

자왜방식 원거리 초음파검사를 위한 단층 송수신 나선형 코일 배열

Single Layer Array of Transmitting and Receiving Spiral Coils for Magnetostrictive Type Long-Range Ultrasonic Testing

최명선*[†], 김유진*, 이효문*

Myoung Seon Choi*[†], Yoo Jin Kim* and Hyo Moon Lee*

초 록 자왜방식 원거리 초음파검사의 최적화된 개별 응용들을 위해, 분리되어 적층된 송수신 나선형 코일 배열들이 사용되어 왔었다. 본 연구에서는 기존에 비해 반으로 줄어든 다리 폭을 갖는 나선형 코일들과 이 다리 폭 감소에 기인한 빈 공간들을 활용할 때, 보다 쉬운 사용과 제조를 허용하는 단층 구조를 형성하도록 송수신 코일들이 배열될 수 있다는 것을 실증하였다. 다리 폭에 비례하는 수신코일의 감은 수 때문에 단층 코일 배열의 감도는 대응되는 이중 코일 배열의 그것의 반 정도이었지만 이는 메인-뱅(main bang) 에코로 인한 포화로부터 수신증폭기의 보다 빠른 회복을 허용하였다. 또한 지향성 조종과 SNR(signal-to-noise ratio)의 관점에서는 이 두 종류의 코일 배열들이 거의 같은 성능을 갖는 것으로 밝혀졌다.

주요용어: 나선형 코일, 자왜변환기, 원거리 초음파검사, 비틀림 모드

Abstract Separate and layered transmitting and receiving spiral coil arrays had been used for the optimized individual applications of magnetostrictive type long-range ultrasonic testing. In this study, it was demonstrated that when taking advantages of the spiral coils with the leg width reduced to be half of the previous one and of the empty spaces due to the decrease of leg width, the transmitting and receiving coil array can be arranged to form a single layer structure allowing more easy use and fabrication. Because of the number of turns of the receiving coils that is proportional to their leg width, the sensitivity of the single layer coil array was about half that of the corresponding double layer coil array while it allowed the receiving amplifier to get faster recovery from a saturation due to the main bang echo. It was also found that the two types of coil arrays have almost the same performances in the view points of signal-to-noise ratio and directivity control.

Keywords: Spiral Coil, Magnetostrictive Transducer, Long-Range Ultrasonic Testing, Torsional Mode

1. 서 론

원거리 초음파검사(long-range ultrasonic testing: LRUT)는 파이프라인, 튜브, 봉, 로프, 판, 레일, H-빔 등과 같은 구조물 요소에서 그 경계에 의해 안내되어 그 길이를 따라 멀리 전파되는 낮은 주파수(보통 100 kHz 이하)의 탄성 피도파(被導波, guided wave) 펄스를 이용하여 구조물 두께 내에 존재할 수 있는 결함들을 원거리에서 탐지

하거나 구조 건전성을 진단 및 감시하고자 하는 비파괴검사 방법이다(국내에서는 “誘導波”라는 용어가 널리 사용되어 왔으나 “피도파”가 영어 원문에 보다 가까운 의미를 제공하는 것 같아 본 논문에서는 후자를 사용함). 이 LRUT는 직접적인 접근이 어려운 부위를 그로부터 멀리 떨어진 접근 가능한 한 부위로부터 검사할 수 있게도 한다. 판형 구조물에서는 SH₀로 표시되는 기본 수평 횡모드를, 실린더 형태의 구조물에서는 T(0,1)

[접수일: 2013. 1. 30, 수정일: 2013. 3. 19, 게재확정일: 2013. 3. 21] *영남대학교, [†]Corresponding Author: Department of Physics, Yeungnam University, 280 Daehak-Ro, Gyeongsan, Gyeongbuk 712-749, Korea (E-mail: cmseon@ynu.ac.kr)

으로 표시되는 기본 비틀림모드를 주로 이용한다. 이들 모드는 구조물 두께 내/외부 표면에 존재할 수도 있는 유체에 둔감할 뿐 아니라 그 전파 속도가 주파수에 관계없이 일정하고 두께 내에서의 변위가 상대적으로 균일하며 맞대기 용접부와 같이 축대칭인 불연속들과의 상호작용 과정에서 다른 모드로 변환될 가능성이 낮다는 특성들을 갖고 있어 상대적으로 해석이 용이한 에코 구조를 제공하기 때문이다.

횡과 형태의 피도파를 송수신하는 자왜변환기들은 Wiedemann 효과, 즉 자왜물질 내에서 서로 수직한 정적자기장과 동적자기장의 상호작용의 효과에 의존한다[1]. 바이어스 자기장으로 불리는 이 정자기장과 라디오 주파수 영역에 있는 이동자기장은 보통 영구자석과 RF(radio frequency) 코일의 사용에 의해 형성되고 탐지된다. 철과 같은 강자성 물질로 만들어진 구조물들은 그 자체가 자왜변환기의 한 구성 요소로 이용될 수 있다; 그래서 이 경우의 자왜변환기는 구조물과의 직접적인 접촉없이 피도파를 송수신할 수 있다.

비자성물질로 만들어 구조물의 경우에는 자왜변환기의 한 요소로 구조물 표면에 접촉된 얇은(보통 0.2 mm 이하) 니켈 혹은 철-코발트 합금 스트립(혹은 패치)을 이용할 수 있다. 피도파 송수신 효율의 향상을 위해 이 같은 자왜스트립 접근법은 강자성 구조물에도 종종 적용되어 왔다.

권 등은 파이프라인에서 T(0,1) 모드를 효율적으로 송수신하는 자왜스트립 변환기를 개발하였다[2]. 이 변환기는 파이프의 한 원주를 거의 감싸는 자왜스트립과 솔레노이드 형태의 RF코일로 이루어졌다. 에폭시와 같은 접착성 물질을 사용하여 자왜스트립을 파이프 표면에 접촉시키고 나서 U형 영구자석을 자왜스트립의 길이방향(파이프의 원주방향)을 따라 1-2회 이동시킨 후 제거할 때 스트립 내에 남는 잔류자화를 바이어스 자기장으로 이용하였다. 이 변환기는 단순할 뿐 아니라 우수한 송수신 효율을 제공한다는 장점을 갖지만 자왜스트립의 반복적인 재사용이 어렵고 센 동자기장에 의해 잔류자화가 변할 수 있으며 원주방향 분해능이 매우 낮다는 문제점들을 갖는 것으로 알려져 왔다[3,4]. 최 등[5,6]과 김[7]은 상기 처음 두 문제점들을 해결하기 위한 방법들을 제안하여 왔다. Vinogradov는 방향이 서로 바뀐 바이어스 자기장과 동자기장, 즉 파이프라인 축

방향의 바이어스 자기장과 원주방향의 동자기장을 이용하는, 그래서 작은 외경의 튜브들의 검사에 보다 적합해 보이는, 자왜스트립 변환기를 개발하였다[8]. Bertoncini 등[9]과 김[10]은 상기 자왜스트립 변환기들의 매우 낮은 원주방향 분해능을 개선할 수 있는 자왜스트립 탐촉자들을 제안하여 왔다.

늘어진(elongated) 나선형 코일이 솔레노이드에 비해 보다 우수한 SNR(signal-to-noise ratio)를 제공한다는 것이 알려져 왔지만 다양한 외경의 파이프라인들에 적용할 수 있는 코일들의 제작의 어려움 때문에 권 등[2]과 정[3]은 리본 케이블로부터 쉽게 구성될 수 있는 솔레노이드를 RF코일로 이용하였다. 최 등은 FFC(flexible flat cable)나 에나멜 동선으로부터 임의의 나선형 코일을 제작하는 방법을 개발하였다[5,11,12]. 이는 최적화된 개별 응용들을 위해 분리되어 적층된 송수신 코일 배열의 사용을 가능하게 하였다. 본 논문에서는 이 같은 나선형 송수신 코일들의 이층 배열을 대체할 수 있는 단층 배열을 제안하고 실험을 통하여 이 두 종류의 배열들의 장/단점을 비교분석한다.

2. 단층 송수신 코일 배열

이 논문에서 제안하는 단층 송수신 코일 배열을 Fig. 1에 도식적으로 나타내었다. 이 배열은 동일한 다리 폭(w_l)과 다리 길이(L)를 갖는 네 개의 늘어진 나선형 코일들로 이루어진다. 개별 코일은 하나의 에나멜 동선으로부터 만들어진 유연한 솔레노이드의 네 부분을 접어서 만든다[5]. 진하게 표시된 두 코일들은 송신용이고 나머지는 두 코일들은 수신용이다; T_{ij} 와 R_{ij} 는 각각 송신 코일과 수신 코일의 단자들을 가리키고 i 와 j 는



Fig. 1 Single layer array of two-channel transmitting and receiving spiral coils

채널 번호와 단자 번호이다. 두 채널의 코일의 사용은 피도파의 송수신과정에서 그 지향성을 조종하기 위함이다[12-14]. 개별 단자의 폭은 코일 제작을 위해 사용된 전선의 폭을 암시한다. 달리 말하면, 송신 코일은 감은 수가 작도록 넓은 전선으로 만들어져 그 구동이 쉬운 반면에 수신 코일은 감은 수가 크도록 좁은 전선으로 만들어져 민감하다는 것을 가리킨다. 개별 코일의 두 다리 사이의 간격(b)과 두 채널의 코일들 사이의 간격(a)은 각각 1/2 파장과 1/4 파장에 해당한다. 그래서 개별 코일의 다리 폭(w_l)은 1/8 파장보다 약간 작아야 하고 여덟 개의 코일 다리들로 구성되는 이 단층 송수신 코일 배열의 전체 폭은 한 파장 정도에 해당한다.

단층코일 배열에서의 개별 코일의 다리 폭은 기존의 이중코일 배열[5,6,12]에서의 그것의 반(1/2) 정도이다. 이 좁아진 다리 폭에 기인하여 생긴 빈 공간들이 송신 및 수신 코일들의 단층 배열을 허용한다. 폭이 일정한 전선을 사용하여 코일을 제작하는 경우, 좁아진 코일 다리 폭은 수신 코일의 감은 수의 감소와 이로 인한 그 감도의 저하가 예상되지만 그 대가로 사용하기 쉬울 뿐 아니라 제작하기도 용이한 단층 송수신 코일 배열을 얻을 수 있을 것이다. 또한 기존의 이중코일 배열에 비해, 이 새로운 단층코일 배열에서는 송수신 코일들 사이의 상호작용이 줄어들 것이다. 이는 송신펄스가 곧바로 수신 코일에 탐지될 때 나타나는 수신증폭기의 포화를 회복하기 위해 필요한 시간이 짧아질 것이라는 것을 암시한다.

3. 실험

Fig. 2는 실험에 사용된 LRUT 시스템을 도식적으로 보여준다. (주)디지털초음파가 공급한 이 시스템(모델명: GWR320)은 탐촉자(probe), 전자장치(electronic instrument), 연결 박스(junction box: JB), 랩톱 PC 등으로 구성되었다. 탐촉자는 5-분 에폭시의 사용에 의해 탄소강 파이프 시편(길이 3 m, 외경 100 mm, 두께 5 mm) 외면에 접착된 자왜밴드(magnetostrictive band: MB)와 이 밴드를 감싸는 송수신 코일 배열로 이루어졌으며 시편 왼쪽 끝으로부터 1 m 거리에 위치되었다. 전자 장치는 탐촉자를 구동하고 수신신호들을 증폭한

다. JB는 탐촉자와 전자장치 사이의 연결과 수신 코일에 의해 탐지된 신호들의 전처리(pre-conditioning)를 위해 사용된다. PC는 두 개의 직렬 포트를 통해 전자장치의 모든 운영 매개변수들을 조정하고 증폭된 수신신호들을 수집 및 처리한다.

Fig. 3은 실험에 사용된 링(ring) 형태의 MB의 사진을 보여준다. 이 링의 외경은 파이프의 외경과 비슷하였고 그 폭은 112 mm 이었다. 이 MB는 동일한 두 서브 밴드로 이루어진다. Fig. 4에 도식적으로 나타낸 것처럼, 각 서브 밴드는 얇은(0.1 mm 두께) 자왜합금(철-코발트) 스트립 코어를 갖는 솔레노이드(solenoid), 얇은(0.2 mm 두께) 알루미늄 판으로 만들어진 보호층(protection layer), 그리고 접착매질(couplant)로 5-분 에폭시를 사용하는 경우에도 이 밴드의 탈/장착을 손쉽게 하기

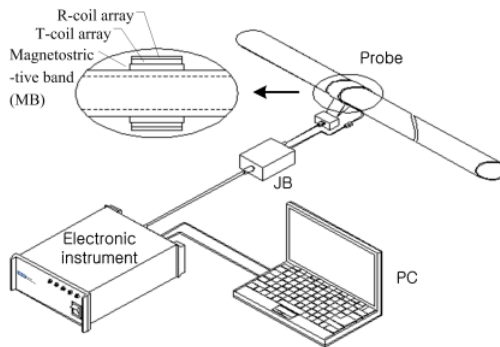


Fig. 2 Experimental setup

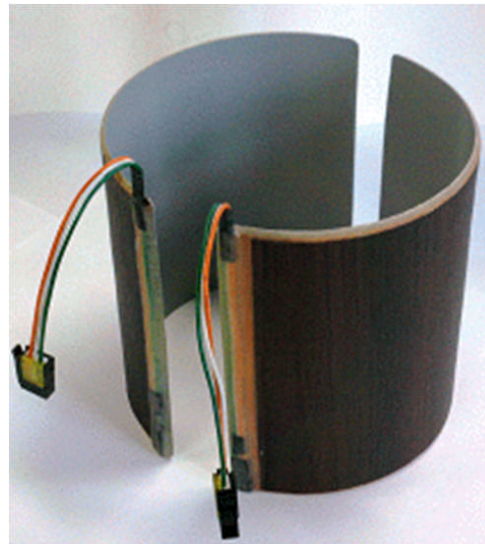


Fig. 3 Ring type dual magnetostrictive band

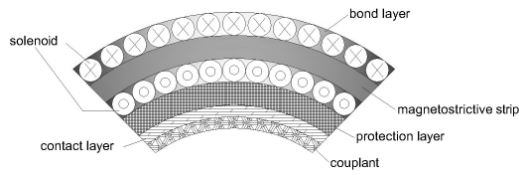


Fig. 4 Schematic drawing of a subband

위해 테프론으로 코팅된 접촉층(contact layer) 등으로 구성되었다. 솔레노이드와 보호층은 음향학적으로 결합되도록 에폭시로 접착되었다. 솔레노이드의 양단은 Fig. 3에서 볼 수 있었던 커넥터로 연결된다. 이 커넥터를 이용하여 솔레노이드에 직류 전류를 가할 때, 바이어스 자기장이 자왜스트립 내에 형성된다. 두 서브 밴드는 바이어스 자기장의 방향이 같도록 위치되어야 한다. 두 서브 밴드에서의 커넥터들은 직류전원(12 V)에 연결된 중계 커넥터에 병렬로 연결된다. 개별 솔레노이드는 직경이 0.2 mm인 에나멜 동선으로 만들어졌으며 그 직류 저항은 약 120 Ω이었다. 그래서 개별 솔레노이드에는 0.1 A의 정도의 전류가 흐른다.

MB를 감싸는 송수신 코일 배열은 자왜스트립들내에서 파이프 축 방향과 나란한 동자기장을 형성시키거나 탐지한다. 서로 수직한 바이어스 자기장과 동자기장의 간섭은 자왜스트립들내에서 SH0 모드 피도파의 송수신을 허용한다. 이 SH0 모드와 파이프 시편에서의 T(0,1) 모드는 매우 유사한 특성을 갖고 있어 서로 쉽게 변환될 수 있다.

Fig. 5는 실험에 사용된 송수신 코일 배열들의 펼쳐진 모습을 보여주는 사진이다. 이들의 길이와 폭은 약 0.5 m와 112 mm로 모두 동일하였다. 이중코일 배열에서는 각각 네 개의 단자를 갖는 두 개의 커넥터를 포함하고 단층코일 배열에서는 여덟 개의 단자를 갖는 한 커넥터를 포함하고 있음을 볼 수 있다. Table 1은 이들 코일 배열의 특성을 보여준다. 두 코일 배열에서 사용된 개별 나선형 코일의 간격(b)은 56 mm로 모두 동일하지만 그 다리 폭(w)은 서로 다르다는 것을 볼 수 있다: 단층과 이중 코일 배열에서의 다리 폭은 각각 14 mm와 28 mm이었다. 그래서 도선의 크기, 감은 수, 직류저항 등의 특성들에서도 서로 다르다.

사용된 코일 배열들은 개별 나선형 코일의 두

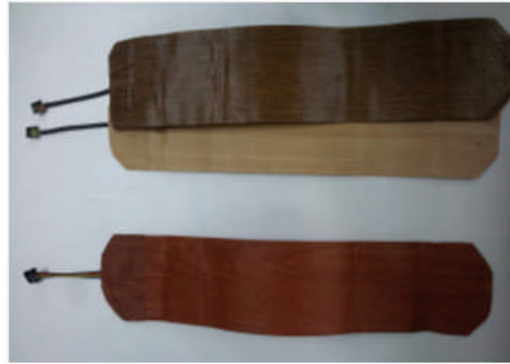


Fig. 5 Photo of single(bottom side) and double (upper side) layer arrays of two-channel transmitting and receiving spiral coils

Table 1 Characteristics of two-channel transmitting and receiving spiral coil arrays used in the experiment

RF coil array (0.5-m length, 112-mm width)		spiral coil				
		leg interval (b mm)	leg width (w ;mm)	conductor size (mm)	number of turns	DC resistance (Ω)
single layer	transmit	56	14	0.2 x 7	2	0.6
	receive	56	14	0.2 dia.	67	46
double layer	transmit	56	28	0.2 x 7	4	0.5
	receive	56	28	0.2 dia.	134	93

다리 사이의 간격(56 mm)의 두 배에 해당하는 파장(112 mm)을 갖는 피도파를 효율적으로 송수신한다. 탄소강 파이프에서 T(0,1)모드 피도파의 전파속도(약 3230 m/s)를 고려하면 이 코일 배열들은 30 kHz 정도의 중심주파수를 갖는 전기 펄스의 사용에 의해 적절히 구동될 수 있음을 알 수 있다. 본 실험에서는 30 kHz, 2사이클의 사각(rectangular) 펄스를 초당 4개씩 발생시키도록 전기펄스를 조종하였다. 수신증폭기의 이득은 0 dB로 고정하였고 비디오 형태의 파형을 선택하였으며 중심주파수의 50%에 해당하는 대역폭(15 kHz)을 갖는 가우시안(Gaussian) 필터를 사용하였다. 신호 수집을 위한 샘플링 주파수와 샘플링 포인트의 수는 각각 1.25 MHz와 2500으로 설정하였다. 이후의 실험 절차는 아래와 같았다. 1) 탐촉자 우측의 파이프 시편 영역이 검사되도록 피도파의 송신방향과 수신방향을 조종한다. 2) 송신 전기펄스의 크기를 결정하는 값(이하 송신 펄스 진폭조종 값)을 500으로 설정한다(GWR320

시스템에서 이 값은 0과 4095 사이에서 선택될 수 있으며 송신 전기펄스의 크기는 이 값과 함께 증가한다. 특히 500과 3500 사이의 영역에서는 이 값이 커짐에 따라 송신 전기펄스의 크기는 멱(exponential)함수로 증가한다. 이 값은 실제 펄스 증폭기의 증폭이득을 조종하는, 0 V와 2 V 사이의 전압에 해당된다. 3) 100 개의 송신펄스에 대한 수신 신호들을 수집하여 그 평균화된 신호 데이터를 저장한다. 4) 송신펄스 진폭조종 값을 200씩 증가시키면서 그 값이 3500이 될 때까지 위 과정 3을 반복한다. 5) 탐촉자 좌측의 파이프 시편 영역이 검사되도록 피도파의 송신방향과 수신방향을 변경한다. 6) 위 과정 2로부터 4까지를 반복한다.

4. 결과 및 논의

Fig. 6은 탐촉자 좌/우측의 파이프 시편 부위에 대한 검사 결과 신호들을 하나로 합성한 예들을 보여준다. 위쪽과 아래쪽 예는 각각 단층코일 배열과 이중코일 배열에 의해 탐지된 신호들을 보여준다. 개별 검사부위에 대한 개별 코일 배열의 신호는 채널-1 코일과 채널-2 코일에 의해 탐지된 신호들을 두 채널 사이의 간격(b)에 기인한 위상 차이를 고려하여 더한 신호이다[13]. 이 그림에서 MB, PE1, PE2, X는 각각 메인-뱅 에코, 파이프 양끝 에코들, 그리고 송신 및 수신 두 과정 모두에서 의도된 것과 반대로 진행된 피도파에 의한 역방향 에코[14]를 의미한다. 탐촉자 좌측의 파이프 부위에 대한 신호들에서는 파이프 좌측 끝 에코(PE1)만이 보이나 우측 부분에 대한 신호들에서는 파이프 우측 끝 에코(PE2)와 함께 좌측 끝으로부터의 역방향 에코(X)가 보인다. 두 그래프의 y축 스케일에서 두 배의 차이가 있음을 주목하면, 단층코일 탐촉자의 감도가 이중코일 탐촉자의 그것에 비해 반(1/2) 정도로 작아졌음을 볼 수 있다. 물론, 이는 수신코일의 감은 수 차이 때문일 것이다. 그런데 두 경우 모두에서, 탐촉자로부터 가까운 PE1 에코의 크기가 먼 PE2 에코의 크기보다 오히려 작음을 볼 수 있다. 이는 큰 메인-뱅 신호들에 의해 포화된 수신증폭기의 불완전한 회복 때문일 것이다.

Fig. 7은 송신펄스 진폭조종 값에 따른 파이프 양끝 에코들의 진폭 변화를 보여준다. 이 진폭

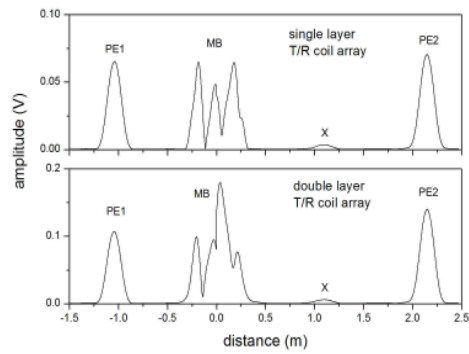


Fig. 6 Echo signals detected by the single and double layer transmitting and receiving spiral coil probes in the pipe specimen

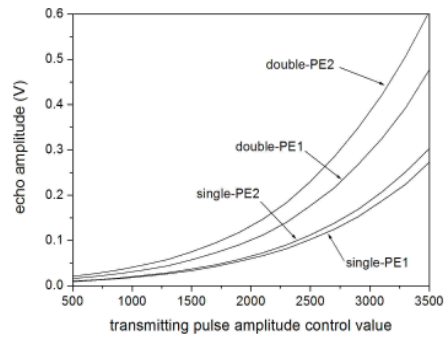


Fig. 7 Variation of the pipe end echo amplitudes according to transmitting pulse amplitude control values

조종 값이 증가함에 따라, 즉 송신 전기펄스의 진폭이 커짐에 따라, 수신에코 진폭의 증가율과 양끝 에코들의 진폭 차이가 커짐을 볼 수 있다. 이중코일 배열보다는 단층코일 배열에 대한 이 증가율과 진폭 차이가 훨씬 작다. 이는 단층코일 배열에서의 송수신 코일들 사이의 상호작용이 이중코일 배열의 그것보다 훨씬 작다는 것을 암시한다.

Fig. 8은 송신펄스 진폭조종 값에 따른 두 탐촉자의 지향성의 변화를 보여준다. 각각의 지향성 값은 다음 식에 의해 계산되었다:

$(1 - A_X/A_{PE2}) \times 100$, 여기서 A_X 와 A_{PE2} 는 각각 에코 X와 에코 PE2의 최대 크기를 의미한다. 모든 지향성은 송신 송신펄스의 진폭과는 거의 무관하고 이중코일 탐촉자의 지향성이 단층코일 탐촉자의 지향성보다 조금 좋아 보인다. 그러나 후자는 수신증폭기의 회복시간 차이에 기인한 역

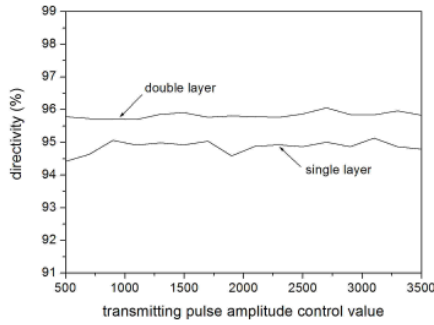


Fig. 8 Directivity variation according to transmitting pulse amplitude control values

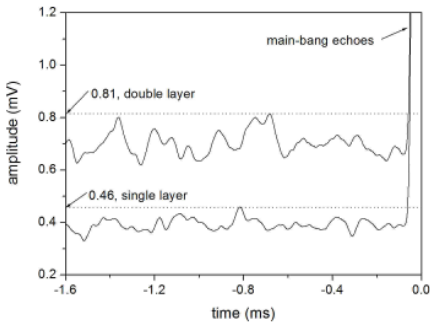


Fig. 9 Typical noises and main-bang echoes detected by the single and double layer transmitting and receiving spiral coil probes (receiving amplifier gain = 20 dB)

방향 에코의 걸보기 진폭의 감소 때문인 것으로 생각된다. 이 점을 고려한다면, 두 탐촉자의 실제 지향성은 거의 대등한 것으로 판단된다.

SNR(signal-to-noise ratio)을 평가하기 위한 추가 실험을 수행하였다. 탐촉자 우측의 파이프 시편 부위가 검사되도록 송수신 방향성을 조종하였고 낮은 크기를 갖는 잡음(noise)들의 보다 쉬운 측정을 위해 수신증폭기의 이득을 20 dB로 증가시켰다. 그리고 오실로스코프의 프리-트리거 데이터 수집 기능을 이용하여 메인-뱅 에코가 샘플링 포인트 수의 95%(2375 개)에 해당되는 시간에 나타나도록 신호표시화면을 조정한 후 백(100)개의 송신펄스에 대해 평균화된 수신신호들을 수집하였다. Fig. 9는 이렇게 수집된 신호들의 전형적인 예들을 보여준다. 여기서 우측 끝 부근에서 급격히 증가하는 데이터는 메인-뱅 에코의 시작을 가리킨다. 메인-뱅 에코 이전에 보이는 데이터들로부터 잡음의 크기를 평가할 수 있다. 이 경우 단

층 및 이중코일 탐촉자들에 대한 잡음의 크기는 각각 0.46 mV와 0.81 mV 이하이었다. 단층코일 탐촉자에 대한 잡음의 편차가 이중코일 탐촉자에 대한 그것보다 상당히 작다는 것을 또한 볼 수 있다. 이 추가실험 과정에서 얻은 다른 중요한 결과는 측정된 잡음의 크기가 송신펄스 진폭조종 값에 관계없이 거의 일정하다는 것이었다. 이는 SNR의 송신펄스 진폭조종 값에 대한 의존성이 Fig. 7에 나타내었던 것과 유사한 경향을 갖는다는 것을 가리킨다. 예로써, 송신펄스 이득 조종 값이 2048이고 수신이득이 20 dB일 때, 단층코일 탐촉자와 이중코일 탐촉자에 대한 PE2 에코의 크기는 각각 0.73 V와 1.43 V이었다. 잡음의 최대크기에 대한 PE2 에코의 크기의 비로부터, 이 경우 두 탐촉자의 SNR이 64 dB와 65 dB 정도로 거의 대등하다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

중심 주파수에서 1/4 파장 정도의 다리 폭을 갖는 기존의 나선형 코일들을 1/8 파장 정도의 다리 폭을 갖는 나선형 코일들로 대체하고 이 다리 폭의 감소에 기인한 빈 공간들을 활용하면, 보다 쉬운 사용과 제조를 허용하는 단층구조를 형성하도록 송수신 코일들을 배열할 수 있다. 다리 폭에 비례하는 수신 코일 감은 수의 감소 때문에 단층 코일 배열의 감도는 대응되는 이중배열의 감도의 반(1/2) 정도로 저하되지만 이는 메인-뱅 에코에 기인한 포화로부터 수신증폭기의 보다 빠른 회복을 허용한다. 지향성과 SNR의 관점들에서는 두 배열이 거의 대등한 성능을 갖는다.

후 기

본 연구는 중소기업청, 한국동서발전주식회사, 무리기술주식회사가 공동으로 지원하는 중소기업 기술개발과제(S2077147)의 일환으로 수행되었으며 이에 감사를 표한다.

참고문헌

- [1] 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*, Vol. SU-13, No. 2, pp. 33-41 (1966)
- [2] H. Kwun, S. Y. Kim and G. Light, "Long-range guided wave inspection of structures using the magnetostrictive sensor," *J. KSNT*, Vol. 21, No. 4, pp. 383-390 (2001)
- [3] Y. M. Cheong, "Experimental evidence and analysis of a mode conversion of guided wave using magnetostrictive transducer," *J. KSNT*, Vol. 29, No. 2, pp. 93-97 (2009)
- [4] S. J. Kim and M. S. Choi, "Magnetic property effect of the strip on transducer sensitivity in a magnetostrictive strip type guided wave transducer," *J. KSNT*, Vol. 28, No. 2, pp. 205210 (2008)
- [5] M. S. Choi, S. J. Kim and W. N. Heo, "Method for manufacturing spiral coil, the spiral coil, and electro-magnetic acoustic transducer including the same," *Kor. Patent* 10-1018554 (2011)
- [6] M. S. Choi and S. J. Kim, "Contact SH-guided-wave magnetostrictive transducer," *Kor. Patent* 10-1068350 (2011)
- [7] Y. G. Kim, "Self magnetization MsS sensor," *Kor. Patent* 10-0987730 (2010)
- [8] S. A. Vinogradov, "Method and system for generating and receiving torsional guided waves in a structure," *US Patent* 7821258B2 (2010)
- [9] F. Bertoncini, M. Raugi and F. Turcu, "Pipeline long-range inspection and monitoring by an innovative magnetic collar for magnetostrictive guided wave systems," www.ndt.net (December 2008)
- [10] Y. G. Kim, "Self magnetization MsS sensor for detecting circumferential direction of examinee defect," *Kor. Patent* 10-1068148 (2011)
- [11] M. S. Choi and W. N. Heo, "Spiral coil magnetostrictive strip transducers for long range ultrasonic testing of cylindrical structures," *J. KSNT*, Vol. 28, No. 5, pp. 416-420 (2008)
- [12] M. S. Choi, W. N. Heo and J. K. Jun, "Design and fabrication of the spiral coils for guided wave magnetostrictive transducers," *J. KSNT*, Vol. 28, No. 6, pp. 496-503 (2008)
- [13] W. N. Heo, H. T. Lim, T. G. Kim and M. S. Choi, "A software approach for the realtime received signal processing in magnetostrictive long-range ultrasonic testing," *J. KSNT*, Vol. 32, No. 5, pp. 540-544 (2012)
- [14] M. S. Choi and W. N. Heo, "Realtime identification of the propagation direction of received echoes in long-range ultrasonic testing," *J. KSNT*, Vol. 33, No. 1, pp. 69-72 (2013)