

레이저 유도 초음파에 대한 이해

Understanding of Laser-based Ultrasonics

이승석*[†], 장태성**

Seung Seok Lee*[†] and Tae Seong Jang**

1. 서 론

1960년대 초 레이저의 발명 이래, 레이저의 풍부한 적용성은 광학 분야뿐만 아니라 다양한 과학 기술 분야에서 주목받아왔으며, 현재 레이저의 사용은 비파괴 검사 및 평가 분야에서도 보편화되고 있다. 1970년 후반과 1980년대의 초기 연구자들[1-7]에 의해 레이저 기술이 초음파를 발생시키고 수신하는데 있어, 압전 트랜스듀서를 대체할 수 있는 기술로서 확립되었다. 광학과 초음파장의 상호작용에 대한 다양한 실험이 실험실 조건하에서 이루어졌고, 응용 가능성이 입증되었다. 레이저를 이용한 초음파의 발생 및 레이저 간섭계를 이용한 초음파의 비접촉식 감지는 지난 십 여 년에 걸쳐 비파괴 검사 및 평가 분야에서 매우 활동적인 연구 분야였다. 국외에서는 이미 많은 연구가 이루어졌고, 국내에서는 상대적으로 연구가 미비한 실정이다.

레이저를 이용한 초음파 발생 및 감지 기술이 많은 연구자의 주목을 받는 이유는, 본질적으로 이 기술이 비접촉식 초음파 송수신 기술이라는데 있다. 레이저와 관련된 가장 흥미로운 현상 중의 하나가 바로 고출력(high-power) 레이저가 불투명한(opaque) 표면에 흡수될 때 생성되는 현상이다. 레이저를 흡수하는 재료의 상변화(phase change)가 발생되기도 하고, 금속 재료로부터 폭발되는 기체의 발광이 관찰되기도 한다. 비파괴 검사 및 평가 목적에서는, 재료의 상변화를 야기하지 않고 재료의 국부 가열만을 유도하여, 열탄성 효과에 의한 탄성파를 재료 내에 전파시키는 연구

에 주된 관심을 갖는다. 레이저를 흡수한 표면의 용융이나 기화는 재료의 손상을 의미하며, 용접이나 가공, 절단분야에서는 이러한 현상에 대해 주로 관심을 가진다. 레이저에 의한 원격 초음파 생성과 더불어, 초음파 전파에 의해 발생된 재료 표면 수직 변위를 레이저 간섭계를 이용하여 비접촉 방식으로 측정하는 기술이 레이저 유도 초음파(laser-based ultrasonics) 기술의 핵심을 이룬다.

일반적으로 레이저 입사에 의해 벌크(bulk) 탄성파, 표면 탄성파, 유도 초음파(guided waves)를 원격으로 발생시킬 수 있으며, 이들은 재료 내 결함의 검출, 재료의 물성 평가, 탄성파 전파 연구 등에 적용된다. 비파괴 검사 및 평가 분야에서의 레이저 유도 초음파의 매력은 초음파의 비접촉식 발생 및 감지, 광학을 이용한 장치의 원격 배치, 높은 공간 분해능, 용이한 스캐닝, 절대 변위 측정, 넓은 대역 및 좁은 대역의 신호 발생, 광범위 주파수 대역 측정, 곡면에서의 적용가능성으로부터 생긴다. 레이저 유도 초음파 기술은 특히 고온 구조물이나, 기존 비파괴 탐상 방법으로는 접근이 곤란한 구조물 등에 적용될 때, 매우 큰 기술적 장점을 가지고 있기 때문에, 많은 관심이 집중되어 왔다. 또한 현재까지는 가장 탁월한 비접촉식 초음파 탐상기술로 인정받고 있으며, 향후 연구가치가 높은 분야라고 판단된다. 한편 레이저 유도 초음파 기술은 광학에 대한 기본 지식을 필요로 하며, 장치가 비교적 고가이고, 초음파 감지를 위해 구성된 광학계가 다소 복잡하다는 특성을 가지고 있다. 따라서, 국내에서는 연구 저변 확대가 상대적으로 활발하지 못하였고, 실험실 환경에

서의 기초 연구가 진행되고 있다.

본 논문은 레이저를 이용한 초음파의 발생과 감지의 기본 원리에 대한 이해를 돕고, 레이저 유도 초음파에 대한 연구 저변을 확대하고자 의도되었다. 물리적 현상에 대한 개념적 설명을 바탕으로, 국내에서 수행된 레이저 유도 초음파의 적용 분야를 제시함으로써, 많은 연구자들의 향후 연구에 다소나마 도움이 되리라는 기대를 가지고 본 논문을 기술한다.

2. 레이저 유도 초음파의 정의 및 특징

레이저 유도 초음파(laser-based ultrasonics) [8]는 레이저 조명(illumination)에 의한 초음파 발생과 레이저 간섭계 기술에 의한 초음파 신호 감지를 결합한 초음파 탐상 기술을 의미한다. 문헌에서는 많은 연구자들이 이 분야를 레이저 초음파(laser ultrasonics)[9]라고 명명하며, 간혹 photo-acoustics라고 일컫는다. 이는 레이저라는 광원의 흡수에 의한 초음파의 발생을 의미하는 용어이다. 특히 레이저 초음파라는 용어는 압전 트랜스듀서나 EMAT를 포함하는 상용 초음파(conventional ultrasonics)와 차별성을 강조한 용어이다.

압전 트랜스듀서에 의한 초음파 송수신은, 효율성 및 간편성에서 탁월하나, 접촉매질(couplants)을 이용하는 접촉식 측정법이기 때문에 500°C 이상의 온도에서는 더 이상 사용이 불가능하다는 단점이 있다. 접촉식 트랜스듀서가 갖는 한계 때문에 접촉매질로부터 자유로운 비접촉식 초음파 트랜스듀서를 개발하고자 하는 노력이 진행되었고, EMAT가 바로 가장 잘 알려진 비접촉식 트랜스듀서이다. 그러나, EMAT의 적용은 전기 전도체 시편에 국한되고, 비접촉 거리가 수 mm 내외의 아주 작은 양에 불과하다. 또 다른 비접촉식 트랜스듀서에는 자왜(magnetostrictive) 트랜스듀서, 전기 용량형(capacitive) 트랜스듀서, 공기-결합(air-coupled) 트랜스듀서가 있다. 자왜 트랜스듀서는 강자성체 물질에 적합하고, 전기 용량형 트랜스듀서는 국부적으로 잘 연마된 표면에 활용 가능하며, 주로 초음파의 수신용으로 제한된다. 공기-결합 트랜스듀서는 검사하고자 하는 재료와 공기 간의 큰 음향 임피던스 차이로 인해 상대적으로 효율이 낮다.

레이저 유도 초음파 기술은, 현재까지 알려진 가장 우수한 비접촉식 초음파 발생 및 감지 기술로서, 검사 대상 매질에 대한 제약이 거의 없고, 주파수 대역은 100MHz까지 매우 넓게 조절될 수 있으며, 초음파 감지 가능한 비

접촉 간극이 기존의 어떤 방법보다도 훨씬 크다는 매우 큰 장점을 가지고 있다. 경우에 따라, 고체 내 발생된 변위장의 절대 진폭 정보가 필요할 수도 있으나, 기존 초음파 감지 방법으로는 변위의 절대 성분을 측정하는 것은 매우 어렵다. 그러나, 레이저 간섭계에 의한 표면 변위 측정은 그 절대 성분을 얻어낼 수 있다는 또 하나의 매우 큰 장점을 보유하고 있다. 예로써, 1000°C 이상의 고온에서 수행되는 열간 압연과 같은 공정에 적용하기에는 기존의 측정 방법은 많은 한계를 가지고 있다. 반면에 레이저 유도 초음파 기술에 의한 초음파 송수신은 이와 같은 한계를 극복할 수 있는 강력한 장점을 가진다.

레이저에 의한 초음파 발생의 기본적인 원리는 고휘력 펄스 레이저를 고체 표면에 조사시키면, 매우 얇은 흡수층에서, 에너지의 흡수 및 반사가 발생하는데, 흡수된 에너지에 의해 고체 표면의 온도가 매우 짧은 시간 동안에 상승 및 하강하는 구배를 나타내고, 극히 짧은 시간동안에 이루어지는 온도 구배로 인해 열탄성 효과에 의한 재료 내 순간적인 팽창이 발생하여, 고주파의 열탄성 응력, 변형률이 고체 시편 내부로 전달이 된다는 메커니즘에 있다. Fig. 1에 레이저 유도 초음파 기술의 개념도를 제시하였다.

초음파의 비접촉 수신은 표면의 수직 변위를 계속 감시하고 있는 cw 레이저가 초음파 전파에 의한 수Å 내지 nm의 표면 변위를 경험할 때, 발생하는 광경로차에 의한 위상변화 또는 표면에서의 산란 정보로부터 간섭계의 변화를 측정하여 초음파 전달 정보를 얻는다는 것이다. 따라서, 이러한 현상의 이해를 위해서는, 레이저 광원의 흡수 및 온도 분포 과정과 열탄성 응력 발생 과정에 대한 이해와 간섭계의 기본 원리에 대한 이해가 필요하다.

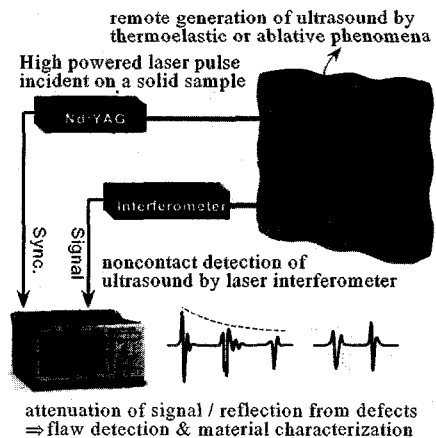


Fig. 1 Concept of laser based ultrasonics

3. 레이저에 의한 초음파의 발생 원리

3.1. 레이저 입사에 따른 물리현상

적당한 진폭과 주파수 범위(100kHz~10MHz)의 초음파를 발생시키기 위해서는, 펄스 길이(pulse length) 50ns 이하의 Q-스위칭된(Q-switched) 펄스 레이저를 보통 이용한다. 레이저 입사에 의해 비파괴 검사 및 평가에 적당한 수 nm 수준의 변위 진폭을 얻기 위해서는 수~수십 MW수준의 레이저 출력이 필요하다[3,4,9]. 이러한 고출력 레이저를 발생시키는데, 연속파(continuous wave, cw) 레이저는 적합하지 않다. Q-스위칭은 연속 출력의 레이저를 수~수십 ns의 펄스 레이저로 바꿀 수 있다. 따라서, 10Hz의 반복률인 경우 수 W의 연속 출력 레이저를 Q-스위칭하여 수십 MW의 고출력 펄스도 쉽게 얻게 된다. 또한 초음파 탐상에 적합한 주파수를 얻기 위해서는, 역시 펄스 레이저의 폭이 짧아야 고주파 영역에서 큰 에너지를 가지며, 주어진 펄스 에너지에 대해 피크 출력이 더 높다. 이러한 이유로 레이저 유도 초음파 기술에서 초음파 발생을 위한 레이저로서는 Q-스위칭된 펄스 레이저가 주로 사용된다.

펄스 레이저가 고체 표면에 입사되면 다양한 물리적 현상이 발생할 수 있다. 출력 밀도 10MW/cm² 이하[3]의 저출력(low power) 펄스 레이저의 입사에 대해서는 순간적 가열(heating), 열파(thermal waves) 및 탄성파(elastic waves)의 발생이 일어난다. 특히 반도체와 같은 재료에서는 전류의 흐름이 발생한다. 고출력 펄스 레이저의 입사에 대해서는 이러한 현상과 더불어 재료의 표면에서 물질이 용해되어 증발하는 용발(ablation)이 발생하고, 고체 샘플로부터 이온과 전자가 방사되어 가시광선 영역의 푸른 불꽃을 내는 플라즈마(plasma)가 형성되며, 샘플 내에서는 용융(melting), 소성변형 그리고 심지어는 균열이 형성될 수도 있다[10]. 손상을 야기하지 않는 저출력 레이저의 입사와는 대조적으로 고출력 레이저의 입사에서는 재료 표면의 손상을 수반한다. 예로써, 고출력 Nd:YAG 펄스 레이저의 입사에 의한 금속 표면의 용발에 의한 손상을 Fig. 2에 참고로 제시하였다.

레이저 출력에 따라, 저출력 레이저의 입사에 의해 열탄성 영역 및 변형률을 발생시키는 열탄성 영역(thermoelastic regime)과, 고출력 레이저의 입사에 의해 용발을 발생시키는 용발 영역(ablation regime)으로 분류한다. 비파괴 검사 및 평가의 목적으로는 열탄성 영역에서의 레이저에

의해 발생하는 초음파를 필요로 한다. 그러나, 고온 강판의 결정 크기(grain size) 평가를 위한 초음파 감쇠 측정과 같이 큰 진폭의 초음파를 필요로 하는 경우에는, 재료 표면의 약간의 손상을 감수하더라도, 용발 영역의 초음파를 발생 시키기도 한다[11].

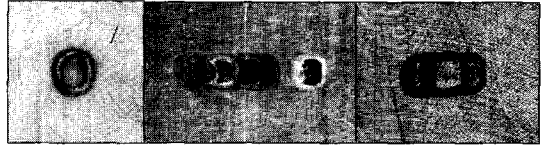


Fig. 2 Photos of ablative region on metal

3.2. 전자기적 복사의 흡수

레이저가 고체 샘플 상에 입사될 때, 일부 에너지는 샘플의 특성 및 복사 주파수에 따른 다양한 메커니즘에 의해 흡수되고, 나머지는 표면으로부터 반사 및 산란된다. 금속의 경우, 파장 1064nm의 Nd:YAG 펄스 레이저 입사에 대한 전자기파 흡수층은 수 nm 내외, 열파 영역은 수 μm 정도로 알려져 있다[9]. 흡수와 반사는 표피(skin)이라 부르는 표면층에서 일어난다. 표피 깊이(skin depth)는 전자기파의 진폭이 초기 값의 1/e로 감소할 때까지의 거리로 정의된다. 예로써, 파장 1064nm의 Nd:YAG 레이저가 알루미늄에 입사할 경우에, 표피 깊이는 5nm가 얻어진다. 레이저가 고체 표면에 입사할 때, 복사에너지가 흡수되는데, 잘 알려진, 지수적 형태의 흡수가 이루어진다.

$$I(z) = I(0)e^{-\gamma z} \dots\dots\dots (1)$$

이때, $I(0)$ 는 표면에 입사된 펄스 레이저의 세기(intensity), γ 는 흡수계수(absorption coefficient)이다. 또한 일부 에너지는 반사가 되는데, 반사도(reflectivity, R)는 전체 입사 세기에 대한 반사 세기로 정의된다. 문헌[9]에 제시된 대표적인 표면 연마된 금속에 대한 반사도를 Table 1에 나타내었다. 레이저에 의한 초음파 발생은 연강(steel)의 경우에 반사도가 작아서 더 효율적임을 알 수 있다. 레이저 파장이 적외선 영역으로 증가할수록 반사도는 증가하는 반면에, 자외선 영역에서는 반사도가 감소하여 더 많은 에너지가 흡수된다. 따라서, 레이저를 이용한 초음파의 발생 관점에서는 상대적으로 짧은 파장 대역(가시광선이나 자외선)의 레이저를 이용할 때, 금속의 표면에서 흡수되는 에너지가 증가하므로, 초음파 생성 효율이

높다고 할 수 있다. 한편, 표면 거칠기는 에너지 흡수에 영향을 주는데, 일반적으로 거칠기가 증가할수록 에너지 흡수량은 증가한다. 초음파 발생을 위해 사용되는 펄스 레이저는 재료에 의존하는데[9], Nd:YAG 레이저(파장 1064nm) 또는 Nd:YAG 레이저의 제 2 조화파(파장 532nm)가 이상적이며, 보편적으로 사용된다[3,4,6,7]. 고분자 복합재료의 적층분리와 같은 결함 검출을 위해서는 CO₂ TEA 레이저(파장 10μm)를 사용하기도 한다[12]. 보통 구조물의 비파괴 평가를 위해서는 수~수십 mJ, 막막에 적용할 레이저 초음파를 위해서는 μ의 펄스 에너지를 사용한다.

Table 1 Reflectivity for various metal

Metal	Reflectivity, R	
	for 1064nm	for 250nm
Al	0.93	0.8
Steel	0.63	0.38
Copper	0.90	0.26

3.3. 온도 분포

대개 펄스 레이저 빔 공간 윤곽(spatial profile)은 근거리장과 원거리장에 따라 편차를 보인다. 1m 내의 근거리장에서는 가우시안 분포와의 편차가 상대적으로 커지고, 원거리장에서는 가우시안 분포에 근접한다. 펄스 레이저 흡수에 의한 고체 표면 근방 온도분포는 초기 연구자들 [1,3,13]에 의해 많이 수행되었으며, 고전적인 열전달 방정식의 해로부터 얻어진다. 대부분의 실제 상황에서는 짧은 펄스 레이저는 수 mm² 면적에 걸쳐 금속을 조사하며, 펄스 지속 시간 동안 열이 전달되는 깊이는 그 면적보다도 훨씬 작다. 따라서, 일차원 근사 모델이 많이 이용되었다. 반 무한체(half-space)에서의 열 흐름에 대한 미분방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = -\frac{A(z, t)}{K} \dots\dots (2)$$

여기서, $T(z, t)$ 는 온도분포이고, $A(z, t)$ 는 단위시간, 단위체적 당 발생된 열(W/m³)이고, K 와 α 는 각각 열전도도(conductivity)와 확산도(diffusivity)이다. 레이저 입사에 의한 에너지 흡수는 단위체적당의 열발생률로 나타내어진다.

$$A = (1 - R) I(t) \gamma e^{-\gamma z} \dots\dots\dots (3)$$

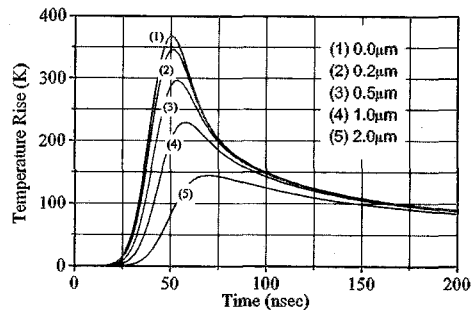
여기서, $I(t)$ 는 레이저 입사 세기(W/m²)이고, γ 는 흡수계수(m⁻¹)이며, 초기조건 및 경계조건은 다음으로 주어진다.

$$T(z, 0) = 0$$

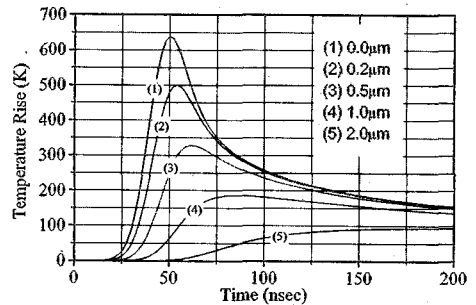
$$T \rightarrow 0 \quad \text{as } z \rightarrow \infty \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z = 0$$

예로써, 10mm² 면적에 걸쳐 펄스의 공간분포가 균일하고, 시간분포는 $I \exp(-\xi^2/\tau^2)$ 형태의 가우시안 분포로 가정된 경우에 대한 고체 표면 근방 온도 분포에 관한 해를 Fig. 3에 제시하였다. 여기서, $\xi=2.7726$ 이고, τ 는 반치폭(FWHM)이며, 20ns로 가정하였고, 알루미늄과 연강 모두 15mJ의 동일한 에너지가 흡수되었다고 가정하였다. 이 결과에 의하면, Al의 열전도도가 연강보다 크기



(a) for aluminum



(b) for mild steel

Fig. 3 Temperature rise for a range of depth below the surface

때문에 동일한 에너지 흡수량에 대해서는, 연강의 최대 온도가 더 높은 것으로 나타난다. 그러나, 실제로는 펄스 레이저가 동일한 세기로 입사하는 경우에 연강의 반사율이 작아서, 실제 에너지 흡수량은 연강의 경우가 훨씬 크기 때문에, 시간 및 공간 영역에서의 최대 온도 및 온도 구배는 연강의 경우에 이보다도 훨씬 크게 나타난다. 따라서, 레이저 입사에 의한 온도구배는 연강의 경우에 효과적이고, 결과적으로 레이저 유도 초음파를 발생시키는 데 더 유리하다고 볼 수 있다.

Q-스위칭된 펄스 레이저의 원거리장 분포와 유사한 가우시안 공간 율곽, 그리고 펄스의 실제적 시간 율곽을 고려한 금속 표면 근방 온도분포는 Ready의 연구[10]에서 제시되었다. 최근에는 Sanderson 등[14]에 의해 가우시안 시간분포 및 공간분포를 갖는 펄스 레이저에 의해 발생된 온도분포가 레이저 초음파의 파형 예측을 위해 계산되었다.

3.4. 무한체 내 초음파 전파

3.4.1. 열탄성 효과에 의한 초음파 전파

입사 레이저 펄스의 효과가 단지 샘플 표면 영역에서의 적당한 온도 상승을 유발하는 저출력 영역에서는, 반드시 고온 재료의 열 팽창과 이에 따른 재료 내 응력과 변형률을 발생시킨다. 탄성파가 고체 내를 전파하는 거리가 레이저 빔의 직경보다 상당히 작은 경우를 가정할 경우, 일차원 문제[1]로 근사화 할 수 있다. 따라서, 일차원 모델에서는 단지 표면에 수직한 평면 파면을 가진 압축 파만이 발생된다. 1차원 문제에서의 응력-변형률 관계 및 운동 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_{zz} = (\lambda + 2\mu)\epsilon_{zz} - 3Ba\delta T \dots\dots\dots (5)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - 3Ba \frac{\partial T}{\partial z} \dots\dots\dots (6)$$

여기서, B 는 체적 탄성계수(bulk modulus)이고, a 는 선팽창(linear expansion) 계수이다. 그러나, 레이저 펄스가 금속 재료 표면에 입사되었을 때, 삼차원 모델은 물리적 실재를 좀 더 근접하게 나타낼 수 있다. 대부분의 실제 응용에서 레이저 펄스 직경은 초음파 전파 경로보다 훨씬 작아서, 엄밀하게는 삼차원 문제[3,5,7,16]로 접근해

야 한다. 이 경우에, 레이저 소스를 한 점에서 발생하는 팽창의 중심(center of expansion)으로 고려하게 된다. 만일 팽창 중심이 등방성으로 가정된 재료의 체적 내에 묻힌다면, 그 점에 작은 여분의 체적 δV 를 삽입한 것과 등가하다. 이것은 다음의 국부 변형률과 정수압을 발생시킨다.

$$\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = \epsilon_{33} = \frac{1}{3} \frac{\delta V}{V} = a\delta T \dots\dots\dots (7)$$

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33} = B \frac{\delta V}{V} \dots\dots\dots (8)$$

따라서, 점 팽창(point expansion)은 크기가 같고, 서로 수직인 세 개의 하중 쌍의 갑작스런 발생과 등가하다. 이러한 하중 쌍을 쌍극자라고 부른다. 쌍극자의 강도(strength)는 각 하중의 크기와 각 하중이 떨어진 거리의 곱으로 주어진다. 따라서, 응력과 체적의 곱과 같다.

$$D_{11} = D_{22} = D_{33} = B\delta V \dots\dots\dots (9)$$

펄스로부터 에너지 $\delta E = (1-R)E$ 가 체적 V 내에 흡수되어, 온도 상승 δT 를 야기한다면, 열 전도율을 무시할 때 체적 변형률은 다음으로 주어진다.

$$\frac{\delta V}{V} = 3a\delta T = \frac{3a\delta E}{\rho CV} \dots\dots\dots (10)$$

따라서, 레이저에 의한 열탄성 소스(source)는 레이저에 의한 에너지 흡수량에 비례하는 다음과 같은 작은 여분의 체적 δV 의 삽입으로 고려될 수 있다. [3].

$$\delta V = \frac{3a}{\rho C} \delta E \dots\dots\dots (11)$$

원점에 가해진 순간적인 점 팽창에 쌍극자 강도를 적용할 때, 이에 의한 무한체 내에서의 변위장은 다음으로 주어진다[15].

$$u_r = \frac{B}{4\pi(\lambda + 2\mu)c_1 r} \delta V'(t - r/c_1) \dots\dots (12)$$

$$= \frac{B}{4\pi(\lambda + 2\mu)c_1 r} \frac{3a}{\rho C} \delta E'(t - r/c_1)$$

변위는 레이저에 의해 흡수된 에너지 함수의 도함수에 비례하며, 압축 중심은 전단파를 발생시키지 않고, 단지 압축파만을 발생시킨다.

3.4.2. 용발 파원에 의한 초음파 전파

고출력 레이저에 의한 용발 파원은 충격하중이 작용하는 것처럼 모델링한다. 이는 용발 파원에 의해 운동량이 전달되기 때문이다. 무한 고체 내 시간에 따라 변화하는 점 하중 $F(t)$ 가 원점에서 작용할 때 임의점에서의 변위장은 다음과 같이 주어진다[15].

$$u_r(t) = \frac{\cos \theta}{4\pi(\lambda + 2\mu)r} F(t - r/c_1) \dots\dots\dots (13)$$

$$u_\theta(t) = \frac{\sin \theta}{4\pi\mu r} F(t - r/c_2) \dots\dots\dots (14)$$

전파 방향 및 전파 방향에 수직인 방향으로의 변위의 시간 의존성은 하중 $F(t)$ 의 시간 의존성과 동일하다. 이는 팽창 중심의 경우에서처럼 도함수에 의존하는 것과 다르다.

3.5. 유한체에서의 탄성파 전파

실제의 레이저 유도 초음파는 유한한 경계를 갖는 재료에서 수행되며, 이미 많은 연구자들이 반 무한체나 평판에서의 변위장에 대한 이론적, 실험적 연구를 수행하였다. Sinclair [16]는 반 무한체에서의 점 파원(point source)에 대한 진앙점(epicenter)에서의 해를 제시하였다. Rosel[5]는 표면 팽창 중심(surface center of expansion) 모델을 이용하여, 평판 표면에 입사된 레이저-여기 초음파(laser-generated ultrasound)에 의한 진앙점에서의 변위에 대해 상세한 연구를 수행하였다. 이들 연구는 레이저-여기 초음파의 이론적 변위장을 예측하는데 활용되었다[17]. Scala와 Doyle[18]은 레이저-여기 표면 탄성파의 주파수 및 시간 영역에서의 특성을 다루었는데, 재료 표면의 레이저 입사점과 초음파 감지점 사이의 거리에 따라 근거리장, 원거리장을 구분하여, 이들 각 경우에 대한 열탄성 영역, 용발 영역에서의 표면탄성파의 파형 변화를 구체적으로 제시하였다. 예로써, 알루미늄에 대한 열탄성 영역 레이저 입사에 의해 발생된 전형적인 원거리장 표면 변위를 그들의 연구 결과를 인용하여, Fig. 4에 제시한다. Scala 등[18]

의 보고에 의하면, 용발 영역 레이저 입사에 의한 초음파 파형은 극적인 변화를 보인다. 예로써, 레이저 선 조명을 이용한 표면 탄성파의 파형 변화를 Fig. 5에 제시한다.

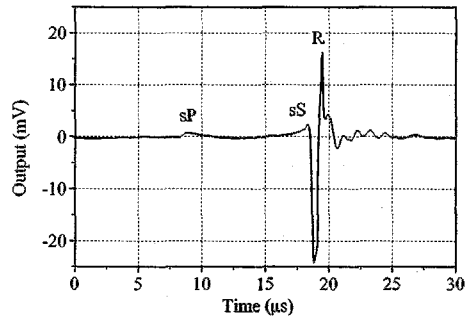


Fig. 4 Surface waveform for farfield from a thermoelastic laser source on Al

Scruby 등[3]은 레이저 입사에 의해 알루미늄 시편에 발생된 진앙점에서의 변위장을 열탄성영역에서 실험적으로 측정하고, 진앙점에서의 횡파의 진폭이 종파의 진폭의 4배 가량 된다는 사실과 이들 진폭이 레이저 펄스의 입사에너지에 비례한다는 사실을 제시하였다. Aussel 등[7]은 열탄성 영역뿐만 아니라, 용발 영역에서의 표면탄성파의 파형 및 진앙점에서의 파형에 대한 이론적, 실험적 결과를 제시하였다. 이들에 의한 연구 결과 중 일부를 인용하여 입사 레이저 출력에 따른 진앙점에서의 급격한 파형 변화를 Fig. 6에 제시한다.

Hutchins 등[4]은 알루미늄에서의 레이저-여기 초음파의 지향 패턴에 대한 이론적 예측과 실험을 수행하였다. 열탄성 영역과 용발 영역에서 종파, 횡파의 지향성에 차이를 보인다는 사실을 제시하였다. 최근에는 Bernstein 등[19]이 레이저-여기 초음파의 횡파 신호를 측정하고, 레이저 선 조명에 의한 지향성과, 레이저 점원에 의한 지향성은 동일하나, 시간에 따른 이들 파형에는 차이가 발생함을 보고하였다. Doyle와 Scala[20]는 실린더 렌즈에 의한 레이저 선 조명이 발생시키는 Rayleigh 파의 근거리장에서의 파형이 단극 하강(monopolar depression) 특성이 있음을 제시하였다. Royer 등[21]은 열탄성 영역에서의 레이저 라인 소스에 의한 Rayleigh 파형에 대해 이론적 실험적 연구를 수행하였는데, 근거리장과 원거리장에서 파형에 차이가 난다는 사실을 제시하였다. 또한 레이저의 펄스 폭과 레이저의 가우시안 빔폭을 파라미터로 하는 근거리장과 원거리장의 근사기준을 수치적으로 제시하였다.

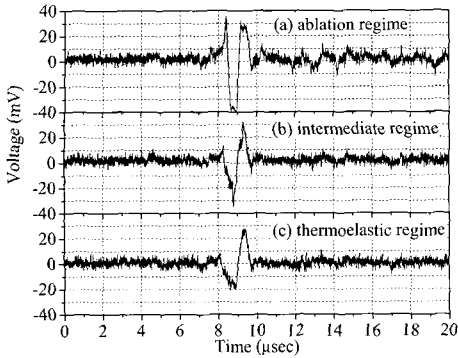
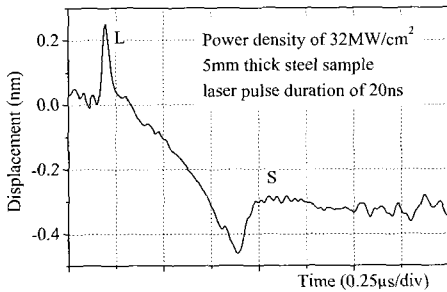
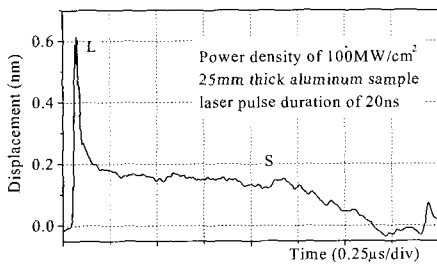


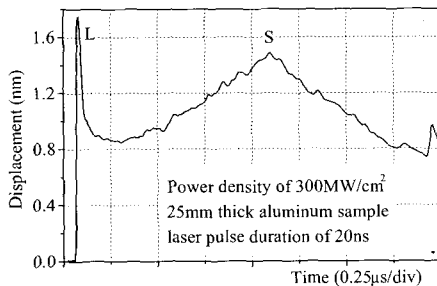
Fig. 5 Rayleigh waveform for thermoelastic, ablative laser line sources



(a) intermediate condition



(b) ablation condition



(c) ablation condition

Fig. 6 Influence of laser power density on displacement at epicenter

이러한 연구들은 결합 크기나 표면 특성에 효과적인 표면파형을 예측하고, 발생시키는데 유용한 정보를 제공한다. 레이저에 의한 초음파의 발생 메카니즘과 더불어 초음파의 파형을 정확히 예측하는 것은 결과를 해석하는데 있어서 매우 중요하다. 국내에서는 김경조 등[22]이 레이저-여기 초음파의 열탄성 및 용발 영역에서의 파형 예측을 위해 유한차분법과 질량-질점 모델과 유사한 기법에 의한 2차원 시뮬레이션을 수행한 바 있다.

실제 결합 검사를 위해서는 목적에 적합하도록 레이저 조명 형태를 바꿀 필요가 있다. 선이나 선 배열 또는 원형으로 바꾸기 위해 다양한 광학소자가 활용될 수 있다. 보통 실제적인 경우에는 레이저 점원이 폭넓게 이용되지만, 지향성을 특히 강화해야 할 필요가 있을 때는 선 조명이 요구된다. 또한 선 조명의 경우에는 수학적 복잡성을 제거할 수 있는 2차원 모델이 된다는 장점을 가진다. 또한, 레이저 펄스를 환형으로 변환하여 원형의 Rayleigh 파가 원의 중심으로 수렴하도록 하여 큰 표면 진폭을 얻을 목적으로 링 파원을 만들기도 한다[23].

레이저 간섭계를 이용한 비접촉식 초음파 감지는 상용 초음파 방법에 비해 상대적으로 낮은 신호대 잡음비(SNR)를 갖는다는 단점을 개선하기 위해, 협대역 표면탄성파를 발생시키기 위한 연구가 이루어졌다[24-26]. 특히, Huang 등[26]은 회절격자를 이용한 선배열 조명을 수행하였고, 선 배열 간의 간격과 선 조명 폭 간의 최적 조건을 도출하여, 협대역 표면탄성파를 발생시켰다. 선 배열 조명에 의한 표면탄성파의 발생은, 파의 방향성 조절, 신호대 잡음비의 개선뿐 만 아니라, 특히 전파하는 표면탄성파의 파장을 변화시켜, 주파수 선택적 초음파를 발생시킬 수 있어서, 큰 장점을 갖는다. 뿐만 아니라, 선 배열 조명은 박판 내 Lamb파를 발생시키는데 활용될 수 있다. Eisenhardt 등[27]은 알루미늄 평판 내 레이저 입사에 의한 Lamb파를 발생시키고, 전파 거리를 변화 시켜가면서, 레이저 간섭계에 의해 초음파 신호를 측정하고, 2D 푸리에 변환에 의해 분산 곡선을 얻어내었다.

한편, 레이저 펄스를 고체 표면까지 유도하는데 있어 다중모드 광섬유가 사용되고 있다[28,29]. 실험실과 같은 이상적인 측정 환경이 아닌, 거친 환경에서도 광섬유를 도파관으로 이용하여 손쉽게 레이저를 샘플까지 운반 및 조명하기에 매우 효과적이다. 이러한 연구 결과들은 하나의 완전한 레이저 초음파 시스템의 구성을 이룰 수 있고, 현장에서의 적용 능력을 진보시키고 있으며, 비접촉식 비파괴 검사 및 평가에 대한 응용성을 극대화해 나가고 있다.

4. 간섭계에 의한 초음파의 비접촉식 수신

레이저 유도 초음파 기술의 가장 큰 특징은 초음파의 비접촉식 발생 및 감지에 있다. 레이저 간섭계는 표면 수직 변위의 비접촉식 감지 및 절대량 측정이 가능하다는 장점으로 인하여 초음파 감지에 활발히 적용되어왔다. [9,30]. 다양한 레이저 간섭계의 광학적 원리를 본 지면을 통해 상세히 서술하는 데는 한계가 있다고 판단된다. 그러나, 다양한 구성의 간섭계는 고전적인 마이켈슨 간섭계의 변형으로 기술될 수 있다. 따라서, 초음파 수신을 위한 기본 원리의 전달이라는 목적에서 고전적인 마이켈슨(Michelson) 간섭계를 이용한 초음파 감지 원리를 예로써 기술하고자 한다. 초음파 측정을 위해 활용되는 그외 간섭계에 대해서는 특징을 요약 기술하고, 집중적인 관심을 필요로 하는 독자들을 위해 참고문헌을 추천한다.

초음파 변위 측정을 위한 마이켈슨 간섭계의 광학적 개요도를 Fig. 7에 제시하였다. cw 단색성 광원은 시준기를 통해 평행광으로 정렬되고, 광분할기(beam splitter)를 거쳐 기준 빔(reference beam)과 신호 빔(signal beam)으로 분할된다. 특히 신호 빔은 초음파 변위 $u(t)$ 를 경험하고 되돌아오며, 광분할기를 거쳐 기준 빔과 다시 합쳐진다. 합쳐진 빔의 일부가 광검출기로 진행하고, 간섭세기에 의한 교류 전압 신호를 오실로스코프를 통해 관측하여, 초음파 변위 정보를 얻는다. 기준 빔과 신호 빔 사이의 상대 위상차는, 이들 빔 사이 광경로차에 의해 발생되는데, 정적 광경로차에 의한 위상차 ϕ_b 와 초음파 변위가 야기하는 위상차 $\phi_s=2ku(t)$ 로 표현할 수 있다. 이때, k 는 광원의 파수(wave number)이며, $2\pi/\lambda$ 이다. 따라서, 광검출기에서의 간섭세기는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$I(t) = I_0[1 + V\cos(\phi_b + 2ku(t))] \dots\dots\dots (15)$$

여기서, I_0 는 광검출기로 입사하는 전체 입사 세기이고, V 는 가시도(visibility)로 정의된다. 최종적으로 초음파에 의한 변위가 신호 빔의 광경로에 교란을 주어, 그 영향이 간섭세기의 변화 형태로 나타난다.

광학 간섭계를 이용한 초음파 감지 기술에서 가장 큰 관심사는 실제적인 거친 표면에 대한 초음파 변위를 측정하는 것이다. 마이켈슨 간섭계를 이용한 초음파 측정에서, 시편의 표면 변위를 경험하는 신호 빔은, 거울과 같은 시편 표면에서는 좋은 가간섭성을 가지고 반사되겠지만, 거친 표면에서는 산란되고, 극히 일부의 빔이 광검출기에 도달한다. 따라서, 마이켈슨 간섭계를 이용한 비접촉식 초음파 측정에는 재료 표면의 거칠기가 신호 측정에 매우 큰 영향을 준다. 이러한 경우, 시편을 잘 연마하여 가간섭성이 좋은 반사가 발생하도록 해야한다. 그러나, 거친 표면이라 하더라도, 유한한 면적에 입사된 레이저의 극히 일부 빔은 광검출기까지 도달한다. 물론, 이러한 경우 신호대 잡음비는 크게 감소하게 된다. 따라서, 이를 보상하기 위해 더 큰 출력의 레이저의 사용을 시도하게 되나, 역시 광검출기의 손상 허용치를 고려하여 결정하여야 한다.

또 한가지 중요한 문제는, 원거리를 전파한 전형적인 초음파 변위의 진폭이 수 nm 내외로 극히 작다는 점이다. 물론 펄스 레이저 출력을 증가시켜 레이저 여기 초음파의 진폭을 증가시킬 수 있으나, 열탄성 영역에서의 원거리장의 초음파 진폭은 보통 nm 또는 Å 단위로 알려져 있다[7,9]. 간섭세기를 나타내는 식 (15)에서, 교류 성분은 $2ku(t)$ 에 의해 결정되는데, 이는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$2ku(t) = 4\pi u(t)/\lambda \dots\dots\dots (16)$$

이때, λ 는 광원의 파장이다. 예로써, 간섭계의 광원으로 파장 632.8nm의 He-Ne 레이저를 사용할 때, 초음파에 의한 위상차 ϕ_s 는 매우 작은 값을 갖게 된다. 따라서, Fig. 8에 보인 바와 같이, 위상 바이어스 ϕ_b 를 $\pi/2$ 로 만들어 주어야 초음파 측정을 위한 간섭계 민감도(sensitivity)가 최적일 수 있다. 위상 바이어스를 $\pi/2$ 로 인가하여 민감도를 증가시키고, 주변환경으로부터의 온도, 진동에 의한 주파수 잡음에 대한 능동적인 안정화 과정이 필요하며, 이러한 기술적 방법들에 대한 많은 연구가 이루어졌다[9,12,30].

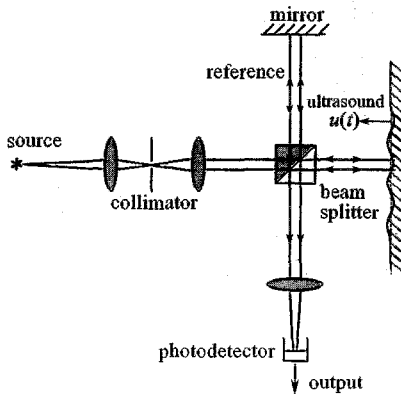


Fig. 7 Optical schematic of Michelson interferometer

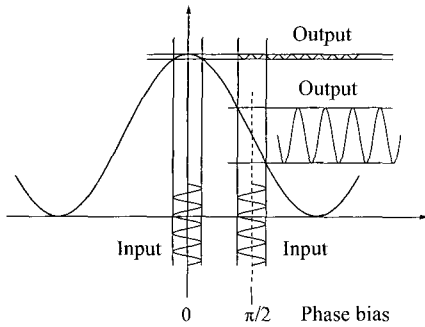


Fig. 8 Output signal versus phase bias

또한, 기준 빔을 사용하지 않고, 초음파에 의해 진동하는 표면으로부터 산란된 빛의 주파수의 작은 변화, 즉 도플러 효과(Doppler shift)를 직접 결정하는 방식의 경로차(long-path difference) 간섭계가 초음파 감지에 활용된다. 이러한 간섭계 출력은 초음파 표면 변위보다는 표면 속도에 비례하게 된다. 이 간섭계는 반사가 매우 잘 되도록 연마된 시편 표면에 대해서는, 기준 빔을 사용하는 마이켈슨 간섭계에 대해 특별한 장점이 없다. 그러나, 속도를 측정하는 이 간섭계는 시편 표면의 저주파 진동의 영향을 받지 않고, 고주파에 효과적이며, 특히 거친 표면에 대해서도 좋은 민감도를 갖는다는 아주 큰 장점이 있다. 이러한 목적을 위해 큰 경로차를 갖도록 구성된 시간 지연(time delay) 간섭계와 수많은 다중 반사를 이용하는 패브리-페로(Fabry-Perot) 간섭계가 있다. 시간 지연 간섭계는 최적 주파수 감도를 경로차(long-path)를 통해 조절하게 되는데, 벌크 광학 간섭계를 이용하여 5MHz, 1MHz에서 최적감도를 얻기 위해서는 각각 20m, 100m 정도의 경로차를 만들어 주어야 하는 점이 현장 적용에 실용적이지 못하다.

이러한 단점을 보완한 대체 간섭계가 90년대 들어 보고되었는데, 바로 시간 지연 간섭계의 경로차를 광섬유 지연선으로 구현한 광섬유 Sagnac 간섭계[31-36]이다. Sagnac이 제안한 Sagnac효과를 활용하는 광섬유 회전 자이로스코프와 유사한 구조로 되어있다. 광섬유 자체가 빛을 운반하고, 휠 수 있는 유전체 도파관이기 때문에, 광섬유로 경로차를 만들어 주어, 경로차를 만드는 데 있어 공간상의 제약을 제거하였다. 일반적으로 광섬유는 가볍고, 적응성이 우수하며, 감도가 좋을 뿐 아니라, 굽힘성이 좋아 피측정물의 구조에 적합한 형태로 만들 수 있다. 광섬유 간섭계의 이러한 장점을 활용하여 초음파 간섭계를

구성함으로써, 복잡한 구조물, 고온 환경과 같이 기존의 접촉식 초음파 센서로 측정이 불가능한 분야에 활용될 수 있다. Fig. 9에 광섬유 Sagnac 간섭계의 광학적 개요도를 제시한다. 여기에 제시한 광섬유 Sagnac 간섭계 [35,36]는 광섬유 내 복굴절을 조절하여 $\pi/2$ 위상 바이어스를 인가함으로써, 별도의 복잡한 신호처리 없이 초음파를 쉽게 감지할 수 있는 특징이 있다. Sagnac 간섭계는 동일한 광 경로를 서로 반대 방향으로 진행하는 두 빛간의 간섭 현상을 활용하기 때문에, 정적 광경로가 완전히 일치하는 구조이다. 정적 광경로차가 발생하지 않는 특성으로 인해 마흐-젠더(Mach-Zender)나 마이켈슨 간섭계에서 나타나는 위상 유동은 거의 발생하지 않는다. 따라서, 광섬유 센서의 주된 잡음원 중의 하나인 광원에 의한 위상 잡음이 없으며, 광섬유 길이를 정밀하게 조절할 필요가 없다. 또한, 고주파 신호에 대한 반응도가 높을 뿐만 아니라, 주변 환경에 의한 영향이 적다는 장점을 갖는다. Fig. 10에는 광섬유 Sagnac 간섭계의 초음파 측정 원리를 나타낸 것이다. 광섬유 지연선의 길이는 광섬유 내 빛이 초음파 반주기동안 진행한 거리만큼 만들어 주어, 위상반응도를 극대화하며, 본질적으로 간섭계는 주파수 대역이 좁다는 특징을 갖는다.

또 다른 경로차 간섭계인 패브리-페로 간섭계는 경로차를 증가시키기 위한 방법으로 매우 반사도가 좋은 두 개의 거울을 배치하여 만든 공동(cavity) 사이에 빛이 다중 반사되도록 하는 방식을 사용한다. 일련의 협대역 피크로 구성된 주파수 스펙트럼을 얻기 위해 무수히 반사된 빔 사이의 간섭을 이용한다. 투과된 입사 세기는 다음과 같이 표현된다.

$$T_E = \frac{(1-R)^2}{1+R^2-2R\cos(\phi_D)} \dots\dots\dots (17)$$

$$\phi_D = 4\pi h\nu/c - 2\pi n \dots\dots\dots (18)$$

여기서, R은 거울의 반사율이며, h는 공동의 두께이다. Fig. 11에 패브리-페로 간섭계의 광학적 개요도를 제시하였다. 두 평면 거울 사이에 다중 반사가 발생하는데, 패브리-페로 간섭계는 수광 출력(light-gathering power)을 높이는 것이 중요하다. 이를 위해 Fig. 12에 보인 바와 같이 평면 거울 대신 공초점(confocal) 패브리-페로 공동을 적용하여 평면 패브리-페로의 수광 출력을 개선한 공초점(confocal) 패브리-페로 간섭계[37]가 있다. 곡률 반

경 R_M 의 동일 반경을 갖는 두 개의 부분 투과 거울을, 거리 R_M 만큼 떨어진 같은 축 상에 배열하여 구성한 것이다. Monchalin 등[37]은 공초점 페브리-페로 간섭계를 시편 표면의 초음파 감지에 적용하였다. 페브리-페로 간섭계는 최대 민감도를 보이는 지점에서 작동하도록 안정화가 필요하다. 비파괴 평가에서의 실제적인 거친 표면에 대한 초음파 감지 성능이 매우 우수하여, 고온 강재의 물성 평가에 활용되고 있다[11].

90년대 들어서, 광굴절 결정체(photorefractive crystal)가 빛에 의해 굴절률이 달라지는 광굴절 효과(photorefractive effect)를 이용한 광굴절간섭계(photorefractive interferometer)에 대한 연구가 활발하게 이루어졌다[38-40]. 재료 시편 표면에서 산란된 신호 빔과 레이저 광원으로부터 펌프빔이

광굴절 결정체 내에서 간섭을 하고, 광굴절 효과에 의해 굴절을 격자가 생성되면, 회절된 펌프빔이 신호 빔의 홀로 그래피 복사가 된다. 신호 빔과 펌프빔의 two-wave mixing (TWM)이 발생하므로, TWM 간섭계라고도 하는데, 많은 연구자들의 관심을 받았다. 그 이유는 TWM 간섭계가 간섭계는 실제 시편과 같이 매우 거친 표면에서의 초음파를 감지하는데 성능이 우수하고, 저주파 잡음에 의한 적용성이 매우 우수하여, 능동 안정화의 필요성이 없고, 감지 주파수 대역이 광대역이라는 장점을 가지고 있기 때문이다[41].

실제 비파괴 평가에 사용될 거친 표면에서의 초음파 변위 측정은 레이저 유도 초음파 기법의 본질적인 목표이다. 또한 초음파와 변위의 측정 가능한 분해능을 최소한으로 작게 하는 것이 또 하나의 목표가 된다. 최근의 일련의 연구 결과는 초음파의 비접촉식 측정을 위해 적용되는 레이저 간섭계의 신호대 잡음비가 낮다는 기존의 평가를 극복해 가는 과정에 있다.

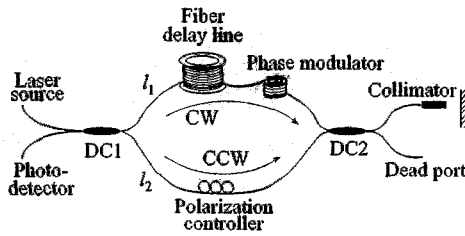


Fig. 9 Schematic of fiber optic Sagnac interferometer for ultrasound detection

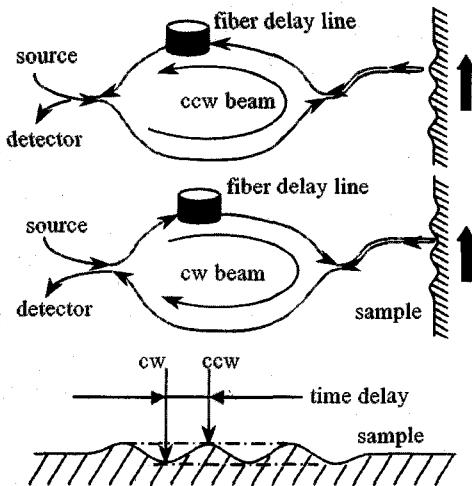


Fig. 10 Principle of ultrasound measurement of fiber optic Sagnac interferometer

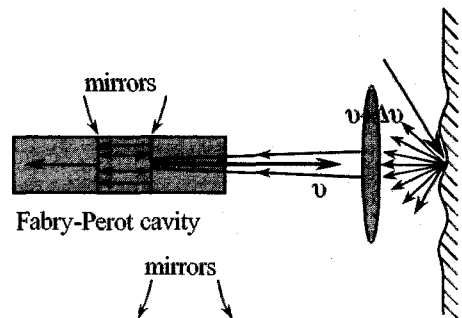


Fig. 11 Principle of Fabry-Perot interferometer

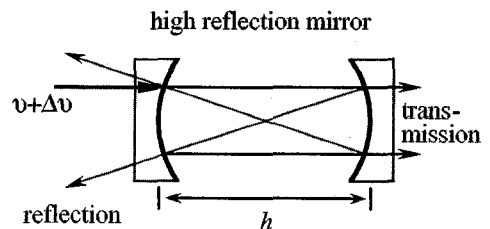


Fig. 12 Confocal Fabry-Perot cavity

5. 레이저 유도 초음파의 전망

압전 트랜스듀서를 이용한 상용 초음파에 비해 레이저 유도 초음파 기술은 상대적으로 비싸다는 단점이 있다. 또한 비접촉 초음파 감지를 위한 레이저의 간섭계의 감도가 접촉식보다는 떨어진다는 지적도 제기된다. 그러나, 지난 10여 년간의 레이저 유도 초음파 분야의 활동적 연구의 결과로서, 간섭계의 감도 개선은 비약적으로 이루어졌다. 특히 국외에는 연구 저변이 확대되어 실로 다양한 연구 결과들이 보고되고 있다. 따라서, 향후 레이저 유도 초음파 기술의 사용은 더욱 확대될 것이다.

실제 산업 현장에서 비파괴 검사 및 평가를 필요로 하는 부품이나 구조물 등은 일반적으로 복잡한 기하를 가진다. 펄스 레이저를 다중모드 광섬유 이용하여 샘플 표면까지 전달하는 기법에 대한 많은 연구가 이미 수행되고 있다. 한편, 초음파 감지를 위한 광섬유 간섭계에 대한 연구가 관심을 받고 있다. 레이저 초음파에 의한 구조물 표면의 미세한 변위를 비접촉식으로 측정하는데는 보통 벌크 광학 간섭계가 활용되었다. 그러나, 벌크 광학 간섭계의 경우 이상적인 환경에서 사용이 보편화되어 있다. 벌크 광학 간섭계의 이러한 단점을 해결하기 위해 광섬유로 구성된 간섭계를 활용하여 초음파 변위 감지를 수행하려는 연구가 진행되어왔다[31-36]. 광섬유는 가볍고, 적용성이 우수하며, 굽힘성이 좋아 피측정물의 구조에 적합한 형태로 만들 수 있다. 광섬유 간섭계는 시험체 근방에서 민감한 광학계의 정밀 정렬을 요구하지 않으며, 벌크 광학계에 요구되는 이상적인 측정 환경을 필요로 하지 않는다. 따라서, 복잡한 형상을 지닌 구조물에 적용하기 용이하며, 거친 환경에서도 사용할 수 있다는 장점을 지닌다. 현재 많은 연구자들이 레이저에 의해 초음파를 발생시키고, 적용성이 풍부한 광섬유 간섭계를 이용하여 초음파를 감지하는 연구에 관심을 기울이고 있다. 고반복률의 펄스 레이저와 결합된 광섬유 전달 시스템(fiber delivery system)과 비접촉 초음파 감지를 위한 광섬유 간섭계는 신속 검사(rapid inspection)를 위한 효과적인 수단이 될 것이다.

대부분의 결합 감지 및 재료 물성 평가는 상온에서 요구되지만, 고온 상태에서의 물성 평가 및 결합 검출이 필요한 상황도 존재한다. 예로써, 철강 제조 과정에서는 고품질, 저가 철강에 대한 요구로 인하여 결정 크기(grain size)나 결합에 대한 수많은 측정과 검사가 요구되며, 고온 환경 하에서의 비접촉식 결합 검출 및 재료 물성 평

가에 대한 연구가 절실한 상황이다. 구체적으로 비접촉식 결합 검출 및 물성 평가에 대한 연구는, 용접이나 주조과정에서 고체와 액체의 경계 조사, 단조나 열간 압연 과정에서 층간 분리나 기공과 같은 결함의 검출, 열간 압연 과정에서 결정 크기나 결(texture)과 같은 미소구조 파라미터의 감시 등에 필수적으로 수반된다. 국내에서도 고온 구조물의 비파괴 검사 및 평가를 위해 레이저 유도 초음파 기술이 적용되고 있다[11].

금속 재료뿐만 아니라 복합재료에서의 결합 검출에도 레이저 유도 초음파 기법이 활용되고 있다[12]. 레이저 초음파 C-스캔 이미징 기술은 많이 발전하여 다양한 구조물의 결합 검출에 활용되고 있으며, CFRP 항공기 날개에 대한 레이저 초음파 C-스캔 이미징을 통해 복합재료의 대표적인 손상 기구인 적층분리를 검출하는데 활용된 바 있다[42,43]. 레이저 유도 초음파 기술은 실험실 차원의 결합 탐상, 물성 평가에서부터 산업 구조물 비파괴 평가에까지 적용이 점차 확대되어 갈 것이다[44].

특히 최근 레이저 유도 초음파 기술은 코팅과 같은 박막이나 미소 가공된 박막층의 잔류 응력, 탄성계수, 포아송 비와 같은 물성 평가에도 적용되고 있다[45]. 특히 박막 미소기전시스템(MEMS) 소자에 대한 특성 평가에는 펄스당 에너지는 수 μJ 펄스 폭은 수백 psec 단위의 레이저가 요구되며, 펄스 레이저의 입사점 크기도 지름 수 μm 단위의 미세한 크기가 요구된다. 레이저 유도 초음파 기술은 산업 설비나 기계구조물에서 미소기전시스템 소자에까지 적용되고 있으며, 적용 영역의 폭은 더욱 광범해질 것으로 전망된다.

6. 맺음말

초기 연구자들에 의해 초음파를 발생시키고 수신하는데 있어, 레이저 기술의 응용 가능성을 입증한 후, 레이저 유도 초음파 기술은 비약적으로 발전하였고, 향후 그 적용 범위는 더욱 확대될 전망이다. 레이저 유도 초음파 기술은 지난 십 여 년에 걸쳐 비파괴검사 및 평가 분야에서 매우 활동적인 연구 분야였다. 향후 구조물의 건진성 감시 및 재료 물성 평가에 원격 신속 검사 기술로서 큰 영향력을 부여할 것이다. 그 적용 범위도 산업 설비, 기계 구조물에서 미세가공 소자에 이르기까지 광범해질 것이다.

레이저 유도 초음파 기술은 비접촉식 초음파 발생 및 수신 기술로서, 진보된 비파괴 평가 기술로 인정받고 있

다. 또한 레이저 유도 초음파 기술은 광학, 초음파, 재료 등 여러 분야의 지식을 공유하는 분야-제휴적인 성격을 강하게 띠는 특징이 있다. 실용화 단계까지의 연구 결과가 도출된다면, 기존의 비파괴 탐상 방법으로는 불가능한 분야에 적용함으로써, 효율 가치를 극대화할 수 있는 고부가가치 기술이 되리라 판단된다.

연구 및 산업에의 적용 가치를 인정받고 있는 레이저 유도 초음파 분야의 국내 연구 저변의 확대가 요구되며, 기술 선진화를 위해 집중적인 연구가 필요하다. 제한된 지면을 통해, 레이저 초음파 기술의 이해를 돕고자 전문가들의 연구 결과를 정리하였다. 레이저 유도 초음파 분야에 관심을 집중하고 있는 많은 연구자들에게 적은 지식이나마 도움이 되었으면 하는 바람을 피력한다.

참고문헌

- [1] R. M. White, "Generation of elastic waves by transient heating," *J. Appl. Phys.*, Vol. 34, No. 12, pp. 3559-3567, (1963)
- [2] H. M. Ledbetter and J. C. Moulder, "Laser-induced Rayleigh waves in aluminum," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 65, No. 3, pp. 840-842, (1979)
- [3] 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)
- [4] D. A. Hutchins, R. J. Dewhurst, and S. B. Palmer, "Directivity patterns of laser-generated ultrasound in aluminum," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 70, No. 5, pp. 1362-1369, (1981)
- [5] L. R. F. Rose, "Point-source representation for laser-generated ultrasound," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 75, No. 3, pp. 723-732, (1984)
- [6] B. C. Moss and C. B. Scruby, "Investigation of ultrasonic transducers using optical techniques", *Ultrasonics*, Vol. 26, pp. 179-188, (1988)
- [7] J. D. Aussel, A. Le Brun, and J. C. Baboux, "Generating acoustic waves by laser: theoretical and experimental study of the emission source," *Ultrasonics*, Vol. 26, pp. 245-255, (1988)
- [8] J.D. Achenbach, "Quantitative nondestructive evaluation," *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 37, pp. 13-27, (2000)
- [9] C. B. Scruby and L.E. Drain, *Laser Ultrasonics - Techniques and Applications*, Adam Hilger, New York, (1990)
- [10] J. F. Ready, *Effects of High-power Laser Radiation*, Academic Press, New York, pp. 67-125, (1971)
- [11] K. J. Oh, C. S. Lim, H. K. Park, and H. H. Jeon, "Measurement of grain size for steel plate using laser-ultrasonics," 1st International Conference on Laser Application, Edited by K.S. Kim, Gwangju, Korea, 29-30th Nov., (2001)
- [12] J. P. Monchalin, "Detection and characterization of flaws by laser-ultrasonics," In: P.K. Rastogi and D. Inaudi (Eds.), *Trends in Optical Nondestructive Testing and Inspection*, Elsevier, New York, pp. 503-517, (2000)
- [13] J. F. Ready, "Effects due to absorption of laser radiation," *J. Appl. Phys.*, Vol. 36, No. 2, pp. 462-468, (1965)
- [14] T. Sanderson, C. Urne, J. Jarzynski, "Laser generated ultrasound: a thermoelastic analysis of the source," *Ultrasonics*, Vol. 35, pp. 115-124, (1997)
- [15] J. D. Achenbach, *Wave Propagation in Elastic Solids*, North-Holland, Amsterdam, (1973)
- [16] J. E. Sinclair, "Epicentre solutions for point multipole sources in an elastic half-space," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 12, pp. 1309-1315, (1979)
- [17] 김경조, 山脇 壽, 장경영, "마이켈슨 간섭계를 이용한 레이저 여기 초음파의 검출," *비파괴검사학회지*, Vol. 20, No. 1, pp. 27-32, (2000)
- [18] C. M. Scala and P. A. Doyle, "Time-and frequency-domain characteristics of laser-generated ultrasonic surface wave," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 85, No. 4, pp. 1569-1576, (1989)
- [19] J. R. Bernstein and J. B. Spicer, "Line source representation for laser-generated ultrasound in aluminum", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 107, No. 3, pp. 1352-1357, (2000)
- [20] P. A. Doyle and C. M. Scala, "Near-field Rayleigh waves from a laser line source," *Ultrasonics*, Vol. 34, pp. 1-8, (1996)

- [21] D. Royer and C. Chenu, "Experimental and theoretical waveforms of Rayleigh waves generated by a thermoelastic laser line source," *Ultrasonics*, Vol. 38, pp. 891-895, (2000)
- [22] 김정조, 山脇 壽, "레이저 여기 초음파의 2차원 컴퓨터 시뮬레이션," *대한기계학회논문집 A권*, 제 24권, 제 7호, pp. 1847-1853, (2000)
- [23] P. Cielo, F. Nadeau, and M. Lamontagne, "Laser generation of convergent acoustic waves for materials inspection," *Ultrasonics*, Vol. 23, No. 2, pp. 55-56, (1985)
- [24] K. A. Nelson, R. J. D. Miller, D. R. Lutz, and M. D. Fayer, "Thermal generation of tunable ultrasonic waves," *J. Appl. Phys.*, Vol. 53, No. 2, pp. 1144-1149, (1982)
- [25] D. Royer and E. Dieulesaint, "Analysis of thermal generation of Rayleigh waves," *J. Appl. Phys.*, Vol. 56, No. 9, pp. 2507-2511, (1984)
- [26] J. Huang, S. Krishnaswamy, and J. D. Achenbach, "Laser generation of narrow-band surface waves," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 92, No. 5, pp. 2527-2531, (1992)
- [27] C. Eisenhardt, L. J. Jacobs, and J. Qu, "Application of laser ultrasonics to develop dispersion curves for elastic plates," *J. Appl. Mech.*, Vol. 66, pp. 1043-1045, (1999)
- [28] F. L. Scalea, T. P. Berndt, J. B. Spicer, and B. B. Djordjevic, "Remote laser generation of narrow-band surface waves through optical fibers," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, 46 (6), 1551-1557, (1999)
- [29] S. N. Hopko and I. C. Ume, "Laser generated ultrasound by material ablation using fiber optic delivery," *Ultrasonics*, Vol. 37, pp. 1-7, (1999)
- [30] J. W. Wagner, "Optical detection of ultrasound," In: R.N. Thurston, A.D. Pierce (Eds.), *Ultrasonic Measurements Methods*, Physical Acoustics, Vol. XIX, Academic Press, pp. 201-266, (1990)
- [31] J. J. Alcoz, C. E. Duffer, and S. Nair, "Noncontact detection of ultrasound with rugged fiber-optic interferometer," *Proceedings of the 1996 IEEE Ultrasonic Symposium*, Vol. 1, pp. 639-642, (1996)
- [32] P. A. Fomitchov, S. Krishnaswamy, and J.D. Achenbach, "Compact phase-shifted Sagnac interferometer for ultrasound detection," *Opt. Laser Technol.*, Vol. 29, No. 6, pp. 333-338, (1997)
- [33] P. Fomitchov, J.S. Steckenrider, S. Krishnaswamy, and J.D. Achenbach, "Frequency-shifted low-noise Sagnac sensor for ultrasonic measurements," In: D.O. Thompson and D.E. Chimenti (Eds.), *Review of Progress Quantitative Non-Destructive Evaluation*, Vol. 16b, Plenum Press, New York, pp. 2053-2060, (1997)
- [34] P. Fomitchov, A. K. Kromine, S. Krishnaswamy, and J. D. Achenbach, "Sagnac-type fiber-optic array sensor for detection of bulk ultrasonic waves," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, Vol. 47, No. 3, pp. 584-590, (2000)
- [35] 장태성, 이승석, 김영길, 권일범, 이왕주, 이정주, "광섬유 Sagnac 간섭계를 이용한 초음파의 비접촉식 감지," *대한기계학회 논문집 A권*, 제25권 제9호, pp. 1400-1409, (2001)
- [36] T. S. Jang, S. S. Lee, I. B. Kwon, W. J. Lee, and J. J. Lee, "Non-contact detection of ultrasonic waves using fiber optic Sagnac interferometer," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, accepted (2002)
- [37] J. P. Monchalin and R. Héon, "Laser ultrasonic generation and optical detection with a confocal Fabry-Perot interferometer," *Mat. Evalu.*, Vol. 44, pp. 1231-1237, (1986)
- [38] R.K. Ing and J.P. Monchalin, "Broadband optical detection of ultrasound by two-wave mixing in a photorefractive crystal," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 59, No. 25, pp. 3233-3235, (1991)
- [39] A. Blouin and J.P. Monchalin, "Detection of ultrasonic motion of a scattering surface by two-wave mixing in a photorefractive GaAs crystal," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 65, pp. 932-934, (1994)
- [40] P. Delaye, A. Blouin, D. Drolet, L.A. de Montmorillon, G. Roosen, and J.P. Monchalin, "Detection of a ultrasonic motion of a scattering surface by photorefractive InP:Fe under an applied DC field," *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 14, pp. 1723-1733, (1997)
- [41] P. Delaye, A. Blouin, J.P. Monchalin, and G. Roosen, "Photorefractive interferometry for the optical

- detection of the ultrasonic motion of a scattering surface," In: P.K. Rastogi and D. Inaudi (Eds.), *Trends in Optical Nondestructive Testing and Inspection*, Elsevier, New York, pp. 519-532, (2000)
- [42] O. Pétillon, J. P. Dupuis, H. Voillaume, and H. Trétout, "Applications of Laser Based Ultrasonics for Aerospace Industry," *ECTNDT98, NDT.net*, Vol. 3, No. 9, September, (1998)
- [43] J. P. Monchalain, C. Neron, M. Choquet, D. Drolet, M. Viens, "Laser-ultrasonics inspection and characterization of aeronautic materials," *ECTNDT98, NDT.net*, Vol. 3, No. 11, November, (1998)
- [44] O. Pétillon and J. P. Dupuis, "Laser ultrasonic: from the lab to the industry," *Proceedings of the 15th World Conference on Non-Destructive Testing*, 15-21th October, Rome, (2000)
- [45] T. W. Murray, S. Krishnaswamy, and J. D. Achenback, "Laser generation of ultrasound in films and coatings," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 74, No. 23, pp. 3561-3563, (1999)