



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

780MPa급 강재의 저항 점 용접

시뮬레이션 및 공정 변수

최적화에 대한 연구



2014년 2월

부경대학교 대학원

기계공학과

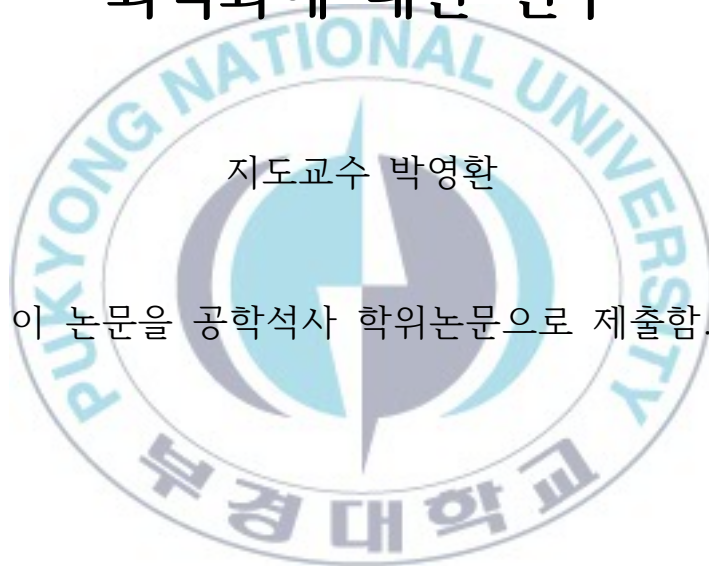
손창석

공학석사 학위논문

780MPa급 강재의 저항 점 용접
시뮬레이션 및 공정 변수
최적화에 대한 연구

지도교수 박영환

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.



2014년 2월

부경대학교 대학원

기계공학과

손창석

손창석의 공학석사 학위논문을 인준함

2013년 12월 11일



주심 공학박사 강 대 민 ①

위원 공학박사 김 태 완 ①

위원 공학박사 박 영 환 ①

목 차

Nomenclature	iii
List of tables	v
List of figures	vii
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구현황	3
1.2.1 초 고강도강에 대한 저항 점 용접	3
1.2.2 용접 공정변수 최적화	3
1.3 연구내용	4
제 2 장 이론적 배경	6
2.1 저항 점 용접	6
2.1.1 저항 점 용접 이론	6
2.1.2 저항 점 용접 주요 공정변수	10
2.1.3 스파터 발생 메커니즘	11
2.1.4 로브 곡선	12
2.2 저항 점 용접 시뮬레이션 프로그램	14
제 3 장 저항 점 용접 시뮬레이션	17
3.1 시뮬레이션 조건	17
3.1.1 시뮬레이션 모델링 및 재료	17
3.1.2 저항 점 용접 시뮬레이션 조건	19
3.2 시뮬레이션의 신뢰성	20

3.3 저항 점 용접의 너겟 형성 메커니즘	22
3.3.1 용접 공정변수에 따른 너겟 형성 메커니즘	22
3.3.2 재료에 따른 너겟 형성 메커니즘	25
3.4 용접부 인장전단강도	28
 제 4 장 로브 곡선 예측 모델	33
4.1 인장전단강도 예측모델	33
4.1.1 회귀모델	33
4.1.2 변수 선택에 의한 최적회귀모델	39
4.1.3 회귀모델의 통계적 유의성	41
4.2 스패터 예측모델	42
4.2.1 신경 회로망	42
4.2.2 스패터 예측	44
4.3 적정용접구간 예측모델	47
 제 5 장 공정변수 최적화	51
5.1 목적함수 및 적합도 함수	51
5.2 적합도에 따른 최적화	54
5.3 적정용접구간 예측모델의 최적점	60
 제 6 장 결 론	61
 Reference	62
Abstract	66
감사의 글	68

Nomenclature

A	: cross section of conductor	[mm ²]
F_E	: electrode force	[N]
F_N	: force of the molten metal	[N]
i	: data number	
I	: welding current	[A]
k	: thermal conductivity	
L	: length of conductor	[mm]
n	: total data number	
obj_{TTS}	: objective function value for tensile shear strength	
obj_{WC}	: objective function value for welding current	
obj_{WT}	: objective function value for welding time	
obj_{SP}	: objective function value for spatter	
P	: internal pressure of the molten metal	[Pa]
Q	: heating value	[J/mm ²]
R	: electric resistance	[Ω]
R^2	: coefficient of determination	
t	: welding time	[cycle]
T	: temperature	[K]
T_0	: temperature at the interface	[K]
w_{TTS}	: weight value for objective function of tensile shear strength	
w_{WC}	: weight value for objective function of welding current	
w_{WT}	: weight value for objective function of welding time	
w_{SP}	: weight value for objective function of spatter	

x_1	: welding current of regression model	
x_2	: welding time of regression model	
x_3	: electrode force of regression model	
x_4	: material of basemetal I of regression model	
x_5	: material of basemetal II of regression model	
x_6	: thickness of basemetal I of regression model	
x_7	: thickness of basemetal II of regression model	
x_{TTS}	: input variable for tensile shear strength in objective function	
$x_{TTS,A}$	: input variable for acceptable tensile shear strength in objective function	
x_{WC}	: input variable for welding current in objective function	
x_{WT}	: input variable for welding time in objective function	
y	: tensile shear strength by simulation	[kN]
$\hat{y}$	: tensile shear strength value through estimation model	[kN]
β_0	: intercept of y-axis	
$\beta_1 \sim \beta_{77}$	: coefficient of regression model	
ρ	: specific resistance of conductor	
ρ_1, ρ_2	: specific resistance of the material	
$\rho_{contact}$	: contact resistance	
$\rho_{contaminant}$	: resistance by contamination of contact surface	
σ_n	: contact normal stress at the interface	
σ_{s_soft}	: metal stress of weak hardness	

List of tables

Table 1.1 Changes in automobile materials	2
Table 3.1 Chemical composition	18
Table 3.2 Steel sheets and combination of simulation	19
Table 3.3 Simulation conditions	20
Table 3.4 Acceptable tensile shear strength	30
Table 3.5 Tensile shear strength of DP780 1.0t steel sheets	30
Table 3.6 Tensile shear strength of DP780 1.4t steel sheets	31
Table 3.7 Tensile shear strength of DP780 1.0t and 1.4t steel sheets	31
Table 3.8 Tensile shear strength of DP780 and SPRC440 1.0t steel sheets	32
Table 3.9 Tensile shear strength of DP780 and DP590 1.0t steel sheets	32
Table 4.1 Coefficients for Model I (multiple linear regression model)	34
Table 4.2 Coefficients for Model II (second order polynomial regression model)	34
Table 4.3 Coefficients for Model III (multiple nonlinear regression model)	35
Table 4.4 Coefficient of determination and average error rate for model I ~ III	37
Table 4.5 Coefficients for Model IV (Stepwise regression model)	40
Table 4.6 ANOVA for Model I (multiple linear regression model)	41

Table 4.7 ANOVA for Model II (second order polynomial regression model)	42
Table 4.8 ANOVA for Model III (multiple nonlinear regression model)	42
Table 4.9 ANOVA for Model IV (stepwise regression model)	42
Table 4.10 Spatter prediction result of DP780 1.0t steel sheets	45
Table 4.11 Spatter prediction result of DP780 1.4t steel sheets	45
Table 4.12 Spatter prediction result of DP780 1.0t and 1.4t steel sheets	46
Table 4.13 Spatter prediction result of DP780 and SPRC440 1.0t steel sheets	46
Table 4.14 Spatter prediction result of DP780 and DP590 1.0t steel sheets	47
Table 4.15 Acceptable welding range prediction result of DP780 1.0t steel sheets	48
Table 4.16 Acceptable welding range prediction result of DP780 1.4t steel sheets	48
Table 4.17 Acceptable welding range prediction result of DP780 1.0t and 1.4t steel sheets	49
Table 4.18 Acceptable welding range prediction result of DP780 and SPRC440 1.0t steel sheets	49
Table 4.19 Acceptable welding range prediction result of DP780 and DP590 1.0t steel sheets	50
Table 5.1 Optimal point at acceptable welding range prediction result	60

List of figures

Fig. 2.1 Resistance and temperature during resistance spot welding	9
Fig. 2.2 Dynamic resistance for welding cycle	9
Fig. 2.3 Major forces acting on the weldment during welding	12
Fig. 2.4 Weld current- weld time lobe curve	13
Fig. 2.5 Electrical resistance model of resistance spot welding	16
Fig. 3.1 Mesh of steel sheet and electrode for numerical simulation	18
Fig. 3.2 Setting of simulation conditions	18
Fig. 3.3 Nugget diameter and cross section of DP780 1.0t steel sheets	21
Fig. 3.4 Nugget diameter and cross section of DP780 1.4t steel sheets	21
Fig. 3.5 Nugget diameter and cross section of DP590 1.0t steel sheets	21
Fig. 3.6 Temperature distribution in welding time 21cycle and force 300kgf	23
Fig. 3.7 Temperature distribution in welding time 21cycle and current 7kA	24
Fig. 3.8 Change in resistance with time by materials combination ..	26
Fig. 3.9 Change in temperature with time by materials combination	27
Fig. 3.10 Change in Molten volume with time by materials combination	27

Fig. 4.1 Estimation results of Model I (multiple linear regression model)	37
Fig. 4.2 Estimation results of Model II (second order polynomial regression model)	38
Fig. 4.3 Estimation results of Model III (multiple nonlinear regression model)	38
Fig. 4.4 Estimation results of Model IV (stepwise regression model)	40
Fig. 4.5 Neural network model for spatter estimation	44
Fig. 5.1 Objective function	53
Fig. 5.2 Optimal point of DP780 1.0t steel sheets	55
Fig. 5.3 Optimal point of DP780 1.4t steel sheets	56
Fig. 5.4 Optimal point of DP780 1.0t and 1.4t steel sheets	57
Fig. 5.5 Optimal point of DP780 1.0t and SPRC440 1.0t steel sheets	58
Fig. 5.6 Optimal point of DP780 1.0t and DP590 1.0t steel sheets	59

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

지난 수십 년간 자동차 업계에서 저항 점 용접 공정은 차체를 접합하기 위한 핵심 공정으로 각광받아 왔으며, 보통 차체 한 대당 3000에서 5000타점의 용접이 이루어지고 있다. 최근 화석연료 고갈 및 환경오염 문제가 대두되면서 환경오염에 대한 규제가 강화되었고, 각 국에서는 2025년 탄소배출량 감축목표의 달성을 위해 완성차업체에게 40 % 이상의 연비 개선을 요구하고 있다.

이러한 연비 개선의 방안으로 자동차 경량화를 진행하고 있다. 자동차의 경량화를 위해 크게 3가지의 방법이 있으며, 첫째는 기존 차체에 적용되는 소재의 무게를 줄이는 방법, 둘째 성형 및 가공기술을 개발하는 방법, 셋째 기존 부품의 형태를 최적화 설계하는 방법으로 분류된다. 이 중 첫 번째 차체의 무게를 줄이는 방법이 자동차 중량절감에 가장 효율적이며 경량화는 엔진 효율을 극대화하여 연료 절감에 가장 적합한 방법이다. 차체의 경량화를 위하여 저 중량인 알루미늄 합금이나 마그네슘 합금과 같은 가벼운 소재나 강도가 높은 고강도의 강재를 사용하여 두께를 줄여 중량을 줄이는 방법 등이 있다.

이러한 자동차 차체의 경량화를 위한 많은 소재가 개발되고 있으며, 차체에 적용되고 있다. 2007년 Ducker Worldwide에서 북미 소형차량에 적용된 자동차용 소재 중량 분석 결과, 1975년에는 연강판이 55.9 %, 기존의 고강도강이 3.6 %, 알루미늄 등 비철금속이나 플라스틱이 9.8 % 를 점유하였으며, 2007년에는 연강판이 43.1 % 로 12.8 % 나 감소하였고 고강도강이 11.9 % 로 8.3 % 증가하였으며 비철 금속이나 플라스틱이 20.4 % 로 10.6 % 증가하였다고 한다. 기존에는 고강도 강판이 많이 사용되었으나, 경량화 및 충돌안전성에 대한 요구가 더욱 강화되고 있기 때문에 초 고강도강(AHSS, Advaned High Strength Steel)의 사용이 증가할 것이라고 예측하고 있다[1][2].

Table 1.1 Changes in automobile materials [1]

material (lbs)	1975	2005	2007	2015	variation
Mild Steel	2,180	1,751	1,748	1,314	866 ↓
HSS	140	324	334	315	175 ↑
AHSS	-	111	149	403	403 ↑
Other Steels	65	76	76	77	12 ↑
Iron	585	290	284	244	341 ↓
Aluminum	84	307	327	374	290 ↑
Magnesium	-	9	9	22	22 ↑
Other Metals	120	150	149	145	25 ↑
Plastic/Composites	180	335	340	364	184 ↑
Other Materials	546	629	634	650	104 ↑
Total Pounds	3,900	3,982	4,050	3,908	8 ↑

초 고강도강은 TS x EI 값이 25,000 MPa·% 보다 낮은 강도를 가지며 변태조직을 제어함으로써 강도가 확보되는 강재를 말하며, DP(Dual phase)나 TRIP(Transformation Induced Plasticity)강이 이에 속한다[2]. 이러한 강들은 성형성 및 강도가 높은 장점을 지니고 있어 자동차용 강재로 적용되고 있다. 이렇게 개발되고 있는 다양한 강재들을 자동차 차체에 적용하기 위하여 아크 용접이나 레이저 용접 및 저항 점 용접 등을 많이 사용하고 있다. 그 중 저항 점 용접을 가장 많이 사용하고 있으며, 새로운 강재에 대한 적정용접조건을 선정하는 것이 매우 중요하다. 하지만 이러한 새로운 강재에 대한 적정용접조건 데이터 베이스를 확보하기에는 시간 및 비용이 많이 든다는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 자동차 차체 경량화를 위한 자동차 차체에 적용되는 AHSS급 강재를 저항 점 용접 시뮬레이션을 이용하여 강재에 대한 저항 점 용접성을 평가하고 적정용접조건인 로브곡선을 제시하고자 한다. 또한 저항 점 용접 공정 변수에 대한 용접특성을 파악하고, 다양한 모델을 이용하여 용접부의 품질을 예측하고자 한다. 또한 예측 모델을 적용하여 용접성 및 생산성을 고려한 최적 용접 공정변수를 도출하고자 한다.

1.2 연구현황

1.2.1 초 고강도강에 대한 저항 점 용접

현대 산업의 발전으로 인하여 제품의 생산은 고속화를 이루었고, 이러한 산업의 발전에 따라 자동차의 생산 또한 고속화 및 대량생산을 이루었다. 이러한 자동차 생산의 고속화 및 대량생산을 이루기 위하여 저항 점 용접공정은 필수불가결한 공정요소이다.

하지만 새로운 자동차용 강재인 AHSS는 기존에 사용되던 강재보다 탄소나 기타 비저항이 큰 원소들이 많이 함유하고 있어 모재의 고유저항이 크고 이로 인해 적정용접구간이 저 전류대로 이동하는 경향을 보이며, 또한 강도가 크기 때문에 스패터를 줄이기 위하여 기존보다 높은 가압력과 낮은 용접전류가 요구된다[3].

DP강의 경우 Si함유량이 증가할수록 강도를 향상시킨다고 알려져 있으며 연신을 역시 향상된다고 알려져 있다[4]. 이에 따라 Si의 함유량이 저항 점 용접부에 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위하여 Kong[5] 등은 DP강의 성분 중에 Si의 함유에 따라 너겟 직경 및 전기저항이 어떻게 변하는지에 대하여 연구를 하였다. Si의 함유량이 늘어날수록 전기저항이 증가한다는 것을 확인하였다. Pouranvari[6]는 DP강에 대하여 계면파단이 일어나는 문제점을 용접공정변수인 용접전류, 용접시간, 전극 가압력의 영향에 대하여 연구하였다. 또한, Khan[7] 등은 AHSS급 강재의 저항 점 용접부에 대한 미세 조직 및 기계적 특성을 연구하였고, Tapan[8]은 DP780 강판에 대한 저항 점 용접부에 대하여 마이크로 경도시험, 인장 전단 시험, 피로 시험 등을 실시하여 용접특성을 파악하였다. Weber[9] 등은 AHSS급 아연도금 강판 및 비도금 강판에 대하여 공정변수에 따른 용접성 로브를 연구하였다.

이와 같이 발표된 논문은 주로 재료학적인 측면에서 접근한 연구가 주류를 이루고 있으며, 본 논문에서는 기계학적인 측면에서 DP780의 저항 점 용접특성을 분석하고자 한다.

1.2.2 용접 공정변수 최적화

초 고강도강은 기존의 연강판에 비해 로브영역이 좁고 저 전류를 요하기 때문에

용접 공정변수를 잘 선정하는 것이 매우 중요하다. 이러한 용접공정변수는 저항 점 용접에서 일반적으로 용접성 로브를 이용하여 적정용접조건을 설정하고 있다 [10][11]. 하지만 적정용접조건 내에서 작업자가 임의로 용접공정변수를 선택한다면 간편하지만 정확한 최적점을 선정하기에는 어려움이 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 용접조건을 최적화하는 과정이 필요하고, 용접 주요공정변수에 대한 예측 모델이 필요로 하며 예측 모델링을 통하여 용접조건을 최적화하는 과정이 필요하다. 이러한 예측 모델링을 위해 Hong[12] 등은 저항 점 용접의 용융부를 신경 회로망과 회귀모델을 사용하여 예측하였다. 또한 Muhammad[13]은 중심합성계획법을 이용하여 용접 공정변수를 설계하고 회귀식을 이용하여 너겟 및 열영향부(HAZ)를 예측하여 하였다. 한편, 용접조건을 최적구간을 유추하기 위하여 인공 신경망으로 적정구간을 트레이닝 시키고 예측모델의 성능을 평가한 연구도 발표되었다[14].

또한 최적화를 위하여 Han[15]은 인공지능형 알고리즘인 유전 알고리즘(Genetic algorithm)을 이용하여 이종강재에 대한 용접 공정변수를 최적화하였으며, Park[16]은 반응표면분석법으로 최적화를 진행하였다.

1.3 연구 내용

본 논문에서는 DP780의 저항 점 용접의 너겟 형성 메커니즘 및 조합에 따른 적정용접구간을 도출하기 위해 저항 점 용접 시뮬레이션을 진행하였으며, 저항 점 용접에서 용접성에 해당하는 인장전단강도를 회귀모델로써 예측하고, 또한 스패터를 신경회로망을 이용하여 예측하였다. 이러한 두 가지 모델을 통해 적정용접조건구간인 로브곡선을 예측하였다. 또한 적합도 함수를 정의하여 각 공정변수에 대하여 적합도를 판단하고, 용접성 및 생산성을 모두 만족하는 최적의 용접 공정변수를 제시하였다.

2장에서는 저항 점 용접의 원리와 점 용접의 주요 공정변수들이 용접부에 미치는 영향에 대하여 기술하였으며, 스패터의 발생 메커니즘 및 저항 점 용접 시뮬레이션에 대하여 서술하였다. 3장에서는 저항 점 용접 주요 공정변수인 용접 전류,

용접 시간, 전극 가압력에 따른 용접부의 너겟 형성 메커니즘을 알아보았고, DP780에 대한 동종 재료 및 이종 재료, 이종 두께 조합에 대한 용접특성을 알아보았다. 또한 로브 곡선의 왼쪽 경계선을 너겟 지름이 아닌 인장전단강도를 기준으로 함으로써 보다 정량적인 기준을 제시하였고, 인장전단강도를 기준으로 한 로브 곡선을 사용하여 적정용접조건의 범위를 도출하였다. 4장에서는 용접부의 품질과 관련되는 인장전단강도를 회귀모델을 이용하여 예측하였으며, 또한 스파터 여부를 신경 회로망의 모델을 이용하여 예측하였다. 이 두 가지 모델을 이용하여 적정용접 구간을 예측하였다. 5장에서는 4장에서 구해진 모델들을 이용하여 최적화를 수행하였으며, 용접성 및 생산성을 모두 고려하여 최적의 용접 공정변수를 제시할 수 있었다.



제 2 장 이론적 배경

2.1 저항 점 용접[17][18][19]

2.1.1 저항 점 용접 이론

점 용접이 실용화 된 것은 1900년경 미국의 Hamad에 의해 점 용접기가 발명되면서부터이다. 초기에는 주방용품인 냄비 손잡이에 사용하던 리벳을 대신하여 사용하였다. 그 후 2차 세계대전 중에 항공기, 자동차 및 기타 군수품과 무기 등의 대량생산의 필요성으로 리벳 대신 저항 점 용접을 적용하는 것이 진행되었고 지금까지 발전해 나아가고 있다.

저항 점 용접은 전극을 이용하여 판재를 고정시키고, 전류를 흐르게 하여 판재 내부에서 발생한 저항열에 의해 판재의 접합면을 용융시키고 압력을 가해 접합부를 형성하는 공정이다. 일반적으로 저항 용접공정은 통전시간이 매우 짧아 생산성이 높기 때문에 생산 현장에서 널리 사용되고 있다.

저항용접에서 저항열이 매우 중요한 역할을 하며, 도체에 전류가 흐르는 경우에 발생하는 저항열은 전류의 제곱에 비례한다. 식으로 표현하면 식(2.1)과 같다.

$$Q = I^2 R t \quad (2.1)$$

여기서, Q 는 발열량, I 는 용접전류, R 는 전기 저항, t 는 통전시간이다.

위 식에 포함되어 있는 전기저항 R 은 용접재료의 벌크 저항(bulk resistance) 뿐만 아니라 전극을 포함하여 저항용접 장치의 2차 회로 전체 저항을 나타낸다. 또한, 식(2.1) 의 전기저항 R 은 재료의 비저항(resistivity), 단면적 및 길이의 영향을 받으며 식(2.2) 와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = I^2 \left(\frac{\rho L}{A} \right) t \quad (2.2)$$

여기서, ρ 는 도체의 비저항, L 는 도체의 길이, A 는 도체의 단면적이다.

위의 식에서 저항열은 전류의 제곱에 비례하고, 저항과 전류를 흘린 시간인 통전시간에 비례한다. 전류가 흐르는 부위의 단면적이 작을수록 발열량이 증가하기 때문에 동일한 전류로 용접하는 경우에도 통전경로의 단면적이 감소하면 전류 밀도가 증가하는 효과를 얻을 수 있다.

저항열에 의해 용접재 내부의 온도가 증가하며, 용접재 내부의 온도분포는 용접재 간의 계면인 중심부에서 최대 온도가 발생한다. 용접재 간의 계면에서 온도가 높은 것은 계면에서 접촉저항이 높기 때문이며, 온도 분포는 용접재의 재질과 두께, 전극의 재질과 형상에 영향을 받는다.

실제의 용접에서는 발열량의 일부가 용접에 사용되며, 나머지는 용접기의 전류 공급회로와 용접재 내부의 저온 영역으로 손실되어 용접 공정에서의 에너지 효율을 감소시킨다. 즉, 저항용접에서 발생하는 열량은 용접부의 온도를 상승시키지만 전극과 용접재의 계면 및 용접재의 다른 부분도 가열하여 열손실이 발생한다.

이와 같은 열손실은 모재의 성분과 질량(또는 두께), 통전시간 및 전극의 냉각 조건 등에 따라 변화한다. 통전시간을 제어 요소로 볼 때 용접에 필요한 전류는 거의 통전시간의 제곱근에 반비례한다. 그러므로 통전시간이 짧아지면 그만큼 용접 전류를 높여야 외형적으로는 동일한 가열 에너지를 용접부에 부과하는 것이 된다. 필요 이상으로 통전시간이 짧아지면 그만큼 높은 용접전류를 사용하여야 하기 때문에 열변형이 발생하고 과도한 표면 용융으로 스파터 발생과 전극 수명의 단축을 야기할 수도 있다.

Fig. 2.1 은 두 장의 판재를 점 용접할 때 용접부 두께 방향의 저항 분포와 저항열에 따른 온도 분포를 개략적으로 나타낸 것이다. 그림에서 R1 과 R5 는 전극과 판재 사이의 계면 접촉저항이고, R2 와 R4 는 판재 내부의 저항, R3 는 판재와 판재 간의 계면 접촉저항이다. 판재와 판재의 접촉면에서 저항이 가장 높으므로 가장 높은 온도가 발생한다. 이는 판재 간의 접촉면에 존재하는 산화 피막, 각종 오염 물질 및 계면의 표면 거칠기 때문에 저항이 가장 높아서 저항열이 가장 크게 발생하는 것이다. 또한 판재와 전극 사이의 계면 온도도 상당히 높지만, 전극에 냉

각수가 흐르기 때문에 계면에서 발생하는 저항열의 상당 부분은 전극을 통해 외부로 전달된다.

온도가 증가하면 금속 재료의 저항이 증가하기 때문에 점 용접 과정에서 발생하는 저항 값의 변화를 측정하면 재료의 온도를 개략적으로 추정할 수 있다. 이와 같이 시간에 따라 변화하는 재료의 저항을 동저항(dynamic resistance)라고 하며, 저항 값은 전극의 상하부의 전압강하와 용접전류를 측정하여 계산할 수 있다. Fig. 2.2 는 점 용접이 진행될 때 동저항의 변화와 그 때의 용접부 형성 모습을 개략적으로 나타낸 그림이다. 시간에 따라 구간 I 에서 V 까지의 구간으로 나타내었다. 구간 I 은 전극이 판재를 가압하면서 판재를 밀착시키게 되고 그로 인해 표면의 거친 면들이 파괴되면서 연화되는 과정을 거치게 되고, 이로 인해 초기에는 높은 저항값을 가지지만 시간이 지나면서 재료가 밀착, 돌출부는 압력에 의해 변형되어 접촉 면적이 증가하여 저항 값이 줄어들게 된다. 이 구간은 점 용접 초기에 순식간에 수 ms 의 시간에 일어난다. 구간 II 는 판재가 완전히 밀착되면서 저항의 최소 값을 가지게 되며 그래프에서 α 점에 해당하며 이를 α -피크 (peak)라 한다. 또한 α -피크를 기점으로 전류가 흐르면서 판재의 온도가 높아지게 되고 저항 값이 다시 상승하게 된다. 구간 III 은 판재의 온도가 올라가면서 저항이 높아지게 되고 구간의 끝부분에서 판재의 접촉면에서 부분적인 용융이 발생하게 된다. 구간 IV 는 판재의 접촉면에서 발생한 용융부에 저항이 증가하기 때문에 저항은 계속 증가하게 되고, 접촉저항의 최대점인 β 점을 기준으로 하여 전극의 가압력에 의해 전극 사이가 감소하게 되어 저항이 감소하게 된다. 이때 β 점을 β -피크 (peak)라고 한다. 구간 V 는 용융부가 계속 성장하면서 접촉 면적이 넓어지고 전극 사이의 거리가 계속 감소하기 때문에 저항이 감소하게 된다. 만일, 용접전류가 너무 큰 조건에서 용접을 실시하면 용융부도 짧은 시간에 급격히 많아지면서 주위의 고체 상태인 소재 금속이 전극 가압력을 더 이상 지탱하지 못하게 되고 용융금속이 분출하는 스패터 현상을 일으키며 동저항 또한 급격히 감소한다.

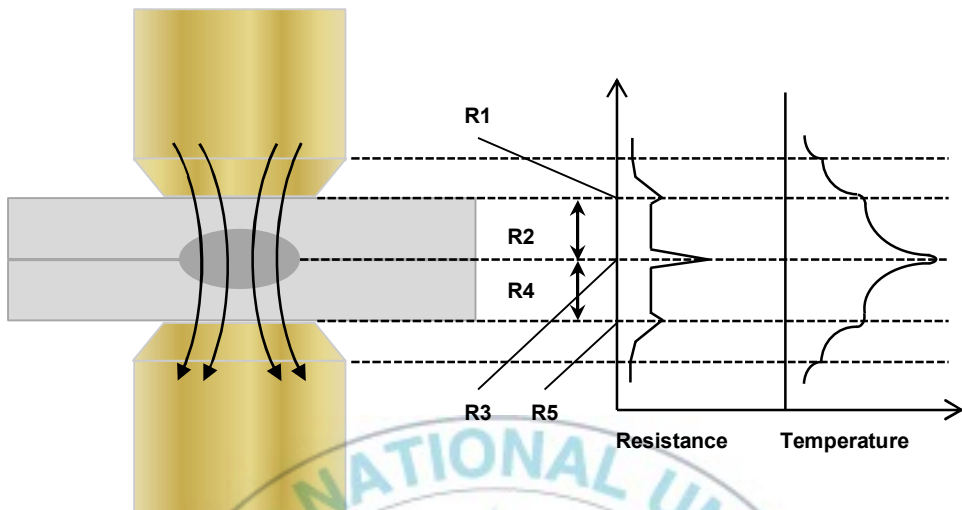


Fig. 2.1 Resistance and temperature during resistance spot welding

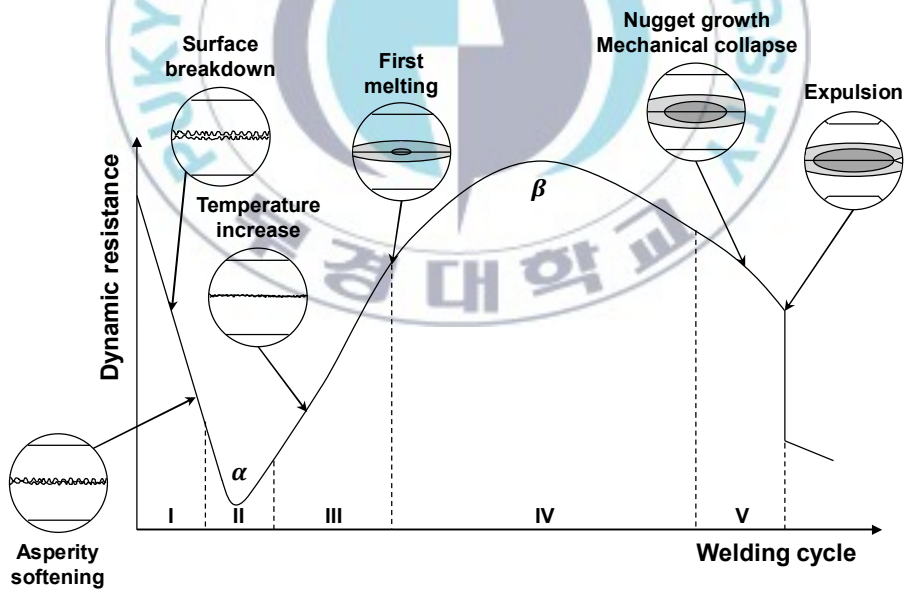


Fig. 2.2 Dynamic resistance for welding cycle

2.1.2 저항 점 용접 주요 공정변수

저항 점 용접의 주요 공정 변수는 용접전류, 용접시간, 전극 가압력을 들 수 있으며, 이외에도 전류 파형, 전극의 재질 및 형상, 모재의 재질 및 표면 상태 등이 용접 품질에 영향을 준다.

점 용접의 주요 공정변수 중 너겟에 가장 많은 영향을 미치는 공정변수는 전류이다. 발열량은 전류의 제곱에 비례하기 때문에 전극 가압력과 통전시간이 일정한 조건에서 용접전류를 변화시키면 일정 전류값 이상에서는 점 용접부인 너겟(nugget)이 형성되기 시작하고 전극에 의해 판재의 표면에 압흔이 발생한다. 용접 전류를 증가시키면 압흔이 깊어지며 전류값이 너무 높으면 스파터가 발생한다. 스파터가 발생하면 용접부의 표면 품질 저하 및 너겟 내부에서도 응고 균열이나 기공 결함이 발생할 가능성이 높아진다. 이와 같이 용접전류가 증가하면 용접부의 너겟과 인장전단강도가 커지지만, 전류가 과도하면 스파터가 발생하여 강도가 저하하는 현상이 발생하기 때문에 적정 범위의 용접전류를 사용해야 한다.

두 번째 주요 공정변수로 용접시간이 있다. 용접부의 발열량은 용접시간에 비례하기 때문에 중요한 공정변수이며, AC 용접의 경우 단위는 대체로 cycle 로 표현한다. 60 Hz 의 AC 전원을 이용하는 경우 1 cycle 이 16.67 ms 에 해당하며 1 cycle 단위로 용접시간을 설정해야하기 때문에 정밀하게 용접시간을 제어하기 어렵다. 통전 초기에 저항열에 의해 접합면의 온도가 증가하여 재료가 연화되기 때문에 접촉면이 넓어지며, 용접시간이 경과하면 저항열에 의해 용융부가 형성되며, 시간이 더욱 경과하면 용융부가 과다하게 커지면서 압흔이 발생한다. 적절한 용접시간을 결정하려면 용접전류와 연계하여 고려해야 한다. 대전류로 짧은 시간 용접하는 경우와 저전류로 긴 시간 용접하는 경우 발열량이 같더라도 전극과 소재로 열 전달이 일어나 열손실이 발생하기 때문에 저 전류로 긴 시간 용접하는 경우 양호한 너겟이 형성되지 않을 수도 있다. 또한 고 전류로 짧은 시간 용접하는 경우 너겟 형성은 수월하지만 스파터나 내부의 기공 발생 가능성이 증가하기 때문에 적절한 용접시간을 설정하는 것이 중요하다.

세 번째 공정변수로 전극 가압력을 들 수 있다. 전극은 전류를 통전시키는 역할

과 함께 판재 사이의 접촉면에 압력을 가하여 밀착시키는 역할을 한다. 이때 전극 가압력이 너무 작다면 판재와 판재 사이의 접촉저항이 커져 빠른 용융이 일어나지만 가압력이 너무 낮을 경우 용융부의 압력을 제어하지 못하고 스파터가 발생하는 현상이 일어나게 된다. 또한 가압력이 너무 크다면 판재사이의 접촉저항이 작아져 큰 전류를 요구하게 되며 큰 가압력으로 인해 용접 후 압흔 깊이가 더 깊어지게 된다. 따라서 판재에 따라 적절한 가압력을 설정하는 것이 중요하다.

그 밖에 제어할 수 있는 공정변수로 전극을 들 수 있다. 전극은 용접 전력을 모재에 전달하는 역할을 하기 때문에 저항 점 용접에서는 전극의 재질과 형상이 매우 중요하며 전극의 모양 및 치수는 KS C 9606 에서 규정하고 있다. 용접과정에서 전극 표면의 전류 밀도는 500 A/mm^2 까지 상승하는 것으로 알려져 있어서 양호한 전기전도도와 함께 고온 강도 또한 전극이 가져야할 특성이다. 또한 용접이 완료된 후 전극에 의해 용접부를 냉각시켜 결함이 없는 너겟을 형성시키는 역할을 한다. 전극의 재질은 Cu-Cr 합금이 주종이며 Zn 도금 강재들을 용접할 때에는 Zn 및 Cu의 합금화 현상에 의한 전극 표면의 오염과 도전성의 저하를 억제할 목적으로 개발된 Cu-Be 계 및 알루미늄 분산 강화 Cu 전극이 쓰이고 있다. 또한 일반적으로 전극에 발생하는 열을 냉각시키기 위하여 전극 내부에 냉각수를 사용한다.

2.1.3 스파터 발생 메커니즘[19]

저항 점 용접에서 스파터는 흔히 일어나는 현상이며, 용접시 용융금속의 분출을 뜻한다. 스파터는 크게 표면에서 일어나는 표면 스파터와 용접재의 접합면 사이에서 발생하는 중간 스파터로 구분할 수 있다. 표면 스파터는 강도에는 영향을 거의 주지 않지만, 용접부 표면에 스파터의 흔적을 나타내기 때문에 용접부 외관 품질을 저하시키고, 중간 비산은 용접부의 외관 품질은 저하시키지 않지만 너겟 내부의 용융금속이 분출되기 때문에 용접부의 강도를 저하시키기 때문에 용접 품질 측면에서 매우 바람직하지 못하다.

스파터 발생 메커니즘은 일반적으로 전극 가압력과 너겟 내부의 용융금속 압력

을 통하여 설명할 수 있다. Fig 2.3 은 용접시 용접 구조물에 작용하는 주요 힘을 나타내었다. 여기서 F_E 는 전극의 가압력이고, P 는 용융금속의 내부압력, F_N 는 고체로 봉쇄된 액체 너겟의 힘이다. 재료의 계면에서 고체 확산 (코로나 접합)에 의한 접합은 판의 분리로부터 어느 정도 저항을 제공하지만 다른 힘들보다 훨씬 작기 때문에 무시할 수 있다. 보통 스패터는 고체로 봉쇄된 액체 너겟의 힘 (F_N)이 전극 가압력 (F_E)과 같거나 초과할 경우 스패터가 발생한다.

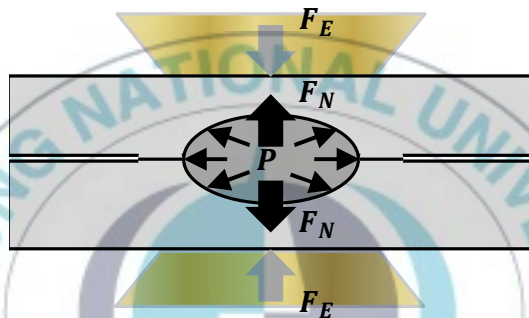


Fig. 2.3 Major forces acting on the weldment during welding

2.1.4 로브 곡선

점 용접의 주요 공정변수는 앞에서 언급한 바와 같이 용접전류, 용접시간, 전극 가압력이며 이러한 용접 공정변수들은 용접품질과 전극 수명에 큰 영향을 준다. 따라서 이러한 공정변수를 결정하는 것은 아주 중요하며 주요 공정변수를 결정하기 위하여 용접성 로브(Weldability lobe)를 많이 사용한다. 용접성 로브는 로브 곡선 (Lobe Curve)또는 로브 커브라고도 한다.

용접성 로브는 점 용접의 용접전류와 통전시간 및 압력의 적정 범위를 체계적으로 구하기 위해 사용되며, 용접전류-시간 용접성 로브의 개략도를 Fig. 2.4 에 나타내었다. 용접전류-시간 용접성 로브는 가압력을 고정시킨 상태에서 전류 및 시간을 증가시켜 판재를 용접하고, 용접한 판재를 분리시켜 너겟을 측정하여 용접성

로브를 작성한다. 용접성 로브는 KS B ISO 14327에서 규정하고 있으며 그림에 보는 바와 같이 총 3개의 구간으로 나눌 수 있다. 전류나 시간의 조건이 너무 짧다면 충분한 입열이 이루어지지 않아 너겟이 제대로 형성되지 않게 되고 양호한 용접부 강도를 가지지 못한다. 이러한 부분은 그림에서 왼쪽 부분이며 규격에서는 일반적으로 판재의 두께가 t 일 때, 너겟의 지름이 $3.5\sqrt{t}$ 또는 $5\sqrt{t}$ 를 기준으로 왼쪽 하한선을 규정하고 있다. 또한 전류나 용접시간이 크거나 길어지게 되면 입열량이 너무 많아 판재의 과용융 또는 용융부의 압력이 전극 가압력보다 커지면서 스파터가 발생하게 된다. 이러한 스파터는 용접부의 품질저하를 일으키기 때문에 적정용접구에서 제외한다. 규격에서는 이 스파터를 기준으로 하여 오른쪽 상한선을 규정하고 있다. 로브 곡선의 하한선과 상한선의 중간부분이 너겟이 제대로 형성되면서 스파터가 발생하지 않는 적정용접구간으로 지정하고 있다.

또한 용접 공정변수 결정방법으로 용접부 품질의 평가기준 중에 외관시험을 KS B 0850에서 규정하고 있으며, 외관 품질을 판정하기 위한 일반적인 항목으로 표면 비산(스패터), 전극으로부터의 오염 및 압흔 깊이 등이 있다. 이것은 용접부의 품질에 치명적인 영향을 준다.

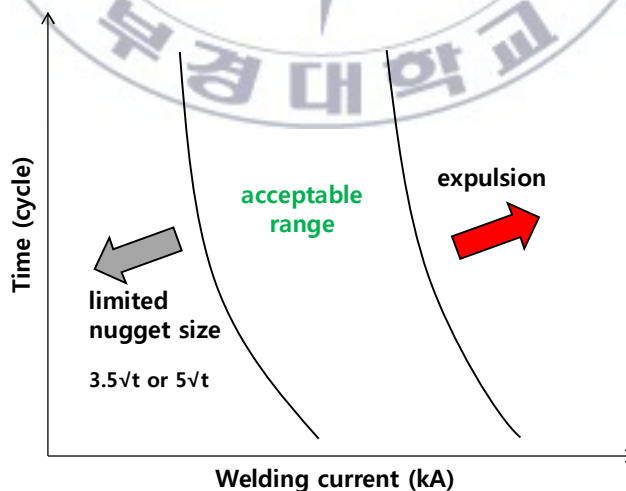


Fig. 2.4 Weld current- weld time lobe curve

2.2 저항 점 용접 시뮬레이션 프로그램[19][20][21]

저항 점 용접 시뮬레이션을 위하여 CAE(Computer Aided Engineering) 를 수행하였고, CAE 프로그램은 저항용접 시뮬레이션 전용 소프트웨어인 SOPAS (Simulation and Optimization of Resistance Projection And Spot welding processes)를 사용하였다. 시뮬레이션 프로그램은 Zhang[19][20][21]이 제시한 전기, 열, 금속, 기계의 4가지 수학적 모델을 바탕으로 하여 서로 연계되어 작용되도록 되어있다.

첫 번째, 전기모델에서는 저항 점 용접에서 중요한 요소인 접촉저항을 설명하고 있다. 접촉저항은 저항 발열의 원인이 되는 중요한 요소이며 전기 모델로부터 식 (2.3) 과 같이 표현 된다.

$$\rho_{contact} = 3 \left(\frac{\sigma_{s_soft}}{\sigma_n} \right) \left(\frac{\rho_1 + \rho_2}{2} + \rho_{contaminant} \right) \quad (2.3)$$

여기서, $\rho_{contact}$ 는 접촉저항, ρ_1, ρ_2 는 맞닿아 있는 금속 재료의 고유저항, $\rho_{contaminant}$ 는 접촉부 표면의 오염에 의한 저항, σ_n 는 계면의 접촉 수직응력, σ_{s_soft} 는 접촉된 두 금속 중에 경도가 약한 금속의 응력을 나타낸다.

Fig. 2.5 는 시뮬레이션 상에 전극 및 판재가 모델링되는 과정을 나타낸 그림으로 각 전극 및 판재의 고유저항과 계면의 접촉저항을 보여주고 있다.

두 번째, 열 모델은 열전달과 온도분포를 계산하며 금속모델은 상변화와 온도의 영향을 받는 물성을 계산한다. 지배 미분 방정식 및 경계조건들을 연계하여 열 모델을 나타내면 식 (2.4) 와 같이 표현된다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_0) \quad (2.4)$$

여기서, k 는 열전도율, T 는 온도, T_0 는 경계면에서의 온도이다.

세 번째, 기계모델은 재료의 변형과 형상 및 응력과 변형률의 분포 그리고 경계면에서의 접촉면적을 계산한다. 소성변형의 지배방정식은 포텐셜 에너지의 함수로 식 (2.5) 와 같이 표현된다.

$$\pi = \int_V \frac{1}{2} \sigma \dot{\epsilon} dV - \int_S F v dS \quad (2.5)$$

첫 번째 항은 외부 하중 또는 속도와 마찰 등에 의한 경계조건을 나타내고 두 번째 항은 전체 변형에 의한 포텐셜 에너지를 나타낸다. 마찰에 의한 손실과 더불어, 일반적으로 기계모델에는 두 가지의 경계 조건을 정의할 수 있다. 경계면에서 전극의 이동속도가 알려진다면 속도를 $v_i = v_0$ 로 정의할 수 있으며, 전극에 가해지는 힘이 알려진다면 $F_i = F_0$ 로 정의된다. 변분적인 접근을 적용하면 식 (2.5) 를 식 (2.6) 과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \pi}{\partial v} = 0 \quad (2.6)$$

이 식은 여러 개의 비선형 방정식을 산출하며, 이러한 방정식의 선형화를 위하여 Newton-Raphson method가 적용된다.

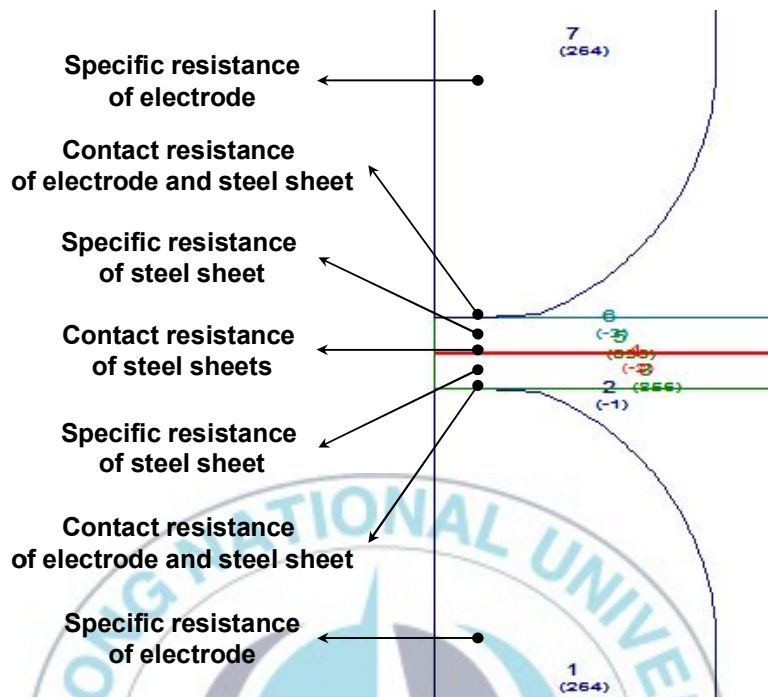


Fig. 2.5 Electrical resistance model of resistance spot welding

제 3 장 저항 점 용접 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 조건

3.1.1 시뮬레이션 모델링 및 재료

저항 점 용접 시뮬레이션을 위하여 시뮬레이션 프로그램 상에 Fig. 3.1 과 같이 모델링을 하였다. Fig. 3.1 을 살펴보면 시뮬레이션 할 강판이 중앙에 겹쳐 있으며 상하부로 전극이 맞닿아 있는 형태이다.

전극은 캡(Cap)형으로 하늘색으로 표시된 부분에 냉각수가 흐르도록 설계되었다. 모델링에 사용된 전극은 돔(Dome)형 전극으로 자동차 업계에서 저항 점 용접을 실시할 때 가장 많이 사용하는 전극 형상이며 재질은 CuCr 합금으로 하였다. 또한 20 °C 의 냉각수가 4 l/min 의 유량으로 전극 상하부에 흐르도록 경계조건을 설정하였다.

저항 점 용접 시뮬레이션을 진행할 때 전류의 타입을 설정하기 위하여 Fig. 3.2 와 같이 60Hz 의 교류식 용접기로 설정을 하였다.

시뮬레이션은 현장에서 쓰이는 재료와 전극을 원통형 대칭(cylindrical symmetric) 모델의 형태로 구성하였으며, 또한 메쉬 모델은 4각 메쉬 형태를 이용하여 Fig. 3.1 과 같이 나타내었다.

시뮬레이션에 사용된 재료는 AHSS의 강재 중 하나인 DP780 을 기준으로 하여 동종 및 이종 두께와 재료의 조합으로 시뮬레이션을 진행하였다. 이종재료로써 SPRC440 과 DP590 을 사용하였으며 각 강판의 화학적 조성을 Table 3.1 에 나타내었다.

시뮬레이션 상에 모델링된 사이클에 따른 전류 파형 및 전극 가압력의 형태는 Fig. 3.2 와 같다. 그림을 살펴보면 빨간색 선으로 표시되어 있는 부분이 전류의 파형이고, 파란색으로 표시된 부분이 전극 가압력의 형태이다. 전류는 용접시간(welding time) 동안 교류식 용접의 전형적인 형태의 파형을 가지고, 전극 가압력은 초기 가압시간(squeeze time)에 가압되어 유지시간(holding time)까지 유지된다.

Table 3.1 Chemical composition (wt%)

element Steel	C	Mn	Si	Cr	Mo	other
DP780	0.07	2.4	1.05	0.1	0.03	0.21
SPRC440	0.09	1.4	0.14	0.1	0.05	0.21
DP590	0.095	1.9	0.16	-	0.09	-

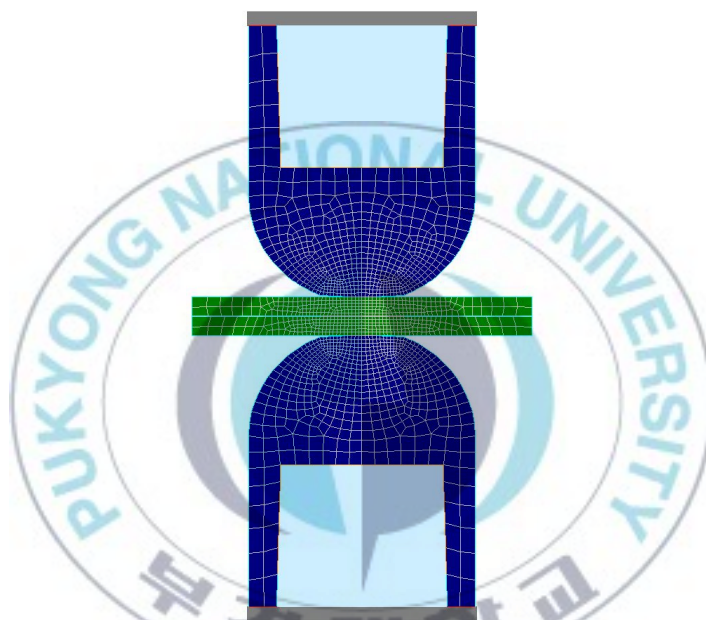


Fig. 3.1 Mesh of steel sheet and electrode for numerical simulation

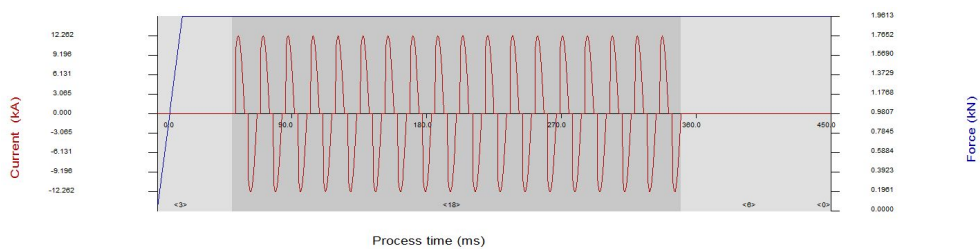


Fig. 3.2 Setting of simulation conditions

3.1.2 저항 점 용접 시뮬레이션 조건

본 연구는 AHSS의 강판 중 하나인 DP780을 선정하여 동종 강종일 때, 이종 강종일 때, 그리고 이종 두께일 때의 적정용접조건을 선정하기 위하여 총 5가지 조합으로 저항 점 용접 시뮬레이션을 진행하였다. Table 3.2 에서 보는 바와 같이 동종 강종 조합인 No. I, II 그리고 이종 두께 조합인 No. III 및 이종 강종 조합인 No. IV, V 총 5가지 조합에 대하여 시뮬레이션을 진행하였으며 각 조합에 따른 용접특성을 알아보았다.

또한, 주요 용접 공정변수인 전극 가압력, 용접 전류, 용접 시간에 대한 용접특성을 파악하고 각 조합에 대한 적정용접조건을 도출하기 위하여 주요 용접공정변수를 Table 3.3 과 같이 설정하였다. 가압력은 3수준, 용접전류는 9수준, 용접시간은 5수준으로 설정하였다. 용접전류에 대하여 용접부의 품질이 많이 좌우되기 때문에 용접전류에서 좀 더 수준을 많이 나누어 조건을 설정하였다. 각 조합마다 총 135가지의 조건으로 시뮬레이션을 진행하였으며, 총 675가지의 용접조건으로 시뮬레이션을 진행하였다. 또한 시뮬레이션의 시간적 절약을 위하여 상대적으로 높은 전류나 긴 용접시간이 설정되어 있어 과도한 발열로 인해 스파터가 발생하는 구간에 대하여 연속 두 번 스파터가 발생하면 멈추도록 설정하여 시뮬레이션을 진행하였다.

Table 3.2 Steel sheets and combination of simulation

Combination	No.	Steel sheet 1	Steel sheet 2
same steel sheet	I	DP780 1.0t	DP780 1.0t
	II	DP780 1.4t	DP780 1.4t
Different thickness steel sheet	III	DP780 1.0t	DP780 1.4t
Dissimilar steel sheet	IV	DP780 1.0t	SPRC440 1.0t
	V	DP780 1.0t	DP590 1.0t

Table 3.3 Simulation conditions

Variables	Minimum value	maximum value	Increase value	Level
Electrode force (kgf)	200	400	100	3
Welding current (kA)	3	11	1	9
Welding time (cycle)	12	24	3	5

3.2 시뮬레이션의 신뢰성

먼저 시뮬레이션을 진행하기 전에 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 평가하기 위하여 Fig. 3.3 에서 3.5 까지 나타낸 것처럼 DP780 1.0t 의 14개 조합, DP780 1.4t 의 15개 조합, DP590 1.0t 의 15개 조합으로 총 44개의 조합의 너겟 지름을 실험결과와 비교하였으며, 시뮬레이션 신뢰성은 두 결과의 너겟 크기 오차율로 판단하였다. 그 결과 평균 너겟 오차율은 9.22 %, 최대 오차율은 23.22 %, 최소 오차율은 0.39 % 로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 오차율이 큰 영역은 입열량이 적은 저 전류의 영역대인 3 kA 에서 4 kA 인 것을 확인할 수 있었다. 시뮬레이션 상에서는 미세하게 용접부가 형성되었지만, 실제 용접에서는 너겟은 형성이 되나 용접 후 바로 계면 파단이 발생하여 너겟의 크기를 측정할 수 없는 경우도 발생하였다. 3 kA 에서 4 kA 의 저 전류 영역을 제외한 적정 용접 조건에 대한 평균 오차율은 8.25 % 로 나타났으며, 저 전류 영역에 대한 오차율은 13.08 % 이었다. 이를 통하여 적정용접조건 영역에 대한 시뮬레이션의 예측 성능은 우수함을 알 수 있었다. 그림을 살펴보면 판재 두 장 사이에 너겟이 형성된 것을 확인할 수 있으며 열 영향부가 너겟의 주위에 형성되어있는 것을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 결과에서는 너겟 주위에 색깔로써 열 영향부가 표시되어 있는 것을 확인할 수 있다.

이와 같이 시뮬레이션 결과에서 적정용접조건 구간의 결과에서 평균 오차율이 10 % 미만인 것을 확인할 수 있으며, 시뮬레이션의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 본 연구는 저항 점 용접 시뮬레이션을 통해 저항 점 용접의 적정용접 조건구간을 설정하고자 하는 것이기 때문에 시뮬레이션 결과를 사용하여도 좋다고 판단하였다.

200kgf					
current	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA
21cycle	미접합				
Nugget(mm)	0	3.9	4.9	5.5	5.9
300kgf					
current	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA
21cycle					
Nugget(mm)	3.7	4.4	5.1	6.1	6.6
400kgf					
current	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA
21cycle					
Nugget(mm)	4.1	5.3	5.6	6.3	6

(a) Experiment result

200kgf					
current	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA
21cycle					
Nugget(mm)	2.358	3.553	4.36	5.053	5.551
300kgf					
current	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA
21cycle					
Nugget(mm)	2.99	4.132	4.815	5.461	5.819
400kgf					
current	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA
21cycle					
Nugget(mm)	3.715	4.66	5.288	5.839	6.205

(b) Simulation relsut

Fig. 3.3 Nugget diameter and cross section of DP780 1.0t steel sheets

200kgf					
current	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA
21cycle					
Nugget(mm)	2.7	4.1	4.8	5.8	6.1
300kgf					
current	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA
21cycle					
Nugget(mm)	3.5	4.9	5.9	6.6	6.7
400kgf					
current	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA
21cycle					
Nugget(mm)	4.3	5.6	6.7	7.5	6.6

(a) Experiment result

200kgf					
current	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA
21cycle					
Nugget(mm)	2.42	3.781	4.615	5.216	5.863
300kgf					
current	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA
21cycle					
Nugget(mm)	2.921	4.273	5.143	5.796	6.285
400kgf					
current	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA
21cycle					
Nugget(mm)	3.813	4.951	5.691	6.235	6.652

(b) Simulation relsut

Fig. 3.4 Nugget diameter and cross section of DP780 1.4t steel sheets

200kgf					
current	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA
10cycle					
Nugget(mm)	3.4	4.1	4.4	5.3	5.5
300kgf					
current	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA
10cycle					
Nugget(mm)	4	4.5	5.1	5.7	5.4
400kgf					
current	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA
10cycle					
Nugget(mm)	5.4	5.6	5.9	6.2	6.1

(a) Experiment result

200kgf					
current	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA
10cycle					
Nugget(mm)	3.226	3.852	4.383	4.859	5.247
300kgf					
current	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA
10cycle					
Nugget(mm)	3.62	4.239	4.794	5.186	5.595
400kgf					
current	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA
10cycle					
Nugget(mm)	4.146	4.698	5.178	5.498	5.881

(b) Simulation relsut

Fig. 3.5 Nugget diameter and cross section of DP590 1.0t steel sheets

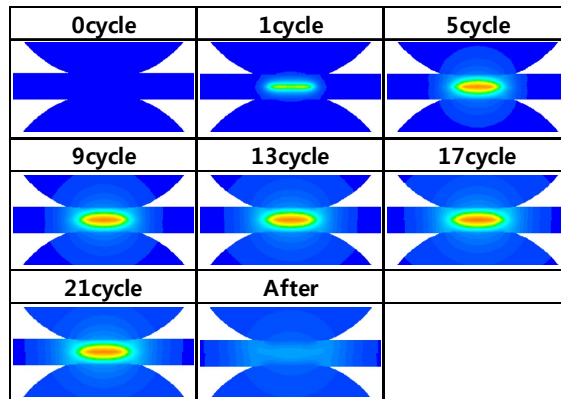
3.3 저항 점 용접의 너겟 형성 메커니즘

3.3.1 용접 공정변수에 따른 너겟 형성 메커니즘

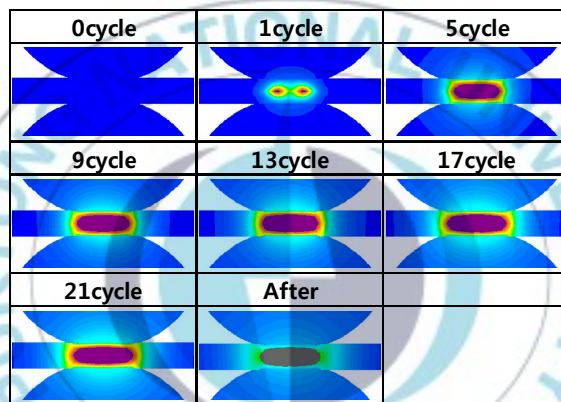
용접 주요 공정변수에 따른 용접부의 특성을 파악하기 위하여 시뮬레이션 과정을 용접시간 별로 비교해보았다.

첫 번째로 용접 전류 및 시간에 대한 특성을 알아보기 위하여 DP780 1.0t 의 조합을 전극 가압력 300 kgf, 용접시간 21 cycle 에서 전류 3 kA, 6 kA, 9 kA를 각각 Fig. 3.6 (a), (b), (c) 로 구분하여 나타내었으며 용접시간 별로 용접 진행과정을 보여주고 있다. 저항발열은 용접시간에 비례하기 때문에 Fig. 3.6 (a), (b), (c) 에서 공통적으로 시간이 늘어날수록 열이 분포되는 영역이 늘어나게 되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 전류에 따라 살펴보면 용접전류가 3 kA 일 때에는 용접전류가 너무 낮아 열분포는 거의 늘어나지 않고 용접이 완료된 후 너겟이 형성되지 않은 것을 확인할 수 있다. 또한 9 kA 에서는 1 cycle 부터 용융이 시작되면서 너겟이 급격하게 늘어나며 과도한 입열로 인하여 13 cycle 부터 스파터가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 용접전류가 너무 낮거나 높으면 Fig. 3.6 (a) 와 (c) 와 같이 너겟이 제대로 형성되지 않거나 스파터가 발생하게 되기 때문에 (b) 와 같이 적절한 전류를 선정하는 것이 매우 중요하다.

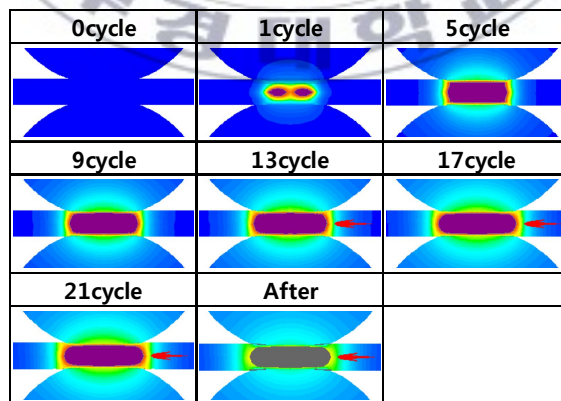
두 번째로 전극 가압력 및 시간에 대한 특성을 알아보기 위하여 DP780 1.0t 의 조합을 용접전류 7 kA, 용접시간 21 cycle 에서 가압력이 200 kgf, 300 kgf, 400 kgf 일 때의 시뮬레이션 과정을 Fig. 3.7 (a), (b), (c) 에 나타내었다. 용접시간은 발열량에 비례하므로 용접시간이 늘어날수록 용접부의 온도분포가 늘어나는 것을 Fig. 3.7 (a), (b), (c) 에서 공통적으로 관찰할 수 있다. 하지만 가압력이 너무 작다면 (a) 와 같이 용융금속의 분출압력을 견디지 못하고 스파터가 발생하게 된다. 또한 가압력이 너무 크다면 (c) 와 같이 (b) 보다 작은 너겟을 가지게 되고 또한 용접부의 압흔 깊이가 깊어지기 때문에 적절한 용접 가압력을 선정하는 것이 중요하다. 이와 같이 가압력이 증가하게 되면 너겟이 줄어드는 이유는 가압력이 증가하게 되면서 판재 사이의 계면 접촉저항에 영향을 주게 되고 이로 인하여 저항 발열량이 적어지게 되기 때문이다.



(a) Weld Current : 3 kA

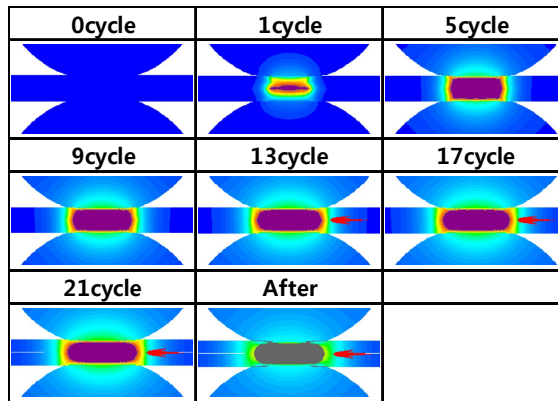


(b) Weld Current : 6 kA

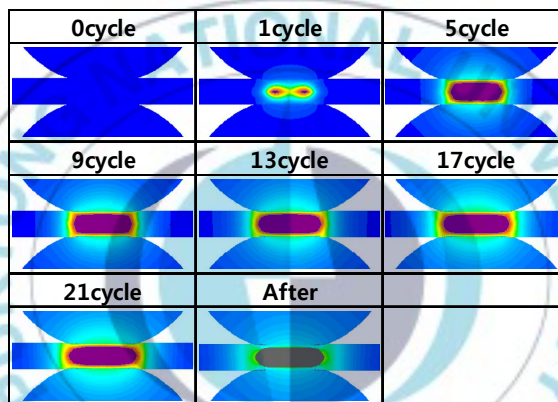


(c) Weld Current : 9 kA

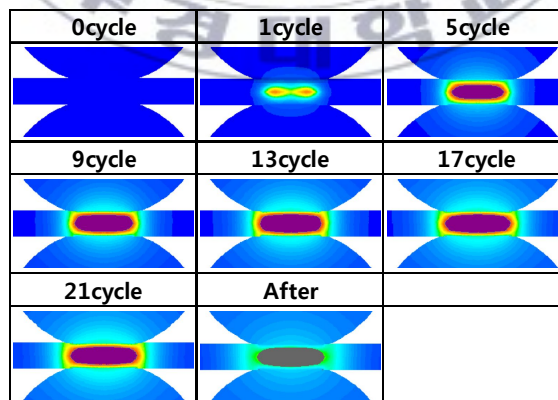
Fig. 3.6 Temperature distribution in welding time 21 cycle and force 300 kgf



(a) Electrode force : 200 kgf



(b) Electrode force : 300 kgf



(c) Electrode force : 400 kgf

Fig. 3.7 Temperature distribution in welding time 21 cycle and current 7 kA

3.3.2 재료에 따른 너겟 형성 메커니즘

이종재료에 따른 용접특성을 파악하기 위하여 DP780 1.0t 의 조합과 이종재료 조합인 DP780 1.0t x SPRC440 1.0t 및 DP780 1.0t x DP590 1.0t 조합을 같은 용접 전류, 용접 시간, 전극 가압력에서 용접 현상을 비교해보았다. 용접시간에 따라 각 조합의 전체저항을 Fig. 3.8 에 나타내었다. 그림에서 살펴 볼 수 있듯이 DP780 1.0t 의 조합에서 가장 높은 피크 저항을 가지는 것을 살펴 볼 수 있고 또한 용접이 진행될 때 역시 DP780 1.0t 에서 높은 저항을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 다음으로 DP590 1.0t, SPRC440 1.0t 순으로 저항 값이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 두 가지 원인을 들 수 있는데 재료의 강성에 따라 판재 사이의 계면 접촉저항이 달라지게 되며 이로 인하여 저항 값이 차이가 난다[3]고 판단된다. 또한 두 번째 이유로 재료의 고유저항 때문에 저항 값이 차이가 난다고 판단된다. 일반적으로 강의 경우 강도가 높을수록 원소 함유량이 높아지면서 비저항이 커지기 때문에 강도가 가장 높은 DP780에서 저항이 높다고 판단할 수 있으며 DP590, SPRC440 순으로 저항 값이 적어진다.

조합별로 전체 저항 값이 차이가 나게 되면서 전류가 통전하게 되면서 판재 계면사이의 온도는 Fig 3.9 와 같이 조합별로 다르게 나타나게 되는 것을 볼 수 있다. 저항 값이 가장 큰 DP780 1.0t 조합에서 가장 높은 온도를 가지며 두 번째로 DP780 1.0t 과 DP590 1.0t 조합, 마지막으로 DP780 1.0t 과 SPRC440 1.0t 조합에서 가장 낮은 온도를 가지는 것을 확인할 수 있다.

각 조합의 온도 차이로 인하여 Fig. 3.10 과 같이 용융금속의 체적이 차이가 나게 된다고 판단된다. 이러한 현상들로 인하여 같은 가압력을 받는다면 동종재료 조합인 DP780 1.0t 의 로브 곡선의 영역보다 이종재료 조합인 DP780 1.0t 와 SPRC440 1.0t 조합이나 DP780 1.0t 와 DP590 1.0t 조합에서 더 큰 전류나 용접 시간이 필요하다.

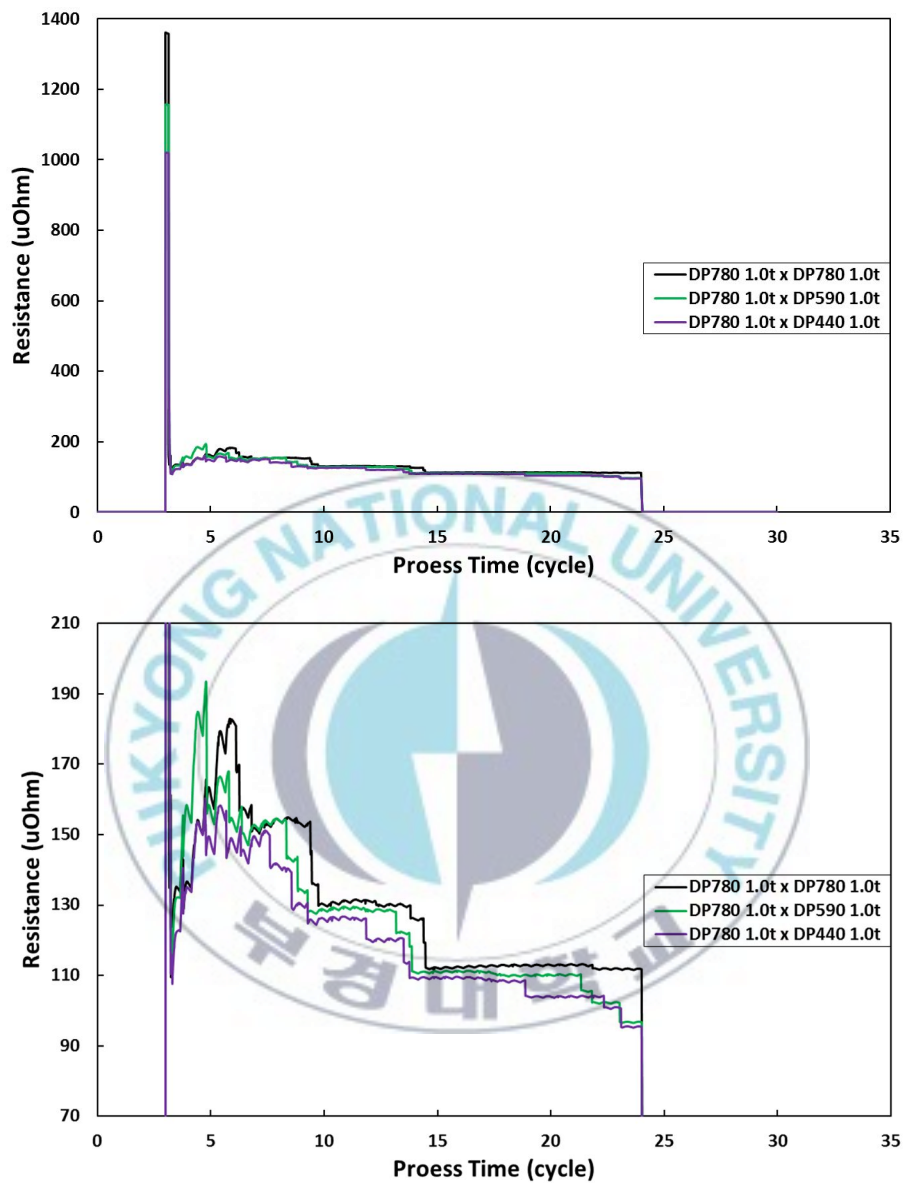


Fig. 3.8 Change in resistance with time by materials combination

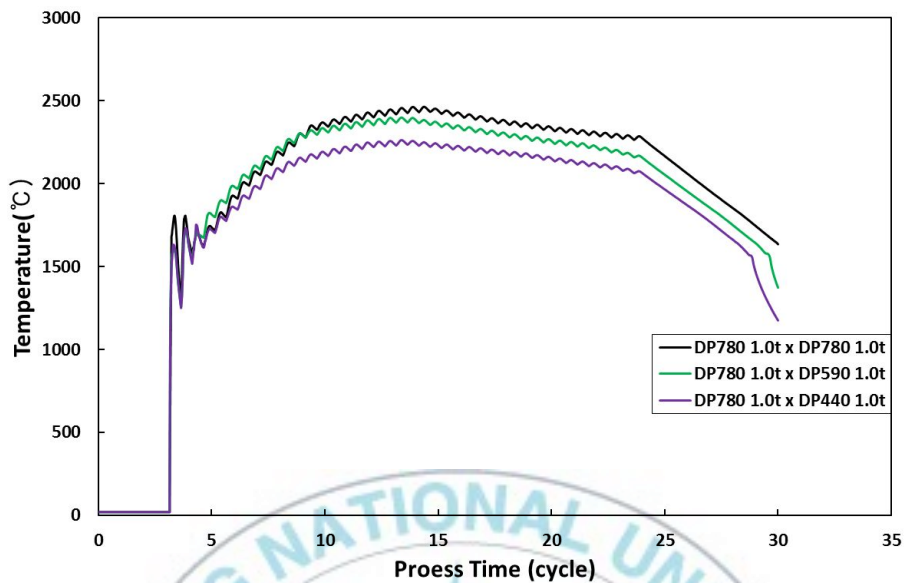


Fig. 3.9 Change in temperature with time by materials combination

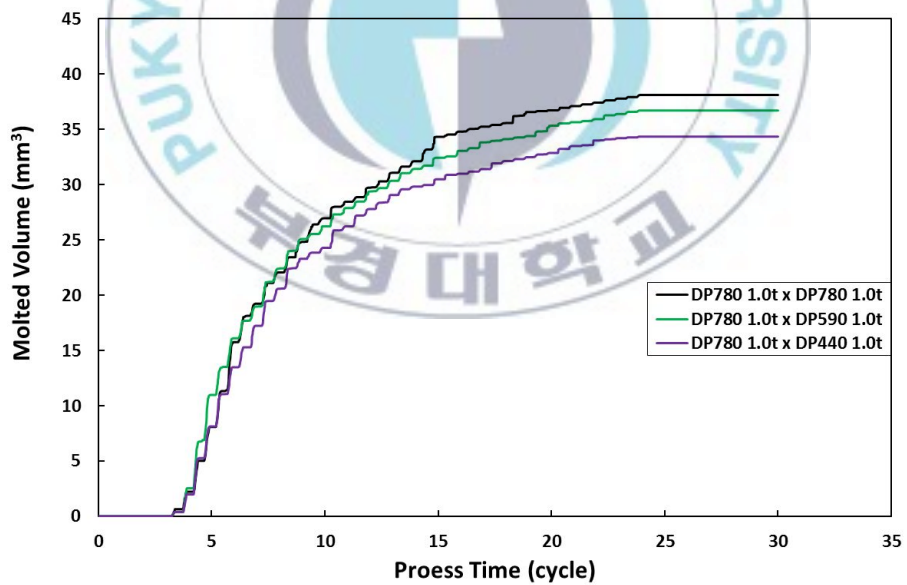


Fig. 3.10 Change in Molten volume with time by materials combination

3.4 용접부 인장전단강도

용접성을 평가하기 위한 방법으로 2장에 서술한 용접성 로브를 일반적으로 많이 사용한다. 용접성 로브는 KS B ISO 14327의 규정대로 하한선은 판재의 두께가 t 일 때, 너겟의 지름이 $3.5\sqrt{t}$ 또는 $5\sqrt{t}$ 를 기준으로 하고, 상한선은 스파터 발생 여부에 따라 결정이 된다. 하지만 본 연구에서는 보다 정량적인 하한선 기준을 설정하기 위하여[22] 너겟지름이 아닌 용접부의 허용인장전단강도를 기준으로 하여 하한선을 설정하였다. 허용인장전단강도는 기존 자동차 사에서 사용되는 값을 사용하였으며 Table 3.4 와 같다. 또한 로브 곡선의 상한선인 스파터의 발생은 전극 가압력과 너겟부의 용융너겟의 압력 및 금속학적 공정과 관련이 있으며 이에 대한 선행 연구[23][24]를 바탕으로 시뮬레이션 상에서 스파터의 발생여부를 판단하였다.

이에 따라 시뮬레이션 결과를 Table 3.5 에서 3.9 까지 나타내었다. Table 3.5 은 본 연구에서 기준이 되는 DP780 1.0t 의 동종재료 조합으로 표는 용접성 로브에 따라 가압력이 200 kgf, 300 kgf, 400 kgf 로 각각 일정할 때 전류와 시간에 따라 인장전단강도가 어떤 값을 가지는 지 나타낸 표이며, Table 3.6 은 동종재료 DP780 1.4t 에 대한 인장전단강도, Table 3.7 은 DP780의 이종두께의 조합, Table 3.8 은 DP780과 이종재료인 SPRC440의 조합, Table 3.9 는 DP780과 이종재료인 DP590의 조합의 시뮬레이션 결과들을 각각 나타낸 표이다. 용접성 로브는 하한선 및 적정용접구간, 상한선을 각각 색깔로 구분하였다. 하한선부터 열은 회색으로 하여 상한선은 진한 회색으로 표시하였다. 하한선과 상한선 중간을 적정용접구간으로 중간 회색으로 나타내었다.

Table 3.5 에서 3.9 까지 모두 살펴보게 되면 용접부의 인장전단강도는 용접전류가 증가할수록, 용접시간이 늘어날수록 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 저항 점 용접은 저항발열의 원리로 너겟이 형성되기 때문에 적정용접구간에서는 전류나 시간이 증가할수록 너겟지름이 증가하여 인장전단강도가 늘어나는 것이다. 또한 같은 전류대나 시간일 때 가압력이 증가할수록 인장전단강도는 감소하게 되는데, 이는 전극 가압력이 늘어나면서 재료의 계면이 파괴, 연화되면서 계면 접촉저

항이 줄어들어 발열량이 줄어들기 때문이다. 발열량이 줄어들면서 너겟지름이 감소하게 되고 이로 인해 인장전단강도 값이 작아지는 현상이 일어나게 된 것이다. 또한 Table 3.5 에서 3.9 까지 공통적으로 전극의 가압력이 200 kgf, 300 kgf, 400 kgf 로 늘어날수록 적정용접조건의 범위가 넓어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 가압력이 증가하면서 접촉저항은 저항은 감소하여 높은 전류를 요구하여 하한선은 오른쪽으로 이동하고, 전극 가압력이 늘어나면서 용융금속의 분출압력보다 전극 가압력이 커지게 되면서 상한선 또한 오른쪽으로 이동하게 되는데 하한선보다 상한선이 이동하는 전류 폭이 크기 때문에 전체적으로 적정용접구간의 범위는 넓어지게 되는 것이다.

DP780 1.0t (Table 3.5) 의 조합을 살펴보면 적정용접구간은 200 kgf, 3 kA 에서는 허용인장강도 값을 넘지 못하는 것을 확인할 수 있다. 또한 용접전류 7 kA, 8 kA 에서 스파터가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 로브 곡선의 하한선과 상한선 사이의 값이 적정용접구간으로 제시할 수 있었다.

동종재료에서 DP780 1.0t 에서 두께가 늘어난 조합인 DP780 1.4t (Table 3.6) 을 비교하면 로브영역의 하한선부분인 용접전류 4 kA 에서 적정용접조건 영역이 줄어드는 것을 확인할 수 있고, 또한 상한선 부분에서 스파터가 낮은 전류대에서 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 입열량이 적은 하한선 부분에서는 두께가 두꺼워지게 되면서 판재 사이에 집중되는 열이 주위로 열전도가 일어나면서 너겟 부에 집중되는 열량이 작아져 너겟이 제대로 형성되지 않아 하한선이 줄어들었다고 판단된다. 또한 입열량이 충분한 상한선의 경우 두께가 늘어나게 되면서 너겟의 높이 방향으로 용융이 진행되면서 1.0t 보다 너겟 높이가 커지게 되고 그로인해 용융면적이 늘어나게 되면서 용융금속의 분출압력이 전극 가압력보다 커져 스파터가 더 낮은 전류대에서 발생되었다고 판단된다. 이는 동종재료지만 이종두께인 DP780 1.0t 와 1.4t 조합에서도 확인할 수 있다. DP780 1.0t (Table 3.5)와 이종두께 조합(Table 3.7)을 비교하면 하한선과 상한선 부분에서 적정용접조건의 범위가 조금씩 감소하는 것을 확인할 수 있다.

동종재료 DP780 1.0t 의 조합과 이종재료 조합인 SPRC440 (Table 3.8)이나

DP590 (Table 3.9)의 조합을 비교해보면 상한선 구간은 일치하는 것을 확인할 수 있지만, 입열량이 적은 하한선 구간에서는 이종재료에서 적정용접조건의 하한선 부분이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 동종재료 조합인 DP780과 이종재료 조합인 SPRC440 및 DP590의 재료의 강성차이로 인하여 같은 가압력이 가해졌을 경우 재료의 변형량이 다르기 때문인 것으로 판단된다. 같은 가압력이 가해졌을 경우 강성이 큰 DP780이 변형이 적게 일어나게 되고 그로인하여 접촉저항이 이종재료에 비하여 커지게 되기 때문에 발열량이 많아져 하한선 부분이 보다 저 전류대에서 형성되는 것이다. DP780의 조합과 비교하였을 때 강성이 큰 DP590, SPRC440 순서대로 영역의 범위가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

Table 3.4 Acceptable tensile shear strength (kN)

Steel	1.0t	1.4t
DP780	6.76	11.4
SPRC440	3.92	-
DP590	5.54	-

Table 3.5 Tensile shear strength of DP780 1.0t steel sheets (kN)

200	24	5.81	9.46	11.56	13.38	14.86	16.06			
	21	5.05	9.38	11.51	13.34	14.66	15.78			
	18	4.30	9.35	11.36	12.81	14.22	15.33			
	15	3.96	9.32	10.97	12.46	13.92	14.99			
	12	3.97	8.81	10.62	12.11	13.42	14.33	15.22		
300	24	0	7.90	11.14	12.83	14.60	15.99	16.89	18.06	
	21	0	7.90	10.91	12.71	14.42	15.37	16.66	17.77	
	18	0	7.90	10.71	12.60	14.07	15.11	16.36	17.32	
	15	0	7.89	10.57	12.35	13.63	14.85	15.78	16.73	
	12	0	7.77	10.22	11.80	13.27	14.23	15.12	16.12	
400	24	0	0	9.84	12.53	14.10	15.61	16.68	17.83	19.25
	21	0	0	9.81	12.31	13.97	15.42	16.38	17.61	18.64
	18	0	0	9.76	12.02	13.86	14.90	16.15	17.29	18.05
	15	0	0	9.44	11.77	13.51	14.52	15.82	16.56	17.61
	12	0	0	8.88	11.28	12.78	14.04	14.98	16.08	16.81
Force (kgf)	Time (cycle)	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA

Table 3.6 Tensile shear strength of DP780 1.4t steel sheets (kN)

200	24	5.72	14.07	20.54	23.87	26.44				
	21	5.50	13.41	19.98	22.82	25.65	27.73			
	18	4.45	12.94	18.50	22.21	24.75	26.83			
	15	3.64	12.36	16.94	21.46	23.76	25.68			
	12	3.11	11.06	15.65	20.23	22.31	24.24			
300	24	0	8.36	18.55	22.87	26.13	28.32	30.34		
	21	0	7.49	17.13	22.50	25.36	27.49	29.16	31.18	
	18	0	6.63	16.32	21.74	24.52	26.61	28.53	30.43	
	15	0	5.62	15.42	20.57	23.36	25.68	27.38	28.30	
	12	0	4.63	13.49	19.07	22.13	24.09	26.15	27.66	
400	24	0	0.36	14.94	22.23	25.34	27.92	30.06	31.72	
	21	0	0.15	13.64	21.66	24.89	27.27	29.10	31.02	
	18	0	0	12.56	20.76	24.18	26.44	28.39	30.30	31.60
	15	0	0	11.66	20.27	22.87	25.32	27.30	28.81	30.64
	12	0	0	8.39	18.51	22.01	24.14	26.09	27.61	29.02
Force (kgf)	Time (cycle)	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA

Table 3.7 Tensile shear strength of DP780 1.0t and 1.4t steel sheets (kN)

200	24	6.26	9.80	12.19	13.91	15.14				
	21	6.15	9.76	12.01	13.77	15.02	16.22			
	18	6.07	9.61	11.82	13.48	14.65	15.73			
	15	6.01	9.37	11.21	12.78	14.25	15.21			
	12	5.87	9.14	10.77	12.29	13.68	14.66			
300	24	0	8.26	11.49	13.53	15.12	16.35	17.69		
	21	0	8.06	11.24	13.37	14.89	16.12	17.18	18.31	
	18	0	7.53	11.10	13.05	14.63	15.54	16.60	17.75	
	15	0	7.53	10.80	12.60	13.98	15.07	16.19	17.13	
	12	0	6.53	10.59	12.01	13.51	14.66	15.30	16.36	
400	24	0	0.55	10.47	13.11	14.80	16.15	17.45	18.62	19.97
	21	0	0.46	10.36	12.66	14.55	15.97	17.17	18.03	19.53
	18	0	0.38	10.09	12.48	14.15	15.64	16.46	17.66	18.78
	15	0	0.16	9.82	12.15	13.85	14.97	16.11	17.14	18.14
	12	0	0	9.43	11.87	13.25	14.32	15.43	16.31	17.12
Force (kgf)	Time (cycle)	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA

Table 3.8 Tensile shear strength of DP780 and SPRC440 1.0t steel sheets (kN)

200	24	1.81	5.37	6.49	7.51	8.50	9.24			
	21	1.81	5.25	6.46	7.46	8.43	8.96			
	18	1.81	5.15	6.41	7.38	8.18	8.81			
	15	1.81	5.07	6.25	7.23	7.97	8.63			
	12	1.54	4.93	6.07	6.91	7.74	8.30	8.80		
300	24	0	1.86	6.22	7.28	8.20	9.05	9.80	10.32	
	21	0	1.48	6.19	7.19	8.13	8.94	9.70	10.18	
	18	0	1.30	6.14	7.09	8.06	8.78	9.39	10.06	
	15	0	1.24	5.86	6.97	7.85	8.53	9.22	9.70	
	12	0	1.10	5.71	6.82	7.48	8.24	8.81	9.37	
400	24	0	0	5.13	6.95	8.03	8.85	9.66	10.35	11.17
	21	0	0	4.97	6.90	7.91	8.79	9.47	10.16	10.76
	18	0	0	4.30	6.75	7.81	8.54	9.30	10.00	10.59
	15	0	0	2.65	6.48	7.68	8.30	9.07	9.65	10.23
	12	0	0	1.96	6.37	7.28	8.06	8.70	9.31	9.80
Force (kgf)	Time (cycle)	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA

Table 3.9 Tensile shear strength of DP780 and DP590 1.0t steel sheets (kN)

200	24	4.32	7.25	8.83	10.28	11.48	12.48			
	21	4.36	7.21	8.78	10.23	11.41	12.20			
	18	4.34	7.17	8.73	10.03	11.05	11.87			
	15	4.48	7.05	8.56	9.69	10.78	11.65			
	12	2.57	6.83	8.24	9.35	10.46	11.14	11.83		
300	24	0	5.14	8.69	9.83	11.18	12.30	13.27	14.02	
	21	0	5.00	8.45	9.74	11.05	12.10	12.92	13.80	
	18	0	5.00	8.28	9.72	10.92	11.77	12.69	13.56	
	15	0	4.54	8.09	9.53	10.55	11.51	12.40	13.09	
	12	0	3.43	7.67	9.13	10.21	11.14	11.77	12.58	
400	24	0	0	7.55	9.63	10.84	11.98	13.07	13.83	15.16
	21	0	0	7.32	9.51	10.77	11.88	12.72	13.65	14.77
	18	0	0	6.93	9.26	10.61	11.57	12.53	13.46	14.19
	15	0	0	6.69	8.97	10.41	11.16	12.29	12.85	13.71
	12	0	0	6.66	8.67	9.87	10.86	11.66	12.49	13.07
Force (kgf)	Time (cycle)	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA

제 4 장 로브 곡선 예측 모델

4.1 인장전단강도 예측모델

4.1.1 회귀모델[25][26]

회귀모델은 예측 모델로써 용접부의 인장전단강도나 너겟의 크기를 예측하는 데 많이 사용되고 있다[12][13].

본 연구에서는 용접부의 품질을 대표할 수 있는 인장전단강도를 예측하기 위하여 3가지의 회귀 모델을 사용하였다. 첫 번째로 회귀모델로 다중 선형 회귀모델(multiple linear regression model)을 식 (4.1) 과 같이 정의하였다. 두 번째로 제시한 회귀모델은 2차 다항 회귀모델(second order polynomial regression model)로 입력인자의 항들의 교호작용 및 입력인자의 2차항들을 포함하는 모델로 식 (4.2) 과 같이 정의하였다. 세 번째 회귀모델로 입력변수에 로그값을 사용하여 비선형을 포함하는 회귀모델인 다중 비선형 회귀모델(multiple nonlinear regression model)을 사용하였으며 식 (4.3) 과 같이 정의하였다.

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^7 \beta_i x_i \quad (4.1)$$

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^7 \beta_i x_i + \sum_{i \leq j}^7 \beta_{ij} x_i x_j \quad (4.2)$$

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^7 \beta_i \ln x_i \quad (4.3)$$

각 회귀모델의 입력변수는 주요공정변수인 용접전류, 용접시간, 가압력을 x_1 , x_2 , x_3 로 정의하였고, 또한 본 논문의 변수로써 강판 및 두께를 고려하였기 때문에 강판1의 재질, 강판2의 재질, 강판1의 두께, 강판2의 두께를 입력변수로 각각 x_4 , x_5 , x_6 , x_7 로 정의하였다. 출력인자로는 용접성과 관련되는 항목인 인장전단강도를 $\hat{y}$ 로 정의하여 용접 공정변수에 따라 인장전단강도를 예측하였다. β_0 에서

β_{35} 까지는 각 입력 인자의 계수 값으로, 계수 값은 최소제곱법(method of least squares)을 이용하여 추정하였다.

다중 선형 회귀모델인 Model I의 각 항 계수를 Table 4.1 에 나타내었다. 여기서 β_5 는 강판1의 재질의 계수인데 강판1은 DP780이기 때문에 모두 동일한 변수 값을 가지게 된다. 따라서 상수항으로 취급하여 오차항에 풀링(pooling)하였고, 계수 값은 표에서 제외되었다. 또한 β_7 은 강판2의 두께이며 유의성이 매우 낮아 오차항에 풀링하였다.

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

β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7
-30.7	2.31	0.099	0.0143	0.0157	-	17.8	-

Model II 는 2차 다항 회귀모델로 각 계수값을 Table 4.2 에 나타내었다. 표를 살펴보면 유의성이 거의 없는 항들은 Model I 과 동일하게 오차항에 풀링되어 값을 가지지 않는 것을 확인할 수 있다.

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

β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7
9.17	-2.48	-3.39×10^{-1}	-8.7×10^{-3}	9.8×10^{-3}	-	-16.4	-
β_{12}	β_{13}	β_{14}	β_{15}	β_{16}	β_{17}	β_{23}	β_{24}
2.97×10^{-2}	5.2×10^{-3}	2.37×10^{-3}	-	5.08	-	8.7×10^{-5}	1.03×10^{-4}
β_{25}	β_{26}	β_{27}	β_{34}	β_{35}	β_{36}	β_{37}	β_{45}
-	0.46	-	-1.6×10^{-5}	-	-2.03	-	-
β_{46}	β_{47}	β_{56}	β_{57}	β_{67}	β_{11}	β_{22}	β_{33}
-	-	-	-	-	-0.339	-9.24×10^{-3}	-4×10^{-6}
β_{44}	β_{55}	β_{66}	β_{77}				
-5×10^{-6}	-	-	-				

Model III 은 다중 비선형 회귀모델이고 각 항의 계수는 Table 4.3 에 나타내었다. Model I 과 동일하게 강판1의 재질은 상수항으로 오차항에 풀링하였고, 강판1의 두께는 유의성이 낮아 오차항에 풀링되어 각 항의 계수는 표와 같다.

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

β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7
-61	14.2	1.74	3.63	9.44	-	21.3	-

이러한 3가지 인장전단강도 회귀모델을 이용하여 시뮬레이션의 결과를 비교하여 각 모델이 우수한 예측 결과를 얻는지 알아보았다. 데이터는 스패터가 연속 두 번 발생한 결측치 부분을 제외하고 총 572개를 사용하여 비교하였다. 각 모델의 예측 결과를 그래프를 그려 비교하였으며 가로축에 시뮬레이션 결과의 인장전단강도, 세로축은 예측모델에서 예측한 인장전단강도로 설정하여 예측 결과를 나타내었다.

Fig. 4.1 은 Model I 의 예측 결과를 나타낸 것이다. 그래프 내에 대각선으로 표시된 선에 가까울수록 예측 성능이 우수한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 가로축에서 1 kN 에서 17 kN 내에서는 높은 예측성능을 가지는 것을 확인할 수 있지만, 가로축 0 kN 에서 큰 오차가 나타나는 것을 확인할 수 있으며 가로축이 17 kN 이상일 때에는 직선에 다소 떨어져 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4.2 는 Model II 의 예측 결과를 나타낸 것이다. Model I 에 비해 전체적으로 직선에 가까이 분포되어 있는 것을 확인할 수 있으며 예측성능이 매우 우수함을 알 수 있다. 가로축에서 0 kN 에 해당하는 데이터들이 오차가 크게 나타나지만 데이터의 오차는 6 kN 이하임을 확인할 수 있고, 이는 허용인장강도 값 이하인 것을 확인할 수 있기 때문에 적정용접구간의 예측성능에는 지장이 없다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4.3 은 Model III 의 예측결과이다. 그래프를 살펴보면 Model I 보다 예측 성능이 우수하지만, Model II 에 비해 예측성능이 다소 떨어짐을 확인할 수 있다.

또한 가로축 0 kN 에 해당하는 데이터에서 오차 값이 큰 것을 확인할 수 있다.

또한 예측 모델의 성능을 적합도를 평가하기 위해서 회귀선의 추정 후 그 타당성을 조사하기 위해서는 결정계수 (coefficient of determination) 및 평균 오차율 (average error rate : AER)을 일반적으로 많이 사용한다. 결정 계수 및 평균 오차율은 식 (4.4) 와 식 (4.5) 와 같이 표현된다.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2} \quad (4.4)$$

$$AER = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \quad (4.5)$$

여기서 R^2 는 결정계수이고, i 는 데이터 번호, n 은 데이터의 총 개수로 본 논문에서는 572개이며, y 는 시뮬레이션 결과의 인장전단강도, $\bar{y}$ 는 y 의 평균 값, $\hat{y}$ 는 예측모델에 의해 계산된 값, $\bar{\hat{y}}$ 는 $\hat{y}$ 의 평균값이다.

식 (4.4) 와 식 (4.5) 를 통하여 각 모델에 대한 결정계수 및 평균 오차율을 구하였고, Table 4.4 에 각 모델에 대하여 비교하였다. 결정계수는 1에 가까울수록 예측 성능이 우수하고, 평균 오차율은 0에 가까울수록 회귀모델의 예측 성능이 우수하다고 할 수 있다.

각 모델에서 결정계수는 Model II 에서 가장 높게 나와 회귀식의 정도가 가장 높다는 것을 확인할 수 있다. 또한 평균 오차율 역시 Model II 에서 가장 낮은 값이 나타났으므로 Model II 가 가장 좋은 예측 성능을 가진다는 것을 확인할 수 있었다.

Table 4.4 Coefficient of determination and average error rate for Model
I ~ III

	Model I	Model II	Model III
Coefficient of determination	0.81	0.96	0.85
Average error rate	0.193	0.091	0.188

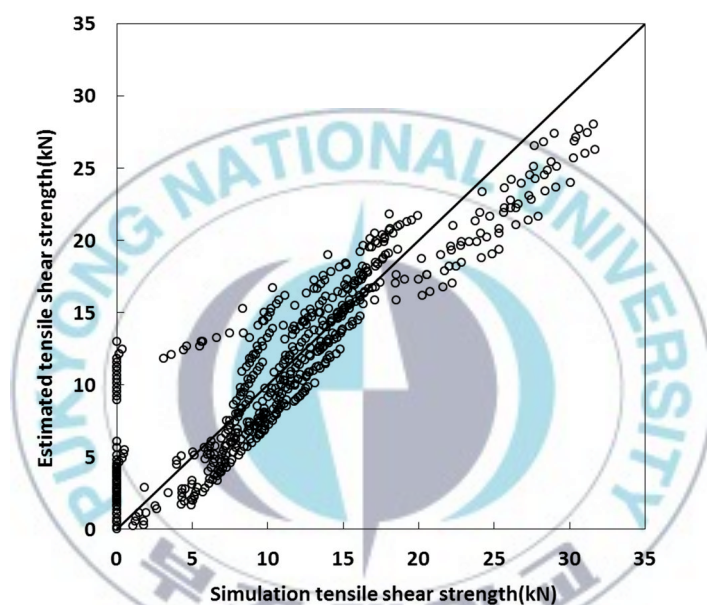


Fig. 4.1 Estimation results of Model I (multiple
linear regression model)

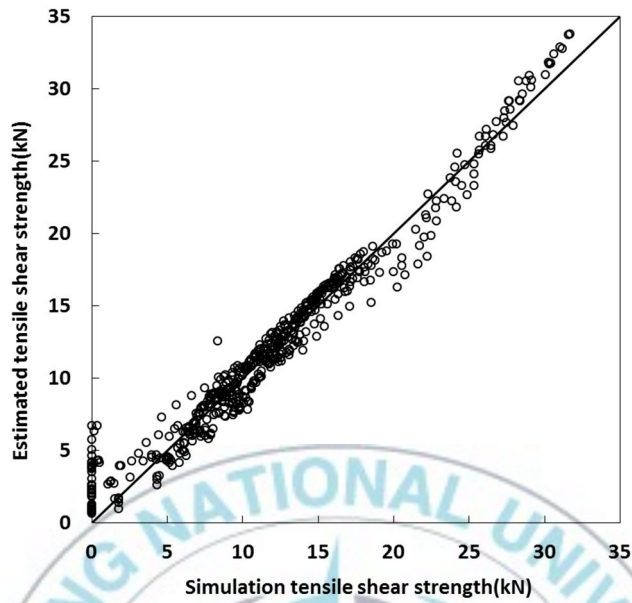


Fig. 4.2 Estimation results of Model II (second order polynomial regression model)

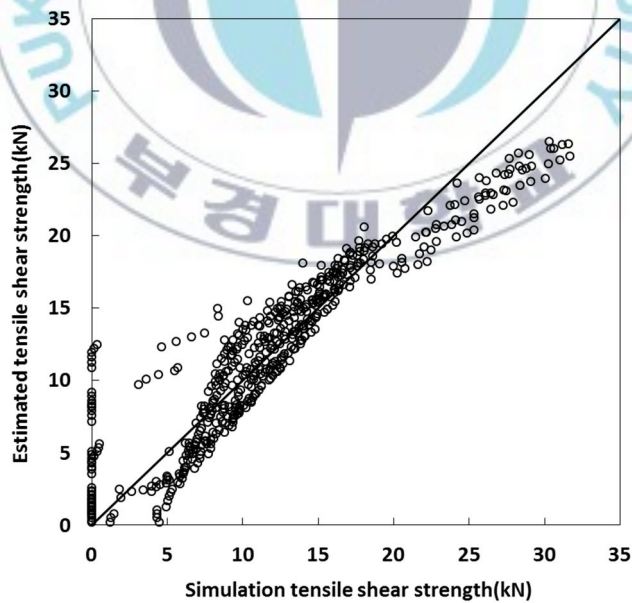


Fig. 4.3 Estimation results of Model III (multiple nonlinear regression model)

4.1.2 변수 선택에 의한 최적회귀모델[25]

앞 절에서 3가지의 인장전단강도 예측모델을 제시하였지만 Model I 과 Model III 에서는 예측 결과가 만족스럽지 못하였고, Model II 는 예측 결과는 우수하지만 7가지 변수들의 2차항을 모두 고려해야하기 때문에 입력변수의 항 개수가 총 36개로 너무 많다는 문제점이 발생하였다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 Model II 에 대하여 단계별 회귀(Stepwise regression)를 수행하여 변수를 선택하였다.

일반적으로 변수선택의 방법은 크게 모든 가능한 회귀(All possible regressions), 후진 제거(backward elimination), 전진 선택(forward selection), 단계별 회귀로 나눌 수 있다. 모든 가능한 회귀는 모든 가능한 변수들의 조합을 회귀분석하여 보는 것이기 때문에 방대한 계산을 요구한다. 이러한 방대한 계산을 줄이기 위하여 후진 제거나 전진 선택 또는 단계별 회귀를 사용하여 변수를 선택한다.

본 연구에서는 2차 다항회귀모델인 Model II 에 대하여 단계별 회귀를 수행하여 변수를 선택하였다. 단계별 회귀는 총 20단계로 그 중 변수들의 항 및 결정계수 값 및 예측성능을 가지고 비교하였을 때 가장 좋다고 판단한 모델을 식 (4.6)에 제시하였으며 Model IV 로 정의하였다.

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_1 x_2 + \beta_3 x_1 x_3 + \beta_4 x_1 x_4 + \beta_5 x_1 x_6 + \beta_6 x_3 x_6 + \beta_7 x_1^2 \quad (4.6)$$

식 (4.4) 를 살펴보면 전류(x_1) 에 대한 항과 전류와 다른 항들의 곱으로 이루어져 있는 것을 확인할 수 있으며 이러한 점을 미루어 볼 때, 전류에 대한 인장전단강도의 유의성이 크다는 것을 확인할 수 있다. 또한 Table 4.5 는 2차 다항회귀모델을 단계별 회귀를 하였을 때 각 변수들의 계수를 나타낸 표이다.

Table 4.5 Coefficients for Model IV (Stepwise regression model)

β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7
-3.27	-1.88	0.0183	0.00515	0.00239	4.75	-0.0392	-0.343

이러한 단계별 회귀의 예측 결과를 Fig 4.4 에 나타내었다. 그림을 살펴보면 Model I, Model III 보다는 좋은 예측 성능을 가지고, Model II 보다는 예측 성능이 조금 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 전체적인 예측 성능은 우수한 것을 확인할 수 있고, 가로축 0 kN 에서 예측 결과 값이 하나의 데이터를 제외하고 모두 6 kN 이하인 것을 확인할 수 있기 때문에 Model IV 의 예측성능은 우수하다고 판단할 수 있었다. 또한 Model IV 의 회귀식 정도를 알아보기 위하여 결정계수 및 평균 오차율을 구하였다. 결정계수는 0.959, 평균 오차율은 0.096으로 나타났다으며 이는 Model I 과 Model III 에 비하여 결정계수는 높고 평균 오차율은 낮아 예측 성능이 좋다는 것을 판단할 수 있다.

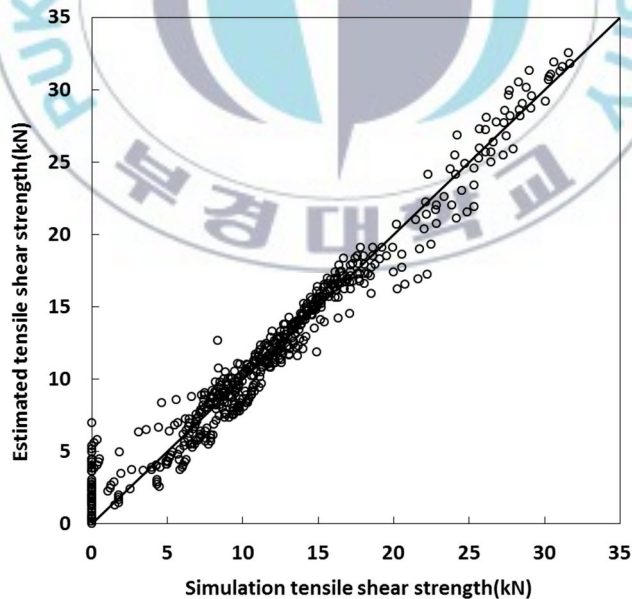


Fig. 4.4 Estimation results of Model IV (stepwise regression model)

4.1.3 회귀모델의 통계적 유의성[26]

앞 절에서 제시한 총 4가지 모델에 대한 결과를 살펴보았다. 하지만 조금 더 통계적인 유의성을 판단하기 위하여 각 모델에 대하여 분산분석(analysis of variation : ANOVA)을 수행하였다.

회귀 모델에 대한 분산분석은 추정된 모형이 본 자료에 얼마나 잘 맞는지 알아보는 가설 검정이다. 본 논문에서는 시뮬레이션 결과의 인장전단강도에 대한 회귀 모델을 정의하였고 인장전단강도에 대하여 입력변수들의 설명 가능한 값과 그렇지 않은 값으로 나누어 이 두 값의 비를 F 검정을 통해 유의성을 평가한다.

앞에서 제시한 4가지 모델의 분산분석에서 F_0 는 회귀의 평균제곱에 대한 잔차의 평균제곱의 비로서 F_0 의 값이 크면 회귀식의 정도(precision)가 좋다고 할 수 있다. 또한 $F(0.05)$ 는 F-검정의 유의 수준을 나타내는 것으로 유의수준 95%에 대한 F 기각치(critical value)이다.

각 모델에 대하여 분산분석 결과를 Table 4.6 에서 Table 4.9 까지 차례대로 나타내었다. 4가지의 모델 공통적으로 F_0 의 값이 $F(0.05)$ 보다 매우 큰 것을 확인할 수 있고, 이것으로 미루어보아 각 모델의 입력변수에 대한 출력변수의 유의수준이 크다는 것을 확인할 수 있다.

Table 4.6 ANOVA for Model I (multiple linear regression model)

Factor	Sum of square	Degree of freedom	Mean square	F_0	$F(0.05)$
Regression	25247.7	6	4207.9	415.49	2.11
Residual	5722.1	565	10.1		
Total	30969.8	571			

Table 4.7 ANOVA for Model II (second order polynomial regression model)

Factor	Sum of square	Degree of freedom	Mean square	F_0	$F(0.05)$
Regression	29845.3	22	1356.6	662.32	1.56
Residual	1124.5	549	2.0		
Total	30969.8	571			

Table 4.8 ANOVA for Model III (multiple nonlinear regression model)

Factor	Sum of square	Degree of freedom	Mean square	F_0	$F(0.05)$
Regression	26442.8	6	4407.1	550.04	2.11
Residual	4527.0	565	8.0		
Total	30969.8	571			

Table 4.9 ANOVA for Model IV (stepwise regression model)

Factor	Sum of square	Degree of freedom	Mean square	F_0	$F(0.05)$
Regression	29707.6	7	4243.9	1896.36	2.03
Residual	1262.2	564	2.2		
Total	30969.8	571			

4.2 스패터 예측모델

4.2.1 신경 회로망[27]

용접부 품질과 관련되는 인장전단강도에 대한 예측 모델을 앞 절에서 제시하였다. 하지만 인장전단강도만으로 용접부의 품질을 대표하기에는 어렵다고 판단하여 용접부의 품질을 대표할 수 있는 두 번째 인자로 스패터를 선정하였다. 스패터는 용접부의 외관이나 인장전단강도를 저하시키는 요소로 용접부 품질에 좋지 않은 요소로 작용하고 있다.

따라서 본 절에서는 용접부 품질을 저하시키는 요소인 스패터를 예측하기 위한

모델을 제시하고자 한다. 스패터를 예측하기 위하여 인공지능형 알고리즘의 하나인 신경 회로망을 이용하여 모델을 제안하였다. 모델의 구성은 Fig. 4.5 와 같이 1개의 입력층(input layer)과 2개의 은닉층(hidden layer) 그리고 출력층(output layer)으로 구성되어 있으며 각각의 층에는 7개, 8개, 7개, 1개의 노드(node)로 구성하였다.

신경회로망에서 입력노드는 회귀모델과 동일한 입력인자로 용접전류, 용접시간, 전극 가압력, 강판1의 재질, 강판2의 재질, 강판1의 두께, 강판2의 두께로 총 7가지로 지정하였다. 또한 출력노드는 스패터의 발생여부로 지정하였다. 스패터 발생여부는 스패터가 발생하지 않았을 때 1, 스패터가 발생하였을 때 -1로 목표값(target)을 두고 모델을 학습(training)을 시켰다[14]. 학습에 사용된 데이터는 시뮬레이션에 사용했던 데이터 개수와 동일하게 총 675개를 사용하였다. 가중치를 학습시키기 위한 알고리즘으로 오류 역전파(error backpropagation) 알고리즘을 사용하였으며 신경회로망에 사용된 학습률(learning rate)는 0.1, 모멘텀 계수(momentum parameter)는 0.9로 설정하였다. 최대 학습수는 1,000회로 하였으며 학습은 1,000회를 모두 수행하였다. 1,000회의 학습 중 성능함수가 가장 좋은 결과를 이용하였다.

각 레이어를 연결하는 전달함수(transfer function)은 입력층과 1차 은닉층은 탄젠트 시그모이드(tangent-sigmoid) 함수를 사용하였고, 1차 은닉층과 2차 은닉층의 전달함수 및 2차 은닉층과 출력층의 전달함수는 선형(linear) 전달함수를 사용하였다. 또한 수렴속도를 빠르게 하기 위해 신경망 모델의 최적화 방법으로 레벤버그 마쿼드 알고리즘(Levenberg-Marquardt algorithm)을 이용하였다.

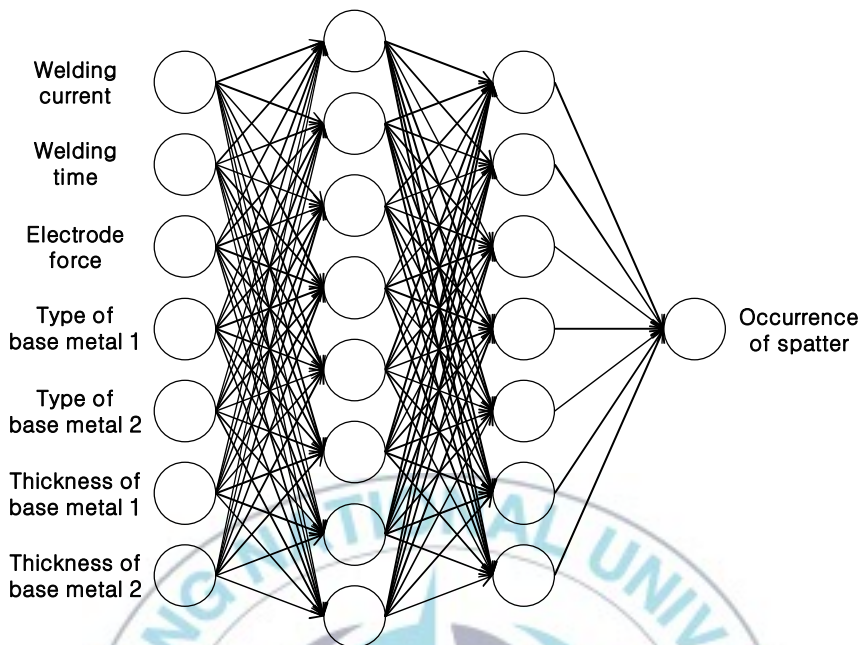


Fig. 4.5 Neural network model for spatter estimation

4.2.2 스패터 예측

스패터의 예측 성능을 판단하기 위하여 트레이닝의 결과 값과 시뮬레이션 결과 값을 비교하였으며, Table 4.10 과 같이 나타내었다. 스패터 예측모델의 결과값은 0보다 크면 1로, 0보다 작으면 -1로 분류시켜 스패터가 발생하는 조건을 예측하였다. Table 4.10 은 DP780 1.0t 의 조합으로 총 135의 데이터 중 2개의 데이터가 다른 것을 확인할 수 있다. Table 4.11 은 DP780 1.4t 의 조합이며 스패터 예측은 5개의 조건에서 일치하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 또한 DP780의 이종두께 조합을 Table 4.12, 이종강판 조합인 SPRC440조합을 Table 4.13, DP590조합을 Table 4.14 에 나타내었다. 각각 3, 2, 2개의 조건이 일치하지 않는 것을 확인할 수 있었고 전체 675개의 조건 중 14개의 오차를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

이와 같이 5가지 조합에 대하여 총 675개의 신경 회로망 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였을 때, 675개의 조건 중 661개의 조건에서 트레이닝 결과값이 일치

하는 것을 확인할 수 있었으며, 스패터 예측모델의 오차율은 0.021로 매우 낮은 것을 확인할 수 있었고 스패터 예측이 매우 좋다는 것을 알 수 있었다.

Table 4.10 Spatter prediction result of DP780 1.0t steel sheets

200	24	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
	21	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
	18	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
	15	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
	12	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
300	24	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
	21	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1
	18	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1
	15	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1
	12	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1
400	24	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1
	21	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1
	18	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1
	15	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
	12	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
Force (kgf)	Time (cycle)	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA

Table 4.11 Spatter prediction result of DP780 1.4t steel sheets

200	24	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
	21	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
	18	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
	15	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
	12	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
300	24	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
	21	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
	18	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1
	15	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1
	12	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1
400	24	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1
	21	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1
	18	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1
	15	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1
	12	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
Force (kgf)	Time (cycle)	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA

Table 4.12 Spatter prediction result of DP780 1.0t and 1.4t steel sheets

200	24	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
	21	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
	18	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
	15	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
	12	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
300	24	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
	21	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
	18	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1
	15	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1
	12	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1
400	24	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1
	21	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1
	18	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1
	15	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1
	12	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
Force (kgf)	Time (cycle)	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA

Table 4.13 Spatter prediction result of DP780 and SPRC440 1.0t steel sheets

200	24	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
	21	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
	18	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
	15	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
	12	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
300	24	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
	21	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1
	18	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1
	15	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1
	12	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1
400	24	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1
	21	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1
	18	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1
	15	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
	12	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
Force (kgf)	Time (cycle)	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA

Table 4.14 Spatter prediction result of DP780 and DP590 1.0t steel sheets

200	24	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
	21	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
	18	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
	15	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
	12	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
300	24	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
	21	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1
	18	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1
	15	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1
	12	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1
400	24	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1
	21	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1
	18	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1
	15	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
	12	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
Force (kgf)	Time (cycle)	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA

4.3 적정용접구간 예측모델

앞의 두 가지 예측모델을 통해 각 공정변수에 대한 인장전단강도 및 스파터를 예측할 수 있었다. 이러한 예측모델을 두 가지 예측 모델을 이용하여 저항 점 용접의 적정용접조건 구간을 나타낼 수 있는 로브곡선을 제시하고자 한다. Table 4.15 부터 Table 4.19 까지 각 조합을 차례대로 적정용접조건 구간 예측 모델인 로브곡선 예측모델을 제시하였다. 표에서 볼 수 있는 인장전단강도 값은 앞에서 제시한 최적회귀모델인 Model IV 을 이용하여 각 공정변수에 따른 예측 인장전단강도 값이다. 이러한 예측 인장전단강도 값을 Table 3.4 에 나타난 최소허용인장전단강도와 비교하여 왼쪽 경계선을 설정할 수 있었다. 또한 오른쪽 경계선은 스파터 예측 모델인 신경망 모델을 이용하여 오른쪽 경계선을 설정하여 로브곡선을 예측할 수 있었다.

실제 시뮬레이션 결과와 비교하였을 때 왼쪽 경계선 부분과 오른쪽 경계선 부분이 약간씩 줄어드는 경향을 보이고 있지만 전체적인 로브곡선의 형태는 매우 유사하게 예측되는 것을 확인할 수 있다.

Table 4.15 Acceptable welding range prediction result of DP780 1.0t steel sheets

200	24	4.41	8.22	11.33	13.76	15.51	16.57	16.94	16.62	15.62
	21	4.25	8.00	11.06	13.43	15.12	16.13	16.44	16.08	15.02
	18	4.08	7.78	10.78	13.10	14.74	15.69	15.95	15.53	14.42
	15	3.92	7.56	10.51	12.77	14.35	15.25	15.46	14.98	13.81
	12	3.75	7.34	10.23	12.44	13.97	14.81	14.96	14.43	13.21
300	24	4.41	8.22	11.33	13.76	15.51	16.57	16.94	16.62	15.62
	21	1.87	6.14	9.71	12.60	14.81	16.33	17.16	17.31	16.77
	18	1.71	5.92	9.44	12.27	14.42	15.89	16.66	16.76	16.16
	15	1.54	5.70	9.16	11.94	14.04	15.45	16.17	16.21	15.56
	12	1.38	5.48	8.89	11.61	13.65	15.01	15.68	15.66	14.95
400	24	0	4.50	8.64	12.10	14.88	16.97	18.37	19.08	19.11
	21	0	4.28	8.37	11.77	14.49	16.53	17.87	18.54	18.51
	18	0	4.06	8.09	11.44	14.11	16.09	17.38	17.99	17.91
	15	0	3.84	7.82	11.11	13.72	15.65	16.89	17.44	17.30
	12	0	3.62	7.54	10.78	13.34	15.21	16.39	16.89	16.70
Force (kgf)	Time (cycle)	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA

Table 4.16 Acceptable welding range prediction result of DP780 1.4t steel sheets

200	24	6.98	12.68	17.70	22.03	25.67	28.63	30.90	32.49	33.39
	21	6.81	12.46	17.42	21.70	25.29	28.19	30.41	31.94	32.78
	18	6.65	12.24	17.15	21.37	24.90	27.75	29.91	31.39	32.18
	15	6.48	12.02	16.87	21.04	24.52	27.31	29.42	30.84	31.58
	12	6.32	11.80	16.60	20.71	24.13	26.87	28.93	30.29	30.97
300	24	6.98	12.68	17.70	22.03	25.67	28.63	30.90	32.49	33.39
	21	2.87	9.03	14.51	19.30	23.40	26.82	29.55	31.60	32.96
	18	2.70	8.81	14.23	18.97	23.02	26.38	29.06	31.05	32.36
	15	2.54	8.59	13.96	18.64	22.63	25.94	28.57	30.50	31.75
	12	2.38	8.37	13.69	18.31	22.25	25.50	28.07	29.95	31.15
400	24	0	5.82	11.87	17.23	21.90	25.89	29.20	31.81	33.74
	21	0	5.60	11.60	16.90	21.52	25.45	28.70	31.26	33.14
	18	0	5.38	11.32	16.57	21.14	25.01	28.21	30.71	32.53
	15	0	5.16	11.05	16.24	20.75	24.58	27.71	30.17	31.93
	12	0	4.95	10.77	15.91	20.37	24.14	27.22	29.62	31.33
Force (kgf)	Time (cycle)	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA

Table 4.17 Acceptable welding range prediction result of DP780 1.0t and 1.4t steel sheets

200	24	4.41	8.22	11.33	13.76	15.51	16.57	16.94	16.62	15.62
	21	4.25	8.00	11.06	13.43	15.12	16.13	16.44	16.08	15.02
	18	4.08	7.78	10.78	13.10	14.74	15.69	15.95	15.53	14.42
	15	3.92	7.56	10.51	12.77	14.35	15.25	15.46	14.98	13.81
	12	3.75	7.34	10.23	12.44	13.97	14.81	14.96	14.43	13.21
300	24	4.41	8.22	11.33	13.76	15.51	16.57	16.94	16.62	15.62
	21	1.87	6.14	9.71	12.60	14.81	16.33	17.16	17.31	16.77
	18	1.71	5.92	9.44	12.27	14.42	15.89	16.66	16.76	16.16
	15	1.54	5.70	9.16	11.94	14.04	15.45	16.17	16.21	15.56
	12	1.38	5.48	8.89	11.61	13.65	15.01	15.68	15.66	14.95
400	24	0	4.50	8.64	12.10	14.88	16.97	18.37	19.08	19.11
	21	0	4.28	8.37	11.77	14.49	16.53	17.87	18.54	18.51
	18	0	4.06	8.09	11.44	14.11	16.09	17.38	17.99	17.91
	15	0	3.84	7.82	11.11	13.72	15.65	16.89	17.44	17.30
	12	0	3.62	7.54	10.78	13.34	15.21	16.39	16.89	16.70
Force (kgf)	Time (cycle)	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA

Table 4.18 Acceptable welding range prediction result of DP780 and SPRC440 1.0t steel sheets

200	24	1.98	4.97	7.27	8.89	9.82	10.06	9.62	8.50	6.69
	21	1.81	4.75	6.99	8.56	9.43	9.63	9.13	7.95	6.08
	18	1.65	4.53	6.72	8.23	9.05	9.19	8.64	7.40	5.48
	15	1.48	4.31	6.45	7.90	8.67	8.75	8.14	6.85	4.87
	12	1.32	4.09	6.17	7.57	8.28	8.31	7.65	6.30	4.27
300	24	1.98	4.97	7.27	8.89	9.82	10.06	9.62	8.50	6.69
	21	0	2.89	5.65	7.73	9.12	9.83	9.85	9.18	7.83
	18	0	2.67	5.38	7.40	8.74	9.39	9.35	8.63	7.22
	15	0	2.45	5.10	7.07	8.35	8.95	8.86	8.08	6.62
	12	0	2.23	4.83	6.74	7.97	8.51	8.36	7.53	6.02
400	24	0	1.25	4.58	7.23	9.19	10.46	11.05	10.96	10.18
	21	0	1.03	4.30	6.90	8.80	10.03	10.56	10.41	9.57
	18	0	0.81	4.03	6.57	8.42	9.59	10.07	9.86	8.97
	15	0	0.59	3.76	6.24	8.04	9.15	9.57	9.31	8.36
	12	0	0.37	3.48	5.91	7.65	8.71	9.08	8.76	7.76
Force (kgf)	Time (cycle)	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA

Table 4.19 Acceptable welding range prediction result of DP780 and DP590 1.0t steel sheets

200	24	3.05	6.40	9.06	11.04	12.33	12.93	12.85	12.08	10.63
	21	2.89	6.18	8.79	10.71	11.94	12.49	12.36	11.53	10.03
	18	2.72	5.96	8.51	10.38	11.56	12.05	11.86	10.99	9.42
	15	2.56	5.74	8.24	10.05	11.18	11.61	11.37	10.44	8.82
	12	2.39	5.52	7.96	9.72	10.79	11.18	10.87	9.89	8.21
300	24	3.05	6.40	9.06	11.04	12.33	12.93	12.85	12.08	10.63
	21	0.51	4.32	7.44	9.88	11.63	12.69	13.07	12.76	11.77
	18	0.35	4.10	7.17	9.55	11.24	12.25	12.58	12.22	11.17
	15	0.18	3.88	6.89	9.22	10.86	11.81	12.08	11.67	10.56
	12	0.02	3.66	6.62	8.89	10.48	11.38	11.59	11.12	9.96
400	24	0	2.68	6.37	9.38	11.70	13.33	14.28	14.54	14.12
	21	0	2.46	6.10	9.05	11.31	12.89	13.79	13.99	13.52
	18	0	2.24	5.82	8.72	10.93	12.45	13.29	13.45	12.91
	15	0	2.02	5.55	8.39	10.55	12.01	12.80	12.90	12.31
	12	0	1.80	5.27	8.06	10.16	11.58	12.30	12.35	11.70
Force (kgf)	Time (cycle)	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA



제 5 장 공정변수 최적화

5.1 목적함수 및 적합도 함수

저항 점 용접공정에서 최적점을 찾을 때 작업자의 직관으로만 최적점을 구한다면 단순히 구할 수 있지만 정확한 최적점인지 알 수 없다. 따라서 수치적인 방법으로 최적점을 구하는 것이 비교적 정확한 최적점을 구할 수 있다.

점 용접 주요 공정변수를 최적화하는 것은 두 가지 측면에서 중요하다. 첫 번째 용접부의 품질과 관련되는 용접성과 두 번째로 생산단가 및 생산속도와 관련되는 생산성이다. 본 연구에서는 이 두 가지를 만족하는 최적의 용접조건을 찾기 위하여 목적함수 및 적합도 함수를 정의하였다[28][29].

이러한 인자들을 고려하여 공정변수의 최적화를 진행하였다. 첫 번째 측면에서 용접성과 관련되는 공정변수로 인장전단강도와 스패터의 유무를 고려하지 않을 수 없다. 인장전단강도는 용접부의 품질을 나타내는 대표적인 인자이고 또한 스패터 역시 용접부의 외관품질 및 인장전단강도와 관련되기 때문에 중요한 인자이다. 두 번째 측면에서 생산성은 용접전류와 용접시간을 들 수 있다. 용접전류는 낮을수록 생산단가에 유리하고, 용접시간은 짧을수록 생산속도가 빠르므로 짧을수록 유리하다. 하지만 이 4가지 인자는 서로 다른 차수(order)를 가지고 있기 때문에 이를 목적 함수를 이용하여 표준화(normalizing)하였다.

식 (5.1) 은 인장전단강도에 대한 목적함수이다. 인장전단강도의 목적함수는 인장전단강도가 클수록 유리하기 때문에 허용인장전단강도를 1로 두고 0의 인장전단강도를 가지는 값을 0으로 두어 목적함수를 정의하였다. Fig. 5.1 (a) 에서 보는 바와 같이 허용인장전단강도보다 예측인장전단강도가 크다면 1보다 큰 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한 용접전류는 생산단가 측면에서 작을수록 유리하므로 3 kA 를 1로, 11 kA 를 0으로 하여 목적함수를 정의하였으며 Fig. 5.1 (b)와 같이 표현된다. 용접시간은 짧을수록 유리하기 때문에 12 cycle 을 1로, 24 cycle 을 0으로 나타내었고, 스패터 유무는 스패터가 발생하지 않을 때 1, 스패터가 발생할 때 0으로 두고 목적함수를 정의하였으며, Fig. 5.1 (c), (d) 와 같이 그림으로

표현하였다.

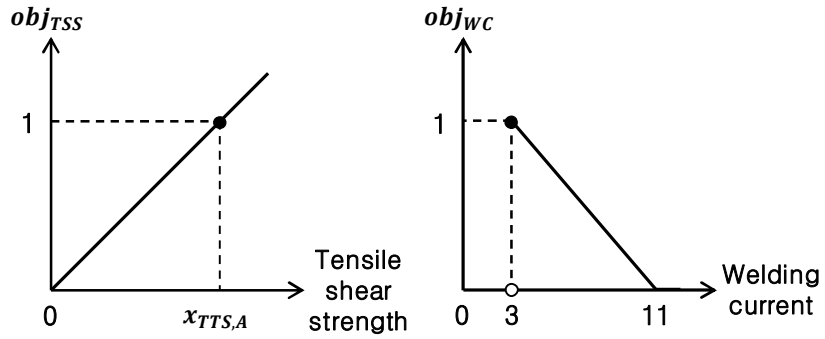
$$obj_{TTS} = \begin{cases} \frac{x_{TTS}}{x_{TTS,A}} & (x_{TTS} \geq 0) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (5.1)$$

$$obj_{WC} = \begin{cases} \frac{11 - x_{WC}}{11 - 3} & (3 \leq x_{WC} \leq 11) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (5.2)$$

$$obj_{WT} = \begin{cases} \frac{24 - x_{WT}}{24 - 12} & (12 \leq x_{WT} \leq 24) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (5.3)$$

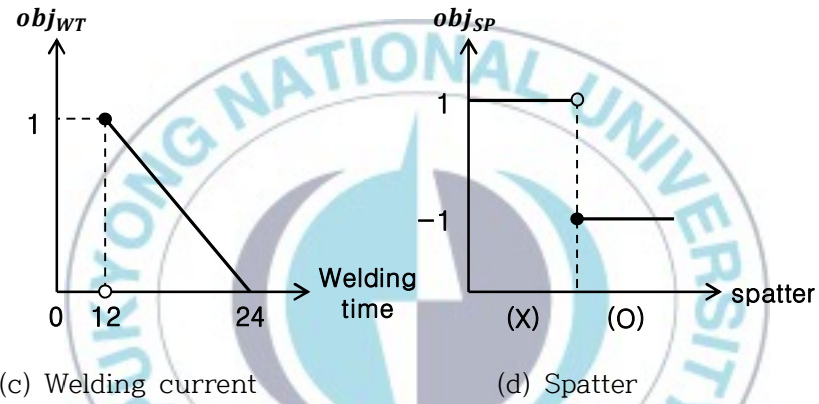
$$obj_{SP} = \begin{cases} 1 & (spatter X) \\ -1 & (spatter O) \end{cases} \quad (5.4)$$

여기서, obj_{TTS} , obj_{WC} , obj_{WT} , obj_{SP} 는 각각 인장전단강도, 용접전류, 용접 시간 및 스패터의 목적함수를 나타낸다. 또한 x_{TTS} , x_{WC} , x_{WT} , x_{SP} 는 각각 인장전단강도, 용접전류, 용접시간 및 스패터의 입력값을 나타내고, $x_{TTS,A}$ 는 재료별 허용인장전단강도를 나타낸 것이다.



(a) Tensile shear strength

(b) Welding current



(c) Welding current

(d) Spatter

Fig. 5.1 Objective function

최적화를 위하여 앞에서 정의한 목적함수에 가중치를 곱하여 적합도 함수를 정의하여 식 (5.5) 에 나타내었다.

$$fitness = (w_{TTS} \ w_{WC} \ w_{WT} \ w_{SP}) \cdot \begin{pmatrix} obj_{TTS} \\ obj_{WC} \\ obj_{WT} \\ obj_{SP} \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

여기서, $fitness$ 는 적합도 함수의 값(fitness value)를 나타내고, w_{TTS} , w_{WC} ,

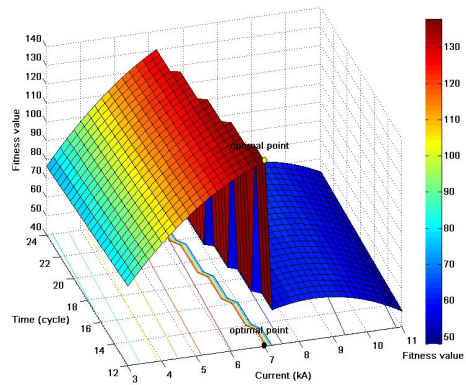
w_{WT} , w_{SP} 는 각각 인장전단강도, 용접전류, 용접시간, 스패터의 가중치이다. 가중치는 인장전단강도에 40, 용접전류에 10, 용접시간에 10, 스패터에 40의 가중치를 두었다.

5.2 적합도에 따른 최적화

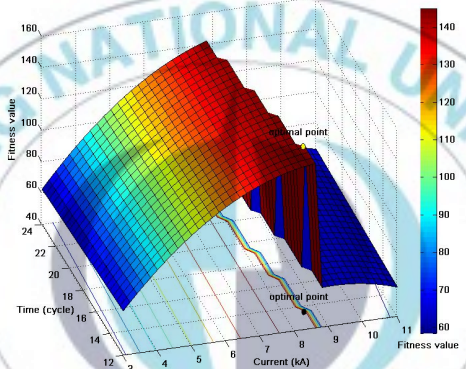
4절에서 인장전단강도 모델로는 회귀모델을 사용하여 인장전단강도를 예측하였고, 또한 스패터를 신경 회로망을 이용하여 예측할 수 있었다. 이러한 예측모델들을 적합도 함수에 이용하여 적합도를 판별하고자 한다.

인장전단강도 예측 모델과 스패터 예측 모델을 이용하여 각 조건별로 어떠한 적합도 값을 갖는지 확인할 수 있으며 Fig 5.2 에서 5.6 까지와 같이 표현할 수 있다. 각 그래프는 용접전류와 용접시간에 대한 적합도를 3차원 그래프로 표현한 것이며 각 가압력 및 재료조합에 대하여 최적점을 표시하였다. 최적 용접 공정변수는 적합도 값이 최대가 되는 점으로 Fig. 5.2 에서 Fig. 5.6 까지 차례대로 표현하였다.

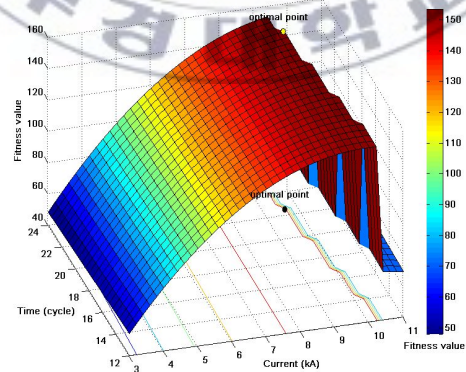
그래프를 살펴보게 되면 전류 및 시간이 늘어날수록 적합도 값이 늘어나는 것을 확인할 수 있으며, 스패터가 발생한 구간을 기점으로 적합도 값이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 스패터가 용접부에 악영향을 미치기 때문에 적합도를 확연히 구분하고자 목적함수를 설정하였기 때문이다. 또한 최적점은 스패터가 발생하기 직전의 전류에서 발생하는 것을 각 그림에서 확인할 수 있었다.



(a) Electrode force : 200 kgf

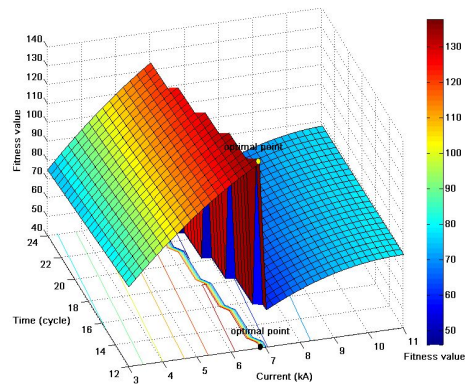


(b) Electrode force : 300 kgf

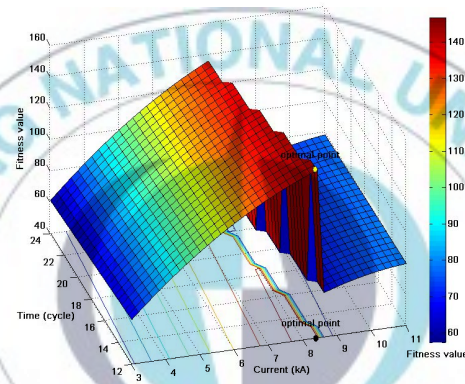


(c) Electrode force : 400 kgf

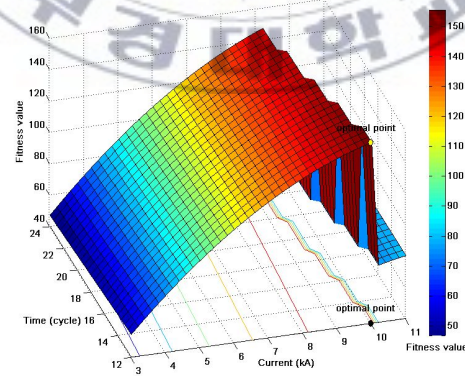
Fig. 5.2 Optimal point of DP780
1.0t steel sheets



(a) Electrode force : 200 kgf

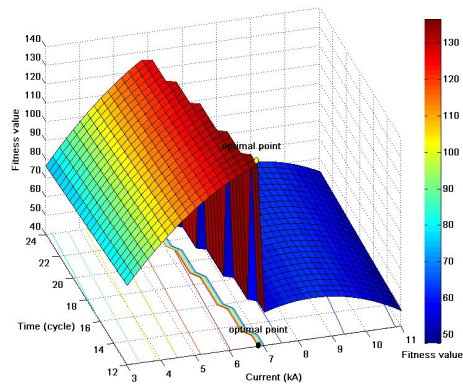


(b) Electrode force : 300 kgf

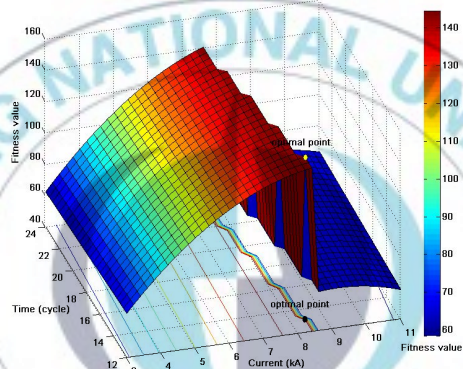


(c) Electrode force : 400 kgf

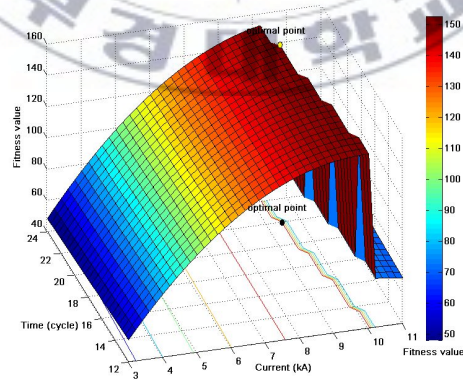
Fig. 5.3 Optimal point of DP780
1.4t steel sheets



(a) Electrode force : 200 kgf

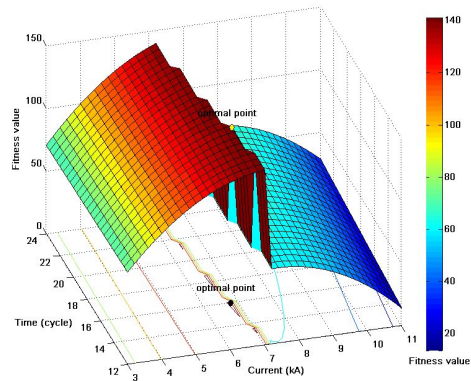


(b) Electrode force : 300 kgf

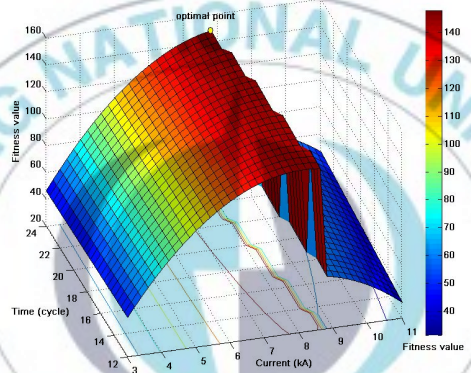


(c) Electrode force : 400 kgf

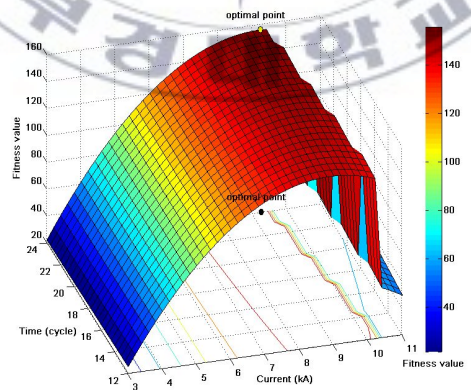
Fig. 5.4 Optimal point of DP780
1.0t and 1.4t steel sheets



(a) Electrode force : 200 kgf

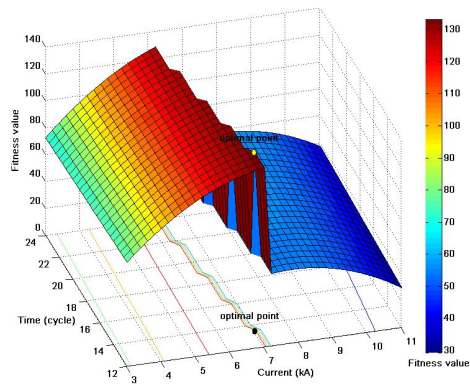


(b) Electrode force : 300 kgf

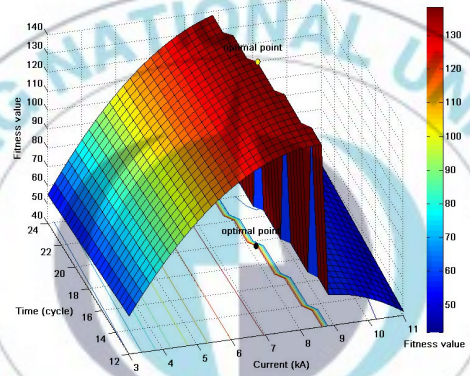


(c) Electrode force : 400 kgf

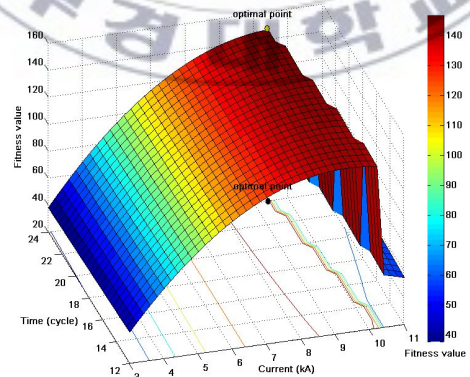
Fig. 5.5 Optimal point of DP780 1.0t and SPRC440 1.0t steel sheets



(a) Electrode force : 200 kgf



(b) Electrode force : 300 kgf



(c) Electrode force : 400 kgf

Fig. 5.6 Optimal point of DP780 1.0t and DP590 1.0t steel sheets

5.3 적정용접구간 예측모델의 최적점

앞의 4.3 절에서 예측한 로브곡선을 이용하여 공정변수에 따른 적합도 함수를 비교하여 조합 및 가압력에 따른 최적 용접전류 및 용접시간을 Table 5.1 에 나타낼 수 있었다.

각 조합 및 가압력에 따른 최적점은 각각 스파터가 발생하기 전에 전류대에서 나타나는 것을 확인할 수 있었고, 또한 시뮬레이션 결과인 Table 3.5 에서 3.9 까지의 표를 각각 비교했을 때 역시 스파터가 발생하기 바로 직전 영역에서 적합도가 가장 높은 것을 확인할 수 있었다. 이로 인해 앞 절에서 제시하였던 로브곡선의 예측성능이 우수함을 다시 한번 확인할 수 있었으며, 또한 적합도 함수를 정의함으로써 영역 내에서 적합성이 가장 높은 최적점을 제시할 수 있었다.

Table 5.1 Optimal point at acceptable welding range prediction result

No.	Steel sheet 1	Steel sheet 2	Force [kgf]	Optimal condition		Tensile shear strength [kN]	Fitness value
				current [kA]	time [cycle]		
1	DP780 1.0t	DP780 1.0t	200	7	12	13.97	137.66
			300	8	21	16.33	142.85
			400	10	15	17.44	151.93
2	DP780 1.4t	DP780 1.4t	200	6	12	20.71	128.91
			300	8	12	25.50	143.24
			400	10	12	29.62	155.17
3	DP780 1.0t	DP780 1.4t	200	6	12	12.44	129.89
			300	8	18	15.89	142.75
			400	9	24	18.37	151.18
4	DP780 1.0t	SPRC440 1.0t	200	7	12	8.28	139.50
			300	8	21	9.83	146.51
			400	9	24	11.05	155.30
5	DP780 1.0t	DP590 1.0t	200	7	12	10.79	132.91
			300	8	21	12.69	137.90
			400	9	24	14.28	145.61

제 6 장 결 론

본 논문에서는 자동차 차체의 경량화를 위한 재료인 DP780의 저항 점 용접성을 저항 점 용접 시뮬레이션을 이용하여 평가하고 적정용접조건을 제시하였으며, 적정 용접 조건 예측모델을 개발하였고, 각 조합에 대한 용접공정변수를 최적화하였다.

차량 경량화에 사용되는 DP780의 저항 점 용접성 및 적정용접조건을 도출하기 위하여 저항 점 용접 시뮬레이션 프로그램인 SORPAS를 이용하여 저항 점 용접 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 저항 점 용접에서 주요 공정변수인 용접전류, 용접시간 및 전극 가압력에 대한 용접특성을 알아보았으며, DP780의 동종재료 조합, 이종재료 조합 및 이종두께 조합에 대한 용접특성을 알아보았다. 또한 각 조합 및 전극 가압력에 따라 용접 전류와 용접 시간의 적정용접조건 범위를 용접성 로브의 형태로 도출할 수 있었다.

저항 점 용접에서 용접부의 품질과 관련되는 인장전단강도와 스패터를 예측하기 위하여 각각 회귀모델과 인공신경망을 사용하여 예측 모델을 제시하였다. 회귀모델에서는 총 3가지를 제시하였으며, Model I 은 다중 선형 회귀모델, Model II 는 2차 다항 회귀모델, Model III 는 다중 비선형 회귀모델을 제시하였다. 이중 가장 예측성능이 좋은 모델은 Model II 였지만, 항의 개수가 너무 많은 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 2차 다항 회귀모델에 대하여 단계별 회귀를 사용하여 변수의 최적화를 수행하였다. 단계별 회귀를 통해 얻어진 최적 회귀모델을 Model IV 로 제시할 수 있었으며, 예측성능은 또한 Model II 보다 거의 차이가 나지 않는 것을 확인할 수 있었다. 두 번째로 스패터를 예측하기 위하여 인공신경망을 사용하였으며 예측성능이 우수함을 알 수 있었다.

공정 모델을 이용하여 자동화를 위한 용접공정변수를 최적화하였다. 최적화는 용접성 및 생산성 모두를 고려하여 각 공정변수를 목적함수로 정의하였고 목적함수에 가중치를 곱하여 적합도 함수를 정의하였다. 이러한 적합도 함수를 용접성을 나타낼 수 있는 평가지수로 지정하고, 총 5가지 조합 및 가압력에 대하여 최적 용접 전류 및 최적 용접시간을 제안할 수 있었다.

Reference

1. 오창석, 김성준 (2010.7), 자동차용 고강도 강판 기술개발 동향, 기계와 재료, 재료연구소
2. 박경현(2013.4), 자동차용 강판의 고강도 경량화, 자동차 경제
3. 최두열, 김영곤 (2009.4), 자동차용 강재의 접합기술 동향, 대한용접접합학회지, 27-2, pp.125-130
4. Ming-hui CAI, Hua DING, Young-kook LEE, Zheng-you TANG and Jian-su ZHANG (2011), Effects of Si on Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Hot-rolled Ferrite and Bainite Dual-phase Steels, ISIJ International, 51-3, pp.476-481
5. 공종판, 강길모, 한태교, 진광근, 강정운 (2011), DP강의 전기저항점 용접부 너짓직경에 미치는 Si 함량의 영향, 대한용접접합학회지, 29-5, pp.597-603
6. Majid Pouranvari, Eslam Ranjbarnoodeh (2012), Dependence of the Fracture Mode on the Welding Variables in the Resistance Spot Welding of Ferrite-Martensite DP980 Advanced High-Strength Steel, Materials and technology, 46-6, pp.665-671
7. M. I. Khan, M. L. Kuntz, E. Biro and Y. Zhou(2008), Microstructure and Mechanical Properties of Resistance Spot Welded Advanced High Strength Steels, Materials Transactions, 49-7, pp.1629-1637

8. Tapan Kumar Pal and Kaushik Bhowmick(2010), Resistance Spot Welding Characteristics and High Cycle Fatigue Behavior of DP 780 Steel Sheet, Journal of Materials Engineering and Performance, 21-2, pp.280-285
9. G. Weber, S. Goklu (2006), Resistance Spot Welding of Uncoated and Zinc Coated Advanced High Strength Steel- Weldability and Process Reliability-Influence of Welding Parameters, Welding in the World, 50-3, pp.3-12
10. E.W.Kim and T. W. Eagar(1988), Parametric Analysis of Resistance Spot Welding Lobe Curve, SAE Technical Paper, 880278, pp.1-12
11. Cesar M. Calva and Thomas W. Eagar(1990), Enhancement of the Weldability in Resistance Spot Welding, AWS Detroit Section Sheet Metal Welding Conference IV, Southfield.MI(1990)
12. 홍태민, 최용범, 김상필,이준희(1993), 저항 점 용접의 용융부 추정에서 인공신경회로망을 이용한 기법과 Regression 기법의 비교 분석, 대한용접학회, 춘계학술대회논문집, pp.929-932
13. Norasiah Muhammad, and Yupiter HP Manurung(2012), Design Parameters Selection and Optimization of Weld Zone Development in Resistance Spot Welding, World Academy of Science, Engineering and Technology, 71, 1220-1225
14. 조정호 (2013), 신경망 알고리즘을 이용한 아크 용접부 품질 예측, 대한용접접

합학회지, 31-3, pp.44-48

15. 한재희, 양성모, 유효선, 김태진(2010), GA에 의한 차량용 이조재 최적점 용접 조건, Transactions of KSAE, 18-4, pp.68-73

16. 박현성, 김태형, 이세헌 (2003), 저항 점 용접에서 반응표면분석법을 이용한 고장력 TRIP강의 최적 용접 조건 설정에 관한 연구, 대한용접접합학회지, 21-2, pp.206-211

17. 김명준 (1998), 저항 용접, 기문사, 개정2판

18. 용접 접합 편람III(2007), 대한용접접합학회

19. Zhang. Hongyan, Senkara, Jacek(2005), Resistance welding - Fundamentals and Applications, CRCPrILlc

20. SORPAS Version 10.6 User Manual(2011), SWANTEC

21. Zhang, Wenqi (2004), Design and Implementation of Software for Resistance Welding Process Simulations, Journal of Materials & Manufacturing, Vol. 112, pp.556-564.

22. 김태형, 이동욱, 이세헌(2005), 로브곡선을 이용한 자동차용 신강재의 저항 점 용접성 평가 기술 개발, 대한용접학회, 23-4, pp.59-65

23. Q, Song, W. Zhang, and N. Bay(2006), Contact Modelling in Resistance Welding. Part 1 : Algorithms and Numerical Verification, Journal of

Engineering Manufacture, 220-5, pp. 599 -606

24. Q, Song, W. Zhang, and N. Bay(2006), Contact Modelling in Resistance Welding. Part 2 : Experimental verification, Journal of Engineering Manufacture, 220-5, pp.607-613

25. Douglas C. Montgomery(2009), Design and Analysis of Experiments, Seventh Edition, Wiley & Sons, Inc.

26. 박성현(1998), 회귀분석, 3판, 민영사

27. Neural Network Toolbox TM6 - User's Guide, MATLAB, The MathWorks, Inc.

28. 김동윤, 박영환 (2011), 원격 스캐너를 이용한 알루미늄 레이저 용접에 대한 생산 공정 최적화 설계, 대한용접접합학회지, 29-6, pp.702-707

29. 박한영, 오세영, 김영도, 배상식(2011), 공학최적화 : 이론과 실제, 홍릉과학출판사

A Study of the Resistance Spot Welding Simulation and Process Parameters for 780MPa Steel

Chang-Seok Son

*Department of Mechanical Engineering,
Graduate School of Pukyong National University*

ABSTRACT

Nowadays, car manufacturers applied many high strength steels such AHSS or UHSS to car bodies for weight lightening. In this study, we conducted resistance spot welding simulation to optimized used. There two combinations for same steel sheet which were DP780 1.0t, DP780 1.4t. Dissimilar steel sheet combination with different thickness was 1.0t, and 1.4t of DP780. Different steel combinations were DP780 1.0t and SPRC440 1.0t, and DP780 1.0t and DP590 1.0t.

Tensile shear strength estimated by using second order polynomial regression model and spatter estimated by using neural network. In addition optimized welding condition was

determined in terms with weldability and productivity using objective function and fitness function.



감사의 글

연구실에 들어오고 어느덧 세 번째 겨울이 지나가고 있습니다. 2년이 긴 시간이라고 생각했지만, 연구실에 들어와 지내다보니 벌써 졸업이 얼마남지 않았습니다. 긴 시간이라고 생각했던 2년 동안 연구실 생활을 하면서 좋은 사람들을 만나고, 그들과 함께 했던 재밌고 즐거웠던 많은 일들이 기억에 남습니다.

2년 동안 저를 이끌어주신 우리 박영환 교수님 정말 감사드립니다. 처음 들어올 때부터 지금까지 항상 부족한 저를 믿고 이끌어주시고 채워주시던 교수님의 가르침이 평생 기억에 남을 것 같습니다.

또한 제 부족한 논문을 심사해주시고 가르침을 주셔서 졸업을 할 수 있게 해주신 강대민 교수님, 김태완 교수님께 감사드립니다. 대학원 수업에서 들었던 강대민 교수님의 소성론과 쉽게 접하지 못했던 자연모사 공학을 가르쳐 주신 김태완 교수님의 명강의는 아주 감명 깊었습니다.

한양대학교 이세현 교수님, 충북대학교 조정호 교수님을 비롯하여 제 논문이 있도록 도와주신 많은 분들께 감사의 말씀을 드립니다. 또한 제 연구를 도와주신 기아차 전정상 박사님, 대우조선해양의 이희근 과장님, 용접을 하느라 항상 눈이 충혈 되어있는 부산대학교 상현이에게도 감사의 말씀을 전합니다.

지금은 학교에 없지만 항상 뒤에서 가르침을 준 우리 동윤이형, 저를 연구실에 있게 해준 내 친구 영호, 많은 어려움을 딛고 멋지게 취업을 한 성현이와 민경이, 수줍음이 많은 윤정을 비롯한 졸업한 우리 연구실 식구들을 만나 즐거운 대학원 생활을 할 수 있었습니다. 더불어 항상 열심히 하는 우리 동기 진수형, 실험실을 위해 항상 애쓰는 내 친구 종중이, 항상 한결같은 우리 후배 재완이, 항상 선배들 뒤치다꺼리하면서 불평 한마디 없는 우리 세원이, 무엇이든 항상 열심히하고 열정적인 지은이, 항상 긍정에너지를 주는 실험실 분위기 메이커 선영이에게도 고맙다는 말을 전합니다. 졸업을 해도 이 인연이 끊기지 않고 자주 볼 수 있었으면 좋겠습니다.

그리고 처음에 실험실에 들어와 적응하도록 많은 도움을 준 우리 큰형님 경도형, 발표연습을 많이 도와주었던 경우형, 귀여운 외모의 소유자 태희형, 직장에 첫 출근을 하고 있을 창근이형, 늘 연구실을 지키는 태현이형과 성준이형, 옆 연구실 명성이와 재성이를 비롯한 여러 사람들에게 고마움을 전합니다. 여러분이 있었기에 지난 2년 동안 무사히 대학원 생활을 할 수 있었습니다.

그리고 제가 가는 길을 묵묵히 바라봐주는 우리 친구들에게도 고마움을 전합니다. 늘 뒤에서 응원해주는 형과 형수님, 내 동생 정민이에게도 감사의 말씀을 전합니다. 마지막으로 저를 이 세상에 있게 해주신 우리 아버지, 어머니께 감사드립니다. 저를 믿고 제가 하고 싶은 일을 할 수 있도록 뒤에서 항상 밀어주시는 부모님이 계셔서 무사히 논문을 완성하고 졸업을 할 수 있었습니다. 아버지, 어머니 사랑합니다.



2014년 1월 6일

손창석 올림