



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

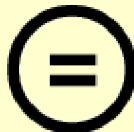
다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이 학 석 사 학 위 논 문

레이저 발생 초음파 트랜스듀서의
특성에 관한 연구



부 경 대 학 교 대 학 원

물 리 학 과

김 한 문

이 학 석 사 학 위 논 문

레이저 발생 초음파 트랜스듀서의 특성에 관한 연구

지도교수 하 강 렬

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함.



2015년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

물 리 학 과

김 한 문

김한문의 이학석사 학위논문을 인준함.

2015년 2월 27일



주 심 공학박사 김 무 준 인

위 원 이학박사 이 충 섭 인

위 원 공학박사 하 강 렬 인

목 차

Abstract	vi
제 1 장 서론	1
제 2 장 레이저에 의한 초음파 발생 원리	4
2-1. 초음파 발생 메커니즘	4
2-2. 초음파 발생 이론	7
제 3 장 실험	12
3-1. 장치 및 방법	12
3-2. 레이저발생 초음파 트랜스듀서(LGUT) 설계 및 제작	16
3-3. CNT/PDMS 막의 두께	21
제 4 장 결과 및 고찰	25
4-1. 초음파 방사 특성	25
4-1-1. 파형 특성	25
4-1-2. 음장 특성	31
4-2. 초음파 파형 시뮬레이션에 의한 고찰	33
4-2-1. 온도 변화에 따른 파형	34

4-2-2. 음축 상의 파형	38
4-2-3. 음축에 수직한 축 상의 파형 및 음압분포	39
제 5 장 결론	40
참고문헌	42
감사의 글	44



표 목차

표 3-1. 광학계 구성품의 규격	15
표 3-2. 제작한 6개 LGUT의 CNT 및 PDMS막 두께	22



그림 목차

그림 2-1. 레이저에 의한 초음파 발생의 영역별 모식도	6
그림 2-2. 레이저 발생 원형 평면 초음파 트랜스듀서의 구조	6
그림 2-3. 음장해석을 위한 좌표계	9
그림 3-1. 실험장치의 구성도	13
그림 3-2. 전체 시스템 사진	14
그림 3-3. 트랜스듀서의 구조(단위: mm)	17
그림 3-4. LGUT 제작공정	18
그림 3-5. CNT 수용액의 양에 따른 막의 두께	23
그림 3-6. PDMS 코팅 횟수에 따른 막의 두께	24
그림 4-1. 방사되는 초음파의 전형적인 파형	26
그림 4-2. 평균 강도에 따른 파형 변화	27
그림 4-3. 평균 강도에 따른 음압 변화	28
그림 4-4. CNT의 두께 변화에 따른 파형 변화	29
그림 4-5. PDMS의 두께 변화에 따른 파형 변화	30
그림 4-6. 축 방향 거리 변화에 따른 파형 변화	32
그림 4-7. 축 방향 거리 변화에 따른 파형 변화	32
그림 4-8. 온도 변화에 따른 음압 파형(1) ($\beta_1 = 1.0 \times 10^{-9}$, $\beta_1 = 1/16 \times 10^{-9}$ 일 때)	35

그림 4-9. 온도 변화에 따른 음압 파형(2)	
($\beta_1 = 2.0 \times 10^{-9}$, $\beta_1 = 1/8 \times 10^{-9}$ 일 때)	36
그림 4-10. 온도 변화에 따른 음압 파형(3)	
($\beta_1 = 4.0 \times 10^{-9}$, $\beta_1 = 1/4 \times 10^{-9}$ 일 때)	37
그림 4-11. 음축상의 위치에 따른 파형 변화	38
그림 4-12. 음축에 수직한 축상의 위치에 따른 파형 변화	39



Study on the Characteristics of a Laser Generated Ultrasound Transducer

Han-Moon, Kim

Graduate School

Pukyong National University

Abstract

For study on ultrasound generating characteristics, six circular plane LGUTs(Laser Generated Ultrasound Transducers) with diameter $\phi = 40$ mm were fabricated. Those were made of CNT(Carbone nano-tube) and PDMS(polydimethyl-siloxane) coated on PMMA(poly-methylmethacrylate) acrylic substrates. The CNT and PDMS were coated by the filtering/transition method and the spin coating method respectively, and each has three different thickness. The LGUTs were illuminated by a pulse Laser with about 8 ns pulse width and variable power. The ultrasound waves generated by the LGUTs were measured with a needle hydrophone with diameter $\phi = 0.2$ mm. As the results, the impulsive shock waves with 15 ns of -6 dB pulse width were obtained from all of the transducers. The amplitudes of the waveform were linearly changed with the Laser intensity. However, the waveform were not changed significantly with the

thickness of the CNT or PDMS as well as with the axial distance or the lateral position. It was shown that the theoretical consideration using the temperature change on the LGUT surface could estimate the impulsive wave generation.



제 1 장 서론

물질이 빛 에너지를 흡수하면 부분적으로 온도가 높아지고 열팽창에 의해 압력파가 만들어지는 현상을 광음향효과(photoacoustic effect)라고 한다.[1,2] 광음향효과에 의한 초음파의 발생 메커니즘은 기본적으로 열탄성(thermoelasticity)과 관련되는데, 시료 표면에 조사된 빛의 강도가 충분히 약할 경우 열탄성 만에 의해 초음파가 발생하고, 어느 한계보다 강할 경우 열탄성 뿐 만아니라 시료 표면의 식각(ablation)에 따른 초음파의 발생이 동반된다. 발생하는 초음파는 종파, 횡파, 표면파의 세 종류이며, 그 파형 및 전파방향은 광 빔의 특성 뿐 만아니라, 시료의 광학적 및 열탄성적 특성, 그리고 기하학적인 구조에 의존하여 변하는 것으로 보고되고 있다.[3,4] 즉, 광음향효과에 의해 발생하는 초음파 신호는 조사하는 빛의 세기와 펄스 폭, 시료의 빛 흡수율과 열전달 및 열팽창 특성, 그리고 형상에 따라 변하게 되는 것이다. 따라서 그 초음파 신호의 분석 및 처리에 의해 기존의 다른 수단으로는 획득이 곤란한 시료에 대한 여러 가지 새로운 정보를 얻을 수 있다. 예를 들어, 시료의 표면 부근에 불순물이나 미세결함이 존재하면 광음향 신호가 변화하기 때문에 그 존재를 가시적으로 확인할 수 있다. 따라서 최근 개발된 광음향 현미경(photoacoustic microscope: PAM), 광음향 단층영상법(photoacoustic tomography: PAT) 등의 장치나 기법은 반도체 웨이퍼, 금속 등 고체재료를 미소영역에서 비파괴적으로 평가하거나, 혈액이 특정 파장의 빛을

잘 흡수한다는 점을 이용하여 생체 피하층의 미세혈관을 정밀하게 영상화하는데 사용되는 등 크게 각광 받고 있다.[5~8]

한편으로 광원으로 펄스 레이저를 이용하면 광음향효과에 의해 초음파 트랜스듀서를 개발할 수 있는데, 그 트랜스듀서를 레이저발생 초음파 트랜스듀서(Laser generated ultrasound transducer: LGUT)라고 한다. LGUT는 유리나 석영 등 투명한 매질의 한쪽 단면에 빛 흡수율과 열탄성이 큰 물질을 코팅이나 결정성장법 등에 의해 부착시킨 후, 그 투명 매질을 통해 레이저 빔을 조사하여 부착된 물질에서 초음파를 발생시키는 것이다. 부착되는 물질로서는 종래 주로 카본블랙(carbon black)을 탄성중합체(elastomer)인 PDMS(polydimethyl-siloxane)와 혼합한 것이 사용되어져 왔으나[9,10], 최근 CVD(chemical vapor deposition)에 의해 성장시킨 CNT(carbon-nanotube)에 PDMS를 스핀 코팅한 것이 개발되어지고 있다.[11,12] CNT는 광흡수율 및 열전달율이 매우 우수한 재료이므로 그것을 사용하여 만들어지는 LGUT는 광/음향 에너지 변환 효율이 종래의 카본블랙에 의한 것 보다 매우 우수하다. 따라서 Baac 등[12]은 초점부근에서의 음압이 50 [MPa] 이상인 집속 초음파 트랜스듀서를 제작하여 생의학적 및 공학적으로 이용하고 있다.

광음향효과에 의해 발생된 초음파의 특성에 대해서는 1980년대부터 현재까지 많은 연구가 수행되어져 왔으나, 그것을 이용한 트랜스듀서, 즉 LGUT에 관한 연구는 2000년대 이후 주로 미시간 대학을 중심으로 이루어지고 있을 뿐, 세계적으로도 그다지 많은 연구가 수행되지 않고

있다. 특히, 국내에서는 이에 대한 연구가 전혀 이루어지고 있지 않고 있는데, 그것은 LGUT가 에너지 변환 효율이 나쁘고, 비가역적이어서 송신용으로만 사용되기 때문이다. 그리고 초음파 발생 메커니즘이 종래의 압전 트랜스듀서와는 다른데, 그 동작특성에 대한 이론적 해석이 충분히 이루어져 있지 않으며, 재현성이 있는 안정된 트랜스듀서를 제작하는 실험적 기법이 확립되지 않은데 기인한다.

본 연구는 광음향효과에 의해 발생하는 초음파의 특성을 제작된 막의 특성과 관련하여 실험적으로 체계화하고, 이론적으로 고찰하는데 목적이 있다. 이를 위하여 먼저 펄스 레이저를 사용한 광음향 측정시스템을 구성하였다. 다음으로 아크릴 기판 상에 부착된 CNT의 두께를 달리하거나, 탄성중합체(elastomer)인 PDMS의 두께를 달리하면서 제작한 직경 40 mm의 원형 평면 LGUT에서 광음향효과에 의해 방사되는 초음파의 특성을 측정, 분석하였으며, 그 결과를 이론과 결부하여 고찰하였다.

제 2 장 레이저에 의한 초음파 발생 원리

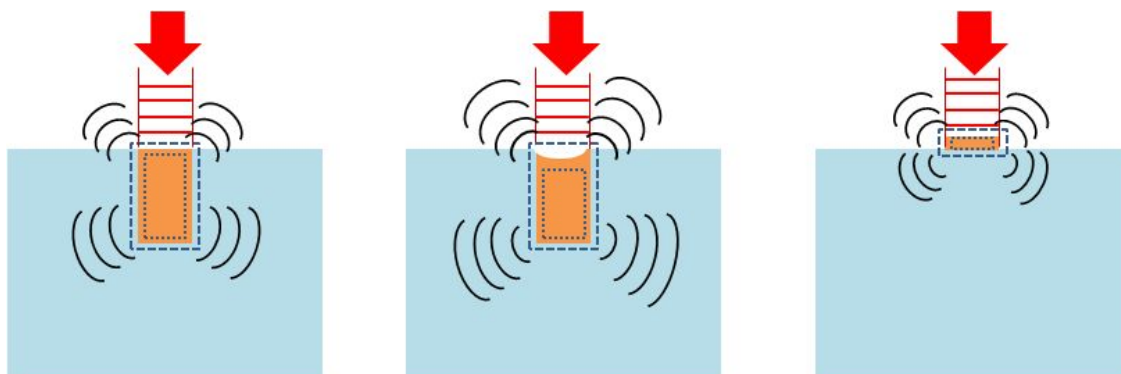
2-1. 초음파 발생 메커니즘

열탄성을 갖는 시료에 펄스의 레이저 빔을 조사하면 그 에너지의 일부가 흡수되어 시료의 온도는 국부적으로 급속히 상승한다. 이에 따라 시료는 열팽창하게 되고 기계적 변형이 생기므로 초음파가 발생된다. 이 광음향효과는 종래 주로 비파괴평가(nondestructive evaluation: NDE) 분야에서 사용되어져 왔다. NDE를 위해서는 공기 중에서 광 빔을 시료에 조사한 후, 그 표면 부근에서 발생하여 시료 내부로 전파하는 초음파를 탐지하고 있다. 초음파의 탐지방법으로는 주로 레이저 도플러 등을 이용하여 입자변위를 측정한다. 그 경우 시료 표면에서의 레이저의 강도 및 시료의 변형 형태에 따라 초음파 발생 메커니즘을 그림 2-1에 나타낸 바와 같이 크게 세 가지 영역으로 구분하고 있다.[3,4] 빛의 강도가 어느 한계보다 작으면 시료는 식각되거나 녹지 않고 그림 2-1(a)와 같이 탄성적으로 변형된 후 원래의 모습으로 복원되는데, 그 한계 이내를 열탄성영역이라고 부른다. 그 한계를 넘으면 그림 2-1(b)에 나타낸 것처럼 시료가 일부 식각되거나 용융되는 소성적 변형이 동반되는데, 그 영역을 식각(ablation) 또는 플라즈마(plasma) 영역이라고 한다.

비파괴 검사 등 일반적인 응용에 있어서는 빛의 강도가 열탄성영역 내에 있어야 하는데, 금속 시료의 경우 약 10^7 W/cm^2 이하이면 이 영역에 속한다. 열탄성 영역에서 발생하는 초음파의 진폭은 빛의 강도에 비례한다. 한편, 식각 영역에서는 더욱 강한 초음파, 특히 시료 표면에 수직인 방향으로 강한 벌크파가 방사된다. 따라서 시료에 손상이 생기는 것을 감수하고라도 큰 초음파 출력을 얻고자 할 경우에 이 영역에서 동작시킨다.

그림 2-1(c)는 고체 기관의 한쪽 단면에 빛 흡수율 및 열탄성이 우수한 물질을 박막 형태로 형성시키고, 그 박막에 레이저 빔을 조사하여 초음파를 발생시키는 방법이다. 이 방법에 의한 초음파 발생은 구속표면 음원영역(constrained surface source regime)에 속한다. 이 경우 주로 열탄성영역 내에서 사용되나, 필요에 따라 박막을 희생시키면서 강한 초음파를 얻기 위한 식각영역에서의 구동도 가능하다.

가장 단순한 LGUT는 그림 2-2와 같은 구조를 갖는다. 이것은 그림 2-1(c)를 응용한 것으로서, 레이저 빔이 투명한 고체 버퍼를 통하여 입사되고, 그 빛이 박막으로 된 흡광체에서 열로 변환된 후 탄성중합체를 여기시켜 초음파를 발생시킨다. 그리고 발생된 초음파는 그 박막에 접해 있는 매질로 전파되며, 매질이 물이나 생체일 경우 종파가 된다. 이때 트랜스듀서는 재현성을 가지고 안정되게 동작해야하므로 열탄성영역 내에서 주로 구동시킨다.



(a) 열탄성

(b) 식각(또는 플라즈마)

(c) 구속표면음원

그림 2-1. 레이저에 의한 초음파 발생의 영역별 모식도

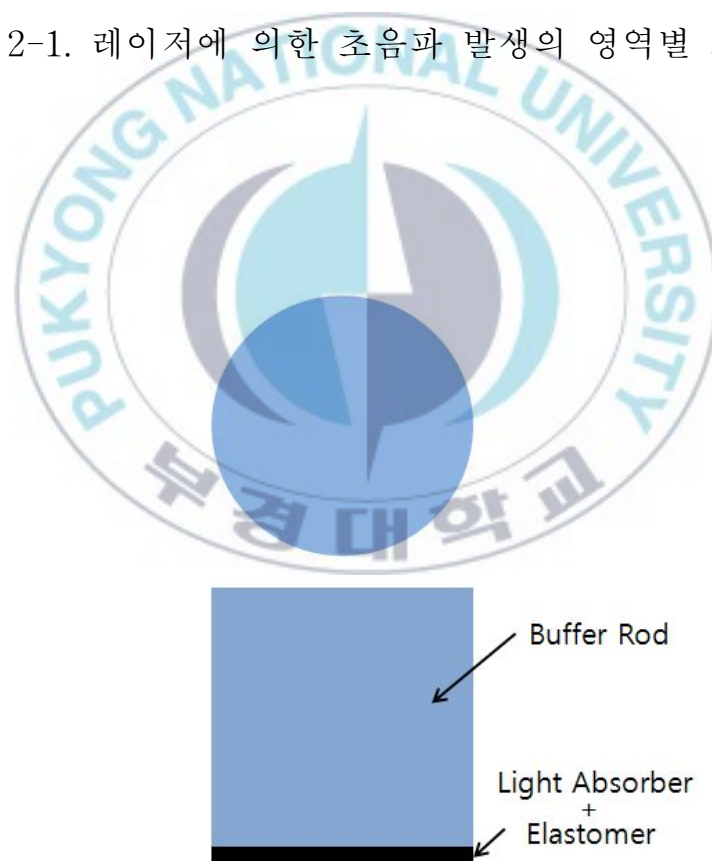


그림 2-2. 레이저 발생 원형 평면 초음파 트랜스듀서의 구조

2-2. 초음파 발생 이론

광음향 효과에 의한 초음파 발생의 원리 및 관련 이론은 그 메커니즘이 전술한 세 가지 영역 중 어느 영역에 속하느냐에 따라 다르다. 그러나 본 연구에서 고려하고 있는 구속표면 음원영역은 열탄성과 유사한 동작을 하는 것으로 알려져 있다[4]. 따라서 여기서는 열탄성에 대하여 그 이론을 전개한다.

열탄성에 의한 초음파의 발생은 열전도방정식과 파동방정식에 의해 지배된다. 매질의 온도분포를 결정하는 열전도방정식은 다음과 같다.[10]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \nabla^2 T + \frac{1}{\rho C_p} h(\vec{r}, t) \quad (2-1)$$

여기서, T 는 온도, κ 는 열확산계수($=K/\rho C_p$, 단, K 는 열전도율), ρ 는 밀도, C_p 는 정압비열, h 는 단위체적당의 열전달량이다.

한편, 스칼라 퍼텐셜 ϕ 에 대한 파동방정식은 다음과 같다.

$$\nabla^2 \phi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \frac{3B\alpha_L}{\rho c^2} T \quad (2-2)$$

여기서, c 는 매질에서의 종파 음속, B 는 체적탄성률, α_L 는 열팽창계수이다.

이 파동방정식의 해는 다음과 같이 구한다. 즉, 그림 2-3으로 주어지

는 좌표계에서 붉은 색이 레이저가 조사된 영역이며, 그 영역을 dS 인 미소 면적요소로 분할하면, dS 로부터 r 떨어진 P 점에 형성되는 스칼라퍼텐셜은 그린함수에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$\phi = -\frac{1}{4\pi} \frac{3B\alpha_L}{\rho c^2} \int_S \frac{T\left(t - \frac{r}{c}\right)}{r} dS \quad (2-3)$$

단, 매질에서는 감쇄가 없는 것으로 가정하고 있다. 그리고 음압 p 와 ϕ 의 관계

$$p = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2-4)$$

에서

$$p = -\frac{1}{4\pi} \frac{3B\alpha_L}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \frac{T\left(t - \frac{r}{c}\right)}{r} dS \quad (2-5)$$

가 된다.

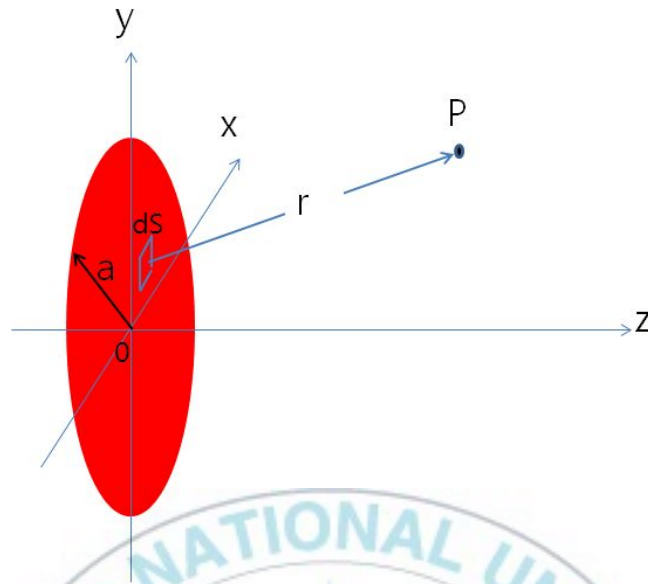


그림 2-3. 음장해석을 위한 좌표계

(2-5)식은 레이저가 조사된 영역을 $\Delta S = \Delta x \Delta y$ 인 면적요소로 x 와 y 축 방향에 대해 각각 L 및 M 개로 분할하여 수치 해석적으로 표현하면 다음과 같이 나타내어진다.

$$p = -\frac{1}{4\pi} \frac{3B\alpha_L}{c^2} \Delta x \Delta y \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \frac{\frac{\partial}{\partial t} T(t - \frac{r}{c})}{r} \quad (2-6)$$

$z=0$ 평면에 조사된 레이저의 펄스폭이 충분히 짧아 초음파가 발생되는 동안 열확산이 무시된다고 가정하면, 그 평면에서 식 (2-1)은

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{1}{\rho C_p} h(t) \quad (2-7)$$

가 되며, 식 (2-6)은

$$p = -\frac{1}{4\pi} \frac{3B\alpha_L}{\rho c^2 C_p} \Delta x \Delta y \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \frac{h(t - \frac{r}{c})}{r} \quad (2-8)$$

가 된다. 이 식에서 부터 단위체적당의 열전달량 $h(t)$ 를 알면 그에 따라 P점의 음압이 구해짐을 알 수 있다.

$h(t)$ 는 흡광재의 종류에 따라 달라지는데, 레이저로부터 흡수하여 흡광재에 저장되는 열에너지의 비율 η 는 다음 식에 의해 추정된다.[12]

$$\eta = \frac{\tau_H}{\tau_L} \times \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\tau_L}{\tau_H}\right) \right\} \quad (2-9)$$

여기서, τ_L 은 레이저 펄스의 지속시간이고, τ_H 는 열확산 시간인데,

$$\tau_H = \frac{d^2}{16\kappa_\chi} \quad (2-10)$$

이다. d 는 내부 구조물의 직경, κ_χ 는 주변 물질의 열확산계수이다. CNT/PDMS로 된 LGUT의 경우, d 는 CNT 직경으로서 약 25 nm, κ_χ 는 PDMS의 열확산계수로서,

$$\kappa_\chi = 1.06 \times 10^{-7} [m^2/s] \quad (2-11)$$

를 갖는다.[12] 후술하는 바와 같이 본 실험에서 사용하는 레이저는 폭 5 ns의 TTL형 펄스에 의해 구동되며, 방사되는 광파의 펄스폭은 $\tau_L = 6 \sim 9$ ns이다. 따라서 $\eta = 0.04 \sim 0.06$ 이므로 레이저 조사 후 CNT

에 남아 있는 에너지는 약 5 %가 되어 매우 작다. 즉, 레이저 에너지의 대부분이 PDMS에 전달되며, PDMS의 열팽창계수는

$$\alpha_L = 0.92 \times 10^{-3} [K^{-1}] \quad (2-12)$$

로 매우 크므로 진폭이 큰 초음파를 발생시킬 수 있다.[12]



제 3 장 실험

3-1. 장치 및 방법

본 연구에 사용된 실험 장치의 전체 구성은 그림 3-1과 같다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 이 시스템은 레이저를 포함하는 광학계, 트랜스듀서, 극소형 수중청음기와 전치증폭기, 디지털 오실로스코프, 위치 제어용 스캐너 및 PC로 구성된다. 실험에 있어서는 먼저 Quanta-Ray(Spectra-Physics, Inc.) 레이저를 펄스로 동작시킨 후, 그 앞 10 cm 지점에 조리개와 콜리메이터(collimator)를 설치하였다. 그 콜리메이터에서 나온 평행광은 버퍼인 원기둥형 아크릴(PMMA)을 통해 트랜스듀서에 해당하는 CNT와 PDMS에 조사된다. 그 PDMS의 열팽창에 의해 발생한 초음파는 매질인 물을 통하여 전파된다. 그 초음파를 직경 $\phi = 0.2 \text{ mm}$ 의 PVDF 극소형 수중청음기(Precision Acoustics Ltd.)가 수신한 다음 증폭하여 디지털 오실로스코프(LeCroy LT322)로 보낸다. 그 오실로스코프에 나타낸 파는 최종적으로 PC에 저장된다. 그림 3-2는 전체시스템의 사진이다.

실험에 사용된 광학계 구성품의 규격은 표 3-1과 같다.

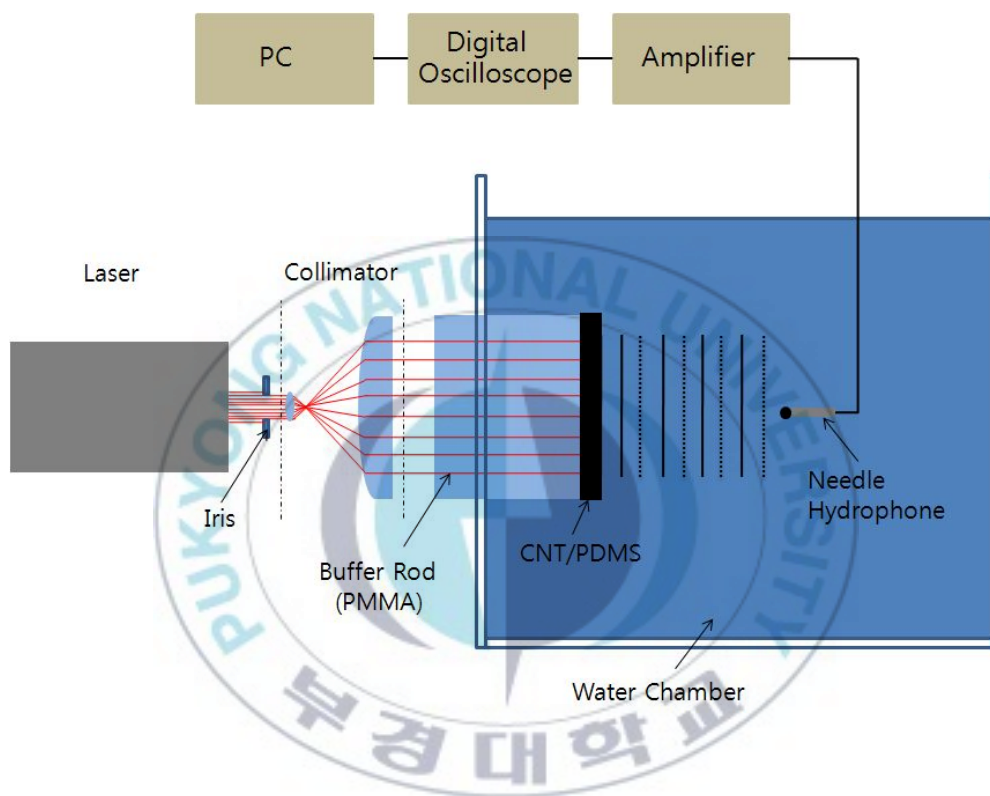


그림 3-1. 실험장치의 구성도

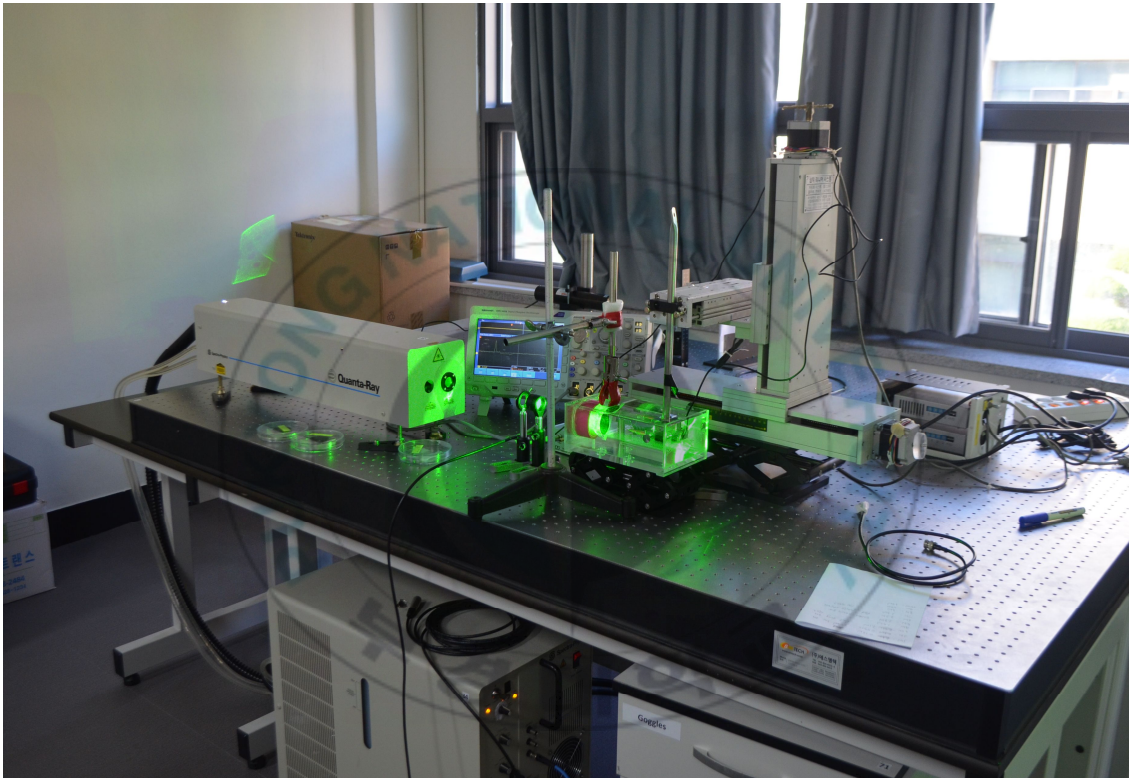


그림 3-2. 전체 시스템 사진

표 3-1. 광학계 구성품의 규격

Parts	Characteristics
Laser	- Quanta-Ray(Spectra-Physics, Inc.) - Wave length : 355, 532, 1064 nm - Pulse Width : 6~9 ns - PRF : 20 Hz stable or variable - Energy: max. 200 mJ
Expanding Lens	- NT55-582(Edmund Ltd.) - Rear accessory attachment type - Expansion power : 20 times
Collimating Lens	- Diameter : 50 mm, focal length : 36 mm - Plano-convex type

3-2. 레이저발생 초음파 트랜스듀서(LGUT) 설계 및 제작

그림 3-3은 실험에 사용한 LGUT의 규격을 나타낸다. 제작에 있어서는 먼저 두께 10 mm인 PMMA 아크릴판을 50×50 mm 로 절삭한 다음, 한쪽 면에 Collimating 렌즈의 크기를 고려하여 직경 40 mm의 CNT 막을 다중벽 탄소나노튜브(Multi-walled Carbon Nano Tube: MWNT) 분말을 필터링/전이 방법[15]에 의해 형성한 후, PDMS를 스펀 코팅하여 LGUT를 만들었다. 전체적인 제작 공정은 그림 3-4와 같다.



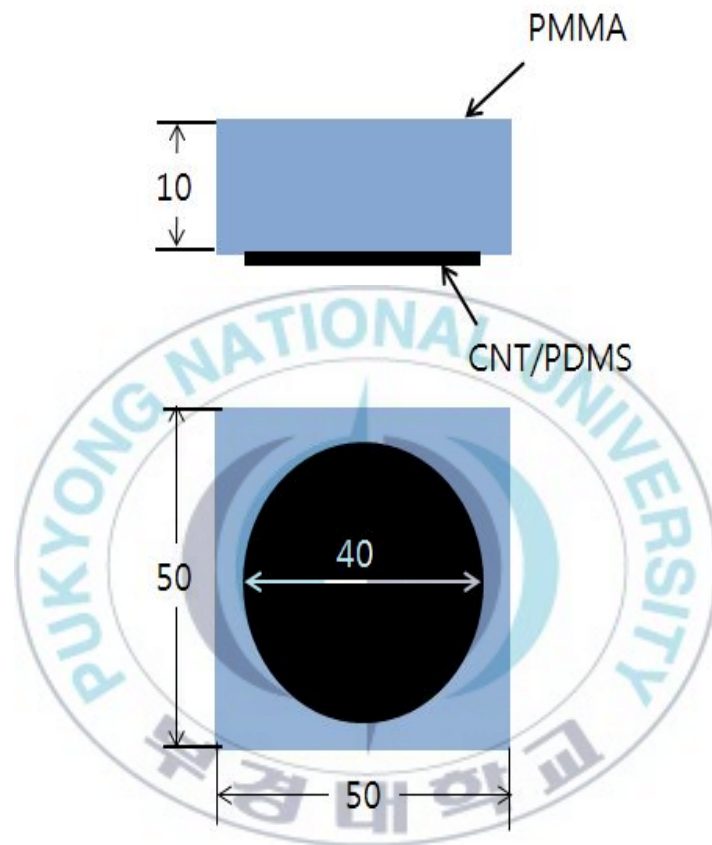


그림 3-3. 트랜스듀서의 구조(단위: mm)

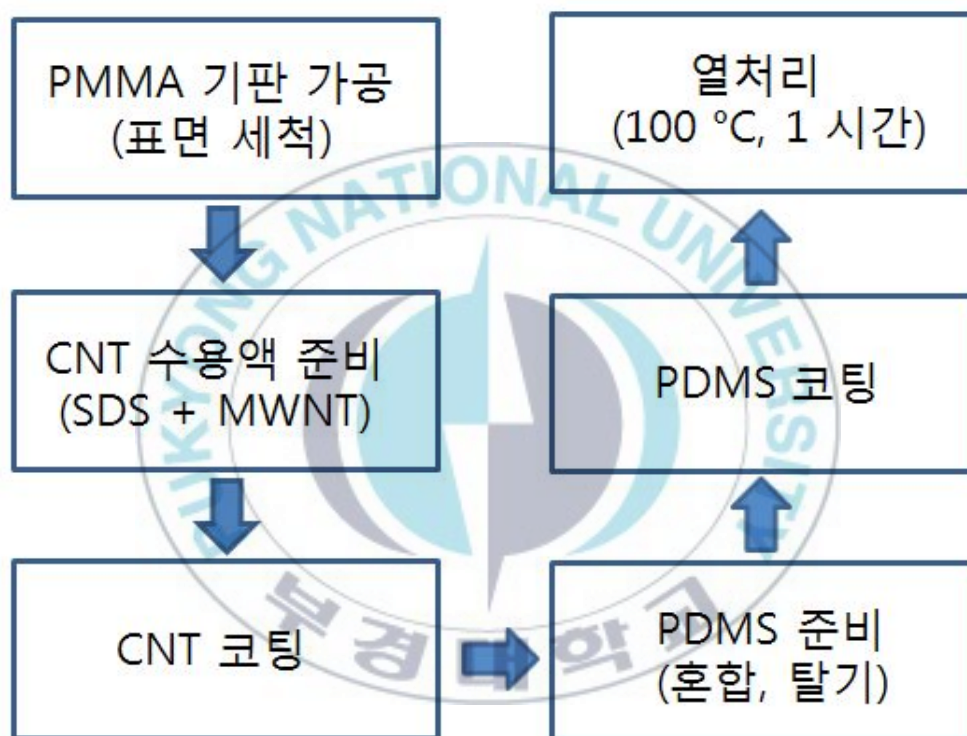


그림 3-4. LGUT 제작공정

그림 3-4에서 나타낸 CNT와 PDMS 코팅 방법의 세부적인 절차는 다음과 같다.

<CNT 코팅 절차>

1. MWNT를 계면활성제 SDS(Sodium Dodecyl Sulfate) 수용액에 분산시킨다. 여기서 사용한 SDS는 중량비 2%인 수용액이며, 거기에 투입된 MWNT는 그 수용액에 대해 중량비 0.1 %이다.

2. MWNT 분산액을 AAO(Anodic Aluminum Oxide) 재질의 필터를 통과시킨다. 이 때, 그 필터에 탄소나노튜브가 걸려, 필터 위에 탄소나노튜브 필름이 형성된다.

3. 탄소나노튜브 필름이 형성된 필터를 수산화나트륨 수용액에 넣는다. AAO 필터는 수용액에 의해 용해되고 탄소나노튜브 필름은 수용액 위에 뜨게 된다.

4. 떠 있는 탄소나노튜브 필름이 PMMA 기판 위에 오도록 건져내고 말린다.

<PDMS 코팅 절차>

1. 탄성중합체 PDMS(SYLGARD 184)의 주제와 경화제를 중량비 10:1로 공기 중에서 유리 막대를 사용하여 혼합한다.

2. 약 10^{-2} Torr의 진공 챔버 내에서 30분간 탈기시킨다.

3. 만들어진 용액을 코팅된 CNT 위에 도포하고 스핀 코팅하였다. 이

때 30초간 약 600 rpm 으로 1차 저속 회전시킨 후, 약 5000 rpm으로 3분간 2차 고속 회전시켰다.

4. 그 후 100℃의 항온조에서 1시간 동안 열처리(curing)한다.

CNT의 두께가 다른 것을 제작하기 위해서 필터링시에 SDS에 MWNT를 분산시킨 CNT 수용액의 양을 조절하였는데, 본 실험에서는 0.4, 0.8, 1.6 mL의 3 종류를 사용함으로써 막의 두께를 달리하였다. 한편, 같은 두께의 CNT에 PDMS의 두께가 다른 것은 스핀 코팅시 코팅의 회수를 1~3번으로 변화시켜 제작하였다. 이 때 코팅의 시간 간격은 30분으로 하였다. 이상의 방법에 의해 총 6개의 LGUT를 제작하였다.



3-3. CNT/PDMS 막의 두께

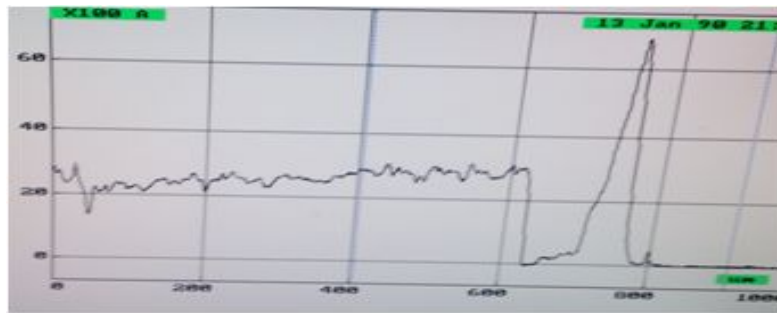
제작된 CNT/PDMS 막의 두께를 surface profiler (Profilometer, Alpha-Step 500)를 사용하여 측정하였다. 그림 3-5는 PMMA에 CNT만을 코팅하여 surface profiler로 측정하였을 때의 결과인데, 그림 3-5(a)는 CNT 수용액을 0.4 mL, 그림 3-5(b)는 0.8 mL, 그림 3-5(c)는 1.6 mL 사용하였을 때에 대한 것을 나타낸다. 그림으로 부터 각각의 두께는 약 $0.3\ \mu\text{m}$, $0.7\ \mu\text{m}$, $1.4\ \mu\text{m}$ 로서, 사용한 수용액의 양과 CNT막의 두께는 비례하는 것으로 나타났다.

그림 3-6은 0.8 mL의 CNT 수용액을 사용하여 코팅한 후 PDMS를 1회 코팅한 막의 CNT/PDMS 두께를 측정한 결과이다. 이 결과로 부터 PDMS를 한번 코팅하면 약 $5\ \mu\text{m}$ 의 두께가 되는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 두께를 변화시키기 위해, 2회 코팅한 것과 3회 코팅한 것의 세 종류를 만들었는데, 2회와 3회 코팅한 것의 두께는 그림 3-7과 같이 사용한 surface profiler의 측정 범위를 초과하였다. 그러나 CNT만의 경우와 같이 선형적으로 증가한다고 가정하면 각각 약 $10\ \mu\text{m}$ 및 약 $14\ \mu\text{m}$ 가 될 것으로 추정된다.

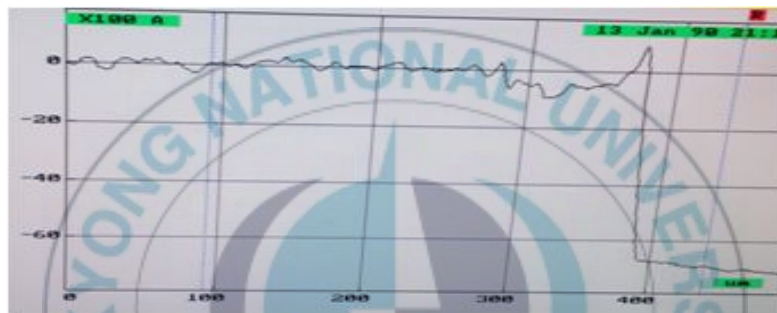
이상의 결과를 요약하면 제작한 6개 LGUT의 CNT 및 PDMS막의 두께는 표 3-2와 같다.

표 3-2. 제작한 6개 LGUT의 CNT 및 PDMS막 두께

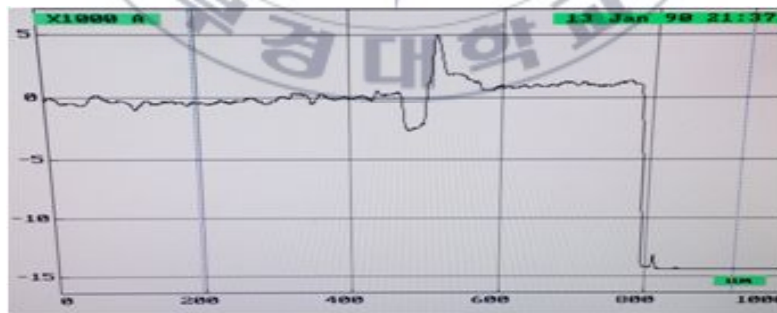
No.	Thickness (μm)		
	CNT	PDMS	Total
1	0.3	4.5	4.8 (approx. 5)
2	0.7	4.5	5.2 (approx. 5)
3	1.4	4.5	5.9 (approx. 6)
4	0.7	4.5	5.2 (approx. 5)
5	0.7	9.0	9.7 (approx. 10)
6	0.7	13.5	14.2 (approx. 14)



(a) 0.4 mL (두께: 약 $0.3 \mu m$)

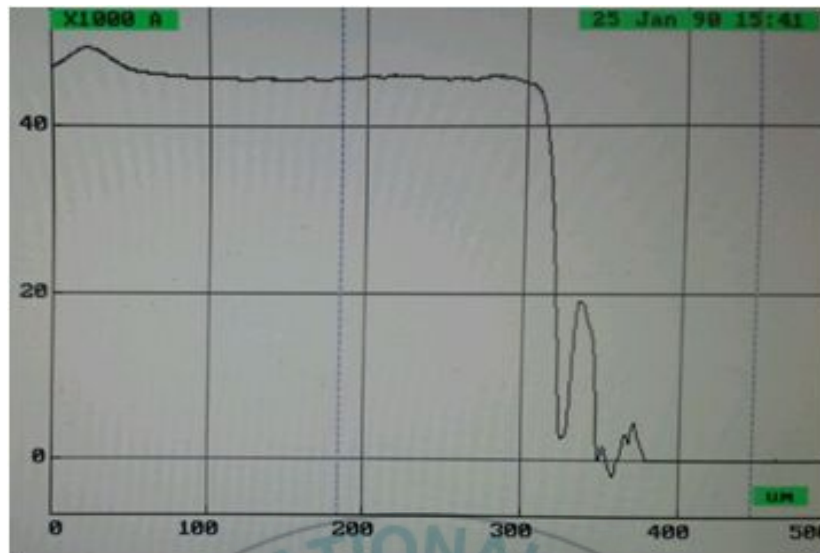


(b) 0.8 mL (두께: 약 $0.7 \mu m$)

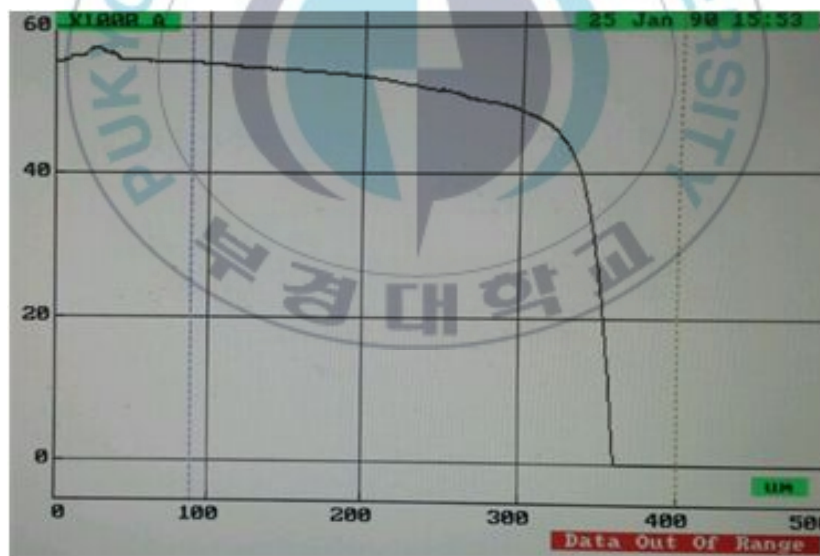


(c) 1.6 mL (두께: 약 $1.4 \mu m$)

그림 3-5. CNT 수용액의 양에 따른 막의 두께



(a) PDMS를 1회 코팅한 막의 두께(약 5 μm)



(b) PDMS를 2회 코팅한 막의 두께(측정 불가)

그림 3-6. PDMS 코팅 횟수에 따른 막의 두께

제 4 장 결과 및 고찰

4-1. 초음파 방사 특성

4-1-1. 파형 특성

그림 4-1은 CNT 두께 $d=8\ \mu\text{m}$ 인 LGUT 표면에서 20 mm 떨어진 중심축 부근에서 강도를 달리하면서 측정한 초음파의 파형이다. 콜리메이터를 지난 평행광 부분의 공기 중에서의 강도는 레이저 파워미터 (THORLABS PM100D meter and S370C detector)를 사용하여 측정하였다. 초음파는 LGUT에 입사하는 레이저의 한주기 평균 강도가 약 $5\ \text{mW}/\text{cm}^2$ (펄스의 강도는 약 $30\ \text{kW}/\text{cm}^2$)에서부터 발생하였는데, 제작한 모든 LGUT에서 -6 dB 폭이 약 15 ns인 매우 짧은 임펄스의 비선형 충격 초음파가 발생하였다. 그 전형적인 파형을 그림 4-1에 나타내었다.

그림 4-2는 강도를 변화시켰을 때의 파형 변화를 나타내며, 그림 4-3은 강도에 따른 초음파의 진폭 변화를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 초음파의 진폭은 실험에서 사용한 최대 강도인 약 $200\ \text{mW}/\text{cm}^2$ 까지 강도에 거의 비례하였다.

그림 4-4은 CNT 막의 두께를 세 가지로 변화 시켰을 때에 대한 파형 변화를 나타내며, 그림 4-5는 동일한 CNT막에 PDMS의 두께를 세

가지로 변화시켰을 때에 대한 파형 변화를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 실험에 사용한 LGUT에서는 CNT 및 PDMS의 두께에는 무관한 것으로 나타났다.

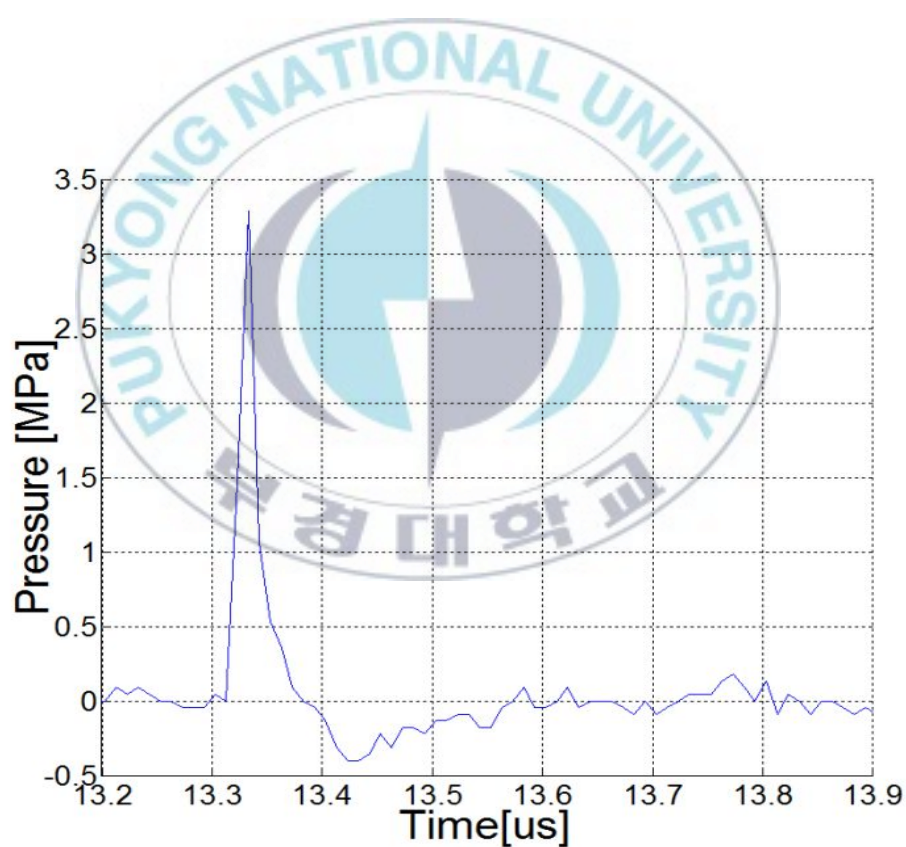


그림 4-1. 방사되는 초음파의 전형적인 파형

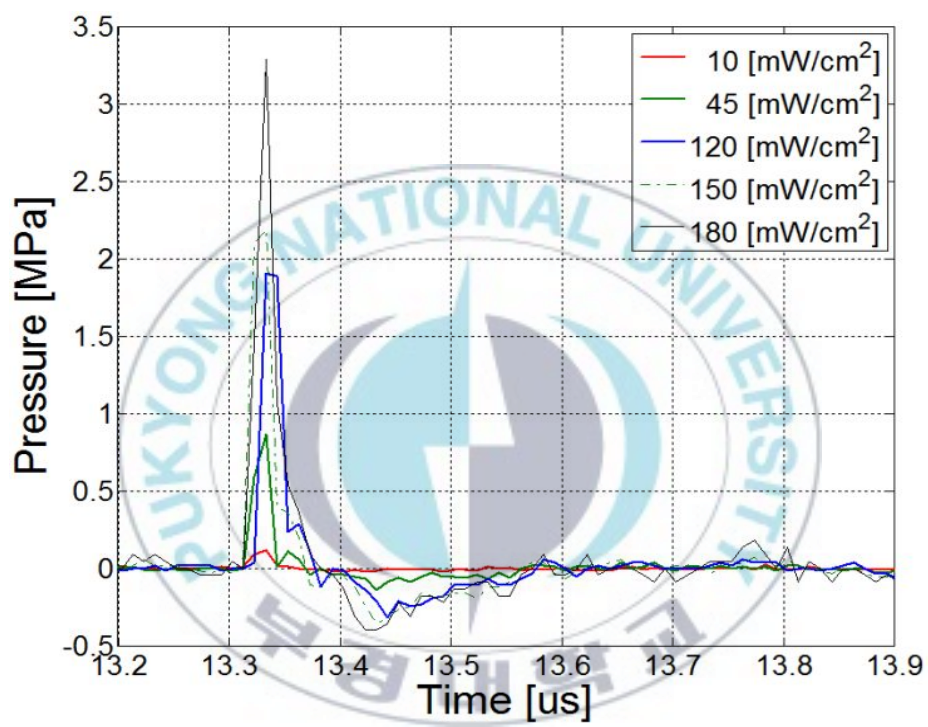


그림 4-2. 평균 강도에 따른 파형 변화

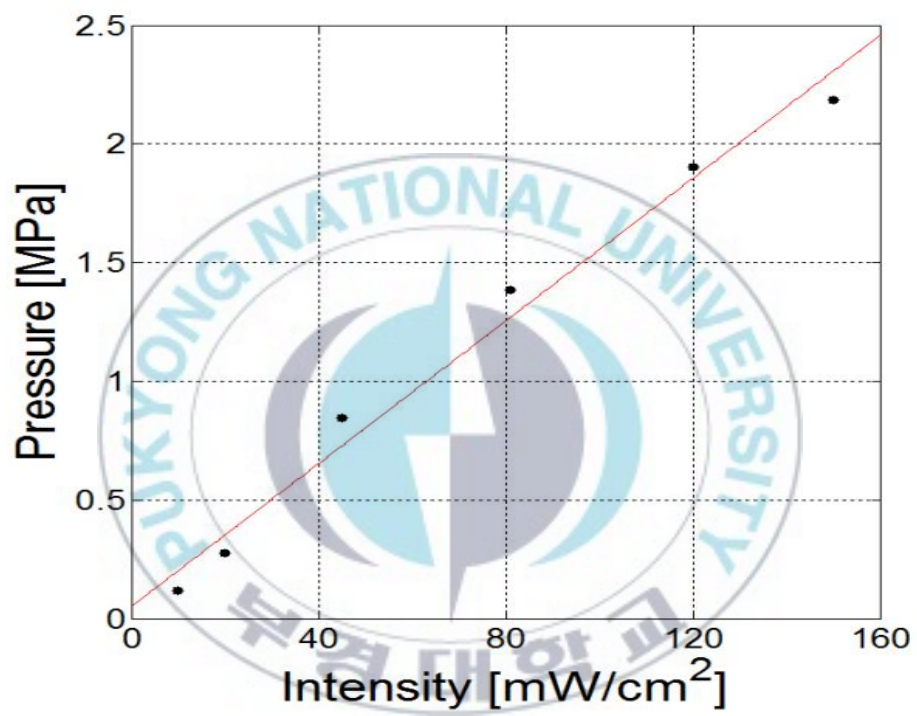


그림 4-3. 평균 강도에 따른 음압 변화

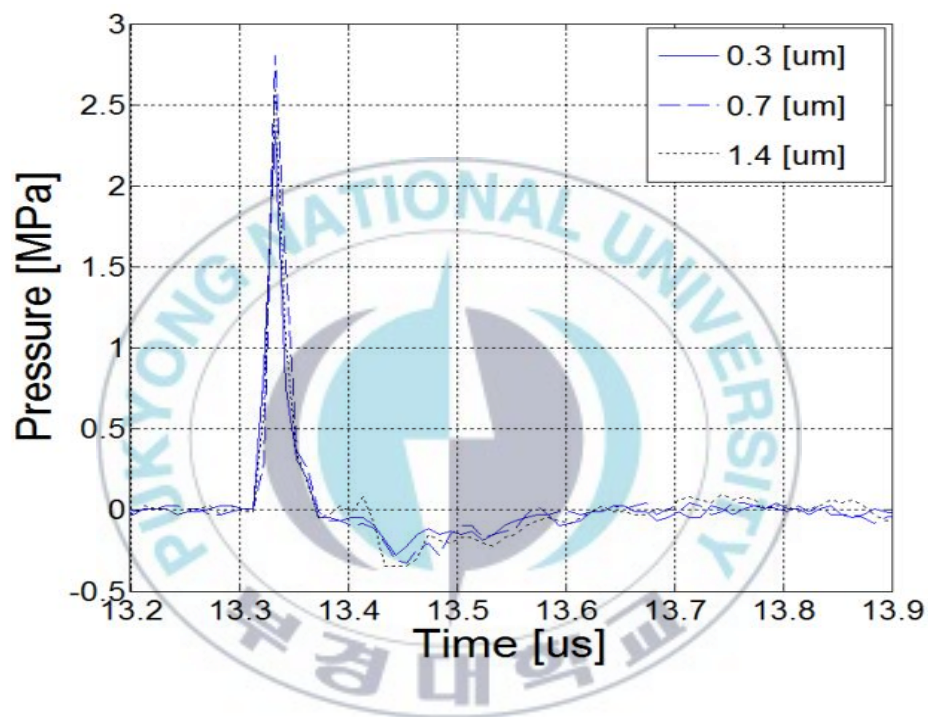


그림 4-4. CNT의 두께 변화에 따른 파형 변화

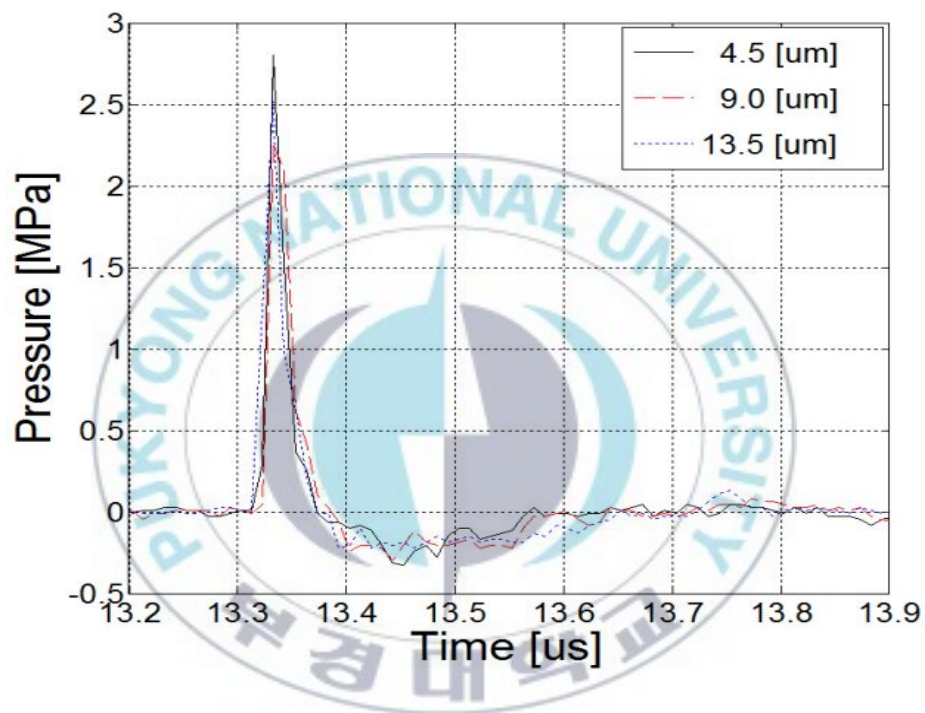
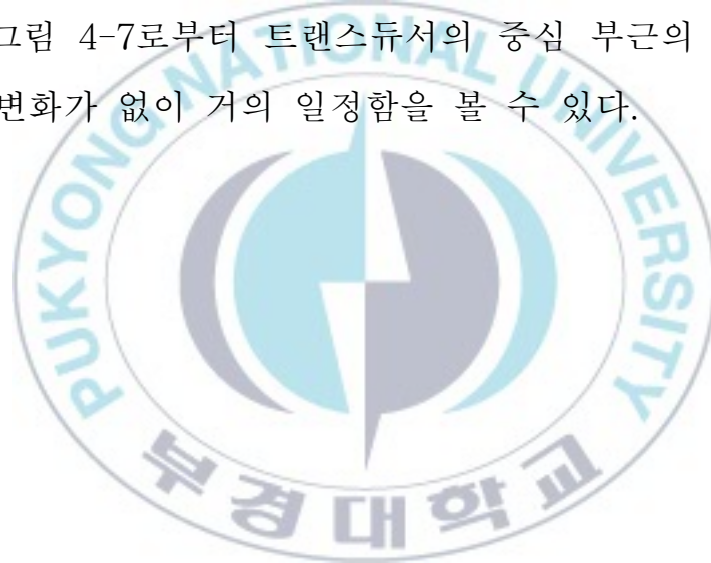


그림 4-5. PDMS의 두께 변화에 따른 파형 변화

4-1-2. 음장 특성

발생되는 파형의 음장 내 위치에 따른 변화를 파악하기 위해 LGUT의 중심에서부터 음축 상으로 10, 15, 20, 25 mm 떨어진 네 지점에 있어서 초음파를 측정하고, 그 결과를 그림 4-6에 나타내었다. 그림에서 보면 초음파의 진폭은 거리에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 또한, LGUT 표면으로 부터 20 mm 떨어진 지점에서 측 방향으로 ± 10 mm 떨어진 지점까지 2 mm 간격으로 초음파를 측정한 결과를 그림 4-7에 나타내었다. 그림 4-7로부터 트랜스듀서의 중심 부근의 면상에서는 뚜렷한 파형의 변화가 없이 거의 일정함을 볼 수 있다.



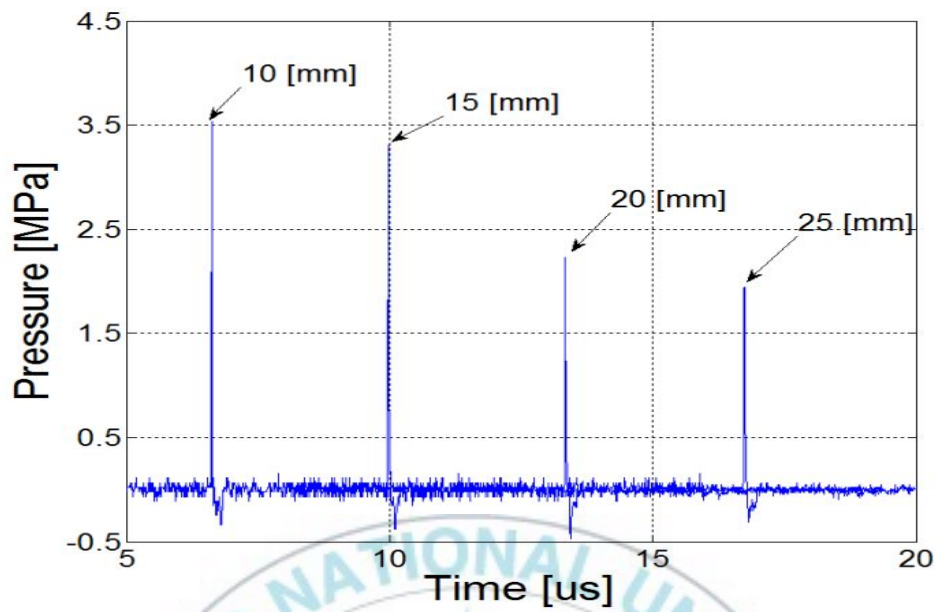


그림 4-6. 축 방향 거리 변화에 따른 파형 변화

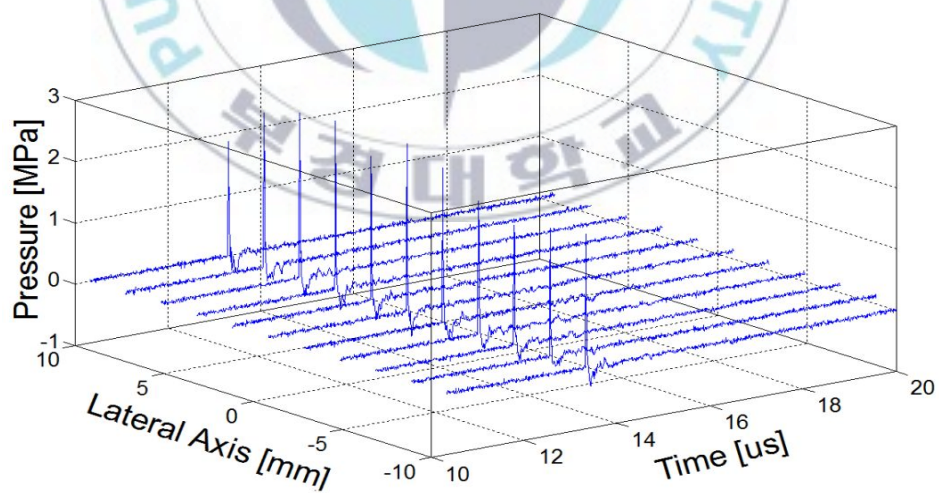


그림 4-7. 축 방향 거리 변화에 따른 파형 변화

4-2. 초음파 파형 시뮬레이션에 의한 고찰

균일한 매질 내 임의 지점에서의 LGUT에 의한 초음파 파형 및 음장은 식 (2-6)에 의해 구해진다. 식 (2-6)을 이용하기 위해서는 먼저 레이저의 조사에 의해 LGUT 막에서의 온도변화를 $T(t,0)$ 를 알아야 한다. 그러나 그 값은 정확히 파악하기 곤란하다. 따라서 여기서는 다음과 같이 가정하여 시뮬레이션함으로써 음압 파형의 형태를 예측하였다.

가정 1) 반경 a 인 CNT/PDMS 원형막이 무한 수중의 임의 지점에 있고(그 지점을 $z=0$ 인 xy 면), 그 막에 짧은 펄스의 레이저가 조사되며, 그 강도는 막내에서 일정하다.

가정 2) 레이저의 조사에 의해 CNT/PDMS 막의 온도가 레이저 펄스 지속시간(8 ns) 동안 지수적으로 증가하고, 그 후 지수적으로 감소한다. 즉,

$$\begin{aligned} T(t) &= A\{1 - \exp(-\beta_1 t)\} \quad ; t \leq \tau_L \\ &= A\{1 - \exp(-\beta_1 \tau_H)\} \exp\{-\beta_2(t - \tau_H)\} \quad ; t > \tau_L \end{aligned} \quad (2-13)$$

여기서는 식 (2-13)에서의 β_1 과 β_2 를 실험의 결과를 고려하여 각각 다음과 같이 3가지 경우를 가정하였다.

$$\textcircled{1} \quad \beta_1 = 1.0 \times 10^{-9}, \quad \beta_2 = 1/16 \times 10^{-9}$$

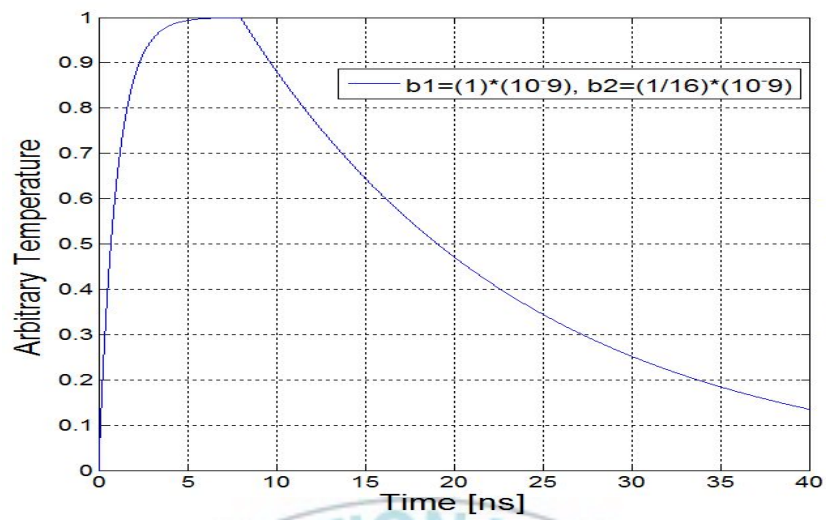
$$\textcircled{2} \quad \beta_1 = 2.0 \times 10^{-9}, \quad \beta_2 = 1/8 \times 10^{-9}$$

$$\textcircled{3} \quad \beta_1 = 4.0 \times 10^{-9}, \quad \beta_2 = 1/4 \times 10^{-9}$$

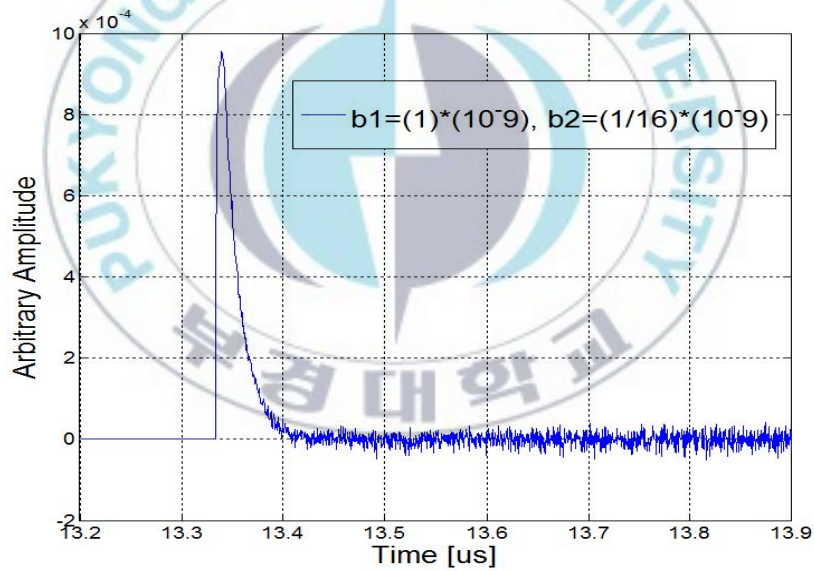
가정 3) 식 (2-6)에서 다른 모든 계수는 상수로 가정하여 1로 두고, 온도의 최대 값 또한 1로 가정한다.

4-2-1. 온도 변화에 따른 파형

가정 2의 각 온도 변화에 대해 실험에 사용한 LGUT와 동일한 크기의 트랜스듀서 표면으로 부터 음축 상에서 20 mm 떨어진 지점의 음압 파형 시뮬레이션 결과를 그 온도 변화와 함께 그림 4-8에서부터 그림 4-10에 각각 나타내었다. 이 결과로 부터 음압 파형은 실험과 유사하게 매우 짧은 임펄스의 형태를 가짐을 알 수 있다. 특히, 온도 분포 ①의 경우는 실험 결과와 유사하게 -6 dB의 펄스 폭이 약 15 ns이다. 파형의 폭 등은 온도 변화의 형태에 따라 미소하게 변하나, 임펄스 형태는 동일하다. 그러나 실험 결과에 나타나는 음(-)의 음압 부분이 나타나지 않아 전형적인 충격파의 파형이라고 할 수 없다.



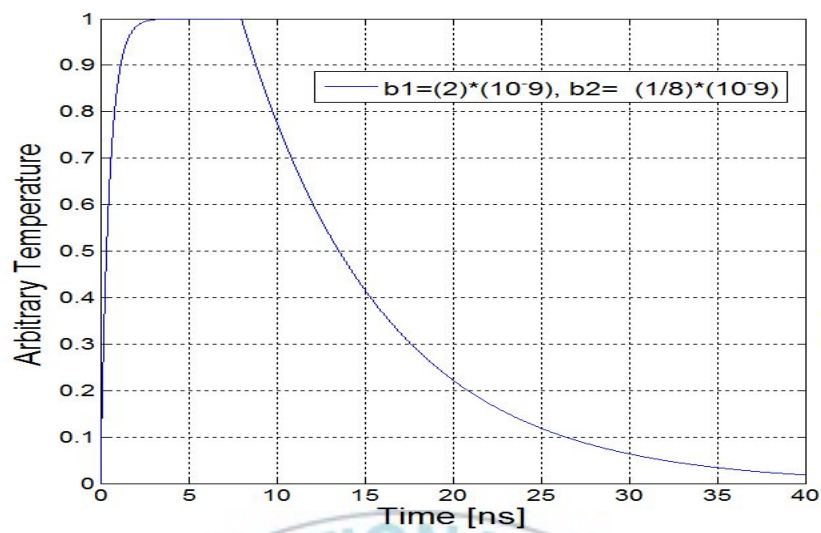
(a) 온도 변화



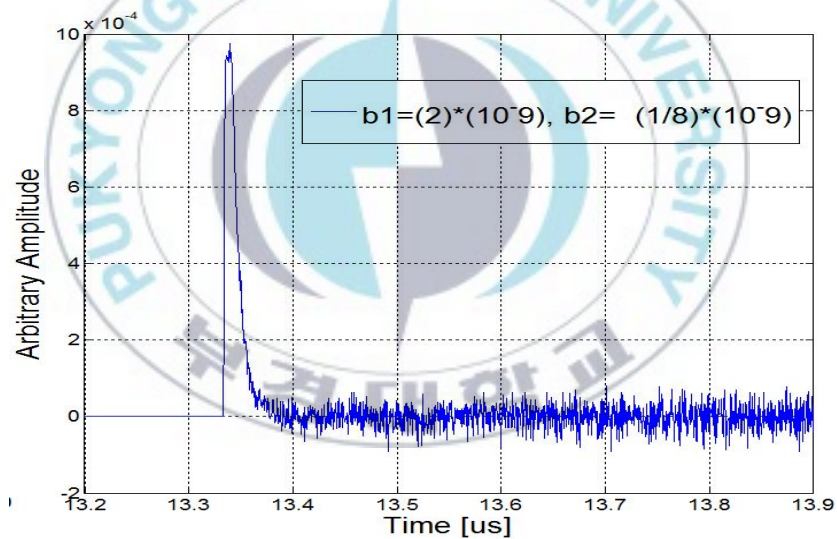
(b) 음압 파형

그림 4-8. 온도 변화에 따른 음압 파형(1)

($\beta_1 = 1.0 \times 10^{-9}$, $\beta_2 = 1/16 \times 10^{-9}$ 일 때)



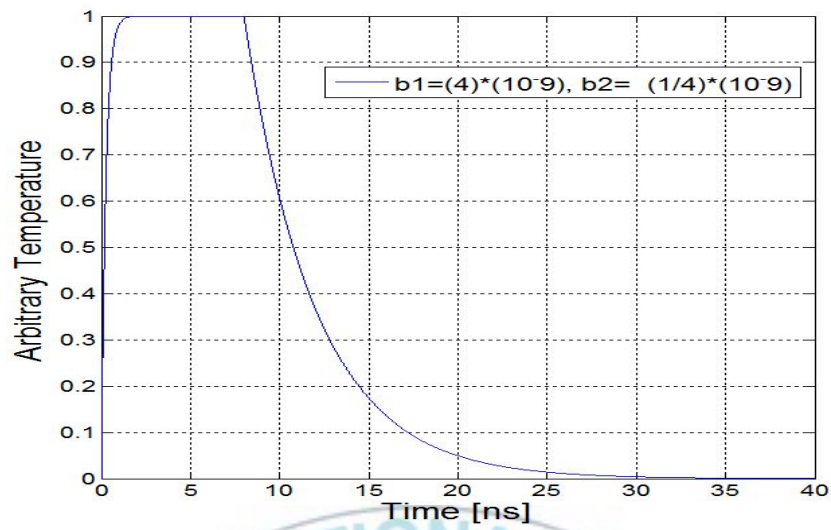
(a) 온도 변화



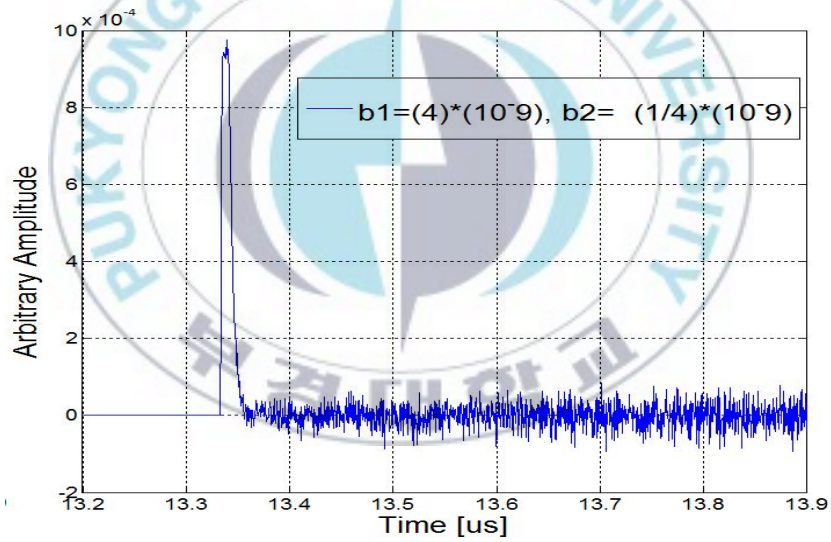
(b) 음압 파형

그림 4-9. 온도 변화에 따른 음압 파형(2)

($\beta_1 = 2.0 \times 10^{-9}$, $\beta_2 = 1/8 \times 10^{-9}$ 일 때)



(a) 온도 변화



(b) 음압 파형

그림 4-10. 온도 변화에 따른 음압 파형(3)

($\beta_1 = 4.0 \times 10^{-9}$, $\beta_2 = 1/4 \times 10^{-9}$ 일 때)

4-2-2. 음축 상의 파형

그림 4-11은 ①의 온도 변화에 대해 음축 상의 5개 지점에 형성되는 음압 파형을 나타낸다. 이것은 그림 4-6의 측정치에 대응하는 것으로 볼 수 있다. 이 결과로 부터 음압의 진폭은 거리에 따라 감소하나 측정치에 비해 작은 것을 알 수 있는데, 그 원인 중에 하나는 수중에서의 감쇠를 고려하지 않았기 때문이다. 또한, 그림에서 잘 나타나 있지는 않으나 거리가 멀어질수록 펄스폭이 커지는데, 그것은 측정에서도 유사한 경향을 보였다.

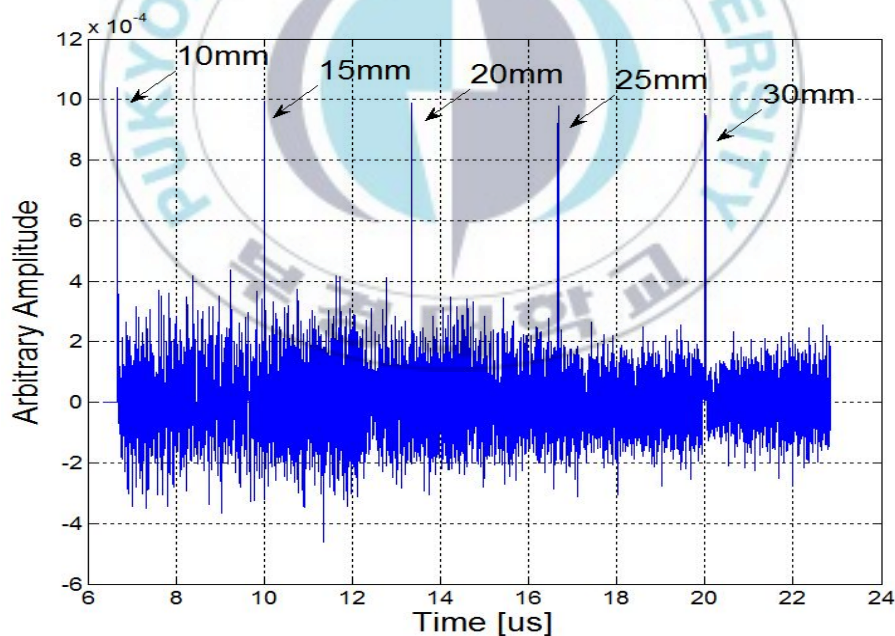


그림 4-11. 음축상의 위치에 따른 파형 변화

4-2-3. 음축에 수직한 축 상의 파형 및 음압분포

그림 4-12은 ①의 온도 변화에 대해 음축으로 부터 20 mm 떨어진 지점에서 축 방향으로 ± 5 mm와 ± 10 mm 떨어진 지점의 음압 파형이다. 이것은 그림 4-7의 측정치에 대응하는 것으로 볼 수 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 파형의 변화는 거의 없어 측정치의 경향과 유사하다.

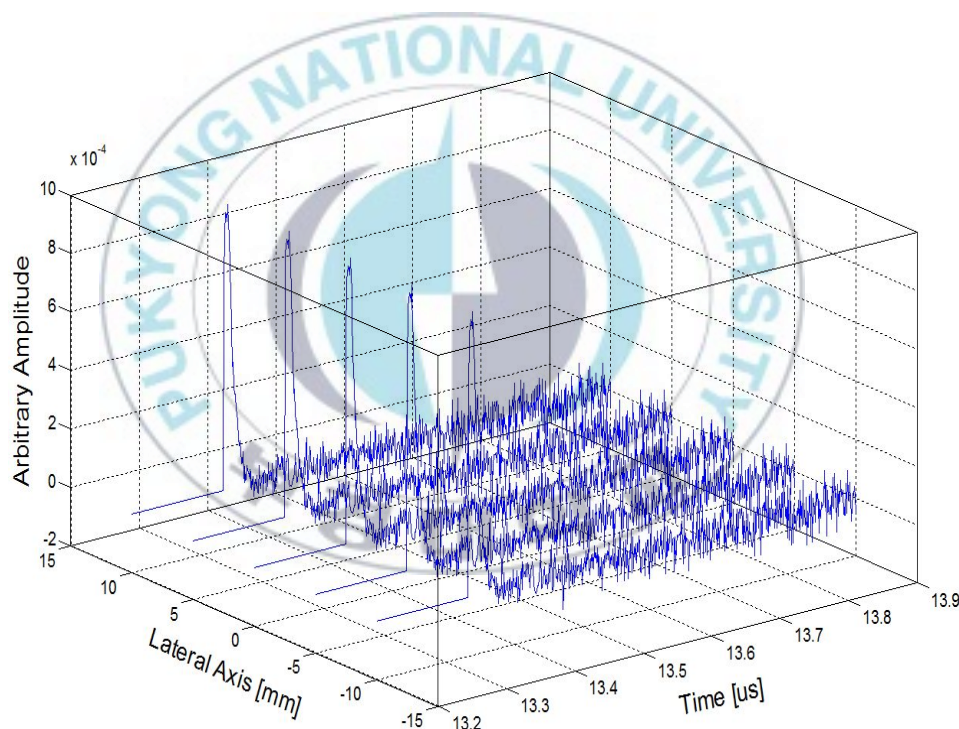


그림 4-12. 음축에 수직한 축상의 위치에 따른 파형 변화

제 5 장 결론

본 연구는 LGUT에 있어서 광음향효과에 의해 발생하는 초음파의 특성을 제작된 막의 특성과 관련하여 실험적으로 체계화하고, 이론적으로 고찰하는 것을 목적으로 수행되었다. 이를 위하여 먼저 펄스 레이저와 극소형 수중청음기를 사용한 광음향 측정시스템을 구성하였다. 다음으로 아크릴 기판 상에 CNT와 PDMS를 코팅한 직경 40 mm의 원형 평면 LGUT를 제작하고, 그 특성을 평가하였다. CNT와 PDMS의 코팅에는 필터링/전이법과 스핀코팅법을 이용하였으며, 그 각각의 두께가 다른 6개의 LGUT를 만들어 방사되는 초음파를 측정하였다. 그 결과, 입사되는 레이저의 한주기 평균 강도가 약 5 mW/cm^2 (펄스 강도 약 30 kW/cm^2)에서부터 제작한 모든 LGUT에서 약 15 ns의 폭을 가지는 매우 짧은 임펄스의 충격 초음파가 발생됨을 알았다. 그 초음파 파형의 진폭은 LGUT에 입사하는 레이저의 강도에 비례하며, 트랜스듀서 면상에서 비교적 균일하게 발생하고, 트랜스듀서 표면에서 멀어지면 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 제작된 LGUT에 대해서 CNT 및 PDMS의 두께와는 직접적으로 상관되지 않는 것으로 나타났다.

실험에서 측정된 파형에 대해 참고문헌[10]의 식을 사용하여 이론적으로 검토한 결과, 완전히 일치하지는 않으나 임펄스 형태의 음압파가 발생하는 것이 예측되어져, 실험 결과의 파형에 대한 이해가 일부 가능하였다. 그러나 금후, 그 충격파의 발생 메커니즘에 대한 보다 구체적인

해석이 필요하다. 또한, 본 연구에서 제작된 LGUT가 대단히 짧은 초음파를 발생시키므로, 금후 박막의 두께 측정이나 표피하의 결함 등을 탐지하는 비파괴검사 및 축 방향 분해능이 높은 단층상을 얻는 영상장치 개발에의 응용이 기대된다.



참고문헌

- [1] A. Rosencwaig, 『Photoacoustics and photoacoustic spectroscopy』, Willey, 1980.
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/Photoacoustic_effect
- [3] T. Kundu, 『Ultrasonic Nondestructive Evaluation』, CRC Press, 2003.
- [4] S. J. Daviest, C. Edward, G. S. Taylor and S. B. Palmer, "REVIEW ARTICLE; Laser-generated ultrasound: its properties, mechanisms and multifarious applications", J. Phys. D Appl. Phys., Vol. 26, pp.329-348, 1993.
- [5] T. Hoshiyama, "Nondestructive evaluation of surface defects under dry/wet environment by the use of photoacoustic and photothermal electrochemical imaging", NDT & E International, Vol. 32, Issue 3, pp. 133 - 137, 1999.
- [6] N. Ohtaki¹, M. Hatake-yama¹, M. Suzuki, H. Endoh, T. Hoshimiya¹, M. Kawakami, Y. Muraki, T. Nakajima, A. Tominaga and M. Takeshi, "Nondestructive image evaluation of welded zone of steel plate using photoacoustic microscope", Jap. Jour. of Appl. Phy., Vol. 46, Part 1, No. 7B.
- [7] X. Wang, Y. Pang, G. Ku, X. Xie, G. Stoica and L.V. Wang,

"Non-invasive laser-induced photoacoustic tomography for structural and functional in vivo imaging of the brain", *nature biotechnology*, Vol. 21, pp. 803-806, 2003.

[8] K. Maslov, G. Stoica and L.V. Wang, "In vivo dark-field reflection-mode photoacoustic microscopy," *Optics letters*, Vol. 30, No. 6, pp. 625-627, 2005.

[9] T. Buma, M. Spisar, and M. O'Donnella, "High-frequency ultrasound array element using thermoelastic expansion in an elastomeric film", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 79, No 4, pp. 548-550, 2001

[10] Y. Hou, S. Ashkenazi, S. W. Huang, and M. O'Donnell, "Improvements in Optical Generation of High-Frequency Ultrasound", *IEEE Trans. on UFFC*, Vol. 54, No. 3, pp.682-686, 2007.

[11] H. W. Baac, J. G. Ok, H. J. Park, T. Ling, S. L. Chen, A. J. Hart, and L. J. Guo, "Carbon nanotube composite optoacoustic transmitters for strong and high frequency ultrasound generation", *Applied Physics Letters*, Vol. 97, pp. 234104-1~3, 2010.

[12] H. W. Baac, J. G. Ok, A. Ma., K. T. Lee, Y. C. Chen, A. J. Hart, Z. Xu, E. Yoon and L. J. Guo, "Carbon-Nanotube Optoacoustic Lens for Focused Ultrasound Generation and High-Precision Targeted Therapy", *Scientific Reports*, Vol. 2, PMC3524551, pp.1-8, 2012.

감사의 글

지나간 세월이 짧기도 또 길기도 했던 시간들이었지만 저에게는 가장 소중했던 시간이었습니다. 무사히 대학원 석사과정을 마칠 수 있도록 주변에 많은 도움을 주신 분들께 지면을 통해 감사의 말씀을 전하고자 합니다.

본 논문이 완성되기까지 너무나도 부족한 저에게 아낌없이 가르침을 주시고 하던 된다고 항상 힘을 북돋아 주시며 세심한 지도와 열과성을 다하여 지도하여 주신 하강렬 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 바쁘신 가운데서도 논문을 심사하시고 넓은 아량과 많은 조언, 충고를 해주신 김무준 교수님, 이충섭 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 아울러 물리학과 모든 교수님께 감사를 드립니다.

또한 주변에 격려해 주신 많은 친구들과 선배, 후배님들에게 감사 합니다. 저의 부족한 부분을 많이 채워준 연구실 선배, 후배 학우들에게 고마운 마음을 전합니다. 특히 Cao와 백용근님께 고맙다고 전하고 싶습니다.

그동안 뒷바라지에 고생하며 많은 격려를 해준 아내 지영과 귀엽고 예쁜 딸 언서, 도유에게 고맙고 사랑한다고 전하고 싶습니다. 한없는 사랑으로 저를 위해 모든 희생을 다하신 어머니, 하늘에 계신 아버지님, 그리고 빙부, 빙모님께 감사함을 전합니다.

2015년 1월

김한문