

# 수직 GMA 용접공정 입열량에 따른 용접부 경도특성에 대한 실험적 연구

박민호\* · 이종표\* · 진병주\* · 김인주\*\* · 김지선\*\* · 김일수\*†

\*목포대학교 기계공학과

\*\*한국생산기술연구원 그린몰드기술센터

## An Experiment Study for Hardness Characteristic of Weldment according to Welding Heat-Input of Vertical GMA Welding Process

Min-Ho Park\*, Jong-Pyo Lee\*, Byeong-Ju Jin\*, In-Ju Kim\*\*, Ji-Sun Kim\*\* and Ill-Soo Kim\*†

\*Department of Mechanical Engineering, Mokpo University, Mokpo 58554, Korea

\*\*Green mold Technology Center, Korea Institute of Industrial Technology, Gwang-ju 61012, Korea

†Corresponding author : ilsookim@mokpo.ac.kr

(Received August 23, 2016 ; Revised September 19, 2016 ; Accepted January 4, 2017)

### Abstract

The GMA welding process involves large number of interdependent variables which may affect product quality, productivity and cost effectiveness. The relationships between process parameters for a vertical weldment and mechanical properties are complex because a number of process parameters are involved. To make the vertical-position welding, a method that predicts bead geometry and accomplishes the desired mechanical properties of the weldment should be developed. In addition, a reliable welding process and conditions must be implemented to reduce weld structure failure. In this study, the welding process analysis of investigates the interaction between the heat input and welding parameter(Welding current, Arc voltage, Welding speed) for predicting the weldment hardness.

Key Words : Vertical GMA welding, Full factorial design, Welding heat-input, Weldment hardness, Thermal energy

## 1. 서 론

제조산업 현장의 핵심기술인 용접기술은 열악한 작업 환경과 유해하고 육체적인 부담이 크기 때문에 근로자들이 꺼려하는 대표적인 3D작업중 하나이다. 최근 숙련된 용접인력의 감소, 용접사의 고령화 및 인건비 증가 등의 이유로 용접자동화가 국가 경쟁력의 주요 현안으로 대두되고 있다. 특히 조선해양산업은 설계, 생산 및 관리기술 외에 첨단 IT 기술의 적용이 필수적인 산업으로, 선박의 건조공정이 매우 다양하고 대형 구조물의 제작상 자동화에도 한계가 있기 때문에 적정규모의 기능인력 확보가 필수적인 산업이다. 또한 최근 들어 산업의 경향이 새로운 방향으로 변화하고 있으며, 기존의 대량생산방식이 이미 포화상태에 다다르고 있고 사람들의 소비 경향도 무조건 값싼 제품을 찾는 것이 아

니라, 자신의 필요에 따라 원하는 제품을 찾고 있는 경향을 나타낸다. 이러한 생산기술과 생산제품의 변화는 생산라인의 변화를 필요로 하는데 기존의 고정적 기능의 자동화 시스템으로는 소비자의 요구사항이나 생산라인 변화를 만족시키지 못한다. 용접 자동화 시스템에서 시간이 많이 소요되는 작업으로 용접선(Seam Tracking)에 대하여 용접토치를 정확히 일치시키는 작업으로, 토치의 높이조정, 위빙 폭의 조정, 토치의 중심위치 조정을 하기 위한 시간은 전체 용접공정 시간의 50% 이상을 차지한다. 따라서 생산성과 위치 정밀도를 향상시키기 위한 로봇과 함께 센서를 사용하는 추세이다. 특히 Vertical Position 용접은 일반 용접자세와 다르게 용접속도가 느려지기 때문에 슬래그가 용접부에서 빠져나오지 못하고 중간에 응고되는 경우가 발생되는데, 이는 용융 슬래그가 계속 용융지에 머무르게 되고 이러한 현상이 시간이 지남에 따라 용융지에 많은 슬래그가 쌓이

게 되어 전기 전도도가 떨어져 불연속적인 아크가 발생하게 된다. 선박 블록 조립시 두 철판을 하나로 접합하는 용접작업을 할 경우, 보통 용접기를 고정시키고 대상이 되는 부분을 여러번 용접함으로써 하나로 이어주는 방식을 사용하고 있으며, 이 경우 작업 속도도 느리고 숙달된 용접공이 아닌 경우, 용접품질이 균일하지 않아 불량률이 높아진다는 단점이 있다. 현재까지 Vertical Position 용접을 위한 자동화 시스템개발에 필요한 용접부 특성 및 최적의 용접조건 선정 알고리즘은 대부분 FEM (Finite Element Method) 기법이 광범위하게 이용되고 있다<sup>1-2)</sup>. 하지만 FEM 기법은 많은 여러가지 제한조건 때문에 단순히 경향(Trends)을 분석하는데 사용되고 있으며, 최근에는 ICT(Information and Communications Technology) 기술을 용접접합 자동화에 적용하기 위한 제한적인 연구가 시도되고 있다. 그러나 수직 GMA 용접공정에서 발생하는 아크특성 및 용융물 거동 현상을 동시에 분석한 연구는 전무한 실정이다<sup>3-4)</sup>. 따라서, 본 연구에서는 수직 GMA 용접공정에 적용이 가능한 용접 입열량 수식을 개발하고 획득한 열량데이터를 기반으로 용접부 경도특성을 파악하여 용접 입열량이 용접부에 미치는 취성적인 영향력을 확인하고자 하였다.

### 2. 수직 GMA 용접실험

수직 GMA 용접공정에서 용접 입열량에 따른 용접부 경도특성을 파악하기 위해 500A급 GMA용접기와 토치 구동부, 와이어 송급장치, 수직형 용접 JIG로 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 용접시스템을 구성하였으며, 용접 입열량 데이터를 측정하기 위해 NIT社의 High-Speed 열화상 카메라(TACHYON1024 micro CORE)를 사용하여 촬영된 열화상 이미지를 기반으로 전체 용접공정에 대한 실제 입열량을 산출하여 수집하였다. Fig. 2는 본 수직 GMA 용접실험에 대한 개략도를 나타내고 있다.

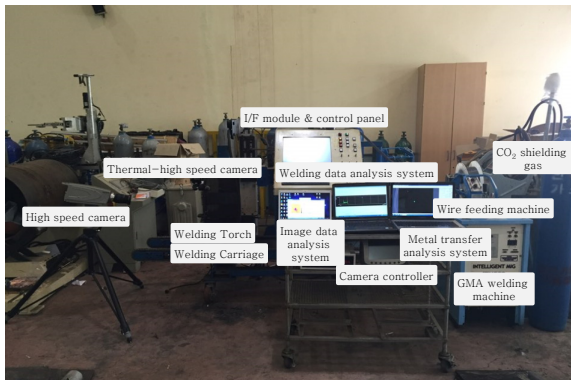


Fig. 1 Experimental setup for vertical GMA welding

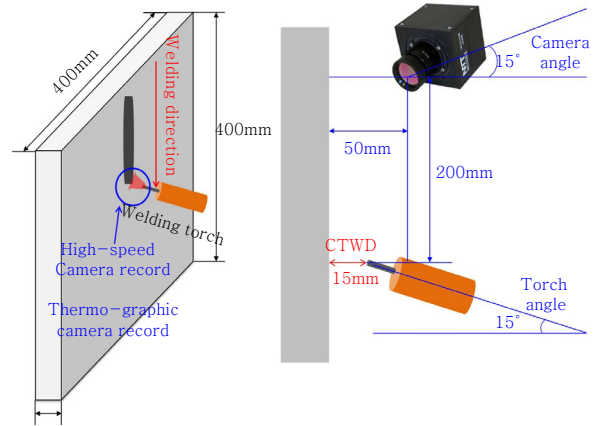


Fig. 2 A schematic diagram for vertical GMA welding process

본 실험에 사용된 용접 시험편의 기계적 성질은 Table 1에 나타내었으며, 시험편의 화학적 성질은 Table 2에 각각 나타내었다<sup>5)</sup>. 일반적인 실험계획법으로 알려진 완전요인설계의 경우 각각의 입력변수들의 수준을 일정간격으로 배치하여 모든 입력변수들간 수준의 조합에 의해 실험이 이루어지게 된다. 입력변수의 수가 n개이고, 수준의 수가 k개인 경우 총  $K^n$ 개의 실험횟수를 수립할 수 있으며, 이와 같은 완전요인배치법은 실험수행을 위한 시간 및 비용이 늘어나고 반응의 비선형적 변화감지가 다소 부족한 단점을 가지고 있으나 각각의 변수 특성에 대한 공정의 여러 가지 요인 해석이 가능하다<sup>6)</sup>. 따라서, 본 실험에서는 입력변수 변화에 따른 출력변수 반응의 모든 요인효과를 추정할 수 있고 고차의 교호작용 효과를 검출하기 위하여 완전요인배치법(FFD)을 적

Table 1 Mechanical properties of base metal

Material	SS400
Tensile Strength(N/mm <sup>2</sup> )	435
Yield Point(kg/mm <sup>2</sup> )	245
Elongation(%)	25
Impact Value(kgm/cm <sup>2</sup> )	6.2

Table 2 Chemical properties of base metal(wt, %)

Material	SS400
C	0.15
Si	0.15
Mn	0.597
P	0.013
S	0.007
Fe	Bal.

**Table 3** Vertical GMA welding parameters and their levels

Welding Parameter	Symbol	Unit	Level		
			-1	0	1
Welding Current	A	Amp	250	260	270
Arc Voltage	V	Vol.	23	25	27
Welding Speed	W/S	cm/min	46	53	60
Fixed Variable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CTWD : 15mm</li> <li>• Torch Angle : 15°</li> <li>• Shielding Gas Ratio : 18l/min</li> <li>• Welding Direction : Down Hill Welding</li> <li>• Camera Angle : 15°</li> <li>• Verticality Distance of Camera : 200mm (Since Welding Torch)</li> <li>• Horizontality Distance of Camera : 50mm (Since Base Metal)</li> </ul>				


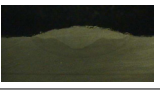

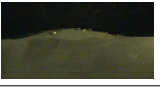

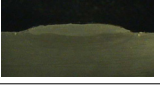
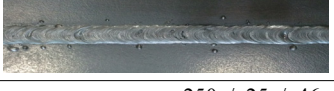


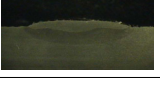

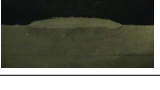
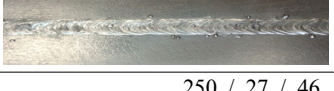

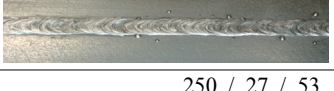
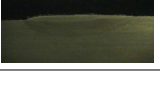
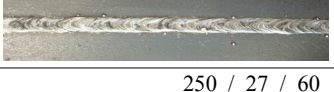
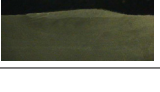
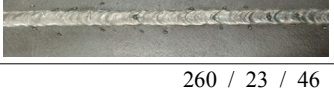
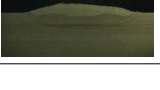


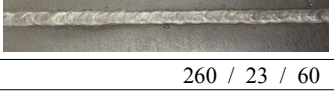
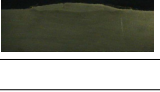
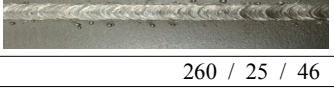
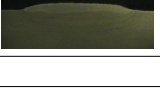
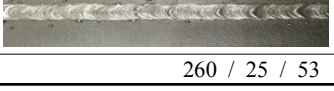
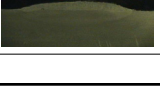
용하였다. 용접실험에 사용된 입력변수는 일반적으로 용접성에 영향력이 가장 높은 용접전류, 아크전압, 용접속도를 선정하였으며, 출력변수는 용접부 및 열영향부의 경도와 용접공정의 입열량으로 선정하였다. 입력변수(용접전류, 아크전압, 용접속도)의 적정수준 및 범위는 예비실험을 통하여 정하였으며, 입력변수의 수는 3개이고 수준의 수는 3으로써 총 27회의 실험조건이 생성되었다. Table 3은 입력변수의 실험변수 및 수준을 나타낸다.

### 3. 수직 GMA 용접실험 결과




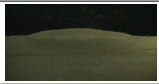
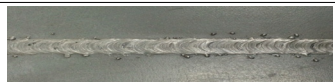
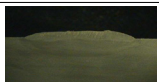


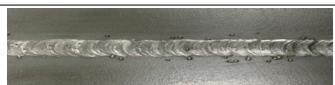
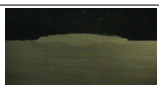
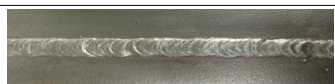
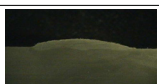





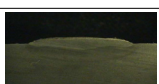

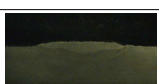
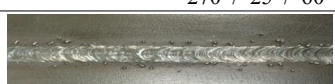
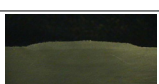
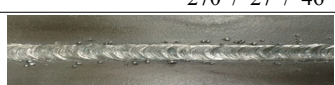
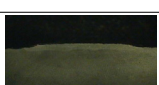
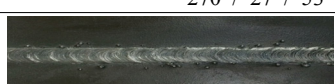
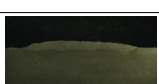
#### 3.1 수직 GMA 용접부 단면형상 분석

공정변수에 따른 수직 GMA용접 실험결과 일부의 용접조건에서는 양호한 표면비드가 형성되었으나, 다소 높은 용접전류 및 전압의 공정변수에서는 다량의 스패터가 발생됨을 확인하였다. 다량의 스패터는 전류가 급상승 하면서 표면에 가해지는 입열량도 증가하는 현상이 동반되며, 용접부의 취성을 가져올 수 있다<sup>7-8)</sup>. 따라서 각 실험조건에 따른 경도 분석도 진행하였으며, Table 4에 공정변수에 따른 표면 비드 및 비드단면을 나타내고 있다. 용접부의 단면형상(Macro)를 촬영하였으며, 겹치기 용접부의 단면형상을 측정하기 위하여 용접이 완료된 시험편의 가로축 중간부분을 Wire Cutting을 사용하여 80mm×80mm의 크기로 절단하고 단면부를 연삭한 후 폴리싱(Polishing)하였다. 시험편의 단면형상을 잘 나타내기 위해 90% Ethanol + 10% Nitric 용액을 혼합하여 단면부에 대해 (Etching) 작업을 수행한 후 모재에 적절한 용입이 이뤄졌는지 확인하기 위하여 광학 현미경 시스템(SOMETECH社, SV-35) 이용하였다.

**Table 4** Result of bead geometry

Test No.	Welded Specimen	Bead Geometry
	Welding condition (Welding current / Arc voltage / Welding speed)	
1		
	250 / 23 / 46	
2		
	250 / 23 / 53	
3		
	250 / 23 / 60	
4		
	250 / 25 / 46	
5		
	250 / 25 / 53	
6		
	250 / 25 / 60	
7		
	250 / 27 / 46	
8		
	250 / 27 / 53	
9		
	250 / 27 / 60	
10		
	260 / 23 / 46	
11		
	260 / 23 / 53	
12		
	260 / 23 / 60	
13		
	260 / 25 / 46	
14		
	260 / 25 / 53	



Test No.	Welded Specimen	Bead Geometry
	Welding Condition (Welding current / Arc Voltage / Welding Speed)	
15		
	260 / 25 / 60	
16		
	260 / 27 / 46	
17		
	260 / 27 / 53	
18		
	260 / 27 / 60	
19		
	270 / 23 / 46	
20		
	270 / 23 / 53	
21		
	270 / 23 / 60	
22		
	270 / 25 / 46	
23		
	270 / 25 / 53	
24		
	270 / 25 / 60	
25		
	270 / 27 / 46	
26		
	270 / 27 / 53	
27		
	270 / 27 / 60	

### 3.2 수직 GMA 용접부 입열량 산출

현재 많은 연구자들에 의하여 용접부 인성에 미치는 냉각속도 및 조직의 영향뿐만 아니라 합금 원소에 대한 연구가 활발히 이루어 졌으나, 현재의 개발된 용접재료

및 고효율/고용작량의 용접조건은 충분히 반영하지 못하고 있다<sup>4)</sup>. 현재 학계에서 사용되는 용접 입열량에 대한 수식은 FCAW공정을 기준으로 AWS에서 식 (1)과 같이 규정하고 있으며, 입열량 범위의 상한치는 인증시험에서 사용했던 입열량 보다 25% 큰값이나 5.5kJ/mm 중에서 작은값으로 한다는 규정을 제시하고 있다<sup>9)</sup>.

$$H = \frac{k \cdot V \cdot A \cdot 60}{v} (J/cm) \tag{1}$$

여기서  $H$ 는 용접입열량,  $k$ 는 공정별 비례상수,  $V$ 는 아크전압,  $A$ 는 용접전류,  $v$ 는 용접속도를 나타내고 있다. 용접부의 품질은 위에서 기술한 바와 같이 용접 입열량에 의해 매우 큰 영향을 미치는 인자로서, 용접 입열량에 따른 용접부의 기계적 특성변화에 대한 연구가 시급하지만 위에서 제시한 용접 입열량 산출식은 FCAW에 한해 개발된 수식이다. 따라서 수직 GMA용접공정에 적용이 가능한 입열량 수식개발이 필요하다. 용접 입열량 수식에서  $k$ 는 용접공정에 대한 비례상수로서, 실험적인 값에서  $k$ 의 수치를 산출해야 되는 상황이다. 일반적인 GMA 용접공정에서 용접부의 취성 증가를 보장하기 위해 용접입열을 최소화 시켜 용접부 품질을 확보하는 방법들이 다양한 방식으로 적용되고 있으나, 수직 GMA 용접품질을 확보하고자하는 연구들이 시급하다. 따라서 본 연구에서는 수직 GMA 용접공정에 한정되어 적용할 수 있는 입열량 수식을 실험적인 수치로 개발하고자 하며, 이를 위해 High-Speed 열화상 카메라 촬영을 통해 획득한 입열 데이터를 기반으로 식 (1)에서 제시한 비례계수를 제시하고자 한다. 용접 입열량의 산출은 공정변수에 따라 식 (1)에 대입하고 비례계수인  $k$ 를 포함하여 단위 cm당 입열량을 산출하였으며, High-Speed 열화상 카메라 촬영을 통해 획득한 열량 데이터는 초당 1,000frame에 대해 시간과 거리의 관계에 따른 입열량을 평균화하여 산출하였다. Fig. 3은 High-Speed 열화상 카메라를 통해 촬영되는 용접부 화상 이미지를 나타내고 있으며, Column과 Low는 카메라를 통해 촬영된 이미지의 Pixel을 나타낸다. 이는 열량 데이터를 측정하기 위한 위치를 나타내고 있으며, NIT사에서 배포한 프로그램을 사용하여 이미지 내에서 발생하는 아크의 열량의 평균값을 적용하였다. Fig. 4는 전체 용접공정에 대해 실시간으로 수집되는 열량 에너지를 나타내고 있으며, 측정된 데이터는 식 (2)에 의해 아크의 온도변화량으로 실제 투입되는 열량으로 계산하여 공정변수에 따른 실제 입열량을 산출하였다. 또한 정확한 입열량 산출을 위해 용접 시작과 끝에 대한

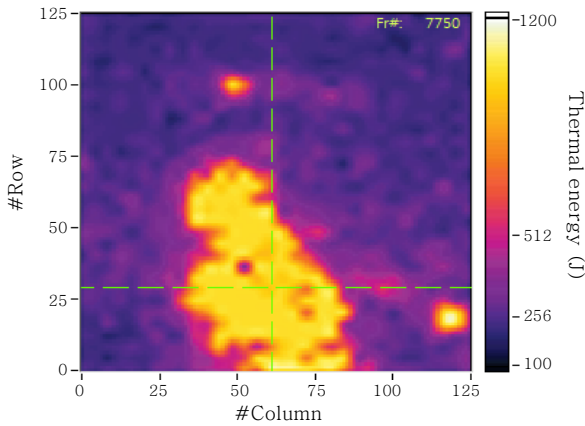


Fig. 3 Photos of measurement on the weld zone using a thermal high-speed camera

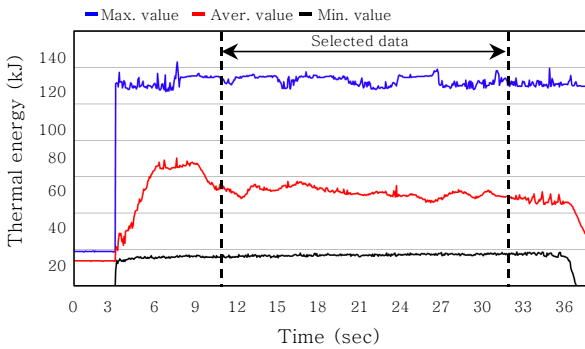


Fig. 4 Thermal energy of calculated on the weld zone using a thermal high-speed camera

데이터는 사용하지 않았으며, 이는 안정적인 아크에 의한 입열을 가정하고자 중간부분의 데이터를 사용하였다. 식 (2)에  $H_V$ 는 용접부에 실제 투입되는 열에너지량,  $c$ 는 SS400 금속의 비열,  $m$ 은 시험편의 질량,  $\Delta t$ 는 아크열원에 의한 온도차,  $s$ 는 사용된 데이터에 대한 용접부의 길이를 의미하고 있다.

$$H_V = \frac{c \cdot m \cdot \Delta t}{s} (J/cm) \quad (2)$$

식 (2)에 사용된 비열은 모재인 SS400의 기본 물성치를 사용하였으며, 질량은 모재 사이즈에 대한 크기와 밀도의 계산을 통해 입력하였다. 또한 온도변화의 경우 용접공정 중 초당 1,000frame에 대한 온도변화량을 계산하여 대입하였으며, 여기서 산출한  $H_V$ 는 전체 공정에 대한 열에너지 값에서 데이터를 사용한 수, 즉 사용된 데이터에 대한 용접부의 거리를 나누어 줌으로써 단위 cm당 열량 에너지를 나타내고 있다. 위의 식 (1)에 나타낸 바와 같이  $H$ 는 실험적 비례상수인  $k$ 를 포함하

고 있으며,  $k$ 에 대한 식으로 전개를 하고 이론적으로 산출되는 용접 입열량과 High-Speed 열화상 카메라에서 측정하여 산출된 열에너지는 동일하다는 가정을 수립하고 식 (3)을 통해  $1/k$ 를 산출할 수 있다. 따라서 이론에 의한 용접 입열량과 실험에 의한 열에너지의 관계는 식 (3)과 같은 관계가 성립되며, Table 5은 식 (1)과 식 (2)을 적용하여 산출된 용접 입열량 및 열에너지를 나타내고 있으며, 두 정량적인 값을 사용하여 식 (3)에 의해 산출된 비례계수를 나타내고 있다.

$$\frac{1}{k} \cdot H = \frac{V \cdot A \cdot 60}{v} (J/cm) \rightarrow \frac{1}{k} = \frac{H_V}{H} \quad (3)$$

### 3.3 수직 GMA 용접부 경도측정

용접부 및 열영향부(HAZ)의 경도 특성을 분석하기

Table 5 Results of proportional coefficient using welding heat-input calculated

Test No.	Welding Heat Input, H(J/mm)	Thermal Energy, HV(J/mm)	Proportional Coefficient, 1/k
1	7500.00	4075.05	0.54334
2	6509.43	3687.27	0.56645
3	5750.00	3104.25	0.53987
4	8152.17	4501.47	0.55218
5	7075.47	3990.71	0.56402
6	6250.00	3436.50	0.54984
7	8804.34	4794.23	0.54453
8	7641.50	4131.69	0.54069
9	6750.00	3707.24	0.54922
10	7800.00	4361.21	0.55913
11	6769.80	3781.55	0.55859
12	5980.00	3380.67	0.56533
13	8478.26	4757.92	0.56119
14	7358.49	4099.64	0.55713
15	6500.00	3571.95	0.54953
16	9156.52	4963.84	0.54211
17	7947.17	4439.21	0.55859
18	7020.00	3944.61	0.56191
19	8100.00	4442.36	0.54844
20	7030.18	3851.21	0.54781
21	6210.00	3357.31	0.54063
22	8804.34	4777.33	0.54261
23	7641.50	4272.67	0.55914
24	6750.00	3802.55	0.56334
26	9508.69	5227.41	0.54975
27	8252.83	4513.72	0.54693
Average Proportional Coefficient k = 0.55219			

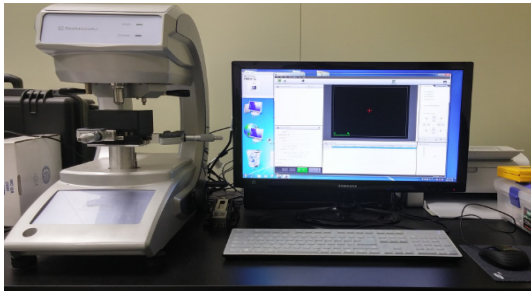


Fig. 5 Vickers hardness test

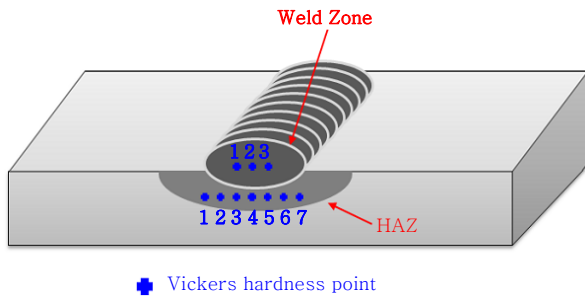


Fig. 6 Measured location of hardness

위해 공정변수에 따라 용접을 수행한 시험편의 일부를 절단(30mm×10mm)하여 경도시험을 실시하였다. 본 연구는 위에서 기술한 바와 같이 용접부 와 열영향부에 한정된 경도 시험을 수행하였으며, Fig. 5의 비커스경도계를 사용하여 경도시험을 수행하였다. 이 때 사용된 하중은 0.5N으로 열영향부의 가운데를 중심으로 좌우측으로 3회씩 측정하였으며, 경도 측정시 발생하는 미세표시에 의한 상대 경도들에 영향을 주지 않은 0.15mm 간격으로 경도분석을 수행하였다. Fig. 6은 용접 시험편의 경도측정 위치를 나타낸 그림이며, 모재인 SS400 재질의 경도보다 어느정도의 취성이 상승하는지 확인하기 위해 열영향부 7회, 용접부 3회에 대한 경도치를 평균값으로 산출하여 Table 6에 나타내었으며, 모재에 대한 경도 상승률은 백분율을 통해 산출 결과는 Table 7에 나타내었다.

4. 입열량에 따른 용접부 경도특성 분석

GMA 용접공정에서 입열량 범위의 상한치는 5.5kJ/mm를 넘지 않는 선에서 공정을 수행하는 규정이 명시되어 있는 만큼 고효율/고용착량의 용접조건을 충분히 반영하며, 용접부의 취성을 보장하는 적정 공정변수 선정을 하고자 하였다. 이를 위해 위에서 산출한 실험에 의한 용접 입열량 기반으로 용접부와 열영향부의 취성을 확인하였으며, Fig. 7에 수직 GMA 용접 입열량에 따른 경도 분포를 나타내었다. 전체적으로 용접부 및 열영향부의 경도 분포는 모재보다 각각 37.61%, 47.95%

Table 6 Results of hardness tests

Test No.	Averaged HAZ Zone Hardness(Hv)	Averaged Weldment Zone Hardness(Hv)
1	243.29	213.94
2	216.57	206.63
3	196.00	176.46
4	256.86	247.26
5	229.14	200.16
6	212.86	204.05
7	230.14	221.74
8	239.71	228.69
9	222.86	202.31
10	254.86	231.96
11	221.29	198.22
12	207.29	187.31
13	263.71	246.36
14	232.00	222.61
15	215.71	192.19
16	269.29	261.71
17	232.71	218.94
18	241.57	234.43
19	272.57	252.22
20	227.86	221.01
21	211.86	197.15
22	336.14	299.17
23	258.71	228.62
24	220.71	198.67
25	262.86	253.92
26	286.00	270.63
27	288.71	276.87

Table 7 Rising percentage of hardness according to welding parameters

Test No.	Hardness for Base Metal = 164HV	
	Rising Percentage of Hardness for HAZ(%)	Rising Percentage of Hardness for Weld Zone(%)
1	48.34	30.45
2	32.06	25.99
3	19.51	7.60
4	56.62	50.77
5	39.72	22.05
6	29.79	24.42
7	40.33	35.21
8	46.17	39.45
9	35.89	23.36
10	55.40	41.44
11	34.93	20.87



Test No.	Hardness for Base Metal = 164HV	
	Rising Percentage of Hardness for HAZ(%)	Rising Percentage of Hardness for Weld Zone(%)
12	26.39	14.21
13	60.80	50.22
14	41.46	35.74
15	31.53	17.19
16	64.20	59.58
17	41.90	33.50
18	47.30	42.95
19	66.20	53.79
20	38.94	34.76
21	29.18	20.21
22	104.97	82.42
23	57.75	39.40
24	34.58	21.14
25	60.28	54.83
26	74.39	65.02
27	76.05	68.82
Aver.	47.95	37.61

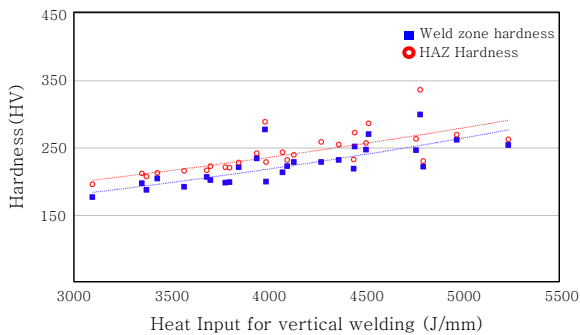


Fig. 7 Hardness distributions of HAZ and weldment according to welding heat-input

상승하여 취성의 영향이 미쳤다는 것을 확인할 수 있으나, 인장시험을 추가적으로 진행하지 않았기 때문에 정량적인 취성의 영향은 포함되지 않았다. 또한 용접 입열량이 4,000J/mm의 아래의 범위에서는 입열량 증가에 따라 경도가 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타나고 있으며, 그 이상의 입열량 범위에서는 경도의 증감이 반복되어 취성에 대한 예측 및 보장이 매우 어렵다. 하지만 4,500J/mm 입열량 이상에서 용접부 및 열영향부 경도값의 증감이 반복되는 가운데 추세분석의 결과에서는 증가 형태의 추세가 나타나고 있으며, 이는 입열량이 증가 할수록 용접부의 잔류응력 및 과도한 전류와 전압에 의한 취성도 동반한다는 것을 나타내고 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 수직 GMA 용접공정에 적용이 가능한 용접 입열량 수식을 개발하고 획득한 열량데이터를 기반으로 용접부 경도특성을 파악하여 용접 입열량이 용접부에 미치는 영향력을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 수직 GMA 용접공정에서 용접 입열량이 용접부 경도에 미치는 영향력을 파악하기 위하여 용접실험을 수행하였으며, 양호한 용입이 발생되었는지 확인하기 위하여 용접부 단면형상을 분석하였다. 그 결과 전체적으로 양호한 표면비드가 형성되었으나, 다소 높은 용접 전류 및 전압의 공정변수에서는 다량의 스패터가 발생됨을 확인하였다.

2) 용접 입열량은 용접부 품질에 매우 큰 영향을 미치는 인자로서, 용접공정에 따라 용접 입열량 수식에서 요구하는 k의 비례상수를 산출하고 있는 실정이다. 따라서, High-Speed 열화상 카메라 촬영을 통해 획득한 입열 데이터는 기반으로 비례계수를 산출하고 추출된 데이터를 온도에 대한 값으로 변경시켜 열에너지 산출하는 방법으로 입열량을 산출하였다.

3) 용접 입열량과 용접부의 경도상승률과 관계를 분석한 결과, 용접 입열량이 4,000J/mm의 아래의 범위에서는 입열량 증가에 따라 경도의 증가는 경향이 뚜렷하게 나타나고 있음을 확인하였으나, 그 이상의 4,500J/mm 용접 입열량 범위에서는 경도의 증감이 반복되어 취성에 대한 예측 및 보장이 매우 어렵다는 것을 확인하였다.

### 후 기

본 연구는 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (No. 2015R1D1A3A01020246)

### References

1. H. W. Lee and D. E. Ko, Microstructures and Impact Properties of 50mm Single Pass Electro-gas Weldment for EH36 TMCP steels, *Journal of KWS*, 17 (3) (1999), 244-249 (in Korean)
2. H. J. Kim and B. Y. Kang, Effect of Microstructure on Cold Cracking in Weld Metal, *Journal of KWS*, 21 (1) (2003), 8-13 (in Korean)
3. M. F. Ashby and K. E. Easterling, A First Report on Diagrams for Grain Growth in Welds, *Acta Metallurgica*, 30 (1982), 1969-1978
4. H. J. Kim and B. Y. Kang, Role of Non-Metallic Inclusions on the Nucleation of Acicular Ferrite, *Journal of KWS*,

- 18 (6) (2000), 696-703 (in Korean)
5. I. S. Kim, M. H. Park, H. H. Kim, J. P. Lee, C. K. Park and J. Y. Shim, An Experimental Study on Mathematical Model to Predict Bead Width in GMA Weldment, *Journal of KSPE*, 32 (2) (2015), 209-217 (in Korean)
  6. C. B. Dallam, S. Liu and D. L. Olson, Flux Composition Dependence of Microstructure and Toughness of Submerged Arc HSLA Weldment, *Welding Journal*, 64 (1985), 140-151
  7. Y. T. Shin, S. W. Kang and H. W. Lee, Fracture Characteristics of TMCP and QT Steel Weldments with respect to Crack Length, *Materials Science and Engineering*, 43 (2006), 365-371
  8. J. P. Lee, I. S. Kim, M. H. Park, C. K. Park, B. Y. Kang, J. Y. Shim, A Study on Development of STACO Model to Predict Bead Height in Tandem GMA Welding Process, *J. Welding and Joining*, 32 (6) (2014), 8-13 (in Korean)
  9. T. Tadahisa, Y. Makoto and N. Kiyomichi, Effects of hot wire on mechanical properties of weld metal using gas-shielded arc welding with CO<sub>2</sub> gas, *Welding in th World*, 58 (1) (2014), 77-83