펄스 레이저 스캐닝 기반 초음파 영상화 기술을 활용한 원전 배관 비파괴 진단

Nondestructive Diagnosis of NPP Piping System Using Ultrasonic Wave Imaging Technique Based on a Pulsed Laser Scanning System

김 현 옥¹⁾ 이 창 길²⁾ 박 승 희^{3)*}
Hyun-Uk Kim Chang-Gil Lee Seung-Hee Park

Abstract

A noncontact nondestructive testing (NDT) method is proposed to detect the damage of pipeline structures and to identify the location of the damage. To achieve this goal, a scanning laser source actuation technique is utilized to generate a guided wave and scans a specific area to find damage location more precisely. The ND: YAG pulsed laser is used to generate Lamb wave and a piezoelectric sensor is installed to measure the structural responses. The measured responses are analyzed using three dimensional Fourier transformation (3DFT). The damage-sensitive features are extracted by wavenumber filtering based on the 3D FT. Then, flaw imaging techniques of a pipeline structures is conducted using the damage-sensitive features. Finally, the pipes with notches are investigated to verify the effectiveness and the robustness of the proposed NDT approach.

Keywords : Pipeline structures, Noncontact NDT, Ultrasonic wave propagation image, Q-switched laser system, Wave-number filtering, Flaw image

1. 서 론

현재 국내·외에서 가동되고 있는 원전은 노후화가 가속되고 있으며, 향후 건설될 미래형 원전에서는 핵연료 교체 주기의 연장으로 연속 운전 시간이 대폭 길어질 것이 확실시되고 있다. 또한, 원자력발전설비의 건전성 및 신뢰성 확보와 잔존수명예측기법의 확보를 위해서는 상시감시 개념의 고감도, 고정도의 비파괴검사(NDT)기법의 확립이 필요하다. 비파괴검사 기술 개발의 중요성은 모든 산업발전소의 안전운전에 있어서 본질적인 요소 중의 하나로 인식되고 있다. 국외에서는 주로 미국, 일본 및 유럽의 일부 국가에서 원자력 발전소의 국부 손상 정도를 파악하고 거동을 예측할 수 있는 비파괴 검사 시스템의 개발에 많은 노력을 기울이고 있으며 현재 관련기술의 기업화 단계에 있는 실정이다. 그러나 개발되어지고 있는 비파괴 검사 방법들은 예방차원보다는

사후관리 차원의 모니터링 기술이 주를 이루고 있다. 따라서 원자력 발전소의 취약부재에서 발생하는 다양한 유형의 손상들에 대해 발생초기의 극미세 결함진단이 가능한 저비용 고감도 기술이 필히 요구된다.

원전 배관의 건전성을 진단하기 위한 현재의 기법들은 측정 범위가 좁고 시간이 오래 걸리며 또한 배관의 피복을 벗겨 내야 하는 등 측정을 위한 시간과 인력이 많이 드는 문제점을 가지고 있다. 이는 결국 비용의 증가로 이어질 뿐만 아니라 관리영역의 한계로 인하여 안전성 확보가 어려워진다. 따라서 경제적이면서 넓은 영역에서 운전 중 감시가 가능한 신 개념의 원거리, 비접촉 비파괴 측정 기법 도입이 필요하다.

레이저를 이용한 원격 초음파 검사 방법은 신호 발생 및 측정 장치 모두 대상 구조물에 대한 중간 매개가 필요 없는 완전한 비접촉 계측 방법일 뿐 아니라, 작업거리 유지에도 유연성을 갖춘 원격 검사이다. 또한 레이저 초음파 검사기술

1) 정회원, 성균관대학교 u-City공학과 석사과정
2) 정회원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정
3) 정회원, 성균관대학교 건축토목공학부 조교수, 교신저자

* Corresponding author : magickicker@nate.com

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2014년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

은 구조물의 표면 상태에 대한 의존성이 적고 원격으로 복잡한 구조물에 대해서도 적용이 용이하며, 광대역 정보를 얻을 수 있어 기존의 방법에서 관측하기 어려운 복잡한 구조물의 피로열화, 미세결함, 정밀 두께 등을 측정할 수 있다. 이외에도 수중에서의 작업이 가능하며, 결함의 깊이 정보도 확보할 수 있다는 등의 기술적인 장점을 지니고 있다. 원자력 발전소의 노후 시설에 대한 유지보수는 고온 및 방사능 오염으로 인하여 원격 계측 및 검사가 필수적이며 기존의 검사 방법으로 적용할 수 없는 기계적으로 복잡한 구조가 많으므로, 레이저 초음파 방법은 적용에 장점을 가지고 있다.

원자력에 대한 기존의 불신과, 최근의 국내 발전소의 잦은 운전 정지로 인하여 사회적으로 원자력 발전소의 안전성에 대한 불안감이 잔존하고 있고 이를 해소할 수 있는 첨단 기술이 요구되고 있다. 첨단 과학 기술 분야에서 주로 사용되던 레이저 기술은 원자력 산업에 필수적으로 요구되는 원격, 비접촉, 정밀 측정의 요건을 가장 잘 만족하고 있으면서도 기존의 측정 방법에 비하여 적용성이 높아, 이들 첨단 레이저 기술을 이용한 원자력 시설의 계측 및 검사는 원자력 시설에 대한 정책적인 신뢰도 제고에 기여할 것으로 기대된다.

따라서 본 연구에서는 Q-Switch Nd: YAG 레이저 시스템 및 갈바노미터 기반 레이저 스캐너를 이용한 비파괴 검사 기술을 통해 원전 배관 구조물의 손상을 진단하는 연구를 수행하였다.

2. 레이저 가진 기반 초음파 전파 특성을 이용한 손상 진단 시스템

2.1 UWPI 시스템 및 초음파 전파 영상화 알고리즘

2.1.1 UWPI 시스템 개요

UWPI 시스템은 Fig. 1과 같이 Q-Switch 레이저 시스템과 갈바노미터 기반 레이저 미러 스캐너, 초음파 센서, 디지털 이터 및 이미지 처리기로 구성된다.

Q-Switch 레이저 시스템은 Q-switched Nd: YAG diode-pumped solid-state 레이저를 사용하며, 그 파장 길이는 1064nm이다. 최대 펄스 반복 주파수는 20Hz이다. 레이저 미러 스캐너는 대상 구조물의 원하는 가진점에 레이저 펄스를 입사시키는 데 사용된다. 레이저 미러 스캐너는 두 개의 갈바노미터로 구동되며 파장 길이 1064nm에서 작동되도록 설계되었다. 갈바노미터의 최대 각속도는 $\pm 0.35\text{rad}$ ($\pm 20.05^\circ$) 범위 내에서 100rad/s이다. 두 갈바노미터의 회전축은 서로 수직한다. 따

Fig. 1 Configuration of Pulsed Laser System

Table 1 Acoustic emission sensor specification

Model name	Resonant Frequency kHz	Sensitivity * dB (0dB=1V/m/s)	Temperature Range
M204A	200 $\pm$ 20%	120 $\pm$ 3	-20+80

Fig. 2 A scheme of a ultrasonic wave propagation imaging system based on a UWPI laser system

라서 레이저 미러 스캐너는 2차원 스캔 영역을 빠른 속도로 스캔할 수 있게 된다. 스캔이 진행되는 동안 레이저 미러 스캐너는 먼저 수직축으로 상향 스캔을 실시하며 수직축 스캔이 완료된 후 수평축으로 이동하여 하향 스캔을 실시하게 된다. 이러한 일련의 스캔 과정을 통해 대상 구조물에 격자 형태로 초음파 가진을 수행한다. 이 때 수평축 및 수직축에서 실시한 격자 간격은 일정하며, 갈바노미터의 속도에 따라 펄스 반복 주파수를 설정할 수 있다.

레이저 빔이 대상 구조물의 표면에 입사되면 열탄성 메커니즘에 의해 대상 구조물에서는 초음파가 가진되며, 이 초음

파는 계측점까지 전파된다. 초음파 계측은 접촉식 또는 비접촉식으로 모두 가능하며, 본 연구에서는 실험 구성을 간편화하기 위해 접촉식으로 구성하였다. UWPI 시스템에서는 고정 계측점에서 초음파 응답을 계측하므로 센서 설치의 매우 간단하다. 추가로 센서의 위치는 가진면과 동일한 면 또는 가진면의 반대면에 설치할 수 있다. 이는 SHM/NDT 검사를 수행하는 대상 구조물에서 항상 모든 면이 개방되어 있지는 않으므로 중요한 점이다. 계측된 초음파 응답은 필터링 및 증폭 과정을 거친다. 필터링 과정은 해석을 위한 특정 주파수 대역을 설정뿐만 아니라 랜덤 잡음의 제거를 통해 신호 대 잡음비를 높여주기 위해 필수적으로 요구된다.

2.1.2 초음파 전파 영상화 알고리즘

계측된 시간 영역의 초음파 신호를 이용하여 초음파 전파 영상을 생성하기 위한 단계는 Fig. 3과 같이 총 3단계이다. 먼저, 계측된 신호로부터 관찰하고자 하는 주파수 영역 선택을 위해 필터링 과정 및 웨이블릿 변환을 실시하게 된다. 이때 필터링 과정을 통해 전파되는 유도 초음파의 모드 차수를 결정할 수 있다. 다음으로 특정 모드만을 선택하여 영상화를 수행하기 위해 웨이블릿 변환을 수행할 수 있는데, 이는 특정 손상에 민감한 모드를 선택적으로 영상화할 때 유용하게 사용 가능하다. 다음 단계에서는 처리된 시간 영역 신호를 세로축 (또는 가로축)으로 나열한다. 이 때 각 계측 신호는 레이저 빔 입사 지점에 위치시킨다. 이 과정을 가로축 (또는 세로축)으로 반복하여 가로축, 세로축, 시간축의 3차원 데이터를 구성한다. 다음으로 구성된 3차원 데이터를 시간축 방향으로 잘라내는 평면을 이용하면, 이 평면에 각 가진점의 값이 초음파 진폭 값이 되며 시간축에 대해 계측 시간만큼 반복하여 영상을 재생하면 초음파 전파 영상을 얻을 수 있다.

Fig. 3 A scheme of an ultrasonic wave propagation imaging algorithm

2.2 초음파 전파 영상 기반 손상 진단 알고리즘

본 연구에서는 초음파 전파 영상을 이용하여 입사파를 제거한 상태에서의 손상에서 반사되는 반사파만을 관찰함으로써 손상을 진단하는 알고리즘을 적용한다. 먼저, 입사파의 진행 방향과 관련있는 변수는 초음파의 wavenumber로써 입사파의 진행 방향은 음의 wavenumber로써, 반사파의 진행 방향은 양의 wavenumber로써 표현된다. Wavenumber는 공간 주파수로써의 의미를 갖는데, 본 연구에서 획득한 공간 및 시간의 3차원 데이터를 이용할 경우 다음과 같은 3차원 푸리에 변환을 통해 공간 및 시간의 3차원 데이터를 주파수 및 wavenumber의 3차원 데이터로 변환할 수 있다 (Ruzzene, 2007; Michaels et al., 2011).

$$W(k_x, k_y, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} w(x, y, t) e^{-i(\omega t + k_x x + k_y y)} dx dy dt \quad (1)$$

여기서, $w(x, y, t)$ 는 시간 영역에서의 2차원 유도 초음파 신호이며, 3차원 푸리에 변환을 통해 변환된 $W(k_x, k_y, \omega)$ 는 주파수 영역에서의 신호이다 (Green Jr, 2004). k_x 및 k_y 는 각각 x 축과 y 축 방향의 wavenumber이다. 따라서 파의 진행 방향에 대한 x 축 또는 y 축 방향의 음의 wavenumber를 소거하면 반사파만을 취할 수 있는데, 이를 wavenumber filtering이라 한다. 본 연구에서는 wavenumber 소거를 위해 rectangular window를 사용하였다.

다음으로 wavenumber filtering된 신호로부터 손상 진단을 위해 RMS (Root Mean Square) 값을 이용하였다. RMS 값은 신호의 에너지 변화량을 나타내어주므로, 손상에서의 반사파의 에너지 변화량을 관찰하기에 적합하다. RMS 값은 다음과 같이 계산할 수 있다 (Radzieński et al., 2011).

$$w_s^r(x, y) = \left[\frac{1}{T} \int_0^T (w^r(x, y, t))^2 dt \right]^{1/2} \quad (2)$$

여기서, T 는 계측 신호의 주기이며, w^r 는 반사파를 나타낸다.

실제 계측한 데이터는 이산형 데이터이므로 식 (2)를 다음과 같이 수정하여 손상 진단에 적용하였다.

$$w_s^r(x, y) = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (w^r(x, y, t))^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

여기서, N 은 계측한 데이터의 샘플 수를 나타낸다.
마지막으로 손상의 영향을 효과적으로 관찰하기 위해 식 (4)와 같이 RMS 값에 가중치를 곱한다.

$$w_s^r(x, y) = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (w^r(x, y, t))^2 \cdot i^k \right]^{1/2} \quad (4)$$

여기서, k 는 가중치 계수를 나타낸다.

추가로 계산된 RMS에 log를 적용하여 반사파의 영향을 극대화하여 표현할 수 있다.

3. 원전 배관 구조물 손상 진단 시험

3.1 직관부 Testbed 손상 진단 시험

실험에 사용한 배관은 Photo 1과 같이 길이 2000mm, 직경 160mm, 두께 3mm의 SUS관이다. 이 경우는 실제 구조물에서의 적용성을 고려하기 위해 scanning 위치와 같은 면에 센서를 부착하였으며, 손상 또한 배관의 외부 표현에 형성했다. 배관은 평판과는 다르게 곡면에서 scanning을 수행하게 되므로 scanning 폭에 제약이 따른다.

본 실험에서 사용한 배관에서는 약 80mm 폭을 넘게 되면 레이저가 배관의 측면을 타원형태로 가진하게 되므로 구조

Photo 1 Straight Pipe Testbed and Scan Area

물에 정확한 타격이 가해지지 못한다. 또한 곡면 특성을 고려하여 이 경우는 scanning interval을 1mm로 하였다.

강관 구조물에서의 초음파 전파 현상은 크게 종파 모드, 비틀림 모드, 횡파 모드의 3가지 모드에 기반한다. 배관 표면에서 발생 가능한 손상은 주로 용접부에서의 균열로서 배관의 길이 방향과 수직하므로 손상이 종파 모드의 파면에 접한다. 따라서 종파 모드 입사파의 손상에서의 반사파만을 추출함으로써 손상 검출이 가능하다. Fig. 4 및 Fig. 5에서는 종파 모드가 명확하게 나타나는 시간에 영상을 획득하였다. 그리고 Wavenumber filtering을 통해 하향 입사파를 제거하였다. 종파 모드에서 모두 하향 방향으로 초음파가 전파되므로 Fig. 5와 같이 입사파가 제거되었다. 따라서 Fig. 5(b)와 같이 손상에서의 반사파가 명확하게 관찰되어 손상 유무를 확인할 수 있다.

Fig. 6은 RMS 영상으로써 손상이 명확히 관찰되어 실제 구조물에서의 본 기법의 적용성을 확인하였다.

Fig. 4 UWPI Snapshots before Wavenumber Filtering (80μs, 180μs)

(a) Intact

(b) Damage

Fig. 5 UWPI Snapshots after Wavenumber Filtering (80 μ s, 180 μ s)

(a) Intact

(b) Damage

Fig. 6 RMS Maps (80 μ s, 180 μ s)

3.2 용접부 및 곡관부 Testbed 손상 진단 시험

제작 시편의 용접부는 Photo 2와 같이 직선 배관부 1구간, 곡관부 1구간으로 제작되었다.

손상 진단 실험을 수행한 용접부는 Photo 2와 같이 단순 용접부 손상 진단을 위한 직관 용접부 1구간, 곡관 용접부에서의 손상과 초음파 응답 간의 상호작용을 고려하기 위한 곡관부 1구간으로 선정하였다. 두 구간에서 각각 깊이 2mm, 폭 1mm, 길이 30mm의 notch를 균열로 가정하여 인위적으로 생성시켰다. 각 구간의 레이저 스캔 영역은 Photo 3과 같이 직선 배관부에서는 폭 220mm, 높이 200mm, 곡관부에서는 곡관부를 일부 포함시켜 폭 330mm, 높이 200mm로 하였으며, 레이저 가진 포인트 간 간격을 2mm로 설정하였다.

레이저 가진 포인트 간 간격은 초음파 파장 길이와 연관이 있으며 배관 표면의 곡률 및 배관 두께에 따른 초음파 응답의 주파수 대역 등에 따라 설정될 수 있는데, 간격이 조밀할 경우 측정되는 데이터의 수가 급격히 증가하여 영상 처리 속

Photo 2 Weld Zone and Curved Pipe Testbed

(a) Weld Zone of Straight Pipe (b) Weld Zone of Curved Pipe

Photo 3 Scan Area of Weld Zone

Fig. 7 UWPI Snapshots before Wavenumber Filtering of Straight Pipe (112μs)

도가 느려지며, 간격이 성긴 경우 획득한 초음파 영상의 해상도가 낮아진다. 이러한 조건을 고려하여 본 실험에서는 레이저 가진 포인트 간 간격을 2mm로 설정하였다. 레이저 스캔 속도는 초당 최대 20포인트로써 직선 배관부는 11,211포인트를 가진하게 되어 약 9.3분이 소요되며, 곡관부는 16,665포인트를 가진하여 약 13.9분이 소요된다. 이는 레이저 가진 장비에 의해 좌우되는데, 좀 더 고사양의 장비를 이용할 경우 초당 최대 약 1,500포인트를 가진 할 수 있어 측정 시간을 약 1/75 단축시킬 수 있어 단시간에 넓은 지역도 효과적으로 진단 할 수 있다.

먼저 레이저 가진 시스템을 이용하여 직선 배관부의 초음파 전파 영상을 112μs에서 획득하여 Fig. 7에 나타내었다. 배관에서의 초음파의 분산 특성은 크게 종파 모드와 횡파 모드로 나타나는데, 손상이 파면과 접할 때 반사파의 에너지량이 가장 크게 나타나므로 여기에서는 종파 모드만 관찰되는 시간에서 영상을 획득하였다. Fig. 7(a)는 정상 상태에서 획득한 초음파 영상이지만 (110, 100) 부근에서 반사파가 약하

Fig. 8 UWPI Snapshots after Wavenumber Filtering of Straight Pipe (112μs)

Fig. 9 RMS Maps of Straight Pipe (112μs)

게 관찰되는데, 이는 용접부에 의한 반사파이다. 반면, Fig. 7(b)는 Fig. 7(a)에 비해 좀 더 큰 에너지량이 반사되는데 이는 용접부는 물론 notch에 의한 반사파이다. 획득한 초음파 전파 영상을 wavenumber filtering 하면 Fig. 8과 같다. wavenumber filtering을 통해 종파 모드의 입사파를 제거하면 Fig. 8(b)와 같이 notch 손상에서의 반사파 및 standing wave만이 관찰된다. 하지만 wavenumber filtering 후에도 잔류 입사파에 의해 손상이 명확하게 관찰되지 않는데, RMS를 계산하여 특정 시간까지의 에너지 누적량을 관찰함으로써 Fig. 9와 같이 손상이 명확하게 관찰된다.

다음으로 곡관부의 notch 손상 진단 결과를 다음 그림에 나타내었다. Fig. 10과 같이 직선 배관부와 마찬가지로 손상 유무와 상관없이 용접부에서 반사파가 관찰되었다. 또한 곡관부의 형상이 초음파 경로로써 선명하게 영상화가 되었음을 확인하였다. 다음으로 wavenumber filtering을 수행하였는데, 직선 배관부와 유사하게 Fig. 11(b)와 같이 손상에 의한 반사파가 관찰된다. 마지막으로 RMS를 계산하여 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 이 경우 정상 상태에서 용접부에서 RMS 변화 양상이 나타나는데, 이는 용접부의 standing wave가 관찰되는 결과이다. 반면, 손상 상태에서의 RMS 영

Fig. 10 UWPI Snapshots before Wavenumber Filtering of Curved Pipe (70 μ s)

Fig. 11 UWPI Snapshots after Wavenumber Filtering of Curved Pipe (80 μ s)

Fig. 12 RMS Maps of Curved Pipe (400 μ s)

상에서는 손상 영역에서 RMS 변화량이 명확하게 관찰된다. 정상 상태와 손상 상태의 RMS 영상을 비교해보면 정상 상태에서의 용접부에서도 standing wave가 관찰되나 그 영역이 넓게 퍼져있는 것을 알 수 있으며, 손상 상태의 경우 손상에 그 에너지가 집중되어 효과적으로 손상이 검출되었음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 Q-Switch 레이저 가진 시스템 및 갈바노미터 기반 레이저 미러 스캐너를 이용한 원전 배관 비파괴 검사 기법을 구현하였다. 배관 구조물 테스트베드에 적용하여 초음파 전파 영상, wavenumber filtering, 손상 영상 검출 등의 알고리즘을 검증하였으며, 직관부, 곡관부, 용접부 등 손상의 종류를 달리하여 사용성을 검토하였으며 다음과 같은

결론을 얻었다.

- (1) 배관 구조물에서는 구조 표면의 곡률로 인해 레이저 가진에 제약이 따른다. 본 연구에서 고려한 배관 구조물은 상대적으로 직경이 큰 부재로 스캐닝을 위한 적정 폭이 확보되어 실험을 수행하였다. 배관 구조물에서의 초음파는 종파 모드, 비틀림 및 횡 모드가 발생하는데, 손상과 파면이 접하는 종파 모드를 이용하여 손상을 가시화하였다. 종파 모드만을 사용하고 wavenumber filtering을 적용하여 손상에서의 반사파만을 추출함으로써 효과적으로 손상을 가시화할 수 있었다.
- (2) 배관의 직선부, 곡관부, 용접부를 notch 손상을 통해 레이저 스캐닝 하였다. 모든 손상 부분을 명확하게 영상화되어 위치 정보를 확인 할 수 있었다.

이를 통해 U-City 사회기반 시설구조물인 원전 및 플랜트 배관구조물에 대해 주기적인 안전진단을 통하여 배관의 손상을 이미지화 시켜 정확한 상태를 모니터링 할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부의 u-city 석·박사 과정 지원사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

1. Blum, T., Pouet, B., Breugnot, S., and Clémenceau, P. (2008), Non-destructive Testing using Multi-channel Random-quadrature Interferometer, *AIP Conference Proceedings*, 975, 239-246.
2. Castellini, P., Martarelli, M., and Tomasini, E. P. (2006), Laser Doppler Vibrometry: Development of Advanced Solutions Answering to Technology's Needs, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(6), 1265-1285.
3. Chia, C. C., Jang, S. G., Lee, J. R., and Yoon, D. J. (2009), Structural Damage Identification based on Laser Ultrasonic Propagation Imaging Technology, *Proc. of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 7389, Art. No. 73891S.
4. Chia, C. C., Lee, J. R., and Shin, H. J. (2009), Hot Target Inspection Using a Welded Fibre Acoustic Wave Piezoelectric Sensor and a Laser-ultrasonic Mirror Scanner, *Measurement Science and Technology*, 20(12), Art. No. 127003.
5. Chia, C. C., Lee, J. R., Park, J. S., Yun, C. Y., and Kim, J. H. (2008), New Design and Algorithm for an Ultrasonic Propagation Imaging System, *Proc of Defektoskopie*, 63-70.

6. Green, Jr. R. E. (2004), Non-contact Ultrasonic Techniques, *Ultrasonics*, 42(1-9), 9-16.
7. Köhler, B. (2006), Dispersion Relations in Plate Structures Studied with a Scanning Laser Vibrometer, *Proc. of the ECNDT 2006*, Berlin, Germany, paper no. 2. 1. 4.
8. Lee, J. R., and Yoon, C. Y. (2010), Development of an Optical System for Simultaneous Ultrasonic Wave Propagation Imaging at Multi-Points, *Experimental Mechanics*, 50(7), 1041-1049.
9. Lee, J. R., Chia, C. C., Shin, H. J., Park, C. Y., and Yoon, D. J. (2011), Laser Ultrasonic Propagation Imaging Method in the Frequency Domain based on Wavelet Transformation, *Optics and Lasers in Engineering*, 49(1), 167-175.
10. Lee, J. R., Takatsubo, J., and Toyama, N. (2007), Disbond Monitoring at Wing Stringer Tip based on Built-in Ultrasonic Transducers and a Pulsed Laser, *Smart Materials and Structures*, 16(4), 1025-1035.
11. Michaels, T. E., Michaels, J. E., and Ruzzene, M. (2011), Frequency-wavenumber Domain Analysis of Guided Wavefields, *Ultrasonics*, 51(4), 452-466.
12. Muhammad, N. S. B., Hayashi, T., Murse, M., and Kamiya, S. (2009), Analysis of Guided Wave Propagation by Visualizing In-plane and Out-of-plane Modes, *AIP Conference Proceedings*, 1096, 774-781.
13. Pouet, B., Breugnot, S., and Clémenceau, P. (2005), An Innovative Interferometer for Industrial Laser Ultrasonic Inspection, *AIP Conference Proceedings*, 760, 273-280.
14. Radzieński, M., Doliński, Ł., Krawczuk, M., Żak, A., and Ostachowicz, W. (2011), Application of RMS for Damage Detection by Guided Elastic Waves, *Journal of Physics: Conference Series*, 305(1), Art. No. 012085.
15. Ruzzene, M. (2007), Frequency-wavenumber Domain Filtering for Improved Damage Visualization, *Smart Materials and Structures*, 16(6), 2116-2129.
16. Staszewski W. J., Lee, B. C., and Traynor, R. (2007), Fatigue Crack Detection in Metallic Structures with Lamb Waves and 3D Laser Vibrometry, *Measurement Science and Technology*, 18(3), 727-739.

Received : 09/30/2013

Revised : 10/31/2013

Accepted : 11/05/2013

요 지

본 연구에서는 레이저 가진을 이용한 초음파 전파 영상 기반 배관 비파괴 검사에 관해 다룬다. 손상의 영상화를 위해 갈바노미터 기반 레이저 미러 스캐너와 Q-Switch Nd: YAG 레이저 시스템을 사용하였다. 레이저 시스템을 가진원으로 사용하면 빠른 속도로 비접촉 초음파 가진이 가능하며, 온도의 변화가 급격한 환경이나 유해 물질이 포함된 환경에서도 대상 구조물의 원거리 가진이 가능하다. 또한 공간 해상도가 높으며, 입사각이 넓어 표면 형상이 복잡한 대상 구조물도 가진이 가능하다. 본 연구에서는 이러한 레이저 시스템으로부터 생성된 유도 초음파를 단일 PZT 센서를 사용하여 계측하고, 계측된 신호는 레이저 가진점에 해당하는 좌표점에 나열함으로써 2차원 공간좌표 및 시간축을 더한 초음파 전파 영상 생성을 위한 3차원 데이터를 구성한다. 이 데이터를 시간 축에 따라 연속적으로 반복 재생하면 초음파 전파 영상을 구할 수 있다. 이 때 웨이블릿 변환을 이용하여 계측 신호의 특정 주파수 성분을 추출해냄으로써 관찰하고자 하는 특정 유도 초음파 모드를 추출할 수 있다. 이러한 일련의 과정으로부터 획득한 초음파 전파 영상 데이터를 시간-공간 영역에서 주파수-wavenumber 영역으로 변환시켜줌으로써 손상 특성을 추출할 수 있다. 본 연구에서는 손상의 진단 및 위치 추정을 위해 wavenumber 필터링 기술을 적용하였으며, 시스템 검증에 위해 다양한 배관구조물 Testbed를 대상으로 실험을 수행하였다.

핵심 용어 : 배관 구조물, 비접촉 비파괴 검사 시스템, 초음파 전파 영상, Q-Switch 레이저 가진 시스템, wavenumber 필터링, 손상 영상