



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](#)

2007年 8月

博士學位論文

레이저 조사에 따른 마킹 메커니즘
분석과 온도 분포 해석

朝鮮大學校 大學院

光應用工學科

金 永 燮

레이저 조사에 따른 마킹 메커니즘
분석과 온도 분포 해석

Analysis of marking mechanism and
thermal distribution on laser beam irradiation

2007年 8月 24日

朝鮮大學校 大學院

光應用工學科

金 永 燮

레이저 조사에 따른 마킹 메커니즘
분석과 온도 분포 해석

指導教授 申 容 珍

이 論文을 理學博士 學位申請 論文으로 提出함

2007年 8月

朝鮮大學校 大學院

光應用工學科

金 永 燮

金永燮의 博士學位 論文을 認准함

委員長 光州科學技術院 教授 _____

委員 韓國光技術院 責任研究員 _____

委員 朝鮮大學校 教授 _____

委員 朝鮮大學校 教授 _____

委員 朝鮮大學校 教授 _____

2007年 6月

朝鮮大學校 大學院

목 차

ABSTRACT

제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구배경	1
제 2 절 연구목적	2
제 2 장 이 론	5
제 1 절 수치해석의 개요	5
제 2 절 열전달 해석	12
제 3 절 레이저 마킹 메커니즘	21
제 4 절 광 결맞음 단층촬영	27
제 3 장 실험 및 측정	37
제 1 절 시료	37
제 2 절 레이저 마킹 시스템	39
제 3 절 마킹 측정 시스템	49
제 4 절 레이저 마킹에 의해 형성된 흠 측정	52
1. 펄스 수에 따른 레이저 마킹	53
2. 펄스 반복율에 따른 레이저 마킹	65
제 5 절 열전달 수치해석	73
제 6 절 나노초 시간 분해 반사율 측정	86
제 4 장 결과 및 고찰	92
제 1 절 OCT 및 광학 현미경에 의한 흠 분석	92
제 2 절 열전달 분포 분석	107
제 3 절 나노초 시간 분해 반사율 분석	116

제 5 장 결 론 121

참고문헌 126

Appendix I 134

Appendix II 138

Appendix III 142

Appendix IV 146

List of Figures

Fig. 2-1. Process of numerical analysis.	6
Fig. 2-2. Node and element.	8
Fig. 2-3. Definition of one dimensional control volume for finite element method.	9
Fig. 2-4. Approximation of first order polynomial for thermal distribution.	10
Fig. 2-5. Approximation of first order of weighting function.	11
Fig. 2-6. Heat flux $g_e(r)$ of a Gaussian intensity distribution impinging perpendicularly to the material.	16
Fig. 2-7. Heaviside step function.	17
Fig. 2-8. Schematic of proposed mechanism-1; (a) molten bulge produced by local thermal expansion, (b) flow of bulge caused by surface tension and lateral pressure, (c) shrinkage of leveled bulge.	23
Fig. 2-9. Schematic of proposed mechanism-2; (a) molten bulge produced by local thermal expansion and intrinsic viscosity, (b) flow of bulge caused by surface tension, (c) formation of pi and rim by recoil pressure.	26

Fig. 2-10. Biomedical imaging modality for the internal structure of organs; (a) CT, (b) PET, (c) MRI, (d) SPECT, (e) US, (f) NIR, (g) Confocal microscopy, (h) Multiphoton microscopy, (i) OCT.	29
Fig. 2-11. Resolution of biomedical systems.	30
Fig. 2-12. Schematic diagram of OCT system.	31
Fig. 2-13. Michelson interferometer based on optical spectrum analyzer (OSA)	33
Fig. 2-14. The Schematic of optical low coherence reflectometry.	34
Fig. 2-15. Sequence of electric signal processing at OCT system.	36
Fig. 3-1. Molecular model of ABS polymer used at experiment.	37
Fig. 3-2. Dimension of marking sample.	38
Fig. 3-3. Schematic of pit formation system.	39
Fig. 3-4. Configuration of recording laser system; (a) rear mirror, (b) 1/4 wave plate, (c) Pockel cell, (d) dielectric polarizer, (e) pumping chamber, (f) output coupler mirror, (g-h) 1064 nm reflector mirror, (i-j) beam expander, (k) dielectric polarizer, (l) SKTP, (m-n) 532 nm reflector mirror, (o) BBO, (p-q) 355 nm reflector mirror.	42

Fig. 3-5. Picture of recording laser(Nd:YAG laser) system.	42
Fig. 3-6. Response time of electric beam shutter.	44
Fig. 3-7. Set-up of beam splitter and energy meter.	46
Fig. 3-8. Output energy of recording laser for input voltage.	47
Fig. 3-9. Pulse width of recording laser for output energy.	48
Fig. 3-10. Optical spectrum of the OCT laser source.	51
Fig. 3-11. Schematic of swept source OCT system.	52
Fig. 3-12. Optical microscopy images of HAZ and OCT images of pit formed after the irradiation of recording laser operating at 1064 nm (5 pulse at the repetition rate of 5 Hz); (a) Optical microscopy images, (b) CT images, (1) 199.88 mJ/pulse, (2)258.50 mJ/pulse, (3) 295.93 mJ/pulse, and (4) 327.09 mJ/pulse.	55
Fig. 3-13. Optical microscopy images of HAZ and OCT images of pit formed after the irradiation of recording laser operating at 532 nm (5 pulse at the repetition rate of 5 Hz); (a) Optical microscopy images, (b) OCT images, (1) 164.54 mJ/pulse, (2) 226.58 mJ/pulse, (3) 268.95 mJ/pulse, and (4) 303.62 mJ/pulse.	56

Fig. 3-14. Optical microscopy images of pit and HAZ formed by the irradiation of 1064 nm laser marking with changing pulse number; (a) 5 pulse, (b) 10 pulse, (c) 20 pulse, (d) 40 pulse, (e) 60 pulse, (1) 199.88 mJ/pulse, (2)258.50 mJ/pulse, (3) 295.93 mJ/pulse and (4) 327.09 mJ/pulse. 57

Fig. 3-15. Optical microscopy images of pit and HAZ formed by the irradiation of 532 nm laser marking with changing pulse number; (a) 5 pulse, (b) 10 pulse, (c) 20 pulse, (d) 40 pulse, (e) 60 pulse, (1) 164.54 mJ/pulse, (2)226.58 mJ/pulse, (3) 268.95 mJ/pulse and (4) 303.62 mJ/pulse. 59

Fig. 3-16. OCT images of pit formed by the irradiation of 1064 nm laser marking with changing pulse number; (a) 5 pulse, (b) 10 pulse, (c) 20 pulse, (d) 40 pulse, (e) 60 pulse, (1) 199.88 mJ/pulse, (2)258.50 mJ/pulse, (3) 295.93 mJ/pulse and (4) 327.09 mJ/pulse. 61

Fig. 3-17. OCT images of pit formed by the irradiation of 532 nm laser marking with changing pulse number; (a) 5 pulse, (b) 10 pulse, (c) 20 pulse, (d) 40 pulse, (e) 60 pulse, (1) 164.54 mJ/pulse, (2) 226.58 mJ/pulse, (3) 268.95 mJ/pulse and (4) 303.62 mJ/pulse. 63

Fig. 3-18. Optical microscopy images of pit and HAZ formed by the irradiation of 1064 nm laser marking at different pulse repetition rates; (a) 199.88 mJ/pulse, (b) 258.50 mJ/pulse, (c) 295.93 mJ/pulse, (d) 327.09 mJ/pulse, (1) 1 Hz, (2) 5 Hz, (3) 10 Hz and (d) 20 Hz. 66

Fig. 3-19. Optical microscopy images of pit and HAZ formed by the irradiation

of 532 nm laser marking at different pulse repetition rates; (a) 164.54 mJ/pulse, (b) 226.58 mJ/pulse, (c) 268.95 mJ/pulse, (d) 303.62 mJ/pulse, (1) 1 Hz, (2) 5 Hz, (3) 10 Hz and (d) 20 Hz.	68
Fig. 3-20. OCT images of pit formed by the irradiation of 1064 nm laser marking at different pulse repetition rates; (a) 199.88 mJ/pulse, (b) 258.50 mJ/pulse, (c) 295.93 mJ/pulse, (d) 327.09 mJ/pulse, (1) 1 Hz, (2) 5 Hz, (3) 10 Hz and (4) 20 Hz.	70
Fig. 3-21. OCT images of pit formed by the irradiation of 532 nm laser marking at different pulse repetition rates; (a) 164.54 mJ/pulse, (b) 226.58 mJ/pulse, (c) 268.95 mJ/pulse, (d) 303.62 mJ/pulse, (1) 1 Hz, (2) 5 Hz, (3) 10 Hz and (4) 20 Hz.	72
Fig. 3-22. Schematic for analysis of heat transfer distribution.	75
Fig. 3-23. Sequence of simulation for numerical analysis at Comsol-Multiphysics.	76
Fig. 3-24. Dimension of boundaries of model by Comsol Multiphysics.	77
Fig. 3-25. Measurement of processing temperature at ABS plastic by IR camera.	78
Fig. 3-26. The time dependent thermal distribution of sample surface by numerical analysis according to consider only heat transfer; (a) 0 ns, (b) 1 ns, (c) 2 ns, (d) 4 ns, (e) 6 ns, and (f) 8 ns.	79

Fig. 3-27. The time dependent thermal distribution of sample section by numerical analysis according to consider only heat transfer; (a) 0 ns, (b) 1 ns, (c) 2 ns, (d) 4 ns, (e) 6 ns, and (f) 8 ns. 80

Fig. 3-28. Thermal distribution by one pulse laser irradiation at threshold value; (a)~(b): Optical microscope images, (a) 1064 nm-12 mJ, (b) 532 nm-20 mJ, (c)~(d): OCT images, (c) 1064 nm, (d) 532 nm, and (e) simulation at maximum temperature 534K by Comsol Multiphysics. 81

Fig. 3-29. Meshing process of material in Comsol Multiphysics program; (a) Auto mesh(1×10^{-3} m), (b) Manual mesh(1×10^{-5} m). 83

Fig. 3-30. The simulation of the time resolved pit and rim formation and the time resolved thermal distribution by laser irradiation; (a) 0 s, (b) 5 ns, (c) 10 ns, (d) 20 ns, (e) 30 ns, (f) 60 ns, (g) 80 ns, and (h) 100 ns. 85

Fig. 3-31. Schematic of nanosecond time resolved reflectivity system. 88

Fig. 3-32. Set-up of nanosecond time resolved reflectivity system. 89

Fig. 3-33. Application of laser in materials processing; PLA/PLD: pulsed laser ablation/deposition, LA: laser annealing, LC: laser cleaning, LIS: laser-induced isotope separation, MPA/MPI: multiphoton absorption /ionization, LCVD: laser-induced chemical vapor deposition, LSDW /LSCW: laser-supported detonation/combustion waves, LEC: laser

-induced electrochemical plating/etching	90
Fig. 3-34. Organized nano-second time resolved reflectivity of recording laser at 182.5 mJ.	91
Fig. 4-1. The variation of pit radius on irradiation number of a laser pulse centered 1064 nm.	93
Fig. 4-2. The variation of pit radius on irradiation number of a laser pulse centered 532 nm.	94
Fig. 4-3. The variation of pit depth on irradiation number of a laser pulse centered 1064 nm.	95
Fig. 4-4. The variation of pit depth on irradiation number of a laser pulse centered 532 nm.	96
Fig. 4-5. The variation of pit radius on repetition rate of a laser pulse centered 1064 nm.	97
Fig. 4-6. The variation of pit radius on repetition rate of a laser pulse centered 532 nm.	98
Fig. 4-7. The variation of pit depth on the repetition rate of a laser pulse centered 1064 nm.	99
Fig. 4-8. The variation of pit depth on the repetition rate of a laser pulse	

centered 532 nm.	100
Fig. 4-9. Radius of pit formed by 1064 nm laser.	101
Fig. 4-10. Radius of pit formed by 532 nm laser.	102
Fig. 4-11. Depth of pit formed by 1064 nm laser.	103
Fig. 4-12. Depth of pit formed by 532 nm laser.	104
Fig. 4-13. The comparison between the experimental (1-2) and the simulation (3) results for the surface deformation; (1) optical microscopic images, (2) OCT images, and (3) simulation - the single pulse energy is 295.93 mJ/pulse and the operation Wavelength of the Nd:YAG laser is 1064 nm; (a) 5, (b) 10, (c) 20, and (d) 40 pulses, dashed line in (a-3) is HAZ boundary determined by the glass temperature.	106
Fig. 4-14. The variation of HAZ on the irradiation number of a laser pulse centered 1064 nm.	108
Fig. 4-15. The variation of HAZ on the irradiation number of a laser pulse centered 532 nm.	109
Fig. 4-16. The variation of HAZ on the repetition rate of a laser pulse centered 1064 nm.	110

Fig. 4-17. The variation of HAZ on the repetition rate of a laser pulse centered 532 nm.	111
Fig. 4-18. Radius of HAZ formed by 1064 nm laser.	112
Fig. 4-19. Radius of HAZ formed by 532 nm laser.	113
Fig. 4-20. The calculated and measured size of pit; 40 pulse at 20 Hz in repetition rate.	114
Fig. 4-21. The calculated and measured size of HAZ; 40 pulse at 20 Hz in repetition rate.	115
Fig. 4-22. Time resolved reflectivity by irradiation of recording laser.	117
Fig. 4-23. Time resolved reflectivity by irradiation of 1064 nm laser.	118
Fig. 4-24. Time resolved reflectivity by irradiation of 532 nm laser.	119
Fig. 4-25. Delay time of reflectivity depending on wavelength.	120

List of Tables

Table 1. Comparison of resolution depending on image modality	28
Table 2. Physical properties of ABS plastic.	38
Table 3. The characteristic of recording laser system.	41
Table 4. Specification of optical components for nanosecond time resolved reflectivity.	49
Table 5. Specifications of OCT laser source.	51
Table 6. Parameters of irradiated recording laser.	53
Table 7. Boundary condition for simulation of deformation of specimen by heat transfer.	82
Table 8. The characteristic of probe laser system.	87

ABSTRACT

Analysis of marking mechanism and thermal distribution on laser beam irradiation

Youngseop Kim

Advisor : Prof. Yong Jin Shin Ph.D

Department of Optical Application Engineering

Graduate School of Chosun University

Recently, many scientists have studied the interaction between laser beam and materials such as pit formations and heat transfer distributions according to laser irradiation. Nevertheless, they just predict those without mechanism analysis. Thus, we try to perform the numerical analysis for heat transfer distributions due to pit formations using the FEM (Finite Elements Method) by pulse laser irradiated to ABS plastic. ABS plastic is generally used for the industry and it is sensitive to the thermal. We also try to prove the mechanism of a pit formation by measuring a nano second time resolved reflectivity on real time.

In this paper, we use the Q-switching Nd:YAG laser as a record laser and it forms pits at ABS plastic. In our experiments, wavelengths of 1064 nm and 532 nm are used, with 8 ns pulse-width, irradiation energy per pulse ranging from 190 mJ to 340 mJ, pulse repetition (1, 5, 10 and 20 Hz). Total irradiation energy to form pits is controlled by repetition pulse number. The pits are

analyzed by optical microscopy and OCT (Optical Coherence Tomography) using non-contact method. This measurement give us the information of radius of pit and size of HAZ (Heat Affected Zone). These results are characterized by wavelength, energy and pulse repetition rate and they in accord with simulation. Magnitude of nano second time resolved reflectivity in order to analyze the mechanism of pit formations is dependence on wavelength, and nano second reflectivity has delay time. In case of has irradiation energy over 250 mJ, the reflectivity has side lobe which is based on mechanism analysis of pit formation.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경

레이저 빔과 물질과의 상호작용은 지난 수 세기 동안 부단한 연구가 진행되어 왔다. 레이저 빔이 물질에 입사될 때 열로서 일어날 수 있는 물리적인 현상들은 빔의 세기와 파장, 빔의 편광상태 및 노출시간에 따라 달라지고, 물질의 구성 성분 및 표면 정도에도 관계된다. 일반적으로 레이저 빔이 물질에 입사될 때 반사와 흡수를 동시에 일으키게 되는데 시료의 가열은 흡수에 의존하게 된다. 시료가 금속인 경우 단위 면적당 10^3 W 에서 시료의 가열이 시작되고, $10^5 \sim 10^6$ W에 이르면 용융되기 시작한다. 레이저의 출력이 10^6 W에 이르면 시료가 증발되기 시작한 후 표면에서 키홀(key hole)이 형성되어 입사빔의 대부분이 흡수된다 [1]. 또한 단위 면적당의 출력이 $10^7 \sim 10^8$ W가 되면 키홀 속의 증기가 증가되어 주위에 이온화가 이루어져 플라즈마가 형성된다. 플라즈마는 빔의 상당 부분을 흡수해 빔 진행을 차단하게 되며 입사된 레이저 빔 주위에 플라즈마 경계를 만들어 실질적인 메커니즘이 끝나게 된다 [2].

레이저와 물질간의 상호작용은 레이저 에블레이션(ablation)과 레이저 열처리 과정으로 분류할 수 있는데, 전자(前者)의 경우 미세 가공이나 레이저 증착 및 나노 입자 가공 등과 같이 매우 폭넓게 응용되고 있으며[3] 고출력 레이저에서는 물질을 증발시키거나 이온화 시켜 물질 표면에서 분화구와 같은 홀이나 플라즈마를 만들어 내는데 이는 이온화 과정을 포함한 에블레이션이나 에너지 전환 및 에블레이션 직후에 발생하는 상변화와 물질의 제거 등과 같은 연구에 그 목적을 두고 있다[4, 5]. 반면에 후자(後者)의 경우는 일반적으로 1 J/cm^2 보다 작은 저출력의 레이저 조사로 물질의 결정 상태의 변화 및 시료의 변형력 등에 관하여 논의해 오고 있다 [6-8]. 특히 레이저 조사에 의해 야기되는 물질에서의 온도 분포는 거의 모든 상황에서 배재시킬 수 없기 때문에 그에 관한인지는 물질의 절단, 드릴링, 마킹 및 용

접과 같은 산업적 처리 및 의학적 처리를 적용시키기 위한 중요한 단계이다. 특히 마킹과 표면 처리는 레이저 조사 영역의 화학적 및 물리적 구조 변화와 열탄성 변형 또는 연화(軟化)를 유도해 내고 표면 열처리에 의한 증발을 피하기 위한 목적을 내포하고 있다[9]. 이러한 물리적 상황은 간단한 수학적 모델에 의해 표현될 수 있으며 물질의 온도 분포는 이미 잘 알려진 열전달 미분 방정식에 의해 풀어질 수 있다[10]. 열전달 미분 방정식을 풀이하는데 있어 모델이 기하학적 대칭 구조를 가지며 일정한 물성 상수를 가질 경우 해석적 방법이 유용하며[11-14], 모델이 매우 복잡해지거나 물성 상수들이 시간에 독립적이지 않으면 유한차분법(FDM, Finite Difference Method)이나 유한요소법(FEM, Finite Elements Method)에 기초한 수치적 방법이 유용하다[15]. 또한 이러한 열전달 문제가 제시된 위의 두 가지의 해석적 방법에 의해 해결된다 하더라도, 비록 열처리에서는 큰 문제가 되지 않지만, 표면 마킹이나 via 홀을 형성시키기 위해 레이저 조사 조건이 달라진다면 열전달 문제를 해결하는 것만으로는 정형화된 형상을 측정하고 분석하는데 연구의 담보를 보이고 있어 메커니즘 해석에 한계점을 드러내고 있다[16].

제 2 절 연구목적

레이저는 군사, 산업, 과학기술 및 의료 등 여러 분야에서 획기적인 첨단 기기로 사용되고 있다. 특히 산업 및 과학기술 분야에서는 고출력의 레이저가 발진된 이후 종래의 재래식 가공 방법에서 레이저를 이용한 가공 기술로 급진적인 발전을 보이고 있을 뿐만 아니라 기기의 소형화에 따른 초정밀 마킹과 정밀 가공 기술 역시 눈부신 발전을 보이고 있다. 현재에는 정밀 가공을 통한 레이저 마킹 데이터 저장 장치의 일환으로 유기체의 플라스틱 물질에 대한 마킹이 대두되고 있으며 광학 기록 매체의 이용은 대부분의 전통적인 기술보다 고밀도의 정보 저장 능력을 제공하고 있기 때문에 지대한 관심을 보이고 있다.

유기체의 플라스틱 물질은 금속에 비해 갈라짐이나 깨짐이 적은 장점을 보이고 있는 반면[17], 완성품의 제작 방법에 있어 압출이나 사출의 방법을 사용하고 있는 특성상 열적 내구성에는 큰 취약점을 보이고 있다. 이러한 열적 내구성의 취약점 때문에 저장 매체로서의 플라스틱의 사용은 알루미늄 등과 같은 금속 물질과 혼합하여 사용을 하고 있어[18], 그 공정이 복잡하고 고가(高價)의 생산비용이 소요되고 있다.

레이저의 의학적 응용은 크게 진단 목적과 치료 목적으로 사용되고 있는데 두 응용 모두가 비동질의 세포 조직에 조사된 빔이 부분적으로 흡수, 산란 및 투과되어 세포 조직을 분열하거나 제거, 절단 등의 상호 작용을 일으킨다. 이는 기계적 시술이나 전기적인 시술에 비해 출혈이 거의 없지만 빔 흡수에 의한 세포 조직의 열적 반응에 따른 단백질 응고 및 효소의 비활성화로 인한 세포 구조 자체가 변형되는 등의 조직별 열작용에 의한 부작용이 가장 큰 문제점으로 대두되고 있다[19, 20]. 따라서 본 논문에서는 산업 및 과학기술 분야 중 정밀 마킹과 의료 분야에서의 세포 조직 가열을 동시에 만족할 수 있는 범용의 사출 ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) 플라스틱을 시료로 사용하였다. ABS 플라스틱은 폴리머 중 가장 범용으로 사용되며 가격면에서도 저렴할 뿐만 아니라 열에 민감한 비동질의 성질 때문에 열전달 해석의 실험에 생물체의 세포 조직과 비슷한 많은 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 ABS 플라스틱의 시료 표면에 레이저를 조사하여 흡을 형성하였으며 이 과정에서 발생하는 열전달 문제를 해석하였다. 이는 기존의 금속 표면 열처리 과정에서 해석되는 열전달 문제와는 달리 레이저 조사가 시작되는 시점에서부터 끝나는 시점까지 거의 연속적으로 매 순간 흡을 형성시켜 가며 열전달이 이루어진다는 점이다. 또한 레이저 조사에 의해 시료로 사용된 플라스틱에 흡이 형성되는 메커니즘을 해석하기 위하여 흡 형성 과정을 나노(10^{-9}) 초 간격으로 반사도를 측정하여 분석하였다. 이러한 과정들은 기존의 간접적인 수치해석에 의해 예측된 시료의 변형들을 유한요소법에 의한 해석적 방법을 통해 열전달을 예측함으로써

써 시료의 최소 변형 환경을 찾아내고, 나노초 시간분해 반사도의 해석과 더불어 레이저 조사에 의한 흠 형성 메커니즘을 분석하는데 그 목적을 두고 있다.

제 2 장 이 론

제 1 절 수치해석의 개요

지구상 혹은 우주의 모든 물리현상의 표현은 편미분 지배 방정식의 형태로 나타낼 수 있는데, 이들 편미분 방정식을 해석적인 방법으로 풀 수 있는 것은 대부분 선형 편미분 방정식이어야 하고 초기조건과 경계조건이 매우 간단한 문제에 국한되므로 이러한 해석적인 방법으로 실제적이고 복잡한 물리현상을 다루는 문제를 해결하기에는 거의 불가능하다고 볼 수 있다. 1950년대 공학용 컴퓨터가 출현하면서 복잡한 편미분 방정식을 풀 수 있게 되었는데 이와 같이 풀이하는 방법을 수치해석 또는 시뮬레이션(Simulation) 등의 이름으로 통용되었고 그림 2-1과 같은 절차를 따른다.

공학의 지배적인 편미분 방정식은 연속적인 물리현상을 표현하고 있는 아날로그(analog) 형태의 방정식이므로 아날로그 컴퓨터의 출현 없이 적분 해를 구한다는 것은 현재로서는 불가능하다. 그러므로 디지털 컴퓨터에서 아날로그 형태의 편미분 지배 방정식을 풀기 위해서는 디지털 컴퓨터가 받아들일 수 있는 절차가 필요한데 이것이 그림 2-1의 네 번째 단계인 불연속(discretization) 절차이다. 이러한 불연속 절차의 작업은 크게 유한차분법(FDM, Finite Difference Method), 유한체적법(FVM, Finite Volume Method) 및 경계요소법(BEM, Boundary Element Method)과 유한요소법(FEM, Finite Elements Method)의 방법이 있다[21].

유한 차분법은 차분 방정식으로 근사화시켜 수치 해석을 하는 방법으로 편미분 방정식에서 1차 연립 방정식으로의 변환 과정이 직접적인 방법이기 때문에 단계별 해석이 가능하고 행렬(matrix)을 형성할 필요가 없어 계산 시간이 짧고 저장 용량이 적게 요구되며 큰 변위를 해석할 수 있어 동적 해석에 유용한 장점이 있는 반면 정적 해석에 있어 많은 계산 시간이 요구되며 시료 내부와 경계에서 나누는 마디점(node)의 개수에 따라 결과의 정확도에 영향을 미치는 단점이 있다[22]. 또한

이는 다항식이나 사인(sin)/코사인(cos) 급수, Legendre 다항식, Fourier 급수 및 Taylor 급수 등을 이용하여 표현할 수 있는데, 보통의 경우 Taylor 급수를 이용하고 있다[23].

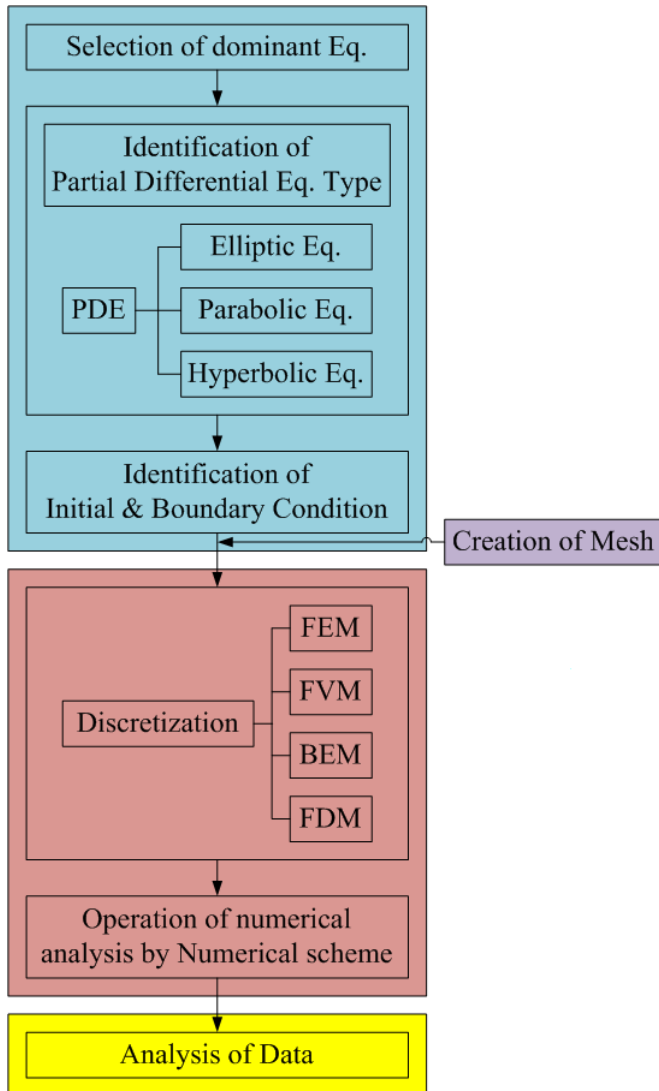


Fig. 2-1. Process of numerical analysis.

유한 체적법에서는 편미분방정식(PDE, Partial differential Equation)을 미분형태로 풀이하지 않고 식 (2-1)과 같이 공간상에서 체적 적분에 대해 만족할만한 해를 구해 해석한다.

$$\iiint_{\text{space}} [\text{PDE}] dV \equiv 0 \quad (2-1)$$

경계요소법은 편미분 방정식으로 표현된 경계값 문제를 경계상의 값에 관한 1차 연립방정식으로 변환하여 해석하는 방법으로 영역의 경계만을 요소로 분할하므로 풀어야 할 방정식의 수가 유한요소법에 비하여 적다. 따라서 적은 계산 시간이 요구되고 입력과 출력이 용이하며 해석해야 할 핵심부가 경계일 경우 경제적이고 효과적이다. 그러나 대부분의 경계요소법 프로그램은 시료를 선형 거동의 재료로 고려하며 복잡한 공정이나 재료의 시간 의존 특성 등을 쉽게 고려할 수 없는 단점이 있다. 즉, 경계에서의 발산 조건을 자동적으로 만족하는 반면 경계면이 매우 복잡한 비균질 물질을 다루는데 있어서 부적절한 방법이다.

유한요소법은 구조물 내 무한개의 미지수 점들을 유한개의 이산화된 위치들의 절점(node)으로 나타내고, 이들 간의 서로 유기적인 관계를 맺어주는 요소(element)를 이용하여 전체 구조물이나 실제의 물리적인 계가 절점들의 변위를 미지수로 하는 연립방정식을 나타낸 후 이를 계산하여 각 절점에서의 변위를 구함으로써 구조물 내 임의의 점에서 변위, 응력, 변형률 등의 결과 값을 수치적인 근사화를 통해 얻어지는 방법이다. 여기에서 요소라 함은 도식적으로 그림 2-2와 같이 절점과 절점들을 연결하는 블록의 형태를 가지고 있지만 실제로는 각 절점들 간의 관계를 나타내는 정보의 집합이라 할 수 있다[24]. 유한체적법과 비슷한 유한요소법은 1차원 모델에서의 유한체적을 $x_{i-1} \leq x \leq x_{i+1}$ 로 잡고 식 (2-2)의 적분이 만족하는 해를 구하는 방법으로 매우 복잡한 시료 조건을 해석할 수 있으며 시료의 불균질성을 해석할 수 있다. 즉, 불규칙적으로 생긴 물체를 쉽게 모델링 할 수 있을 뿐만 아니라 다른 물질로 구성된 물체의 모델링도 가능하며 여러 종류의 하중 조건을

쉽게 처리할 수 있다. 또한 경계 조건의 종류와 개수에 제한이 없고 필요에 따라 특정 부위의 요소 크기 조절이 가능하며 열해석을 위한 모델링이 가능하여 시간 의존성을 고려할 수 있는 장점이 있다[25]. 그러나 복잡한 문제를 해석하는 경우 많은 계산 시간과 저장 용량이 요구되고 일반적으로 인위적인 경계 조건을 정의하여야 하기 때문에 결과가 경계 조건의 설정에 따라 영향을 받게 된다.

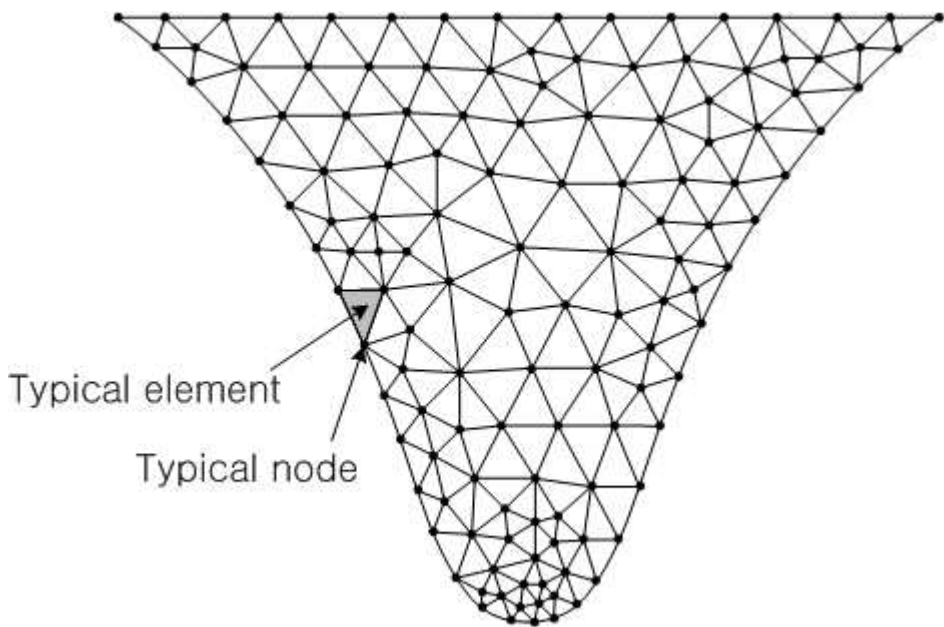


Fig. 2-2. Node and element.

$$\iiint_{\text{control volume}} [\text{PDE}][\text{Weight function}] dV \equiv 0 \quad (2-2)$$

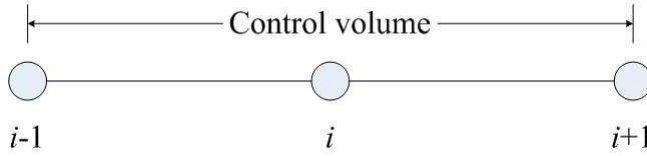


Fig. 2-3. Definition of one dimensional control volume for finite element method.

유한요소법은 가중함수(Weighting function)를 어떻게 취하느냐에 따라 여러 종류로 나뉠 수 있는데 가장 널리 일반적으로 사용되는 방법이 Galerkin 방법이다. Galerkin 방법은 미지수의 근사화를 위한 다항식 또는 Fourier 급수와 같은 차수의 다항식을 가중함수로 취하는 방법으로써 식 (2-3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_{x_{i-1}}^{x_{i+1}} \left[\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right] \omega(x) dx \equiv 0 \quad (2-3)$$

여기에서 $\omega(x)$ 는 가중함수이고 $x_{i-1} \leq x \leq x_{i+1}$ 에서의 온도 분포가 그림 2-4와 같이 1차 다항식으로 근사화 된다고 가정하고, 가중함수 역시 온도와 같은 차수의 1차 다항식으로 그림 2-5와 같이 가정하면 식 (2-3)의 각 항은 식 (2-4)와 같이 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Term \# 1} &= \int_{x_{i-1}}^{x_{i+1}} \frac{\partial T}{\partial t} \omega(x) dx & (2-4) \\ &= \int_{x_{i-1}}^{x_i} \frac{\partial T}{\partial t} \omega(x) dx + \int_{x_i}^{x_{i+1}} \frac{\partial T}{\partial t} \omega(x) dx \\ &= \frac{\partial}{\partial t} \left[\int_{x_{i-1}}^{x_i} T \omega(x) dx + \int_{x_i}^{x_{i+1}} T \omega(x) dx \right] \end{aligned}$$

여기에서 $\xi_1 = \int_{x_{i-1}}^{x_i} T\omega(x)dx$ 및 $\xi_2 = \int_{x_i}^{x_{i+1}} T\omega(x)dx$ 로 놓고 $x_{i-1} \leq x \leq x_i$ 구간에서 온도분포와 가중함수가 그림 2-4와 그림 2-5에 의해 1차 다항식으로 나타나므로 각각 식 (2-5)와 식 (2-6)식으로 표현되며 두 식에 의해 ξ_1 은 식 (2-7)과 같이 표현된다.

$$T(x) = T_{i-1} + \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x}(x - x_{i-1}) \quad (2-5)$$

$$\omega(x) = \frac{1}{\Delta x}(x - x_{i-1}) \quad (2-6)$$

$$\xi_1 = \int_{x_{i-1}}^{x_i} \left[T_{i-1} + \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x}(x - x_{i-1}) \right] \frac{x - x_{i-1}}{\Delta x} dx \quad (2-7)$$

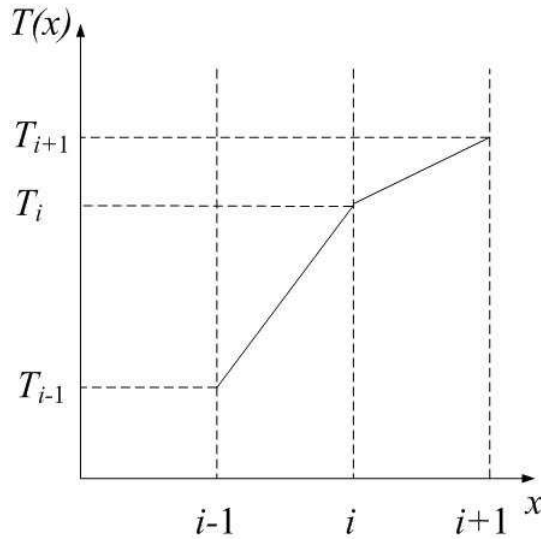


Fig. 2-4. Approximation of first order polynomial for temperature distribution.

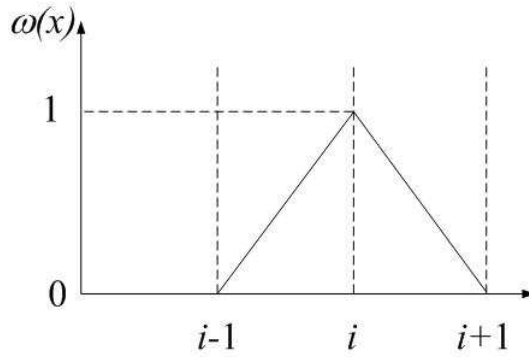


Fig. 2-5. Approximation of first order for weighting function.

같은 방법으로, $x_i \leq x \leq x_{i+1}$ 구간에서 ξ_2 를 표현하면

$$\xi_2 = \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left[T_i + \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x} (x - x_i) \right] \frac{x - x_i}{\Delta x} dx \quad (2-8)$$

ξ_1 과 ξ_2 를 적용하여 식 (2-4)에 대입하여 Taylor 전개를 시키면 식 (2-9)가 얻어진다.

$$\text{Term \# 1} = \frac{1}{6} \left(\frac{T_{i-1}^{n+1} - T_{i-1}^n}{\Delta t} \right) + \frac{2}{3} \left(\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \right) + \frac{1}{6} \left(\frac{T_{i+1}^{n+1} - T_{i+1}^n}{\Delta t} \right) \quad (2-9)$$

식 (2-3)의 두 번째 항은

$$\text{Term \# 2} = \alpha \int_{x_{i-1}}^{x_{i+1}} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \omega(x) dx \quad (2-10)$$

이 되며 부분적분 하면

$$\text{Term \# 2} = \left[\alpha \omega(x) \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x_{i-1}}^{x_{i+1}} - \alpha \int_{x_{i-1}}^{x_{i+1}} \frac{\partial \omega(x)}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} dx \quad (2-11)$$

식 (2-11)의 첫 번째 항의 $\omega(x)$ 는 $x = x_{i-1}$ 및 x_{i+1} 에서 “0”이므로 둘째항의 적분 영역을 $x_{i-1} \leq x \leq x_i$ 와 $x_i \leq x \leq x_{i+1}$ 로 나누어 계산하면 식 (2-12)를 얻는다.

$$\text{Term \# 2} = \alpha \frac{1}{\Delta x} [T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}] \quad (2-12)$$

결과적으로 유한요소법에 의해 얻어진 결과식은 다음과 같다[26-29].

$$\begin{aligned} & \frac{1}{6} \left(\frac{T_{i-1}^{n+1} - T_{i-1}^n}{\Delta t} \right) + \frac{2}{3} \left(\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \right) + \frac{1}{6} \left(\frac{T_{i+1}^{n+1} - T_{i+1}^n}{\Delta t} \right) \\ & = \alpha \frac{1}{\Delta x} [T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}] \end{aligned} \quad (2-13)$$

제 2 절 열전달 해석

열전달 해석에 있어 정상상태라 함은 에너지의 균형을 이룬 상태로서 물질에 입사된 양과 방출된 양이 같다는 것을 의미한다. 초기 열을 가할 때 각 부분의 온도가 상승하는 과도상태가 되지만 입사열량과 방출열량이 같아지면 각 부분의 상태가 일정 상태로 유지되는 정상상태가 된다. 즉, 과도상태가 지난 후에는 정상상태가 되며 정상상태에서는 온도가 시간에 의존하지 않게 된다. 정상상태를 제외한 상태를 과도상태 즉, 비정상상태라 하는데 정상상태를 제외한 모든 경우에서 온도

는 시간에 따라 변하게 된다. 물질 내부의 온도가 위치와 시간에 따라 변하게 되므로 위치와 시간에 따른 함수를 고려해야 하는 상태이다[30].

열전달에서의 에너지는 보통 단위 시간당 전달되는 열유동율 (열전달율; Heat flow rate)과 단위 면적당 전달되는 열속 (heat flux) 및 온도로 측정된다. 실험적 관찰에 근거한 열전달의 기본 법칙은 Biot으로부터 제안되었으나, 이를 열의 이론적 해석에 사용한 Joseph Fourier에 의해 특정 방향으로의 열류는 식 (2-14)와 식 (2-15)와 같은 형태로 정립되었다.

$$Q = -kA \nabla T \quad [\text{W}] \quad (2-14)$$

$$q = \frac{Q}{A} = -k \nabla T \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (2-15)$$

여기에서 식 (2-14)의 Q 는 면적 또는 체적 A 를 통해 양의 방향으로의 열유동율이 고, 식 (2-15)의 q 는 동질의 등방형 고체 물질에서 양의 방향으로의 열속이며 k 는 시료의 열전도계수이다.

시간 및 위치의 함수로 물질 외부에서의 에너지 공급에 의해 핵 및 전자, 화학 또는 기타의 원천에 기인하는 열 발생이 이질의 등방형 물질의 내부에서 발생한다면 정상상태의 열전달 미분 방정식은 식 (2-16)을 정리하여 식 (2-17)과 같이 얻어진다.

$$[\text{입사열율}] + [\text{에너지 발생율}] = [\text{에너지 저장율}] \quad (2-16\text{-a})$$

$$[\text{입사열율}] = - \int_A \vec{q} \cdot \hat{n} dA = - \int_V \nabla \cdot \vec{q} dv \quad (2-16\text{-b})$$

$$[\text{에너지 발생율}] = \int_V g(\vec{r}, t) dv \quad (2-16\text{-c})$$

$$[\text{에너지 저장율}] = \int_V \rho C_p \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} dv \quad (2-16\text{-d})$$

$$\int_V \left[-\nabla \cdot \vec{q}(\vec{r}, t) + g(\vec{r}, t) - \rho C_p \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} \right] dv = 0 \quad (2-16-e)$$

$$-\nabla \cdot \vec{q}(\vec{r}, t) + g(\vec{r}, t) = \rho C_p \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (2-16-f)$$

$$\nabla^2 T(\vec{r}, t) + \frac{1}{k} g(\vec{r}, t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (2-17)$$

여기에서 식 (2-16)의 첨자 A 는 체적 요소 V 의 표면적이고, 음수 부호는 열 흐름이 체적 요소 V 의 내부에 있음을 암시하고 있으며 $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$ 로 열 확산율이다.

만약 내부에서 열 발생이 없다면 즉, 동질의 물질이라면 식 (2-17)은 식 (2-18)과 같은 열전달 미분 방정식이 된다[31].

$$\nabla^2 T(\vec{r}, t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (2-18)$$

시료의 레이저 마킹에 대한 이론적 모델은 시료 표면($z=0$)에 수직으로 조사되는 외부 열속 (heat flux)이 그림 2-6과 같이 가우시안 (Gaussian) 분포를 가지고 있으며 시료에서의 열원의 물리적 분포가 대칭성이 있을 뿐만 아니라 온도가 각도에 대해 의존적이지 않기 때문에 원통형 좌표계를 사용하면 식 (2-19)를 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2-19)$$

여기에서 $T \equiv T(r, \phi, z, t)$ 이며, 또한 열 확산 깊이가 시료의 두께에 비해 얇아 반무한 고체로 취급할 수 있으며 이차원 문제로 축소하여 생각할 수 있다. 따라서 물질

의 열전달 미분 방정식 (2-19)는 식 (2-20)으로 다시 쓸 수 있는데 이는 ϕ 에 대해 의존적이지 않으며 대류와 복사열을 무시하였기 때문이다[32].

$$\frac{\partial^2 T(r,z,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r,z,t)}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial t} \quad (2-20)$$

$$-\infty \leq r \leq \infty, \quad 0 \leq z \leq \infty, \quad t > 0$$

따라서 경계조건은 식 (2-21)과 식 (2-22)로 표현된다.

$$k \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = f(r,t); \quad t > 0 \quad (2-21)$$

$$T(r,z,t) = F(r,z); \quad t = 0 \quad (2-22)$$

여기에서 식 (2-21)은 제 2 종(the Second kind) 경계조건, 즉 Neumann 조건으로 표면에서 온도 구배를 나타내고 있으며, $f(r,t)$ 는 표면에 수직으로 입사되는 외부 열속이다. 식 (2-22)는 제 1 종(the First Kind) 경계조건으로 Dirichlet 조건이며 $F(r,z)$ 는 표면 온도를 나타내고 있다. 따라서 시료에 수직으로 입사되는 열속은 식 (2-23)으로 나타내어지며 $H(t)$ 는 단위 계단 함수(unit step function)로 잘 알려진 Heaviside Step 함수로서 $t > 0$ 일 때 연속적인 열 흐름을 나타내고 있는 불연속적인 함수로서 그림 2-7 및 식 (2-24)와 같다. 여기에서 $g_c(r)$ 은 식 (2-25)로 표현된다.

$$f(r,t) = g_c(r)H(t) \quad (2-23)$$

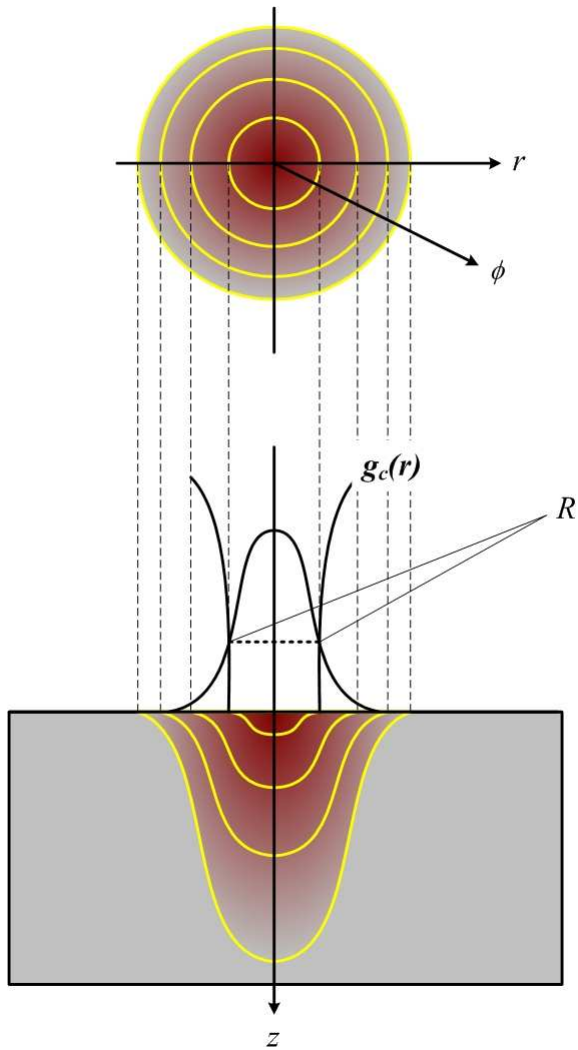


Fig. 2-6. Heat flux $g_c(r)$ of a Gaussian intensity distribution impinging perpendicularly to the material.

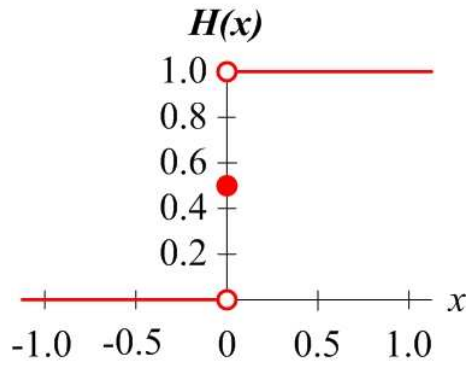


Fig. 2-7. Heaviside step function.

$$H(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ \frac{1}{2} & x = 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases} \quad (2-24)$$

$$g_c(r) = AI_0 \exp\left(-\frac{r^2}{R^2}\right) \quad (2-25)$$

여기에서 A 는 흡수율이고, I_0 는 최대 초기 강도, R 은 반치폭 (FWHM; Full Width at Half Maximum)에서의 레이저 미소 반경(radius of spot)이다.

레이저 조사에 의해 유도된 물질 가열의 물리적 현상은 잘 알려진 열전달 미분 방정식에 의해 설명될 수 있다. 비선형과 비동질성을 포함한 편미분 방정식의 해는 일반적으로 유한 차분법이나 유한 요소법과 같은 수치 계산적 방법에 의해 수행된다[33, 34]. 물리 현상의 수학적 표현은 물질의 특성이 온도에 독립적이고 등방형 구조를 이루고 있으며 복사와 대류에 의한 열 손실을 무시할 수 있을 때 선형적인 방정식을 만들어 낸다. 따라서 열 방정식의 해석적 방법의 해가 강력히 요구되어진

다[35, 36]. 여러 해석적 방법의 접근 중 Green 함수 방법은 가열 과정에 수반된 물리적 관점을 잃지 않고 물질에서의 온도 분포를 나타내기 때문에 매우 유용하다 [37]. Green 함수의 해석적 방법을 이용한 열전달 미분방정식의 풀이는 식 (2-26)과 같다.

$$\begin{aligned}
 T(\vec{r}, t) = & \int_R G(\vec{r}, t | \vec{r}', \tau)|_{\tau=0} F(\vec{r}') dv' \\
 & + \frac{\alpha}{k} \int_{\tau=0}^t d\tau \int_R G(\vec{r}, t | \vec{r}', \tau) g(\vec{r}', \tau) dv' \\
 & + \alpha \int_{\tau=0}^t d\tau \sum_{i=1}^N \int_{S_i} G(\vec{r}, t | \vec{r}', \tau)|_{\vec{r}' = \vec{r}_i} \frac{1}{k_i} f_i(\vec{r}', \tau) dS_i'
 \end{aligned} \tag{2-26}$$

여기에서 우측 첫 번째 항목은 적분된 R 영역, 즉 체적 내 온도 분포에서 초기 조건 함수와 초기 온도 분포 $F(\vec{r})$ 의 효과와 관련이 있으며, 두 번째 항목은 온도 $T(\vec{r}, t)$ 에서 에너지 생성 $g(\vec{r}', \tau)$ 의 효과를 내포하고 있다. 마지막 항목은 온도에서 경계조건의 비동질성 항, $f_i(\vec{r}', \tau)$ 의 효과를 언급하고 있다.

식 (2-26)에서 언급된 Green 함수를 결정하기 위하여 식 (2-20)을 고려해 보면 식 (2-27)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 \Phi(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Phi(r, z, t)}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \Phi(r, z, t)}{\partial t} \\
 0 \leq r \leq \infty, \quad 0 \leq z \leq \infty, \quad t > 0
 \end{aligned} \tag{2-27}$$

경계 조건은 식 (2-28)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \left. \frac{\partial \Phi(r, z, t)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad t > 0 \\
 \Phi(r, z, t) = F(r, z) \quad t = 0
 \end{aligned} \tag{2-28}$$

식 (2-27)을 변수분리 과정을 통해 풀이하면 식 (2-29)를 얻게 된다.

$$\begin{aligned} \Phi(r, z, t) &= \int_{\lambda=0}^{\infty} a(\lambda) \exp(-\alpha\lambda^2 t) \cos(\lambda z) d\lambda \\ &\quad \times \int_{\beta=0}^{\infty} b(\beta) \exp(-\alpha\beta^2 t) J_0(\beta r) d\beta \end{aligned} \quad (2-29)$$

여기에서 $a(\lambda)$ 와 $b(\beta)$ 는 Fourier 변환을 통해 얻어진 식으로 식 (2-30)과 같다.

$$\begin{aligned} a(\lambda) &= \frac{2}{\pi} \int_{z'=0}^{\infty} \cos(\lambda z') F(z') dz' \\ b(\beta) &= \int_{r'=0}^{\infty} \beta r' J_0(\beta r') F(r') dr' \end{aligned} \quad (2-30)$$

Green 함수를 이용한 Φ 의 표현은 식 (2-31)과 같다.

$$\Phi(r, z, t) = \int_{r'=0}^{\infty} \int_{z'=0}^{\infty} r' G(r, z, t) |_{r=0} F(r', z') dr' dz' \quad (2-31)$$

따라서 두 식 (2-29)와 (2-31)의 비교에 의해 얻어진 Green 함수는 식 (2-32)와 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} G(\vec{r}, t | \vec{r}', \tau) &= \frac{2}{\pi} \int_{\lambda=0}^{\infty} \exp[-\alpha\lambda^2(t-\tau)] \cos(\lambda z') \cos(\lambda z) d\lambda \\ &\quad \times \int_{\beta=0}^{\infty} \beta \exp[-\alpha\beta^2(t-\tau)] J_0(\beta r') J_0(\beta r) d\beta \end{aligned} \quad (2-32)$$

초기온도 $F(r)$ 이 "0"의 값을 갖고 시료 내에서의 열원 $g(\vec{r}', \tau)$ 가 없다고 가정하면 식 (2-26)의 세 번째 항만을 고려하면 된다. 따라서 온도 분포는

$$T(\vec{r}, t) = \alpha \int_{\tau=0}^t d\tau \int_{r'=0}^{\infty} r' G(\vec{r}, t | \vec{r}', \tau) |_{z'=0} \frac{f(\vec{r}', \tau)}{k} dr' \quad (2-33)$$

여기에서 $f(r', \tau) = g_c(r')H(\tau)$ 이고 $g_c(r') = AI_0 \exp(-r'^2/R^2)$ 로 표현할 수 있으며 $G(\vec{r}, t | \vec{r}', \tau) \equiv G(r, z, t | r', 0, \tau)$ 로

$$\begin{aligned} G(r, z, t | r', 0, \tau) &= \frac{2}{\pi} \int_{\lambda=0}^{\infty} \exp[-\alpha\lambda^2(t-\tau)] \cos(\lambda z) d\lambda \\ &\times \int_{\beta=0}^{\infty} \beta \exp[-\alpha\beta^2(t-\tau)] J_0(\beta r') J_0(\beta r) d\beta \end{aligned} \quad (2-34)$$

따라서 식 (2-33)은 식 (2-35)와 같은 온도 분포로 나타내어진다.

$$\begin{aligned} T(r, z, t) &= \frac{2\alpha AI_0}{\pi k} \int_{\tau=0}^t H(\tau) d\tau \int_{\lambda=0}^{\infty} \exp[-\alpha\lambda^2(t-\tau)] \cos(\lambda z) dz \\ &\times \int_{\beta=0}^{\infty} \beta \exp[-\alpha\beta^2(t-\tau)] J_0(\beta r) d\beta \\ &\times \int_{r'=0}^{\infty} r' J_0(\beta r') \exp\left(-\frac{r'^2}{R^2}\right) dr' \end{aligned} \quad (2-35)$$

식 (2-35)의 최종 적분 형태는 식 (2-36)과 같이 나타나며 이를 통해 시료에서의 온도 분포를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
T(r, z, t) = & \frac{AI_0R^2}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \sum_{u=0}^n (-1)^u & (2-36) \\
& \times \int_{\tau=0}^t \frac{\exp\left(-\frac{r^2}{4\alpha(t-\tau)+R^2}\right) \exp\left(-\frac{z^2}{4\alpha(t-\tau)}\right)}{\sqrt{t-\tau} [4\alpha(t-\tau)+R^2]} \\
& \times H(\tau-ud) d\tau
\end{aligned}$$

제 3 절 레이저 마킹 메커니즘

흠 형성 메커니즘에 대한 모델은 지난 수 년 동안 여러 과학자들에 의해 제시되어 왔으며 제시된 모델들은 모두 매체 내에서의 온도 분포와 밀접한 관련을 맺고 있다. 플라스틱 물질에서의 레이저 마킹은 일반적으로 광학적 흡수, 열 흐름, 질량운동과 같은 세 가지 물리적인 과정을 내포해 고도로 집속된 레이저 빔이 작은 크기의 흠을 만들어 낸다. 극히 짧은 시간 동안 레이저 빔이 물질에 조사되면 빔은 순간적으로 일부를 반사시키고 나머지 일부는 반사율 및 흡수율에 따라 반사 흡수된다. 반사율은 녹는점 이상의 온도에서 모든 표면에서는 “0”으로 가정되어 지는데 이는 흡수된 빔이 열원으로 작용해 물질이 그 열을 흡수하여 용융되고 마침내 빔이 조사된 주위로 열 흐름을 발생시킨다. 결과적으로 흠 중심의 표면은 함몰되고 흠 주위로 증배가 형성된다. 이는 함몰된 표면이 키홀(keyhole)을 형성해 흑체(blackbody)와 같은 역할을 하기 때문이다[38]. 레이저 빔의 흡수된 에너지 일부는 재복사에 의해 소실되고 나머지가 물질 내부로 흡수되어 물질의 표면에서부터 내부로 전달된다. 즉, 이러한 열전달에 의해 물질의 변형이 일어나는 것이다. 레이저 빔의 흡수된 에너지는 키홀과 같은 흠에서 순간적으로 감소되는데 이는 식 (2-37)과 같은 Beer Lambert 법칙에 의해 지수 함수적으로 감소한다[39, 40].

$$I = I_0 \exp(-\alpha d) \quad (2-37)$$

여기에서 I_0 는 빔의 초기 조사 강도이고, α 는 선형 흡수계수, d 는 투과깊이다. 이와 같이 광학적 흡수에 의한 열 흐름의 영향으로 플라스틱 표면은 흡과 외륵을 형성하게 되는데 이러한 흡과 외륵을 형성하는 메커니즘을 해석하는 여러 모델 중 최근 가장 각광 받고 있는 메커니즘 모델은 Chung에 의해 제시된 모델과[41] Wrobel과 그의 연구진들[42]에 의해 제시된 모델로 압축할 수 있다. 이 두 모델 모두 유기물질의 플라스틱 시료에 대해 언급하고 있는데, Chung에 의해 제시된 레이저 마킹 메커니즘 모델의 경우 레이저 마킹이 진행되는 동안 온도 구배에 의해 야기되는 표면 장력의 공간 구배 추진력 하에 발생하는 용융 물질의 흐름을 주된 요인으로 보고 있다[43]. 이는 서로 다른 두 해석으로 제시되고 있는데 그 하나가 열 팽창의 결과로 매체 표면으로부터의 용융 돌기의 체적 변화의 단계적 변화이며 다른 하나는 표면의 냉각 수축에 뒤따르는 단계적 변화이다. 이러한 메커니즘을 설명하기 위한 해석들은 아직도 명확하게 해석되지 않고 있지만 근사적인 계산들을 통해 그 가능성을 제시하고 있다. Chung과 Wrobel에 의해 제시된 두 모델의 순서는 각각 그림 2-8과 그림 2-9에 도식적으로 나타내었다. 시료의 일부가 시료를 액체 상태로 전환시키는 온도 이상의 온도로 열원으로서의 레이저 빔에 노출되어 부피를 증가시키고 노출되지 않은 부분의 측면 압력 때문에 초기 표면으로부터 돌출되는 용융 증배 현상을 이끌어낸다. 이어 돌출된 용융 부위는 증배의 꺾인 표면으로부터 작용하는 표면장력에 의해 흐름이 형성되며 마지막으로 열평형에 의한 수축 현상에 기인해 초기의 용융 영역이 점유했던 질량의 미소분이 밖으로 흘러나와 외륵을 형성하고 용융 영역의 중심부에서 함몰을 일으키며 홈을 형성시킨다[44-46].

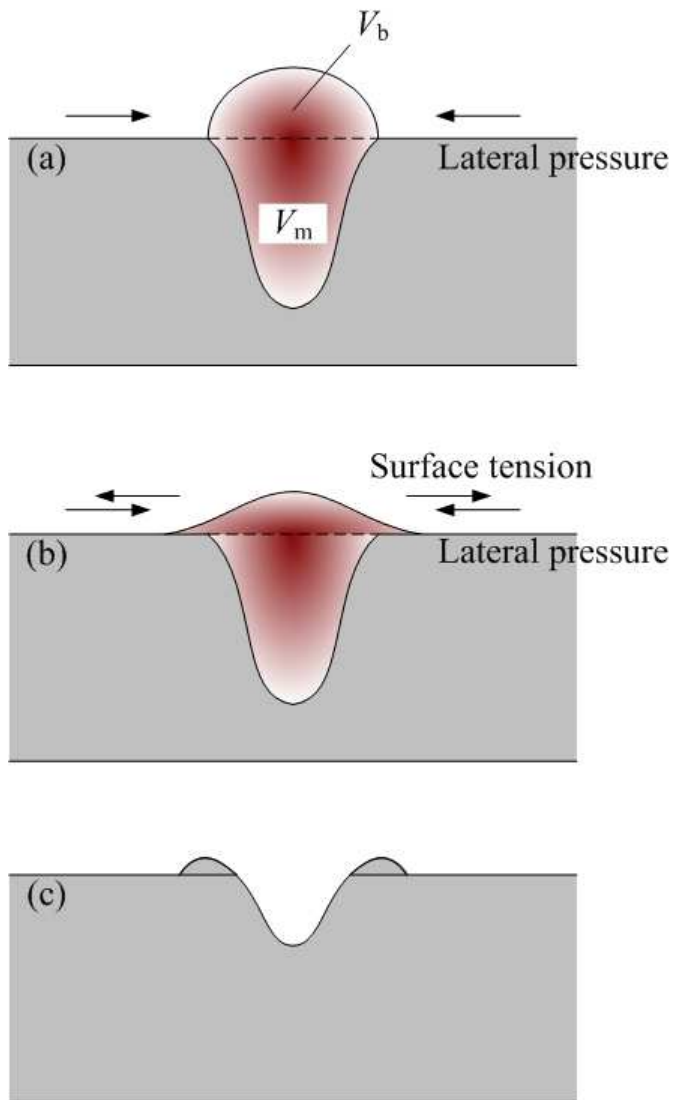


Fig. 2-8. Schematic of proposed mechanism-I; (a) molten bulge produced by local thermal expansion, (b) flow of bulge caused by surface tension and lateral pressure, (c) shrinkage of leveled bulge.

Chung의 모델은 흠을 형성시키기 위해 열팽창과 수축이 초기 증배와 표면에서 흠을 형성하기에 충분히 커야하며 수평 흐름은 증배가 용융상태에 있는 제한된 시간 동안 발생해야만 하는데 실제로 몇몇 흠 형성 과정은 열팽창 메커니즘에 기초하고 있지만 수평흐름은 요구되지 않는다. 이는 매체의 열팽창 계수와 레이저 조사 영역의 온도 상승 ΔT 를 계산하면 열분해를 초래하기에 충분히 높은 온도로서 미소 체적 팽창비 $\Delta V/V$ 를 만들어 낸다. 따라서 열팽창 조건은 흠을 형성하기 위한 조건에 만족되어 진다. 그림 2-8에서 제시된 바와 같이 제안된 메커니즘은 순차적으로 발생하지만 거의 동시에 순간적으로 발생해 열전달 문제로 연결된다. 즉 열전달에 의해 발생된 용융 흐름은 즉시 완전 진행단계에 이르게 되는 근사적인 방법이다. 온도 구배에 의해 형성된 용융이 폭 r 과 높이 a 를 갖는 부분적인 구 형태의 돌출을 만들어 낸다고 가정하고 매체 내에서의 용융의 경계가 폭 r 과 높이 h 를 갖는 Gaussian 분포를 만들지만 역삼각형 구도로 가정하면 식 (2-38)과 같은 체적 팽창비가 얻어진다.

$$\frac{V_b}{V_m} = \frac{\Delta V}{V} = \frac{a(3r^2 + a^2)}{2r^2h} \quad (2-38)$$

여기에서 만약 $a \ll r, h$ 라면 $a \simeq 2/3 \cdot h(\Delta V/V)$ 가 된다. 여기에 Orchard 방정식을 적용하면 용융 돌출부의 크기 비율 a/a_0 값은 계속 증가하게 된다. 따라서 Chung의 메커니즘 모델에서 제시된 두 번째 해석은 충분한 수평 흐름을 만들어 내지 못하고 있다.

Wrobel에 의해 제시된 모델의 경우 레이저 마킹에 의한 흠 외륜의 존재는 흠을 형성하는 동안 점성 흐름이 물질의 고유한 운동 성질이라는 것을 내포하고 있다. 표면 장력 σ 에 의해 유도된 질량 흐름의 표면 속도는 식 (2-39)와 같이 제시된다.

$$v_s = \sigma \frac{l}{\eta} \quad (2-39)$$

여기에서 η 는 물질의 점성이고 l 은 용융층의 두께이다. 시간 τ 이내에 반경 r 의 흠을 형성하기 위해 점성 에너지는 $E_\eta \approx \sigma \cdot \pi r^2 \tau = \eta r^4 / (l\tau)$ 가 요구되며 밀도 ρ 의 물질에 대해 흠 형성에 요구된 운동 에너지는 $E_k \approx \rho r^4 l / \tau^2$ 이다. 만약 $\eta \geq 10^{-2}$ poise 라면 E_k 는 E_η 보다 더 낮다. 실제로 시료의 점도가 높은 온도에서 1 poise 이하로 떨어지게 되면, 시료에서 흠 형성이 되는 동안 점성력이 흐름을 제한하기 때문에 1 poise 이하로 떨어져서는 안 된다. Wrobel은 흠 형성의 최종적인 의문을 추진력 F_d 의 근원에 두고 있다. 플라스틱에서 발생하는 표면장력과 비슷한 힘은 입자간의 상호작용이 변하지 않기 때문에 입자들 간의 에너지 차라기보다는 온도 구배에 기인한 것으로 보고 있으며 흠을 만들기 위해서는 표면장력 구배가 반드시 필요하다고 보고 있다. 대부분의 플라스틱에 대한 표면장력 $\sigma \leq 40$ dyne/cm 이지만 $\sigma \approx E_\eta / \pi r^2 = 2 \times 10^4 \cdot \eta$ dyne/cm 이기 때문에 빠른 흠 형성에 있어 표면장력은 큰 역할을 하지 못하고 있다. 대신 물질 제거에 기인하는 반충압력(recoil pressure)이 질량 흐름을 위한 주된 추진력으로 제안하고 있다. 식 (2-40)은 레이저 조사 시 발생하는 에블레이션 에너지이다[47, 48].

$$E_a \approx \frac{(F_a \cdot \pi r^2 \cdot \tau)}{2f\rho\pi r^2 l} \quad (2-40)$$

여기에서 F_a 는 흠 형성시 발생하는 반충압력이고, f 는 제거되는 흠 체적의 일부이다. 만약 반충압력이 점성을 극복하고 등방성이라면 $F_a \geq \sigma \cdot r/l = r^6 \eta^2 / (f \rho l^5) \approx \eta^2 / f$ nJ이 요구된다. 이와 같이 반충압력의 예측은 필수적이며 이에 기인해 질량 제거율은 홀 표면에서 압력차에 독립적이지 못하다. 그러나 반충압력이 발생하는 경우는 레이저가 나노초 펄스와 같은 특별한 경우 발생하는 현상이다[49].

특히 플라스틱 물질의 점성이 레이저 조사에 의한 분해 화학적인 과정에 의해 감소된다면 이 계산은 실험값과 거의 가까운 값을 보이게 된다. Wrobel에 의해 제시된 메커니즘을 도식화 하면 그림 2-9와 같다.

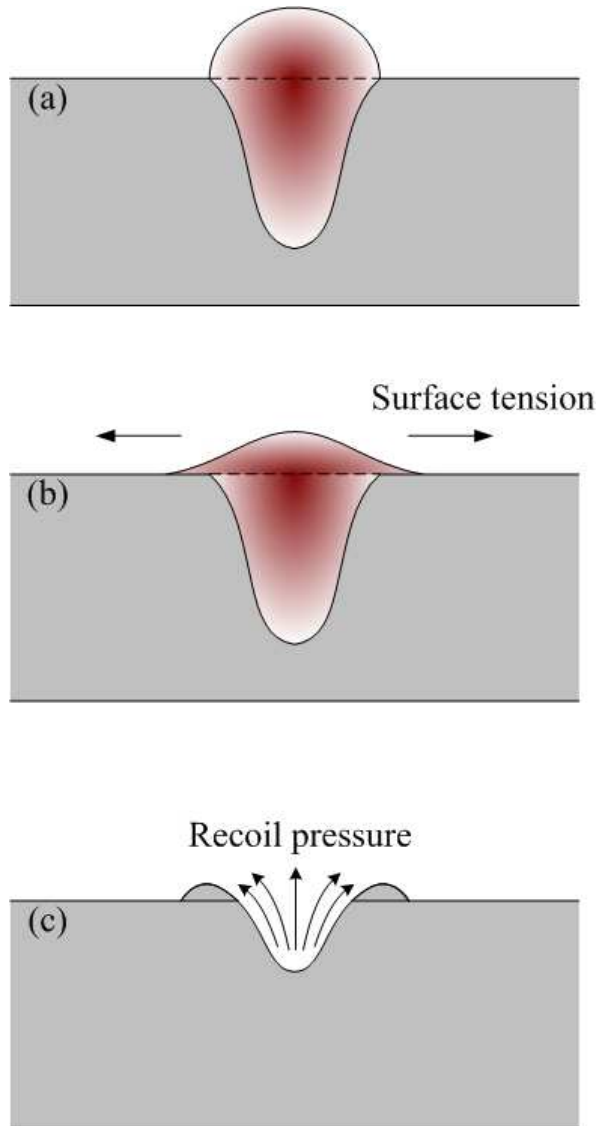


Fig. 2-9. Schematic of proposed mechanism-II; (a) molten bulge produced by local thermal expansion and intrinsic viscosity, (b) flow of bulge caused by surface tension, (c) formation of pi and rim by recoil pressure.

제 4 절 광 결맞음 단층촬영

광 결맞음 단층촬영(OCT; Optical Coherence Tomography)은 1992년 조직 해부학이나 생리학에서 실시간 단면 이미지 처리를 질병 치료의 중요한 정보로 제공할 목적으로 개발된 나노(nano) 기술이다. 이는 시료의 단면 정보를 제공하며 반사된 빛을 사용한다는 이유로 초음파 영상진단 의료장비와 비교되나 OCT는 빛을 이용하기 때문에 고해상도의 영상을 제공한다는 장점을 가지고 있다. 현재에는 OCT의 장점을 이용해 의료분야 뿐만 아니라 산업 및 과학기술분야에도 폭넓게 사용되고 있다. OCT는 광의 가간섭성 성질을 이용하고 있으며 이러한 성질은 이미지의 해상도에 직접적인 영향을 미친다[50]. 표 1은 현재 사용되고 있거나 개발 중에 있는 여러 단층 촬영 기법의 특징들을 요약하였고 그림 2-10은 그 예를 보여주고 있으며 그림 2-11은 OCT의 해상도를 보여주고 있다. 이는 가간섭성에 의존하고 있기 때문에 침투 깊이가 약 3 mm이며 해상도는 1-10 μm 이다[51].

Table 1. Comparison of resolution depending on image modality.

Technique	Resolution	Depth	Time
Magnetic Resonance Imaging (MRI)	10-100 μm	No limit	Min/Hours
x-ray Computed Tomography (CT) imaging	50 μm	No limit	Min
Ultrasound imaging	50 μm	mm	Min
Positron Emission Tomography (PET) imaging	1-2 mm	No limit	Min
Single Photon Emission Tomography (SPECT) imaging	1-2 mm	No limit	Min
Fluorescence Reflectance Imaging (FRI)	1-2 mm	< 1 cm	Sec/Min
Fluorescence Mediated Tomography (FMT)	1-2 mm	< 10 cm	Sec/Min
Bio-luminescence Imaging (BLI)	Several mm	cm	Min
Intravital Microscopy (Confocal, Multiphoton)	1 μm	< 400 μm	Sec/Min

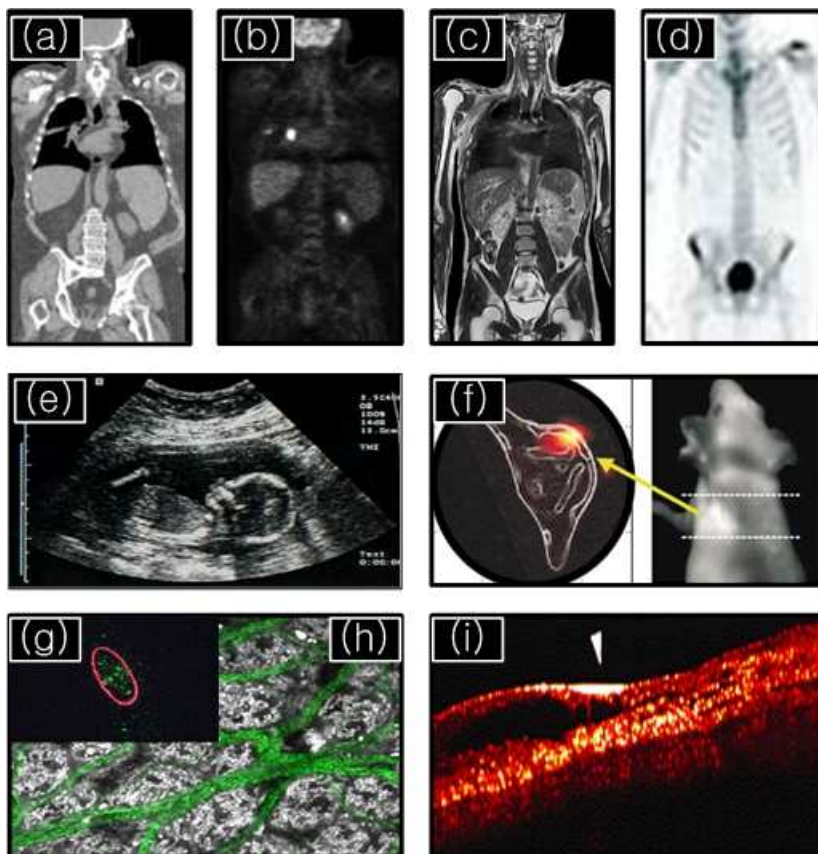


Fig. 2-10. Biomedical imaging modality for the internal structure of organs; (a) CT, (b) PET, (c) MRI, (d) SPECT, (e) US, (f) NIR, (g) Confocal microscopy, (h) Multiphoton microscopy, (i) OCT.

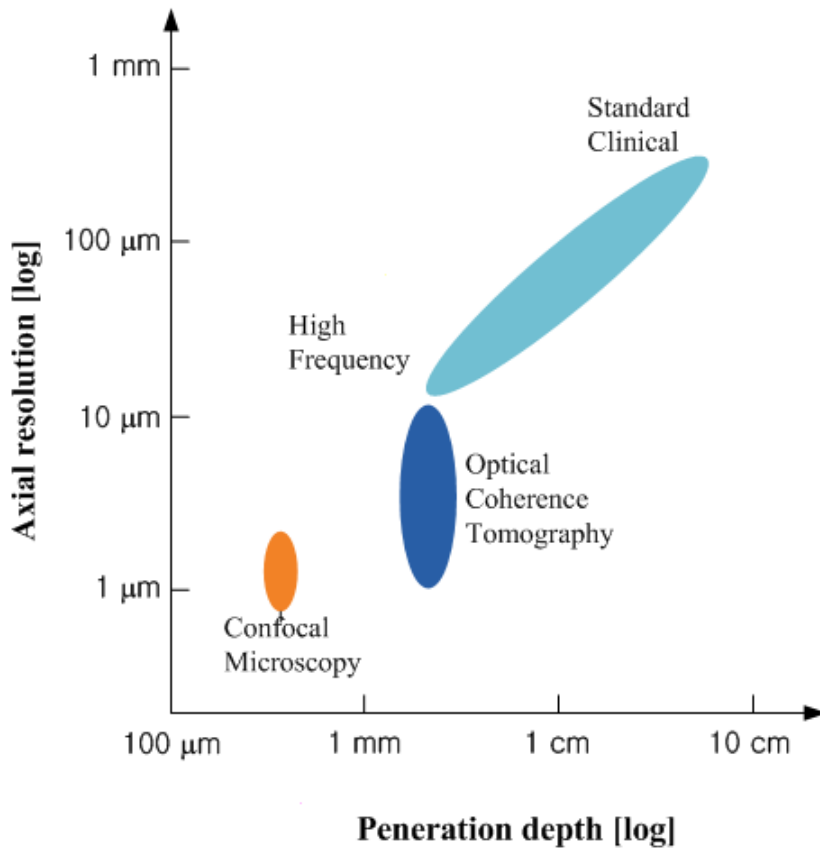


Fig. 2-11. Resolution of Biomedical systems.

OCT는 가간섭 영역의 광기술(Coherence-domain optical technology)에 바탕을 두고 있으며 기본적인 시스템의 구성은 그림 2-12와 같다. OCT 시스템은 광학 시스템과 전기 신호 시스템으로 구분할 수 있는데 전자(前者)의 경우 광원부, 기준단, 샘플단 및 검출단으로 분류되며 후자(後者)의 경우는 광학 시스템에서 얻은 광학적 신호를 전기회로적인 신호 처리를 통해 영상으로 변환시킨다.

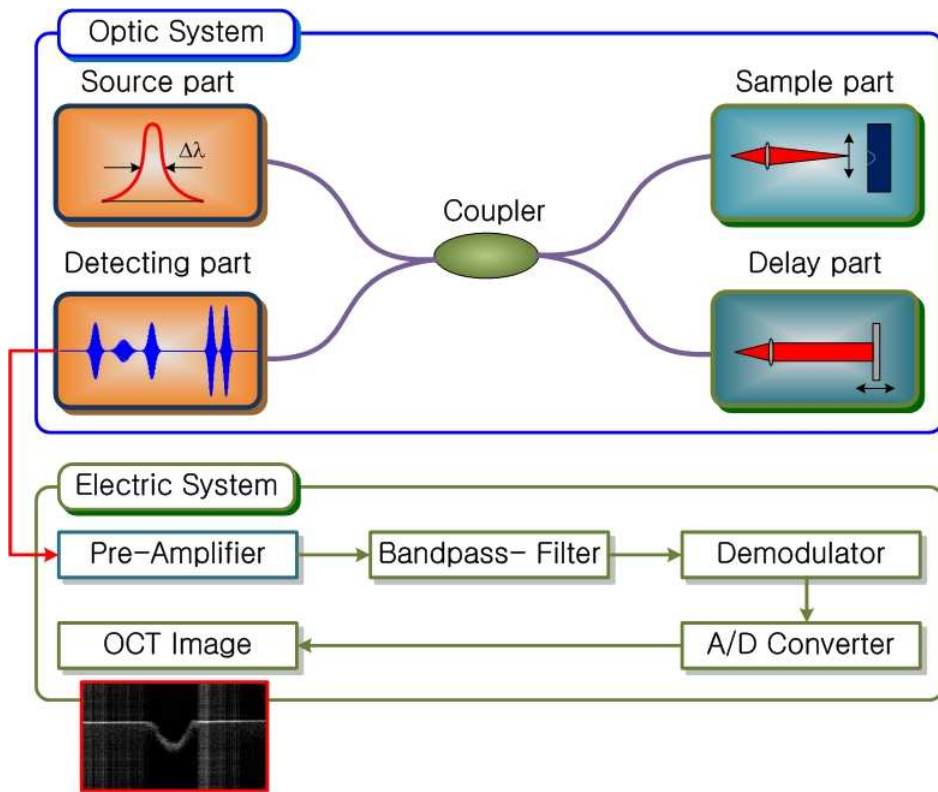


Fig. 2-12. Schematic diagram of OCT system.

OCT의 광학 시스템은 그림 2-13과 같은 미켈슨 간섭계(Michelson interferometer)를 기반으로 하고 있다. 이는 초음파를 이용한 영상 취득 방법과는 달리 광을 탐침자(probe)로 사용하기 때문에 직접 측정이 곤란한 문제점을 안고 있다. 간섭계를 시스템에 도입할 경우 기준단과 샘플단에서 반사된 빛이 광경로가 동일한 지점에서 간섭이 일어나는 특성을 이용하여 시료 내부의 깊이 정보를 얻을 수 있다. 즉, 광대역 광원에서 나온 빛이 광분배기(BS; Beam Splitter)에서 두 방향으로 분할되어 각각의 빛이 기준단과 샘플단으로 보내진다. 샘플단으로 보내진 빛은 샘플 내부의 각 경계면에서 반사되고 기준단에서는 움직이는 반사경에 의해 반사된다. 각각의 단에서 반사된 빛은 다시 광분배기에서 합쳐진 후 광검출기에서 검출된다. 이때 두 빛은 서로 광경로차가 일치할 때만 간섭무늬를 생성하게 되므로 광검출기에서 검출된 전기신호를 처리하여 반사체의 위치를 추적할 수 있다[52].

OCT 시스템 중 광학 시스템의 광원부는 최종적으로 얻어지는 영상의 분해능을 결정하는 핵심부로 사용하는 광원에 의해 가간섭 거리가 결정된다. 식 2-41과 같이 넓은 영역의 반치폭을 갖는 광원은 짧은 가간섭 거리를 갖고 영상 스펙트럼의 반치폭이 좁아지므로 고분해능의 OCT 영상을 얻을 수 있다. 따라서 OCT 시스템의 광원은 간섭성이 낮은 반도체 고체 레이저를 주로 사용한다.

$$\Delta z = \frac{2 \ln 2}{\pi} \left(\frac{\lambda^2}{\Delta \lambda} \right) \quad (2-41)$$

여기에서 Δz 는 영상 스펙트럼의 반치폭이고 $\Delta \lambda$ 은 광원의 반치폭이다.

기준단의 역할은 시료 내 각 경계면에서 반사되는 빛의 광경로를 기준단의 스캐닝을 통해서 알아내는 것으로 샘플단의 경계면과 동일한 광경로를 갖도록 기준단의 광경로를 변화시켜 간섭을 발생시킴으로써 시료 내부의 구조를 알 수 있다. 즉, 그림 2-14와 같이 시료의 깊이에 대한 정보를 간섭을 일으키는 기준단의 광경로로부터 얻을 수 있으며 이러한 깊이 방향의 스캐닝을 A-scan이라 하고 그 해상도는 식 2-41과 같다[53].

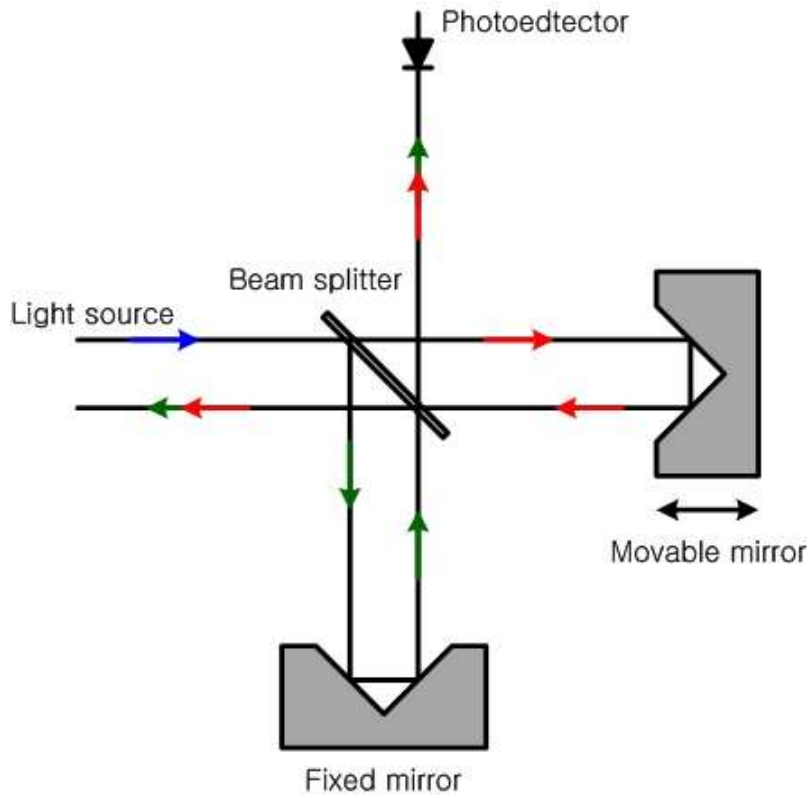


Fig. 2-13. Michelson interferometer based on optical spectrum analyzer (OSA).

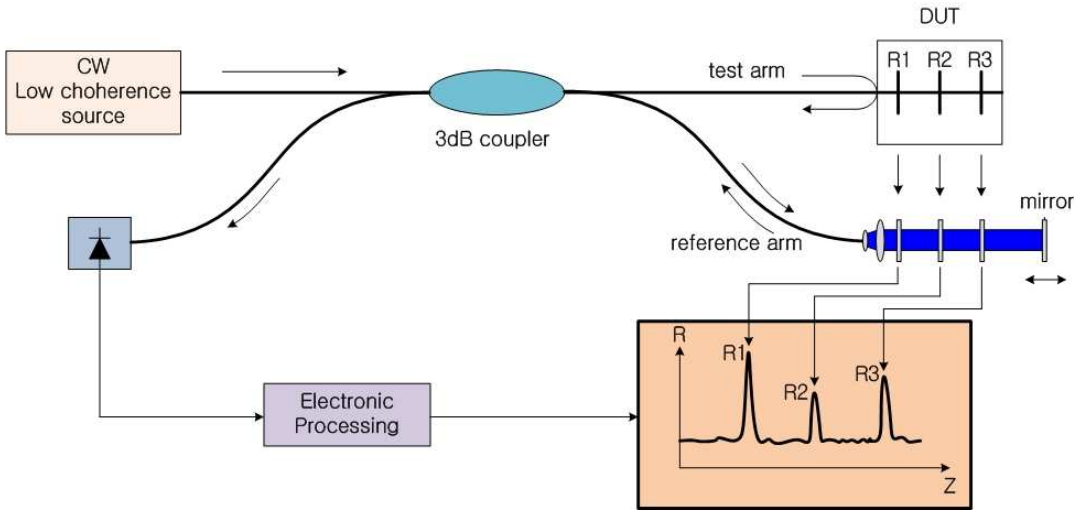


Fig. 2-14. The Schematic of optical low coherence reflectometry.

샘플단은 입사하는 광의 초점심도(focal depth)에 의한 축 방향의 스캐닝 깊이를 결정하여 깊이 정보를 알아낸다. 기준단과는 달리 광섬유에서 배출된 빛을 대물렌즈로 집광 후 샘플에 입사시키고 다시 반사되어 나오는 빛을 집광한 후 광섬유로 전해주는 역할을 한다. 또한 대물렌즈의 초점거리와 입사하는 광의 중심파장 및 평행광관(collimator)에서 인출되는 빛의 크기에 따라 수평방향의 분해능이 결정되며 이러한 수평 방향으로의 스캐닝을 B-scan이라 하고 그 해상도는 식 2-42와 같다. 그림 2-14는 기준단에서의 A-scan과 샘플단에서의 B-scan을 통해 이차원 OCT 이미지를 얻는 과정을 보여주고 있다.

$$\Delta x = \frac{4\lambda}{\pi} \left(\frac{f}{d} \right) \quad (2-42)$$

여기에서 d 는 대물렌즈에 의한 초점 크기이고 f 는 초점거리이다.

그림 2-15는 하드웨어에 의한 신호처리 과정을 순차적으로 나타낸 것이다. 광검출기가 수신한 광신호를 전기신호로 전환하여 전류를 흘려보내게 된다. 그러나 검출기에서 검출된 전기신호는 매우 미약하기 때문에 전류에서 전압으로 변환시키면서 pre-amplifier에서 증폭시킨다. 증폭된 신호는 도플러 주파수를 캐리어 주파수로 하는 간섭무늬 신호와 샘플 깊이 신호를 갖는 포락선 신호로 구성되어 있는데 신호 대 잡음비(SNR) 향상을 위하여 도플러 주파수를 중심으로 하는 대역통과필터를 거친다. 이후 신호의 감쇠를 보완하기 위하여 주 증폭기(main-amplifier)를 거쳐 신호를 증폭한다. OCT에서는 간섭무늬와 포락선만을 이용하므로 검파기(demodulator)를 통해 신호의 포락선만을 취한다. 이렇게 얻은 아날로그 신호를 아날로그/디지털 변환기(A/D converter)를 통해 디지털 신호로 변환시킨 후 컴퓨터의 신호처리 과정을 거쳐 2차원 영상으로 디스플레이하게 된다.

이와 같이 OCT는 낮은 결맞음의 광원을 이용한 간섭계의 활용으로 비접촉에 의한 깊이 정보를 알 수 있는 시스템으로 초기의 의학적인 활용에서 벗어나 본 논문에서는 이공학적인 분야로까지 적용하였다.

레이저 가공에 의해 형성된 3차원적 모델의 데이터를 얻는데 있어 그 측정 방법이 종래의 파괴적인 방법을 사용하고자 한다면 가공된 시료의 손실이 유발되기 때문에 유실된 시료의 정확한 데이터를 얻을 수가 없을 뿐만 아니라 가공된 시료의 보존 및 반복 사용이 불가능하여 측정 방법에 있어 종래의 방법을 사용한다는 것은 많은 불이익을 감수해야한다. 따라서 시료의 유실을 방지하고 보존 및 반복사용이 가능한 비접촉식이고 비파괴적인 방법을 생각해 볼 수밖에 없다. 따라서 전술(前述)된 방법과 접목되는 방법 중의 하나가 광학적 측정 방법을 사용해 가공된 시료의 측정에 있어 비접촉식이고 비파괴적인 OCT 시스템을 활용하였다.

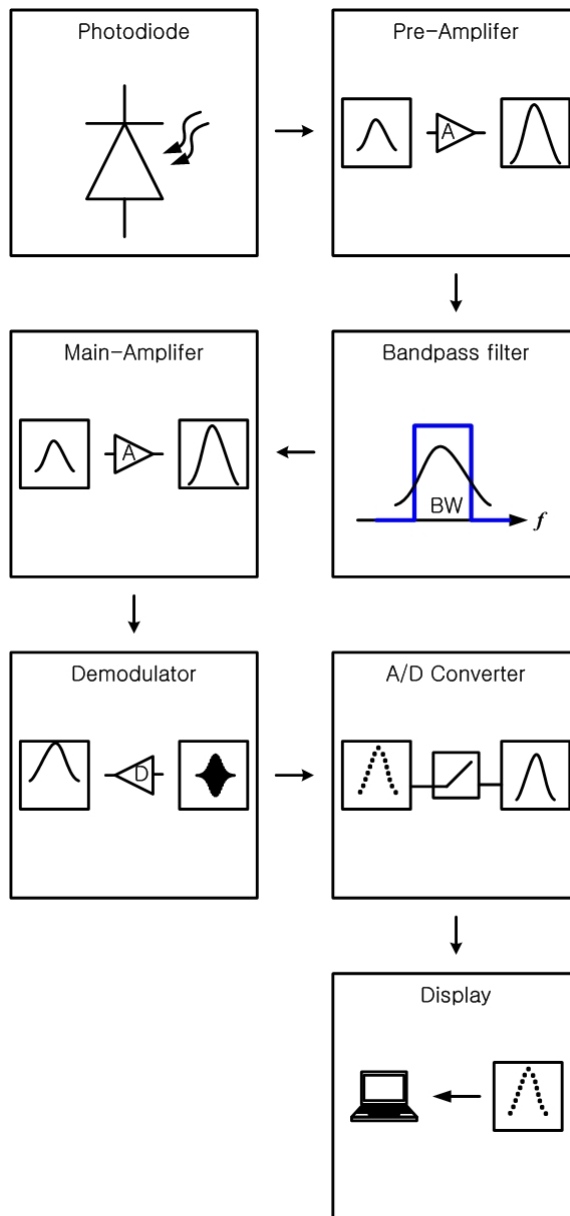


Fig. 2-15. Sequence of electric signal processing with OCT system.

제 3 장 실험 및 측정

제 1 절 시료

본 논문에서는 산업 및 과학기술 분야 중 레이저 정밀 마킹과 의료 분야의 세포 조직의 가열을 동시에 만족시킬 수 있는 비동질의 플라스틱으로 세라믹이나 유리 및 금속에 비해 균열 발생이 적을 뿐만 아니라 내구성이 강하며 데이터 저장 매체로서 대두되고 있는 유기 플라스틱의 한 종류인 ABS(Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) 플라스틱을 시료로 사용하였다. 이는 그림 3-1과 같은 분자 구조를 가진 평판 (LG AF-302)으로 가로, 세로, 높이를 그림 3-2와 같이 각각 600×650×3 mm로 원판을 사출 성형하여 가장자리에서 약 10 mm가량 이격 시킨 후 홈을 형성하였다. 실험에 사용된 ABS 플라스틱은 표 2와 같은 물리적 성질을 가지고 있다.

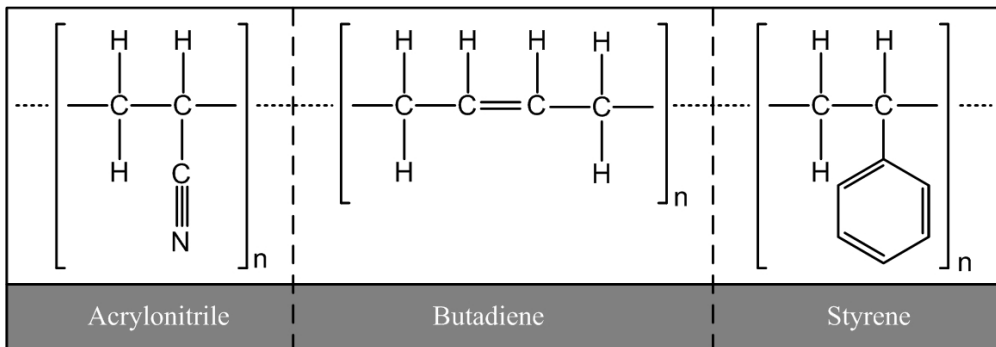


Fig. 3-1. Molecular model of ABS polymer used for experiment.

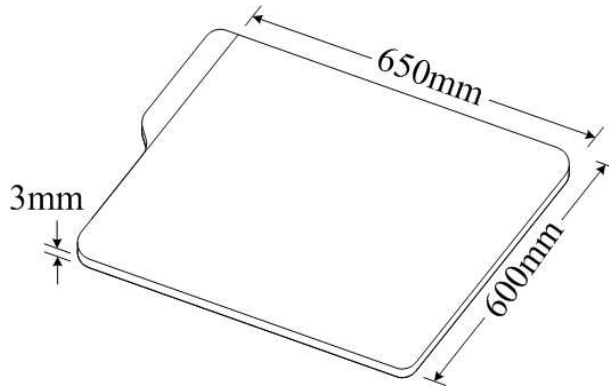


Fig. 3-2. Dimension of marking sample.

Table 2. Physical properties of ABS plastic.

Classification	Value
Density [g/cm ³]	1.05
Linear mold shrinkage [cm/cm]	0.0064
Melt flow [g/10 min]	9.3
Hardness	110
Tensile modules [GPa]	2.4
Specific heat [J/g-K]	2.0
Thermal conductivity [W/m-K]	0.15
Thermal diffusivity [10 ⁻³ cm ² /s]	1.4
Vicat softening point [°C]	100
Glass temperature [°C]	110
Processing temperature [°C]	240
Surface tension [dyne/cm]	30
Viscosity [poise]	10

제 2 절 레이저 마킹 시스템

본 논문의 목적은 1064 nm 또는 532 nm의 레이저 빔을 ABS 플라스틱 시료에 조사해 흠을 형성하고 이 과정에서 발생되는 열전달 분포를 해석하면서 동시에 나노초 단위의 실시간 시간 분해 반사율을 측정해 흠 형성의 주된 기작을 살펴는 것이다. 그림 3-3은 전술(前述)된 내용을 시행하고자 하는 실험의 개략도이다.

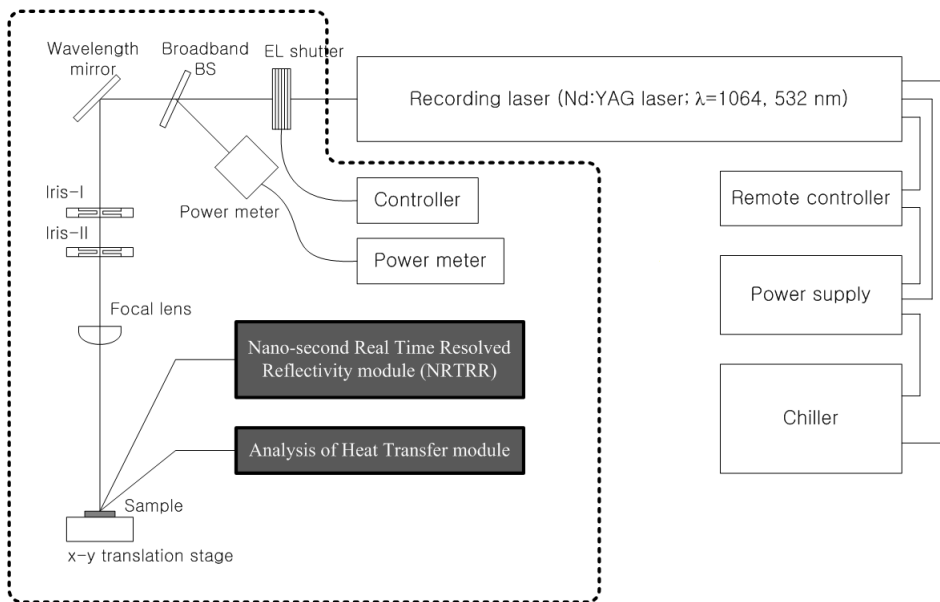


Fig. 3-3. Schematic of pit formation system.

그림 3-3에 의한 실험은 Nd:YAG 레이저를 이용한 시료의 흠 형성 모듈과 시료의 흠 형성 영역에서의 유한 요소법에 의한 수치 해석적 열전달 분포 분석 모듈 및 He-Ne 레이저를 이용한 나노초 실시간 분해 반사도 측정 모듈로 나누어 실행하였다. 흠 형성 모듈은 기록 레이저(Nd:YAG laser; $\lambda=1064, 532$ nm, LabLight, Canada) 시스템, 전기적 빔 셔터(Electric beam shutter; SH05, Thorlab, USA), 에너지 측정기(Pulsed energy pyroelectric and photodiode detector, OPHIR, ISRAEL) 및 광전달 매체로 구성하였다. 기록 레이저 시스템은 TEM₀₀ 모드의 가우시안 빔 특성을 가지고 있는 펄스 레이저로 펄스 반복율은 1, 5, 10, 20 Hz 및 EXT로 조절가능하며 반치폭에서의 빔 반경은 약 3.5 mm, 펄스폭은 약 8 ns이며 표 3과 그림 3-4 및 그림 3-5와 같은 레이저 빔 전달 시스템으로 구성하였다.

Table 3. The characteristic of recording laser system.

Classification		Value
Wavelength [nm]	Fundamental	1064
	2 nd harmonic	532
	3 rd harmonic	355
Operation mode		Pulse
Output power [mW]	Fundamental	402mJ@max
	2 nd harmonic	340mJ@max
	3 rd harmonic	62mJ@max
M ²		< 2
Transverse mode		TEM ₀₀ mode
Beam diameter [mm at 1/e ²]		7.0
Beam divergence [mrad at 1/e ²]		< 1@1064 nm
Noise [rms]	Fundamental	< 3%
	2 nd harmonic	< 4%
	3 rd harmonic	< 5%
Repetition rate [Hz]		1, 5, 10, 20, EXT
Pulse width [ns]		< 10@1064 nm

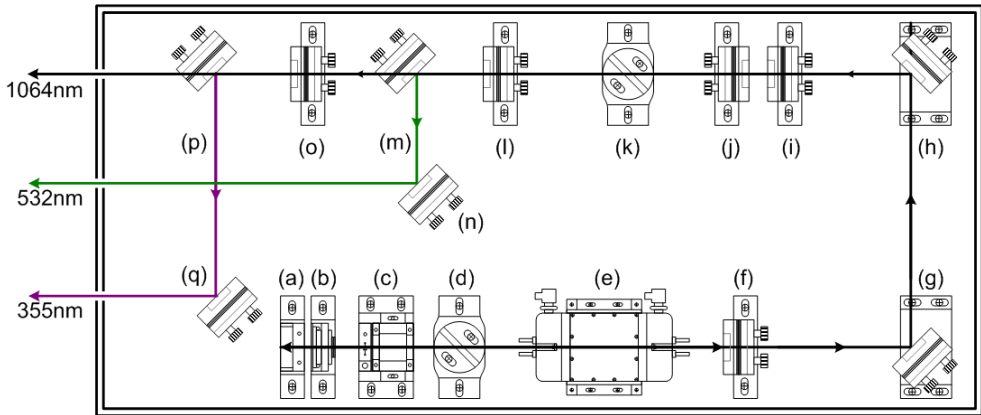


Fig. 3-4. Configuration of recording laser system; (a) rear mirror, (b) 1/4 wave plate, (c) Pockel cell, (d) dielectric polarizer, (e) pumping chamber, (f) output coupler mirror, (g-h) 1064 nm reflector mirror, (i-j) beam expander, (k) dielectric polarizer, (l) SKTP, (m-n) 532 nm reflector mirror, (o) BBO, (p-q) 355 nm reflector mirror.

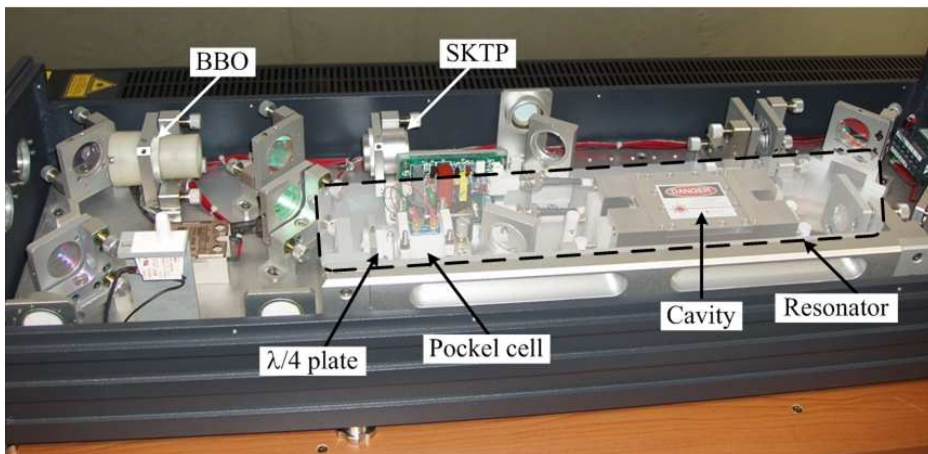


Fig. 3-5. Picture of recording laser(Nd:YAG laser) system.

그림 3-4 (a)부터 (f)까지의 광학 부품은 1064 nm의 펄스 레이저 빔을 발진시키기 위한 공진기 구조로 Pockel cell(c)은 레이저 공진기의 Q-switching으로 사용되며 한 쌍의 편광기와 더불어 낮은 정전 용량에 기인해 매우 빠른 스위칭 시간 (switching time)을 갖는다. 1064 nm의 레이저 빔은 SKTP(Super Potassium Titanium Oxide Phosphate)로 인해 파장이 절반으로 줄어 제 2 차 고조파(2nd harmonic)의 532 nm의 파장을 발진시킨다. SKTP는 KTP의 기능을 강화한 것으로 1064 nm 파장의 진동수를 배가(frequency doubling)시켜 532 nm 파장을 만들어 낸다. KTP는 열에 강한 특성을 가지고 있어 적외선 영역의 1064 nm 파장을 제 2 차 고조파 파장의 532 nm 파장으로 변환시키기에 유용하다. 반면 BBO (Beta Barium Borate; $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$) 결정은 각 파장에 대한 주파수를 배가 시키는 물질로 1064 nm는 532 nm로, 532 nm는 355 nm로 파장으로 변환시킨다. 그러나 KTP나 SKTP와는 다르게 열 손실 가변 폭이 매우 좁기 때문에 Nd:YAG 레이저의 기본 파장에 대한 진동수 배가는 열에 강한 KTP나 SKTP로 시켜 제2차 고조파를 발진시키고 제 3 차 고조파(3rd harmonic) 파장을 BBO로 발진시킨다. 이와 같이 기록 레이저는 1064 nm의 기본 파장을 KTP 또는 SKTP와 BBO를 사용해 각각 532 nm, 355nm와 같은 3종류의 파장을 발진시키지만 그 빔을 배출시키는 방법에 있어서는 약간의 차이를 보이고 있다. 우선 기본 파장인 1064 nm의 파장을 배출시키기 위해서는 그림 3-4와 같은 시스템 내의 빔 경로에서 주파수를 배가시키는 광학 부품인 SKTP(1)와 BBO(o)를 제거하고, 532 nm 반사 거울(m, n)과 355 nm 반사 거울(p, q)을 제거해야 한다. 제 2 차 고조파 파장인 532 nm의 파장을 배출시키기 위해서는 그림 3-4와 같은 시스템에서 532 nm 파장의 주파수를 배가시키는 BBO(o)를 제거한 후 355 nm 반사 거울인 (p)와 (q)를 제거해야 한다. 마지막으로 제 3 차 고조파 파장인 355 nm의 파장을 배출시키기 위해서는 그림 3-4와 같은 시스템에서 제 2 차 고조파 파장의 532 nm 반사 거울인 (m)과 (n)만을 제거해야 한다. 여기에서 기본 파장인 1064 nm만이 열선으로 취급할 수 있기 때문에 열전달 해석에 사용된 레이저의 파장은 1064 nm이며 나노초 시간 분해 반사율 측정에는 1064 nm와 532 nm의 파장을 사용하였다.

ABS 플라스틱에 흠을 형성시키기 위한 기록 레이저는 펄스 형태이기 때문에 펄스 수에 따라 흠의 형태가 달라진다. 따라서 펄스 수를 제어할 필요가 있으며 이는 전기적 빔 셔터(Electric beam shutter; SH05, Thorlab, USA)에 의해 행해졌다. 그림 3-6은 전기적 빔 셔터의 반응속도를 보이고 있다. 시간 간격 50 ms, 셔터 열림 시간 50 ms에 의한 응답속도로 셔터 시간 간격 7 ms, 셔터 열림 시간에서 약 +7 ms의 시간 지연이 있지만 흠 형성에 사용된 기록 레이저의 최대 펄스 반복율이 20 Hz로 50 ms의 최소 시간 간격을 갖기 때문에 펄스 수를 제어하기에는 충분하였다.

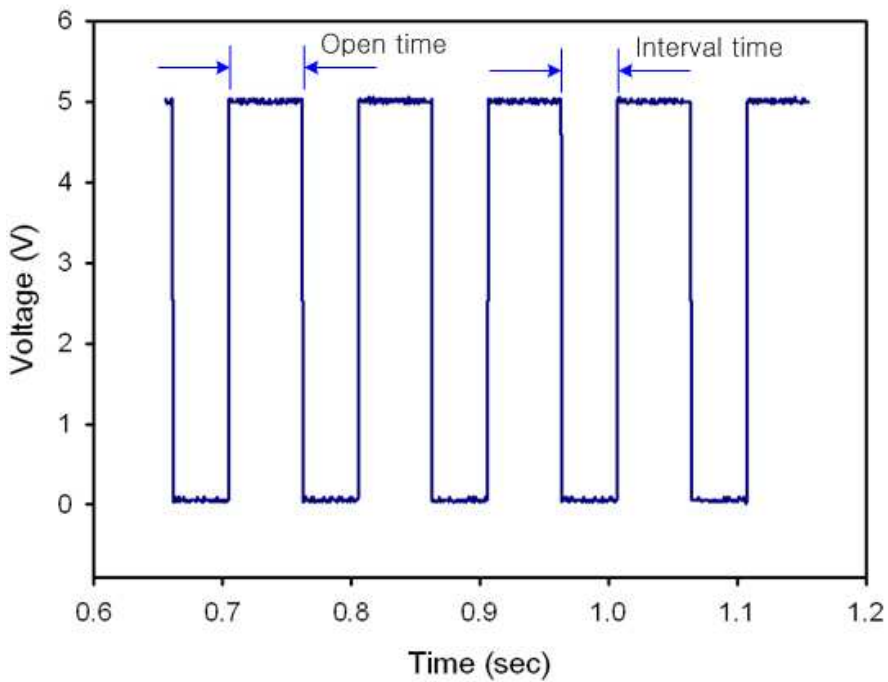


Fig. 3-6. Response time of electric beam shutter.

흡 형성시 조사된 기록레이저의 에너지를 측정하기 위해 빔의 출사구에 반사빔 대 투과빔의 비율이 0.5:9.5인 빔 분할기를 두고 그림 3-7과 같이 빔 분할기의 고정 중심축과 빔 축이 45° 각도를 유지하게 한 후 에너지 측정기(Pulsed energy pyroelectric and photodiode detector, OPHIR, ISRAEL)를 빔 분할기에서 반사된 빔이 수직으로 조사되도록 위치시켜 반사된 빔을 에너지 측정기로 측정한 후 조사 에너지로 환산하였다. 환산된 기록 레이저의 조사 에너지 범위는 1064 nm와 532 nm 모두 160 mJ/pulse부터 330 mJ/pulse까지이다. 기록 레이저의 에너지 범위를 이와 같이 결정한 이유는 레이저 빔을 발진시킬 수 있는 매질에 외부의 전원 공급 장치에 의해 특정 전압을 인가하게 되는데 그림 3-8과 같이 인가된 전압이 800 V~1100 V, 즉 40 mJ/pulse부터 340 mJ/pulse 사이에서 출력 에너지가 증가하는 형태를 보이고 있으며 그 이상에서는 인가된 전압과 무관하게 출력 에너지가 거의 일정해진다. 그러나 그림 3-9와 같이 레이저 출력 에너지가 190 mJ/pulse부터 320 mJ/pulse까지의 범위에서 펄스폭이 약 8 ns으로 그 변화가 오차 범위 내에 존재하기 때문에 기록 레이저의 조사 에너지 범위를 결정하였다.

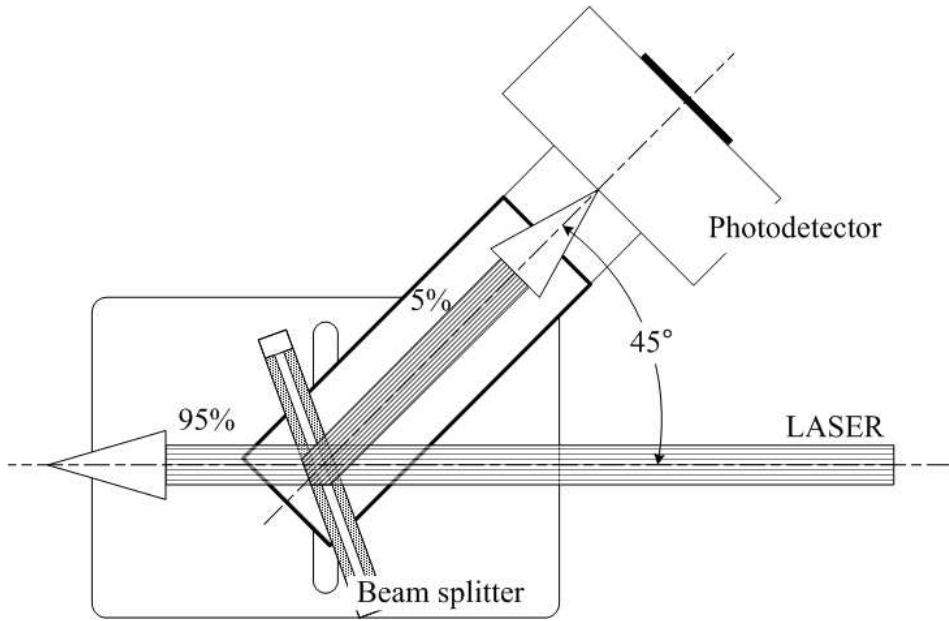


Fig. 3-7. Set-up of beam splitter and energy meter.

본 논문의 실험은 ABS 플라스틱에 홈을 형성하면서 다른 두 가지 모듈의 실험을 동시에 실행하였다. 따라서 모듈에 필요한 장치들을 설치할 수 있는 공간이 필요할 뿐만 아니라 양질의 기록 레이저 빔을 얻어야만 하기 때문에 1064 nm 반사 거울 또는 532 nm 반사 거울을 45°의 각을 유지하는 빔 스티어링(Beam steering) 장치에 부착하여 빔 방향을 바꿨으며 두 개의 아이리쉬(Iris)를 두어 양질의 기록 레이저 빔을 얻을 뿐 아니라 시료에 수직으로 기록 레이저 빔이 조사되도록 그 경로를 보정하였다. 그러나 시스템의 특성상 각 파장의 출사빔 위치가 달라지게 설계되어 있으므로 인해 발생할 수 있는 기록 레이저의 반사 각도의 왜곡을 방지하기 위해 기록 레이저에 의해 시료에 홈을 형성시키기 위한 광학 요소들과 나노초 시간분해 반사율 측정 모듈에 사용되는 광학 요소들을 하나의 소형 광학 테이블 위에 설치한 후 레일 로드(rail road)와 운송자(carrier)를 이용해 이들을 동시에 움직일 수 있게 하였다.

레이저 공진기에서 발진된 반경 3.5 mm의 레이저 빔을 각 과장대에 맞는 반사 거울을 사용하여 빔 경로를 바꾼 후 초점 렌즈를 사용하여 초점 반경 200 μm 로 초점화시켜 ABS 플라스틱 표면에 홈을 형성시켰다. 각 과장대별 반사거울을 포함한 광학 부품은 표 4와 같다.

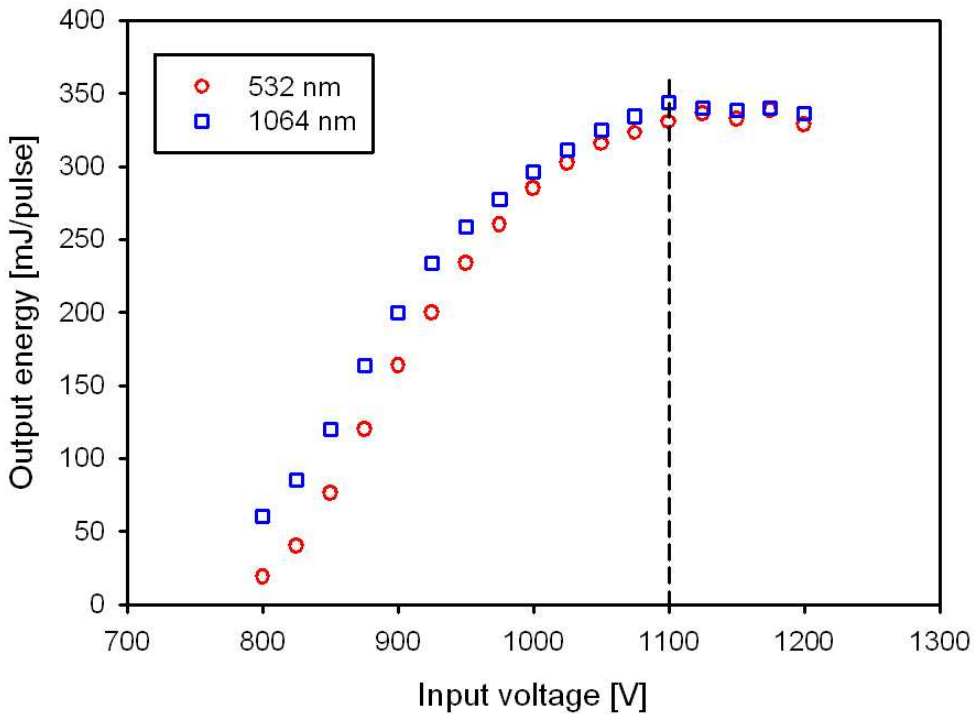


Fig. 3-8. Output energy of recording laser for input voltage.

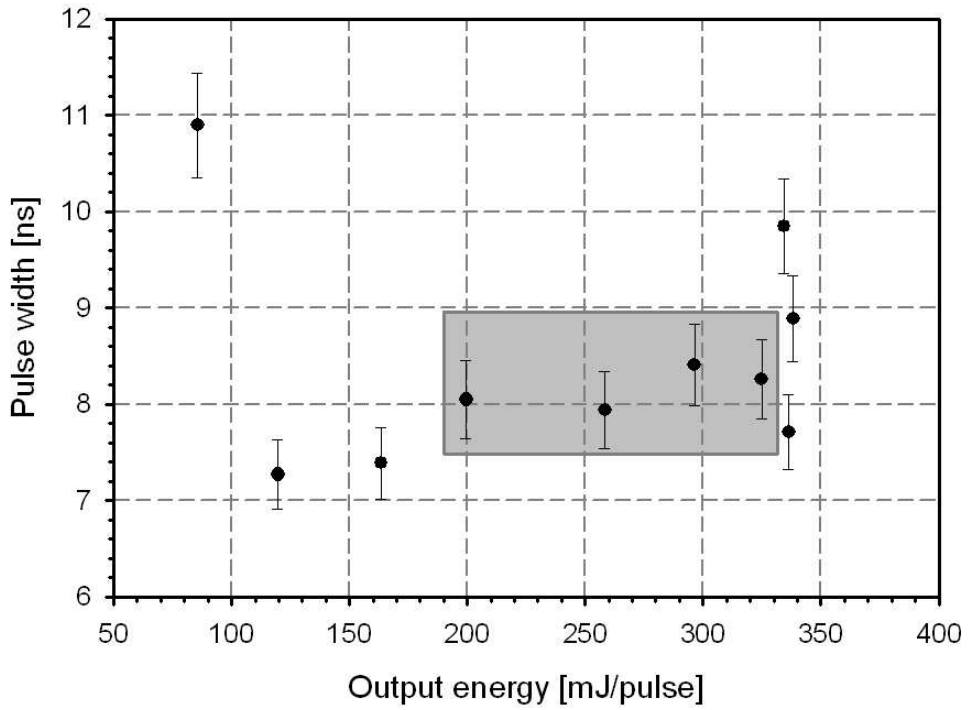


Fig. 3-9. Pulse width of recording laser for output energy.

Table 4. Specification of optical components for nanosecond time resolved reflectivity.

Classification	Wavelength [nm]	Optic name	Specification
Recording laser	1064, 532, 355	Reflector mirror	Dielectric mirror
		Focal lens	BK7 Plano convex lens, F=100.0 mm
		Beam splitter	Plate type, 0.5R/9.5T
Probe laser	632.8	Reflector mirror	Metal mirror
		Analyzer	Glan-Thomson polarizing prism
		Focal lens	BK7 Plano convex lens, F=50.0 mm
		Bandpass filter	632.8 nm line filter
		Photodetector	Si pin detector, rising time 1ns

제 3 절 마킹 측정 시스템

기록 레이저에 의해 형성된 흠은 큰 연성값을 가지는 시료의 특성에 의해 단면 절개시 흠의 일그러짐을 유도하므로 단면의 측정이 어렵다. 이는 비단 폴리머에 국한되지만은 않기 때문에 단면 절개 방법을 사용할 경우 비록 미세한 양이라 할지

라도 시료의 일부가 소실될 수 있기 때문이다[54]. 따라서 본 실험에서는 단면 절개에 의한 방법인 주사 전자 현미경(SEM; Scanning Electron Microscopy)과 투과 전자 현미경(TEM; Transmission Electron Microscopy)등과 같은 방법에 의한 측정은 기피하였다. 또한 본 실험에서 형성된 흠의 직경이 최대 수백 μm 에 이르기 때문에 원자 크기의 대상체를 측정할 수 있는 원자 현미경(AFM; Atomic Force Microscopy)의 사용도 배제하였다. 따라서 레이저 조사에 의해 형성된 흠과 흠의 가장자리에 동반되는 열 영향층의 반경 측정은 비절개적인 방법으로 표면 측정과 단면 측정을 병행하였다. 흠의 표면 측정은 20배의 광학 실체 현미경(동원정밀, OSM-1, Korea)을 사용하였으며 단면 측정은 광결맞음 단층 촬영(OCT; Optical Coherence Tomography) 시스템을 사용하였다. 표 5와 그림 3-10 및 그림 3-11은 본 실험에 사용된 OCT 시스템으로 광원(Thorlabs, USA)의 중심파장이 1325 nm이고 약 110 nm의 반치폭을 가지며 파장 가변을 16 kHz, 평균 출력 12 mW, 80:1 이상의 선편광 특성을 가지고 있다. 또한 이미지 스캔 속도는 초당 25 프레임을 촬영할 수 있으며 프레임 당 512번의 A-스캔을 한다. 이때의 이미지 크기는 1024×512 픽셀이고 한 프레임의 크기는 3 mm×3 mm이다. 그림 3-11에서와 같이 광원에서 발진된 레이저 빔은 광섬유 커플러에 의해서 마흐-젠더 간섭계(MZI; Mach-Zehnder Interferometer)와 순환기(circulator)로 분리 후 입사시켰다. MZI 모듈에서 주파수 보정에 의해 시간과 주파수와의 관계를 선형적으로 보상해 주며 순환기에 입사시킨 빔은 다른 광섬유 커플러에 의해 기준단과 샘플단으로 분리되어 기준단에서는 기준 거울에 의해 반사되고 샘플단에서는 샘플에 의해 반사되어 다시 광섬유 커플러에 입사되는데 이때는 각각의 빔이 서로 간섭무늬를 일으키게 된다. 이후 balanced detector로 DC 성분을 제거시킨 후 DAQ(Data Acquisition) 보드에 입력하고 MZI 모듈에 의한 클럭(clock) 신호 역시 DAQ 보드에 입력시켜 간섭무늬를 클럭신호에 맞춰 디지털화된 신호를 수집하였다.

Table 5. Specifications of OCT laser source.

Classification	Value
Optical	
Center wavelength	1325 nm
Spectral width (FWHM)	110 nm
Axial scan rate	16 kHz
Coherence length	6 mm
Average output power	10 mW
Image	
Imaging speed (on 512 A-scans per frame)	25 fps
Maximum image size	1024×512 pixels
Transverse resolution	15 μm

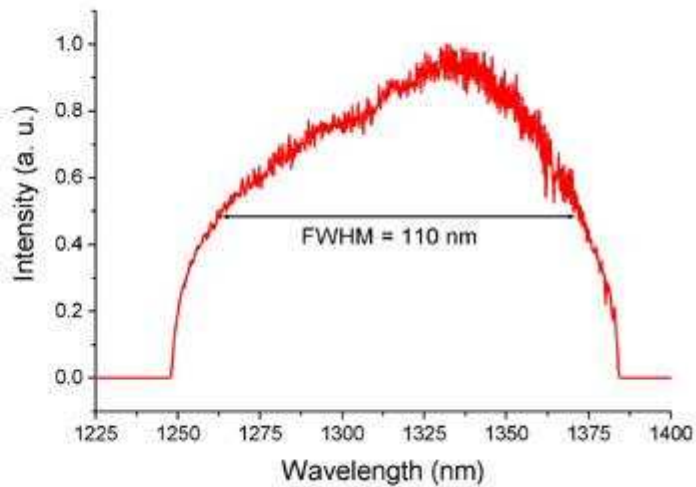


Fig. 3-10. Optical spectrum of the OCT laser source.

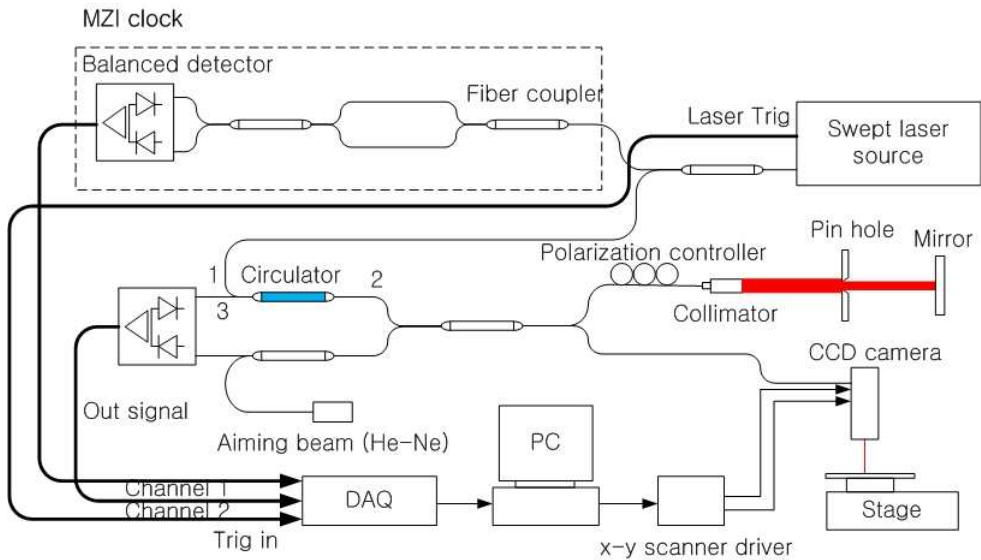


Fig. 3-11. Schematic of swept source OCT system.

제 4 절 레이저 마킹에 의해 형성된 흠 측정

1064 nm 및 532 nm의 Nd:YAG 레이저 시스템을 기록 레이저로 이용한 흠 형성 모듈은 기록 레이저의 에너지 조사 범위를 160 mJ/pulse부터 330 mJ/pulse까지로 제한하였으며 레이저 조사 반복율은 1, 5, 10 및 20 Hz로 제한함과 동시에 총 조사 시간을 조절하여 각 단계별로 총 조사 에너지를 동일하게 하였다. 또한 전기적 빔 셔터를 이용하여 조사 펄스 수를 5, 10, 20, 40 및 60개로 제한하였다. 따라서 총 조사 에너지는 800 mJ부터 19.6 J까지 조사되었다. 이는 동일한 총 조사 에너지에서 조사 반복율과 펄스 수 및 파장을 변화시켜 가며 흠과 외륜의 형상 및 열전달 분포를 보기 위함이다. 조사된 기록 레이저는 펄스당 에너지 조사 간격을 각 파장 별로 4단계로 나누어 조사하였으며 각각의 단계별 에너지 즉, 동일한 펄스당의 에너지 범위에서 펄스 반복율을 4단계로, 다시 동일 펄스 반복율에서 펄스 수에 따라

5단계로 나누어 조사하였다. 따라서 각각의 파장에 대해 80개의 경우의 수로 기록 레이저를 조사하여 흠을 형성하였다. 즉 각 파장에 대해 표 6과 같은 경우의 수로 레이저를 조사하여 흠을 형성하였다.

Table 6. Parameters of irradiated recording laser.

Wavelength (nm)	Average energy per pulse (mJ)	Pulse repetition rate (Hz)	Pulse number
1064	199.88	1, 5, 10, 20	5, 10, 20, 40, 60
	258.50		
	295.93		
	327.09		
532	164.54	1, 5, 10, 20	5, 10, 20, 40, 60
	226.58		
	268.95		
	303.62		

1. 펄스 수에 따른 레이저 마킹

시료에 조사된 레이저의 출력은 각 파장에 따른 단일 펄스의 출력을 조절함과 동시에 펄스 수를 조절하여 총 에너지를 계산하여 조사하였다. 그림 3-12와 그림 3-13은 1064 nm와 532 nm에서 펄스 당 조사 에너지를 변화시켜가며 기록 레이저를 조사한 후 형성된 흠과 열 영향층을 광학 현미경에 의해 측정된 시료 표면의 영상과 OCT 시스템에 의해 측정된 시료 단면의 영상이다. 그림 3-12는 1064 nm 레이저 조사에 의해 형성된 흠으로 (a)는 광학 현미경 측정에 의한 시료의 표면에서 흠

과 열 영향층의 분포이며 (b)는 OCT 시스템을 이용한 비절개적 방법의 홈 단면 측정 영상이다. (1), (2), (3) 및 (4)는 각각 199.88, 258.50, 295.93 및 327.09 mJ의 펄스 당 조사 에너지로 5 펄스를 조사한 것이다. 그림 3-13 역시 그림 3-12의 마킹 및 측정 방법과 동일한 방법으로 마킹한 후 측정되었으나 (1), (2), (3) 및 (4)의 펄스 당의 조사 에너지는 각각 164.54, 226.58, 268.95 및 303.62 mJ이다. 그림 3-14는 1064 nm의 기록 레이저에 의해 형성된 홈의 표면과 열 영향층으로 레이저 조사 펄스 수를 변경시켜 가며 나타낸 것으로 (a), (b), (c), (d) 및 (e)는 각각 5, 10, 20, 40 및 60 펄스의 레이저 조사로 펄스 수를 증가시킨 것이며 (1), (2), (3) 및 (4)는 각각 펄스당의 에너지가 199.88 mJ, 258.50 mJ, 295.93 mJ 및 327.09 mJ 이다. 그림 3-14에서 알 수 있듯이 레이저 펄스 수가 증가할수록, 펄스 당의 조사 에너지가 증가할수록 홈의 반경과 열 영향층의 반경이 증가되었다.

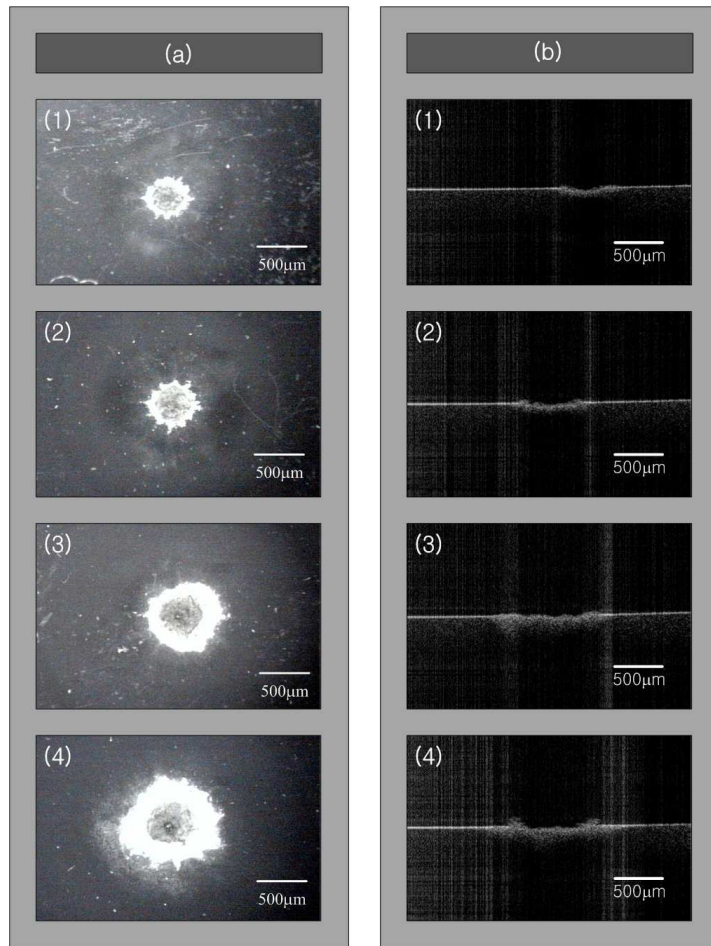


Fig. 3-12. Optical microscopy images of HAZ and OCT images of pit formed after the irradiation of recording laser operating at 1064 nm (5 pulse at the repetition rate of 5 Hz); (a) Optical microscopy images, (b) OCT images, (1) 199.88 mJ/pulse, (2) 258.50 mJ/pulse, (3) 295.93 mJ/pulse, and (4) 327.09 mJ/pulse.

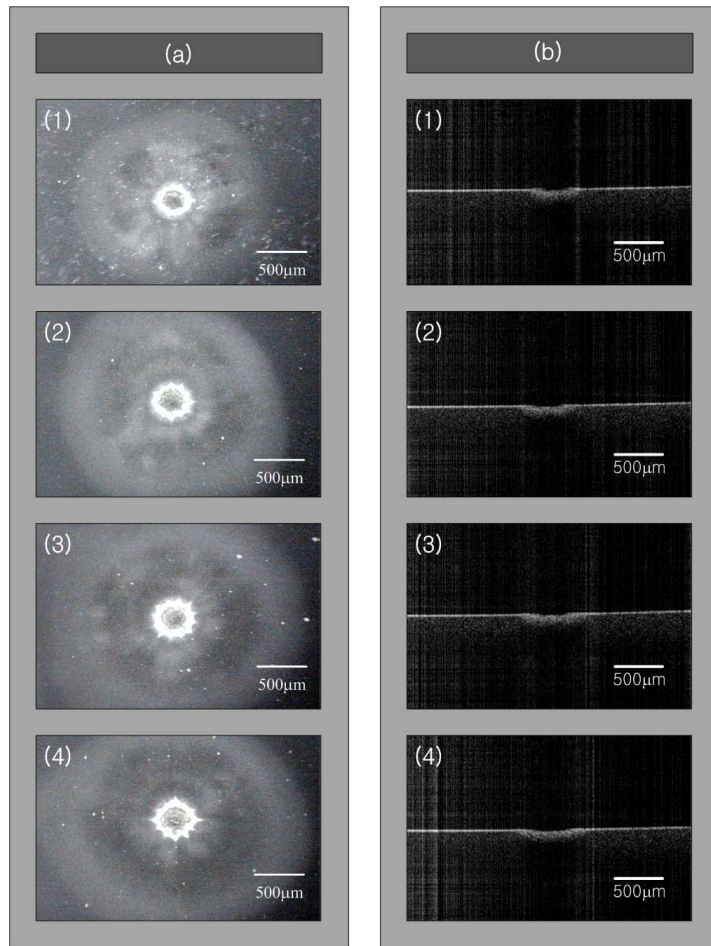


Fig. 3-13. Optical microscopy images of HAZ and OCT images of pit formed after the irradiation of recording laser operating at 532 nm (5 pulse at the repetition rate of 5 Hz); (a) Optical microscopy images, (b) OCT images, (1) 164.54 mJ/pulse, (2) 226.58 mJ/pulse, (3) 268.95 mJ/pulse, and (4) 303.62 mJ/pulse.

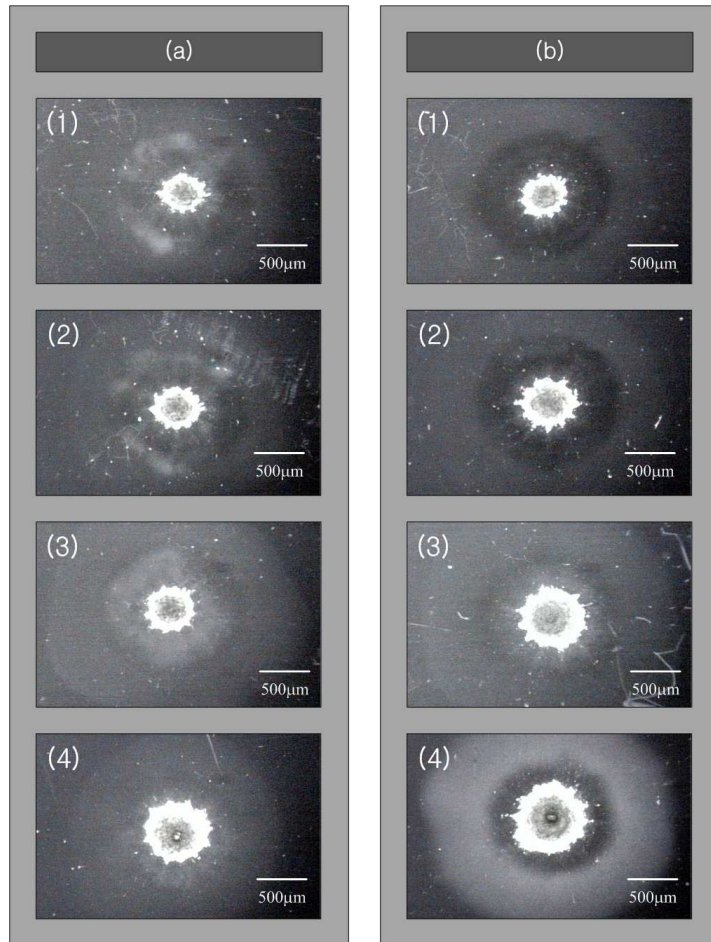


Fig. 3-14. Optical microscopy images of pit and HAZ formed by the irradiation of 1064 nm laser marking with changing pulse number; (a) 5 pulse, (b) 10 pulse, (c) 20 pulse, (d) 40 pulse, (e) 60 pulse, (1) 199.88 mJ/pulse, (2)258.50 mJ/pulse, (3) 295.93 mJ/pulse and (4) 327.09 mJ/pulse.

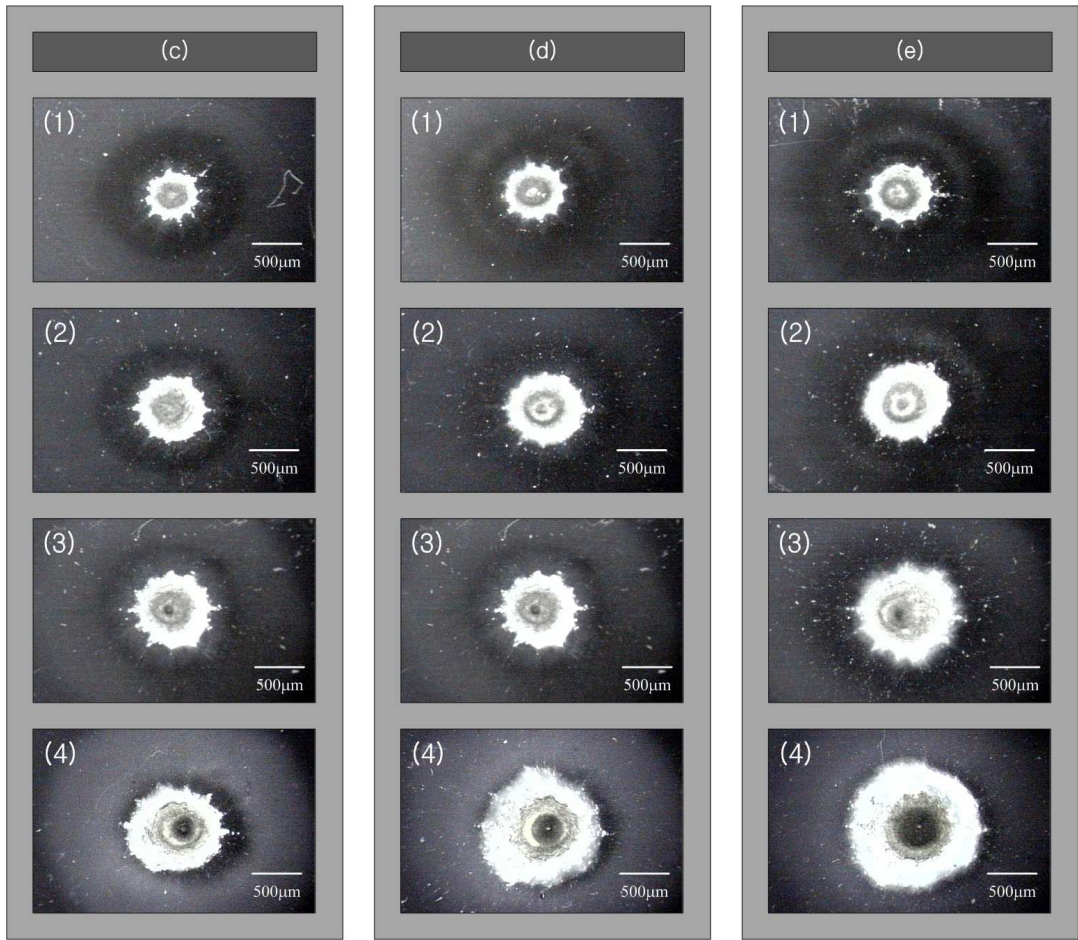


Fig. 3-14. Continuous.

그림 3-15는 532 nm의 기록 레이저에 의해 형성된 흠의 표면과 열 영향층으로 레이저 조사 조건은 그림 3-14와 같다. 단 펄스 당의 조사 에너지는 (1), (2), (3) 및 (4)가 각각 164.54 mJ, 226.58 mJ, 268.95 mJ 및 303.62 mJ 이다. 그림 3-14와 마찬가지로 레이저 펄스 수가 증가할수록, 펄스 당의 조사 에너지가 증가할수록 흠의 반경과 열 영향층의 반경이 증가되는 동일한 결과를 보였다.

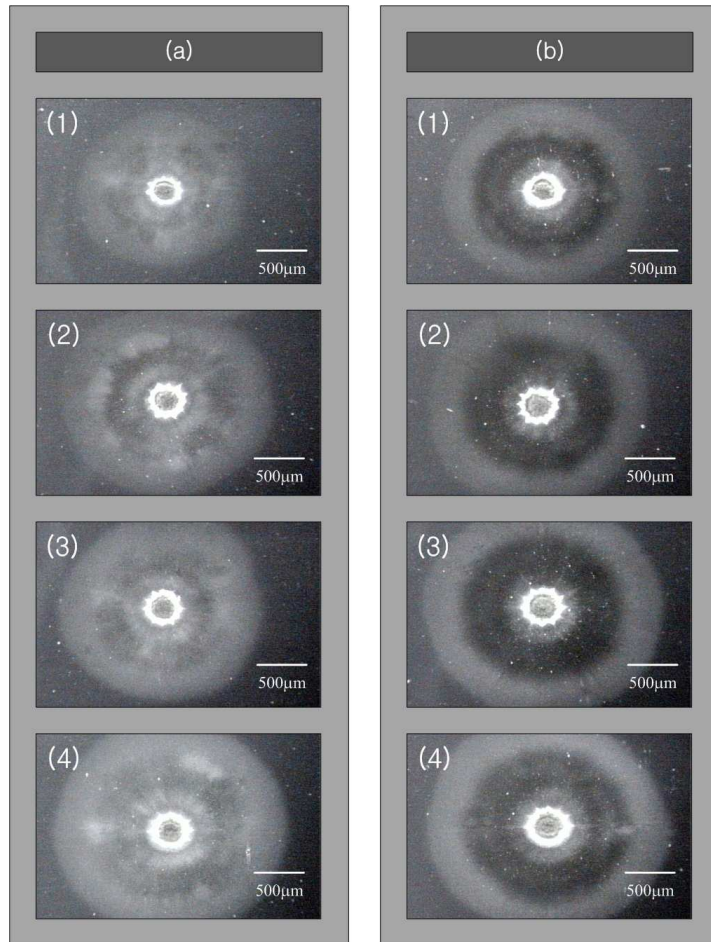


Fig. 3-15. Optical microscopy images of pit and HAZ formed by the irradiation of 532 nm laser marking with changing pulse number; (a) 5 pulse, (b) 10 pulse, (c) 20 pulse, (d) 40 pulse, (e) 60 pulse, (1) 164.54 mJ/pulse, (2) 226.58 mJ/pulse, (3) 268.95 mJ/pulse and (4) 303.62 mJ/pulse.

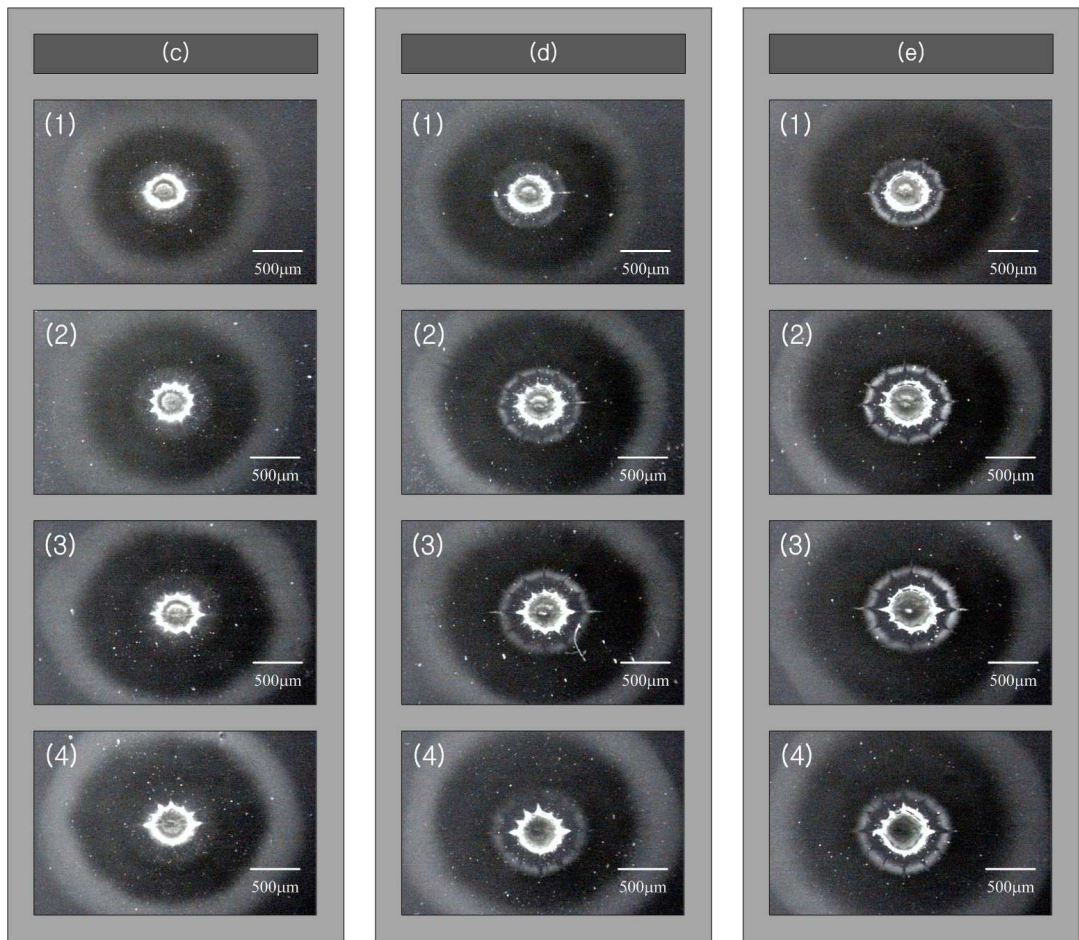


Fig. 3-15. Continuous.

그림 3-14와 그림 3-15가 광학 현미경을 이용한 표면 영상을 나타낸 반면 그림 3-16은 OCT 시스템을 사용해 흠의 단면 영상을 나타낸 것으로 레이저 조사 조건은 그림 3-14와 같으며 각 그림들은 서로 대응된다. 그림 3-16에서 알 수 있듯이 상대적으로 낮은 펄스 수에서는 펄스 당 레이저 조사 에너지가 증가 하더라도 흠의 깊이는 뚜렷한 증가를 보이지 않으며 단지 흠의 형태만 변형되는 것을 볼 수 있다. 그러나 상대적으로 높은 펄스 수에서는 펄스 당 조사 에너지가 증가할수록

홈의 깊이가 증가되는 것을 볼 수 있을 뿐 아니라 홈의 형태도 변형됨을 알 수 있었다.

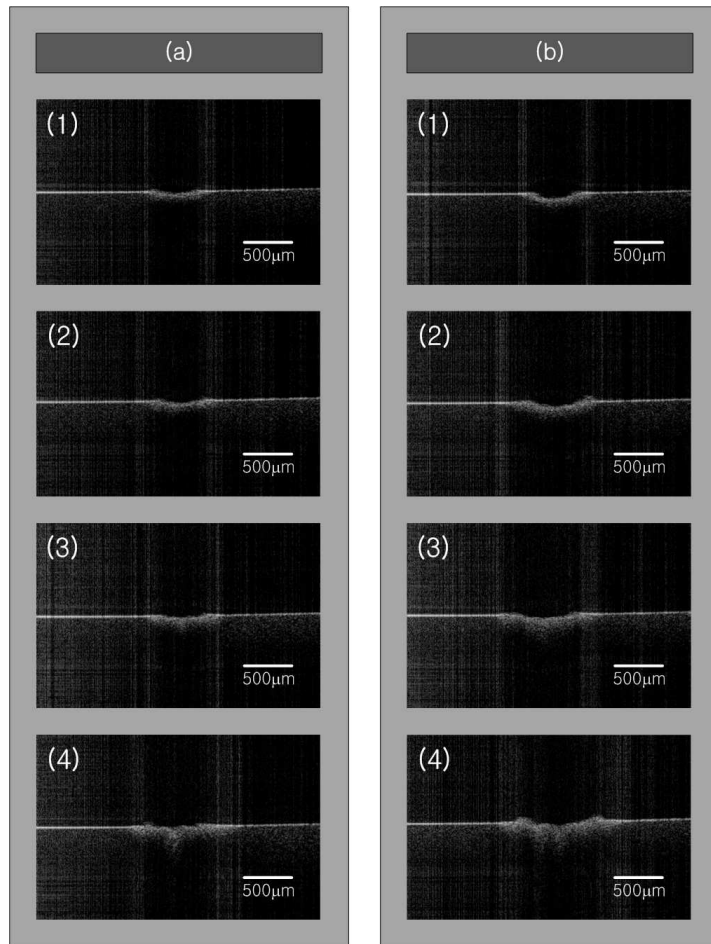


Fig. 3-16. OCT images of pit formed by the irradiation of 1064 nm laser marking with changing pulse number; (a) 5 pulse, (b) 10 pulse, (c) 20 pulse, (d) 40 pulse, (e) 60 pulse, (1) 199.88 mJ/pulse, (2) 258.50 mJ/pulse, (3) 295.93 mJ/pulse and (4) 327.09 mJ/pulse.

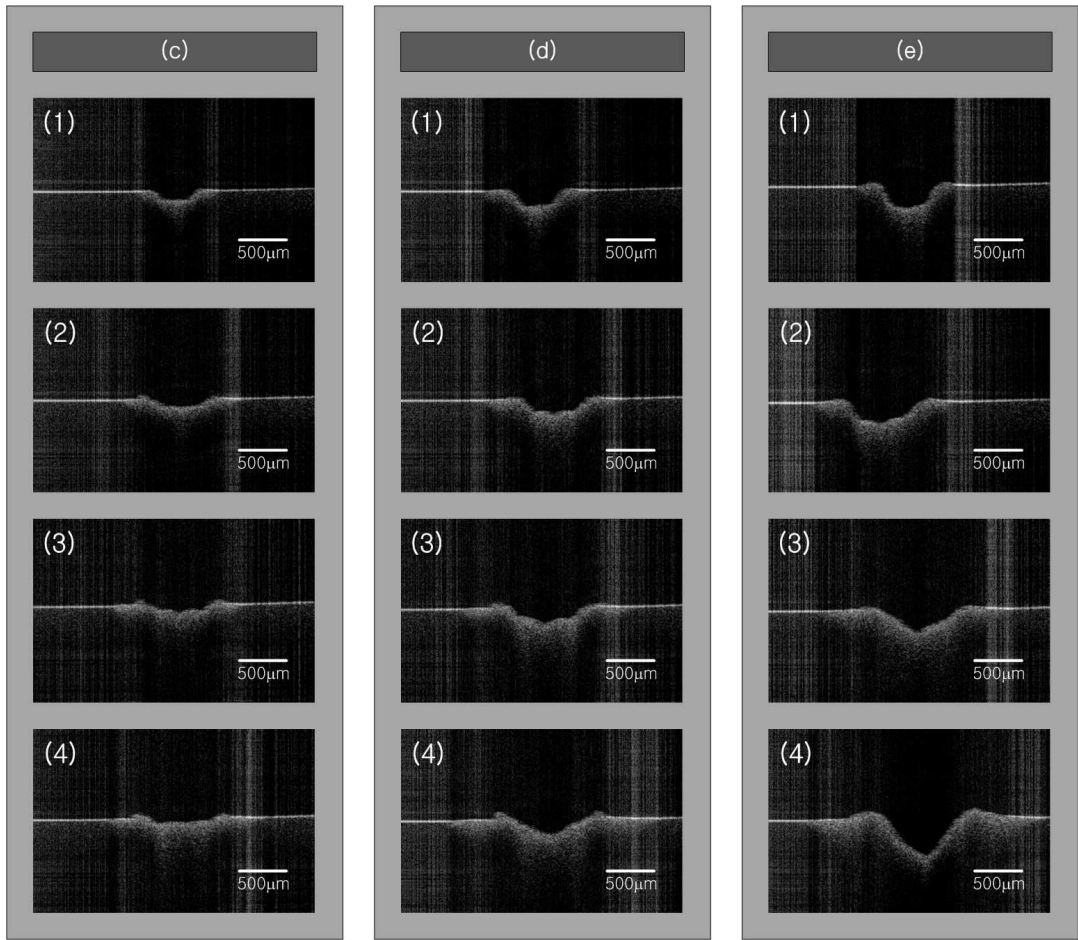


Fig. 3-16. Continuous.

그림 3-17은 그림 3-16과 같이 그림 3-15에 대응되는 홈의 단면 측정 영상이다. 마찬가지로 상대적으로 낮은 펄스 수에서 홈의 깊이가 에너지와 무관하게 나타남을 볼 수 있었고 높은 펄스 수에서는 에너지에 대응되어 홈의 깊이가 달라짐을 볼 수 있었다. 특히 그림 3-16에서는 볼 수 있었던 홈 가장자리의 외륜 형성이 보이지 않았다. 이는 조사 에너지나 펄스 수와는 무관하게 조사 레이저의 파장에 관계됨을 알 수 있다.

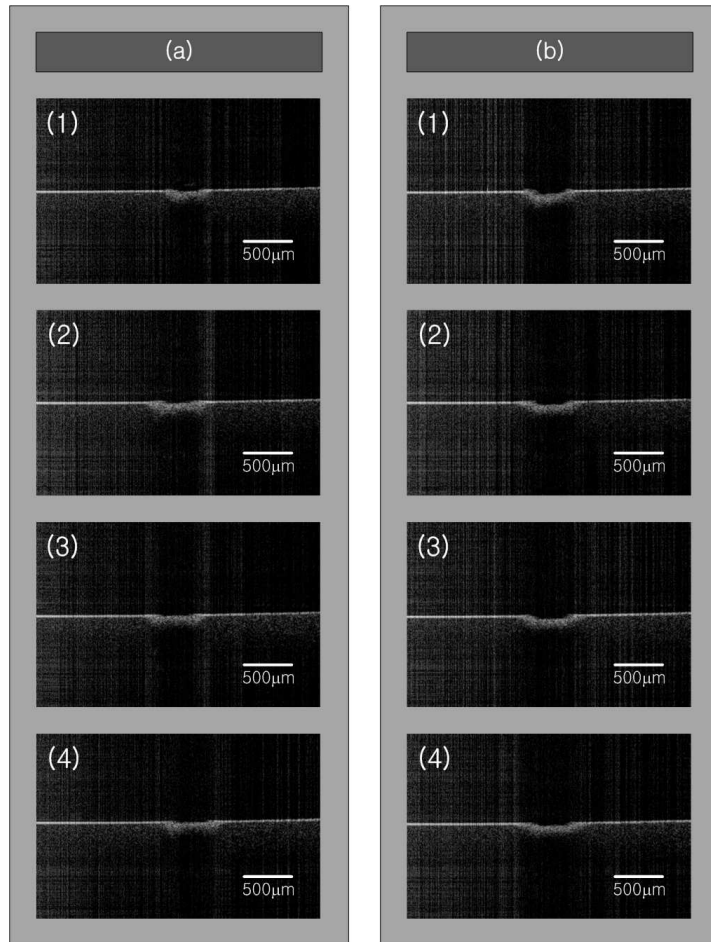


Fig. 3-17. OCT images of pit formed by the irradiation of 532 nm laser marking with changing pulse number; (a) 5 pulse, (b) 10 pulse, (c) 20 pulse, (d) 40 pulse, (e) 60 pulse, (1) 164.54 mJ/pulse, (2) 226.58 mJ/pulse, (3) 268.95 mJ/pulse and (4) 303.62 mJ/pulse.

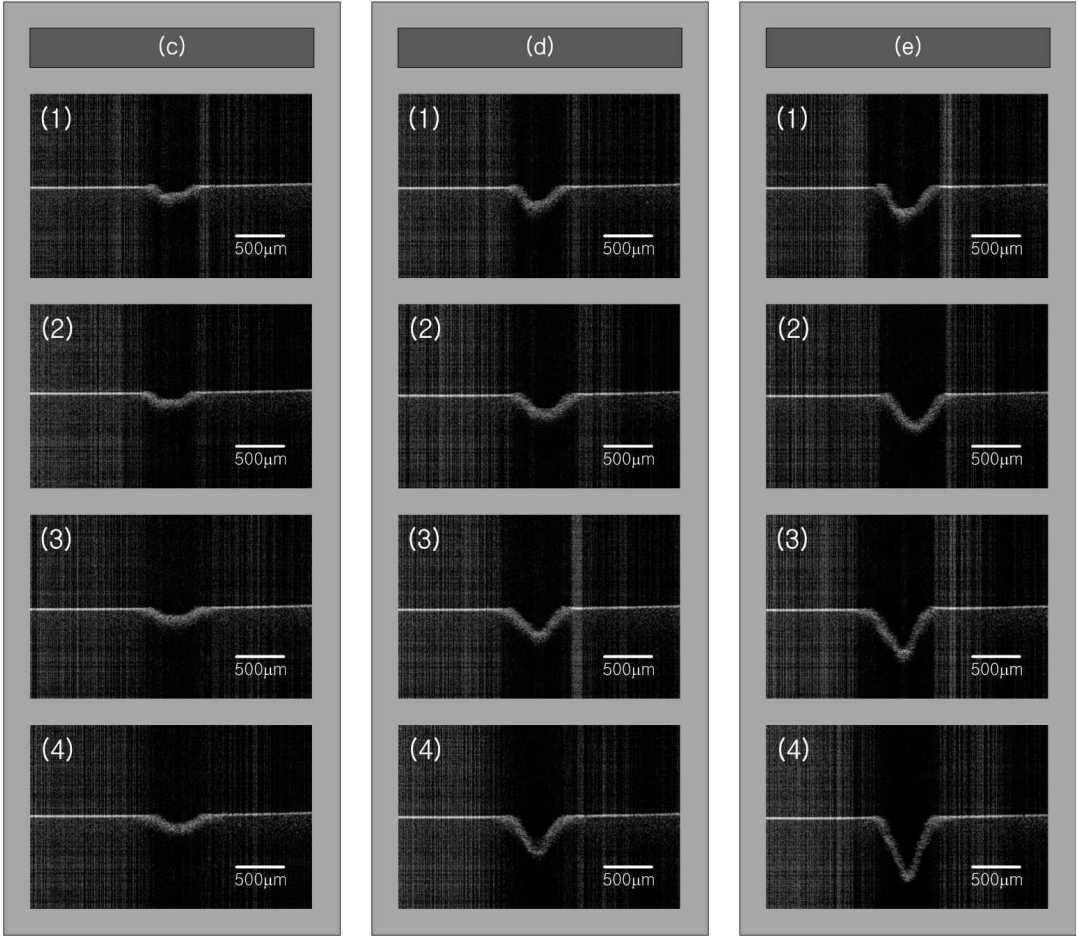


Fig. 3-17. Continuous.

2. 펄스 반복율에 따른 레이저 마킹

제 4-1 절에서는 각 파장에서의 펄스 수를 조절하여 시료에 흠을 형성한 반면 본 절에서는 레이저 조사 펄스 반복율 변화에 따른 흠의 변화를 관찰하기 위하여 펄스 수를 동일하게 하고 펄스 반복율을 조절하여 흠을 형성하였다. 시료에 조사된 기록 레이저의 총 에너지는 동일하게 하면서 조사된 시간 간격을 변화시켜 흠을 형성한 후 흠의 형태와 열 영향층의 분포를 관측하였다. 그림 3-18은 1064 nm 레이저의 40 펄스 조사에 의해 형성된 흠의 표면 분포를 나타낸 것으로 펄스 당 조사 에너지는 (a), (b), (c) 및 (d)가 각각 199.88 mJ, 258.50 mJ, 259.93 mJ 및 327.09 mJ이며 펄스 반복율은 (1), (2), (3) 및 (4)가 각각 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz 및 20 Hz이다. 그림 3-18에서 알 수 있듯이 펄스 반복율이 증가할수록 흠의 가장자리가 선명해지며 열 영향층이 다소 감소하는 것을 보았다. 그림 3-19는 그림 3-18과 동일한 조사 조건하에서 파장만 532 nm으로 변환한 것으로 펄스당의 에너지가 (a), (b), (c) 및 (d)가 각각 164.54 mJ, 226.58 mJ, 268.95 mJ 및 303.62 mJ이며 1064 nm 레이저 조사 때와는 달리 낮은 펄스 반복율에서 보였던 흠 가장자리에서 시료의 갈라짐 현상은 보이지 않았던 반면 펄스 반복율이 높아질수록 열 영향층의 감소 효과는 동일하게 나타났다.

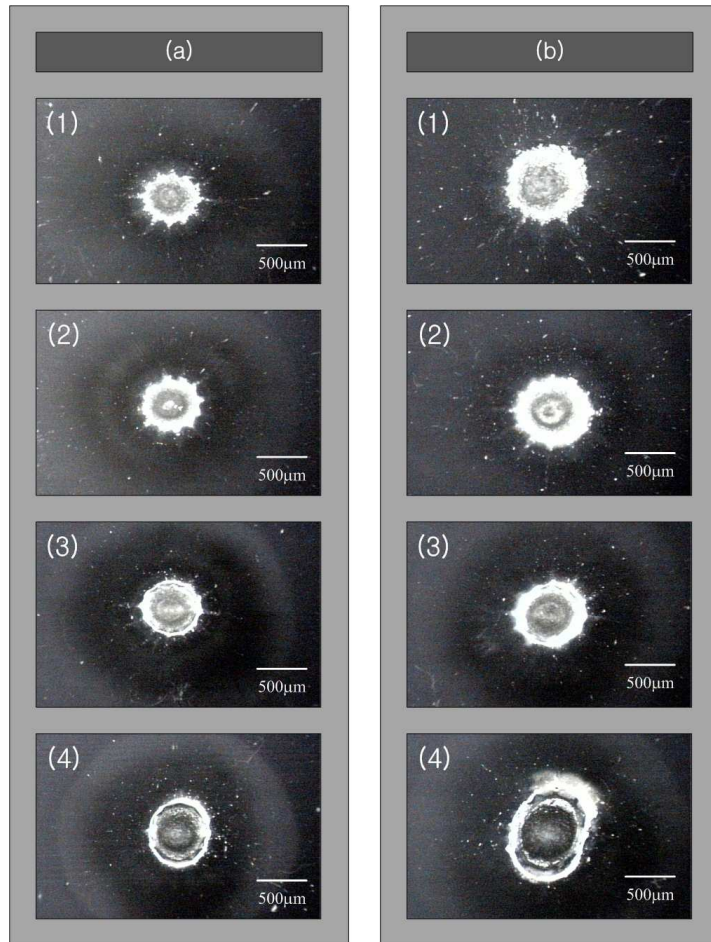


Fig. 3-18. Optical microscopy images of pit and HAZ formed by the irradiation of 1064 nm laser marking at different pulse repetition rates: (a) 199.88 mJ/pulse, (b) 258.50 mJ/pulse, (c) 295.93 mJ/pulse, (d) 327.09 mJ/pulse, (1) 1 Hz, (2) 5 Hz, (3) 10 Hz and (d) 20 Hz.

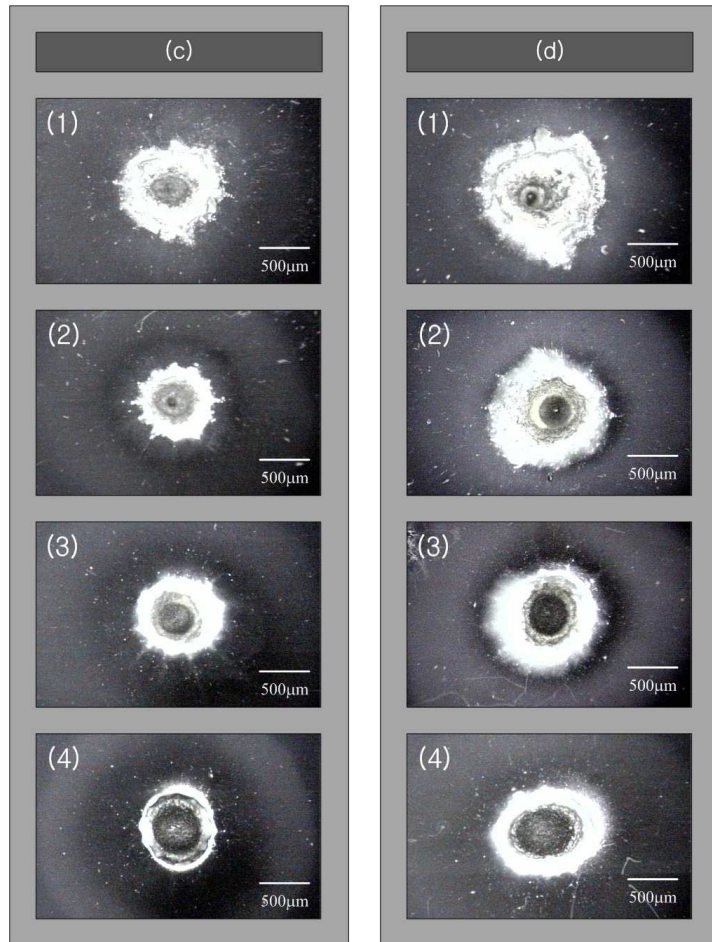


Fig. 3-18. Continuous.

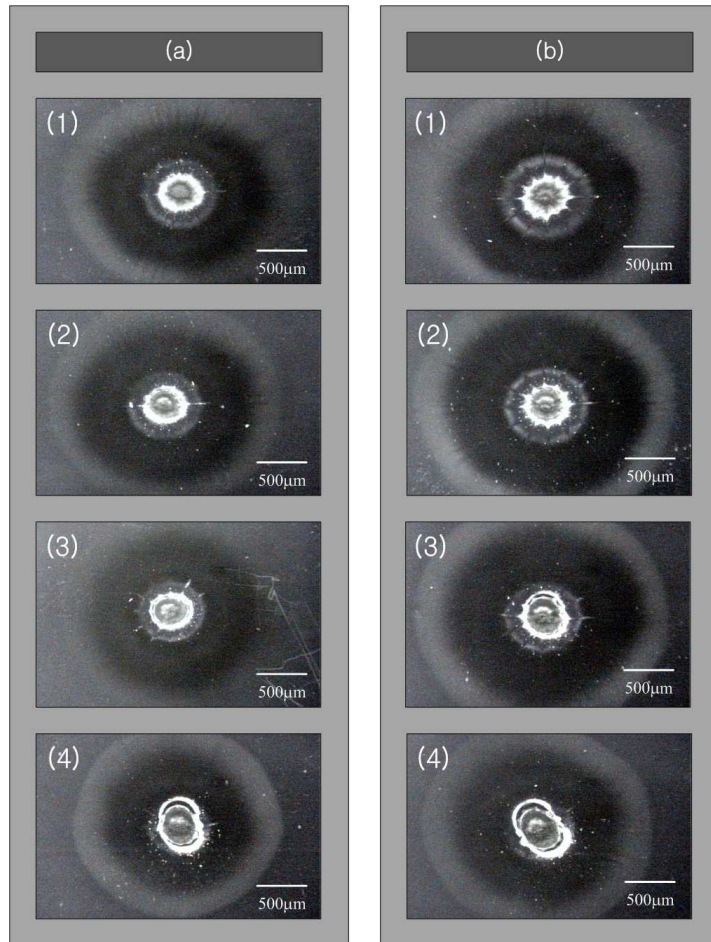


Fig. 3-19. Optical microscopy images of pit and HAZ formed by the irradiation of 532 nm laser marking at different pulse repetition rates; (a) 164.54 mJ/pulse, (b) 226.58 mJ/pulse, (c) 268.95 mJ/pulse, (d) 303.62 mJ/pulse, (1) 1 Hz, (2) 5 Hz, (3) 10 Hz and (d) 20 Hz.

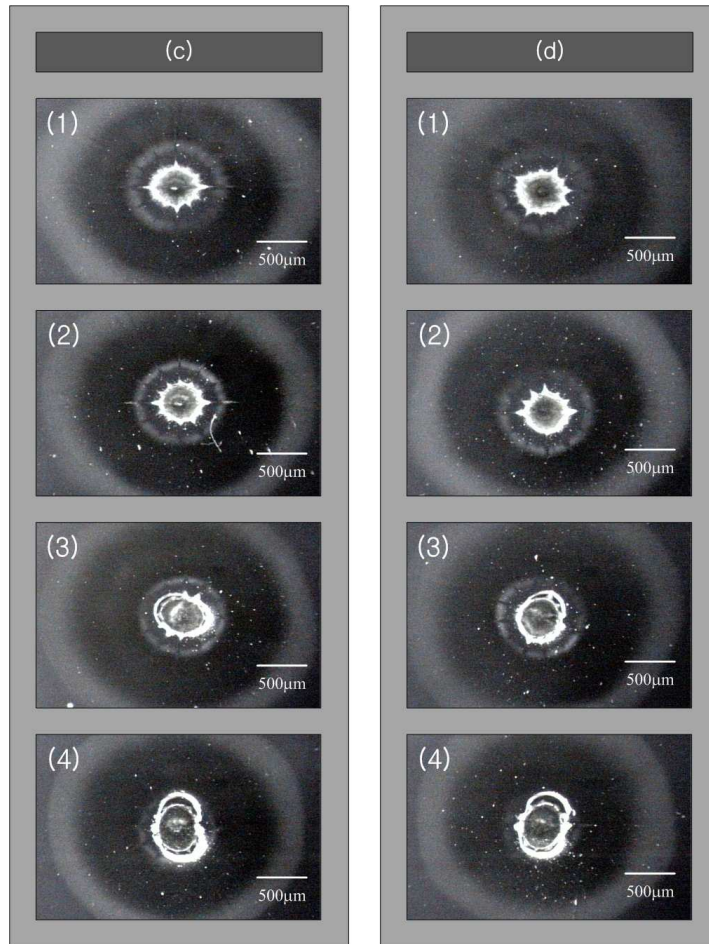


Fig. 3-19. Continuous.

그림 3-20과 그림 3-21은 광학 현미경을 통해 측정된 그림 3-18과 그림 3-19의 홈을 OCT 시스템으로 측정된 단면 영상이다. 그림 3-20은 펄스 반복율을 변화에 따른 1064 nm 레이저에 의해 형성된 홈의 단면 영상으로 펄스 반복율이 증가할수록 홈 가장자리에 외륜의 형성을 보이며 깊이 방향으로 증가하였으며 홈의 형태 또한 불규칙한 형태에서 가우시안의 특정 형태로 변형되고 있었다.

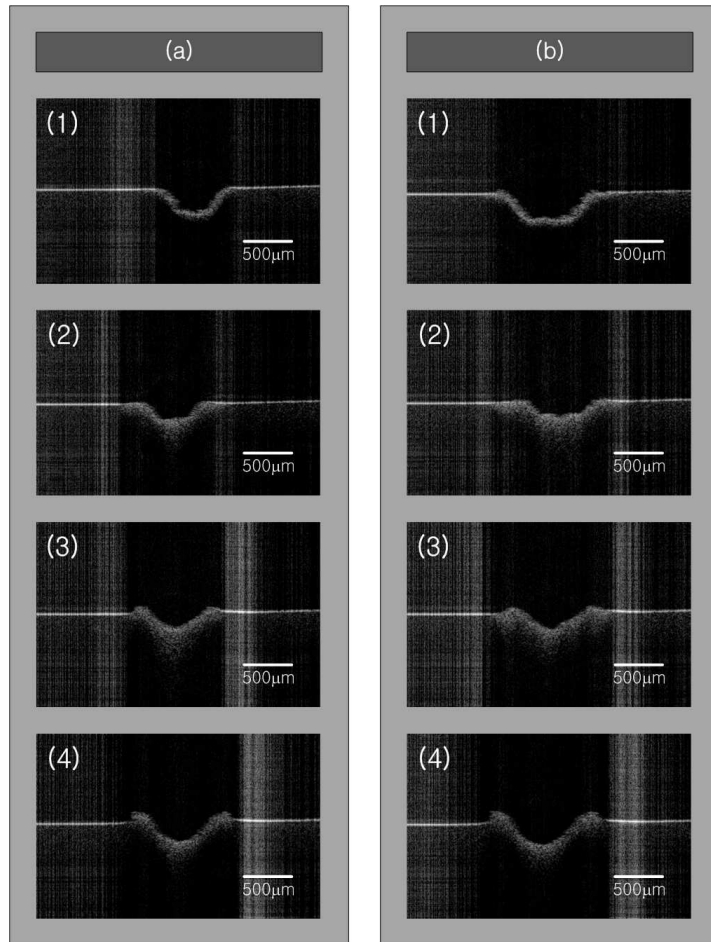


Fig. 3-20. OCT images of pit formed by the irradiation of 1064 nm laser marking at different pulse repetition rates; (a) 199.88 mJ/pulse, (b) 258.50 mJ/pulse, (c) 295.93 mJ/pulse, (d) 327.09 mJ/pulse, (1) 1 Hz, (2) 5 Hz, (3) 10 Hz and (4) 20 Hz.

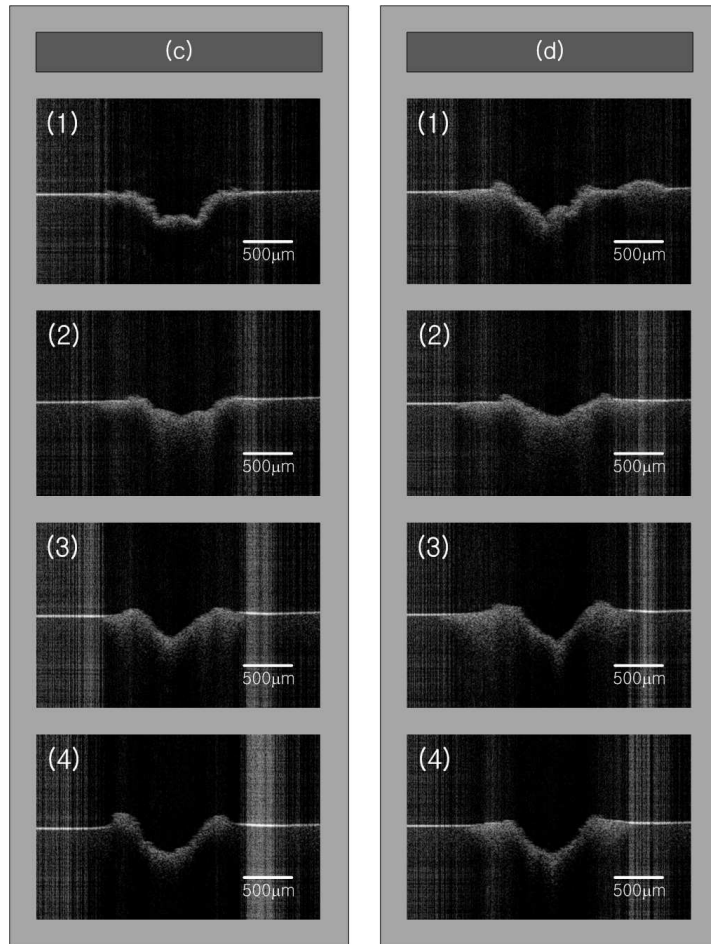


Fig. 3-20. Continuous.

그림 3-21은 그림 3-19와 동일한 조사 조건으로 OCT 시스템에 의한 홈의 단면 측정 결과이다. 1064 nm 레이저 조사와는 다르게 532 nm 레이저 조사의 경우 펄스 반복율이 증가하더라도 외륜의 형성이 보이지 않았으며 깊이도 얕아짐을 볼 수 있었다.

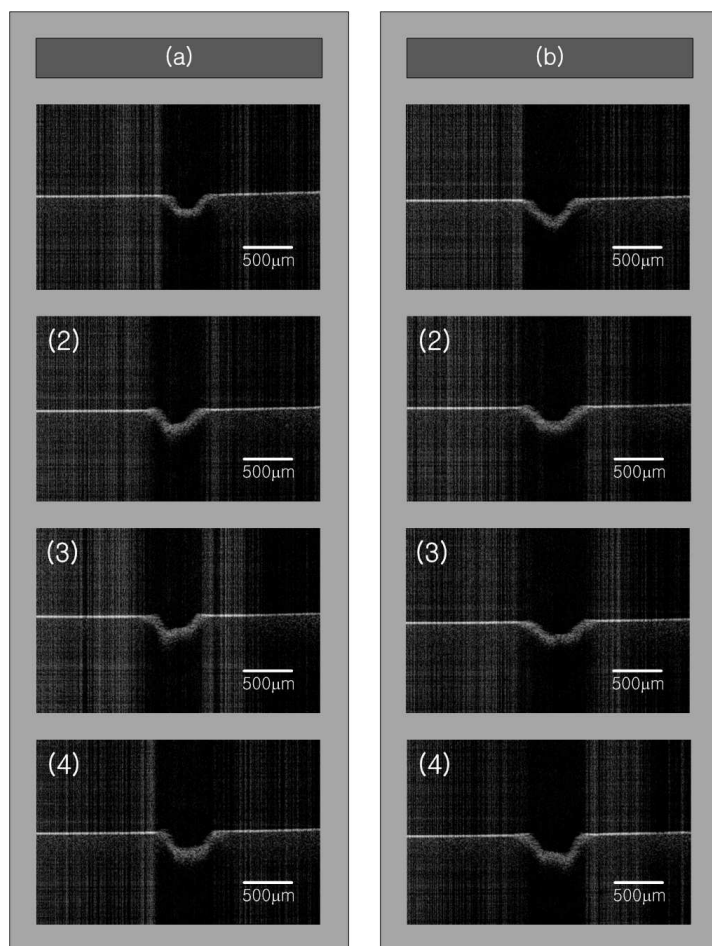


Fig. 3-21. OCT images of pit formed by the irradiation of 532 nm laser marking at different pulse repetition rates; (a) 164.54 mJ/pulse, (b) 226.58 mJ/pulse, (c) 268.95 mJ/pulse, (d) 303.62 mJ/pulse, (1) 1 Hz, (2) 5 Hz, (3) 10 Hz and (4) 20 Hz.

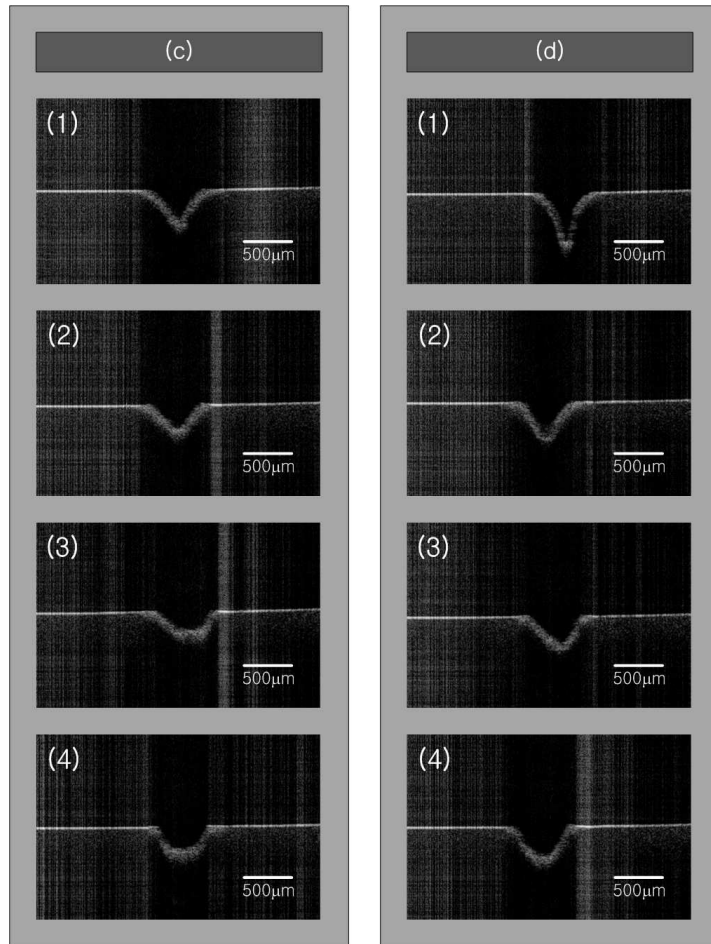


Fig. 3-21. Continuous.

제 5 절 열전달 수치해석

레이저 마킹 모듈에 의해 형성된 홈은 가장자리에 열 영향층을 동반하였다. 특히 상대적으로 파장이 긴 적외선 영역의 1064 nm 레이저에 의해 형성된 홈의 가장자리에 분포되는 열 영향층은 홈의 수십 배에 이르는 단면적 분포를 보였다. 이러한 분포는 일반적으로 조사된 레이저 광의 흡수에 기인하게 되고 열전달 미분 방

정식에 의해 수치해석 한다. 본 논문에서는 레이저 조사에 동반되는 열전달 및 분포의 해석을 열전달 수치해석 프로그램인 COMSOL Multiphysics(COMSOL, v3.2, Sweden)로 PDE 기반의 다중 물리 현상을 유한요소법으로 해석하였으며 그림 3-22와 같은 분석과정을 통해 얻은 이미지와 비교하였다. 레이저 마킹에 의한 시료의 영상을 얻기 위해 기록 레이저에 의해 시료에 흠을 형성하고 광학 실체 현미경을 통해 흠의 크기 및 열 영향층의 반경을 측정하였으며 OCT를 통해 흠의 단면 형상을 관측하였다. 또한 전자 주사 현미경(SEM)을 통해 흠과 외륜 및 열 영향층의 단면 구조 이미지를 얻었다. 이러한 일련의 과정은 실험에 의한 열전달 분포의 영상뿐만 아니라 이에 관한 측정 자료를 얻기 위한 과정으로 비파괴적 측정 방법인 현미경 측정 영상과 OCT 측정 영상을 먼저 얻은 뒤 시료를 파괴시키는 SEM 측정을 하였다. 이렇게 얻어진 흠의 영상과 측정 자료는 수치 해석에 의한 영상 및 자료와 비교하였는데 유한요소법에 기인한 수치해석 프로그램의 처리 과정은 그림 3-23과 같이 전처리 과정(Pre-Processing), 처리 과정(Processing), 그리고 후처리 과정(Post-Processing)으로 분리하였다.

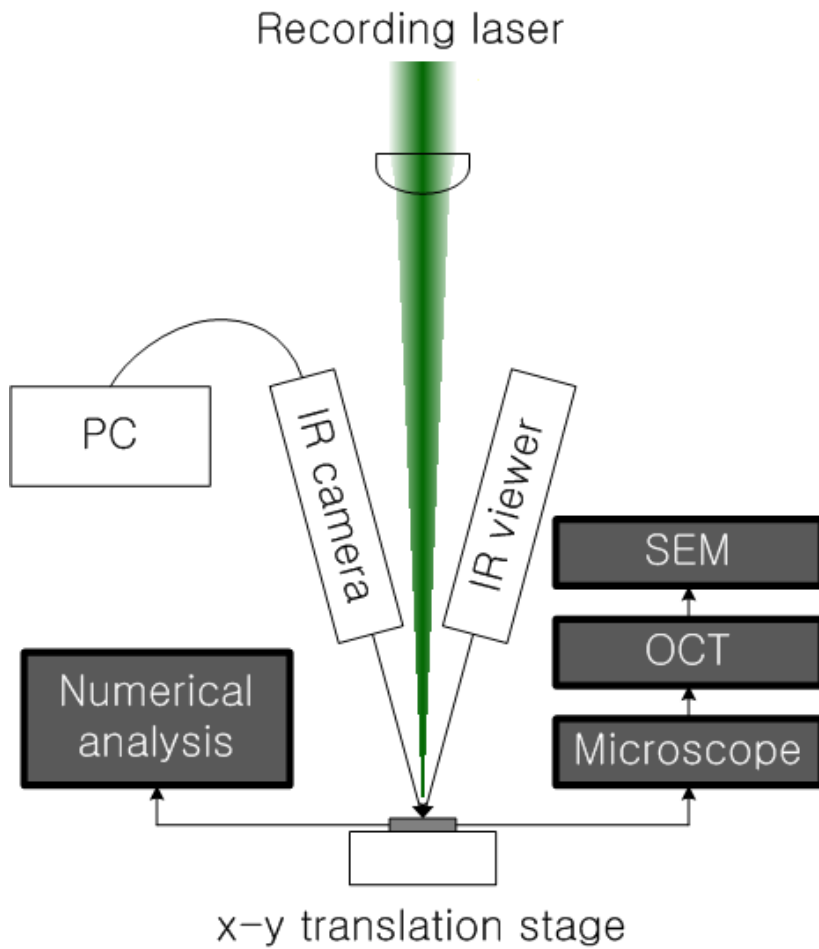


Fig. 3-22. Schematic for analysis of heat transfer distribution.

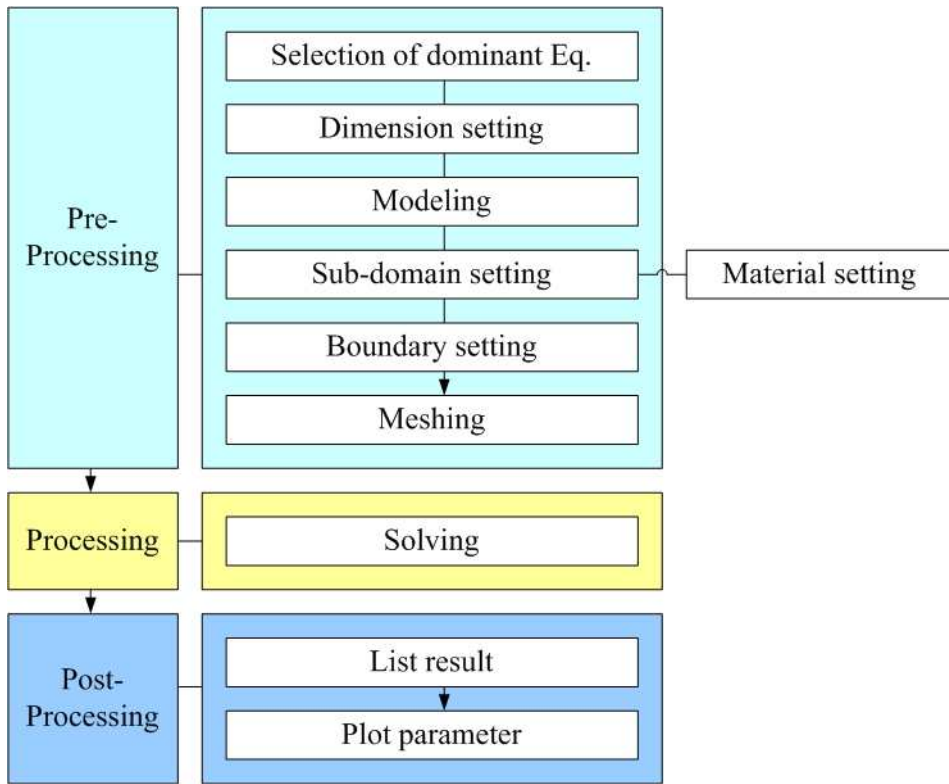


Fig. 3-23. Sequence of simulation for numerical analysis at Comsol Multiphysics.

본 해석의 경우 첫 번째 순서인 전처리 과정은 해석하고자 하는 모델의 지배방정식을 선택한 후 차원을 선택하였다. 해석하고자 했던 모델의 지배 방정식은 실제 레이저 가공에서 발생하는 시료의 차원 변형과 유사한 형태학적 구조를 얻기 위해 열전달 구성(heat transfer module)과 구조 역학 구성(mechanical structure module) 및 동적 그물망 구성(moving mesh module)을 선택하였다. 이후 차원에 적용되는 모델링을 하였고 해석하고자 하는 물질의 변수들을 입력하는

Sub-domain을 결정하였다. 본 해석의 경우 레이저를 외부 열원으로 취급하였을 때 시료에서의 열 확산이 원통형 좌표에서의 ϕ 와는 독립적으로 전달되기 때문에 그림 3-24와 같이 가로×세로×높이를 각각 4 mm×4 mm×3 mm로 모델링하고 외부 열원을 레이저의 초점 크기와 동일한 200 μm 의 크기로 고체의 원통형으로 설계하여 3차원 입방체로 모델링 하였다.

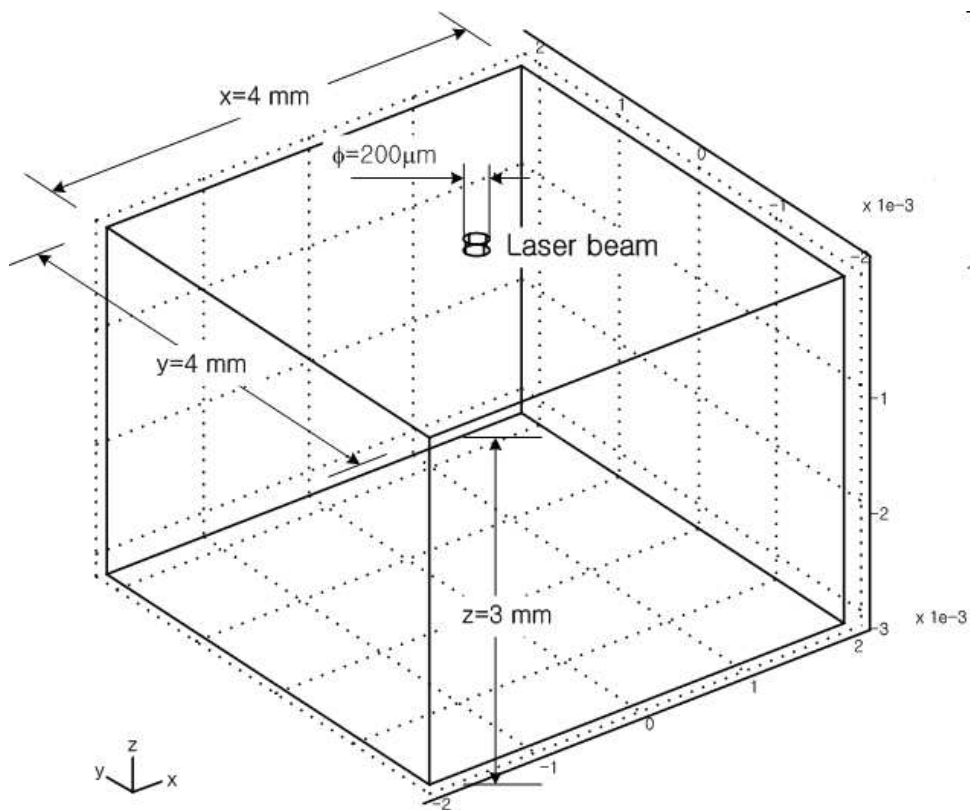


Fig. 3-24. Dimension of boundaries of model by Comsol Multiphysics.

모델링이 끝난 후 실험에 사용되는 시료의 각종 물리적인 변수들을 결정하였다. 이 과정이 Sub-domain의 결정 과정으로 시료의 물리적인 변수들은 표 1과 같다. Sub-domain이 표 1과 같은 상수로 결정되면 경계조건을 결정하게 되는데 경계조건은 앞에서 기술한 세 가지 구성 즉, 열전달 구성과 구조 역학 구성, 동적 그물망 구성을 설정하였다. 첫 번째 구성인 열전달 구성에서의 경계 조건은 레이저 초점 크기인 200 μm 의 영역을 레이저가 조사되는 영역으로 취급하여 그 크기만큼을 외부에서 내부로 열원이 입사되도록, 조사된 레이저와 결부시켜 측정된 온도와 같도록 열속을 주었으며 나머지 경계는 무한고체의 조건을 적용하였고 시료의 내부로는 열전달만을 고려하였다. 그림 3-25는 홈 형성시 조사된 레이저의 초점 위치에서 적외선 온도 측정기(M90-Q, MIKRON, USA)로 측정된 시료의 온도로 최고 온도는 약 1500~1600 $^{\circ}\text{C}$ 를 나타내고 있으며 그림 3-26과 그림 3-27은 가우시안(Gaussian) 형태의 외부 열원 공급으로 열전달만을 고려한 수치 해석의 열전달 분포를 보이고 있다. 이는 각각 시료 평면과 시료 단면에서의 나노초 단위의 열전달 분포로 시료의 가공을 고려하지 않은 상태에서의 열전달 분포이다. 그림 3-28은 1064 nm 레이저와 532 nm 레이저의 홈이 형성되기 직전의 경계값에서의 1 펄스 조사에 의한 증배의 형성과 열 영향층 분포이다.

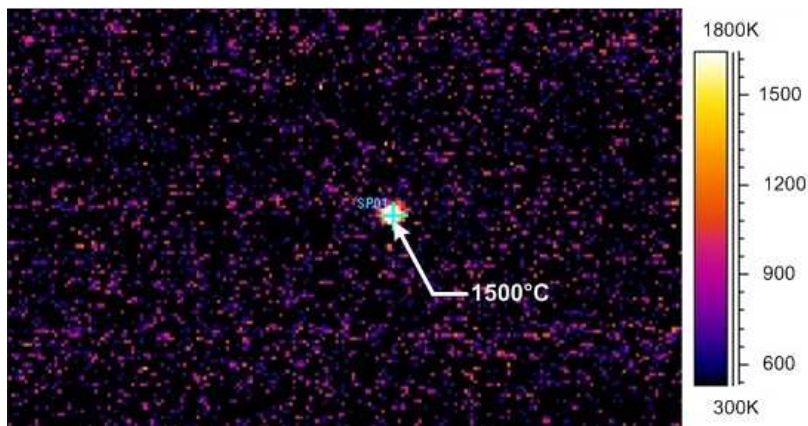


Fig. 3-25. Measurement of processing temperature at ABS plastic by IR camera.

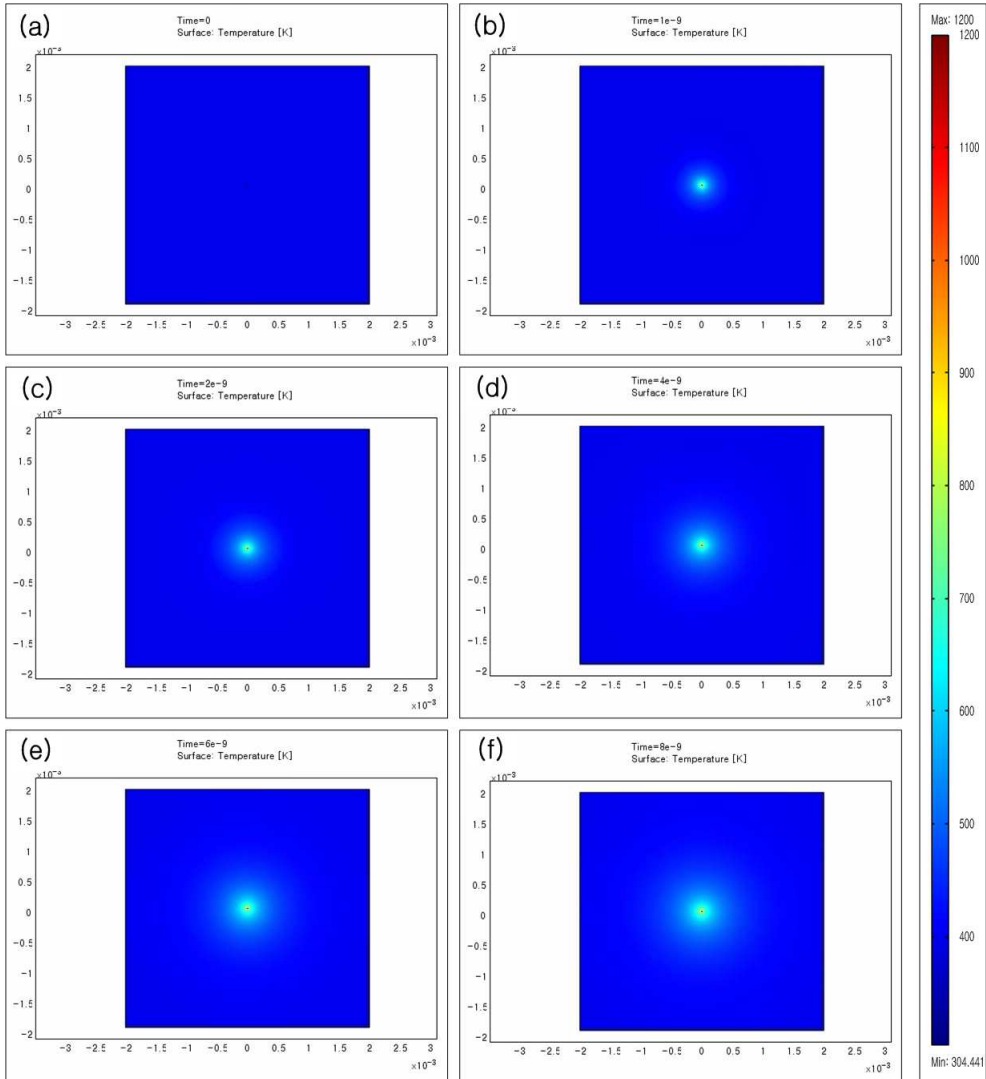


Fig. 3-26. The time dependent thermal distribution of sample surface by numerical analyzed according to consider only heat transfer; (a) 0 ns, (b) 1 ns, (c) 2 ns, (d) 4 ns, (e) 6 ns, and (f) 8 ns.

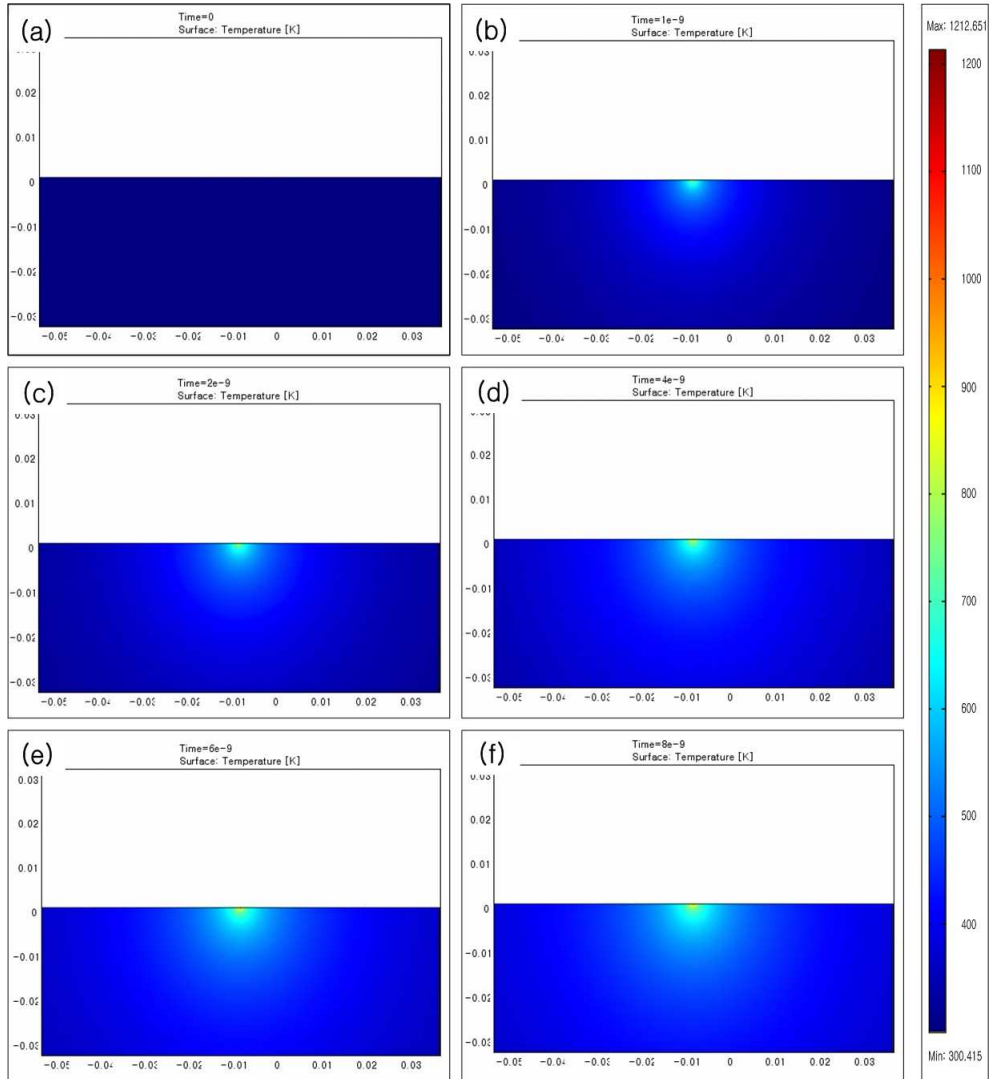


Fig. 3-27. The time dependent thermal distribution of sample section by numerical analyzed according to consider only heat transfer; (a) 0 ns, (b) 1 ns, (c) 2 ns, (d) 4 ns, (e) 6 ns, and (f) 8 ns.

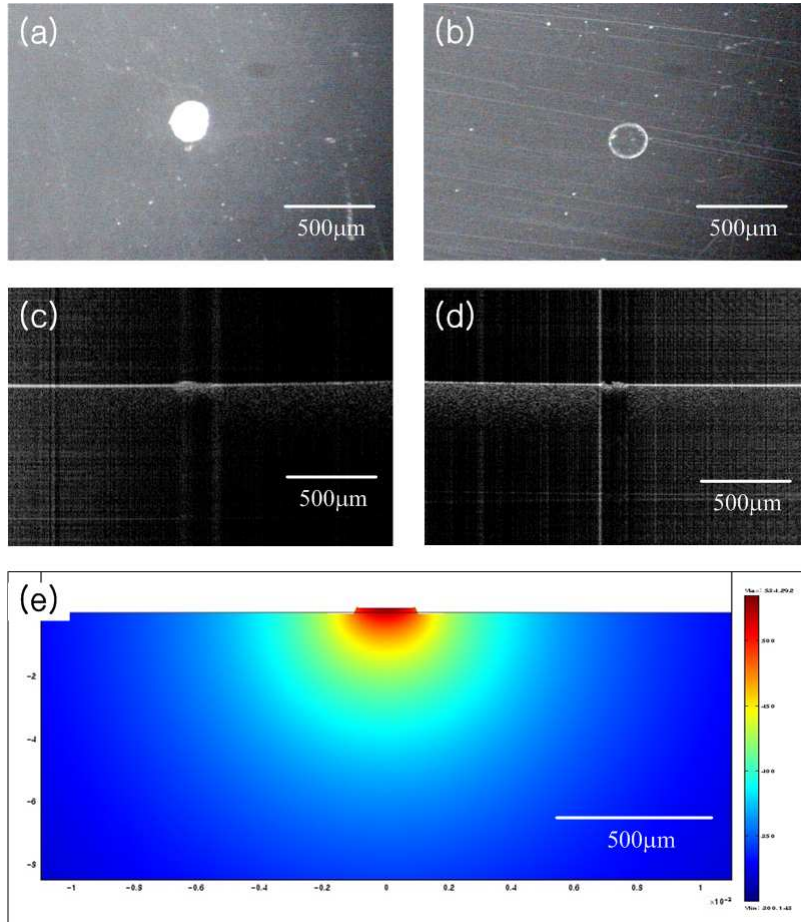


Fig. 3-28. Thermal distribution by one pulse laser irradiation at threshold value; (a)~(b): Optical microscope images, (a) 1064 nm-12 mJ, (b) 532 nm-20 mJ, (c)~(d): OCT images, (c) 1064 nm, (d) 532 nm, and (e) simulation at maximum temperature 534K by Comsol Multiphysics.

두 번째 구조 역학 구성에서는 열원으로서의 레이저 빔이 조사되는 영역은 시료의 초기 상태와 같은 자유 표면 상태로 두었으며 동일 구조에서 레이저 빔이 조사되지 않은 영역, 즉 레이저 조사 영역을 제외한 모든 영역은 무한 고체의 조건을

적용하였다. 구조 역학 구성은 열전달 구성과 동적 그물망 구성만으로는 시료의 구조적인 변화를 이끌어낼 수 없기 때문에 특별한 변수 값을 할당하지 않음에도 불구하고 반드시 포함시켜야 하는 구성중의 하나이다.

마지막으로 동적 그물망 구성에서의 경계 조건은 레이저가 조사되는 영역의 그물망 이동 속도를 열적 변형에 의거해 시료의 경계영역까지 열전달을 가정해 x 축 및 y 축, z 축의 그물망 이동 속도를 시료의 경계 영역까지 지정하였다. 그러나 실제 레이저 마킹에서는 레이저 조사에 의한 시료 내부로의 열전달은 시료 경계까지 도달하지 못하며 수치 해석에 의한 가상 실험에서도 마찬가지로 그 영역이 경계까지는 미치지 못한다. 전술된 세 구성의 경계조건 및 경계값을 표 7에 정리하였다.

Table 7. Boundary condition for simulation of deformation of specimen by heat transfer.

Model	Location	Description
Mechanical Structure	Area of incidence	Free surface.
	Except area of incidence	Infinite property
Heat Transfer	Area of incidence	Inlet heat flux equal to temperature Temp.; 650 K - 1600 K Heat flux; $3 \times 10^5 \exp[-(x^2+y^2)/(240 \times 10^{-6})^2] \sim$ $3 \times 10^6 \exp[-(x^2+y^2)/(240 \times 10^{-6})^2]$
	Except area of incidence	Infinite property
Moving mesh	All area	To boundary specimen

경계조건이 결정되면 전처리 과정에서 모델링 된 연속체 모델을 이산화된 각각의 요소로 분리시키는 그물망 구성 과정을 거치게 된다. 그물망 구성은 크게 사각형 구조와 삼각형 구조로 분리 되는데 본 실험에 사용된 프로그램의 그물망 구성은 삼각형 구조로 그물망 구성 명령에 의해 자동으로 구성되며 필요한 경계에서는 수동으로의 구성이 가능하다[55]. 본 실험에서 그림 3-29와 같이 열원이 입사되는 경계와 외륜이 형성될 수 있는 경계에서는 그 형상을 정확히 파악하기 위해 자동 그물망 구성의 약 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 배의 크기로 수동 그물망 구성을 취하였다.

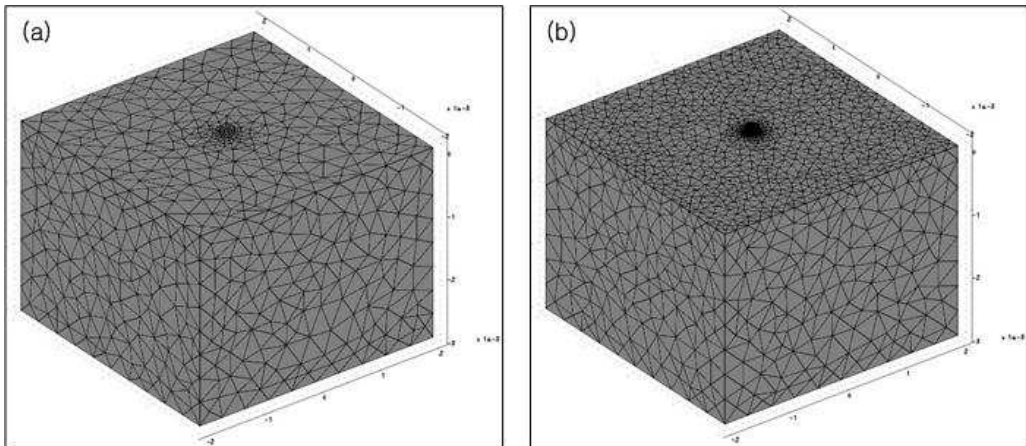


Fig. 3-29. Meshing process of material in Comsol Multiphysics program; (a) Auto mesh(1×10^{-3} m), (b) Manual mesh(1×10^{-5} m).

그물망 구성 과정을 끝으로 전처리 과정이 끝나면 처리 과정에 접어들게 되는데 처리 과정에서는 전처리 과정에서 입력된 변수들에 의존해 문제를 해석한 후 결과를 2차원 및 3차원, 윤곽선 형태의 도식적인 그림을 보여준다. 마지막으로 후처리 과정에서는 전처리 과정과 처리 과정을 통해 얻은 결과를 분석하고자 하는 자료의 형태로 나열한다. 이러한 수치 해석의 일련의 과정에 의해 레이저에 의한 흠 형성

과정에서 열전달을 해석할 수 있으며 흠 및 외륜 변형의 시간적인 변화를 볼 수 있다. 그림 3-30은 전처리 과정을 통해 모델링된 시료의 열전달 구성, 구조 역학 구성 및 동적 그물망 구성의 처리 과정을 거쳐 형성된 흠 및 외륜 형성 과정과 열전달 분포를 시간 분해하여 보이고 있다. 그림 3-30의 (a), (b)는 레이저가 조사된 직후부터 증배가 형성된 직후까지의 가상실험으로 약 5 ns 이전에 시료 표면에서 증배가 형성되었음을 짐작할 수 있으며 이는 다음절에 논의될 시간분해 반사율 측정과 함께 더욱 자세히 논의될 것이다. 그림 3-30의 (c)~(f)는 시료 표면에서 증배가 형성된 후 흠과 외륜이 형성되는 과정으로 (c)의 10 ns까지는 흠이 형성되거나 외륜 형성을 보이지 않으며 (d)의 20 ns 이후부터 외륜의 형성을 보이고 있다. 또한 (e)의 30 ns 까지는 미소하지만 흠의 반경이 증가되고 있으며 30 ns 이후에는 흠 반경의 증가는 없으며 깊이 방향으로만 흠을 형성하고 있다.

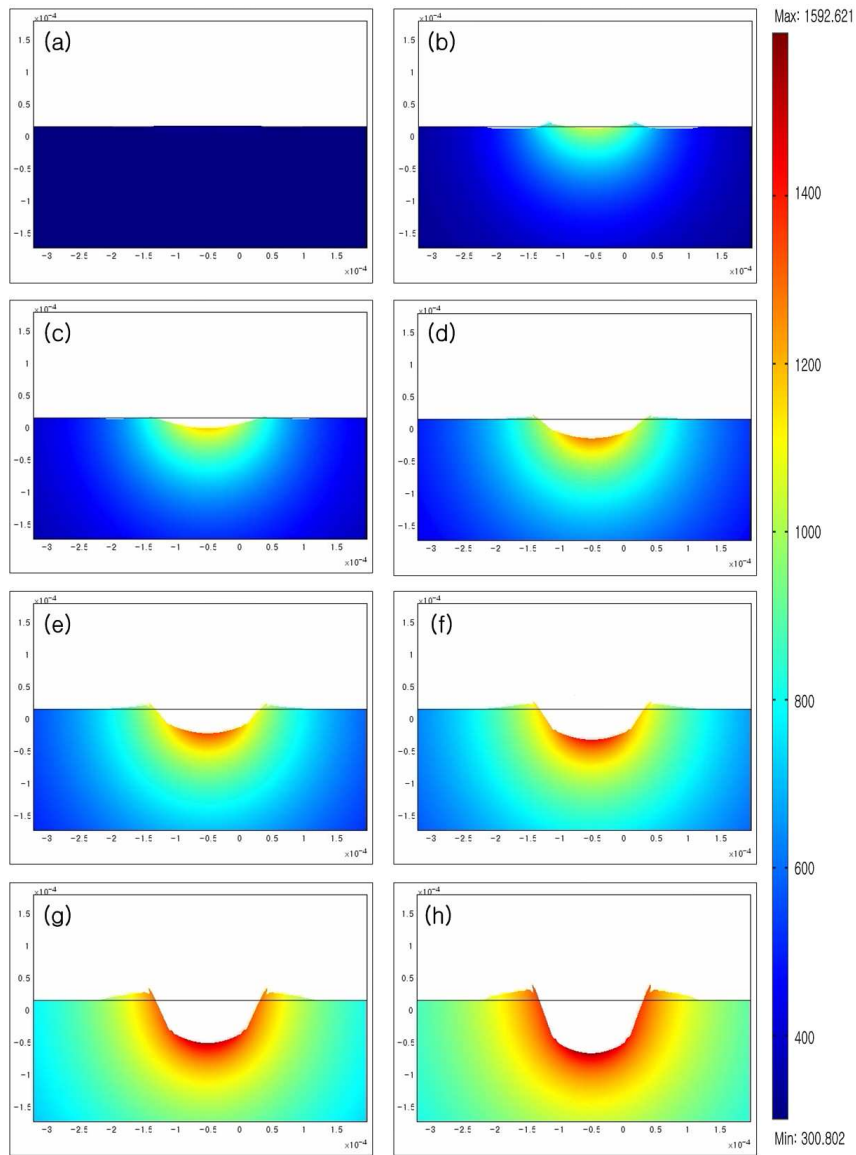


Fig. 3-30. The simulation of the time resolved pit and rim formation and the time resolved thermal distribution by laser irradiation; (a) 0 s, (b) 5 ns, (c) 10 ns, (d) 20 ns, (e) 30 ns, (f) 60 ns, (g) 80 ns, and (h) 100 ns.

제 6 절 나노초 시간 분해 반사율 측정

본 실험의 또 하나의 목적인 나노초 시간분해 반사율 측정의 실험은 레이저 조사에 의해 시료에 흠이 형성될 때 변화되는 반사율을 나노초 단위의 시간 간격으로 분해하여 이를 측정하고 측정된 반사율을 해석함으로써 흠 형성시 동반되는 메커니즘을 실시간으로 분석하고자 하는 것이다. 나노초 시간분해 반사율 측정은 시료에 흠을 형성하기 위한 기록 레이저 외에 반사율을 측정할 수 있는 탐침레이저를 필요로 한다. 탐침 레이저(He-Ne laser; $\lambda=632.8$ nm, Melles Griot, USA)는 표 8과 같은 특성을 가지고 있다. 이는 CW형의 He-Ne 레이저 시스템으로 TEM₀₀ 모드의 632.8 nm의 파장을 가지고 있으며 최대 출력이 35 mW이다. 또한 기록 레이저와는 다르게 500:1 이상의 편광성을 가지고 있고 약 0.62 mm의 반치폭(FWHM; Full Width at Half Maximum) 빔 반경을 가지고 있다. 나노초 시간 분해 반사율을 측정하기 위한 실험 장치도는 그림 3-31과 같다. 1064 nm의 기록 레이저가 시료에 조사시켜 흠을 형성할 때 632.8 nm의 검침 레이저를 흠 영역에 동시에 조사시켜 반사되는 검침 레이저 빔을 광검출기로 검출하였다. 이 때 검침 레이저가 빔 경로 상에서의 외곡을 최소화하기 위해 반사 거울이 기록레이저 조사 축을 중심으로 대칭으로 위치하도록 설치하였다. 반사된 검침 레이저 빔의 편광 변화를 보기 위해 Glan-thompson 편광 프리즘을 이용해 편광 분석기로 이용하였으나 편광의 변화는 없었다. 또한 검침 레이저의 반사빔의 변화를 나노초 단위로 보기 위해 광검출기(PD, Photodetector-Si pin detector, New Focus, USA)를 사용하였으며 광검출기에서 수광된 자료를 나노초 단위로 분석하기 위한 디지털 오실로스코프(Agilent, 1GHz-4GS/s, USA)를 사용하였다. 광검출기에서 기록 레이저의 반사빔 수광을 방지하기 위하여 광검출기의 수광부 전면(前面)에 632.8 nm의 빔만을 투과시키는 선형 투과 필터(line type bandpass filter)를 위치시켰다. 그림 3-32는 그림 3-31의 개략도에 의해 설치된 실험 장치이다.

Table 8. The characteristic of probe laser system.

Classification	Value
Wavelength [nm]	632.8
Operation mode	CW
Output power [mW]	35
M^2	< 1.1
Transverse mode	> 95% TEM ₀₀ mode
Beam diameter [mm at 1/e ²]	1.23
Beam divergence [mrad at 1/e ²]	0.66
Noise [rms]	< 1%
Polarization	Linear > 500:1

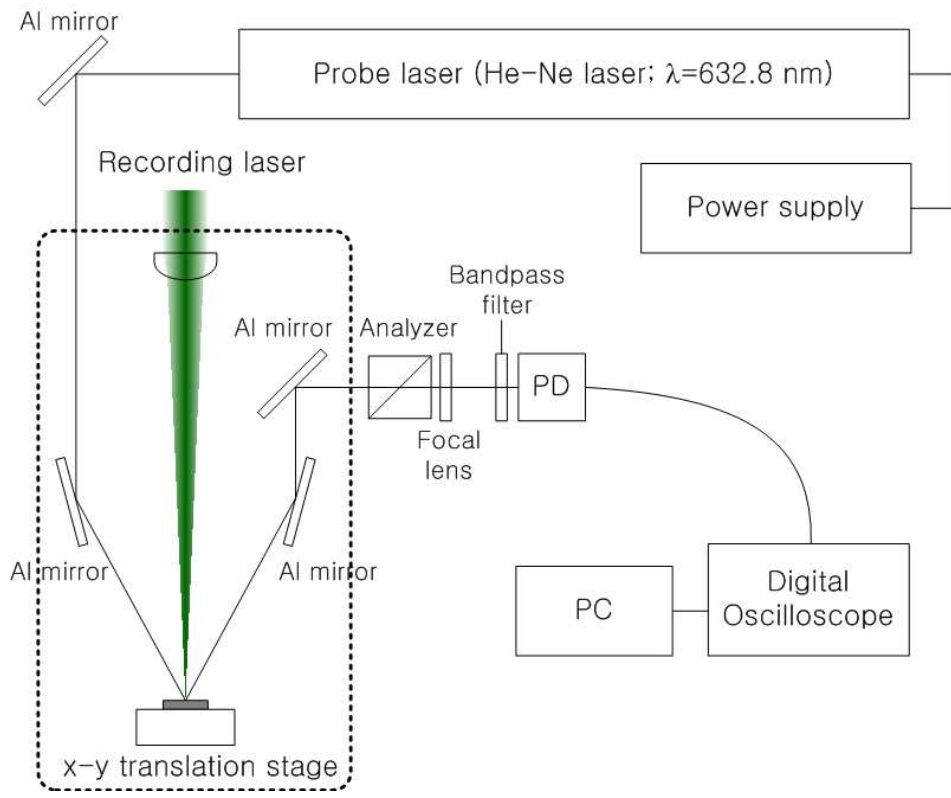


Fig. 3-31. Schematic of nanosecond time resolved reflectivity system.

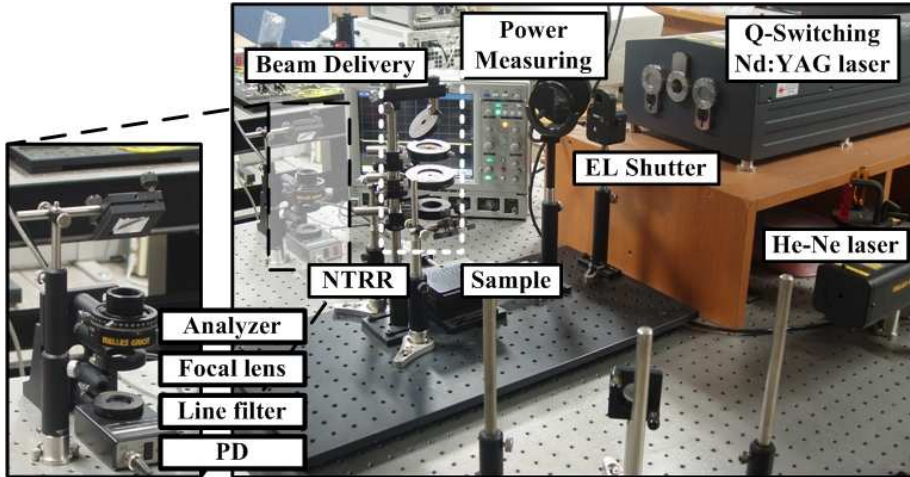


Fig. 3-32. Set-up of nanosecond time resolved reflectivity system.

나노초 시간 분해 반사율 측정은 기록 레이저의 조사에 있어 제 4 절과는 다르게 단일 펄스에 의해 형성된 흠의 경계에서 측정된 검침 레이저의 반사값이다. 두 번째 펄스부터는 시료에서 생성된 흠에 의해 반사빔의 경로가 바뀌게 되기 때문이다. 만약 이러한 나노초 시간 분해 반사율의 변화를 일으키는 경계가 시료의 표면이 아니고 흠 형성시 발생하는 플라즈마에 의한 경계에서 발생할 수 있다고 예측할 수도 있겠으나 펄스 형태의 Q-switching 레이저에 의한 플라즈마의 발생은 그림 3-33와 같이 단위 레이저의 세기가 $4 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 이상에서만 플라즈마가 발생된다 [56]. 그러나 본 실험에서의 레이저 세기의 최대값은 $1 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 를 넘지 못하므로 플라즈마 경계에서의 반사율 변화로 보기는 어렵다. 그림 3-34는 182.5 mJ의 기록 레이저 조사 시 정량화된 검침 레이저의 시간적 변화율이다. 실선은 532 nm의 반사빔의 시간적 변화이며 점선은 1064 nm의 변화이다. 1064 nm의 경우 미소하지만 최대 반사율에서 532 nm보다 시간 지연이 있으며 반사율의 반치폭에 있어서도 시간 지연을 보이고 있다. 그러나 두 파장 모두 동일한 시간대에서 또 다른 반사율 변화를 보이고 있다.

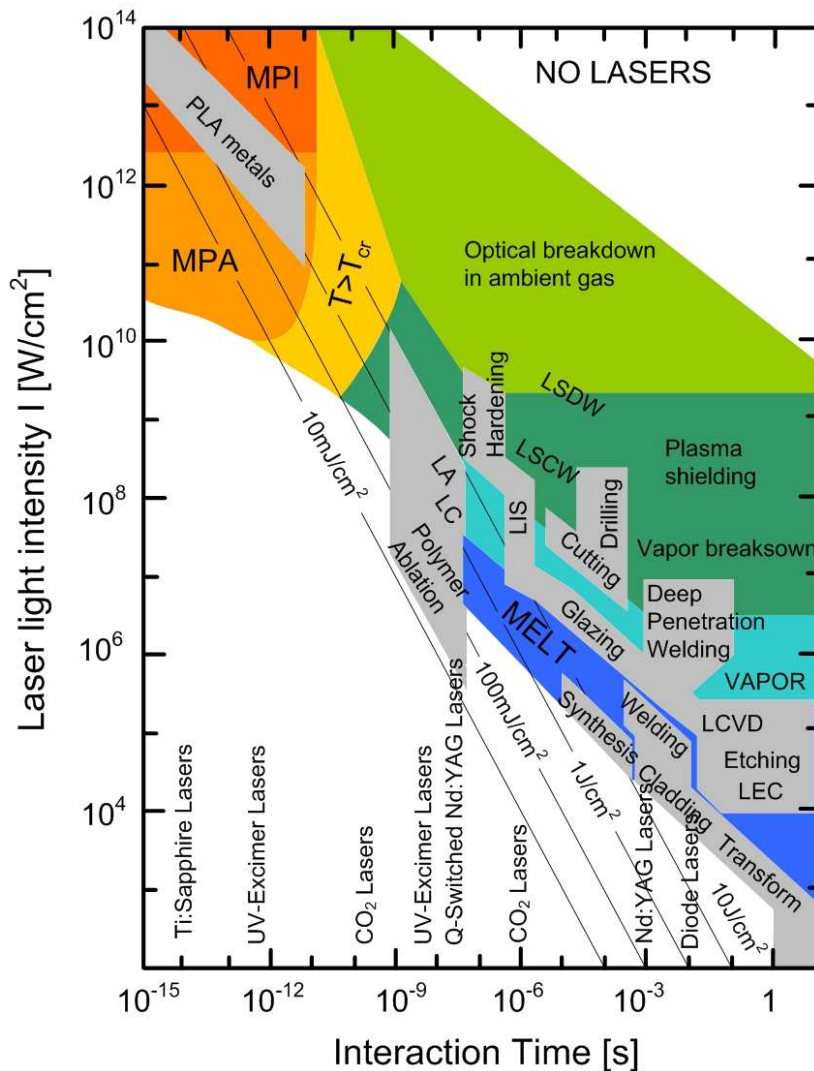


Fig. 3-33. Application of laser in materials processing; PLA/PLD: pulsed laser ablation/deposition, LA: laser annealing, LC: laser cleaning, LIS: laser-induced isotope separation, MPA/MPI: multiphoton absorption/ionization, LCVD: laser-induced chemical vapor deposition, LSDW/LSCW: laser-supported detonation/combustion waves, LEC: laser-induced electrochemical plating/etching [i].

[i] *Source:* Dieter Bauerle, "Laser Processing and Chemistry", Springer, 2000, p. 6.

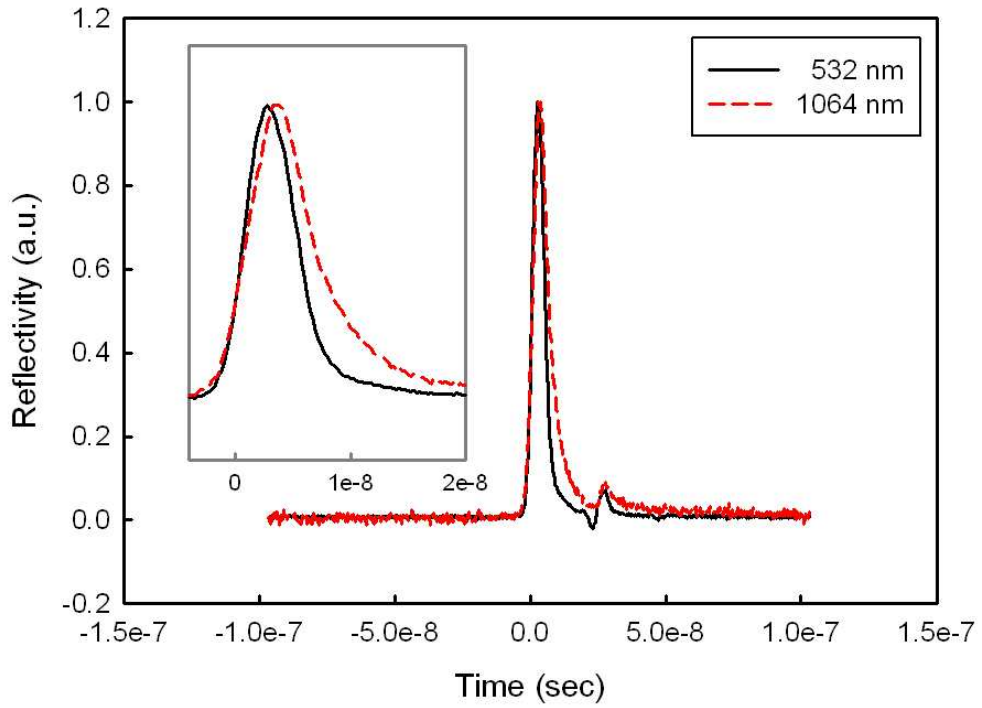


Fig. 3-34. Organized nano-second time resolved reflectivity of recording laser at 182.5 mJ.

제 4 장 결과 및 고찰

제 1 절 OCT 및 광학 현미경에 의한 흠 분석

본 실험에 사용된 기록 레이저는 파장대가 적외선인 1064 nm와 가시광선인 532 nm이다. 따라서 실험에 사용된 시료인 ABS 플라스틱에 흠을 형성하고자 할 때는 반드시 열을 동반하게 되고 이러한 열적인 현상에 의해 시료의 표면이 용융되면서 흠이 형성되기 시작한다. 그러나 시료에서의 흠의 형성과정은 단순한 열적인 현상에만 의존하지는 않는다. 이는 흠 형성 메커니즘에 관계되기 때문에 제 2 절과 제 3 절에서 논의하였다. 그림 4-1부터 그림 4-4까지는 기록 레이저 조사에 의해 형성된 80개의 경우의 수 중 제 3 장 제 4 절에서 나타낸 기록 레이저의 파장과 펄스 수에 따른 흠 형성의 분석 그래프로 그림 4-1과 그림 4-2는 각각 1064 nm와 532 nm 레이저 조사에 의해 형성된 흠의 반경 변화이다. 레이저 조사에 의해 형성된 흠의 반경은 펄스 수가 증가할수록 즉 조사된 총 에너지가 증가할수록 그 값이 선형적 증가 추세를 보였다. 그러나 532 nm 레이저 조사에 의해 형성된 흠의 반경은 선형에 가까운 로그함수의 형태로 증가하였다. 이는 적외선 영역의 1064 nm 레이저 조사에 의해 형성된 흠은 열적인 효과가 상대적으로 커 시료의 용융에 의한 흠 가장자리에 외륜을 형성하기 때문이며 532 nm 레이저 조사에 의한 흠은 열적인 효과가 존재하기는 하지만 파장이 짧아 상대적으로 열적 효과가 적어 외륜이 형성되지 않기 때문이다. 그림 4-3과 그림 4-4는 전술(前述)된 내용과 동일한 조건하에서의 흠의 깊이에 관한 정보로 그림 4-3은 1064 nm 레이저 조사에 의해, 그림 4-4는 532 nm 레이저 조사에 의해 형성되었다. 그림 4-3은 조사 펄스 수에 비례하여 선형적으로 증가하였으나 그림 4-4의 경우는 단위 펄스 당의 에너지가 증가할수록 선형적 증가에서 지수함수의 형태로 증가하고 있음을 볼 수 있었다.

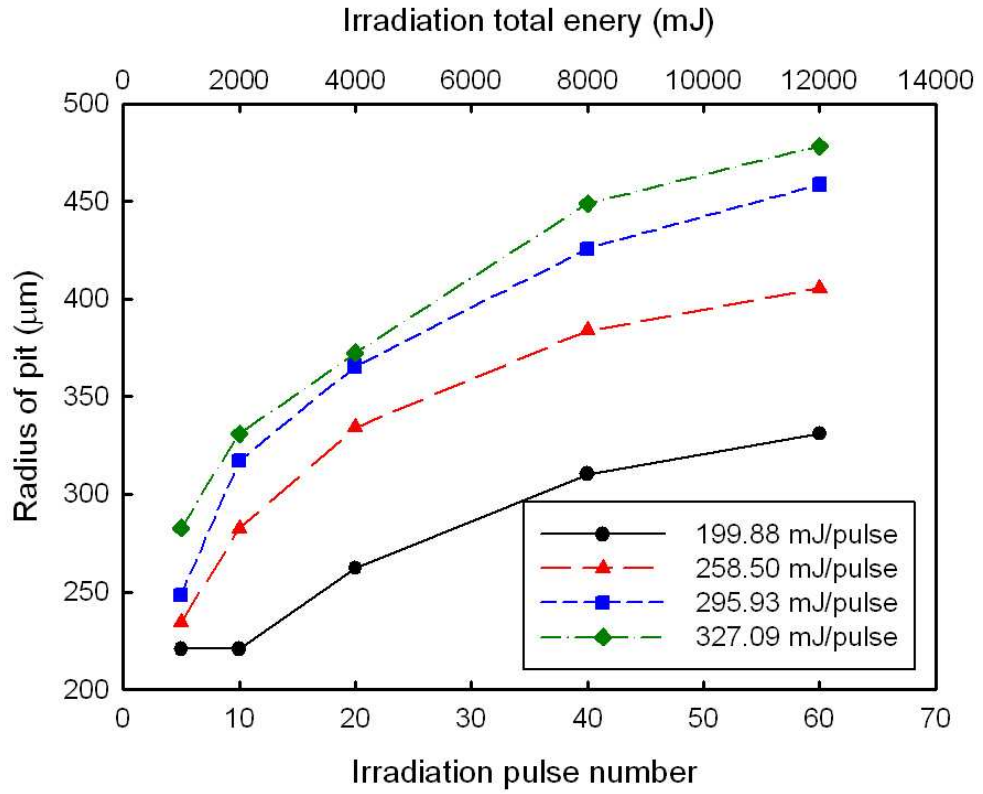


Fig. 4-1. The variation of pit radius on irradiation number of a laser pulse centered 1064 nm.

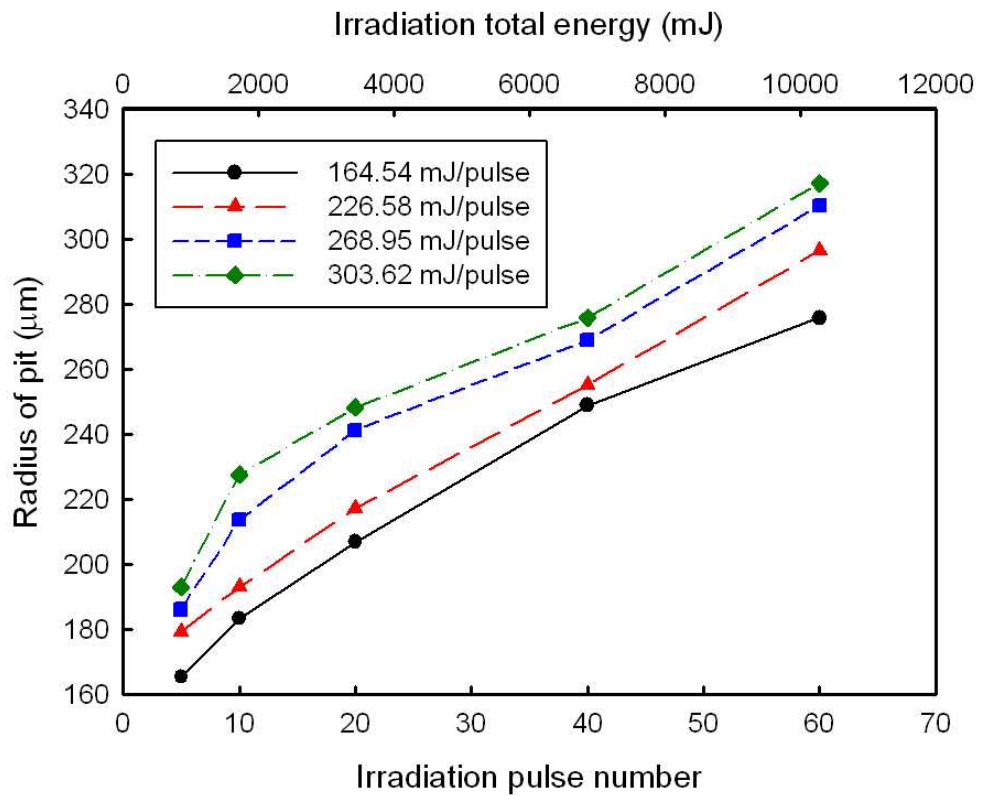


Fig. 4-2. The variation of pit radius on irradiation number of a laser pulse centered 532 nm.

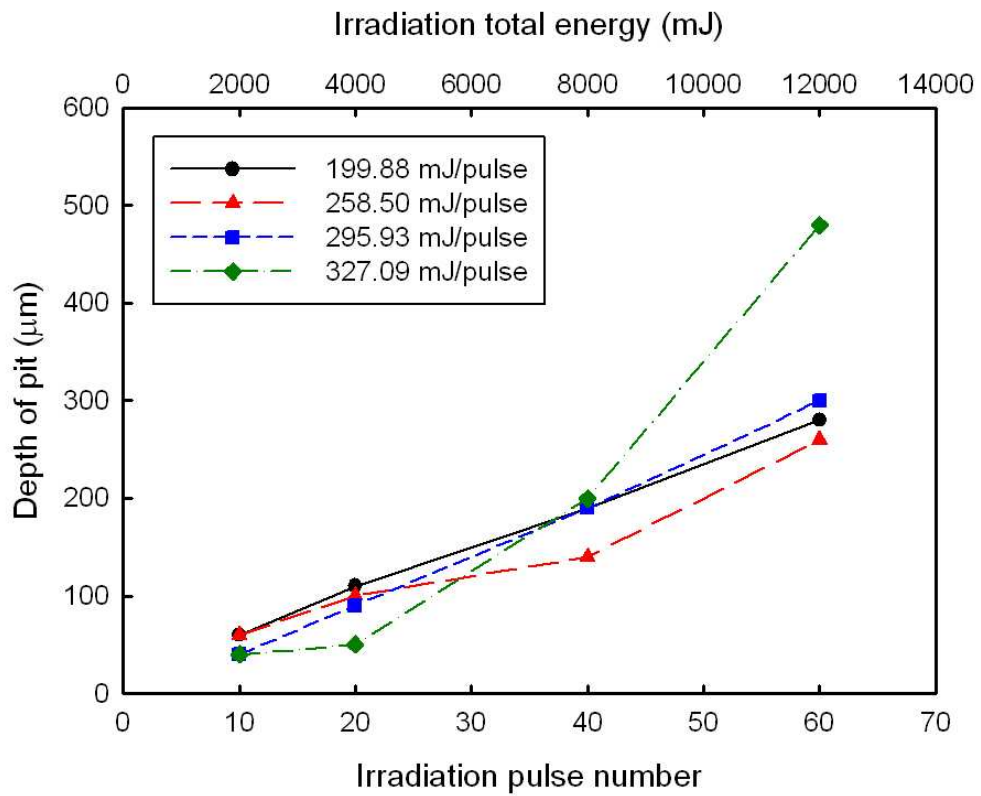


Fig. 4-3. The variation of pit depth on irradiation number of a laser pulse centered 1064 nm.

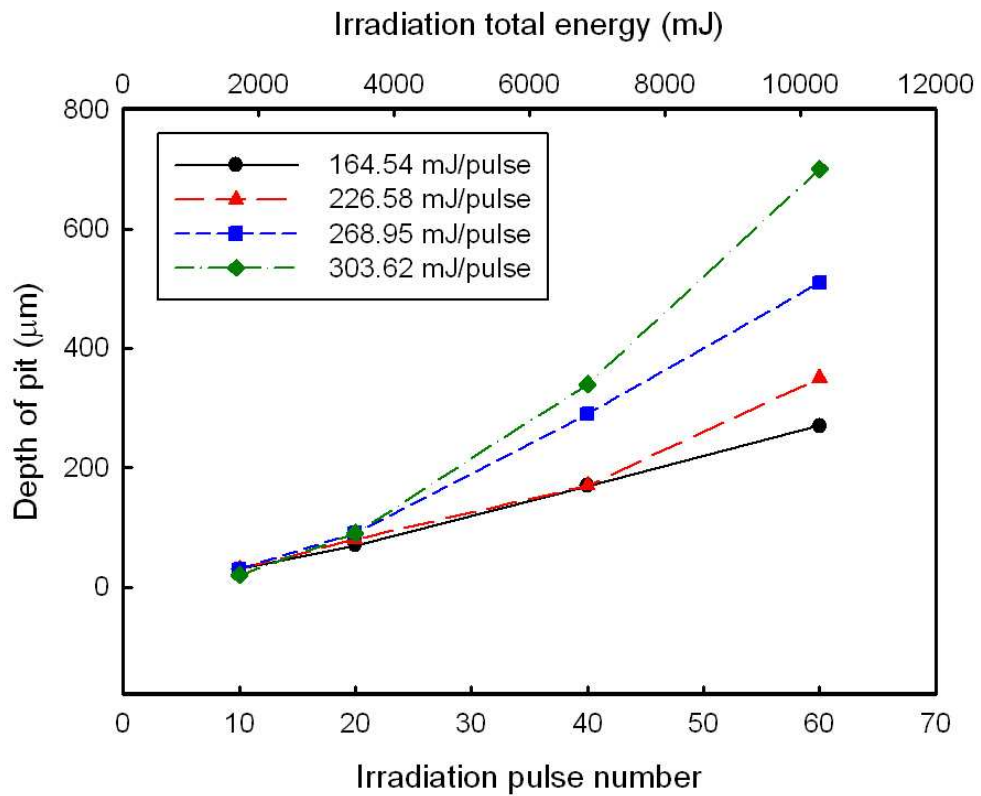


Fig. 4-4. The variation of pit depth on irradiation number of a laser pulse centered 532 nm.

그림 4-1부터 그림 4-4까지가 레이저 조사 펄스 수 변화에 따른 홈 정보를 나타내었다면 그림 4-5부터 그림 4-8까지는 레이저 조사 펄스 수를 일정하게 한 후 펄스 반복을 변화에 따른 홈 정보를 나타내었다. 그림 4-5와 그림 4-6은 파장에 따른 홈의 반경을 나타낸 것으로 그림 4-5는 1064 nm 레이저 조사에 의해, 그림 4-6은 532 nm 레이저 조사에 의해 형성된 홈의 반경이다. 1064 nm 레이저 조사에 의해 형성된 홈의 반경은 총 조사 에너지가 약 10 J을 경계로 반대되는 성향을 보였으나 특정 값으로 일정해지는 것을 볼 수 있었다. 이는 펄스 수에 따른 홈 형성과 같이 특정 에너지 이상에서 용융층에 의한 외륜의 형성에 기인한 것으로 볼 수 있다. 그러나 532 nm 레이저 조사에 의해 형성된 홈의 반경은 선형적으로 증가되는 것을 볼 수 있는데 마찬가지로 펄스 수에 따른 홈의 반경과 같이 외륜의 발생이 없기 때문인 것으로 예측된다.

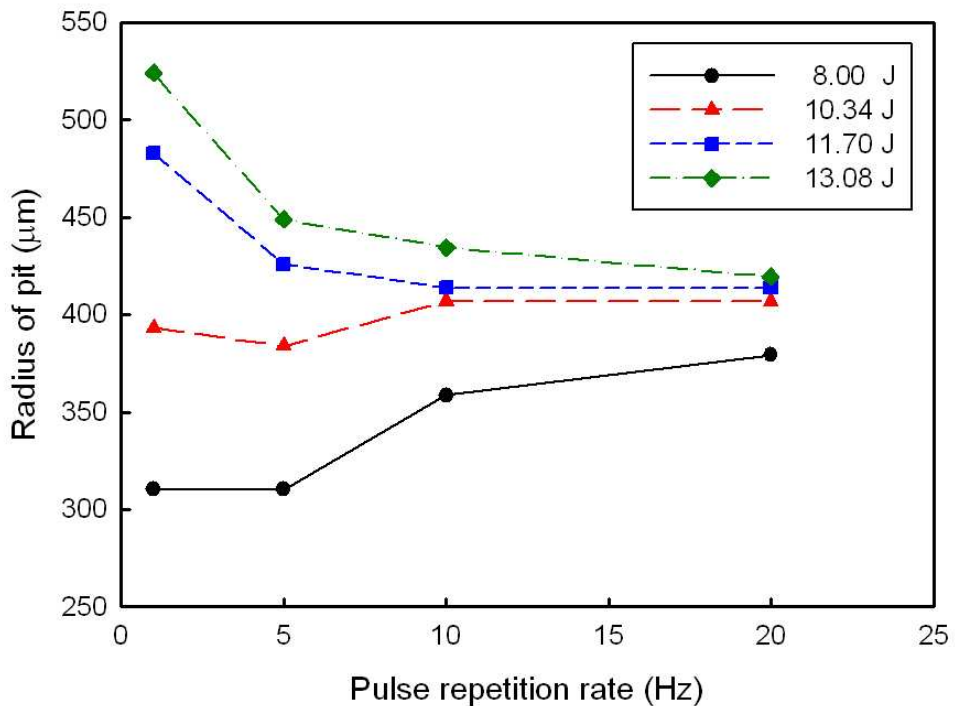


Fig. 4-5. The variation of pit radius on repetition rate of a laser pulse centered 1064 nm.

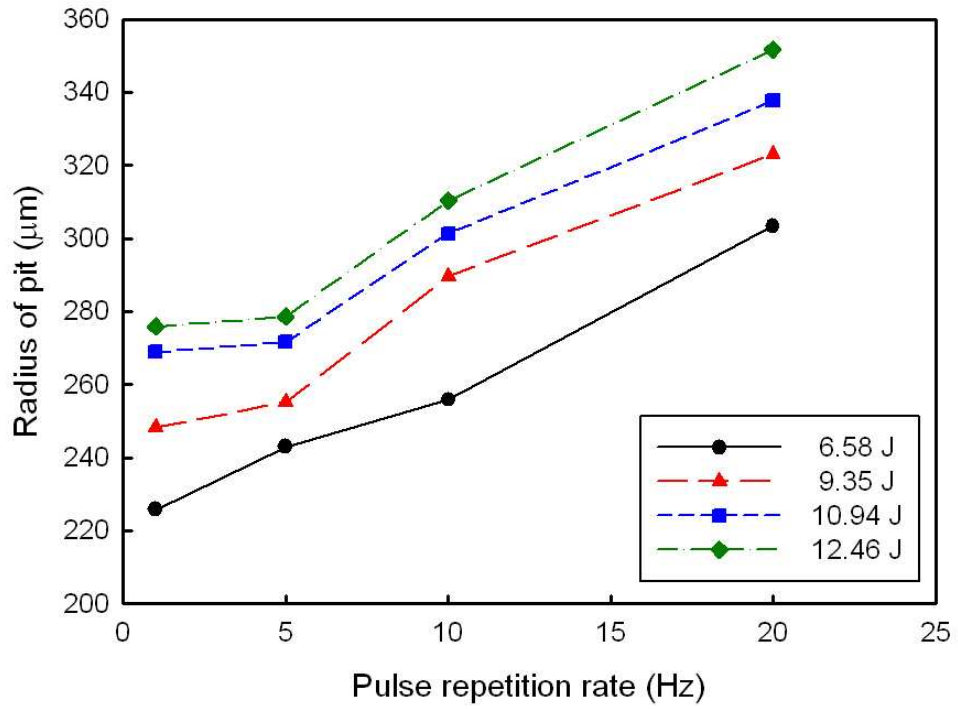


Fig. 4-6. The variation of pit radius on repetition rate of a laser pulse centered 532 nm.

그림 4-7은 1064 nm 레이저 조사에 의해 형성된 홈의 깊이를 나타낸 것으로 총 조사 에너지와는 무관하게 비슷한 특성을 보이고 있었다. 펄스 반복율이 5 Hz에서 급격히 감소했다가 증가 후 일정해 졌는데 이는 5 Hz의 펄스 반복율 이전까지는 외륜의 형성이 거의 없으며 이후부터 외륜이 형성되는 것으로 보아 외륜을 형성시키기 위한 시료의 용융에 의한 내부 함몰로 추정된다. 그러나 그림 4-8과 같이 532 nm 레이저 조사에 의해 형성된 홈의 깊이는 지수함수로 감소하는 것을 볼 수 있었다. 이는 상대적으로 짧은 파장은 열적인 효과가 적어 용융에 의한 홈의 형성이라 볼 수 없기 때문으로 생각된다.

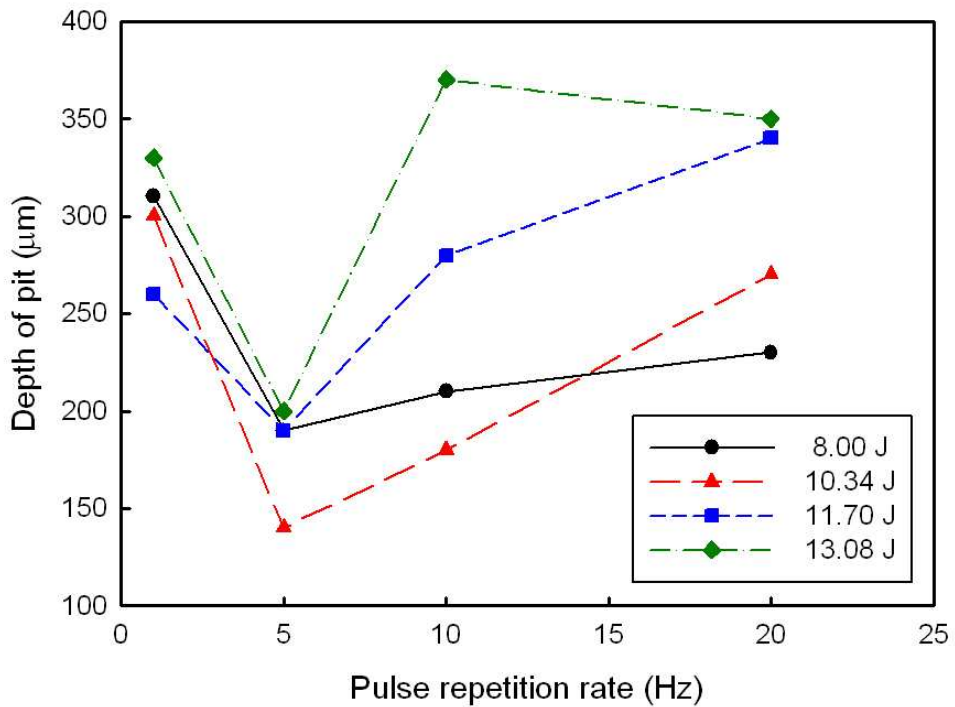


Fig. 4-7. The variation of pit depth on the repetition rate of a laser pulse centered 1064 nm.

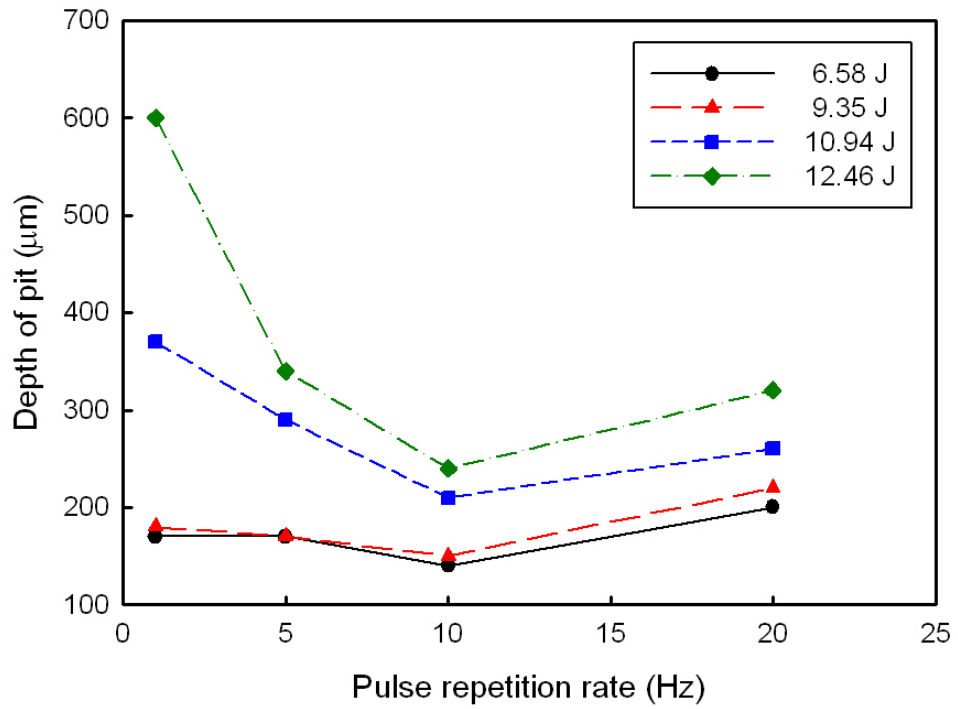


Fig. 4-8. The variation of pit depth on the repetition rate of a laser pulse centered 532 nm.

그림 4-9부터 그림 4-12까지는 레이저 조사 펄스 수를 총 에너지로 환산하여 펄스 반복율과의 관계로 실험된 전(全) 사건의 경우를 나타낸 그래프이다. 그림 4-9는 1064 nm 레이저에 의해 형성된 흠의 반경이며 이는 동일한 조사 펄스 반복율에서 에너지에 따른 변화이다. 펄스 반복율 1 Hz에서는 반경의 변화가 거의 무작위로 변화되어 변화 과정을 예측할 수 없었으나 펄스 반복율 5 Hz 이상에서는 조사 펄스 반복율이 증가할수록 흠 반경은 점차 선형적으로 변화되고 있음을 볼 수 있었다. 그림 4-10은 532 nm 레이저에 의해 형성된 흠의 반경으로 그림 4-9와 같은 정보를 보이고 있다. 그림 4-9와는 다르게 532 nm 레이저 조사에 의해서는 조사 반복율 1 Hz에서도 특성이 나타났으며 5, 10 및 20 Hz로 조사 반복율이 증가할수록 동일 에너지에서의 흠 반경도 증가되고 있음을 볼 수 있었다. 그러나 1064 nm 레이저 조사에 의한 선형적인 흠 반경 증가와는 다르게 점차 일정해 짐을 볼 수 있었다.

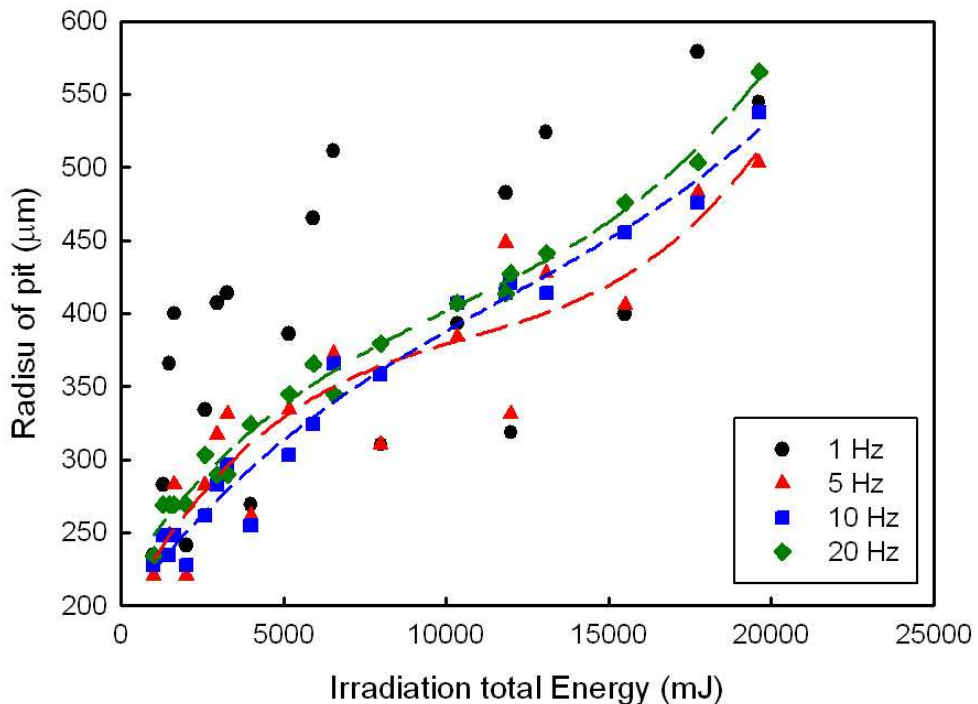


Fig. 4-9. Radius of pit formed by 1064 nm laser.

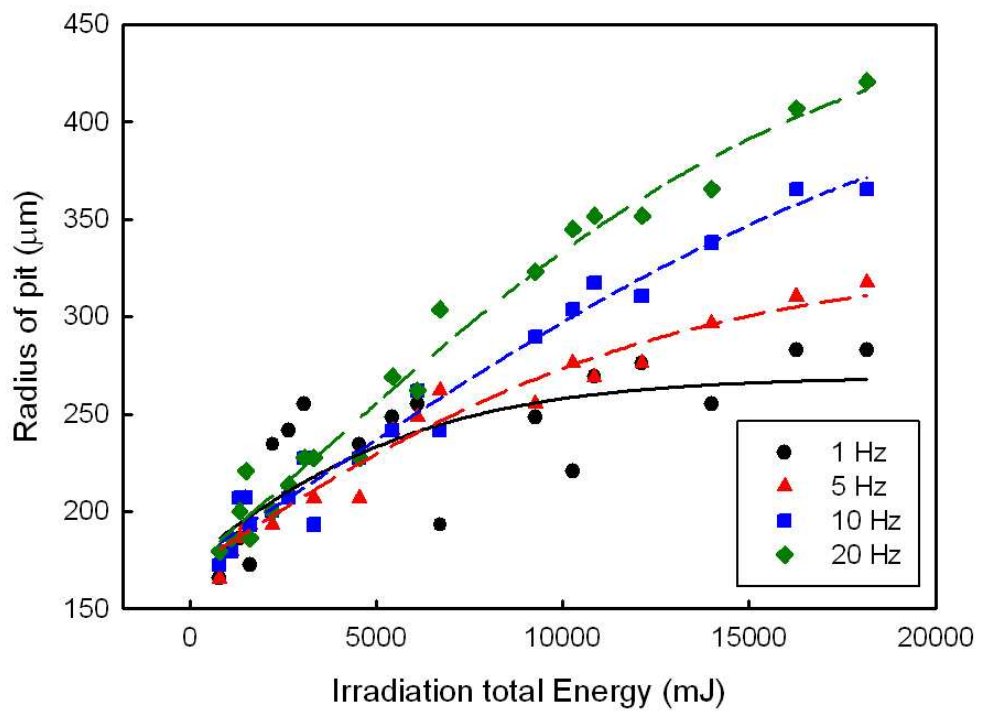


Fig. 4-10. Radius of pit formed by 532 nm laser.

그림 4-11과 그림 4-12는 1064 nm와 532 nm 레이저 조사에 의해 형성된 홈의 깊이를 각각 보이고 있다. 그림 4-11의 1064 nm 레이저에 의해 형성된 홈의 깊이는 레이저 조사 반복율 1 Hz에서 그림 4-9의 1 Hz에 의한 홈의 반경과 같이 다소 불규칙한 값을 나타내고 그 이상에서는 레이저 조사 반복율이 증가할수록 홈의 깊이도 증가하는 것으로 보인다. 특히 펄스 반복율 20 Hz에서는 선형적인 증가를 보였다. 그러나 펄스 반복율 20 Hz를 제외하고는 반경 증가와는 달리 특정 에너지 값 이상에서는 일정한 값에 도달할 것으로 여겨진다. 그림 4-12는 532 nm 레이저에 의해 형성된 홈의 깊이로 레이저 조사 반복율이 증가할수록 홈의 깊이는 지수함수의 형태를 이루면서 감소하였고 특히 20 Hz에서는 1064 nm에 의해 형성된 홈의 깊이와 같이 에너지가 증가할수록 일정한 값에 도달할 것으로 보인다. 그림 4-11과 그림 4-12는 OCT 시스템에 의해 측정된 값이다.

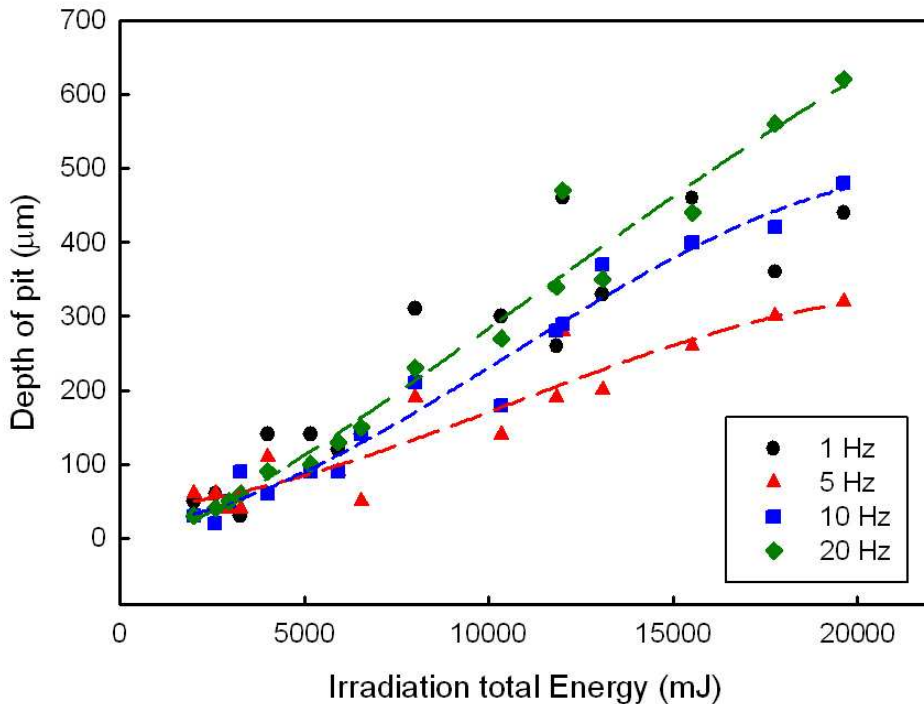


Fig. 4-11. Depth of pit formed by 1064 nm laser.

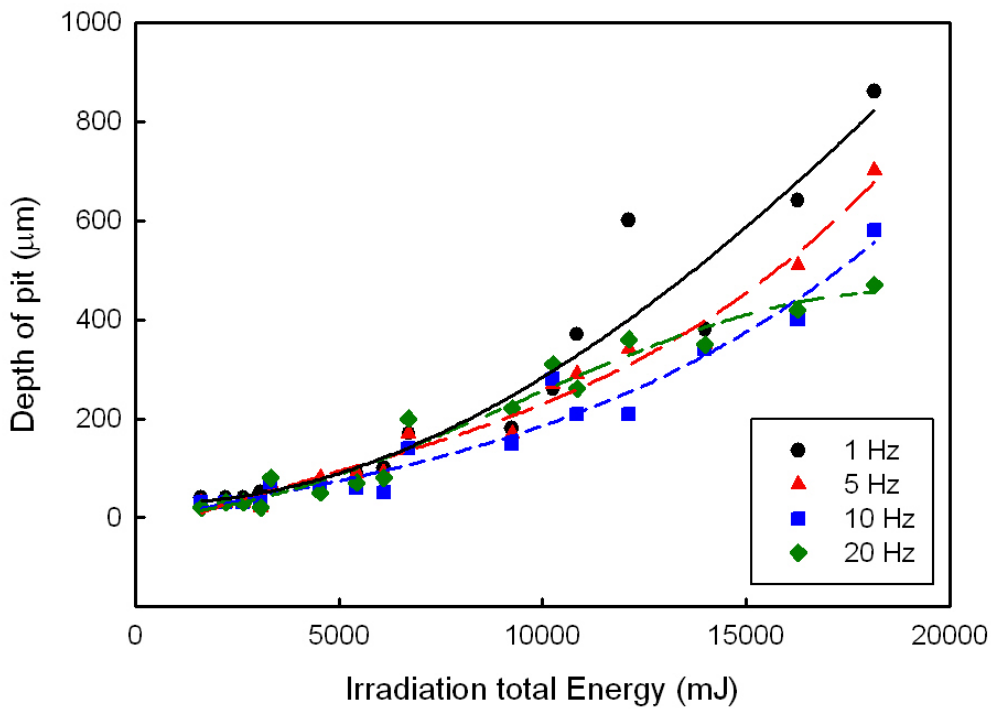


Fig. 4-12. Depth of pit formed by 532 nm laser.

그림 4-13 (1)과 (2)의 흠 및 외륜의 크기가 서로 잘 일치하고 있는 것으로 보아 (1)의 광학 실체 현미경 관찰에 의한 흠의 표면 분포를 (2)의 OCT 영상에 의한 흠의 단면 분포로 예측해 낼 수 있으며 (2)의 단면 분포와 (3)의 가상 실험 결과가 일치하는 것으로 보아 (2)의 OCT 영상에서 얻어내지 못했던 열 영향층의 분포를 (3)의 가상 실험 결과에서 얻어낼 수 있었다. 따라서 (1)의 광학 실체 현미경에 의한 흠의 열 영향층 표면 분포로 (3)의 가상 실험에 의한 열 영향층 단면 분포를 예측해 낼 수 있었다. 그림 4-13의 실험에 사용된 레이저 1064 nm의 Nd:YAG 레이저이며 조사된 펄스 수는 (a), (b), (c) 및 (d)가 각각 5, 10, 20 및 40 펄스로 펄스당 에너지는 295.93 mJ/pulse 이다. (3)의 점선은 열 영향층을 나타낸 선으로 유리 전이 온도이다.

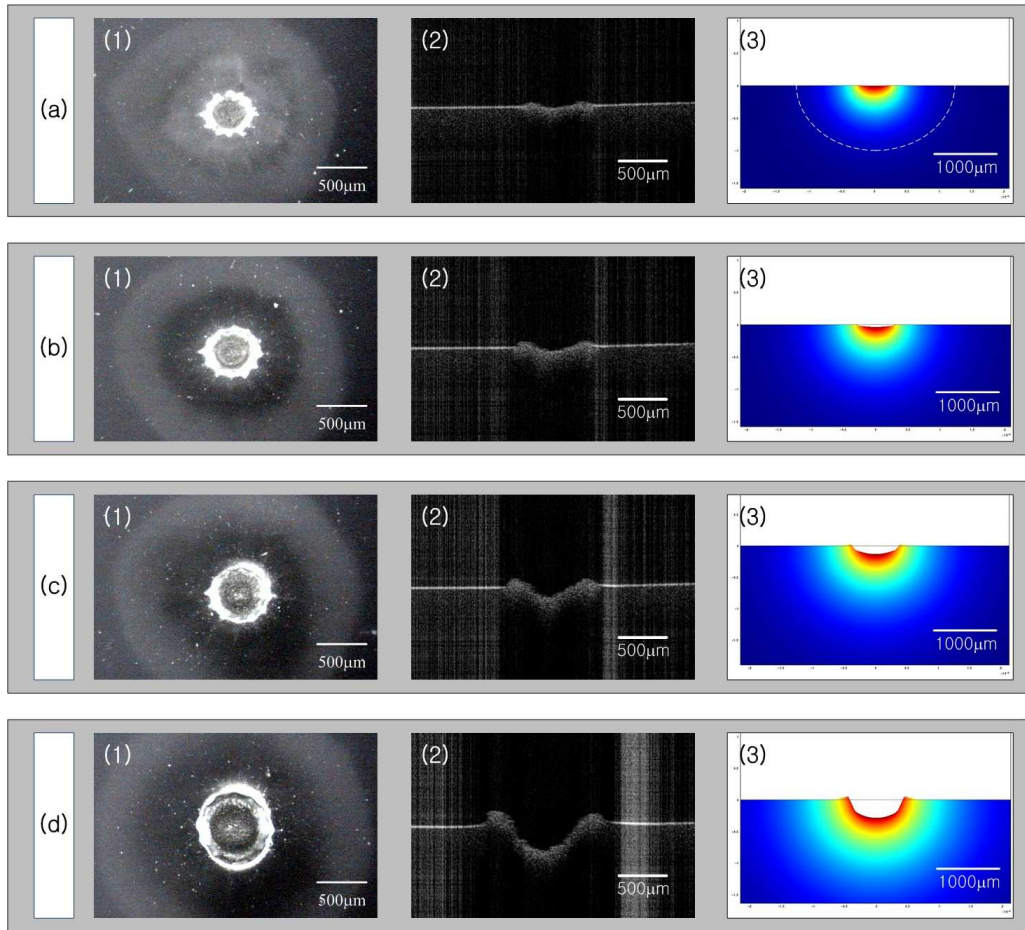


Fig. 4-13. The comparison between the experimental (1-2) and the simulation (3) results for the surface deformation; (1) optical microscopic images, (2) OCT images, and (3) simulation - the single pulse energy is 295.93 mJ/pulse and the operation Wavelength of the Nd:YAG laser is 1064 nm; (a) 5, (b) 10, (c) 20, and (d) 40 pulses, dashed line in (a-3) is HAZ boundary determined by the glass temperature.

제 2 절 열전달 분포 분석

OCT 시스템은 시료에서 반사되는 간섭무늬를 기반으로 단면을 디지털화하여 이미지를 만들어 내기 때문에 홈의 가장자리와 같이 시료에서의 경계가 명확한 부분은 정확한 이미지를 만들어 낼 수 있으나 열 영향층과 같이 경계가 명확하지 않은 부분은 정확한 간섭무늬를 만들어 낼 수 없기 때문에 측정에 있어 어려운 점이 있을 뿐만 아니라 신뢰도에 있어서도 아직은 미흡한 상태이다. 따라서 본 실험에서는 열 영향층과 같이 시료에서 정확한 경계를 만들어 내지 못하는 영역은 광학 현미경을 통해 시료 표면에서의 측정값만을 얻을 수 있었다.

그림 4-14와 그림 4-15는 레이저 조사 펄스 수 변화에 따른 열 영향층에 관한 정보로 펄스 반복율 5 Hz에서 펄스 수 즉 조사된 총 에너지가 증가할수록 지수함수의 형태로 증가하여 증가폭이 감소되고 있음을 알 수 있었다. 이는 레이저 조사에 의한 홈 반경의 증가 추이와는 같지만 홈의 깊이 변화 추이와는 다른 것으로 보아 열 영향층을 만들어 내는 주된 메커니즘은 홈을 형성시키는 메커니즘 중 반경을 지배하는 변수로 볼 수 있다.

그림 4-16과 4-17은 조사 펄스 수 40에서 펄스 반복율과 열 영향층의 관계를 나타낸 그래프이다. 두 그래프 모두 펄스 반복율이 높을수록 총 조사 에너지와 무관하게 열 영향층이 작아지는 것으로 보아 열 영향층의 분포는 펄스 조사 간격과 무관하지 않을 것으로 보이며 시료에서의 용융층이 발생되면서 열전달에 관계된 상수들이 변화된 때문이라 생각된다.

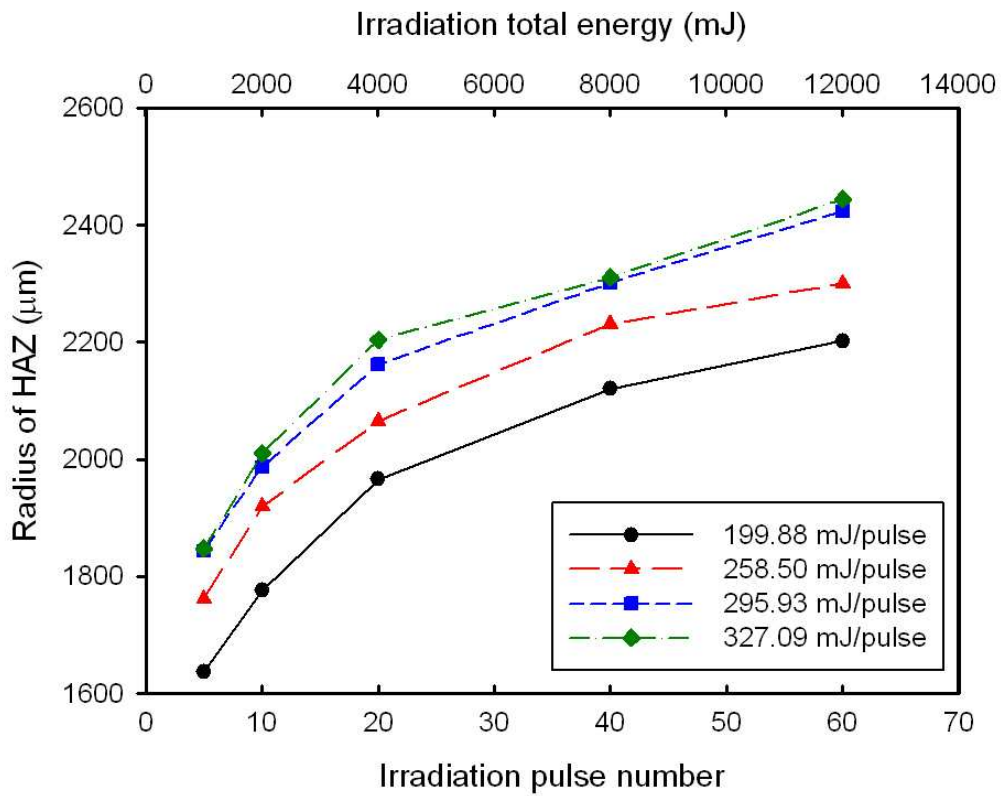


Fig. 4-14. The variation of HAZ on the irradiation number of a laser pulse centered 1064 nm.

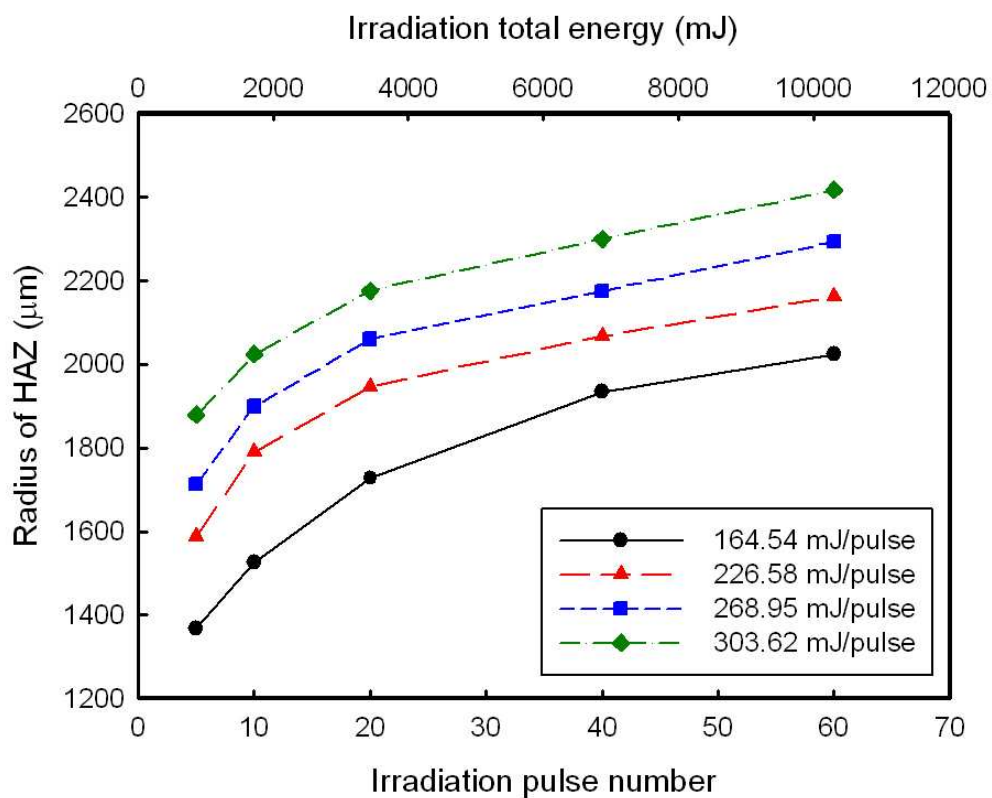


Fig. 4-15. The variation of HAZ on the irradiation number of a laser pulse centered 532 nm.

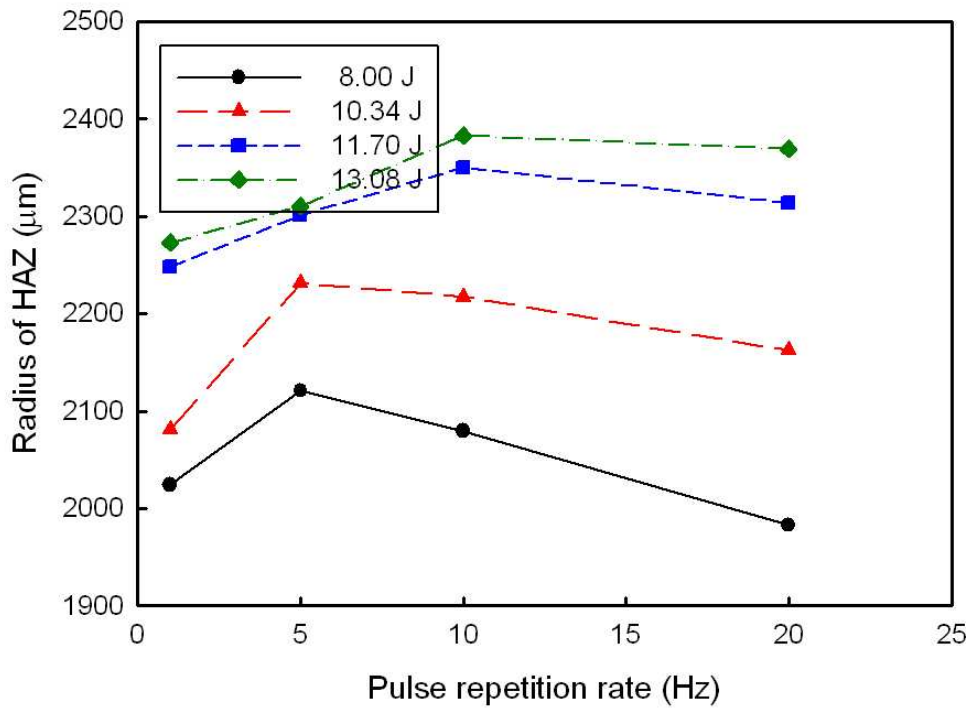


Fig. 4-16. The variation of HAZ on the repetition rate of a laser pulse centered 1064 nm.

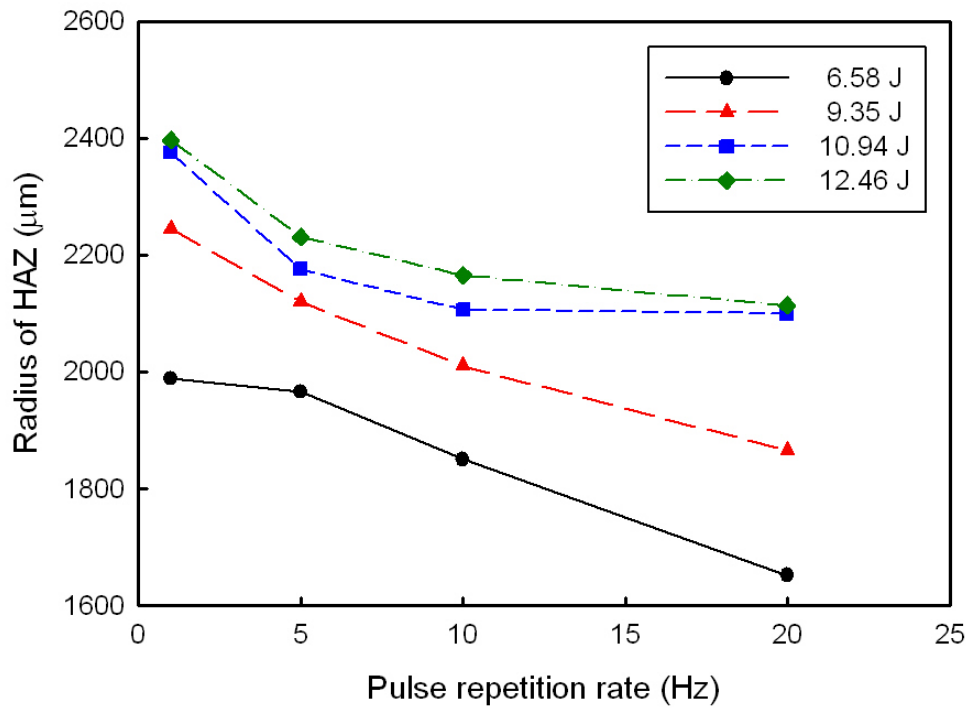


Fig. 4-17. The variation of HAZ on the repetition rate of a laser pulse centered 532 nm.

그림 4-18과 그림 4-19는 그림 4-9부터 그림 4-12까지와 같이 레이저 조사 펄스 수를 총 에너지로 환산하여 펄스 반복율과의 관계로 실험된 전(全) 사건의 경우를 나타낸 그래프로 조사된 기록 레이저의 파장은 각각 1064 nm와 532 nm이다. 1064nm 레이저 조사에 의한 경우 펄스 반복율 1 Hz에서는 열 영향층의 반경이 급격히 일정해 지는 것을 알 수 있었다. 또한 동일한 펄스 반복율 내에서의 규칙성은 지수 함수의 형태로 증가되고 있음을 찾을 수 있었으나 펄스 반복율끼리의 규칙성을 찾아보기 어려웠다. 532 nm 레이저 조사의 경우 열 영향층이 일정해지는 에너지 분포가 조사 반복율에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있을 뿐만 아니라 1064 nm와는 다르게 펄스 반복율끼리의 규칙성 즉, 펄스 반복율이 클수록 열 영향층은 더 작은 값을 나타내는 것을 알 수 있었다.

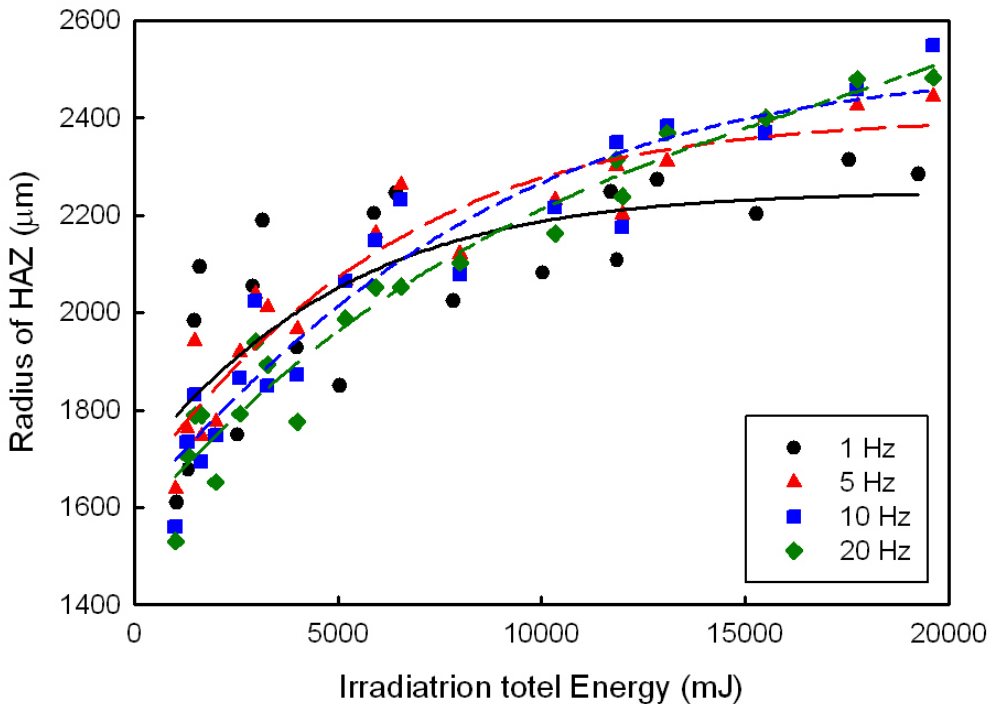


Fig. 4-18. Radius of HAZ formed by 1064 nm laser.

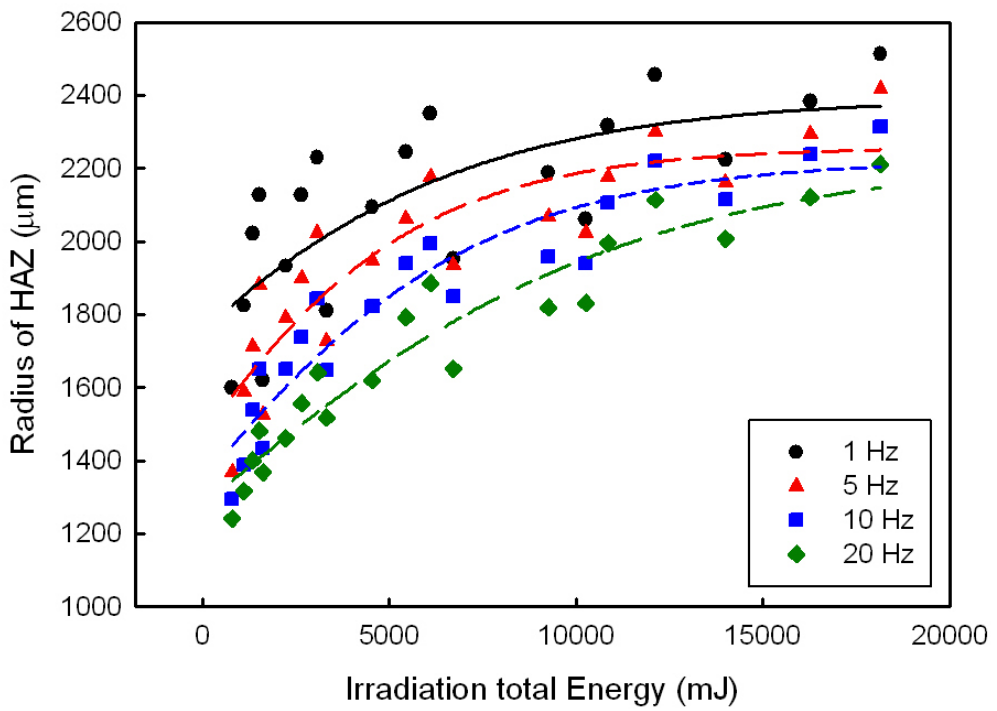


Fig. 4-19. Radius of HAZ formed by 532 nm laser.

레이저 가공에 의한 흠의 형성 및 흠 가장자리에 발생하는 외륜, 열 영향층은 수치해석 프로그램에 의한 가상실험으로 예측할 수 있었다. 그림 4-20과 그림 4-21은 실험에 사용된 수치해석 프로그램인 COMSOL MultiPhysics에 의해 시행된 가상실험 결과와 실험 결과를 비교한 것으로써 흠 반경과 깊이 변화 및 열영향층의 변화를 볼 수 있었으며 이는 실험적 결과와 잘 일치하였다. 여기에서 그림 4-21의 결과 중 실험에 의한 열 영향층의 경계는 광학 현미경에 의해 관측된 시료 표면에서 나타나는 흠 주위의 변색된 부분을 열 영향층의 경계로 설정하였으며 가상실험에 의한 열 영향층의 경계는 유리전이온도로 설정하였다.

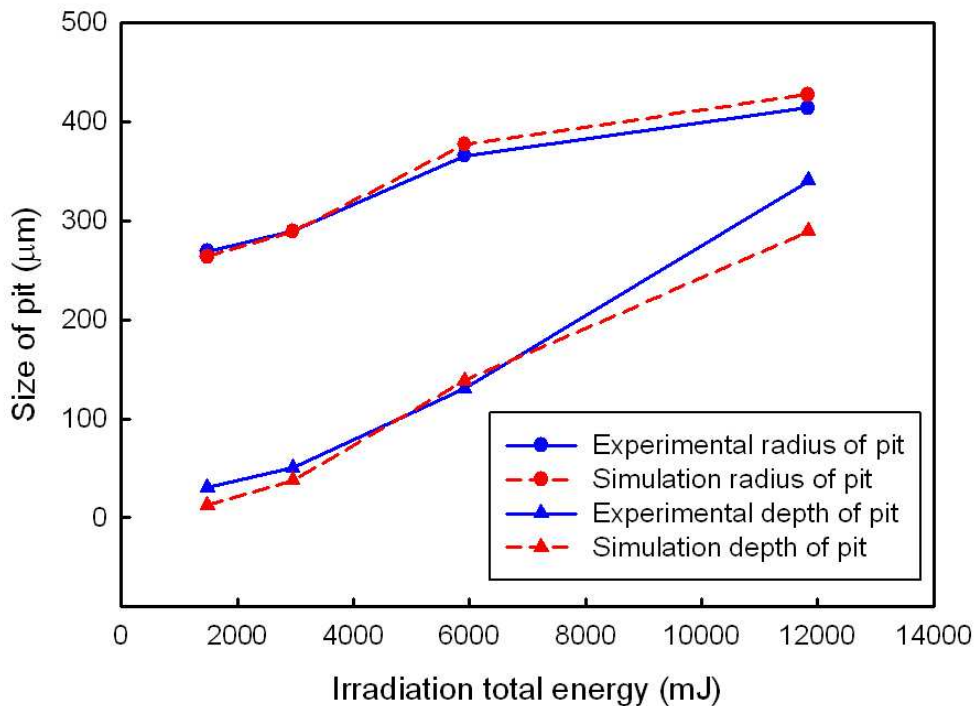


Fig. 4-20. The calculated and measured size of pit; 40 pulse at 20 Hz in repetition rate.

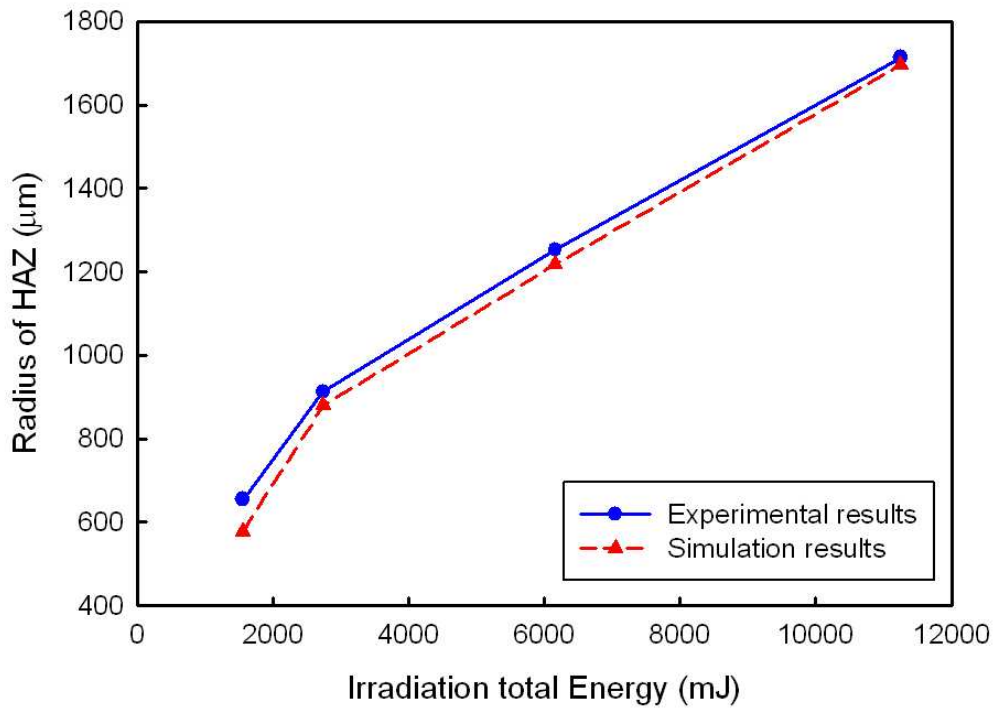


Fig. 4-21. The calculated and measured size of HAZ; 40 pulse at 20 Hz in repetition rate.

제 3 절 나노초 시간 분해 반사율 분석

대다수의 레이저 마킹은 마이크로 이하의 극히 짧은 시간 내에 이루어지기 때문에 레이저 마킹 메커니즘을 해석하기 위해서는 시간분해가 필수적이다. 이러한 시간 분해 해석은 반사율뿐만 아니라 굴절이나 회절, 편광 및 열분석 등이 있으며 굴절이나 회절 및 편광은 열분석과 더불어 시료에 열원을 공급할 때 시료의 특성 변화를 시간적으로 분해하여 해석하는 분야로 널리 적용되고 있고 반사율의 시간 분해 해석의 경우는 열분석과 더불어 메커니즘 해석에 적용되고 있다[57, 58]. 따라서 본 논문에서는 레이저 마킹 메커니즘 과정인 "광학적 흡수", "열 흐름", "미소 질량 운동"의 세 과정을 레이저 마킹시 변화되는 시료 표면의 반사율을 나노초 단위의 시간적인 분해 과정을 거쳐 실시간으로 모니터링하여 해석하고자 하였다.

시간 분해 반사율의 측정은 레이저가 시료에 조사된 직후 최초의 흡을 형성할 때 측정하게 되는데 이는 두 번째 이상의 펄스부터는 형성된 흡의 내부로 레이저가 조사되어 흡의 경계에서 다중 난반사를 일으켜 일정한 반사율 변화를 예측하기 어렵기 때문이다.

그림 4-22는 시료에 기록 레이저를 조사하여 최초의 흡이 생성될 때 발생하는 반사율 변화를 632.8 nm의 He-Ne 레이저를 조사하여 광검출기로 수광한 것으로 상대적으로 파장이 짧은 532 nm 레이저에 의한 반사율 변화가 큰 것을 알 수가 있다. 이는 보다 짧은 파장에 의한 시료의 가공 상태가 상대적으로 빠르게 변화됨을 짐작할 수 있다.

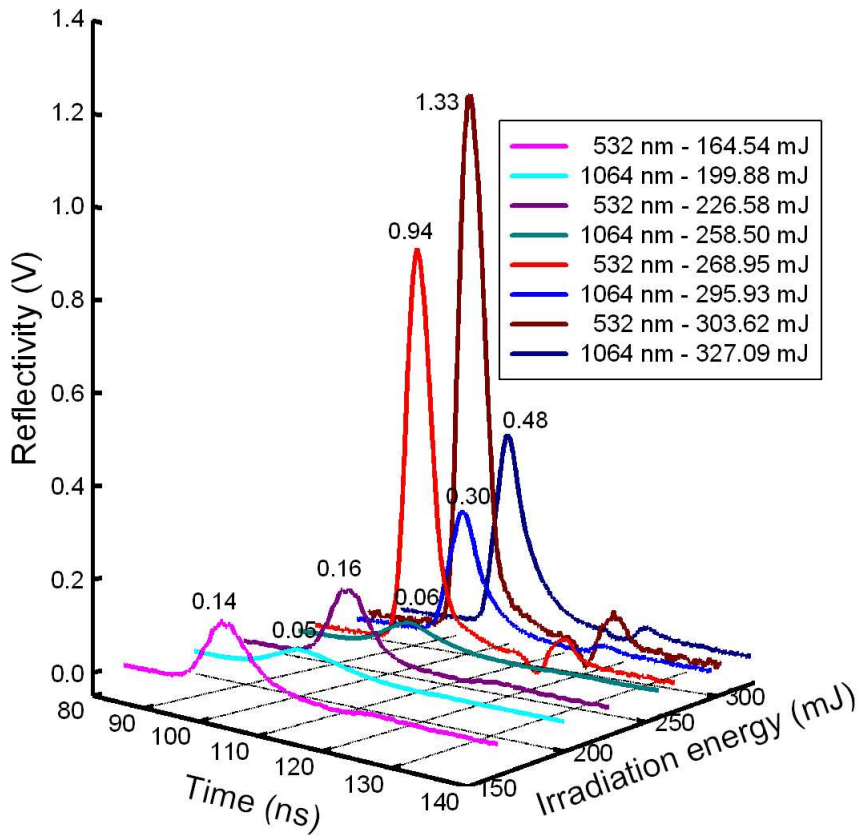


Fig. 4-22. Time resolved reflectivity by irradiation of recording laser.

그림 4-23은 그림 4-22의 1064 nm 파장에 의한 시료 가공시 발생되는 반사율 변화를 선택하여 규격화 한 것으로 에너지에 독립적으로 반사율 변화가 발생됨을 알 수 있으며 반사율 변화가 시작된 후 약 6 ns 이후 반사율이 최대가 됨을 알 수 있었다. 이후 약 15~20 ns 후에 반사율 변화가 없음을 알 수 있었고 따라서 흠의 형성은 레이저가 조사된 후 25 ns 이내에 이루어짐을 알 수 있었다. 그러나 상대적으로 높은 에너지 즉, 250 mJ 이상에서는 반사율 변화가 끝나고 약 5 ns 후에 또 다른 반응을 보이고 있었다. 이러한 반응은 앞에서 기술한 두 모델의 마지막 메커니즘 단계인 반충압력이나 냉각 수축 과정에 의한 외륜 형성 과정으로 설명할 수 있으며 이는 저(低) 에너지에서 외륜 발생이 없는 OCT 이미지와 잘 결부되고 있다.

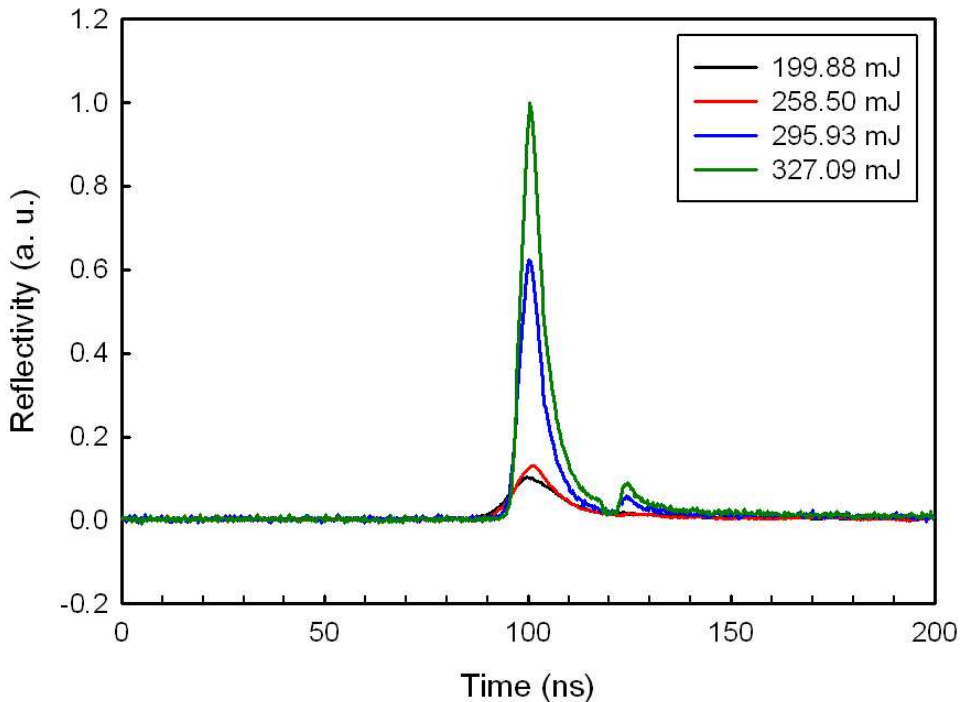


Fig. 4-23. Time resolved reflectivity by irradiation of 1064 nm laser.

그림 4-24는 시료에 532 nm 레이저를 조사한 후 그림 4-23의 측정방법과 같이 측정된 후 규격화한 것이다. 532 nm 레이저에 의한 마킹 역시 에너지에 독립적으로 반사율 변화가 발생되고 있음을 볼 수 있으나 그림 4-23과는 달리 약 4 ns 이후 반사율이 최대가 됨을 볼 수 있으며 이후 약 10 ns 후에 반사율 변화가 없음을 볼 수 있었다. 따라서 흠의 형성이 1064 nm 레이저 조사와는 다르게 약 15 ns 이내에 이루어짐을 알 수 있다. 그림 4-23과 마찬가지로 상대적으로 높은 에너지 즉, 250 mJ 이상에서는 반사율 변화가 끝나고 약 10 ns 후에 또 다른 반응을 보이고 있다. 그림 4-23과 비교해 약 5 ns 시간 지연이 있으며 두 번째 반응을 보이는 시간은 동일한 시간에서 보이고 있다. 이 역시 앞에서 기술된 흠 형성의 마지막 메커니즘 단계에 기인하는 외륜 형성과정으로 볼 수 있으며 OCT 이미지와 잘 결부된다.

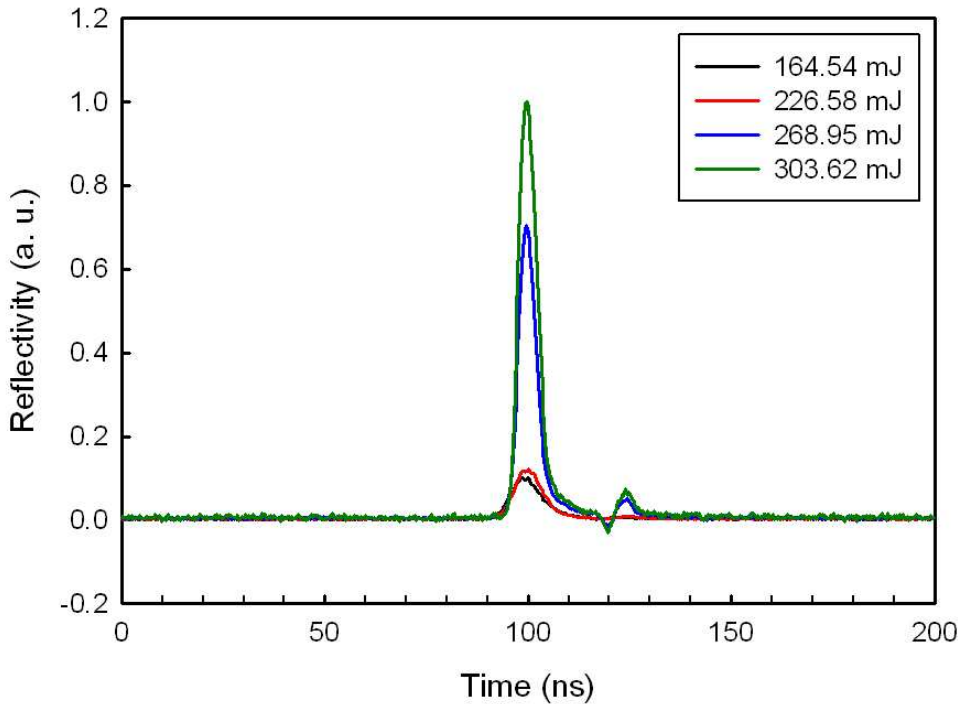


Fig. 4-24. Time resolved reflectivity by irradiation of 532 nm laser.

그림 4-25에서 기록 레이저 조사 이후 시료에서의 반사율 변화의 반응 시간을 살펴보면 변화가 시작된 후 1064 nm와 532 nm에 의한 가공은 각각 약 6 ns와 4 ns 동안 반사율이 증가하는 것을 볼 수 있는데 이러한 지연 시간은 흠 형성의 초기 메커니즘 현상으로 시료의 표면에서 증배가 형성되는 시간으로 볼 수 있다. 이후 각각 6 ns와 5 ns의 반치폭을 보이며 반사율 변화가 일어남을 볼 수 있는데 이는 표면 장력 또는 측면 압력에 의해 흠이 형성되어지는 과정으로 볼 수 있다. 반사율 변화를 일으키기 시작하는 시간은 파장별로 약간의 시간 지연은 있으나 반사율 변화가 시작된 이후 약 30 ns 이후 외륜 형성으로 추정되는 마지막 기작을 일으키는 시간은 시료 가공 파장에 독립적으로 발생하는 것으로 보인다. 그러나 이는 상대적으로 조사 에너지가 높은 영역에서 마지막 기작이 보였으며 에너지가 낮은 영역 즉, 250 mJ 이하에서는 이러한 마지막 기작과 같은 현상은 보이지 않았다.

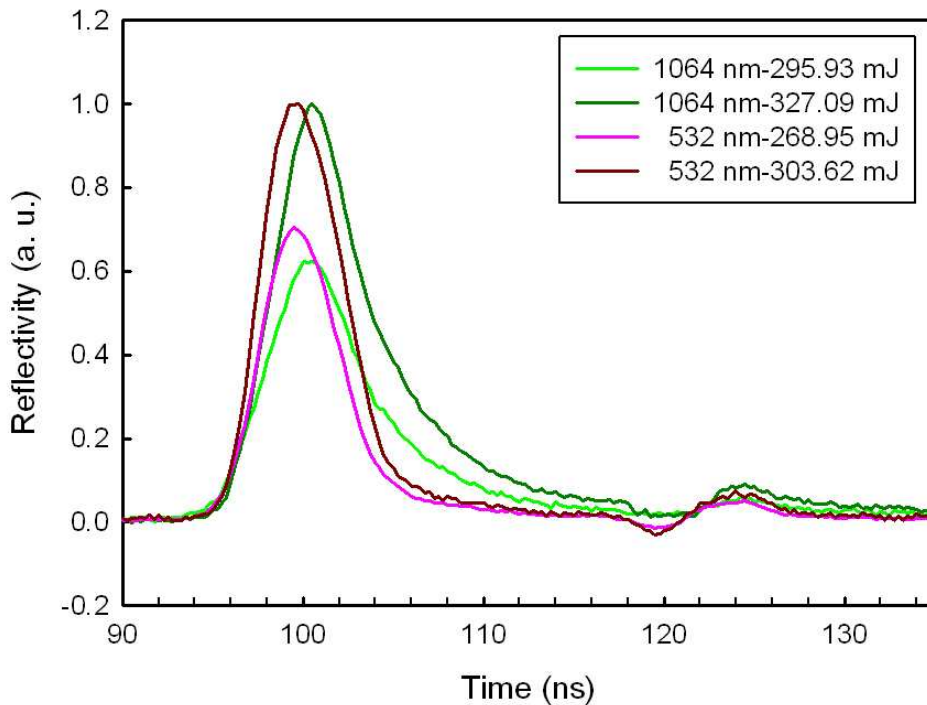


Fig. 4-25. Delay time of reflectivity depending on wavelength.

제 5 장 결 론

금속 시료의 열처리 과정에 주로 적용되어온 열전달 분포 해석과는 다르게 본 논문에서는 열에 민감한 범용 ABS 플라스틱을 시료로 사용하여 레이저 마킹 과정에서 발생하는 흠의 형성 메커니즘과 열전달 분포 해석에 관하여 연구하였다.

열전달 미분 방정식에 기초한 수치해석적 결과는 열원이 공급된 후 약 5 ns 이내에 증배가 형성되고 있음을 보였으며, 10 ns까지는 흠의 형성과정만 보일뿐 외륜 형성 과정은 보이지 않았다. 20 ns 이후부터 외륜이 형성되기 시작하여 30 ns에 뚜렷한 외륜의 형성을 보이며 미소하지만 흠 반경의 증가가 있었다. 이후에는 흠 반경의 증가는 없이 깊이 방향으로의 흠 형성만 이루어졌다. 이는 파장과 조사 펄스 수 및 펄스 반복율을 조절하며 분석된 실험적 결과와는 달리 단지 열속으로써의 열원만을 공급하며 해석된 수치해석적 결과이지만 실험적 결과와 잘 일치함을 볼 수 있었으며 이러한 결과는 시료의 가공 이전에 수치해석을 통한 가상 실험을 시행함으로써 시간 변화에 따른 시료의 가공 형태를 미리 예측할 수 있으며 시료 내에서의 열전달을 예측해 레이저 가공에 의한 시료의 왜곡 현상을 최소화시킬 수 있다.

레이저 마킹 실험에 사용된 레이저의 변수는 펄스형의 532 nm 레이저와 1064 nm 레이저를 펄스 반복율 1, 5, 10 및 20 Hz로, 펄스 수를 5, 10, 20, 40 및 60 펄스로 조절하여 총 조사 에너지를 조절하여 ABS 시료에 조사하였으며 이를 광학 현미경과 OCT를 사용한 비절개적인 방법으로 가공된 흠과 열 영향층을 관측하였다. 관측된 결과는 아래와 같이 각 파장에 따라 3가지 변수를 두고 분석하였다.

1. 기록 레이저에 의해 형성된 흠의 반경

a) 펄스 반복율을 일정하게 한 후 조사 펄스 수와의 관계

- 532 nm : 선형적 증가

- 1064 nm : 로그함수로 증가
- b) 조사 펄스 수를 일정하게 한 후 펄스 반복율과의 관계
 - 532 nm : 선형적 증가
 - 1064 nm : 총 조사 에너지 10 J 이하에서는 증가 후 일정, 10 J 이상에서는 지수함수로 감소
- c) 펄스 반복율과 조사 펄스 수와의 관계
 - 532 nm : 총 조사에너지 증가에 따라 지수함로 증가, 펄스 반복율이 증가할수록 로그함수의 형태에서 선형적인 증가로 변화
 - 1064 nm : 펄스 반복율이 증가할수록 선형적 증가

2. 기록 레이저에 의해 형성된 흠의 깊이

- a) 펄스 반복율을 일정하게 한 후 조사 펄스 수와의 관계
 - 532 nm : 단위 펄스당의 에너지가 증가할수록 선형적 증가에서 지수함수로 증가
 - 1064 nm : 선형적 증가
- b) 조사 펄스 수를 일정하게 한 후 펄스 반복율과의 관계
 - 532 nm : 지수함수로 감소
 - 1064 nm : 조사 에너지간의 관계를 찾아 볼 수 없으며 5 Hz에서 급격히 줄었다가 증가
- c) 펄스 반복율과 조사 펄스 수와의 관계
 - 532 nm : 20 Hz를 제외하고 지수함수로 증가, 상대적으로 낮은 펄스 반복율에서 더 깊은 정보를 나타냄.
 - 1064 nm : 1 Hz에서는 특성을 찾아볼 수 없으며 펄스 반복율이 증가할수록 선형적으로 변화

3. 기록 레이저에 의해 형성된 열 영향층

- a) 펄스 반복율을 일정하게 한 후 조사 펄스 수와의 관계

- 532 nm : 로그함수로 증가
- 1064 nm : 로그함수로 증가
- b) 조사 펄스 수를 일정하게 한 후 펄스 반복율과의 관계
 - 532 nm : 지수함수로 감소
 - 1064 nm : 증가 후 감소
- c) 펄스 반복율과 조사 펄스 수와의 관계
 - 532 nm : 로그함수로 증가, 펄스 반복율이 높은수록 HAZ의 영역은 작아짐
 - 1064 nm : 로그함수로 증가, 상대적으로 낮은 조사 에너지에서는 펄스 반복율이 낮을수록 영역이 증가하지만 조사 에너지가 증가할수록 상황 반전

각 파장에 따른 홈의 반경 및 깊이, 열 영향층의 변화 추이를 볼 때 상대적으로 파장이 짧은 532 nm 레이저 조사에 의해 형성된 홈의 경우는 깊이 방향과 측면 방향으로의 열전달이 비슷하게 이루어진 반면 1064 nm 레이저 조사에 의해 형성된 홈의 경우는 측면으로의 열전달 보다 깊이 방향으로의 열전달이 빠르게 이루어지고 있음을 결론지을 수 있다.

열 영향층의 경우 그 영역이 총 조사 에너지와 비례 관계를 보이고 있음을 알 수 있는데, 532 nm 레이저 조사에 의해 형성된 홈 주위의 열 영향층은 총 조사 에너지와는 무관하게 펄스 반복율과 역비례함을 알 수 있으며, 1064 nm 레이저 조사에 의해 형성된 열 영향층의 경우 상대적으로 낮은 총 조사 에너지에서는 펄스 반복율과 역비례하지만 총 조사 에너지가 증가할수록 상황은 반전됨을 알 수 있다.

레이저 조사에 의한 홈 형성 메커니즘을 분석하기 위한 또 다른 방법으로 본 논문에서 제시하였던 시간분해 반사율 측정은 시료에 홈을 형성시키기 위한 기록 레이저로 하나의 펄스만을 조사하였으며 이와 동시에 632.8 nm의 He-Ne 레이저를 검침자로 사용하여 광 검출기로 수광한 후 이를 디지털 오실로스코프로 분석하였다. 532 nm 레이저 가공과 1064 nm 레이저 가공시 변화되는 반사율의 크기는 최대

약 3배의 차이를 보이며 532 nm 레이저 가공에 의한 반사율 값이 상대적으로 크게 나타남을 보였다. 이는 보다 짧은 파장에 의한 가공이 시료의 상태 변화를 크게 일으키고 있음을 알 수 있다. 또한 532 nm 레이저 가공과 1064 nm 레이저 가공에 의한 반사율의 변화가 기록 레이저가 조사된 직후 각각 4 ns와 6 ns 이후 최대의 반사율 변화를 일으키며 이후 각각 15 ns와 20 ns 동안 반사율 변화를 일으키는 것으로 보아 532 nm 레이저 가공에서는 약 20 ns 동안, 1064 nm 레이저 가공에서는 25 ns 동안 흠 형성 기작의 대부분이 발생됨을 알 수 있으며 서로 약 5 ns의 시간차를 두로 흠 형성 기작의 변화를 보이고 있다. 조사된 레이저의 파장에 관계없이 250 mJ 이상의 에너지를 조사하게 되면 반사율 변화가 끝난 직후 각각의 파장에 따라 5 ns와 10 ns 후에 또 다른 기작을 보이고 있는데 기록 레이저가 조사되고 30 ns 후로 조사된 레이저 파장에 관계없이 동일한 시간 간격을 두고 발생하고 있다. 이는 열전달 분포 가상 실험에서 보였던 실험과 동일한 시간 간격을 보이고 있다. 따라서 이러한 현상을 흠 형성 기작의 마지막 단계로 단정되었으며, 250 mJ 이하에서는 동일한 현상이 발생되지 않는 것으로 보아 외륜 형성의 기작으로 결론지어지며 반사율 변화가 끝난 후 특정 에너지 이상의 레이저를 조사할 경우에만 시간 지연을 두고 발생하는 것으로 보아 저출력의 레이저 조사에 의해서 발생하는 흠과 외륜의 주된 기작은 냉각에 의한 수축작용으로 해석되어지며 상대적으로 높은 출력에 의해 발생하는 흠과 외륜의 주된 기작은 에블레이션에 기인한 반충 압력으로 해석되어진다.

본 논문은 펄스형 레이저를 조사함으로써 발생하는 흠과 외륜 및 열 영향층의 형성 메커니즘을 해석하고자 하는 연구로서 열전달 미분 방정식의 수치해석적 가상 실험과 나노초 단위의 시간분해 반사율 측정 실험을 병행하였다. 형성된 흠의 반경과 깊이 및 열영향층에 있어서는 수치해석적 가상실험 결과와 실험 측정 결과가 일치하였음을 보였다. 그러나 열 영향층의 경계 설정에 있어서는 SEM이나 고분해능 OCT와 같은 시료의 조직 변화까지 판별할 수 있는 영상과 시료의 각 지점에서의 온도 측정이 가능한 방법 등을 통해 열 영향층의 경계에 대해 정확히 논의

하여 경계를 설정할 필요가 있으며 시료의 소실이나 왜곡이 없는 절단 방법을 고려해 깊이 방향으로의 흠 정보와 열 영향층의 변화 추이도 논의할 필요가 있다. 또한 본 논문에서 제외시켰던 자외선 영역의 파장을 사용한 실험적 결과를 도출하여 흠의 반경과 깊이 정보 및 열 영향층의 정보를 본 논문의 정보와 비교 분석한다면 레이저 조사에 의한 가공 및 열전달 해석의 기준이 마련되리라 여겨진다.

참고문헌

- [1] W. W. Duley, 『*Laser Processing and Analysis of Materials*』, Plenum Press, 1983, pp. 171-176, 85-104.
- [2] 송순달, 『레이저의 기초 원리와 응용』, 청문각, 2001, p. 160, 181-188.
- [3] S. Ameer-Beg, W. Perrie, S. Rathbone, J. Wright, W. Weaver, H. Champoux, "*Femtosecond laser microstructuring of materials*", Applied Surface Science vol. 127, no. 129, 1998, pp. 127-129.
- [4] Pascale Rudolph, Klaus-Werner Brzezinka, Rolf Wasche, Wolfgang Kautek, "*Physical chemistry of the femtosecond and nanosecond laser-material interaction with SiC and a SiC-TiC-TiB₂ composite ceramic compound*", Applied Surface Science, vol. 209, no. 209, 2003, pp. 285-291.
- [5] S Mishra and T DebRoy, "*A computational procedure for finding multiple solutions of convective heat transfer equations*", Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 38, 2005, pp. 2977-2985.
- [6] F. B. Hsiao, C. P. Jen, D. B. Wang, C. H. Chuang, Y. C. Lee, C. P. Liu, H. J. Hsu, "*An analytical modeling of heat transfer for laser-assisted nanoimprinting processes*", Comput Mech, vol. 37, 2006, pp. 173-174.
- [7] C. W. Lee, M. K. Ko, S. L. Woo, H. W. Oh, S. J. Gho, and J. Y. Lee, "*Comparison of the stress between rapid thermal annealed and excimer*

- laser annealed polycrystalline silicon thin films*", Solid State Communications, vol. 105, no. 12, 1998, pp. 777-781.
- [8] A. Pecora, L. Mariucci, R. Carluccio, G. Fortunato, P. Legagneux, F. Plais, C. Reita, D. Pribat, "*Combined Solid phase crystallization and excimer laser annealing process for polysilicon thin-film transistors*", Phys. Stat. Sol, vol. 166, 1998, pp. 707-714.
- [9] M. Rozniakowska, A. A. Yevtushenko, "*The effect of the time structure of laser pulse on the temperature distribution in homogeneous body with coating*", Heat Mass Transfer, vol. 43, 2007, pp. 439-447.
- [10] J. C. Conde, F. Lusquinos, P. Gonzalea, B. Leon, and Perez-Amor, "*Temperature distribution in laser marking*", Journal of Laser Applications, vol. 13, No. 3, 2001, pp. 105-106.
- [11] M. Lax, "*Temperature rise induced by a laser beam*", Journal of Applied Physics, vol. 48, no. 9, 1977. pp. 3913-3924.
- [12] Brian Josef Bartholomeusz, "*Thermal response of a laser-irradiated metal slab*", Journal of Applied Physics, vol. 64, no. 8, 1988, p. 3815.
- [13] Brian Josef Bartholomeusz, "*Thermomagnetic marking of rare-earth-transition-metal thin films*", Journal of Applied Physics, vol. 65, no. 1, 1989.
- [14] G. Allcock, P. E. Dyer, G. Elliner, and H. V. Snelling, "*Experimental*

- observations and analysis of CO₂ laser-induced microcracking of glass*", Journal of Applied Physics, vol. 78, no. 12, 1995, pp. 7295-7296.
- [15] C. Garrido, B. Leon and M. Perez-Amor, "*A model to calculate the temperature induced by a laser*", Journal of Applied Physics, vol. 69, no. 3, 1991, pp. 1133-1140.
- [16] 김영섭, 박소희, 신용진, 김태훈, "나노초 시간분해 반사도 측정과 OCT 이미지에 의한 레이저 마킹 메커니즘 분석", 새물리, vol. 52, no. 2, 2006, p. 169.
- [17] 김영섭, 신용진, 정광현, 양경승, "CO₂ 및 Nd:YAG 레이저에 의한 ABS 플라스틱 흠 형성", 새물리, vol. 44, no. 6, 2002, p. 305.
- [18] Taeyoung Choi, Tom D. Milster, "*Change in data marks and groove structures of compact recordable disks in response to a high power laser beam*", Optical Engineering, vol. 45, no. 6, 2006, pp. 064302-1-064302-4.
- [19] J. Wilson, J. F. B. Hawkes, 『*Lasers Principles and Applications*』, Prentice Hal, pp. 197-199.
- [20] 김기준, 이종선, 성기천, 양재웅, 이후설, 『레이저 원리 및 활용』, 대영사, pp. 149-160.
- [21] A kind of numeral analysis, <http://www.kongkankorea.com/RND/report/data/al.doc>.
- [22] Analsys method, http://altair.chonnam.ac.kr/~rocks/tunnel_safe.htm

- [23] J. M. Amado, M. J Tabar, A. Ramil, A. Yanez, "*Application of the Laplace transform dual reciprocity boundary element method in the modelling of laser heta transfer*", Engineering Analysis with Boundary Elenents, Vol. 29, 2005, pp. 126-135.
- [24] 김지용, 『유한요소해석 입문과 선형해석』, 도서출판계림, 2005, pp. 25-26, p. 8.
- [25] 류창하, 『수치해석적 방법의 발파설계 적용 및 문제점 고찰』, 한국지질자원연구원.
- [26] John C. Tannehill, Dale A. Anderson, Richard H. Pletcher, 『*Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*』, Taylor & Francis, 1984, pp. 46-55.
- [27] Gianni Comini, Stefano Del Giudice, Carlo Nonino, 『*Finite Element Analysis in Heat Transfer*』, Taylor & Francis, 1994, pp. 120-121.
- [28] J. N. Reddy, D. K. Gartling, 『*The Finite Element Method in Heat Transfer and Fluid Dynamics*』, CRC Press, 1994, pp. 27-40.
- [29] John David Jackson, 『*Classical Electrodynamics*』, John Wiley & Sons, 1999, p. 79.
- [30] B. S. Yibas and I. Z. Naqvi, "*Laser heating including the phase change process and thermal stress generation in relation to drilling*", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 217, No. 7, 2003, pp. 977-992.

- [31] M. Necati Ozisik, 『*Heat conduction*』, Wiley-Interscience, 1993, pp. 3-6, 214-251.
- [32] Wen T. Cheng and Chung H. Lin, "*Transient mixed convective heat transfer with melting effect from the vertical plate in a liquid saturated porous medium*", International Journal of Engineering Science, 2006, pp. 1-14.
- [33] H. F. Liu, H. M. Liu, and T. T. Tsong, "*Numerical calculation of the temperature distribution and evolution of the field-ion emitter under pulsed and continuous-wave laser irradiation*", Journal of Applied Physics, vol. 59, no. 4, 1986, pp. 1334-1340.
- [34] Roger J. Anderson, "*A method to calculate the laser heating of layered structures*", Journal of Applied Physics, vol. 64, no. 12, 1988, pp. 6639-6645.
- [35] Abdollah Abtahi and Peter F. Braunlich, "*Theory of transient temperature response of a two-layer system heated with a localized laser beam*", Journal of Applied Physics, vol. 60, no. 10, 1986, pp. 3417-3421.
- [36] A. H. M. Holtslag, "*Calculations on temperature profiles in optical recording*", Journal of Applied Physics, vol. 66, no. 4, 1989, pp. 1530-1543.
- [37] J. C. Conde, F. Lusquinos, P. Gonzalez, B. Leon, M. Perez-Amor, "*Temperature distribution in a material heated by laser radiation: modelling and application*", Vacuum, vol. 64, 2002, pp. 359-366.

- [38] Lijun Han, Frank W. Liou and Srinivas Musti, "*Thermal behavior and geometry model of melt pool in laser material process*", Journal of Heat Transfer, Vol. 127, 2005, pp. 1005-1014.
- [39] Bekir S. Yilbas and Muhammad Sami, "*Laser Heating Mechanism Including Evaporation Process-Semiclassical and Kinetic Theory Approaches*", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 34, 1995, pp. 6391-6400.
- [40] V. V. Semak, B. Damkroger and S. Kempka, "*Temporal evolution of the temperature field in the beam interaction zone during laser material processing*" Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 32, 1999, pp. 1819-1825.
- [41] Kurt F. Wissbrum, "*Thermal expansion and flow model for pit formation in laser marking of polymeric film optical disks*", Journal of Applied Physics, vol. 62, no. 3, 1987. pp. 1123-1124.
- [42] J. J. Wrobel, A. B. Marchant, and D. G. Howe, "*Laser marking of thin organic films*", Applied Physics Letter, vol. 40, no. 11, 1982.
- [43] Tai-Shung Chung, "*Pit formation during laser marking of thin organic films*", Journal of Applied Physics, vol. 60, no. 1, 1986. pp. 55-60.
- [44] Hyungson Ki, Pravansu S. Mohanty and Jyoti Mazumder, "*Modeling of laser keyhole welding: Part I. Mathematical modeling, numerical*

- methodology, role of recoil pressure multiple reflections, and free surface evolution*", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 33A, 2002, pp. 1817-1830.
- [45] Hyungson Ki, Pravansu S. Mohanty and Jyoti Mazumder, "*Modeling of laser keyhole welding: Part II. Simulation of keyhole evolution, velocity, temperature profile, and experimental verification*", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 33A, 2002, pp. 1831-1842.
- [46] Toshihiko Ooie, Shinsuke Asada and Isamu Miyamoto, "*Time-resolved measurement of surface displacement in excimer laser ablation of Si*", Proceedings of SPIE, Vol. 5063, 2003, pp. 333-337.
- [47] Mikhail Ivanenko, Martin Werner, Said Afilal, Manfred Klasing and Peter Hering, "*Ablation of hard bone tissue with pulsed CO₂ lasers*", Medical Laser Application, Vol. 20, 2005, pp. 13-23.
- [48] D. von der Linde, K. Sokolowski-Tinten, "*The physical mechanisms of short-pulse laser ablation*", Applied Surface Science, Vol. 154, No. 155, 2000, pp. 1-10.
- [49] V. V. Semak, G. A. Knorovsky, D. D. MacCallum and R. Allen Roach, "*Effect of surface tension on melt pool dynamics during laser pulse interaction*", Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 39, 2006, pp. 590-595.
- [50] 신용진, 『광산업 조사 연구 보고서-의광학 영상진단장비 기술동향조사』, 한

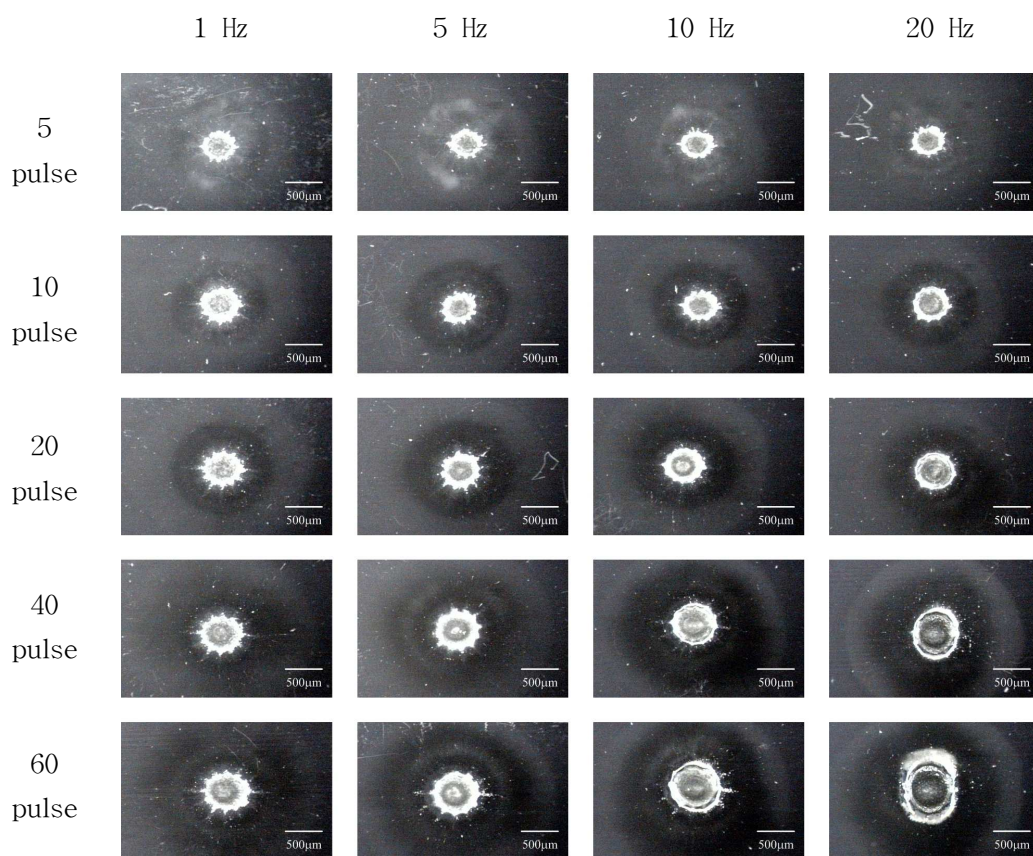
국광산업진흥회(KAPID), 2003, p 28.

- [51] 이병하, 최은서, 엄태중, 김명진, 김호경, 박병혁, 나지훈, Stephane, 조장희, 『위탁기관 최종 연구 개발 보고서-근적외선 광을 이용한 영상진단기 개발』, 광주과학기술원, 2003, p. 2.
- [52] Dennis Derickson, 『*Fiber Optic Test and Measurement*』, HP Company, 1998, pp. 90-91.
- [53] Brett E. Bouma, Guillermo J. Tearney, 『*Handbook of Optical Coherence Tomography*』, Marcel Dekker, 2002, pp. 41-43.
- [54] 김영섭, 『*CO₂ 및 Nd:YAG 레이저에 의한 ABS Plastic에 형성된 흠에 관한 연구*』, 조선대학교 일반대학원 물리학과 석사학위 논문, 2002, p. 20.
- [55] 양해정, 『*3차원 스캐너의 데이터를 이용한 부피 요소생성의 자동화*』, 조선대학교 대학원 물리학과 박사학위 논문, 2003, pp. 7-9.
- [56] Dieter Bauerle, 『*Laser Processing and Chemistry*』, Springer, 2000, p. 6.
- [57] B. S. Yilbas and S. B. Mansoor, "*Laser evaporative heating of surface: simulation of flow field in the laser produced cavity*", Journal of Physics D:Applied Physics, Vol. 39, 2006, pp. 3863-3875.
- [58] J. Martan, O. Cibulka and N. Semmar, "*Nanosecond pulse laser melting investigation by IR radiometry and reflection-based methods*", Applied Surface Science, Vol. 253, 2006, pp. 1170-1177.

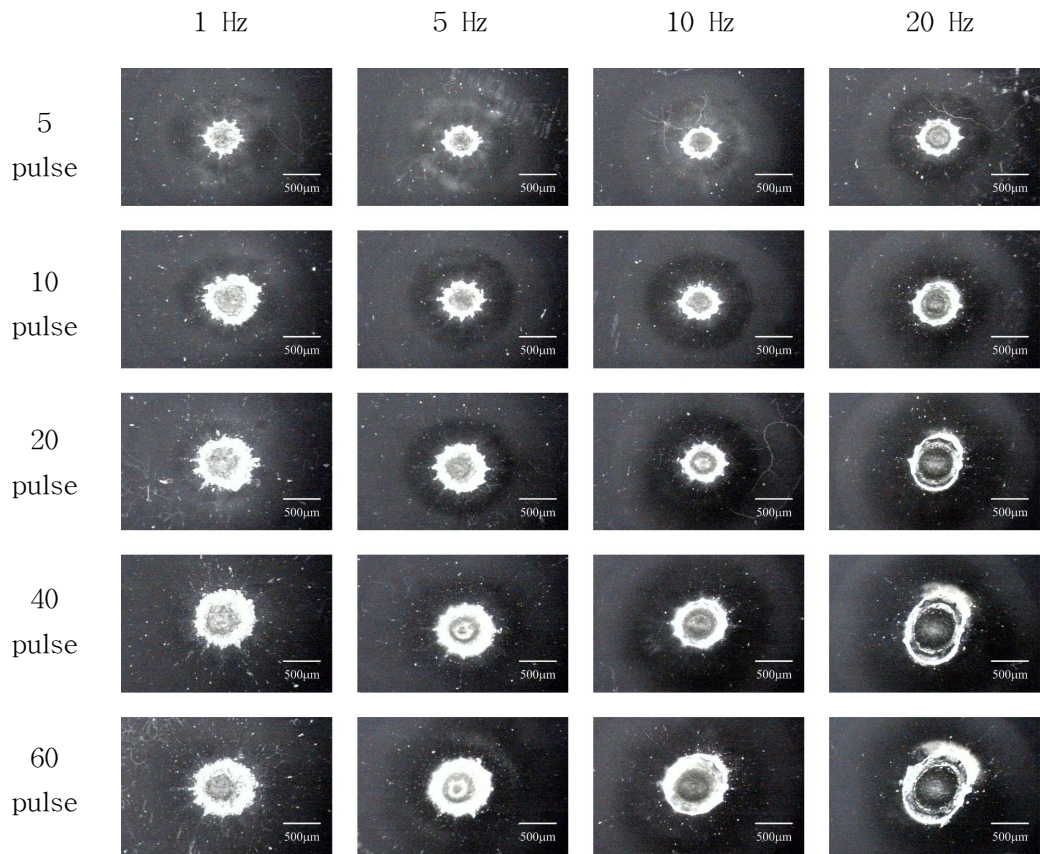
Appendix I.

Microscopy images by 1064 nm laser marking.

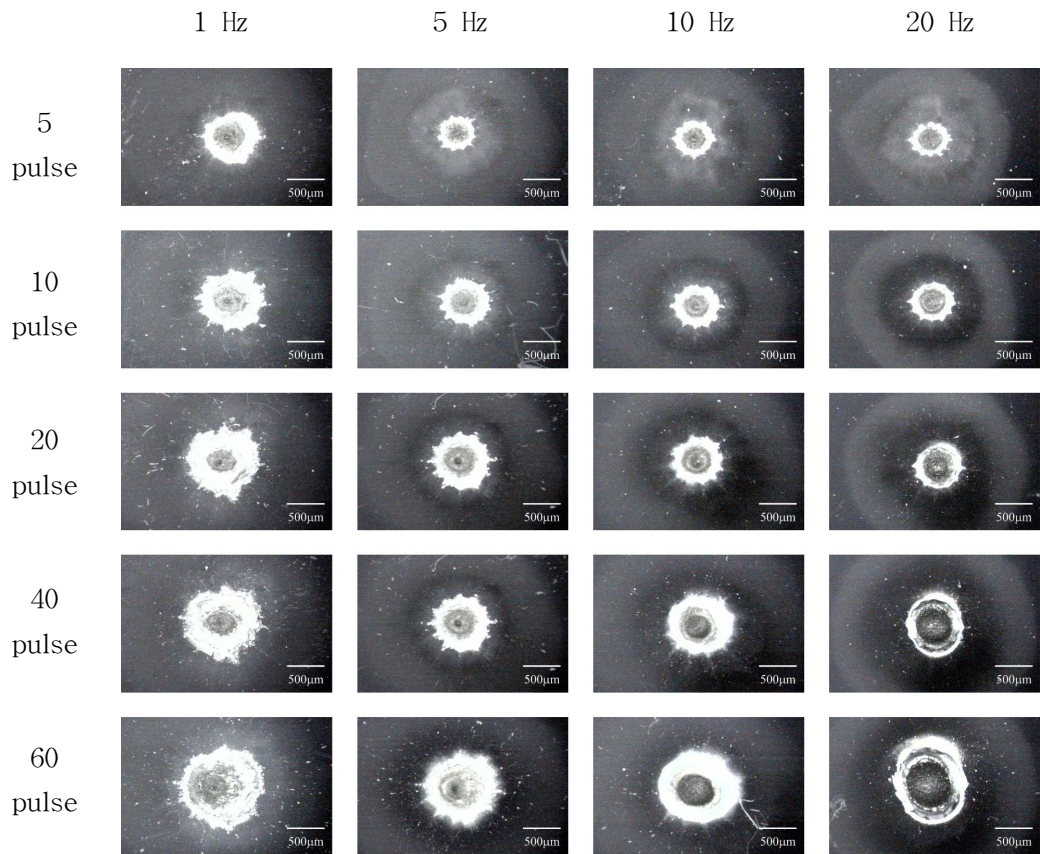
A. Surface of pits by 199.88 mJ/pulse.



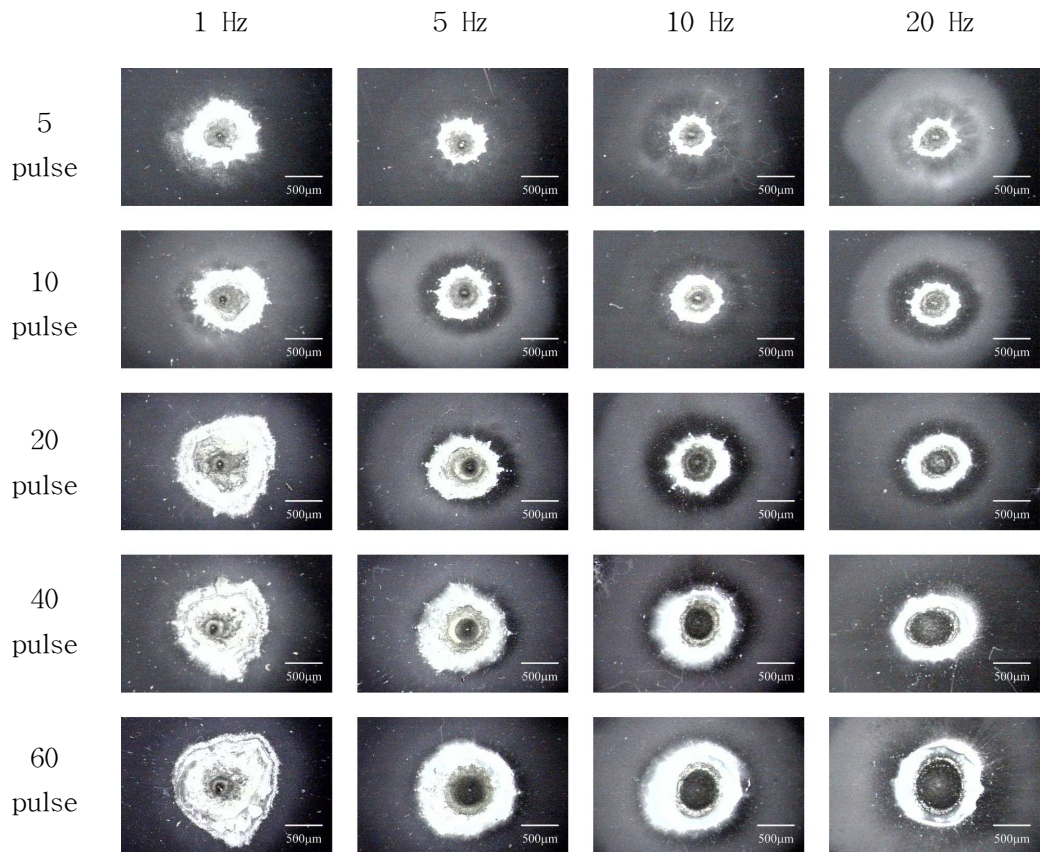
B. Surface of pits by 258.50 mJ/pulse.



C. Surface of pits by 295.93 mJ/pulse.



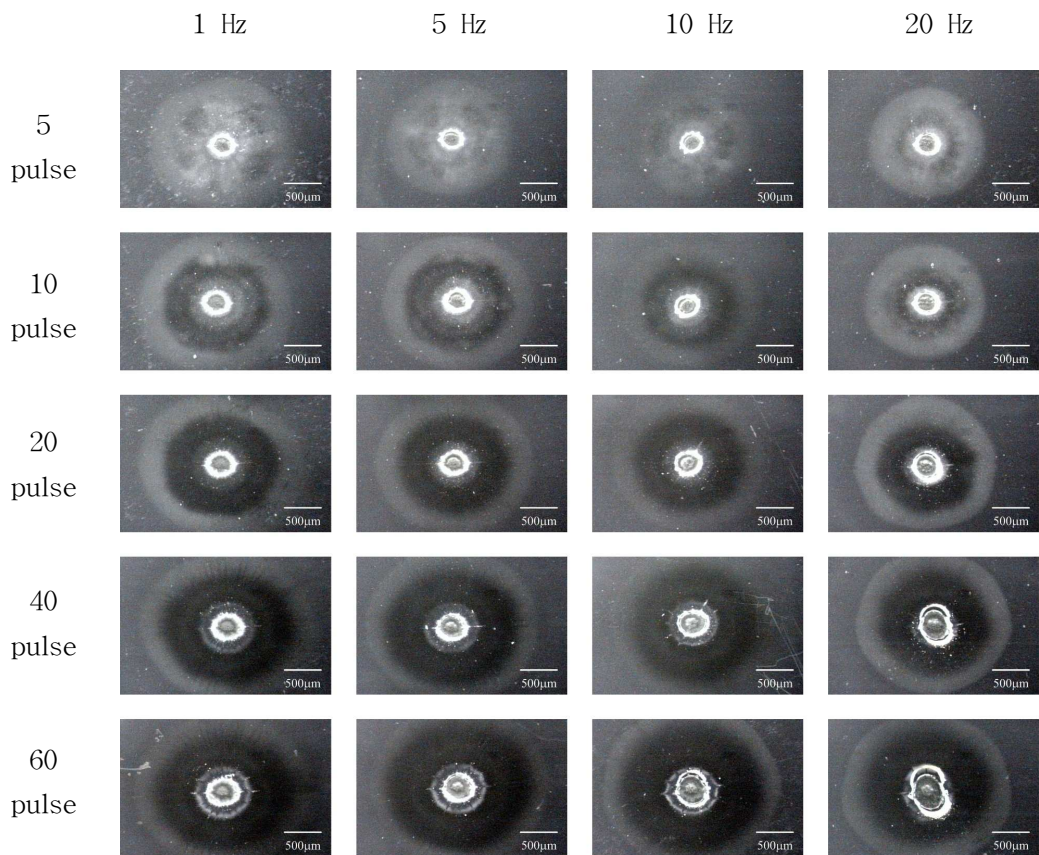
D. Surface of pits by 327.09 mJ/pulse.



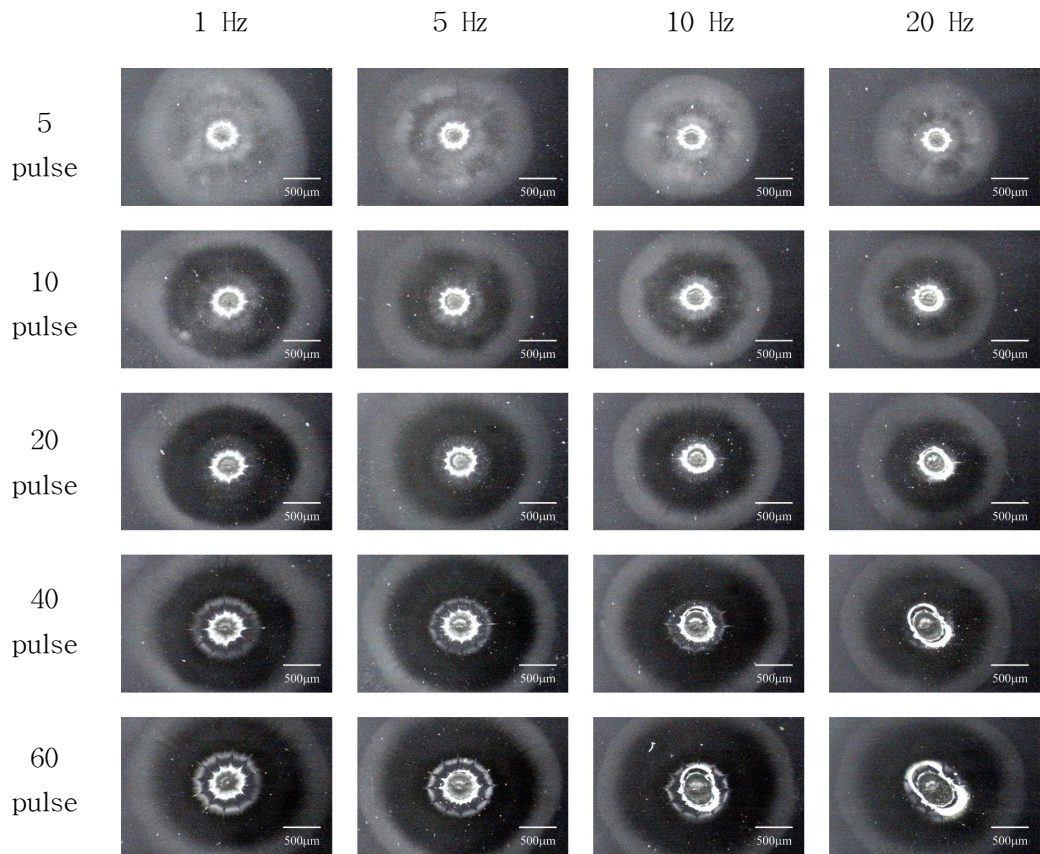
Appendix II.

Microscopy images by 532 nm laser marking.

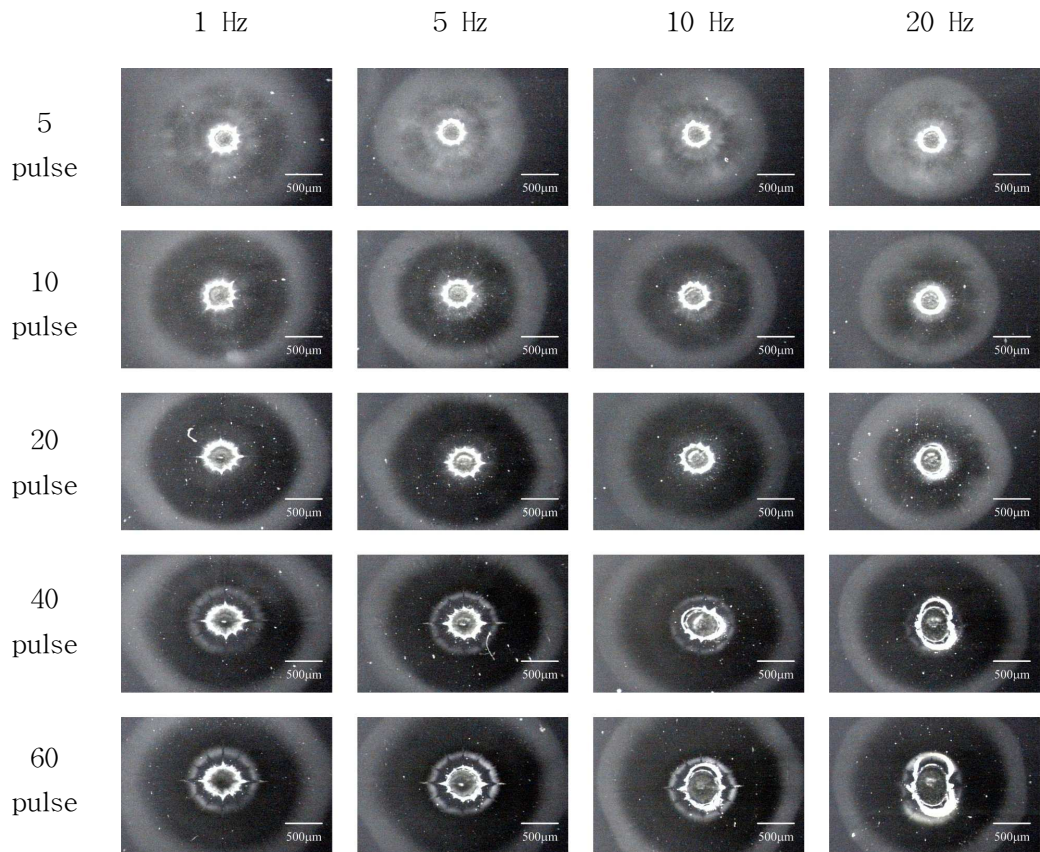
A. Surface of pits by 164.54 mJ/pulse.



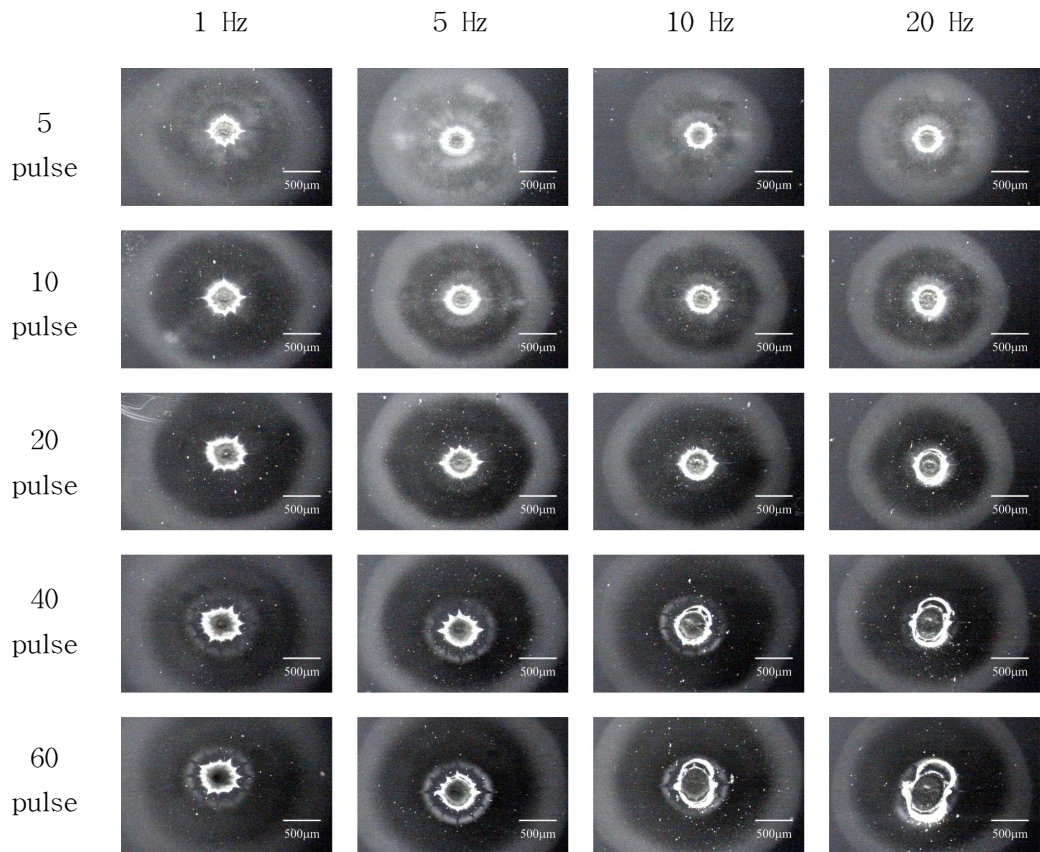
B. Surface of pits by 226.58 mJ/pulse.



C. Surface of pits by 268.95 mJ/pulse.



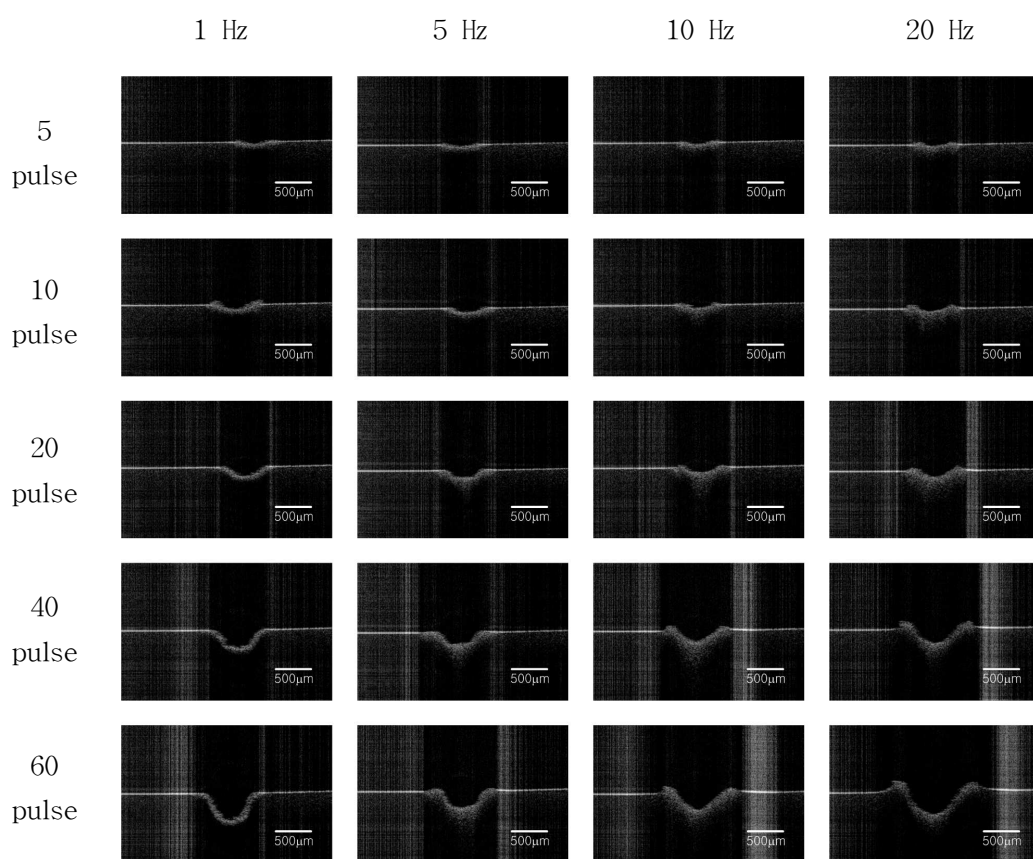
D. Surface of pits by 303.62 mJ/pulse.



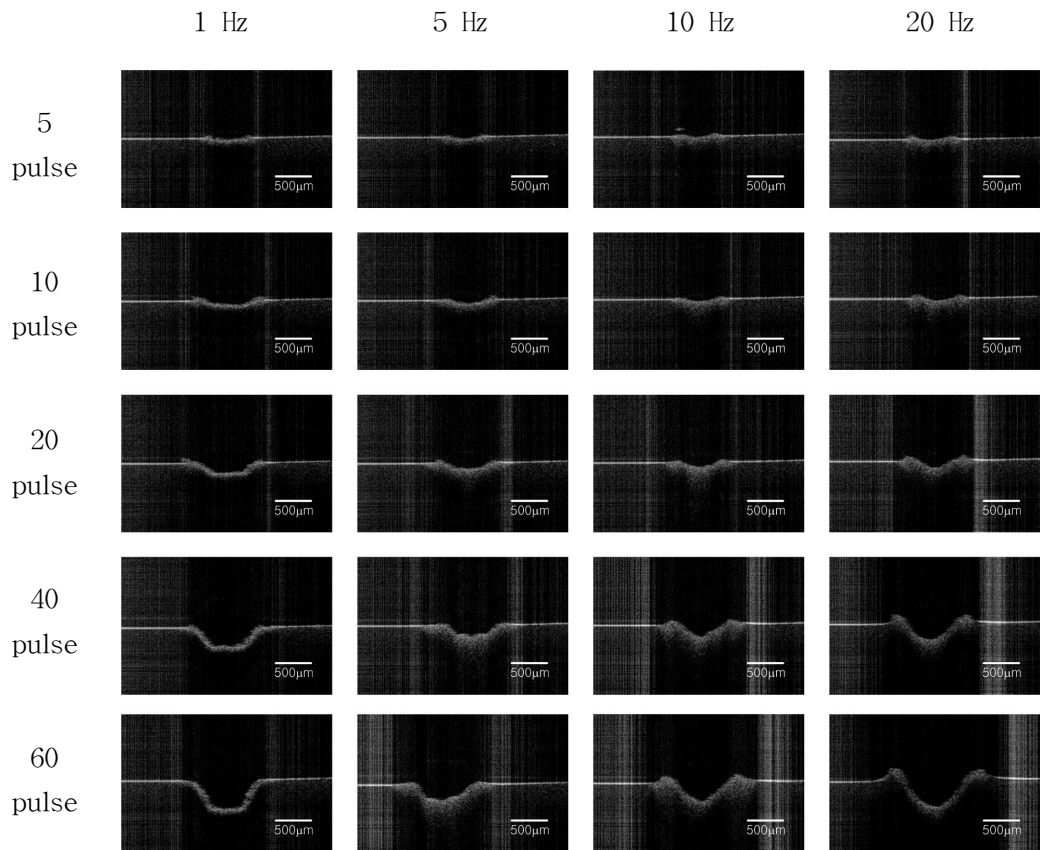
Appendix III.

OCT images by 1064 nm laser marking.

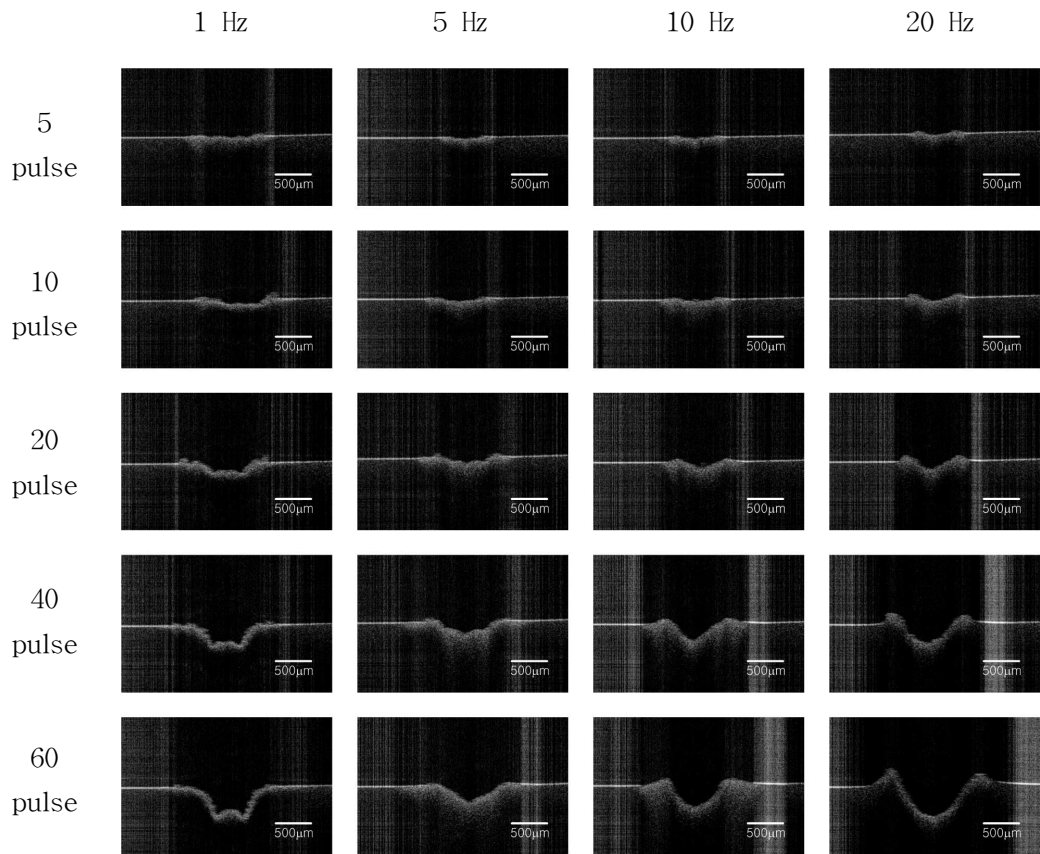
A. Surface of pits by 199.88 mJ/pulse.



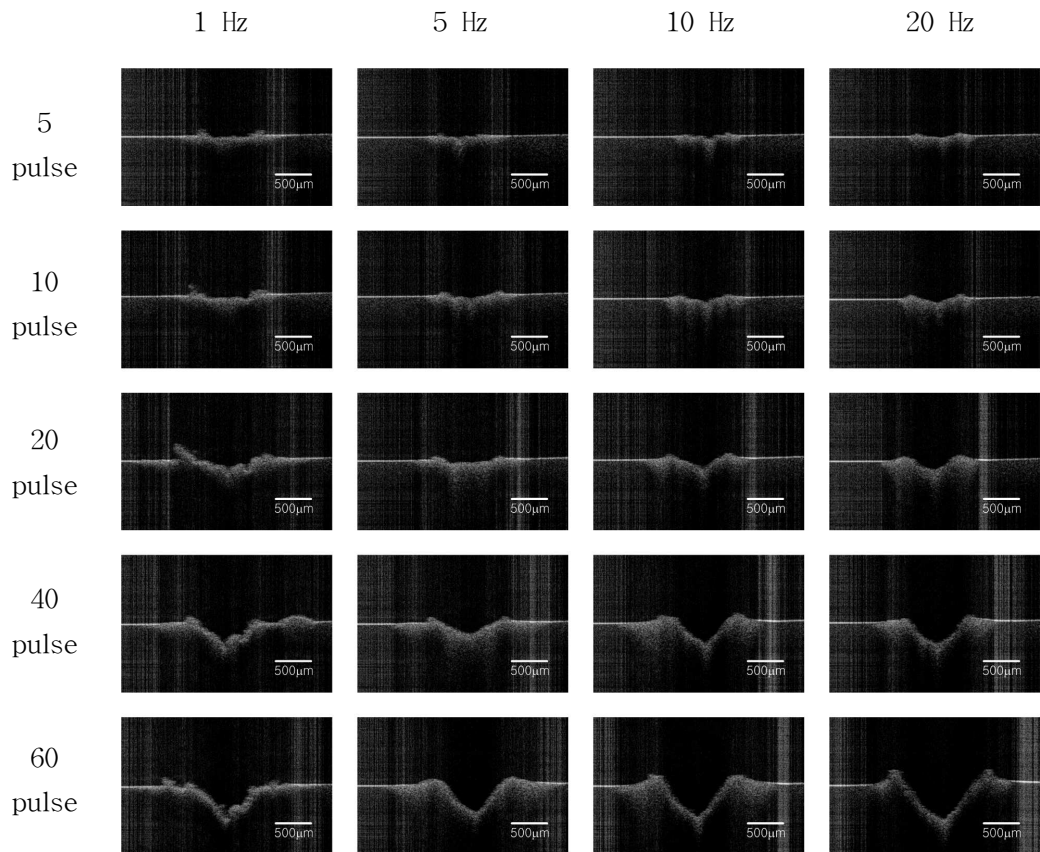
B. Surface of pits by 258.50 mJ/pulse.



C. Surface of pits by 295.93 mJ/pulse.



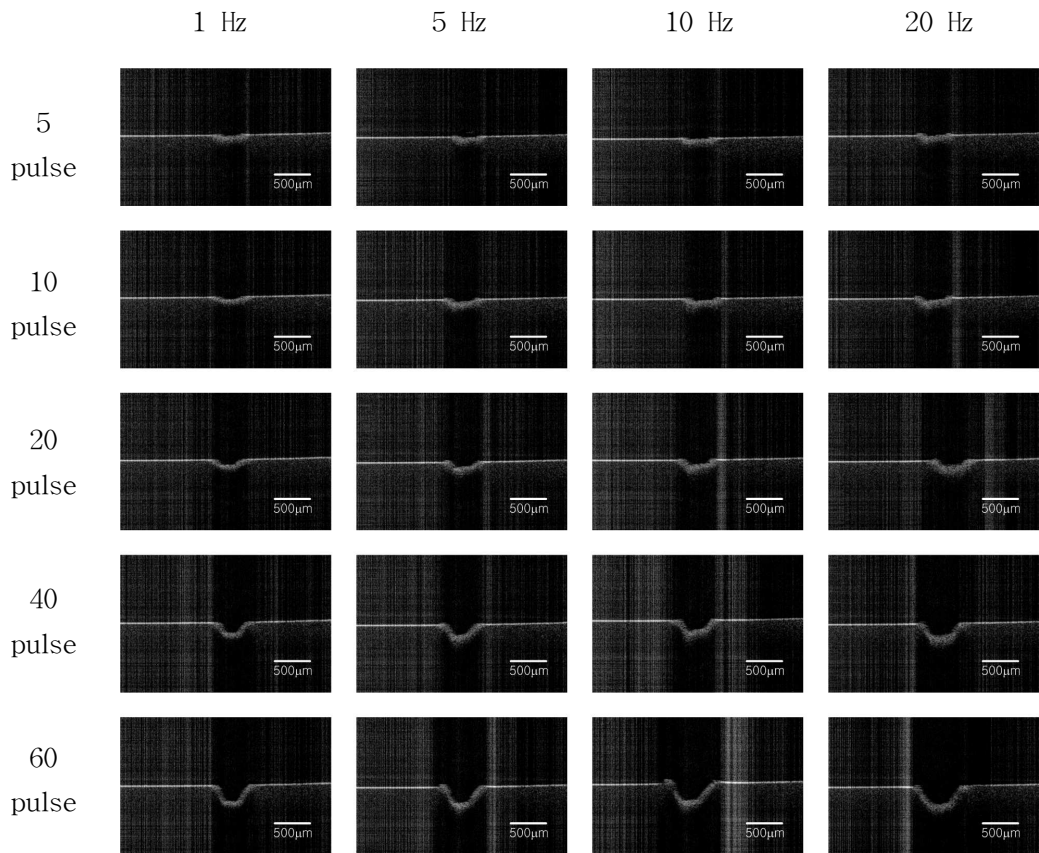
D. Surface of pits by 327.09 mJ/pulse.



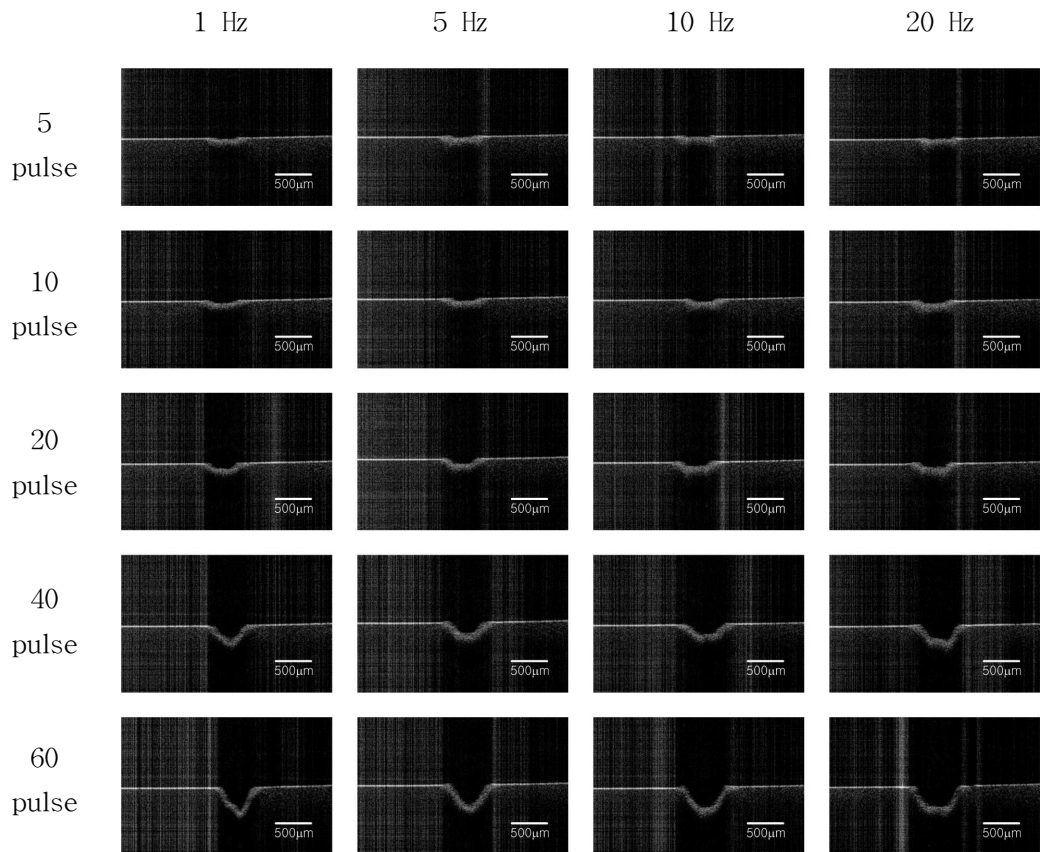
Appendix IV.

OCT images by 532 nm laser marking.

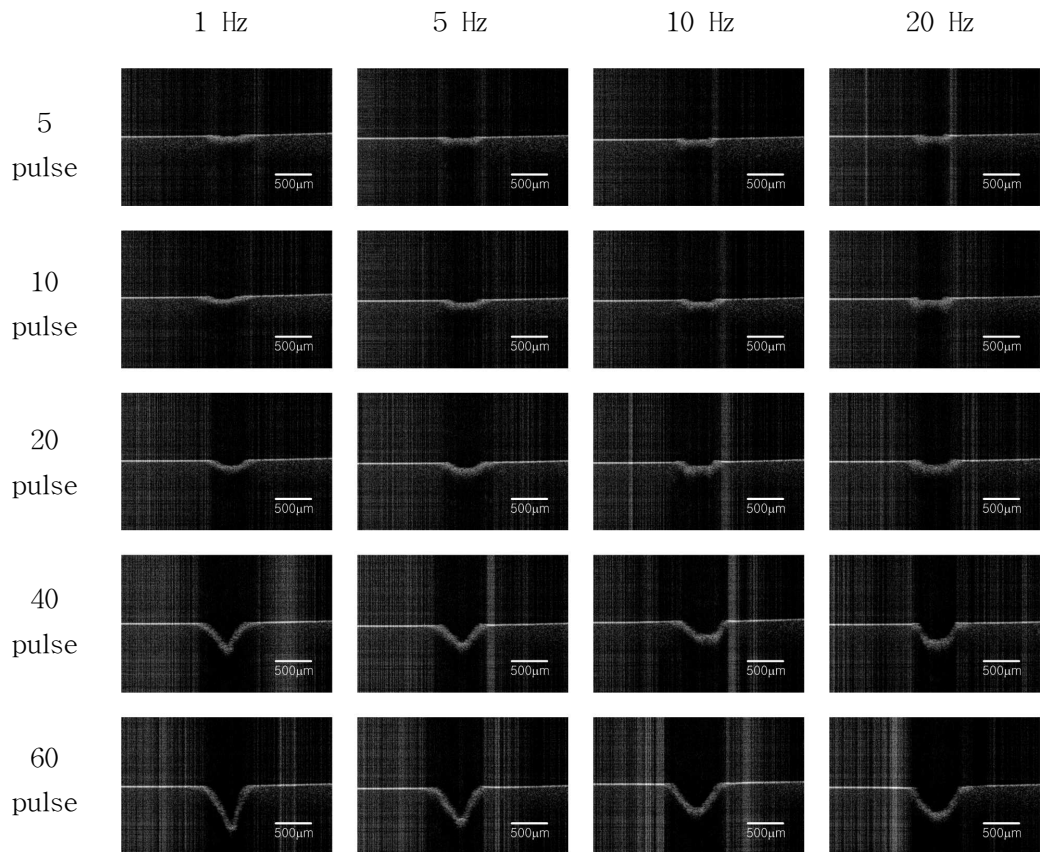
A. Surface of pits by 164.54 mJ/pulse.



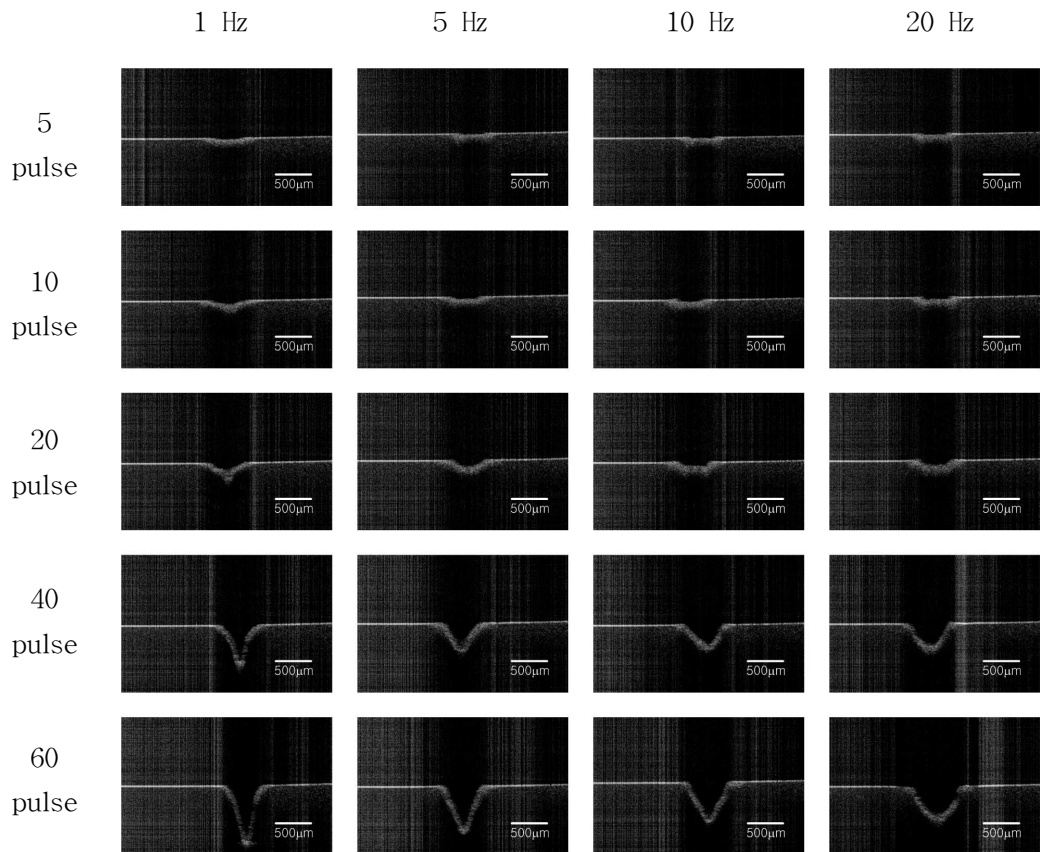
B. Surface of pits by 226.58 mJ/pulse.



C. Surface of pits by 268.95 mJ/pulse.



D. Surface of pits by 303.62 mJ/pulse.



저작물 이용 허락서

학 과	광응용공학과	학 번	20027597	과 정	박사
성 명	한글: 김영섭 한문 : 金永燮 영문 : Youngseop Kim				
주 소	광주광역시 북구 문흥동 대주 APT 102-1109				
연락처	E-MAIL : kys4011@nate.com				
논문제목	한글 : 레이저 조사에 따른 마킹 메커니즘 분석과 온도분포 해석 영문 : Analysis of the marking mechanism and thermal distribution on laser beam irradiation				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(○) 반대()

2007년 8월 일

저작자: 김 영 섭 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하

감사의 글

학위를 시작한지 8년의 시간이 지날 즈음 논문을 마치려 하니 새로운 감회가 듭니다. 지금의 제가 있기까지 도움을 주신 많은 분들께 미약하나마 감사의 말씀을 드리고자 짧은 글을 씁니다.

학위 과정 동안 은사님으로, 때론 인생의 선배로 항상 지도 편달해 주시고 애정을 아끼지 않으셨던 신용진 지도 교수님께 먼저 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 학교에 입학하면서부터 훌륭한 은사님으로 학업에 있어 방향을 제시해 주신 장차익 명예 교수님, 논문을 준비하면서 따뜻한 말로 힘이 되어 주신 최성휴 교수님께도 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 새로 부임하셔서 학교에 적응하시기도 힘드셨을 텐데 논문을 꼼꼼히 챙겨주신 최은서 교수님과 곽우섭 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 늘 옆에서 자극제가 되어 주셨던 유상하 학장님을 비롯한 자연과학 대학 물리학과 교수님들과 이수일 교수님을 비롯한 사범대학 물리교육학과 교수님들께도 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 미약한 저의 논문을 심사해 주신 고등광기술 연구소 이종민 소장님, 한국광기술원 김정호 팀장님께도 감사의 말씀을 전합니다. 학위과정 동안 늘 미안해하신 부모님과 큰 형님 내외, 따끔한 충고 아끼지 않으셨던 둘째형님 내외, 멀리 중국에서 많은 도움을 주신 누님 내외분께도 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 처음 인사했을 때부터 지금까지 묵묵히 지켜봐주신 장인 장모님을 비롯한 처남 내외분과 동서 내외분들, 특히 항상 안타까운 마음으로 동생처럼 보살펴 주셨던 둘째 동서 내외분과 울산, 광양 동서 내외분들께 감사의 말씀을 전합니다. 논문 수정에 있어 많은 도움을 준 박소희 선생님을 비롯하여 최영희 선생님과 김성표군에게도 서면을 빌어 고맙다는 말을 전합니다. 그리고 사랑하는 나의 아내. 착한 딸로, 사랑스런 며느리로, 훌륭한 어머니로 그리고 존경할 줄 아는 아내로서의 역할에 최선을 다하면서 헌신적인 내조를 해온 사

랑스런 아내에게 고맙다는 말을 전하며 사랑하는 딸 윤지와 8월이면 태어날 배속에 있는 아기에게도 더불어 고맙다는 말을 전합니다. 마지막으로 여기에서 언급하지 못했지만 도움을 주신 모든 분들께 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

2007년 6월

김 영 섭 드림

저 자 이 력

성 명 : 김영섭 (Youngseop Kim)

생년월일 : 1971. 4. 13

본 적 : 전라남도

주 소 : 광주광역시 북구 문흥동 대주 APT 102-1109

교육이수과정

1991. 3 - 1997. 2 조선대학교 자연과학대학 물리학과 졸업

2000. 3 - 2002. 2 조선대학교 일반대학원 물리학과 석사
논문제목 : CO₂ 및 Nd:YAG 레이저에 의한 ABS Plastic
에 형성된 흠에 관한 연구 (The study of pit formation
on ABS plastic by CO₂ and Nd:YAG laser)
지도교수 : 신용진 Ph. D

2002. 2 - 2007. 8 조선대학교 일반대학원 광응용공학과 박사
논문제목 : 레이저 조사에 따른 마킹 메커니즘 분석과 온
도 분포 해석 (Analysis of the marking mechanism and
the thermal distribution on laser irradiation)
지도교수 : 신용진 Ph. D

학회 활동

2001. 1 - 현재 한국물리학회 학생회원
 한국광학회 학생회원
 한국레이저가공학회 학생회원

수상경력

1. Best Poster 한국물리학회, 2005

정부출연 개발사업 참여

1. 과학기술부, “평면 조사 방식의 가시 영역 레이저 투영장치 개발”, 2001. 7 - 2003. 8
2. 산업자원부, “사진 분야에 대한 국제 표준화 연구”, 2002. 4 - 2002. 10
3. 한국광산업진흥회, “의광학 영상 진단 장비 기술 동향 조사 연구 사업”, 2003. 6 - 2003. 9
4. 한국과학기술정보연구원 (KISTI), “지역 중소기업 R&D 활동 지원 모형 개발”, 2006. 7 - 2006. 11

Publication

Journal Papers

1. **Youngseop Kim**, Eun Seo Choi, Wooseop Kwak, and Yongjin Shin, "*The analysis of thermal distribution by a laser beam irradiation*", Journal of the Korean Physical Society, *Processing*, 2007.
2. **Youngseop Kim**, Eun Seo Choi, Wooseop Kwak, and Yongjin Shin, "*Three-dimensional non-destructive evaluation of laser processing performance using optical coherence tomography*", Optics and Laser Technology, *Processing*, 2007.
3. E. S. Choi, T. H. Kim, **Y. S. Kim**, Y. H. Choi, and Y. J. Shin, "*Three-dimensional laser engraving patterning for the light guide panel based on the simulation*", Optics Express, *Processing*, 2007.
4. Yongjin Shin, **YoungseopKim** and SoheePark, "Pit and rim formation during laser marking of acrylonitrile butadiene styrene plastic", Journal of Laser Applications, Vol. 17, No. 4, 2005, pp. 243-246.
5. Yongjin Shin, Sohee Park, **YoungseopKim**, Jangwoen Lee, Woonggyu Lee, Zhongping Chen and J. Stuart Nelson, "Analysis of laser engraving image inside crystal and PMMA", SPIE, Vol. 5713, 2005, pp. 539-544.
6. Yongjin Shin, Hyunjin Kim, **Youngseop Kim**, Woonggyu Jung, Zhongping Chen and Stuart Nelson, "Investigation of pit formation in laser-irradiation multilayer thin film by using optical coherence tomography", Journal of the Korean Physical Society (JKPS), Vol. 48, No. 2, 2006, pp. L184-L187.

7. Yongjin Shin, Sohee Park, *Youngseop Kim* and Jangwoen Lee, "Development of a pc interface board for true color control using an Ar-Kr white-light laser", Optics and Laser Technology, Vol. 38, 2006, pp. 266-271.
8. 김영섭, 김태훈, 박소희, 최영희, 최은서, 신용진, "레이저 가공에 의한 백라이트 도광판 성능 향상", 한국레이저가공학회, 제10권, 제1호, 2007, pp. 29-34.
9. 김영섭, 최은서, 신용진, "미세 선가공을 위한 레이저 변수 제어", 한국레이저가공학회, 제10권, 제1호, 2007, pp. 11-17.
10. 최은서, 김영섭, 박소희, 신용진, "측면 발광 POF에 의한 LED 디스플레이", 새물리, vol. 54, No. 5, 2007, pp. 409-412.
11. 최은서, 김영섭, 신용진, 이병하, "광섬유 기반의 광단층 이미징(OCT)의 원리 및 응용", 새물리, vol. 54, No. 5, 2007, pp. 399-408.
12. 김영섭, 박소희, 신용진, 김태훈, "나노초 시간분해 반사도 측정과 OCT 이미지에 의한 레이저 마킹 메커니즘 분석", 새물리, Vol. 52, No. 2, 2006, pp. 169-173.
13. Sohee Park, *Youngseop Kim*, Yongjin Shin, "Investigation of the shape of the dots in laser irradiated crystal and PMMA using optical coherence tomography", 한국레이저가공학회, 제8권, 제2호, 2005, pp. 1-6.
14. Sohee Park, *Youngseop Kim*, Yongjin Shin, "Investigation of the shape of the dots in laser irradiated crystal and PMMA using optical coherence tomography", 한국레이저가공학회, 제8권, 제2호, 2005, pp. 1-6.
15. 신용진, 박소희, 김영섭, 장주환, 양경승, "레이저 디스플레이를 위한 다색 음향 광변조기의 색 제어", 새물리, vol. 49, No. 6, 2004, pp. 476-482.

16. 신용진, 김현진, 김영섭, 박소희, “OCT에 의한 다층 박막의 spot marking 분석”, 한국레이저가공학회, 제7권, 제2호, 2004, pp.11-18.
17. Sohee Park, *Youngseop Kim*, Yongjin Shin, “Investigation of the shape of the dots in laser irradiated crystal and PMMA using optical coherence tomography”, 한국레이저가공학회, 제8권, 제2호, 2005, pp. 1-6.
18. 김영섭, 신용진, 정광현, 양경승, “CO₂ 및 Nd:YAG 레이저에 의한 ABS 플라스틱의 흠 형성”, 새물리, Vol. 44, No. 6, 2002, pp. 305-311.

Conference Papers

1. *Youngseop Kim*, Eun Seo Choi, Yongjin Shin, Woonggyu Jung, Yeh-Chan Ahn, Ahongping Chen, “The application of optical coherence tomography for monitoring of the laser marking performance”, CLEO, 2007, *Processing*.
2. 최은서, 김영섭, 최영희, 최성휴, 신용진, “임플란트 응용을 위한 골조직 레이저 드릴링 가공 및 OCT 기반의 광학적 진단”, 한국물리학회, 제25권, 제1호, 2007, p. 138.
3. 김영섭, 박소희, 최영희, 최은서, 신용진, “레이저 펄스 반복율에 따른 pit 주위 열분포 분석”, 한국물리학회, 제25권, 제1호, 2007, p. 135.
4. 최영희, 김영섭, 박소희, 최은서, 신용진, “3차원 산란체 도광관 표면의 그리드 패턴에 의한 밝기 성능 분석”, 한국물리학회, 제25권, 제1호, 2007, p. 135.
5. 김영섭, 최은서, 신용진, “레이저에 의한 pit 형성에서의 열분포 simulation 및 나노초 시간분해 반사도 측정에 따른 메커니즘 분석”, 한국물리학회, 제24권, 제2

호, 2006, pp. 408-409.

6. 김태훈, 박소희, 김영섭, 최은서, 신용진, “백라이트 도광판 패턴의 레이저 가공에 관한 연구”, 한국레이저가공학회, 2006, pp. 66-67.
7. 김영섭, 김태훈, 박소희, 최은서, 신용진, “레이저 마킹에서의 열 분포 시뮬레이션”, 한국레이저가공학회, 2006, pp. 120-122.
8. 김영섭, 박소희, 신용진, “나노초 시간분해 반사도 측정과 OCT에 의한 레이저 마킹 메커니즘 분석”, 한국물리학회, 제23권, 제2호, 2005, p. 608.
9. Yongjin Shin, *Youngseop Kim*, Sohee Park, W. Jung, Z. Chen, “Non-medical applications (materials investigation) of OCT”, 한국광학회, No. 6, 2005, pp. 87-102.
10. 박소희, 김영섭, 신용진, “PCAOM 및 PC interface board에 의한 백색 레이저의 색 분해에 관한 연구”, 한국물리학회, 제22권, 제1호, 2004, p. 222.
11. 김영섭, 박소희, 양경승, 신용진, “Pulsed Nd:YAG 레이저에 의한 광 기록매체의 미소점 가공에 따른 시간분해 반사도 측정”, 한국물리학회, 제22권, 제1호, 2004, p. 229.
12. 박소희, 김영섭, 신용진, “Laser Engraving에 의해 PMMA에 형성된 Dot의 OCT image 분석”, 한국물리학회, 제22권, 제2호, 2004, p. 591.
13. *Youngseop Kim*, Sohee Park, Yongjin Shin, “The interaction for the pit formation on ABS with laser beam”, 한국레이저가공학회, 2004, pp. 22-28.
14. 김영섭, 김현진, 신용진, “SUS 304 표면에서 Q-switch pulsed Nd:YAG laser에 의한 흠 형성에 동반되는 nano-second 분해 반사도 측정”, 한국물리학회, 제21권, 제1호, 2003, p. 208.

15. 신용진, 김현진, 김영섭, Byungjo Jung, “The study of interaction of the spot marking on the optical-recording storage material by Nd:YAG laser”, 한국물리학회, 제21권, 제1호, 2003, p. 219.
16. *Youngseop Kim* and Yongjin Shin, “Analysis of laser marking mechanism by time resolved reflectivity on metal and nonmetal”, International Conference on Optical Communications and Multimedia(ICOCM), Vol. 2, No. 1, 2002, pp. 32-35.
17. Jun-Ock Lee, Kwang-Taek Kim, *Youngseop Kim*, Yongjin Shin, “Polarizer and polarization splitter based on the side-polished fiber incorporating a thin metal film”, International Conference on Optical Communications and Multimedia (ICOCM), Vol. 2, No. 1, 2002, pp. 28-31.
18. 김영섭, 김현진, 양경승, 장주환, 신용진, “마킹 영역에서 레이저 광의 편광 분석을 통한 마킹 메커니즘 해석”, 한국물리학회, 제20권, 제1호, 2002, p. 180.
19. 김영섭, 김현진, 박영신, 양경승, 신용진, “금속 표면의 라인 가공에 사용되는 변수 제어에 관한 연구”, 한국물리학회, 제20권, 제2호, 2002, p. 168.
20. 김영섭, 양경승, 박영신, 신용진, “ ABS 플라스틱에서의 시간분해 반사율 측정”, 한국레이저가공학회, 제2권, 제1호, 2002, pp. 12-16.