

유도초음파를 이용한 수중 강관의 기계적 결함 검출

우동우* · 나원배*

*부경대학교 해양공학과

Mechanically Fabricated Defects Detection on Underwater Steel Pipes using Ultrasonic Guided Waves

Dongwoo Woo* and Won-Bae Na*

*Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Ultrasonic guided waves 유도초음파, Underwater steel pipe 수중 강관, Mechanically fabricated defects 기계적 결함, Detection 검출, Incident angle 입사각

ABSTRACT: This study presents a detection method for mechanically fabricated defects on underwater steel pipes, using ultrasonic guided waves. Three different diameters (60, 90, and 114 mm) of 1000-mm long steel pipes were considered, along with several experimental design factors such as incident angles, incident distances, and the degrees of defects, to investigate how these factors affected the experimental results - the detectability of the mechanical defects. From the experimental results, we determined that the amplitude and arrival time of the first received wave signals gave a promising clue for distinguishing the existence of the defects and their severities. Between the amplitude and arrival time, the arrival time gave a more promising indication since it was affected by the experimental factors in a constant manner. Therefore, it was shown that the use of ultrasonic guided waves for underwater pipe inspection is feasible.

1. 서 론

해양에 설치된 수중 파이프라인에서 발생하는 가장 일반적인 손상은 파이프 외벽에 발생하는 기계적 손상과 부식이다 (Macdonald et al., 2007). 일련의 기계적 손상과 부식은 파이프라인의 누수(Leakage) 현상으로 발전할 수 있으며 종종 해양의 오염, 발전 플랜트 및 시추장비의 가동중지 등과 같은 사회적 불안감 및 산업적 손실을 초래한다(Tien et al., 2007). 해저 송유관에 결함이 발생하여 원유가 유출되면 1989년 3월 24일 알래스카에서 발생한 엑손 발데즈호와 2007년 12월 7일 서해안에서 발생한 허베이 스피리트호의 원유유출사고와 유사한 환경오염이 발생되며 이로 인해 초래되는 환경복구 비용과 시간은 실로 막대하다(이문진과 김혜진, 2009). 엑손 발데즈호의 경우 연안의 원유 제거 비용만 25억 달러가 들었으며(Ott, 2005), 허베이 스피리트호의 경우 환경이 완전히 복구되는 데 앞으로 20년이 걸릴 것이라 전망되었다(정종관, 2008). 따라서 파이프라인에 결함이 발생하기 전 손상정도를 예측하는 기술이 필요하며 정기적인 파이프라인의 검사로 파이프라인의 손상을 발견하고 손상의 정도에 따른 보수 또는 재생을 실시하여야 한다. 이 때 손상 검사는 신뢰할 수 있고 경제적이어야 하며 외부환경에 민감하지 않아야 한다.

현재 파이프라인의 정기적인 안전검사에는 다양한 비파괴검

사 기법이 활용되고 있는데 수중 파이프라인을 검사하는 비파괴 검사법은 크게 네 가지로 구분 할 수 있다(Na and Kundu, 2002). 첫째, 잠수부 또는 ROV(Remote operated vehicle)가 물속에서 소형 비파괴검사 장비를 활용하여 수중파이프의 손상을 검사하는 것이다. 고가의 검사장비 구입이 없어 초기 비용이 적고 검사법이 간단하다. 하지만 수십 km에 달하는 파이프라인을 검사하는데 많은 시간이 소요되며 손상에 대한 판단도 잠수부와 ROV 운영자의 지식과 경험에 의존해야 하는 단점이 있다 (Na and Kundu, 2002).

둘째, 파이프라인 검사 시 스마트 피그(Smart pig)를 사용하는 방법이다. 이 방법은 누설자속(Magnetic flux) 및 초음파 탐촉자 등을 탑재한 스마트 피그를 파이프 내부로 이송시켜 파이프 내부 결함을 검사하는 방법이다(Gloria et al., 2009). 비교적 안정된 기술로써 신뢰성이 검증된 상태이다(Crump and Papenfuss, 1991). 그러나 이 방법은 파이프라인의 일부 또는 전체의 가동을 중지하여 검사를 실시하여야 하고 장치구입 및 설치, 유지에 소요되는 비용이 고가이고, 스마트 피그를 내부로 이송시키고 다시 밖으로 빼낼 수 있는 진입 및 출구 장치가 필요하다는 단점이 있다. 따라서 직경이 크고 길이가 긴 파이프에만 적용 가능하다.

셋째, 파이프라인에 가동 내압의 120% 수준인 물 또는 특수 유체를 진입시키고, 누수에 의한 압력강하를 모니터링하거나

파이프라인의 외부에서 누수를 육안으로 확인하는 방법이다. 이 방법 또한 파이프라인의 일부 또는 전체의 가동을 중지하여 검사를 실시해야 하며, 심각한 상태의 결함만 검출할 수 있어 사고 대책마련이 시급하다는 단점이 있다(Committee on the Safety of Marine Pipelines, 1994).

마지막으로, 파이프라인 외부에 모니터링 센서를 부착 또는 삽입하여 손상을 검사하는 것이다. 이 방법은 스마트 피그와 달리 가동 중인 파이프라인에도 사용이 가능하고 따로 진입장치가 필요하지 않은 장점이 있다. 하지만 아직까지 개발의 정도가 떨어지고 수중에서의 사용성에 관한 검증이 필요하다는 단점이 있다(Na and Kundu, 2002).

이들 비파괴검사법의 결함탐지, 크기추정, 결함형식 구별, 위치식별, 건전도 평가라는 5가지 기능을 확보하기 위한 연구개발 및 신기술 확보사업은 비파괴 검사 및 평가(Nondestructive testing and evaluation), 스마트 센서(Smart sensor), 구조 건전성 모니터링(Structural health monitoring) 등의 분야에서 수행되고 있으며 점차적으로 그 중요성이 증대되고 있다. 하지만 현재 기술 수준으로는 상기의 5가지 기능을 통합하는 비파괴검사법 및 해석기술의 확보는 쉽지 않다.

파이프라인 외부에서 사용 될 수 있는 비파괴검사법의 종류는 다양하지만 초음파, 음향 방출법 등의 음향의 정보를 이용하는 음향법(Acoustic method)은 여타의 검사법에 비하여 상대적으로 간편하고 용도가 넓다(Pan et al., 1999; Achenbach, 2000; 안석환 등, 2002). 특히 파이프라인의 기하학적 특성에 의해 유도되어지는 유도초음파(Ultrasonic guided waves)는 전파거리가 길어 장거리 파이프라인의 검사에 유리한 것으로 알려져 있다(Nishino et al., 2006). 유도초음파를 활용한 파이프라인의 비파괴검사법에 관한 연구는 유도초음파의 전파거리, 분산, 감쇠, 결함 민감 모드 등에 관한 이론 및 수치시뮬레이션에 관한 연구와 이를 기반으로 한 실험에 의한 실증연구로 대별된다(Alleyne and Cawley, 1995; 1996; Lowe et al., 1998; Aristégui et al., 2001; Na and Kundu, 2002; Lohr and Rose, 2003; Long et al., 2003; Cheong et al., 2004; Na et al., 2005; Ma et al., 2006).

이들 연구 중 수중 파이프라인의 비파괴검사에 유도초음파를 활용한 실험적 연구(Na and Kundu, 2002)는 알루미늄 파이프의 기계적 손상을 연구한 것으로서 변환된 주파수 신호의 차이로 손상유무와 손상형식을 식별하였다. 이 방법은 결함식별을 위해서 무결함 파이프라인으로부터 수신된 기준신호(Baseline signal)가 반드시 필요하며 동일한 파이프 직경, 입사각, 입사거리를 사용함으로써 이들 변화에 따른 결함검출 여부를 검증하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 유도초음파를 이용하여 다양한 직경을 갖는 수중 강관(Underwater steel pipe)의 기계적 결함을 검출하고자 한다. 연구목적을 달성하기 위해 먼저 실험에 사용될 파이프의 직경(60mm, 90mm, 114mm)을 선택하였고 세 가지 실험일자(입사각, 입사거리, 파이프 결함 깊이)를 선택하여 이들이 결함검출에 미치는 영향을 분석하였다. 실험에서 수조의 진동이나 해수의 운동(파랑, 유동)이 없는 것으로 간주하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 사용된 피 검사체인 강관의 치수를 Table 1에 나타내었다. 강관 결함 깊이에 따른 신호특성을 알기 위하여 동일한 규격의 강관 3본을 준비하였다. 이들 강관을 Fig. 1에 나타내었는데 Fig. 1(a)는 무결함 상태의 강관을, Fig. 1(b)는 강관 두께의 절반 깊이에 해당하는 결함(Half cut)이 가공된 강관을, Fig. 1(c)는 완전히 관통하는 결함(Full cut)이 가공된 강관을 나타낸다. 이들 결함은 강관 끝으로부터 500mm 떨어진 곳에서 원주길이의 40%까지 그라인더를 사용하여 가공되었다. 결함 깊이와 길이의 결정은 결함 깊이가 파이프 두께의 50%를 초과하거나 결함 길이가 원주방향으로 원주길이의 40%를 초과하면 반사계수가 급격히 증가한다는 연구결과(박경조, 1999)를 반영하여 결정되었다. 강관을 V자형 나무블록으로 단순 지지하였는데, 이는 V자형 지지에 의한 파동의 반사가 매우 작다는 연구결과(Alleyne and Cawley, 1996)를 반영한 것이다.

실험 모식도를 Fig. 2에 나타내었다. 펄스-리시버는 RPR-4000을 사용하였고 수신신호는 오실로스코프를 통하여 획득하였다. 사용된 수침용(Immersion) 탐촉자의 중심 주파수는 1MHz이다. 실험은 앞서 설명한 세 가지 실험일자에 맞추어 진행되었다.

Table 1 The dimensions of steel pipes

Outside diameter	Wall thickness	Length
60 mm	3.65 mm	1000 mm
90 mm	4.05 mm	1000 mm
114 mm	4.05 mm	1000 mm

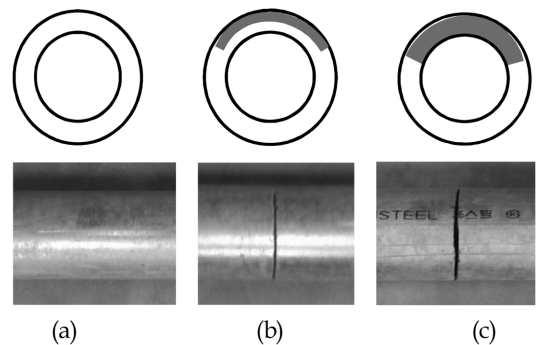


Fig. 1 Defect types fabricated in steel pipes: (a) no damage, (b) defect with half cut, and (c) defect with full cut

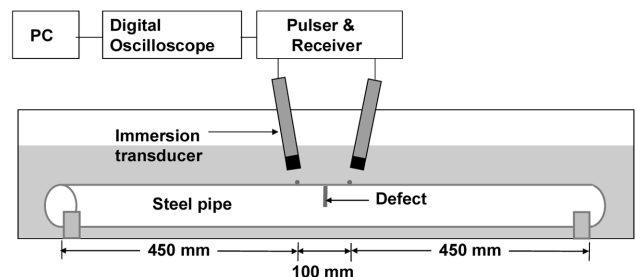


Fig. 2 Schematic diagram of experiment equipment

첫째, 입사각을 달리하여 실험을 수행하였다. 이는 초음파가 두 매질의 경계면을 통과할 때 발생하는 굴절과 모드변환이 입사각에 영향을 받기 때문이다. 본 연구에서는 10°와 20°의 입사각을 사용하였다. 이는 강관의 재료적 성질(밀도 = 7800g/mm³, 종파속도 = 5850m/sec, 횡파속도 = 3230m/sec)과 Snell의 법칙에 따르면 10°의 입사각에서는 종파와 전단파의 신호가 함께 전달되고 20°의 입사각에서는 종파는 모두 반사되며 전단파만 강관에 전달되기 때문이다. 둘째, 입사거리를 달리하여 실험을 수행하였다. 입사거리가 커질수록 강관과의 거리가 멀어져서 가진 신호가 강관에 도달할 때까지 유체의 영향을 받는다. 이런 영향으로 발생하는 현상을 고려하기 위해 본 연구에서는 50mm와 200mm의 입사거리를 사용하였다. 셋째, 결함 결함 깊이를 달리하여 실험을 수행하였다. 결함의 크기가 커질수록 강관 두께의 단면이 작아지므로 강관 단면을 따라 전파하는 유도초음파에 미치는 영향이 달라지기 때문이다. 요약하면, 입사각, 입사거리, 결함 깊이를 달리하여 이들 인자가 유도초음파를 활용한 결함 검출에 미치는 영향을 분석하였다.

3. 실험결과

먼저 60mm 강관에서 입사각, 입사거리, 결함 깊이에 대한 신호특성을 알아보았다. Fig. 3은 60mm 직경 강관, 10° 입사각, 50mm 입사거리에서 결함 크기에 따른 시간신호를 나타낸다. Fig. 3(a)은 무결함 강관, Fig. 3(b)는 절반 결함을 갖는 강관, Fig. 3(c)은 관통 결함을 가진 강관에서 취득된 신호를 각각 나타낸다. 이들 신호를 보다 정밀히 분석하기 위해 Fig. 4에 0.00005에서 0.00015sec에 해당하는 구간의 신호를 확대하여 나타내었다. Fig. 4에 점선 사각형 구간은 취득된 신호의 첫 번째 부분으로써 이들 신호의 최고 봉우리(Peak)의 진폭(Amplitude)과 도달시간(Arrived time)을 각각 구하여 Table 2에 나타내었다. 이와 같은 방법으로 입사각이 20°인 경우와 입사거리가 200mm인 경우의 진폭과 도달시간도 Table 2에 각각 나타내었다. 또한, Table 3과 Table 4에 90mm와 114mm 직경을 갖는 강관에서 취득된 첫 번째 신호의 진폭과 도달시간을 각각 나타내었다. 이들 Table의 결과로부터 무결함 강관인 경우의 진폭이 최대이고 결함이 커질수록 진폭이 작아지는 것을 알 수 있으며, 도달시간의 경우는 결함이 큰 관통 결함의 도달시간이 절반 결함의 도달시간보다 늦으며, 무결함 강관의 경우의 도달시간이 가장 빠르다는 것을 알 수 있다. 예외적인 결과가 114mm 직경의 강관에서 입사각이 10°이고 입사거리가 50mm인 경우에 발생하는데 이때는 절반 결함인 경우의 진폭이 무결함의 경우보다 크다. 그러나 도달시간을 비교하면 이 경우도 역시 일반적인 실험결과를 따르고 있다. 즉, 무결함인 경우의 도달시간이 절반 결함인 경우보다 빠르다.

Tables 2~4의 결과를 보다 효과적으로 비교하기 위해 Figs. 5~10에 그림으로 나타내었다. Fig. 5는 60mm 직경 강관을 통과한 유도초음파 첫 수신신호의 최고 봉우리 진폭을 입사각, 입사거리, 결함정도에 따라 나타낸 것이며, Fig. 6은 이들 경우의 도달시간을 나타낸 것이다. Fig. 7과 Fig. 8은 90mm 직경 강관의

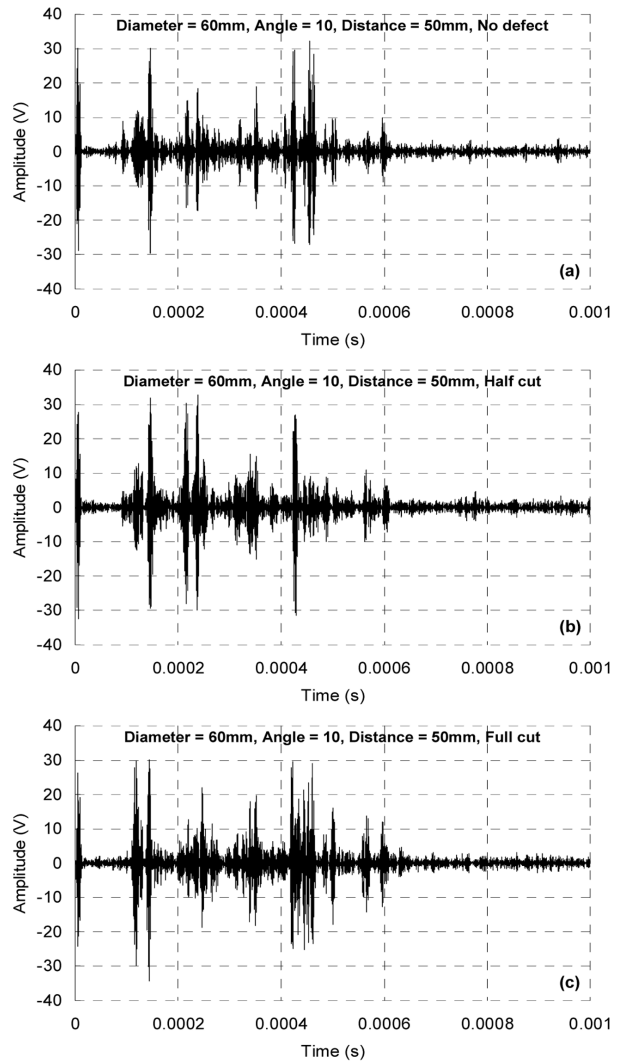


Fig. 3 Received signals from the pitch-catch arrangement in the cases of (a) no defect, (b) defect with half cut, and (c) defect with full cut

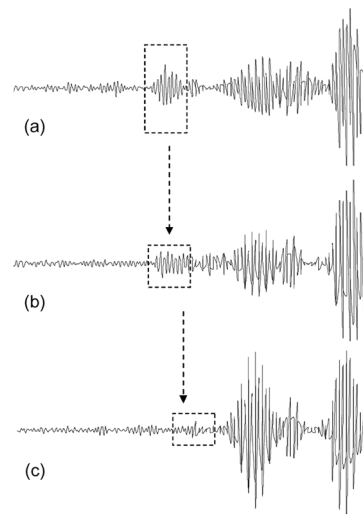


Fig. 4 A detailed figure of Fig. 3 over 0.0001sec

Table 2 Amplitude and arrived time of the first received signals traveled through the 60 mm-diameter steel pipe

Inc. angle	Distance	Damage	Amplitude (V)	Time (μ s)
10°	50 mm	No defect	8.86	93
		Half cut	4.52	94
		Full cut	3.46	101
	200 mm	No defect	7.98	290
		Half cut	6.85	290
		Full cut	5.50	292
20°	50 mm	No defect	32.32	95
		Half cut	10.26	98
		Full cut	10.21	106
	200 mm	No defect	14.85	298
		Half cut	3.52	312
		Full cut	1.43	312

Table 3 Amplitude and arrived time of the first received signals traveled through the 90 mm-diameter steel pipe

Inc. angle	Distance	Damage	Amplitude (V)	Time (μ s)
10°	50 mm	No defect	7.22	95
		Half cut	4.03	104
		Full cut	2.02	106
	200 mm	No defect	29.10	288
		Half cut	14.92	295
		Full cut	11.49	299
20°	50 mm	No defect	7.22	100
		Half cut	1.87	112
		Full cut	1.35	114
	200 mm	No defect	9.97	308
		Half cut	6.98	308
		Full cut	6.30	310

Table 4 Amplitude and arrived time of the first received signals traveled through the 114 mm-diameter steel pipe

Inc. angle	Distance	Damage	Amplitude (V)	Time (μ s)
10°	50 mm	No defect	11.08	89
		Half cut	12.67	90
		Full cut	4.74	92
	200 mm	No defect	17.62	290
		Half cut	11.90	290
		Full cut	7.73	292
20°	50 mm	No defect	10.01	110
		Half cut	5.63	110
		Full cut	1.11	113
	200 mm	No defect	10.37	294
		Half cut	5.29	308
		Full cut	1.43	310

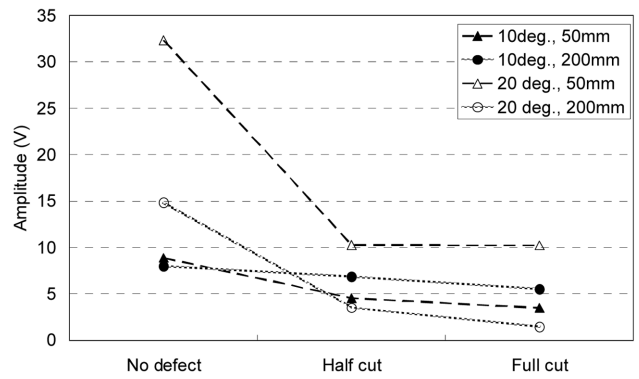


Fig. 5 Amplitude of the first received signals in the cases of 60 mm-diameter steel pipes with no defect, half cut defect, or full cut defect, respectively

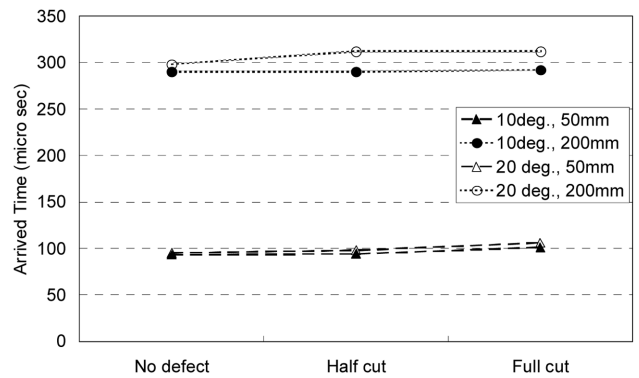


Fig. 6 Arrived time of the first received signals in the cases of 60 mm-diameter steel pipes with no defect, half cut defect, or full cut defect, respectively

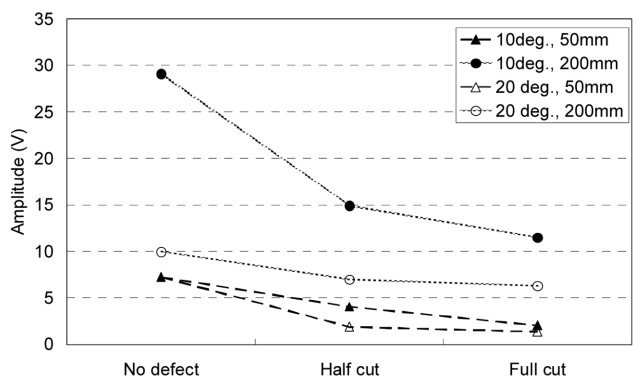


Fig. 7 Amplitude of the first received signals in the cases of 90 mm-diameter steel pipes with no defect, half cut defect, or full cut defect, respectively

진폭 및 도달시간을 Fig. 9와 Fig. 10은 114mm 직경 강관의 진폭 및 도달시간을 각각 나타낸다.

이들 결과를 입사각, 입사거리에 따라 분석하면 Figs. 6, 8, 10에서 보듯이 입사거리가 50mm인 경우(삼각형 기호)가 200mm인 경우(원형 기호)보다 신호 도달시간이 빠른 것을 알 수 있고,

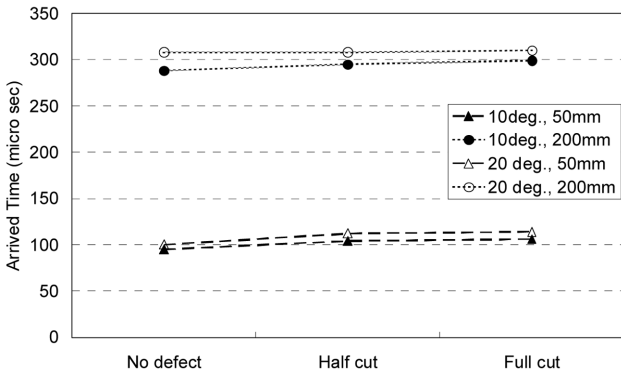


Fig. 8 Arrived time of the first received signals in the cases of 90 mm-diameter steel pipes with no defect, half cut defect, or full cut defect, respectively

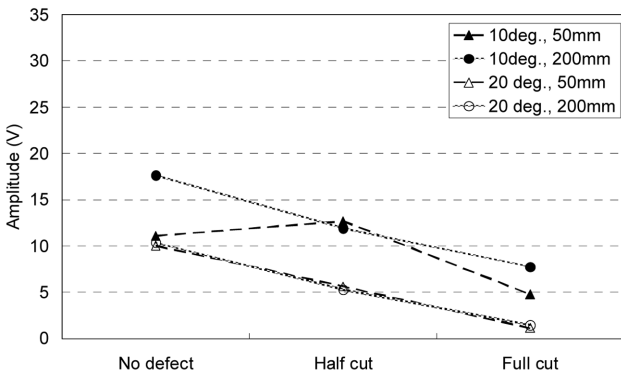


Fig. 9 Amplitude of the first received signals in the cases of 114 mm-diameter steel pipes with no defect, half cut defect, or full cut defect, respectively

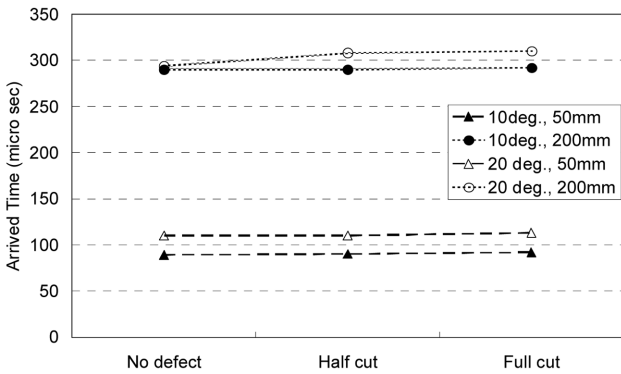


Fig. 10 Arrived time of the first received signals in the cases of 114 mm-diameter steel pipes with no defect, half cut defect, or full cut defect, respectively.

입사각이 10°인 경우(검은 기호)가 20°인 경우(흰 기호)보다 신호 도달시간이 빠른 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 탐촉자와 강관과의 거리가 짧을수록 그리고 종파와 전단파의 신호가 함께 전파될 때(즉 입사각이 10°인 경우) 유도초음파의 도달이 빠르다는 것을 의미한다. 물론 이와 같은 결과는 입사각 및 입

사거리의 특정 범위 내에서만 해당된다. 반면에 Figs. 5, 7, 9에서 보듯이 입사각과 입사거리의 시간 신호의 진폭에 일관적인 영향을 미치지 못한다. 즉, 진폭은 입사각과 입사거리에 무관하게 강관의 직경에 따라 그 크기가 달라짐을 알 수 있는데, 결과적으로 강관의 직경이 작을수록 진폭이 크다. 이것은 유도초음파의 에너지가 작은 단면에 더 집중되어 전파되기 때문이다. 참고로 60mm, 90mm, 114mm 강관의 단면적은 각각 646mm², 1093mm², 1398mm²이다.

결함 검출의 관점에서 살펴보면 Tables 2, 3, 4에서 나타낸바와 같이 진폭(Figs. 5, 7, 9)과 도달시간(Figs. 6, 8, 10)은 결함의 깊이에 따라 일관적인 경향을 나타낸다. 즉, 결함이 클수록 진폭은 작아지고 도달시간은 늦어진다. 이것은 결함이 유도초음파의 전파를 단절시키기 때문이다. 강관의 직경, 입사각, 입사거리에 따라 그 값의 차이가 매우 작거나 같은 경우가 발생하나 전반적으로 진폭과 도달시간의 차이로 결함의 크기를 검출할 수 있다. 여기서 주목해야 할 것은 무결함, 절반 결함, 관통 결함의 값들을 연결하면 진폭은 선형적인 변화를 나타내지 못하나 도달시간은 비교적 선형적인 변화를 나타내고 있다는 것이다. 따라서 입사각과 입사거리에 일관적인 결과를 나타내며 결함 간에 선형적인 변화를 보이는 도달시간이 결함검출에 보다 신뢰적인 도구로 사용될 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 유도초음파를 이용하여 60mm, 90mm, 114mm 직경을 갖는 수중 강관의 기계적 결함(절반 결함, 관통 결함)을 검출하였다. 결함검출 시 입사각(10°, 20°)과 입사거리(50mm, 200mm)를 달리하여 실험을 수행하였으며 이들 인자가 결함 검출에 미치는 영향을 분석하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 입사거리가 50mm인 경우가 200mm인 경우보다 신호 도달 시간이 빠르다. 이와 같은 결과는 탐촉자와 강관과의 거리가 짧을수록 강관에 전파되는 유도초음파가 빨리 생성됨을 의미한다.
- (2) 입사각이 10°인 경우가 20°인 경우보다 신호 도달 시간이 빠르다. 이와 같은 결과는 종파와 전단파의 신호가 함께 전파될 때(즉 입사각이 10°인 경우) 유도초음파의 도달이 빠르다는 것을 의미한다.
- (3) 입사각과 입사거리는 신호의 진폭에 일관적인 영향을 미치지 못하나 강관의 직경이 작을수록 진폭이 크다. 이것은 유도초음파의 에너지가 작은 단면에 더 집중되어 전파되기 때문이다.
- (4) 진폭과 도달시간은 결함의 크기에 따라 달라진다. 즉, 결함이 클수록 진폭은 작아지고 도달시간은 늦어진다.
- (5) 강관의 직경, 입사각, 입사거리에 따라 진폭과 도달시간의 차이가 매우 작거나 같은 경우가 발생하나 전반적으로 진폭과 도달시간의 차이로 결함의 크기를 검출할 수 있다.
- (6) 진폭과 도달시간 차이 모두 결함검출 인자로 사용할 수 있으나 입사각과 입사거리에 일관적인 결과를 나타내며 결함 간에 선형적인 변화를 보이는 도달시간이 결함검출에 보다 신뢰적인 도구로 사용될 수 있다.

후 기

이 논문은 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2008-331-D00589).

참 고 문 헌

- 박경조 (1999). "파이프 원주방향 결합에 의한 유도파 반사", 여수대학교 논문집, 제14권, 제2호, pp 217-225.
- 안석환, 남기우, 김선진, 김진환, 김현수, 박인덕 (2002). "감속배관의 손상모드에 따른 음향방출 특성", 한국해양공학회지, 제16권, 제5호, pp 66-72.
- 이문진, 김혜진 (2009). "해양유류오염사고 위험도 평가에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제23권, 제1호, pp 24-30.
- 정종관 (2008). "서해안 원유유출사고와 해안지역 생태복구", 국토, 통권317호, pp 118-125.
- Achenbach, J.D. (2000). "Quantitative Nondestructive Evaluations", International Journal of Solids and Structures, Vol 37, pp 13-27.
- Alleyne, D.N. and Cawley, P. (1995). "The Long Range Detection of Corrosion in Pipes Using Lamb Waves", Review in Progress of Quantitative. Nondestructive Evaluation, Vol 14B, eds., D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, New York, NY, pp 2073-2080.
- Alleyne, D.N. and Cawley, P. (1996). "The Effect of Discontinuities on the Long Range Propagation of Lamb Waves in Pipes", Journal of Process Mechanical Engineering, Proc. I Mech. E, Part E 210, pp 217-226.
- Aristégui, C., Lowe, M.J.S. and Cawley, P. (2001). "Guided Waves in Fluid-Filled Pipes Surrounded by Different Fluids", Ultrasonics, Vol 39, pp 367-375.
- Cheong, Y.M., Lee, D.H. and Jung, H.K. (2004). "Ultrasonic Guided Wave Parameters for Detection of Axial Cracks in Feeder Pipes of PHWR Nuclear Power Plants", Ultrasonics, Vol 42, pp 883-888.
- Committee on the Safety of Marine Pipelines (1994). Improving the Safety of Marine Pipelines, National Research Council, National Academic Press, Washington DC.
- Crump, H.M. and Papenfuss, S. (1991). "Use of Magnetic Flux Leakage Inspection Pigs for Hard Spot Detection and Repair", Materials Performance, Vol 30, No 6, pp 26-28.
- Gloria, N.B.S., Areiza, M.C.L., Miranda, I.V.J. and Rebello, J.M.A. (2009). "Development of Magnetic Sensor for Detection and Sizing of Internal Pipeline Corrosion Defects", NDT&E International, Vol 42, pp 669-677.
- Lohr, K.R. and Rose, J. (2003). "Ultrasonic Guided Wave and Acoustic Impact Methods for Pipe Fouling Detection", Journal of Food Engineering, Vol 56, pp 315-324.
- Long, R., Lowe, M.J.S. and Cawley, P. (2003). "Acoustic Wave Propagation in Buried Iron Water Pipes", Proceeding of Royal Society Series A, Vol 459, pp 2749-2770.
- Lowe, M.J.S., Alleyne, D.N. and Cawley, P. (1998). "Defect Detection in Pipes using Guided Waves", Ultrasonics, Vol 36, pp 147-154.
- Ma, J., Simonetti, F. and Lowe, M. (2006). "Scattering of the Fundamental Torsional Mode by Axisymmetric Layer Inside a Pipe", Journal of Acoustical Society of America, Vol 120, pp 1871-1880.
- Macdonald, K.A., Cosham, A., Alexander, C.R. and Hopkins, P. (2007). "Assessing Mechanical Damage in Offshore Pipelines-Two Case Studies", Engineering Failure Analysis, Vol 14, pp 1667-1679.
- Na, W.B. and Kundu, T. (2002). "Underwater Pipeline Inspection Using Guided Waves", Transactions of ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol 124, pp 196-200.
- Na, W.B., Ryu, Y.S. and Kim, J.T. (2005). "Attenuation of Fundamental Longitudinal Cylindrical Guided Wave Propagating in Liquid-Filled Steel Pipes", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol 19, No 5, pp 26-33.
- Nishino, H., Yoshida, K., Cho, H. and Takemoto, M. (2006). "Propagation Phenomena of Wideband Guided Waves in a Bended Pipe", Ultrasonics, Vol 44, pp 1139-1143.
- Ott, R. (2005). Sound Truth and Corporate Myths: The Legacy of the Exxon Valdez Oil Spill, Dragonfly Sisters Press.
- Pan, E., Rogers, J., Datta, S.K. and Shah, A.H. (1999). "Mode Selection of Guided Waves for Ultrasonic Inspection of Gas Pipelines with Thick Coating", Mechanics of Materials, Vol 31, pp 165-174.
- Tien, S.W., Hwang, W.T. and Tsai, C.H. (2007). "Study of a Risk-Based Piping Inspection Guideline System", ISA Transactions, Vol 46, pp 119-126.

2009년 12월 14일 원고 접수

2010년 2월 2일 심사 완료

2010년 2월 4일 게재 확정