

자동차용 박강판 겹치기 이음부의 CO₂ 아크 용접에서 다중회귀분석기법을 이용한 용입깊이 예측에 대한 연구

이경민* · 심현우* · 권재형* · 윤복동** · 정민기** · 박문수*** · 이보영****,†

*한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 대학원

**광주 기아자동차 차체생기팀

***현대 NGV

****한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

A Prediction of the Penetration Depth on CO₂ Arc Welding of Steel Sheet Lap Joint with Fillet for Car Body using Multiple Regression Analysis Technique

Kyungmin Lee*, Hyunwoo Sim*, Jaehyung Kwon*, Bukdong Yoon**, Minki Jeong**,
Moonsoo Park*** and Boyoung Lee****,†

*Dept. of Aerospace and Mech. Eng., Graduate school of Korea Aerospace Univ., Goyang 412-791, Korea

**Dept of Gwangju Body Manufacturing Engineering Team of KIA MOTORS, Gwangju 502-711, Korea

***New Technology Development Team, Hyundai NGV Co.Ltd, Seoul 151-742, Korea

****School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace Univ., Koyang 412-160, Korea

†Corresponding author : bylee@kau.ac.kr

(Received February 17, 2012 ; Revised April 18, 2012 ; Accepted April 30, 2012)

Abstract

Welding is an essential process in the automotive industry. Most welding processes that are used for auto body are spot welding and CO₂ welding are used in a small part. In production field, CO₂ welding process is decreased and spot welding process is increased due to welding quality is poor and defects are occurred in CO₂ welding process frequently. But CO₂ welding process should be used at robot interference parts and closed parts where spot welding couldn't. Because of the 0.65mm ~ 2.0mm thickness steel sheet were used in the automotive industry, poor quality of welding area such as burn through and under fill were happened frequently in CO₂ process.

In this paper, we will study about the penetration depth which gives a huge impact on burn through changing a degree of base metal, welding position and torch angle. Voltage, current and welding speed were fixed but degree of base metal, welding position and torch angle were changed. And Cold-Rolled(CR) steel sheet was used. Penetration depth was analysed by multiple regression analysis to derive approximate calculations. And reliability of approximate calculations were confirmed through additional experiments. As the results of this research, we confirmed the effect of torch and plate angle to bead shape. And we present a possibility that can simulate more accurate to weld geometry, as deduced the verification equations that has tolerance of less than 21.69%.

Key Words : Welding position, Angle of plate, Torch angle, Penetration depth, Multiple regression analysis

1. 서 론

CO₂용접은 산업현장에서 가장 널리 사용되어지고 있

는 용접으로 불활성가스 대신 이산화탄소 가스 100%를 이용하는 용접이다. 와이어 송급 롤러로 송급되어지는 용접와이어에 전류가 전도되어 와이어와 모재 사이

에 아크를 발생시켜 용접하는 방법으로 용가재는 solid wire와 flux cored wire로 크게 나누어진다. 연속적인 와이어 송급이 가능하기 때문에 다른 용접에 비해 용접 능률이 높으며, 경제적이고, 용접속도가 빨라 일반 구조물의 용접 작업에 많이 이용되어지고 있다¹⁾.

자동차 산업의 경우 spot 용접을 주로 사용하고 있지만 spot 용접기가 용접할 수 없는 폐구간 등에서 주로 CO₂ 용접을 사용하고 있다. 특히 차체 생산 라인과 자동차 부품 산업에서는 완제품을 생산하기 위해서 CO₂ 용접이 꼭 필요하다. 차체 생산 라인의 경우 사용되는 용접자세는 전 자세가 거의 다 사용된다고 할 수 있지만 주로 아래보기 자세 또는 수평 필릿 자세로 용접하는 것이 일반적이다. 또한 용접 이음부는 제품의 복잡한 형상으로 인한 성형시의 공차발생 및 가공의 난해함 등을 이유로 맞대기 이음을 사용하지 않고, 겹침 이음을 사용한다²⁾.

박판재를 사용하는 차체 용접에서의 CO₂ 용접은 용접 입열에 매우 민감하여 조금만 용접 조건이 바뀌어도 용락이나 용착 등의 용접 결함이 발생할 수 있다. 이러한 용접 결함의 발생은 차체 공장 전체의 가동을 정지시켜 가동률을 떨어뜨리는 결과를 가져온다. 때문에 용접 결함이 발생하지 않게 하기 위하여 현장에 사용하기에 적합한 최적 용접 조건(용접 전류, 용접 전압, 용접 속도, 토치 각도, 용접 자세 등)을 지속적으로 연구하여 적용시키는 것이 무엇보다 중요하다.

기존 연구자들의 경우 용접형상의 재현성을 좀 더 높이기 위해 전류와 전압, 용접속도에 대한 민감도 분석과 같은 통계적인 방법을 사용하여 비드 형상을 예측하는 연구가 진행되었고³⁾ 다중회귀 분석을 통해 CO₂ 레이저 용접에서의 비드예측 연구가 진행되었다⁴⁾. 하지만 아크 용접 시 토치와 모재 각도에 따라 용입이 어떻게 바뀌는지에 대한 연구는 아직 미비하다. 김재성⁵⁾ 등이 연구한 결과를 보면 CO₂ 용접 공정에서 수직자세로 용접할 경우 전진각을 90°로 하여 상하향 용접을 할 때 좋은 용접 품질을 확보할 수 있고 아크도 안정적이라는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 용접부의 위치, 로봇팔의 간섭에 따른 와이어의 꼬임 등에 의해 최적 자세로 용접이 불가능한 경우 모재각이나 토치각에 변화를 주어 용접해야 하며, 그에 따라 최적 자세에서 얻어진 용접 품질을 확보할 수 없다.

이에 본 연구에서는 고정된 전류와 전압에서 모재각과 토치각을 각각 변화시켜 용접 한 후 다중회귀 분석법을 적용하여 실험결과를 통해 확보한 최적자세 범위 내에서 용접결함이 발생하지 않을 수 있도록 용입을 예측하는 근사식을 도출하였다. 또한 근사식에 대한 검증

을 위해 임의의 조건으로 실험하여 근사식의 정확도를 확인하였다.

2. 실험장치 및 용접 조건

2.1 재료 및 시편제작

본 연구에서는 0.9mm 두께의 냉연강판(CR)을 사용하였으며, 상판과 하판 모두 동일한 CR 강재로 겹치기 용접을 진행하였다. 용가재는 ϕ 0.9의 AWS 규격을 따르는 ER-70S를 사용하였다.

2.2 실험장치

본 연구에서 정밀하고 안정된 용접작업을 위해 DAIHEN사의 CO₂/MAG인버터 아크용접기 DM-350을 사용하였으며 사용한 용접기와 와이어 송급장치를 Fig. 1에 나타내었다.

2.3 용접 조건 및 실험 방법

모재각도는 0°, 45°, 90°로 변화시키며 각 모재각도에 따라 토치각을 45°, 60°, 90°로 변화시켰다. 모재각과 토치각 조건은 Table 1에서 확인할 수 있다. 그리고 용접 변수 CTWD, 전류, 전압, 및 용접속도에 대한 조건은 Table 2에 나타내었다. 정확한 개요 모델은 Fig. 2에 나타내었다. 용락과 험핑 비드가 발생하지 않는 최적용접조건 산출을 위한 선행 겹치기용접을 실시

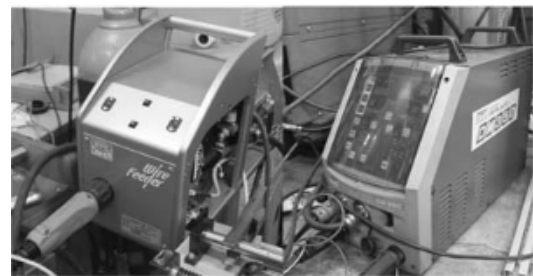


Fig. 1 Wire feeder and CO₂ welding machine

Table 1 Variable degree conditions

CTWD	Current	Voltage	W/S
15mm	120A	22v	60cm/min

Table 2 Welding Condition

Plate angle θ	0°(PA)			45°(PB)			90°(PC)		
Torch angle ϕ	90°	60°	45°	90°	60°	45°	90°	60°	45°

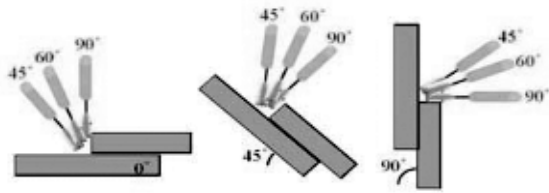


Fig. 2 Welding torch and the plate degree

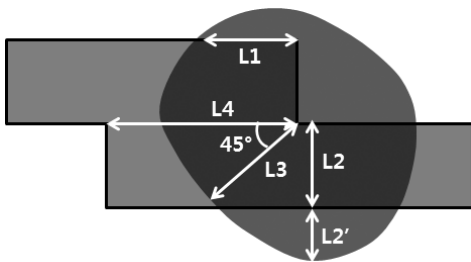


Fig. 3 Penetration Directions

- L1 : maximum penetration depth in the horizontal direction from upper plate
- L2 : maximum penetration depth in the vertical direction from upper plate
- L2' : length of back bead from lower plate back side
- L3 : maximum penetration depth in the 45 degree from the point where upper and lower plate meet
- L4 : overlap length of upper and lower plate

하여 실험에서 사용될 전류와 전압을 120A, 22V로 선정하였다. 또한 용접을 위해 사용된 DAIHEN사의 CO₂/MAG인버터 아크용접기 DM-350은 실제 차체 생산라인에서 많이 사용되며, 아크의 안정성이 우수하다고 평가받고 있다. 이에 본 실험에서는 각 조건에 대한 용접을 1회 진행하여 데이터를 분석하였다.

2.3.1 형상인자

겹치기 용접에서 모재각과 토치각 변화에 따라 가장 크게 영향을 받을 것이라고 예측되는 비드 단면 형상에 대한 형상인자를 다음과 같이 선정하였고 Fig. 3에 나타내었다. 선정된 형상인자 중 용접 후에 측정이 어려운 L1과 L3의 정확한 측정을 위하여 상판과 하판의 겹침 부위(L4)를 동일하게 20mm로 고정 후 실험을 진행하였다. 따라서 용접 후 L1과 L3의 측정은 상판과 겹쳐진 하판의 끝단에서 20mm 떨어진 구간을 기준으로 진행되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험결과

Table 1, Table 2를 조건으로 용접한 후 단면 비드

Table 3 Penetration lengths

θ (Deg)	Φ (Deg)	Penetration Lengths (mm)			
		L1	L2	L2'	L3
0	90	2.300	1.615	0.715	1.361
	60	3.226	1.529	0.629	1.715
	45	3.742	1.473	0.573	1.826
45	90	2.225	1.589	0.689	1.450
	60	3.150	1.471	0.571	1.450
	45	4.600	1.355	0.455	1.788
90	90	2.756	1.392	0.492	1.441
	60	3.846	1.346	0.446	1.573
	45	4.200	1.300	0.400	1.644

의 형상인자 측정값을 Table 3에 나타내었다.

모재각이 0°일 경우 토치각을 90°에서 45°로 감소시키면서 용접한 결과 형상인자 L1과 L3은 증가하였고, L2 + L2'는 감소하였다. 또한 모재각이 45°일 경우 토치각을 90°에서 45°로 감소시키면서 용접한 결과에서도 형상인자 L1과 L3는 증가하였고, L2 + L2'는 감소하였다. 또한 모재각이 90°일 경우 토치각을 90°에서 45°로 감소시키면서 용접한 결과에서도 형상인자 L1과 L3는 증가하였고, L2 + L2'는 감소하는 동일한 결과를 확인할 수 있었다. 모재각과 토치각에 따른 용입깊이 L1은 Fig. 4에 도식화 하였고 L2 + L2'와 L3는 각각 Fig. 5, Fig. 6에 도식화하여 나타내었다. 토치각이 90°에서 45°로 감소할수록 L2 + L2'방향으로의 용입 깊이가 감소하는 것을 알 수 있는데, 이러한 현상은 아크블로우의 방향이 토치각 변화로 인해 달라짐으로써 하판의 용입 깊이에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 같은 토치각일 경우 모재각이 0°에서 90°로 증가함에 따라 L2 + L2'방향으로의 용입 깊이가 감소하는 것을 확인할 수 있는데 이는 용융 풀에 미치는 중력의 영향으로 판단되어진다.

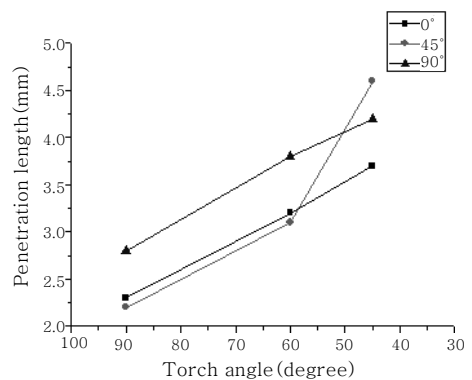


Fig. 4 Penetration length of L1

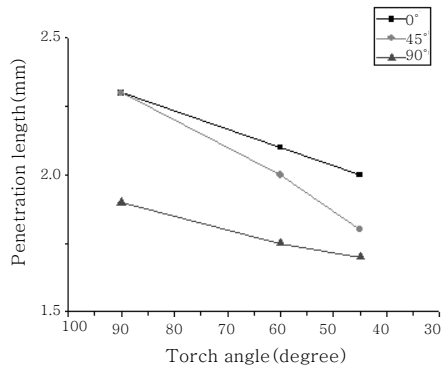


Fig. 5 Penetration length of L2 + L2'

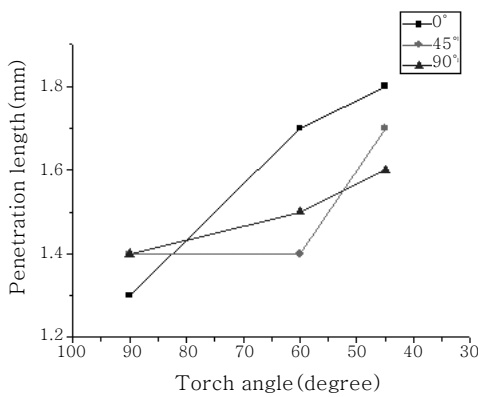


Fig. 6 Penetration length of L3

3.2 용입 깊이 예측

본 연구에서 모재각과 토치각의 변화가 용입의 깊이에 미치는 영향을 예측하기 위한 회귀식을 도출하기 위해서 형상인자 파라미터의 분석결과를 토대로 회귀분석 기법을 이용하였다. 그리고 Fig. 4, 5, 6의 실험 결과를 보았을 경우, 각 모재각에서 토치각에 따른 용입의 깊이가 대부분 선형적인 관계를 보이고 있어서 다양한 회귀 모형중에서 1차 회귀모형을 선택하여 회귀식을 도출하였다.

3.2.1 회귀식 추정

다중회귀모형을 적용하기 위하여 본 연구에서는 종속 변수를 용입 깊이를 나타내는 3가지 방향의 길이 L1, L2 + L2', L3로 설정하였고, 독립변수를 모재각과 토치각으로 설정하였다.

측정데이터를 사용하여 도출한 회귀식은 다음과 같다.

$$L1(mm) = 5.56 + 0.00568 \times \theta - 0.0381 \times \phi \quad (1)$$

Table 4 The analysis of variance in penetration

	Source	SS	DF	MS	F ₀	P
L1	Regression	4.9579	2	0.4790	29.64	0.001
	Error	0.5019	6	0.0836		
	Total	5.4598	8			
L2	Source	SS	DF	MS	F ₀	P
	Regression	0.091611	2	0.045805	35.20	0.000
	Error	0.007807	6	0.001301		
Total	0.099418	8				
L3	Source	SS	DF	MS	F ₀	P
	Regression	0.171352	2	0.085676	9.21	0.015
	Error	0.055793	6	0.009299		
Total	0.227145	8				

$$L2 + L2'(mm) = 1.33 - 0.00214 \times \theta - 0.00337 \times \phi \quad (2)$$

$$L3(mm) = 2.09 - 0.000904 \times \theta - 0.00716 \times \phi \quad (3)$$

유의수준 0.0000은 종속변수와 독립변수 X 사이에 함수관계가 없다고 오판할 확률 즉 제 1종의 과오를 범할 확률이 0.0000으로 추정된 회귀식이 신뢰성이 있음을 의미한다.

Table 4를 보면 회귀식의 최대 유의수준은 0에 가까워 95%의 신뢰성을 만족하므로 이 회귀식들은 종속변수와 독립변수 사이에 유의한 회귀 관계를 존재함을 알 수 있다.

또한 본 연구에서 도출된 회귀식이 데이터를 얼마나 잘 반영하는가를 판단하는 결정계수 R²이 사용되었다. 회귀식 (1), (2) 및 (3)의 신뢰성은 90.8%, 92.1%, 75.4%으로 나왔다.

Table 5의 용입깊이 측정치는 회귀식을 계산하기 위하여 사용된 것이므로, 측정치와 계산치의 차이 즉 error는 회귀모형에서 개별값의 오차에 해당한다.

3.3 회귀식 검증

3.2.1절에서 추정된 회귀식을 통해 다른 모재각과 토치각에서 용입 깊이에 대한 형상인자의 계산값 및 측정값이 서로 유사한지를 확인해보기 위해서 추가검증실험을 진행하였다. 회귀식이 모재와 토치각에 관련되어 있으므로 앞선 실험에서의 독립변수인 모재각과 토치각의 중간값을 선정하였다. 회귀식 도출을 위해 진행된 실험에서 모재각은 0°, 45°, 90°에서 진행되었으므로 검증

Table 5 Measured and calculated penetration length and error

a) Penetration length of L1

θ (Deg)	Φ (Deg)	Measured Value (mm)	Calculated Value (mm)	Error
0	90	2.30	2.13	7.93%
	60	3.23	3.27	-1.47%
	45	3.74	3.85	-2.69%
45	90	2.23	2.39	-6.77%
	60	3.15	3.53	-10.75%
	45	4.60	4.10	12.17%
90	90	2.76	2.64	4.31%
	60	3.85	3.79	1.61%
	45	4.20	4.36	-3.60%

b) Penetration length of L2+L2'

θ (Deg)	Φ (Deg)	Measured Value (mm)	Calculated Value (mm)	Error
0	90	1.62	1.63	-1.12%
	60	1.53	1.53	-0.21%
	45	1.47	1.48	-0.58%
45	90	1.59	1.54	3.38%
	60	1.47	1.44	2.44%
	45	1.36	1.39	-2.19%
90	90	1.39	1.44	-3.38%
	60	1.35	1.34	0.48%
	45	1.30	1.29	0.85%

c) Penetration length of L3

θ (Deg)	Φ (Deg)	Measured Value (mm)	Calculated Value (mm)	Error
0	90	1.36	1.45	-5.85%
	60	1.72	1.66	3.29%
	45	1.83	1.77	3.29%
45	90	1.45	1.40	3.21%
	60	1.45	1.62	-10.48%
	45	1.79	1.73	3.52%
90	90	1.44	1.36	5.63%
	60	1.57	1.58	-0.38%
	45	1.64	1.69	-2.52%

실험에서는 모재각을 30°와 60°로 선정하였다. 또한 각각의 모재각에 대해 토치각은 회귀식 도출을 위해 진행된 실험 조건인 90°, 60°, 45°의 중간값 80°와 50°로 선정하여 검증실험을 진행하였다. 실험 결과는

Table 6 Measured and calculated penetration length and error

a) Penetration length of L1

θ (Deg)	Φ (Deg)	Measured Value (mm)	Calculated Value (mm)	Error
30	80	2.92	2.68	8.86%
	50	3.45	3.83	-9.87%
60	80	3.19	2.85	11.82%
	50	4.03	4.00	0.93%

b) Penetration length of L2+L2'

θ (Deg)	Φ (Deg)	Measured Value (mm)	Calculated Value (mm)	Error
30	80	1.48	1.54	-3.85%
	50	1.45	1.43	1.05%
60	80	1.41	1.47	-4.43%
	50	1.31	1.37	-4.17%

c) Penetration length of L3

θ (Deg)	Φ (Deg)	Measured Value (mm)	Calculated Value (mm)	Error
30	80	1.59	1.49	6.46%
	50	1.69	1.70	-0.63%
60	80	1.55	1.46	6.09%
	50	1.66	1.68	-1.00%

Table 6에 나타나 있고 회귀식 검증에서 검증오차범위는 -9.87%에서 11.82%내외 즉, 21.69%의 오차가 발생함을 확인하여 회귀식이 신뢰할 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 CO₂ 아크용접의 겹치기 용접에 모재각과 토치각의 변화를 주어 용입 깊이를 측정하였다. 이러한 측정결과에 회귀분석기법을 적용하여 용입 깊이를 추정할 수 있는 근사식을 도출한 본 연구결과는 다음과 같다.

1) 본 논문에서 정의한 비드 단면 형상에 대한 형성 인자를 확인한 결과 L1 인자는 토치각이 작아질수록 커졌다. 그리고 L2+L2' 인자는 토치각이 작아짐에 따라 작아졌고, L3 인자는 토치각이 작아짐에 따라 커지는 것을 확인할 수 있었다.

2) 선형회귀분석 모형을 적용하여 각 용입 깊이를 나

타내는 형상인자 파라미터에 대해 도출한 회귀식은 다음과 같다.

$$L1(mm) = 5.56 + 0.00568 \times \theta - 0.0381 \times \phi$$

$$L2 + L2'(mm) = 1.33 - 0.00214 \times \theta - 0.00337 \times \phi$$

$$L3(mm) = 2.09 - 0.000904 \times \theta - 0.00716 \times \phi$$

3) L1과 L2+L2'의 α 값은 각각 0.001과 0.000이고 이에 비해 L3값은 L1, L2+L2'에 비해 비교적 높은 값인 0.015였지만 신뢰성 95%안에 포함되므로 추정식이 신뢰성이 있음을 확인할 수 있었다.

4) 회귀식을 검증하기 위하여 모재각(30°, 60°), 토치각(80°, 50°)으로 추가실험을 진행한 결과 10% 내외 오차 값을 갖는 것으로 보아 추정식은 신뢰할 수 있다는 것을 재확인되었다.

본 연구를 통해 용접현장에서 제한된 모재각과 토치각에 대해서 다중회귀분석을 통해 용접형상을 시뮬레이션 해볼 수 있다는 것을 증명하였다. 이 회귀식은 추후 더 많은 조건에서 근사식을 통해 용접형상을 시뮬레이션 하는데 기초 자료로써 유용할 것이고 이를 바탕으로 용접산업 현장에서 용접조건 설정에 도움을 줄 수 있을 것이라고 판단된다. 또한 본 논문에서는 회귀식 도출을 위한 실험이 1회만 진행되었으나, 추가적인 실험을 진행하여 더 많은 데이터의 확보 후 회귀식을 추정할 경우 오차 범위가 줄어든 회귀식을 얻고 현장에 적용할 수 있을 것이라고 판단된다.

참 고 문 헌

1. Bub-Hun Kim, Won-Il Kim, Chil-Soon Lee, May, 2011, : Inspection about Influences on the Weld Parts through the Change of the Position of Welding Torch and the Voltage During CO₂ Welding, J. Korean Society of Industrial Application, **14-2** (2011), 59-65 (in Korean)
2. Dong-soon Choi, Jae-seong Kim, Hyun-jae Kim and Bo-young Lee, October, 2009, : A Study on Characteristic of Fracture in Lap Joint Welded STS429L, Journal of KWJS, **27-5** (2009), 49-54 (in Korean)
3. Ill Soo Kim, Ji Yeon Shim, In Ju Kim, Hak Hyoung Kim, 2008. 10., : A Study on Sensitivity Analysis for Selecting the Process Parameters in GMA Welding Processes, Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, **17-5** (2008), 30-35 (in Korean)
4. Hyunsung Park, Sehun Rhee and Ki-Woan Um, June. 1999, : Estimation of CO₂ Laser Weld Bead by Using Multiple Regression, Journal of KWS. **17-3** (1999), 26-35 (in Korean)
5. Jaeseong Kim, Dongsun Choi, Jonghyun Kim and Boyoung Lee, December, 2010, : A Study on the Optimal Welding Methods of Vertical Welding Positions in the Vehicle Body, Journal of KWJS, **28-6** (2010), 10-14 (in Korean)
6. Young Moon Lee, Seung Il Jang, Jeong Woon Jun, Hyun Ho Bae, October 2004, : Evaluation of Cutting Characteristics Using Multiple Regression Analysis, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, **20-10** (2004), 20-25 (in Korean)
7. Seung Hun Lee, : Engineering analysis of statistical data, 4.3 Multiple Regression Analysis (2008), 202
8. KS B 0867, 1995 (2006 confirmed), : Method of controlled thermal severity Weld cracking test
9. KS B ISO 15792-3, 2004(2009 confirmed), : Welding consumables - Test Methods - Part 3: Classification testing of positional capacity and root penetration of welding consumables in a fillet weld
10. I.S. Kima, J.S. Sona, I.G. Kimb, J.Y. Kimc, O.S. Kim, 2002, : A study on relationship between process variables and bead penetration for robotic CO₂ arc welding, Journal of Materials Processing Technology **136** (2003) 139-145
11. Erdal Karadeniz, Ugur Ozsarac, Ceyhan Yildiz, 2005, : The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding processes, Materials and Design, **28** (2007), 649-656
12. Han-Sur Bang, Hee-Seon Bang, Sung-Min Joo, Chan-Seung Ro, Bo-Ram Sung and Han-Gil Suk : A Study on the Prediction of the Optimal Welding Condition for Automotive Steel Sheets in MAG Welding Process, Journal of KWJS, **27-3** (2009), 38-43
13. Y. S. Kim., H. S. Yoo., H. J. Kim., : Analysis of Welding Phenomena and Effect of Short Circuit Current Rise Slope in the High Speed CO₂ Welding of Steel Sheets, Journal of KWS, **23-5** (2005), 14-19