

工學碩士 學位論文

MIG 용접공정에서 파형해석에 의한  
인라인 품질 평가 방법 개발

指導教授 趙相明

이 論文을 釜慶大學校 大學院 소재프로세스공학과 劉光善 氏 出함



2006年 2月

釜慶大學校 大學院

소재프로세스공학과

劉光善

# 劉光善의 工學碩士 學位論文을 認准함

2005年 12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	1
제 1장 서론	2
1.1 연구 배경 및 필요성	2
1.2 연구 목적 및 개요	3
제 2장 이론적 배경	4
2.1 GMAW의 원리	4
2.2 용접 모재의 개요	6
2.2.1 구상흑연주철	6
2.2.2 페라이트계 스테인리스강	8
2.3 용접부의 정의	11
2.3.1 Ex-manifold	11
2.3.2 Converter	11
2.4 CTWD의 정의	12
2.5 작업각, 진행각의 정의	13
2.6 용접선 추적 불량(Failure of seam track)	14
제 3장 진행각 변경 실험	15
3.1 서언	15
3.2 실험 재료 및 실험 방법	15
3.2.1 실험 재료	15
3.2.2 실험 방법	17
3.3 실험 결과 및 고찰	18
3.4 결론	21

제 4장 용접선 추적 불량 모의실험에 의한 용접 파형 관찰	22
4.1 서언	22
4.2 실험 재료 및 실험 방법	23
4.2.1 실험 재료	23
4.2.2 실험 방법	25
4.3 실험 결과 및 고찰	27
4.3.1 용접선 2mm 이탈 실험 결과	27
4.3.2 용접선 2.5mm 이탈 실험 결과	28
4.3.3 용접선 3mm 이탈 실험 결과	29
4.4 결론	30
제 5장 현장 용접공정에서의 파형해석에 의한 인라인 품질 평가 방법 개발	31
5.1 서언	31
5.2 실험 방법	32
5.3 실험 결과 및 고찰	36
5.3.1 비드 외관 및 단면 관찰	36
5.3.2 용접선 추적 불량시의 용접 파형 관찰	38
5.3.3 구간 평가법 개발	40
5.3.4 평가 Parameter 개발	41
5.3.5 평가 기준에 대한 검증	48
5.4 결론	56
제 6장 결론	57
참고 문헌	58

# **Development of In-line Quality Evaluation Method by Analysis of Waveform in MIG Weld Process**

Kwang-sun Yu

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

## **Abstract**

In car muffler assembly, welding of ductile cast iron(FCD500) and ferrite stainless steel(STS436) is the most important welding process. These two materials are joined by automatic MIG circumferential welding so that welding productivity is very high. Attachment of large spatter on contact tip and bending of wire can make failure of seam tracking to occur the lack of penetration in weld joint. Also it will make the initiation of crack easily on weldment due to decrease of real throat thickness and increase of net stress concentration. So the development of quality evaluation method for the weldment is necessary in field of car muffler production

In this study, section evaluation method and parameters are developed and then analysing the correlation of parameters, the evaluation method of seam track condition is finally described

Key Words : FCD500, STS436, Current waveform, Voltage waveform, Seam tracking, Lack of penetration, Short circuit transfer mode, Spray transfer mode, MIG Welding, GMAW

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경 및 필요성

페라이트계 스테인리스강과 구상흑연주철은 자동차 머플러용 소재로 널리 쓰이고 있으며, 이 두 이종 소재의 자동 MIG 원주 용접은 자동차 머플러 조립에서 가장 중요한 공정에 속한다. 페라이트계 스테인리스강은 내부식성과 내열성 그리고 기계적 성질이 우수하고, 구상흑연주철은 복잡한 형상으로도 제조가 가능하며 또한 주철 중에서도 용접성이 가장 좋기 때문에 자동차 머플러 소재로 많이 사용된다<sup>1)</sup>. 구상흑연주철소재인 익스메니폴드와 페라이트계 스테인리스강소재인 컨버터의 형상을 Fig. 1.1에 나타내었다.

자동차 머플러의 한 용접이음부인 익스메니폴드(FCD500)와 컨버터(STS436)의 원주 용접시 발생하는 컨택팁 마모 과대 및 대형 스파터 부착으로 인한 와이어 편심은 용접선 추적 불량을 야기 시키며, 이로 인해 용입부족을 가지는 용접부가 발생하게 된다. 이러한 용접부가 반복하중을 받으면 작은 목단면으로 인해 높은 응력이 작용하고 응력이 심해져서 피로크랙이 쉽게 발생한다.

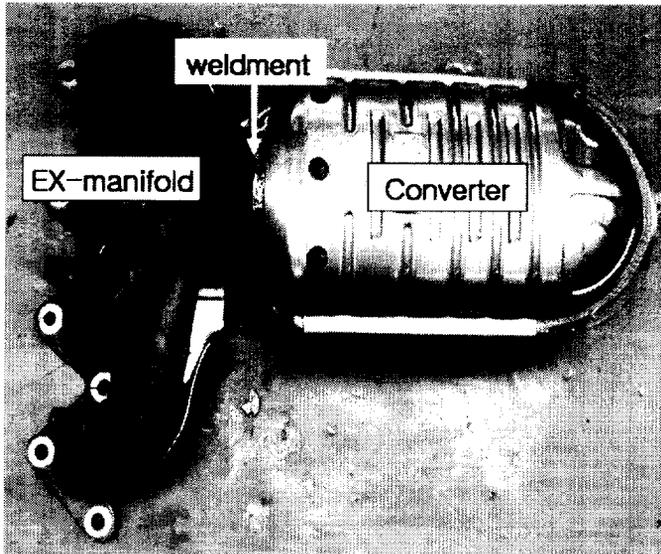


Fig. 1.1 Schematic of ex-manifold and converter weldment

Y그루브 맞대기 용접이음부에서 불완전 용입으로 인한 내구성 불량은 육안 검사 및 누설 검사로 판별이 어렵고, 전수검사 또한 현실적으로 어렵다.

단락 이행 모드에서의 단락시간비 또는 전류, 전압을 분석하여 아크 안정성 평가 그리고 용접 품질 평가 방법을 제시한 경우들은 많지만 평판인 시험편 위에 1패스 용접조건에서만 평가가 되었고<sup>2,4)</sup>, 불규칙적인 Y그루브 형상과 스프레이 이행 모드인 현장용접조건에서는 적용하기가 어려운 실정이므로 용접 품질 평가를 위한 새로운 파라미터 개발의 필요성이 대두되어졌다. 박판 맞대기 및 필릿 용접시의 전류, 전압 파형분석을 통한 각 파라미터에서의 용접부 품질 평가 방법은 여러 논문에 의해 제시되었지만<sup>2,5,6)</sup>, Y그루브의 불규칙적인 형상을 고려한 맞대기 용접에서의 파형 해석적 기법은 아직 확립되어 있지 않은 실정이다. 따라서 인라인 품질 모니터링에 의해 품질 평가를 할 수 있는 파라미터 개발이 절실히 필요하게 되었다.

## 1.2 연구 목적 및 개요

본 연구에서는 Y그루브 맞대기 자동 MIG 원주용접에서 용접선 추적 불량시의 파형을 정상조건의 파형과 비교, 분석하여 용접파형 해석에 의한 품질 평가 방법 개발에 그 목적을 두었다.

이를 위한 실험으로 익스메니폴드(FCD500)와 컨버터(STS436) Y그루브 맞대기 자동 MIG 원주용접 조건에서 와이어의 끝이 그루브 중앙에 위치하여 용접이 되는 정상 컨택팁 사용조건 그리고 큰 용적의 스패터 부착 및 컨택팁 내경 과대로 인해 와이어의 끝이 컨버터의 상단면에 위치하여 용접이 되는 불량 컨택팁 사용조건으로 용접 실험을 하였다. 그리고 각 용접조건에서의 비드외관과 용접부 단면검사 그리고 용접 파형을 정밀히 분석하였다.

## 제 2 장 이론적 배경

### 2.1 GMAW의 원리

GMAW(Gas Metal Arc Welding)는 소모전극을 사용하는 방법으로 용가재로 작용하는 와이어를 일정한 속도(Wire Feeding Rate)로 용융지에 송급하면서 전류를 통하여 와이어와 모재 사이에서 아크가 발생하도록 하는 용접법이다. Fig. 2.1 에서와 같이 연속적으로 송급되는 와이어는 높은 아크열에 의해 용융되어 아크 기둥을 거쳐 용융지로 이행되게 되며, 아크 기둥과 용융부위는 가스노즐을 통해 공급되는 보호가스(Shielding Gas)에 의해 주위의 대기로부터 보호된다. 이 용접법은 사용되는 보호가스의 종류에 따라 분류되고 있는데, Ar과 같은 불활성 가스를 사용하는 경우를 MIG(Metal Inert Gas)용접, 순수 탄산가스만을 사용하는 경우를 CO<sub>2</sub>용접, 탄산가스와 Ar가스를 혼합하여 사용하는 경우를 MAG(Metal Active Gas)용접 이라고 한다.

본 연구에서는 98%Ar과 2%O<sub>2</sub>를 사용하는 MIG용접을 사용하였다.

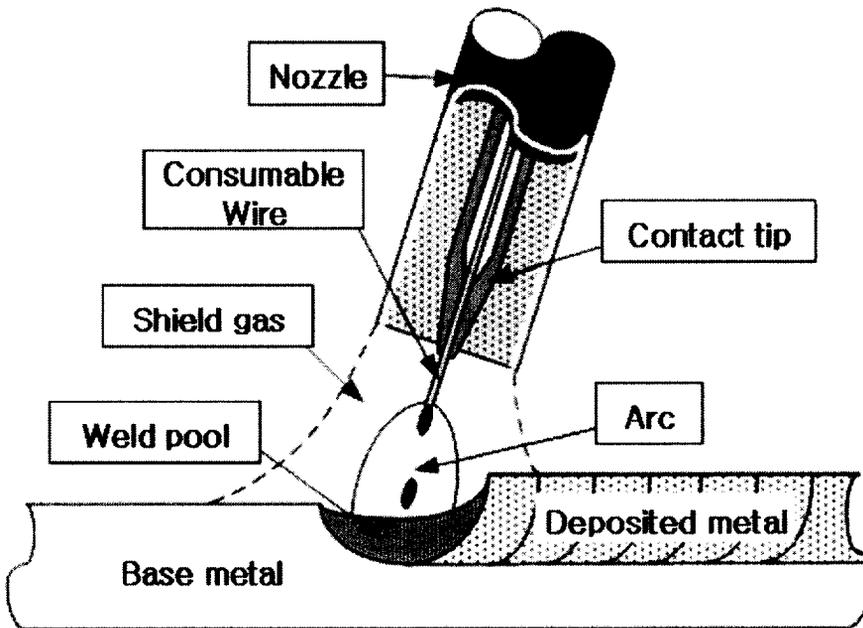


Fig. 2.1 Schematic of GMAW

## 2.2 용접 모재의 개요

### 2.2.1 구상흑연 주철

#### (1) 일반적 특성

구상흑연주철은 흑연 구상화제인 Mn, 회토류금속 등을 첨가하여 Fig. 2.2 에서와 같이 흑연이 구상으로 정출되어 있는 주철로서 강도 및 연성이 가장 높다. 이 주철은 회주철의 양호한 가공성과 강의 다양한 장점(고강도, 인성, 연성, 경화능, 고온가공성)을 조합한 특성을 나타낸다. 구상흑연주철은 통상 3~4%C, 1.8~2.8%Si 그리고 최대 0.7%Mn을 함유한다. 여기서 Mn 함유량은 충격치가 엄격하게 요구될 경우에 제한되는데, 이것은 Mn함량이 높을 경우에 용접부 충격 저항 특성을 감소시킬 수 있기 때문이다. 이 주철은 415~830MPa의 인장 강도를 가진다. 내열 및 내식성을 개선하기 위해서는 합금원소를 첨가해야 하며, 이 경우에 2~3%C, 1~6%Si, 0.7~2.4%Mn, 18~36%Ni 그리고 최대 5.5%Cr을 함유할 수 있다.

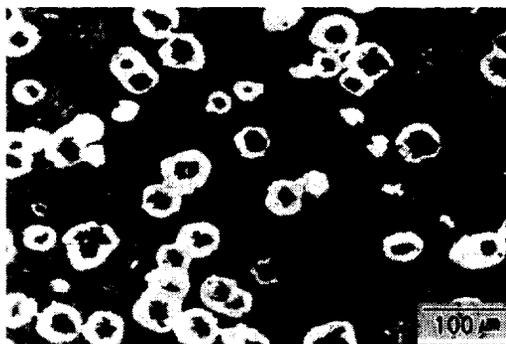


Fig. 2.2 Nodular cast iron

## (2) 용접성

편상흑연주철은 분리된 흑연입자들이 약한 면을 가지고 있어 취성이 강해 용접하기가 어렵다. 하지만 구상흑연주철에는 구상화제인 Mn, 희토류 금속 등이 첨가되어 흑연이 구상으로 정출되어 있기 때문에 주철로서 강도 및 연성이 가장 높다. 이 주철은 회주철의 양호한 가공성과 강의 다양한 장점(고강도, 인성, 연성, 경화능, 고온가공성)을 가지고 있기 때문에 주철중에서 용접성이 좋은 것으로 알려져있다. 주철의 종류와 용접성을 Table 2.1 에 나타내었다.

Table 2.1 Class and Weldability of cast iron

Class		KS	Weldability
Gray cast iron		D4301	Not bad
Nodular cast iron		D4302	Good
Malleable irons	Blackheart Malleable iron	D4303	Bad
	Pearlite malleable iron	D4304	Bad
	Whiteheart malleable iron	D4305	Not bad

## 2.2.2 페라이트계 스테인리스강

### (1) 일반적 특성

스테인리스강이란 Cr을 주합금 원소로 하고 기타의 합금 원소를 첨가하여 우수한 내부식성 및 기계적 성질을 얻기 위하여 만들어진 강을 의미한다. 보통 Cr성분이 11~12% 이상 함유되어 있는 강으로서 Cr에 의하여 매우 얇고 안정한 산화피막이 형성되어 내식성을 갖게 한다. 이 강은 습식, 건식분위기에서 높은 내식성을 가지며, 가공성, 내열성, 내마모성이 우수하여 적용분야가 매우 광범위하다. 미세 조직에 따라 페라이트계, 마르텐사이트계, 오스테나이트계, 석출경화계, 듀플렉스계의 5가지 종류로 구분된다. 페라이트계 스테인리스강은 Fe-13%Cr을 기본 조성으로 하고 필요에 따라 C, Mn, N, Nb, Ti 등의 합금원소를 소량 첨가하여 각종 용도에 적합하도록 개발되어 있다. 대표적인 강종은 430이며, 내식성 및 내열성을 향상시키기 위하여 Mo, Nb, Ta를 첨가하여 자동차용으로 사용하는 436이 있다. 주로 예민화(sensitization) 현상에 기인하여 유발되는 입계부식(intergranular corrosion)을 막기 위해 강력한 carbide형성원소(Ti, Nb)를 첨가한 것이 409, 444, 436등이며 409의 경우 C와 Cr의 반응으로 부식저항성과 인성을 떨어뜨릴 수 있으므로 C의 함유량을 0.03%이하로 조절한 것이 409L이며 표면에 Pitting Corrosion이 발생하는 것을 막기 위해 Mo를 첨가한 형태로 436 등이 있다. 페라이트계 스테인리스강의 재질별 화학조성을 Table 2.2에 비교하여 나타내었다.

Table 2.2 Chemical composition of ferrite stainless steel for each class

Comp Mat	C	Mn	Si	Cr	P	S	Others
405	0.08	1.00	1.00	11.5-14.5	0.04	0.03	0.10-0.30Al
409	0.08	1.00	1.00	10.5-11.75	0.045	0.045	6*%C min Ti(e)
429	0.12	1.00	1.00	14.0-16.0	0.04	0.03	-
430	0.12	1.00	1.00	16.0-18.0	0.04	0.03	-
430F	0.12	1.25	1.00	16.0-18.0	0.06	0.15	0.6Mo(c)
460FSe	0.12	1.25	1.00	16.0-18.0	0.06	0.06	0.15min Se
434	0.12	1.00	1.00	16.0-18.0	0.04	0.03	0.75-1.25 Mo
436	0.12	1.00	1.00	16.0-18.0	0.04	0.03	0.75-1.25Mo: 5*5C min Nb+Ta(f)

\* Comp : Compositions, Mat : Materials

## (2) 용접성

페라이트계 스테인리스강은 일반적으로 용접성이 나쁜 것으로 알려져 있으며, 그 이유는 결정구조가 온도에 관계없이 항상 페라이트이기 때문에 약 1,100℃ 이상의 온도로 상승하는 용접부 및 용접열영향부( Heat Affected Zone, HAZ )에서는 결정립이 Fig. 2.3 에서와 같이 급속히 성장한다. 이러한 결정립의 조대화는 연성 및 인성에 해로운 영향을 미치며 용접부에 언더컷이나 응력집중부가 존재하면 매우 쉽게 균열이 발생한다. 그리고 450℃ 이상으로 가열되는 HAZ에서는 강중에 존재하는 C와 N이 Cr과 결합하여 Cr탄화물, 질화물, 탄질화물 등을 형성한다. 이들은 결정립계에 석출하며, 결정립이 성장하면서 면적이 감소하는 입계면에 농축된다. 또한 이 석출물들은 입내의 전위에도 석출한다. 이러한 강하고 취성이 큰 석출물은 응력집중원으로 작용하며, 파괴시에 석출물이나 석출물이 형성된 결정립내의 아결정립계를 통하여 취성파괴를 조장한다.

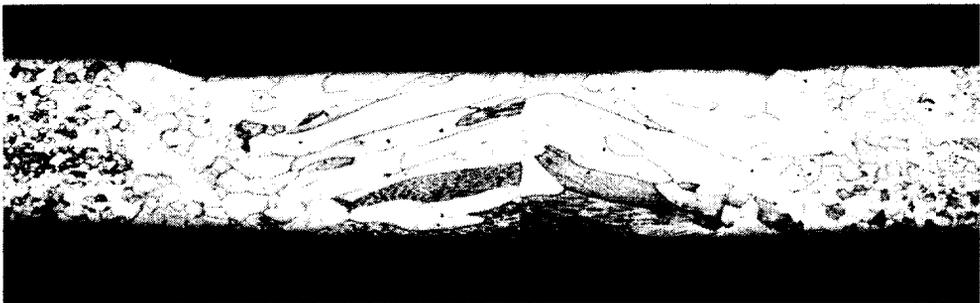


Fig. 2.3 Micro structure of ferrite stainless steel with 0.6mm thickness after welded by TIG

## 2.3 용접부의 정의

### 2.3.1 Ex-manifold

Fig. 2.4 (a)는 자동차의 엔진에 장착되는 부품으로, 엔진실린더에서의 폭발 가스를 배출시키는 배기관(Ex-manifold)을 나타내고 있다. 복잡한 형상으로 인해 구상 흑연 주철로 주조된 소재이다. 자동차 머플러에서 반복하중을 가장 크게 받는 부분이다.

### 2.3.2 Converter

Fig. 2.4 (b)는 Ex-manifold와 연결되는 컨버터를 나타내고 있다. 부품내에 촉매가 내장되어 유해가스를 환원 시켜주는 역할을 한다. 소재는 패라이트계 스테인리스강이며, 자동차 머플러에서 반복하중을 크게 받는 부분이다.

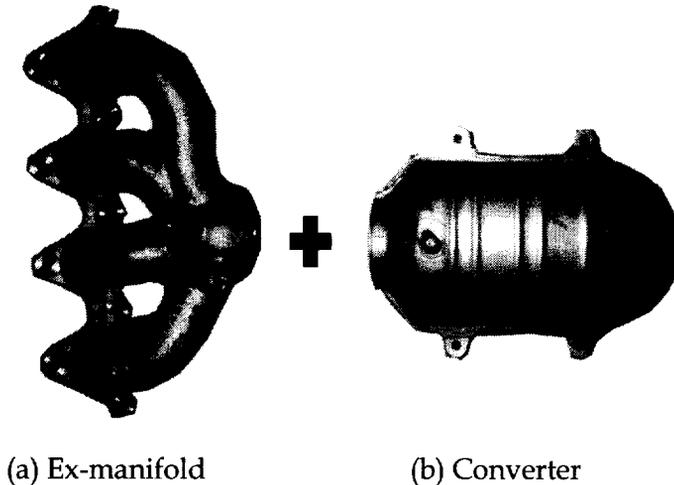


Fig. 2.4 Definition of ex-manifold and converter

## 2.4 CTWD의 정의

Fig. 2.5 에서와 같이 CTWD (Contact tip to Workpiece Distance)는 컨택팁에서 모재까지의 거리이며, 와이어 돌출길이와 아크 길이로 나누어진다. 아크길이를 일정하게 유지하는 정전압 특성에서 CTWD변화는 와이어 돌출길이와 관련이 있다. CTWD가 작아지면 와이어 돌출길이는 줄어들고, 줄어든 와이어 길이만큼 저항값도 작아진다. 때문에 옴의 법칙( $R = V/I$ )에 의해 전류는 증가하게 되고 반대로 CTWD가 증가하면 전류는 감소하게 된다.

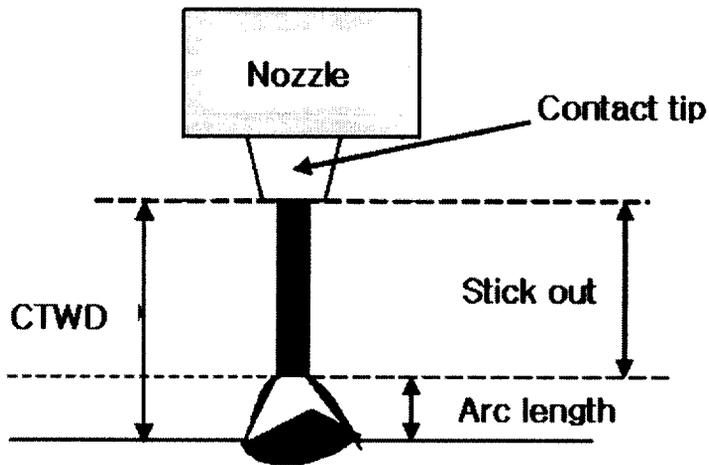


Fig. 2.5 Definition of CTWD

## 2.5 작업각, 진행각의 정의

주로 진행각(Travel Angle)의 형식에는 두 종류가 있으며, 전진각(Forehand angle)과 후진각(Backhand angle)으로 호칭한다. 전극 와이어가 주행 방향점에 놓일 때, 그 각을 전진각(Forehand angle)이라고 부른다. 전진각은 용입을 감소시키고, 비드 폭을 증가시키는 경향이 있다. 전극 와이어가 주행 방향의 대칭점에 놓일 때, 그 각을 후진각(Backhand angle)이라고 부른다. 후진각은 용입을 증가시키고, 비드 폭을 감소시키는 경향이 있다. 전극(용접봉)이 용접축에 횡방향으로 이루는 각도를 작업각(work angle)이라고 부른다. 이 작업 각도는 필렛 용접각장 및 다층 개선 홈 용접시에 양호한 용접부 확보를 위해 조절되어 진다.

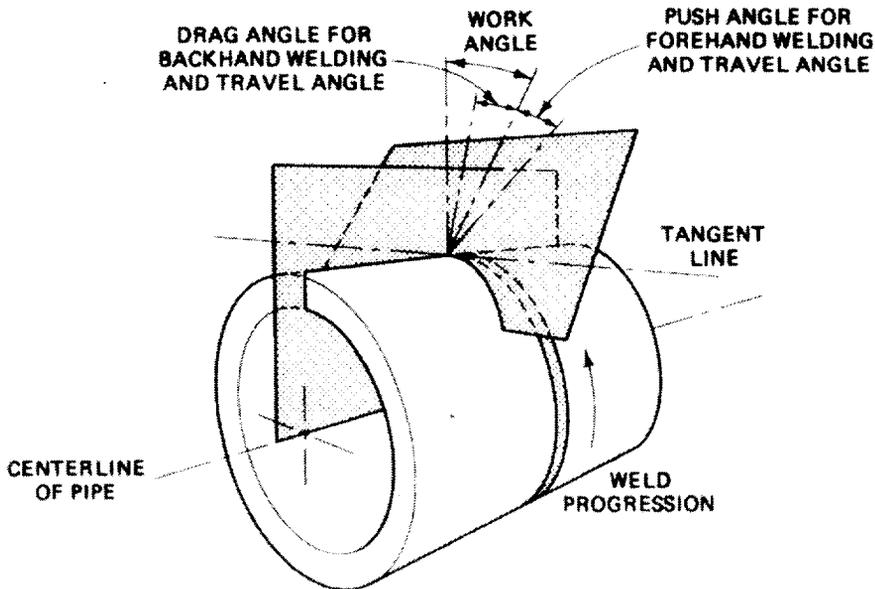


Fig. 2.6 Definition of travel angle and work angle

## 2.6 용접선 추적 불량(Failure of seam track)

Fig. 2.7 에서와 같이 용접 비드가 용접 이음부에 형성되지 못하고 모재쪽으로 형성이 되는 경우를 용접선 추적 불량이라고 한다. 이러한 현상은 컨택팁 내경의 마모가 과대하거나 큰 용적의 스패터가 컨택팁에 달라붙어 와이어의 휨이 과대 하게 되는 경우 또는 토치가 이동한 경우에 주로 발생한다. Fig. 2.7 의 용접이음부에서 실제로 용접이 된 부분은 비드 덧살의 왼쪽부위 만임을 알 수가 있으며, 이러한 용접부는 반복 하중과 피로에 대한 자동차 머플러 용접부의 강도를 떨어 트리는 치명적인 역할을 한다.

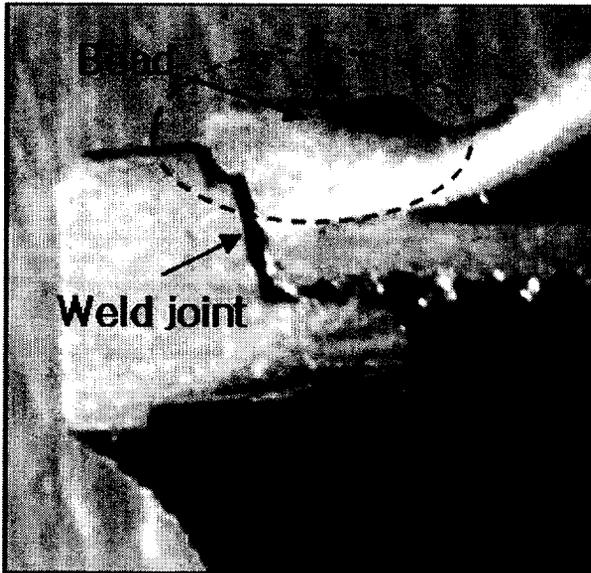


Fig. 2.7 Definition of failure of seam track

## 제 3장 진행각 변경 실험

### 3.1 서언

페라이트계 스테인리스강의 용접부는 마르텐사이트를 포함하는 결정립 조대화 영역이 나타나서 취화의 원인이 된다. 이러한 용접부에 언더컷이나 과대 비드, 과대각장이 생기게 되면 비드 Toe부에서의 응력집중을 야기 시켜 Crack이 쉽게 발생하게 된다. 본 실험에서는 진행각을 변경하여 각 조건에서의 비드 단면을 관찰, 페라이트계 스테인리스강을 소재로 사용하고 반복하중을 자주 받는 자동차 머플러 용접 이음부에 대한 적정 용접조건을 찾고자 다음과 같은 실험을 하였다.

### 3.2 실험재료 및 실험방법

#### 3.2.1 실험재료

본 실험에 사용된 재료는 폭 100mm × 길이240mm × 두께10mm의 연강판을 사용하였고. 시편 형상은 Fig. 3.1에 나타내었다. Grinding작업으로 재료 양면의 흑피를 제거하여 사용하였다.

사용된 Wire의 종류는 KS YF309LG (JIS YF 309LG) 직경 1.2mm Metal cored wire이며 기계적 성질을 Table 3.1에 그리고 화학성분을 Table 3.2에 나타내었다. 쉴드가스는 98%Ar + 2%O<sub>2</sub>의 혼합가스를 사용하였다.

Table 3.1 Mechanical properties of metal cored wire

Material	Tensile strength N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
K-309LMT	560(57)	40

Table 3.2 Chemical composition of metal cored wire(wt.%)

Material	C	Si	Mn	Cr	Ni
K-309LMT	0.03	0.48	1.57	23.9	12.4

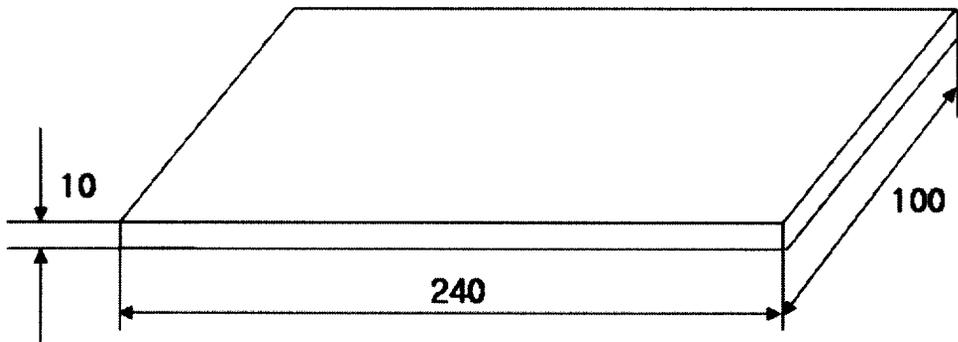


Fig. 3.1 Configuration of base metal

### 3.2.2 실험방법

용접조건은 Table 3.3과 같으며, 진행각은 전진각10도, 5도, 0도, 후진각 5도, 10도로 변경하여 Bead on plate로 용접을 하였다. 용접 실험을 위한 장치 구성도는 Fig. 3.2에 나타내었다. 용접전류를 계측하기 위해서 Arc Monitoring System(WAM 4000)을 사용하였다.

Table 3.3 Welding condition

Power source	Digital inverter
Welding current	300A
Welding voltage	32V
Welding speed	111(cm/min)
CTWD	15mm
Shielding gas	98%Ar+ 2%O <sub>2</sub> (20l/min)
Welding wire	K-309LMT(1.2mm)
Travel angle	Forehand 10°, 5°, 0°, Backhand 5°, 10°

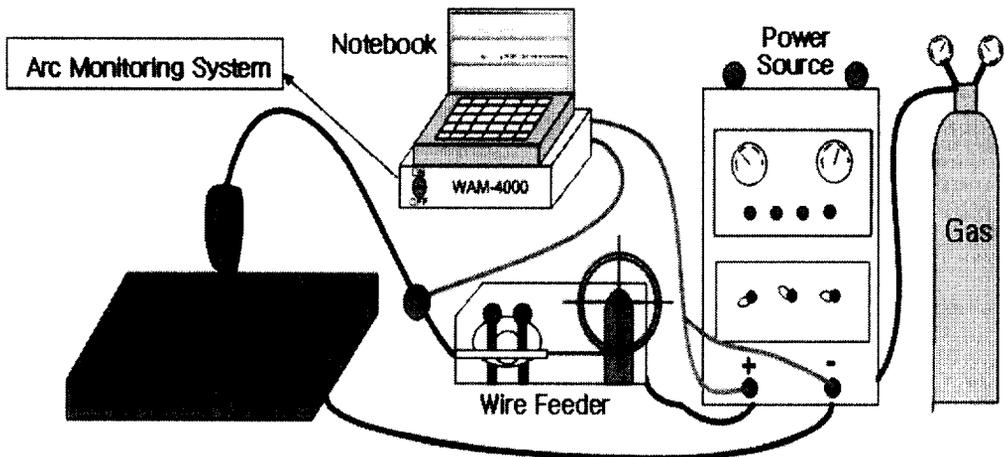


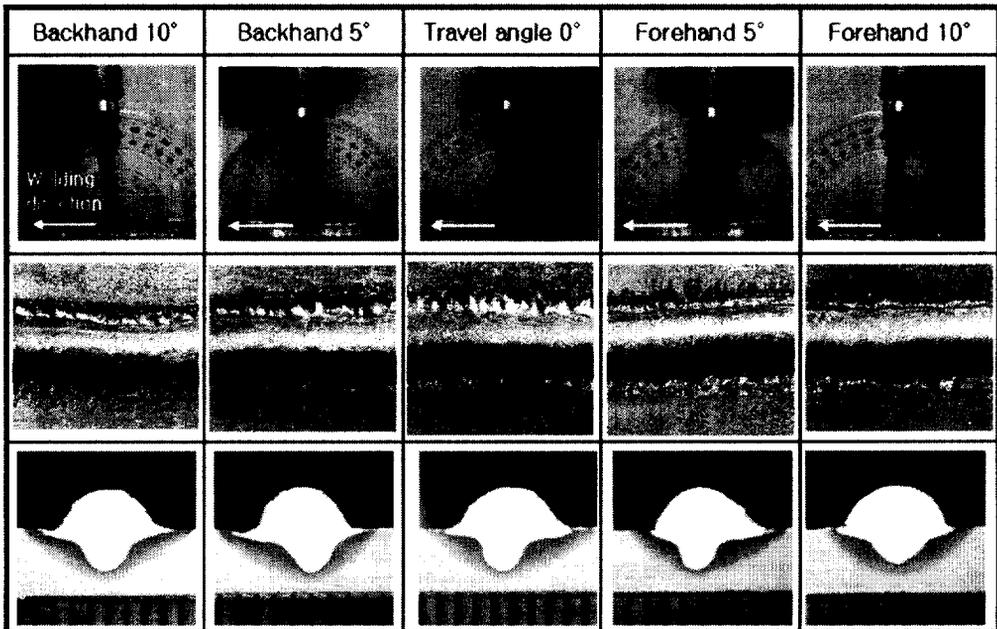
Fig. 3.2 Equipment for experiment

### 3.3 실험결과 및 고찰

Table 3.4는 각 진행각 조건에 대한 비드 외관과 단면을 나타내고 있다. 전진각 10도에서는 용입이 얇고 비드 폭이 넓음을 확인 할 수 있었으며, 후진각으로 갈수록 비드 폭이 좁아지고 용입이 깊어짐을 알 수가 있었다. 진행각 0도에서 후진각 10도로 변경할수록 언더컷 현상이 심해짐을 관찰 할 수 있었다.

Fig. 3.3은 각 용접조건에서의 비드 폭, Fig. 3.4는 비드 높이, Fig. 3.5는 용입 깊이를 나타내었다. 모재의 면과 용접비드의 표면이 교차하는 점인 토우부의 곡률반경이 작아지게 되면 응력이 집중될 가능성이 높고 이때의 Aspect ratio(bead height/bead width)는 커지게 된다. 반면 Aspect ratio가 작으면 toe부의 응력집중도 감소하게 되어 높은 피로 강도를 가지는 용접부를 만들 수 있다. Fig. 3.6은 각 용접 조건에서의 Aspect ratio를 나타내었다.

Table 3.4 Bead shape and Cross section for each travel angle



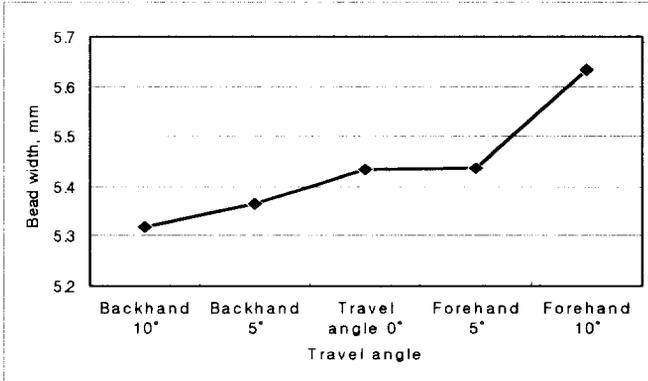


Fig. 3.3 Comparison of bead width for each travel angle

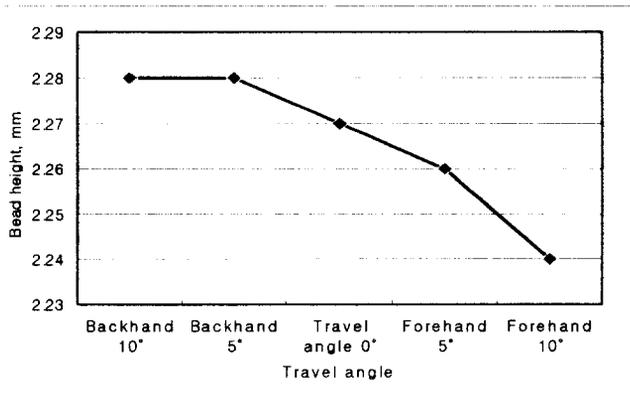


Fig. 3.4 Comparison of bead height for each travel angle

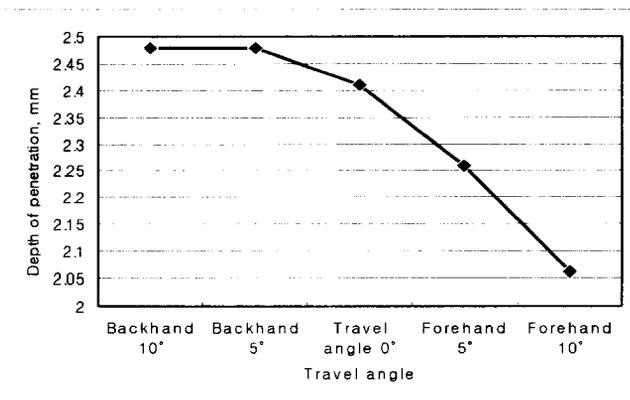
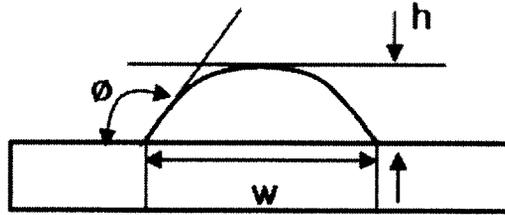
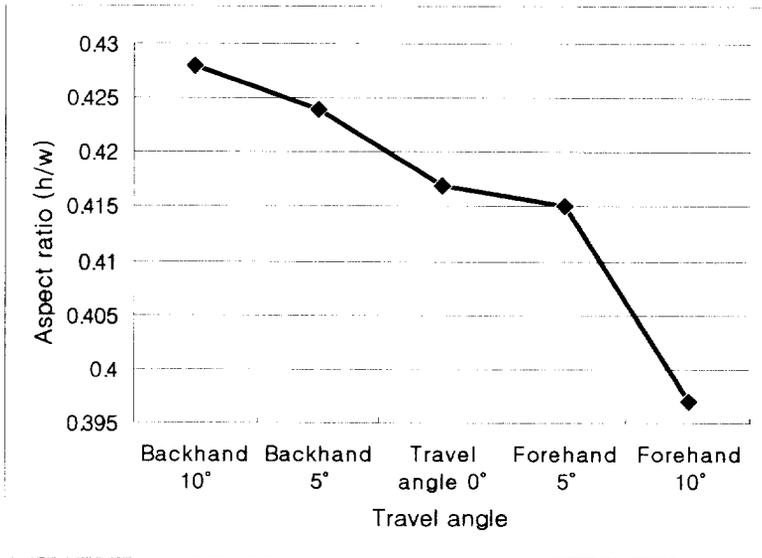


Fig. 3.5 Comparison of penetration depth for each travel angle



(a) Definition of h and w



(b) Aspect ratio(h/w) with change of travel angle

Fig. 3.6 Comparison of aspect ratio(h/w) for each travel angle

### 3.4 결론

진행각 변경 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 전진법에서 후진법으로 갈수록 비드 폭은 감소하였고, 비드 높이와 용입 깊이는 증가 하였다. 이것은 전진법일때 아크의 형성이 용융풀 위에 형성되어 용접 진행 방향으로 향하기 때문에 모재를 작게 녹이며 아크 뒤에 형성된 용융금속은 자연스럽게 퍼져서 응고가 되기 때문이다. 반면 후진법일때 아크는 용융금속을 밀어 올려주며 또 모재를 파내는 작용을 하므로 언더컷이 생길 확률도 높고 비드 높이도 높게 된다.

2) 모재와 용융금속의 경계면에 용접선 방향으로 용융금속이 채워지지 않은 언더컷과 비드 높이가 높아져 모재의 면과 용접비드의 표면이 교차하는 점인 토우부의 곡률반경이 작아지게 되면 응력이 집중될 가능성이 높기 때문에 반복응력을 받는 구조물의 강도를 저하시키게 된다.

그러므로 반복하중을 자주 받는 구조물 용접시에는 전진법으로 용접하여 비드 폭을 넓게 하고 비드 높이를 낮게 하는 것이 바람직하다고 판단된다.

## 제 4장 용접선 추적 불량 모의실험에 의한 용접 파형 관찰

### 4.1 서언

용접선 추적 불량시 아크는 그루브를 이탈하여 모재상단 면에 형성되기 때문에 CTWD는 감소하게 된다. 감소된 CTWD구간에서는 전류가 증가하게 된다. 용접선 추적이 다시 양호한 상태로 되면 아크는 모재상단 면에서 그루브 안으로 형성되기 때문에 CTWD는 증가하여 다시 전류가 감소하게 된다. 본 실험에서는 이러한 내용을 토대로 하여 용접선 추적 불량시의 전류 파형이 실제로 변화되는지 확인 하고자 다음과 같은 실험을 하였다.

## 4.2 실험 재료 및 실험 방법

### 4.2.1 실험 재료

본 실험에 사용된 재료는 폭 50mm × 길이 200mm × 두께 5mm의 연강판이다. 용접이음부의 그루브 형상을 Y형으로 하여 루트갭을 2mm로 두었으며 용접이음부의 모서리를 1 ~ 1.5mm로 개선하였다. 시편 형상을 Fig. 3.1 에 나타내었다.

사용된 Wire의 종류는 KS YF309LG (JIS YF 309LG) 직경 1.2mm Metal cored wire이며 기계적 성질을 Table 3.1에 그리고 화학성분을 Table 3.2 에 나타내었다. 쉴드가스는 98%Ar + 2%O<sub>2</sub>의 혼합가스를 사용하였다.

Table 4.1 Mechanical properties for K-309LMT

Material	Tensile strength N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	Elongation percentage(%)
K-309LMT	560(57)	40

Table 4.2 Chemical composition(wt.%) for K-309LMT

Material	C	Si	Mn	Cr	Ni
K-309LMT	0.03	0.48	1.57	23.9	12.4

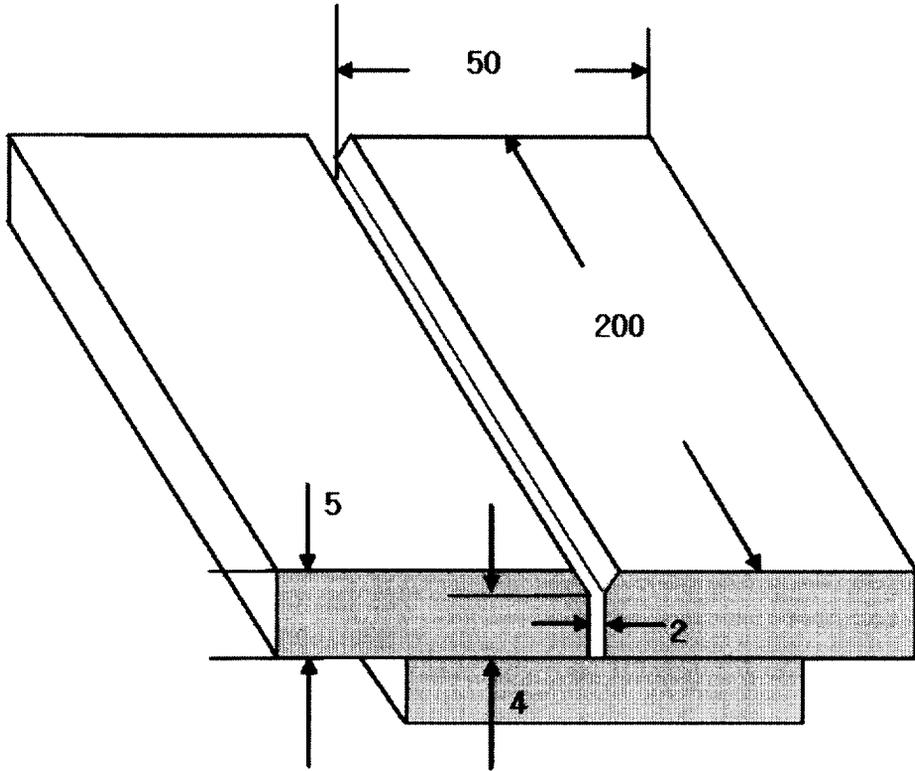


Fig. 4.1 Schematic of specimen

## 4.2.2 실험 방법

본 실험은 Table 4.3의 조건으로 용접을 하였으며 용접중 아크 위치를 모재 쪽으로 2, 2.5, 3mm로 이동 시켜 인위적으로 용접선 추적 불량을 재현 시켰다. 그리고 이때의 전류 파형을 비교 분석하였다.

용접 실험을 위한 실험모식도를 Fig. 4.2에 나타내었으며, Fig. 4.3은 용접선 추적 불량시의 아크 위치를 용접하기 전 셋팅된 와이어의 위치로 나타내었다. 용접전류를 계측하기 위해서 Arc Monitoring System(WAM 4000)을 사용하였다.

Table 4.3 Welding condition for experiment

Power source	Digital inverter
Welding current	300A
Welding voltage	32V
CTWD	15mm
Shielding gas	98%Ar+ 2%O <sub>2</sub> (20ℓ/min)
Welding speed	41cm/min
Wire feed rate	762cm/min
Wire	K-309LMT(1.2mm)
Travel angle	Forehand 10°

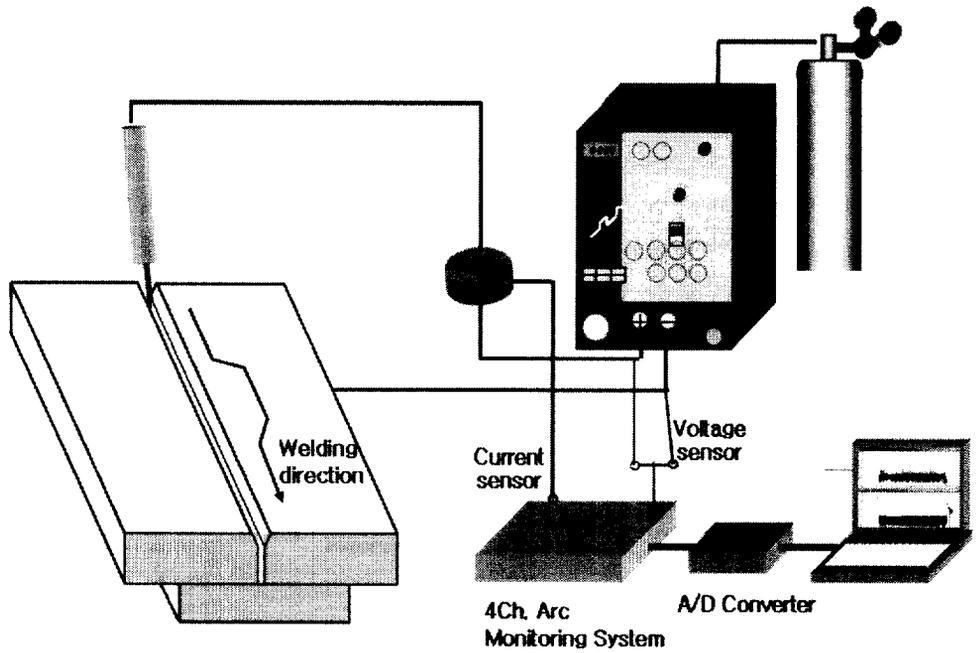


Fig. 4.2 Schematic of welding condition

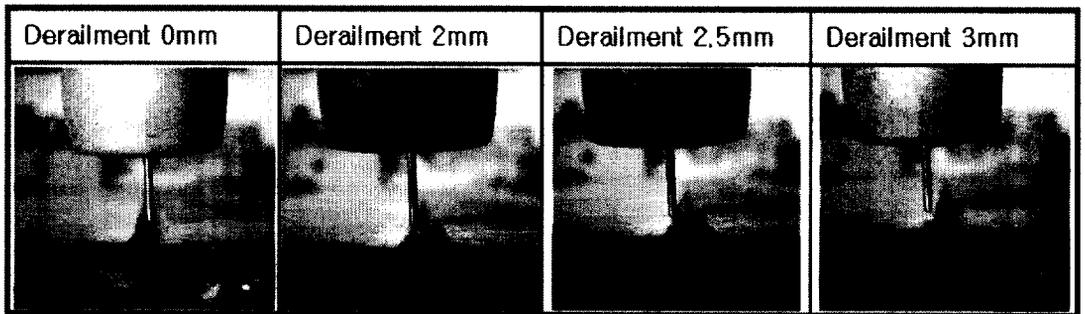


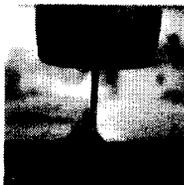
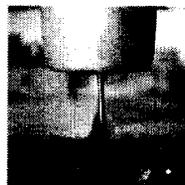
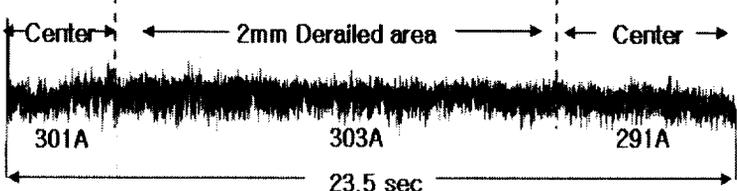
Fig. 4.3 The position of wire for experiment

### 4.3 실험 결과 및 고찰

#### 4.3.1 용접선 2mm 이탈 실험 결과

Table 4.4 는 용접선 추적 불량시의 전류 파형 변화를 나타낸 것이다. 용접 중 토치를 모재쪽으로 2mm 이동한 결과 아크가 그루브에서 모재쪽으로 향함을 관찰 할 수 있었으며 이때의 전류값도 증가함을 알 수 있었다. 다시 토치를 그루브 센터로 원위치 시킨 결과 전류값이 다시 감소함을 알 수가 있었다. 아크의 형성이 그루브 내에 위치 할 때 전류값은 291A ~ 301A였으며, 아크의 형성이 센터에서 2mm 벗어난 경우의 전류값은 303A였다.

Table 4.4 Relationship between bead shape and current waveform

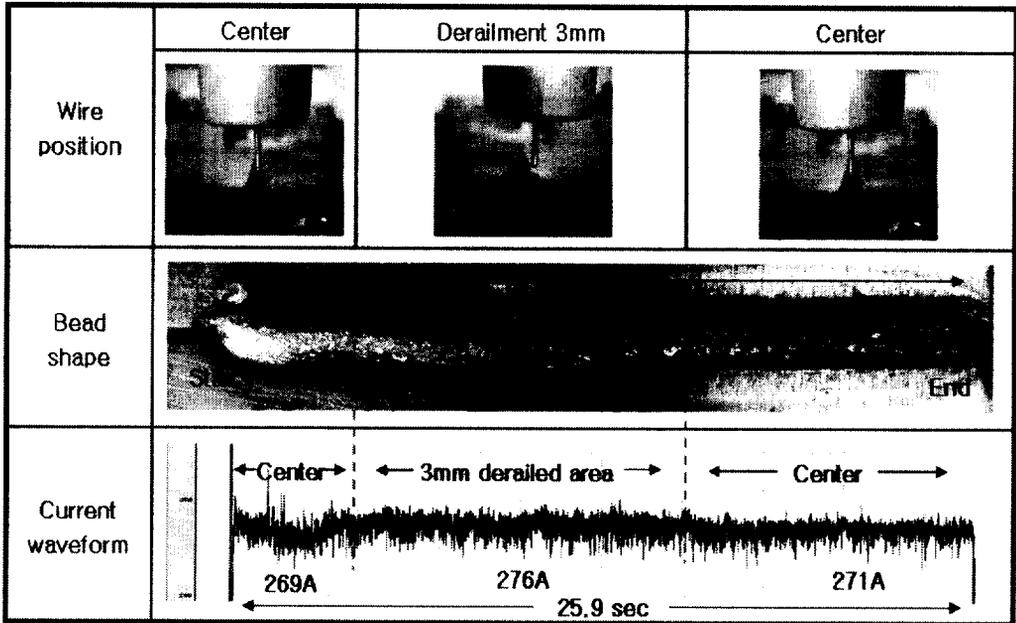
	Center	Derailment 2mm	Center
Wire position			
Bead shape			
Current waveform	 <p>Center ← 2mm Derailed area → Center</p> <p>301A                      303A                      291A</p> <p>23.5 sec</p>		



### 4.3.3 용접선 3mm 이탈 실험 결과

Table 4.6 에서와 같이 용접선에서 3mm 이탈 될 경우 와이어의 위치는 그루브를 약간 벗어나 모재의 상단면에 위치하게 됨을 알 수가 있다. 아크 형성이 그루브안에 위치 되어 용접 되었을 때의 전류값은 269A ~ 271A였으며, 아크형성이 모재 위에 형성 되었을 때의 전류값은 276A였다. 용접선 이탈시 전류가 증가함을 확인 할 수 있었다.

Table 4.6 Relationship between bead shape and current waveform



## 4.4 결론

용접선 추적 불량시의 전류 파형 관찰 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 용접선 추적 불량시 아크의 형성은 그루브를 벗어나 그루브의 개선면 또는 모재 상단면에 형성됨을 알 수 있었다.
- 2) 아크의 형성이 그루브의 개선면 이나 모재 상단면에 위치 할 경우 전류가 증가함을 알 수 있었다. 그 이유는 아크 길이가 항상 일정한 정전압 조건에서 CTWD가 감소하게 되면 와이어의 들출길이만 감소하게 되고 줄어드는 와이어 길이만큼 저항도 감소하기 때문에 옴의 법칙( $I=V/R$ )에 의해 전류는 증가하게 되기 때문이다.
- 3) 용접선 추적 불량시의 전류 파형 변화를 관찰 한 결과, 용접선 2.0mm 이탈 실험에서는 최대 12A 증가, 용접선 2.5mm 이탈 실험에서는 최대 10A 증가, 용접선 3.0mm 이탈 실험에서는 최대 7A까지 증가함을 확인할 수 있었다.

# 제 5장 현장 용접공정에서의 파형해석에 의한 인라인 품질 평가 방법 개발

## 5.1 서언

본 연구에서는 Y그루브 맞대기인 Ex-manifold와 Converter용접에서 용접선 추적 불량시의 파형을 정상조건의 파형과 비교, 분석하여 용접파형 해석에 의한 품질 평가 방법 개발에 그 목적을 두었다.

이를 위한 실험으로 익스메니폴드(FCD500)와 컨버터(STS436) Y그루브 용접 조건에서 정상 컨택팁과 불량 컨택팁을 사용한 용접 실험을 하였으며, 각 용접조건에서의 비드외관과 용접부 단면검사 그리고 용접 파형을 정밀히 분석하였다.

## 5.2 실험 방법

실험조건은 Table 5.1에 나타내었으며, Fig. 5.1(컨버터에서 익스메니플 드를 보았을 때)에 토치의 위치 및 용접 구간을 나타내었다. 2시방향에 위치한 토치를 기준으로 시계방향으로 구간 A ~ E를 나타내었다. 컨버터 하단부의 인너콘이 과도하게 돌출되어 구간 E(컨버터상단부)의 그루브 폭이 jig 1 사용시에는 항상 넓게 존재함을 Fig. 5.2에 나타내었으며, jig 2 사용시에는 구간 C(컨버터 하단부)가 항상 넓게 존재함을 Fig. 5.3에 나타내었다. Fig. 5.4에서와 같이 용접선 추적 양호, 토치 3mm 이동, 불량 컨택팁 조건으로 실험을 하였다. 와이어는 Converter쪽으로만 휘어져 있으며, 용접선 추적 양호 조건과 토치 3mm 이동 조건에서는 컨택팁 내경 마모 및 편심이 없는 정상 컨택팁을 사용하였다. 불량 컨택팁의 형상을 Fig. 5.5에 나타내었다.

Table 5.1 Welding condition for experiment

Power source	Digital inverter
Welding current	300A
Welding voltage	32V
CTWD	15mm
Shielding gas	98%Ar+ 2%O <sub>2</sub> (20ℓ/min)
Welding speed	111cm/min
wire feed rate	1446cm/min
Welding wire	K-309LMT(1.2mm)
Travel angle	0°

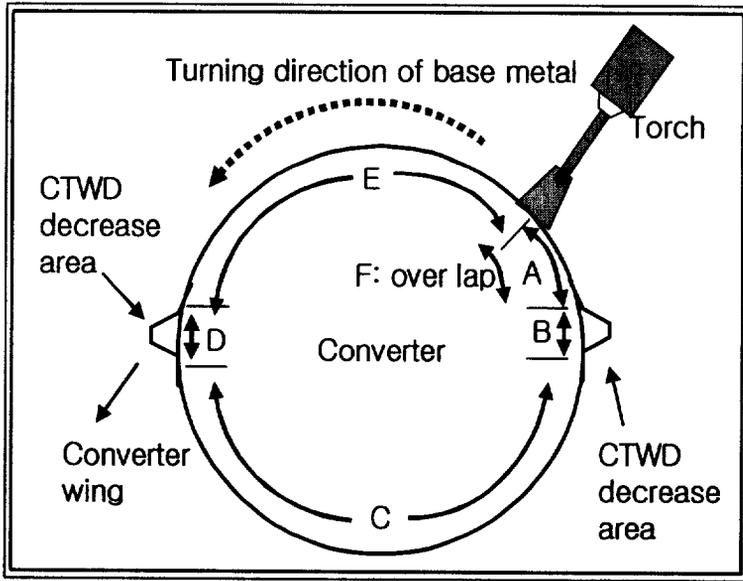
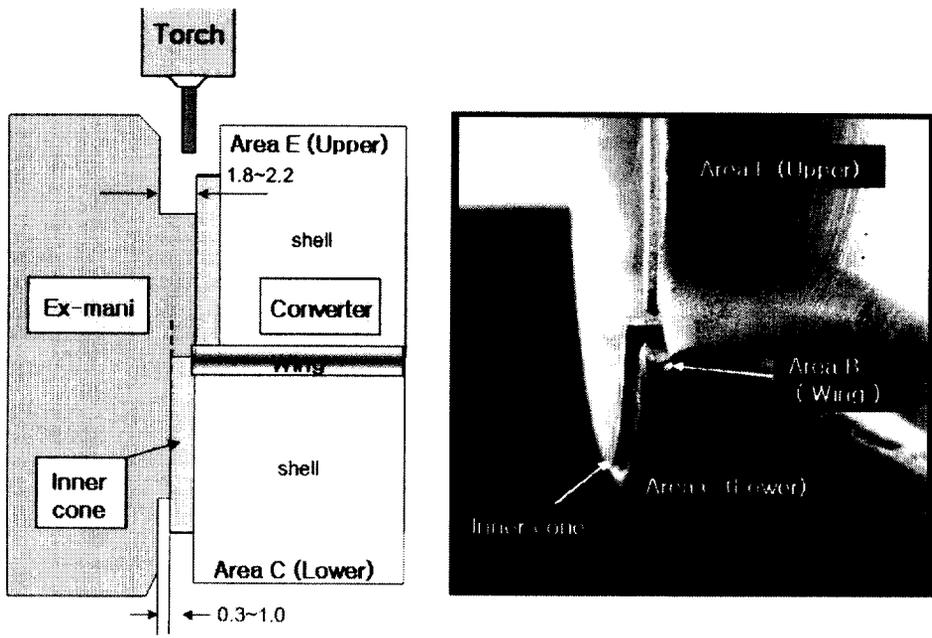


Fig. 5.1 Turning direction of work piece and welding section



a) Schematic of weld joint

b) Real shape

Fig. 5.2 Schematic and shape of weld joint



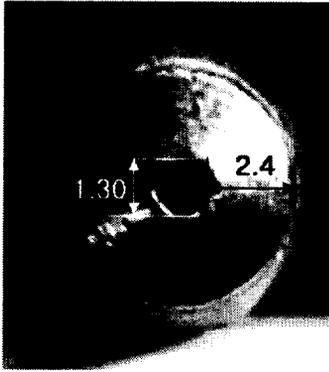
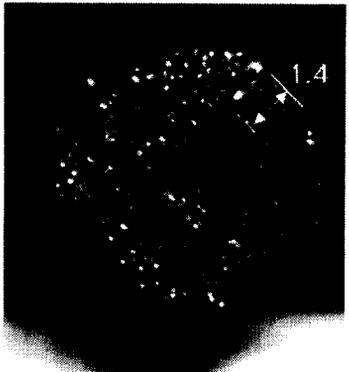
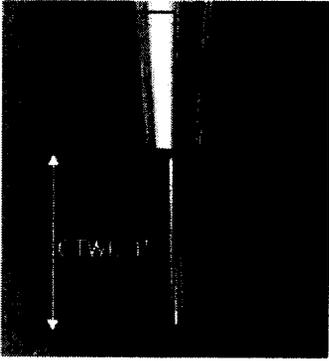
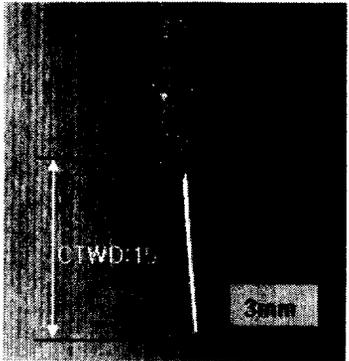
	Standard contact tip	Defective contact tip
Comparison of contact tip caliber and eccentricity		
Comparison of wire bend with CTWD 15mm		

Fig. 5.5 Comparison of contact tip shape and wire position with CTWD 15mm

## 5.3 실험 결과 및 고찰

### 5.3.1 비드 외관 및 단면 관찰

각 용접조건에서의 용접비드 외관과 단면을 Fig. 5.4에 나타내었다. 용접선 추적 양호 조건에서는 아크가 그루브에 형성되어 Ex-manifold와 Converter의 용접 이음부에 균일하게 용접 되어 비드 형성이 양호함을 알 수가 있었다. 하지만 토치 3mm 이동 조건과 불량 컨택팁 사용 조건에서는 아크가 Converter의 모재 상단면에 위치하여 용접이 되었으며 용접시 용융금속들은 그루브 내로 흘러 들어가 Ex-manifold의 그루브 면과 융합이 되면서 용접비드가 형성됨을 알 수가 있었다. 육안검사 그리고 누설검사에서 3가지 용접 조건이 다 만족하였다. 하지만 Fig. 5.5에서와 같이 토치 3mm이동, 불량 컨택팁 사용 조건에서는 용접 이음부의 용입이 충분하지 못해 실제 유효 목두께가 작음을 확인 할 수 있었다.

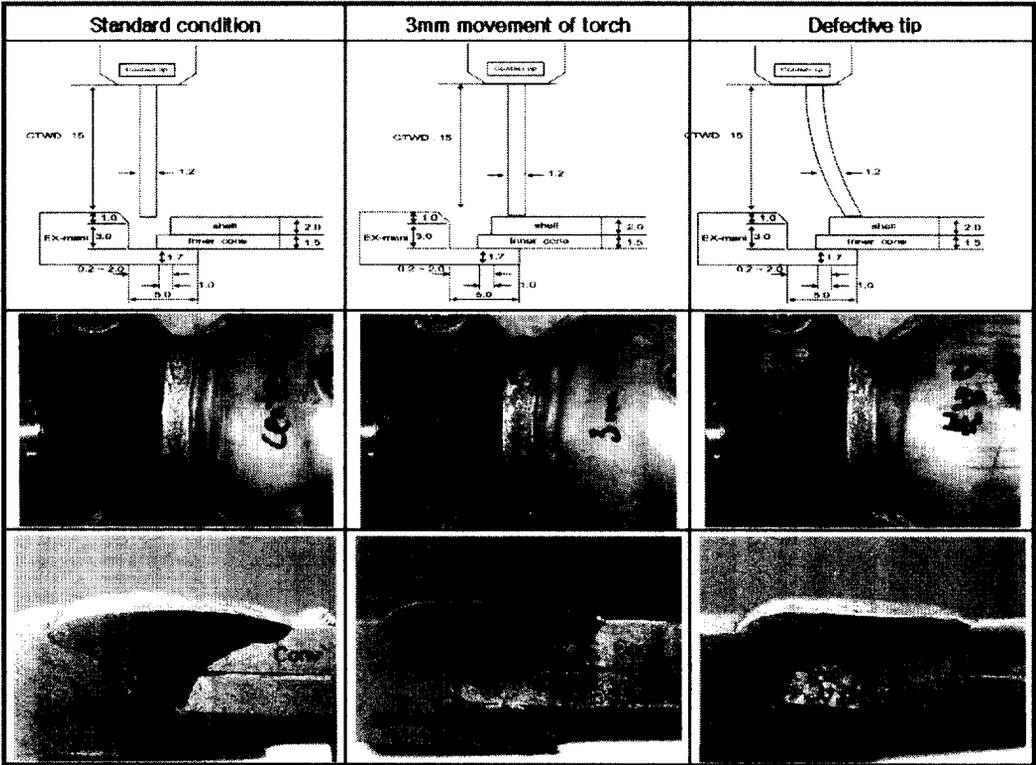


Fig. 5.4 Comparison of bead shape and cross section for each welding condition

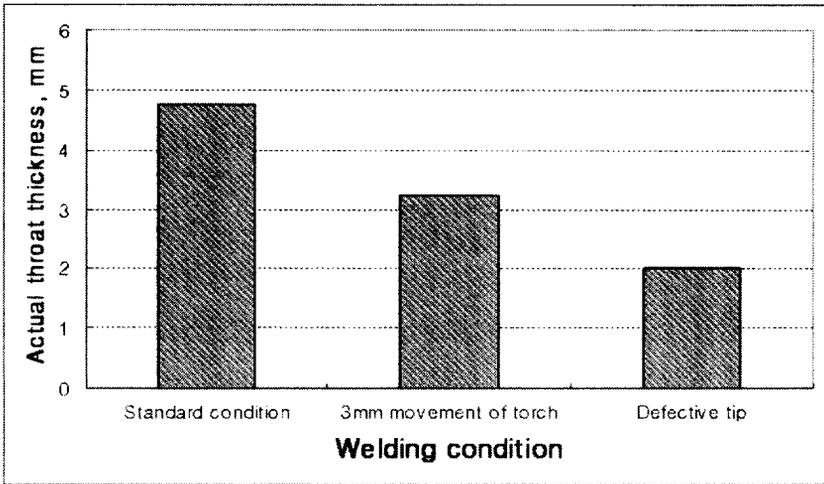


Fig. 5.5 Comparison of actual throat thickness on cross section

### 5.3.2 용접선 추적 불량시의 용접 파형 관찰

Fig. 5.6에 각 용접조건별 파형을 나타내었으며, 용접 전류, 전압 파형에서의 측정 구간을 A부터 F까지 총 6군데로 나누었다. (Fig. 5.1 참고)

용접선 추적 양호시 아크는 그루브 안에 형성되었으며, 특히 그루브의 폭이 넓은 구간인 C구간 또는 E구간에서는 불규칙적인 그루브의 형상에 따라 아크 길이 및 위치도 순간순간 변환되어 전류, 전압 파형에서의 변동이 크게 나타났으며, 이로 인한 아크 저항(아크전압/전류)에서의 변동 또한 크게 나타남을 확인할 수 있었다<sup>5,6)</sup>. 토치 3mm 이탈 조건과 불량 컨택팁 사용 조건에서는 항상 아크가 컨버터의 상단면에 형성되어 용접이 되었으며 그로 인해 전류, 전압파형에서의 변동도 작음을 알 수가 있었다. 그리고 컨버터의 상단면인 A구간에서는 CTWD가 감소하여 전류값이 증가함을 알 수가 있었다.

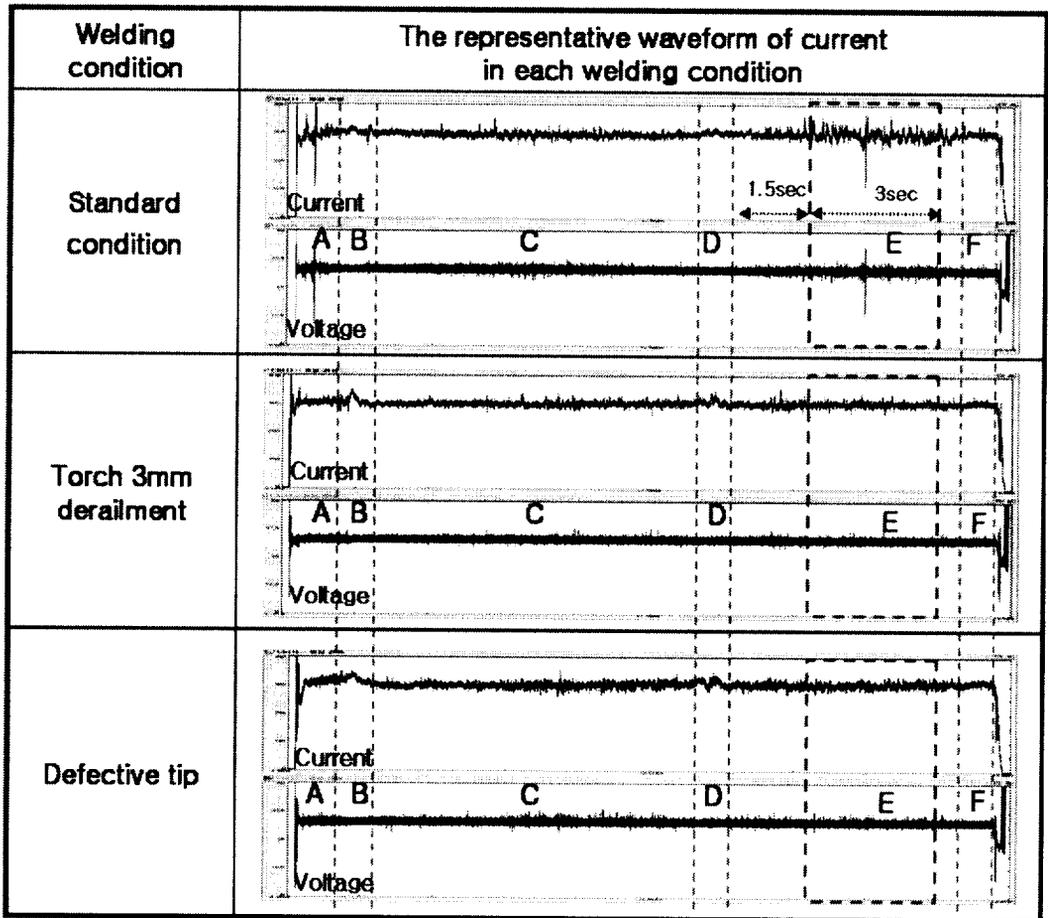


Fig. 5.6 Comparison of waveform for each welding condition

### 5.3.3 구간 평가법 개발

용접 파형을 분석한 결과 용접선 추적 양호시는 그루브 폭이 넓어지는 C구간 또는 E구간에서 전류, 전압 파형의 산포가 커지는 반면 용접선 추적 불량시는 컨버터 날개 구간(B, D)을 제외한 나머지 전 구간에서 전류, 전압의 산포가 작게 나타남을 알 수 있었다. 그리고 용접부 형상에 의한 구간 평가법(A ~ F)은 용접 시간이 변동하게 되면 구간별 측정 시간 및 측정 위치가 변하게 되므로 보다 체계화된 평가법이 필요하게 되었다. 보다 더 정밀한 품질 상태의 평가를 위해 전체 용접 파형을 일정한 등분으로 구간을 나누어 평가하는 방법이 필요하게 되었다<sup>6)</sup>.

따라서 Fig. 5.7에서와 같이 총 용접시간을 항상 25구간으로 나누어 평가함으로써 용접시간이 변하여도 구간별 측정 위치는 항상 일정하게 되는 세분화된 구간 평가법을 개발하였다.

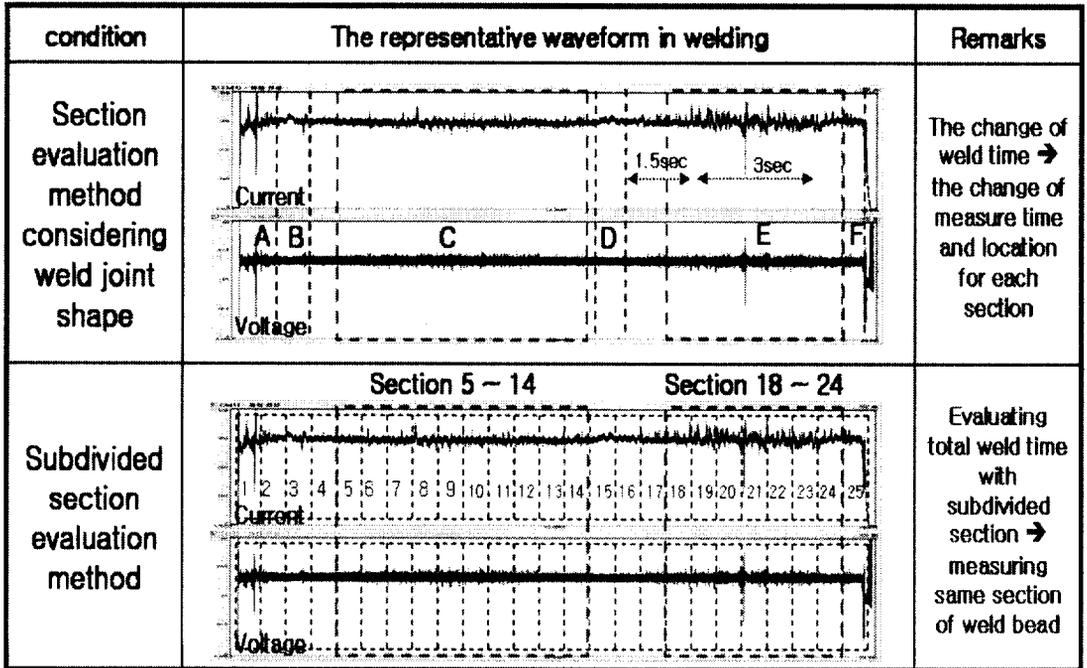


Fig. 5.7 The development of section evaluation method

### 5.3.4 평가 Parameter 개발

T.P. Quinn<sup>2)</sup>등 그 외 논문<sup>5,6)</sup>에서는 용접부 품질 평가를 위한 파라미터로 전류표준편차, 평균전류, 전압표준편차, 평균전압, 아크저항표준편차, 평균저항, 아크상태계수(저항변동특성), 단락시간비를 사용하여 용접부 품질을 평가하였다<sup>2,5,6)</sup>. 특히 T.P. Quinn<sup>2)</sup>은 0.3초 간격으로 구간을 두어 정상용접조건에서 얻어진 전류, 전압값의 표준편차를 가지고서 각 파라미터별 평가 기준을 확립 하였다. 하지만 본 연구에서는 총 용접시간을 항상 25등분으로 세분화 하여 평가 하는 구간 평가법과 특히 그루브 폭이 넓은 특정 구역에서의 전류, 전압값의 변동 차이로 용접선 추적 양호와 추적 불량시의 평가기준을 확립하는 새로운 파형 해석적 기법을 마련하였다. 용접선 추적 양호시와 불량시의 파형을 정밀 분석한 결과 루트갭이 큰 특정구간에서의 최소전류 평균, 최대전압 평균, 최소전압 평균,  $I_{mm}$ (단위구간별  $I_{max} - I_{min}$  전류의 평균),  $V_{mm}$ (단위구간별  $V_{max} - V_{min}$  전압의 평균), 아크저항 표준편차 평균값에서 경향성이 나타남을 알 수가 있었다. Table 5.2는 각 파라미터에 대한 정의를 나타내고 있으며 Table 5.3은 측정된 data, Fig. 5.8에서 Fig. 5.14는 각 파라미터에서 측정된 data를 막대그래프로 나타내어 용접선 추적 양호시와 불량시의 수치적인 판별기준을 점선으로 나타내었고 Table 5.4는 각 파라미터에 대한 평가 기준을 나타내고 있다.

Table 5.2 Definition of parameters

<b>Definition of Parameters</b>	
<b>Name</b>	<b>Definition</b>
P1A	Average of minimum current for section 5~14 , $I_{min}$
P1B	Average of minimum current for section 18~24, $I_{min}$
P2A	Average of maximum voltage for section 5~14 , $V_{max}$
P2B	Average of maximum voltage for section 18~24, $V_{max}$
P3A	Average of minimum voltage for section 5~14, $V_{min}$
P3B	Average of minimum voltage for section 18~24, $V_{min}$
P4A	Average of $\Delta I_{mm}$ ( $I_{max} - I_{min}$ ) for section 5~14 , $\Delta I_{mma}$
P4B	Average of $\Delta I_{mm}$ ( $I_{max} - I_{min}$ ) for section 18~24, $\Delta I_{mma}$
P5A	Average of $\Delta V_{mm}$ ( $V_{max} - V_{min}$ ) for section 5~14 , $\Delta V_{mma}$
P5B	Average of $\Delta V_{mm}$ ( $V_{max} - V_{min}$ ) for section 18~24, $\Delta V_{mma}$
P6A	Average of arc resistance standard deviation for section 5~14 , $S_{ave}$
P6B	Average of arc resistance standard deviation for section 18~24, $S_{ave}$
P7	Average current for section 1, $I_{ave}$

Table 5.3 Measured data for each parameter

Parameter name	Measured data		
	Standard condition	Defective tip	Torch 3mm derailment
P1A	267 A	268 A	276 A
P1B	239 A	268 A	276 A
P2A	36.9 V	37.3 V	36.9 V
P2B	38.0 V	36.9 V	37.0 V
P3A	29.8 V	29.5 V	30.2 V
P3B	26.8 V	29.6 V	30.2 V
P4A	64 A	67 A	56 A
P4B	110 A	72 A	65 A
P5A	7.1 V	7.8 V	6.7 V
P5B	11.2 V	7.4 V	6.8 V
P6A	5.71 mΩ	5.96 mΩ	5.30 mΩ
P6B	7.77 mΩ	6.06 mΩ	5.45 mΩ
P7	288 A	310 A	300 A

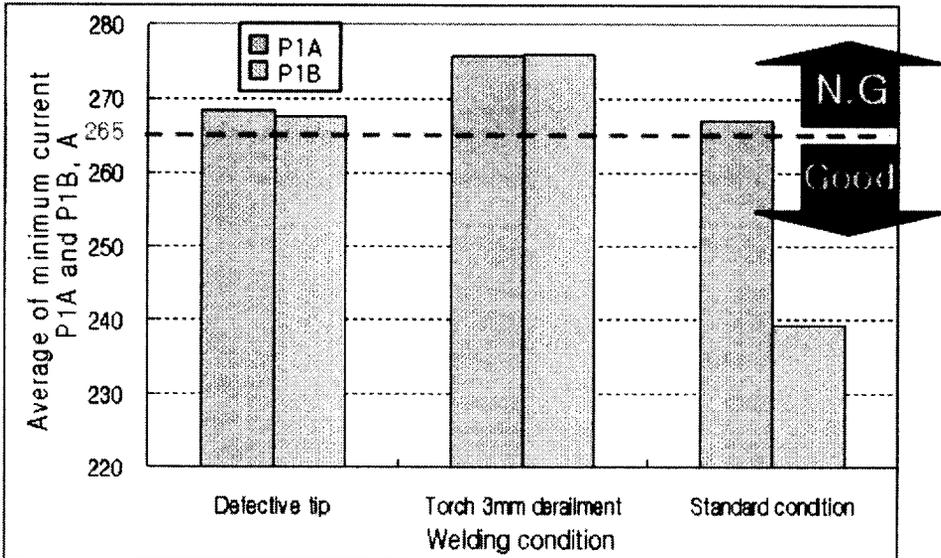


Fig. 5.8 Average of minimum current for P1A and P1B according to seam tracking, I<sub>min</sub>

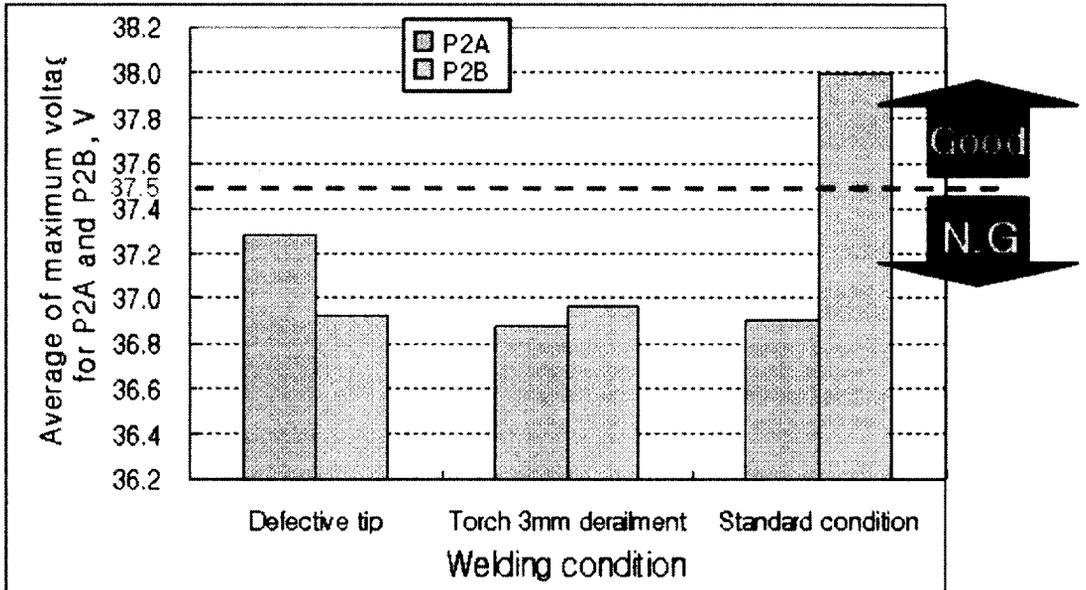


Fig. 5.9 Average of maximum voltage for P1A and P1B according to seam tracking,  $V_{max}$

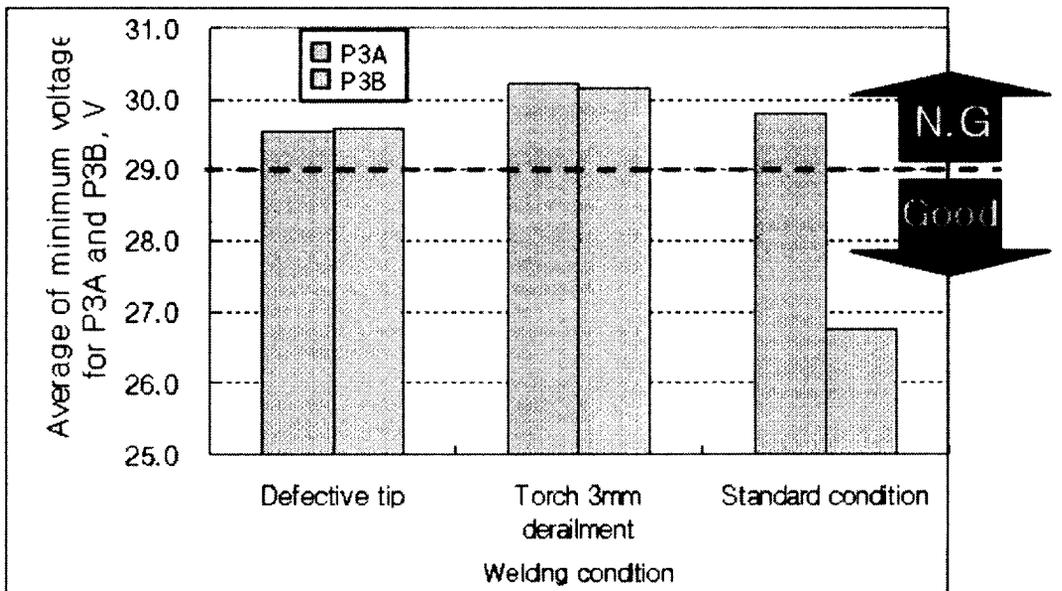


Fig. 5.10 Average of minimum voltage for P1A and P1B according to seam tracking,  $V_{min}$

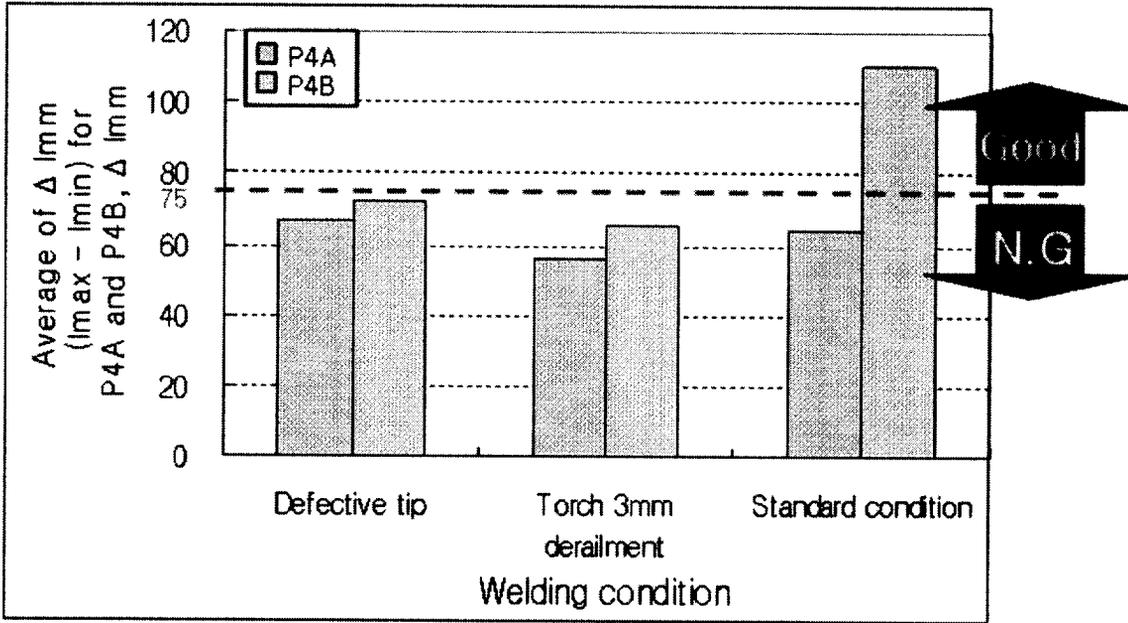


Fig. 5.11 Average of  $Imm$  ( $I_{max} - I_{min}$ ) for P4A and P4B according to seam tracking,  $Imm_a$

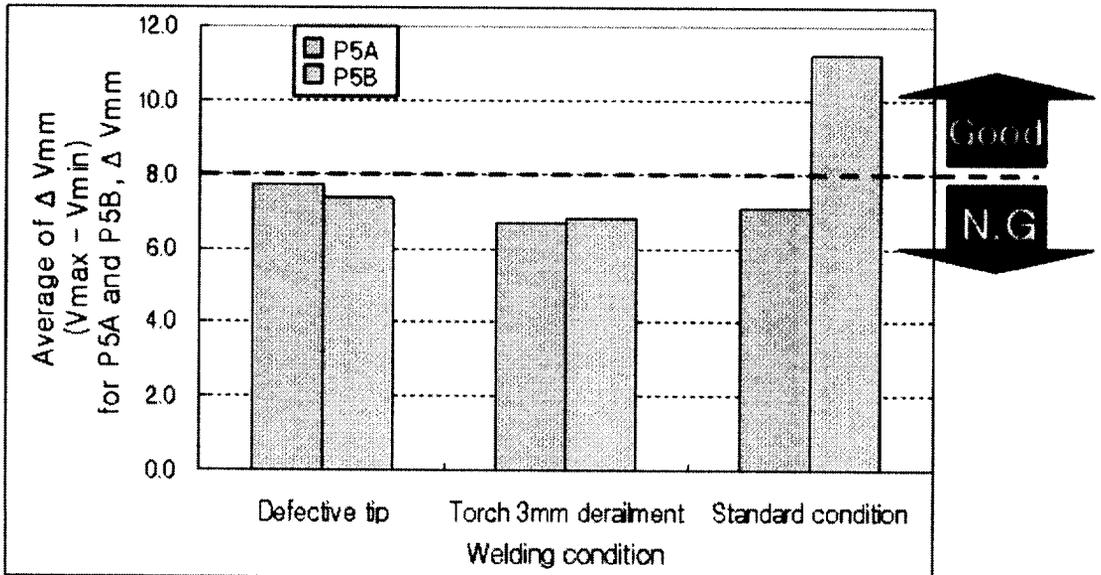


Fig. 5.12 Average of  $Vmm$  ( $V_{max} - V_{min}$ ) for P4A and P4B according to seam tracking,  $Vmma$

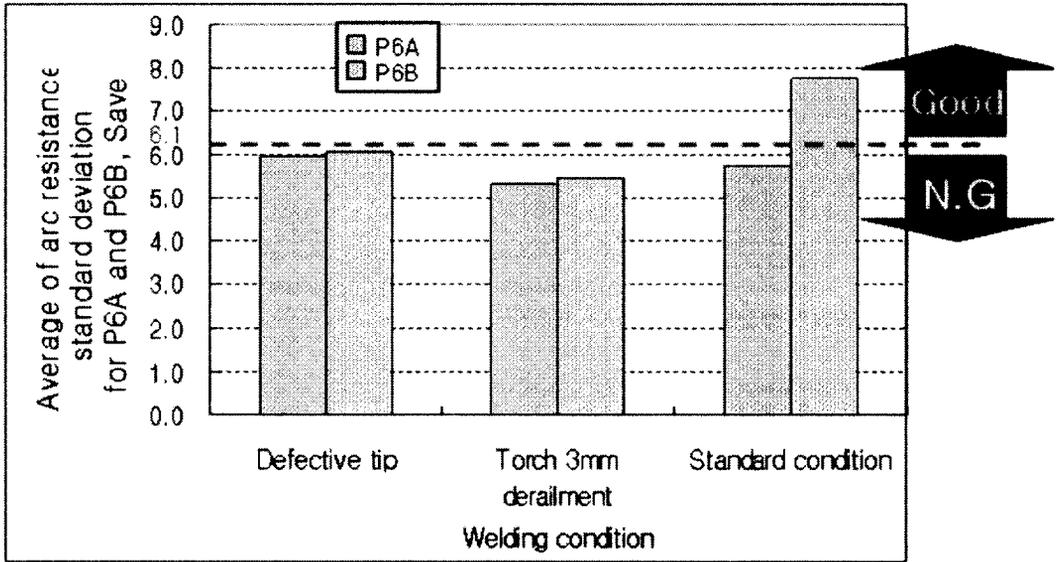


Fig. 5.13 Average of arc resistance standard deviation for P6A and P6B according to seam tracking, Save

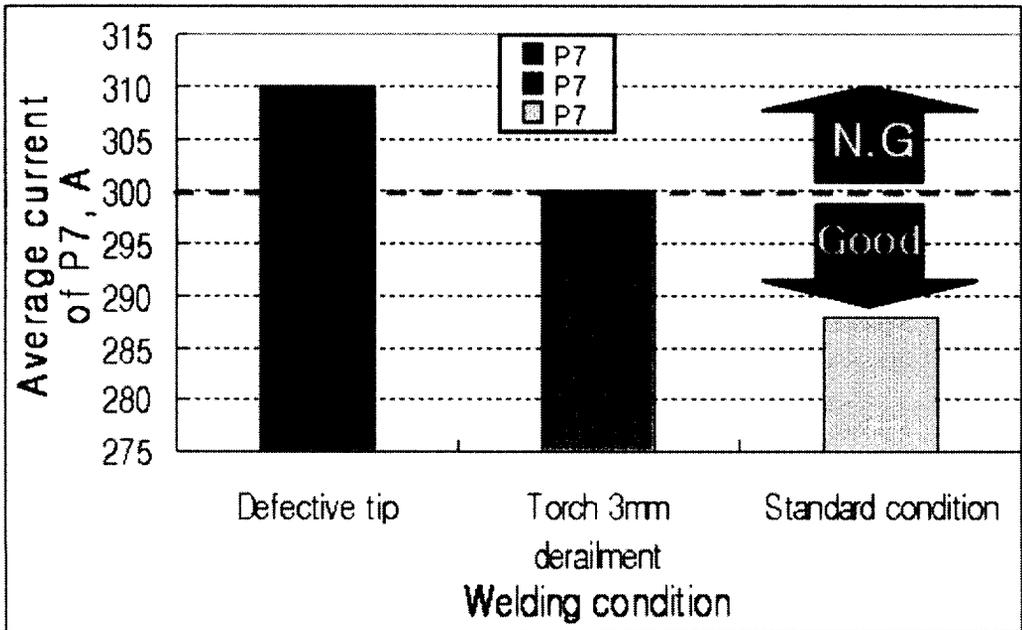


Fig. 5.14 Average current for P7 according to seam tracking,

Table 5.4 Criterion for evaluation

Parameter	Evaluation of seam tracking	
	Good	N.G
P1A ----- P1B	$P1A \leq 265$ or $P1B \leq 265$	$P1A > 265$ and $P1B > 265$
P2A ----- P2B	$P2A > 37.50$ or $P2B > 37.50$	$P2A \leq 37.50$ and $P2B \leq 37.50$
P3A ----- P3B	$P3A \leq 29.0$ or $P3B \leq 29.0$	$P3A > 29.0$ and $P3B > 29.0$
P4A ----- P4B	$P4A > 75$ or $P4B > 75$	$P4A \leq 75$ and $P4B \leq 75$
P5A ----- P5B	$P5A > 8.0$ or $P5B > 8.0$	$P5A \leq 8.0$ and $P5B \leq 8.0$
P6A ----- P6B	$P6A > 6.10$ or $P6B > 6.10$	$P6A \leq 6.10$ and $P6B \leq 6.10$
P7	$P7A < 300$	$P7A \geq 300$

### 5.3.5 평가 기준에 대한 검증

용접선 추적 양호와 불량에 대한 평가 기준을 확립한 후 용접선 추적 양호시의 파형을 한달 간격으로 세 번 더 분석하여 평가 기준에 대한 타당성을 증명하였다.

Fig. 5.15는 jig 1 사용조건에서 용접선 추적양호시의 용접파형을 나타내고 있다. 그루브 폭이 넓은 특정구간(section 5~14, 18~24)에서의 전류, 전압 변동이 크게 나타남을 확인할 수 있다. 평가기준에 대한 검증 결과를 Table 5.5에 나타내었다. 검증 결과 용접선 추적 양부 판정이 잘 됨을 확인할 수 있었다.

Fig. 5.16은 jig 1 사용조건에서 용접선 추적양호시의 용접파형을 나타내고 있다. 그루브 폭이 넓은 특정구간(section 18~24)에서의 전류, 전압 변동이 크게 나타남을 확인할 수 있다. 평가기준에 대한 검증 결과를 Table 5.6에 나타내었다. 검증 결과 용접선 추적 양부 판정이 잘 됨을 확인할 수 있었다.

Fig. 17은 jig 2 사용조건에서 용접선 추적양호시의 용접파형을 나타내고 있다. 그루브 폭이 넓은 특정구간(section 5~14)에서의 전류, 전압 변동이 크게 나타남을 확인할 수 있다. 평가기준에 대한 검증 결과를 Table 5.7에 나타내었다. 검증 결과 용접선 추적 양부 판정이 잘 됨을 확인할 수 있었다.

1) 정상조건(용접선 추적 양호)에서의 각 Parameter 평가 기준에 대한 검증 1

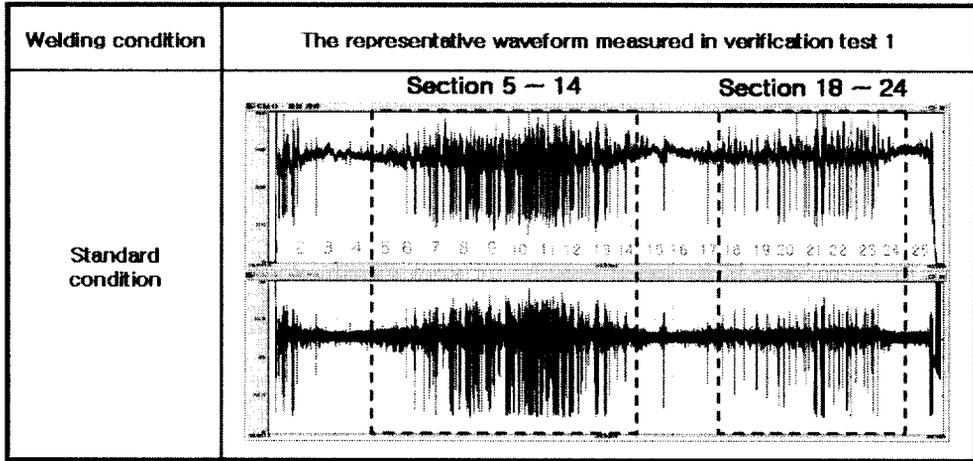


Fig. 5.15 Waveform of standard welding condition

Table 5.5 The result of verification 1

Parameter	Data measured in Verification 1 test	Condition of N.G	Results
P1A	95 A	P1A > 265 and P1B > 265	Good
P1B	136 A		
P2A	44.29 V	P2A ≤ 37.50 and P2B ≤ 37.50	Good
P2B	44.07 V		
P3A	7.0 V	P3A > 29.0 and P3B > 29.0	Good
P3B	10.8 V		
P4A	286 A	P4A ≤ 75 and P4B ≤ 75	Good
P4B	244 A		
P5A	37.3 V	P5A ≤ 8.0 and P5B ≤ 8.0	Good
P5B	30.1 V		
P6A	17.82	P6A ≤ 6.10 and P6B ≤ 6.10	Good
P6B	11.25 mΩ		
P7	271 A	P7A ≥ 300	Good

2) 정상조건(용접선 추적 양호)에서의 각 Parameter 평가 기준에 대한 검증 2

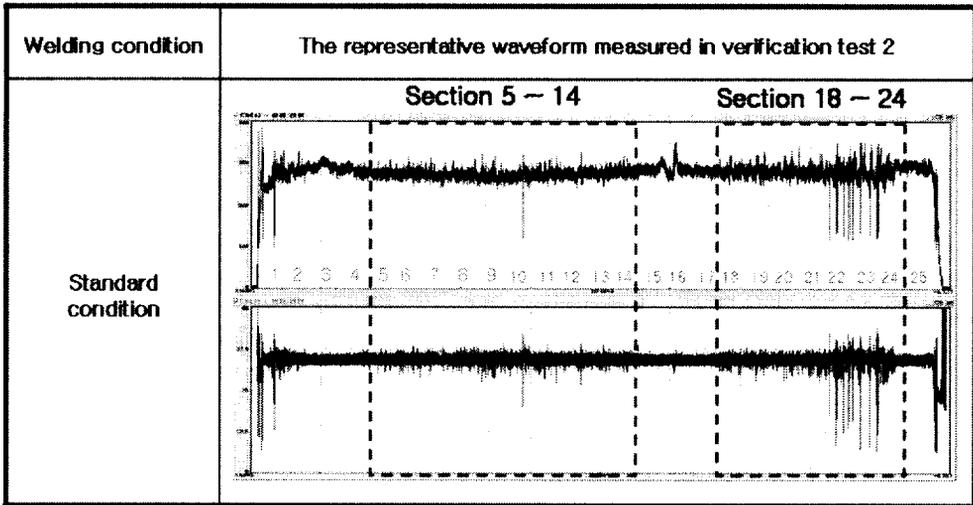


Fig. 5.16 Waveform of standard welding condition

Table 5.6 The result of verification 2

Parameter	Data measured in Verification 2 test	Condition of N.G	Results
P1A	233 A	P1A > 265 and P1B > 265	Good
P1B	191 A		
P2A	39.00 V	P2A ≤ 37.50 and P2B ≤ 37.50	Good
P2B	40.16 V		
P3A	27.94 V	P3A > 29.0 and P3B > 29.0	Good
P3B	20.84 V		
P4A	84 A	P4A ≤ 75 and P4B ≤ 75	Good
P4B	144 A		
P5A	11.05 V	P5A ≤ 8.0 and P5B ≤ 8.0	Good
P5B	19.32 V		
P6A	6.71 mΩ	P6A ≤ 6.10 and P6B ≤ 6.10	Good
P6B	9.08 mΩ		
P7	259 A	P7A ≥ 300	Good

3) 정상조건(용접선 추적 양호)에서의 각 Parameter 평가 기준에 대한 검증 3

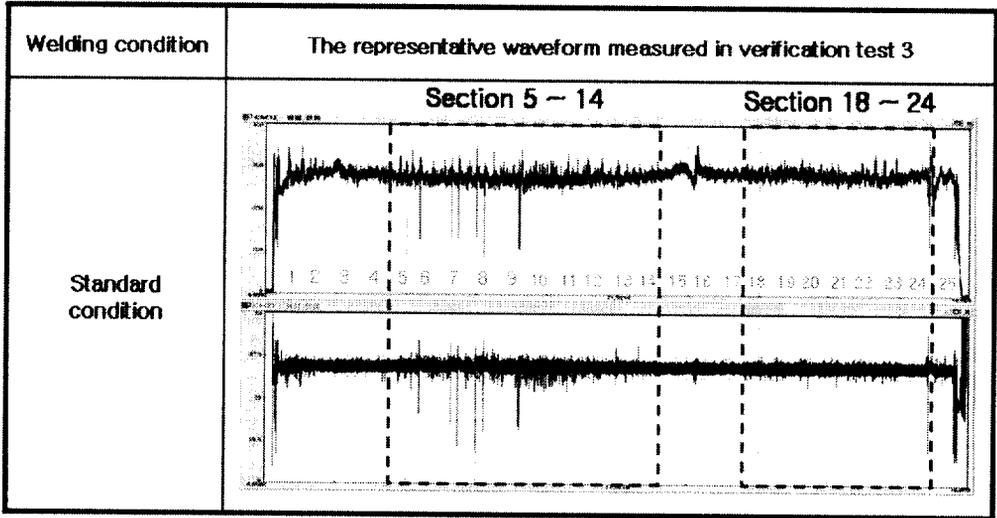


Fig. 5.17 Waveform of standard welding condition

Table 5.7 The result of verification 3

Parameter	Data measured in Verification 3 test	Condition of N.G	Results
P1A	192 A	P1A > 265 and P1B > 265	Good
P1B	236 A		
P2A	39.76 V	P2A ≤ 37.50 and P2B ≤ 37.50	Good
P2B	38.84 V		
P3A	23.00 V	P3A > 29.0 and P3B > 29.0	Good
P3B	27.06 V		
P4A	139 A	P4A ≤ 75 and P4B ≤ 75	Good
P4B	96 A		
P5A	16.76 V	P5A ≤ 8.0 and P5B ≤ 8.0	Good
P5B	11.78 V		
P6A	7.70 mΩ	P6A ≤ 6.10 and P6B ≤ 6.10	Good
P6B	7.55 mΩ		
P7	260 A	P7A ≥ 300	Good

#### 4) 막대그래프 검증 결과

용접선 추적 양호시의 파형을 검증한 결과 평가 기준에 만족하여 용접선 추적 양호로 판정이 됨을 알 수가 있었다. 각 평가 기준에 대한 검증 결과를 Fig. 5.18에서 Fig. 5.24에 막대그래프로 나타내었다.

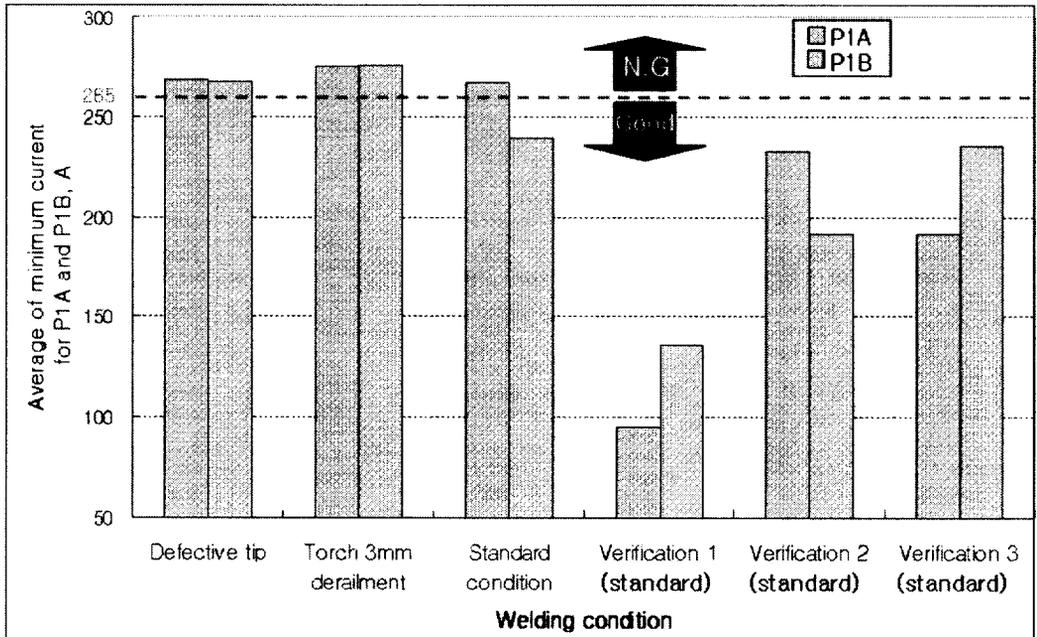


Fig. 5.18 Average of minimum current for P1A and P1B according to seam tracking, I<sub>min</sub>

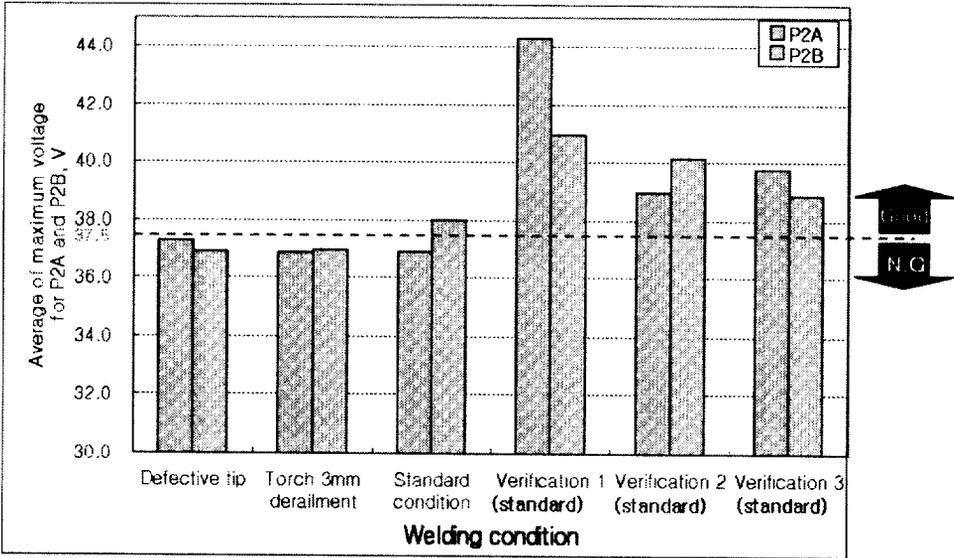


Fig. 5.19 Average of maximum voltage for P1A and P1B according to seam tracking,  $V_{max}$

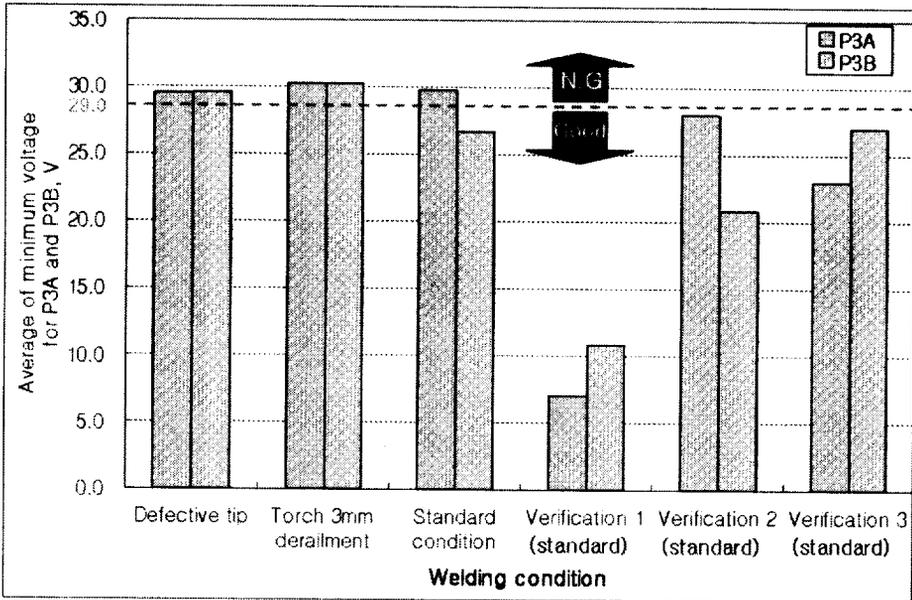


Fig. 5.20 Average of minimum voltage for P1A and P1B according to seam tracking,  $V_{min}$

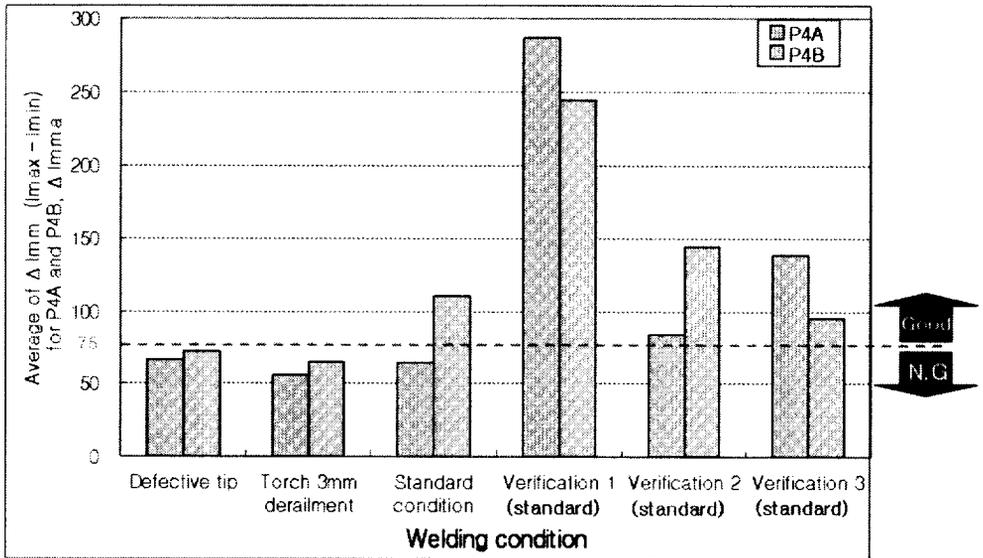


Fig. 5.21 Average of  $I_{mm}$  ( $I_{max} - I_{min}$ ) for P4A and P4B according to seam tracking,  $I_{mma}$

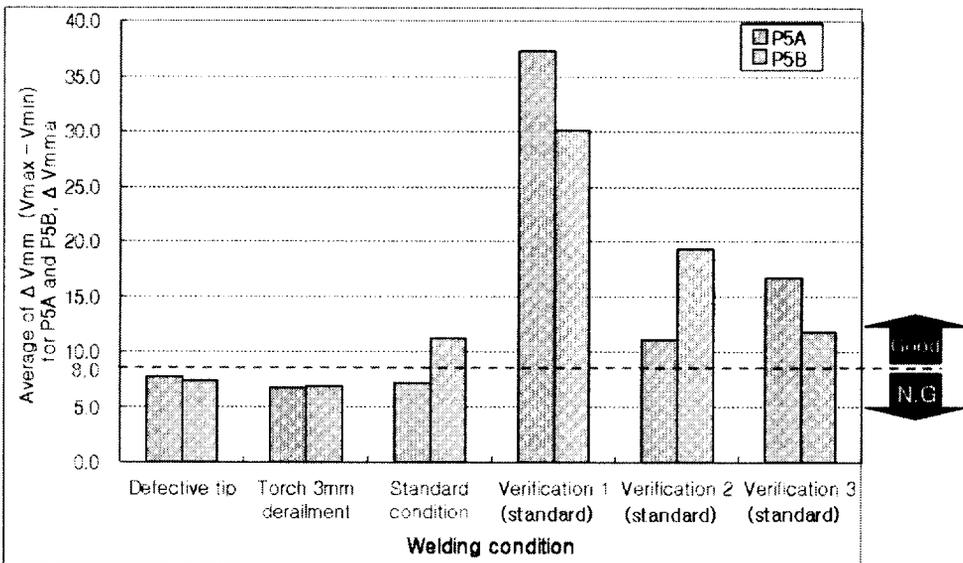


Fig. 5.22 Average of  $V_{mm}$  ( $V_{max} - V_{min}$ ) for P4A and P4B according to seam tracking,  $V_{mma}$

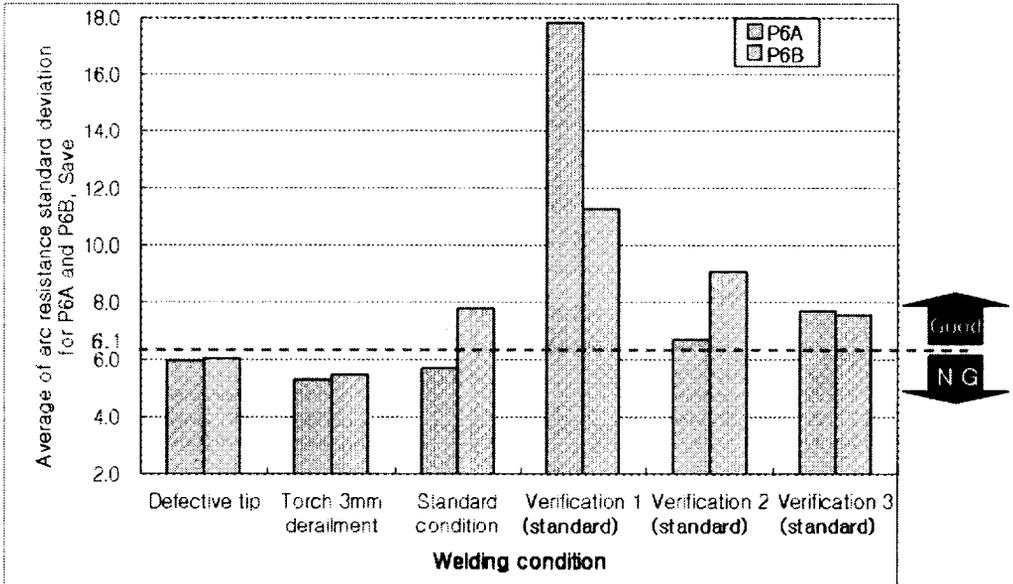


Fig. 5.23 Average of arc resistance standard deviation for P6A and P6B according to seam tracking, Save

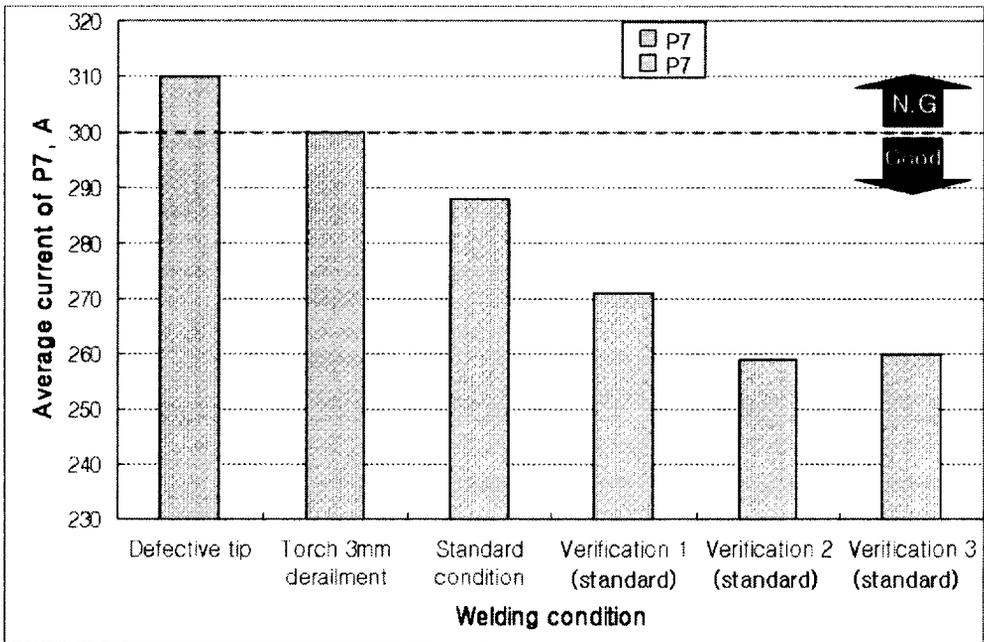


Fig. 5.24 Average current for P7 according to seam tracking

## 5.4 결론

Ex-manifold와 Converter 용접부 비드 단면 및 전류 파형 관찰 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) V-그루브 맞대기 원주용접의 용접선 추적 불량시 아크는 그루브에서 벗어나 모재 상단면에 형성되었으며, CTWD가 감소하여 전류가 증가함을 알 수 있었다.

2) 상기 1)에 의해 모재의 상단면에 형성된 용융금속은 그루브로 흘러내려 응고되었으며, 불완전 용입으로 실제 목두께가 작아짐을 확인할 수 있었다. 그리고 이러한 용접부에 반복 하중이 가해지면 쉽게 크랙이 발생 할 것으로 예상된다.

3) 루트갭이 큰 특정구간에서의 최소전류 평균, 최대전압 평균, 최소전압 평균, Imm(단위구간별  $I_{max} - I_{min}$  전류의 평균), Vmm(단위구간별  $V_{max} - V_{min}$  전압의 평균), 아크 저항 표준편차 평균값을 통해 용접선 추적 양호 공정과 추적 불량 공정을 정량적으로 판별할 수 있었다.

4) 용접 비드의 위치와 형상을 고려하여 전체 용접선 길이를 여러 등분으로 세분하였고 각 구간별로 품질평가를 하여 전체의 용접선 추적 불량이 평가되는 In-line 품질 평가 시스템을 개발 할 수 있었다.

## 제 6장 결론

EX-manifold 와 Converter 자동 MIG 원주 용접에서 용접선 추적불량에 의한 불량품을 검출하기 위하여 용접 전류와 전압의 모니터링에 의한 인라인 품질 평가 방법에 대해 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 모재와 용융금속의 경계면에 용접선 방향으로 용융금속이 채워지지 않은 언더컷과 비드 높이가 높아져 모재의 면과 용접비드의 표면이 교차하는 점인 토우부의 곡률반경이 작아지게 되면 응력이 집중될 가능성이 높기 때문에 반복응력을 받는 구조물의 강도를 저하시키게 된다. 그러므로 반복하중을 자주 받는 EX-manifold와 Converter 자동 MIG 원주 용접 시에는 전진법(down hill)으로 용접하여 넓은 비드 폭과, 낮은 비드 높이를 가지는 용접부를 형성시켜 용접 구조물의 강도를 높이는 것이 바람직하다고 판단된다.
- 2) V-그루브 맞대기 원주용접의 용접선 추적 불량시 아크는 그루브에서 벗어나 모재 상단면에 형성되었으며, CTWD가 감소하여 전류가 증가함을 알 수 있었다.
- 3) 상기 2)에 의해 모재의 상단면에 형성된 용융금속은 그루브로 흘러내려 응고되었으며, 불완전 용입으로 실제 목두께가 작아짐을 확인할 수 있었다. 그리고 이러한 용접부에 반복 하중이 가해지면 쉽게 크랙이 발생 할 것으로 예상된다.
- 4) 용접 시작 구간에서의 평균 전류 그리고 루트갭이 큰 특정구간에서의 최소 전류 평균, 최대전압 평균, 최소전압 평균, Imm(단위구간별  $I_{max} - I_{min}$  전류의 평균), Vmm(단위구간별  $V_{max} - V_{min}$  전압의 평균), 아크 저항 표준편차 평균값을 통해 용접선 추적 양호 공정과 추적 불량 공정을 정량적으로 판별할 수 있었다.
- 5) 용접 비드의 위치와 형상을 고려하여 전체 용접선 길이를 여러 등분으로 세분하였고 각 구간별로 품질평가를 하여 전체의 용접선 추적 불량률이 평가되는 In-line 품질 평가 시스템을 개발 할 수 있었다.

## 참고문헌

1. Handbook of welding and joining, December(1998), 56-67, 143-169 (in korean)
2. T.P.Quinn, C. Smith, C. N. McCowan, E. Blachowiak and R. B. Madigan : Arc Sensing for Defects in Constant-Voltage Gas Metal Arc Welding, Welding Reserch Supplement, September(1999), 322-328
3. M. J. M. Hermans and G. Den Ouden : Process Behavior and Stability in Short Circuit Gas Metal Arc Welidng, Welding Reserch Supplement, APRIL(1999), 137-140
4. C. S. Wu, M. A. Chen, S. K. Li : Analysis of excited droplet oscillation and detachment in active control of metal transfer, Computational Materials Science 31 (2004) 147-154
5. Sang-Myung Cho, Kyu-Won Choi and Kwang-won Lee : Trends of Monitoring Technology for the Arc Welding Quality  
Journal of KWS. vol. 18, No4 August(2000), 417-423 (in korean)
6. Hoon-Sung Yoon, Kyu-Won Choi, Chang-Joon Yoon, Sang-Myung Cho :  
Development of in-line monitoring system for quality monitoring and backtracking of failure in robot arc welding process, Proceeding of the 2005 Autumn Annual Meeting of Korean Welding Society (in korean)

## 감사의 글

2002년 9월경 참 무식한 돌 하나가 용접 IT연구실에 들어왔습니다. 그리고 그 무식한 돌은 석사 과정이라는 험난한 강을 통해 2006년 1월 현재 반짝반짝 빛나는 조약돌이 되었습니다. 참 인간승리입니다.

가장 먼저 고개 숙여 감사의 말씀을 전하고 싶은 분은 바로 저희 지도 교수이신 조 상명 교수님이십니다. 저의 모난 흙을 단호히 깎아주신 분이시기 때문입니다. 항상 덩벙대고, 논리적이지 못했던 저였기에 교수님 으로부터 꾸지람도 많이 들었지만, 달라진 제 모습을 볼 때면 그 이유를 새삼 느낄 수가 있기 때문입니다.

학부, 대학원 과정동안 많은 지도를 해주신 김우열 교수님, 박홍일 교수님, 김성규 교수님, 이병우 교수님, 방국수 교수님, 서원찬 교수님, 이길근 교수님들께도 감사의 말씀을 올립니다. 논문 완성을 위해 많은 조언을 해주신 김우열 교수님, 서원찬 교수님께도 다시 한번 감사드립니다.

처음 연구실에 들어온 저에게 많은 도움을 주셨던 조호재, 김진우, 공현상, 탁정수, 김기정 선배님들께 고마움을 전하고 싶습니다. 그리고 항상 주경야독 하시던 오동수, 황동수, 고명훈, 고미혜 박사과정 선배님들께도 고마움을 전하고 싶습니다. 항상 열심히 노력하는 후배들, 고찬식, 조진안, 윤승종, 김대만, 문영덕, 김진욱, 함효식, 김성덕, 황규민, 배광무, 오리에게도 고마움을 전하고 싶습니다.

우리 정사모이자 금사빠 모임인 김영주(희노애락을 같이한 my lovely junior), 김인태군에게도 정말 수고했다고 진심으로 전하고 싶습니다. 삶의 활력소가 되어준 이정현양에게도 진심으로 고마움을 전하고 싶습니다.

또한 제가 지금 여기까지 달려 올수 있게 묵묵히 지원해 주신 나의 누님(유희정) 그리고 부모님께 진심으로 감사의 마음을 전합니다. 항상 열심히 살아 갈 것임을 내 자신에게 약속하며 본 논문을 마칩니다.