

工學碩士 學位論文

후판 편면 맞대기 용접을 위한
Hi-Pro FCAW의 개발에 관한 연구

指導教授 趙相明

이 論文을 釜慶大學校 産業大學院 소재프로세스 공학과 朴今基 提出함



釜慶大學校 産業大學院

소재프로세스 공학과

朴今基

朴今基의 工學碩士 學位論文으로 認准함

2004年 8月

主 審 工學博士 金 雨 烈 

委 員 工學博士 徐 源 贊 

委 員 工學博士 趙 相 明 

목 차

Abstract	3
제 1 장 서론	4
1.1 연구배경 및 필요성	4
1.2 연구목적 및 개요	4
제 2 장 이론적 배경	5
2.1 플럭스 코어드 아크용접	5
2.2 Hi-Pro FCAW 개요	6
2.3 Hi-Pro FCAW 용착량	8
제 3 장 실험방법	9
3.1 용접재료 및 용접방법	9
3.2 파형 계측	11
3.3 아크 영상 및 용융지 관찰	11
3.4 비드형상 계측	11
제 4 장 실험결과 및 고찰	12
4.1 Hi-Pro FCAW 용접의 안정성 평가	12
4.2 Hi-Pro FCAW 용접의 전극간거리 설정	14
4.3 아크 각각 275A Hi-Pro FCAW	15
4.3.1 비드외관과 출력파형의 관계	15
4.3.2 출력파형과 용적이행과의 관계	18
4.3.3 비드형상	26

4.4 아크 각각 350A Hi-Pro FCAW -----	28
4.4.1 비드외관과 출력파형의 관계 -----	28
4.4.2 출력파형과 용적이행과의 관계 -----	31
4.4.3 비드형상 -----	39
4.5 Hi-Pro FCAW 현장 적용 -----	42
4.5.1 실험방법 -----	42
4.5.2 실험결과 및 고찰 -----	42
제 6 장 결 론 -----	44
참고문헌 -----	45

A Study on the Development of Hi-Pro FCAW for One-side Butt Welding in Thick Plates

Kum-Gi, Park

*Department of Materials Processing Engineering, Graduate School,
Pukyong National University*

Abstract

The Hi-Pro FCAW welding is high productive arc welding process. This welding method is generated by twin arcs which are consist of right wire and left wire in one power source. Therefore we can get deep penetration and high deposition. The contact tip distance is 13mm. This welding should be occurred interference phenomenon between right wire arc and left wire arc. We try to monitor arc currents and arc voltages. Coefficient of current variation and coefficient of resistance variation can estimate arc stability index.

It is purpose of this study that is arc stability of Hi-Pro FCAW for variable welding voltages.

Key Words: Tandem welding, Twin welding, Hi-Pro FCAW welding, Melting weight, Arc stability, Coefficient of current variation, Coefficient of resistance variation, Molten metal, Flux column

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 필요성

선박건조의 탑재공정에 있어서 용접장이 길고 작업공간이 넓으며 이동장비 지원이 원활한 선체의 Tank Top Plate나 Engine Room Bad 등의 후판 편면 맞대기 용접에는 SAW과 같은 고효율 용접법이 적용되고 있다. 하지만 컨테이너 운반선의 Upper Deck나 Hatch Coaming Top Plate와 같이 용접장이 짧고 작업공간이 협소하며 이동장비 지원이 원활하지 못한 부분에는 고효율 용접법이 적용되지 못하고 있다. 따라서 이러한 부분에 적용시킬 고효율 용접법이 요구된다.

1.2 연구목적 및 개요

본 연구에서 개발한 Hi-Pro FCAW의 용착량은 기존의 CO₂용접 용착량보다 약 2배 많은 용접법이다. Hi-Pro FCAW 용접법의 아크 안정성을 간단하게 평가할 수 있는 기법을 개발하고 개발된 방법을 이용하여 구체적인 적절한 용접조건, 용접 공법 개발을 통하여 현장 적용하는 것을 본 연구의 목적으로 하였다.

각 전류 영역에서 전압 변화에 따른 현상들을 관찰하고, 용접비드와 용입 상태를 관찰하여 최적의 조건을 판단하였다.

제 2 장 이론적 배경

2. 1 플럭스 코어드 아크 용접

플럭스 코어드 아크(Flux Cored Arc Welding, FCA) 용접의 원리는 가스 메탈 아크 용접(Gas Metal Arc Welding, GMAW)과 유사하게 소모 전극을 사용하는 방법으로서 용가재로 작용하는 와이어를 일정한 속도(Wire Feeding Rate)로 용융지에 송급하면서 전류를 통하여 와이어와 모재 사이에서 아크가 발생하도록 하는 용접법이다. 그러나 이름 자체가 의미하는 바와 같이 와이어 중심부에 플럭스가 채워져 있는 플럭스 코어드 와이어를 사용한다. FCA 용접은 보호가스 사용 여부에 따라 가스보호 FCA 용접과 자체보호 FCA 용접으로 분류된다. 가스보호 FCA 용접은 외부에서 별도의 보호가스를 공급하여 용융부가 보호가스 뿐만 아니라 플럭스에서 생성된 슬래그에 의해 보호된다. 따라서 용융지가 이중으로 보호되는 것으로써 GMAW 와이어와 형태만 다를 뿐 원리를 동일하다. 그러나 자체보호 FCA 용접에서는 외부에서 추가적인 보호가스가 공급되지 않기 때문에 FC 와이어의 플럭스에서 발생하는 가스와 슬래그에 의해 용접부가 보호된다. 따라서 SMA 용접의 원리와 유사하다. 한편 플럭스 코어드 와이어는 내부에 충전된 재료에 따라 슬래그를 형성하는 플럭스가 주성분일 경우에는 플럭스 코어드 와이어라 하며, 금속 분말이 주성분일 경우에는 특별히 메탈 코어드 와이어라고 부른다. 메탈 코어드 와이어는 슬래그가 생성되지 않고 보호가스를 필히 사용하여야 하기 때문에 GMAW 와이어의 일종으로 분류하기도 한다.

2. 2 Hi-Pro FCAW 개요

탄뎀용접과 트윈용접은 Fig. 2.1과 2.2에서 나타낸 것과 같이 처음 필릿용접에서 사용되어왔다. 본 연구에서 사용된 Hi-Pro FCAW 용접법은 Fig. 2.3과 같이 기존 탄뎀, 트윈 용접과는 달리 맞대기 용접부에 적용시키는 것이다. Fig. 2.4에서처럼 최근 Twin-Wire GMAW^{2),7)}, T.I.M.E Twin³⁾, Double Wire MIG Welding⁴⁾ 등은 2대의 용접전원을 동기화시켜 전류펄스를 제어하는 방법, 단일 용접전원으로 하나의 아크를 일으켜 아크 주위에 Cold 와이어를 송급시켜 와이어 용착량을 증가시키는 방법 등이 연구 중이거나 용접장비가 판매되고 있다. Hi-Pro FCAW는 단일 용접전원으로 하나의 와이어 송급장치에 두개의 와이어 스폴을 장착하여 두 개의 컨택트 팁으로 구성된 토치에 와이어를 송급시켜 2개의 아크가 하나의 용융지를 형성하는 용접법이다. 따라서 고생산성 용접을 추구하는 용접법이라 하여 "Hi-Pro(High-Productivity)용접"으로 지칭하였다.

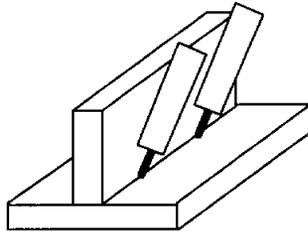


Fig. 2.1 Schematic of tandem welding in the fillet welding

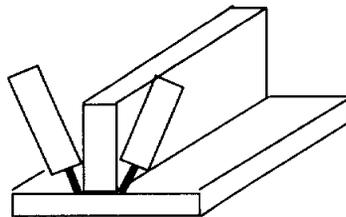


Fig. 2.2 Schematic of twin welding in the fillet welding

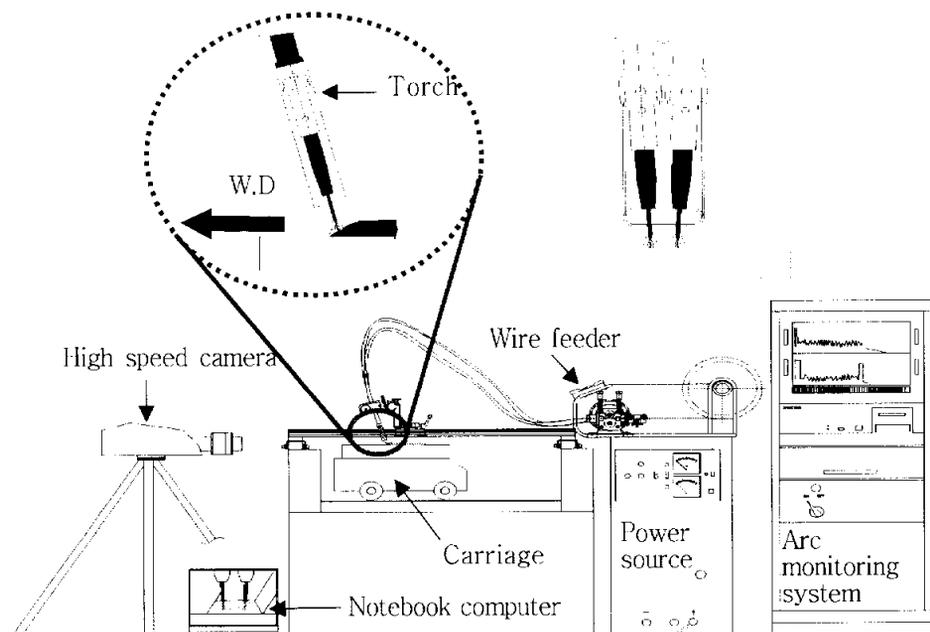


Fig. 2.3 Schematic of equipment by Hi-Pro FCAW

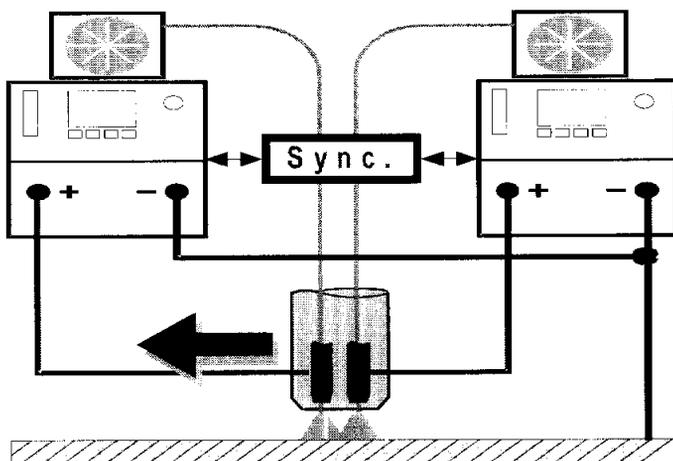


Fig. 2.4 Schematic of equipment by T.I.M.E Twin

2. 3 Hi-Pro FCAW 용착량

용접에 있어서 단위시간당 용착량이 매우 중요한 의미를 가지는데 이 단위시간당 용착량은 바로 산업현장에서의 생산량과 직결된다. 따라서 많은 세계적인 연구소에서도 시간당 용착량을 늘릴 수 있는 여러 가지 고효율 용접법을 개발 중에 있다.

Fig. 2.5는 용접법에 따른 전류별 용착량을 나타낸 그래프이다. 사각형마크는 사이리스터 용접기를 이용한 Single 1.4 ϕ FCAW 용착량이고 검은색 사각형마크는 1.4 ϕ Hi-Pro FCAW 용착량을 나타내었다. Hi-Pro FCAW 용착량이 기존의 FCAW 용착량보다 약 2배 많은 것을 확인할 수 있다. 따라서 Hi-Pro FCAW는 단위시간당 용착량을 많이 용착시킬 수 있는 고효율 용접법이라 할 수 있다.

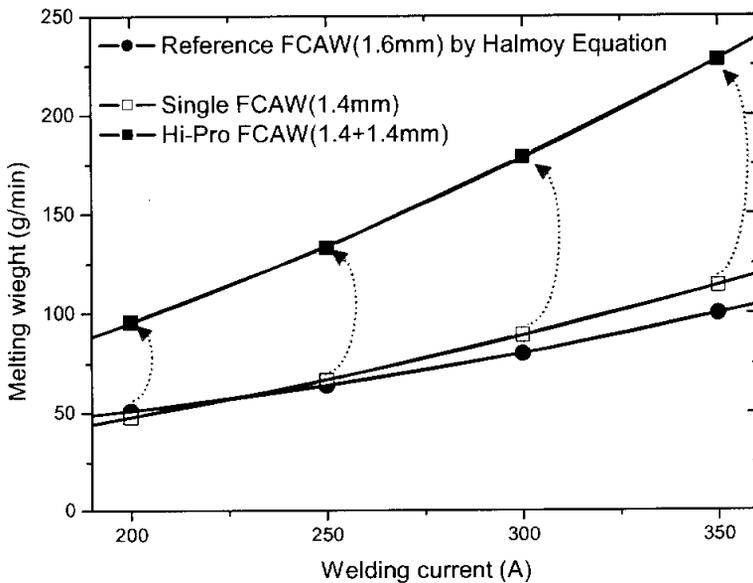


Fig. 2.5 Melting rate in the Hi-Pro FCAW

제 3 장 실험방법

3.1 용접 재료 및 용접 방법

실험에는 100% 사용율을 가진 600A 용량의 사이리스트러 용접기를 사용하였다. 실드 가스는 CO₂ 100% 가스를 사용하였으며 유량은 60~65 mm l/min으로 하였다. 전극와이어는 ϕ 1.4mm의 AWS A5.20 E71T-1에 상당하는 플럭스 코어드 와이어(FCW: Flux cored wire)를 사용하였다. 용접 주행은 고속 비디오카메라 촬영을 위해 레일을 사용하는 이동용 대차에 시편을 고정시켜 각각의 용접 전류에 따라 정속을 유지하였다. 용접토치는 토치 슬라이드를 이용하여 작업각 0°, 진행각 15°, 전극 배열을 용접선의 법선 방향으로 전극간 거리 13mm 상태로 고정시켜 아래보기 자세로 하였다. 150mm x 300mm x 20t 시편에 Bead on Plate 용접으로 토치 높이는 30mm로 약 20초 동안 용접하였다. Table. 3.1은 전류에 따른 용접조건을 나타내었으며 Fig. 3.1은 전체 시스템의 상황을 나타낸다.

Table 3.1. The conditions for variable voltages

Each current	Travel speed	Electrode distance	CO ₂ gas flow rate	Welding voltages
275A	30cm/min	13mm	60 l / min	23, 25, 27, 29, 31, 33, 35V
350A	35cm/min	13mm	65 l / min	23, 25, 27, 29, 31, 33, 35, 37V

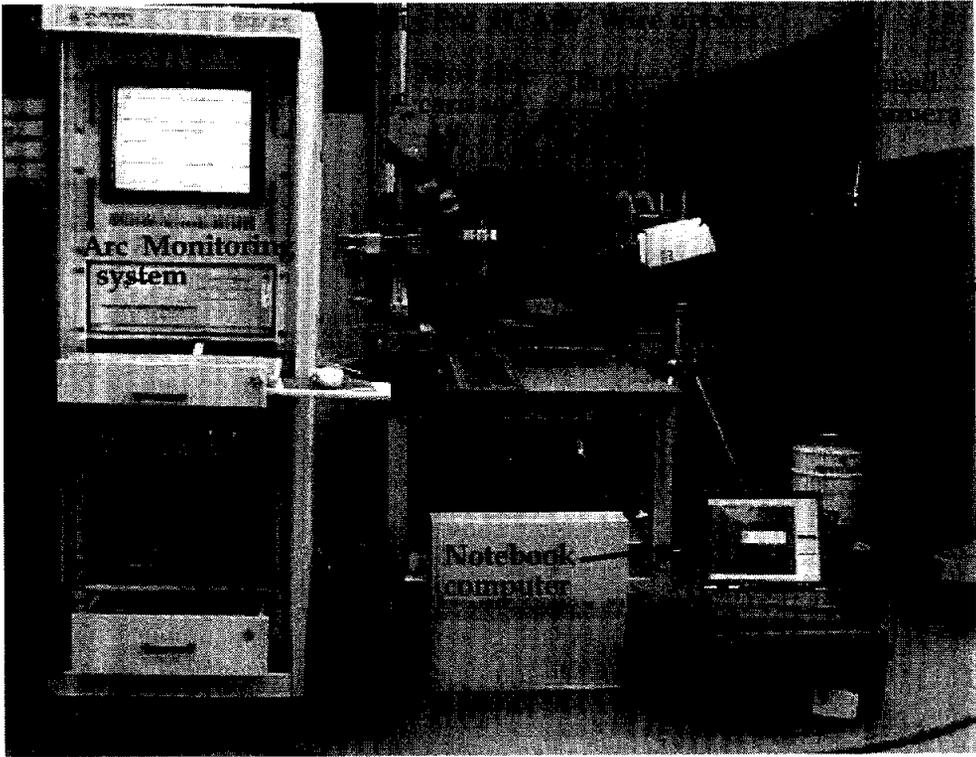


Fig. 3.1 Equipment for experiment

3.2 파형 계측

아크 모니터링 시스템에서는 홀센서(1,000A)에 의하여 전류를 전압으로 변환하고, 전압은 직접 클립형 단자에 의하여 계측하여 감압보드를 거쳐서, 노이즈 필터를 통과시킨다. 사용자가 선택 가능하도록 제작된 저역 통과 노이즈 필터를 통과한 신호를 A/D변환기를 거친 후 컴퓨터에 보내서 저장하는 구조로 되어있다. 전류, 전압 및 저항의 변동을 파형으로 분석하였으며 아크 안정성 평가를 위해 전류의 변동계수와 저항의 변동계수를 계측하여 비교하였다.

3.3 아크영상 및 용융지 관찰

3,000 frames/sec의 샘플링 속도를 갖는 고속 카메라에 ND(neutral density) 필터를 부착하여 아크 광의 영향을 감소시켜 촬영하였다. 사용된 ND 필터는 X4인 것을 사용하였다. 그리고 카메라 렌즈의 조리개를 이용하여 여러 가지 조합의 광 투과율을 만들어 광 투과율에 따른 아크 영상 및 용융지 거동을 관찰하였다.

3.4 비드형상 계측

각 용접 시편을 Fig. 3.2에서와 같이 용접 시작점에서 40, 100 및 160mm 떨어진 곳으로부터 10mm 크기의 비드형상 계측 시편을 3개씩 채취하여 제작하였다. 비드형상 계측을 위하여 100배(10 x 10) 현미경이 장착된 마이크로 비커스 경도기를 사용하였다.

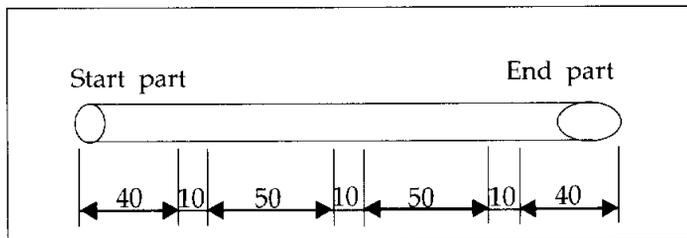


Fig. 3.2 Schematic of test specimen

제 4 장 실험결과 및 고찰

4.1 Hi-Pro FCAW 용접의 안정성 평가

아크 안정성을 평가할 수 있는 아크 안정성 지수의 개발은 여러 방면에서 다양한 연구가 이루어져 왔다. 그 중에서 대표적으로 Mita 등^{10),11)}의 연구가 있다. Mita 등은 용접 전류 파형에서 스파터 발생량에 영향을 미치는 여러 인자를 개발하여 각각의 인자들을 회귀분석 하여 아크 안정성 지수를 개발하였다. 하지만 매우 복잡하여 실제로 적용하기에는 상당히 까다롭고 스파터 발생량에만 의존하여 아크 안정성을 논하였다. 또한 Shinoda 등¹²⁾이 용접시간에 따른 전압과 전류의 변화를 V-I loop로 나타내어 아크 안정성을 판단하였다. 그리고 S.M.Cho¹⁾의 연구에서는 SMAW에서 용접저항의 변동계수(Coefficient of Resistance Variation, C_{RV})를 이용한 매우 간단하면서도 합리적으로 아크 안정성을 평가하였다. 따라서 본 연구에서는 아크 안정성 지수로 전류의 변동계수와 저항의 변동계수로 설정하고 Hi-Pro FCAW에 있어서 적용 가능성을 평가해 보았다. Fig. 4.1에서 저항의 변동계수가 전류의 변동계수보다 더욱 민감하게 반응함으로써 저항의 변동계수가 아크 안정성 지수로서 더욱 타당한 것으로 판단하였다.

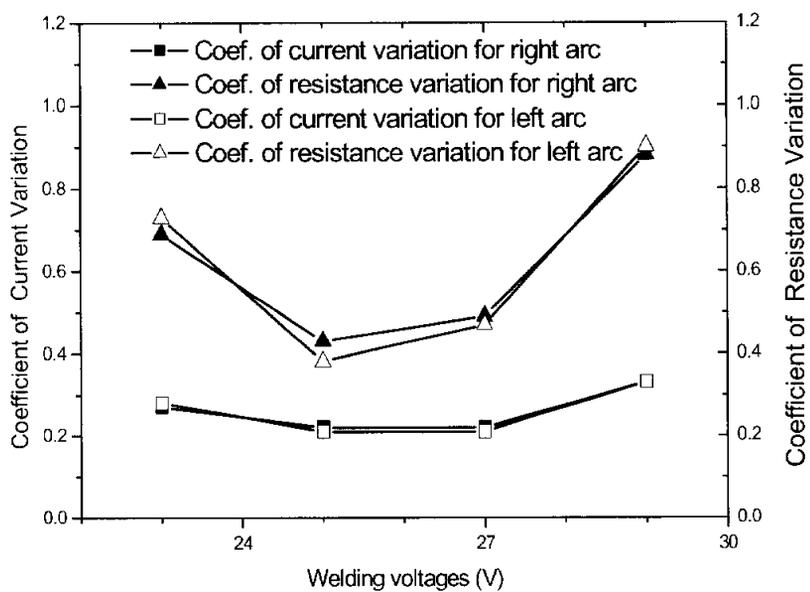


Fig. 4.1 Coef. of Current Variations & Coef. Resistance Variations by each 200A

4.2 Hi-Pro FCAW 용접의 전극간거리 설정

용접조건을 아크 각각 275A 23~35V로 하여 용접할 때 전극간거리가 다른 경우 저항의 변동계수를 측정하였다. Fig. 4.2는 이때 전압 변화에 따른 저항의 변동계수를 나타내었다. 전극간거리가 13mm와 16mm인 경우, 10mm일 때보다 저항의 변동계수가 작은 값들이 많이 있음을 볼 수 있고 13mm와 16mm 경우 저항의 변동계수는 비슷한 것을 확인할 수 있다. 따라서 후판 편면 맞대기 그루브 내의 용접에는 전극간거리가 16mm인 것보다 짧은 13mm가 더욱 타당한 것으로 판단하였다. 전극간거리를 13mm로 하였다.

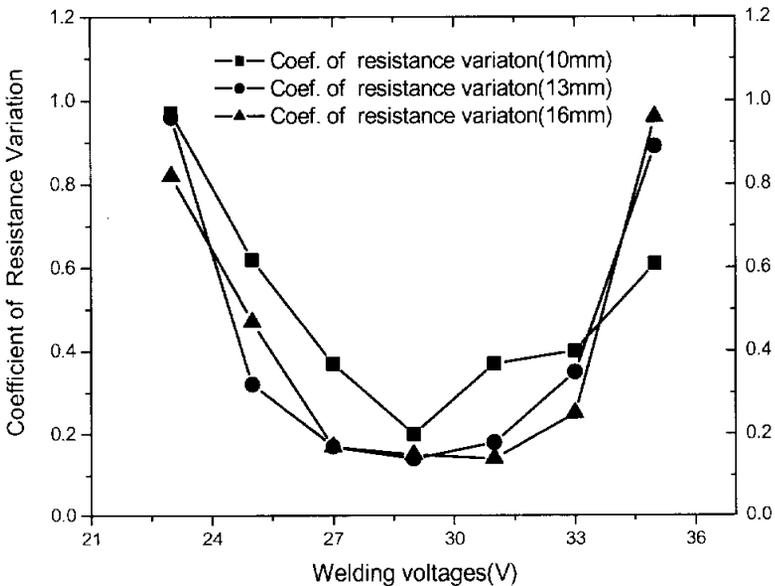


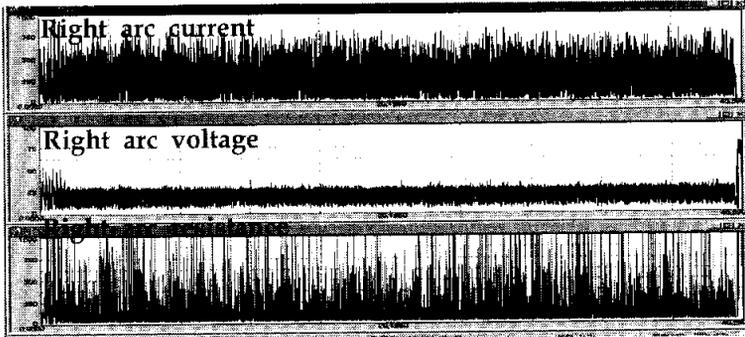
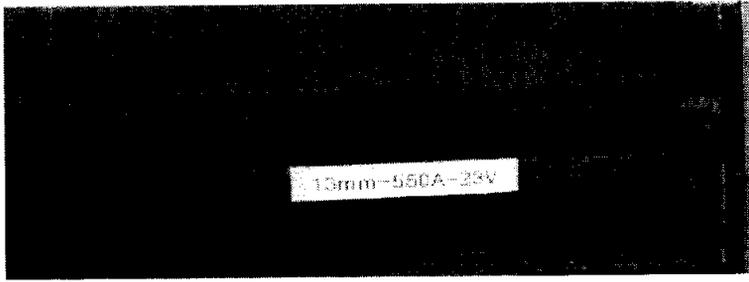
Fig. 4.2 Coefficient of Resistance Variations for variable distance between two electrodes by each 275A

4.3 아크 각각 275A Hi-Pro FCAW

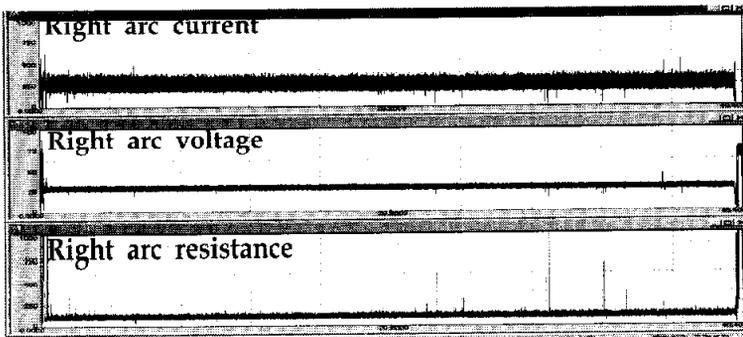
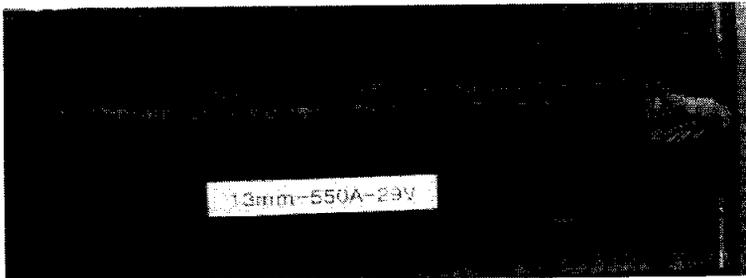
4.3.1 비드 외관과 출력 파형의 관계

Fig. 4.3의 (a), (b), (c)는 용접 속도 30cm/min으로 아크 각각 275A 전압 23, 29, 35V로 용접한 시편의 비드 외관과 전류, 전압 및 저항의 계측 파형을 나타낸 것이다. 비드외관을 보면 (a)는 용접시 발생한 대립의 스패터가 비드 주위에 많이 부착된 것을 볼 수 있고 (b)는 스패터가 비드 주위에 거의 없다. 따라서 아크 각각 275A Hi-Pro FCAW에 있어서 스패터가 가장 작게 된 것으로 판단된다. (c)의 경우는 용접시 발생한 대립의 스패터가 비드 슬랙 위와 비드 주위에 많이 부착된 것을 확인할 수 있다. 계측 파형 결과를 보면 (a)는 낮은 전압 때문에 단락이 많이 발생하여 전류파형은 많이 변동하고 있다. 아크 각각 275A Hi-Pro FCAW에 있어서 (b)가 전류 및 전압파형이 가장 안정되었다. 그리고 (c)는 전압파형은 안정되었는데 전류, 저항의 파형이 많이 변화하고 있는 이유는 와이어 송급 불안정으로 인한 번백 현상으로 판단되며 사이리스터 용접전원 특성이다.

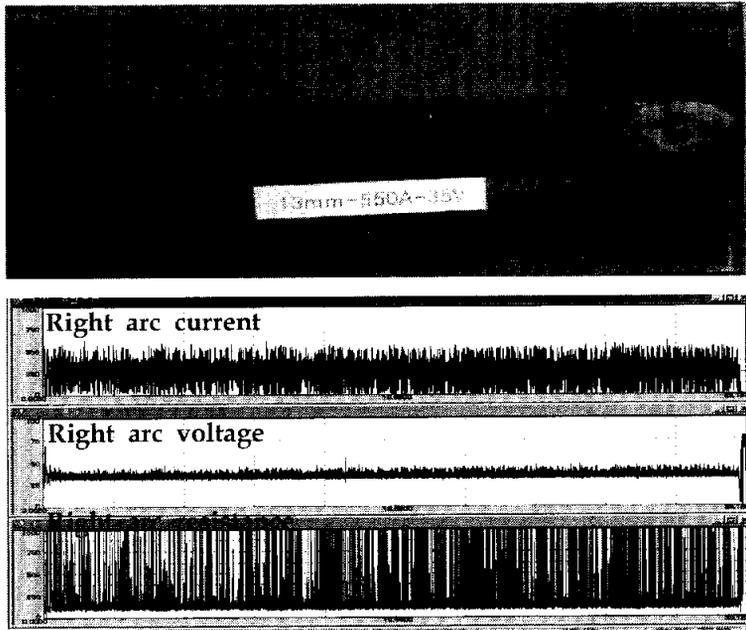
Fig. 4.4는 전압변화에 따른 전류, 저항의 변동계수를 나타낸 그래프이다. 아크 각각 275A 용접에서의 전류, 저항의 변동계수는 29V에서 가장 작았고 27, 29, 31V 조건에서의 전류, 저항의 변동계수는 0.2 이하였으며 이 때 안정된 용접을 수행할 수 있었다. 따라서 아크 각각 275A 29V조건이 가장 강건한 용접조건이라 판단된다. 그리고 이 그래프에서도 저항의 변동계수가 전류의 변동계수보다 더 민감함을 볼 수 있다.



(a) Each 275A, voltage 23V



(b) Each 275A, voltage 29V



(c) Each 275A, voltage 35V

Fig. 4.3 Bead appearance & Waveform for variable voltages

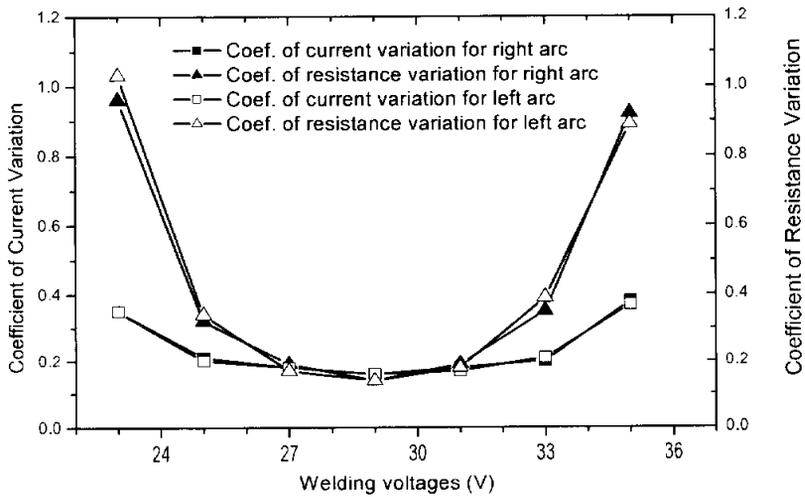


Fig. 4.4 Coef. of Current Variations & Coef. Resistance Variations by each 275A

4.3.2 출력 파형과 용적이행과의 관계

아크 각각 275A에서의 적정전압은 29V였다. 따라서 아크 각각 275A의 적정 전압과 적정전압보다 낮은 전압 및 높은 전압에서의 아크 이행현상과 용융지 거동을 관찰하였으며 전류와 전압 계측파형을 살펴보았다.

Fig. 4.5의 (a)~(i)는 아크 각각 275A 23V에서의 용적이행 주요 양상이다. 각 사진의 왼쪽 아크 현상을 중심으로 설명하면 (a)는 용적이행 후 새로운 용적이 성장하기 시작하는 순간의 사진이다. (b), (c)는 약 1.33msec 뒤 용융지의 많은 유동으로 인하여 (a)의 정상적인 아크가 영향을 받아 불안정해지는 것을 볼 수 있다. (d)는 7msec 뒤 용적의 중간 성장 모양을 나타낸 사진이고 오른쪽 아크에서 플렉스 기둥을 관찰할 수 있다. (e)는 용적이 크게 성장한 사진이다. (f)~(h)는 용적이 크게 성장하여 용융지와 단락되기 전, 그리고 단락 상태와 단락 후 아크가 재 점호된 사진이다. (i)는 용적 이행 후 다시 아크가 안정되어 새로운 용적이 성장하기 시작하는 상태를 나타낸 사진이다. 아크 각각 275A 23V에서의 용적이행 주기는 약 17 ~ 30msec이었다. 심한 용융지 유동에 의해 아크가 소멸됨으로써 용적이행 하는 것이 대부분 이었고 용적 성장과정 중에 심한 용융지의 유동으로 인하여 단락되어 아크가 소멸되는 경우가 빈번하였다.

Fig. 4.6은 아크 각각 275A 23V 조건에서 용융지 거동의 주요 양상이라고 할 수 있다. 여기서 용융풀이 많이 유동하고 있는 것을 볼 수 있으며 아크에 영향을 끼치고 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4.7은 Fig. 4.5에 나타낸 양상에서 나타날 수 있는 아크모니터링 출력 파형이다. (b)점에서 전류가 낮고 저항이 높은 것은 아크가 끊긴 것으로 판단된다. (g)점에서는 전류가 매우 높고 저항이 "0"에 가까운 값을 나타나는 것으로 보아 단락된 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 4.8의 (a)~(f)는 아크 각각 275A 29V에서의 아크이행의 주요 양상이다. 각 사진의 오른쪽 아크 현상을 중심으로 설명하면 (a)는 용적이행 후 새로운 용적이 성장하기 시작하는 상태의 사진이다. (b)는 약 8msec 뒤 용적의 중간 성장 모양을 나타낸 사진이다. 또한 양 아크에서 플렉스 기둥을 관찰할 수 있다. (c)는 용적이 계속 성장하고 있는 사진이고 플렉스 기둥을 관찰할 수 있다. (d)는 용적이행이 있기 직전의 사진인데 용적이 가장 크게 성장한 상태이다. (e)는 와이어 선단에서 용적이 용융지로 이행할 때의 사진이고 (f)는 용적이행 후 아크가 안정되어 다시 새로운 용적이 성장하기 시작하는 사진이다. 아크 각각 275A 29V에서의 용적이행주기는 약 14 ~ 30msec로 일정하였다.

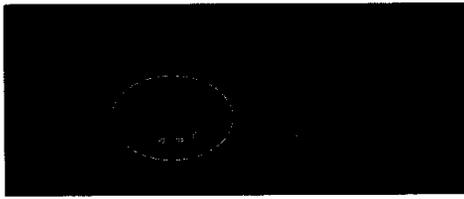
Fig. 4.9는 아크 각각 275A 29V에서의 용융지 거동 주요 양상이라고 할 수 있고 용융지의 유동은 심하지는 않았다.

Fig. 4.10은 Fig. 4.8에 나타낸 양상에서 나타날 수 있는 아크모니터링 출력 파형이다. 전류파형을 보면 약 0.03msec 동안 5개의 파형이 생성되었다. 이것은 3상 60Hz 전원을 사용하는 사이리스터 용접전원 특성이다.

Fig. 4.11의 (a)~(i)는 아크 각각 275A 35V에서의 아크이행 주요 양상이다. 각 사진의 오른쪽 아크 현상을 중심으로 설명하면 (a)은 앞의 용적이 이행된 뒤 새로운 용적이 성장하기 시작하는 상태이고 (b)는 2.33msec 뒤 용적이 계속 성장하지 못하고 용융지로 흩뿌려지는 모양을 볼 수 있다. (c)는 용적이 구형으로 성장하여 용융지로 이행하는 것을 관찰할 수 있다. (d)~(f)는 원활하지 못한 와이어 공급으로 인하여 번백 현상이 일어나 아크가 소멸되기 전과 소멸된 후 그리고 재 점호 순간의 사진이다. (g)는 재 점호 된 후 용적이 최대로 성장한 상태의 사진이다. (h)는 용적이 용융지로 이행하는 사진이다. (i)는 새로운 용적이 성장하기 시작하는 상태이다. 아크 각각 275A 35V에서의 용적이행주기는 매우 불균일하게 이행되어 알 수가 없었다.

Fig. 4.12는 아크 각각 275A 35V에서 용융지 거동의 주요 양상인데 양 아크 사이에서의 용융지의 유동은 거의 없었지만 아크의 가장자리 쪽에서 많이 유동하는 것이 관찰되었다.

Fig. 4.13은 Fig. 4.11에 나타낸 양상에서 나타날 수 있는 아크모니터링 출력 파형이다. (e)점에서 전류파형이 "0" 이고 저항파형이 최대인 것으로 보아 아크가 장시간 동안 완전히 꺼진 것으로 판단된다.



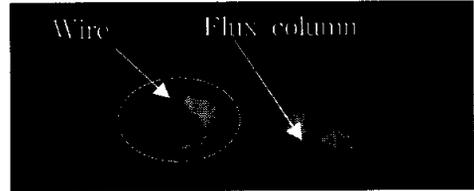
(a) 0 msec



(b) 1.33msec



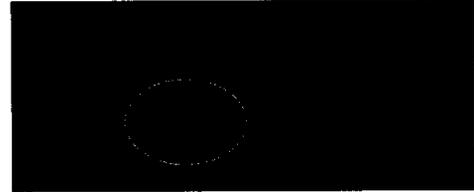
(c) 2msec



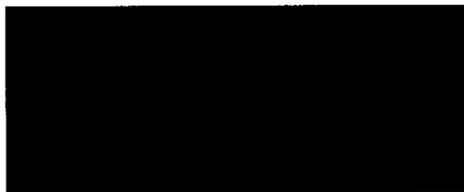
(d) 7msec



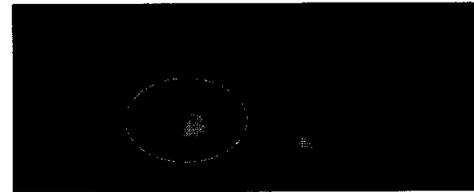
(e) 13msec



(f) 15msec



(g) 15.33msec



(h) 15.66msec



(i) 17msec

Fig. 4.5 Photographs of molten metal transfer by each 275A, 23V

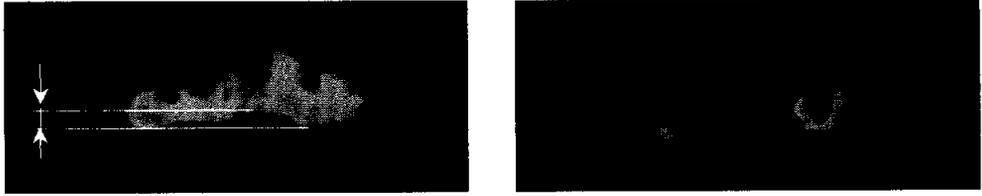


Fig. 4.6 Photographs of molten pool by each 275A, 23V

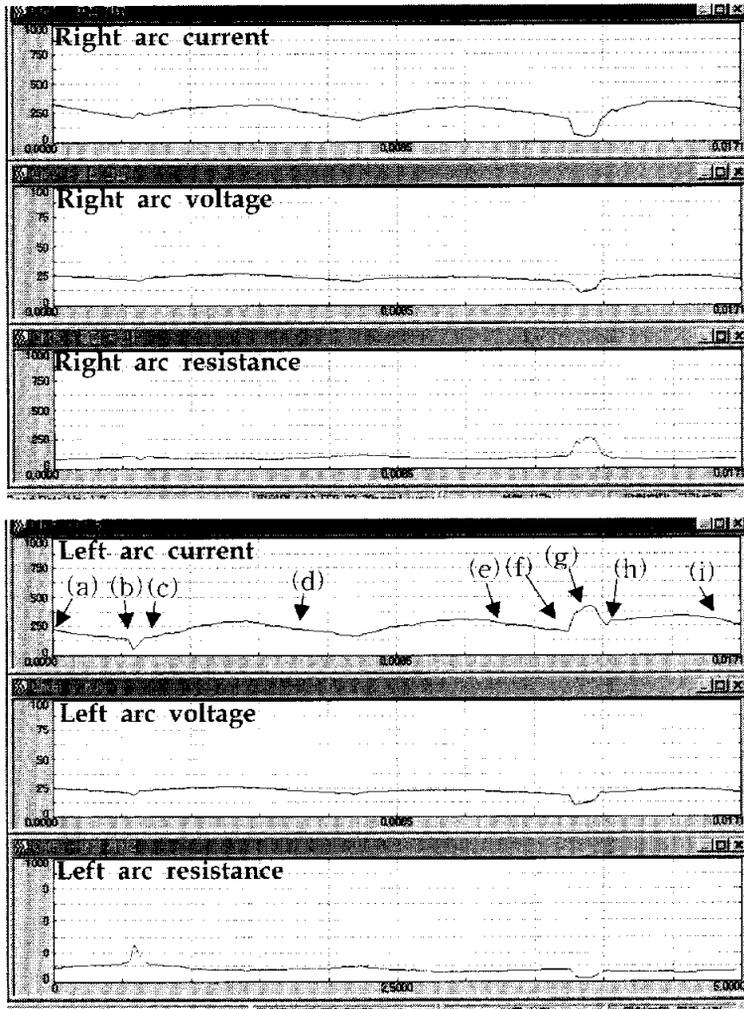


Fig. 4.7 Output currents and voltages
(Each 275A, voltage 23V, speed 30cm/min)

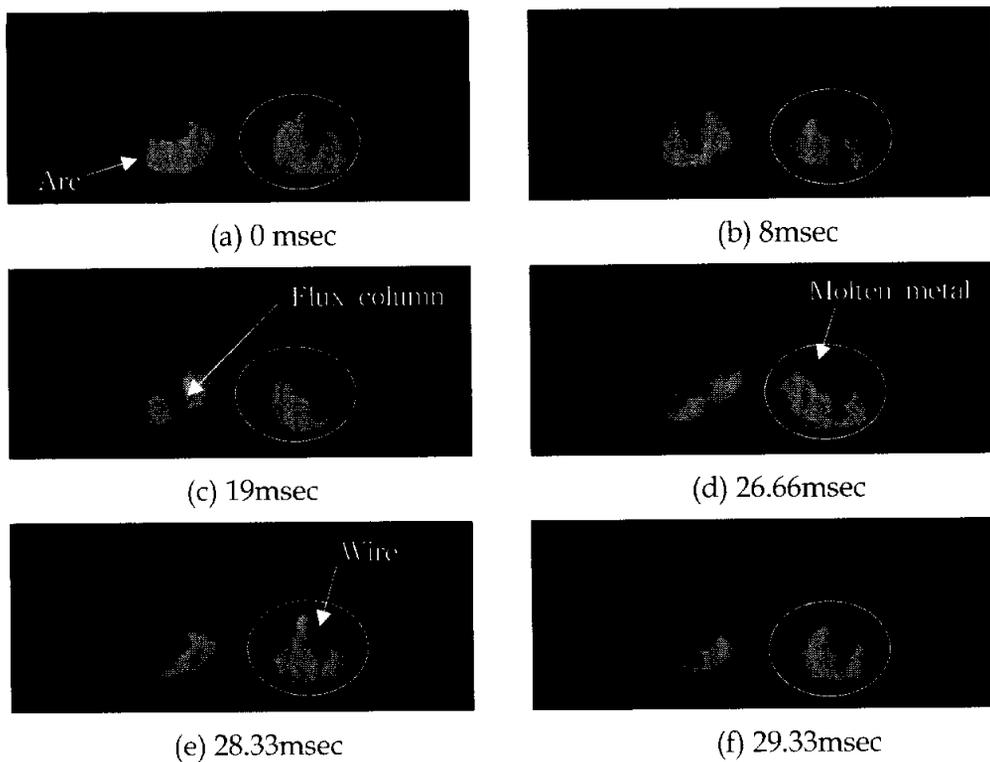


Fig. 4.8 Photographs of molten metal transfer by each 275A, 29V

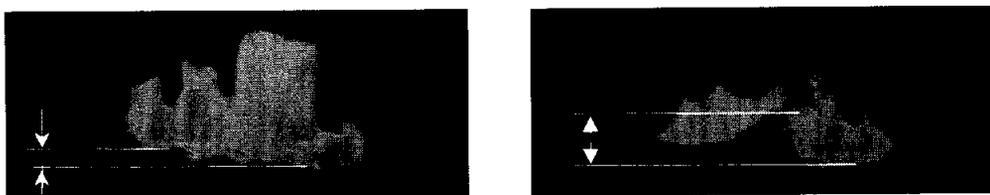


Fig. 4.9 Photographs of molten pool by each 275A, 29V

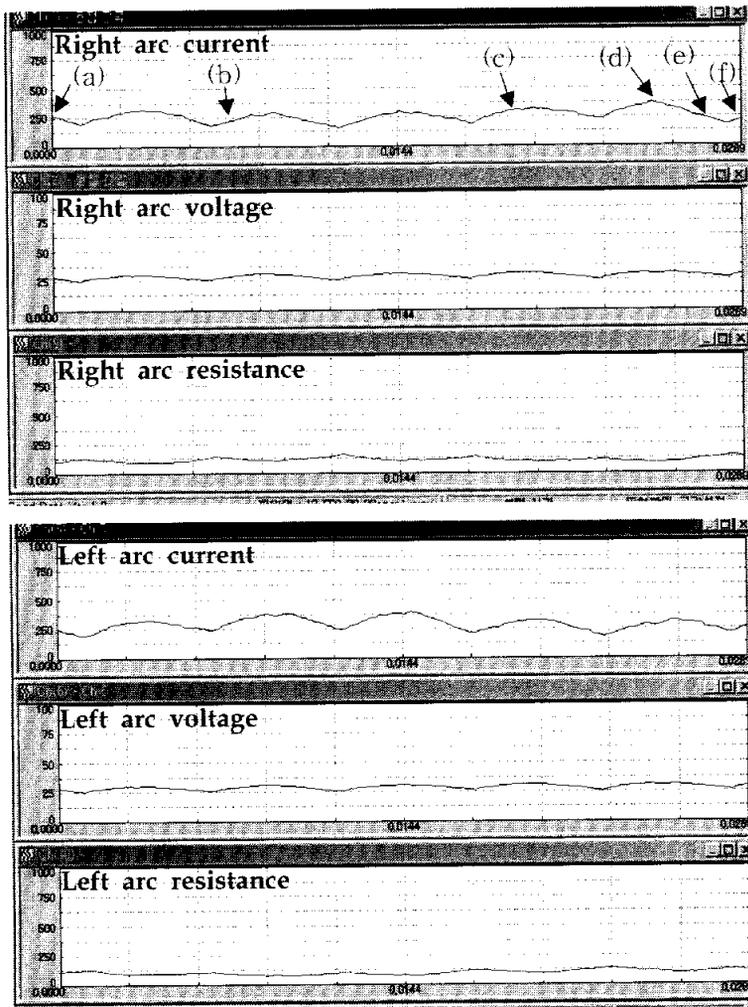


Fig. 4.10 Output currents and voltages
 (Each 275A, voltage 29V, speed 30cm/min)

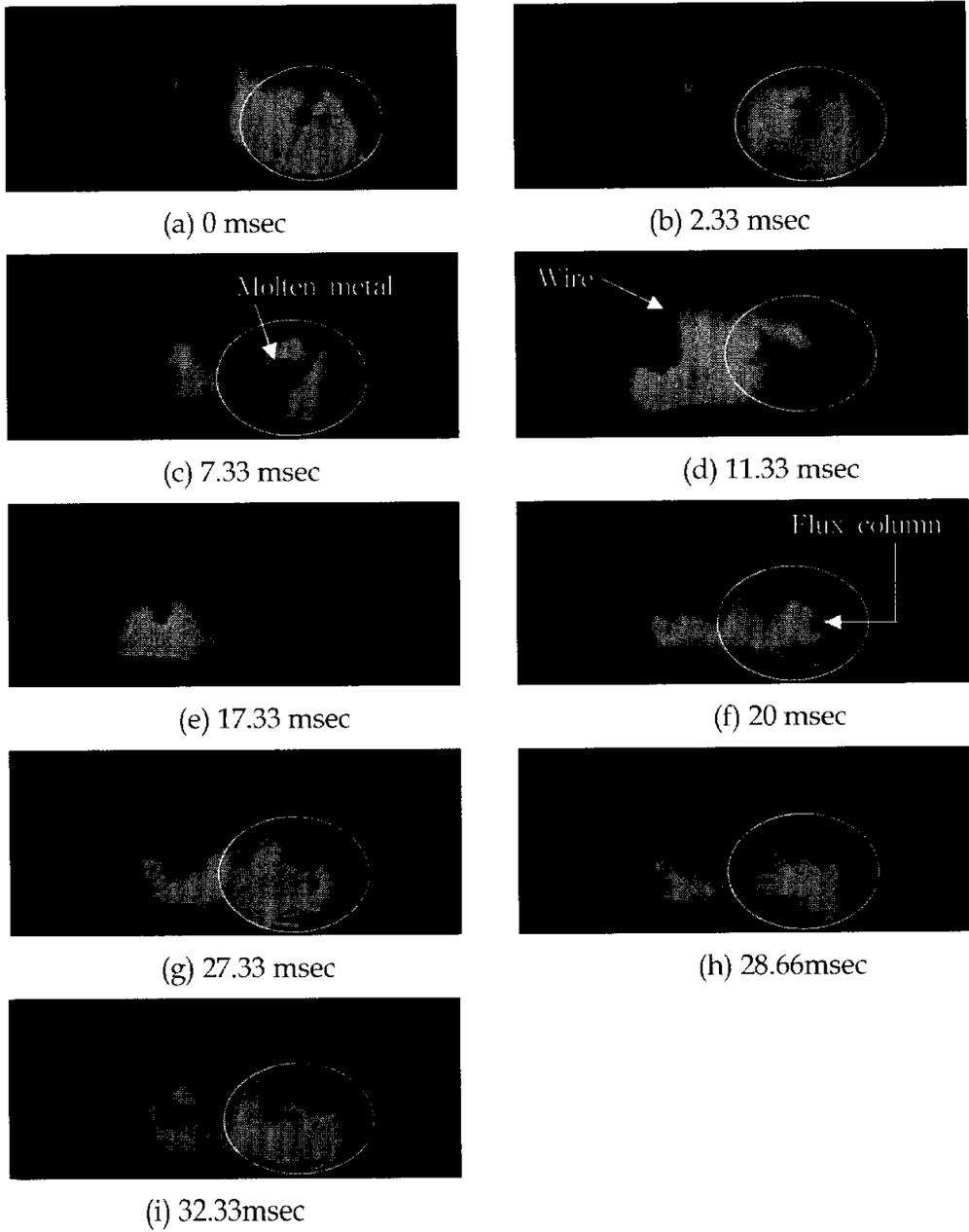


Fig. 4.11 Photographs of molten metal transfer by each 275A, 35V

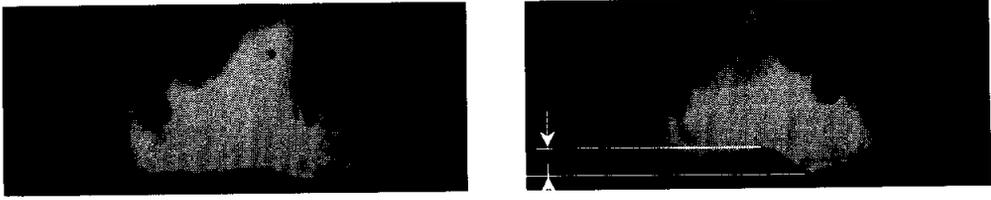


Fig. 4.12 Photographs of molten pool by each 275A, 35V

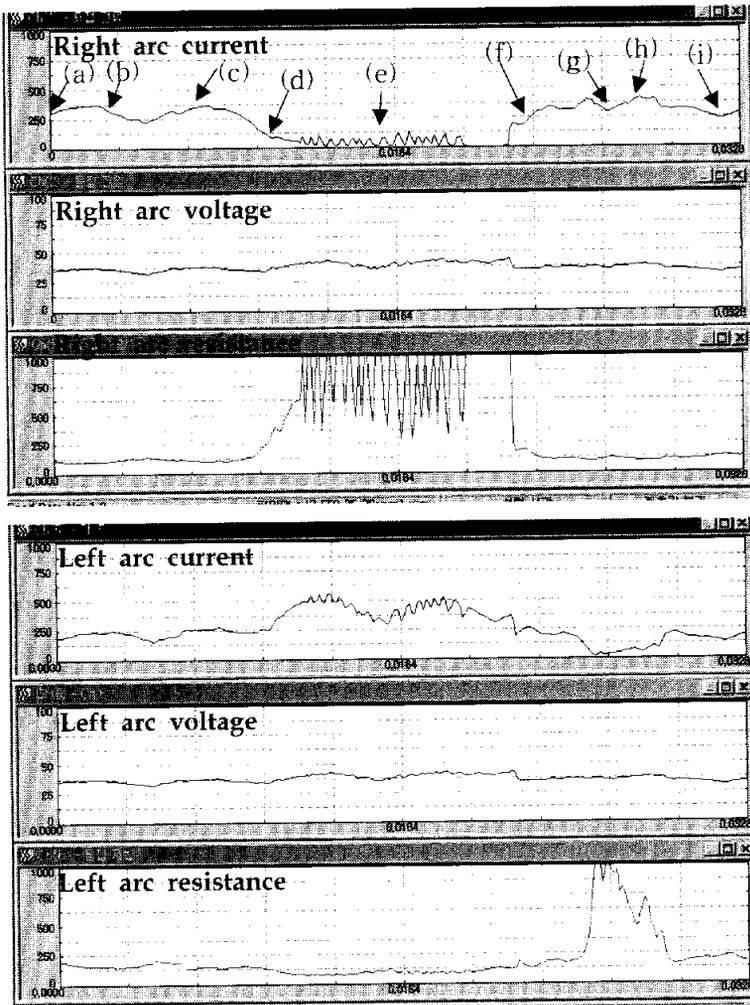


Fig. 4.13 Output currents and voltages
(Each 275A, voltage 35V, speed 30cm/min)

4.3.3 비드형상

Fig. 4.14는 아크 각각 275A에서의 전압 변화에 따른(23~35V) 비드높이(Height), 비드폭(Width), 용입깊이(Penetration depth)를 나타내었다. 전압이 증가할수록 비드폭(width)은 넓어지고, 용입깊이는 깊어졌지만 비드높이는 약간 낮아졌다. 전압이 증가할수록 용입깊이가 깊어지는 이유는 전체 평균전류는 같지만 번백에 의해 자주 아크가 소멸되어 순간전류가 "0"에 가까워지는 횟수가 많다. 그리고 평균전류가 아크 각각 275A가 되어야 함으로 최대전류가 높아야 한다. 따라서 높은 전류에서의 순간 아크력이 강해서 용입깊이가 깊어지는 것으로 판단된다. Fig. 4.15는 마크로 단면사진을 나타내었는데 23, 25V에서의 용입형상은 "W"형을 나타내었다.

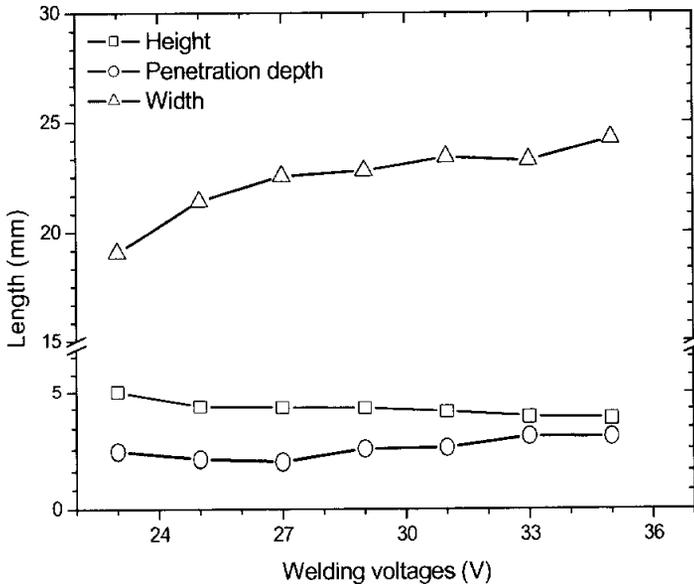
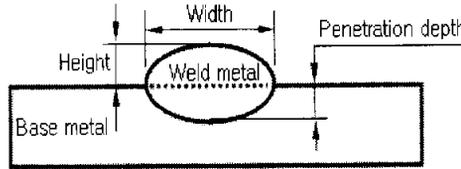


Fig. 4.14 Penetration depths, heights, widths by each 275A

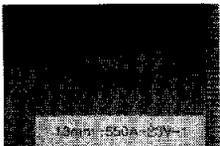
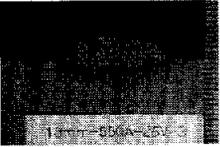
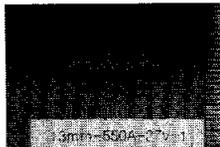
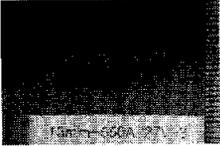
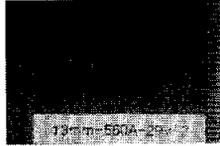
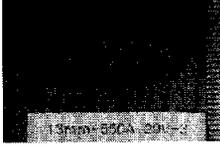
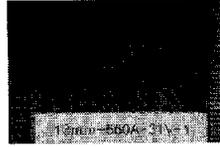
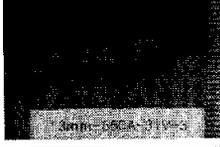
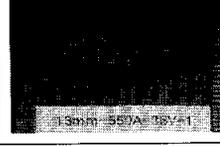
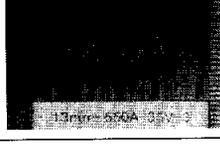
Voltages	1	2	3
23V	 13mm-550A-23V-1	 13mm-550A-23V-2	 13mm-550A-23V-3
25V	 13mm-550A-25V-1	 13mm-550A-25V-2	 13mm-550A-25V-3
27V	 13mm-550A-27V-1	 13mm-550A-27V-2	 13mm-550A-27V-3
29V	 13mm-550A-29V-1	 13mm-550A-29V-2	 13mm-550A-29V-3
31V	 13mm-550A-31V-1	 13mm-550A-31V-2	 13mm-550A-31V-3
33V	 13mm-550A-33V-1	 13mm-550A-33V-2	 13mm-550A-33V-3
35V	 13mm-550A-35V-1	 13mm-550A-35V-2	 13mm-550A-35V-3

Fig. 4.15 Photographs of macro sections by each 275A

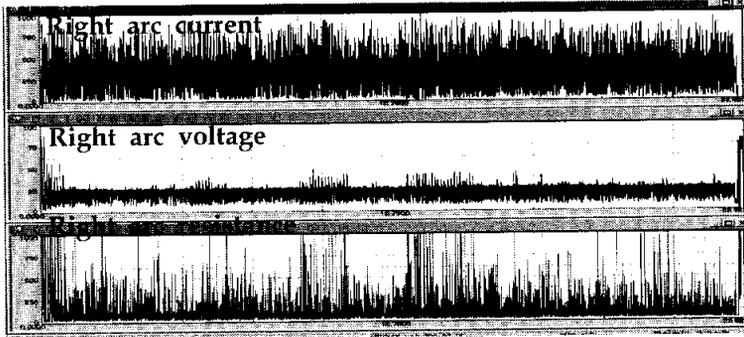
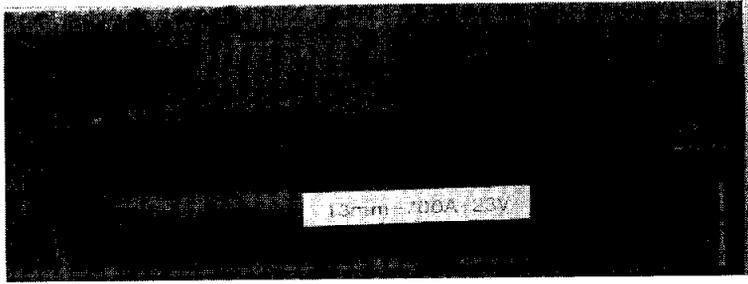
4.4 아크 각각 350A Hi-Pro FCAW

4.4.1 비드외관과 출력파형의 관계

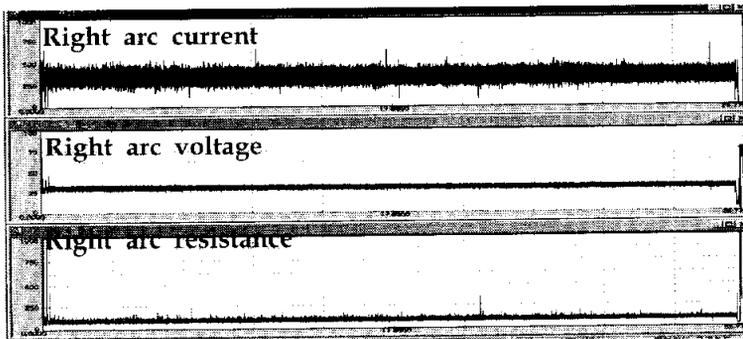
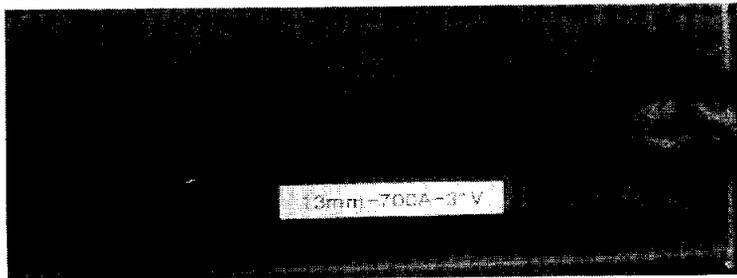
Fig. 4.16의 (a), (b), (c)는 용접 속도 35cm/min으로 아크 각각 350A, 전압을 23, 31, 37V로 용접한 시편의 비드외관과 전류, 전압 그리고 저항의 계측파형을 나타내었다. Fig. 4.16의 (a), (b), (c)에서 비드외관을 보면 (a)는 대립의 스패터가 비드 주위에 많이 부착된 것을 볼 수 있다. (b)는 비드 주위에 스패터가 거의 없는 것을 볼 수 있다. 따라서 아크 각각 350A Hi-Pro FCAW에 있어서 스패터가 가장 작게 된 것으로 판단된다. (c)는 대립의 스패터가 슬랙 위와 비드 주위에 튄 흔적이나 슬랙 위에 많이 부착된 것을 볼 수 있다.

계측 파형 결과를 보면 (a)는 낮은 전압에 의해 아크길이가 짧게 되어 단락이 많이 발생하였다. 전류, 전압 및 저항파형은 많이 변동하였다. 아크 각각 350A Hi-Pro FCAW에 있어서 (b)가 전류 및 전압 파형이 가장 안정되었다. 그리고 스패터도 가장 작게 튄 것으로 판단된다. (c)는 전압파형은 안정되었으나 와이어 송급 불안정으로 인해서 번백 현상이 발생하여 아크가 소멸되고 전류 및 저항파형은 많이 변동하였다.

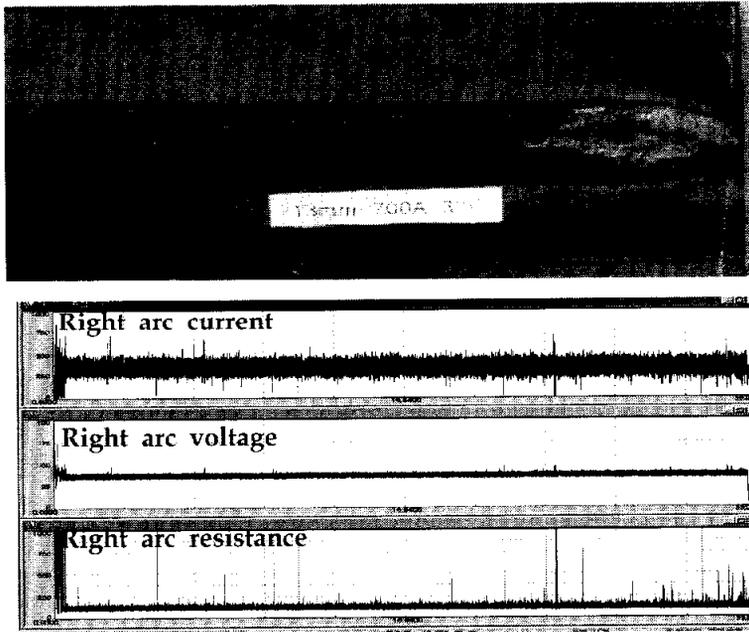
Fig. 4.17은 전압변화에 따른 저항의 변동계수를 나타낸 그래프이다. 저항의 변동계수가 31V에서 가장 낮았다. 또한 27~33V조건에서 저항의 변동계수가 0.2이하로 안정된 용접을 수행할 수 있었다. 따라서 아크 각각 350A 30V조건이 가장 강건한 용접조건이라 판단된다.



(a) Each 350A, voltage 23V



(b) Each 350A, voltage 31V



(c) Each 350A, voltage 37V

Fig. 4.16 Bead appearance & Waveform for variable voltages

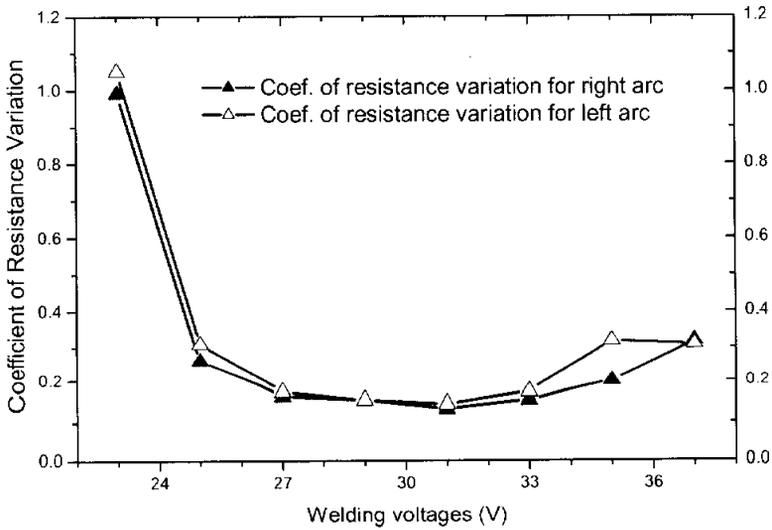


Fig. 4.17 Coefficient of Resistance Variations by each 350A

4.4.2 출력 파형과 용적이행과의 관계

아크 각각 350A에서의 적정전압은 31V였다. 따라서 아크 각각 350A의 적정 전압과 적정전압보다 낮은 전압 및 높은 전압에서의 아크 이행현상과 용융지 거동을 관찰하였으며 전류와 전압 계측파형을 살펴보았다.

Fig. 4.18의 (a)~(f)는 아크 각각 350A, 23V에서의 아크이행 주요 양상이다. 각 사진의 오른쪽에 위치한 아크 현상을 중심으로 설명하면 (a)는 용적이행 후 새로운 용적이 성장하는 상태를 나타낸 것이다. (b)는 용적이 성장하는 사진을 나타내었는데 심한 용융지 유동으로 인하여 아크가 불안하였다. (c)는 와이어 선단에서 용적이 성장하여 심한 용융지의 유동에 의해 아크가 꺼지기 직전의 사진이다. (d)는 약 1msec 동안 아크가 소멸된 상태를 나타내고 있다. (e)는 아크가 소멸되어 재점호 된 상태를 나타내었는데 용적은 와이어 선단으로부터 이탈된 상태이다. 그리고 (f)는 아크가 다시 정상아크가 되었을 때의 사진이다. 아크 각각 350A 23V에서의 용적이행주기는 약 5 ~ 35msec이었다. 용융지는 심하게 유동하였다. 그리고 용적 성장과정 중에 심한 용융지의 유동으로 인하여 단락되고 아크가 소멸되는 경우가 빈번하였다.

Fig. 4.19는 아크 각각 350A 23V 조건에서 용융지 거동의 주요 양상이라고 할 수 있다. 여기서 용융풀이 많이 유동하고 있는 것을 볼 수 있으며 아크에 영향을 끼치고 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4.20은 Fig. 4.18에 나타낸 양상에서 나타날 수 있는 아크모니터링 출력 파형이다. (b)점에서 전류가 낮고 저항이 높은 것은 아크가 끊긴 것으로 판단된다. (g)점에서는 전류가 매우 높고 저항이 "0"에 가까운 값을 나타나는 것으로 보아 단락된 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 4.21의 (a)~(d)는 아크 각각 350A 31V에서의 아크이행 주요 양상을 나타내었다. 각 사진의 왼쪽에 위치한 아크 현상을 중심으로 설명하면 (a)는 새로운 용적이 다시 성장하기 시작하는 상태의 사진이다. (b)는 약 9.33msec 뒤 용적이 가장 크게 성장한 상태를 나타낸 사진이며, 용적과 플럭스 기동을 관찰할 수 있다. (c)는 용적이 와이어 선단으로부터 이탈될 때의 사진이다. (d)는 와이어 선단에서 용적이 용융지로 이행한 후 안정된 아크의 사진이다. 아크 각각 350A 31V에서의 용적이행주기는 약 6 ~ 10msec로 일정하게 안정된 용적이행을 하였다.

Fig. 4.22는 아크 각각 350A 31V 영역에서의 용융지 거동의 주요 양상이라고 할 수 있다. 양 아크 사이의 용융지의 유동은 약간 있었지만 아크에 영향을 끼

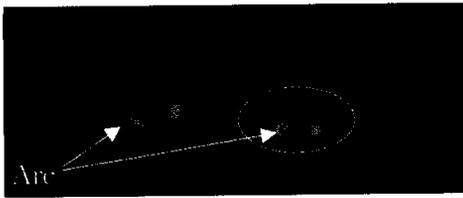
치지 않았다.

Fig. 4.23은 Fig. 4.21에 나타낸 양상에서 나타날 수 있는 아크모니터링 출력 파형이다. 전류파형을 보면 약 0.01msec 동안 약 2개의 파형이 생성되었다. 이것은 3상 60Hz 전원을 사용하는 사이리스터 용접전원 특성이다.

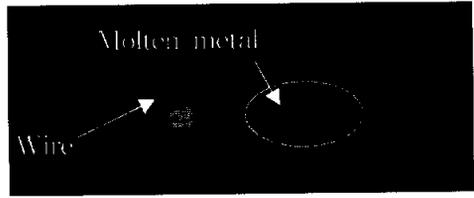
Fig. 4.24의 (a)~(e)는 아크 각각 350A 37V에서의 아크이행 주요 양상을 나타내었다. 각 사진의 오른쪽에 위치한 아크 현상을 중심으로 설명하면 (a)는 용적이 와이어 선단으로부터 떨어져나간 뒤 아크가 안정된 상태를 나타내었다. (b)는 8.33msec 뒤 용적의 중간 성장모습의 사진이며 플럭스 기둥을 관찰할 수 있다. (c)는 용적이 와이어 선단에서 구형으로 성장하여 최대로 성장한 것을 볼 수 있다. (d)는 와이어 선단에 맺힌 용적이 용융지로 이행하기 직전의 사진이다. (e)는 다시 아크가 안정된 상태이다. 아크 각각 350A 37V에서의 용적이행 주기는 8 ~ 26msec로 용적이행은 불균일하며 불안정하였다.

Fig. 4.25는 아크 각각 350A 37V에서의 용융지 거동의 주요 양상이라고 할 수 있다. 용융지는 심하게 유동하였다.

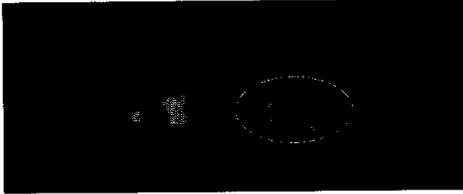
Fig. 4.26은 Fig. 4.24에 나타낸 양상에서 나타날 수 있는 아크모니터링 출력 파형이다. 전압파형은 일정하였으나 전류파형은 많이 변동하였다. 이것은 와이어 송급 불안정으로 인한 번백이 발생하고 있음을 나타낸다. 또한 아크 각각 350A 37V에서의 용적이행 주요 양상이라고 할 수 있다.



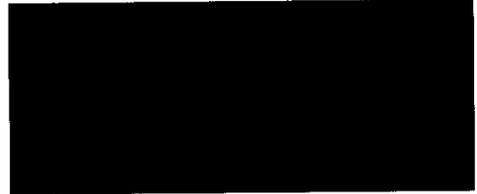
(a) 0msec



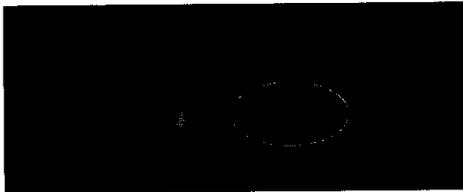
(b) 7.66msec



(c) 10.66msec



(d) 11msec



(e) 12msec



(f) 16.66msec

Fig. 4.18 Photographs of molten metal transfer by each 350A, 23V

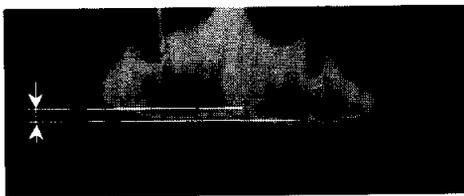


Fig. 4.19 Photographs of molten pool by each 350A, 23V

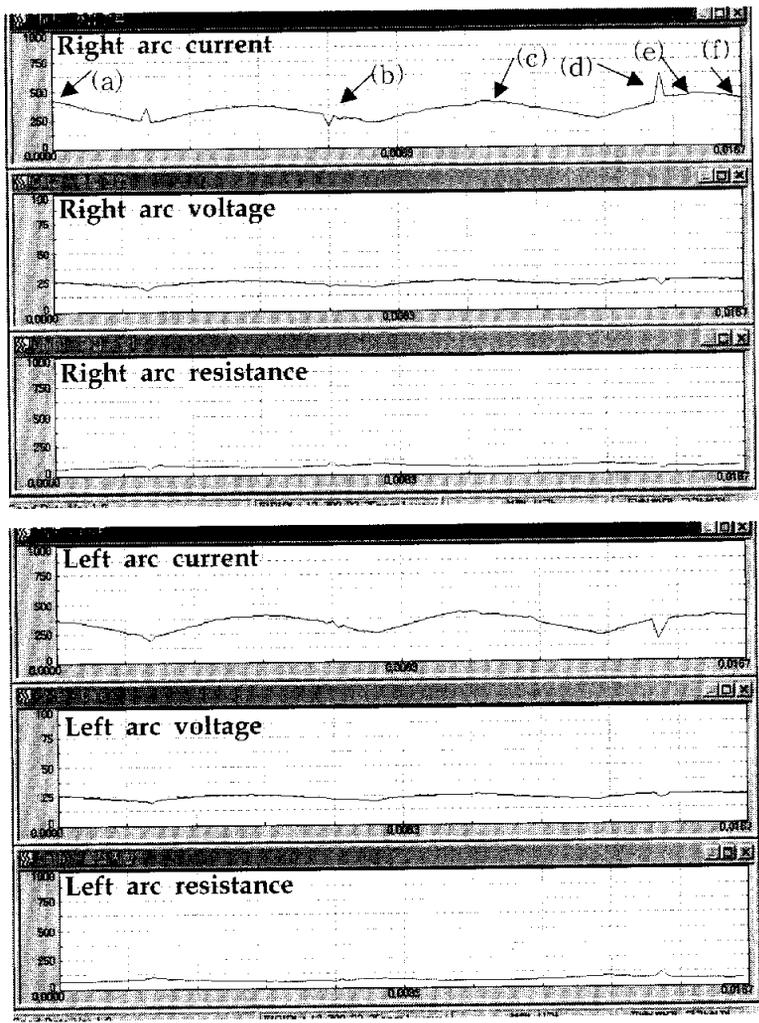
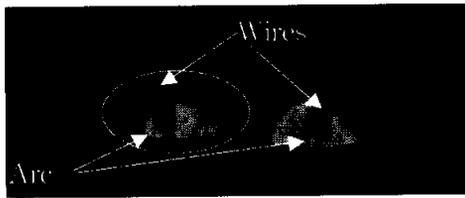
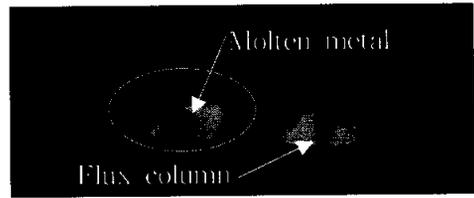


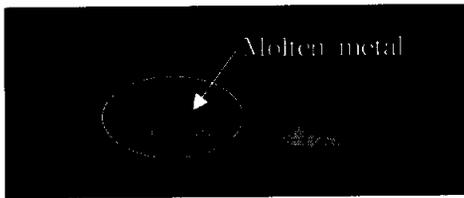
Fig. 4.20 Output currents and voltages
 (Each 350A, voltage 23V, speed 35cm/min)



(a) 0msec



(b) 9.33msec



(c) 10msec



(d) 10.33msec

Fig. 4.21 Photographs of molten metal transfer by each 350A, 31V

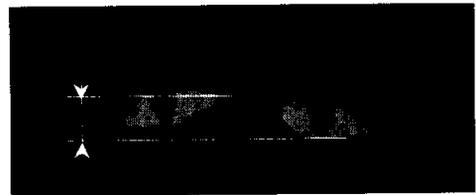


Fig. 4.22 Photographs of molten pool by each 350A, 31V

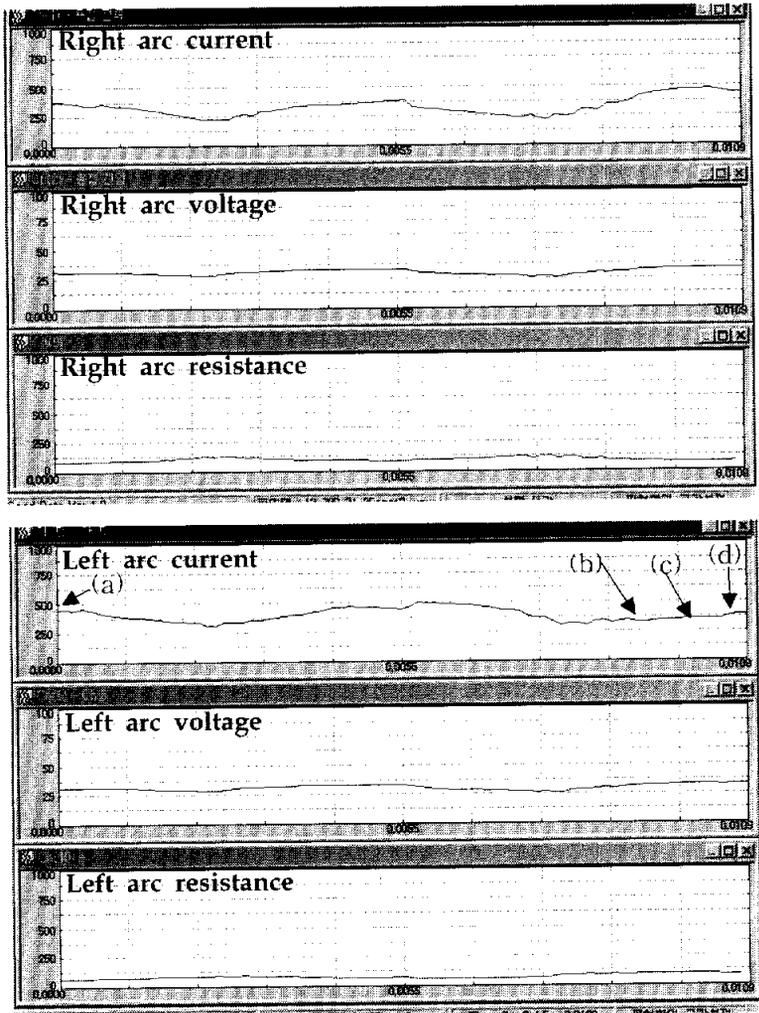


Fig. 4.23 Output currents and voltages
 (Each 350A, voltage 31V, speed 35cm/min)

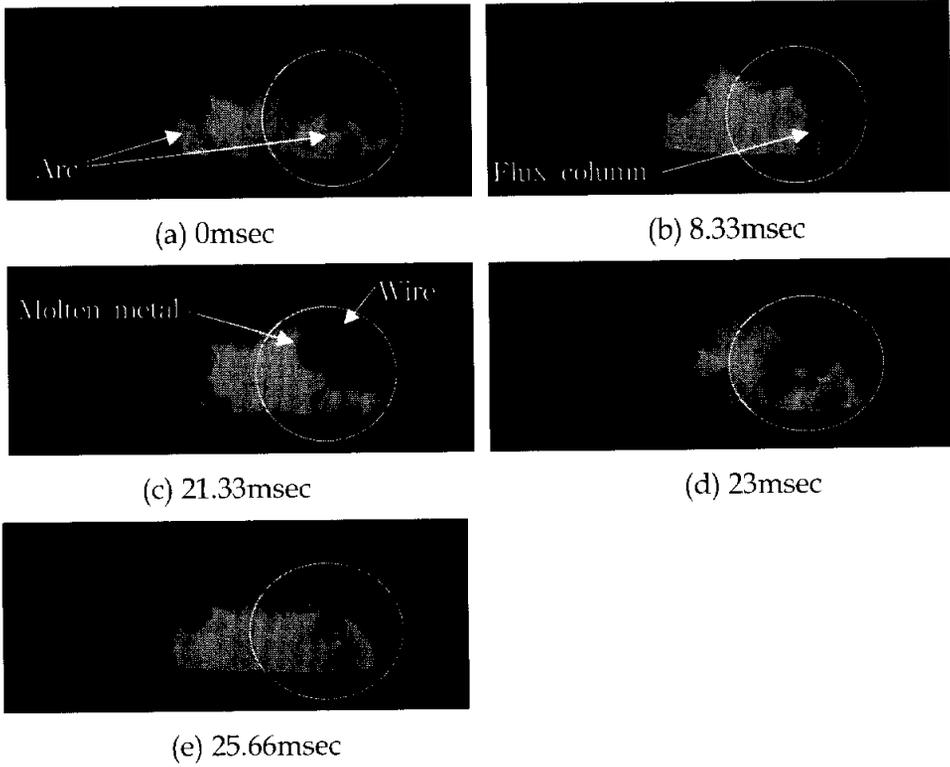


Fig. 4.24 Photographs of molten metal transfer by each 350A, 37V

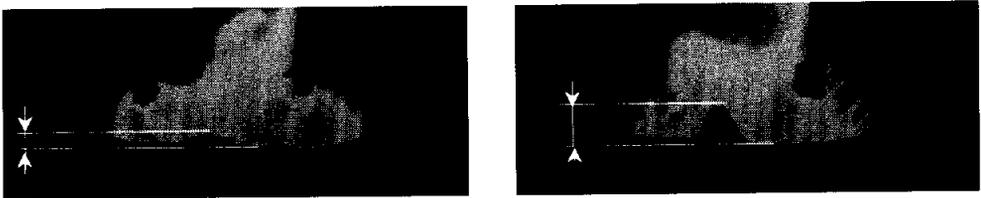


Fig. 4.25 Photographs of molten pool by each 350A, 37V

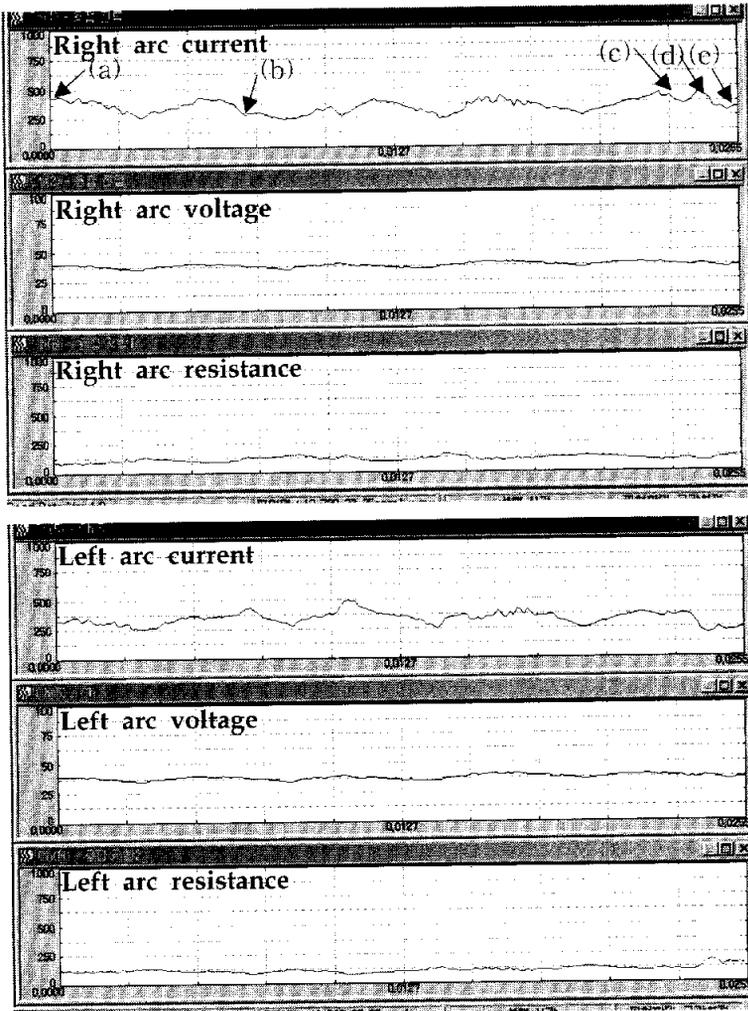


Fig. 4.26 Output currents and voltages
 (Each 350A, voltage 37V, speed 35cm/min)

4.4.3 비드형상

Fig. 4.27은 아크 각각 350A에서의 용접전압 변화에 따른(23 ~ 37V) 비드높이(Height), 비드폭(Width), 용입깊이(Penetration depth)를 나타내었다. 전압이 증가할수록 비드폭(width)은 넓어지고, 용입깊이는 거의 변화가 없었으며 비드높이는 약간 낮아졌다. Fig. 4.28은 마크로 단면사진을 나타내었다. 23V조건의 단면에서는 용합선 근처에 잔존하는 용융되지 못한 플럭스를 볼 수 있는데 이것은 높은 전류에 의해 아크력이 강하게 되고 용입깊이는 깊게 된다. 그런데 전압이 낮아 짧아진 아크는 용융지의 많은 유동으로 인하여 아크가 소멸되어 깊게 들어간 와이어가 함몰된 것으로 판단된다. 23 ~ 33V에서의 용입형상은 "W"형을 나타내었고 35, 37V에서는 비드 중앙부는 "삿갓모자" 형을 나타내었다. 따라서 용입형상을 고려하여 전압조건을 설정해야 될 것으로 판단된다.

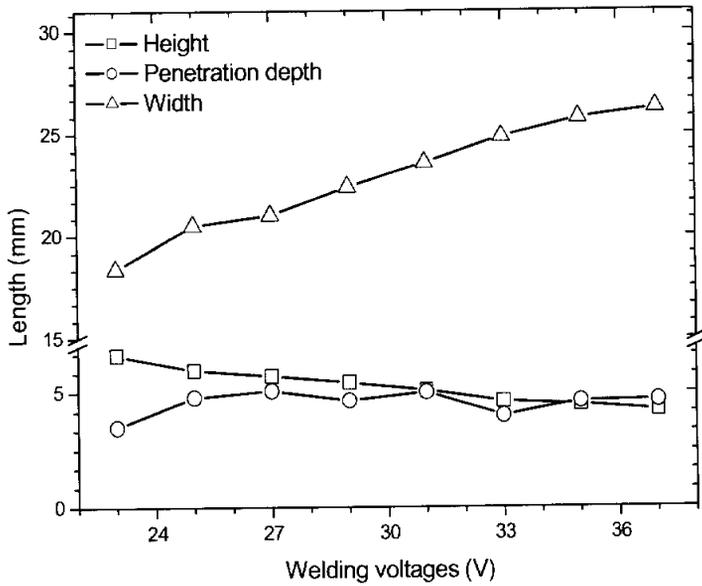
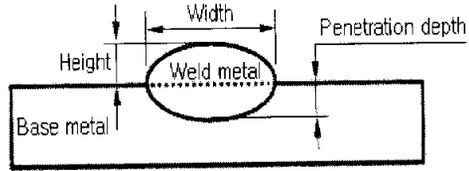


Fig. 4.27 Penetration depths, heights, widths by each 350A

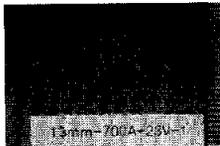
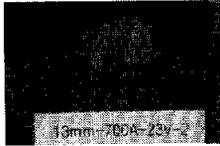
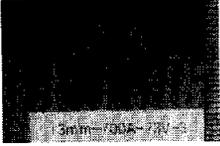
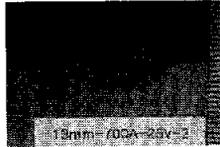
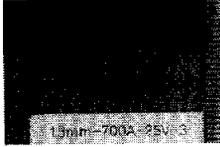
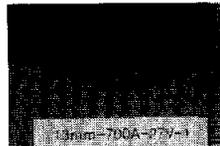
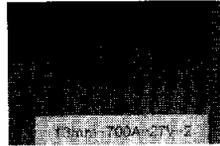
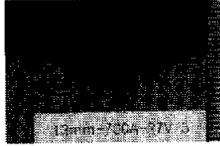
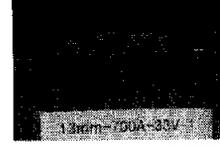
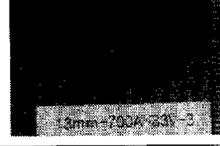
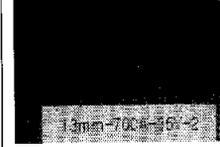
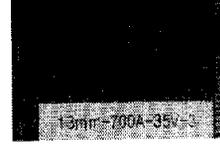
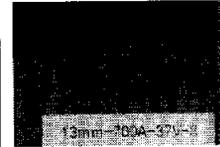
Voltages	1	2	3
23V			
25V			
27V			
29V			
31V			
33V			
35V			
37V			

Fig. 4.28 Photographs of macro section by each 350A

4.5 Hi-Pro FCAW 현장 적용

4.5.1 실험방법

현장적용을 위한 용접법승인시험(WPQT: Welding Procedure Qualification Test)의 시험편은 500mm x 1,000mm x 40t(EH36), 개섩각 35°, 루트 간격 8mm로 취부하였다. 그리고 간이 캐리지를 이용해서 아래보기 자세로 용접하였다. 용접 후 시험편은 48시간 뒤 비파괴검사를 하였다. 또한 기계적 성능 시험을 실시하였는데 기계 시험의 내용은 인장 응력시험과 굽힘시험 및 용접부와 열영향부의 인성 저하 여부를 확인하기 위한 충격 시험 그리고 경도 시험이었다. 인장 응력시험은 단면 축소형(Reduced section tension test) 시험편을 만들어 실시하였다. 굽힘 시험은 측면 굽힘 시험을 하였다. 경도 시험은 비커스 경도계로서 용접금속 중앙부와 좌우 융합선(bond line) 및 열 영향부를 측정하였다. 충격 시험편은 용접금속 중앙부와 융합선상, 그리고 융합선에서 2mm 떨어진 열 영향부 내에서 채취하였으며 충격시험은 영하(-20℃)에서 실시하였다.

4.5.2 실험결과 및 고찰

40t(EH36), 개섩각 35°, 루트 간격 8mm로 취부된 시험편을 14패스에 용접 완료하였다. Table. 4.1과 Table. 4.2는 용접법승인시험 용접조건과 기계적 시험 결과를 나타내었다. 인장강도는 550~750N/mm² 범위에 있어 매우 양호하며, 충격시험 결과도 모두 요구치 34J을 충분히 상회하는 안정된 값을 나타내었다. 경도 값은 170~220의 분포를 보였으며 최고경도값이 250 미만으로서 용접 균열의 위험도가 비교적 낮은 편임을 알 수 있었다. Fig. 4.29는 마크로 단면시험의 사진이다. 검사결과 융합불량 등과 같은 결함이 발생하지 않았으며 기계적 시험 결과 물성 값들은 선급 규정을 만족하였다. 따라서 Hi-Pro FCAW를 현장 적용해도 된다고 판단하였다.

Table 4.1. Welding conditions for WPQT

No of pass	Total current	Voltages	Travel speed
1	200A(Single)	33V	14 cm/min
2~13	530~580A	29~31V	27~39 cm/min
14	550A	29	42 cm/min

Table 4.2. Results of mechanical test

Tensile strength (N/mm)	Bend test	Impact test (J) [-20°C]			Requirement
	Side	Center	Fusion	F+2mm	
557.7	good	90.1	142.1	147	34(J)
		82.3	142.1	146	
		106.8	134.3	147	
Average		93	139.5	146.7	

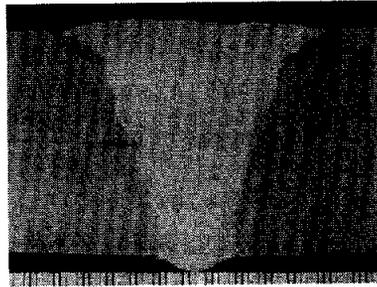


Fig. 4.29 Photograph of macro section

제 5 장 결 론

후판 편면 맞대기 용접을 위한 Hi-Pro FCAW의 개발에 관한 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Hi-Pro FCAW에 있어서 아크의 안정성을 평가할 수 있는 아크 안정성 지수를 개발하였다.
- 2) 후판 편면 맞대기 용접을 위한 Hi-Pro FCAW의 적절한 전극간거리를 도출하였다.
- 3) 아크 각각 275A와 350A Hi-Pro FCAW 용접에 있어서 가장 강건한 용접조건은 29V와 30V이다.
- 4) 각 전류에서 적정전압보다 낮은 전압과 높은 전압에서 아크꺼짐의 주요인은 심한 용융지의 유동과 와이어 송급 불안정이었다.
- 5) 용접전류가 높아짐에 따라 용적이행 주기가 점차 줄어들고 용적의 크기가 작아졌으며 양호한 용접품질이 얻어지는 전압범위가 넓어졌다.
- 6) 각 전류에서 Hi-Pro FCAW의 비드 형상은 전압이 증가함에 따라 비드 폭은 넓어졌고, 비드높이는 낮아졌으며 용입은 깊어짐을 알았다. 하지만 비드높이와 용입의 치수는 크게 변하지 않았다.
- 7) 고능률 용접법인 Hi-Pro FCAW를 현장 적용할 수 있다.

참고 문헌

- 1) 조상명: 교류 피복 아크 용접에 있어서 아크 안정성의 정량적 평가에 관한 연구, 대한용접학회지 제 16호 제 4권(1998), p125-131.
- 2) Ken Michie, Stephen Blackman, T.E.B. Ogunbiyi : Twin-Wire GMAW : Process Characteristics and Applications, Journal of AWS. May, 1999 (in U.S.A)
- 3) H.Hackl : T.I.M.E. Twin- A novel double wire process for joining aluminium, IIW-Doc XII-1439-96
- 4) Takeshi Shinoda, Jitsuo Nakata, Hideki Miyauchi : Development of Double Wire MIG Welding Process, Recent Technology of Arc Welding in Vessel and Pipe, Technical Commission on Welding Process, Japan Welding Society, 2000(in Japanese)
- 5) 강덕일, 최재호, 장영섭, 김용석 : CO₂ 용접에서 전류 펄스 조건이 스파터 발생에 미치는 영향, 대한용접학회지 제 16호 제 4권(1998), p319-328.
- 6) Welding Joining Handbook, KWS, 549(in Korean)
- 7) D.Sc. Janez Tusek : Mathematical modeling of melting rate in twin-wire welding, Journal of Materials Processing Technology, December, 1999
- 8) 馬場信 : フラックス入りワイヤの實踐, 日本溶接協會編, 産報出版, 1994, 13(in Japanese)

9) J.F.Lancaster : The Physics of Welding, The International Institute of Welding, 1986, 314

10) T. Mita : Quantitative Estimation of Arc Stability on CO₂ Gas Shielded Arc Welding, J. of Japan Weld. Soc., Vol. 5, No 1(1987), p75(in Japanese)

11) T. Mita : Waveform control method in CO₂ gas shielded arc welding, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, Vol. 6, No. 6(1994), p457(in Japanese)

12) T. Shnoda, H. Nishikawa : Monitoring and Signal Processing of Short Circuitings Metal Transfer of Metal Active Gas Welding Process, Proceedings of the Int. Conf. on the Joining of Materials, May 31~June 2(1995), p558~565(in Japanese)

감사의 글

세월은 정말로 빠릅니다. 제가 처음 연구실 문을 두드렸을 때가 1994년 11월 학부 2학년 이었으니 벌써 횡수로 11년째 됩니다. 계속 연구실 생활은 하지 않았지만 지금까지 저의 인생에서 1/3정도 차지하는 시간입니다. 교수님께 그동안 많이 배웠고 배우고 있으며 또 계속 배울 것입니다. 회사생활 하면서 공부한다는 것이 정말 쉽지는 않았습니다. 쉽지 않은 공부인데 가능하게끔 주위의 많은 분들이 도와 주셨습니다.

학문과 인생이라는 길의 길잡이로서 한결같은 지도를 아끼지 않으신 조상명 교수님께 먼저 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

학부 및 대학원 과정에서 질책과 격려를 아끼지 않으셨던 김우열 교수님, 박홍일 교수님, 김성규 교수님, 이병우 교수님, 방국수 교수님, 서원찬 교수님, 이길근 교수님께 진심으로 감사의 마음을 올립니다.

회사생활 하면서 공부를 할 수 있게끔 늘 마음어린 조언과 충고로 이 자리에 설수 있게 해주신 최우현님, 정문섭님, 이정수님, 양종수님, 최길영님께 진심으로 감사의 마음 올립니다. 또한 직장동료로서 그리고 용접과 장비 Set-up, 시편가공을 도와주신 류영수님, 정준식님, 김남인님, 강내익님, 공종선님, 정교식님, 신병섭님, 양수석님, 원호정님, 이영석님 진심으로 감사의 마음을 올립니다.

새롭게 옮긴 일자리에서 이 논문이 있게끔 도와주신 정광석 부사장님, 김서주 실장님, 조종래 팀장님, 김영환 차장님, 김희용님, 그리고 stx조선생산기술팀 팀원 여러분께 진심으로 감사의 마음을 올립니다.

선후배인 오동수님, 이광원님, 임성룡님, 최규원님, 김선희님, 박찬우님, 김덕원님, 박대규님, 윤훈성님, 간병오님, 황동수님, 지정민님, 조호재님, 공현상님, 김기정님, 고미혜님, 박덕조님, 김진우님, 조성우님, 유광선님, 조진안님, 허상준님, 김영주님, 김인태님, 김대만님, 함효식님, 김진욱님께 감사의 말을 전하고 싶습니다. 또한, 연구실 살림꾼 김외숙님께도 진심으로 감사의 마음을 전합니다. 그리고 건승하시길 바랍니다.

끝으로, 지금까지 학업을 계속할 수 있게 뒤에서 묵묵히 지원해준 양가 부모님, 형제누이 그리고 사랑하는 아내 이정민님께 감사의 마음을 전합니다. 또한 엄마 뱃속에서부터 지금까지 묵묵히 지켜봐준 가인에게도 고마움을 전합니다.