)를 고려하면, 이 폭이 32 kHz에서의 도파 파장(96.8 mm)과 유사함을 알 수 있다. 니켈 스트립은 (주)두연[14]이, FFC는 (주)은성[11]이 공급하였다. 사용된 FFC의 자세한 특성은 다음과 같았다: $L = 353$ mm, $W_{ffc} = 97.5$ mm, $N = 39$, $P_c = 2.5$ mm, $W_c = 0.8$ mm, $t_c = 0.1$ mm, $S_1 = 5$ mm, $S_2 = 5$ mm, $S_3 = 10$ mm, $S_4 = 10$ mm. 코일의 감은 수는 9이었고 코일다리 사이에 이용되지 않은 도체의 수는 1이었다: $n=9, m=1$. 이 그림

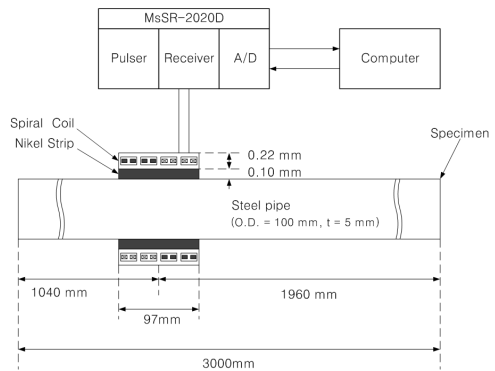


Fig. 4 Schematic diagram of pulse-echo experimental setup for generating and detecting T(0,1) mode guided waves

에는 나타나지 않았지만, 자왜변환기의 T(0,1)모드 운영을 위해 요구되는 니켈스트립 길이방향의 잔류 자화를 유도하기 위한 U형 영구자석이 또한 사용되었다. 이 자석의 길이와 두 폴(pole) 사이의 거리는 각각 170 mm와 20 mm이었고 폴 근처에서의

자기장의 세기는 약 0.7 T 이었다.

실험은 다음 절차에 따라 수행되었다: (1) 32 kHz, 2 사이클, 30 V 진폭의 사각파형이 발생되도록 펄서를 조정하였고 40 dB의 리시버 증폭이득과 32 kHz 리시버 필터를 선택하였다. (2) 도파의 송/수신방향을 양방향으로 선택한 후, 750 kHz의 샘플링 주파수로 수집된 1800 개의 데이터로 구성되는 도파신호를 500번 수집하여 그 평균신호를 컴퓨터에 저장하였다. (3) 도파의 송/수신 방향을 좌측 또는 우측으로 바꾼 후 과정 (2)를 각각 반복하였다. (4) 2채널 나선형 코일을 리본케이블로 만들어진 SwRI의 2채널 솔레노이드 코일로 대체한 후 과정 (2)와 (4)를 반복하였다. 솔레노이드 코일의 폭은 19 mm이었고 감은수는 16 이었다. 이 폭은 나선형 코일의 다리폭(22.5 mm)과 비슷하였고, 감은수는 나선형 코일의 그것(9)보다 컸다.

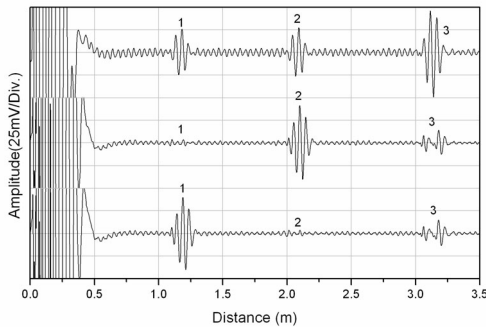


Fig. 5 Guided wave signals by the solenoid coil transducer. Top, middle, and bottom traces show those generated to and detected from both sides, right side, and left side of the transducer, respectively

4. 결과 및 논의

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 솔레노이드 코일 변환기와 나선형 코일 변환기로 송/수신된 T(0,1)모드 도파신호들의 데이터를 보여준다. 각 그림에는 3개의 신호데이터를 포함한다. 위쪽, 중앙, 그리고 아래쪽 데이터들은 각각 양방향, 우측방향, 그리고 좌측방향으로 송수신된 신호들을 나타낸다. 양방향으로 송수신된 신호데이터는 3개의 에코를 포함한다. 에코1은 좌측방향으로 발생된 도파가 시편 좌측 끝에서 반사되어 탐지된 신호이고 에코2는 우측방향으로 발생된 도파가 시편 우측 끝에서 반사되어 탐지된 신호이며 에코3은 두 도파가 시편을 한번 왕복

한 후 중첩되어 탐지된 신호이다. 우측방향으로 송/수신된 신호데이터에서는 에코2가, 좌측방향으로 송/수신된 신호데이터에서는 에코1이 강조되어 나타나고 다른 에코들은 약화됨을 볼 수 있다.

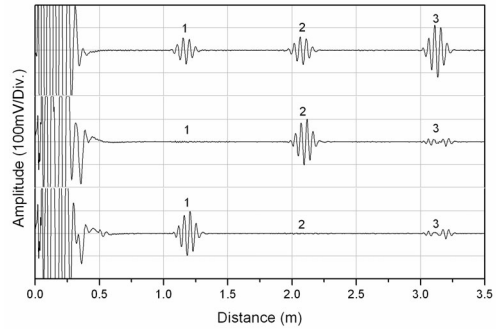


Fig. 6 Guided wave signals by the spiral coil transducer. Top, middle, and bottom traces show those generated to and detected from both sides, right side, and left side of the transducer, respectively

Fig. 5와 Fig. 6에서 서로 대응되는 두 에코의 진폭을 비교함으로써 나선형 코일 변환기가 솔레노이드 코일 변환기보다 약 2.5배 정도 민감하게 도파신호를 송/수신한다는 것을 알 수 있다. 이는 주로 나선형 코일이 솔레노이드 코일보다 2배 많은 코일 다리를 갖기 때문일 것이다. 민감도보다 더 주목해야 할 것은 나선형 코일 변환기에 의한 신호데이터에서 잡음신호의 크기(약 0.5 mV)가 솔레노이드 코일 변환기에 의한 그것(약 4.0 mV)보다 훨씬 작다는, 그래서 나선형 코일 변환기가 솔레노이드 코일 변환기 보다 20배정도 우수한 SNR를 제공한다는 관측사실이다. 나선형 코일 변환기의 이 같은 우수성은 도파송신과정에서 솔레노이드 코일 변환기는 코일 아래 모든 방향으로 넓은 주파수 대역의 에너지를 방사하지만 나선형 코일 변환기는 좌/우측 양방향으로 집중되며 상대적으로 좁은 주파수 대역의 에너지를 방산한다는 사실과 도파수신과정에서 1/2 파장에 해당되는 각 나선형 코일의 두 다리 사이의 간격이 필터의 역할을 제공한다는 사실에 주로 기인하는 것으로 생각된다. 또한 좌측 또는 우측방향으로 송/수신된 각각의 신호데이터에서 에코1과 에코2의 상대적인 진폭 비로부터 변환기의 도파방향조정능력을 평가할 수 있다. 나선형 코일 변환기와 솔레노이드 코일 변환기의 평가된 도파방향조정능력은 각각 약 98 %와 92 % 정도이었다.

5. 결론

FFC를 사용하여 2채널 나선형 코일 자왜 도파변환기의 시작품을 설계하고 제작하여 그 성능을 평가하는 과정에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) FFC는 폭에 비해 길이가 매우 긴 정교한 표면 RF코일의 손쉬운 제작을 가능하게 한다.
- 2) 리본케이블로 만들어지는 기존의 솔레노이드 코일 변환기와 비교할 때, FFC로 만들어진 나선형 코일 변환기는 훨씬 우수한 감도, SNR, 도파방향조정능력을 갖는다. 이 같은 우수성은 나선형 코일의 구조와 FFC의 정확한 치수 및 유연성에 기인하는 것으로 생각된다.
- 3) 상용으로 공급되는 FFC의 제한된 사양 때문에, 변환기의 주파수가 높아짐에 따라 코일제작에 어려움이 발생할 것으로 예상된다.

본 논문에서 기술한 나선형 코일 제조방법은 리본케이블을 사용하는 경우에도 그대로 적용될 수 있다. 그러나 상용으로 공급되는 리본케이블의 사양제한은 FFC의 경우보다 심하여 그 장점을 찾기 쉽지 않을 것이다.

감사의 글

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

참고문헌

- [1] <http://www.imperial.ac.uk/ndt>
- [2] <http://www.guided-ultrasonics.com>
- [3] <http://www.ndttech.swri.org>
- [4] 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)
- [5] 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)
- [6] 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)
- [7] 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)
- [8] S. J. Kim and M. S. Choi, “Magnetic property effects of the strip on transducer sensitivity in a magnetostrictive strip type guided wave transducers,” J. Korean Soc. NDT. Vol. 28, No. 2, pp. 205-210, (2008)
- [9] <http://www.mkckorea.com>
- [10] M. Hirao and H. Ogi, EMATs for Science and Industry, Ch. 2, Kluwer Academic, (2003)
- [11] <http://www.eunsung-ind.com>
- [12] G. M. Light, H. Kwun, S. Y. Kim and R. L. Spinks, “Method and apparatus for short term inspection or long term structural health monitoring,” U.S. Patent No. 6396262, (2002)
- [13] M. G. Silk, Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing, Ch. 5, Adam Hilger, (1984)
- [14] <http://www.dooyoun.com>