



저작자표시-변경금지 2.0 대한민국

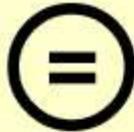
이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



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](#)

2008년 2월

석사학위논문

고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한
Inconel 718 박판의 절단특성 분석
및 3차원 유한요소 해석에 관한 연구

조선대학교 대학원

기계공학과

변 경 원

고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한
Inconel 718 박판의 절단특성 분석
및 3차원 유한요소 해석에 관한 연구

Investigation into the characteristics and
finite element analysis of laser cutting process
for Inconel 718 sheet using high power CW Nd:YAG
laser

2008 년 2 월 25일

조선대학교 대학원

기계공학과

변 경 원

고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한
Inconel 718 박판의 절단특성 분석
및 3차원 유한요소 해석에 관한 연구

지도교수 안 동 규

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2007 년 10 월 일

조 선 대 학 교 대 학 원

기계공학과

변 경 원

변경원의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 한 길 영 (인)

위 원 조선대학교 교수 유 영 태 (인)

위 원 조선대학교 교수 안 동 규 (인)

2007 년 11 월 일

조 선 대 학 교 대 학 원

목 차

LIST OF TABLES	I
LIST OF FIGURES	II
ABSTRACT	
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적	6
제 2 장 레이저 절단시편 및 실험방법	8
2.1 레이저 절단시편	8
2.2 실험 방법	10
2.2.1 레이저 절단 시스템	11
2.2.2 직선 절단 실험	14
2.2.3 각도 절단 실험	15
2.2.4 루프 (Loop) 절단 실험	16

제 3 장 실험 결과 및 고찰	17
3.1 초점 거리	17
3.2 절단 가능 영역 (Practical cutting region)	19
3.3 절단폭 (Kerfwidth)	22
3.4 표면조도 (Surface roughness)	25
3.4.1 표면조도 측정 방법	25
3.4.2 중심선 평균거칠기 (R_a)	27
3.4.3 절단면 최대거칠기 (R_{max})	29
3.4.4 표면 굴곡 형성 (Striation formation)	31
3.5 절단면 조직	32
3.6 절단 각도에 따른 절단 특성	40
3.6.1 모서리 용융 면적 (Melted area in the shape corner)	40
3.6.2 열영향부 (Heat affective zone)	45
3.7 루프 절단에 따른 절단 특성	48
3.7.1 모서리 용융 면적 (Melted area in the shape corner)	49
3.7.2 열영향부 (Heat affective zone)	52

제 4 장 3차원 열전달 해석	53
4.1 3차원 유한요소 모델링	53
4.1.1 유한요소 지배방정식	53
4.1.2 열원 모델링	55
4.1.3 유한요소해석 방법 및 경계조건	57
4.2 최적 유한요소 모델링 도출	62
4.3 열전달 특성 및 온도분포 고찰	65

제 5 장 결론 및 향후과제	71
------------------------------	----

REFERENCES	74
-------------------------	----

감사의 글

LIST OF TABLES

Table 1 Chemical composition of Inconel 718 (wt%)	8
Table 2 Experimental conditions	10
Table 3 Practical cutting region of each cutting condition	21
Table 4 Number of elements and nodes	58

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Specimen of laser cutting experiments (Inconel 718)	9
Fig. 2 Energy spectrum of specimen (Inconel 718)	9
Fig. 3 Schematic diagrams of laser cutting system using a high power CW Nd:YAG laser and 6-axis robot system	11
Fig. 4 Experimental set-up	12
Fig. 5 Schematic diagrams of the auto-tracking system for the real-time control of a focal distance	13
Fig. 6 Methodology of linear cutting tests and measuring region of specimen	14
Fig. 7 Methodology of angular cutting tests	15
Fig. 8 Methodology of loop cutting tests	16
Fig. 9 Influence of a focal distance on the kerfwidth for each thickness of material	18
Fig. 10 Influence of the effective heat input on the formation of the cut section (T = 1.0 mm, P = 1,200 Watt)	20
Fig. 11 Formation of the cut section in the vicinity of the maximum allowable cutting speed (T = 2.0 mm, P = 1,600 Watt)	21
Fig. 12 Estimation method of kerfwidth	22
Fig. 13 Influence of process parameters on kerfwidth	24
Fig. 14 Estimation method of surface roughness	25
Fig. 15 Measuring equipment of surface roughness	26

Fig. 16 Influence of travel speed of laser and power of laser on the surface roughness for each thickness of material 28

Fig. 17 Influence of travel speed of laser on the maximum roughness of the cut section 30

Fig. 18 Influence of cutting speed on the striation formation of the cut section (T = 1.0 mm, P = 1,600 Watt) 31

Fig. 19 Influence of cutting speed on the formation of the break area in the cut section (T = 1.6 mm, P = 1,600 Watt) 32

Fig. 20 Influence of cutting speed on the formation of the break area in the cut section for each thickness of material (P = 1,400 Watt) 33

Fig. 21 Definition of depth of the cut area and the break area 34

Fig. 22 Influence of process parameters on cut & break ratio 35

Fig. 23 Variation of microstructures of the cut section in the thickness direction (T = 1.6 mm, P = 1,600 Watt, $V_{tr} = 7,000$ mm/min) 36

Fig. 24 Energy spectrum of material surface (Inconel 718) 37

Fig. 25 Energy spectrum of each cut section (T = 1.6 mm, P = 1,600 Watt, $V_{tr} = 7,000$ mm/min) 38

Fig. 26 Influence of cutting angle on the melted area in the shape edge (T = 2.0 mm, P = 1,800 Watt, $V_{tr} = 6,000$ mm/min, Upper side of cut section) 41

Fig. 27 Influence of cutting angle on the melted area in the shape edge
(T = 1.0 mm, P = 1,400 Watt, $V_{tr} = 9,000$ mm/min, Lower
side of cut section) 42

Fig. 28 Measuring methodology of the melted area 43

Fig. 29 Influence of cutting angle and power of laser on the melted
area 44

Fig. 30 Measuring methodology of heat affective zone (HAZ) 46

Fig. 31 Influence of cutting angle and power of laser on the HAZ
..... 48

Fig. 32 Methodology of the loop cutting test 49

Fig. 33 Influence of cutting angle and loop length on the melted area
(T = 1.0 mm) 50

Fig. 34 Influence of cutting angle and loop length on the melted area
(T = 1.6 mm) 51

Fig. 35 Formation of HAZ according to the cutting angle and loop
length (T = 1.6 mm, P = 1,400 Watt, $V_{tr} = 7,000$ mm/min)
..... 52

Fig. 36 Schematics of coordinate system 54

Fig. 37 Schematics of conical heat source for analysis 56

Fig. 38 Finite element for analysis (T = 2.0 mm) 57

Fig. 39 Boundary conditions for analysis 59

Fig. 40 Material properties for FE analysis 62

Fig. 41 Comparison of the result of analysis with those of experiments
with respect to kerfwidth 63

Fig. 42	Flowchart of modeling procedure for analysis	64
Fig. 43	Comparison of the result of analysis with those of experiments with respect to kerfwidth	64
Fig. 44	Temperature distribution of the cut section (T = 1.0 mm, P = 1,600 Watt, V_{tr} = 7,000 mm/min)	66
Fig. 45	Result of FE analysis (P = 1,600 Watt, V_{tr} = 6,000 mm/min)	67
Fig. 46	Result of FE analysis (T = 1.0 mm, P = 1,400 Watt)	68
Fig. 47	Result of FE analysis (T = 1.6 mm, P = 1,600 Watt)	68
Fig. 48	Result of FE analysis (T = 2.0 mm, P = 1,800 Watt)	68
Fig. 49	Relationship between process parameters and practical heat input	69
Fig. 50	Relationship between process parameters and energy per unit volume	70
Fig. 51	Maximum temperature on the maximum cutting speed of each thickness	70

ABSTRACT

Investigation into the characteristics and finite element analysis of laser cutting process for CSP 1N sheet using high power CW Nd:YAG laser

Byun, Kyung-Won

Advisor : Prof. Ahn, Dong-Gyu, Ph. D.

Dept. of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

Inconel sheets have been widely applied to industrial area, including a shipbuilding industry, the energy industry, a defense industry and other, to enhance corrosion and heat resistances of parts. Recently, in order to manufacture rapidly a part with a complex shape using a thin sheet of Inconel, several research works on laser cutting of the Inconel sheet have been actively in progress. The objective of this research work is to investigate into laser cutting characteristics of the Inconel 718 sheet with thickness less than 2 mm when CW Nd:YAG laser with a high power is utilized as the cutting heat source. In order to examine the influence of process parameters, such as the power of the laser, the travel speed of the laser and the thickness of the

workpiece, on a practical cutting region, the kerfwidth, the surface roughness of the cut section, and the formation of the cut section, several linear cutting tests have been performed. Through preliminary linear cutting tests, practical cutting regions for each thickness of workpiece have been obtained. From the results of the linear cutting tests, the effects of the process parameters on the kerfwidth and characteristics of the cut section, including the surface roughness, the formation of the striation, the cut and break ratio and microstructures, have been quantitatively evaluated. Angular and loop cutting tests have been performed to examine the effect of the corner angle and the size of loop on the formation of the sharp corner. From the results of the angular cutting tests, the influence of the corner angle on the melted area of the sharp corner and the quality of the cut section in the vicinity of the sharp corner has been quantitatively investigated. From the results of the loop cutting tests, a proper size of the loop with a minimum melted area for each combination of process parameters has been estimated. Three dimensional heat transfer analysis has been carried out to investigate into the effects of the process parameters on characteristics of the heat transfer in the workpiece using a commercial code SYSWELD V9.0. The laser cutting process has been assumed as a quasi-stationary and the steady state process. The laser has been assumed as a three dimensional volumetric heat source with Gaussian distributions in a longitudinal plane of the laser and the linear variation of the Gaussian distribution. From the comparison of the results of the experiments and those of the FE analyses, proper models of the FE analyses have been obtained. In addition, the influence of the process parameters on the temperature distribution

and characteristics of the heat transfer during the cutting of the workpiece has been quantitatively examined. Based on the above results, optimum cutting conditions and a proper cutting path of Inconel 718 sheets could be obtained when the Nd:YAG laser with a high power is utilized as cutting tools.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

레이저 가공은 고밀도의 에너지를 가지는 높은 출력의 열원으로 재료의 고속 가공이 가능하므로 가공 재료에 작은 열 영향부를 형성시키며 가공 후 열변형이 작아 고정밀 절단 및 용접이 필요한 자동차/선박/전자/선박산업 및 각종 기계부품 가공에 폭넓게 활용되고 있다.^{1~3)}

레이저 가공 분야 중, 레이저 절단공정은 비접촉식 가공이므로 가공 중에 소재에 의한 반력이 없고, 소음발생이 극히 적을 뿐 만 아니라 플라스틱, 천, 고무, 종이 등의 비금속 재질이나, 박판재 금속 등을 변형 없이 고정밀도 가공이 가능하다. 또한, NC 제어장치와 결합하면 원호, 직선, 또는 자유곡선등 프로그램 가공이 가능하며, 일반 절삭가공으로 가공할 수 없는 복잡한 형상, 미세한 형상 및 극취성 재료의 가공도 가능하다.⁴⁾

레이저를 이용한 박판 절단 공정은 레이저의 초점크기 (Spot size) 내에 고출력/고밀도의 에너지가 밀집되고 재료를 고속으로 절단하므로 레이저의 입열량에 의한 가공재료의 열전달 반경이 작아 가공후 열변형이 최소화되는 정밀 제품 절단이 가능하다. 그러므로, 열원을 이용한 비접촉식 박판재 절단이 요구되는 경우 산소절단, 플라즈마 절단에 비하여 레이저 절단은 정밀/고속 절단이 가능한 장점이 있다.⁵⁾

현재 산업 현장에서는 10.6 μm 의 파장대를 가지며 연속파형 특징이 있는 CO₂ 레이저가 다량 보급되어, 고속절단이나 두꺼운 판재의 절단 및 고속 용접이나 심입 용접 등에 많이 사용되고 있다.^{6~8)} 한편, 최근 레이저의 가격이 감소하고, 정밀 부품과 국소 영역에 대한 가공이 요구되는 산업적 경향에 의하여 고체 레이저로써 안정된 고출력을 나타내는 연속파형 Nd:YAG 레이저의 산업적 적용과 학문적 연구가 활발히 진행되고 있다.^{9~10)} Nd:YAG 레이저의 파장은 1.06 μm 이고 레이저의 안정성이 높고 고출력을 얻을 수 있으며, 파장이 10.6 μm 인 CO₂ 레이저 보다 가공물의 표면에서 빔 반사율이 매우 낮고 작은 영역에서 에너지가 집중되기 때문에 열

영향부가 작아서 제품의 열변형이 작게 일어난다.^{11~16)} 특히, 니켈 금속의 경우 Nd:YAG 레이저가 CO₂ 레이저보다 빔 흡수율이 9배 이상 높아 고효율의 제품 절단이 가능하다.⁵⁾ 이러한 이유로, 최근 산업 분야에서 고풍력 Nd:YAG 레이저를 이용한 금속의 절단 가공 기술이 크게 호응을 얻고 있다.¹⁷⁾

레이저를 이용한 판재 절단시 제품 품질은 절단폭, 열영향부 크기, 바닥면 드로스량 및 절단면 표면조도, 표면굴곡 형성 (Striation formation), 절단부 조직변화 등의 절단면 형성 특성에 의하여 결정된다.¹⁸⁾ 따라서, Nd:YAG 레이저를 이용한 고정밀 레이저 절단 제품을 가공하기 위해서는 레이저 절단시 공정변수와 절단면 특성에 대한 연구가 필요하다. 이와 관련된 선행 연구는 다음과 같다.

Na 등은 저출력 CO₂ 레이저 절단시 보호가스압력의 영향성에 대한 연구를 수행하였다.¹⁹⁾ 초음속 보조가스는 절단부를 중심으로 넓게 공급되며 주조금속 절단에서는 가스압력이 드로스 상태에 상당한 영향을 미치지만 조도나 절단폭은 무시할 정도이고, 가스압력 2.5 kg/cm² 일때 적정절단공정영역이 가장 크다는 것을 확인하였다.

Yilbas²⁰⁾ 는 CO₂ 레이저를 이용한 연강판재 절단시 재료두께별 절단속도와 레이저 출력관계에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 산소가스 압력이 증가하면 절단속도는 증가하고, 고속절단은 절단영역으로부터 열분산을 감소시킴을 확인하였다. 또한, 절단속도가 임계속도에 도달했을때 절단 바닥면 부분에 가는흠 곡선이 나타남을 확인하였고, 고출력에서 임계 가스압력일때 절단속도는 거의 시편두께와 독립적임을 확인하였다.

Arata²¹⁾ 등은 CO₂ 레이저를 이용한 탄소강 절단시 반응성 가스의 산화 동역학을 이용하여 절단 무늬 표면굴곡 생성의 원인을 규명하고자 하였다. 그 결과 산화 반응선단속력 (Speed of the oxygen reaction front) 이 절단 속력보다 클 때 반응가스에 의한 절단면 측면 연소현상이 현저히 나타남을 알 수 있었다.

Aloke²²⁾ 등은 CO₂ 레이저를 이용한 연강 박판재 절단시 입열량과 절단속도가 절단면 수직도에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 평균출력 2.0 kW, 보조가스 10 bar 에서 가장 좋은 수직도를 얻었으며, 절단속력이 빠를수록 수직도가 높게 나타남을 확인하였다.

Naeem²³⁾ 등은 1.5kW 급 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 연강 판재 절단시 빔특성 (Beam quality), 초점 크기, 가스압력이 절단가능 속도, 절단 가능 두께, 최적 가스 압력등에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 빔 특성 개선으로 초점 크기가 작아지고 필드깊이 (Depth of field) 가 향상됨을 확인하였다. 그리고 초점 크기별 절단 속도는 두께 3mm 까지는 0.36 mm를 사용했을때, 최대 절단속도가 0.60 mm 보다 더 크게 나오나 두께 3 mm 이후에는 초점크기가 0.60 mm 일때 최대 절단속도가 더 크게 나옴을 확인하였다. 또한, 두께가 두꺼워 질수록 최적의 가스압력은 감소하고, 그 영역 또한 좁아짐을 확인하였다.

Dorn²⁴⁾ 등은 펄스형 Nd:YAG 레이저의 비정질 합금 절단시 절단속도, 펄스간격, 입력량의 절단부 조직변화에 대한 영향성에 대하여 연구하였다. 그 결과 Nd:YAG 레이저를 이용한 드릴링 작업시 발생하는 구조적 변형을 완전히 피할 수는 없지만 저속가공 ($V=150$ mm/min) 과, 저열 ($Q=17$ mJ), 짧은 펄스시간 ($\tau=0.10$ ms) 의 공정변수를 이용하면 용융영역에서 구조변형이 일어나지 않는 영역이 생성되는 것을 확인하였다. 동시에 용융영역 가장자리 부근의 구조변형 구간도 감소함을 확인하였다.

Olsen²⁵⁾ 등은 CO₂ 레이저를 이용한 연강판 절단시 공정변수인 레이저 출력, 레이저 절단속력 및 가스압력이 절단면 물결무늬 (Striation) 형성에 미치는 영향에 대하여 연구를 수행하였다. 그 결과 절단폭에 있어서 몇몇 중요한 변수는 용융면의 온도분포, 용융층의 두께 그리고, 온도구배임을 확인하였으며, 절단가스가 저압일 때는 단일형의 물결무늬가 생성되나 고압일 때는 2개로 분리된 형상으로 나타남을 확인하였다. 또한, 절단속도가 빠를수록 물결무늬 생성각도가 작게 나타남을 확인하였다.

Yilbas²⁶⁾ 는 CO₂ 레이저를 이용한 연강판재 절단시 가스압력과 레이저 절단속력이 절단면 품질에 미치는 영향에 대하여 연구를 수행하였다. 그 결과 절단속도가 증가할수록 절단폭은 감소하고 레이저 출력이 증가하면 절단 폭도 증가함을 확인하였다.

Chen²⁷⁾ 등은 고출력 CO₂ 레이저를 이용한 연강 판재 절단시 고압의 보조가스가 절단품질에 미치는 영향을 연구하였다. 그 결과 고압의 불활성 기체를 사용한 절단

은 품질이 상당히 좋게 나왔으며, 고압의 산소와 공기를 사용한 절단은 품질이 떨어짐을 확인하였다. 아르곤을 보조가스로 사용한 절단에서는 최대 절단 속도가 크게 증가함을 확인하였다. 또한, 질소를 사용한 절단에서는 가스압력을 높임으로써 드로스가 감소하고, 표면 거칠기가 좋아짐을 확인하였다.

Joshi²⁸⁾ 등은 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 Inconel 718 천공에서 펄스폭, 펄스에너지, 진폭, 초점거리 및 보호가스 등의 공정변수가 제품의 구멍크기, 천공각도 및 스페터 형성에 미치는 영향성에 관한 연구를 수행하였다.

Thawari²⁹⁾ 등은 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 1 mm 두께의 니켈 기반 초합금의 절단시 공정변수가 절단폭, 절단가능영역 및 절단면 특성에 미치는 영향성에 대한 연구를 수행하였다.

레이저 가공 중 가공 형상의 변화에 의해 절단 경로가 평면상에 일정한 각도를 가지는 경사절단을 수행할 경우 급격한 곡률 변화에 의해 모서리 부분에서 과도한 열 집적으로 인하여 과용융이 발생한다. 급격한 곡률 변화 부위에 대한 과용융 해결 방안으로 레이저 절단 경로 변경과 레이저 절단 속도 제어 등의 방법들이 널리 사용되고 있다. 특히, 박판재의 레이저 절단 시 균일 절단 속력으로 판재를 절단하기 위하여 레이저 절단 경로 변경 방법에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 이와 관련된 선행 연구는 다음과 같다.

Han³⁰⁾ 등은 레이저 절단 공정에서 절단 경로 개발에 관한 연구에서 절단폭과 모서리 용융량을 고려하여 제품의 형상에 영향을 미치지 않고 최적의 경로를 보완할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

Ahn³¹⁾ 등은 고출력 연속파형 (continuous wave : CW) Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP 1N 냉연강판 절단시 공정변수가 모서리 절단 특성에 미치는 영향에 관한 연구에서 루프크기 (Size of loop) 가 모서리 절단 특성에 미치는 영향성에 대하여 연구를 수행하였다. 그 결과 절단각도 및 루프크기와 모서리 용융 면적 및 열영향부 면적 형성의 상관관계를 도출하였다.

한편, 레이저 절단공정의 열전달 특성을 분석하기 위해서는 레이저 절단시 재료 내부에 발생하는 3차원 열전달 특성에 관한 정량적 고찰이 필요하다. 이와 관련된 연구는 1940년대부터 현재에 이르기까지 지속적인 연구가 진행되고 있으며, 선행

연구는 다음과 같다.

Rosental³²⁾ 등은 레이저 절단공정의 준정적상태 가정과 이동좌표계를 이용하여 해석적 접근법으로부터 유한요소법에 이르기까지 다양한 연구를 수행하였다.

Eagar³³⁾ 등은 이동식 분포 열원에 의하여 재료내부에 생성되는 온도분포에 대한 수학적 모델링을 수행하였고, Mazumdar³⁴⁾ 등은 연속파형 레이저를 이용한 재료가공에 대한 열전달 모델을 개발하였다.

Park³⁵⁾ 등은 FDM 방법을 이용하여 레이저 절단공정에서의 절단 메카니즘 및 절단폭 해석에 대한 연구를 수행하였고, Kim³⁶⁾ 등은 고에너지 레이저 절단공정을 위한 2차원 유한요소 모델을 개발하였다.

Ahn³⁷⁾ 등은 고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP 1N 박판 절단공정의 열전달 특성에 관한 연구에서 절단폭을 기준으로 실험값과 해석값의 오차가 5% 이내에 존재하는 최적 유한요소 모델링을 도출하였고, 이를 통한 해석을 실시하여 공정변수와 절단부 온도분포의 상관관계를 도출하였다.

이상에서의 실험/해석적 선행 연구를 통해서 레이저 절단공정에 영향을 미치는 공정변수는 매우 다양하며, 재료의 특성에 따라 공정변수는 각각 다른 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

본 연구에 사용된 Inconel 718 재료는 극저온과 고온에서 우수한 강도를 가지며, 내식성, 내열성이 우수하여 항공기 기체 및 원자력 발전소 증기발생기 전열관, 자동차 코일 스프링, 반도체 소자, 각종 기계부품 등에 다양하게 사용되고 있으나, 레이저를 이용한 재료의 절단가공에 있어서 실험적/해석적 연구는 매우 빈약한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 Inconel 718 재료의 절단시, 절단 특성 분석을 통한 최적 절단 조건 데이터베이스 구축 및 3차원 열전달 해석을 통한 공정변수가 재료 내부 열전달/온도분포 특성에 미치는 영향에 대해 알아보하고자 한다.

1.2 연구목적

본 연구에서는 고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 시편 두께 2 mm 이하의 Inconel 718 박판의 절단시 공정변수가 절단폭과 절단면 특성 및 절단재료 내부 열전달 분포에 미치는 영향에 대하여 고찰/분석하고자 한다. 이러한 연구를 통해서 공정변수에 의해 크게 좌우되는 절단품질을 정량적으로 평가하고, 최적의 공정변수를 도출하고자 한다. 또한, 3차원 유한요소 해석을 통해서 절단공정중 볼 수 없는 재료 내부의 3차원 열전달 특성 및 온도분포 특성을 확인하고자 한다.

실험에서는 절단가스 분사 장치가 부착되고, 6자유도 운동이 가능한 최대 출력 2.8 kW 의 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용하였다. 절단 실험의 공정변수로서는 레이저 출력, 레이저 이송속력, 시편두께, 절단각도 및 루프크기 (Size of loop) 를 선정하였다.

실제적으로 절단이 되는 영역을 선정하기 위해서 직선 절단 실험을 실시한 후, 절단면 용융 상태 분석을 통해서 절단 가능 영역 (Practical cutting region) 을 도출하고자 한다. 또한 공정변수와 레이저 절단폭 (Kerfwidth) 형성의 상관관계를 규명하기 위해서 광학현미경을 이용한 레이저 절단면을 확대 촬영하여 절단폭을 측정하고자 한다.

절단면 형성 특성을 알아보기 위하여 표면조도 측정기를 이용한 절단면의 중심선 평균거칠기 (R_a) 와 최대높이 (R_{max}) 측정하여 공정변수와의 상관관계를 규명하고자 한다. 또한, 광학 현미경으로 절단면 표면 굴곡 형성을 관찰하여 표면조도와 절단면 표면굴곡 형성의 상관관계를 규명하고자 한다.

복잡한 형상의 제품 가공시 경로변경에 의한 모서리 절단 특성 분석을 위해 각도별 절단을 수행하여, 절단각도가 모서리 용융량 및 열영향부에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고, 이를 최소화하기 위한 최적의 루프길이 (Size of loop) 찾기 위한 루프절단을 수행하고자 한다.

본 연구에서는 이러한 실험결과를 종합하여 공정변수의 절단품질에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고 최적의 공정변수를 도출하고자 한다.

또한, SYSWELD V9.0을 이용하여 고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한

Inconel 718 박판 절단공정의 준정적 정상상태 (Quasi-stationary and steady-state) 3차원 열전달 해석을 수행하여 재료 내부의 3차원 열전달 특성과 절단부의 온도분포 특성에 대해 분석하고자 한다.

제 2 장 레이저 절단시편 및 실험방법

본 장에서는 본 연구에 사용된 Inconel 718 시험편의 규격 및 특성과 고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 Inconel 718 박판의 절단 방법을 설명하고, 광학현미경을 이용한 절단시편의 절단면 특징 분석 방법에 관하여 서술하였다.

2.1 레이저 절단시편

실험에 사용한 시편은 극저온과 고온에서 우수한 강도를 가지며 내식성, 내열성이 우수하여 항공기 기체 및 원자력 발전소의 증기발생기 전열관, 자동차 코일 스프링, 반도체 소자, 각종 기계부품 등에 다양하게 사용되고 있는 Inconel 718 니켈계 초합금이다. 실험시편의 판재 두께는 1.0 mm에서 2.0 mm 사이로 레이저 절단시 열에 의한 후변형에 의하여 절단이 양호하지 못한 박판을 선정하였다. 시편의 크기는 Fig. 1 과 같이 정사각형의 200mm × 200mm 크기로 제작하였다.

실험에 사용된 Inconel 718 박판재의 재료 성분비는 Table 1 과 같으며, 이것은 EDX (Energy Dispersive Spectrometer) 검출 방법에 의해 정량적으로 분석하였다. EDX 검출 방법은 시편의 표면에 전자선을 조사하여 이때 방출되는 전자중에 검출기로 검출된 X-Ray 신호를 Pulse Processor 에서 측정된 후 측정된 각각의 전자성분을 아날로그 디지털 변환기 (A/D Converter) 를 거쳐 디지털 신호로 변화시키는 방법으로 미소 부위의 화학 성분을 정성/정량 적으로 분석하는 방법이다. Fig. 2 는 Inconel 718 재료의 에너지 스펙트럼이다.

Table 1 Chemical composition of Inconel 718 (wt%)

Ni	Cr	Fe	Mo	Nb+Ta
52.5	19	18.5	3	5.1

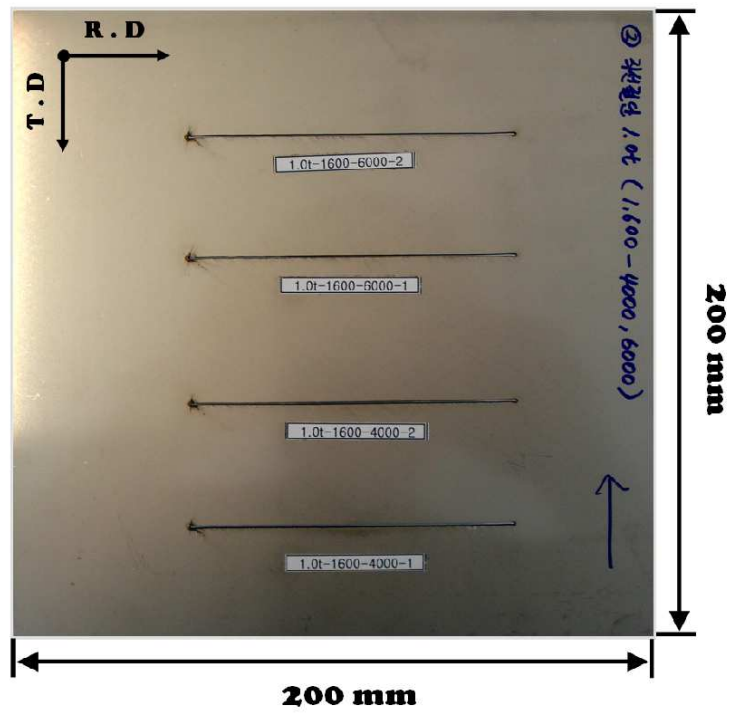


Fig. 1 Specimen of laser cutting experiments (Inconel 718)

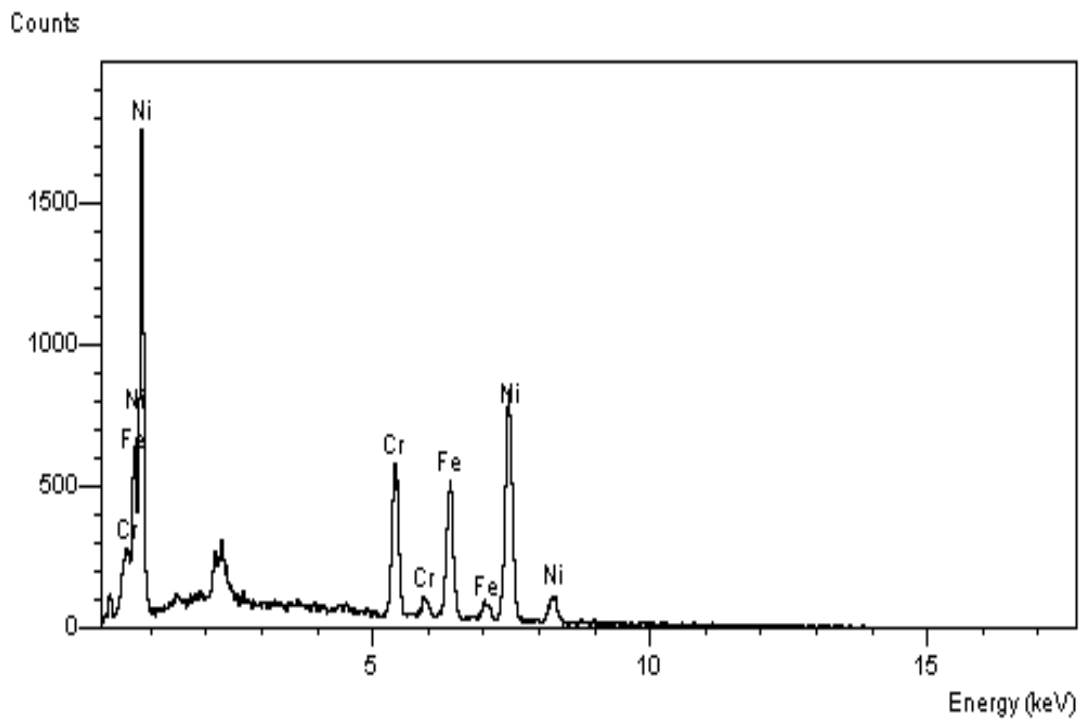


Fig. 2 Energy spectrum of specimen (Inconel 718)

2.2 실험 방법

본 연구에 사용된 레이저 공정변수는 레이저 출력 (P) 과 레이저빔 이송속도 (V_{tr}) 이며, 재료변수는 시편두께 (T) 를 선정하였다. 실험에 사용된 공정변수와 재료두께는 Table 2 와 같으며, 절단가스 압력은 0.1 MPa 로 고정하였다. 특히, 판재 두께는 0.5 mm에서 2 mm 사이로 산소절단과 플라즈마 절단시, 절단후 후변형에 의하여 절단이 양호하지 못한 영역을 선정하였다.

Table 2 Experimental conditions

Process parameter	Condition
Power of laser (Watt)	1,200 ~ 1,800
Travel speed of laser (mm/min)	2,000 ~ 10,000
Thickness of CSP 1N (mm)	1.0 ~ 2.0
Gas pressure (MPa)	0.1
Cutting angle (°)	30 ~ 150
Size of loop (mm)	3, 5

2.2.1 레이저 절단 시스템

본 연구에 사용된 레이저 절단 시스템은 최대 출력 2.8 kW 의 연속파형 Nd:YAG 레이저와 절단가스분사 장치가 부착된 6자유도 운동이 가능한 로봇 레이저 절단 시스템을 이용하였다. 연속파형 Nd:YAG 레이저는 독일의 Trumpf³⁸⁾ 사에서 제작된 아크 플래시 램프 펌핑 장치가 부가된 레이저 발진기에서 생성된다. Fig. 3 과 4 는 레이저 절단 시스템의 구성도와 실험 장치이다.

실험에 사용된 Nd:YAG 레이저의 파장은 $1.06 \mu\text{m}$ 이고 초점렌즈의 초점크기는 0.6 mm 이다. 레이저 빔의 공간모드는 TEM₀₀ 모드이며 레이저 파장의 길이는 195 mm 이고, 노즐과 시편 상면사이의 거리인 초점거리는 1.0 mm 이다.

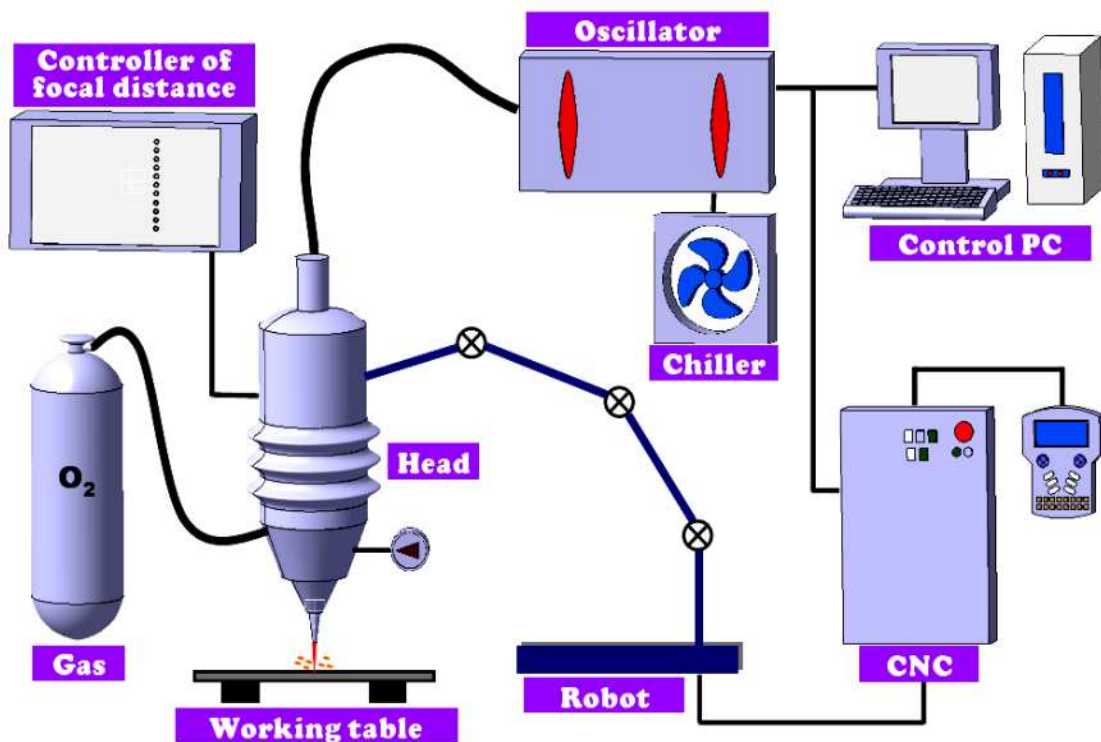


Fig. 3 Schematic diagrams of laser cutting system using a high power CW Nd:YAG laser and 6-axis robot system

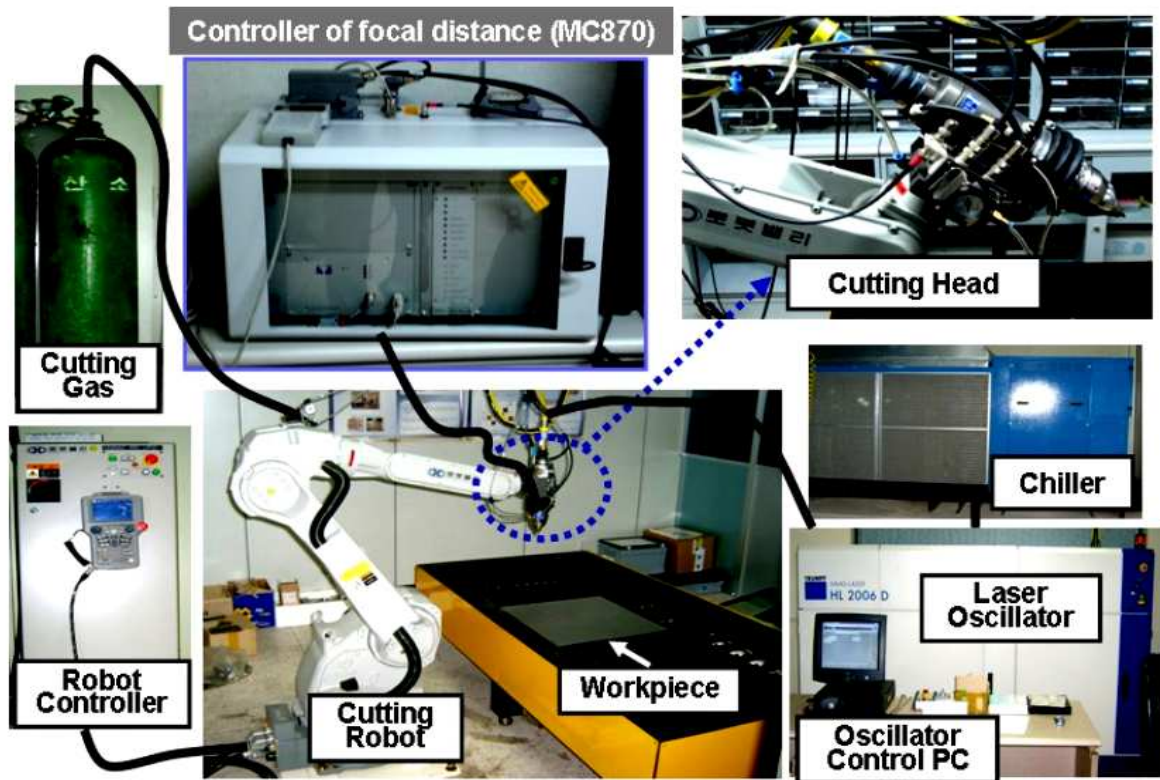


Fig. 4 Experimental set-up

레이저 절단시스템의 작동 방식은 Fig. 4 에서와 같이 레이저 발진기 (Oscillator) 로 부터 생성된 레이저는 광파이버 (Optical Fiber) 를 통해서 CNC 조작이 가능한 6자유도 로봇에 부착된 절단 헤드 (Cutting Head) 로 전송되고, 보호가스인 순도 99.99 % 의 산소가스와 함께 가공물에 조사된다.

레이저 절단 실험 중 초점거리는 Fig. 5 와 같은 자동 초점거리 제어 장치가 포함된 오토트래킹 (Auto-tracking) 시스템에 의하여 제어된다. 자동 초점거리 제어 장치는 독일 PRECITEC 사³⁹⁾ 의 MC870 제어 장치와 제어 신호를 받아들여 노즐의 급속 수직 이동을 수행하는 선형 이동 장치 (Linear driver) LD30C 로 구성되어 있다.

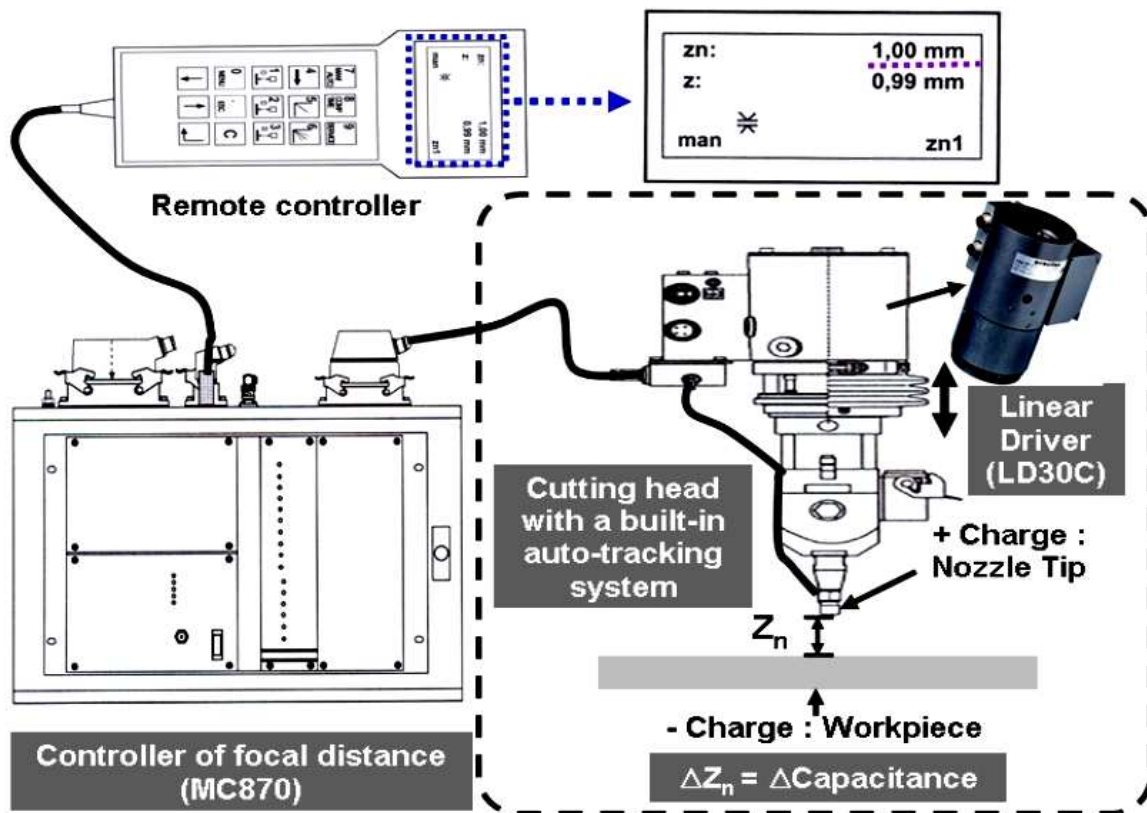


Fig. 5 Schematic diagrams of the auto-tracking system for the real-time control of a focal distance

자동 초점거리 제어 방식은 커패시터 센서 시스템 방식으로 Fig. 5 와 같이 노즐 끝단부를 양극 (+ charge) 으로 하고 시편을 음극 (- charge) 으로 하여 노즐 끝단부와 시편 상부의 초기 초점거리 (Z_n) 를 기준으로 제어 장치에서 기준 전압을 생성한다. 그 후, 제어장치에서 레이저 절단 중 초점거리가 변함 (ΔZ_n) 에 따라 발생하는 커패시턴스 (Capacitance) 변화에 의한 가공 중 전압이 산출된다. 최종적으로 기준 전압과 가공 전압의 전압차를 계산하고, 이 전압차를 압전 센서 (Piezoelectric sensor) 가 부착된 선형 이동 장치로 전송하여 전압차 만큼 선형 이동 장치가 수직 방향으로 노즐을 급속 이동하도록 하여 초기 초점거리를 유지하도록 하는 방식이다.

2.2.2 직선 절단 실험

공정변수가 절단부 형성에 미치는 영향성 평가 및 절단 가능영역을 도출하기 위하여 Fig. 6 과 같이 전체 길이 100 mm 의 직선 절단 실험을 실시하였으며, 전체 절단 길이 중 전·후 30 mm 의 레이저 안정화 구간을 제외한 나머지 40 mm 구간에서 반복 측정을 통한 데이터 값을 취득하였다. 레이저 절단 실험간 간격은 열에 의한 영향을 최소화하기 위하여 최소 40 mm 이상의 간격을 유지하여 실험하였다. 100 배율의 광학현미경을 이용하여 시험편의 절단 단면을 검사하여 절단가능영역 (Practical cutting region) 선정 및 절단폭 (Kerfwidth) 을 측정하였다. 절단폭은 상부절단면 (Upper side of the cut section) 과 하부절단면 (Bottom side of the cut section) 에서 각각 절단폭을 측정한 후, 평균값으로 정의하였다. 또한, 측정영역의 절단면 특성 분석을 위해서 절단 시편을 레이저 절단방향에 수직이 되도록 절곡하였다. 절곡된 시험편은 300 배율의 광학현미경을 이용한 절단면 조직사진 촬영에 사용되었다.

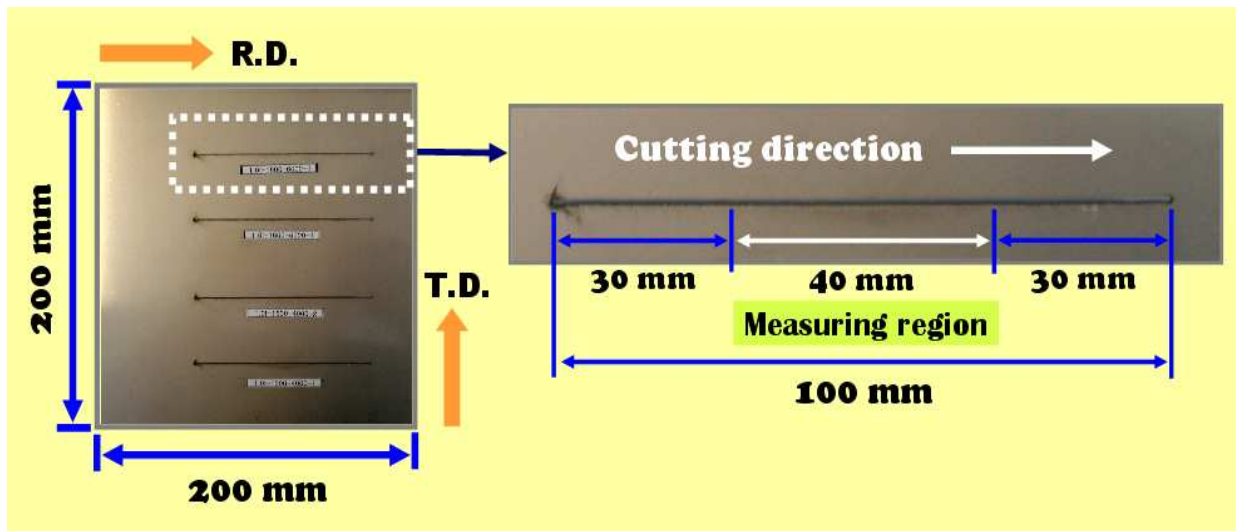


Fig. 6 Methodology of linear cutting tests and measuring region of specimen

2.2.3 각도 절단 실험

레이저 절단 가공 중 다양하고 복잡한 형상의 가공물을 절단시, 모서리 부분에 열이 집중되어 용융됨으로써 요구하는 형상을 가공하기가 어려운 단점이 있다.^{30~31)} 이와 같이 모서리 부분에서 재료가 용융되는 양을 정량적으로 평가하고 최적의 공정변수를 도출하기 위하여 Fig. 7 과 같이 레이저 가공 경로에 절단 각도의 변화를 주어 실험하였으며, 절단각도는 30°, 60°, 90°, 120°, 150° 로 선정하였다. 실험에 사용된 공정변수는 직선 절단을 통해 확보한 최적의 공정변수를 사용하였다. 각도 절단 실험은 4회 이상을 반복 실험하여 오차값을 최소화 하였다.

이와 같이 각도 절단 실험을 통해서 모서리 부분의 용융량 (Fusion area) 및 열영향부 (Heat affective zone) 를 확인함으로써 가공 경로가 변하는 절단 실험에서 모서리 부분에 열이 집중되는 정도를 정량적으로 평가하였다.

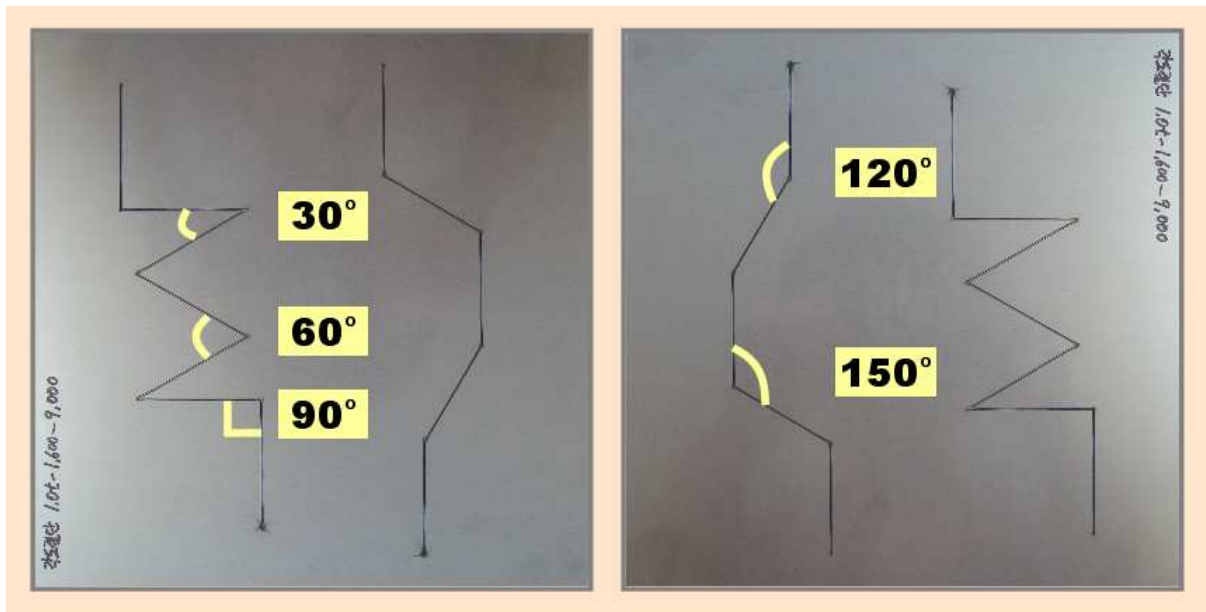


Fig. 7 Methodology of angular cutting tests

2.2.4 루프(Loop) 절단 실험

각도 절단 실험 실시 후 확인된 모서리 용융량 및 열영향부 등을 바탕으로 모서리 부분에 과도한 열의 집중현상을 최소화하고 가공물의 정밀도를 향상시키기 위하여 Fig. 8 과 같이 경로가 변하는 모서리 부분을 루프(Loop) 처리하여 실험하였다. 루프 길이(Size of loop)는 3 mm, 5mm 로 선정하였으며, 루프 절단 실험 각도는 각도 절단 실험과 동일한 30° , 60° , 90° , 120° , 150° 로 선정하였다. 루프 절단 실험을 통해 가공물의 형상에 영향을 미치지 않고, 절단 공정을 간소화 시키는 최적의 루프 길이를 도출하고자 하였다.

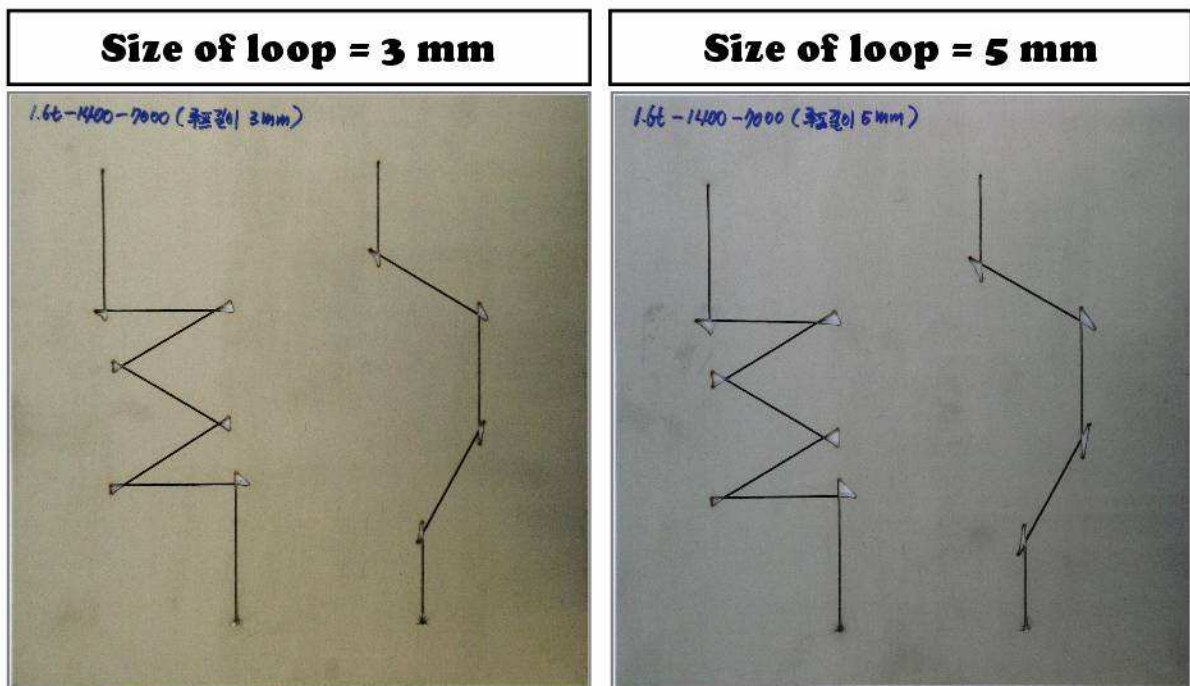


Fig. 8 Methodology of loop cutting tests

제 3 장 실험 결과 및 고찰

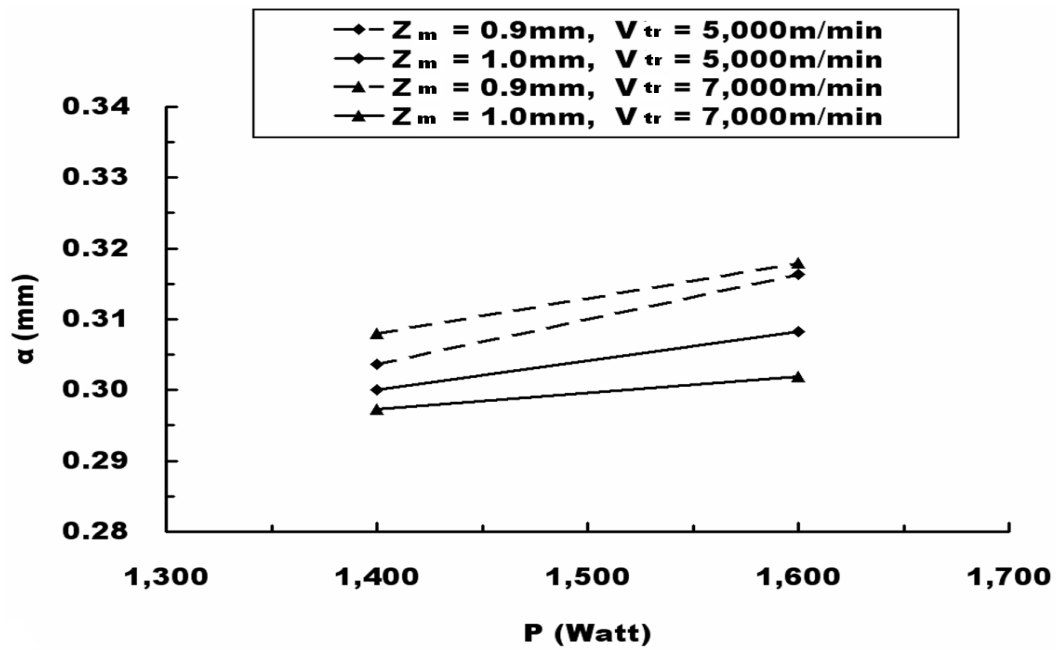
본 장에서는 고풍력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 Inconel 718 박판의 직선 절단, 각도 절단, 루프절단 실험 결과 분석을 통해서 절단 가능영역, 절단폭, 표면 조도, 절단면 조직변화, 모서리 용융량 및 열영향부 등을 고찰하고, 이를 통해 가공물의 절단품질에 영향을 미치는 최적의 공정변수 도출에 관해 설명하고자 한다.

3.1 초점 거리

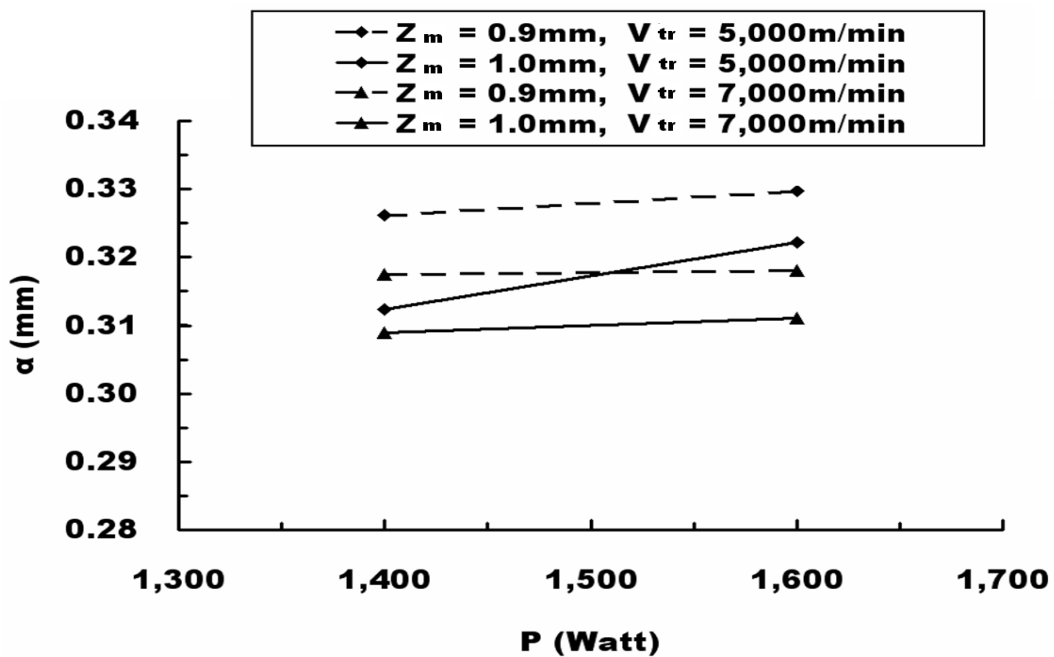
본 실험에 앞서 예비 실험을 통하여 절단 실험 변수인 초점거리(Z_m)를 도출하였다. 초점거리는 노즐과 시편 상면과의 거리로 정의하였으며, 예비실험 결과 얻어진 절단폭을 척도로 하여 최적의 초점거리를 도출하였다.

최적의 초점거리를 획득하기 위해 절단 실험 조건내에서 임의의 영역을 선택하여 각각 초점거리를 달리하여 직선 절단 실험을 실시한 후, 절단부의 절단폭을 측정하여 절단폭이 가장 작게 나타나는 실험 조건에서의 초점거리를 획득할 수 있었다. Fig. 9 는 예비 실험을 통하여 얻어진 절단부의 절단폭을 비교한 것으로, (a)는 시편의 두께가 1.0 mm 일 때 레이저 출력, 레이저 이송 속도 및 초점거리 등의 공정변수에 따른 절단폭의 형성을 나타낸 것이고, (b)는 시편의 두께가 1.6 mm 일 때의 절단폭을 나타낸 것이다. 이를 통해 시편 두께, 레이저 출력, 레이저 이송 속도 등에 관계없이 초점거리가 1.0 mm 일 때 절단폭이 가장 작게 나타나는 것을 알 수 있었다.

따라서, 예비실험을 통해 획득된 최적 초점거리는 0.1 mm 이며, 이것은 본 실험에서 고정된 공정변수로 사용되었다.



(a) T=1.0 mm



(b) T=1.6 mm

Fig. 9 Influence of a focal distance on the kerfwidth for each thickness of material

3.2 절단 가능 영역 (Practical cutting region)

절단 가능 영역은 직선 절단 실험 결과 얻어진 절단면의 조직사진 촬영을 통한 절단부 용융상태를 고찰하여 결정하였다. 절단 실험 후 100 배율의 광학현미경을 이용하여 절단부의 단면검사를 실시하여 과용융, 미절단 및 절단면 하부에 과도한 드로스 발생이 생성되는 공정 조건은 절단 불가능 영역으로 선정하였다.

Fig. 10 은 시편 두께 1.0 mm 이고 레이저 출력이 1,200 Watt 일 때의 절단면 사진이다. Fig. 10 을 통해 절단속도가 낮은 영역에서는 절단공정 중 재료내에 투입되는 유효입열량 (Effective heat input : $Q_{\text{eff}} = P/V_{\text{tr}}$) 이 많아 모재로 많은 양의 열전달이 일어나고 그에 따라 모재의 과용융이 발생하고, 발생된 용융물은 보호가스에 의해 효율적으로 제거되지 못해 절단부 상면에 재응고에 의한 재충진 현상이 발생하였다. 반면, 절단속도가 빠른 영역에서는 보호가스가 용융물을 제거할 시간이 짧아 절단부 하면에 다량의 드로스가 발생하였다. 이를 통해 시편 두께가 1.0 mm 이고 레이저 출력이 1,200 Watt 에서는 절단가능영역이 존재하지 않음을 알 수 있었다.

또한 Fig. 11 과 같이 절단속력이 각 시편 두께와 레이저 출력 조합에 대한 최대 절단 가능 속력을 초과할 경우 시편으로 투입되는 유효입열량 부족으로 인하여 시편이 절단되지 않고 부분 용융 후 냉각되는 특성을 나타내는 것을 알 수 있었다. 이 결과로부터 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 Inconel 718 박판 절단 시 시편의 절단이 가능한 영역과 절단이 불가능한 영역 사이의 유효 입열량 간격이 현저히 작음을 알 수 있었다.

이와 같이 절단부의 용융상태가 양호하지 않은 영역은 절단 가능영역에서 제외하였으며, 최종적으로 Table 3 과 같은 절단 가능영역을 얻을 수 있었다.

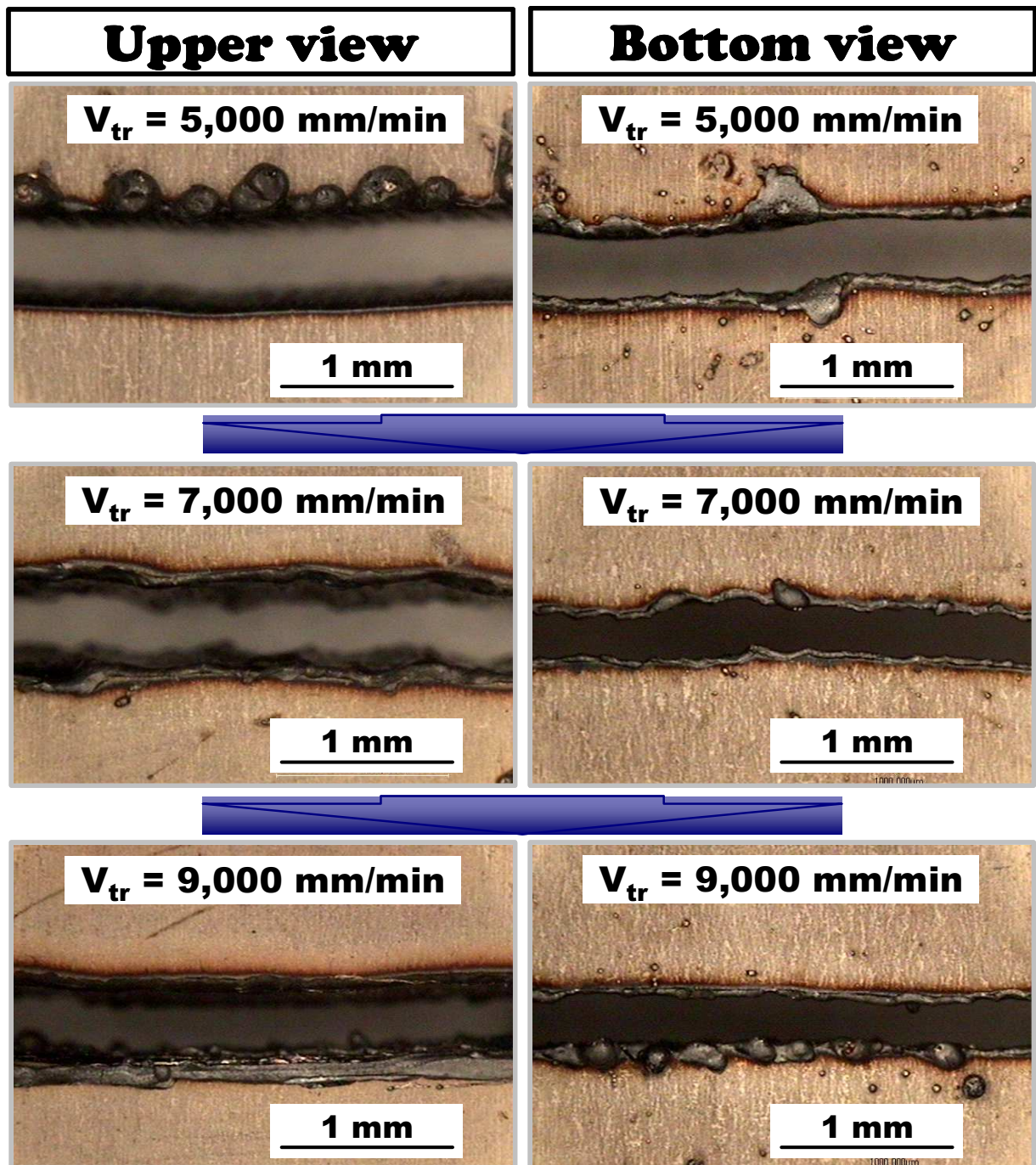


Fig. 10 Influence of the effective heat input on the formation of the cut section ($T = 1.0 \text{ mm}$, $P = 1,200 \text{ Watt}$)

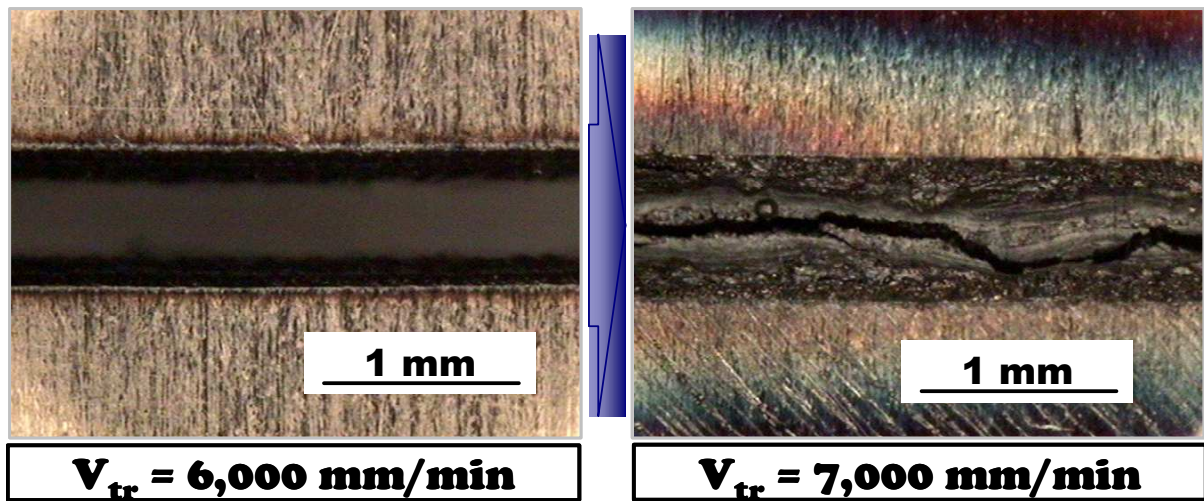


Fig. 11 Formation of the cut section in the vicinity of the maximum allowable cutting speed ($T = 2.0$ mm, $P = 1,600$ Watt)

Table 3 Practical cutting region of each cutting condition

Thickness (mm)	P (Watt)	$V_{tr,min}$ (mm/min)	$V_{tr,max}$ (mm/min)
1.0	1,400	3,000	10,000
	1,600	3,000	10,000
	1,800	3,000	10,000
1.6	1,200	3,000	6,000
	1,400	3,000	7,000
	1,600	3,000	7,000
	1,800	3,000	8,000
2.0	1,200	3,000	5,000
	1,400	3,000	5,000
	1,600	3,000	6,000
	1,800	3,000	6,000

3.3 절단폭 (Kerfwidth : α)

공정변수가 절단폭 형성에 미치는 영향성은 앞에서 취득한 절단가능영역을 고찰하여 절단폭과 공정변수의 상관관계를 분석하였다. 이를 통해 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 Inconel 718 박판재 절단시 공정변수와 절단폭 관계를 규명하고, 이를 이용하여 정형화된 실험식을 유도하고자 한다.

Fig. 12 는 절단폭 측정 방법이다. 절단폭은 직선절단 실험 실시 후 절단품질 평가길이 내에서 상부절단면 (Upper side of the cut section) 과 하부절단면 (Lower side of the cut section) 의 임의의 여러 지점에서 측정한 후 최종적으로 그 평균값을 산출하였다.

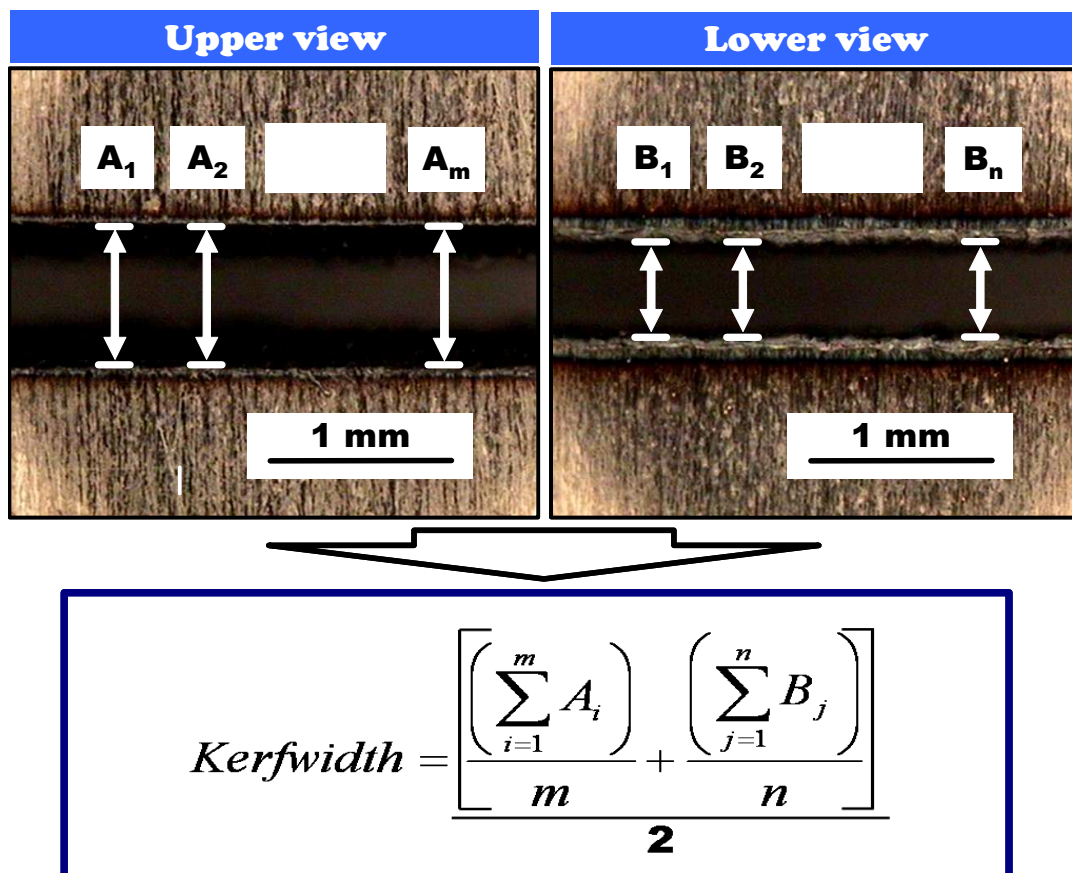
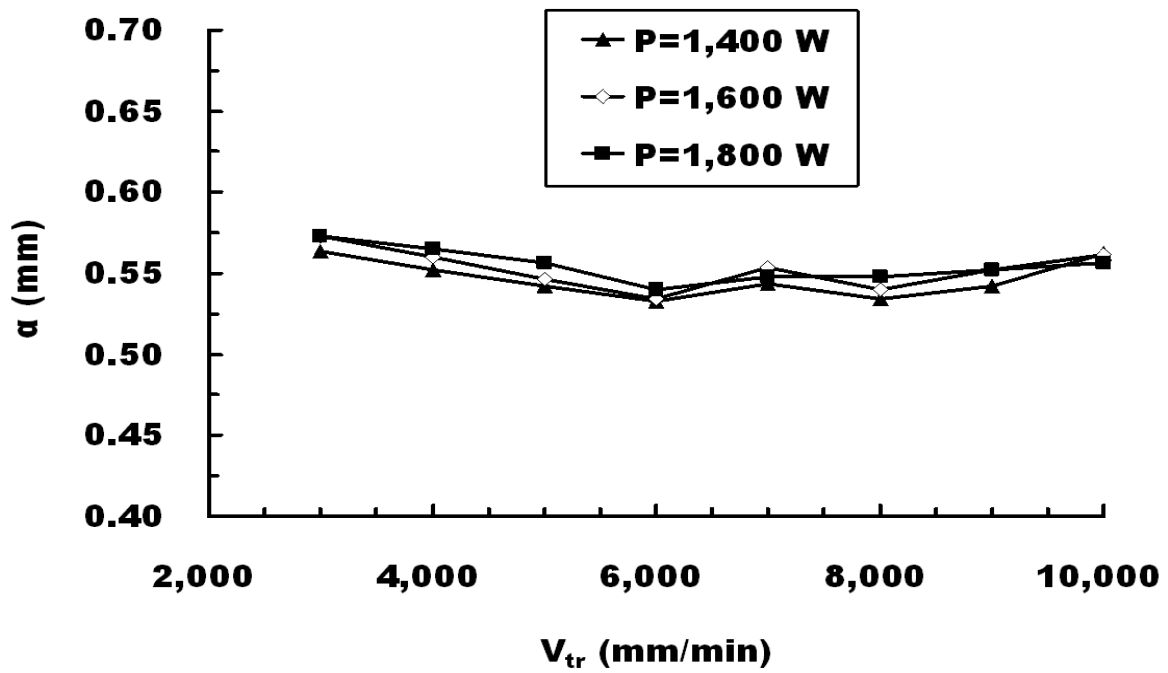
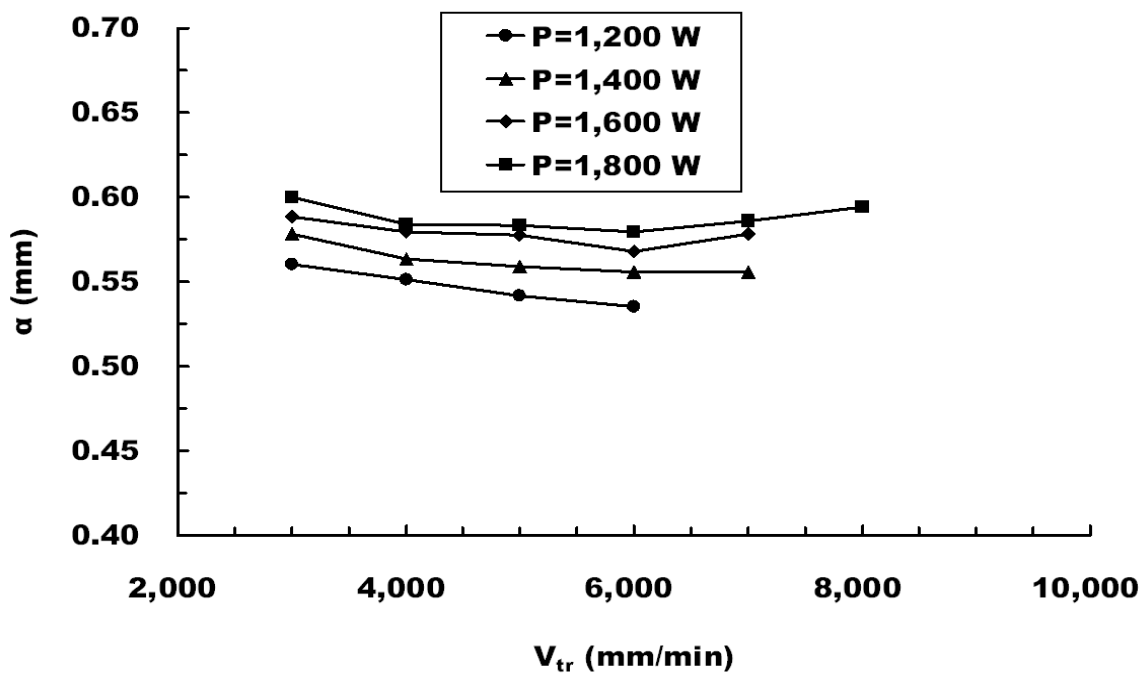


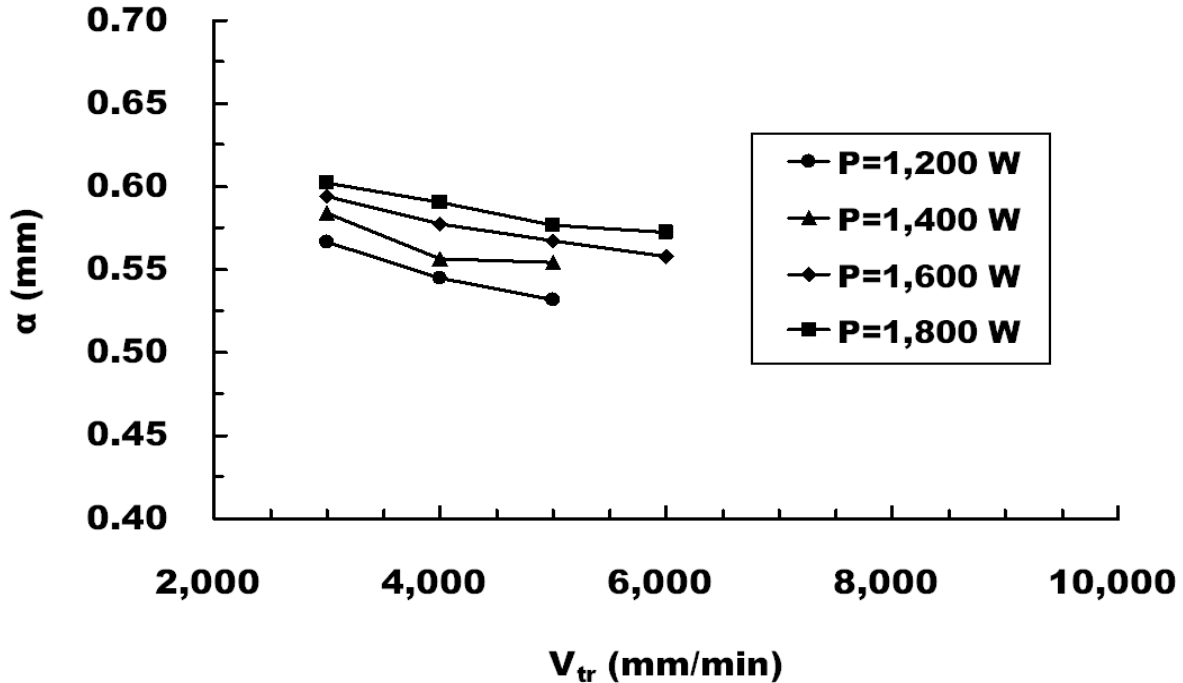
Fig. 12 Estimation method of kerfwidth



(a) $T=1.0$ mm



(b) $T=1.6$ mm



(c) T=2.0 mm

Fig. 13 Influence of process parameters on the kerfwidth

Fig. 13 은 재료 두께에 대한 레이저 출력별 절단속력과 절단폭 (Kerfwidth : α)의 상관관계를 나타낸다. Fig. 13 에서와 같이 레이저 출력의 절단폭 크기 영향성은 시편 두께 1.0 mm 에서는 거의 나타나지 않았으나, 시편의 두께가 1.6 mm 에서 2.0 mm 로 두꺼워질수록 레이저 출력이 증가함에 따라 절단폭이 조금씩 증가하였다. 또한, 시편두께 2.0 mm 에서는 절단 속도가 증가함에 따라 절단폭은 점점 감소하였으나, 시편두께 1.0 mm 와 1.6 mm 에서는 절단 속도가 증가하면서 절단폭은 점점 감소하다가 임계 절단속도 6,000 mm/min ~ 7,000 mm/min 을 기준으로 다시 증가하였다. 본 실험범위에서 절단폭은 최소 0.48 mm 에서 최대 0.60 mm 사이의 값을 나타내었다.

3.4 표면조도 (Surface roughness)

3.4.1 표면조도 측정 방법

공정변수가 절단면 표면조도에 미치는 영향성 분석 및 고찰은 절단폭과 마찬가지로 앞에서 취득된 절단가능영역에서 수행하였다. 레이저 절단면에서의 표면조도는 재료두께 방향의 위치에 따라 차이가 발생할 수 있으므로 Fig. 14 와 같이 평균조도를 나타내는 두께 방향 중심선에서 표면조도를 측정하였으며, 절단 품질 평가 길이 내에서 한 측정 지점을 선정하여 4 mm 간격으로 3회 표면조도를 측정한 후 측정횟수로 평균하여 산출하였다.

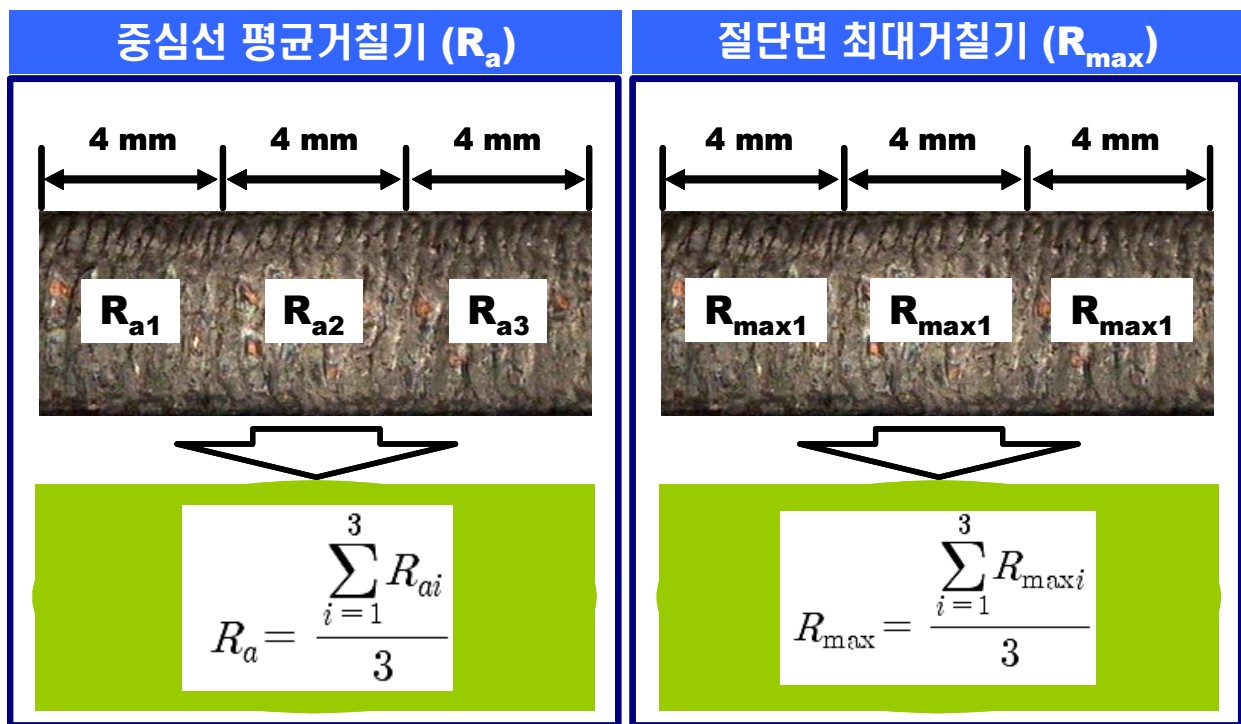


Fig. 14 Estimation method of the surface roughness

Fig. 15 는 표면조도 측정 장치이다. 표면조도는 Mitutoyo 사의 Surftest 402 축침형 표면조도 측정 장치를 이용하여 중심선 평균 거칠기 (R_a) 와 절단면 최대 거칠기 (R_{max}) 값을 측정하였다.

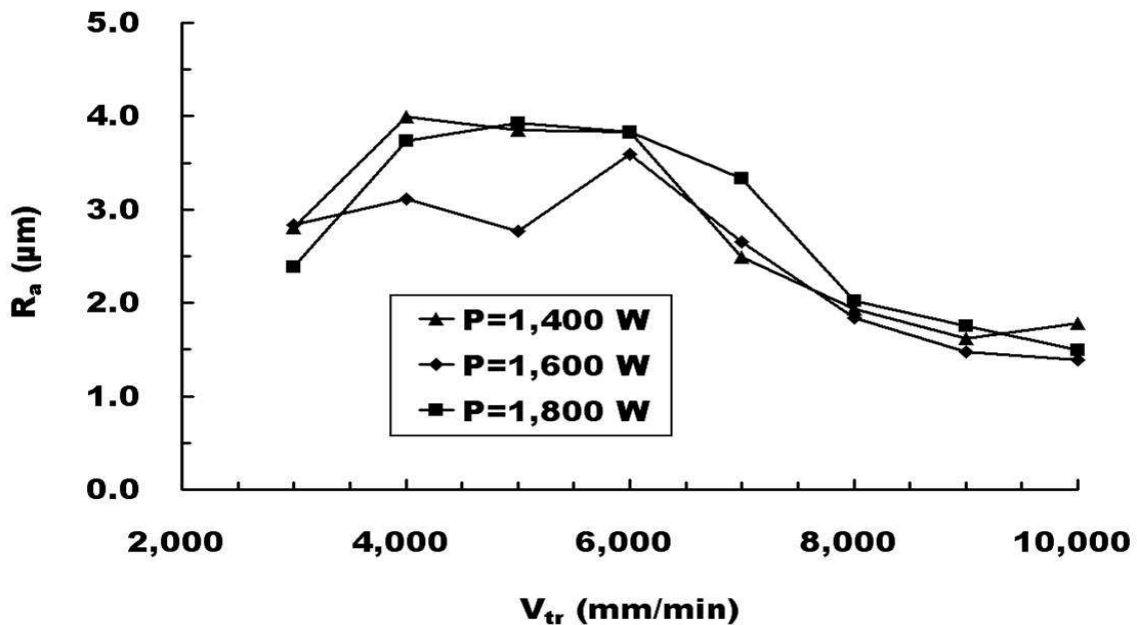
또한, 절단면의 표면조도와 표면굴곡 형성의 상관관계를 알아보기 위해 광학현미경으로 절단면을 확대 촬영하여 절단면의 물결무늬형성(Striation formation) 특성에 대해 분석하였다. 현미경의 배율은 각각 100~300 배율로 절단면을 촬영하였다.



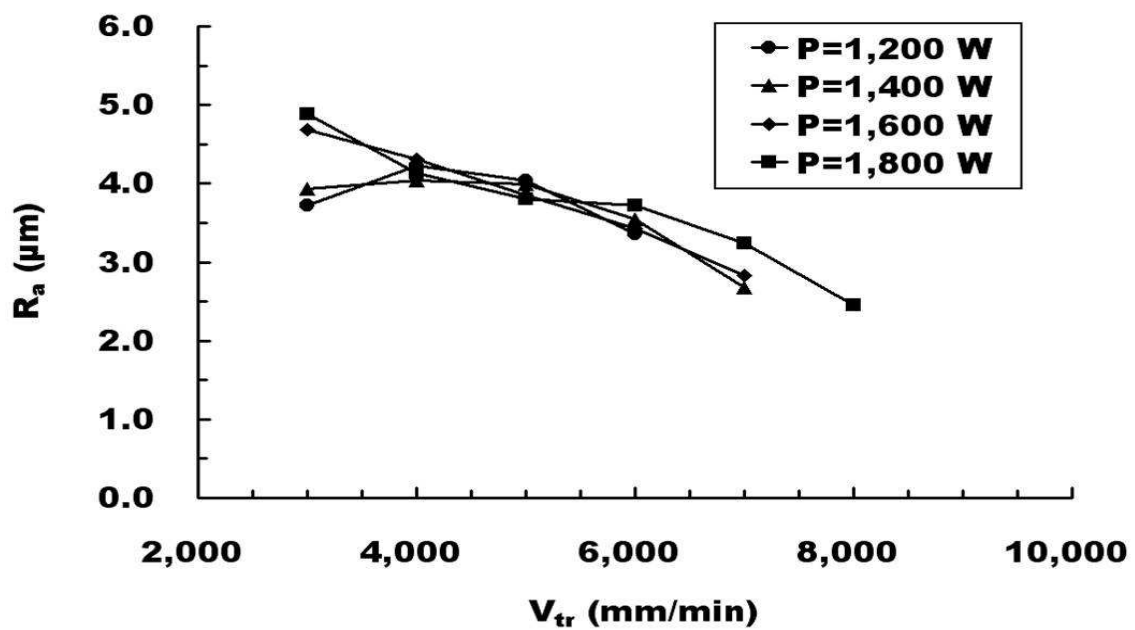
Fig. 15 Measuring equipment of surface roughness (Sufstest 402)

3.4.2 중심선 평균거칠기 (R_a)

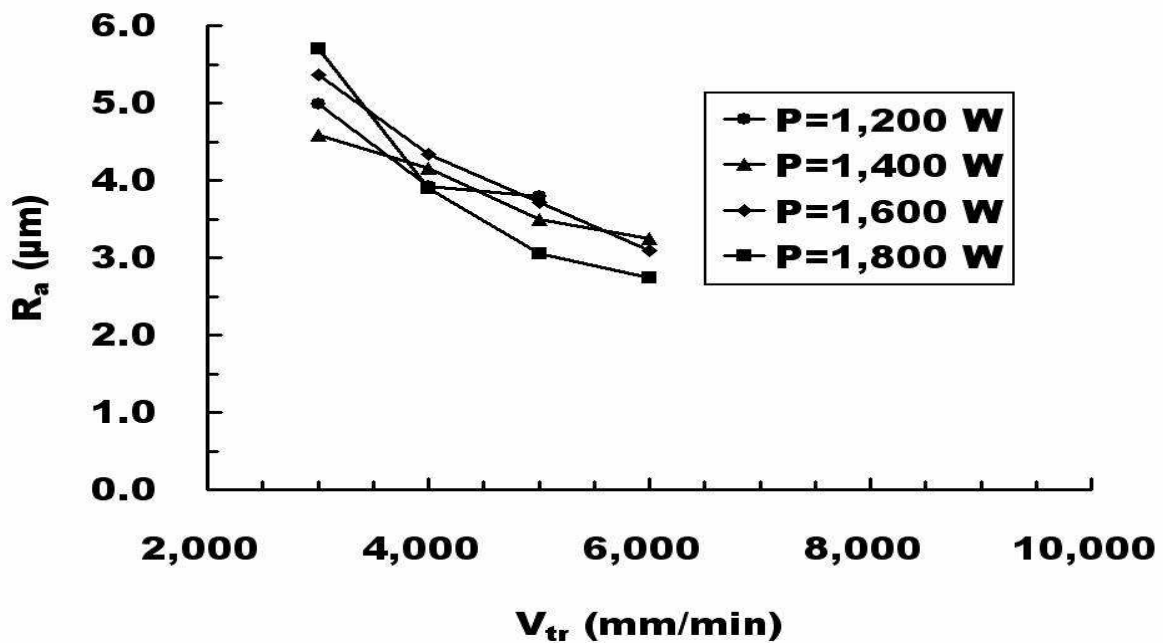
Fig. 16 은 재료 두께별, 출력별 절단속력에 따른 중심선 평균 거칠기의 상관관계를 나타낸 것이다. 본 실험조건에서는 레이저 출력변화에 따른 인코넬 재료의 절단면 표면 거칠기의 변화는 거의 없는 것으로 나타났으나, 일반적으로 절단 속력이 증가할수록 표면조도가 감소하였다. 두께 2 mm 에서는 좁은 절단 속력 영역에서 급격한 표면조도의 변화가 일어났다. 반면, 두께 1 mm 에서는 최초 표면조도가 증가하다가 절단 속력 4,000 ~ 6,000 mm/min 영역에서 표면조도의 변화가 정체현상을 나타낸 후 다시 급격히 감소하였으며 절단 속력 8,000 mm/min 이상에서 표면조도가 완만하게 증가하였다. 이와 같은 현상은 절단면 최대 조도에서도 유사하게 나타났다. 본 실험 조건에서 Inconel 718 재료의 Nd:YAG 레이저 절단 시 취득 될 수 있는 중심선 평균 거칠기는 최소 1.39 μm 에서 최대 5.70 μm 범위에 존재하였다.



(a) $T=1.0$ mm



(b) $T=1.6$ mm

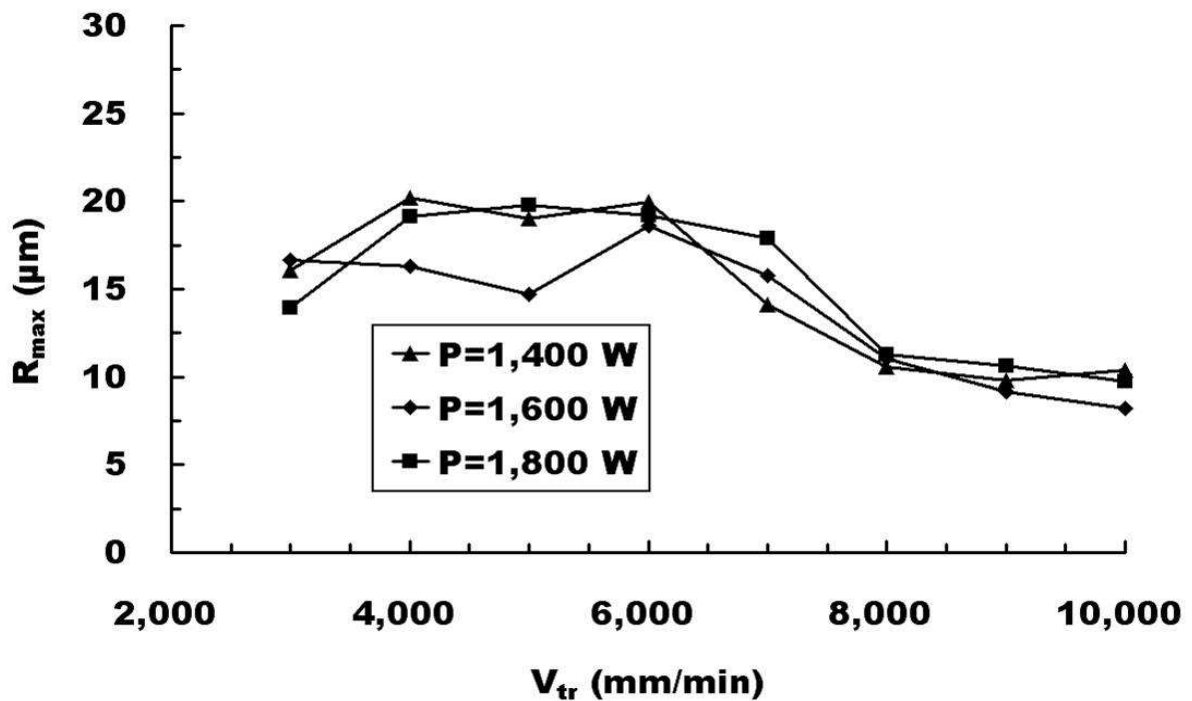


(c) $T=2.0$ mm

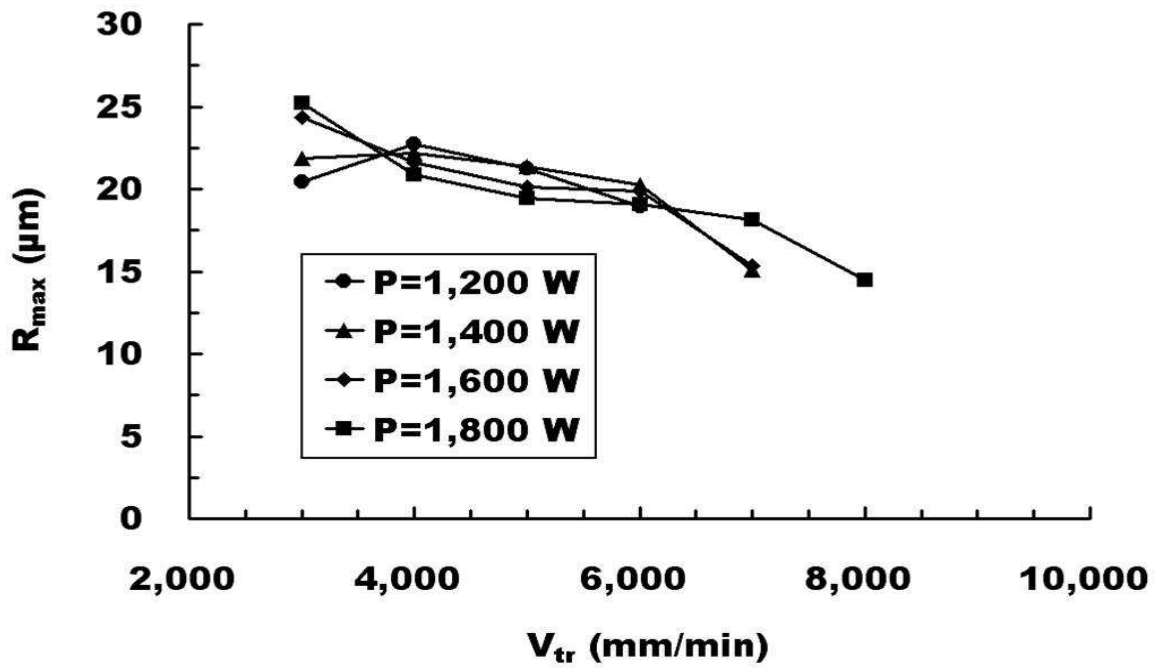
Fig. 16 Influence of travel speed of laser and power of laser on the surface roughness for each thickness of material

3.4.3 절단면 최대거칠기 (R_{max})

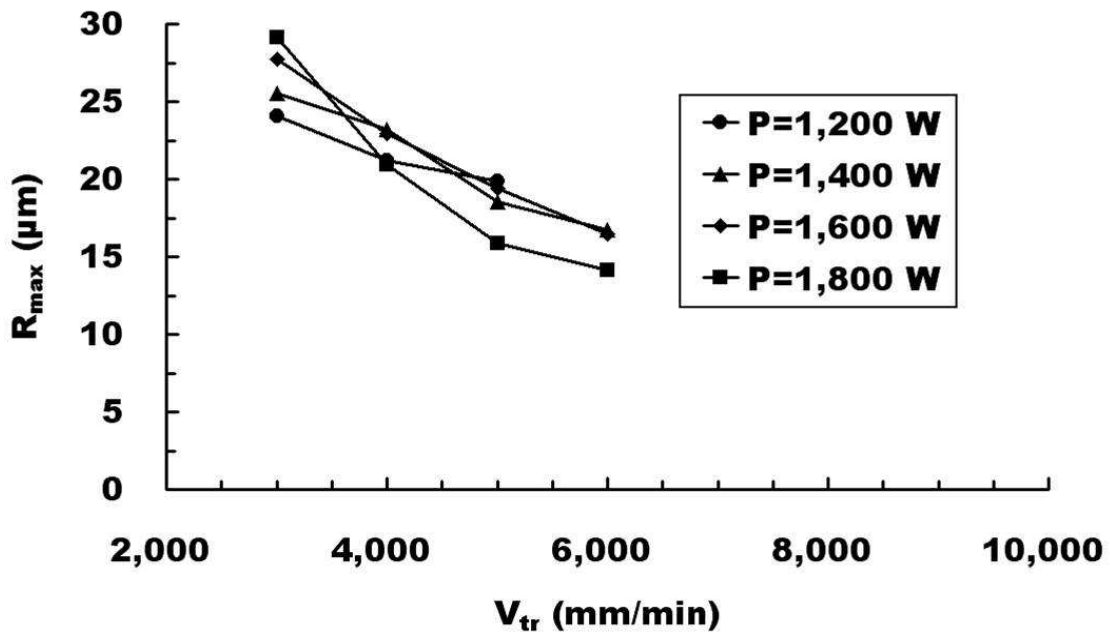
Fig. 17 은 레이저 출력에 따른 절단 속력과 절단면 최대거칠기의 상관관계를 나타낸다. Fig. 17 에서와 같이 절단시편의 두께가 두거워질수록 절단면 최대거칠기는 증가하였다. 또한, 절단속력이 증가할수록 최대거칠기가 감소하다가 임계속력 이후에는 최대거칠기가 증가하는 현상이 나타났다. 이 결과로부터 각 실험 조건별 최대거칠기가 최소화되는 최적절단속력이 존재함을 알 수 있었다. 본 실험 조건에서의 Inconel 718 재료의 Nd:YAG 레이저 절단 시 취득 될 수 있는 절단면 표면 조도는 절단면 최대 조도의 경우 최소 $8.20 \mu\text{m}$ 에서 최대 $29.10 \mu\text{m}$ 의 범위를 알 수 있었다.



(a) $T=1.0 \text{ mm}$



(b) $T=1.6$ mm



(c) $T=2.0$ mm

Fig. 17 Influence of travel speed of laser on the maximum roughness of the cut section

3.4.4 표면 굴곡 형성 (Striation formation)

Fig. 18 은 절단속력에 따른 절단면의 굴곡 형성 특성 변화이다. 절단속력이 느린 영역에서는 골이 깊고 높이가 높은 물결무늬가 형성되었으며, 그에 따라 표면조도가 크게 나타났다. 반면 절단속력이 증가함에 따라 높이가 낮은 요철로 변하면서 표면조도가 감소하였다. 이 결과로부터 절단속도가 증가함에 따라 절단면의 표면굴곡의 높이가 완만해지고 이로 인해 표면조도가 감소함을 알 수 있었다. 이와 같은 현상은 절단속력이 느린 경우 절단면내 용융풀의 존재 시간이 길어지면서, 용융풀의 열에너지를 절단 재료쪽으로 많이 전달시킴으로써 절단면 용융깊이가 깊어지기 때문으로 사료된다.

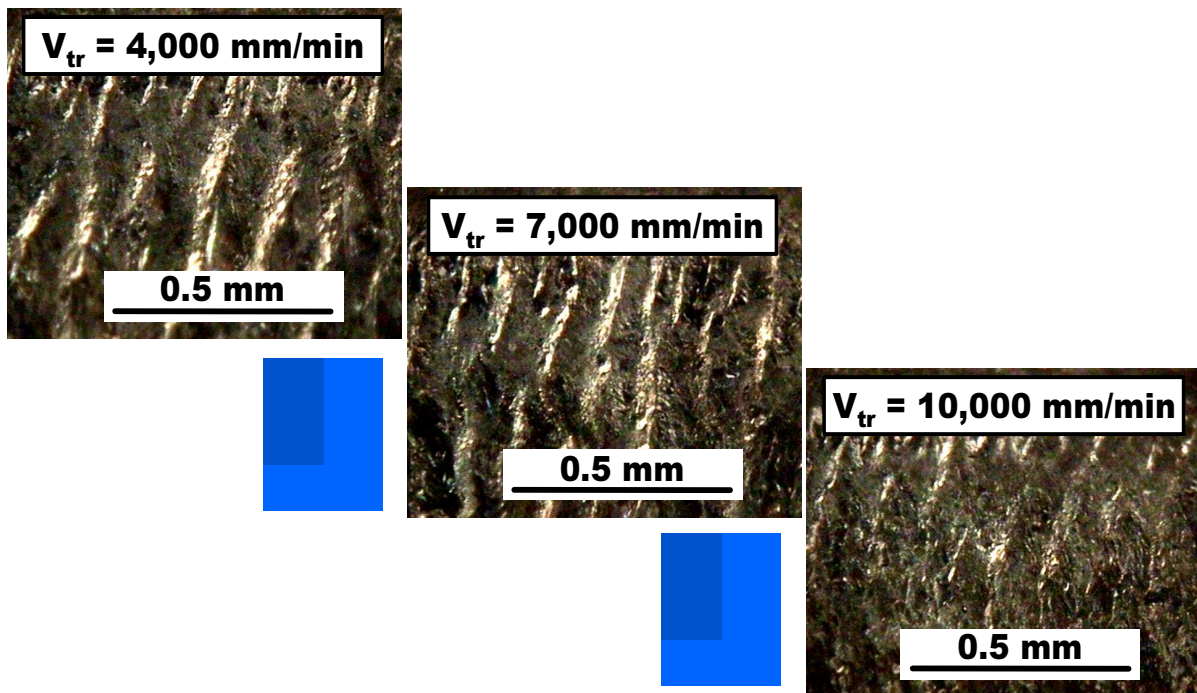


Fig. 18 Influence of cutting speed on the striation formation of the cut section (T=1.0 mm, P=1,800 Watt)

3.5 절단면 조직

레이저 절단 실험 실시 후 절단 단면의 형성 특성 및 금속 재료의 조직 변화에 대해 알아보하고자 전자현미경(SEM)과 EDX 장비를 이용하여 시편 단면의 조직사진을 촬영하여 산화 반응에 의한 금속 조직의 변화를 고찰하였다.

Fig. 19 는 절단속력에 따른 절단면의 표면 조직 변화를 나타낸다. 일반적으로 레이저 열원이 재료에 공급된 후 모재가 용융되고, 모재 재료와 취입가스의 산화반응에 의한 추가적인 용융이 일어난다. 그 후 산화물로 형성된 용융물의 표면에는 산화막이 형성되어 용융물을 감싸게 된다. 절단속력이 빠른 경우 재료내부로의 유효투입 열량이 부족하여 상부의 열이 하부로 적게 전달되기 때문에 산화막으로 둘러싸인 용융층이 상부에만 형성되고, 이 산화 용융물은 점성에 의해 서로 응집하여 절단면 내에 경계면을 형성한다. 결국, 경계면을 형성하는 산화 용융물은 취입가스의 압력과 중력에 의해 하부로 이동하면서 Fig. 19 와 같은 절단면을 형성하게 된다. 본 논문에서는 Fig. 19 와 같이 절단면 하부에 형성되는 이러한 영역을 과단면 (Break area) 이라 정의하였다.

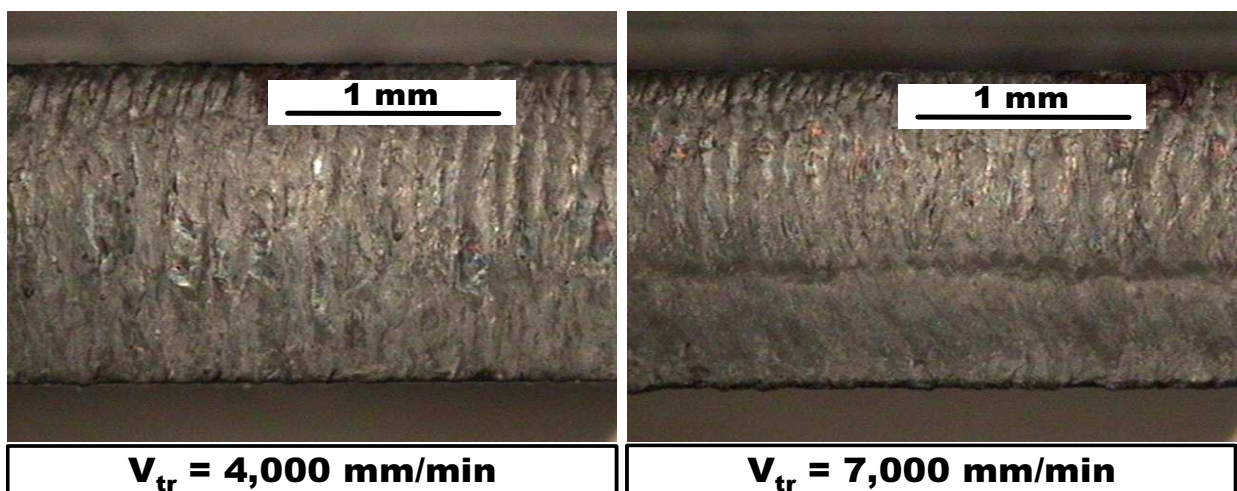


Fig. 19 Influence of cutting speed on the formation of the break area in the cut section (T=1.6 mm, P=1,600 Watt)

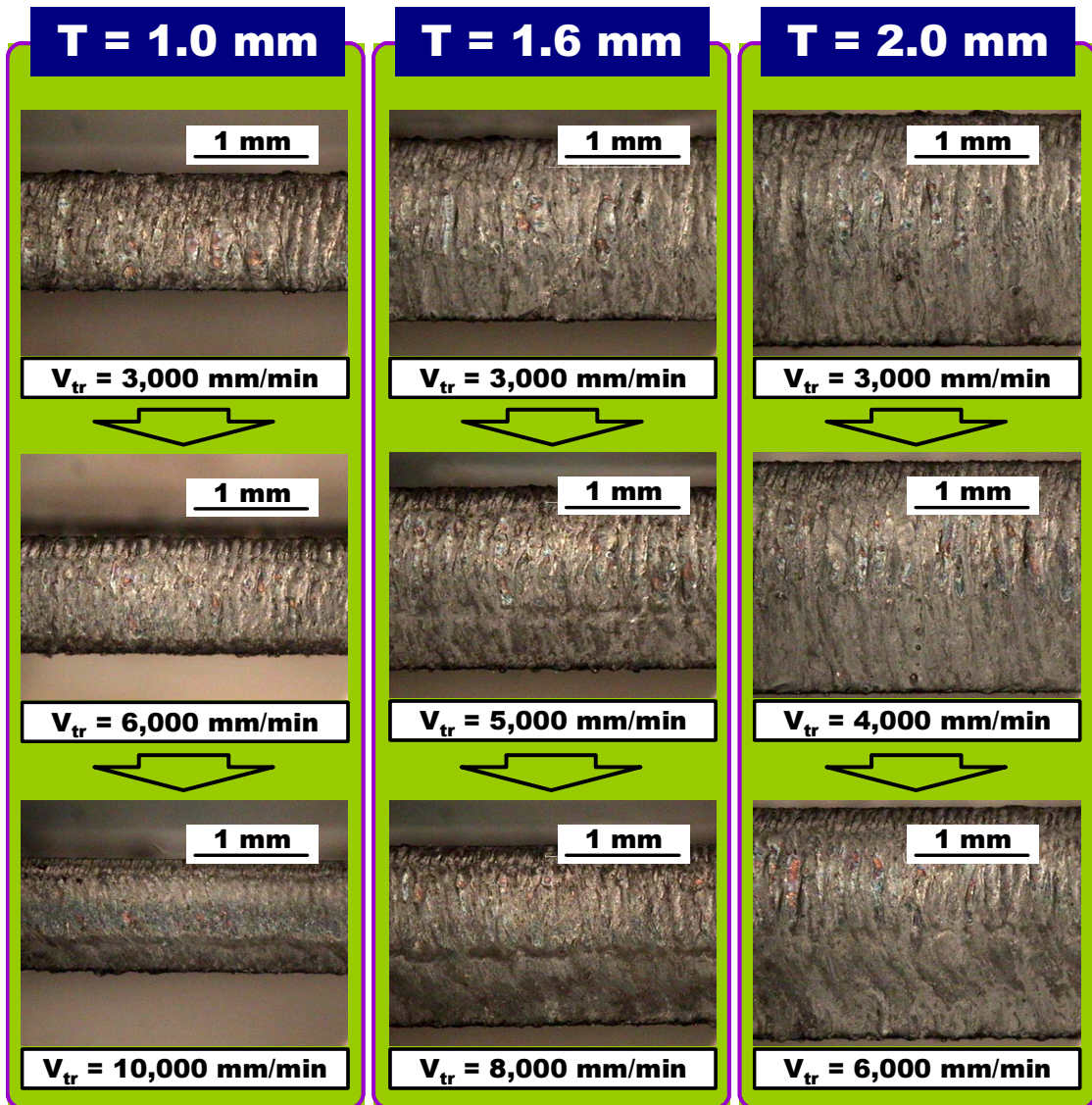


Fig. 20 Influence of the cutting speed on the formation of the break area in the cut section for each thickness of material (P=1,400 Watt)

Fig. 20 은 레이저 출력 1,400 Watt 에서 시편 두께별 절단 속력에 따른 파단면 형성을 나타낸다. Fig. 20 과 같이 레이저 절단 속력이 증가할수록 절단면 하부에 형성되는 파단면이 증가하였고, 이러한 현상은 시편의 두께가 두꺼울수록 절단 속력의 증가에 대해 민감하게 형성되었다.

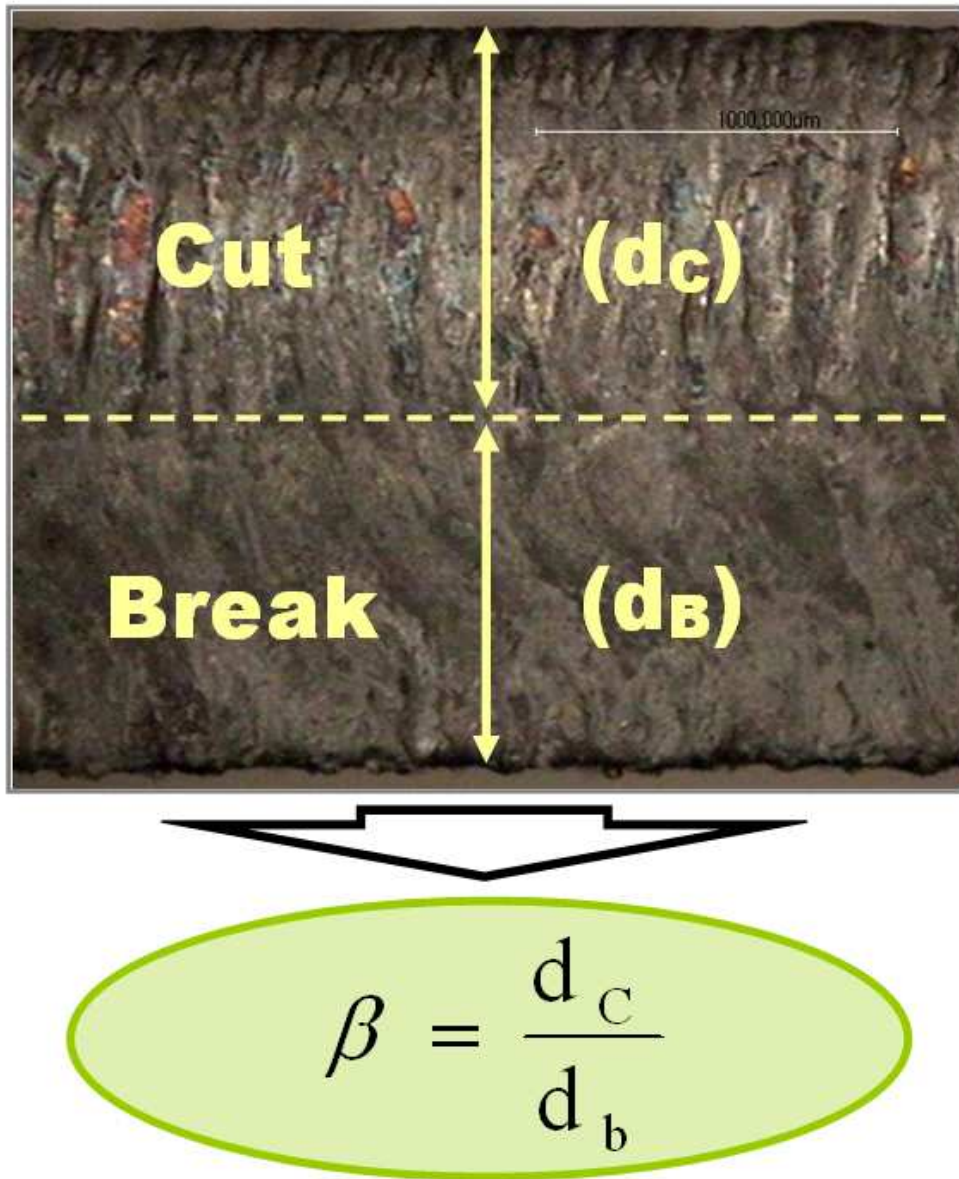


Fig. 21 Definition of depth of the cut area and the break area

절단면 조직관찰 결과 Fig. 19 와 같이 파단면이 형성되는 것을 확인하였고, 그에 따라 공정변수가 절단부 파단면 형성에 미치는 영향성 분석을 위하여 Fig. 21 과 같이 절단면의 경계면을 기준으로 절단영역 (Cut area) 과 파단영역 (Break area) 으로 나누어 공정조건별 절단깊이와 파단깊이의 비 (Cut & break ratio : β) 에 대하여 분석/고찰하였다.

Fig. 22 는 시편두께 및 레이저 출력별 절단깊이와 파단깊이의 비의 레이저 절단 속력에 대한 상관관계이다. Fig. 22 와 같이 레이저 절단 속력이 증가할수록 절단 깊이와 파단깊이의 비가 증가하는 것을 알 수 있었다. 이것은 Fig. 19 에서 설명한 것과 같이 절단속력이 빠르면 재료 내부에 투입되는 유효투입 열량의 부족으로 인하여 절단면의 파단면이 크게 성장하기 때문으로 사료된다. 또한 시편의 두께가 두꺼울수록 동일한 절단 속력에서 절단깊이와 파단깊이의 비가 크게 나타나며, 절단 속력의 증가에 대한 절단깊이와 파단깊이의 비가 크게 성장하였다. 이것은 재료에 투입되는 열량이 동일할 경우, 재료의 단면적이 클수록 에너지의 분산이 증가하여 절단면 하부까지 에너지의 전달이 원활히 이루어지지 않고 그에 따라 시편이 두꺼운 경우 파단면이 더욱 크게 성장하기 때문이다. 반면, 레이저 출력에 대한 절단깊이와 파단깊이 비의 영향성은 시편 두께 및 레이저 절단 속력에 관계없이 거의 없었다.

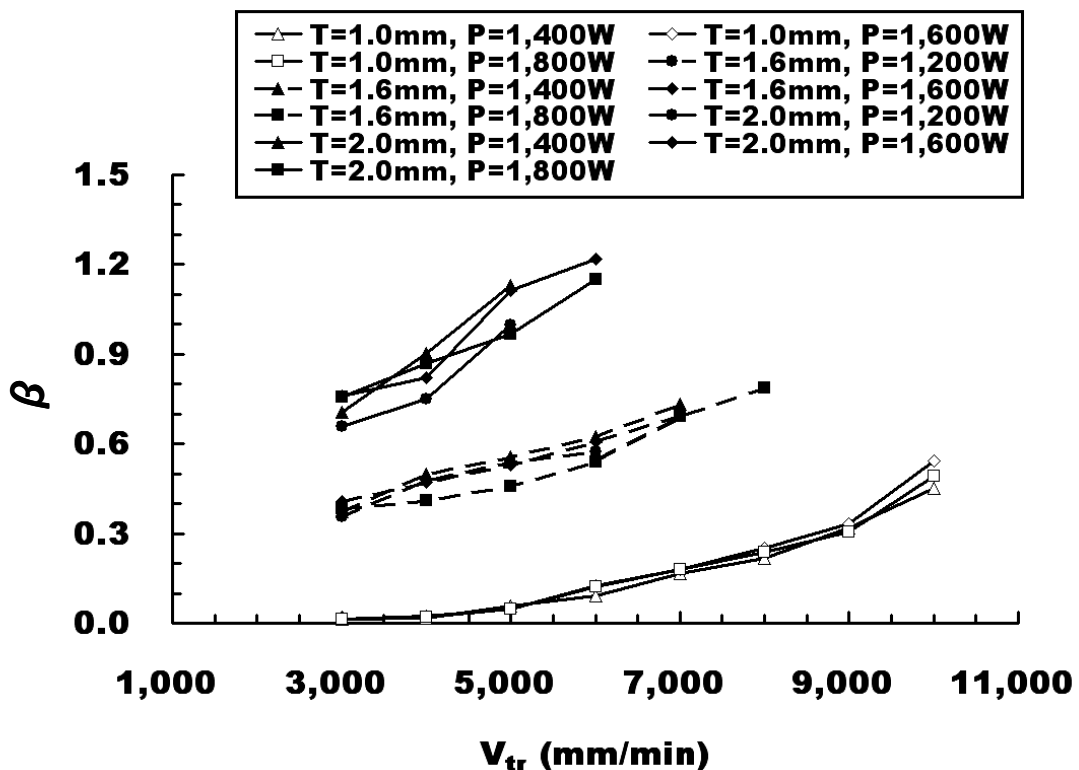


Fig. 22 Influence of process parameters on cut & break ratio

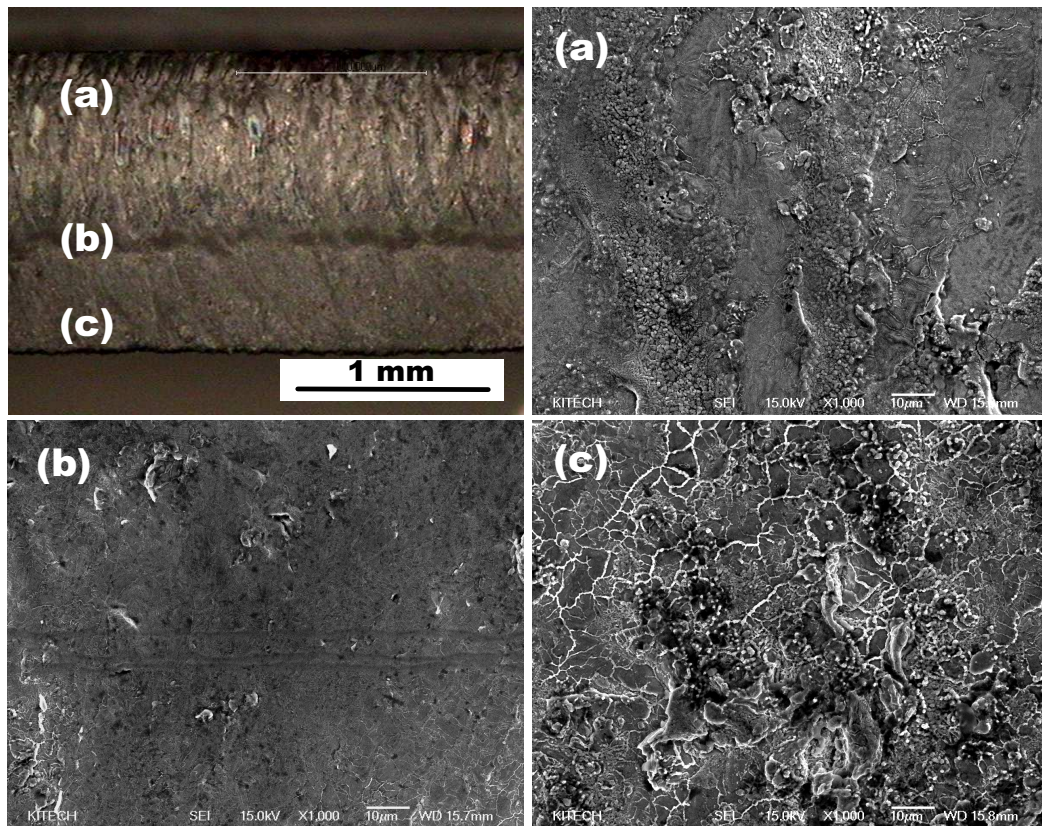


Fig. 23 Variation of microstructures of the cut section in the thickness direction. (T=1.6 mm, P=1,600 Watt, V_{tr} =7,000 mm/min)

공정변수에 따른 절단면 표면조직 변화의 영향성 분석 실시 후 절단면의 조직변화를 세밀하게 관찰하고자 전자현미경 (SEM) 을 이용하여 각 부분별로 나누어 절단면 표면 조직사진을 촬영하였다.

Fig 23 은 두께 1.6 mm, 레이저 출력 1,600 Watt, 레이저 절단 속도 7,000 mm/min 에서의 두께방향 절단면 조직 변화를 나타낸다. Fig. 23 의 (a) 영역인 절단부는 레이저 열원에 의한 열과 산화열에 의하여 모재가 용융되어 생성된다. 그러므로 Fig. 23 의 (a) 영역과 같이 모재 주요 구성 원소인 Ni, Cr, Fe 등과 취입 가스내 산소가 반응하여 나타나는 산화물을 포함하는 형태의 단면 조직을 나타낸다. 그러나 Fig. 23 의 (c) 영역과 같은 파단부에서는 하부의 재료를 충분히 용융시킬 레이저에 의한 에너지가 상면으로부터 전달되지 못하고, 가열된 하부에 취입 가스 압력이 가해짐으로써 연성 파괴 조직과 같은 딴플 조직이 형성되었다.

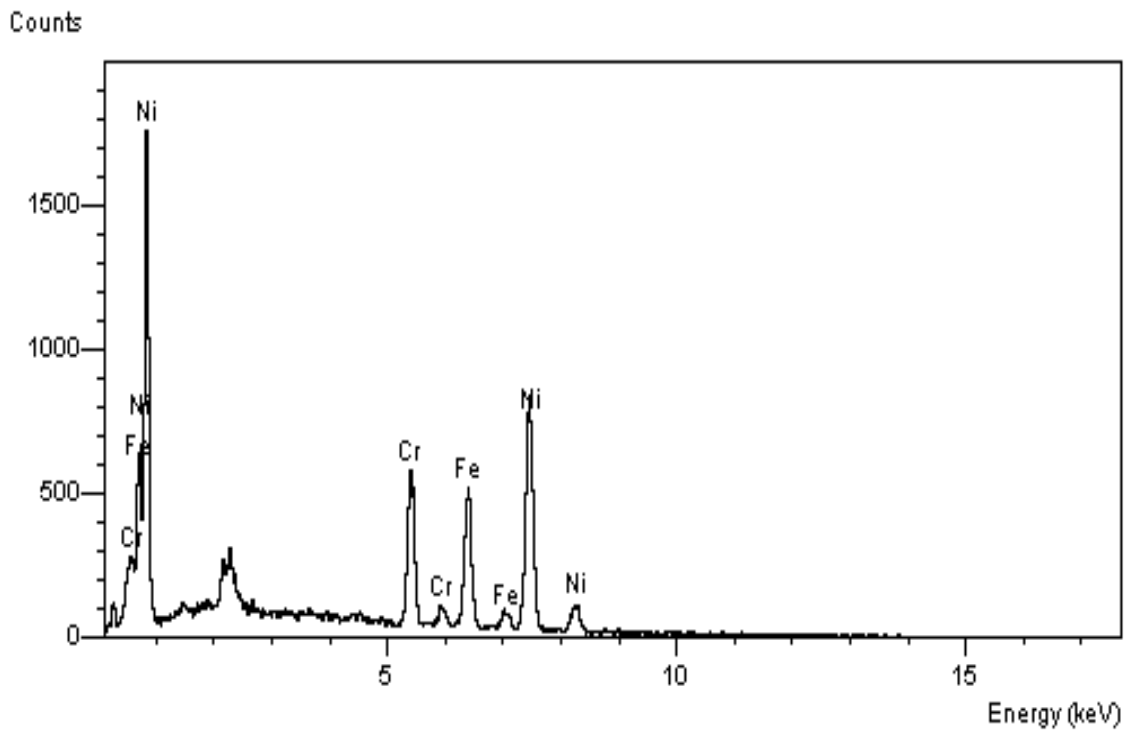
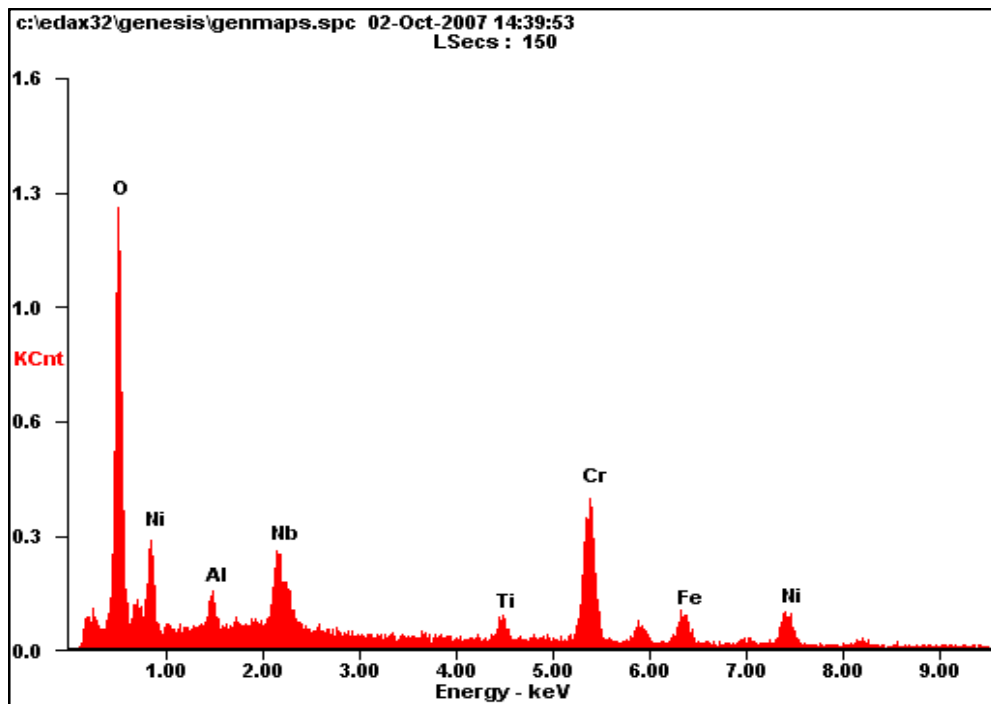
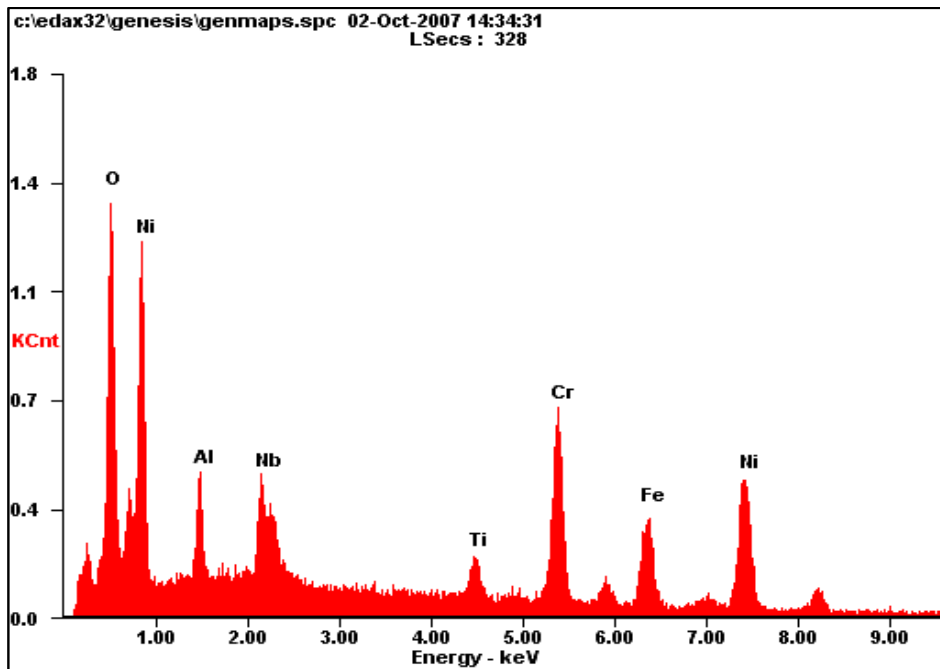


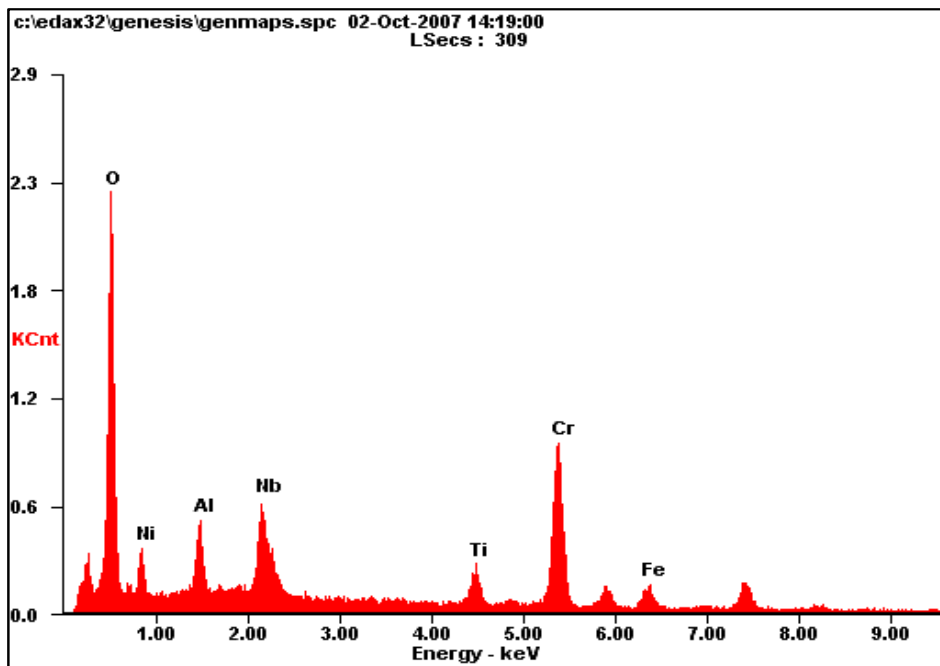
Fig. 24 Energy spectrum of material surface (Inconel 718)



(a) Cut area



(b) Boundary area



(c) Break area

Fig. 25 Energy spectrum of each cut section
 (T=1.6 mm, P=1,600 Watt, V_{tr} =7,000 mm/min)

레이저 절단 가공 후 시편 절단면의 재료 성분분포와 조직변화의 상관관계에 대해 고찰하기 위하여 EDX 장비를 이용하여 Fig. 24 와 25 와 같이 절단면 표면의 에너지 스펙트럼을 분석하였다.

Fig 24 는 절단 실험전의 재료 표면의 에너지 스펙트럼이고, Fig. 25 는 Fig. 23 에서 나타난 절단면의 각 부분을 측정된 절단면의 에너지 스펙트럼이다. Fig. 24 에서는 에너지 분포에 산소성분이 검출되지 않지만, Fig. 25 에서는 레이저 절단에 의해 산소성분이 다량 검출되었다. 또한 절단면 파단부인 (c) 영역에서는 (a) 나 (b) 역역에 비해 다량의 산소성분이 검출되었다. 이를 통해 Inconel 718 금속의 레이저 절단시 절단면은 산화되기 쉬운 모재 주요 구성 원소인 Ni, Cr, Fe 등과 취입가스인 산소가스가 반응하여 용융부에서 강력한 산화 반응을 일으키는 것을 알 수 있었다. 또한, 산화반응에 의해 형성된 산화막은 레이저의 열원이 재료의 하부까지 전달되는 것을 방해하고 취입가스에 의해 용융물질이 제거됨으로써 파단부인 (c) 영역에 산화 물질이 둘러싸이게 되는 것을 확인 할 수 있었다.

3.6 절단 각도에 따른 절단 특성

레이저 절단 가공 중 형상이 다양하고 복잡하여 레이저의 가공 경로가 변하는 가공품은 모서리 부분에서 레이저 입열량에 의해 열변형 및 과용융이 발생하게 된다. 이에 따라 각도절단 실험을 실시하여 절단시 모서리 부분에서 재료가 용융되는 양을 정량적으로 평가하고 최적의 공정변수를 도출하기 위하여 레이저 절단 각도별 모서리 부분의 용융 면적 (Melted area) 및 열영향부 (Heat affective zone) 분석을 실시함으로써 가공 경로의 변경에 따른 모서리 부분의 열 집중도를 정량적으로 평가할 수 있었다.

3.6.1 모서리 용융 면적 (Melted area in the shape corner)

각도 절단 실험 후 절단면의 절단품질 및 열 영향성을 정량적으로 평가하기 위하여 절단면을 광학 현미경을 이용하여 절단 각도를 중심으로 상부 절단면과 하부 절단면을 Fig. 26 과 27 과 같이 각각 촬영하였다. 그 결과 Fig. 26 과 같이 상부 절단면에서는 Inconel 718 재료의 특성상 가공 경로가 변하여도 모서리 부분에서 절단 각도에 관계없이 열 집적으로 인한 과용융 현상은 나타나지 않았다. 반면, Fig. 27 과 같이 하부 절단면에서는 모서리 부근에 재료의 과용융 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 모서리 용융 면적은 상부절단면을 배제하고 하부 절단면에서만 측정을 실시하였다.

Fig. 28 은 각도 절단시 발생하는 모서리 용융면적을 측정하는 방법이다. Fig. 28 과 같이 기존의 가공 경로에서 과용융 된 면적을 여러개의 작은 삼각형으로 나누어 각각의 면적을 측정하고, 취득된 면적의 총합을 모서리 용융 면적으로 정의하였다.

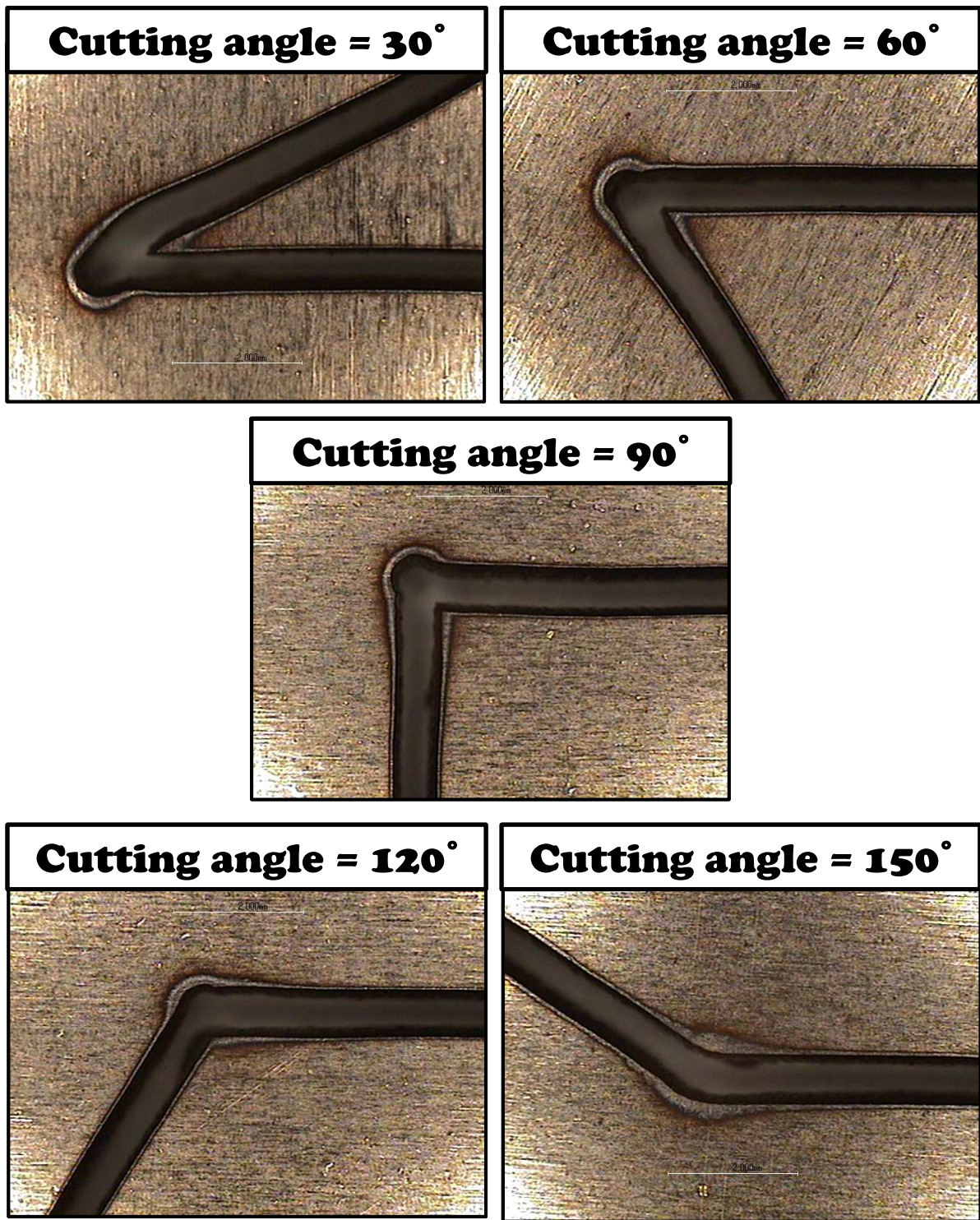


Fig. 26 Influence of cutting angle on the melted area in the shape edge (T=2.0 mm, P=1,800 Watt, V_{tr} =6,000 mm/min, Upper side of cut section)

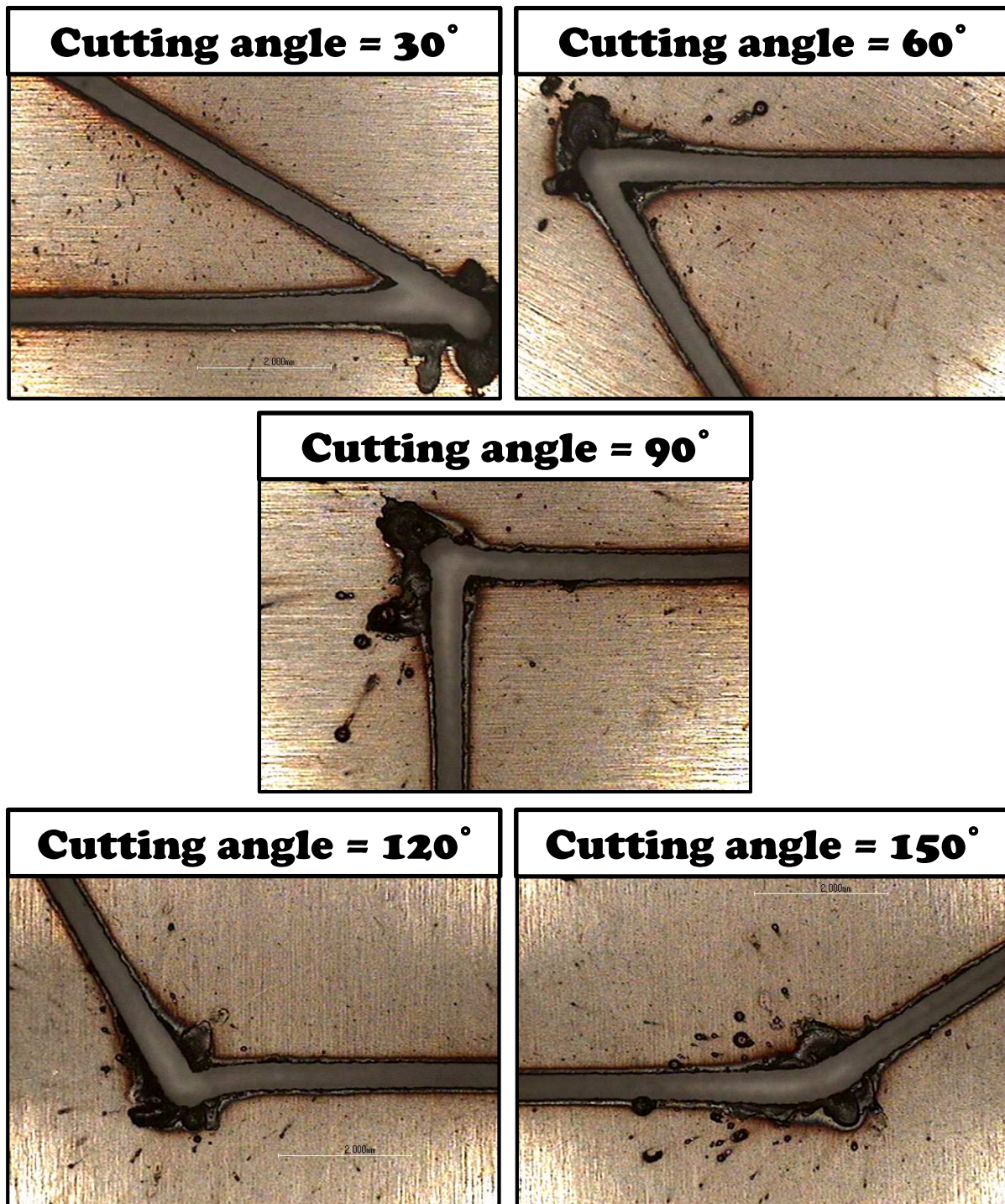


Fig. 27 Influence of cutting angle on the melted area in the shape edge (T=1.0 mm, P=1,400 Watt, V_{tr} =9,000 mm/min, Lower side of cut section)

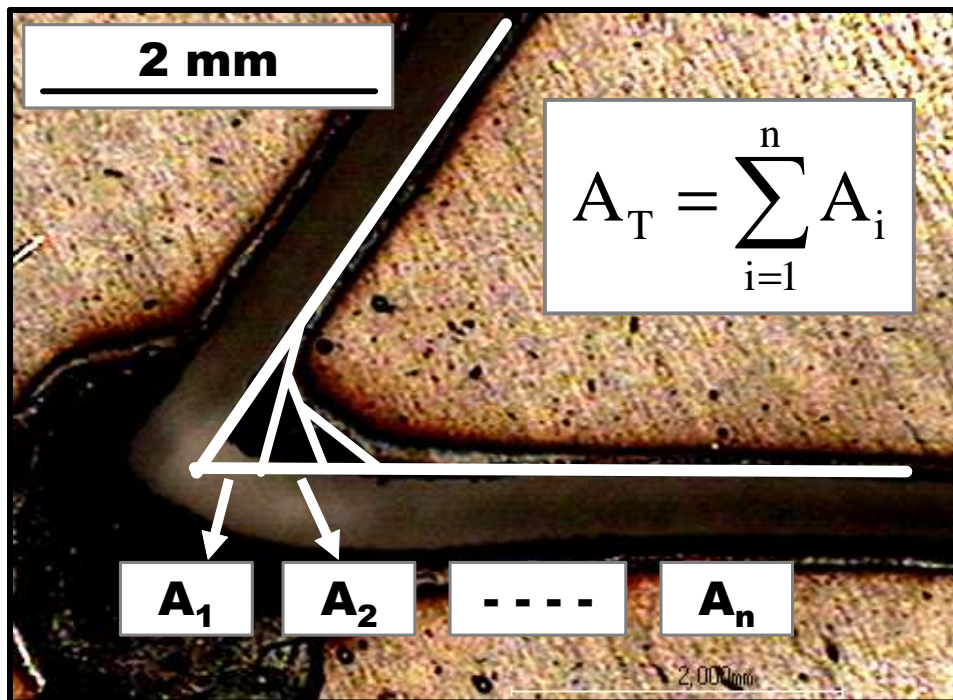
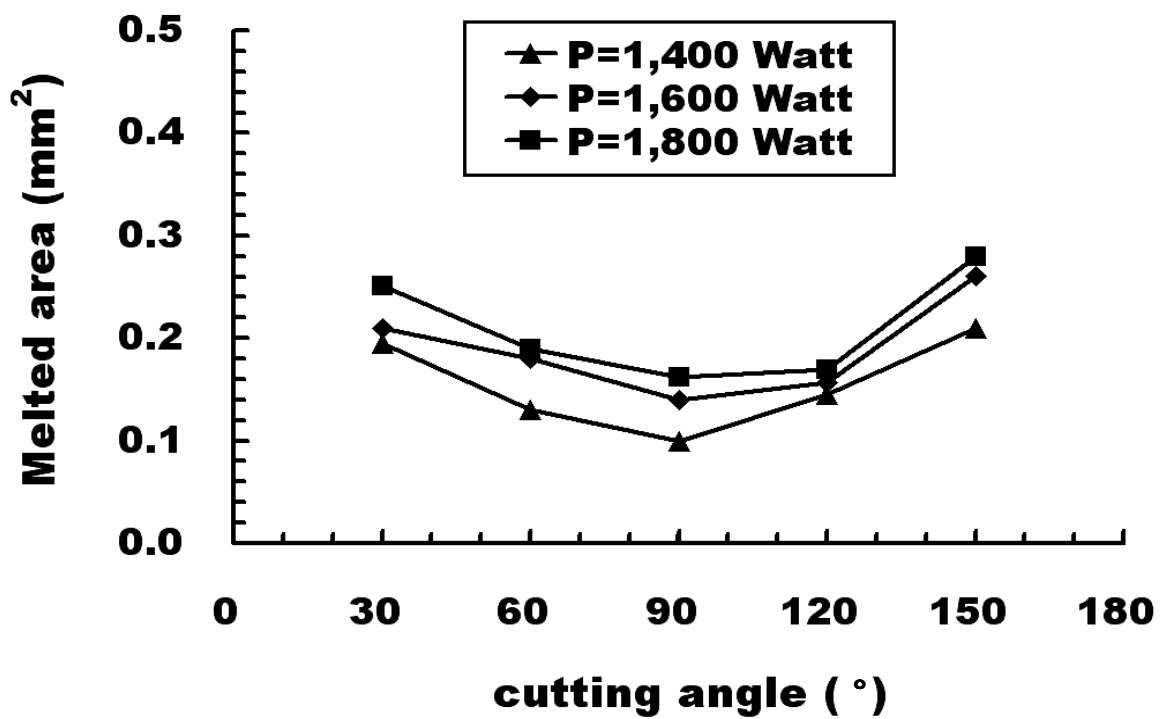
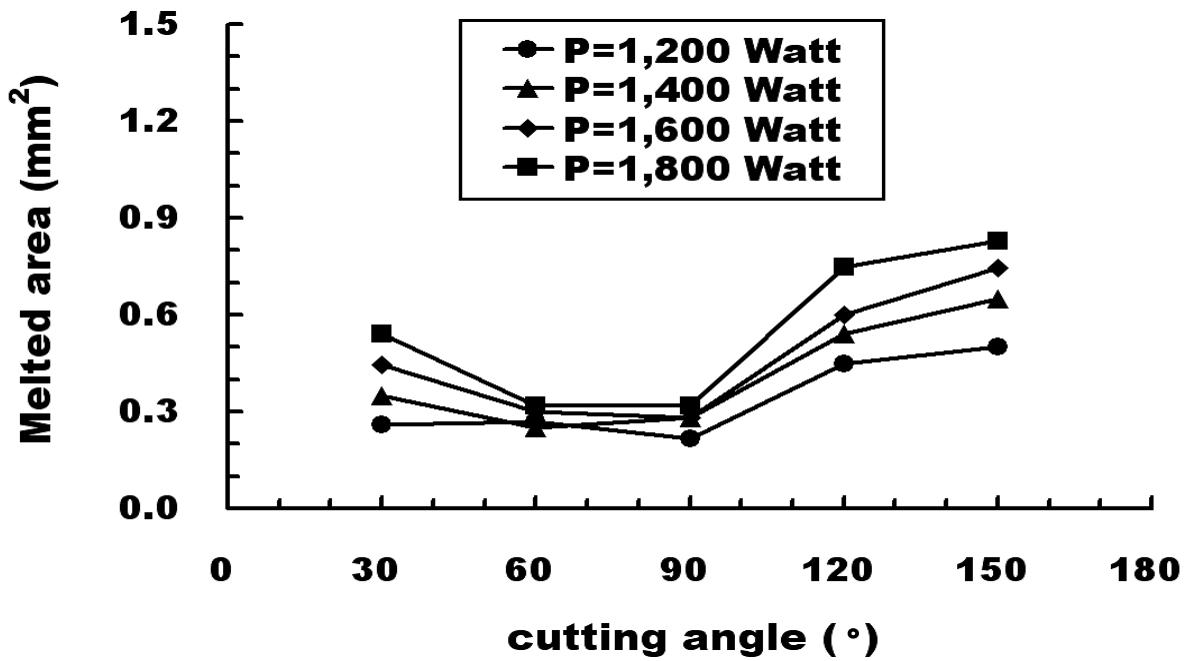


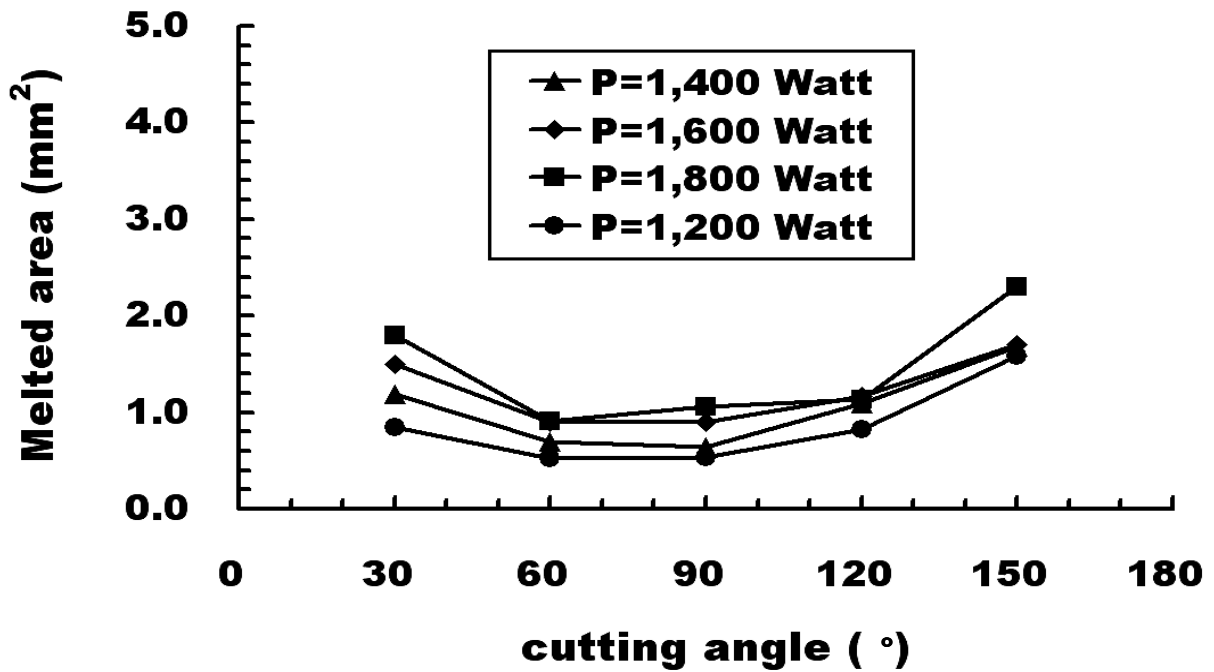
Fig. 28 Measuring methodology of the melted area



(a) Thickness = 1.0 mm



(b) Thickness = 1.6 mm



(c) Thickness = 2.0 mm

Fig. 29 Influence of cutting angle and power of laser on the melted area

Fig. 29 는 각 두께별 표면조도가 최소인 최적의 절단속력에서 절단각도와 모서리 용융량의 상관관계를 나타낸다. 가공 경로의 변화에 따른 모서리 부분의 과용융 현상은 방향 변환시 재료에 투입되는 레이저 빔의 단위시간당 조사시간이 길어져 재료 내에 과입열 현상이 생기기 때문에 발생한다. 실험 결과 Fig. 29 와 같이 절단각도 및 두께에 관계없이 레이저 출력이 증가할수록 모서리 용융량이 증가하며, 시편의 두께가 두꺼울수록 절단에 투입되는 입열량의 증가로 인해 모서리 용융량이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

한편, 절단각도가 증가함에 따라 좁은 영역의 열집중을 분산시켜 모서리 용융량이 감소할 것이라는 예상과는 달리 절단각도 30° 에서 90° 로 각도가 증가할수록 점점 모서리 용융량이 감소하다가, 다시 절단각도가 90° 에서 150° 로 증가할수록 모서리 용융량이 증가하는 현상을 나타내었다. 이러한 현상은 레이저 열원이 지나가는 반경이 작은 절단각도 영역에서는 열의 집적으로 인해 열영향부가 증가하고 절단면 하부에서 재료의 두께방향으로 깊게 모서리가 용융된 반면, 열원이 지나가는 반경이 큰 절단각도가 큰 영역에서는 재료의 산화반응에 의해 생긴 산화막이 절단가스에 의해 제거되는 과정에서 고온의 용융물인 드로스의 열에 의해 재료의 하부가 용융되어 모서리가 레이저 진행방향으로 넓게 용융되어 생기는 현상으로 사료된다. 이러한 모서리 용융특성은 모든 두께에서 동일하게 나타났으며, 모서리 용융량을 감소시키기 위해서는 절단가스의 압력을 더욱 증가시켜야 할 것으로 사료된다.

3.6.2 열영향부 (Heat affective zone)

각도 절단면의 절단 품질 및 열 영향성을 정량적으로 평가하기 위하여 각도 절단시 발생하는 모서리 부분의 열영향부를 모서리 용융량과 동일한 방법으로 Fig. 30 과 같이 여러개의 작은 삼각형으로 나누어 각각의 면적을 측정 후 취득한 각각의 면적을 합하여 각도별로 산출하였다. 열영향부는 각도절단 실험 실시 후 열에 의해 금속 조직이 변화했을 것으로 사료되는 부분을 선정하였으며, 드로스로 인하여 열

영향부의 정확한 판단이 불가능한 하부 절단면은 제외하고 상부 절단면에서만 측정하였다.

Fig. 31 은 각 두께별 최적의 절단속력에서 절단각도와 열영향부의 상관관계를 나타낸다. Fig. 31 을 통해 시편의 두께가 일정할 경우 레이저 출력이 증가할수록 모서리 열영향부가 증가함을 알 수 있었다. 또한, 레이저 절단각도가 30° 에서 90° 로 증가함에 따라 열영향부는 점점 감소하다가 90° 전·후를 기준으로 절단각도가 증가함에 따라 다시 열영향부가 증가하는 것을 알 수 있었다. 이것은 모서리 용융특성과 마찬가지로 절단각도가 작은 영역에서는 열원이 지나가는 반경이 작아 좁은 영역에 열이 집중되어 열영향부가 크게 나타났으나, 절단각도가 큰 영역에서는 열원이 지나가는 반경이 커서 열을 효율적으로 분산시키지만, 절단시 산화막에 의해 열이 절단면 하부까지 효율적으로 전달되지 못하고 재료내에 정체되어 재료내에 예열효과를 가져오는 절단특성 때문에 열영향부가 모서리 주변에 넓게 분포하여 생기는 현상으로 사료된다.

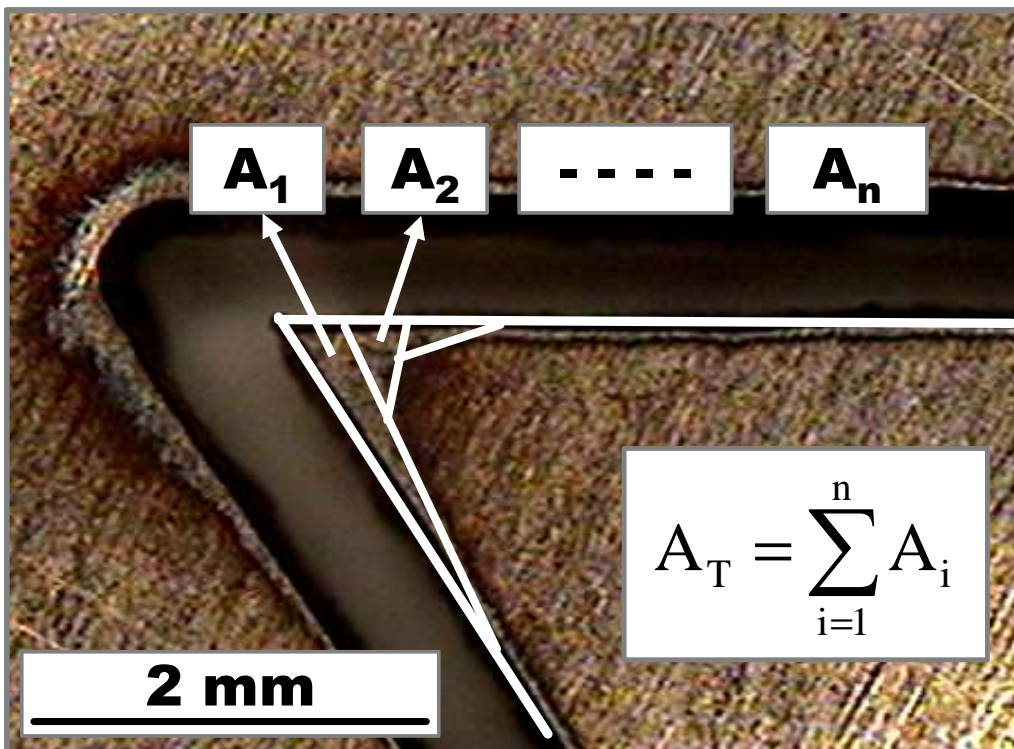
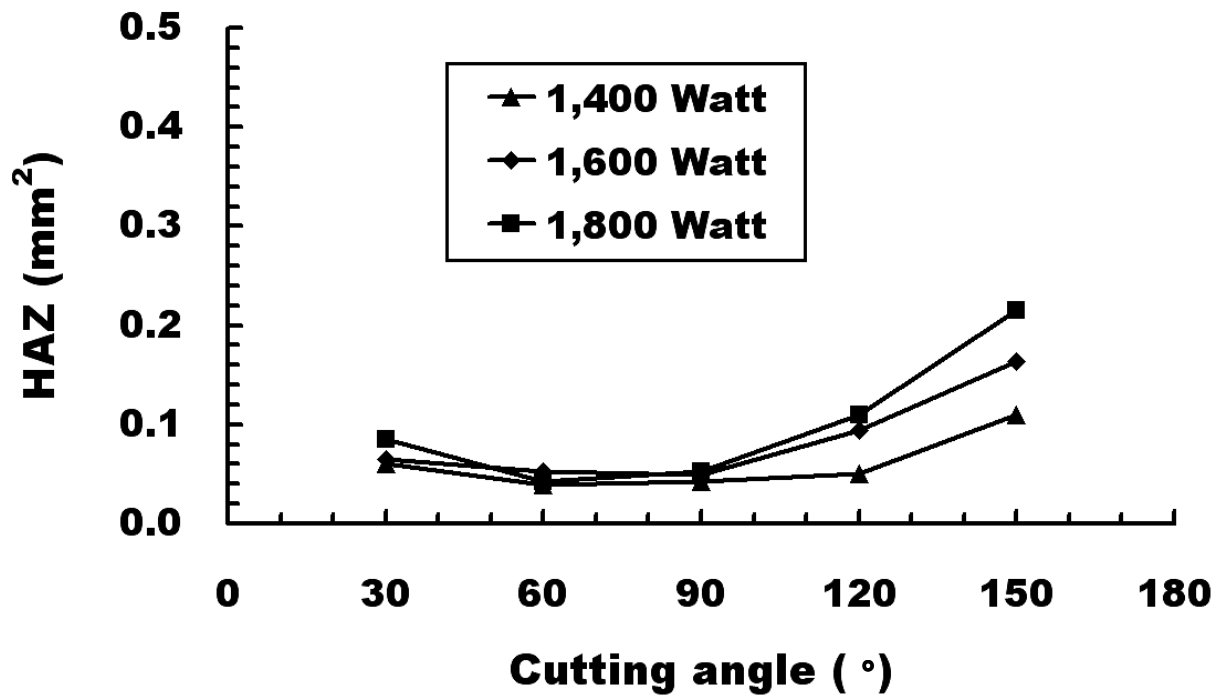
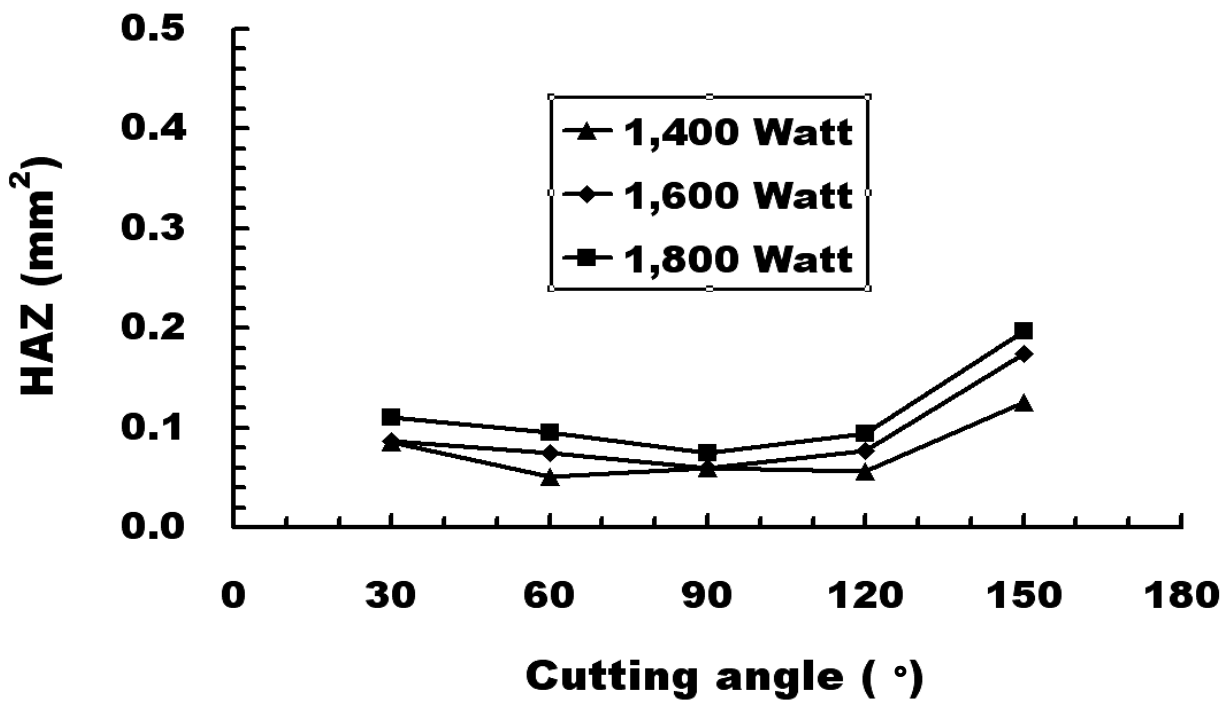


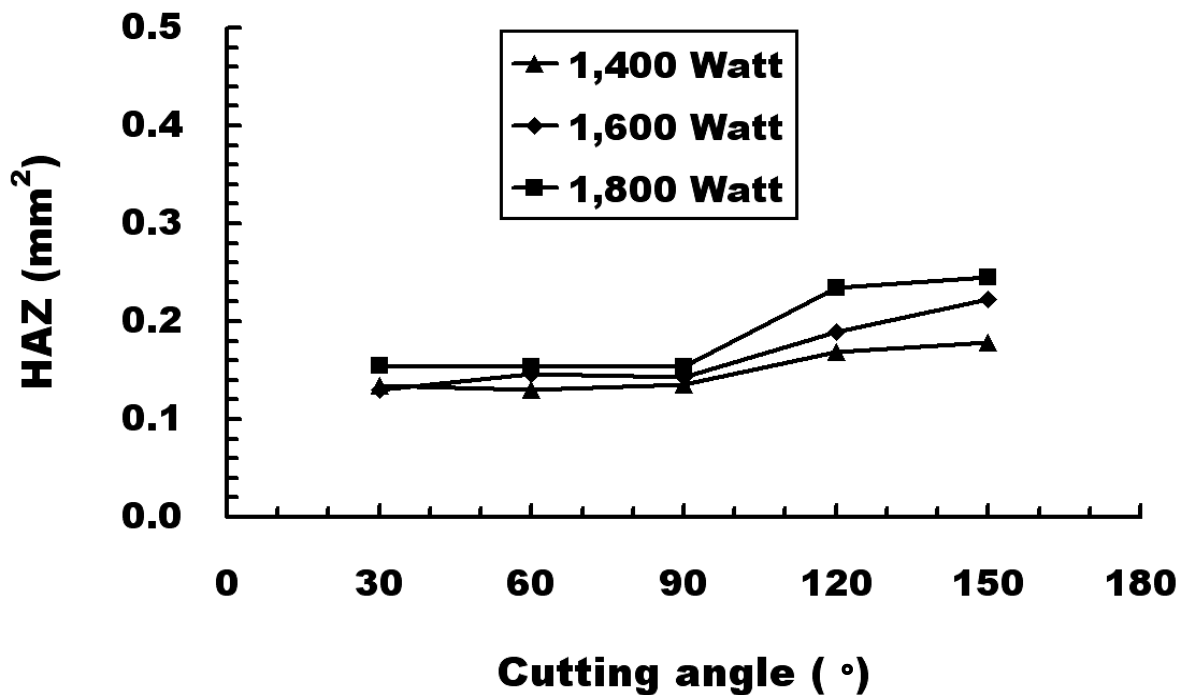
Fig. 30 Measuring methodology of heat affective zone (HAZ)



(a) Thickness = 1.0 mm



(b) Thickness = 1.6 mm



(c) Thickness = 2.0 mm

Fig. 31 Influence of cutting angle and power of laser on the HAZ

3.7 루프 절단에 따른 절단 특성

각도 절단 실험으로 획득한 레이저 절단 각도별 모서리 용융량 (Melted area) 및 열영향부 (Heat affective zone) 분석 결과 가공경로가 변하는 레이저 절단 공정의 경우 고정밀 가공이 어려움을 확인하고 이를 극복하기 위한 방법으로 모서리 부분을 가공경로에 여유길이를 제공하는 방식인 루프 (Loop) 처리를 실시하여 절단 실험을 하였다. 루프처리 방법은 Fig. 32 와 같으며 절단각도인 30° 에서 150° 까지 모든 각도에 대하여 루프절단 실험을 실시하였다. 루프의 길이는 3 mm, 5 mm 로 선정하였다.

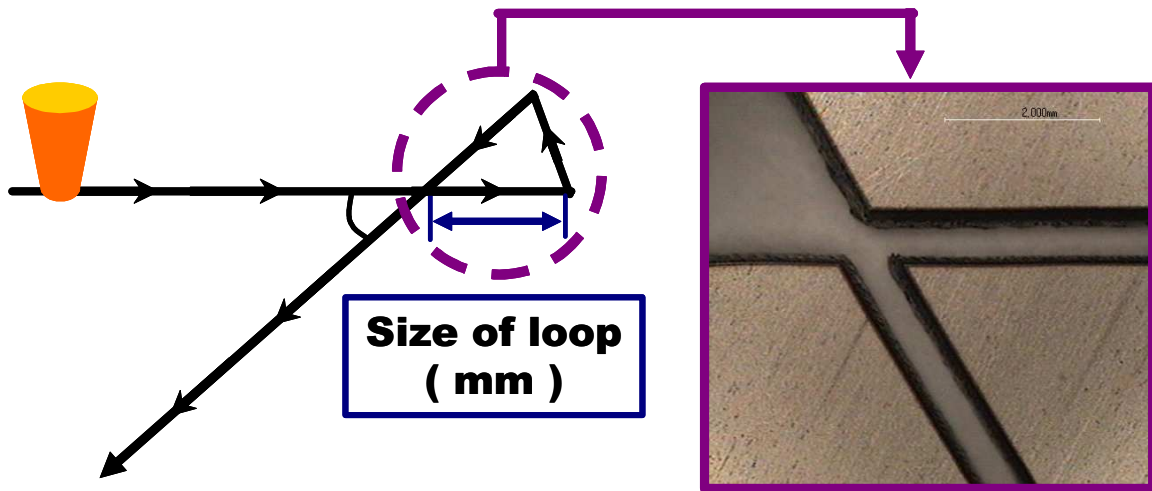
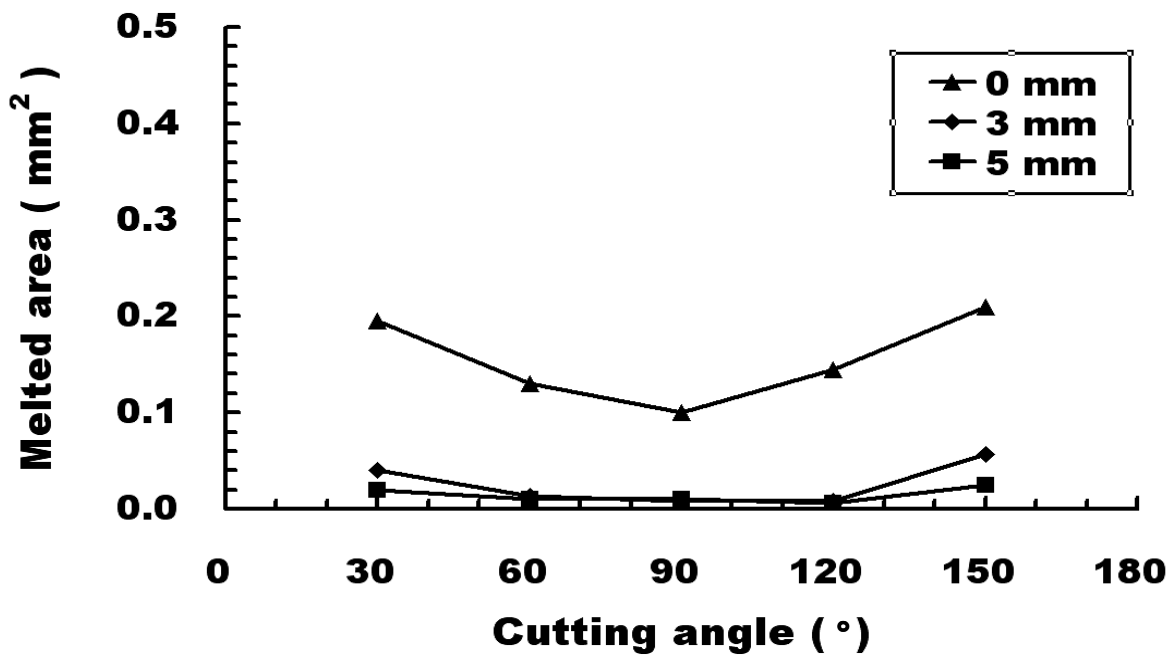


Fig. 32 Methodology of the loop cutting test

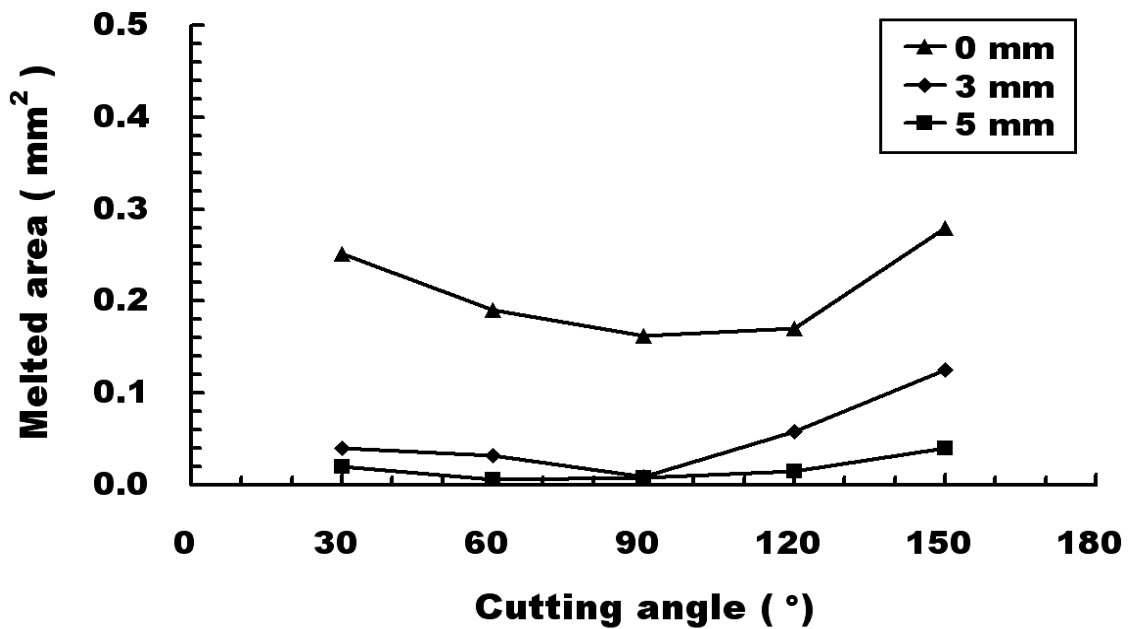
3.7.1 모서리 용융 면적 (Melted area in the shape corner)

루프 절단을 의한 모서리 용융량의 정량적 평가 방법은 앞장의 각도 절단 실험에 사용된 용융량 분석 방법과 동일하게 실시하였으므로 본 장에서는 이에 대한 설명은 생략 한다.

Fig. 33 과 34 는 각각 시편두께 1.0 mm 와 1.6 mm 의 최적 절단속력에서 루프 길이별 절단 각도에 따른 모서리 용융량의 상관관계를 출력별로 나타낸 것이다. Fig. 33 과 34 를 통해 모서리 부분을 루프 처리 하여 절단 실험을 실시하였을 때, 모서리 용융량이 급격하게 감소함을 알 수 있었다. 이것은 열진동 전자의 활성영역인 모서리 부근에 루프 형태의 행로를 지정함으로써 모재가 열을 흡수하여 분산시키는 역할 (Heat sink effect) 을 하여 모서리 부근의 과입열 현상을 해소하기 때문인 것으로 사료된다. 그 결과, 루프 길이 3 mm 와 5 mm 에서의 각도별 모서리 용융량의 차이는 거의 없었으나, 루프처리를 한 경우 루프처리 없이 절단을 수행한 경우보다 모든 절단 각도에서 모서리 용융량을 30 ~ 40% 정도 감소시킬 수 있었다. 이러한 결과는 모든 두께에서 동일하게 나타났다. 본 연구를 통해 가공 경로가 변하는 레이저 절단을 실시 할 경우, 루프 처리를 통해 모서리 부근의 용융량을 획기적으로 개선할 수 있었고, 추가적인 실험을 실시하여 최적의 루프길이를 도출해야 할 것으로 사료된다.

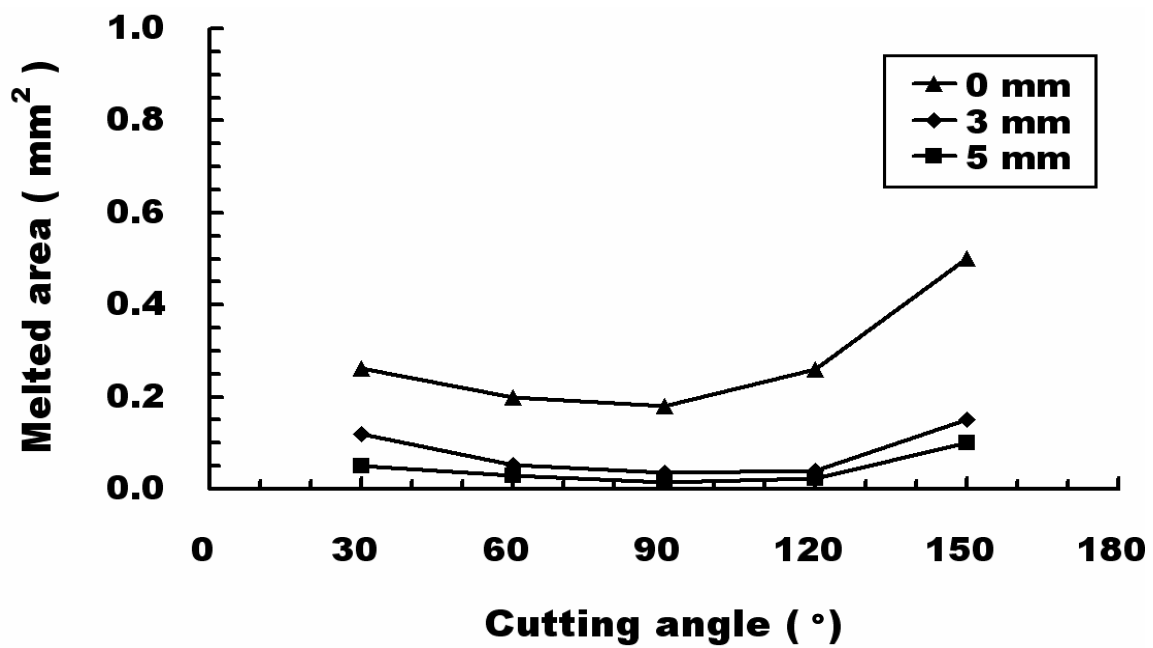


(a) Power = 1,400 Watt

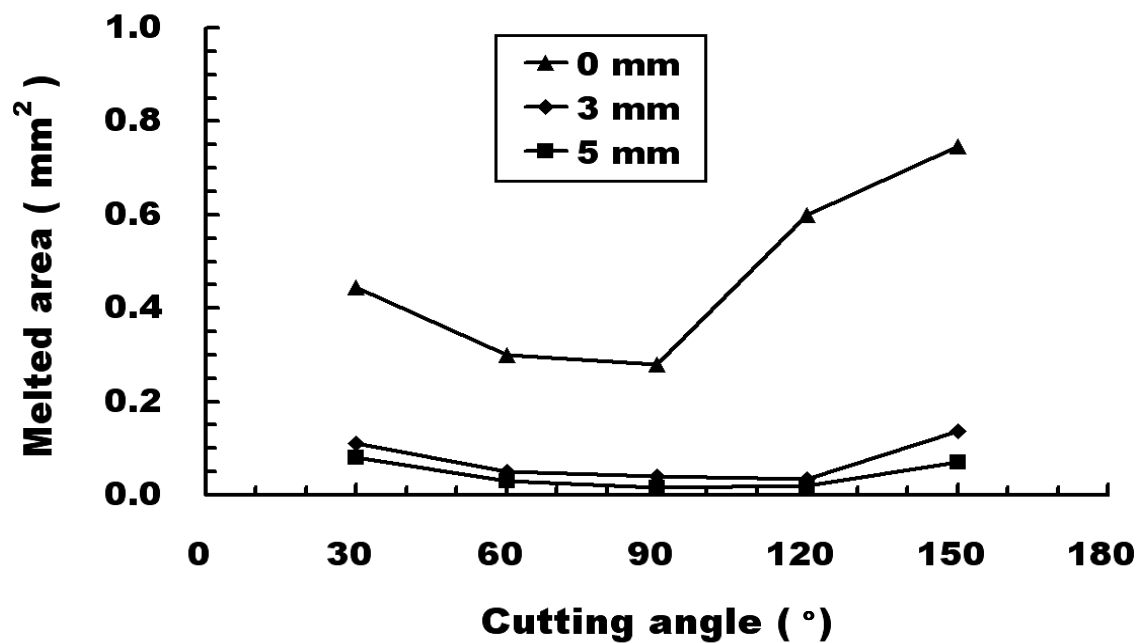


(b) Power = 1,800 Watt

Fig. 33 Influence of cutting angle and loop length on the melted area (T = 1.0 mm)



(a) Power = 1,200 Watt



(b) Power = 1,600 Watt

Fig. 34 Influence of cutting angle and loop length on the melted area (T = 1.6 mm)

3.7.2 열영향부 (Heat affective zone)

루프 절단실험 후 절단면 상부의 열영향부를 고찰한 결과 모든 공정조건에서 열영향부는 Fig. 35 와 같이 거의 발견되지 않았다. 이것은 모서리 용융량 분석과 마찬가지로 루프 처리된 모재가 열집적을 해소하여 모서리부에 열영향이 거의 미치지 않았기 때문으로 사료된다.

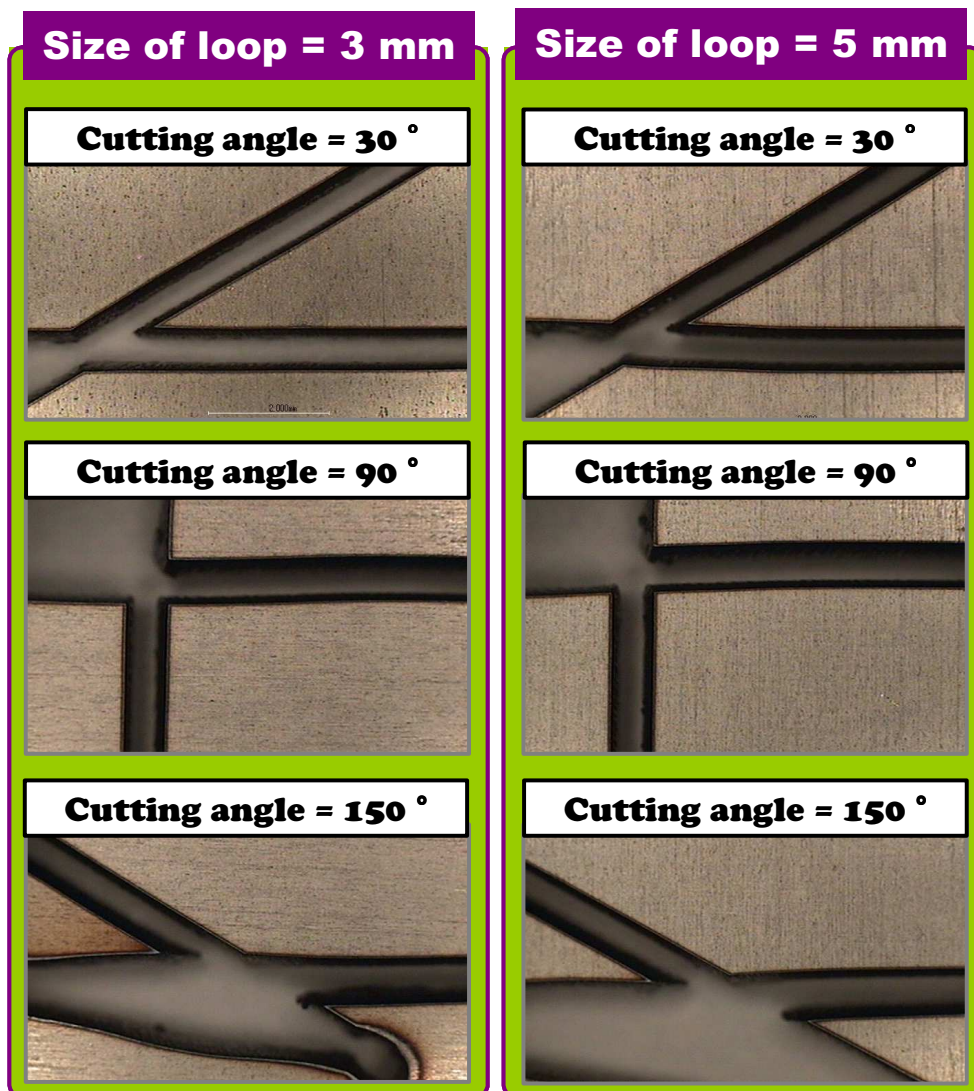


Fig. 35 Formation of HAZ according to the cutting angle and loop length
($T=1.6$ mm, $P=1,400$ Watt, $V_{tr}=7,000$ mm/min)

제 4 장 3 차원 열전달 해석

본 장에서는 고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 2 mm 이하의 Inconel 718 박판 절단공정의 3차원 열전달 해석 모델의 수립과 검증된 해석을 통한 재료 내부의 3 차원 열전달 특성 및 온도분포에 대한 분석을 수행하였다.

4.1 3 차원 유한요소 모델링

4.1.1 유한요소 지배방정식

레이저 절단공정에서의 비정상 온도분포 $T(x,y,z,t)$ 는 3 차원 비정상 열전도 방정식인 식 (1) 을 만족시켜야 한다.

$$\vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) + \dot{q} = \rho c \dot{T} \quad (1)$$

열원이 균일 속력으로 이동하는 형태로 주어질 경우, Fig. 36 과 같이 열원에 좌표계가 부착되어 이동하는 이동 좌표계로 가정하여 준정적 정상상태의 지배방정식으로 변환 할 수 있다. 이때, 고정좌표계 (x, y, z, T) 와 이동좌표계 (x_M, y_M, z_M, T) 의 관계는 식 (2) 를 만족하여야 한다. 또한, 이동좌표계와 고정좌표계의 재료 내 온도는 식 (3) 과 같이 동일하여야 한다. 여기서, V_{tr} 은 레이저 절단속력이다.

$$y_M = y - V_{tr} \times t, x_M = x, z_M = z \quad (2)$$

$$T(x_M, y_M, z_M, t) = T(x, y - V_{tr} \times t, z, t) \quad (3)$$

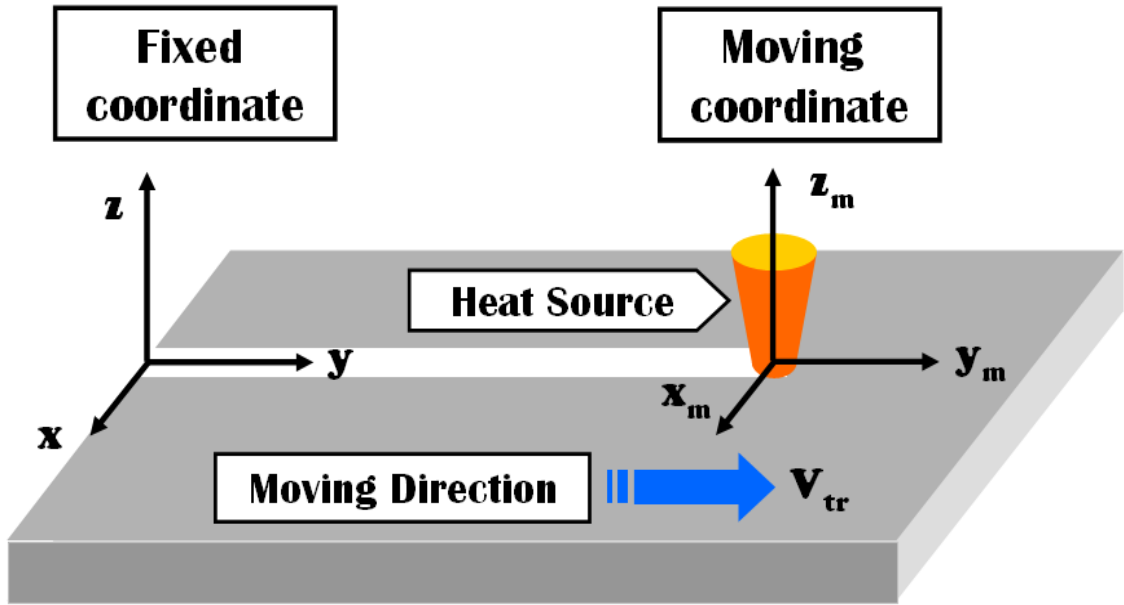


Fig. 36 Schematics of coordinate system

식 (1) 에 이동좌표계를 적용하면, 3차원 열전도 방정식은 식 (4) 로 표현될 수 있다. 특히, 레이저 절단길이 중 초기 레이저 도입부와 최종 종료부를 제외한 영역에서는 시간에 관계 없이 균일한 절단 특성을 나타내는 준정적 정상상태 (Quasi-stationary and steady state) 로 가정할 수 있으며, 재료물성치인 열전도도, 밀도 및 정압비열은 온도의 함수이므로 레이저 절단 공정의 재료 내부 3차원 온도 분포는 식 (5) 로 표현될 수 있다. 또한, 식 (5) 에 대한 유한요소 지배방정식은 식 (6) 과 같이 나타낼 수 있다. 식 (6) 에서 $[C(T)]$, $[K(T)]$, $\{V\}$ 및 $\{Q(t)\}$ 는 각각 용적 행렬, 강성행렬, 속도벡터 및 절점 열유동 벡터이다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y_M} \left(k \frac{\partial T}{\partial y_M} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c \left\{ \frac{\partial T}{\partial t_M} - V_{tr} \times \frac{\partial T}{\partial y_M} \right\} \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y_M} \left(k \frac{\partial T}{\partial y_M} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = -\rho c V_{tr} \frac{\partial T}{\partial y_M} \quad (5)$$

$$[C(T)]\{T\} + [K(T)]\{T\} + \{V\} = \{Q(t)\} \quad (6)$$

본 연구에서는 식 (6) 을 만족하는 재료내부 3차원 온도분포를 계산하기 위하여 상용 유한요소해석 프로그램인 SYSWELD V9.0 을 사용하였다.

4.1.2 열원 모델링

레이저 절단공정에서 재료내에서 반응하여 절단에 영향을 미치는 열에너지는 레이저에 의해서 투입되는 열원에 의한 입열량, 절단가스인 산소와의 반응에 의해 생기는 산화열에 의한 입열량, 피절단물의 기화열에 의한 열손실 있다. 이 3가지 열 에너지는 식 (7) 과 같이 총 입열량을 만족하여야 한다.

$$P(t) = Q_R(r, T) - Q_{EVP} + Q_{REA} \quad (7)$$

여기서, Q_{REA} 는 산화열, Q_{EVP} 는 기화열, $Q_R(r, T)$ 는 레이저에 의해 재료에 투입되는 입열량이다.

본 연구에서는 절단공정 중 재료의 산화반응에 의해 발생하는 산화열과 피절단물의 기화에 의해 손실되는 기화열의 경우 정량적인 수치를 계산하기 어려워 총 입열량에서 산화열, 기화열 및 레이저에 의해 투입되는 입열량을 포함하는 유효 투입 열량을 프로그램 상에서 산출한 후 이것의 효율을 조절하여 절단부의 온도분포 및 열전달 특성을 고찰하였다.

해석에 사용된 레이저 빔의 공간모드는 TEM_{00} 모드이며, 열원의 분포는 Fig. 37 과 같이 평면에서 가우시안 분포를 가지는 3차원 원통형 열원으로 가정하여 레이저에 의한 입열량은 식 (8) 과 (9) 와 같이 가정하였다.

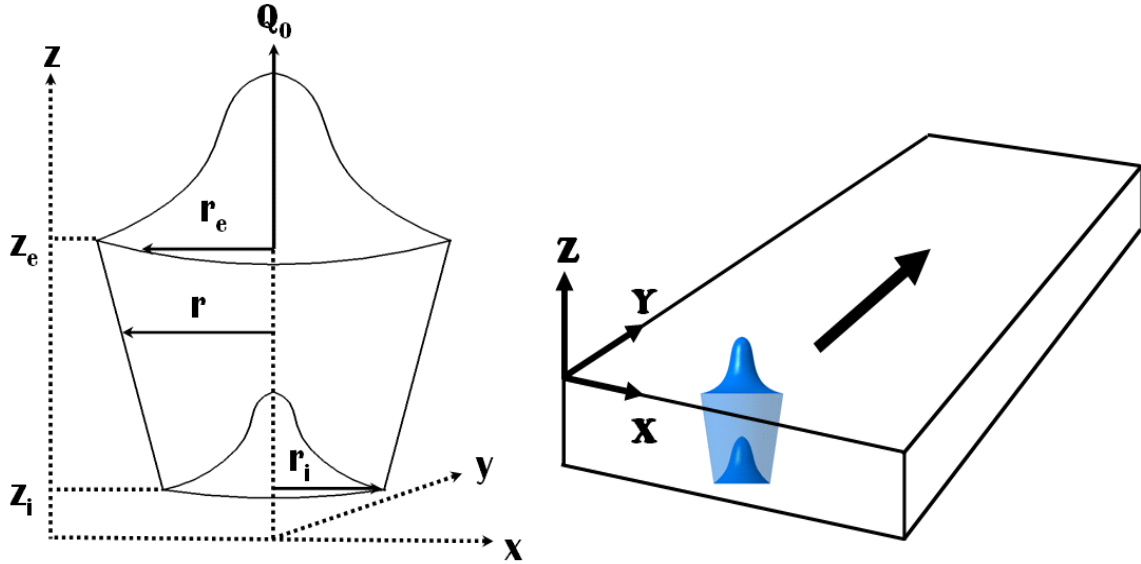


Fig. 37 Schematics of conical heat source for analysis

$$Q(x, y, z) = Q_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r_0^2(z)}\right) \quad (8)$$

$$r_0(z) = r_e + \frac{r_i - r_e}{z_i - z_e}(z - z_e) \quad (9)$$

여기서, Q_0 는 레이저의 효율 및 흡수율을 고려한 레이저 입열량, r_0 는 레이저 유효반경, r 은 레이저 빔 중심에서 레이저 빔 반경까지의 거리이다.

4.1.3 유한요소해석 방법 및 경계조건

유한요소 해석을 위한 모델링 시편의 크기는 실험결과 시편크기가 온도분포에 영향을 미치지 않을 것으로 판단된 평면 면적 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 를 선정하였으며, 해석에 사용된 시편의 두께는 실험과 동일한 1.0 mm , 1.6 mm , 2.0 mm 를 선정하였다.

Fig. 38 은 3차원 열전달 해석에 사용된 유한요소 격자이다. 유한요소모델 생성 시 레이저의 열원이 이동하는 중심부에서 발생하는 급격한 온도 변화를 예측하기 위하여 중심부 방향으로 점점 조밀한 격자가 생성되도록 바이어스 (Bias) 격자 생성법을 이용하였다. 모델링은 내부 열전달에 관여하는 3 차원 입체 요소와 외부 경계조건에 의한 열전달에 관여하는 2 차원 평면 요소로 구성되었다. Table 4 는 3 차원 열전달 해석에 사용된 유한 요소 격자수와 절점수이다.

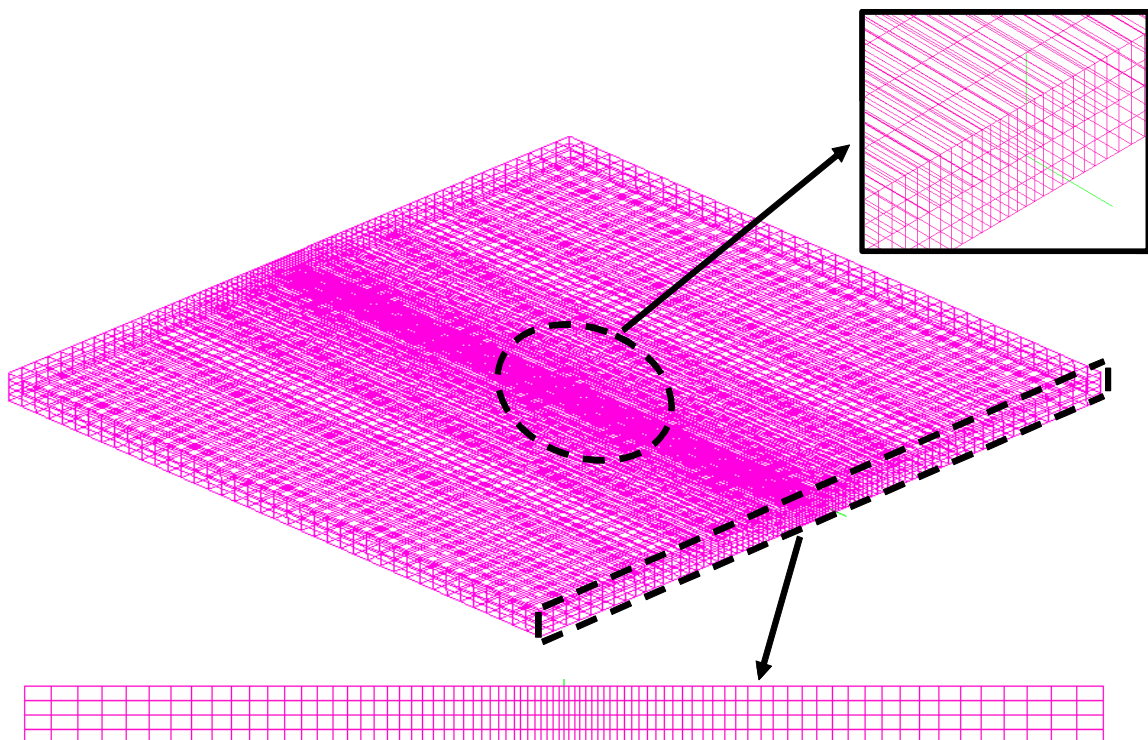


Fig. 38 Finite element for analysis (T=2.0 mm)

Table 4 Number of elements and nodes

T (mm)	Elements (EA)	Nodes (EA)
1.0	11,904	8,979
1.6	17,968	14,965
2.0	17,968	14,965

레이저 절단공정 해석을 위한 경계조건은 대류와 복사에 의한 열전달이 고려되었다. 절단 가스가 직접 분사되는 시편의 윗면은 강제대류조건으로 적용하였으며, 나머지 부분은 자연대류로 계산하였다. 대류에 의한 열손실은 식 (10) 과 같이 계산하였다

$$q_{conv} = \bar{h} (T_{\infty} - T_s) \quad (10)$$

여기서, \bar{h} 는 평균 대류 계수이다.

식 (10) 로부터 강제대류에 대한 평균 대류계수 (\bar{h}_f) 는 식 (11) 과 같이 계산하였으며, 자연대류에 대한 평균 대류계수 (\bar{h}_n) 는 식 (12) 와 같이 계산하였다.

$$\bar{h}_f = Nu_L \cdot \frac{k}{L} = C \cdot \frac{k}{L} \cdot Re_L^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (11)$$

여기서, Nu_L 은 너셀 수이고, k 는 열전도도, L 은 기체의 흐름 방향을 기준으로 한 평판 길이, Re_L 은 레이놀즈수, Pr 은 프란틀 수이며 C 는 상수이다.

$$\bar{h}_n = 0.27 \cdot \frac{k}{L} \cdot Ra_L^{1/4} \quad (12)$$

여기서, Ra_L 은 레일레이 수이다.

또한, 재료의 용융에 의해 발생하는 절단면 상·하면부의 복사 에 의한 열손실은 Stefan-Boltzmann 법칙으로부터 구한 식 (13) 을 통해 계산하였다

$$q_{rad} = \varepsilon \cdot A \cdot \sigma (T_\infty^4 - T_s^4) \quad (13)$$

여기서, ε 은 방사율, A 는 표면 면적, σ 는 Boltzmann - Stefan 상수이다. 방사율 ε 는 인코넬 718 의 주성분인 니켈의 상온에서의 값 0.5 를 사용하였다.

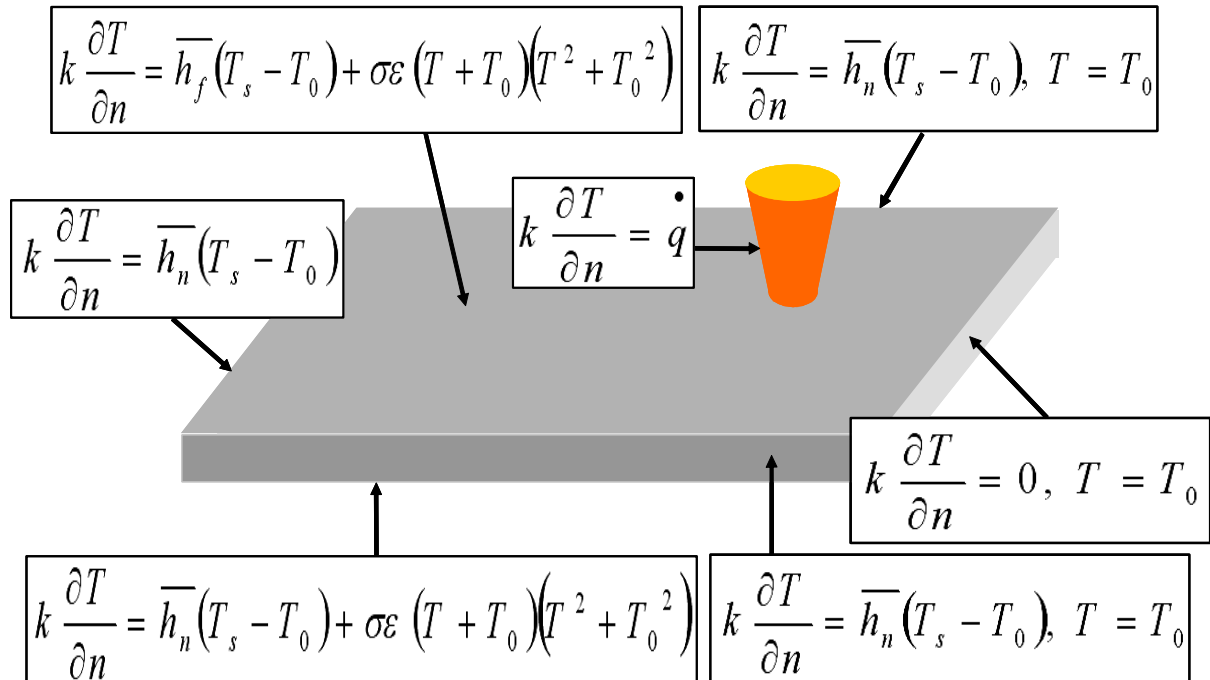


Fig. 39 Boundary conditions for analysis

이와 같이 레이저 절단 공정 해석을 위한 경계조건은 Fig. 39 와 같이 재료 부분별로 각기 다른 경계조건을 부여하였다.

본 연구에서는 준정적 정상상태 3차원 열전달 해석을 SYSWELD V9.0 을 이용하여 수행하였다. 레이저 열원은 전체 시편 길이의 90% 인 시작점으로부터 18 mm 에 위치한 것으로 가정하여 해석을 실시하였다.

해석조건은 직선 절단 실험 후 도출된 절단가능영역에서 실시하였으며, 단위 시간당 유효 투입 열량을 식 (14) 와 같이 산출한 후, 각 두께별 출력별 최대 절단가능속도 영역에서의 절단폭 형성에 투입되는 입열량을 기준으로 해석을 실시하여 실험값과 해석값을 비교하여 해석 모델의 타당성을 검증 및 열전달 특성을 고찰하였다.

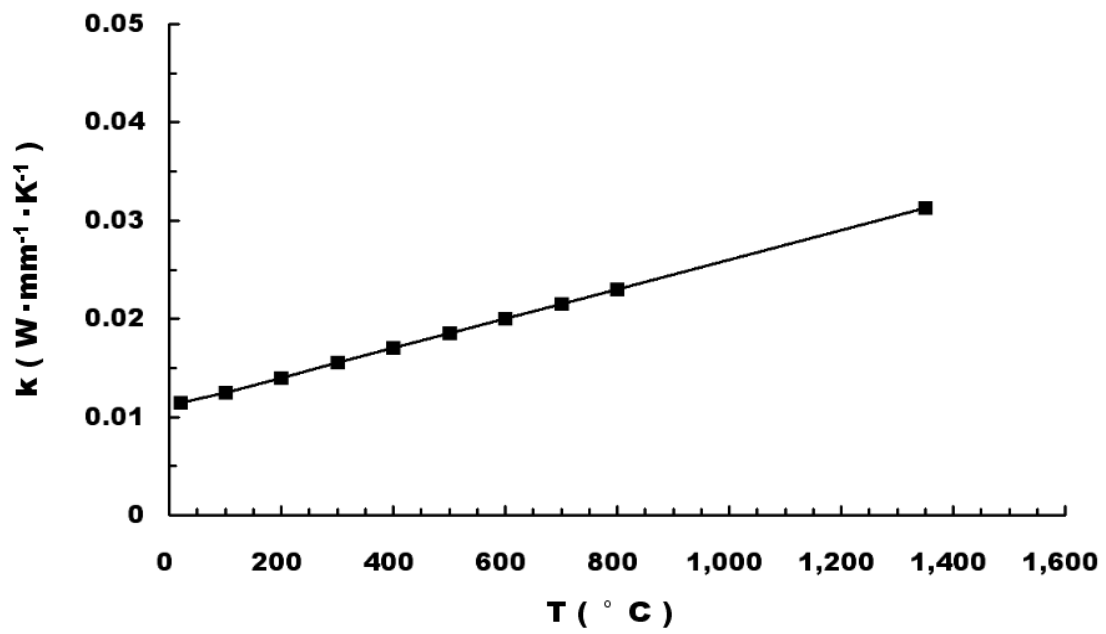
$$Q_{eff, in} = \frac{P_{Real}}{V_{tr}} = \frac{\eta P}{V_{tr}} \quad (14)$$

여기서, P_{Real} 은 해석시 절단공정에서 재료에 투입되는 레이저 출력에 효율을 반영한 유효출력이다.

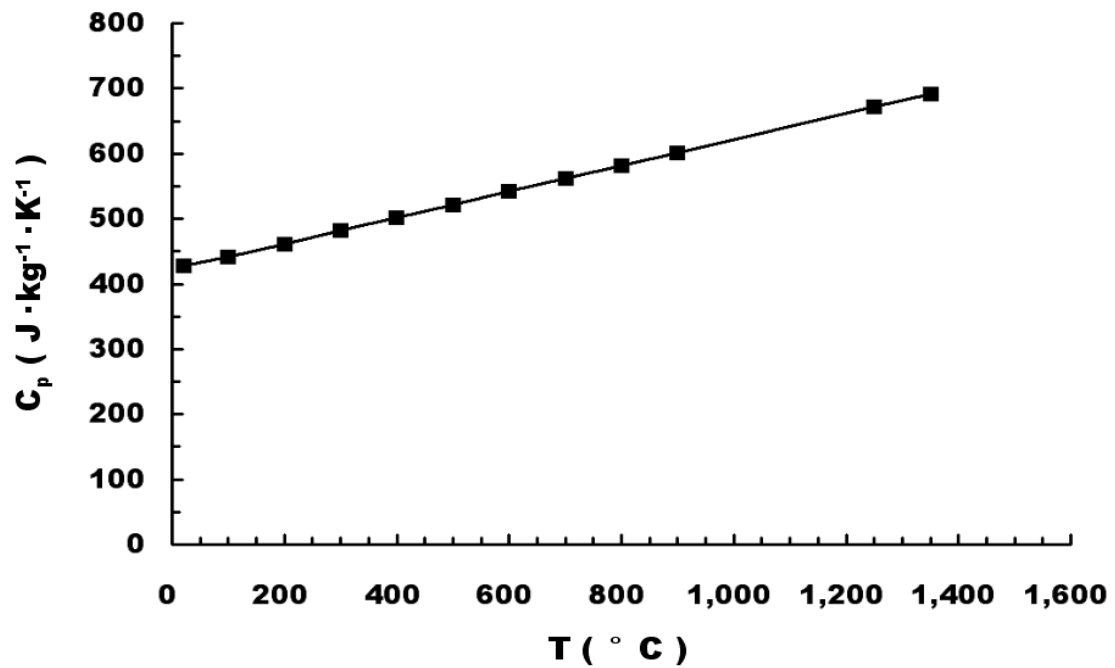
또한, 각각 두께가 다른 재료에 실제 투입되는 에너지량을 비교하기 위하여 식 (15) 와 같은 식을 도입하여 단위 면적당 투입되는 에너지량을 고찰하였다.

$$\varphi = \frac{Q_{eff, in}}{T} \quad (15)$$

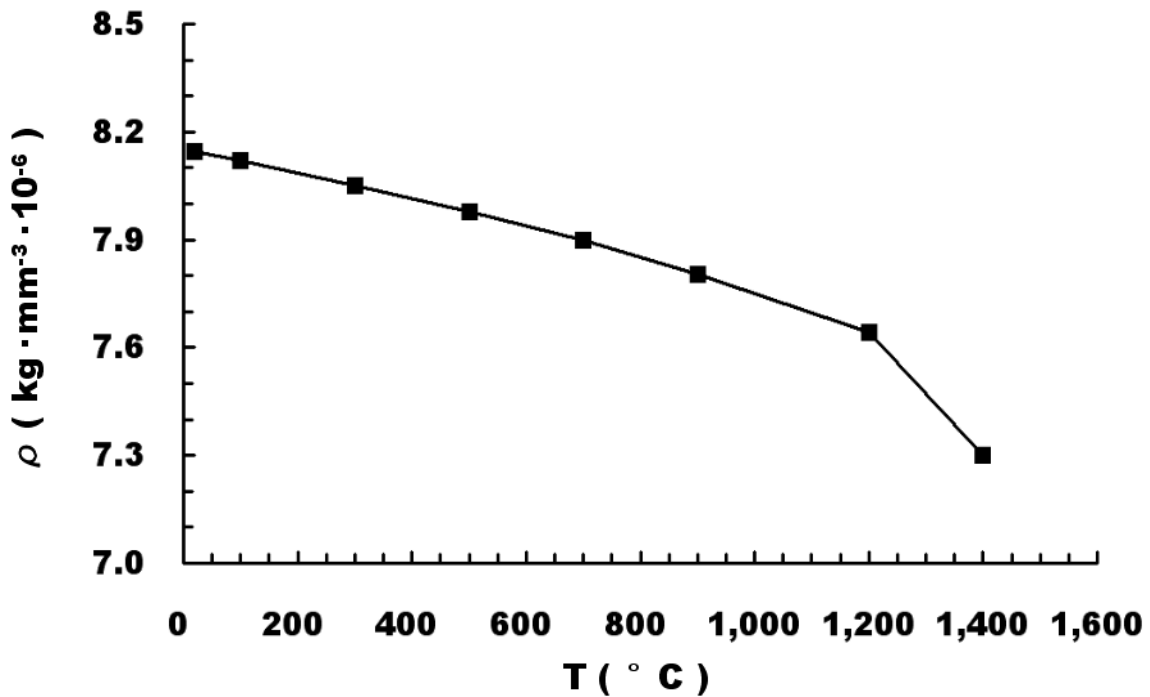
여기서, T 는 시편의 두께이다.



(a) Thermal conductivity



(b) Specific heat



(c) Density

Fig. 40 Material properties for FE analysis

유한요소 해석에 사용된 Inconel 718 재료의 온도에 따른 열 물성치인 열전도도, 정압비열 및 밀도는 Fig. 40 과 같다.

4.2 최적 유한요소 모델링 도출

고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 Inconel 718 박판재 절단시 3차원 준정적 정상상태 열전달 해석에 통해 절단폭 (Kerfwidth) 예측을 수행하여 해석 모델의 타당성 검증 및 최적 유한요소 모델을 도출하였다.

절단폭은 Fig. 41 및 42 와 같이 실험에 의해 취득한 절단폭과 해석을 통해 얻은 절단폭을 비교하여 해석 결과와 실험 결과의 오차가 $\pm 3\%$ 가 될 때까지 반복적으로 보정하여 예측하였다. 해석시 절단폭은 재료 용융점인 $1,400^{\circ}\text{C}$ 이상의 온도영역을 나타내는 부분을 레이저에 의해 용융이 발생하여 취입가스인 산소가스에 의해 제거된

다고 가정하였고, 이 온도영역에 해당되는 부분의 폭을 절단폭으로 가정하였다. 그 결과, Fig. 43 과 같이 절단에 투입된 유효 투입 열량에 대하여 실험값과 해석값의 절단폭이 거의 일치함을 알 수 있었다.

이를 통해 본 연구에 사용된 유한요소 모델이 고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 Inconel 718 박판재 절단시 준정적 정상상태를 가정한 3차원 열전달현상을 예측하기에 타당한 모델임을 알 수 있었다.

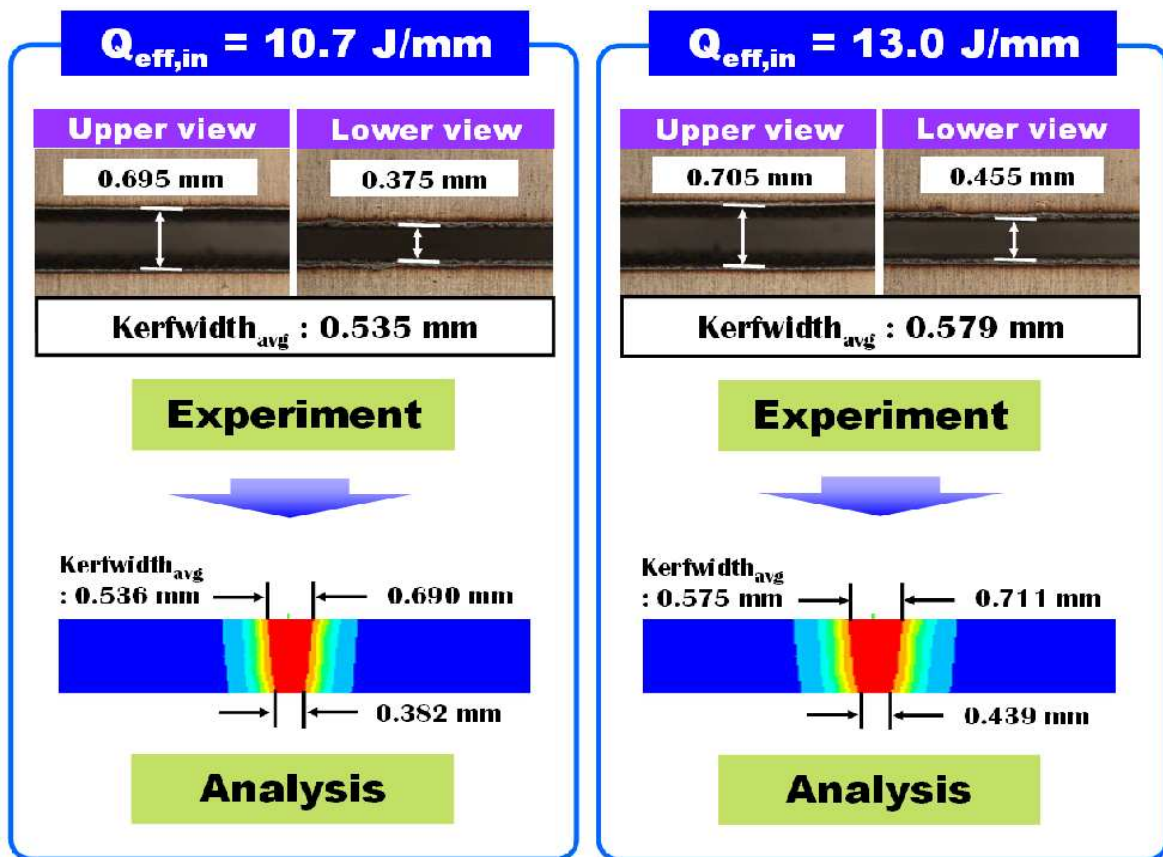


Fig. 41 Comparison of the result of analysis with those of experiments with respect to kerfwidth

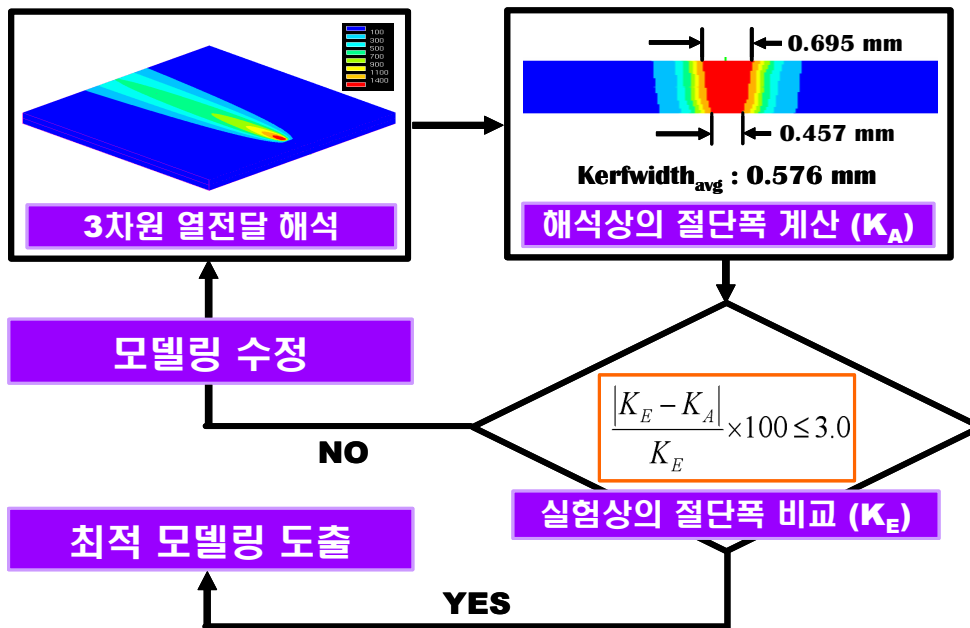


Fig. 42 Flowchart of modeling procedure for analysis

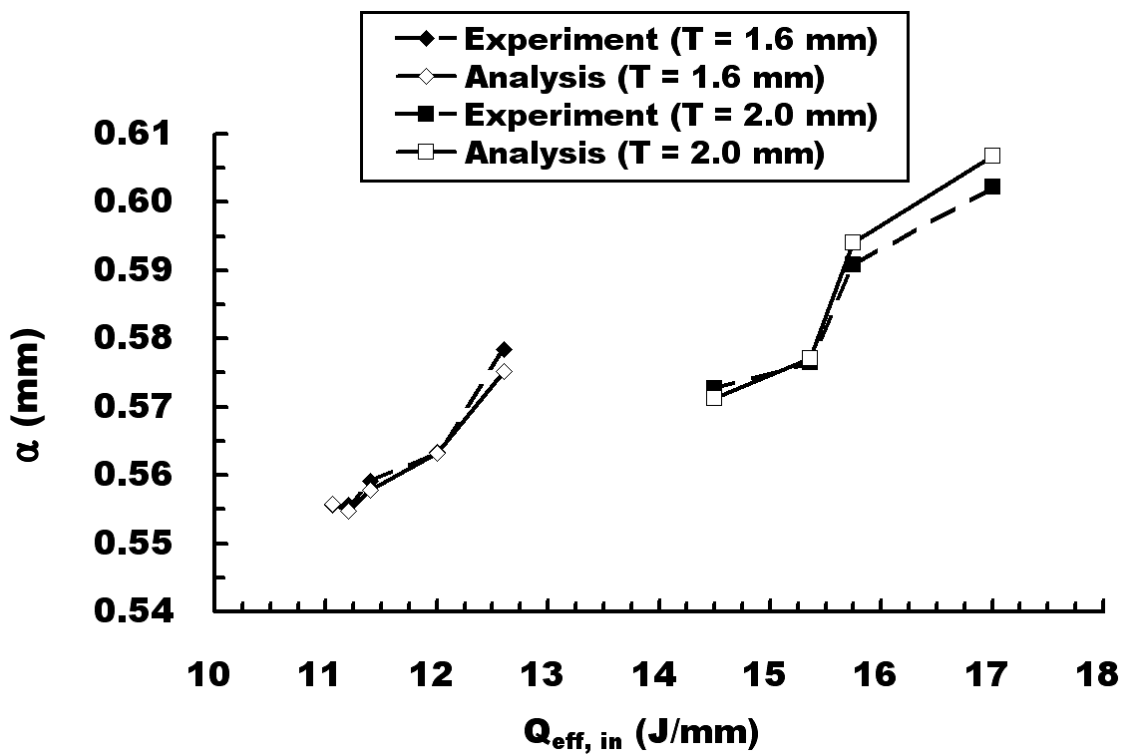


Fig. 43 Comparison of the result of analysis with those of experiments with respect to kerfwidth

4.3 열전달 특성 및 온도분포 고찰

본 장에서는 3차원 준정적 정상상태 가정에 의해 열전달 해석을 수행하여 1.0 KW 이상의 고출력에서 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 Inconel 718 박판재 절단시, 재료 내부의 열전달 특성 및 온도분포에 대하여 고찰하였다.

Fig. 44 는 시편 두께 1.6 mm, 레이저 출력 1,600 Watt, 레이저 절단속력 7,000 mm/min 조건에서 해석 결과 나타난 열전달 특성 및 온도분포이다. 해석 결과 절단면 상부에서 절단면 하부에 비해 시편 두께방향으로 넓고, 레이저 이동 방향으로 긴 온도분포를 나타내었다. 이것은 초기 레이저 열원을 모델링 할 때 실제 절단 실험 실시 후 나타나는 절단면의 경사도를 구현하기 위해 레이저 빔의 집속 각도를 조절하였기 때문에 나타나는 현상이며, 그에 따라 상부 절단면에 비해 하부 절단면에 투입된 열량이 작아 열전달이 상대적으로 작게 일어나기 때문으로 사료된다. 반면, 열원의 중심부에서 상부절단면과 하부절단면은 모델링된 열원과 같이 가우시안 분포를 가지는 온도 분포가 나타났다.

Fig. 45 는 재료 두께별 해석 결과이다. Fig. 45 를 통해 재료의 두께가 두꺼울수록 두께방향으로 열원이 넓게 분포함을 쉽게 확인할 수 있었다.

Fig. 46, 47 및 48 은 절단 속력에 따른 해석 결과이다. 해석을 통해 재료 두께에 관계없이 레이저 절단 속력이 증가할수록 열원이 레이저 이동 방향으로 길게 분포하여 용융길이 길어지는 것을 확인할 수 있었다.

이와 같이 고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 Inconel 718 박판재 절단공정의 3차원 열전달 해석결과 모든 해석 조건에 대하여 레이저가 이동하는 열원의 중심을 기준으로 좌우 0.5 mm 내에 Inconel 718 재료의 용융온도인 1,400° C 이상의 온도에서부터 상온까지 급격한 온도 변화를 나타내었다. 따라서 레이저 절단공정 중 열전달이 발생하는 영역은 재료의 용융부와 열영향부를 포함하여 최대 2.0 mm 내로 매우 작음을 알 수 있었다.

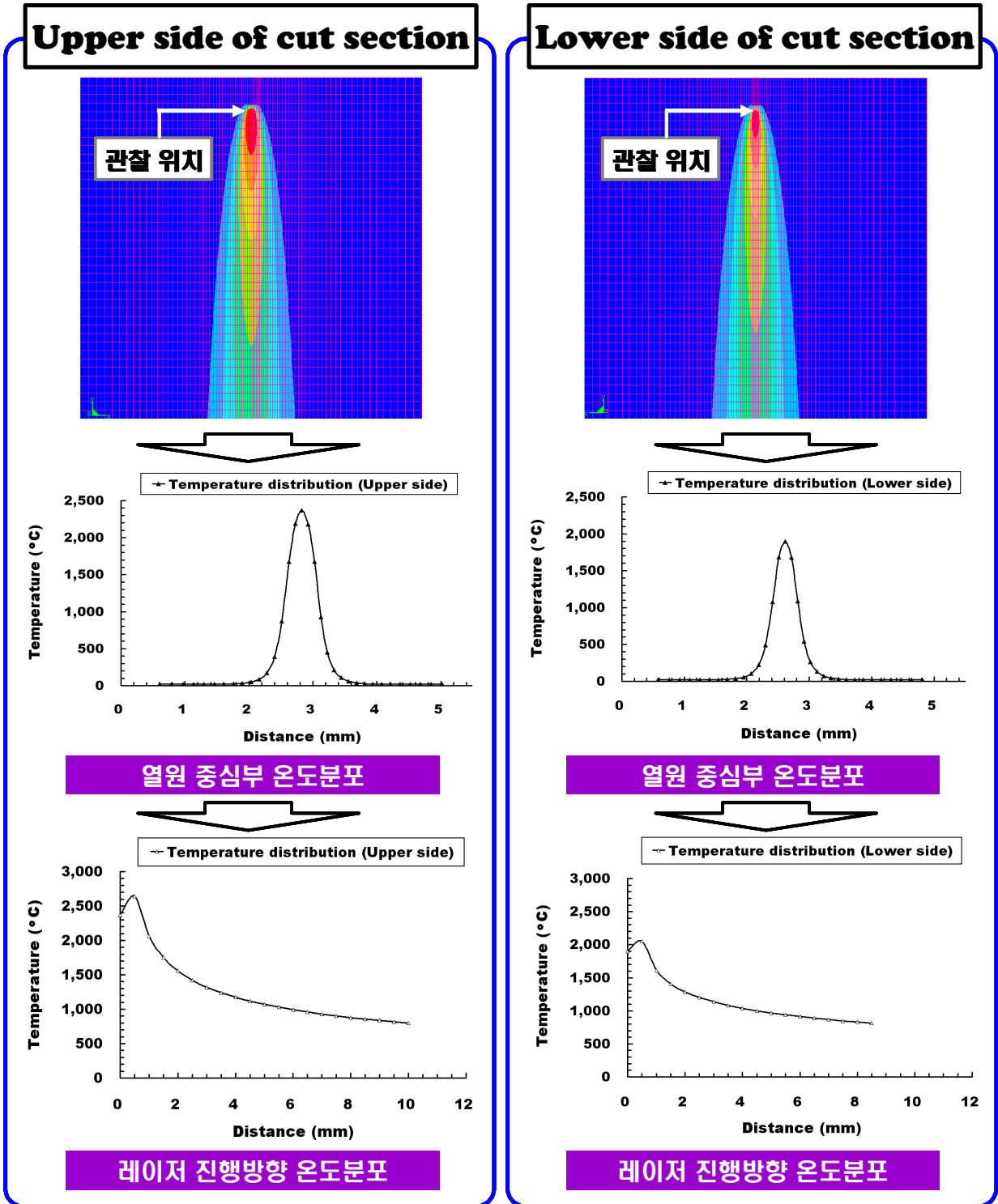


Fig. 44 Temperature distribution of the cut section
(T=1.6 mm, P=1,600 Watt, V_{tr} =7,000 mm/min)

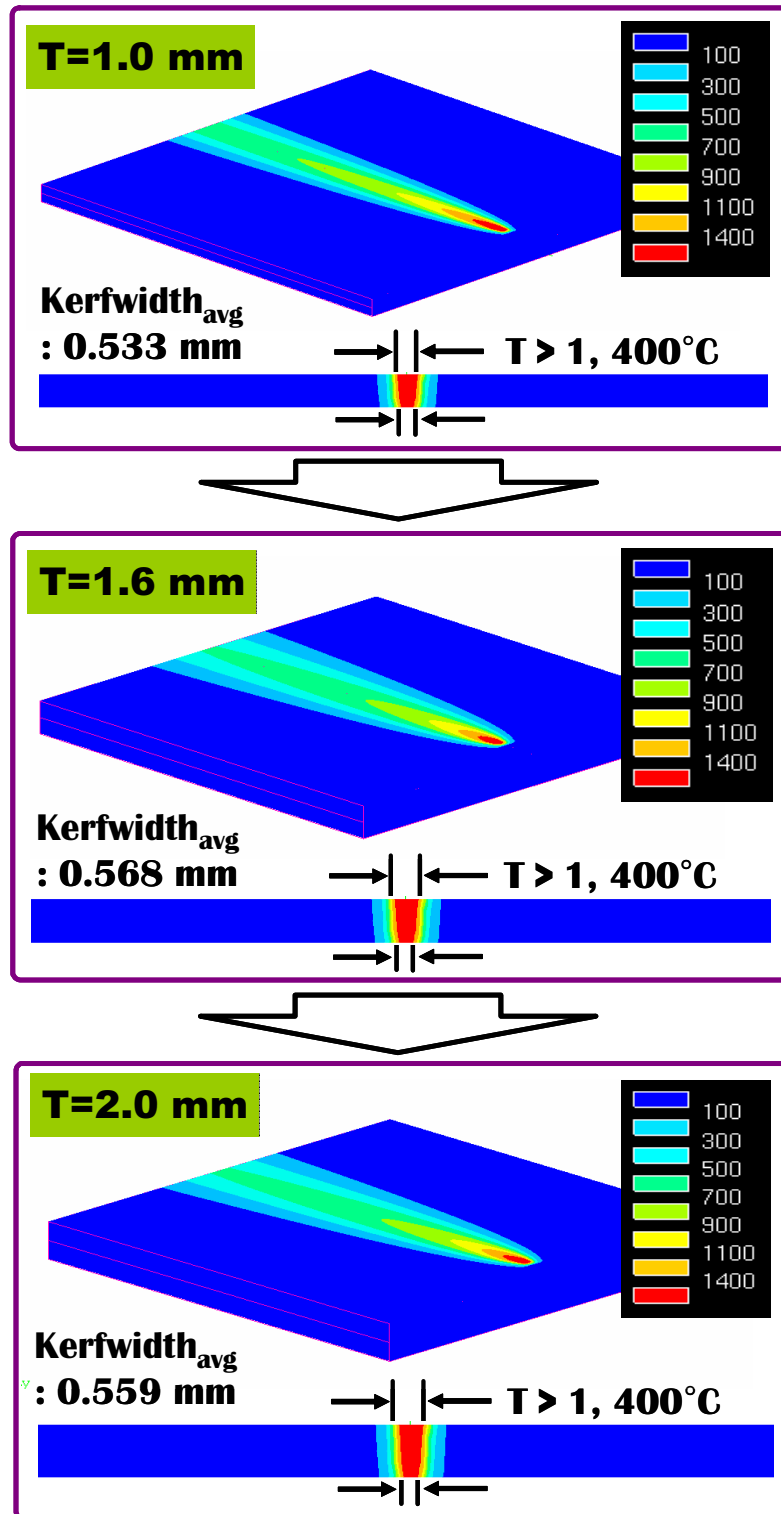


Fig. 45 Result of FE analysis (P=1,600 Watt, V_{tr} =6,000 mm/min)

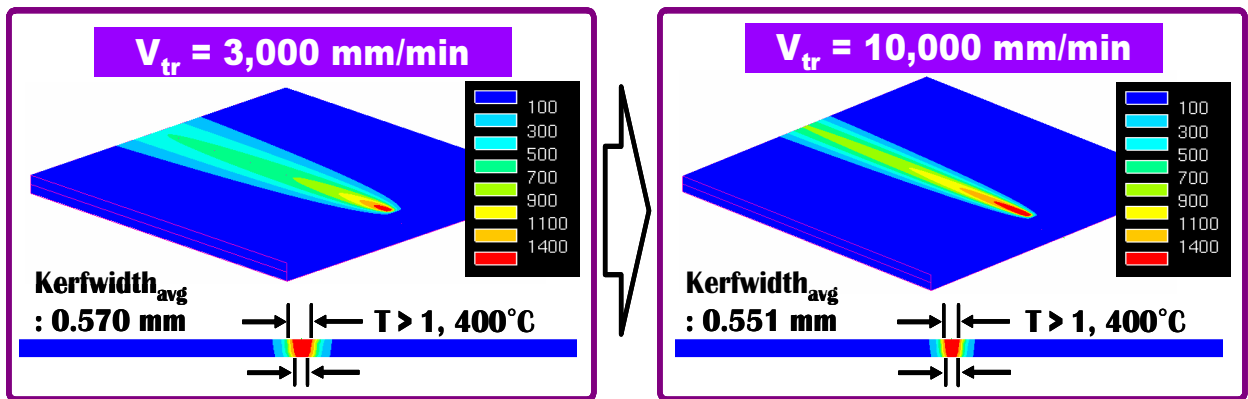


Fig. 46 Result of FE analysis ($T=1.0$ mm, $P=1,400$ Watt)

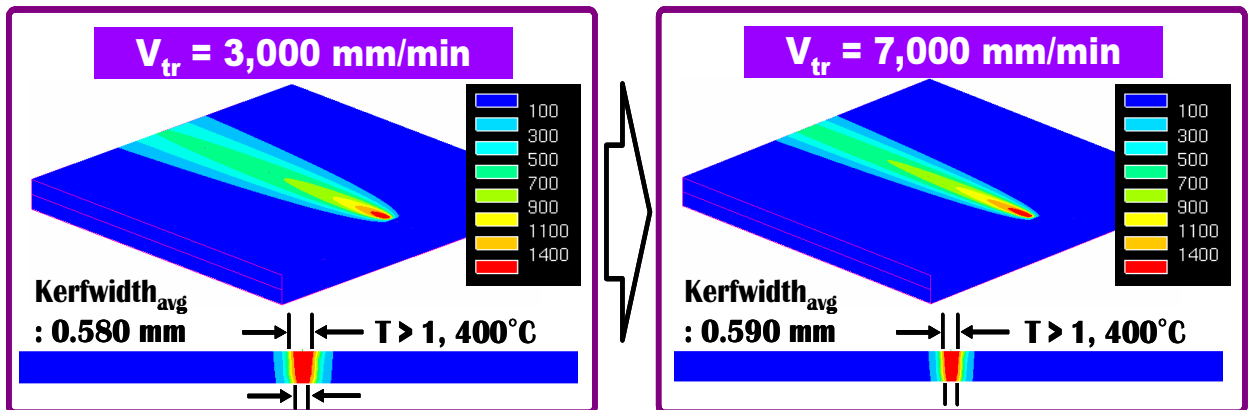


Fig. 47 Result of FE analysis ($T=1.6$ mm, $P=1,600$ Watt)

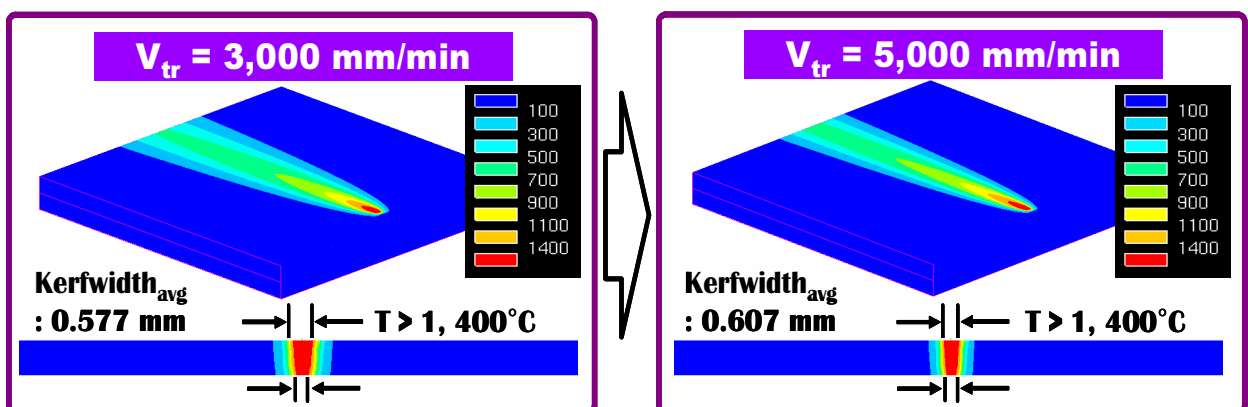


Fig. 48 Result of FE analysis ($T=2.0$ mm, $P=1,800$ Watt)

Fig. 49 는 각 공정조건별 절단에 투입되는 입열량을 비교한 결과이다. 이를 통해 시편의 두께가 두꺼울수록 용융에 필요한 입열량이 크게 나타나며, 출력 변화에 대해 민감하게 반응하는 것을 알 수 있었다. 또한, 절단속도가 증가할수록 절단에 필요한 입열량은 점점 감소하며, 임계절단 속도 이상이 되면 절단에 필요한 입열량이 더 이상 증가하지 않고 일정해지는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 시편의 두께가 얇을수록 더욱 뚜렷한 경향을 나타내었다.

Fig. 50 은 두께가 각각 다른 재료에 실제로 투입되는 단위 면적당 에너지량을 나타낸 것이다. 재료의 두께에 따라 투입되는 에너지는 절단 속도에 따라 6.5 J에서 8.5 J 사이에 매우 협소하게 존재하는 것을 알 수 있었고, 이를 통해 단위면적당 재료에 투입되는 에너지는 재료 두께에 관계없이 거의 유사함을 알 수 있었다.

Fig. 51 은 각 두께별 유효 투입 열량이 더 이상 증가하지 않고 일정해지는 최대 절단 가능속력에서 열원 중심부의 온도분포이다. Fig. 51 과 같이 열원중심부의 온도는 최소 2,000° C 이상 분포하는 것을 알 수 있었다.

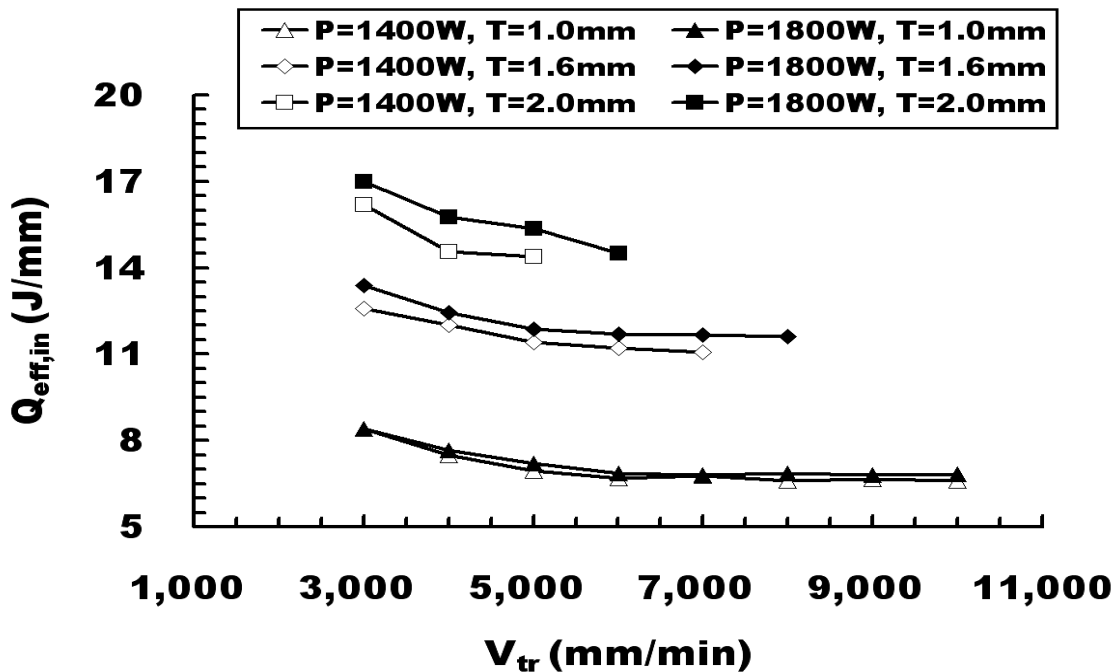


Fig. 49 Relationship between process parameters and practical heat input

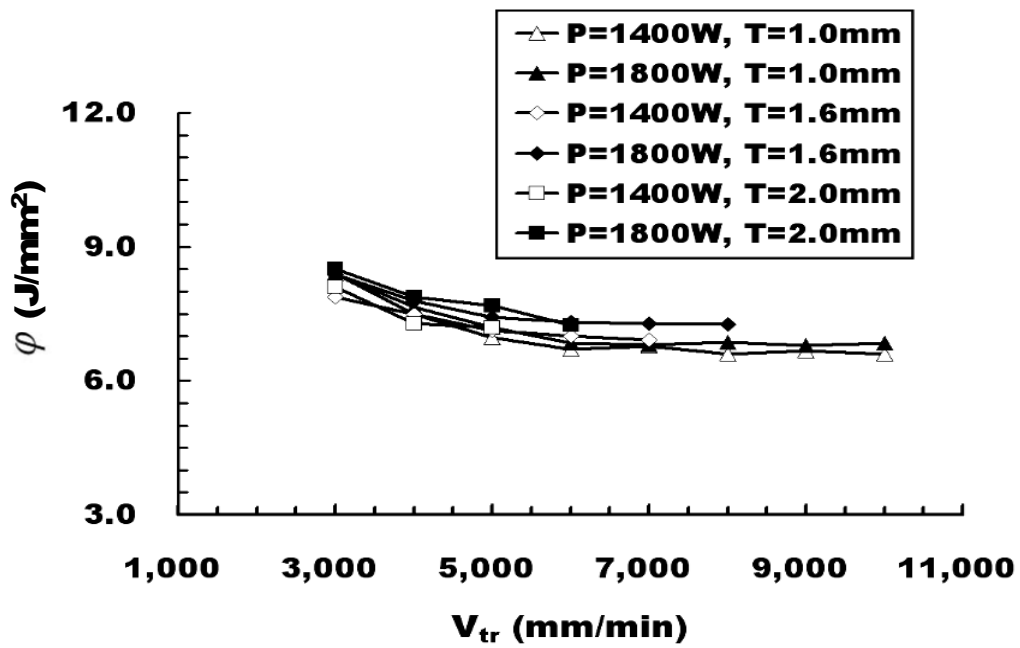


Fig. 50 Relationship between process parameters and energy per unit volume

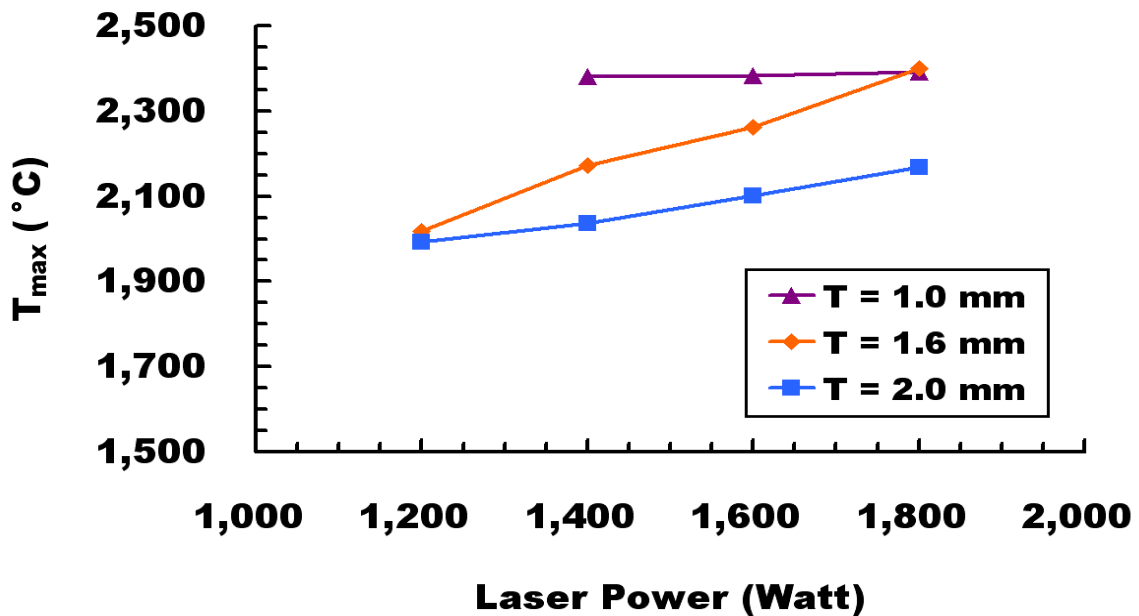


Fig. 51 Maximum temperature on the maximum cutting speed of each thickness

제 5 장 결론 및 향후과제

본 연구에서는 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 2 mm 이하의 Inconel 718 박판재 절단시 절단속도, 레이저출력, 재료두께 등의 공정변수가 각 조건별 절단가능영역, 절단폭, 표면조도, 절단면 조직 변화 및 절단 각도와 모서리 루프 크기에 따른 모서리의 용융량 및 열영향부 변화에 미치는 영향에 대한 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, Inconel 718 박판 재료두께에 따른 레이저 출력별 절단가능속력범위를 취득할 수 있었다. 재료 두께가 증가할수록 최소절단가능속력과 최대절단가능속력이 감소하여 절단가능영역이 협소하게 나타나며, 동일 재료 두께에서 레이저 출력이 증가할수록 최소절단가능속력이 증가하는 현상을 알 수 있었다.

둘째, 레이저출력, 레이저 절단속도 및 Inconel 718 재료 두께와 절단폭의 상관관계를 실험식을 통해 유도할 수 있었다. 재료의 두께 및 레이저 출력이 증가할수록 재료의 열용량이 증가하여 절단폭이 증가하는 것을 알 수 있었으며, 절단속도에 의한 영향은 거의 없는 것을 알 수 있었다.

셋째, 레이저 출력, 레이저 절단속력 및 재료두께가 절단면 표면조도와 물결무늬 형성에 미치는 영향성을 알 수 있었다. 표면조도는 중심선 평균거칠기 (R_a)와 절단면 최대거칠기 (R_{max})가 거의 유사한 특징을 나타내었다. 또한, 절단속력이 느린 영역에서는 골이 깊고 높이가 높은 물결무늬가 형성되어 표면조도가 크게 나타났으며, 절단속력이 점점 증가함에 따라 높이가 낮은 물결무늬가 형성되어 표면조도가 감소하였다. 이를 통해 각 공정조건별 절단면의 표면조도가 최소화되는 최적 절단속력을 도출할 수 있었다.

넷째, 레이저 절단에 의한 재료의 절단면은 모재 주요 구성 원소인 Ni, Cr, Fe

등과 취입가스 내 산소의 강한 산화반응에 의해 산화막이 형성되고 그로 인해 절단면의 국부적인 조직 변화가 일어나는 것을 알 수 있었다.

다섯째, 가공 경로의 변경에 따른 각도 절단 실험과 루프절단 실험을 실시하여, 절단 각도와 루프 길이가 모서리 용융량 및 열영향부에 미치는 영향을 정량적으로 유도할 수 있었다. 루프길이가 증가할수록 모서리 용융량 및 열영향부가 현저히 감소함을 알 수 있었으며, 형상이 복잡하고 다양한 제품 가공시 모서리 부근의 정밀도를 높이고 우수한 품질의 절단면을 획득하기 위해서는 최소 3 mm 이상의 루프 길이를 주어 레이저 절단을 수행해야 할 것으로 사료된다.

위 결과로부터 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 Inconel 718 재료의 절단 가공시 재료 두께별 절단이 가능한 공정변수의 조합을 획득할 수 있었으며, 각 실험조건별 표면조도가 최소화되고 우수한 절단면 품질을 나타내는 최적 절단속력을 예측할 수 있었다.

또한, 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 2 mm 이하의 Inconel 718 박판 절단 공정의 3차원 열전달 해석을 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

반복해석 기법을 이용한 절단폭 측면에서 실험결과와 일치하는 열전달 해석 모델을 수립할 수 있었다. 또한, 레이저 절단 공정중 발생하는 3차원 열전달 특성 및 온도 분포 특성을 알 수 있었다. 특히, 레이저 열원의 중심부를 중심으로 좌우로 0.5 mm 내에서 급격한 온도 변화가 발생함을 알 수 있었으며, 레이저 절단공정 중 열전달이 발생하는 영역은 재료의 용융부와 열영향부를 포함하여 최대 2.0 mm 내로 매우 작음을 알 수 있었다.

이상의 연구에서 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 Inconel 718 박판재 레이저 절단공정의 공정변수 조합에 관한 데이터베이스 구축 및 가공 경로 생성을 위한 절단 특성 분석 및 3차원 유한 요소해석에 관한 부분적인 연구가 수행되었다. 따라서 다양하

고 풍부한 데이터베이스 구축 및 가공 경로 생성을 위해서 다음과 같은 추가적인 연구가 필요하다.

첫째, 레이저 절단 가스 압력의 변화가 레이저 절단 특성에 미치는 영향 및 최적의 절단 가스 압력에 대한 연구를 통한 데이터베이스가 구축되어야 한다.

둘째, 레이저 절단 가공에 의한 재료의 활용도를 높이기 위하여, 두께 1 mm 이하인 Inconel 718 초 박판의 가공여부에 대한 연구가 추가적으로 수행되어야 한다.

셋째, 레이저 절단 가공에 의한 모서리 가공시 절단각도가 30° 이하일 경우에 대한 추가적 실험을 실시하여 형상이 매우 복잡한 가공물의 절단 가능성을 검토하여야 한다. 또한, 열영향을 최소화 하고 가공 효율을 극대화 할 수 있는 최적 가공 경로 도출을 위하여 루프 길이 3 mm 이하에 대한 레이저 절단 실험이 수행되어야 한다.

넷째, 레이저 절단 가공 중 발생하는 산화반응에 대한 물리학적 연구를 통해 재료의 투입되는 열량의 손실을 줄이고, 레이저의 효율을 극대화 할 수 있는 방법을 모색해야 한다.

다섯째, 3차원 유한요소 모델링을 이용한 각도 절단 및 루프 절단 해석을 통해서 실제 절단 공정중 볼 수 없는 열 분포, 열변형 및 잔류응력에 대한 데이터 구축이 필요하다.

여섯째, 다양하고 풍부한 데이터 베이스 구축 및 가공경로 생성을 위해서 Inconel 718 재질 뿐 만 아니라, 최근 산업적으로 사용이 급격히 증가하고 있는 티타늄, 니켈, 알루미늄, 스테인레스 재질의 레이저 절단 특성에 대한 연구가 필요하다.

REFERENCES

1. Geiger, M., "Manufacturing Science—Driving Force for Innovation," Advanced Technology of Plasticity, Vol. 1, pp. 17~30, 2002.
2. Pollmann, W. and Becker, W., "Laser—Assisted Manufacturing Technology in the 3rd Millennium," Processing of the LANE 2001, pp. 39~54, 2001.
3. Larsson, J. K., "The Mature Technique of Laser Processing in Body Manufacture—Long Term Production Experiences and Recent Development," Processing of the LANE 2001, pp. 55~74, 2001.
4. Ready, J. F., "Industrial Applications of Laser," Academic Press, San Diego CA U.S.A., pp. 315~417, 1997.
5. Caristan, C. L., "Laser Cutting ; Guide for Manufacturing," Society of Manufacturing Engineers, Dearborn Michigan U.S.A., pp. 3~54, 2004.
6. Incropera, F. P., "Fundamentals of heat and mass transfer," Wiley & Sons Press, U.S.A., pp. 9~13, 2003.
7. Ready, J. F., "LIA handbook of laser materials processing," Magnolia Press, U.S.A., pp. 37~42, 2001.
8. Kanaoka, M., "레이저 가공기술," (주)한국산업정보센터 출판, 대한민국, pp. 31~86, 2000.
9. Ghany, K. A., "Cutting of 1.2mm Thick Austenitic Stainless Sheet Using Pulsed and CW Nd:YAG Laser," Journal of Materials Processing Technology, Article in Press, 2005.
10. Ahn, D. G., Kim, M. S., Lee, S. H. and Yoo, Y. T., "Influence of Process Parameters on the Kerfwidth for the Case of Laser Cutting of CSP 1N Sheet using High Power CW Nd:YAG Laser," Journal of Korea Society of Precision Engineering, Vol. 22, No. 7, pp. 19~26, 2005.
11. Ahn, D. G., Kim, M. S., Lee, S. H. and Yoo, Y. T., "Influence of

- Process Parameters on the Surface Roughness and the Striation Formation of the Cut Section for the Case of Cutting of CSP 1N Sheet using High Power CW Nd:YAG Laser," Journal of Korea Society of Precision Engineering, Vol. 23, No. 7, pp. 30~38, 2006.
12. Na, S. -J., Yang, Y. -S., Koo, H. -M., Kim, T. -K., "Effect of Shielding Gas Pressure in Laser Cutting of Sheet Metals," Transactions of the ASME ; Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 111, pp. 314~318, 1989.
 13. Ahn, D. G., Byun, K. W. and Yoo, Y. T., "Investigation into the Formation of the Cut Section for the Case of Cutting of Inconel 718 Sheet using CW Nd:YAG Laser," Preceeding of the KSMTE Autumn Annual Conference 2007, pp. 113~118, 2007.
 14. Steen, W. M., "Laser material processing," Springer Press, U.S.A., pp. 34~58, 2003.
 15. Ahn, D. G., Byun, K. W. and Yoo, Y. T., "Preliminary Studies on the Characteristics of Cut Section for the Case of Laser Cutting of Inconel 718 Sheet using High Power CW Nd:YAG Laser," Preceeding of the KSPE Spring Annual Conference 2007, pp. 19~20, 2007.
 16. Ahn, D. G., Byun, K. W. and Yoo, Y. T., "Effects of an Auto-tracking of the Focal Distance on the Quality of the Cut Part in the Laser Cutting of a Low Carbon Steel Sheet," Journal of Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 16, No. 4, pp. 101~107, 2007.
 17. Hitz, B., "Introduction to laser technology," IEEE Press, U.S.A., pp. 1~6, 1998.
 12. Yang, Y. -S., Na, S. -J., "A study on residual stresses in laser surface hardening of a medium carbon steel," Surface, U.S.A., pp.1~6, 1998.
 13. Yilbas, B. S., "Effect of Process Parameters on the Kerfwidth During

- the Laser Cutting Process," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineer Part B; Journal of Engineering Manufacture, Vol.215, pp.1357~1365, 2001.
14. Aloke, R., Girrish, V., Scrutton, R. F., Molian, P. A., "A Model for Prediction of Dimensional Tolerances of Laser Cut Holes in Mild Steel Thin Plates," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.37, pp.1069~1087, 1997.
 15. Dorn, L., Lee, K. -L., Munasinghe, N., "Nd:YAG Laser Cutting of Amorphous Alloys," DVS-Berichte, Vol.163, pp.447~455, 1994.
 16. Naeem, M., Matthews, M., Ingram, S., "Parameteric Study of Laser Cutting of Steel Using 1.5kW Continuous Wave Nd:YAG Laser," Proceedings of Laser Materials Processing Conference, pp.152~158, 1999.
 18. Pietro, P. D. and Yao, Y. L., "A New Technique to Characterize and Predict Laser Cut Striations," International Journal of Machine tools & Manufacture, Vol. 35, pp. 993~1002, 1995.
 19. Yang, Y. -S., Na, S. -J., "A study on residual stresses in laser surface hardening of a medium carbon steel," Surface, U.S.A., pp. 1~6, 1998.
 20. Yilbas, B. S., "Effect of Process Parameters on the Kerfwidth During the Laser Cutting Process," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineer Part B; Journal of Engineering Manufacture, Vol. 215, pp. 1357~1365, 2001.
 21. Arata, Y., Maruo, H., Miyamoto, I. and Takeuchi, S., "Dynamic Behavior in Laser Gas Cutting of Mild Steel," Transaction of JWRI, Vol. 8, No. 2, pp. 15~26, 1979.
 22. Aloke, R., Girrish, V., Scrutton, R. F., Molian, P. A., "A Model for Prediction of Dimensional Tolerances of Laser Cut Holes in Mild Steel

- Thin Plates," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 37, pp. 1069~1087, 1997.
23. Naeem, M., Matthews, M., Ingram, S., "Parameteric Study of Laser Cutting of Steel Using 1.5kW Continuous Wave Nd:YAG Laser," Proceedings of Laser Materials Processing Conference, pp. 152~158, 1999.
 24. Dorn, L., Lee, K. -L., Munasinghe, N., "Nd:YAG Laser Cutting of Amorphous Alloys," DVS-Berichte, Vol. 163, pp. 447~455, 1994.
 25. Olsen, F. O., "Cutting Front Formation in Laser Cutting," Annals of the CIRP, Vol. 38, No. 1, pp. 215~218, 1989.
 26. Yilbas, B. S., "Laser Cutting Quality Assessment and Thermal Efficiency Analysis," Journal of Material Processing Technology, Article In Press, 2004.
 27. Chen, S. L., "The effects of high-pressure assistant-gas flow on high-power CO₂ laser cutting", Journal of Meterials Processing Technology, Vol. 88, pp. 57~66, 1999.
 28. bandyopadhyay, S., Sarin Sundar, J. K., Sundararajan, G. and Joshi, S. V., "Geometrical Features and Metallurgical Characteristics of Nd:YAG Laser Drilled Holes in Thick IN 718 and Ti-6Al-4V Sheets," Journal of Materials Processing Technology, 127, 83~95, 2002.
 29. Thawari, G., Sarin Sundar, J. K., Sundararajan, G. and Joshi, S. V., "Influence of Process Parameters during Pulsed Nd:YAG Laser Cutting of Nikel-base Superalloys" Journal of Materials Processing Technology, 170, 229~239, 2005.
 30. Han, G. C., Lee, S. J., "A Study on Torch Path Planning in Laser Cutting Processing Part 1 : Calculation of Heat Flow in Contour Laser Beam Cutting" Journal of Manufacturing Processes, Vol. 1, No. 1, pp. 54~61, 1999.

31. Ahn, D. G., Kim, M. S., Byun, K. W., Lee, S. H. and Yoo, Y. T., "Influence of Process Parameters on the Cutting Characteristics in the Sharp Corner for the Case of Cutting of CSP 1N Sheet using High Power CW Nd:YAG Laser," Preceeding of the KSMPE Spring Annual Conference 2006, pp. 29~34, 2006.
32. Rosental, D., "Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cutting," Welding Research Supplement, Vol. 20, pp. 220~234, 1941.
33. Eagar, T. W. and Tsai, N. S., "Temperature Fields Produced by Traveling Distributed Heat Source," Welding Research Supplement, pp. 346~355. 1983.
34. Mazumder, J. and steen, W. M., "Heat Transfer Model for CW Laser Material Processing," Journal of Applied Physics, Vol. 51, pp. 941~947, 1980.
35. Park, J. H., "A Study on Cutting Mechanism and Heat Transfer in Laser Cutting Process using FDM," KAIST M. S. Thesis, 1993.
36. Kim, M. J. and Majumdar, P., "Computational Model for High Energy Laser Cutting Process," Numerical Heat Transfer Part A, Vol. 27, pp. 713~733, 1995.
37. Ahn, D. G. and Kim, M. S., "A Study on Heat Transfer Characteristics of Laser Cutting for the CSP 1N Sheet using High-power CW Nd:YAG Laser," Journal of Korean Society of Manufacturing process Engineers, Vol. 6, No. 1, pp. 51~58, 2006.
38. <http://www.trumpf-laser.com>
39. <http://www.precitec.de>

감사의 글

한편의 학위논문이 나오기까지 연구자로서 목적을 이루어 갈 수 있도록 여러 방면으로 도움을 주신 많은 지인들이 있습니다. 2년여 동안의 대학원 생활을 반추해보며 그 시간이 헛되지 않고 학문증진에 매진할 수 있도록 따끔한 충고와 따뜻한 격려를 해주신 여러 지인들께 감사의 마음을 전합니다.

대학원 2년의 시간동안 제자들을 위해서 자신의 대부분을 희생하시고, 이 논문이 완성되기까지 세심한 지도와 편달을 해주신 안동규 지도교수님께 진심으로 감사드립니다. 매 순간순간 최선을 다하고 결과에 순응하는 진정한 프로가 되라고 하신 말씀 명심하겠습니다. 보이지 않는 곳에서 항상 든든한 버팀목이 되어주시고 논문 교정 및 심사를 하시느라 고생하신 한길영 교수님, 실험에 있어서 많은 도움을 주시고 논문의 완성도를 높이기 위해 다양한 조언을 해주신 유영태 교수님께 깊은 감사드립니다.

전산설계실험실에서의 첫 걸음을 시작하면서 잦은 난관에 부딪칠 때마다 많은 조언과 격려를 해주신 이상훈 선배님, 프로젝트 선임으로써 논문에 다양한 조언과 비전을 제시해 주시고 졸업 후에도 실험실에 따뜻한 관심을 쏟아주신 김민수 선배님, 부족한 후배를 너그럽게 배려해주시고 손수 출선수범하여 실험실 분위기를 이끌어 가느라 고생하신 FRP성형실험실장 김진석 선배님께 감사드립니다. 실험실 동기이자 서로 부족한 부분을 많은 대화와 직언으로 슬기롭게 해결하며 모든 일에 최선을 다하는 문경제, 시험실 분위기 메이커이며 모든 일에 긍정적인 정광운, 다재다능하고 다정한 성격의 김대원, 절실한 크리스찬답게 대단히 꼼꼼하고 착실한 김현우, 지금은 실험실에 없지만 들지했던 문형철, 실험실 일을 분담해서 선배들의 부담을 덜어준 고마운 학부생 후배 박승화, 송동한, 남경흠 에게 진심으로 감사의 말씀을 전합니다.

레이저 절단 실험에 많은 도움과 지식을 준 신호준 선배님, 바쁜 와중에도 실험에 동참해준 고마운 대학원 동기 신병현 이하 레이저 가공 실험실에도 감사드립니다.