



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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](#)

공학석사 학위논문

원격 스캐너를 이용한 알루미늄 레이저
용접에 대한 용접 특성 평가 및
최적화 변수 설계



2012년 2월

부경대학교 대학원

생산자동화공학과

김동윤

공학석사 학위논문

원격 스캐너를 이용한 알루미늄 레이저
용접에 대한 용접 특성 평가 및
최적화 변수 설계

지도교수 박영환

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2012년 2월

부경대학교 대학원

생산자동화공학과

김동윤

김동윤의 공학석사 학위논문을 인준함

2011년 12월 12일



주심 공학박사 진 인 태 ㉠

위원 공학박사 김 태 완 ㉠

위원 공학박사 박 영 환 ㉠

목 차

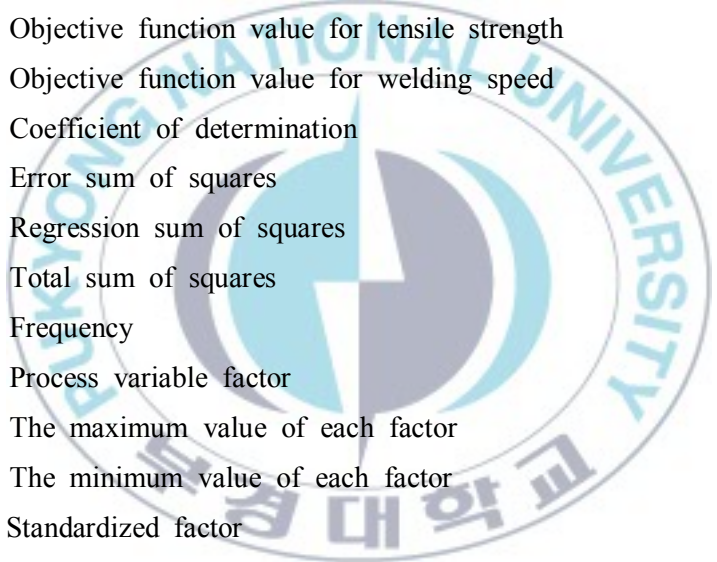
Nomenclature	iii
List of tables	iv
List of figures	v
1. 서 론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구현황	3
1.2.1 원격 스캐너를 이용한 알루미늄 레이저 용접	3
1.2.2 공정 모델링 및 최적화	5
1.3 연구 내용	7
2. 레이저 가공 및 실험 계획법	9
2.1 레이저 원리	9
2.2 레이저 가공 원리	18
2.3 실험계획법	20
2.3.1 분산분석	22
2.3.2 반복이 있는 삼원 배치법	27
2.3.3 회귀분석	29
2.4 생산 자동화를 위한 최적화 이론	37
3. 알루미늄 원격 레이저 용접 실험 및 결과	39

3.1 서언	39
3.2 실험 장치 및 조건	40
3.2.1 용접시스템 및 재료	40
3.2.2 실험조건	42
3.3 용접 공정 변수에 따른 용접 특성	44
3.3.1 용접부 외관 및 단면사진	44
3.3.2 용접부 비드 형상	46
3.3.3 인장강도	51
3.3.4 분산분석	53
3.4 모재 사이의 갭(gap)에 따른 용접 특성	55
3.3.1 용접부 외관 및 단면사진	55
3.3.2 용접부 비드 형상	54
3.3.3 인장강도	60
3.3.4 인장강도에 따른 분산분석	61
3.5 결론	62
4. 공정변수를 이용한 인장강도 예측모델	64
4.1 서언	64
4.2 회귀분석을 이용한 인장강도 예측모델	65
4.2.1 표준화	65
4.2.2 회귀 모델	65
4.2.3 회귀 모델의 예측결과	68
4.2.4 회귀 모델의 통계적 유의성	70
4.3 각 모델의 예측성능 비교	72

4.4 결론	73
5. 공정변수 최적화 기법	75
5.1 서언	75
5.2 목적 함수와 적합도 함수	76
5.3 최적함수를 이용한 변수 최적화	78
5.4 결론	81
6. 결론	82
REFERENCE	84
ABSTRACT	88
감사의 글	91



Nomenclature



AER	: Average error rate
β_0	: Intercept of y-axis
$\beta_1 \sim \beta_9$	: Coefficient of regression model
$fitness$	: Fitness function value
h	: Plank constant (J·s)
Obj_{TS}	: Objective function value for tensile strength
Obj_{WS}	: Objective function value for welding speed
R^2	: Coefficient of determination
SSE	: Error sum of squares
SSR	: Regression sum of squares
SST	: Total sum of squares
ν	: Frequency
x	: Process variable factor
x_{max}	: The maximum value of each factor
x_{min}	: The minimum value of each factor
x_n	: Standardized factor
x_1	: Laser incident angle of regression model
x_2	: Laser power of regression model
x_3	: Welding speed of regression model
W_{TS}	: Weight value for objective function for tensile strength
W_{WS}	: Weight value for objective function for welding speed
y	: Tensile strength by test (N)
$\hat{y}$	: Tensile strength value through estimation model

List of tables

Table 2.1 The models of the process experimental	25
Table 2.2 ANOVA (Analysis of variance)	27
Table 2.3 ANOVA of three-way factorial design	28
Table 2.4 ANOVA of regression analysis	36
Table 3.1 Chemical composition of Aluminum alloy 5J32 (wt. %)	41
Table 3.2 Laser weld experiment condition	43
Table 3.3 Gap experiment condition	43
Table 3.4 ANOVA for tensile strength about welding parameters	55
Table 3.5 ANOVA for tensile strength about welding parameters and gap	32
Table 3.8 Experimental conditions for evaluation of effect of concentration of electrolyte and electric potential on surface roughness	34
Table 4.1 Coefficients for Model I (multiple linear regression model) ...	67
Table 4.2 Coefficients for Model II (second order polynomial regression model)	67
Table 4.3 Coefficients for Model III (multiple nonlinear regression model)	67
Table 4.4 ANOVA for Model I (multiple linear regression model)	71
Table 4.5 ANOVA for Model II (second order polynomial regression mo- del)	71
Table 4.6 ANOVA for Model III (multiple nonlinear regression model) ·	72
Table 4.7 Coefficient of determination and average error rate for each model	73

List of figures

Fig. 1.1 The affecting factor for quality of laser welding	7
Fig. 2.1 Schematic illustration of laser oscillation	15
Fig. 2.2 The excited state and energy level of atoms	16
Fig. 2.3 Energy transition diagram	16
Fig. 2.4 Population inversion for 4 level system of laser transition	17
Fig. 2.5 The principle of laser disk	17
Fig. 2.6 The principle of keyhole welding	19
Fig. 2.7 The decomposition of total sum of squares	24
Fig. 3.1 Schematic diagram of laser scanner system	41
Fig. 3.2 Geometry of the specimen	41
Fig. 3.3 Type of bead shape at different welding conditions	45
Fig. 3.4 Photo of cross section according to welding conditions	46
Fig. 3.5 Measurement of bead height and width	48
Fig. 3.6 Bead height according to welding conditions	49
Fig. 3.7 Bead width according to welding conditions	50
Fig. 3.8 The shape of test piece	52
Fig. 3.9 Result of tensile test	53
Fig. 3.10 Fracture types after tensile test	53
Fig. 3.11 Photo of cross section according to welding conditions and gap	56
Fig. 3.12 Bead height according to welding conditions and gap	58
Fig. 3.13 Bead width according to welding conditions and gap	59
Fig. 3.14 Result of tensile test for gap	61

Fig. 4.1 Estimation result of Model I (multiple linear regression model)	69
Fig. 4.2 Estimation result of Model II (second order polynomial regression model)	69
Fig. 4.3 Estimation result of Model III (multiple nonlinear regression model)	70
Fig. 5.1 Objective function	77
Fig. 5.2 Fitness function in numerical search method	80



1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

레이저(Light Amplification Stimulated by the Emission of Radiation)는 “복사의 자극방출에 의한 빛의 증폭”이라는 의미로 머리글자를 따서 만든 이름으로, 고밀도의 에너지를 갖고 있으며, 집속성이 강한 단색 광선이다. 1958년 A. L. Schawlow 와 C. H. Townes 에 의해 레이저의 이론적 제안이 있는 후, 1960년 T. H. Maiman 에 의해 루비를 사용한 레이저가 발명되었고, 그 후 각종 산업에서 레이저의 이용이 증대되어 왔다. 특히 1970 년대에 들어서면서 고출력 레이저가 개발됨과 동시에 그 사용이 여러 가공 분야에서 급속도로 확산되었다. 고출력 레이저를 이용한 가공에 있어서, 레이저 용접(laser welding)은 자동차 산업에서 가장 활발하게 사용되어 지고 있다. 그 이유로 레이저 용접의 경우 고속의 용접속도, 짧은 용접시간, 작은 입열량, 작은 열영향부(heat affected zone : HAZ) 등과 같은 장점을 가지고 있어, 자동차 산업현장에서 중요한 부분인 품질 향상시킬 수 있고, 생산성이 증가를 기대할 수 있다. 또한 현재 산업현장에서의 생산성과 품질 향상에 대한 많은 연구가 진행되고 있으며, 레이저 용접이 접목 되고 있다. 미국의 G. M 사에서 처음 자동차 조립공정에 적용 되었고 현재 전 세계적으로 자동차 산업에서 그 비중이 점차 커져 가고 있는 추세이다.

최근 들어 심각한 환경오염과 자동차 수요의 급격한 증가에 따른 에너지 자원 고갈로 인해 이미 선진국에서는 자동차 연비 및 배기가스의 규제를 한층 심하게 강화하고 있다. 그리고 자동차 연비 향상 및 공기저항

감소를 위한 새로운 차체 디자인 , 새로운 엔진 개발 및 재료의 경량화 등이 있다. 차체 디자인 및 엔진 개발의 경우기술 개발 비용과 시간이 많이 든다는 단점이 있어 차체 경량화를 실시한다. 차체의 경량화는 엔진 효율을 극대화 시키고 그로 인해 연비 향상을 도모 할 수 있으므로 환경오염 방지와 연료절감에 가장 적합하고 효과적인 방법이다.

차량을 경량화 하기 위해서는 차량에 경량화 소재인 알루미늄 합금이나 마그네슘합금과 같은 재료, 고장력강과 같은 고강도의 재료 및 고강성화의 재료를 사용하여 강판의 두께를 줄이는 방법, 그리고 테일러드 브랭크나 하이드로 포밍과 같은 새로운 공법을 적용하는 방법이 많이 사용되고 있다.

이와 같은 추세에 의하여 자동차뿐만 아니라 철도차량, 비행기, 선박등도 경량화 재료인 알루미늄 합금을 적용하고자 노력하고 있다. 이러한 알루미늄 합금을 차체 조립공정에 적용하기 위한 용접기술이 반드시 필요하다. 그러나 알루미늄은 열전도도가 크고, 녹는점이 낮기 때문에 아크 용접으로는 용접하기가 매우 어렵다. 그러므로 고 에너지 열원인 용접법이 필요하고 그 용접 법으로 레이저 용접이 주목받고 있다.⁽¹⁾

이러한 알루미늄 용접에 있어서 새로운 용접공정이 생산라인에 적용되기 위해서는 반드시 자동화의 과정을 거쳐야 한다. 1970년 로봇과 연계한 저항 점용접에 개발되었고, 1995년 레이저 용접을 로봇과 연계하기 시작하였다. 2002년 스캐너(원격다점)에 의한 레이저 용접이 개발되었고, 2005년에는 로봇과 스캐너에 의한 레이저 용접이 개발되었다.

로봇과 스폿 용접의 연계하여 1타점을 찍기 위해 용접(welding)과 로봇 이동(positioning) 시간은 3초정도 소요되고, 원격 다점 레이저 용접의 경우 0.5초 소요되므로, 이러한 다점 레이저 용접은 생산성을 높이는

데 효과적이라고 볼 수 있다. 그리고 생산성을 극대화하기 위해서는 최적의 레이저 공정변수를 선택하여야 한다.

본 연구에서는 차량 경량화에 사용되는 알루미늄 합금의 원격 스캐너를 이용한 레이저 용접을 수행하였다.

1.2 연구 현황

1.2.1 원격 스캐너를 이용한 알루미늄 레이저 용접

전 세계 알루미늄의 수요는 매년 평균 3 % 증가할 만큼 사용량이 급속도로 늘어나고 있다. 특히 최근에 와서는 연비를 높이고 공해발생을 억제하기 위해 수송기기 분야에서 경량화 소재로 알루미늄 합금의 활용이 본격화되고 있다.

알루미늄은 경량화뿐만 아니라 비강도, 내식성, 열전도도 등이 우수하여 자동차 재료로 사용되며 최고 90 % 가량 경량화를 이룰 수 있다. 그리고 종래 자동차 생산라인의 설비를 약간 혹은 그대로 사용할 수 있다는 장점으로 자동차 경량화를 위한 대체 재료로 주목받고 있다. 또한 90 % 이상 자원재활용이 가능한 알루미늄 합금은 급격한 산업화로 인해 초래된 자원고갈과 환경오염이라는 측면에서도 사용비율을 꾸준히 증가하여 80년대 초 전체 자동차 재료에서 알루미늄이 차지하는 비율이 3% 이하였으나 92년에는 6 %로 증가하였으며, 앞으로도 꾸준히 증가할 것으로 기대된다. 자동차 무게의 20~30 %를 차지하는 차체부분을 강판에서 알루미늄 합금으로 대체하면 가장 큰 경량화 효과를 기대할 수 있다. 실제로 차종에서는 높은 비중의 알루미늄 재료를 사용하고 있다. 예로서

포르쉐 928기종에서는 알루미늄을 266 kg까지 사용하여 전체 차 중량에서 19 %를 차지하고 있으며 G M 코베트는 183 kg으로 11.8 %를 사용하고 있는 등 알루미늄의 차체 차량화의 대표적이라 할 수 있겠다. 그리고 1 kg 알루미늄 합금을 사용하면 차체 중량을 약 2kg 절감하는 것이 가능하며 차체용 박판, 범퍼, 열교환기, 주물재, 단조재에서 금후 수요가 크게 기대되고 있다.

그러므로 알루미늄 합금을 대체하기 위해서는 강도, 성형성, 내식성, 용접성, 표면 처리성 등이 우수하여야 하며, 내연강판에 견줄만하거나 이보다 더 나은 성능을 지녀야 한다. 이와 같이 경량성과 함께 높은 열전도도, 주조성과 가공성, 대량생산 및 표면의 미려함 등 많은 장점을 가지고 있지만 철강 재료보다 값이 비싸고 용접과 같은 접합성의 개선이 필요하며 강도가 떨어지는 단점이 있다.⁽²⁾

우선 산업현장에 적용하고 있는 레이저 용접으로는 CO₂ 레이저, Nd:YAG 레이저, Disk 레이저, Fiber 레이저 등의 용접이 있다.⁽³⁾ 그리고 접합성 개선 및 강도 향상을 위하여 레이저 용접에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 알루미늄 합금에 대한 CO₂ 레이저 용접시 용접 특성을 평가하였으며⁽⁴⁾, 알루미늄 강도 저하를 막기 위해 Nd:YAG 레이저 용접에서는 용가와이어를 이용하였다.⁽⁵⁾ 알루미늄 강판의 CO₂ 레이저 용접과 Nd:YAG 레이저의 용접성을 비교 하는 연구도 있었다.⁽⁶⁾ 이렇듯 알루미늄 합금 용접시 레이저 용접을 접목시키기 위하여 많은 연구가 진행 중이다.

자동차 재료뿐만 아니라 공정부분에서도 많은 연구를 하고 있다. 자동차 차체 용접에서 사용되고 있는 기존의 저항 점용접을 기초로 한 자동차 설계 및 생산방식이 점차 개발되면서 저항 용접기의 기하학적 구조와

용접특성으로 인해 적용범위가 한정적이며, 용접효율이 낮음에 따라 경제성, 기술적 한계에 도달하였다. 따라서 자동차의 경량화, 안전도 향상, 생산성 향상을 달성하기 위하여 원격 스캐너 레이저 용접 기술이 자동차 업계의 핵심기술로 대두되고 있다.⁽⁷⁾ 선진국에서는 이미 기존의 저항 점 용접의 차체 조립 공정을 레이저 용접으로 대체하여 차체 경량화 및 생산성 향상을 달성하고 있고, 국내 자동차 업계에서도 원격스캐너 레이저 용접 생산기술 개발의 필요성이 요구되고 있다. 현재 CO₂ 레이저 원격 용접 시스템을 이용하여 자동차 차체부품의 소재로 널리 쓰이는 SPRC440에 대한 강도평가를 실시하였으며⁽⁸⁾, Nd:YAG 레이저를 이용한 3차원 레이저 용접 시스템을 구축하였다.^(9,10)

본 논문에서는 원격 스캐너를 이용한 Disk 레이저의 용접 특성을 기계적 측면에서 접근하여 용접부 특성이 어떻게 변하는지를 분석함으로써 자동차 차체에 알루미늄 5000계열 판재의 적용 가능성을 판단 할 것이다.

1.2.2 공정 모델링 및 최적화

레이저 용접에 영향을 미치는 요인은 다양하며, Fig. 1.1에서 표현하였다. 그리고 이러한 인자들은 서로 복잡하게 연관되어 있으므로 최적의 용접 조건을 얻는다는 것은 어려운 일이다. 그러나 생산 현장에 적용하기 위하여 생산성과 용접성을 모두 고려하여 용접 조건을 최적화하여야 한다. 최적화를 하기 위한 방법으로 각 공정인자와 수준(level)에 따른 실험의 경우 많은 시간과 비용 소모로 현실적 어려움이 따르므로 실험계획에 의한 통계적 기법의 도입이 필요하다. 실험계획법에 의한 통계적

기법은 용접 조건에 따른 인장강도의 데이터를 분석하여 최소의 실험으로 최적의 용접 조건에 대한 정보를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 그리고 용접 조건을 최적화하기 위해 우선 레이저 가공 변수들 간의 상관관계와 예측모델링이 필요하며, 예측모델링을 통하여 용접조건을 최적화 과정이 필요하다.

최적화하는 과정에 대해서 많은 연구가 있으며, 회귀분석의 통계적으로 입력변수와 출력변수간의 상관관계를 수식으로 전개하고 다양한 가공특성의 예측에 사용하였다. Palani 는 FCAW를 이용하여 용접비드 형상의 최적화 하는 방법을 소개하였고⁽¹¹⁾, Park과 Rhee은 CO₂ 레이저 용접에 있어서 비드의 폭과 용입 깊이를 다중 회귀 분석과 신경회로망 알고리즘을 이용하여 모델링하였다.⁽¹²⁾

본 논문에서는 원격 스캐너를 이용한 알루미늄 레이저 용접에서 영향을 미치는 중요한 인자를 이용하여 실험 계획법을 바탕으로 한 실험결과를 토대로 용접 공정 모델링과 최적화를 실시하였고 최적화는 단순히 기계적 특성뿐만 아니라 생산성을 동시에 고려한 방법을 제안하고자 한다.

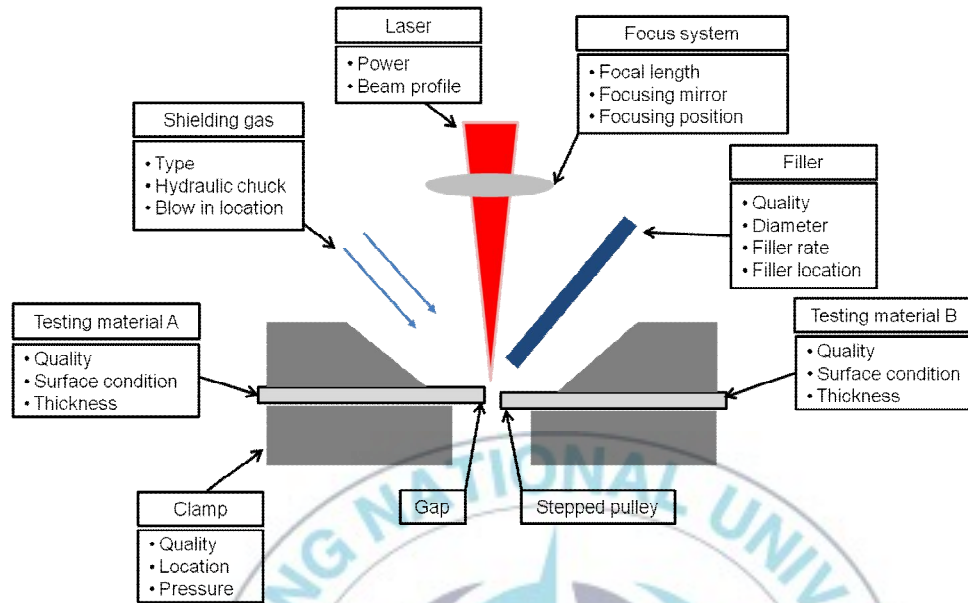


Fig. 1.1 The affecting factor for quality of laser welding

1.3 연구내용

본 논문에서는 원격 스캐너를 이용한 알루미늄의 레이저 용접에 따른 용접 특성 평가를 실시하여 기계적 특성을 알아보았다. 그리고 기계적 특성을 나타내는 인장강도를 이용하여 예측 모델링 하였으며, 생산성과 용접성을 고려한 최적화를 실시하였다.

따라서 제 2장에서는 레이저 가공의 원리와 예측모델을 만들기 위한 이론적 배경 및 정량적으로 평가를 위한 분석법을 기술하였다. 제 3장에서는 5000계열 알루미늄의 소재인 5J32 합금의 겹치기 용접을 조사각도 (angle), 레이저 출력(laser power), 용접 속도(welding speed) 및 모재 사이의 갭(gap)에 따른 용접 특성 평가를 관찰하였다. 용접부 외관 및

비드형상, 인장 강도를 통하여 용접특성을 살펴보고 그 결과를 고찰하였다. 제 4장에서는 회귀 모델을 이용하여 용접부의 인장강도를 예측할 수 있는 모델을 제시하였고, 각 모델의 성능을 정량적으로 평가하였다. 제 5장에서는 4장에서 구한 인장강도의 모델을 이용하여 최적화를 수행하였다. 최적화화 방법은 용접성과 생산성에 관한 목적 함수를 이용하여 적합도 함수를 정의하였다.



2. 레이저 가공 및 실험 계획법

2.1 레이저 원리⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾

레이저(Laser)란 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 의 첫머리 글자를 나타낸 것으로서 유도 방출에 의한 빛의 증폭 현상이다. 1917년 Einstein에 의해 유도방출의 개념을 포함하여 원자에서의 빛의 흡수와 방출에 대한 이론을 발표하였으며, 40여년 후의 T. H. Maiman에 의해 세계최초의 레이저인 루비 레이저가 발진하였다. 그 후 각종 산업에서 레이저의 이용이 증대 되었고, 1970년에 고출력 레이저가 개발됨으로써 여러 가공 분야에서 급속도로 확산되었다.

레이저가 동작하기 위하여 세 가지의 기본 조건을 만족시켜야 한다. 첫째로 전자파 스펙트럼의 광학적인 구역에서 전자파를 방출시키는 활성화된 매질(active media) 이 있어야 하며, 이것은 보통 원자 혹은 분자들의 집합체로 이루어져 있다. 두 번째는 활성화된 매질내에서 분포 반전 현상이 있어야 하며, 광학적인 펌핑(pumping source) 등 여기과정에 의하여 수행된다. 마지막으로 방출된 빛을 증폭시키기 위하여 두 개의 거울로 구성된 공진기공동(resonator cavity)이 있어야 한다. 레이저의 개략도는 Fig. 2.1 와 같다.

모든 물질의 구성하는 원자는 Bohr의 원자 모형에서 알려져 있는 것과 같이 원자핵의 주위를 몇 개의 전자가 회전 운동하며 그 들은 각각의 에너지를 가지고 있다. 원자의 최외각 전자에 외부로부터 다른 전자를 충돌시켜 에너지를 주면 전자는 핵에서 좀 더 먼 궤도로 이동한다.

즉 전자는 원상태보다 큰 에너지를 가지고 다른 운동을 한다. 이 상태

를 여기 상태(excited state)에 있다고 하며 전자나 원자에 에너지를 주는 것을 여기(excitation)라 한다. 또한 원자가 여기 이전의 가장 낮은 에너지 상태를 기저상태(ground state)에 있다고 한다. Fig. 2.2는 여기 상태에 있는 원자의 모식도와 원자가 얻을 수 있는 에너지 크기인 에너지 준위를 나타낸 것이며 이것은 연속되지 않고 일정한 준위를 가지고 존재한다. 이러한 에너지 준위는 원자의 종류에 따라서 고유의 값을 가지고 있다. 에너지 준위 E_1 에 있는 원자에 외부에서 진동수 ν 의 전자파가 입사하면 원자는 진동수 ν 의 파동에 공진하여 에너지를 흡수하고 Fig. 2.3(a)와 같이 에너지 준위 E_1 에서 E_2 로 여기 된다. 외부로부터 받은 에너지가 전자파 에너지인 경우, 이러한 전이를 복사성 전이(radiative transition)라고 한다. 복사성 전이의 경우 빛의 흡수는 원자와 공명하는 특정과장에서 일어난다. 이때의 전자파를 에너지로 취급하여 식(2.1)으로 나타낸다.

$$E_2 - E_1 = h\nu \quad (2.1)$$

여기서, h : Planck 상수, ν : 진동수

위의 식에서 $h\nu$ 는 두 개의 에너지준위의 차 $E_2 - E_1$ 와 동일한 에너지이다. 이 $h\nu$ 를 광자(photon)라고 하며 빛을 에너지를 가진 양자역학적인 입자로 생각한 것이다. 따라서 빛은 광자의 집합이며 광의 흡수는 광자의 흡수라는 것이 된다. Fig. 2.3(b)에 나타낸 바와 같이 여기상태의 에너지준위 E_2 에 있는 원자는 일반적으로 불안정하여 짧은 시간 내에 안정한 상태인 E_1 준위로 옮겨간다. 이때 여기에서 얻어진 잉여 에너지를 광

자로서 방출하게 되는데 이와 같이 E_2 에서 E_1 으로 에너지 상태가 변화하는 것을 천이(transition)라고 한다. 이러한 천이는 자연적인 것이면 자연천이라고 하며 자연 천이에 의한 빛의 방출은 자연 방출(spontaneous emission)이다. 레이저는 이러한 빛을 모아서 증폭시킨 것이며, 좀 더 많은 빛을 얻기 위하여 유도 방출(stimulate emission)을 이용한다. 유도 방출이란 외부로부터 에너지 준위 차에 해당하는 빛 에너지를 인위적으로 가하여 전자를 높은 에너지 준위로 이동시켜 광자의 방출을 유도하는 것으로 Fig. 2.3(c)와 같은 메카니즘을 갖는다. 자연 방출에 의한 빛은 시간적으로 무질서 한데 비하여 유도 방출에 의한 빛은 단색(monochromatic)이며, 일정한 에너지와 가간섭성(coherent) 그리고 평행한 성질을 갖는다.

레이저가 발진되기 위해서는 이러한 유도 방출을 이용하여 에너지준위의 분포 밀도를 반전시켜야 하는데 이를 반전 분포(population inversion)라고 한다. 반전 분포를 만들기 위해 사용되는 에너지 준위에 개수에 따라 레이저는 2준위 기구, 3준위 기구, 4준위 기구로 나눌 수 있다. 그러나 2준위 기구에서는 이론적으로 반전분포가 발생되지 않고, 3준위 기구에서는 기저 준위의 원자들 중 50% 이상을 여기 시켜야 하므로 일반적으로 4준위 기구를 이용한 레이저가 많이 사용되며, 4준위 레이저의 반전 분포는 Fig. 2.4 와 같다. 반전분포 생성에 필요한 펌핑 강도를 감소시키면서 연속발진이 가능한 것으로서 에너지준위 배치를 가진 활성매질이 있다. 이를 4준위 레이저라 하며 전형적인 예로서는 Nd^{3+} 을 활성 매질로 하는 YAG결정이나 모체가 유리인 글라스 레이저 및 형광색소를 이용한 색소 레이저가 있다. 이러한 반전 분포에 의하여 발생된 빛이 공진기내에서는 최초의 활성 영역내에서 몇 개의 여기원자로부터 자

연방출에 의해 파장, 위상 및 편광이 제각기 다른 빛이 생겨 임의의 장소에서 모든 방향으로 전파된다. 또 자연 방출로 발생한 빛에 의해 연속적으로 유도방출이 일어나면서 빛은 증폭된다. 그 중에서 광축과 평행한 방향으로 진행한 빛은 한쪽 반사경에 도달하여 반사되며 이 빛은 다시 활성영역 내를 지날 때 더욱 증폭되고 반대 측 반사경에서 반사되어 활성영역 내로 되돌아온다. 이와 같이 공진기내의 빛은 2장의 거울을 몇 번이나 왕복하는데 이러한 과정을 빛의 되먹임이라 한다. 한편 반사경 간격은 빛의 파장에 비해 매우 크지만 2매의 반사경 사이를 왕복할 때 빛의 왕복시간이 광파 진동주기의 정수배가 되도록 하면 반사경 사이에서 빛은 정재파(standing wave)가 형성되어 유도방출이 급격하게 진전되며 이 상태를 레이저 발진이라고 한다. 레이저의 종류는 대단히 많으며, 이들의 분류는 레이저를 발진시키는 능동매질의 형태, 출력의 형태, 출력의 강도, 파장 등 여러 가지 방법으로 나타낼 수 있다. 그러나 일반적으로 능동매질의 형태에 따라 구분한다. 능동매질의 종류에 따라 고체 레이저, 기체 레이저, 그리고 반도체 레이저로 구분을 한다. 루비(ruby) 레이저, Nd:YAG 레이저가 대표적인 고체 레이저이다. 루비(ruby) 레이저는 1960년 T. H. Maiman에 의해 처음으로 발진에 성공한 레이저이며 능동매질인 단결정 루비봉 주위에 나선형 Xe 전구를 사용하여 광학적인 펌핑을 수행한다. 그리고 되먹임(feedback) 기구로서는 루비봉의 양면을 서로 평행하고, 평면이 되도록 연마시킨 후에 금으로 반사 코팅을 시켰다. 이 때 한 면의 광선을 부분적으로 투과시키도록 코팅하여 레이저빔을 방출시키는 역할을 수행하도록 하였다.

일반적으로 루비레이저는 실제적인 효율이 매우 낮아서 수 천줄(Joule)의 입력되는 전기에너지에 대하여 레이저빔으로 방출되는 것은 수 줄

(Joule) 정도이다. 그리고 펄스의 기간은 수 10^{-3} 초 정도이므로 그 레이저 출력 강도는 보통 수 kW~수십 kW 정도이다.

Nd:YAG 레이저는 레이저의 능동매질로서 YAG (Yttrium Aluminum Garnet : $Y_3Al_5O_{12}$)의 단결정체에 Nd금속을 약 0.5 % 내외 정도 첨가시킨 단결정을 사용한다. Nd:YAG는 연속발진과 펄스발진 등 다양한 발진 형태로 널리 사용되고 있으며, 결정품질과 안정성 및 취급상의 용이성 등 산업용 고체재료로서 매우 우수하다. 1964년에 미국의 Bell 연구소에서 Geusic등에 의해 발명된 Nd:YAG 레이저는 Nd^{3+} 을 활성 이온으로 함유하는 YAG 결정이 여기에 의해 얻어지는 파장 $1.06\mu m$ 의 강력한 근적외광을 발진이 가능하다. 즉 Nd:YAG 레이저는 고출력뿐만 아니라, 연속 발진(continuous wave) 및 펄스 발진이 가능하다. Nd:YAG 레이저의 단점은 레이저가 발진하는 동안 발생하는 열에 의하여 YAG 봉이 팽창하는 열 렌즈(thermal lenseing)효과에 의해 레이저 빔의 품질이 저하된다는 것이다. 최근에는 이러한 단점을 보완하기 위해 부피에 대한 표면적이 크고, 다면을 갖는 YAG 디스크를 이용하는 방식의 디스크(disk) 레이저가 출시되었다.

독일에서 개발된 디스크 레이저(disk laser)는 이터븀(Yb)이 도핑된 Nb:YAG의 얇은 디스크를 매질로 하며 $1,030\text{ nm}$ 파장의 빛을 방출한다. 매질이 로드 타입인 레이저에 비해 디스크 레이저는 빔 품질이 좋고 빔 퍼짐성이 양호하다. 이것은 여기용 LD 레이저빔이 조사될 때 Yb로 도핑된 결정 내의 균일한 온도 분포에 기인한다. 우수한 빔 품질을 얻기 위해서는 디스크의 두께를 얇게 하는 것이 좋다. 코팅된 디스크는 공진기의 반사경으로 사용되는데 그 크기는 지름이 8 mm , 폭이 0.2 mm 정도이며 냉각은 결정 뒷면의 냉각체를 통해 이루어진다. Fig. 2.5은 디스

크 레이저의 발진원리를 나타내고 있다. 여기용 LD 레이저빔이 장치 내부로 조사되면 포물면경과 반사경을 통해 디스크에 다중조사 되고 디스크와 출력 반사경 사이에서 공진 및 증폭되어 레이저 발진이 형성된다. 로드 타입의 매질은 열전도가 불량하여 중심부의 온도가 주변보다 고온으로 되기 때문에 이 가운데를 왕복하는 레이저 빔이 왜곡되는 열 렌즈 효과가 발생한다. 반면에 디스크레이저의 경우는 두께가 얇은 뿐만 아니라 냉각체에 의한 냉각효율이 뛰어나므로 열 렌즈 효과를 거의 무시할 수 있다.

디스크 레이저는 변환 효율이 높고 경제적으로 레이저 매질에 드는 비용이 적다는 장점이 있다. 또한 빔 품질이 우수하여 상대적으로 긴 초점 길이의 광학계를 사용할 수 있기 때문에 가공물이나 특정광학계의 이동 없이 원격 가공이 가능하며 스폿직경이 작아서 정밀 가공도 가능하다.

기체레이저는 레이저 능동매질인 기체의 특성에 따라 원자기체, 이온기체 및 분자기체 레이저로 분류된다. 그리고 이들의 펌핑에는 여러 가지 다른 여기방법이 응용되나, 대부분의 기체레이저는 전기적인 방전 방법에 의하여 여기 시킨다. 즉 방전시에 전자들은 전극들 사이의 전기장에 의하여 가속된다. 이들 가속된 전자들이 능동매질인 원자, 이온 또는 분자들과 충돌함에 따라 이들이 높은 에너지 준위로 전이하게 되며, 분포의 반전을 주게 되며, He-Ne 나 CO₂ 레이저가 대표적인 기체 레이저이다. He-Ne 레이저는 그 출력이 약하여 재료 가공에 이용되지는 못한다. 그러나 632.8 nm 의 가시광선 영역의 파장을 방출하기 때문에 계측용으로 사용되고 있다. CO₂ 레이저인 경우, 그 효율이 매우 높고 빔의 품질이 좋기 때문에 고출력 재료 가공에 매우 많이 사용되고 있다. CO₂ 레이저의 파장은 10.6 μm 이고, 현재 20 kW 급 레이저가 생산되어 자동차

뿐만 아니라 조선 산업 및 중공업에서도 후판 재료의 가공에 사용되고 있다.

반도체 레이저는 능동매질이 반도체로서 접점(junction)레이저 또는 주입(injection)레이저라고도 한다. 이 레이저는 출력이 약하여 재료가공에는 이용되지 않으나, 그 크기가 매우 적고 간편해서 광통신 또는 광전자 기구에 중요하다. 최근에 1~2 kW 급의 다이오드 레이저가 개발되어 플라스틱 가공과 같은 분야에 적용되거나, 하이브리드 방식을 갖는 레이저 가공의 보조 열원으로서 사용되고 있다.

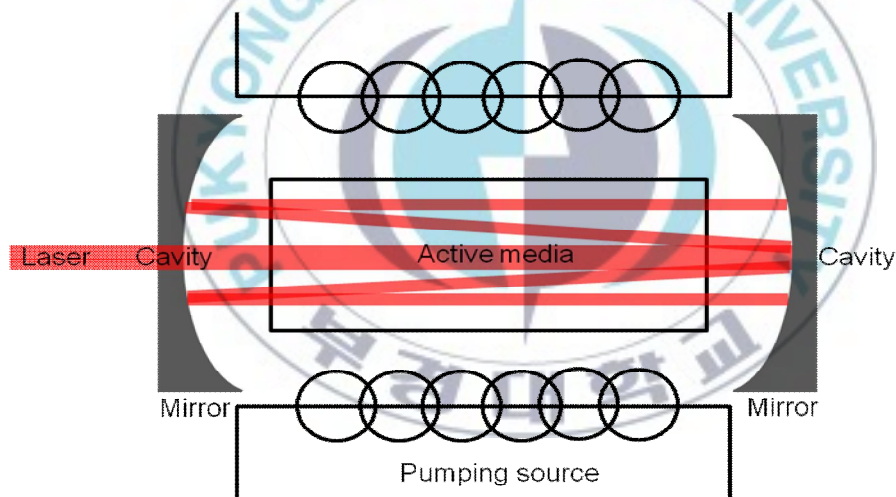


Fig. 2.1 Schematic illustration of laser oscillation

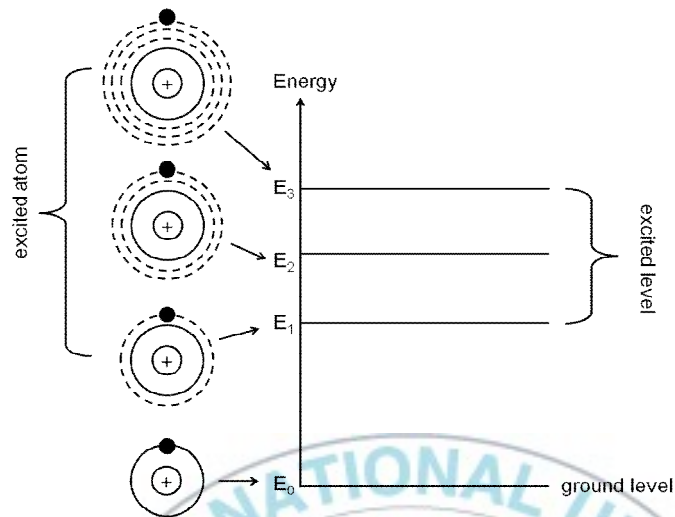


Fig. 2.2 The excited state and energy level of atoms

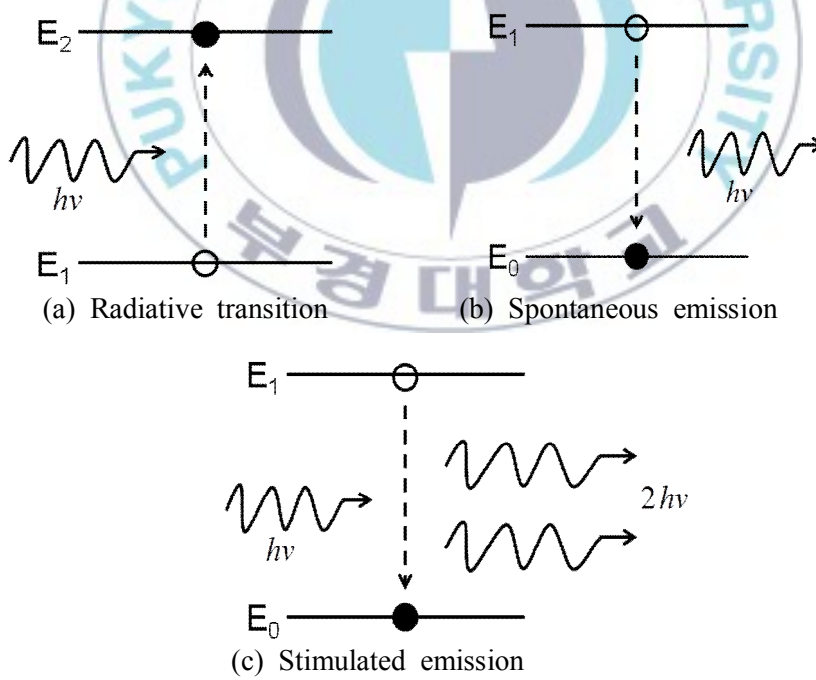


Fig. 2.3 Energy transition diagram

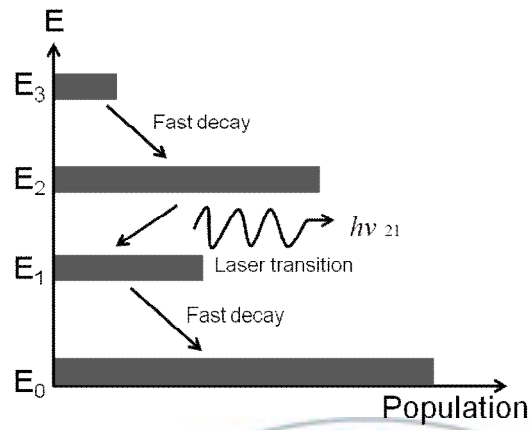


Fig. 2.4 Population inversion for 4 level system of laser transition

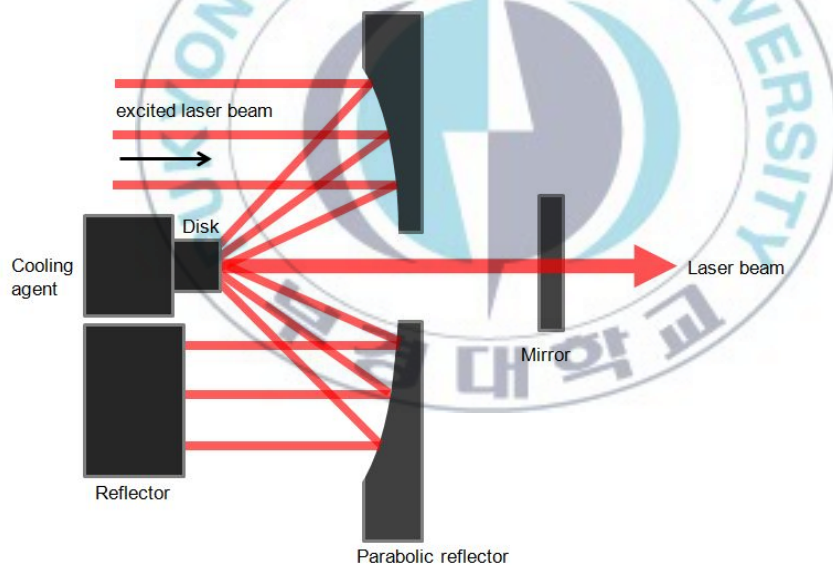


Fig. 2.5 The principle of laser disk

2.2 레이저 가공 원리⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾

레이저 용접은 높은 에너지 밀도의 점 열원을 이용하는 이른바 키홀 용접법이기 때문에 용접부 형성기구가 아크 용접 등 기존의 용융 용접법과는 다르다. 아크 용접의 경우 아크열에 의한 모재의 용융과 열전도가 용접 에너지 전달의 기본이므로 용접부의 폭이 그 깊이에 비하여 넓다. 따라서 두꺼운 재료를 용접하기 위하여 용접 그루브를 가공하고 용접봉 등의 용가재를 사용하여 다층 용접을 실시하는 것이 일반적이다. 여기에 대하여 레이저 용접법은 용접에 필요한 에너지를 전달할 때 재료 표면을 기점으로 점진적인 전달이 아니라 두께 방향으로 직접 열을 투입(키홀 용접의 원리)하는 용접법이다. Fig. 2.6은 철강 재료에 대한 키홀 용접의 원리를 보인 것이며, 용입 깊이는 다른 조건이 일정할 때 사용되는 레이저의 출력에 직접 관계된다. 고출력 레이저를 이용하면 두꺼운 철강 재료라고 하더라도 깊은 용입을 고속으로 실시할 수 있다. 레이저 광에서 변환되는 높은 밀도의 에너지로 키홀 용융 현상을 이용하는 용접법은 앞에서 설명을 하였다. 레이저 집속광의 에너지 밀도가 10^6 W/cm^2 이상의 경우에는 수 μs 의 짧은 시간에 재료가 기화 온도 이상으로 상승하지만, 10^5 W/cm^2 정도의 에너지 밀도에서는 수 ms에서 용융이 일어나는 것으로 알려져 있다. 한편 집속된 레이저 빔이 용접할 소재 표면에 조사되면 용융이 일어나기 직전의 극히 짧은 시간 동안 상당량의 레이저 에너지가 모재 표면에서 반사된다. 이와 같이 반사 손실이 많은 것은 대부분의 금속재료가 가공용 레이저 파장에 대하여 반사율이 높기 때문이다. Fig. 2.6에 보인 것과 같이 모재를 급속하게 가열하여 고온의 금속 증기와 함께 전자 및 이온의 생성을 야기한다.

일단 모재 금속이 용융을 시작하면(Fig. 2.6(a)) 레이저 집속광의 흡수율은 급속하게 상승하여 비등점 이상으로 가열하기 때문에 모재의 용융과 기화를 가속하게 되고(Fig. 2.6(b)) 그 결과(Fig. 2.6(3)) 키홀(keyhole)을 만든다. 이 과정에서 형성된 금속 증기는 일부가 해리되어 이른바 플라즈마 상태로 되며, 용접 초기에는 입사되는 레이저 에너지의 흡수를 돕지만 점차 에너지 흡수효율에 부정적인 역할을 하게 된다.

레이저 용접법의 장점으로서는 좁고 깊은 용접부를 얻을 수 있으므로 두꺼운 판재 용접에서 필요한 그루브 가공과 용접봉 사용을 배제할 수 있기 때문에 용접부 특성과 생산성에서 매우 유리하다. 그리고 매우 적은 입열 에너지로 용접 할 수 있다. 입열이 적은 용접은 결과적으로 소재의 열 변형을 최소화 할 수 있어서 용접 후처리 공정을 생략하거나 축소 할 수 있다. 또 용접 열에 의하여 영향을 받기 쉬운 복합 부품에 근접하여 용접 할 수 있다. 그리고 고속 용접과 용접공정의 융통성을 부여 할 수 있다. 즉 용접 속도를 수 m/min 까지 높일 수 있고 몇 개의 작업대를 하나의 레이저 발진기로 용접을 실시하는 것이 가능하여 용접 생산성을 크게 높일 수도 있다. 또한 접합되어야 할 부품의 조건에 따라서 한 방향 용접으로 접합이 가능하다. 즉 별도의 그루브를 가공한 다음 양면에서 용접할 필요가 없다는 장점이 있다.

레이저 용접의 단점은 집속광의 직경이 1 mm 이하이므로 용접면의 정밀가공이 필요하며 레이저 집속광과 용접선의 정렬도 중요하다. 그리고 접합부 정렬이 적절하지 않으면 레이저 빔 에너지의 많은 부분이 접합면 사이의 틈을 통해 손실될 수도 있다. 또 용융 폭이 좁기 때문에 용접선과 레이저 빔을 잘 일치시키지 않으면, 표면에서는 용접이 잘 이루어진 것 같이 보이지만 이면 비드가 용접선을 벗어나 원하는 용접부 형성할

가능성이 낮아진다. 따라서 정밀한 용접부 가공과 용접장치(용접 지그)를 구비하는 것이 용접품질과 생산성을 높이는데 중요한 요소이다. 그래서 초기 투자비용이 매우 크다는 것이 레이저 가공의 큰 단점이다. 그리고 또한 기존의 가공 방법으로 어려웠거나 힘들었던 부분에 레이저 가공이 적용되어 새로운 가공 방법으로 개발되었다. 미래에도 레이저를 이용한 가공과 공정은 더욱 다양한 분야에 적용될 것이다.

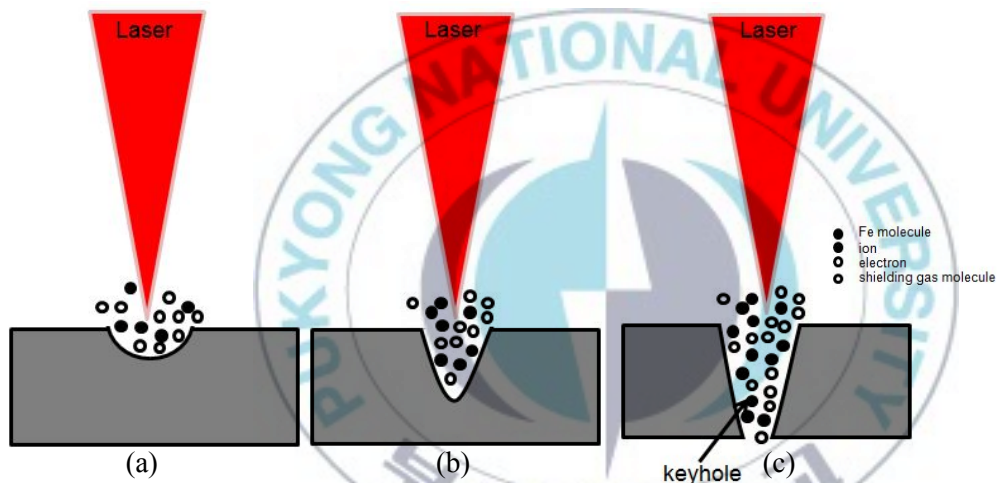


Fig. 2.6 The principle of keyhole welding

2.3 실험 계획법⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾

실험계획법(design of experiments : DOE)이란 ‘실험에 대한 계획방법을 의미하는 것으로 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 행하고, 데이터를 어떻게 취하며, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것’ 이

다. 그리고 실험을 실시한 후에 데이터의 형태로 얻어지는 반응치(특성치)에 대해서 이에 영향을 미치고 있는 원인이 어떻게 관계되어 있는가를 이론적으로 또는 경험적으로 명백히 알아내기는 매우 힘들다. 그 이유는 일반적으로 특성치에 영향을 미치는 원인이 무수히 많으며 원료, 실험장치, 숙련도 등의 차이에서 오는 산포가 있고, 환경조건의 변동, 표본오차(sampling error) 등에 의해서도 영향을 받기 때문이다.

실험계획법은 영국의 통계학자 R. A. Fisher가 로담스테드 실험 농장(Rothamsted Experimental Station)에서 작물 수확에 영향을 주는 주요인자를 연구하기 위한 방법으로 구체화 하였다. 초기에는 주로 농업 실험에 적용되었으나 지금은 기계, 생물, 전자, 화학, 제약, 식품 등 다양한 산업에서 연구개발 및 품질개선 도구로 활용되고 있다.

실험계획법의 목적으로는 실험을 통하여 과학적으로 영향을 미치는 것의 원인을 알아보는 것이며, 그 원인의 첫 번째는 어떤 요인이 반응에 유의한 영향을 주고 있는가를 파악하고 그 영향이 양적으로 어느 정도 큰가를 알아내는 검정과 추정의 문제, 두 번째는 작은 영향밖에 미치지 못하는 요인들은 전체적으로 어느 정도의 영향을 주고 있으며, 측정오차는 어느 정도인가를 알아내기 위한 오차항 추정의 문제, 그리고 마지막으로 유의한 영향을 미치는 원인들이 어떠한 조건을 가질 때 가장 바람직한 반응을 얻을 수 있는가를 알아내기 위한 최적반응조건의 결정문제 등이다. 실험에 있어서 데이터에 산포를 준다고 생각되는 무수히 존재하는 원인들 중에 실험에 직접 취급되는 원인을 인자(factor)라고 부른다. 그리고 실험을 하기 위한 인자의 조건을 인자의 수준(level)이라고 한다. 이러한 인자(factor)와 수준(level)으로 실험계획법을 짜고 해결하고자 하는 문제에 대하여 인자를 선정하며 실험방법을 택하여 실험순서

를 정하고, 실험 후 얻어지는 데이터에 대한 최적분석방법을 선택하여야 한다. 실험계획법에서 많이 사용되는 데이터의 분석방법으로 분산분석 (analysis of variance), 상관분석(correlation analysis), 회귀분석 (regression analysis) 등이 있다.

2.3.1 분산분석

실험계획법에서 가장 많이 사용되는 분석방법은 분산분석이다. 분산분석은 실험에 의하여 얻어지는 데이터 분석의 가장 기본이다. 분산분석 (analysis of variance)이란 집단의 평균치의 차이를 분석하고자 할 때 사용하는 분석 방법이며, 집단의 산포를 제곱합(sum of squares : 이를 변동 또는 자승합)으로 나타내고 이 제곱합을 실험과 관련된 요인마다의 제곱합으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 요인이 무엇인가를 찾아내는 분석방법이다. 각 요인의 제곱합을 그 요인의 자유도로 나누면 그 요인의 제곱평균이 되며 오차분산에 비하여 얼마나 큰가를 검토하게 된다. 따라서 분산분석이라 특성치의 산포를 요인별로 분해하여 어느 요인이 큰 산포를 나타내고 있는가를 규명하는 방법이다.

분산 분석을 하는 방법은 우선 총변동의 분할한다.

a개의 모평균에 차이가 있는가를 검정하는 것은 a개의 수준효과에 차이가 있는가를 검정하는 것과 같으므로 식(2.2)에 주어진 가설은 식(2.3)에 주어진 가설로 표시 할 수 있다.

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \cdots = \mu_a \quad (2.2)$$

H_1 : 모든 μ_i 가 같지는 않다

$$H_0 : \alpha_1 = \alpha_2 = \cdots = \alpha_a = 0 \quad (2.3)$$

H_1 : 적어도 한 α_i 는 0이 아니다.

식(2.3)는 효과(effect)를 이용한 가설로서, 주어진 가설은 자료의 총변동을 급간(처리 간 변동, 수준간 변동)과 급내변동(오차변동, 잔차변동)으로 분해하여 요인이 특성치에 유의한 영향을 미치는가를 검정하는 방법인 분산분석을 통하여 검정할 수 있다.

변동을 저의하려면 어느 점으로부터의 산포인가를 나타내는 데이터의 중심과 각 데이터가 중심으로부터 얼마나 떨어져 있는가를 나타내는 거리의 개념이 필요하다. 따라서 특성값 x_{ij} 의 총평균 $\bar{\bar{x}}$ 로부터의 거리인 총편차는 인자 A의 동일한 수준에서 반복실험 했을 때에 생기는 잔차와 수준효과 α_i 에 기인하는 편차로 식(2.4)과 같이 분해 할 수 있다.

$$x_{ij} - \bar{\bar{x}} = (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}}) + (x_{ij} - \bar{x}_i) \quad (2.4)$$

총편차 = (α_i 에 기인하는 편차) + (잔차)

식(2.4)의 양변을 동시에 제곱하여 ar개의 데이터의 제곱의 합을 구하면 식(2.5) 이 성립된다.

$$\sum_i \sum_j (x_{ij} - \bar{\bar{x}})^2 = \sum_i r(x_i - \bar{\bar{x}})^2 + \sum_i \sum_j (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \quad (2.5)$$

여기서 좌변을 총제곱합 또는 총변동이라 부르고 *SST* 로 표현한다. 식 (2.5)의 우변의 첫 번째 항은 각 수준효과의 차이에 기인하는 편차들의 제곱합이므로 처리 제곱합 또는 급간 변동이라 부르고 *SSR*로 나타내어 준다. 우변의 두 번째 항은 각 처리수준 내에서의 편차들의 제곱합이므로 잔차제곱합 또는 급내 변동이라 부르고 *SSE*로 표현한다. 따라서

$$SST = SSR + SSE \quad (2.6)$$

의 관계가 성립되고 식(2.6)를 그림으로 표현하면 Fig. 2.7과 같다. 총변동이 인자 A에 의한 변동과 잔차 변동으로 분할되었다고 한다.

$$CT = \frac{T^2}{ar} \quad (2.7)$$

$$SST = \sum_i \sum_j x_{ij}^2 - CT$$

$$SSR = \sum_i \frac{T_i^2}{r} - CT$$

$$SSE = SST - SSR$$

총변동 분할이 끝났으면 자유도의 분할이 필요하다. 각 제곱합의 자유도는 제곱을 한 편차의 개수에서 선형제약조건의 수를 뺀 것으로 정의하며 Table 2.1에 의하여 구할 수 있다.

Table 2.1 The models of the process experimental

sum of squares	deviation	linear constraint	degree of freedom
Total sum of squares	ar	$\sum_i \sum_j (x_{ij} - \bar{\bar{x}}) = 0$	$ar - 1$
Treatments sum of squares	$a - 1$	$\sum_{i=1}^a (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}}) = 0$	$a - 1$
Error sum of squares	$ar - a$	$\sum_{j=1}^r (\bar{x}_{ij} - \bar{x}_i) = 0$ $i = 1, 2, \dots, a$	$ar - a$

Table 2.1에서 보는 바와 같이 총 제곱합의 자유도 ϕ_T 는 총변동이 원인 별로 분할되는 것과 마찬가지로 처리제곱합의 자유도 ϕ_R 와 잔차 제곱합의 자유도 ϕ_E 로 분할됨을 알 수 있다. 즉 $\phi_T = \phi_R + \phi_E$ 의 결과를 갖게 된다.

이와 같이 자유도 까지 구했으면 평균제곱(mean square : MS)의 기대값과 F검정을 하여야 한다. 평균제곱은 자유도 1개당 제곱합이므로 인자 R와 잔차에 대한 평균제곱은 SSR 와 SSE 를 각각의 자유도로 나누어 식 (2.8)(2.9)과 같이 구해진다.

$$MS_R = \frac{SSR}{a - 1} \quad (2.8)$$

$$MS_E = \frac{SSE}{a(r-1)} \quad (2.9)$$

인자 R 의 평균제곱 MS_R 와 잔차의 평균제곱 MS_E 의 기대 값은 식 (2.10)(2.11) 와 같다.

$$E(MS_R) = \sigma_E^2 + \sum_{i=1}^a \frac{a_i^2}{(a-1)} \quad (2.10)$$

$$E(MS_E) = \sigma_E^2 \quad (2.11)$$

식(2.11)로부터 잔차의 평균제곱 MSE 는 σ_E^2 의 불편추정량임을 알 수 있다. 인자 R 의 평균제곱 MSA 는 귀무가설 $H_0 : \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_a = 0$ 하에서는 식(2.10)의 우변 두 번째 항이 0이 되어 σ_E^2 의 불편추정량이 되지만 귀무가설이 성립하지 않으면 MSR 의 기대 값이 σ_E^2 보다 크게 된다는 것을 알 수 있다. 따라서 $H_0 : \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_a = 0$ 의 가설에 대한 검정통계량은 두 평균제곱의 비인

$$F_0 = \frac{MSR}{MSE} \quad (2.12)$$

가 되고, F_0 의 값이 커지면 귀무가설을 기각하게 된다.

또한 귀무가설이 사실일 때에 검정통계량 F_0 는 자유도 (Φ_R, Φ_E) 인 F분

포를 한다고 알려져 있다. 따라서 대립가설이 사실일 때에 MSR 가 MSE 보다 상대적으로 클 것이 기대되므로 기각역은 식(2.13) 과 같이 주어진다.

$$F_0 > F(\Phi_R, \Phi_E; \alpha) \quad (2.13)$$

총 제곱합과 자유도의 분할, 평균제곱, 인자 효과의 차이가 없다는 귀무가설에 대한 검정통계량과 기각역을 표로 정리하는 것이 분산분석표이며, Table 2.2와 같은 형태를 갖는다.

Table 2.2의 분산분석표에서 F_0 의 값이 $F(a-1, a(r-1); \alpha)$ 보다 크게 되어 귀무가설을 기각할 때, 인자가 특성값에 유의한 영향을 미친다고 말할 수 있으며 인자의 수준(처리)들 간에 차이가 있다고 통계적으로 결론을 내릴 수 있게 된다.

Table 2.2 ANOVA (Analysis of variance)

factor	sum of squares	degree of freedom	mean square	F_0	$F(\alpha)$
R	SSR	$ar-1$	MSR	$\frac{MS_R}{MS_E}$	$F(a-1, a(r-1); \alpha)$
E	SSE	$a-1$	MSE		
T	SST	$ar-a$			

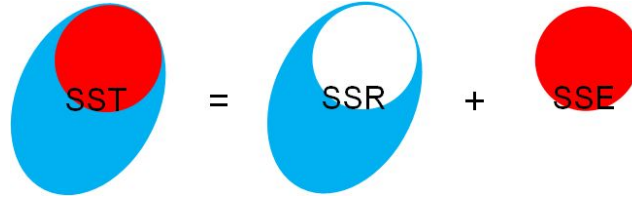


Fig. 2.7 The decomposition of total sum of squares

2.3.2 반복이 있는 삼원배치법

어떤 선택된 특성치에 대하여 취급하고 싶은 인자가 3개 이상 있을 경우, 그들의 모든 인자의 수준조합에서 실험하는 실험계획법을 다원배치법이라 한다. 취급되는 인자가 3개인 경우를 삼원배치법이라고 하고 반복이 있는 경우를 반복이 있는 삼원 배치법이라 부른다.

반복이 있는 삼원배치의 실험(A: l 수준, B: m 수준, C: n 수준, 반복: r 회)을 행할 수 있다. 실험의 랜덤화는 실험전체 $lmnr$ 회를 완전 랜덤화하도록 하고, 얻어지는 데이터 x_{ijkp} 의 구조식은 다음과 같다.

$$x_{ijkp} = \mu + a_i + b_j + c_k + (ab)_{ij} + (ac)_{ik} + (bc)_{jk} + (abc)_{ijk} + e_{ijkp} \quad (2.14)$$

$i = 1, 2, \dots, l$
 $j = 1, 2, \dots, m$
 $k = 1, 2, \dots, n$
 $p = 1, 2, \dots, r$
 $e_{ijkp} \sim N(0, \sigma_E^2)$ 이고 서로 독립

이 구조식이 3인자 교호작용의 검출이 반복이 있는 삼원배치법에서는 가능하다는 점이다.

분산 분석표로 표시하면 Table 2.3와 같다.

Table 2.3 ANOVA of three-way factorial design

factor	sun of square	degree of freedom	mean square	F_0
A	S_A	$l-1$	V_A	V_A/V_E
B	S_B	$m-1$	V_B	V_B/V_E
C	S_C	$n-1$	V_C	V_C/V_E
A×B	$S_{A \times B}$	$(l-1)(m-1)$	$V_{A \times B}$	$V_{A \times B}/V_E$
A×C	$S_{A \times C}$	$(l-1)(n-1)$	$V_{A \times C}$	$V_{A \times C}/V_E$
B×C	$S_{B \times C}$	$(m-1)(n-1)$	$V_{B \times C}$	$V_{B \times C}/V_E$
A×B×C	$S_{A \times B \times C}$	$(l-1)(m-1)(n-1)$	$V_{A \times B \times C}$	$V_{A \times B \times C}/V_E$
E	S_E	$lmn(r-1)$	V_E	
T	S_T	$lmnr-1$		

2.3.3 회귀분석⁽²⁰⁾

회귀분석(Regression analysis)이란 변수들 간의 관련성을 규명하기 위하여 어떤 수학적 모형을 가정하고 모형을 측정된 변수들의 데이터로부터 추정하는 통계적 분석방법을 말하며, 일반적으로 이 추정된 모형을 사용하여 필요한 예측을 하거나 관심 있는 통계적 추론(statistical inference)을 하게 된다.

회귀(regression)란 말은 영국의 생물학자이며 통계학자인 F. Galton(1822~1911)이 C. Darwin(1809~1882)의 진화론을 반증하기 위하여 처음으로 사용하였다.

다윈의 진화론에 의하면 키가 큰 부모들의 자식들은 더욱 키가 커질 것이고, 키가 작은 부모들의 자식들은 키가 더욱 작아질 것이므로 몇 세대가 지나면 키의 분산은 점점 더 커질 것이라고 가설을 세울 수가 있다.

그러나 Galton은 부자간의 신장관계를 연구한 결과 키가 큰 아버지를

가진 아들의 키는 대체로 평균 신장보다는 크나 그들의 아버지의 키보다는 작고, 키가 작은 아버지를 가진 아들은 대체로 평균 신장보다는 작지만 그들의 아버지 키보다는 커서 결국은 아들들의 키는 인류전체의 평균 신장으로 되돌아가려는(회귀)경향이 있다는 것을 발견하였다. 그가 사용한 회귀분석의 의미는 더 이상 사용되지 않고 있으나 이 단어는 아직까지 변수간의 관련성을 규명하려는 통계적 분석방법으로 사용되고 있다. 따라서 회귀분석은 변수들 간의 관계를 함수로 표현하여 한 변수의 값에 대하여 다른 변수의 값을 추정, 예측하는데 목적을 두고 있다. 회귀분석에서 분석의 대상이 되는 변수를 반응변수(response variable) 또는 종속변수(dependent variable)라 하고, 이에 영향을 미치는 변수를 설명변수(explanatory variable) 또는 독립변수(independent variable)라 한다. 일반적으로 회귀분석에서 이용되는 종속변수와 독립변수는 모두 연속형 변수이다.

회귀분석의 종류는 두 가지 기준에 의해 분류가 되며, 첫 번째 기준은 종속변수를 설명하기 위해 회귀모형에 포함되어 있는 독립변수의 개수에 의한 분류로서, 한 개의 독립변수만 포함된 모형의 분석절차를 단순(simple) 회귀분석이라 하고 둘 이상의 독립변수가 포함된 모형의 분석절차를 다중(multiple) 회귀분석이라 한다.

두 번째 선형 회귀분석과 비선형 회귀 분석으로 분류하는 방법이다. 이는 회귀함수식의 종속변수와 독립변수들의 관계를 나타내주는 모수(회귀계수)들이 어떤 함수 형태(선형 또는 비선형)로 모형에 포함되었는지에 의해 결정된다.

종속변수의 변화를 설명하기 위하여 k 개($k \geq 2$)의 독립변수가 사용되어 각 독립변수의 어떤 흥미영역(일반적으로 관심이 있는 좁은 범위임)에서

종속변수와 독립변수의 관계가 선형으로 가정되는 회귀모형을 중선형 회귀 모형 (multiple linear regression model)이라고 부르고, 간단히 중 회귀 모형이라고 한다.

회귀분석에서 많이 사용하는 독립변수가 2개일 경우의 중 회귀 모형에 대해서 알아본다. 종속변수 y 와 두 개의 독립변수 x_1 과 x_2 사이에 식(2.13)과 같은 관계식이 성립한다고 하자.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \epsilon \quad (2.13)$$

여기서 β_0 , β_1 과 β_2 는 미지의 모수(unknown parameter)이며, ϵ 은 y 를 측정할 때에 발생하는 오차로 $N(0, \sigma^2)$ 의 분포를 따르고, 오차항간에는 상호독립이라고 가정한다.

n 개의 관찰점(x_{1i} , x_{2i} , y_i), $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 에 대하여 식(2.13)은 식(2.14)와 같이 표현된다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \epsilon_i \quad (2.14)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

미지의 모수 β_0 , β_1 , β_2 의 최소제곱법(method of least squares)에 의한 추정방법을 강구하였다. 오차제곱의 합을 S 라고 하면 식(2.15)가 된다.

$$S = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_{1i} - \beta_2 x_{2i})^2 \quad (2.15)$$

이를 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 에 대하여 각각 편미분하여 0으로 놓고 정규방정식(normal equations)을 만들면 다음과 같다. 이 식을 만족시키는 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 의 추정값을 각각 $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$ 로 놓은 것이다.

$$n\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \sum x_{1i} + \hat{\beta}_2 \sum x_{2i} = \sum y_i$$

$$\hat{\beta}_0 \sum x_{1i} + \hat{\beta}_1 \sum x_{1i}^2 + \hat{\beta}_2 \sum x_{1i}x_{2i} = \sum x_{1i}y_i \quad (2.16)$$

$$\hat{\beta}_0 \sum x_{2i} + \hat{\beta}_1 \sum x_{1i}x_{2i} + \hat{\beta}_2 \sum x_{2i}^2 = \sum x_{2i}y_i$$

위의 연립방정식은 세 개의 미지수에 세 개의 방정식이 있으므로 $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$ 의 해(solution)를 얻을 수 있다. 만약 독립변수의 수가 네 개라면 네 개의 연립방정식을 다루어야 하며, 복잡한 모양을 나타내기 때문에 중 회귀분석에서는 거의 모든 경우에 행렬(matrix)을 사용하여 표현 및 계산방법을 간소화하고 있다.

식(2.15)의 모형에서 i 번째의 관찰점을 벡터로 표시하면

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \epsilon_i = (1, x_{1i}, x_{2i}) \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} + \epsilon_i \quad (2.17)$$

되며, n 개의 관찰점을 동시에 나타내기 위한 행렬표현식은 다음과 같다.

$$y_i = X\beta + \epsilon \quad (2.18)$$

여기에서 각각

$$y_i = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} \\ 1 & x_{12} & x_{22} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} \end{bmatrix}, \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}, \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

을 의미한다.

최소제곱법에 의해 최소화하려는 오차제곱의 합을 행렬을 사용하여 표현하면

$$S = \epsilon' \epsilon = (y - X\beta)'(y - X\beta) = y'y - 2\beta' X'y + \beta' X'X\beta \quad (2.20)$$

가 되며, 이를 β 로 미분하여 0으로 놓으면 다음의 결과를 얻는다.

$\hat{\beta}$ 는 β 의 최소 제곱 추정값의 벡터로 $\hat{\beta} = (\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2)$ 을 의미한다.

$$X'X\hat{\beta} = X'y \quad (2.21)$$

이 식을 정규방정식이라 부르며 식(2.17)와 동일한 것이다. 즉, 식 (2.17)의 행렬표현이 식(2.19)이 된다. 여기서 $X'X$ 와 $X'y$ 는

$$X'X = \begin{bmatrix} n & \sum x_{1i} & \sum x_{2i} \\ \sum x_{1i} & \sum x_{1i}^2 & \sum x_{1i}x_{2i} \\ \sum x_{2i} & \sum x_{1i}x_{2i} & \sum x_{2i}^2 \end{bmatrix}, \quad X'y = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_{1i}y_i \\ \sum x_{2i}y_i \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

와 같다. 식(2.19)의 양변에 $(X'X)^{-1}$ 을 곱하면

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'y \quad (2.23)$$

이 되는데, 여기서 얻은

$$\hat{\beta} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum x_{1i} & \sum x_{2i} \\ \sum x_{1i} & \sum x_{1i}^2 & \sum x_{1i}x_{2i} \\ \sum x_{2i} & \sum x_{1i}x_{2i} & \sum x_{2i}^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_{1i}y_i \\ \sum x_{2i}y_i \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

이 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 의 최소 제곱 추정값들이다.

그리고 추정된 회귀방정식의 정도(precision)를 측정하여야 한다. 그 측정하는 측도(measure)로서 분산분석표에 의한 F-검정, 그리고 결정계수 R^2 , 잔차평균제곱 MSE , $\hat{\beta}_i$ 와 $\hat{y}$ 을 이용한다.

먼저 중회귀모형의 분산분석(analysis of variance)을 다루어 본다. 변동의 분해는 단순회귀에서 변동의 분해와 동일하나 사용되는 기호에 차이가 있다. 총 변동은 S_R 대신에 SSR 로, 그리고 나머지 잔차 변동은 $S_{y \cdot x}$ 대신에 SSE 로 나타낸다. 그 계산방법은 다음과 같다.

$$SST = \sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum y_i^2 - n(\bar{y})^2 = y'y - n(\bar{y})^2 \quad (2.25)$$

그리고 $\sum \hat{y}_i = \sum y_i = n\bar{y}$ 이므로

$$SSR = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 = \sum (\hat{y}_i)^2 - n(\bar{y})^2 = \hat{y}'\hat{y} - n(\bar{y})^2 \quad (2.26)$$

이 되는데 여기서

$$\hat{y} = \begin{bmatrix} \hat{y}_1 \\ \hat{y}_2 \\ \vdots \\ \hat{y}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{11} + \dots + \hat{\beta}_k x_{k1} \\ \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{12} + \dots + \hat{\beta}_k x_{k2} \\ \vdots \\ \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{1n} + \dots + \hat{\beta}_k x_{kn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{k1} \\ 1 & x_{12} & \dots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & \dots & x_{kn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} = X\hat{\beta} \quad (2.27)$$

이므로

$$SSR = \hat{y}'\hat{y} - n(\bar{y})^2 = \hat{\beta}'X'X\hat{\beta} - n(\bar{y})^2 = \hat{\beta}'X'y - n(\bar{y})^2 \quad (2.28)$$

이 된다. 마지막으로 잔차변동은

$$SSE = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = SST - SSR = y'y - \hat{\beta}'X'y \quad (2.29)$$

로 쉽게 구해진다. 이를 종합하여 분산분석표로 작성하여 Table 2.3과 같다.

앞의 표에서 MSR 은 SST 을 k 로 나눈 값으로 회귀평균제곱(regression mean square)이고, MSE 는 SSE 를 $n-k-1$ 로 나눈 값이므로 잔차 평균

제곱(residual mean square)이다. 만약 $F_0 = \frac{MS_R}{MS_E}$ 의 값이 $F(k, n-k-1; \alpha)$ 보다 크면 유의수준 α 에서 귀무가설 $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$ (또는, 모든 회귀계수는 0이다)이 기각되며, 추정된 회귀방정식이 유의하다고 하겠다.

$F_0 = \frac{MS_R}{MS_E}$ 의 값이 크면 클수록 회귀방정식의 정도가 좋다고 말할 수 있다.

다음으로 회귀방정식의 정도를 측정하는 방법으로 많이 사용되는 것은 결정계수(coefficient of determination)로 R^2 으로 나타내고

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{\text{회귀식에 의해 설명되는 변동}}{\text{전체 변동}} \quad (2.30)$$

에 의하여 구해지는 것은 단순회귀의 경우와 동일하다. $0 \leq R^2 \leq 1$ 의 범위에 있고 R^2 의 값이 1에 가까울수록 높은 정도를 갖는다.

세 번째로 잔차평균제곱 MSE 를 사용하기도 한다. MSE 는 σ^2 의 불편추정 값이며 데이터들이 회귀식 주위에 어떻게 산포되어 있는가를 말해주는 척도이다. MSE 가 작을수록 회귀방정식의 정도가 좋고, 데이터의 산포가 작아진다.

Table 2.4 ANOVA of regression analysis

factor	Sum of squares	degree of freedom	mean squares	F_0	$F(\alpha)$
regression	$SSR = \hat{\beta}' X' y - n(\bar{y})^2$	k	MSR	$\frac{MS_R}{MS_E}$	$F(a-1, a(r-1); \alpha)$
error	$SSE = y'y - \hat{\beta}' X' y$	$n-k-1$	MSE		
total	$SST = y'y - n(\bar{y})^2$	$n-1$			

2.4 생산 자동화를 위한 최적화 이론^(21,22,23)

생산 공정을 계획하는데 있어서 고려되어야 할 사항은 공정의 합리화 및 표준화, 생산성, 타 공정간의 연계성 등이다. 그러므로 공정 계획에 있어서 자동화는 필수적인 요소 중의 하나가 된다. 자동화를 하기 위해서는 생산 공정에 맞는 공정변수를 설계하여야 한다. 적정의 공정변수를 설계하거나 선택하기 위하여 그에 맞는 제품설계와 공정 모델링 그리고 최적화하는 과정이 필요하다.

최적화란 주어진 환경 제한 하에서 목적(objective)에 가장 적합한 대안을 찾는 작업을 의미한다. 최적화를 하기 위해서는 목적에 대하여 수학적 표현으로 변환하는 것으로, 설계자가 결정해야 할 모든 변수의 집합인 설계변수(design variables), 최적설계의 기준이 되는 가격함수(cost function) 또는 목적함수(objective function)와 설계가 꼭 만족하여야 하는 제한조건(constraint)으로 구성된다. 정식화의 과정은 일반적으로 세 단계를 거친다.

첫 번째로는 설계변수의 정의이다. 설계변수는 제품의 두께, 길이, 재료 물성치, 형상 등 설계자가 결정해야 할 모든 변수를 말한다. 설계변수를

정의할 때는 가능하면 서로 독립적으로 정의하여야 한다. 그리고 설계변수의 개수는 가능한 적게 사용하는 것이 효과적이다.

두 번째로는 목적함수의 설정이다. 여러 가지 설계 중 최적의 설계를 결정하기 위한 기준이 되는 함수가 목적함수이다. 목적함수로는 제품의 가격, 이익, 중량, 에너지 소모량, 승차감, 최대응력, 고유진동수 등이 사용된다. 일반적으로 설계는 같은 성능이라면 가격이 저렴한 설계가 좋은 설계이므로 목적함수는 많은 경우 가격함수이다. 또한, 어떤 경우에는 2개 이상의 목적함수가 있을 수 있는데 이런 경우를 다중 목적함수라 한다.

마지막으로는 제한조건의 도출이다. 설계가 꼭 만족해야 하는 모든 조건을 제한 조건이라고 한다. 제한 조건은 일반적으로 부등식으로 표현되며 이런 제한조건을 부등식제한조건(inequality constraints)이라고 한다.

위의 설계과정을 거친 후 적합도 함수(fitness value)를 얻을 수 있다. 적합도는 특정 환경에 가장 적합한 정도를 평가하는 것을 말한다. 여기서 평가는 해당 환경 즉, 목적에 맞는 계산법으로 계산되어 지는데, 이런 계산에 사용되어지는 것이 목적함수이다.

3. 알루미늄 원격 레이저 용접 실험 및 결과

3.1 서언

알루미늄은 자동차 무게의 20~30 % 를 차지하는 차체부분을 강판에서 알루미늄 합금으로 대체하면 가장 큰 경량화 효과를 기대할 수 있다. 이러한 알루미늄의 특징으로 인하여 항공 우주 산업, 조선 산업등 다양한 분야에서 적용될 것으로 예상된다.⁽²⁴⁾ 알루미늄 합금의 용접을 위해서는 아크 용접이 일반적으로 적용되고 있으나 고출력 레이저 용접이 철강 재료에 성공적으로 적용된 이래, 알루미늄 합금의 경우에도 용접이 실용화되고 있다.⁽²⁵⁾ 아크 용접의 경우 장치가격이 저렴하나, 용접부의 기계적 성질이 열화 되는 영역이 넓고, 변형량이 큰 단점이 있다. 이에 반해 레이저 용접은 장치비가 고가이지만, 빠른 용접속도와 적은 변형량, 급냉에 의한 용접부 조직 미세화, 폭이 좁은 열 영향부등 유리한 특성이 있다. 그러므로 알루미늄의 가공에 있어서 레이저를 이용한 가공 방법이 주목받고 있다. 이러한 이유로 자동차 현장에서는 저항 점용접의 차체 조립 공정을 레이저 용접으로 대체하여 생산성 향상을 달성하고 있으므로 로봇과 접목한 3차원 대량 용접 생산기술 개발에 많은 연구를 하고 있으며⁽⁹⁾, 이러한 생산성을 높이기 위한 방법 및 조립 공정 축소에 따른 설치면적 감소, 차체구조 변경 설계 유연성 확보에 따른 원가 절감의 극대화할 수 있는 원격 레이저 용접시스템 연구도 활발히 이루어지고 있다.

알루미늄 합금 레이저 용접의 주요 용접 변수로서는 레이저 출력(laser power), 용접 속도(weld speed), 초점 위치(focal position), 보호가스(shielding gas) 등 많은 공정 변수가 있다. 그리고 거울을 이용하여 원하는 지점에 동시다발적으로 용접하는 방식을 가진 원격 스캐너 용접 시

시스템에서의 빛의 조사각도(angle) 또한 레이저 용접에서 용접부 특성의 변화를 줄 것이라 예상되며, 주요 용접 변수를 분석함으로써 알루미늄 5000계열 판재의 적용 가능성을 판단 할 수 있다.

본 장에서는 알루미늄 합금인 5J32 판재에 대하여 원격 스캐너를 이용한 레이저 용접에서 용접 공정변수인 레이저 출력, 용접속도, 조사각도 및 판재사이의 갭에 따른 용접부의 외관, 용접비드 형상 및 인장강도의 특성 변화를 관찰하였다. 또한 분산분석을 통하여 각 용접 제어 인자가 용접 특성에 미치는 영향을 정량적으로 살펴보았다.

3.2 실험장치 및 조건

3.2.1 용접 시스템 및 재료

레이저 원격용접 시스템의 원리는 Fig. 3.1에서 보는 바와 같이 빔의 초점이 2개축으로 회전할 수 있는 거울에 의해 시편 평면 내에 레이저 빔을 집속 시키는 방법을 사용한다. 즉, 로봇에 스캐너와 레이저를 장착해 작업자가 원하는 지점에 동시다발적으로 레이저 용접을 하는 방식이다. 원격 스캐너 레이저 용접은 용접 시편의 면적에 레이저를 쏠 수 있는 스캐너를 로봇에 달아 멀리서 여러 용접 지점에 동시 다발적으로 레이저 용접을 할 수 있다.

실험에 사용된 레이저는 최대 출력이 4 kW 인 디스크 레이저(disk laser), 용접 헤드로는 스캐너(scanner)를 사용하였다. 판재로는 5000계열 알루미늄 합금 소재인 5J32의 두께는 1.6 mm 를 이용하였다. 화학적 조성은 Table 3.1 과 같고, 용접 그루브(groove) 형상은 겹치기 용접을 실시하였다. 그리고 용접 시편으로는 Fig. 3.2의 형상이며 판재는 100 mm × 125 mm 로 겹침의 길이가 40 mm 이며 용접 길이는 80 mm

로 용접을 실시하였다.

그리고 보호가스(shielding gas)로는 아르곤(Ar)가스를 이용하였으며 아래 방향에서 20 l/min 으로 공급하였다. 공급하는 방법은 보호가스가 흐를 수 있는 채널을 이용하여 공급하였다. 또한 5J32의 알루미늄 합금을 용접하기 전 표면산화피막에 흡착된 수분이 기공 발생을 막기 위하여 아세톤으로 모재를 닦아 용접부 청결 상태를 유지하였다.

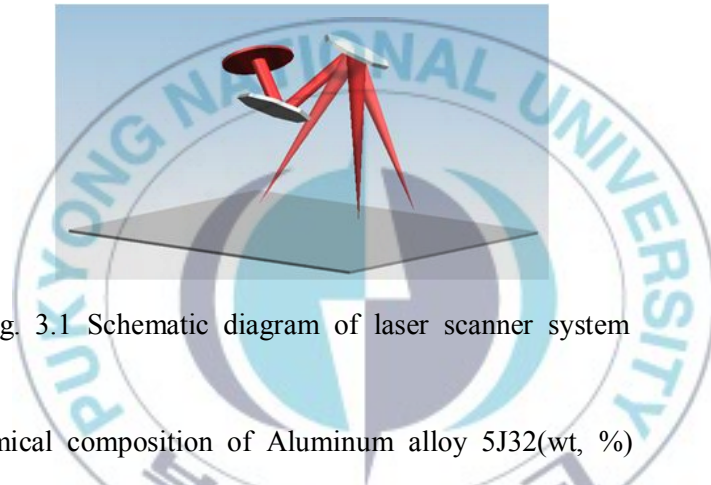


Fig. 3.1 Schematic diagram of laser scanner system

Table 3.1 Chemical composition of Aluminum alloy 5J32(wt, %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Al
0.03	0.08	0.33	0.01	5.60	0.01	Bal.

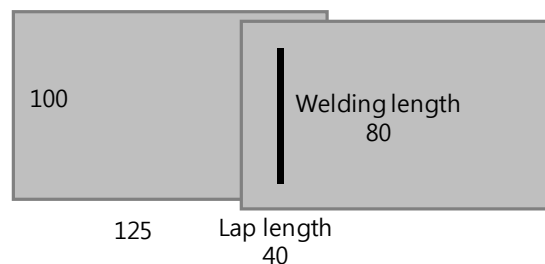


Fig. 3.2 Geometry of the specimen

3.2.2 실험조건

실험은 실험 계획법(design of experiment)에 의하여 진행되었다. 일반적으로 실험 계획법에 의해 사용되는 방법은 실험의 수를 줄이기 위해 다양한 통계적 기법을 이용한다.⁽⁵⁾ 그러므로 직교 계획법(orthogonal design)이나 심플렉스 계획법(simplex design), 중심합성 계획법(central composite design) 등이 주로 사용된다. 그러나 이와 같은 실험 계획은 실험 수는 줄일 수 있으나 실험 영역상에서 결측치(missing value)가 발생하는 단점이 있다. 그러므로 전체 실험 영역에서 삼원 배치법(3^k factorial value)을 이용하여 전수 실험을 수행하였다.

본 연구에서는 용접 공정변수에 따른 용접특성을 알아보는 실험과 모재에 갭(gap)이 있을 경우 용접특성을 알아보는 두 가지 실험을 실시하였다. 첫 번째 용접 공정변수에 따른 실험으로 조사각(angle), 레이저 출력(laser power), 용접속도(welding speed)를 사용하여 용접특성을 확인하였다.

레이저 출력은 3, 3.5, 4 kW 의 3수준이었고, 용접속도는 3, 4, 5 m/min 의 3수준이었다. 그리고 조사각은 0, 8, 16° 로 설정하였다. 그러므로 총 용접조건은 27개였고, 반복 회수는 81회 실시하였다. (Table 3.2)

그리고 두 번째 실험으로는 모재사이의 갭(gap)에 따른 용접성 평가 실험을 실시하였으며, 모재사이의 갭(gap), 레이저출력(laser power), 용접속도(welding speed), 조사각(angle)을 변수로 하여 용접성 평가 실험을 실시하였다.

갭(gap)은 0, 0.1, 0.2 mm 의 3수준으로 하고, 레이저 출력은 3, 4 kW

의 2수준, 용접속도는 3, 5 m/min 의 2수준이었다. 그리고 조사각은 0, 16° 의 2수준으로 하여 반복회수 2회 실시 총 실험회수를 32회 실시하였다. (Table 3.3)

원격스캐너를 이용한 레이저 용접 중 용접 공정 변수와 모재 사이의 갭 (gap)에 따른 용접성 평가를 하기 위하여 용접부의 단면 사진의 비드 모양을 이용하여 용접부 형상을 관찰하였다. 용접부의 상면 비드와 계면비드, 그리고 이면 비드의 폭을 측정 하였고, 용입 깊이도 측정하였다. 또 용접부의 강도를 측정하기 위하여 인장 시험을 수행하였으며, 인장시험에 대한 요인의 유의 수준을 알아보기 위하여 용접 공정 변수에서의 분산분석을 실시하였다.

Table 3.2 Laser weld Experiment Condition

Levels	0	1	2
Laser power (kW)	3	3.5	4
Welding speed (m/min)	3	4	5
Angle (°)	0	8	16

Table 3.3 Gap Experiment Condition

Levels	0	1	2
Gap (mm)	0	0.1	0.2
Laser power (kW)	3	4	-
Welding speed (m/min)	3	5	-
Angle (°)	0	16	-

3.3 용접 공정 변수에 따른 실험 결과 및 고찰

3.3.1 용접부 외관 및 단면사진

원격 스캐너를 이용한 알루미늄 레이저 용접에서 용접 조건에 따른 용접부 외관 형상을 확인 하였다. Fig. 3.3은 용접 공정 변수에 따른 비드 외관을 상면 비드와 이면 비드로 구분하여 나타내었다. 용접의 비드형상을 크게 3가지 형태로 분류하였다. Type I의 경우는 모재에 대한 용접 입열량이 충분한 경우로 상면 및 이면 비드가 매끄럽게 형성되었다. Type II는 모재에 대한 용접 입열량이 충분하지 않은 경우로 상면비드는 매끄럽게 형성되었지만, 이면 비드의 경우 불규칙적으로 형성 되었다. Type III의 경우 모재에 대한 입열량이 매우 적어 상면 비드는 형성이 되지만, 이면 비드는 전혀 형성 되지 않았다.

원격 스캐너를 이용한 알루미늄 레이저 용접에서 용접 조건에 따른 용접부 단면 사진을 Fig. 3.4 에 표시 하였다. 단면 사진 밑에 Type은 Fig. 3.3에서 분류된 비드형상의 유형을 의미한다. Fig. 3.4에서 보는 바와 같이 대부분의 경우에서 기공이 발생하였다. 주된 발생 원인은 2.2절에서 언급했듯이 레이저에 의해 플라즈마가 발생하게 되고, 키홀(keyhole)이 형성된다. 하지만 레이저 출력이 낮을 경우에 키홀이 불안정하여 붕괴되면서 그대로 응고하여 큰 기공이 발생한다.⁽²⁵⁾ 알루미늄 5J32의 주요 합금 원소인 마그네슘의 비등점(boiling point)이 알루미늄보다 낮은 용접 중에 기화하여 공기 중으로 빠져 나가지 못하고 비드에서 같이 응고하여 기공이 발생 된다.⁽²⁶⁾ 수소로 모재에서 용해된 수소원이나 모재에 흡착된 수분과 유기물의 부식생성물, 보호 가스중의 수소와 수분, 그리고 보호가스가 불완전한 경우 공기 중의 수분일 수도 있다. 이

수분은 용접 중 용접열에 의해 다음과 같이 수소로 분해된다.



용융 알루미늄의 수소 용해도가 높기 때문에 알루미늄 합금 용접시 수소는 용융금속에서 용이하게 용해된다. 용융금속이 응고 단계에 이르면 수소의 용해도가 응고온도(약 660 ℃)에서 급격히 감소하므로 가스로 방출되게 되고 이중 응고된 금속 내에 갇힌 수소가 기공으로 남게 된다.⁽²⁷⁾

그리고 레이저 출력 4 kW의 경우 용접속도에 무관하게 용접부 외관으로 분류한 Type I 의 경우로 모재에 입열량이 충분하다는 것을 확인 할 수 있으며, 용접속도가 증가 할수록 Type II, III의 경우가 발생한 것으로 보아 입열량이 충분하지 못하였다. 또한 비드의 형상은 레이저 조사 각 (8, 16 °)의 따라 비스듬하게 기울어 졌음을 알 수 있다.

Type I		
	Top view of bead	Back view of bead
	Welding condition : LP = 3kW, WS = 3 m/min, Angle = 8°	
Type II		
	Top view of bead	Back view of bead
	Welding condition : LP = 3.5 kW, WS = 5 m/min, Angle = 8°	
Type III		
	Top view of bead	Back view of bead
	Welding condition : LP = 3kW, WS = 5 m/min, Angle = 8°	

Fig. 3.3 Type of bead shape at different welding conditions

Angle = 0°				Angle = 8°			Angle = 16°		
Power	3kW	3.5 kW	4 kW	3kW	3.5 kW	4 kW	3kW	3.5 kW	4 kW
Speed = 3 m/min									
	Type I	Type I	Type I	Type I	Type II	Type I	Type II	Type II	Type I
Speed = 4 m/min									
	Type III	Type I	Type I	Type III	Type I	Type I	Type III	Type I	Type I
Speed = 5 m/min									
	Type III	Type II	Type I	Type III	Type II	Type I	Type III	Type II	Type I

Fig. 3.4 Photo of cross section according to welding conditions

3.3.2 용접부 비드 형상

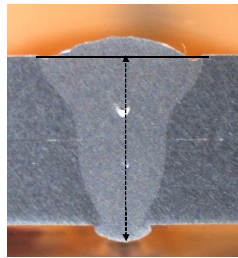
알루미늄 레이저 용접에서 공정변수에 따른 용접 특성을 관찰하기 위하여 Fig. 3.5 와 같은 방법으로 비드의 높이와 폭을 측정하였다.

Fig. 3.6은 용입 깊이 및 상면 비드의 높이 이면 비드의 깊이를 나타내고, Fig. 3.7의 경우 비드의 폭을 나타내었다. 용입 깊이의 경우 용접 시편의 총 두께 3.2mm보다 큰 경우 완전 용입(full penetration)이 일어난 경우이며, 이면비드의 깊이가 형성되었다. 그리고 용입 깊이가 3.2 mm를 넘지 못할 경우 불완전 용입이 발생 했다는 것을 알 수 있으며, 불완전 용입이 발생하면 상면 비드의 단면에 덧살(reinforcement of weld)이 형성되는 것을 확인 할 수 있었고, 이면 비드는 형성되지 않았다.

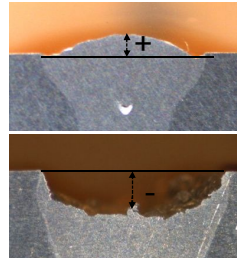
완전 용입이 일어나는 조건은 레이저 출력이 4 kW 일 경우 조건 모두에서 일어나고, 3.5 kW 는 4가지 조건, 3 kW 에서는 2가지 조건으로 Fig. 3.3에서 Type I의 경우에 대하여 상면 비드 높이가 음의 값을 갖는

다. 반면 이면 비드의 깊이가 모두 0보다 크면, 이를 통해 전체적으로 비드가 아래로 처짐을 알 수 있다. Type II의 경우 용접 속도에 따라 영향을 받았다. 용접속도가 적으면 모재에 대한 입열량이 많아져 비드의 폭이 커져 비드가 아래로 처지는 현상을 확인 할 수 있었고, 용접속도가 증가하면 입열량이 부족하여 비드 폭이 좁아져 상면 비드의 높이가 양의 값을 가지며, 덧살이 형성 되었다. 입열이 매우 적은 Type III의 경우 용입 깊이가 3.2 mm 보다 적은 경우로서 이면 비드의 깊이가 모두 0의 경우였다. 이 경우는 모두 상면 비드 높이가 0보다 큰 것을 알 수 있다. 그 이유는 키홀(keyhole)이 모재를 관로하여 완전 용입이 이루어지지 못하고 기공 등에 의해 많은 양의 용융 금속이 상면 위로 쌓이기 때문에 덧살이 형성됨을 알 수 있다.

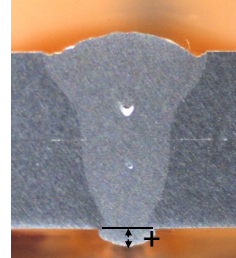
비드 폭의 경우, 전체적으로 용접 속도가 감소할수록 레이저 출력이 커질수록 증가하고 있다. 특징적으로 완전 용입이 일어나는 경우 계면에서의 비드 폭은 1.45 mm 이상이 됨을 알 수 있다. 그리고 계면 비드의 폭이 커지면 이면 비드의 폭도 커지는 것을 확인 할 수 있었다. 하지만 상면 비드의 폭과 계면 비드의 폭은 무관하였다.



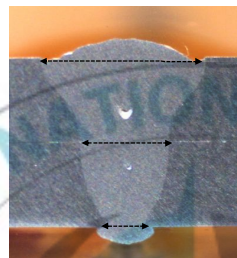
(a) Penetration depth



(b) Top bead height



(c) Back bead depth



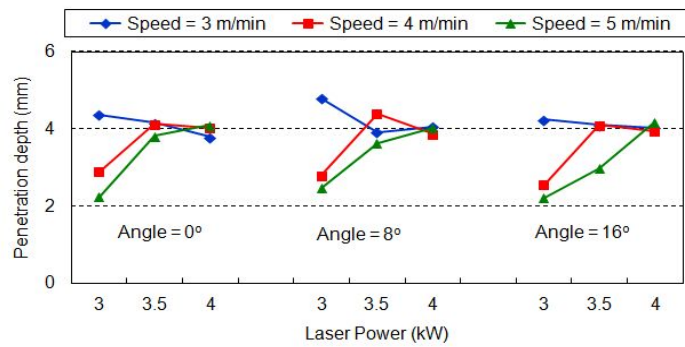
(d) Width

(i) Top bead

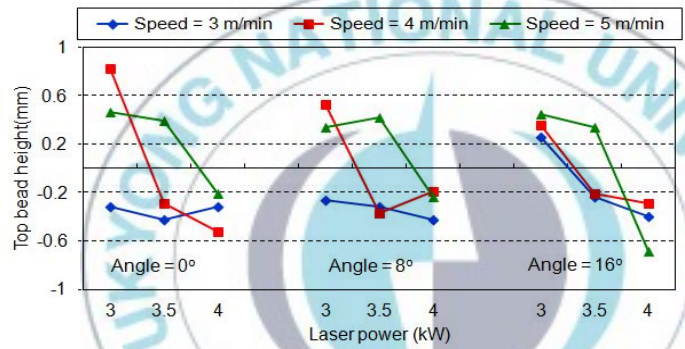
(ii) Interface bead

(iii) Back bead

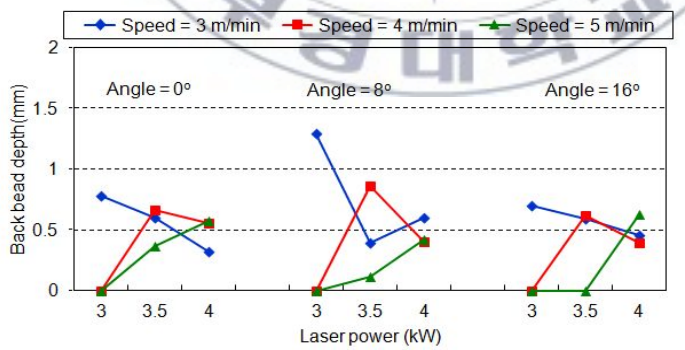
Fig. 3.5 Measurement of bead height and width



(a) Penetration depth according to welding conditions

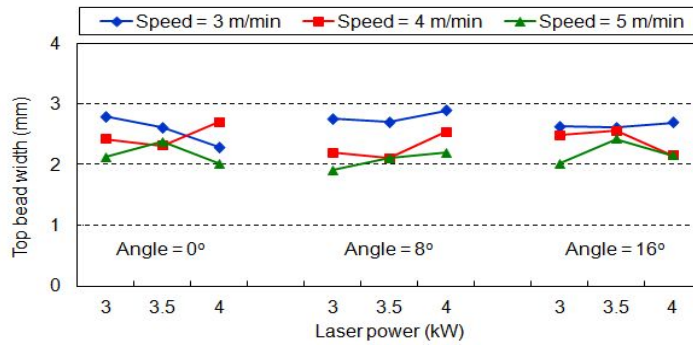


(b) Top bead height according to welding conditions

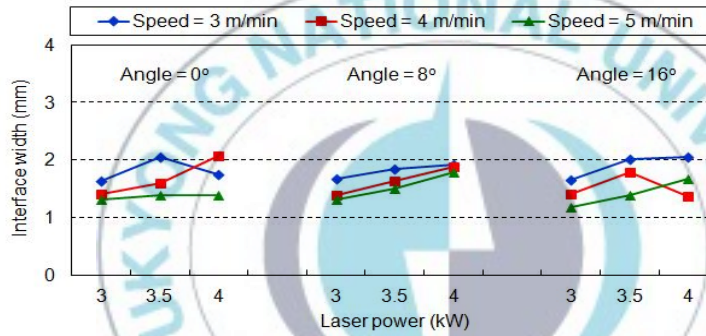


(c) Back bead depth according to welding conditions

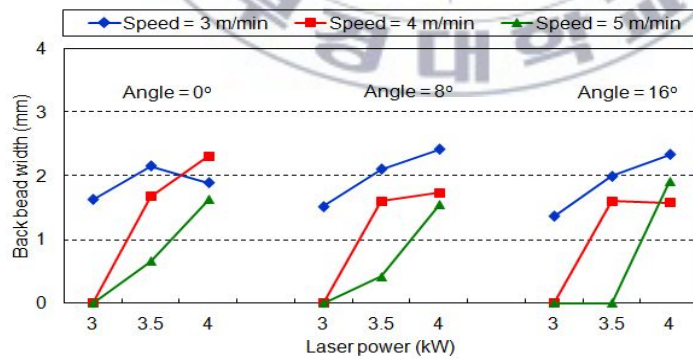
Fig. 3.6 Bead height according to welding conditions



(a) Top bead width according to welding conditions



(b) Interface width according to welding conditions



(c) Back bead width according to welding conditions

Fig. 3.7 Bead width according to welding conditions

3.3.3 인장강도

용접의 공정변수에 대한 기계적 특성을 알아보기 위하여 전단 인장강도 시험을 실시하였다. 현재 생산라인은 기존의 용접인 저항 점용접에서 원격스캐너 레이저 용접으로 대체되어지고 있고 기존의 철강에서 알루미늄으로 대체되어지고 있으므로 기존의 인장강도 시험 방법인 KS B 0851 (저항 점 용접 및 프로젝션 용접 이음의 전단시험에 대한 시험편 치수 및 시험 방법)을 기준으로 시험 시험편을 Fig. 3.8 와 같이 제작하였다. 시험의 신뢰성 확보를 위해 Fig. 3.2의 실험 시험편을 Fig. 3.8 와 같이 중앙부를 절단하여 항상 일정한 시험편을 제작하였으며, 3회 반복 실험을 수행하였다.

용접부의 강도 적정성을 판단하기 위하여 ISO규격 KS B ISO14373 (저항 용접 - 비도금 및 도금 탄소강의 점용접 절차)을 이용하여 허용 인장 강도를 선정하였다. 일반적으로 사용되는 차체 용접의 경우 저항 점 용접으로 수행된다. 그러므로 본 실험의 전단 인장 실험의 결과가 기존의 용접 방법인 저항 점 용접의 전단 인장 강도 기준보다 높게 나오는 것으로 용접부의 강도 기준을 삼았다. 특히 본 연구에서는 너깃의 형성이 없기 때문에 너깃의 크기가 아닌 용접 강도를 선택 하였다. KS B ISO14373에서 제시된 저탄소강의 최소 용접 전단 강도 크기인 공칭지름에 대한 $5\sqrt{t}$ 에 대한 7400 N을 용접 강도기준으로 선정 하였다. 최소 허용인장 강도의 타당성을 확인하기 위하여 자동차 산업 현장에서 사용 되는 허용인장 강도를 확인해 본 결과 이와 유사한 허용 인장강도를 사용 하였다.

인장 시험의 신뢰성을 확보하기 위하여 3회 반복 실험에 대한 인장 시

편을 모두 채취하고 인장 시험 데이터에서 구한 후 평균값을 Fig. 3.9에 그 결과를 나타내었다.

그 결과 레이저 출력이 커지고, 용접 속도가 감소할수록 인장 강도는 증가하였다. 그 이유는 레이저 출력이 증가하고, 용접 속도가 감소할수록 모재에 대한 입열량이 충분하게 되어 비드의 깊이와 폭이 커지기 때문이다. 하지만 레이저 출력이 4 kW 일 때는 용접속도에 상관없이 허용인장 강도를 만족하였다.

Fig. 3.10은 인장 강도 시험시 파단 형태이다. 파단은 크게 용접부 혹은 HAZ부 파단이 난 형태와 용접부 계면에서 파단이 일어난 계면 파단의 형태로 나뉘게 된다. 인장 강도가 9000 N 이상일 경우에 용접부 파단이 일어났다.

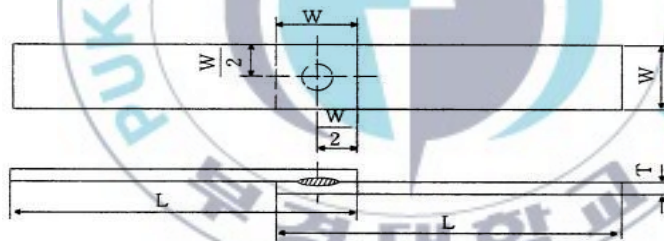


Fig. 3.8 The shape of test piece

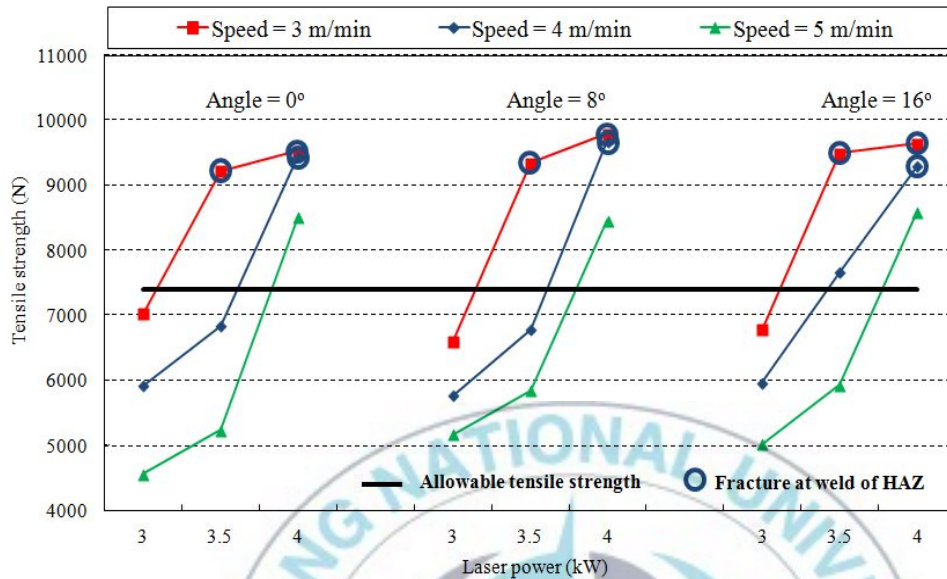


Fig. 3.9 Result of tensile test



Fig. 3.10 Fracture types after tensile test

3.3.4 분산분석

각 공정변수가 용접 특성에 얼마나 큰 영향을 주는 지를 정량적으로 파악하기 위하여 분산분석을 수행하였다. 분산분석이란 실험 결과의 제곱합(sum of square)을 인자(factor), 오차(error)와 교호 작용

(interaction)을 포함한 요인(source)별로 분해하고, 오차에 대한 각 요인 간의 비(ratio)를 통하여 결과에 대한 영향력을 규명하는 분석법이다. 인장 강도에 대한 분산 분석은 Table 3.3 과 같다. Angle은 조사각도, LP는 레이저 출력을, 그리고 WS는 용접 속도를 의미한다. 분산분석에서 ‘×’는 교호작용을 의미한다. 교호 작용이란 인자 수준의 조합에서 일어나는 효과를 의미한다. F_0 는 평균 제곱의 비로서 에러의 평균 제곱에 대한 인자의 평균 제곱의 비로서 나타내고, 이 값이 클수록 영향력이 크다는 것을 의미한다. 그리고 $F(0.05)$ 는 F-검정(F-test)의 유의 수준(level of significance)을 나타내는 것으로 95 %의 유의 수준을 의미한다. 그러므로 F_0 가 $F(0.05)$ 보다 큰 경우, 요인이 결과에 영향을 주는 인자라는 것을 통계적으로 검증하게 된다.^(18,19)

Table 3.4은 인장 강도에 대한 분산분석의 결과다. Table 3.4에서 보는 바와 같이 레이저 출력이 인장강도에서 가장 큰 영향력을 가지고 있음을 알 수 있다. 그리고 용접속도도 통계적으로 유의한 인자라고 할 수 있다. 레이저 출력과 용접속도와의 교호작용이 있음을 알 수 있다. 이것은 레이저 출력이 증가 할수록 입열이 증가되는 요소이지만 용접 속도가 증가할수록 입열을 감소시키는 요인으로 작용하기 때문이다. 이외의 요인들은 인장강도에 크게 영향을 주고 있지 않다는 사실을 분산분석표로 알 수 있다.

Table 3.4 ANOVA for tensile strength about welding parameters

Factor	Sum of square ($\times 10^3$)	Degree of freedom	Mean square ($\times 10^3$)	F ₀	F(0.05)
Angle	965.41	2	482.71	2.08	3.13
LP	148690.87	2	74345.44	320.72	3.13
WS	65233.15	2	32616.57	140.70	3.13
Angle $\times$ LP	996.11	4	249.03	1.07	2.51
Angle $\times$ WS	422.11	4	105.53	0.45	2.51
LP $\times$ WS	18646.57	4	4661.64	20.11	2.51
Angle $\times$ LP $\times$ WS	1758.98	8	219.87	0.95	2.07
Error	12517.37	54	231.804		
Total	24923.06	80			

3.4 모재 사이의 갭(gap) 따른 실험 결과 및 고찰

3.4.1 용접부 외관 및 단면사진

갭(gap)에 따른 용접부 외관은 용접 조건에 따른 용접성 평가(Fig. 3.3)와 같은 방식으로 확인하였다. Fig. 3.11는 용접 공정 변수와 모재사이의 갭(gap)에 따른 비드 형상을 나타낸 것이다. 용접 공정 변수에 따른 용접부 단면사진의 이유와 마찬가지로 기공이 많이 발생 한 것을 알 수 있다. 그리고 레이저 출력이 4 kW의 경우 용접 속도와 갭에 무관하게 용접부 외관으로 분류한 Type I의 경우로 모재에 입열량이 충분 하였으며, 용접 속도가 증가 할수록 Type II, III의 경우가 발생, 즉 입열량이 충분하지 못하였다. 또한 조사각이 16° 일 경우 비드가 비스듬하게 기울어져 있음을 확인 할 수 있었다. 갭(gap)이 있는 용접에서 계면비드의 경우 갭 사이로 용융된 금속이 채워지는 것을 확인 할 수 있었고, 용융 금속이 채워진 부분은 인장강도에 영향을 미칠 것으로 사료된다.

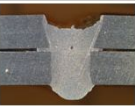
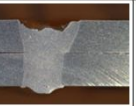
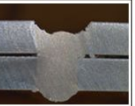
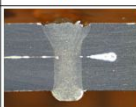
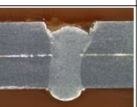
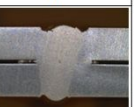
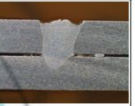
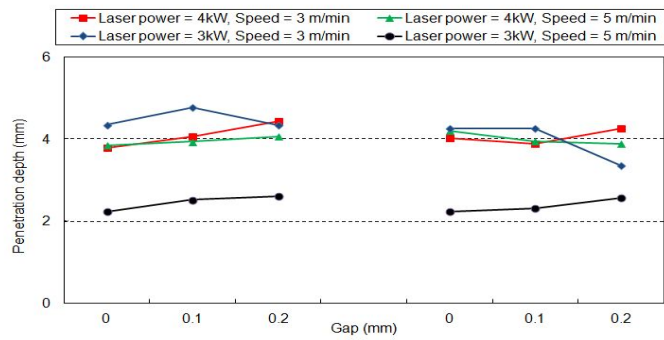
		Angle = 0°			Angle = 16°		
Gap		0 mm	0.1 mm	0.2 mm	0 mm	0.1 mm	0.2 mm
Laser Power = 4 kW	Speed = 3 m/min						
		Type I	Type I	Type I	Type I	Type I	Type I
	Speed = 5 m/min						
		Type I	Type I	Type I	Type I	Type I	Type I
Laser Power = 3 kW	Speed = 3 m/min						
		Type I	Type I	Type I	Type I	Type I	Type II
	Speed = 5 m/min						
		Type III	Type III	Type III	Type III	Type III	Type III

Fig. 3.11 Photo of cross section according to welding conditions and gap

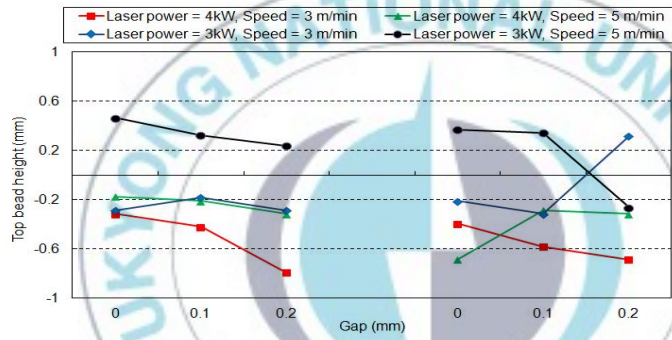
3.4.2 용접부 비드 형상

Fig. 3.12은 용입 깊이 및 상면 비드의 높이, 이면 비드의 깊이를 나타내고, Fig. 3.13 은 비드의 폭을 나타낸다. 갭(gap)이 없을 경우 용접 시편의 총 두께 3.2 mm 보다 큰 경우 완전 용입(full penetration) 이 일어난다고 앞 절에서 설명을 하였다. 갭(gap)이 있을 경우에는 총 시편과 갭의 합보다 큰 경우 완전 용입이 일어난다. 그리고 완전 용입이 일어날 경우 이면비드의 깊이가 형성되었다. 불완전 용입이 발생할 경우 용접 공정 변수에 따른 용접 특성에서와 마찬가지로 상면 비드의 단면에 덧살이 형성되었고, 이면 비드의 경우 0 의 값을 가졌다.

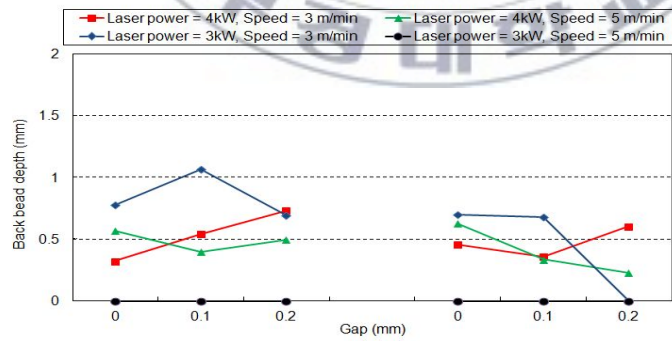
완전 용입이 일어나는 조건은 레이저 출력 4 kW 일 경우 조건 모두에서 일어나고, 3 kW 에서는 5가지 조건으로 Fig. 3.3 에서 Type I 의 경우에 대하여 상면 비드의 높이가 음의 값을 가진다. 반면 이면 비드의 경우 모두 0 보다 큰 것을 확인 할 수 있다. Type II 의 경우로는 용접 조건이 레이저 출력이 3 kW, 용접 속도가 3 m/min 로서 모재 사이의 갭(gap)이 0.1 mm 일 경우 완전 용입이 일어나지만, 0.2 mm 의 경우 불완전 용입을 확인 할 수 있다. 용접 공정 조건은 같은데 용입의 타입이 다른 이유는 갭의 크기가 커 용융된 알루미늄이 갭(gap) 사이로 채워져 비드의 용입 깊이는 작아지고 상면의 덧살이 형성되는 것을 확인 할 수 있다. Type III 의 경우 불완전 용입이 일어나는 경우로서 이면 비드의 깊이가 모두 0 인 경우였다. 이 경우는 모두 상면 비드 높이가 0보다 큰 것을 알 수 있었다. 비드 폭의 경우 용접속도에 의해 영향을 받았으며 용접 속도와 상면 비드의 폭은 반비례 하였다. 용접 공정 변수와 마찬가지로 계면비드의 폭이 1.45 mm 의 이상일 때 완전 용입이 발생하였다. 하지만 상면비드의 폭과 하면비드의 폭은 무관하였다.



(a) Penetration depth according to welding conditions and gap

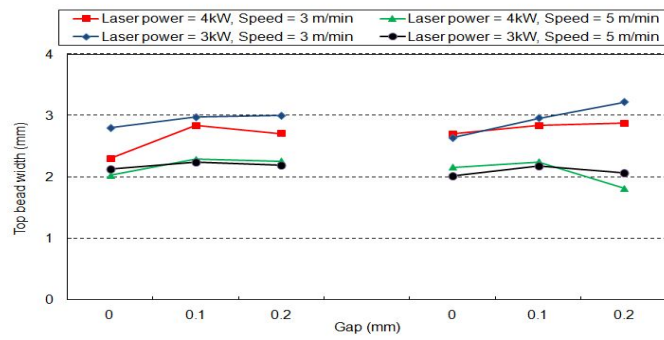


(b) Top bead height according to welding conditions and gap

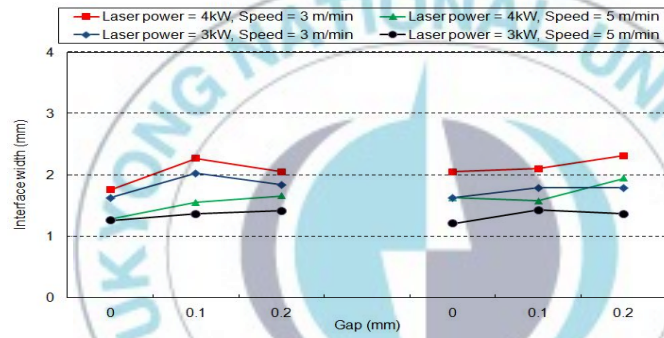


(c) Back bead depth according to welding conditions and gap

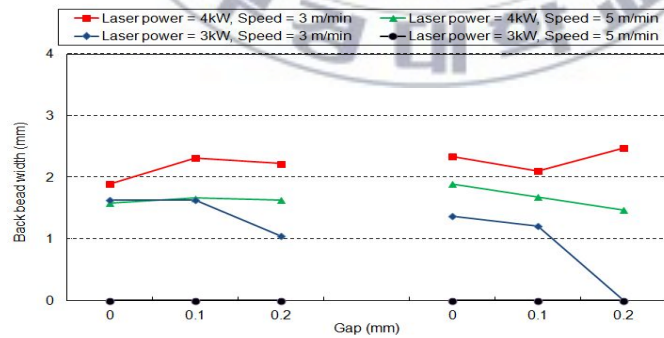
Fig. 3.12 Bead height according to welding conditions and gap



(a) Top bead width according to welding conditions and gap



(b) Interface width according to welding conditions and gap



(c) Back bead width according to welding conditions and gap

Fig. 3.13 Bead width according to welding conditions and gap

3.4.3 인장강도

갭(gap)와 용접 공정변수에 대한 기계적 특성을 알아보기 위하여 전단 인장강도 시험을 실시하였다. 실험을 위한 시험 시편, 허용인장 강도에 대해서는 용접공정 변수를 이용한 레이저 용접시험과 같은 방법을 이용하였다. 레이저 출력이 커지고, 용접 속도가 감소할수록 모재에 대한 입열량이 커져 비드의 깊이가 깊어지고 폭이 커지기 때문에 인장 강도는 증가하였다. Fig. 3.14에서 보는 바와 같은 조건에서 허용인장 강도를 만족하였고 허용인장 강도는 7400 N 이다.

갭(gap)에 따른 인장강도를 살펴본 결과 입열량이 충분한 경우 갭(gap)이 0.1 mm일때 가장 높은 인장을 가졌고, 그 이유는 갭(gap) 사이로 용융된 금속이 채워져 인장강도에 영향을 미쳤다. 하지만 갭의 크기가 0.2 mm 가 되었을 때 오히려 인장강도가 낮아졌다. 그 이유는 용융 금속의 양은 일정하고 모재 사이의 갭(gap) 사이로 채워지는 금속이 갭 0.1 mm 용접보다 많아지게 되고 그로인하여 상면비드에서 언더필(underfill) 현상이 더욱 커져 인장강도에 영향을 준다.⁽²⁸⁾

이는 갭(gap)이 증가할수록 인장 강도가 비례적으로 증가하는 것이 아니기 때문에 산업 현장에서는 갭(gap)을 적절히 이용해야 될 것이다. 그리고 파단 형태를 살펴본 결과 앞 절에서의 용접 공정 변수에 따른 용접부 파단은 9000 N 이상일 경우 발생하였지만, 모재 사이의 갭(gap) 사이로 용융된 금속이 채워져 9000 N 보다 낮은 경우에도 용접부 파단이 발생하였다.

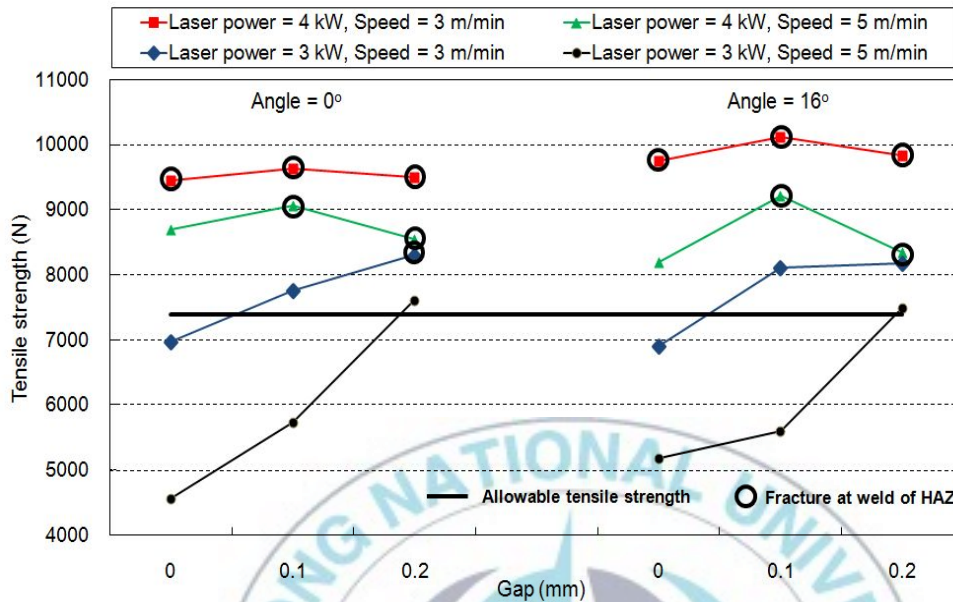


Fig. 3.14 Result of tensile test for the gap

3.4.4 분산분석

각 공정변수와 갭(gap)이 인장강도에 영향을 미치는지를 알아보기 위하여 분산분석을 실시하였다. 용접 공정 변수에 따른 인장강도 분산 분석에서 분산 분석법에 대해 설명하였다. Table 3.4는 갭(gap)에 따른 인장강도의 분산분석의 결과이다. Table 3.4에서 보는 바와 같이 레이저 출력이 인장강도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났고, 그리고 용접 속도, 모재 사이의 갭(gap)도 통계적으로 유의한 인자라고 할 수 있다.

그리고 레이저출력과 용접속도, 모재사이의 갭(gap)사이에서 교호작용이 있음을 알 수 있다. 이외의 요인들은 인장강도에 크게 영향을 주고 있지 않다는 사실을 분산분석표로 알 수 있다.

Table 3.5 ANOVA for tensile strength about welding parameters and gap

Factor	Sum of square ($\times 10^3$)	Degree of freedom	Mean square ($\times 10^3$)	F ₀	F(0.05)
Angle	202.60	1	202.60	1.78	4.26
LP	67492.32	1	67492.32	594.85	4.26
WS	21214.57	1	21214.57	186.98	4.26
Gap	7437.82	2	3718.91	32.78	3.42
Angle $\times$ LP	25.13	1	25.13	0.22	4.26
Angle $\times$ WS	113.49	1	113.49	1.00	4.26
Angle $\times$ Gap	159.57	2	79.78	0.70	3.42
LP $\times$ WS	1454.39	1	1454.39	12.82	4.26
LP $\times$ Gap	9374.14	2	4687.07	41.31	3.42
WS $\times$ Gap	833.59	2	416.80	3.67	3.42
Angle $\times$ LP $\times$ WS	200.06	1	200.06	1.76	4.26
Angle $\times$ LP $\times$ Gap	72.06	2	36.03	0.32	3.42
LP $\times$ WS $\times$ Gap	2390.74	2	1195.37	10.54	3.42
Angle $\times$ LP $\times$ WS $\times$ Gap	356.03	4	89.01	0.784	2.79
Error	2723.05	24	113.46		
Total	114049.54	47			

3.5 결론

원격 스캐너를 이용하여 5000계열 알루미늄 합금인 5J32의 겹치기 용접에서의 공정변수와 모재사이의 갭(gap)에 따른 용접성 평가를 실시하였다. 공정 변수에 따른 용접성 평가를 실시하기 위하여 조사각, 레이저 출력, 용접속도를 변수로 용접 실험을 수행하였다. 그리고 모재사이의 갭(gap)의 영향을 알아보기 위하여 공정변수 및 갭(gap)을 변수로 용접 실험을 수행하였다.

기공이 발생하는 원인은 키홀의 붕괴, 알루미늄 합금 5J32의 주요 합금

원소인 마그네슘의 기화, 환경적인 요인에서의 수소의 용해도 차이 때문이다. 그리고 원격 스캐너의 장점인 조사각에 의하여 각도의 변화에 따라 비드가 경사를 가지는 것을 확인 할 수 있었다. 레이저 출력이 증가하고 용접속도가 감소할수록 완전 용입이 발생하였다. 또한 완전용입이 일어나면 상면비드의 깊이는 음의 값을 가진 언더필(fill)되며 불완전 용입이 일어날 경우 상면비드에 덧살이 형성되었다.

알루미늄 5J32의 기계적 특성을 알아보기 위하여 인장강도 시험을 실시하였다. 입열량이 클 경우 즉, 레이저 출력이 높고 용접속도가 낮을수록 허용인장강도를 만족 하였으며, 9000 N 를 넘었을 경우 용접부 파단이 발생하였다. 그리고 모재사이의 갭(gap)이 있을 경우 허용 인장 강도 9000 N 을 넘지 않을 경우에도 용접부 파단이 발생하였는데, 그 이유는 갭(gap) 사이로 용융된 금속이 채워져 인장강도에 영향을 미치는 것으로 확인 되었다. 또한 갭(gap)과 인장강도에서 선형적인 모습은 보여지지 않았다.

용접 공정 변수 및 모재 사이의 갭(gap)의 인장강도에 대하여 정량적인 분석이 필요하여 분산 분석을 실시하였다. 용접 공정 변수에서 인장강도에 가장 큰 영향을 미치는 것은 레이저 출력이었으며, 용접속도도 인장강도에 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있었다. 레이저 출력과 용접속도의 교호작용도 발생하였다.

그리고 갭(gap) 의 경우도 마찬가지로 가장 큰 영향을 미치는 것은 레이저 출력이었으며, 용접속도, 모재사이의 갭(gap) 또한 인장강도에 영향을 미치는 유의한 인자였음을 알 수 있었으며, 레이저 출력, 용접 속도, 모재사이의 갭(gap)의 교호작용도 발생하였다.

4. 공정변수를 이용한 인장강도 예측모델

4.1 서언

용접 공정변수에 따른 인장강도를 예측하기 위해서는 시스템을 모델링하여야 한다. 예측 모델은 연속적인 종속변수와 독립변수들 간의 인과성을 규명하기 위하여 사용되며, 종속 변수가 독립변수들에 의해 어떻게 설명되는지를 알아보기 위하여 예측 모델링을 한다. 모델링을 함으로써 종속변수와 관련이 있는 주요 독립변수들을 파악하고, 이 변수들의 영향력의 정도를 평가하며, 독립변수들을 사용해 가능한 한 정확한 종속변수 값을 예측할 수 있다.

모델링 방법에는 미분방정식(differential equation), 전달함수를 구하는 방법(transfer function), 그리고 상태 공간 방정식(state space equation)을 구하는 해석적 방법이 사용되며, 입력과 출력에 영향을 미치는 변수들 간의 관계를 통계적으로 표현하는 회귀모델(regression model)등이 있다.

본 장에서는 원격스캐너를 이용한 알루미늄 레이저 공정에서 용접 공정변수인 조사각, 레이저 출력, 용접 속도를 종속변수로 하고 독립변수는 용접성을 나타낼 수 있는 인장강도로 하여 이 변수들 간에 관계를 모델링 하였다. 모델링 방법으로는 통계적으로 표현하는 회귀모델을 사용하였다. 회귀 모델은 변수의 차수(order)와 비선형 모델등 다양하게 구성할 수 있으므로 3가지의 모델을 제안하였다.^(29,30) 그리고 각 모델들의 통계적 유의성을 확인하기 위하여 분석분석을 하였고, 예측 회귀선과 실제 관측치의 적합성을 보여 주는 결정계수와 평균 오차율을 이용하여 정량적으로 비교하였다.

4.2 회귀분석을 이용한 인장강도 예측모델

4.2.1 표준화(normalizing)

원(raw) 데이터로부터 각각의 값을 계산하므로, 이를 이용하여 모델을 세우는 경우 각 값들에 대한 중요도가 변화된다. 그러므로 각 입력인자의 가중치를 일정하게 하기 위해서 각 특정 인자를 0~1사이의 값으로 표준화(normalizing)를 하여야 한다. 표준화를 위한 식은 식(4-1)와 같다.

$$x_n = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4-1)$$

식(4-1)에서 x_n 은 표준화된 인자이고 x 는 공정변수의 인자인 레이저 출력, 용접속도, 조사각도이다. $x_{\max}$ 는 각 요인의 최대 수준 값이고, $x_{\min}$ 는 각 요인의 수준의 최소값이다.

4.2.2 회귀모델

용접 공정변수에 따른 인장강도를 예측할 수 있는 3가지 회귀 모델을 구성하였다. 첫 번째는 Model I 은 회귀선이 선형이고 표준화된 입력인자들 간의 다중 선형 회귀 모델(multiple linear regression model) 식으로 정의 하였다. 다중 선형 회귀 모델로 제안된 모델 식은 식(4-1) 과 같다. 두 번째 Model II 은 회귀선이 선형이고 입력인자들 간의 항이 2차인 2차 다항 회귀 모델(second order polynomial regression model)

이며, 식(4-2)로 정의 하였다. 그리고 Model III은 회귀선에 대해서 비선형이며 입력인자들 간의 비선형 회귀 모델(multiple nonlinear regression model)이며 식(4-3)과 같다.

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 \quad (4-1)$$

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_1 x_2 + \beta_5 x_1 x_3 + \beta_6 x_2 x_3 + \beta_7 x_1^2 + \beta_8 x_2^2 + \beta_9 x_3^2 \quad (4-2)$$

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 \ln x_1 + \beta_2 \ln x_2 + \beta_3 \ln x_3 \quad (4-3)$$

식(4-1),(4-2),(4-3)에서 x_1, x_2, x_3 는 입력인자로서 각각 조사각도, 레이저 출력, 용접속도다. $\hat{y}$ 는 출력인자로서 각각의 모델에 의해 예측된 인장강도이다. 그리고 $\beta_0 \sim \beta_9$ 는 미지의 모수(unknown parameter)이며, β_0 는 y의 절편이고, $\beta_1 \sim \beta_9$ 는 각각 입력 인자의 계수 값이다. 각각의 계수는 최소제곱법(method of least squares)으로 추정하였다.

Model I 인 다중 선형 회귀 모델(multiple linear regression model)이며 계수값을 Table 4.2 와 같이 표시 되었다. 각각의 계수는 각 입력인자가 출력인자에 미치는 영향력을 판단할 수 있다. Table 4.1 에서 보는 바와 같이 예측된 인장강도에 대하여 조사각과 레이저 출력은 양의 효과를 용접속도의 경우 음의 효과를 준다. 그리고 출력 인자인 인장강도에 대해 입력 인자 중에서 레이저 출력이 다중 선형 회귀모델에서는 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

Model II 는 2차 다항 회귀 모델(second order polynomial regression model)이며, 계수값은 Table 4.3 와 같다. 각 입력 인자가

인장강도에 미치는 영향력으로는 레이저 출력과 용접 속도가 중요한 역할을 하고 있다. 그리고 조사각, 레이저 출력은 양의 효과를 용접속도는 음의 효과를 준다. 그리고 2차 다항 회귀 모델은 2차의 비선형 항 (nonlinear term)이 있으므로 계수 값이 Model I 인 다중 선형 회귀모델 보다 계수 값이 매우 복잡함을 알 수 있다. Model III 는 다중 비선형 회귀 모델(multiple nonlinear regression model)의 계수 값은 Table 4.4 와 같다. 각 입력인자가 출력인자에 미치는 영향력으로 레이저 출력의 자연 로그를 취한 값과 용접속도의 자연 로그를 취한 값이 가장 중요한 역할을 한다. 자연 로그를 취한 조사각과 레이저 출력은 양의 효과를 주며, 자연로그를 취한 용접속도는 음의 효과를 준다.

Table 4.1 Coefficients for Model I (multiple linear regression model)

β_0	β_1	β_2	β_3
145.53	16.57	3313.92	-1099.07

Table 4.2 Coefficients for Model II (second order polynomial regression model)

β_0	β_1	β_2	β_3	β_4
7113.43	121.49	1126.13	-1352.05	5.72
β_5	β_6	β_7	β_8	β_9
65.65	214.93	-30.15	155.09	-13.80

Table 4.3 Coefficients for Model III (multiple nonlinear regression model)

β_0	β_1	β_2	β_3
6756.90	240.63	2924.96	-1953.98

4.2.3 회귀모델의 예측 결과

앞 절의 회귀 모델을 이용하여 실제 인장강도의 값과 예측된 인장강도를 비교해 보았다. Fig. 3.10에서 얻은 실제 인장강도의 데이터와 예측 회귀모델에서 얻은 데이터를 이용하여 회귀모델의 예측성능을 평가하였다.

Model I 에 대한 회귀 모델 예측성능은 Fig. 4.1에서 보여 주고 있다. Fig. 4.1의 X축은 실제 인장시험을 통해 얻어진 인장강도의 값이며 Y축은 예측된 인장강도의 값이다. Fig. 4.1에 있는 직선라인에 가까울수록 예측 성능이 우수한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 회귀식에 의해 형성된 데이터에서 좋은 예측 성능을 가지고 있다.

Model II 에 대한 회귀 모델 예측성능은 Fig. 4.2에서 보여 주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 Model II의 경우에도 회귀식에 의해 형성된 데이터에 대해서 전체적으로 예측을 잘 하고 있다.

Model III 에 대한 예측 성능을 Fig. 4.3에서 표시하였다. Fig. 4.3에서 보는 바와 같이 Model III 도 전체적인 예측성능은 뛰어나지만 Model I, II의 성능보다는 예측이 잘 되지 않은 것을 확인 할 수 있다.

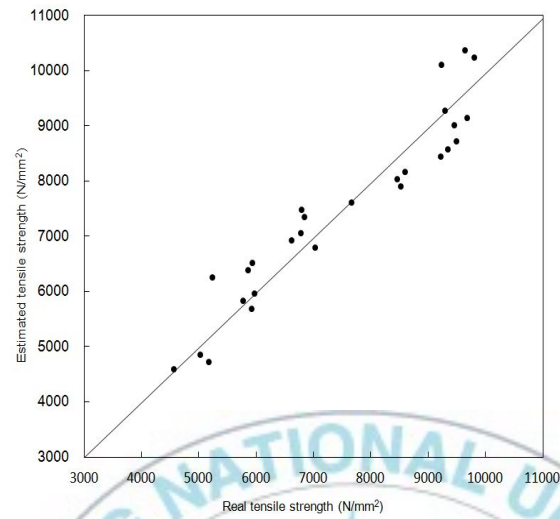


Fig. 4.1 Estimation result of Model I
(multiple linear regression model)

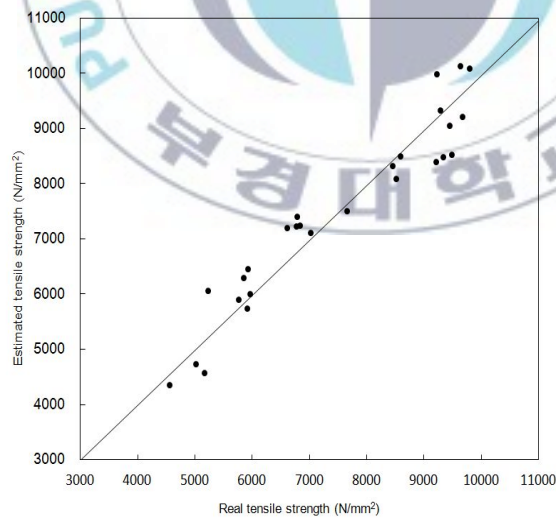


Fig. 4.2 Estimation result of Model II
(second order polynomial regression model)

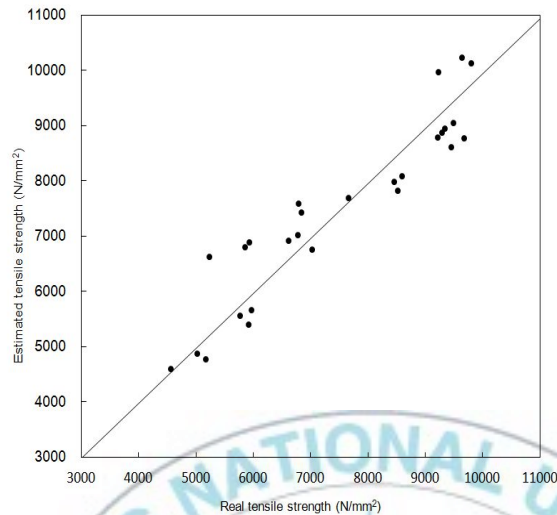


Fig. 4.3 Estimation result of Model III
(multiple nonlinear regression model)

4.2.4 회귀모델의 통계적 유의성

일반적으로 추정된 회귀방정식의 정도(percision)를 측정하는 방법으로 많이 사용되는 측도(measure)로서 분산분석표에 의한 F-검정, 결정계수 R^2 , 잔차 평균제곱 MSE , $\hat{\beta}_i$ 와 $\hat{y}$ 의 분산이 있다.⁽¹⁷⁾ 본 논문에서는 분산 분석을 이용하여 각 회귀 모델의 통계적 유의성을 확인하였다.

회귀 모델에 대한 분산분석은 추정된 모형이 본 자료에 얼마나 잘 맞는지를 알아보는 가설 검정이다. 본 논문에서는 실제 인장강도에 대한 회귀 모델을 구현하였고 인장강도에 대해 조사각, 레이저 출력, 용접속도와 같이 설명이 가능한 값과 그렇지 않는 값으로 나누어 이 두 값의 비를 F 검정하여 통계적으로 유의성을 판단하게 된다.⁽²⁰⁾

세 가지의 모델의 분산분석에서 F_0 는 회귀의 평균제곱에 대한 잔차의

평균제곱의 비로서 F_0 의 값이 크면 회귀식의 정도(percision)이 좋다고 할 수 있다. 또한 $F(0.05)$ 는 F-검정(F-test)의 유의 수준을 나타내는 것으로, 유의수준 95%에 대한 F 기각치(critical value)이다.

Model I 에 대한 분산 분석은 Table 4.5이다. Table 4.5에서 보는 바와 같이 F_0 가 $F(0.05)$ 의 값보다 크므로 다중 선형 회귀식은 입력변수에 대해 출력변수의 통계적 설명이 잘 된다고 할 수 있다.

Model II 에 대한 분산 분석은 Table 4.6, Model II 에 대한 분산 분석은 Table 4.7에 표현하였다. Table 4.6, Table 4.7도 마찬가지로 F_0 의 값이 $F(0.05)$ 의 값보다 크므로 다항 선형 회귀식 과 다중 비선형 회귀식 역시 입력변수에 대해 출력변수가 유의한 수준이라고 할 수 있다.

Table 4.4 ANOVA for Model I (multiple linear regression model)

Factor	Sum of square ($\times 10^3$)	Degree of freedom	Mean square ($\times 10^3$)	F_0	$F(0.05)$
Regression	71478.93	3	23826.31	73.80	3.03
Residual	7425.50	23	322.85		
Total	78904.43	26			

Table 4.5 ANOVA for Model II (second order polynomial regression model)

Factor	Sum of square ($\times 10^3$)	Degree of freedom	Mean square ($\times 10^3$)	F_0	$F(0.05)$
Regression	72236.29	9	8026.25	20.56	2.49
Residual	6668.14	17	392.24		
Total	78904.43	26			

Table 4.6 ANOVA for Model III (multiple nonlinear regression model)					
Factor	Sum of square ($\times 10^3$)	Degree of freedom	Mean square ($\times 10^3$)	F ₀	F(0.05)
Regression	69061.24	3	23020.41	53.79	3.03
Residual	9843.19	23	427.96		
Total	78904.43	26			

4.3 각 모델의 예측성능 비교

앞 절에서 제안된 3개의 회귀 모델에 대해 예측성능을 정량적으로 평가하였다. 그리고 각 모델에 대하여 분산분석을 실시하여 통계적 유의성도 확인하였다. 그리고 각 모델의 회귀선의 적합도를 평가하여 예측성능을 비교하였다. 적합도를 평가하기 위해서 회귀선의 추정 후 그 타당성을 조사하기 위해서는 결정계수(coefficient of determination)과 평균 오차율(average error rate : AER)를 사용한다. 그래서 이번 장에서는 각 모델에 대하여 결정계수 및 평균 오차율을 비교하였다. 각 모델에 대한 결정계수와 평균 오차율은 Table 4.8에 표현하였다. 추정된 회귀식의 정도(percision)를 측정하는 척도인 결정계수(coefficient of determination)의 경우 1에 가까울수록, 평균 오차율은 0에 가까울수록 회귀모델의 예측 성능이 우수하다고 할 수 있다. Table 4.8에서 보는 바와 같이 Model II 인 다항 선형 회귀 모델의 예측성능이 뛰어나다.

그러므로 Fig. 4.1, Fig. 4.2, Fig. 4.3 과 Table 4.8 에서의 정량적인 분석결과 3가지의 모델 모두 예측성능이 우수하다. 그 중 Model II 인

다항 선형 회귀 모델의 결정계수의 값이 0.92 로 가장 컸으며, 평균 오차율의 경우 0.058 로 가장 낮은 것을 확인 할 수 있다. 그러므로 다항 선형 회귀 모델이 제안된 3 가지의 모델 중 예측 성능이 가장 우수 하다는 것을 확인 하였다.

Table 4.7 Coefficient of determination and average error rate for each model

	Model I	Model II	Model III
Coefficient of determination	0.91	0.92	0.88
Average error rate	0.059	0.058	0.072

4.4 결론

본 장에서는 용접특성에 따른 레이저 공정에 대하여 모델링하였다. 예측 모델 방식은 회귀 모델을 이용하였고 입력 변수로 조사각(angle), 레이저 출력(laser power), 용접속도(welding speed)를 선정하였고, 출력 변수로는 용접 특성을 나타내는 인장강도로 선정하였다. 회귀 모델은 3 가지 모델로 구현 하였는데 다중 선형 회귀 방식(multiple linear regression model), 2차 다항 회귀 방식(second order polynomial regression model), 다중 비선형 회귀 방식(multiple nonlinear regression model)의 모델을 제안하였다.

각 회귀 모델에 대하여 회귀식을 확인하였고, 그 회귀식의 예측 데이터와 실제 데이터를 이용하여 회귀 그래프를 비교하였다. 그리고 각 모델의 통계적 유의성을 확인하기 위하여 분산분석을 실시하였고, 그 분산분

석 결과 유의 수준 95 % 이상의 통계적 유의성을 확인 하였다.

그리고 제안된 모델에 대하여 정량적인 분석을 위하여 결정계수와 평균 오차율을 확인 하였다. 3가지 모델의 높은 결정계수를 가지는 것을 확인 하였고, 평균 오차율은 0에 가까운 것을 확인하여 예측 성능이 우수하다는 것을 알 수 있었다.

3가지 제안된 모델은 예측 성능이 모두 우수하였으며, 그 중 예측성능이 가장 우수한 것은 Model II 인 2차 다항 회귀 모델인 것을 알 수 있었다.



5. 공정변수 최적화 기법

5.1 서언

알루미늄의 새로운 소재가 자동차 차체에 적용되기 위해서는 용접성, 성형성 그리고 도장성이 요구된다. 용접성은 용접 후 강도와 밀접한 관계를 가지고 있다. 그리고 산업현장에서 실제 차체에 적용되면 가장 중요한 부분은 생산성이다. 생산성은 용접 속도 및 재료비와 관련이 있다. 그러므로 새로운 소재가 생산라인에 적용되기 위해서 중요한 것은 용접성 및 생산성을 고려해야 한다.

3장의 실험에서 인장 강도를 증가시키기 위하여 레이저 출력을 증가 또는 용접속도를 줄여야 한다. 그러나 레이저 출력을 높이는 것은 한계를 가지고, 용접속도를 줄이는 경우 생산성에 문제를 야기 시킨다. 그러므로 용접성의 증가와 생산성은 상반된 관계를 가진다. 그러므로 용접성과 생산성에 관해 최적화 하여야 한다.

조사각의 경우 3장에서 확인 하였듯이 용접성을 나타내는 인장강도에 영향을 미치는 인자가 아니었고, 생산성과 무관하다.

최적설계는 주어진 제한조건을 만족시키면서 목적함수를 최소화 또는 최대화시키도록 설계변수의 값을 조절함으로써 설계하고자 하는 시스템의 성능을 향상시키는 기술이다.

레이저 가공공정의 생산현장에서 자동화를 위한 최적 설계란 적절한 용접 조건을 설정하는 것이다. 작업자에 의해서 정서적으로 적정 용접 조건을 선정한다면 단순하지만 정확한 최적점을 선정할 수 없다. 그러므로 용접성과 생산성을 나타내는 인자를 정량화하고 이를 이용하여 복잡하지

만 정확한 최적점을 구할 수 있다. 그러므로 본 장에서는 용접성을 나타낼 수 있는 인자로 인장강도를 선택하였고, 생산성을 나타낼 수 있는 인자로 용접속도를 선택하였다. 용접성을 나타내는 인장강도는 4장에서 구한 인장강도 예측모델을 이용하였고, 예측 모델 중에서 가장 예측 성능이 좋은 2차 다항 회귀모델을 사용하였다. 그리고 이 값들은 서로 다른 차수(order)를 가지고 있기 때문에 목적함수(objective function)을 이용하여 표준화(normalizing)을 하였고 각각의 목적 함수에 가중치(weight value)를 곱하여 적합도 함수(fitness function)를 정의하였다.

5.2 목적 함수와 적합도 함수

레이저 가공공정을 최적화하기 위해서는 용접 결과에 맞는 평가지수(performance index)를 정의 하여야 한다. 본 논문에서는 평가 지수로서 적합도 함수를 정의하였다. 적합도 함수에서 용접성을 나타낼 수 있는 인자로 인장강도를 그리고 생산성을 나타낼 수 있는 인자로 용접속도를 선택하였다. 그러나 인장강도와 용접속도는 그 차수가 다르기 때문에 이를 목적 함수를 이용하여 표준화(normalizing)하였다.

식(5-1)은 인장강도에 대한 목적 함수다. Fig. 3.9에서 보는 바와 같이, 전 변수 영역에서 예측된 인장강도의 최소값은 4000 N 과 허용인장강도인 7400 N 을 기준으로 그 구간내의 값을 0에서 1로 할 수 있도록 목적 함수를 정의하였다. 허용인장강도 보다 높은 인장강도로 예측되는 구간에 대해서는 1.4 의 가중치를 줌으로써 그 중요도를 더하였다. 그리고 용접 속도는 빠를수록 생산성이 유리하므로, 용접속도에 대한 목적 함수는 변수 영역 내에 가장 빠른 속도인 5 m/min 은 1 로, 가장 느린 속도

인 3 m/min은 0 이 되도록 식(5-2)와 같이 정의하였다.

$$obj_{TS} = \begin{cases} 1.4 \times \frac{x_{TS} - 4000}{7400 - 4000} & (x_{TS} \geq 7400) \\ 1.0 \times \frac{x_{TS} - 1000}{7400 - 1000} & (4000 \leq x_{TS} < 7400) \\ 0 & (x_{TS} < 4000) \end{cases} \quad (5-1)$$

$$obj_{WS} = \begin{cases} \frac{x_{WS} - 3}{5 - 3} & (3 \leq x_{WS} \leq 5) \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (5-2)$$

여기서 obj_{TS} 는 인장강도의 목적 함수 값이고, obj_{WS} 는 용접 속도의 목적 함수 값이다. 그리고 x_{WS} 는 인장강도와 용접속도에 대한 입력 값이다. 목적 함수를 그래프로 나타내면 Fig. 5.1과 같다.

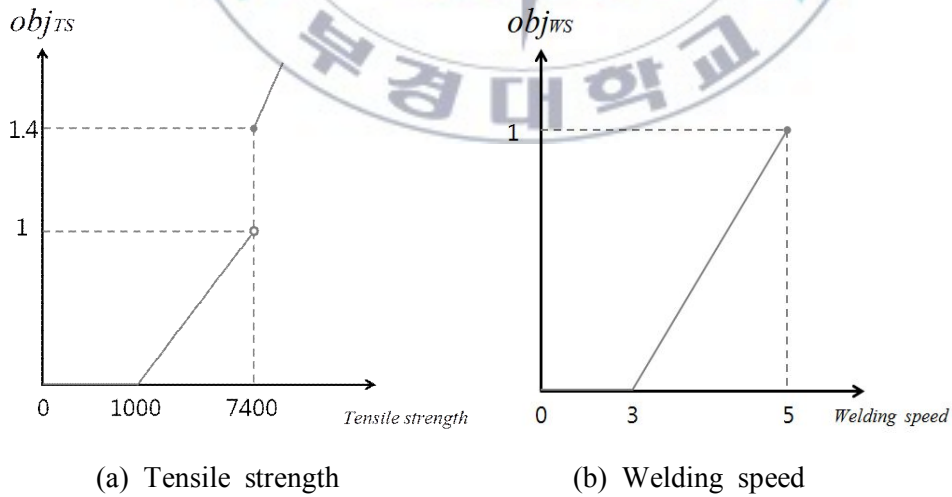


Fig. 5.1 Objective function

용접 조건에 대한 용접 성능을 평가할 수 있는 지수로 적합도 함수를 이용하였다. 적합도 함수는 용접성을 나타낼 수 있는 인장강도에 대한 목적 함수와 생산성을 나타낼 수 있는 목적함수인 용접속도를 이용하여 식(5-3)와 같이 정의 하였다.

$$fitness = (w_{TS} \ w_{WS}) \cdot \begin{pmatrix} obj_{TS} \\ obj_{WS} \end{pmatrix} \quad (5-3)$$

여기서, *fitness*는 적합도 함수의 값을 나타내며, *obj_{TS}*는 인장강도의 목적 함수 값이고, *obj_{WS}*는 용접속도의 목적 함수 값이다. 목적 함수 앞에 있는 배열은 가중치 배열로서 *w_{TS}*와 *w_{WS}*는 각 목적 함수에 대한 가중치의 값을 나타낸다. 본 연구에서는 인장강도에는 70의 가중치를, 생산성을 나타내는 용접속도는 30의 가중치를 두었다.

5.3 최적함수를 이용한 변수 최적화

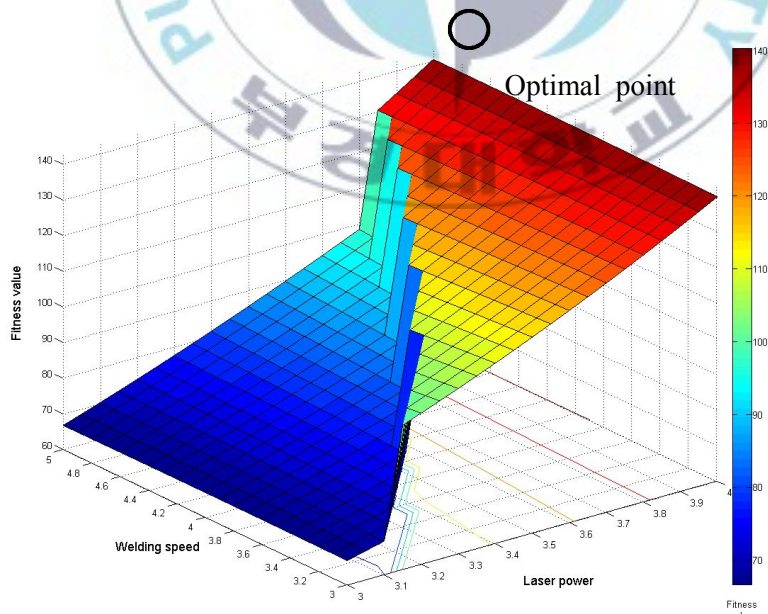
4장에서 예측성능이 가장 뛰어난 ModelⅡ의 다중선형 회귀 모델과 앞장에서 언급한 목적함수, 그리고 적합도 함수를 이용하여 최적 용접 조건을 탐색(search) 하였다.

조사각도가 0° 일 때 인장강도가 8, 16° 일 때보다 가장 낮았기 때문에 조사각이 0° 일 때의 최적화를 하였다. 수치적으로 얻어지는 최적의 공정변수는 레이저 출력이 4 kW 이고 용접속도가 4.6 m/min 이다. 그리고 이때 얻어진 적합도 함수의 값은 140.1 이고 예측되는 인장강도의 값

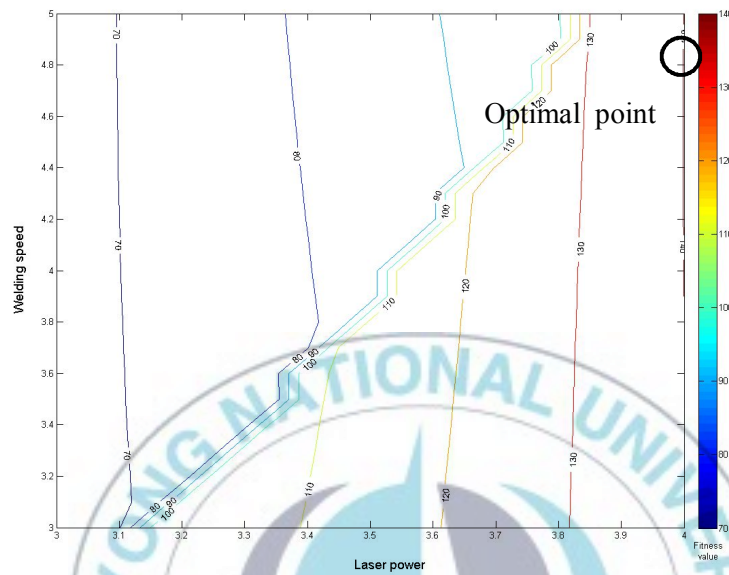
은 8475.21 N 이며 허용인장강도를 만족하였다.

레이저 출력과 용접속도에 대한 적합도 함수값을 표시하면 Fig. 5.2와 같다. Fig. 5.2(a)는 레이저 출력과 용접속도에 대한 적합도 함수 값을 나타낸 것이고, Fig. 5.2(b)의 경우는 적합도 함수값을 등고선(contour)을 표현한 그래프이다. Fig. 5.2(a)에서 보는 바와 같이 탐색 영역내에서 갑자기 증가하는 부분이 있다. 그 이유는 인장강도에서 허용인장강도보다 높을 경우 가중치를 1.4 를 주어 비선형적으로 증가하게 하였기 때문이다. Fig. 5.2(b) 에서도 가중치가 주어지는 부분이 확실하게 나타나졌다.

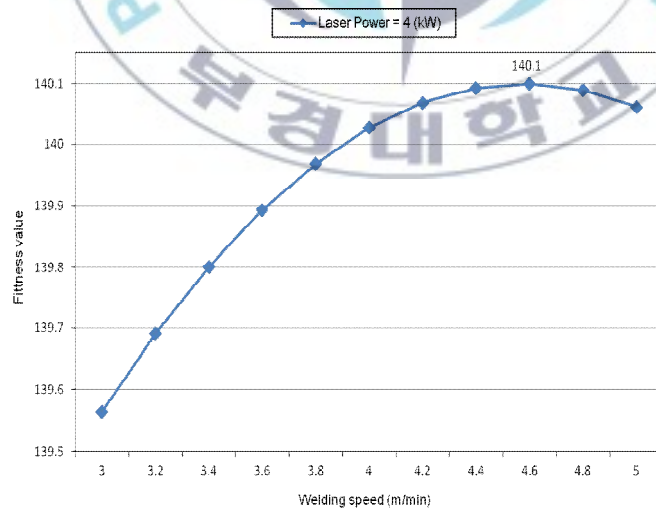
적합도 함수를 살펴본 결과 용접성을 나타내는 인장강도만 살펴 볼 경우 4 kW, 3 m/min 경우에서 가장 높은 인장강도를 확인 할 수 있었다. 하지만 용접성과 생산성을 모두 고려하였을 경우 4 kW, 4.6 m/min 이라는 최적점을 구하였다.



(a) Surface of fitness value



(b) Contour of fitness function



(c) When the laser power output 4kW, Fitness function

Fig. 5.2 Fitness function in numerical search method

5.4 결론

본 장에서는 4장에서 구한 공정 모델을 이용하여 자동화를 위한 용접 공정변수를 최적화 하였다. 최적점은 용접성과 생산성을 고려하여 용접 조건에 대한 적합도 함수를 정의 하였다. 용접성을 나타내는 인장강도와 생산성을 나타내는 용접속도를 인자를 두었고, 4장에서 구한 공정 모델 중 예측이 가장 뛰어난 Model II인 2차 다항 회귀 모델을 선택하였다. 각각의 인자를 표준화하기 위하여 목적 함수를 정의하였고, 각각의 목적 함수 값에 가중치를 곱하여 적합도 함수를 정의하였다. 용접성과 생산성을 모두 고려한 최적 공정변수는 레이저 출력이 4 kW 이고 용접 속도가 4.6 m/min 이다. 이때의 적합도 함수의 값은 140.1 이고 예측된 인장강도의 값은 8475.21 N 이다. 그리고 레이저 출력과 용접속도를 이용하여 적합도 함수 값을 직접 표현하였으며, 적합도 함수를 연결한 등고선 그래프도 나타내었다.

6. 결론

본 논문에서는 원격 스캐너를 이용한 알루미늄 레이저 가공공정에서 생산 공정을 자동화하기 위하여 용접공정 모델링하고, 최적 용접 조건을 구하였다.

차량 경량화에 사용되는 알루미늄 판재의 레이저 가공에서 알루미늄 5J32 합금의 겹치기 용접을 실시하였으며, 공정변수에 따른 용접성 및 모재사이의 갭(gap)에 따른 용접성을 확인 하였다. 우선 레이저 출력이 높고 용접속도가 낮은 경우 인장강도가 높게 나타났다. 모재에 대한 입열량이 많아 인장강도가 높게 나타난 것으로 확인 되었으며 용접성을 보기위하여 외관부 및 단면부를 확인하였고, 단면부에서 기공의 발생원인도 파악하였다. 그리고 입열량이 충분한 경우 허용 인장강도인 7400 N 을 만족 하였고, 9000 N 이상일 경우 용접부 파단이 발생하였다. 또한 인장강도에 영향을 미치는 공정변수를 확인하기 위하여 분산분석을 실시 하였다. 분산 분석결과 레이저 출력과 용접속도가 인장강도에 영향을 미치는 요인이며, 레이저 출력과 용접속도에 대한 교호작용도 있었다. 그리고 모재 사이의 갭(gap)의 크기에 따른 용접 특성 평가를 실시하였다. 용접 공정 변수에서와 마찬가지로 기공의 발생을 확인 할 수 있었고, 용접부 파단은 9000 N 이하일 경우에도 발생을 하였는데 그 이유는 모재 사이의 갭(gap)에 용융된 금속이 채워져 인장강도에 영향을 주었다. 그리고 갭(gap)이 커질수록 인장강도는 상면 비드의 언더필(fill)에 의해 인장강도는 오히려 감소하였다. 그러므로 산업현장에서 사용시 갭(gap)에 유의하여야 한다. 그리고 분산분석을 실시한 결과 레이저 출력,

용접속도, 갭(gap)이 인장강도에 영향을 미치는 요인으로 나타났다.

레이저 가공공정에서 공정변수를 이용하여 인장강도를 예측할 수 있는 모델을 제안하였다. 제안된 모델은 다중 선형 회귀모델, 다항 선형 회귀 모델, 다중 비선형 회귀 모델을 제안하였다. 각 모델은 분산분석에 의해 통계적으로 유의함을 알 수 있었다. 또한 결정계수 및 평균 오차율을 이용하여 정량적으로 예측성능을 비교하였다. 본 논문에서 제안한 3가지 모두 예측성능이 우수하였지만 그 중 다항 선형 회귀모델이 결정계수 0.92, 평균오차율 0.058 로 가장 예측성능이 뛰어난 것을 확인 할 수 있었다.

공정 모델을 이용하여 자동화를 위한 공정변수를 최적화 하였다. 최적 점은 용접성과 생산성 모두를 고려하였다. 최적화 방법으로는 용접성을 나타내는 인장강도와 생산성을 나타내는 용접속도의 목적함수를 이용하였고, 가중치를 주어 적합도 함수를 정의 하였고 적합도 함수를 최대화 할 수 있는 점을 나타내었다. 레이저 출력 4 kW, 용접 속도 4.6 m/min 의 경우 적합도 140.1, 예측 인장강도는 8475.21 N 이다.

REFERENCES

1. G. Mathers, "The welding of aluminum and its alloys", Woodhead Publishing Ltd, 2002
2. 이호인, 한요섭, 김도향, 김원태, “알루미늄 응용기술의 이해와 활용”, 한국철강신문, 2005
3. S.Katayama, A.Matsunawa, "Applications of Laser in Welding", International Symposium on Combustion Engine and Marine Engineering, Vol. 37, No. 3 pp.17-24, 2003
4. S. Katayama, "Effect of welding defects on mechanical properties, deformation and fracture of laser welds", Journal of Light Metal Welding & Construction, No37,pp.12-18, 1999
5. M. Naeem and R. Jessett, "Aluminum tailored blank welding with and without wire feed using high power continuous wave Nd:YAG laser", SAE Conference Proceedings P, No.334, pp.247-256,1998
6. 김기철, 차준호, 이조영, “자동차용 알루미늄도금 강판의 용접성”, 대한용접·접합학회 특별강연 및 학술발표대회, No.5, pp.102-104, 2003

7. Hee-Shin Kang, Jeong Suh and Taik-Dong Cho, "Study on robot application technology for laser welding", International Conference on Smart Manufacturing Application, pp.354-356, 2008
8. Jeong Suh, Mun-Yong Lee, Beong-Hun Jung, Mun-jong Song, Hie-Sin Kang and Jeong-O Kim, "Remote welding components using CO2 laser and scanner", Journal of KWJS, Vol.26, No.5, pp.506-509, 2008
9. 강희신, 서정, 이제훈, "3차원 레이저 용접시스템 개발", 한국 정밀공학회 춘계 학술발표대회 논문집, pp. 932-935, 2005
10. 정병훈, 이문용, 서정, 강희신, "자동차 차체 3차원 레이저 용접기술 개발", 대한용접학회 춘계 학술발표 대회, pp. 103-105, 2005
11. P. K. Palani, N. Murugan, "Optimization of weld bead geometry for stainless steel claddings deposited by FCAW", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 190, pp.291-299, 2007
12. Y.W.Park, S.Rhee, "Estimation of weld bead size in CO2 laser welding by using multiple regression and neural network", Vol. 22, No. 7, pp. 27-37, 2005
13. 김도훈, "레이저 가공학", 경문사, 2005

14. “대한 용접·접합 편람 I”, 대한용접·접합학회
15. “대한 용접·접합 편람 III”, 대한용접·접합학회
16. E.Kannatey-Asibu, "Principles of laser materials processing", WILEY, 2009
17. 박성현, 김종욱, “MINITAB을 활용한 현대실험계획법”, 민영사, 2011
18. 박성현, “현대실험계획법”, 민영사, 2009
19. Douglas Montgomery, "Design and Analysis of Experiments, ", 7th Edition, Wiley, 2009
20. 문영상, 하은호, “회귀분석(SPSS시리즈 3)”, 민영사, 1999
21. J. S. Arora, "Introduction to optimum design", 2nd Edition, Elsevier Academic Press, 2004
22. E. K. PChong and S. H. Zak, "An introduction to optimization", John Wiley & Sons, Inc., 2001

23. P. Venkataraman, "Applied optimization with Matlab programming", John Wiley & Sons, Inc, 2002
24. Y. H. Chung, "Aluminum alloy products for automobile use," Journal of Korea Society of Automotive Engineers (KSAE), Vol. 18, No. 5, pp. 38-52, 1996
25. S. Tsukamoto, I. Kawaguchi, G. Arakane, and H. Honda, "Development of high power CO₂ laser welding process", Journal of the Science and Technology of Welding & Joining, Vol. 6, No. 6, pp. 363-367, 2001
26. J. H. Kim, D. H. Park. "Porosity in thick Aluminum alloy welds," Journal of the Korean welding Society, Vol. 12, pp. 7-15, 1994
27. 윤종원, "알루미늄 합금의 레이저 용접", Journal of KWS, Vol.18, No.2 pp.147-152
28. Moriaki Ono, Yukio Shinbo, Akihide Yoshitake and Masanori Ohmura, "Development of Laser-arc Hybrid Welding", NKK Tech. Rev. NO.86 pp. 8-12, 2002
29. Y.W.Park and S.Rhee, "Development of statistical model for line width estimation in laser micro material processing using optical sensor", Journal

of Korean Society of Precision Engineering, Vol.22, No.7, pp.27-37, 2005

30. Song,G.Y, Moon,H.Y, Park,B.G, Kim,S.C and Lee,E.S "A Study on the tool temperature estimation for different cutting conditions in turning using a statistical method", Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol.19, No.11, pp.96-102, 2002



The Weldability Evaluation and Optimization
Parameters Design in Aluminum Laser
Welding using Remote Scanner

Kim, Dongyoon

*Department of Manufacturing Automation Engineering,
Graduate School of Pukyong National University*

ABSTRACT

The latest trends of vehicle technology development are fuel efficiency improvement, body designs declining air resistance and lightweight of materials. Especially, as lightened weight of materials makes engine efficient so that vehicles keep the best performance, it is the best way to protect the environment and reduce fuel consumption. In this study, we conducted laser welding by using 3-dimension remote scanner that is 5J32 aluminium alloy. Furthermore, conduction experiment that was 3 times repeated for changing factors such as observing angle, laser power and welding speed. we observed

exterior and cross section of welded part and tensile strength. When increasing laser power and decreasing laser speed, tensile strength increased. In order to evaluate factors that affect tensile strength qualitatively we conducted ANOVA. We assumed that the factors are observing angle, laser power and welding speed. Then we found that laser power and laser speed affect tensile strength. We conducted evaluation of weldability of aluminium alloy by above ways and confirmed the prediction model for the tensile strength using regression analysis. The method of prediction models for nonlinear regression model and linear regression model was used. And we have used to compare the predictive performance the coefficient of determination and average error rate

In order to apply to industry should be considered to weldability and productivity. If good weldability is reduced productivity and increasing productivity occur problems to weldability. Therefore, optimization is required for weldability and productivity. The tensile strength indicating weldability and welding speed indicating productivity optimized using Fitness value.

감사의 글

처음 지능형 용접 및 자동화 실험실에 들어올 때도 지금과 같은 추운 겨울이었습니다. 그렇게 2년의 시간이 지나 벌써 이렇게 근사한 졸업논문을 쓰게 되었습니다. 때로는 엄격하게 때로는 저를 위로해주시고 다그쳐 주신 박영환 교수님께 정말 고맙고, 교수님의 등을 보고 열심히 한다고 하였는데 항상 부족한 것 같아 죄송합니다. 그래도 교수님 덕분에 저의 길을 알게 되고 따뜻한 곳에서 공부를 할 수 있어서 감사합니다. 교수님 저 꼭 큰 사람 되겠습니다.^^

그리고 부족한 저의 논문의 심사를 도와주신 진인태 교수님과 김태완 교수님께도 감사하며, 광재섭 교수님과 강대민 교수님께도 부족한 저를 가르쳐 주셔서 고맙습니다.

실험을 도와준 생기원의 김기철 박사님과 인성이 형님, 안영남씨, 현준이, 기배에게도 감사하며 동의대 박영도 교수님과 철영이 형님, 상민이 형님 그리고 동의대 사람들에게도 감사합니다.

우리 석사 동기들 덕분에 즐겁고 신나게 생활을 하였습니다. 항상 나에게 동생이상으로 생각해준 경도 형님 고맙습니다. 박사 생활 열심히 하고... 결.. 혼... 해야죠. 한성이가 먼저 갔어요.^^ 경도 형님 덕분에 즐거웠습니다. 다음으로 우리 집 둘째 태희. 고맙다. 태희야. 부족한 형님 챙기랴. 욕하랴. 바뻐지? 그래도 니가 내 잘 챙겨줘서 내가 빨리 학교생활에 적응한 거 같애. 막 내랑 싸우지 말고 연락 자주 하자. 내가 일부러 니 전화 안 받고 한 건 아냐. 그리고 나의 절친(?) 창민아. 항상 니한테는 신경질만 부린거 같노? 미안. 그래도 넌 몸도 넓고 맘도 넓으니 이해... 해주겠지. 이제 유부남인 한성이. 넌 잘 살고 꼭 너 닮은 자식 나아서 이쁘게 잘 키워. 2년간 웹하드 잘 썼다. 그리고 동철이 밥 먹는데 잘 안 불려서 미안. 자꾸 까먹드라고. 일부러 그런건 아냐. 그리고 상어는 잡았냐? 다 잘 될거야. 아무튼 우리 석사 동기 졸업 후에도 항상 건강하고 자주 연락하고 자주 보도록 하자. 다음으로

우리 실험실 동생들. 영호야 열심히 하고 내 잘 따라줘서 고마워. 지금도 옆에서 낄낄한다고 고생이 많다. 열심히 해라. 열심히. 내보다 더 열심히 해라. 그리고 성현이 STX 붙었어야 되는데 내년에는 더 좋은데 같거야. 성현이 괴롭히는게 재미었는데... 우리 집 막내 민경이 항상 생각만 많아서.... 항상 넓게 생각하고 천천히 행동해도 될거야. 넌 부지런하잖아. 내년부터는 맘 단디 먹고 다시 열심히 공부합시다. 둘째 영아랑 싸우지 말고... 그리고 우리 실험실 막내 윤정이 너도 이제 4학년이구나. 해외 여행준비 잘해서 잘 갔다 오고, 취업 준비 잘해. 여튼 영호 많이 도와주고 석사 오는 친구도 많이 도와줘서 우리 실험실이 더욱 발전해야 된다.

그리고 나의 정인희, 친우회 친구들과 동규, 현우, 준호에게도 너무 감사하고 하는 일 다 잘 되기를 바라며, 영원했으면 좋겠구나. 다들 멀리 있지만 자주 연락하고 자주 만나도록 하자. 하고 싶은 말과 고마운게 많은데 말로 다 표현할 수가 없는 나의 심정 이해해라...

마지막으로 불효자인 아들 믿고 따라주신 아버지, 어머니께 너무 감사하고 사랑합니다. 그리고 저의 식구들에게도 문난 조카 잘 보살펴주어 감사하게 생각합니다. 이 모든 분들께 이 논문을 받칩니다.

2011년 12월 27

김 동 윤