

펄스 레이저와 CFPI를 이용한 이종금속 접촉부의 이물질 측정에 관한 연구

A Study on the Measurement of Foreign Material in Dissimilar Metal Contact Using Pulse Laser and Confocal Fabry-Perot Interferometer

홍경민*, 강영준**†, 박락규***

Kyung-Min Hong*, Young-June Kang**† and Nak-Kyu Park***

초 록 레이저 초음파검사 장치는 레이저 빔을 이용하여 초음파 신호를 발생시키고 측정하는 비접촉식 결합 검사 장치이다. 이 장치는 펄스 레이저 빔을 이용하여 광대역 주파수 범위를 갖는 초음파 신호를 발생시키고 작은 점으로 집속된 레이저 빔을 이용하여 초음파 신호를 측정하므로 우수한 측정 분해능을 제공한다. 본 연구에서는 이종금속 접촉부식(갈바닉 부식) 현상을 레이저를 이용한 비파괴, 비접촉 방법으로 측정하였다. 부식된 부분에 이물질이 혼합되는 경우를 가정하고, 레이저 초음파 실험을 진행하였다. 시편의 뒷면에서 펄스 레이저로 초음파를 발생시키고, 같은 위치의 앞면에서 CW 레이저와 CFPI를 이용하여 초음파 신호를 획득하였다. 이물질이 존재하는 부분의 초음파 신호 특성을 분석하여 이물질의 위치 및 크기를 측정하였다.

주요용어: 레이저 초음파, 펄스 레이저, 레이저 간섭계, 이종금속, 부식, 이물질

Abstract A laser ultrasonic inspection system is a non-contact inspection device which generates and measures ultrasonics by using laser beam. A laser ultrasonic inspection system provides a high measurement resolution because the ultrasonic signal generated by a pulse laser beam has a wide-band spectrum and the ultrasonic signal is measured from a small focused spot of a measuring laser beam. In this study, galvanic corrosion phenomenon was measured by non-destructive and non-contact method using the laser. The case of mixed foreign material on the part of corrosion was assumed and laser ultrasonic experiment was conducted. Ultrasonic was generated by pulse laser from the back side of the specimen and ultrasonic signal was acquired from the same location of the front side using continuous wave laser and Confocal Fabry-Perot Interferometer(CFPI). The characteristic of the ultrasonic signal of exist foreign material part was analyzed and the location and size of foreign material was measured.

Keywords: Laser Ultrasonic, Pulse Laser, Confocal Fabry-Perot Interferometer, Dissimilar Metal, Corrosion, Foreign Material

1. 서 론

레이저 초음파 장치는 펄스 레이저 빔을 이용하여 초음파 신호를 발생시키고 레이저 간섭계를 이용하여 발생된 초음파 신호를 측정하는 비접촉식 결합검사 장치이다[1,2]. 펄스 레이저 빔의 표면 조사에 의해 발생하는 초음파 신호는 일반적

인 압전 트랜스듀서에 의해 발생하는 초음파 신호에 비하여 광대역 스펙트럼을 갖는 초음파가 발생되며, 작은 점으로 집속된 레이저 빔을 이용하여 초음파를 측정하므로 측정 분해능이 우수한 장점을 가지고 있다. 또한, 비접촉식 측정이므로 고온 구조물 및 곡면이나 접근이 어려운 구조물 등에도 적용할 수 있는 장점이 있다. 그러나 레

[접수일: 2013. 3. 18, 수정일: 2013. 4. 15, 게재확정일: 2013. 4. 17] *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)

이저 초음파 시스템은 상대적으로 고가이며 신호 대 잡음 비율이 낮은 단점이 있다. 현재 레이저 간섭계의 검출 효율을 높이기 위한 다양한 연구가 활발히 수행 중에 있다. 특히, Dewhurst와 Shan 등은 공초점 Fabry-Perot 레이저 간섭계(CFPI: confocal Fabry-Perot interferometer)에서 초음파 검출을 위한 투과 모드와 반사 모드에서의 이론적인 모델링을 연구하였으며 투과광과 반사광을 결합하여 초음파를 측정함으로써 측정 이득을 크게 향상시켰다[3].

특히, 원자력발전소의 배관에서 발생하는 부식 및 기계 구조물, 이종금속간의 접촉부식을 비파괴적인 방법으로 평가할 때, 레이저 초음파 검사 시스템이 적용되고 있다. 부식에 의한 사고를 예방하기 위해 사전에 부식결함을 평가할 필요가 있다. 기존의 초음파검사 방법의 한계성인 센서의 직접적인 접촉 또는 액체 등의 접촉 매질을 적용해야 한다는 단점을 극복한 비접촉식 레이저 초음파 방법들이 개발 및 적용되고 있다[4,5].

본 연구에서는 이종금속 접촉부식(galvanic corrosion) 현상을 레이저를 이용한 비파괴, 비접촉 방법으로 측정하였다. 부식된 부분에 이물질이 혼합되는 경우를 가정하고, 레이저 초음파 실험을 진행하였다. Q-스위칭된(Q-switched) 펄스 레이저를 사용하여 시편의 열탄성영역 내에서 초음파를 발생시키고, CW 레이저와 CFPI(confocal Fabry-Perot interferometer)를 구성하여 초음파 신호를 획득하였다. 시편의 뒷면에서 초음파를 발생시키고, 같은 위치의 앞면에서 초음파 신호를 획득하도록 실험장치를 구성하였다. 이물질이 존재하는 부분의 초음파 신호 특성을 분석하여 이물질의 위치 및 크기를 영상화 하였다.

2. CFPI의 기본원리

CFPI (confocal Fabry-Perot interferometer)는 동일한 특성을 갖는 두 개의 구형 거울(mirror)이 서로 마주보게 배치되어 있는 구조로 되어 있다. Fig. 1은 CFPI의 내부를 개략적으로 도시한 것으로, 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 위치1에서 출력되는 동시에 투

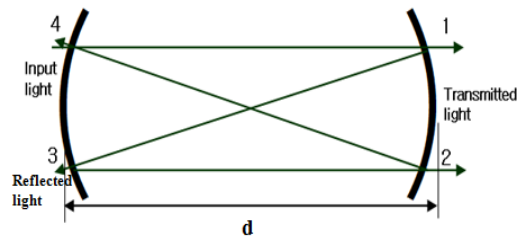


Fig. 1 Schematic diagram of CFPI

과광의 수를 무한히 증대시킨다. 부가적으로 투과광은 위치 2, 3, 4에서 발생되며 높은 성능을 갖는 초음파 측정을 위해서는 투과광인 위치 1, 2에서의 출력광과 반사광인 위치3, 4에서의 출력광을 동시에 이용한다.

공초점 Fabry-Perot 간섭계는 평면 Fabry-Perot 간섭계보다 정렬이 쉽고, 구면거울의 한 쪽이 약간 기울어져도 광학 길이는 거의 변화가 없기 때문에 주파수 안정화의 기준공진기로 사용될 때 높은 안정도를 유지할 수 있다. 또한, 거울 가공시 구면거울은 평면거울보다 매끄럽게 할 수 있으므로 공진기의 finesse를 크게 할 수 있다.

3. 시편 및 실험방법

3.1. 이종금속 시편

본 연구에서는 이종금속 접합을 위해 텅스텐과 알루미늄 시편을 사용하였다. 시편은 100 mm × 33 mm 크기의 직사각형 형태이며, 텅스텐의 두께는 1 mm, 알루미늄의 두께는 0.5 mm 이다.

Fig. 2는 이종금속 시편의 개략적인 형상을 보여주고 있다. 텅스텐 시편의 중앙부에 크기는 10.0 mm × 5.0 mm의 직사각형 형태이고, 깊이는 0.2 mm인 인위적인 결함을 정밀가공한 후, 결함 부위에 플라스틱 재질의 이물질을 삽입하였다. 그리고, 알루미늄 시편을 접합시켜 두께 1.5 mm의 이종금속 시편을 제작하였다. 이종금속 접촉부에 부식에 의한 이물질이 혼합되는 경우를 재현하고, 초음파 특성을 분석하는 실험의 목적에 맞도록 시편을 제작한 것이다. Table 1은 실험에 사용된 텅스텐과 알루미늄의 기계적 물성에 대해 정리한 것이다.

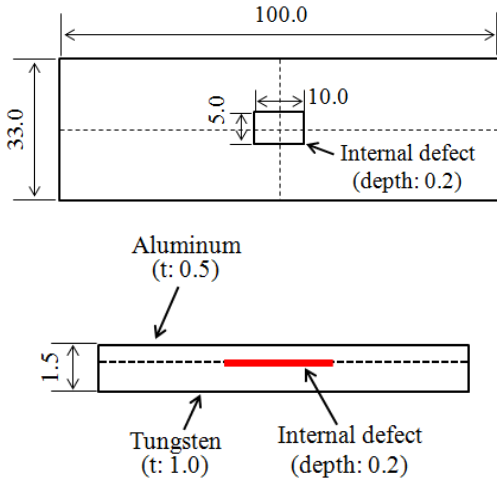


Fig. 2 Shape of dissimilar metal (unit : mm)

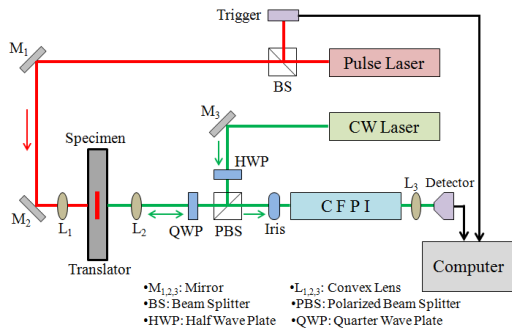


Fig. 3 Configuration of the laser ultrasonic system

Table 1 Mechanical property of tungsten and aluminum

	E (modulus of elasticity) [GPa]	Y (yield stress) [MPa]	v (poisson's ratio)
Tungsten	69~79	35~550	0.31~0.34
Aluminum	350~400	550~690	0.27

3.2. 레이저 초음파 실험 방법

본 연구에서 초음파를 발생시키기 위해 사용된 펄스 레이저는 파장 1064 nm, Max. Avg. power 5W, energy/pulse < 0.5J, 펄스 에너지 10 ~ 100 mJ, 펄스 폭 10 ns, 펄스 반복률은 10 Hz이다. 초음파를 수신하기 위한 CW 레이저는 파장이 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 앞, 뒤에 설치된 convex lens를 조절하여 거의 동일한 위치에서 초음파 송수신이 되도록 구성하였다. 초음파를 발생시키는 펄스 레이저는 BS를 지나 두 개의 빔으로 분할되어 한쪽은 시편에 조사되어 순간적인 열에너지 유입에 의해 초음파를 발생시킨다. 레이저에 의해 생성된 초음파는 펄스 레이저 발진에서 데이터 수집까지 수 μ s 이내에서 진행되므로 간섭계를 이용한 초음파 신호 획득장치를 펄스 레이저 발진에 맞춰 동기화하여 데이터를 수집하였다. 또한, 펄스 레이저 Q-switch의 delay time을 조절하여 시편 표면에서 용발현상이 발생하지 않도록 레이저 출력을 낮추어 재료의 열탄성영역 내에서만 실험하였다.

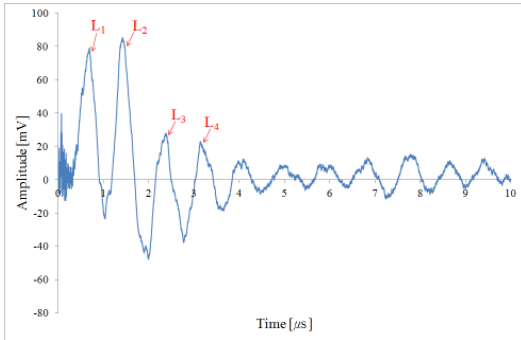
레이저 초음파 신호를 수신하는 CW 레이저는 HWP(half wave plate)를 통하여 선형편광되고, 편광된 레이저 빔은 PBS(polarized beam splitter)를 통과한 후, QWP(quarter wave plate)를 통하여 원형편광되어 시편으로 향하게 된다. 시편 앞쪽에 convex lens를 설치하여 편광된 레이저 빔을 원하는 위치에 집중시킬 수 있다. 시편으로 향한 레이저 빔은 되돌아와 다시 QWP와 PBS를 통하여 CFPI(confocal Fabry-Perot interferometer)로 입사하게 된다. CFPI 앞에 iris를 설치하여 산란 및 반사되는 불필요한 noise를 차단시켰다. CFPI를 통과한 레이저 빔은 광검출기(detector)를 통해 전기적인 신호로 변환되어 오실로스코프와 다이내믹 안정기[6]를 거쳐 컴퓨터로 전송된다.

4. 실험결과 및 고찰

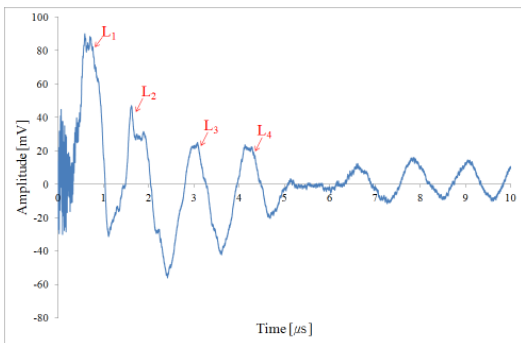
4.1. 투과파에 의한 초음파 신호 결과

Fig. 4는 Fig. 3의 실험 방법으로 획득한 초음파 신호를 시간-진폭 그래프로 보여주고 있다. Fig. 4(a)는 이물질이 없는 부분에서 검출된 초음파 신호이고, 4(b)는 이물질이 존재하는 부분에서의 초음파 신호이다. L₁~L₄는 종파 신호를 표시한 것으로서, 뒷면에서 초음파가 발생되어 시편 내부를 투과해서 첫 번째로 획득한 신호가 1차 종파(L₁)이고, 다시 시편 내부를 왕복하여 돌아온 신호가 2차종파(L₂)이다. 이물질이 없는 부분에 비해 이물질이 존재하는 부분에서 종파 신호의

주기가 점점 길어지는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 초음파가 텅스텐과 알루미늄 내부를 전이하면서 이물질이 존재하는 부분에서의 전이속도가 느려지기 때문이다. 하지만, 시간영역에서의 초음파 신호는 노이즈가 섞여 있어 명확한 구분이 쉽지 않다. 따라서, 시간영역의 초음파 신호를 주파수영역으로 변환하여 중심주파수 값을 비교하였으며, 그 결과는 Fig. 5와 같다. 이물질이 존재하는 부분에서 종파 신호의 주기가 길어지고, 초음파가 전이되는 과정에서 감쇠의 영향으로 중



(a) Ultrasonic signal at intact area



(b) Ultrasonic signal at foreign material area

Fig. 4 Comparison of the received ultrasonic signals

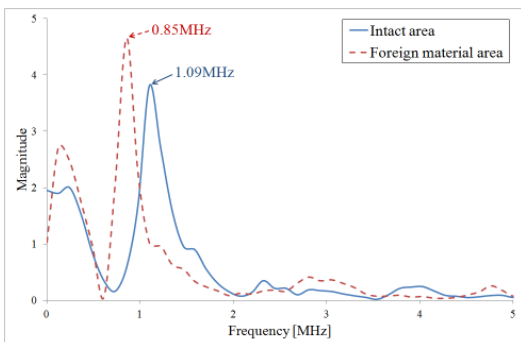


Fig. 5 Comparison of frequency spectrum

심주파수 값이 감소함을 알 수 있다. 이 주파수 스펙트럼 데이터를 이용하여 이물질이 존재하는 위치를 알 수 있고, 스캔장치를 이용하면 위치뿐만 아니라 크기도 알 수 있다.

4.2. 스캔장치를 이용한 이물질의 영상화

Fig. 6은 마이크로미터를 부착한 이송장치를 이용하여 x축 방향으로 20.0 mm를 0.5 mm만큼씩 스캔한 후, 각 지점에서의 중심주파수 값을 추출하여 이물질의 단면 형상을 가시화한 결과이다. 이물질이 포함된 부분이 x축 방향으로 약 10 mm임을 알 수 있다. Fig. 7은 50 mm × 30 mm 영역을 x, y축으로 각각 1 mm만큼씩 스캔한 후, 각 지점에서의 중심주파수 값을 모아서 영상화 한 그림이다. 이물질이 존재하는 부분이 상대적으로 중심주파수 값이 작기 때문에 정상적인 부분보다 어둡게 표현 되어 이물질의 위치뿐만 아니라 크기(10 mm x 5 mm)도 측정할 수 있었다.

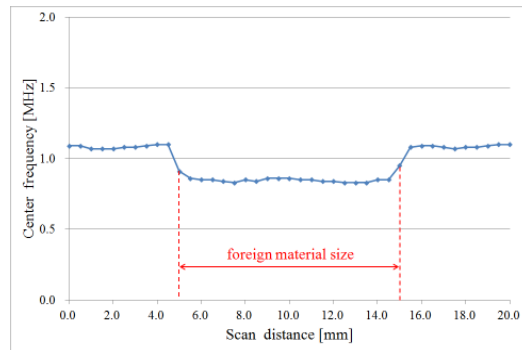


Fig. 6 Visualization of foreign material area

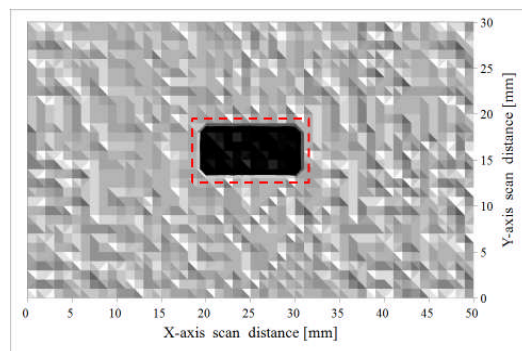


Fig. 7 2D imaging of foreign material area

5. 결 론

본 연구에서는 이종금속 접착부의 이물질을 측정하기 위해 펄스 레이저와 CW 레이저, CFPI 실험장치를 구성하였다. 광대역 레이저 초음파 발생장치의 주파수 범위는 100 kHz ~ 200 MHz이며, CFPI의 초음파 측정 범위는 1 ~ 20 MHz이다. 시편 뒷면에서의 펄스 레이저와 시편 앞면에서의 CW 레이저 조사 위치를 거의 동일하게 구성한 후, 시편 내부를 투과한 초음파 신호를 CFPI로 획득하였다. 본 연구를 통해 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 펄스 레이저와 CW 레이저, CFPI 실험장치를 이용하여 이종금속 내부를 투과한 1~4차 종파 신호를 획득할 수 있었고, 이물질이 존재하는 부분에서 종파 신호의 주기가 길어지는 것을 확인하였다. 따라서 종파 신호의 주기를 비교함으로써 이물질의 존재 여부를 판단할 수 있었다.
- 2) 시간영역의 초음파 신호를 주파수영역으로 변환하여 중심주파수 값을 비교했을 때, 이물질이 존재하는 부분에서 중심주파수 값이 감소함을 뚜렷하게 알 수 있었다.
- 3) 주파수 스펙트럼에서 중심주파수 값을 추출함으로써, 보다 정확하게 이물질의 존재 여부를 판단할 수 있었다. 또한, 스캔장치를 이용하여 이물질이 포함된 크기를 측정할 수 있었다.
- 4) x, y방향으로 2차원 스캔하여 각 지점에서의 중심주파수 값을 모아서 이물질이 포함된 부분의 2D 영상화가 가능하였다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의

재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012M2B2A9A02029370).

참고문헌

- [1] C. B. Scruby and L. E. Drain, "Laser Ultrasonic: Techniques and Applications," Adam Hilger, New York, pp. 223-324 (1990)
- [2] 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)
- [3] Q. Shan, C. M. Chen and R. J. Dewhurst, "A conjugate optical confocal Fabry-Perot interferometer for enhanced ultrasound detection," *Measurement Science and Technology*, Vol. 6, No. 7, pp. 921-928 (1995)
- [4] J. D. Aussel, 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)
- [5] 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)
- [6] 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)