

# 고속 다전극 자동 용접 시스템

문형순\* · 고성훈\* · 김용백\*

\*현대중공업 산업기술연구소 자동화연구실

## Automatic Multi-torch Welding System with High Speed

Hyeong-Soon Moon\*, Sung-Hoon Ko\* and Yong-Baek Kim\*

\*Automation Dept. Hyundai Industrial Research Institut, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd, Ulsan, Korea

### Abstract

Since the wall thickness can be up to 6" or greater, welds must be made in many layers, each layer containing several passes. However, the welding time for the conventional welding processes such as SAW(Submerged Arc Welding) and FCAW(Flux Cored Arc Welding) can be required many hours. The aim of this paper is to develop a high speed welding system with multi-torch and laser vision sensor for increasing the production speed on the line and to remove the need for the operator so that the system can run automatically for the complete multi-torch multi-layer weld. It was shown that the developed laser vision sensor and analysis of arc blow for multi-torch were effective for multi-pass seam tracking and stable arc. A new automated multi-torch welding systems for thick wall applications has been proved in several production lines.

\*Corresponding author : hsmoon@hhi.co.kr

(Received November 3, 2006)

Key Words : Multi torch, Arc blow, Laser vision sensor, Seam tracking, Multi-pass Multi-layer welding, Electro-magnetic force, Self-induced magnetic force

## 1. 서 론

강재를 이용한 많은 사업영역에서 아크용접은 전용 용접 자동화 시스템 및 로봇을 이용한 용접 자동화에 핵심을 이루고 있는 분야 중에 하나이다. 용접 공정은 그 분야가 매우 다양하며 이로 인해 용접 자동화를 구현하기 위한 접근 방법도 다양하게 분류될 수 있다. 용접 자동화는 크게 반 자동과 자동으로 분류할 수 있다. 반 자동의 경우 작업자의 개입이 부분적으로 이루어지지만, 자동의 경우 많은 부분이 자동화 시스템에 의해 구현되며 크게 무인 자동화와 유인 자동화로 구분할 수 있다.

용접 자동화를 통해 부가가치를 가장 효과적으로 얻을 수 있는 분야는 조선, 해양 설치, 화공 플랜트 및 자동차 사업분야를 들 수 있으며, 특히 조선 분야는 많은 인력이 소요되는 아크용접의 유인 자동화를 통하여 생산성 향상에

많은 노력을 기울이고 있다.

용접효율을 가장 손쉽게 올릴 수 있는 방법으로는 용접 속도를 향상시키거나 용접공법을 변경하는 것이다. 용접속도를 향상시키기 위해서 고속 회전 토치와 아크센서를 이용한 용접선 추적을 사용하려는 연구가 수행되었으며<sup>1)</sup>, 탠덤 용접이나 다전극 용접과 같이 용접 공법을 변경하여 생산성을 향상시키려는 연구가 수행되었다<sup>2,3)</sup>. 최근 많은 기업들이 효율 향상이라는 전략적인 목적을 위해 패러다임을 수정하거나 보완하고 있으며 그 중 한 방법으로 다전극 용접토치를 이용한 고속 용접 기법 개발에 박차를 가하고 있다. 다전극 용접 기법은 두개 이상의 용접 토치와 와이어를 사용하여 하나의 용융풀을 형성하도록 용접하는 기법으로 높은 생산성을 얻을 수 있다는 장점이 있지만 두개 이상의 용접아크가 근거리에서 위치하게 되어 아크 쏠림(arc blow)이 발생할 수 있고 고속 용접에 대응하기 위한 용접선 자동 추적 기능이 필수적으로

요구된다는 단점이 있다<sup>4,5)</sup>.

아크 쏠림은 통전되는 전류의 방향이나 접지 상태에 따라 현상이 변하게 되며, 특히 다전극을 이용한 용접공정의 경우 용접품질에 매우 심각한 영향을 미치게 되므로, 아크 쏠림의 주 원인인 유도 자기장의 영향을 분석하고 이를 방지하기 위한 설계 방안이 요구된다.

본 연구에서는 용접 효율향상을 위해 용접선 자동 추적이 가능한 고속 다전극 자동용접 시스템을 개발하였다. 고속 용접을 구현하기 위해 다전극 용접 시스템의 용접선 자동 추적 및 연속 용접 알고리즘을 개발하였으며, 다전극 주변에서의 전자기 해석을 통하여 아크 쏠림을 방지할 수 있는 설계기준을 제시하였다.

## 2. 다전극 용접 시스템의 구조

개발된 다전극 SAW 및 FCAW 자동 용접 시스템의 구성도를 Fig. 1에 나타내었다.

도식에 나타낸 SAW용접 시스템은 3전극으로 구성되어 있으며, 선행 전극은 직류, 나머지 2개 전극은 교류전원으로 구성된다. 이러한 구성으로 실제 개발된 SAW 용접시스템은 압력 용기 제작 시스템으로 Fig. 2에 나타내었으며, FCAW 용접 시스템은 모든 전극이 직류인 3전극 탄뎀(tandem) 구조이며, Fig. 3에 나타낸 바와 같이 양면을 동시에 용접할 수 있도록 구성되어 있다.

SAW 용접 시스템의 선행전극은 아크의 안정성, 즉 일정한 아크 길이를 유지하기 위해 직류전원을 사용하였으며, 후단 토치는 일정한 용착량을 유지하기 위해 교류전원을 사용하였다. 다전극의 경우 토치간의 수평거리 및 상대적인 토치 높이 설정이 매우 중요하므로, 본 조합은 아크 안정성에 매우 중요한 역할을 하게 된다. 부적절한 토치의 기구학적 조합은 SAW에서는 오픈 아크(open arc)를 유발하게 되고, FCAW의 경우



Fig. 2 Pressure vessel welding system

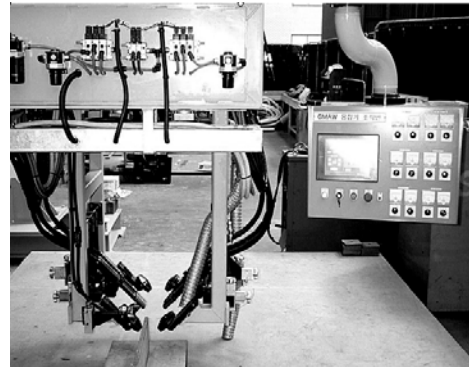


Fig. 3 Six FCAW system

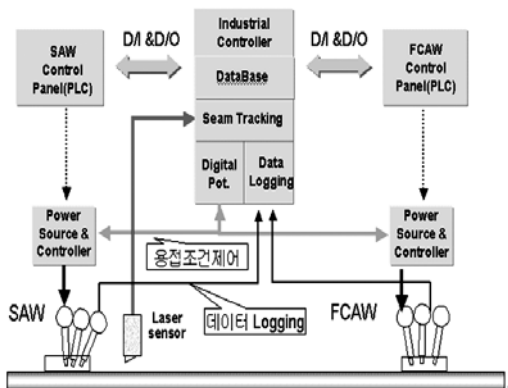


Fig. 1 Overall system structure

는 아크 쏠림 현상이 발생하게 되어 건전한 용접부를 얻을 수 없게 된다. 따라서 건전한 용접부를 얻기 위해서는 토치간의 기구학적 조합이 용접 현상에 미치는 영향을 분석해야 한다. 본 논문에서는 해석적 접근을 통해 전극간 거리를 결정하였다.

다전극 용접시스템은 일반적인 단일 용접 전극을 사용할 때 보다 높은 생산속도를 얻을 수 있다. 조선사의 용접 작업 표준서에 따르면 단일 용접 전극을 사용하는 경우 보통 75cm/min 이하의 용접속도 범위에서 용접이 가능하나 다전극의 경우 특히 SAW의 경우 최대 250cm/min까지 용접이 가능하다<sup>6)</sup>.

다전극 용접시스템 개발시 고려해야 할 항목은 크게 앞서 언급한 전극간 아크 쏠림 현상과 용접선 자동추적과 연계된 자동 연속 용접을 위한 알고리즘 개발로 나눌 수 있으며, 이에 대해서는 3, 4장에서 자세히 설명하였다.

## 3. 아크 쏠림

전극 주변에서는 높은 용접전류의 흐름에 의해서 자

체 유도된 자기장이 형성되게 되며, 형성된 자기장은 주변의 전류 흐름에 영향을 미치게 된다. 따라서 전극간 거리가 가깝고 많은 전극이 동시에 사용되는 다전극 용접시스템에서는 유도 자기장에 의한 아크 쏠림 현상이 용접품질에 중요한 문제가 되고 있다. 본 연구에서는 전극 주변의 유도 자기장을 유한요소 해석을 통해서 계산하고 이로부터 전자기적 특성을 평가하여 아크 쏠림을 방지할 수 있는 전극간 거리를 결정하였다.

3.1 해석 모델 및 가정

전극 주변의 자기장 해석에 사용된 아크 모델은 Fig. 4의 (a)와 같이 원기둥 또는 원뿔 형상으로 가정하였으며, 해석 영역은 반경 1m, 높이 1m의 원기둥 형태이다. 요소망은 20 절점의 brick 요소를 이용하여 313470개의 노드와 64320개의 요소로 구성하였으며, 아크 주변의 요소 크기는 0.1mm로 Fig. 4의 (b)와 같이 구성하였다. 이때, 용접 와이어의 직경은 1.2mm, 모재 두께는 10mm로 가정하였다. 전자기장 해석을 위하여 경계조건으로는 용접 와이어 상단에 용접 전류에 따른 균일한 전류 밀도를, 모재 끝단 접지 부분의 전압은 0으로 부과하였고, 해석 영역 가장자리에는 무한 경계 요소를 정의하여 해석 영역 크기에 따른 자기장 해석의 외곡을 방지하였다.

아크는 초고온의 플라즈마로써 밀도가 매우 낮은 기체 상태이므로, 국부적으로 진공과 유사한 상태로 가정할 수 있다. 따라서 전자기적 물성치인 아크의 상대 투자율은 진공과 같은 1로 가정하였다. 또한, 아크저항은 측정된 용접 전압과 전류, 그리고 측정 가능한 용접 시스템의 저항으로부터 오옴의 법칙을 이용하여 계산하였으며, 이로부터 아크의 비저항은  $7.5 \times 10^{-5} \Omega m$ 로 가정하였다. 용접봉과 모재의 상대 투자율은 2000, 비저항은  $9.7 \times 10^{-8} \Omega m$ 로 가정하였으며, 온도에 따른 물성치 변화는 고려하지 않았다.

3.2 전극 주변의 전자기장 분포

용접부의 자기장 분포를 계산하기 위해서는 아크를

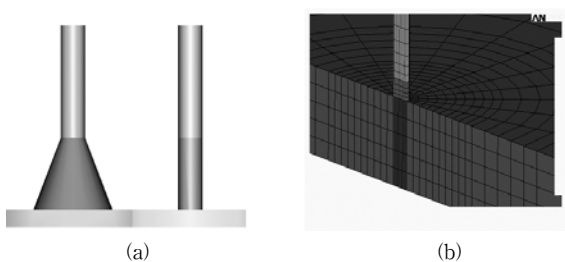


Fig. 4 Configurations of arc and mesh design

통해 모재로 전달되는 전류에 대한 전기장 계산이 선행되어야 한다. 아크에 의해 모재로 전달된 전류는 Fig. 5와 같이 전극에서 접지로의 최단 경로에서 가장 높은 전류 밀도를 보이며, 낮은 전류 밀도이긴 하지만 그 외의 모재 전체를 통해서도 전류가 흐름을 알 수 있다. 전류 밀도는 전극과 접지 주변에서 상대적으로 매우 높았으며, 전극 주변의 전류 밀도는 Fig. 5의 “A”에서와 같이 접지의 위치에 관계없이 전 방향으로 일정한 분포를 나타내었다. 따라서 유도 자기장은 전극 및 접지 주변에서 가장 강하며, 특히 전극 주변의 유도 자기장은 접지의 위치 영향을 무시할 수 있다. 모재로 흐르는 전류에 의해서도 자기장이 유도되지만 상대적으로 유도 자속 밀도가 낮아서, 아크 쏠림에 미치는 영향은 무시할 수 있다.

아크 길이 3mm, 전류 400A에 대한 용접부의 자기장 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 용접봉과 모재는 공기에 비해 투자율이 크기 때문에 매우 높은 자속 밀도를 가지지만, 용접봉 주변 공기는 상대적으로 낮은 투자율로 인하여 낮은 자속 밀도를 나타내었다. 공기 중의 자속 밀도는 전극 주변에서는 높지만 전극에서 멀어지면서 급속히 낮아지는 경향을 보였으며 모재 주변에서는 모재에 흐르는 전류에 의한 유도 전류에 의해서 미미하지만 자속 밀도가 변화하였다. 전극에서 접지 방향으로 흐르는 전류에 의한 유도 자속은 전극에 의한 유도 자

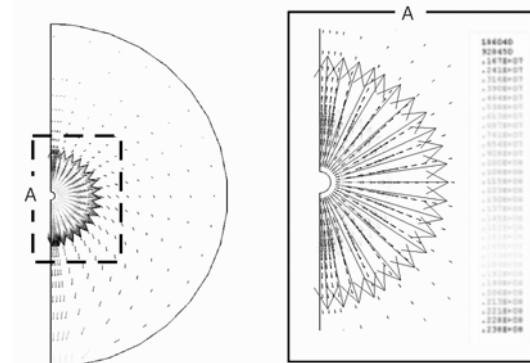
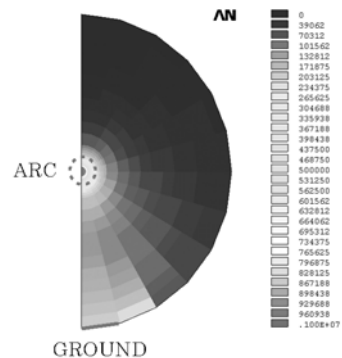


Fig. 5 Contour of current density(current: 400A, unit:A/mm<sup>2</sup>)

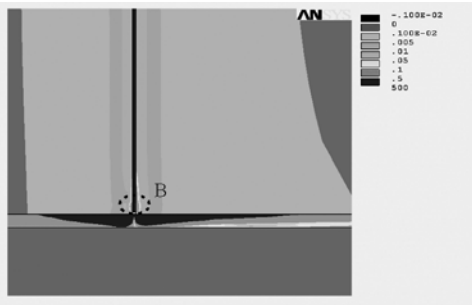


Fig. 6 Contours of magnetic flux distribution

속과 방향이 일치하여 자속 밀도가 다소 증가하였지만, 그 반대 방향의 경우 자속의 방향이 반대여서 오히려 자속밀도가 감소하는 경향을 보였다. 용접봉과 모재사이의 아크 영역에서는 Fig. 6의 “B”와 같이 아크의 낮은 투자율에 기인하여 전극의 높은 자속이 누설되어 자속 밀도는 불균일해지면서 증가하였다.

아크 길이가 일정할 때 아크 폭에 따른 자속 밀도의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 아크 중심부로부터 멀어질수록 자속 밀도는 급격히 감소하였지만, 아크 폭의 변화에 의한 자속 밀도의 변화는 미미하였다. 아크 폭이 일정하고 아크 길이가 변화하였을 때는 Fig. 8과 같이 아크 길이가 길수록 자속 밀도가 증가하는 경향을 보였지만 전극 중심으로부터의 거리가 멀어질수록 그 차이는 급격히 감소하여 10mm 이상 떨어질 경우 그

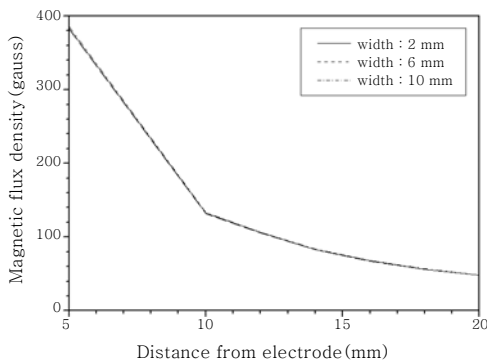


Fig. 7 Effects of arc width on magnetic flux density

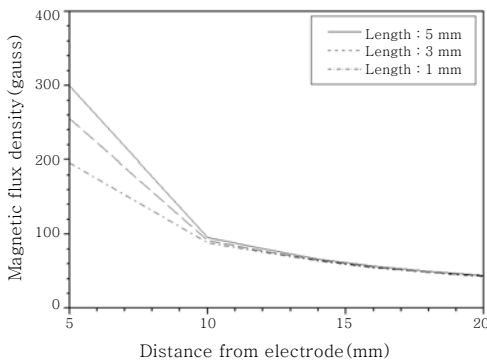


Fig. 8 Effects of arc length of magnetic flux density

차이는 매우 미미하였다. 따라서 아크의 형상 변화에 따른 유도 자기장의 변화는 전극 중심으로부터 10mm 이상의 거리에서는 무시할 수 있다. 따라서 용접이 수행되는 동안 아크의 형상은 일정하지 않지만, 유도 자기장이 이에 의해 받는 영향이 미미하므로 아크 쏠림 현상 평가는 용접 전류 크기와 전극간 거리가 가장 중요한 인자임을 알 수 있다.

용접 전류에 따른 자속 밀도의 변화를 Fig. 9에 나타내었다. 자속 밀도는 전류에 비례하여 증가하고, 전극 중심으로부터의 거리에 반비례하고 있다. 아크 쏠림이 발생하는 자속 밀도를 결정할 경우 이 그래프로부터 아크 쏠림이 발생하기 시작하는 전극간 최소 거리를 결정할 수 있으며, 이를 다전극 토치 설계에 반영하여 아크 쏠림을 방지할 수 있다.

#### 4. 자동 연속 용접

자동 연속 용접이 가장 광범위하게 적용된 사례는 후판 압력용기 제작이다. 압력용기의 경우 최소 10개의 용접패스(pass)에서 최대 수십 패스까지의 용착량이 요구된다. Fig. 10에 일반적으로 사용되는 “V” 그루브(groove)와 “U” 그루브의 용접 형상을 나타내었다.

Fig. 10에 표기된 용접부를 연속 용접하기 위해서는 각 용접 레이어(layer)에 적절한 용접 패스가 결정되어야

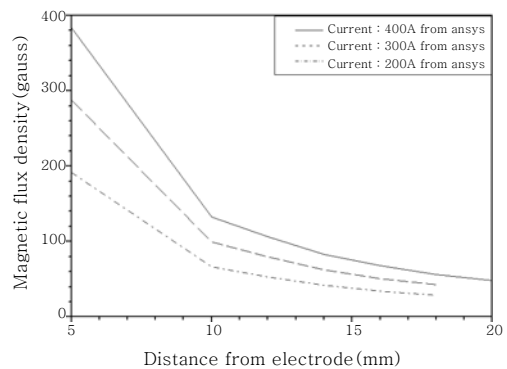


Fig. 9 Magnetic flux density by current

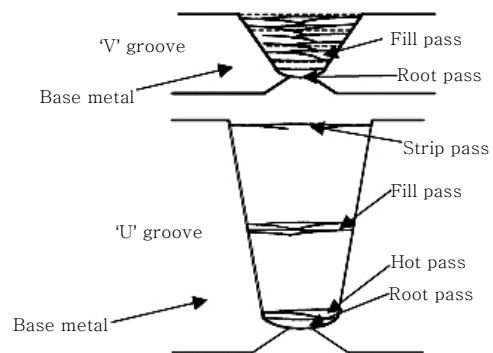


Fig. 10 Definition of welding groove

야 하며 임의의 용접 패스에 과도한 용착량이 적층되지 않도록 Fig. 11과 같이 패스간 최적의 이동 거리 (transition distance)를 자동적으로 결정해야 한다.

각 레이어별 용접 패스를 결정하기 위해서 용접선 인식 및 추적이 가능한 다양한 센서를 사용할 수 있으나, 본 연구에서는 용접선 인식 및 추적을 위해 레이저 비전 센서를 이용하였다<sup>7)</sup>. 용접선 인식은 레이저 비전 센서에 장착된 구조화된 레이저 빔이 부재를 통해 반사되어 카메라에 영상이 맺히고 카메라로부터 저장된 영상을 이용해 용접부를 추출하는 과정을 거친다. 용접부의 기하학적인 형상은 시각센서에서 일반적으로 많이 사용되는 이차 미분법 및 휴리스틱 알고리즘을 이용해 구현하였다<sup>7)</sup>.

각 패스의 용접 위치는 아래와 같은 절차를 통해 결정하였으며, 계산된 용접 위치를 이용하여 용접 패스를 결정하고 연속 용접을 수행하였다:

- 초기 루트 패스(root pass)를 용접하기 위해 Fig. 12의 상단에 표기된 “Top left” 및 “Top right”를 인식하여 그 중간점을 찾는다.
- 시각센서를 통해 그루브 내부에 용접된 용접부와 그루브 벽면 사이의 교차점을 찾아낸다.
- 찾아낸 교차점을 이용해 용접하고자 하는 그루브의 폭을 계산해 레이어별 패스수를 결정한다.
- 만일 계산된 용접 패스가 2개일 경우에는 Fig. 12에 표기된 “Bottom left” 및 “Bottom right”를 기준으로 용접 패스 위치를 결정한다. 단 적절한 용접을 수행하기 위해 각 패스는 내부에 설정된 오프셋 거리 (offset distance)만큼 벽면에서 이격되어 용접한다.
- 패스수가 3개일 경우는 각 벽면에서 용접하는 절차는 위의 절차에 따라 하여 용접 중심점은 초기 루트 패스에서 제안된 절차로 용접한다.

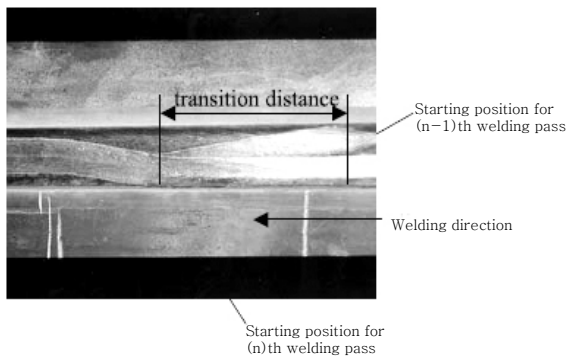


Fig. 11 Transition distance for each welding pass

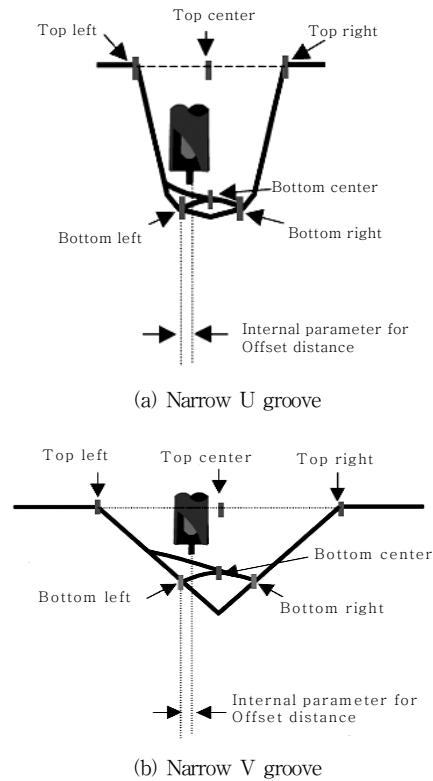


Fig. 12 Schematic diagram of laser scan for narrow U and V groove

### 5. 결 론

- 1) 자동 고속 용접이 가능한 다전극 SAW 및 FCAW 시스템을 개발하였고, 산업 현장에 적용하였다.
- 2) 유한요소 해석을 통하여 전극 주변의 전자기장을 계산하고 이로부터 유도 자기장 특성을 평가하였다. 유도 자기장을 결정하는 주요 인자는 전류의 크기와 전극으로부터의 거리이며, 해석 결과로부터 아크 쓸림을 방지할 수 있는 전극간 거리를 결정하였다.
- 3) 레이저 비전 센서를 이용하여 용접선 추적 및 다 패스 자동 용접을 위한 위치 결정 알고리즘을 개발하였다.

### 참 고 문 헌

1. H.Nomura, J.E.Middle : Development and Application of Arc Sensor Control with a High Speed Rotating Arc Process, Sensors and Control Systems in Arc Welding, Chapman & Hall, Ch. 28, pp.247-256, (1994)
2. Japan Patent, 1996-224667
3. S. J. Mulligan. and G. B. Melton : an Assessment of the Tandem MIG-MAG Welding Process, TWI report 745/2002
4. H.S. Moon and R.J. Beattie : Adaptive Multitorch Multipass SAW, Journal of KWS, 1(2001), 1-7

5. H.S. Moon and R.J. Beattie : A Fully Automatic Adaptive Pressure Vessel Welding System, AWS, Chicago, (2002)
6. Welding Procedure Specification, Hyundai Heavy Industrial
7. H.S. Moon, Y.B. Kim and R. Beattie : Multi Sensor Data Fusion for Improving Performance and Reliability of Fully Automatic Welding System, Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology, (2005)