

## 해상풍력 발전용 타워 제작시 고장력강재의 초층용접에 관한 용접특성 연구

정성명\*, 김일수<sup>+</sup>, 김지선<sup>+</sup>, 나현호<sup>+</sup>, 이지혜<sup>+</sup>

(논문접수일 2011. 08. 24, 수정일 2011. 11. 18, 심사완료일 2011. 11. 21)

### Study of Welding Toughness Characteristics on the Root-pass Welding Process of High Tensile Steel at Tower Production for Offshore Wind Power Generation

Sung-Myoung Jung\*, Ill-Soo Kim<sup>+</sup>, Ji-Sun Kim<sup>+</sup>, Hyun-Ho Na<sup>+</sup>, Ji-Hye Lee<sup>+</sup>

#### Abstract

As the world wind energy market grows rapidly, the productions of wind power generation equipment have recently increased, but manufacturers are not able meet this requirement. Particularly offshore wind energy industry is one of the most popular renewable energy sectors. To generalize welding processes, the welding automation is considered for steel structure manufacturing in offshore wind energy to get high quality and productivity. Welding technology in construction of the wind towers is depended on progress productivity. In addition, the life of wind tower structures should be considered by taking account of the natural weathering and the load it endures. The root passes are typically deposited using Gas Tungsten Arc Welding(GTAW) with a specialized backing gas shield. Not only the validation consists of welders experienced in determining the welding productivity of the baseline welding procedure, but also the standard testing required by the ASME section IX and API1104 codes, toughness testing was performed on the completed field welds.

This paper presents the welding characteristics of the root-pass welding of high tensile steel in manufacturing of offshore wind tower. Based on the result from welding experiments, optimal welding conditions were selected after analyzing correlation between welding parameters(peak current, background current and wire feed rate) and back-bead geometry such as back-bead width(mm) and back-bead height performing root-pass welding experiment under various conditions. Furthermore, a response surface approach has been applied to provide an algorithm to predict an optimal welding quality.

**Key Words** : Offshore wind tower(해상 풍력 타워), Root-pass(초층용접), Welding toughness characteristics(용접부 특성), High tensile steel(고장력강재)

\* 목포대학교 기계공학과 (jungsm@mokpo.ac.kr)

주소: 534-729 전남 무안군 청계면 도림리 61

+ 목포대학교 기계공학과

## 1. 서론

세계 풍력시장은 2004년~2008년에 이르기까지 매년 25% 이상 급성장하여 풍력발전 설비 업체들이 생산량을 맞추지 못할 정도로 수요 요구량이 급증하고 있으며 2030년까지의 풍력자원과 풍력단지 개발 계획을 발표하고 있어, 현재 풍력발전은 빠른 성장성과 지속적인 시장성을 갖고 있는 산업이다. 풍력발전시스템의 기초부분에 해당하는 타워(Wind Tower)의 구조물은 적어도 100톤~250톤 정도로 제작 규모가 크기 때문에 순수 철강 중공업에 속한다고 볼 수 있으며, 사용되는 철판의 두께는 8~120mm로 제작 시 대형 용접장비, 숙련된 용접 전문가 및 높은 수준의 용접품질이 요구되는 작업이다. 풍력발전산업은 전 산업분야의 연계된 신재생에너지산업으로 경제성과 실용성이 가장 높으며, 선박·해양구조물 및 에너지 플랜트 산업 등의 강구조물 제조에 있어 용접품질, 용접 생산성 등을 고려한 용접공정 자동화가 일반화 되어, MIG(Metal Inert Gas)/MAG(Metal Active Gas) Solid wire 및 FCW를 이용한 GMAW(Gas Metal Arc Welding)<sup>(1)</sup>, FCAW(Flux Cored Arc Welding)<sup>(2)</sup> 용접기술이 주로 사용되어지고 있으며, Jones, S. B.<sup>(3)</sup>의 서브머지드 아크 용접의 Tolerance 기법 또한 사용되어지고 있다.

또한 풍력타워의 수명은 해상구조물 또는 선박과 유사하게 제작완료 후 20~25년 정도 장기간 용접 부위가 자연 풍화 및 진동, 하중의 충격에 견뎌내야 하므로 우수한 품질의 재료를 유지하고 내부 용접부위에 결함이 없어야 함은 물론 외관 용접 비드에 대한 높은 수준<sup>(4)</sup>이 필요하다.

Shinoda T. and Doherty, J.<sup>(4)</sup>와 D.C Kim and S.H Rhee<sup>(5)</sup>는 외관 용접비드에 대한 수준을 높이기 위해 아크용접의 매개 변수 및 용접 비드 기하학 사이의 관계, 반응표면 방법론<sup>(6)</sup>을 사용하여 최적의 퍼지 논리 제어기<sup>(7)</sup>의 설계에 대하여 연구하였다.

용접의 품질 및 생산성 향상과 더불어 작업여건을 개선하기 위해서는 용접공정의 자동화가 필요하고, 이러한 목표를 달성하기 위해서 해상풍력 타워부 용접에서 자동화 용접장치가 용접작업자를 대신하여 용접현상을 관찰하고 판단하여 이를 적절한 용접조건<sup>(8)</sup>으로 산출해 내는 지식과 기능을 갖추어야 하고 나아가 용접사가 가지지 못한 지식, 판단 및 제어 기능이 요구된다. 강도상 가장 취약한 접합부<sup>(9)</sup>의 강도평가가 요구되며, 그 중 이용도가 높은 용접부의 최적 용접방법과 피로강도 평가를 체계적인 실험을 D.C Montgomery<sup>(10)</sup>의 설계 및 실험 분석을 통하여 연구 고찰함으로써 구조물의 강도 향상 및 경제적이고 능률적인 용접방법을 찾기 위해 자동 초층용접 공정별 용접부 특성에 대하여 연구하고자 한다.

## 2. 용접 실험

### 2.1 예비 실험

타워의 제작에서 가장 중요한 용접 공정의 특성연구를 위하여, STT용접기를 이용한 수동 용접실험을 통해 용접 대상물의 초층용접 가능성을 확인하였다. 또한, 다양한 공정변수에 따른 영향을 검토하여 자동 용접실험에 적용 가능한 범위를 확인하고자 수동용접 예비실험을 실시하였다. 아래의 Table 1은 각 초층용접에 사용되는 각 공정별 효율성을 나타내는 표이며, 용접에 사용된 시험편의 모식도는 Fig. 1에서 보는 바와 같다. Table 2는 예비실험을 통해 안정적인 용접성 확보가 가능한 용접조건 범위를 나타내는 표이다.

### 2.2 용접실험

용접자세는 아래 보기자세(0°)이며, 고정변수로는 용접속도(13~15cm/min), 토치 진행각(75°~80°)으로 고정하였다. 제어 변수는 Peak current, Background current, Wire feed speed로 선정하였다. 각 제어변수의 범위 및 수준은 Table 3에서 나타내었으며, 중심합성 설계를 바탕으로 한 실험 계획은

Table 1 Efficiency of process analysis

Welding process type		Time	Weldability	Budget	Root gap tolerance
Manual	GTAW	Long	Very good	High	Width
	GMAW (CO2)	Commonality	Commonality	Low	Width
Auto	GTAW	Long	Low probability	High	Limited (U-Groove)
	GMAW	Commonality	Commonality	Low	Limited
	STT	Short	Good	Low	Width

Table 2 The optimal welds conditions obtained through preliminary experiment

Peak current (A)	Background current (A)	Wire feed speed (cm/min)	Welding speed (cm/min)
330~390	60~80	250~350	13~17

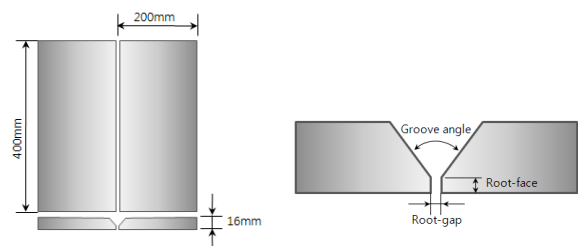


Fig. 1 Configuration of welding specimen

Table 4에서 나타난 바와 같이 총 20회의 용접실험을 실시하였다. 또한, 출력변수는 이면비드의 높이와 폭으로 선정하여 실험을 실시하였다.

초층용접부의 비드형상을 측정하기 위하여 용접이 완료된 시험편의 가로축 중간부분을 레이저 커팅머신을 사용하여 절단하고 단면부를 연삭한 후 폴리싱(Polishing)하였다. 시험편의

**Table 3 Welding parameter and level for experiment**

	Level	
	-1	1
Peak current(A)	330	390
Background current(A)	60	80
Wire feed speed(cm/min)	250	350

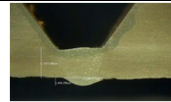
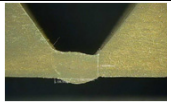
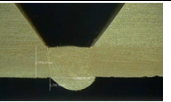
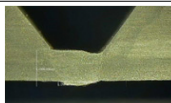
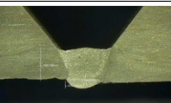
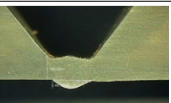
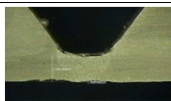
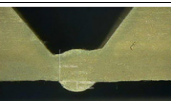
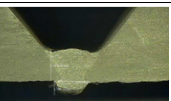
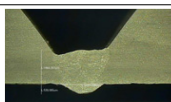
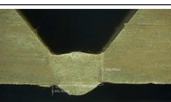
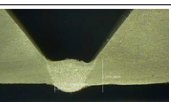
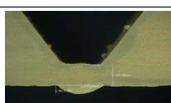
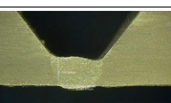
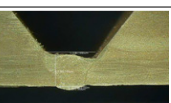
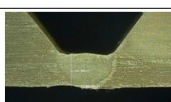
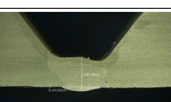
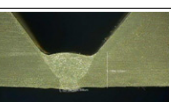
**Table 4 Experimental layout by composite design**

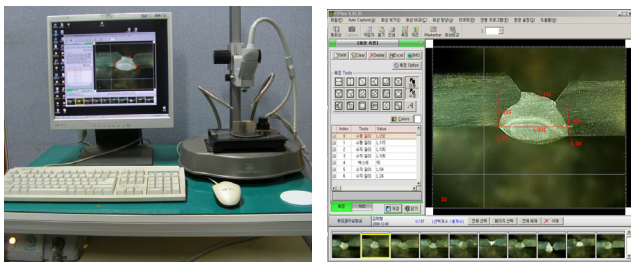
No.	P/C(A)	B/C(A)	W/F(cm/min)
1	360	70	218.35
2	360	70	300
3	360	86.33	300
4	360	70	381.65
5	360	70	300
6	360	53.67	300
7	330	70	300
8	390	70	300
9	390	60	350
10	360	70	300
11	330	80	350
12	330	60	250
13	390	80	250
14	360	70	300
15	390	80	350
16	390	60	250
17	360	70	300
18	330	60	350
19	330	80	250
20	360	70	300

비드형상을 잘 나타내기 위하여 질산 및 알코올을 혼합하여 단면부에 대해 에칭(Etching)작업을 수행한 후 정확한 비드형상을 측정을 위하여 Fig. 2에서 나타난 광학 현미경을 이용하여, 시험편의 단면 비드형상을 측정하였다.

총 20회의 용접 실험 중 2회의 실험이 실패하였다. 조건 1번의 경우 매우 낮은 Wire feed speed로 인해 용융풀을 안정되게 이끌어 나가지 못하여 용락이 발생하였으며 조건 4번의 경우 높은 Wire feed speed로 인해 단락현상으로 인해 용접이 이루어지지 않음을 확인하였다. 아래의 Table 5는 실험 후 비드 단면 형상 및 측정 결과값을 나타내는 표이다.

**Table 5 Measured bead geometry**

		
360/70/300	360/86.33/300	360/70/300
B/W : 4.002 B/H : 0.85	B/W : 4.54 B/H : 0.63	B/W : 4.738 B/H : 1.232
		
360/53.67/300	311.01/70/300	408.99/70/300
B/W : 4.73 B/H : 1.232	B/W : 2.551 B/H : 0.257	B/W : 5.018 B/H : 0.859
		
390/60/350	360/70/300	330/80/350
B/W : 5.074 B/H : 1.031	B/W : 2.005 B/H : 3.981	B/W : 3.785 B/H : 1.06
		
330/60/250	390/80/250	360/70/300
B/W : 5.158 B/H : 1.375	B/W : 2.77 B/H : 0.39	B/W : 4.289 B/H : 1.432
		
390/80/350	390/60/250	360/70/300
B/W : 3.58 B/H : 1.78	B/W : 5.158 B/H : 0.74	B/W : 4.205 B/H : 1.232
		
330/60/350	330/80/250	360/70/300
B/W : 4.17 B/H : 0.63	B/W : 5.635 B/H : 1.63	B/W : 4.551 B/H : 1.21



**Fig. 2 Measuring equipment for bead geometry**

### 3. 실험 결과

용접 실험 결과를 바탕으로 최적의 용접조건을 선정하기 위하여 광학 현미경 시스템을 이용하여, 시험편의 단면 비드형상을 측정한 결과값으로 Back-bead width와 Back-bead height를 기준으로 반응표면 분석법 중 등고선 플롯을 이용한 Fig. 3~4에 나타난 바와 같이 반응표면 분석법중 등고선 플롯을 이용하여 이면 비드 폭과 높이에 대한 적정 이면비드 형성 영역을 확인하였다. 양호한 이면비드 형상을 도출할 수 있는 안정영역에 대한 목표 값을 선정하여 Table 6과 같은 목표 값에 근접한 최적의 용접조건을 도출하였다.

### 4. 초층용접 공정별 용접성 검토

초층용접 공정별 용접성 검토를 위하여 아래의 Table 7과 같은 용접법을 이용하여 용접성 검토를 실시하였다. 각각의 용접 조건은 도출된 최적 용접조건을 바탕으로 시험편을 제작하였으며, 용접성 평가는 용접부 외관 검사, 인장시험, 경도시험, 굽힘시험을 수행하여 용접부의 특성을 고찰하였다. 실험 결과, 수

동 TIG(Tungsten Inert Gas) 1pass + FCAW(Flux Cored Arc Welding) 2pass~5pass의 용접 공정은 수동 TIG 1 pass의 낮은 용착량과, FCAW 공정의 높은 입열량으로 인해 용락이 발생하여 Fig. 5와 같은 용접 불량률이 발생되었다. 따라서 본 연구에서는 수동 TIG 1~2pass + FCAW 3pass~5pass와 STT 1pass + FCAW 2pass~4pass의 용접 실험을 통하여 용접성 검토를 실시하였다.

#### 4.1 용접부 외관 검사

용접품질의 성능평가를 위하여 용접부 외관검사를 실시한 결과, 수동 TIG 1~2pass + FCAW 3pass~5pass와 STT 1pass + FCAW 2pass~4pass의 용접 공정 모두에서 Fig. 6에서 보는 바와 같은 매우 균일한 용접비드를 확인할 수 있었다. 용접결합의 분류 및 품질등급은 ISO6520을 기준으로 용접부 표면 결함을 확인하였다. 또한 용접부 단면 마크로 검사를 위하여 용접시험편의 가로축 부분을 연삭, 폴리싱 및 에칭작업 후 광학현미경으로 확인한 결과 결함이 없는 매우 양호한 단면부 확인이 가능하였다. Fig. 7은 결함이 없는 단면 마크로 검사부의 모습을 나타낸다.

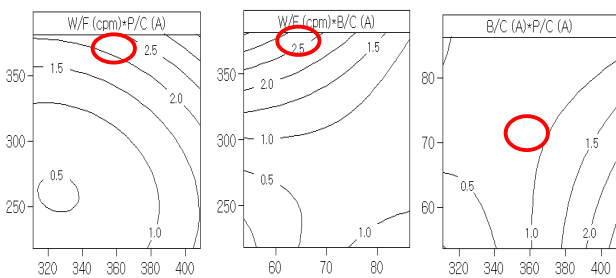


Fig. 3 Contour plots of back-bead height(mm)

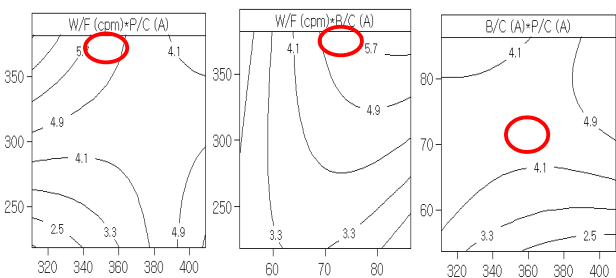


Fig. 4 Contour plots of back-bead width(mm)

Table 6 The predicted optimal value of process parameters

Optimal conditions			Predicted response	
Peak current (A)	Background current (A)	Wire feed speed (cm/min)	Back-bead width	Back-bead height
397.5	57.46	315	5.0	1.0

Table 7 Root-pass welding by process of weldability rating

Specimens of weldability	Welding method	Welding result
1	Manual TIG 1pass + FCAW 2pass~5pass	Failed (Welding affected burn, Welding defects)
2	Manual TIG 1~2pass + FCAW 3pass~5pass	Good
3	STT 1pass + FCAW 2pass~4pass	Good



Fig. 5 TIG 1pass manual welding defects

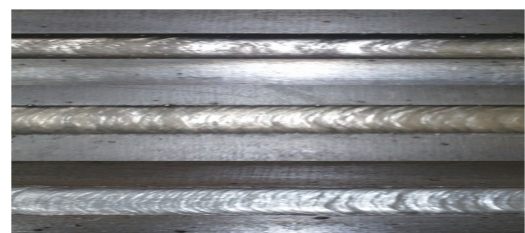


Fig. 6 Examine the surface of the weld bead appearance

### 4.2 인장시험

용접부의 인장강도 및 용접성을 평가하기 위하여 인장 시험기를 사용하여 시험을 수행한 결과, 모재에서의 파단을 통한 용접부의 양호함을 확인하였다. 인장강도는 시험편의 항복강도가 모재의 항복강도인 235MPa 이상, 인장강도는 400MPa 이상임을 확인하였다. 또한 시험편의 용접 파단은 용접열영향부와 용접 비드가 아닌 모재에서 발생하였으며 파단 될 때까지



Fig. 7 Macro test(TIG+FCAW, STT+FCAW)

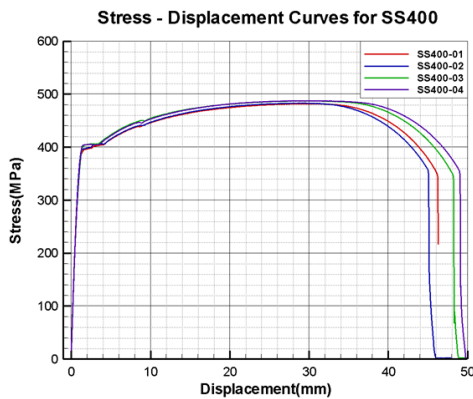


Fig. 8 Stress-strain diagram

Table 8 Tensile test results

Specimens No.	Welding process	Tensile strength (MPa)	Breaking parts	Breaking Samples
(1)	Manual TIG 1~2pass + FCAW 3pass~5pass	481.88	Base metal	
(2)	Manual TIG 1~2pass + FCAW 3pass~5pass	482.92	Base metal	
(3)	STT 1pass + FCAW 2pass~4pass	486.98	Base metal	
(4)	STT 1pass + FCAW 2pass~4pass	487.56	Base metal	

열 영향부의 변형은 모재의 파단 위치보다 현저하게 변형이 작은 것을 확인하였다. Table 8은 인장시험 결과를 나타내며, 응력-변형에 관한 그래프는 Fig. 8에서 보는 바와 같다.

### 4.3 경도시험

본 경도시험은 기존방식(수동 TIG+FCAW)과 본 연구에서 연구한 초층용접방식(STT+FCAW)방식의 경도측정을 통해 기계적 성질 차이를 비교 분석하였다. 경도시험은 용접부와 열영향부 모재의 취성을 알아보기 위한 시험으로, 용접부와 열영향부 및 모재에 대하여 3점 이상을 측정하였다.

Fig. 9에 나타난 것과 같이 경도측정 결과 기존 WPS(Welding Procedure Specification) 방식인 수동 TIG+FCAW와 새로운 방식인 STT+FCAW의 경도분포가 유사하게 나타남을 확인하였다. 또한, 단순히 경도측정값으로 기계적 성질을 단정할 수는 없으나, STT+FCAW를 사용할 경우에도 기계적 강도 저하와 같은 문제는 발생하지 않는 것을 확인하였다.

### 4.4 굽힘시험

용접부의 연성 시험과 용접부 결함(기공, 슬래그, 용입 불량) 등을 파악하기 위한 굽힘 시험은 최적조건으로 선정된 용접조건을 이용하여 맞대기 용접 형상을 바탕으로 굽힘 시험을 진행

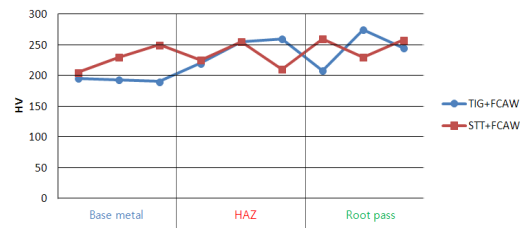


Fig. 9 The hardness of manual TIG+FCAW and STT+FCAW

Table 9 Bend test results

Specimens No.	Welding process	Weld defects	Sample
(1)	Manual TIG 1~2pass + FCAW 3pass~5pass	No defects	
(2)	Manual TIG 1~2pass + FCAW 3pass~5pass	No defects	
(3)	STT 1pass + FCAW 2pass~4pass	No defects	
(4)	STT 1pass + FCAW 2pass~4pass	No defects	

하였다. 각 용접 공정별 2개의 시험편을 제작하여 전체 4개의 시험편을 제작하였으며, 굽힘시험 중 소성 변형이 발생한 후에도 충분한 연성을 가지고 있음을 확인하였으며 용접부에 기공이나 슬래그 등의 용접 불량은 확인되지 않았다. Table 9는 굽힘 시험의 결과를 나타내는 표이다.

## 5. 결론

- (1) 다층 FCAW 용접 조건 선정을 위한 용접 실험을 통해 STT-FCAW 및 수동 TIG-FCAW 의 최적 용접 조건을 선정하였다.
- (2) 최적의 용접조건을 선정하기 위하여 수동 용접실험으로부터 도출된 결과를 바탕으로 평판 용접실험을 수행하여 STT 용접의 각 공정변수에 대한 영향을 확인하였으며, 반응표면 분석법중 등고선 플롯을 이용하여 이면 비드 폭과 높이에 대한 영역을 확인하였다.
- (3) 양호한 이면비드 형상을 도출할 수 있는 안정영역에 대한 이면비드의 목표 값을 선정하여 최적의 이면비드 값에 근접한 용접조건을 도출하였다.
- (4) 수동 TIG 초층용접보다 상대적으로 용접속도가 빠른 STT용접기를 이용하여 수동 TIG 1~2pass + FCAW 3pass ~ 5pass와 STT 1pass + FCAW 2pass ~ 4pass의 용접 실험을 통하여 두 다른 용접공정을 이용한 용접 시편을 용접성 검토를 하였다. 이를 통해 용접부 외관검사, 인장시험, 경도시험, 굽힘시험의 양호한 용접성을 확인하였으며, 기존 공정과 본 연구의 용접공정이 용접성이 차이가 매우 미비함을 확인하였다.

## 후 기

이 논문은 해상풍력중심 신재생에너지 인재양성센터 사업에 의하여 지원되었음.

## 참 고 문 헌

- (1) Chandel, R. S., 1988, "Mathematical Modeling of Gas Metal Arc Weld Features," *Minerals, Metals & Materials Society, Proceedings of the Fourth International Conference on Modeling of Casting and Welding Processes*, Vol. 4, pp. 109~120.
- (2) Doherty, J., Shinoda, T., and Weston, J., 1978, *The Relationships Between Arc Welding Parameters and Fillet Weld Geometry for MIG Welding with Flux Cored Wires*, The Welding Institute.
- (3) Jones, S. B., 1976, *Process Tolerance in Submerged Arc Welding*, Research Report, Weld. Inst.
- (4) Shinoda, T., and Doherty, J., 1978, *The Relationships Between Arc Welding Parameters and Weld Bead Geometry*, The Welding Institute.
- (5) Kim, D. C., and Rhee, S. H., 2001, "Design of an Optimal Fuzzy Logic Controller Using Response Surface Methodology," *IEEE Trans. on Fuzzy systems*, Vol. 9, No. 3, pp. 404~412.
- (6) Cho, B. M., Lee, D. J., and Yoo, I. S., 2009, "A Study on the Characteristics of Geometric Error according to Semi-Cylindrical Surface by Response Surface Method," *Proceedings of the KSMTE Autumn Conference*, pp. 209~214.
- (7) Boo, K. S., Yang, H. H., Cho, H. S., 1990, *Fuzzy Linguistic Control of Arc Welding Process*, Department of Production Engineering Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea.
- (8) Doherty, J., and McGlone, J. C., 1977, *Relationships Between Process Variables and Weld Geo-metry*, The Welding Institute Report.
- (9) Kim, Y. S., 2010, *The Present and Future of the Welding Joinnig Technology*, Korea Institute of Science and Technology Information, Korea.
- (10) Montgomery, D. C., 1984, *Design and Analysis of Experiments (2thEdition)*, John Wiley & Sons, Arizona State University, USA, pp. 340~368.