

## 배관부 감육 손상의 비파괴 평가를 위한 레이저 초음파 기술 적용

### Application of Laser Ultrasonic Technique for Nondestructive Evaluation of Wall Thinning in Pipe

홍경민\*, 강영준\*\*†, 박락규\*\*\*, 윤석범\*\*

Kyung-Min Hong\*, Young-June Kang\*\*†, Nak-Kyu Park\*\*\* and Suk-Bum Yoon\*\*

**초 록** 원자력 발전소의 많은 배관들은 고온, 고압 환경에서 사용되고 있으며, 부식에 의한 감육 손상이 빈번하게 발생하고 있다. 이러한 배관의 감육 손상은 원전 설비가 노후화됨에 따라 점차 증가할 것으로 예상된다. 따라서, 배관 부식에 의한 원전 설비의 사고를 예방하기 위해 배관부의 감육 손상 및 부식 결함을 비파괴적인 방법으로 평가할 필요가 있다. 특히, 원자력 발전소의 배관에서 발생하는 감육 손상을 실시간으로 평가하기 위한 레이저 초음파 기술은 기존의 접촉식 방법이 가지는 한계를 넘어 접근이 어려운 부위에서도 측정이 가능하다. 본 연구에서는 비파괴, 비접촉식 평가를 위해 레이저를 이용한 광학적 방법을 적용하였다. 펄스 레이저로 초음파를 발생시키고 레이저 간섭계를 이용하여 초음파 신호를 획득하였으며, 먼저 감육 손상이 없는 배관에서의 초음파 신호를 검출하여 배관 내에서의 종파 속도를 측정하였다. 그리고, 배관의 두께대비 20, 30, 40, 50%의 인위적인 감육 배관을 제작하여 종파 속도를 측정하였다. 측정된 종파 속도를 이용하여 감육 배관의 두께를 계산할 수 있고, 감육 손상 부분(내부결함 깊이)의 정량적 평가도 가능하였다.

**주요용어:** 레이저 초음파, 펄스 레이저, 레이저 간섭계, 배관, 감육, 비파괴 평가

**Abstract** Many of the nuclear power plant pipe is used in high temperature and high pressure environment. Wall thinning frequently caused by the corrosion. These wall thinning in pipe is expected gradually increase as nuclear power become superannuated. Therefore there is need to evaluate wall thinning in pipe and corrosion defect by non-destructive method to prevent the accident of the nuclear power facility due to pipe corrosion. Especially for real-time assessment of the wall thinning that occurs in nuclear power plant pipe, the laser ultrasonic technology can be measured even in hard-to-reach areas, beyond the limits of earlier existing contact methods. In this study, the optical method using laser was applied for non-destructive and non-contact evaluation. Ultrasonic signals was acquired through generating ultrasonic by pulse laser and using laser interferometer. First the ultrasonic signal was detected in no wall thinning in pipe, then a longitudinal wave velocity was measured inside of pipe. Artificial wall thinning specimen compared to 20, 30, 40 and 50% of thickness of the pipe was produced and the longitudinal wave velocity was measured. It was possible to evaluate quantitatively the wall thinning area(internal defect depth) cause it was able to calculate the thickness of each specimen using measured longitudinal wave velocity.

**Keywords:** Laser Ultrasonic, Pulse Laser, Laser Interferometer, Pipe, Wall Thinning, Nondestructive Evaluation

#### 1. 서 론

최근 2004년도 일본 미하마 원자력 발전소의 2차 계통에서 부식 손상에 의하여 배관부가 파열되는 사고가 발생하였으며, 이와 같은 사고는 미

국 Surry 원전에서도 발생한 적이 있는 비교적 발생 가능성이 높은 손상이다. 이러한 배관의 감육 손상은 원전 설비가 노후화됨에 따라 점차 증가할 것으로 예상된다. 경제성을 고려할 때 모든 배관을 부식에 강한 재질로 교체하는 것은 비현

[접수일: 2013. 3. 18, 수정일: 2013. 7. 19, 게재확정일: 2013. 7. 26] \*전북대학교 대학원 기계설계학과, \*\*전북대학교 기계설계공학부, \*\*\*한국원자력연구원, †Corresponding Author: Department of Mechanical Design Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea (E-mail: yjkang@jbnu.ac.kr)

실적이므로 배관의 건전성 평가를 통하여 감육 손상을 진단하고 손상된 배관의 보수 및 교체하는 것이 합리적이다. 배관부의 감육 손상 및 부식 결함을 평가하는 비파괴적인 방법이 활발하게 연구되어 왔다[1,2]. 비파괴 평가 분야에 있어서 초음파는 적용 매질의 다양성, 안전성, 지향성 등 본질적인 특징 때문에 널리 사용되고 있다. 그러나, 기존의 초음파 기술에는 접촉성의 문제가 있다. 즉, 초음파 송수신 트랜스듀서를 재료에 부착시켜야 하는데 접촉 계면에서 초음파 투과 효율의 변화가 심하며 재료가 매우 고온의 경우에는 실제로 PZT 트랜스듀서를 부착시킬 수가 없기 때문에 음파의 발생조차도 불가능해지게 된다. 또한, 트랜스듀서로 초음파를 수신하기 위해서는 시편의 표면과 수직을 유지해야 한다. 비교적 평평한 시편에서는 수직 유지가 쉽게 이루어질 수 있으나 곡면이거나 복잡한 형태를 갖는 시편에서는 로봇 등과 같은 제2의 장치를 이용하여 수직 유지가 이루어지도록 측정되는 각 위치마다 트랜스듀서의 위치와 각도를 바로 잡아주어야만 한다. 이는 결국 검사 속도를 느리게 하고 복잡한 프로그램이 필요하게 된다. 배관부의 형상이 사용 목적에 따라 평면에 비해 더욱 복잡하게 될 것이고 배관 이음부 및 곡관에서와 같이 그 형태가 복잡한 경우에 트랜스듀서를 이용한 초음파 검사는 더욱 어렵고 느려지게 되며 검사를 수행하는데 소요되는 비용 또한 증가하게 될 것이다.

레이저를 이용한 초음파 검사의 장점은 비접촉식 초음파 송수신 기술이라는 것이다. 레이저에 의한 원격 초음파 생성과 더불어 초음파 전파에 의해 발생된 재료 표면 수직 변위를 레이저 간섭계를 이용하여 비접촉 방식으로 측정하는 방법이 레이저 초음파 기술이다[3]. 펄스 레이저 빔의 표면 조사에 의해 발생하는 초음파 신호는 압전 트랜스듀서에 의해 발생하는 초음파 신호에 비하여 광대역(100 kHz ~ 200 MHz) 스펙트럼을 갖는다.

작은 점으로 집속된 레이저 빔을 이용하여 초음파를 측정하므로 측정 분해능이 우수한 장점을 가지고 있다. 특히, 원자력 발전소의 배관에서 발생하는 감육 손상을 실시간으로 평가하기 위한 레이저 초음파 기술은 기존의 접촉식 탐상 기법이 가지는 한계를 넘어 접근이 어려운 부위에서도 측정이 가능하다[4-6]. 기존의 초음파 검사방법으로는 배관과 같이 평면이 아닌 원통형일 경

우에 트랜스듀서의 부착에 대한 어려움이 따르지만, 본 연구에서와 같이 광학적인 방법을 이용하면 초음파 발생과 수신 모두 비접촉식 방법이 가능하므로 재료의 표면 상태 및 형상에 관계없이 적용 가능하다는 장점이 있다.

배관부 감육 평가에 대한 기존의 레이저 초음파 연구에서는 초음파 수신을 위해 공기 정합 센서(air-coupled transducer)를 이용하였으나[7], 본 연구에서는 광학적인 방법으로 레이저 간섭계(confocal Fabry-Perot interferometer, CFPI)를 구성하여 초음파를 수신하였다. CFPI는 기존의 간섭계(도플러, 마이켈슨, 시그냐 간섭계 등)보다 주위 진동에 덜 민감하고 초음파 수신을 위한 장치의 정렬이 쉽다는 장점이 있으며 공간 분해능이 높아서 초음파 신호 검출에 적합하다. 광학적인 방법을 이용하여 초음파 신호 발생 및 수신 모두 검사 대상체에 대한 중간 매체가 필요 없는 완전한 비접촉 검사와 작업 거리 유지에도 유연성을 갖춘 원격 검사 시스템을 완성하였다.

본 연구에서는 Q-스위칭 된(Q-switched) 펄스 레이저를 사용하여 시편의 열탄성 영역 내에서 초음파를 발생시키고, CW 레이저와 confocal Fabry-Perot interferometer (CFPI)를 구성하여 초음파 신호를 획득하였다. 배관의 두께 대비 20, 30, 40, 50%의 인위적인 감육 배관을 방전 가공으로 제작하여 종파 신호의 도달 시간차를 측정하였다. 그 시간차를 이용하여 감육 배관의 두께를 계산할 수 있고, 감육 손상 부분(내부결함 깊이)의 정량적 측정이 가능하였으며, 스캔 장치를 이용하여 배관 감육부 내부결함의 단면 형상을 가시화할 수 있었다.

## 2. 이 론

### 2.1. 레이저를 이용한 초음파 발생

레이저에 의한 초음파 발생의 기본 원리는 고출력 펄스 레이저를 재료 표면에 조사하면 재료 표면과 매우 가까운 곳에서 에너지 흡수가 이루어진다. 이때 흡수되는 에너지에 의해 매우 짧은 시간 동안 고체 표면의 온도가 상승 및 하강하는 구배를 형성하며, 극히 짧은 시간 동안에 이루어지는 온도 구배는 재료 내의 순간적인 팽창을 야기하는 열탄성 효과로 나타나고, 고주파의 열탄

성 응력 및 변형률이 고체 내부로 전달되는 메커니즘이다. 펄스 레이저가 고체 표면에 입사되면 다양한 물리적 현상이 발생할 수 있는데, 저출력 레이저의 입사에 의해 열탄성 응력 및 변형률이 발생하는 열탄성 영역(thermoelastic area)과 고출력 레이저의 입사에 의해 용발이 발생하는 용발 영역(ablation area)으로 분류할 수 있다. 출력 밀도가  $10 \text{ mW/cm}^2$  이하인 저출력 펄스 레이저가 입사하는 경우에는 순간적인 가열에 의한 열과 탄성파가 발생한다. 열탄성 영역에서의 레이저 초음파의 전파는 전자기적 복사의 흡수에 따른 재료 내의 온도 분포 변화와 이에 뒤따르는 열탄성 응력의 발생에 의해 이루어진다. 고출력 펄스 레이저를 입사하는 경우에는 이러한 현상과 더불어 재료의 표면에서 물질이 용해되어 증발하는 용발 현상이 발생한다. 고체 재료로부터 이온과 전자가 방사되어 가시광선 영역의 불꽃을 내는 플라즈마(plasma)를 형성하며, 재료 내에서는 용융(melting)과 소성 변형뿐만 아니라 심지어는 균열까지 발생할 수도 있다. 그러므로 손상이 허용되지 않는 비파괴 시험 및 평가의 목적으로는 열탄성 영역에서의 레이저 초음파 발생을 필요로 한다[8].

2.2. Confoacl Fabry-Perot Interferometer[9]

Confocal Fabry-Perot interferometer (CFPI)는 동일한 특성을 갖는 두 개의 구형 거울(mirror)이 서로 마주보게 배치되어 있는 구조로 되어 있다. Fig. 1은 CFPI의 내부를 개략적으로 도시한 것으로서, 보이는 바와 같이 위치 3으로 입사된 레이저 광은 공동(cavity) 안에서 위치 1, 3, 2, 4를 거치고 나서 원래의 위치로 되돌아간다. 이 과정은 계속 반복되면서 위치 1에서 출력되는 동시에 투과광의 수를 무한히 증대시킨다. 부가적으로 투과광은 위치 2, 3, 4에서 발생되며 높은 성능을 갖는 초음파 측정을 위해서는 투과광인 위치 1, 2에서의 출력광과 반사광인 위치 3, 4에서의 출력광을 동시에 이용한다.

공초점 Fabry-Perot 간섭계는 평면 Fabry-Perot 간섭계 보다 정렬이 쉽고, 구면 거울의 한 쪽이 약간 기울어져도 광학 길이는 거의 변화가 없기 때문에 주파수 안정화의 기준 공진기로 사용될

때 높은 안정도를 유지할 수 있다. 또한, 거울 가공 시 구면 거울은 평면 거울보다 매끄럽게 할 수 있으므로 공진기의 finesse를 크게 할 수 있다. Table 1에서는 두 간섭계의 차이점을 정리하였다.

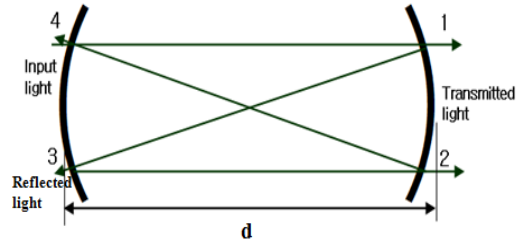


Fig. 1 Schematic diagram of CFPI

Table 1 Difference between plane-plane type and confocal type

	Plane-Plane Type	Confocal Type
Configuration		
Finesse	Small	Big
Alignment	Difficult	Easy
Degree of stability	Low	High

3. 시편 및 실험 방법

3.1. 감육 시편

본 연구에서는 두께 9 mm, 길이 300 mm, 지름(외경) 113 mm인 배관을 시편으로 사용하였다. 재질은 보일러 배관 및 원자력 발전소 배관으로 사용되는 SUS304이다. 인위적인 감육 상태를 만들기 위해 배관의 두께 대비 20, 30, 40, 50% 깊이의 결함을 방전가공 하였다. 즉, 내부결함의 깊이는 1.8, 2.7, 3.6, 4.5 mm이며, 크기는 32 mm × 24 mm인 직사각형 형태이다. Fig. 2는 실험에 사용된 감육 배관의 형상을 보여주고 있고, Table 2에서는 시편 5종에 대한 두께 대비 감육 손상 정도와 내부결함 깊이를 정리하였다.

Table 2 Information of wall thinning and defect depth

	Wall Thinning [%]	Defect Depth [mm]
Specimen 1	0	0
Specimen 2	20	1.8
Specimen 3	30	2.7
Specimen 4	40	3.6
Specimen 5	50	4.5

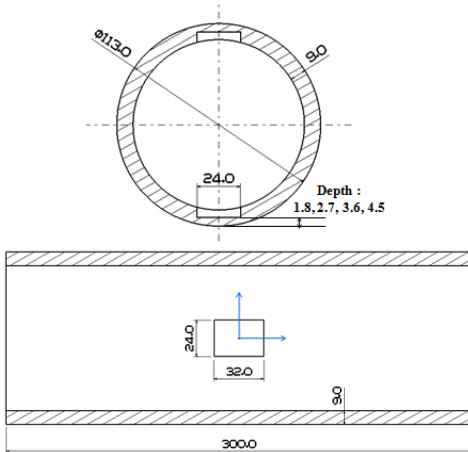


Fig. 2 Shape of wall thinning in pipe (unit: mm)

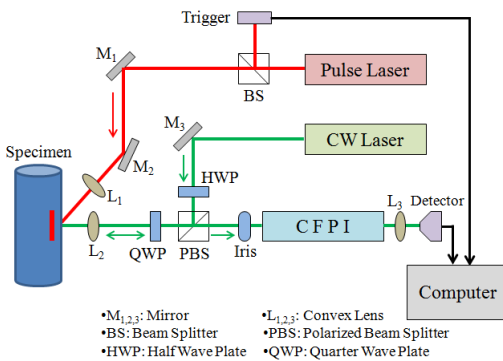


Fig. 3 Configuration of the laser ultrasonic system

3.2. 레이저 초음파 실험 방법

본 연구에서 초음파를 발생시키기 위해 사용된 펄스 레이저는 파장 1064 nm, Max. Avg. power 5W, energy/pulse < 0.5 J, 펄스 에너지 10 ~ 100 mJ, 펄스 폭 10 ns, 펄스 반복률은 10 Hz이다. 초음파를 수신하기 위한 CW 레이저는 파장

이 532 nm인 단파장 녹색광이며, 최대 출력은 200 mW이다.

레이저 초음파 시스템의 구성도는 Fig. 3과 같으며, BS(Beam splitter)와 mirror를 사용하여 펄스 레이저의 조사 방향을 조절하였다. 시편 앞쪽에 설치된 convex lens를 조절하여 거의 동일한 위치에서 초음파 송수신이 되도록 구성하였다. 이러한 방법으로 시편 내부에서 반사되어 돌아오는 초음파 신호(1,2차 종파)의 시간차를 계산하여 감속 손상부의 위치뿐만 아니라 깊이까지도 정량적인 평가가 가능하였다.

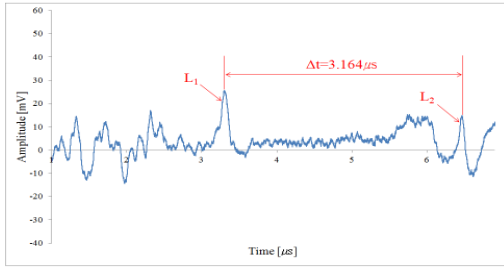
초음파를 발생시키는 펄스 레이저는 BS(Beam splitter)를 지나 두 개의 빔으로 분할되어 한쪽은 시편에 조사되어 순간적인 열에너지 유입에 의해 초음파를 발생시킨다. 레이저에 의해 생성된 초음파는 펄스 레이저 발진에서 데이터 수집까지 수  $\mu$ s 이내에서 진행되므로 간섭계를 이용한 초음파 신호 획득 장치를 펄스 레이저 발진에 맞춰 동기화하여 데이터를 수집하였다. 또한, 시편 표면의 용발 현상이 발생하지 않도록 펄스 레이저 Q-switch의 delay time을 350  $\mu$ s로 조절하였고 이때의 펄스 에너지는 약 0.4J 정도를 유지하였다.

레이저 초음파 신호를 수신하는 CW 레이저는 HWP(half wave plate)를 통하여 선형 편광되고, 편광된 레이저 빔은 PBS(polarized beam splitter)를 통과한 후, QWP(quarter wave plate)를 통하여 원형 편광되어 시편으로 향하게 된다. 시편 앞쪽에 convex lens를 설치하여 편광된 레이저 빔을 원하는 위치에 집중시킬 수 있다. 시편으로 향한 레이저 빔은 되돌아와 다시 QWP와 PBS를 통하여 CFPI(confocal fabry-perot interferometer)로 입사하게 된다. CFPI 앞에 iris를 설치하여 산란 및 반사되는 불필요한 noise를 차단시켰다. CFPI를 통과한 레이저 빔은 광검출기(detector)를 통해 전기적인 신호로 변환되어 오실로스코프와 다이내믹 안정기[10]를 거쳐 컴퓨터로 전송된다.

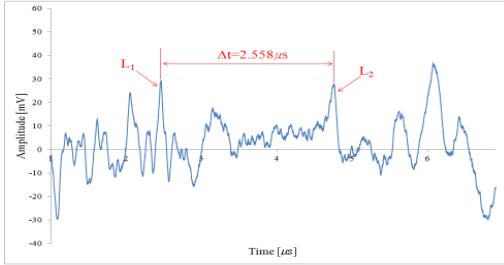
4. 실험 결과 및 고찰

4.1. 감속 손상에 따른 초음파 신호 비교

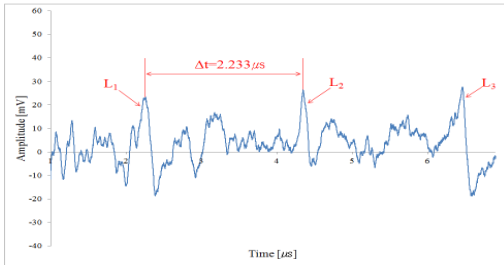
Fig. 4는 Fig. 3의 실험 방법으로 획득한 초음파 신호를 감속 손상에 따라 시간-진폭 그래프로 보여주고 있다. Fig. 4(a)는 감속 손상이 없는 배



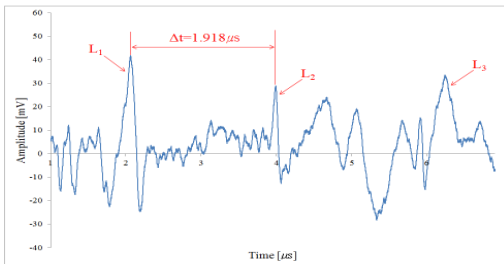
(a) Ultrasonic signal at intact area (specimen 1)



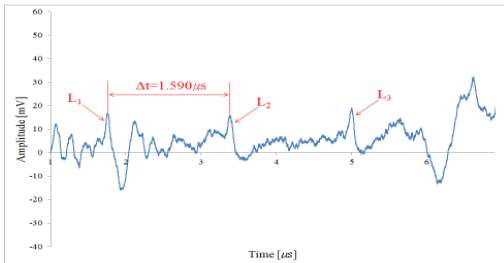
(b) Ultrasonic signal at 20% wall thinning (specimen 2)



(c) Ultrasonic signal at 30% wall thinning (specimen 3)



(d) Ultrasonic signal at 40% wall thinning (specimen 4)



(e) Ultrasonic signal at 50% wall thinning (specimen 5)

Fig. 4 Comparison of the received ultrasonic signals

관에서 검출된 초음파 신호이고, 4(b)에서 4(e)는 차례대로 배관의 두께 대비하여 20, 30, 40, 50% 감육 시편에서의 초음파 신호이다.

1차 종파(L<sub>1</sub>)는 초음파 발생 지점으로부터 시편 내부로 전이되어 안쪽 면을 맞고 돌아오는 신호이며, 2차 종파(L<sub>2</sub>)는 1차 종파 후에 다시 왕복하여 돌아온 신호를 검출한 것이다. 두께 방향으로의 감육 손상이 커질수록 1, 2차 종파의 시간차가 감소함을 알 수 있다. 감육 손상이 커질수록 상대적으로 배관의 두께가 얇아진 상태이므로 종파의 전파 거리가 짧아져서 도달 시간이 감소한 것이다.

SUS 계열의 매질 내에서의 종파 속도는 약 5.790 mm/μs이며, 이 속도를 기준으로 각 시편 (specimen 1~5)에서 측정된 종파 속도의 오차율을 계산한 데이터는 Table 3과 같다. 약 3%이내의 오차율을 보이는 결과로서, 실험 데이터의 신뢰도가 높음을 알 수 있다. 추가로 Fig. 5는 감육 손상에 따른 내부결함 깊이별로 이론값과 실험값을 비교한 그래프이다. 내부결함 깊이별로 초음파(종파)의 전파 시간이 선형적으로 변하며, 이론값과 거의 유사함을 볼 수 있다.

Table 3 Longitudinal velocity in wall thinning pipe

	Propagation time(Δt) [μs]	Propagation distance [mm]	Velocity [mm/μs]	Error rate [%]
Specimen 1	3.164	18.000	5.689	1.745
Specimen 2	2.558	14.400	5.629	2.781
Specimen 3	2.233	12.600	5.642	2.557
Specimen 4	1.918	10.800	5.630	2.764
Specimen 5	1.590	9.000	5.660	2.246

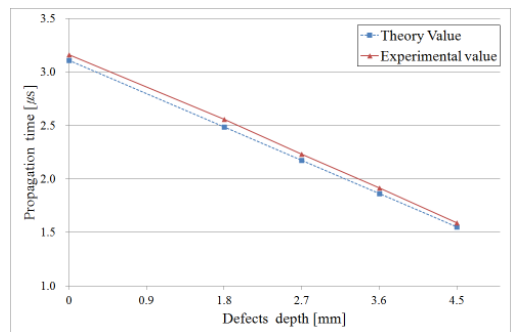


Fig. 5 Propagation time of ultrasonic for each defect

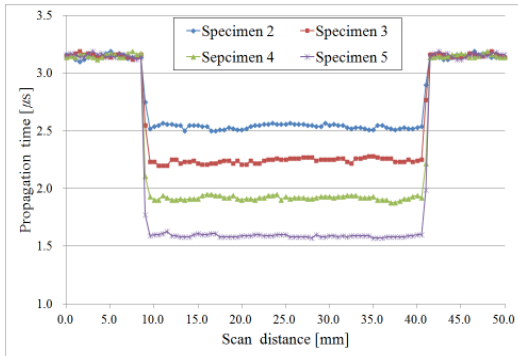


Fig. 6 Visualization of the cross-sectional shape of internal defects (specimen 2~5)

#### 4.2. 감육 손상에 따른 내부결함 가시화

Fig. 6은 마이크로미터를 부착한 이송장치를 이용하여 배관의 축 방향으로 50.0 mm를 0.5 mm만큼씩 스캔한 후, 종파의 도달 시간차를 계산하여 감육 손상에 따른 내부결함의 단면 형상을 가시화한 결과로서, 실제 결함 형상과 매우 근사한 값을 얻을 수 있었다. 감육 시편별로 내부결함의 깊이 차이를 쉽게 구별할 수 있기 때문에 배관 손상 여부를 파악할 수 있고, 그 심각성을 판단할 수 있을 것이다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 배관부의 감육 손상을 평가하기 위하여 레이저 초음파와 간섭계 실험 장치를 구성하였다. 초음파의 발신과 수신 모두 비파괴, 비접촉 검사 장치의 구현이 가능하였다. Q-스위칭된(Q-switched) 펄스 레이저를 사용하여 시편의 열탄성 영역 내에서 초음파를 발생시키고, CW 레이저와 confocal fabry-perot interferometer(CFPI)를 구성하여 초음파 신호를 획득하였다. 배관의 두께 대비 20, 30, 40, 50%의 인위적인 감육 배관을 방전 가공으로 제작하여 종파 신호의 도달 시간차를 측정하고, 그 결과를 이용하여 감육 손상에 의한 내부결함 깊이의 정량적 측정이 가능하였다. 본 연구를 통해 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1) 펄스 레이저, CW 레이저와 CFPI를 이용하여 초음파 발생 및 신호 획득이 가능하였으며, 각 시편별로 1, 2차 종파 신호를 획득할 수

있었다.

- 2) 1, 2차 종파의 시간차와 전파 거리를 이용하여 종파 속도를 계산하였고, 이론값과 비교하여 약 3%이내의 오차율을 얻었다.
- 3) 내부결함의 깊이가 커질수록 종파의 전파 시간이 감소하는 반비례 관계이고, 선형적으로 변하며, 이론값과 거의 유사하였다.
- 4) 감육 시편별로 내부결함의 깊이 차이를 쉽게 구별할 수 있었고, 스캔 장치를 이용하여 내부결함의 단면 형상을 가시화할 수 있었다.

향후에는 배관의 원주 방향으로 회전이 가능한 스캔 장치를 개발하여 축 방향뿐만 아니라 원주 방향으로도 스캔하게 되면 내부결함의 단면 형상을 더 구체적으로 가시화할 수 있을 것이다.

#### 후 기

"이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0024952)."

#### 참고문헌

- [1] J. D. Aassel, A. Le Burn and J. C. Badboux, "Generating acoustic waves by laser: theoretical and experimental study of emission source," *Ultrasonics*, Vol. 26, No. 5, pp. 245-255 (1998)
- [2] J. L. Rose, "A baseline and vision of ultrasonic guided wave inspection potential," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 124, No. 3, pp. 273-282 (2002)
- [3] C. B. Scruby and L. E. Drain, "Laser Ultrasonic: Techniques and Applications," Adam Hilger, New York, pp. 223-324 (1990)
- [4] C. B. Scruby, R. J. Dewhurst, D. A. Hutchins and S. B. Plamer, "Quantitative studies of thermally generated elastic waves in laser-irradiated metals," *Journal of Applied Physics*, Vol. 51, No. 12, pp. 6210-6216 (1980)
- [5] A. S. Murfin and R. J. Dewhurst, "Estimation of wall thinning in mild steel using laser ultrasound Lamb waves and a non-steady-state photo-emf detector," *Ultrasonics*, Vol. 40, No.

- 1-8, pp. 777-781 (2002)
- [6] R. E. Jr. Green, "Non-contact ultrasonic techniques," *Ultrasonics*, Vol. 42, No. 1-9, pp. 9-16 (2004)
- [7] S. W. Choi, J. H. Lee and Y. H. Cho, "Application of laser-based ultrasonic technique for evaluation of corrosion and defects in pipeline," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 25, No. 2, pp. 95-102 (2005)
- [8] S. S. Lee and T. S. Jang, "Understanding of laser-based ultrasonics," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 22, No. 1, pp. 74-87 (2002)
- [9] S. K. Park, S. H. Baik, H. K. Jung, Y. M. Cheong, B. H. Cha, N. K. Park and Y. J. Kang, "Depth detection of a thin aluminum plate in laser ultrasonic testing using a confocal fabry-perot laser interferometer," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 59, No. 5, pp. 3262-3266 (2011)
- [10] S. K. Park, S. H. Baik, M. C. Park, C. H. Lim and S. W. Ra, "Development of a laser-generated ultrasonic inspection system by using adaptive error correction and dynamic stabilizer," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 25, No. 5, pp. 391-399 (2005)