

배관부 부식 및 결함 평가를 위한 레이저 유도 초음파 적용 기술

Application of Laser-based Ultrasonic Technique for Evaluation of Corrosion and Defects in Pipeline

최상우*[†], 이준현**, 조윤호**

Sang-Woo Choi*[†], Joon-Hyun Lee** and Younho Cho**

초 록 원자력 발전소의 많은 배관부는 고온, 고압환경에서 적용되고 있어 환경적 및 기계적 요인에 의하여 부식 결함이 빈번히 발생하고 있다. 이와 같은 부식 결함은 초음파 기법 등에 의하여 평가되어야 하고, 본 연구에서는 주사형 레이저 유도 초음파(SLS) 기법을 도입하여 배관부 부식결함의 영상화 기법을 적용하였다. 본 기법은 표면이 거칠거나 배관재와 같은 곡면의 표면에서 적용할 수 있는 장점이 있다. 한편 기존의 주사형 초음파 기법은 초음파 센서와 검사대상체 사이의 초음파 전달 매개체를 확보하기 위하여 시험편이 수침되거나 워터젯을 이용하였으나 주사형 레이저 초음파 기법은 광학적 기법을 이용하여 초음파를 발생시키므로 비접촉 방법에 의한 주사 이미지 획득이 가능하다. 따라서 본 주사형 레이저 초음파 기법은 복잡한 구조물의 검사, 비접촉 원격 및 고화질의 결함 이미지 탐상이 가능하다. 본 연구에서는 배관 결함의 검출능 향상을 위하여 결함 영상 획득에 있어서 다양한 조건의 레이저 유도 초음파 발생 기법을 적용하였고, 배관에 존재하는 응력부식 균열의 결함 영상을 얻게 되었다.

주요용어: 레이저 유도 초음파, 비접촉기법, 주사형 레이저 초음파 기법, 영상화기법, 부식, 배관

Abstract There are many tube and pipeline in nuclear power plant under high temperature and high pressure. Erosion and corrosion defects were expected on these tube and pipe-line by environmental and mechanical factors. These erosion and corrosion defects can be evaluated by ultrasonic technique. In these study, Scanning Laser Source(SLS) technique was applied to detect defect and construct image. This technique also makes detection possible on rough and curved surfaces such as tube and pipe-line by scanning. Conventional ultrasonic scanning technique requires immersion of specimen or water jet for transferring ultrasonic wave between transducer and specimen. However, this SLS technique does not need contacting and couplant to generate surface wave and to get flaw images. Therefore, this SLS technique has several advantages, for complicated production inspection, non-contact, remote from specimen, and high resolution. In this study, SLS images were obtained with various conditions of generation laser ultrasound and receiving in order to enhance detectability of flaws on the tube. Stress corrosion cracks were produced on tube and images of stress corrosion cracks were constructed by using SLS technique.

Keywords: laser-generated ultrasound, non-contacting method, SLS(scanning laser source) technique, imaging processing, corrosion, pipeline

1. 서 론

원자력 발전설비는 원자로의 핵반응을 통하여 발생된 열에너지를 증기로 변환하여 발전에 적용하고 있으며 원자로의 열에너지를 증기로 변화시켜 터빈으로 전달하기 위하여 많은 배관들로 구성되어 있다. 이들 배관은 고온, 고압의 증기 및 냉각수가 유동되고 있어 부식발생이 비교적 빈번하게 발생되고 있으며 고온, 고압 배관부에서의 부식은 배관의 파열로 이어질 수 있는 위험성을 내재하고 있다. 배관부 중에서도 엘보우, 티 등에서 부식 발생확률이 높으며 이들 배관내에서 유동되는 유체의 유속, 온도, 화학물질의 농도등과 같은 유동조건에 따른 부식 감속속도가 연구된바 있으며 이를 기반으로 예방정비 기간중의 감속평가에서의 주요 측정 지점을 결정하고 있다[1-3]. 그럼에도 불구하고 최근 2004년도 일본 미하마 원자력 발전소의 2차계통에서 부식손상에 의하여 배관부가 파열되는 사고가 발생하여 다수의 사상자를 발생시켰으며 이와 같은 사고는 미국 Surry 원전에서 발생한 적이 있는 비교적 발생가능성이 높은 손상이다. 따라서 이와 같은 배관 부식에 의한 원전 설비의 사고를 예방하기 위하여 배관부의 감속두께 및 부식결함을 비파괴적으로 평가할 필요가 있다. 배관부의 부식 감속두께 측정 및 부식결함 평가를 위한 비파괴 평가 기법으로 초음파 평가 기법이 계획예방정비 기간동안 적용되고 있으며 측정된 두께는 EPR의 CHECWORKS 소프트웨어를 통하여 체계적으로 관리되고 있다[3]. 한편 원전의 운전중 배관부의 비정상적유동으로 배관감속 손상이 의심되는 경우 원전의 안전성확보 및 원전 운전의 효율성을 위하여 원전을 중지시키지 않고 운전상태에서 배관부의 감속 깊이를 평가할 필요가 있다. 그러나 운전중 원전의 배관 조건은 고온, 고압이며 고온에서 압전효과의 성질을 잃게 되는 특성의 초음파 센서를 사용하는 일반적인 초음파 평가 기법으로는 적용이 곤란한 단점이 있으므로 고온 대상체에서 초음파 계측이 적합한 비접촉식 초음파 평가 기법이 요구되고 있다[4,5].

최근 기존의 초음파 기법을 적용하면서 초음파 적용기법의 한계성인 센서의 직접적인 접촉 또는 액체 등의 접촉 매질을 적용해야한다는 단점을 극복한 비접촉식의 레이저 유도 초음파 기법들이 개발 및 적용되고 있다[6,7]. 이들 기법은 레이저의

조사에 의하여 초음파를 발생시키게 되고 레이저 간섭계 등을 적용하여 원거리에서 비접촉식 측정 기법으로 수신할 수 있는 비접촉 광학기법의 초음파 평가 기법을 제공한다. 따라서 레이저 유도 초음파 기법은 고온 환경 및 검사자가 직접 접근하기 곤란한 환경에서도 원격으로 초음파 비파괴 평가 기법을 적용시킬 수 있는 첨단 기술이다.

레이저 유도 초음파 기법에 의한 비파괴 평가 기술은 기존의 초음파 비파괴 계측 기술의 한계를 극복하여 신속한 3차원 결함 평가가 가능하고, 발전설비 항공기 등의 안전성이 강하게 대두되는 각종 부품들의 신뢰성을 획기적으로 향상시킬 수 있는 첨단 기술이다. 본 논문의 주사형 레이저 유도 초음파(Scanning Laser Source)기법은 종래 초음파 기법의 적용이 불가능한 복잡한 형상의 기기부품 및 고온 환경 하에서 사용되는 각종 구조물에 대한 비파괴 계측 기술의 한계를 극복하여, 비접촉 방식으로 부품 내부의 결함을 검출하고 결함의 형상을 영상화함으로써 검사의 신뢰성을 향상시키는 기술이다 [8,9]. 본 논문에서는 고온, 고압 배관부의 부식결함 평가를 위한 주사형 레이저 유도 초음파 기법에서 초음파를 발생시키기 위한 레이저 조사 조건 및 수신조건에 따른 결함의 검출능 및 분해능을 평가하였다. 그리고 고온 고압 배관부에서 발생하기 쉬운 응력부식균열에 대하여 주사형 레이저 유도 초음파를 적용하여 균열을 검출하고 그 형상을 영상화하고자 하였다.

2. Scanning Laser Source 기법

2.1. SLS기법의 원리

레이저 유도 초음파의 특성에 의하여 본 SLS기법에서는 표면파를 적용하여 결함과 초음파의 간섭에 의한 주로 표면결함 및 표면직하의 결함을 영상화시키게 된다. 표면 결함 및 표면직하의 결함을 영상화 시키는 원리는 다음 Fig. 1과 같다. 순간적인 열탄성변형에 의한 초음파 발생 목적의 펄스 레이저 조사지점이 수신센서와 결함 사이에 위치하는 경우 Fig. 1 (1)의 파형과 같이 펄스 레이저 조사에 의하여 순간적인 열탄성변형에 따라 레이저 유도 초음파가 발생되어진 후 최단 거리로 전파하여 수신센서에 수신된 신호 그리고 결함에서 1회 반사된 후 수신되는 신호와 같이 2개의 레이

저 유도 초음파 신호가 수신된다. 레이저의 조사지점이 결합 부근으로 접근하게 되면 Fig. 1 (2)와 같이 앞의 두 개의 레이저 유도 초음파 신호는 하나로 중첩되고 이들의 간섭에 의하여 수신되는 신호의 진폭 높이가 상승하게 된다. 레이저의 조사지점이 결합영역 이후로 넘어가게 되는 경우 Fig. 1의 (3)과 같이 수신되는 초음파는 결합에 의하여 차단되므로 음영효과에 따라 신호의 진폭이 급감하여 나타나게 된다. 즉 이와 같이 초음파 발생을 위한 펄스 레이저 빔을 평가하고자하는 영역에 주사하여 각 주사지점에서 발생된 레이저 유도 초음파를 수신한다. 이때 발생된 레이저 유도 초음파는 결합 주위에서 진폭이 상승하는 특성과 결합 이후의 영역에서 음영효과에 의한 진폭 감소하는 특성을 나타내게 되므로 이와 같은 진폭 값을 각 레이저 초음파 발생위치에 대한 대표적인 특성값으로 나타내어 결합에 대한 진폭영상을 구성하여 결합을 영상화 시키게 된다. 한편 진폭값 이외에도 주파수 대역의 신호 특성 변화로 결합의 영상화가 가능하다. 펄스 레이저의 조사 지점이 결합으로 근접하게 되면 레이저 유도 초음파 발생 지점에서 수신센서로 곧바로 수신되는 초음파와 결합에서 반사되어 수신되는 신호의 간섭에 의하여 주파수 성분의 변동 발생하게 되고 수신 초음파의 중심주파수에 대한 특정 고주파 및 저주파 성분의 상승비(up-shift ratio)와 하강비(down-shift ratio)로 나타낼 수 있으며 이는 음영효과에 의한 진폭감쇠에 따른 왜곡의 보완이 가능하다[10].

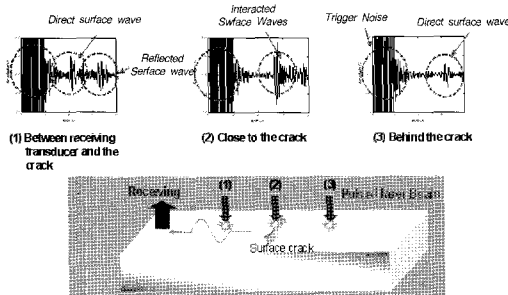


Fig. 1 Typical waveforms due to the variation of SLS spot

2.2. SLS시스템 구성

주사형 레이저 유도 초음파 기법(SLS technique)

은 다음 Fig. 2와 같은 구성의 시스템으로 적용된다. Nd:YAG 펄스 레이저는 짧은 시간동안 레이저 빔을 재료 표면에 조사하여 재료 표면에 순간적인 열팽창·수축을 유발시켜 재료 표면에서 전파되는 초음파를 발생시킨다. 초음파를 발생시키기 위한 레이저빔의 조사위치를 X-Y축을 따라 직사각형 영역내에서 일정간격으로 이동시키면서 이때 레이저 빔의 조사에 의하여 발생된 초음파를 고정된 한 점에서 수신하여 결합의 이미지를 얻는다. 본 논문에서는 이와 같이 X-Y축을 따라 이동하는 주사형의 시스템을 구성하기 위하여 Nd:YAG펄스레이저를 고정시키고, 수신부와 함께 시험편을 두 축을 따라 이동시키는 스캐너 시스템을 구축하였다. 스캐너 시스템은 두 개의 독립된 축으로 연결되어 있으며 각축은 스텝 모터로 구동된다. 스텝모터는 외장형 드라이버로 구동되며 2차원 평면의 이미지를 얻기 위하여 GPIB보드를 통하여 PC에서 자동으로 제어될 수 있다.

초음파의 수신을 위하여 한 점에서의 표면파를 수신하여야하며 본 논문에서는 일반적인 접촉식 초음파 센서의 일종인 표면파 센서, AE센서 등을 사용하여 수신하였다. 초음파 센서는 일반적으로 짧은 지속시간을 가지는 초음파를 발생시키고 수신하게 되는데 본 기법에서는 단지 레이저 유도 초음파의 수신 기능만을 적용하였다. 수신된 초음파 신호는 미약한 신호이며 일반적인 연구용 초음파 탐상장비인 펄서리시버(JSR PR35)를 이용하여 증폭 및 노이즈 제거 기능을 보완하였다. 본 아날로그 신호는 결합의 영상화를 위하여 적합한 인자로 추출되어야 하며 이를 위하여 디지털오실로스코프(LeCroy 9310A)에 저장된 파형 데이터는 GPIB 보드를 통하여 PC로 전송되어 처리된다.

2차원 평면의 결합 이미지를 나타내기 위하여 PC에서는 GPIB보드를 통하여 스캐너시스템의 위치제어와 디지털 오실로스코프의 초음파 데이터 획득을 수행한다. PC에서 스캐너를 한 점씩 구동시키면서 각 점에서 디지털 오실로스코프에서 얻은 초음파 데이터로부터 적절한 인자값을 추출하여 그것을 그 점에서의 대표값으로 영상화시켜 결합의 형상으로 나타내게 된다. 보다 정확한 결합 영상을 얻기 위하여 최적의 인자추출이 요구되며, 이를 위하여 본 연구에서는 여러 가지 인자를 적용한 영상화 기법을 시도하였다.

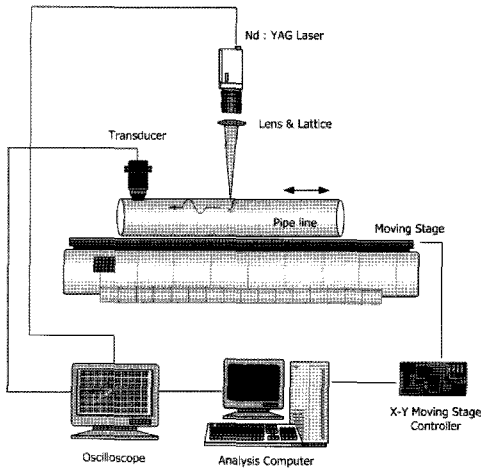


Fig. 2 Schematic diagram of the SLS technique

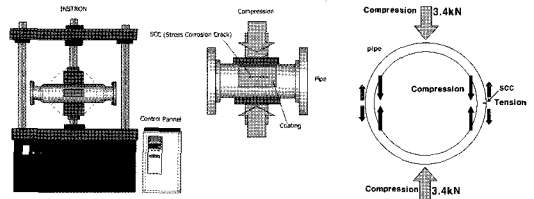


Fig. 3 Schematic experimental setup to produce SCC on tube

3. 실험결과

3.1. 레이저 빔 조건에 따른 SLS영상

주사형 레이저 유도 초음파 기법에 의한 표면 결함의 검출능 및 분해능을 평가하기 위하여 직경 1.2 mm, 0.5 mm 그리고 0.3 mm의 수직 드릴홀을 Ti 합금시험편에 인공결함으로 가공하고, 다양한 레이저 조사 조건하에 이들 인공결함을 영상화시켰다. 본 논문에서 레이저 유도 초음파를 발생시키기 위하여 적용된 레이저 조사 조건은 레이저 헤드에서 방출되는 펄스 레이저 빔을 렌즈나 핀홀 등에 통과시켜 빔폭을 변화시키는 방법을 적용하였다.

Fig. 4의 결과는 레이저 빔을 전혀 집중시키지 않은 6 mm의 직경을 가지는 레이저 빔을 주사시켜 각 주사지점에 따른 수신파형으로부터 구성된 결과 영상이다. 영상의 중앙 아래에 수신센서가 위치하였으며 영상 중심부의 높은 진폭값으로 1.2 mm 직경의 인공결함형상을 나타내고 있다. 결함 경계지역에서 결함에 의하여 반사되는 초음파 신호의 중첩으로 높은 진폭값이 수신되어 진폭의 상승으로 결함의 형상을 나타내었다. 영상의 하단부에서 진폭이 높게 나타나고 있으며 이는 레이저 빔이 수신센서에 근접할수록 수신되는 초음파의 진폭이 높기 때문이다. 영상 중앙 직경 1.2 mm의 인공결함에 대한 형상이 타원의 형상으로 나타나고 있으며 이는 레이저 유도 초음파를 발생하기 위한 레이저 빔의 직경이 6 mm로 넓으므로 분해능이 낮기 때문이다. 인공결함 이후 상부의 어두운 영역은 음영효과 (shadow effect)에 의하여 수신되는 초음파 진폭이 감소되어 낮은 진폭값으로 나타난 영역이다. 레이저 빔이 조사되는 지점과 레이저 유도 초음파를 수신하는 수신센서 사이에 드릴홀과 같은 결함이 존재하는 경우 결함은 초음파의 전파경로를 가로막고

2.3. Stress Corrosion Cracking 시험편 제작

SCC(stress corrosion cracking)는 인장하중을 받는 재료가 환경적 요인에 의한 부식손상을 동시에 받으면서 생성 및 성장되는 균열 결함이다. 이를 실험적으로 구현하여 원전설비의 배관재에 SCC를 발생시키기 위하여 Fig. 3과 같이 배관시험편에 하중을 가하여 배관의 측면에 인장응력상태를 유지시키면서 배관의 바깥 면에 부식용액을 접촉시켜 부식 조건을 형성하고 가속화시킨다. 부식 가속화를 위한 부식용액이 접촉되는 배관의 바깥 면에는 산화방지 코팅을 하고 제작하고자하는 SCC의 형상으로 코팅면에 틈을 가공하였다. 이 틈을 통해 부식용액과 배관 표면이 국부적으로 접촉하여 SCC가 발생하도록 하였다. 일반적인 원전 설비에서 적용되는 스테인레스 배관(stainless steel tube) 측면에 SCC를 발생시키기 위하여 항복하중의 90%인 3.4kN의 정하중으로 배관의 상부 면과 하부 면을 압축하여 배관의 측면에서는 굽힘하중에 의하여 표면에 인장하중이 작용되도록 하였다. 그리고 부식용액은 0.1몰~0.2몰의 $Na_2S_4O_6$ 의 수용액으로 배관측면의 코팅영역이내에서 틈으로 코팅이 제거된 선의 형상으로 국부적으로 부식이 발생하도록 하여 배관(tube)표면에 자연 균열(natural crack)형태의 결함이 발생하였다. 본 기법에 의하여 제작된 길이 1 mm 및 18 mm 균열에 대하여 레이저 유도 초음파 기법으로 검출하고자 하였다.

있으므로 초음파는 수신센서로 전파되지 못한다. 따라서 수신센서의 방향에 대하여 결함 뒷 부분에 음영 영역이 발생되어 Fig. 4의 상단 중앙 영역과 같은 음영영상이 형성된다.

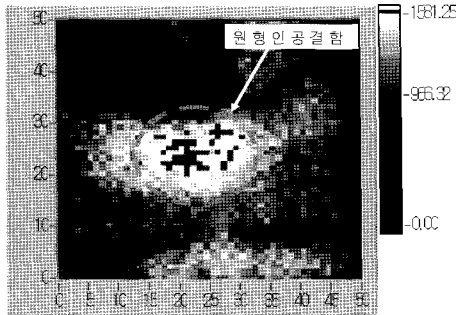
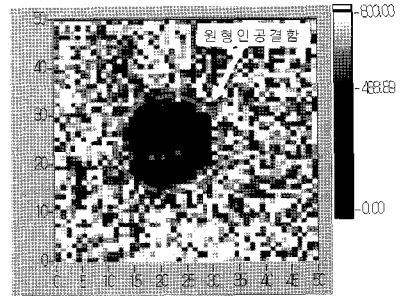


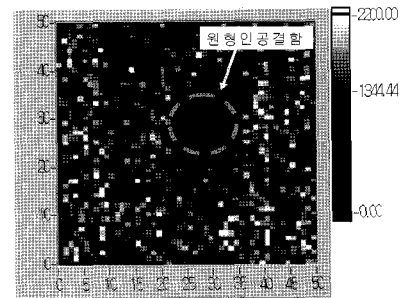
Fig. 4 SLS image for cylindrical hole (Hole diameter : 1.2 mm, Beam diameter : 6 mm, scan area : 3×3 mm²)

다음 Fig. 5는 결함의 형상을 실제 결함에 근접하는 형상의 영상을 얻기 위하여 레이저 빔을 집속렌즈에 통과시키는 방법으로 집속하여 빔의 직경을 약 1 mm로 감소시켜 얻은 영상이다. 앞의 Fig. 4에서 타원형태로 나타났던 직경 1.2 mm의 원형의 인공결함이 Fig. 5 (a)에서 정확한 형태의 원형으로 나타났다. 결함형상의 영상화는 결함이 없는 영역에서는 정상적인 레이저 유도 초음파 신호가 수신센서로 수신되어 그 진폭의 높이가 영상데이터로 전환되어 밝은 색의 높은 진폭 값으로 나타나고 있다. 그러나, 결함영역에서는 정상적인 레이저 조사가 이루어지지 못하여 수신센서에 레이저 유도 초음파를 수신하지 못하게 되어 낮은 값으로 어둡게 나타나므로 결과영상의 음영으로 결함의 형상을 나타내었다. 앞의 Fig. 4에서는 결함의 경계지역에서 높은 진폭 값이 나타났던 결과와 달리 경계지역의 신호 특성은 나타나지 않았다. Fig. 5 (b)는 직경이 0.5 mm인 인공결함에 대한 결과 영상이며, Fig. 5 (c)는 직경 0.3 mm의 인공결함에 대한 영상 결과이다. Fig. 5 (a)와 같이 결함 부분이 진폭이 낮은 어두운 값의 영상으로 나타나 결함이 존재함을 보여 주고 있다. 집속 렌즈를 통하여 레이저 빔의 폭을 감소시키는 경우 분해능이 향상되어 미소한 표면 결함에 대한 검출능이나 결함의 형상에 대한 분해능이 향상되었다. 그러나, 결함의 경계부분이 명확하지 않은 단점이 있으며 이는 레이저 빔을 좁은 영역에 조사함에 있어서 시험편 표면의 손상 유발

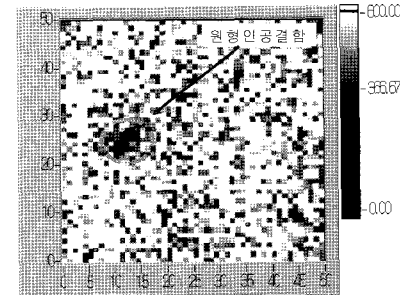
을 방지하기 위하여 낮은 에너지의 레이저를 적용하게 되었고, 따라서 변환되는 초음파의 강도가 낮기 때문에 판단된다.



(a) Hole diameter: 1.2 mm (scan area: 3 × 3 mm²)



(b) Hole diameter: 0.5 mm (scan area: 2 × 2 mm²)



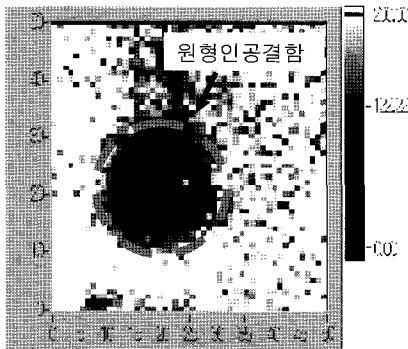
(c) Hole diameter: 0.3 mm (scan area: 1 × 1 mm²)

Fig. 5 SLS image for cylindrical hole (Focused beam through lens)

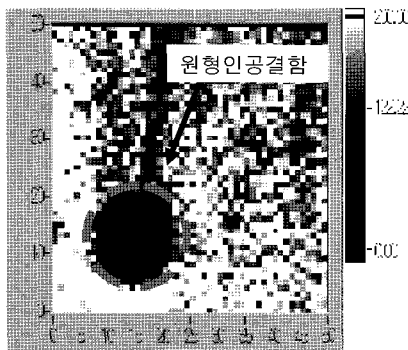
결함형상에 대한 분해능을 향상시키고 수신센서에서 수신하기에 충분한 강도의 초음파를 발생시키기 위하여 레이저 빔을 직경 2 mm의 핀홀에 통과시켜 렌즈에 의하여 집속된 빔의 직경인 1 mm 보다 넓은 직경 2 mm의 레이저 빔을 적용하였다. Fig. 6은 이와 같이 핀홀을 통과시킨 레이저 빔을 주사하여 얻은 인공결함에 대한 SLS영상들이다. Fig. 6 (a)는 직경 0.5 mm의 미소한 원형 드릴홀에

대한 결과이며 앞의 Fig. 5 (b)에서는 그 형상이 선명하지 않았지만 본 결과에서는 드릴홀 부위는 진폭이 낮은 어두운 값으로 경계가 명확하게 구분되었다. 한편, 드릴홀의 상위 영역에서 진폭이 낮은 값을 나타나고 있으며 이는 결함 영역을 나타내는 것이 아니며 앞의 Fig. 4의 결과와 동일하게 결함에 의하여 레이저 유도 초음파의 전파를 가로막는 음영효과에 의한 음영 영역을 나타내고 있다.

Fig. 6 (b)는 직경 0.3 mm의 드릴홀에 대한 SLS 영상으로 0.3 mm의 아주 미세한 인공결함에 대하여도 명확한 결함 형상을 나타내었다. 이와 같이 레이저 빔을 편홀에 통과 시켜 빔폭을 감속시키는 경우 렌즈를 사용하는 경우에 비하여 넓은 영역에 레이저 빔의 강도가 고르게 분포되기 때문에 레이저 유도 초음파의 강도가 상승한다. 따라서 본 Fig. 6의 결과에서 레이저 빔폭이 감소되면서 높은 강도의 레이저 유도 초음파가 발생하는 경우 결함에 대한 분해능이 좋고 동시에 그 검출능도 향상되었음을 보여주었다.



(a) Hole diameter : 0.5 mm



(b) Hole diameter : 0.3 mm

Fig. 6 SLS image for cylindrical hole (Beam through pin hole, scan area: $1 \times 1 \text{ mm}^2$)

3.2. 수신조건에 따른 SLS영상

레이저 유도 초음파는 일반적인 초음파 센서에 의하여 발생하는 초음파에 비하여 광대역의 초음파를 발생 및 전파시킨다. 따라서 수신센서의 주파수 특성에 따라서 다양한 주파수 대역의 레이저 유도 초음파를 수신할 수 있으며 각 주파수대역에 따라서 결함에 대한 특성이 다르게 나타나게 된다. 본 논문에 적용된 수신센서는 AE센서와 일반적인 표면초음파센서들이다. AE센서는 150 kHz에서 450 kHz사이의 저주파수 대역에서 높은 수신 민감도를 나타내고 표면초음파센서는 각각 2.25 MHz와 5 MHz의 수신대역 특성을 가지고 있다.

다음의 결과들은 일반적인 초음파 평가 기법에서 결함의 검출능이 낮은 피로 균열에 대한 SLS영상 결과이며, 영상결과를 얻기 위하여 가로 세로 각각 5 mm의 영역을 레이저 빔으로 주사하여 각 지점에서 발생한 초음파를 AE센서와 2.25 MHz 및 5 MHz의 표면초음파 센서로 수신하여 얻은 결과 영상들이다. 이때 피로균열은 결과 영상의 중앙 바닥에서 영상 중심까지 수직으로 위치한다. 저주파 대역의 수신특성을 가지는 AE센서로 수신하여 얻은 Fig. 7의 SLS영상결과에서는 검출능이 낮은 피로균열에 대하여 높은 검출능을 보였다. 그러나 그 저주파수 대역의 초음파는 파장 길이가 긴 특성을 가지고 있으므로 결함 형상에 대한 분해능이 낮다. 즉, Fig. 7의 결과에서 좌측 하단에 밝은 색으로 피로균열에 의하여 반사된 높은 진폭의 신호특성을 나타내지만 균열의 경계가 명확히 나타나지 못하고 있다. 이는 파장인 긴 경우 균열에 의한 레이저 유도 초음파의 간섭 영역이 넓기 때문이다.

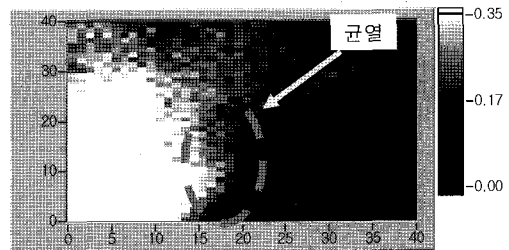


Fig. 7 SLS image for fatigue crack by using AE sensor

결함의 분해능을 향상시키기 위하여 짧은 파장의 초음파를 수신할 필요가 있으며 이를 위하여 AE센서보다 높은 주파수의 표면초음파 센서를 적용하였

다. 2.25 MHz의 주파수대역에서 수신민감도가 높은 표면초음파 센서로 수신하여 얻은 SLS영상결과인 Fig. 8에서는 중앙 바다에서부터 중심부까지 수직으로 성장한 피로균열에 대한 경계가 Fig. 7의 결과에 비하여 명확하게 나타나고 있다. 이것은 AE센서의 비하여 약 10배 높은 주파수 특성을 가지므로 파장의 길이는 약 0.1배로 높은 분해능을 가지기 때문이다. 그러나 Fig. 7에 비하여 신호의 강도가 떨어지고 결함에 대한 검출능은 감소하는 경향을 나타내었다.

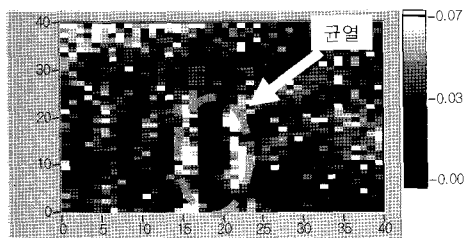


Fig. 8 SLS image for fatigue crack by using 2.25 MHz surface wave sensor

Fig. 9의 결과는 5 MHz 대역에서 높은 수신감도의 표면초음파 센서를 사용하여 얻은 SLS영상 결과이다. Fig. 8의 결과에 비하여 피로균열의 형상이 더욱 명확해지고 그 균열 형상의 폭이 감소하여 짧은 파장 특성에 의하여 높은 분해능을 나타내는 장점이 있지만, 결과 영상의 상부는 높은 진폭의 신호값을 나타내는 노이즈성의 영상결과를 나타내고 있다. 이는 초음파의 주파수가 증가할수록 재료내부에서의 산란 및 감쇠가 증가하고 수신센서의 지향특성이 강해지는 특성 때문으로 사료된다.

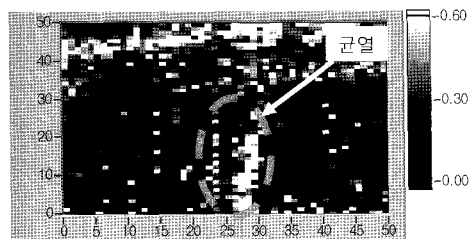


Fig. 9 SLS image for fatigue crack by using 5 MHz surface sensor

3.3. Stress Corrosion Cracking의 SLS영상

원전설비의 배관의 국부영역을 부식용액에 적용하고 동시에 외부 하중을 가하여 응력부식균열(stress corrosion cracking)이 발생된 시험편을 레이저 유도

초음파 기법을 적용하여 결함을 검출하고 영상화하였다. 일반적인 초음파 기법으로 검출이 어려운 균열의 검출능을 향상시키기 위하여 AE센서를 적용하여 저주파 대역의 신호를 수신하고 그 특성으로부터 균열을 검출하고 형상을 영상화하였다. 가로 10 mm, 세로 5 mm영역을 주사하여 1 mm길이의 응력부식 균열의 형상을 검출하여 Fig. 10의 결과로 나타내었다. 1 mm의 균열은 일반적인 초음파 기법으로 검출하기가 어려운 미소한 결함이나 본 레이저 유도 초음파 기법에서는 균열에서 산란되는 레이저 유도 초음파성분중 감쇠가 적은 저주파성분을 수신감도가 높은 AE센서로 수신하여 검출하게 되었다.

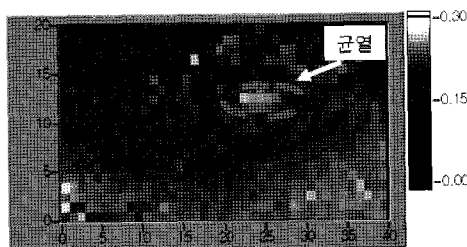


Fig. 10 SLS image for Stress Corrosion Crack by using AE sensor (crack length : 1 mm)

Fig. 11은 원전 설비 배관의 길이 방향으로 응력부식 조건에서 가공된 18 mm길이의 균열을 레이저 유도 초음파기법으로 검출한 균열 형상 영상이다. 균열의 검출능을 향상시키기 위하여 레이저 유도 초음파의 저주파성분을 AE센서로 수신하였고, 주사 영역은 가로 20 mm 그리고 세로 5 mm영역이다. Fig. 11의 결과에서 수평의 진폭이 높은 결과값으로 균열이 검출되고 그 형상이 나타나고 있음을 보여주고 있다. 그러나 그 응력부식균열의 크기는 실제 균열 크기에 비하여 작게 나타났다. 이것은 그만큼 배관에서의 응력부식균열의 검출이 용이하지 못함을 보여준다.

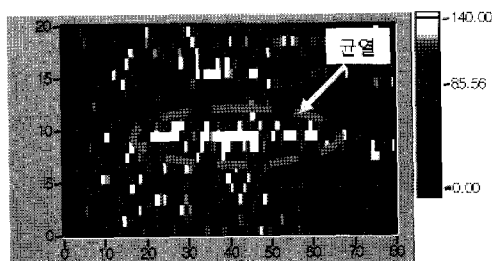


Fig. 11 SLS image for Stress Corrosion Crack by using AE sensor (crack length : 18 mm)

4. 결 론

주사형 레이저 유도 초음파 기법을 적용한 최적 결합영상을 얻기 위하여 결합에 대한 분해능과 검출능 향상을 목적으로 레이저 유도 초음파 발생 및 수신조건을 변화시켜 SLS영상을 얻었다.

레이저 유도 초음파 발생 조건에 있어서 결합 형상의 분해능을 향상시키기 위하여 레이저 빔의 폭이 감소될수록 좋으나 레이저 빔의 폭이 1 mm이하가 되면 발생하는 초음파의 강도가 낮으므로 수신율이 감소되어 분해능을 향상시킬 수 없다. 따라서, 약 2 mm의 직경을 가지는 빔을 적용하여 결합에 대한 분해능을 향상시키고 수신율이 높은 초음파를 유도 시킬 수 있다.

레이저 유도 초음파의 수신 조건에 있어서 저주파대역의 레이저 유도 초음파를 수신하는 경우 감쇠가 적으므로 수신율이 높고 결합에 대한 검출능이 높다. 그러나 결합 형상에 대한 분해능이 낮으므로 저주파대역은 넓은 영역을 탐상하는 경우에 적용하는 것이 유리하고, 미세한 결합을 검출하는 경우 고주파대역의 초음파 센서를 적용하는 것이 적합하다.

일반적인 초음파 기법으로 검출이 용이하지 않은 배관의 응력부식균열에 대하여 균열의 형상을 영상화 시킬 수 있었으며 실제보다 작은 크기로 영상화되어 나타났다.

후 기

본 연구는 과학기술부 및 한국과학기술기획평가원의 지원을 받아 2003년도 원자력기초공동연구소 사업(BAERI)을 통해 수행되었음.

참고문헌

- [1] Kuen Ting and Yin Pang Ma, "The Evaluation of Erosion/Corrosion Problems of Carbon Steel Piping in Taiwan PWR Nuclear Power Plant," Nuclear Engineering and Design, Vol. 191, pp. 231-243, (1991)
- [2] Na Young Lee, Chi Bum Bahn, Seung Gi Lee, Ji Hyun Kim, Il Soon Hwang, Joon-Hyun Lee, Jung Taek Kim and Vincent Luk, "Development of an On-Line Ultrasonic System to Monitor Flow-Accelerated Corrosion of Piping in Nuclear Power Plants," Key Engineering Materials, Vols. 270-273, pp. 2232-2238, (2004)
- [3] Sung-Ho Lee, Han-Sub Chung, Tae-Ryong Kim and Su-Cheol Jeon, "Criteria of UT Thickness Measurement on Thinned Pipe Management Program," Key Engineering Materials, Vols. 270-273, pp. 2204-2209, (2004)
- [4] Mark J. Bergander, "EMAT Thickness Measurement for Tubes in Coal-fired Boilers," Applied Energy, Vol. 74, pp. 439-444, (2003)
- [5] E. Fraizier, M. -H. Nadal and R. Oltra, "Evaluation of Viscoelastic Constants of Metallic Materials by Laser-ultrasonics at Elevating Temperature," Ultrasonics, Vol. 40, pp. 543-547, (2002)
- [6] J. D. Aassel, Le Burn, A. and J. C. Badboux, "Generating Acoustic Waves by Laser: Theoretical and Experimental Study of Emission Source," Ultrasonics, Vol. 26, (1998)
- [7] C. B. Scruby, R. J. Dewhurst, D. A. Hutchins and S. B. Palmer, "Quantitative Studies of Thermally Generated Elastic Waves in Laser-Irradiated Metals," J. Appl. Phys., Vol. 51, No. 12, pp. 6210-6216, (1980)
- [8] Younghoon Sohn, and S. Krishnaswamy, "Mass Spring Lattice Modeling of the Scanning Laser Source Technique," Ultrasonics, Vol. 39, pp. 543-551, (2002)
- [9] Sang-Woo Choi, Joon-Hyun Lee, Ahn-Jin Nam, and S. Krishnaswamy, "Application of Scanning Laser Source Technique for Nondestructive Flaw Detection," Key Engineering Materials, Vol. 270-273, pp. 787-792, (2004)
- [10] Pavel A. Fomitchov, Alexei K. Kromine, Younghoon Sohn, Sridhar Krishnaswamy, Jan D. Achenbach, "Ultrasonic Imaging of Small Surface-breaking Defects Using Scanning Laser Source Technique," Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 21, pp. 356-362, (2002)