



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

Semi-narrow gap 맞대기 용접부에서
피로강도 향상을 위한 펄스GMAW
공정개발



2012년 12월

부 경 대 학 교 대 학 원

신소재시스템공학과

변 재 규

공 학 석 사 학 위 논 문

Semi-narrow gap 맞대기 용접부에서
피로강도 향상을 위한 펄스GMAW
공정개발



이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2012년 12월

부 경 대 학 교 대 학 원

신소재시스템공학과

변 재 규

변재규의 공학석사 학위논문을 인준함

2012년 12월



주 심 공학박사 이 병 우 (인)

위 원 공학박사 서 원 찬 (인)

위 원 공학박사 조 상 명 (인)

목 차

Abstract	1
제 1 장 서 론	2
1.1 연구 배경 및 필요성	2
1.2 연구 목적 및 개요	4
제 2 장 이론적 배경	5
2.1 GMAW의 원리	5
2.2 용접의 이행형태	6
2.3 Pulse 용접	9
2.3.1 Pulse energy 정의	11
2.3.2 Comparative arc length 정의	12
2.4 피로강도 및 피로균열 발생 원리	13
2.4.1 유압실린더 원주 용접부 피로균열 발생 현상	13
2.4.2 용접부 피로강도 지배요인	15
2.5 기존의 용접부 피로강도 향상기법	16
2.6 본 연구의 피로강도 향상을 위한 3대 기술전략	18
2.7 정도에 따른 피로수명의 일반적 경향에 대한 고찰	21
제 3 장 피로시험편 제작을 위한 용접	23
3.1 서언	23
3.2 1.4mm 와이어에서 최적 파형설정	23
3.2.1 완전 스프레이 이행을 펄스파형결정 방법	23
3.2.2 실험재료 및 방법	24
3.2.3 실험결과 및 고찰	25

3.3 시험편 종류.....	28
3.3.1 시험편의 화학성분 및 기계적 특성.....	29
3.4 기존 R4 시험편 적층계획.....	31
3.4.1 적층계획 및 용접조건.....	31
3.4.2 실험결과 및 고찰.....	32
3.5 Pass1의 재용융을 위한 R31시험편 적층계획.....	33
3.5.1 적층계획 및 용접조건.....	33
3.5.2 실험결과 및 고찰.....	34
3.6 Pass1의 재용융을 위한 R32시험편 적층계획.....	35
3.6.1 적층계획 및 용접조건.....	35
3.6.2 실험결과 및 고찰.....	36
3.7 결론.....	37
 제 4 장 SM45C 혼합물에 따른 경화성 조직 변화.....	38
4.1 서언	38
4.2 SM45C 혼합물 개념	38
4.3 R4, R3-1, R3-2 시험편 단면 검토	40
4.3.1 RAc 비교.....	40
4.3.2 용접금속 조직 검토.....	43
4.3.3 경도 분포 검토.....	45
4.3.4 결과 및 고찰.....	48
4.4 결론	49
 제 5 장 피로시험	50
5.1 서언	50
5.2 피로시험을 통한 R4 S-N 커브	50
5.2.1 시험 재료 및 방법.....	50
5.2.2 기존 R4시험편 시험결과 및 고찰.....	52
5.3 피로시험을 통한 S-N 커브 비교.....	53
5.4 수평 Notch길이에 따른 피로강도 비교 및 검토	54
5.5 수평 Notch길이에 따른 피로강도 비교 및 검토	56

5.6 결언	57
제 6 장 결론	58
참고문헌	59



Development of pulse GMAW process to improve the fatigue strength in Semi-narrow gap butt welds

Jae Gyu, Byun

*Dept. of Materials System Engineering,
The Graduate School, Pukyong National University*

Abstracts

The problem occurred that the Fatigue strength has been dropped substantially in the changing course of existing welding joint groove from R4 to R3 in order to improve the productivity of the Semi-narrow gap Butt welds area in hydraulic cylinder tube. In this study, the stable Pulse Gas metal arc welding (GMAW) process has been developed using the wire Φ 1.4mm from the CW process using the existing wire Φ 1.2mm in order to improve this problem.

It has been designed to expand the bead gradually by forming the welding bead and the slope using 50% of this welding current of the start current when the arc start and the tack welding are done in order to prevent the defect in the arc start area and the tack welding area easy to occur the defect. Therefore, the process decreasing the deviation of Fatigue strength to remove the defect part sufficiently by remelting the area designed by the low current has been established.

The stable Pulse Gas metal arc welding (GMAW) process has been established to make the Fatigue strength equals or superiors to R4 groove by changing the length and Root face of Notch area in the R3 groove of welding joint and by mitigating the increase of degree of hardness of welding metal by decreasing the melting rate in the part of SM45C.

Key Words : Fatigue strength, Narrow gap, Pulse GMAW, Butt welds

제 1장 서론

1.1 연구배경 및 필요성

Fig. 1.1은 굴삭기의 유압실린더암을 표시한 것이다¹⁾. 이러한 굴삭기에 사용되어지는 유압실린더의 원주 용접부는 Fig. 1.2에 나타내었다. 현재 유압실린더의 원주 용접부는 Semi-narrow gap으로 용접을 하고 있으며 Semi-narrow gap의 루트부 반경R은 Fig. 1.3의 (a)와 같이 4mm로 용접되어지고 있다.



Fig. 1.1 Hydraulic cylinder of excavator

유압실린더 원주 용접부의 생산성 향상을 위하여 이러한 루트부 반경R을 Fig. 1.3의 (b)와 같이 3mm로 변경하였고, 생산성은 약 19%향상되었다. 하지만 R4를 R3로 변경하면서 피로수명이 기존의 R4보다 새로운 신규공정인 R3가 약 1/2수준으로 감소하였다.

따라서, 요구 피로수명을 얻으면서 생산성을 향상시키기 위해서는 새로운 용접공정의 확립이 필요하게 되었다.

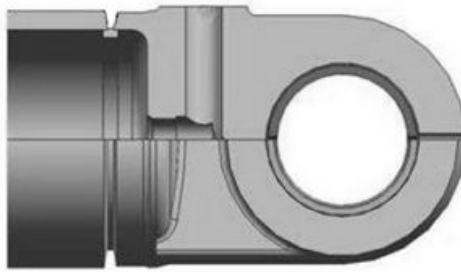
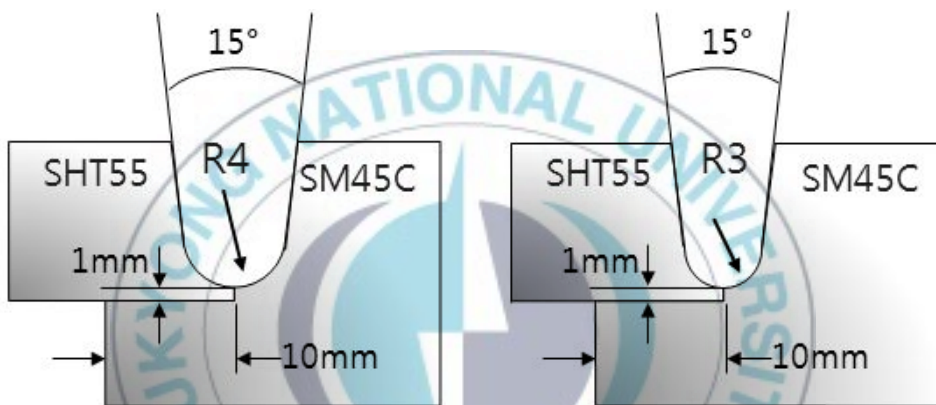


Fig. 1.2 Design of hydraulic cylinder



(a)R4 (As-is)

(b)R3 (New)

Fig. 1.3 Schematic of semi-narrow gap groove

1.2 연구 목적 및 개요

본 연구는 유압실린더 Semi-narrow gap 원주용접부의 피로강도를 향상시키기 위하여 새로운 용접공정의 확립을 목적으로 한다.

Semi-narrow gap의 루트부 반경이 4mm인 R4를 3mm로 변경시킨 R3로 용접하여 R4의 피로수명과 동등이상의 피로수명을 가지게 하는 것과 용접부의 결함이 발생하지 않도록 용접공정을 안정화 시키고, 생산성을 향상시키기 위하여 $\Phi 1.4$ 와이어 펄스용접을 통한 용접공정 확립을 목적으로 한다.

기존은 $\Phi 1.2\text{mm}$ 와이어로 이미 한계의 용접전류를 사용하고 있는 CW 용접으로 공정이 이루어져 있었고, 이는 더 이상 생산성을 향상시키는 것은 한계라고 볼 수 있었다. 생산성을 증가시키기 위하여 $\Phi 1.4\text{mm}$ 와이어 펄스 용접으로 용접전류를 증가시키고 최적화 하였다.

용접결함이 발생할 수 있는 Pass1의 용착단면적을 줄이고, Pass2에서 Pass1을 재용융 시킴으로서 용접결함으로 인한 피로수명의 편차를 감소시키고, Notch부 길이를 감소시켜 구조적인 응력집중을 완화하였다.

또한 Pass1의 용착단면적을 감소시킴으로서 Pass1의 용입 깊이를 낮추었고 이를 통해 SM45C의 용융단면적을 적게 하여 WM의 경도를 감소시켰다.

제 2장 이론적 배경

2.1 GMAW(Gas Metal Arc Welding)의 원리

GMAW(Gas Metal Arc Welding)는 소모전극을 사용하는 방법으로 용가재로 작용하는 와이어를 일정한 속도로 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.²⁾

이 용접법은 사용되는 보호가스의 종류에 따라 분류되고 있는데, Ar과 같은 불활성가스를 사용하는 경우를 MIG(Metal Inert Gas)용접, 순수 탄산가스만을 사용하는 경우를 CO₂용접, 탄산가스와 Ar가스를 혼합하여 사용하는 경우를 MAG (Metal Active Gas)용접이라 한다.

이 용접법은 비교적 세경(0.9~1.6mm)의 전극와이어를 사용하므로 대전류 밀도가 가능하게 되어 용착속도가 높고, 용접 로봇이나 자동화기기를 사용하여 용접 자동화가 비교적 용이하므로 용접 생산성을 높일 수 있다.

본 연구에서는 80%Ar과 20% CO₂를 사용하는 MAG용접을 사용하였다.

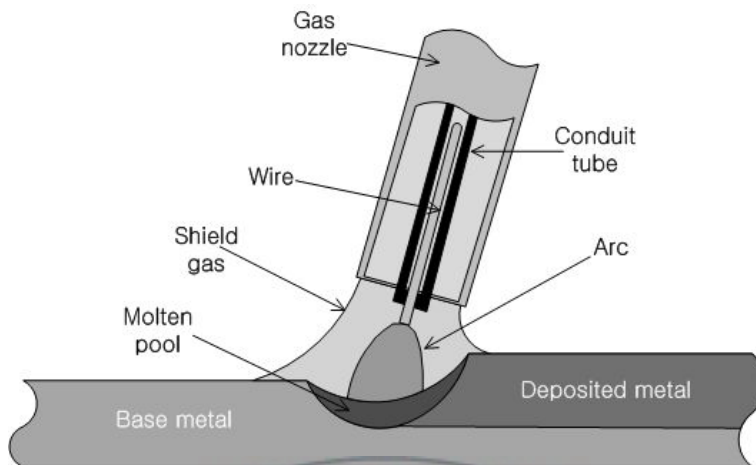


Fig. 2.1 Schematic of molten pool with electrode angle

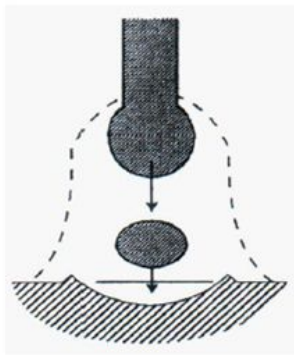
2.2 용적의 이행 형태

GMAW에 있어서 용적이행이란 와이어에서 용융된 금속이 용융지로 이행하는 현상을 말하는 것으로 단순히 금속이행(Metal transfer)이라고도 한다. 용적 이행은 용접재료, 보호가스, 용접조건 등에 따라 여러 가지 형태로 나타난다. Table 2.1은 국제 용접학회(IIW)에서 분류하고 있는 용적 이행 형태를 나타낸 표이다. GMAW에서 용적이 이행하는 현상은 크게 2가지로 분류할 수 있다. 첫 번째로 와이어 선단에서 생성된 용적이 와이어로부터 이탈되어 금속방울 상태로 아크기둥을 거쳐 용융지로 이동하는 형태로서 자유비행이라 한다. 이것은 다시 이행하는 용적크기에 따라 입상용적 이행과 스프레이 이행으로 나눌 수 있다. 두 번째는 와이어선단에서 형성된 용적이 용융지와 접촉하여 가교(Bridging)를 형성하여 이행하는 형태인데, 이 때 전기적인 단락이 발생하기 때문에 단락이행이라 한다. Ar가스를 주성분으로 하는 MIG 용접에서는 용접전류가 증가함에 따라 특정전류에서 용적의 크기가 급격히 변화한다. 이러한 전류를 천이전류라

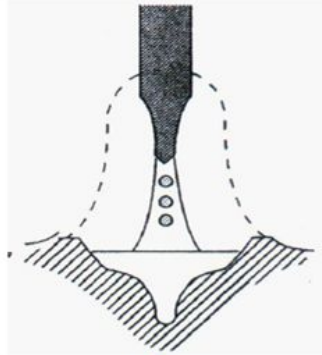
하고, 용접전류가 천이전류 보다 낮을 때는 입상 용적 이행이 일어나고, 천이전류 이상일 때는 용적의 크기가 와이어 직경과 비슷하거나 작은 용적이 초당 수백회 정도의 횟수로 이행하는 현상이 일어난다. 이러한 형태를 스프레이 이행이라고 한다. 스프레이 이행은 전류의 크기에 따라 프로젝티드 이행, 스트리밍 이행, 로테이팅 이행으로 나누게 되는데, 프로젝티드 이행은 천이전류 직상의 범위에서 나타나는 이행으로 용적의 크기는 와이어의 직경과 비슷하고, 아크는 매우 안정적 이면서도 소음이 적다. Fig.2.2는 프로젝트 이행일 때의 아크현상과 용적이행에 대해서 나타낸 것이다.

Table 2.1 The classification of transfer of molten metal (IIW)

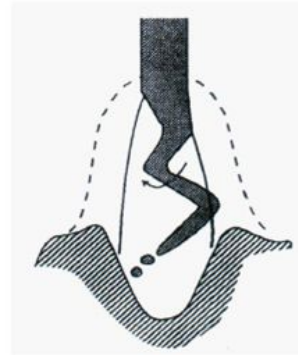
이행 형태명(transfer type)	나타나는 용접법
1. 자유이행(free flight) 1.1 입상용적(globule)이행 (1) 낙하(drop)이행 (2) 반발(repel)이행 1.2 스프레이(spray)이행 (1) 프로젝티드(project)이행 (2) 스트리밍(streaming)이행 (3) 회전(rotating)이행 1.3 폭발이행	중대전류 FCAW 저전류 GMAW 중대전류 CO ₂ 용접 중간전류 MAG, MIG 중대전류 MAG, MIG 대전류 MAG, MIG SMAW
2. 교락이행 2.1 단락(short circuit)이행 2.2 연속교락이행	저전류 GMAW TIG 용가재 첨가
3. 슬래그 보호(slag protect)이행 3.1 벽면(wall)이행 3.2 기타의 모드	SAW SMAW, FCAW, Electroslag 용접



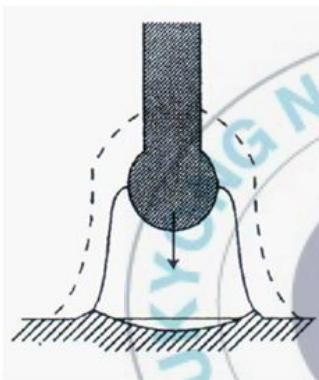
(a) Project transfer



(b) Streaming transfer



(c) Rotating transfer



(d) Drop transfer



(e) Repel transfer



(f) Short circuit transfer

Fig 2.2 Various type of metal transfer in GMAW

2.3 Pulse 용접

GMAW 용접에서 pulse를 사용하는 이유는 CW(Continuous Welding)용접에 비해서 상대적으로 낮은 전류에서 안정적인 스프레이 이행을 가능하게 할 수 있다는 장점이 있다. 또한 펄스 스프레이 이행은 용융풀 냉각 효과가 있다.³⁾

낮은 전류 영역에서는 와이어가 용융풀과 접촉하는 단락이 발생하고, 단락을 해소하기 위하여 상대적으로 높은 피크전류가 발생되고 아크 재점호시, 다량의 스패터가 발생(Fig. 2.3)하기 때문에, 단락이 일어나지 않는 스프레이 이행의 구현이 아주 중요하다. 펄스 용접에서 가장 이상적인 이행의 One Pulse, One Drop⁴⁾ 즉 1개의 펄스주기에서 1개의 용적이 모재로 이행되는 것이다. (Fig. 2.4)

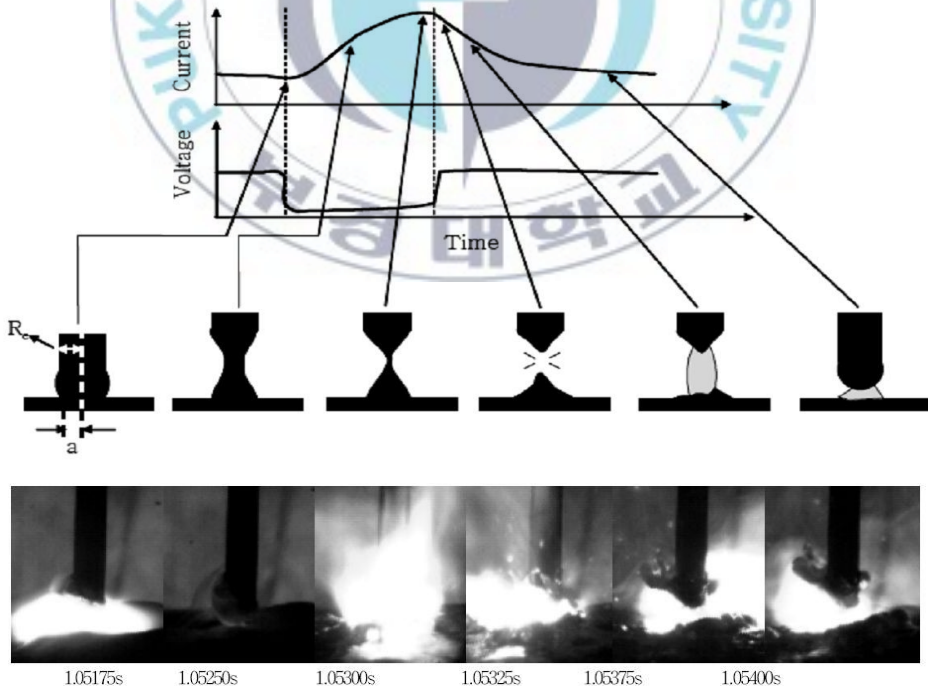


Fig.2.3 Schematic of short circuit and arc reignition spatter

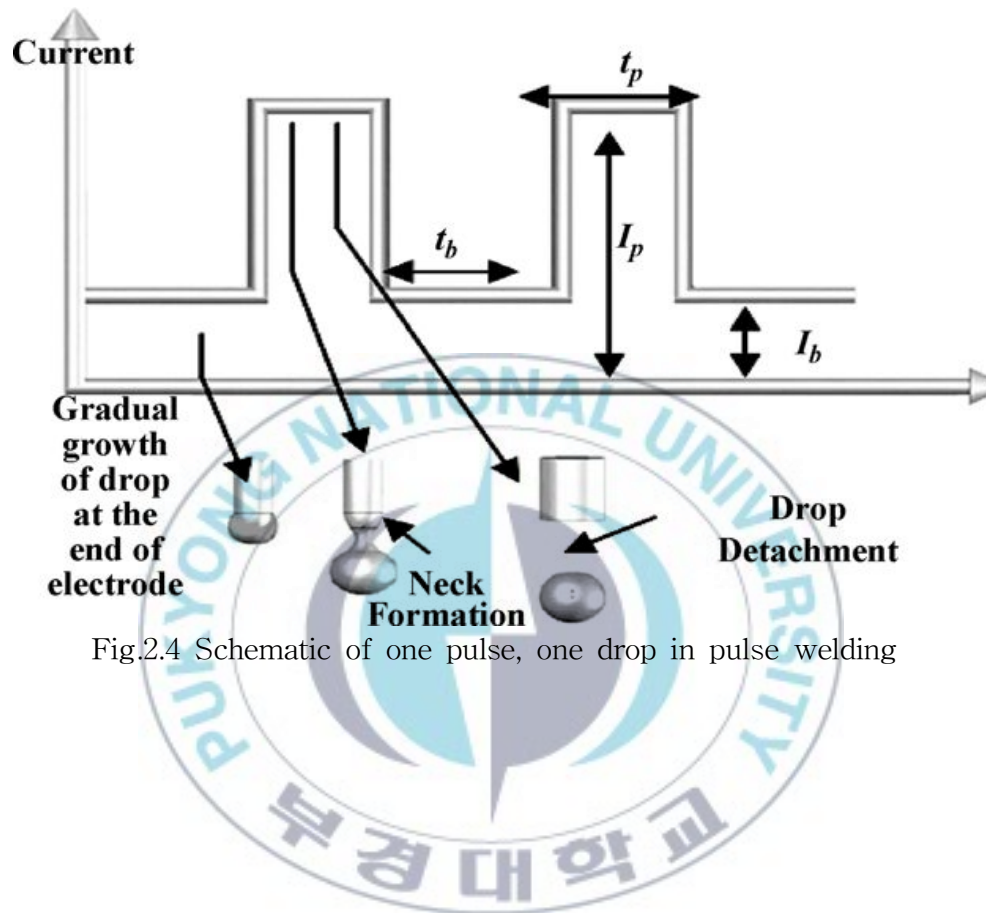


Fig.2.4 Schematic of one pulse, one drop in pulse welding

2.3.1 Pulse energy 정의

RPC (Relative Peak Current)는 Fronius 용접기 펄스파형 전류 및 펄스시간의 상대적 크기를 제어하는 pulse parameter로서, -5~+5사이의 값을 가진다.

Pulse Energy를 +5쪽으로 증가 시키면 펄스파형 전류의 크기와 펄스시간이 상대적으로 커지게 되고, -5쪽으로 감소시키면 펄스파형 전류 및 펄스시간의 크기가 상대적으로 작아지는 경향을 가진다.

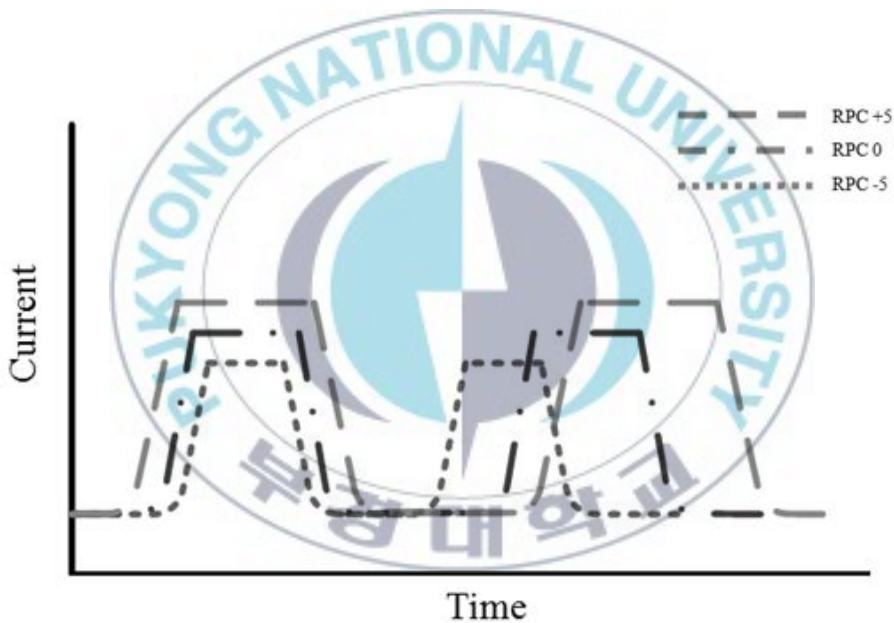


Fig.2.5 Schematic of pulse energy

2.3.2 Comparative arc length (상대적 아크길이) 정의

ALR (Arc Length Ratio)은 Fronius 용접기 아크길이를 제어하는 pulse parameter로서, $-30 \sim +30$ 사이의 값을 가진다. Comparative arc length를 $+30$ 쪽으로 증가 시키면 아크길이는 상대적으로 커지게 되고, -30 쪽으로 감소시키면 아크길이는 상대적으로 작아지는 경향을 가진다.

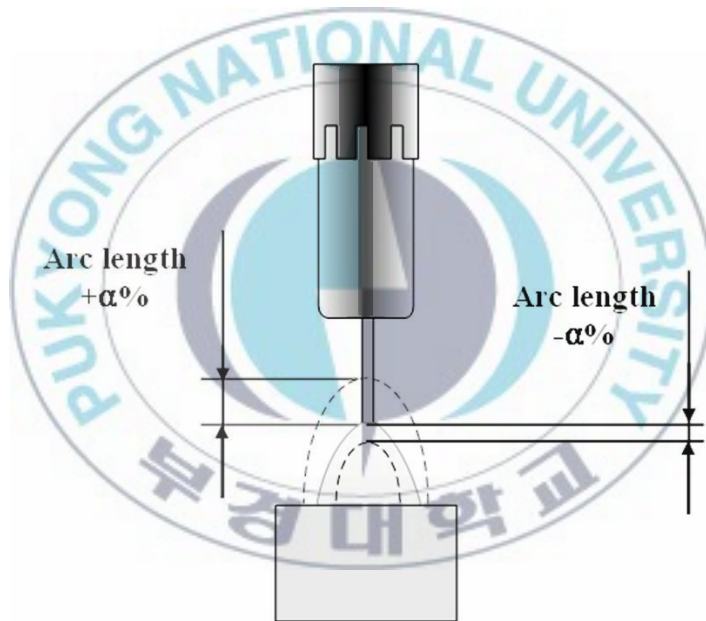


Fig. 2.6 Schematic of comparative arc length

2.4 피로강도 및 피로균열 발생 원리

2.4.1 유압실린더 원주 용접부 피로균열 발생 현상

파괴는 일반적으로 Fig. 2.7의 Mode I 과 같은 개구형, ModeⅡ로 나타내는 면내 전단형, ModeⅢ의 면외 전단형 이 3가지 모드로 진행하게 된다.

본 연구에서의 피로파괴는 주응력과 수평한 수평 Notch부에서 ModeⅡ의 파괴가 일어나 피로균열이 생성되면 Mode I의 파괴로 급격하게 피로균열이 전파하여 피로 파괴하게 된다. 이 때 하중이 동일하다면 Mode I의 진전속도는 동일하지만, 수평 Notch길이가 다르면 ModeⅡ의 파괴모드에서 피로균열 생성속도가 달라지게 된다. 이는 식 (2.1)에서 균열길이(a)가 감소하면 제곱근에 비례하여 전단응력은 감소하기 때문에 균열발생율은 낮아지게 된다.

$$K_{II} = \tau \sqrt{\pi a} \quad \text{-----} \quad (2.1)$$

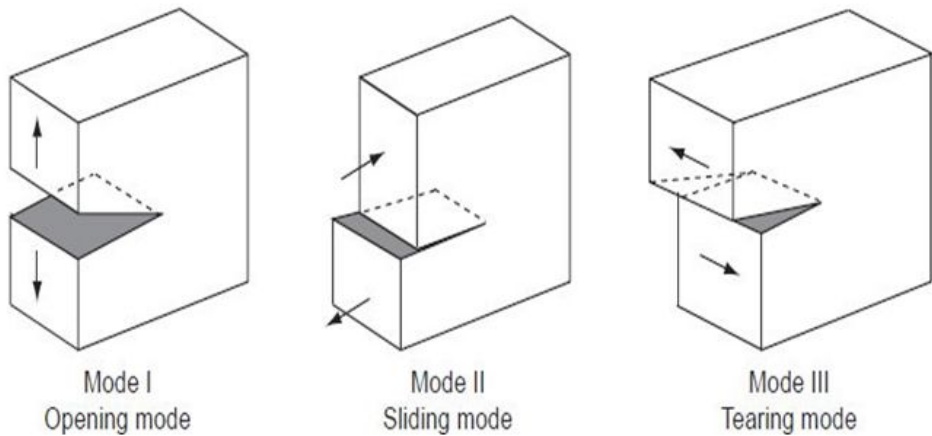


Fig. 2.7 Schematic of fracture mode

유압실린더 원주 용접부에서 Fig. 2.8과 같이 반복하중을 받게 되면 구조적인 응력집중⁵⁾으로 인하여 수평 Notch부와 접한 WM의 fusion line에서 가장 큰 응력이 발생하게 되고, 이때 균열이 발생하면 경도가 높은 WM 안으로 피로균열은 전파하게 된다.

이는 수평 Notch부가 구조적인 응력집중부로 작용하고, WM의 경도가 높기 때문에 이러한 수평 Notch와 접한 WM의 루트부가 최약 링크로 작용하여 피로균열이 발생 및 전파하게 되는 것이다.

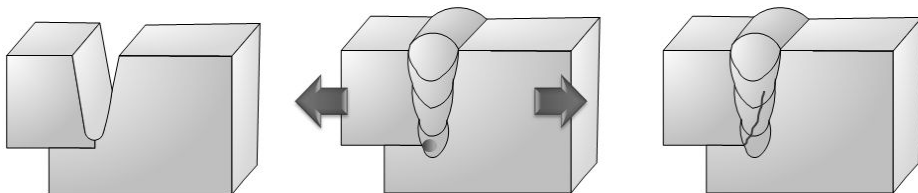


Fig. 2.8 Fatigue crack initiation and propagation to repeated load

2.4.2 용접부 피로강도 지배요인

용접부 피로강도는 여러 가지 요인으로 증가하고 감소하게 되는데⁶⁾, 본 연구에서는 크게 3가지의 피로강도 지배요인으로서 용접결함 유무, WM 경도, 수평 Notch의 길이를 3대요인으로 보았다. 루트부의 용접결함은 Fig. 2.9는 WM 루트부의 용접결함을 나타내었는데, 이러한 용접결함은 최약링크로 작용하여 피로강도의 편차를 나쁘게 하고 피로수명을 저하시키는 원인이 된다. WM의 경도가 높아질수록 소성변형율이 부족하여 피로수명이 저하하고, 피로균열 성장속도가 빨라진다. 마지막으로 본 연구에서는 수평 Notch의 길이가 길어지게 되면 피로균열이 발생하는 ModeII에서 식 (2.1)에 따라 K_{II} 값이 커져 결국 피로수명은 감소하게 된다.

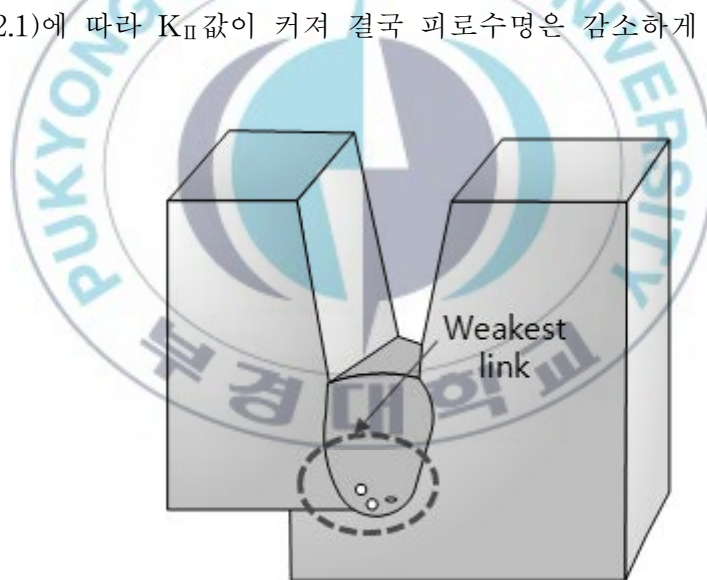


Fig. 2.9 Schematic of weld defect in WM root area

2.5 기존의 용접부 피로강도 향상기법

일반적으로 용접부의 피로강도를 향상시키는 방법은 여러 가지가 있는데 Table 2.1에서 크게 4가지로 분류하였다.

Fig. 2.10과 같이 용접부의 형상을 변화시켜 구조적인 응력집중을 완화시키고⁷⁾, Peening이나 그라인딩을 통하여 국부적인 결함을 제거하여 국부적 응력집중을 제거하고, Overload와 Press를 통하여 피로균열 발생위치에 압축잔류응력을 형성시키거나, 열처리나 입열의 제한으로 피로균열 발생부의 경화성조직을 연화시키는 방법이 있다.⁸⁾ (Fig. 2.11)

Table 2.1 Weldment fatigue strength to improve techniques

No.	Weldment fatigue strength to improve techniques	e.g
1	Structural stress concentration mitigation	Weld joint shape change
2	Local stress concentration remove to remove local defects	Peening, Grinding
3	Fatigue crack initiation location in the formation of compressive residual stress	Overload, Press
4	Softening of the hardened structure in fatigue crack initiation area	Heat treatment, Heat input limit

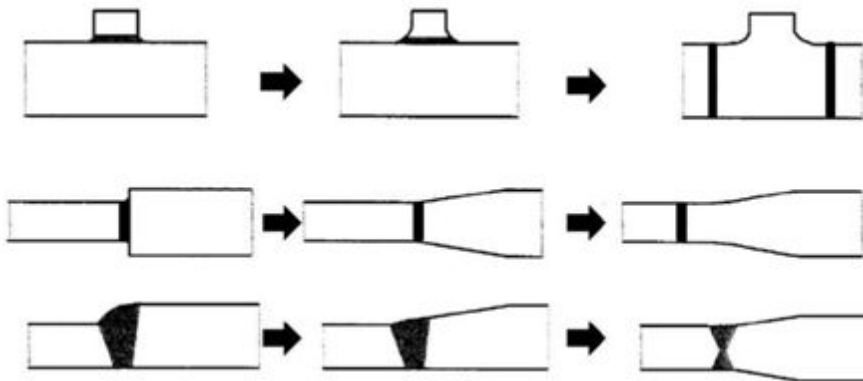


Fig. 2.10 Mitigation methods of stress concentration in two kind of butt joint⁷⁾

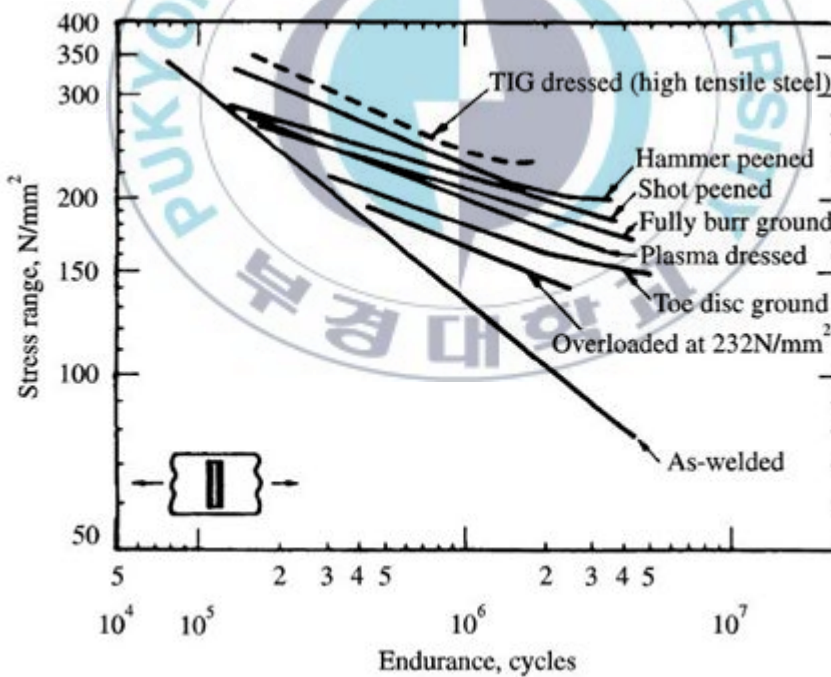


Fig. 2.11 Comparison of fatigue life improvement to post processing after welding⁸⁾

2.6 본 연구의 피로강도 향상을 위한 3대 기술전략

본 연구에서는 기존의 피로강도 향상기법을 참고하여 3대 기술전략을 세웠다.

첫 번째로는 Fig. 2.12와 같이 기존의 수평 Notch길이인 10mm를 5mm로 하여 식(2.1)에서 대입하게 되면 이론적으로 피로균열 발생율을 약 30% 감소시킬 수 있다. 수평 Notch길이를 3mm로 하게 된다면 약 45%의 감소를 볼 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 fit up상의 문제와 용락발생의 가능성, 그리고 유압실린더 내부의 산화층 형성으로 인한 불량이라는 문제성이 발생할 수도 있기 때문에 본 연구에서는 R4의 그루브를 가지는 시험편에서 10mm의 수평 Notch길이를 용접후 Notch부를 절삭 가공하여 수평 Notch길이의 유효성을 판단하였다.

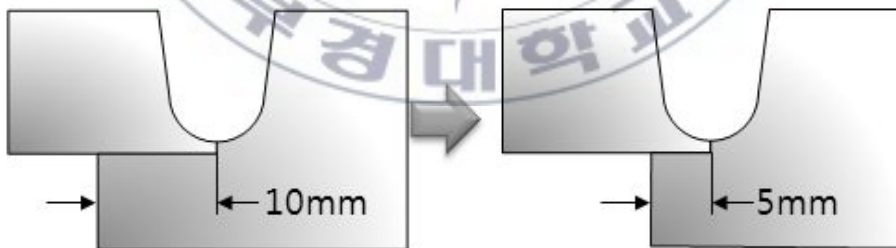


Fig. 2.12 Decrease of horizontal notch length

두 번째로는 pass1의 용입깊이를 얇게 하여 SM45C의 용융단면적을 줄이는 방법으로 WM 루트부의 경화성 조직을 억제하고 이로 인하여 WM의 경도를 감소시키는 방안을 제시하였다. Pass1의 용입깊이를 얇게 하기 위하여 pass1의 전류를 감소시켰으며 Fig. 2.13과 같이 용착단면적이 감소하여 작은 비드를 형성시켰다.

이러한 작은 비드는 세 번째 전략을 위한 것으로 Fig. 2.14에서 보이듯이 pass2에서 pass1을 재용융 시킴으로서 pass1에 남아있을지도 모를 용접결함들을 제거하여 피로수명을 향상시키고 루트부의 전체적인 용착단면적을 크게 하고 SM45C의 용융단면적은 작게 하여 실질적으로 WM에서 SM45C가 혼합되는 비율을 낮추어 WM의 경도를 감소시키기 위함이다.



Fig. 2.13 Decrease of pass1 penetration depth

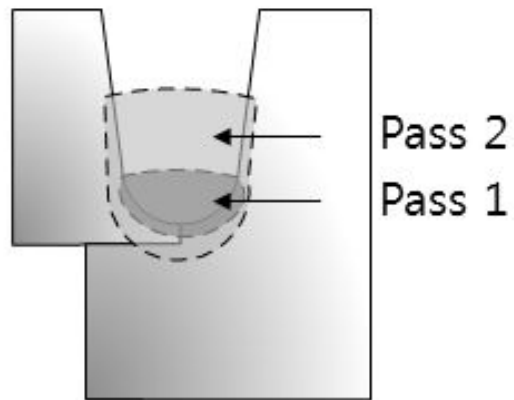


Fig. 2.14 Pass2 remelting to pass1



2.7 경도에 따른 피로수명의 일반적 경향에 대한 고찰

본 연구에서는 경도가 증가하여 피로수명이 감소하였다고 보고있는데, 이는 SM. Cho의 논문에서 식(2.2)가 성립하여 응력비에 따라 차이가 있긴 하지만 Fig. 2.15에서 항복강도가 높은 재료일수록 즉 경도가 높은 재료일수록 피로균열 한계치는 감소한다는 것을 볼 수 있다. 이를 토대로 식 (2.2)에서 피로균열 성장 한계치가 감소하면 피로한도는 감소하게 된다.⁹⁾

$$\Delta K_{th} = \Delta \sigma_w \sqrt{\pi a} \quad \text{-----} \quad (2.2)$$

ΔK_{th} : 피로균열 성장 한계치

$\Delta \sigma_w$: 균열재의 피로한도

a : 균열길이

용접부의 피로강도를 위해서는 균열길이(a) 즉, 결함의 크기가 제한되게 되는데 항복강도가 높은 재료에서는 피로균열 성장 한계치가 감소하게 되어 허용결함의 크기는 더 작게 요구된다.

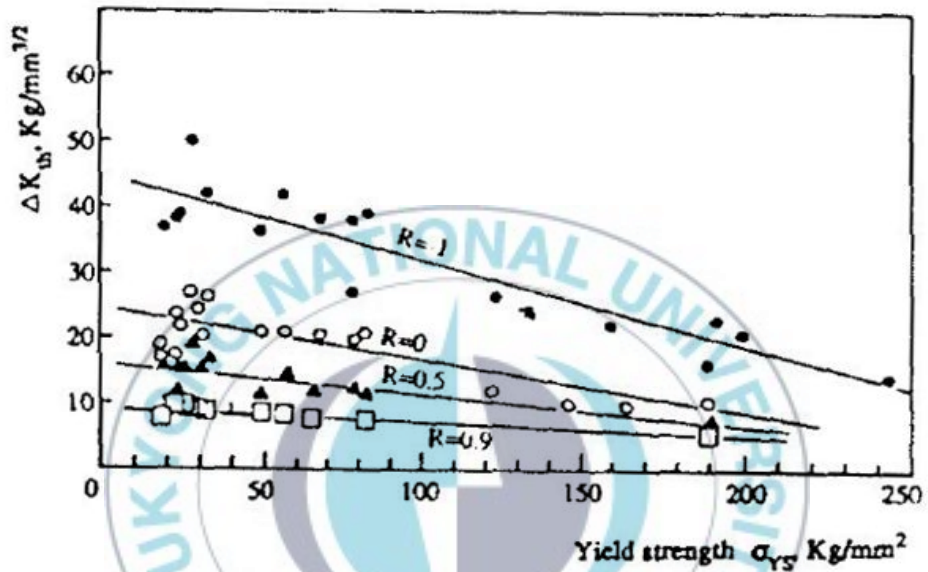


Fig. 2.15 Relationship of steel material yield strength and fatigue crack growth limits⁹⁾

제 3장 피로시험편 제작을 위한 용접

3.1 서언

본 장에서는 피로시험을 하기에 앞서 피로시험편 제작을 위하여 이중재를 기존의 R4시험편에서 $\Phi 1.2\text{mm}$ 와이어를 이용한 CW용접과 새로운 R3 시험편에서 $\Phi 1.4\text{mm}$ 와이어를 사용한 펄스용접을 비교하기 위하여 $\Phi 1.4\text{mm}$ 와이어 펄스 최적 용접조건을 확립하고 전 장에서 피로강도 향상을 위한 3대전략을 통하여 시험편의 종류와 용접조건을 검토하였다.

3.2 1.4mm 와이어에서 최적 파형설정

3.2.1 완전 스프레이 이행을 위한 펄스파형결정 방법

D.M.Kim, S.M.Cho⁹⁾ 등은 펄스 에너지와 상대적 아크길이를 변경하여 실험 하였다. 각 펄스 에너지 설정 후 단락시간비 1% 파형을 획득 후 확인하고, 펄스 에너지에서 아크길이를 길게 하여 최적 파형을 결정 하였다.

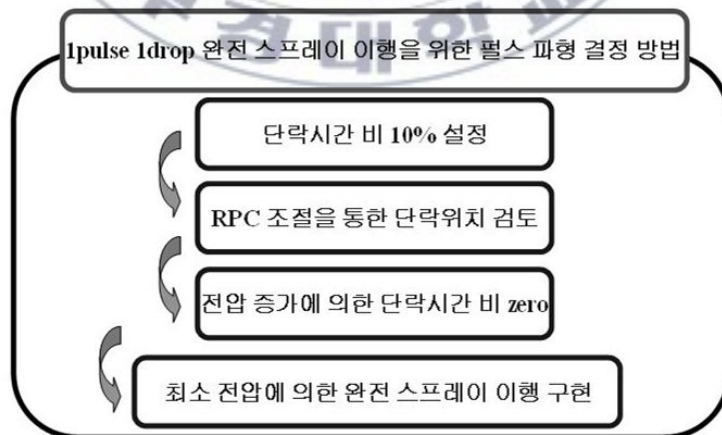


Fig. 3.1 A decision method of the pulse waveform for perfect spray transfer with 1pulse 1drop

3.2.2 실험재료 및 방법

1) 실험 재료

본 실험에서는 길이 450mm x 폭 150mm x 두께 19mm 의 탄소강 모재에 $\Phi 1.4\text{mm}$ 연강 solid 와이어로 아래보기자세로 실험을 실시하였다.

2) 실험 방법

펄스 에너지에서 상대적 아크길이를 길게 하여 최적파형을 확인하였다.

Table.3.1 Experimental conditions

Power source	Fronius TPS-4000
Mode	Pulse
Base metal	SS400
Wire	Mild Steel/($\Phi 1.4\text{mm}$)
Setting current	340 A
Shield gas & flow rate	Ar80% + CO ₂ 20% & 25 ℓ/min
Welding position	Flat
Welding method	Bead on plate
CTWD(mm)	20
RPC (Relative Peak Current)	Min -5 ~ Max +5
ALR (Arc Length Ratio)	Min -30 Max +30

3.2.3 실험결과 및 고찰

각 펄스에너지에서 상대적 아크길이를 변경하여 완전한 스프레이 이행이 일어나는 조건을 얻을 수 있었고, 이때의 RPC에 따른 주파수는 Fig. 3.2와 같이 RPC가 증가할수록 주파수는 감소하고 그에 따라 Fig. 3.3에서 보듯이 Droplet diameter는 증가하는 경향을 나타내었다.

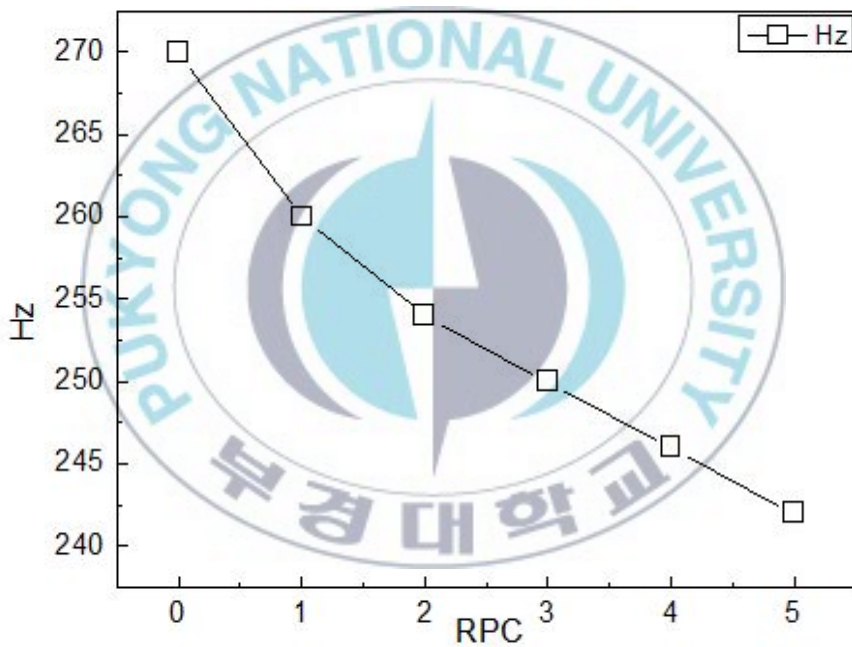


Fig. 3.2 Pulse frequency to PRC

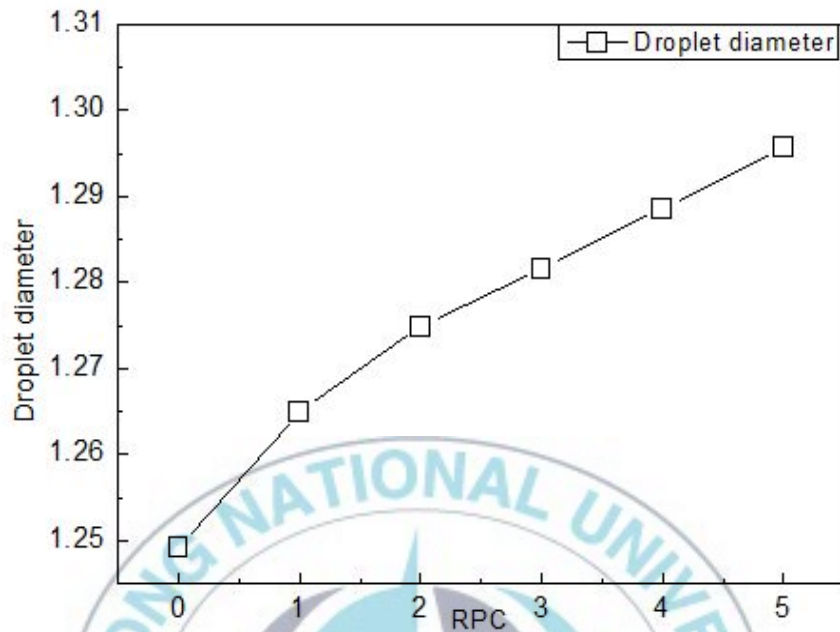


Fig. 3.3 Droplet diameter to PRC

각 펄스에너지에서 완전한 스프레이 이행이 일어나는 조건을 통하여 Fig. 3.4에서 RPC가 증가할수록 전압이 약간씩 낮아지는 경향을 가졌지만 RPC4에서 RPC5보다 낮은 전압값을 가졌고, Table 3.2에서 보듯이 전압이 가장 낮은 RPC4를 최적조건으로 정하였다.

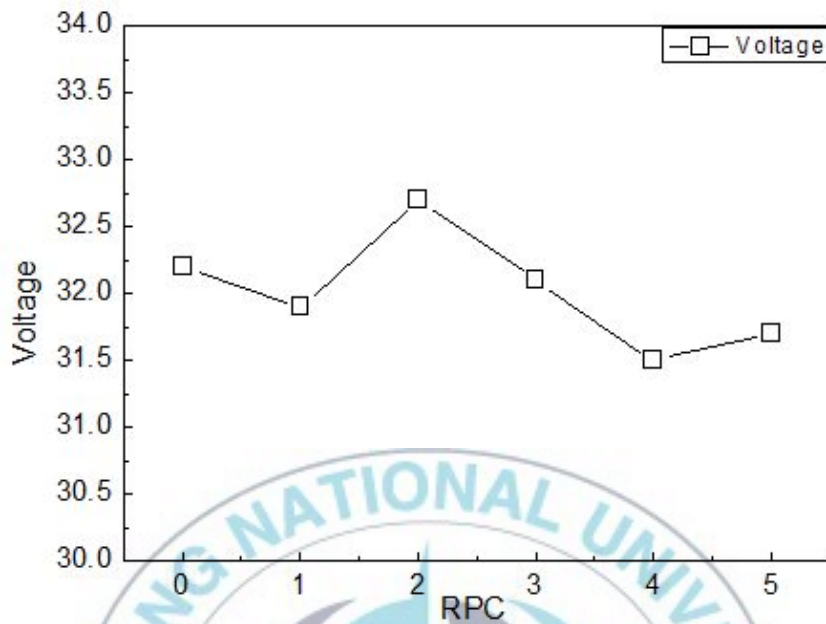


Fig. 3.4 Voltage to PRC

Table 3.2 Welding parameters and ALR to RPC

RPC	ALR	Current (A)	Voltage (V)	Ip (A)	Ib (A)	Hz	Droplet diameter (mm)
5	-17	344	31.7	505	182	242	1.30
4	-16	344	31.5	505	182	246	1.29
3	-15	346	32.1	507	181	250	1.28
2	-12	344	32.7	505	180	254	1.27
1	-12	344	31.9	501	182	260	1.26
0	-11	348	32.2	489	187	270	1.25

3.3 시험편 종류

본 연구에서는 시험편으로 Fig. 3.5에서 기존의 (a)R4를 기준으로 하여 수평 Notch길이를 5mm, 3mm로 각각 감소시킨 (b)R4-5, (c)R4-3의 시험편과, 생산량 향상을 위한 R3시험편 또한 수평 Notch 길이를 5mm로 감소시킨 (d)R31, 그리고 루트페이스를 2mm로 증가시켜 용착단면적을 감소시킴으로서 추가적인 생산성향상을 위한 (e)R32시험편을 준비하여 용접을 실시하였다.

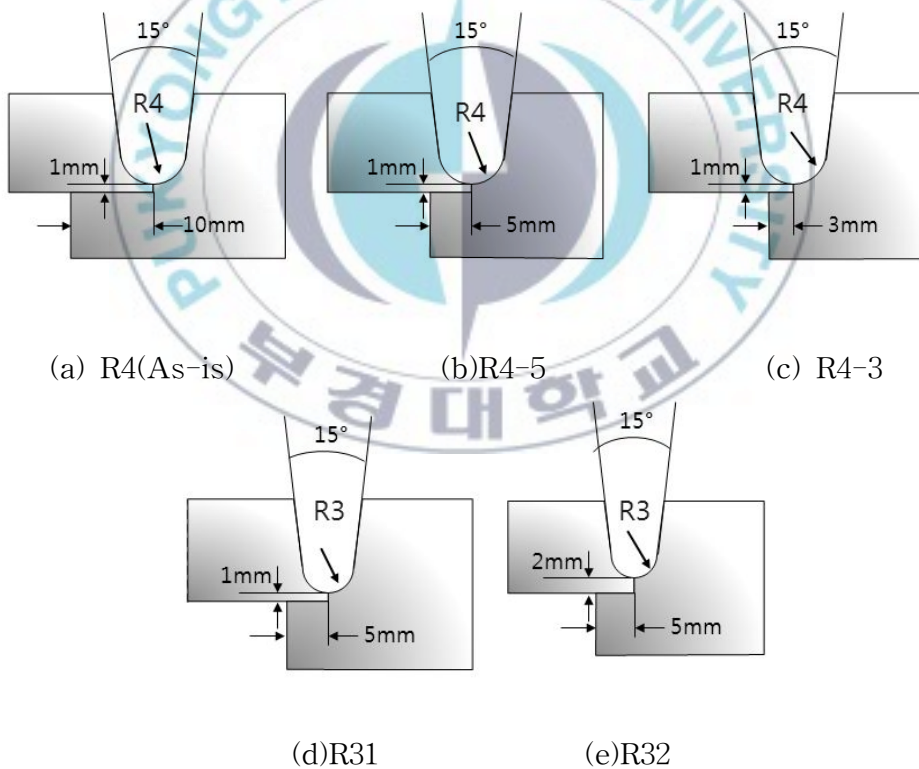


Fig. 3.5 Schematic of specimen

3.3.1 시험편의 화학성분 및 기계적 특성

본 연구의 Semi-narrow gap 용접부 재료는 Fig. 3.6에서 보이듯이 SHT55와 SM45C 이종재 용접부이다.

각 용접재료와 와이어의 화학성분은 Table 3.3에 나타나있는데 SHT55와 SM45C의 Ceq.를 보면 약 0.6으로서 SHT55의 0.4와 와이어의 0.365에 비하여 높은 편으로 WM의 경도를 높이는 역할을 하게 된다. SM45C의 용융단면적이 증가할수록 용착단면적 내의 Ceq.는 증가하고 이에 따라 WM의 경도는 증가하게 될 것으로 판단된다.

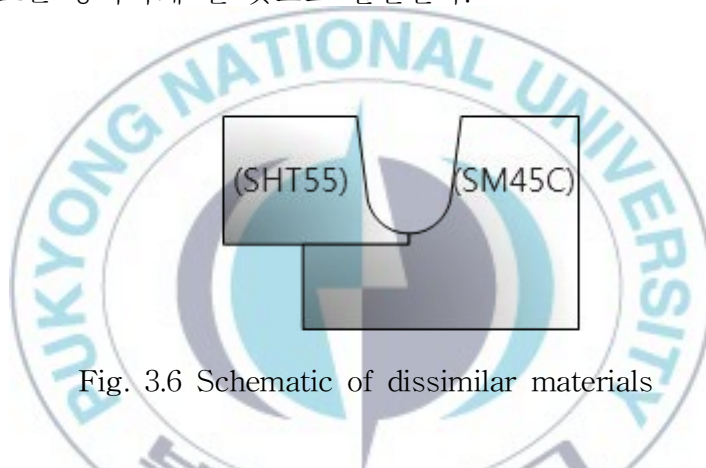


Fig. 3.6 Schematic of dissimilar materials

Table 3.3 Chemical composition of weld material and wire

Material	C	Si	Mn	P	S	Ceq.
SM45C	0.42~0.48	0.15~0.35	0.60~0.90	0.030 max	0.035 max	0.570~0.705
SHT55	0.25max	0.35max	0.30~0.90	0.04 0max	0.040 max	0.325~0.475
ZO-26	0.06	0.80	1.53	0.014	0.010	0.443
ZO-27	0.07	0.62	1.18	0.014	0.010	0.365

Table 3.4의 용접재료와 와이어의 기계적특성을 보면 C_{eq} 가 높은 SM45C의 항복강도와 인장강도가 높은 것을 알수 있다. 연신율이 16%로 소성변형율이 낮아 피로균열이 발생하기 쉽고 이는 피로수명을 저하시킨다.

Table 3.4 Mechanical property of weld material and wire

Material	Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation(%)
SM45C	746	855	16
SHT55	560	650	23
ZO-26	490	570	30
ZO-27	490	560	31

3.4 기존 R4 시험편 적층계획

3.4.1 적층계획 및 용접조건

기존 R4의 그루브를 가지는 시험편으로 기존의 조건 그대로 용접을 하기 위하여 적층은 Fig. 3.7과 같이 1 layer당 하나의 pass로 3 layer 용접을 하였으며, $\Phi 1.2$ 와이어를 사용하는 CW용접 공정으로 Table 3.5와 같이 각 pass별로 용접조건을 바꾸지 않고 용접을 실시하였다.

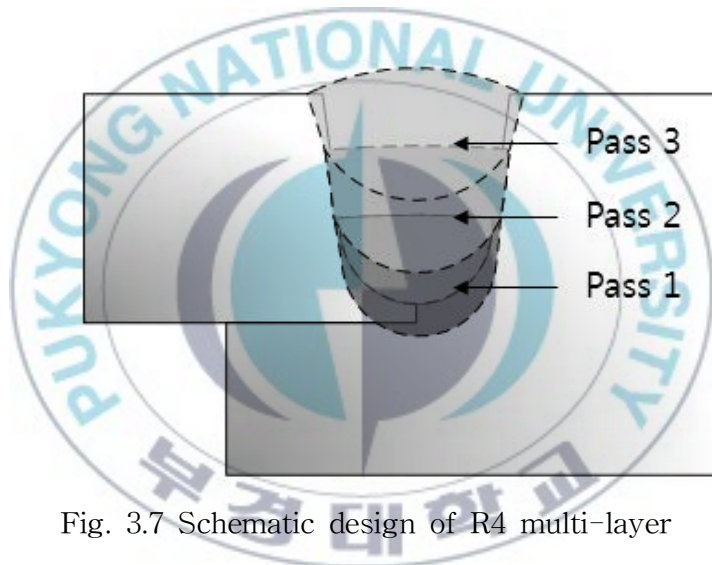


Fig. 3.7 Schematic design of R4 multi-layer

Table 3.5 Experimental conditions

Power source	Fronius TPS-4000		
Mode	CW		
Base metal	SHT55 / SM45C		
Wire	Mild Steel/($\Phi 1.2$ mm)		
Shield gas & flow rate	Ar80% + CO ₂ 20% & 25 ℓ/min		
CTWD(mm)	20		
Pass	Pass1	Pass2	Pass3
Setting current	320 A	320 A	320 A
Tracel speed	43cpm	43cpm	43cpm
WFR	1180cpm	1180cpm	1180cpm
Deposited area	30.4mm ²	30.4mm ²	30.4mm ²

3.4.2 실험결과 및 고찰

용접 후 단면을 검토한 결과 용접결함이 없는 기존의 R4시험편을 완성하였고, 피로시험을 위해 피로시험편으로 절단가공 하였다.



Fig. 3.8 Appearance of R4 cross section

3.5 Pass1 재용융을 위한 R31시험편 적층계획

3.5.1 적층계획 및 용접조건

R31은 루트부 반경이 3mm이고 루트페이스가 1mm인 그루브를 가지는 시험편으로 적층은 Fig. 3.9와 같이 pass1의 용착단면적을 줄여서 pass2에서 pass1을 재용융 시키는 적층설계를 하였다. $\Phi 1.4\text{mm}$ 와이어를 사용하는 펄스용접 공정으로 Table 3.6과 같이 각 pass별로 용접조건을 바꾸어 용접을 실시하였다.

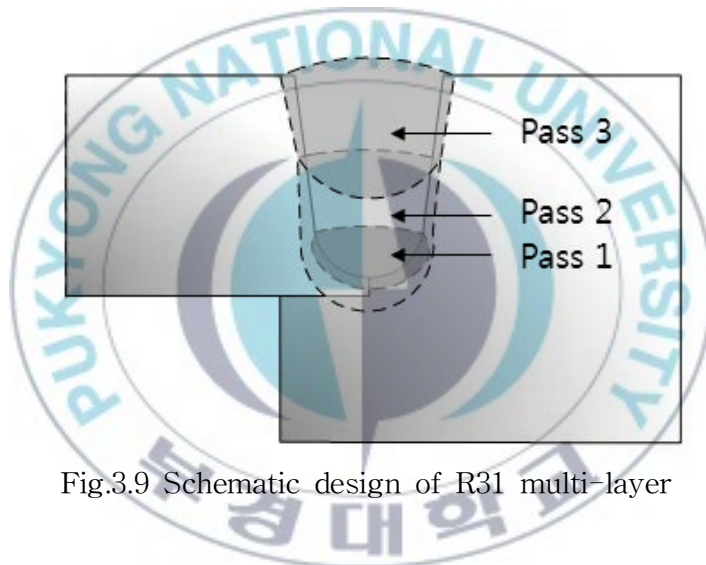


Fig.3.9 Schematic design of R31 multi-layer

Table 3.6 Experimental conditions

Power source	Fronius TPS-4000		
Mode	Pulse		
Base metal	SHT55 / SM45C		
Wire	Mild Steel/($\Phi 1.4\text{mm}$)		
Shield gas & flow rate	Ar80% + CO ₂ 20% & 25 ℓ/min		
CTWD(mm)	20		
RPC	4		
Pass	Pass1	Pass2	Pass3
Setting current	170 A	320 A	320 A
Tracel speed	50cpm	45cpm	45cpm
WFR	400pm	800cpm	1050cpm
Deposited area	12mm ²	26.82mm ²	35.22mm ²

3.5.2 실험결과 및 고찰

용접 후 단면을 검토한 결과 용접결함이 없는 R31 시험편을 완성하였고, 피로시험을 위해 피로시험편으로 절단가공 하였다.



Fig. 3.10 Appearance of R31 cross section

3.6 Pass1 재용융을 위한 R32시험편 적층계획

3.5.1 적층계획 및 용접조건

R32은 루트부 반경이 3mm이고 루트페이스가 2mm인 그루브를 가지는 시험편으로 적층은 Fig. 3.11과 같이 pass1의 용착단면적을 줄여서 pass2에서 pass1을 재용융 시키는 적층설계를 하였다. $\Phi 1.4\text{mm}$ 와이어를 사용하는 펄스용접 공정으로 Table 3.7과 같이 각 pass별로 용접조건을 바꾸어 용접을 실시하였다. R31의 시험편과 용접조건이 비슷하지만 R32의 시험편은 루트페이스가 1mm 증가하였기 때문에 용입이 부족하여 pass1을 충분히 재용융 시키지 못할 수도 있기 때문에 이러한 점을 고려하여 pass2에서 충분한 용입을 얻을 수 있도록 경사상진 10° 와 후진각 10° 으로 용접을 실시하였다.

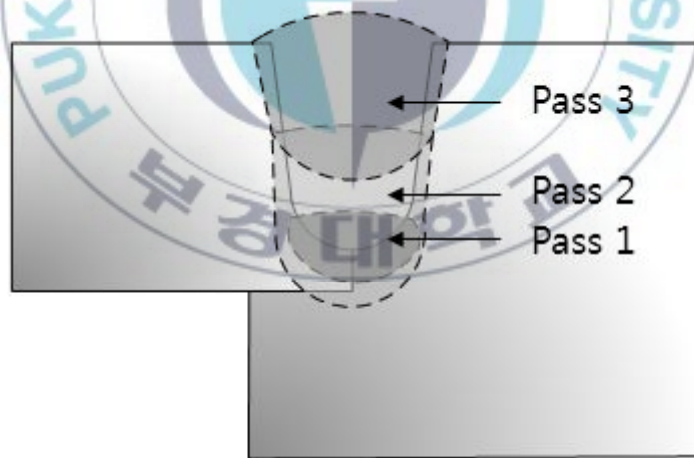


Fig.3.11 Schematic design of R31 multi-layer

Table 3.7 Experimental conditions

Power source	Fronius TPS-4000		
Mode	Pulse		
Base metal	SHT55 / SM45C		
Wire	Mild Steel/($\Phi 1.4\text{mm}$)		
Shield gas & flow rate	Ar80% + CO ₂ 20% & 25 ℓ/min		
CTWD(mm)	20		
RPC	4		
Pass	Pass1	Pass2	Pass3
Setting current	320 A	320 A	320 A
Tracel speed	43cpm	43cpm	43cpm
WFR	1180cpm	1180cpm	1180cpm
Position	Flat	Inclined up 10°	Flat
Progressive angle	0°	-10°	0°
Deposited area	30.4mm ²	30.4mm ²	30.4mm ²

3.5.2 실험결과 및 고찰

용접 후 단면을 검토한 결과 용접결함이 없는 R32 시험편을 완성하였고, 수평 Notch에서 충분한 용입을 얻을 수 있었으므로 피로시험을 위해 피로시험편으로 절단가공 하였다.

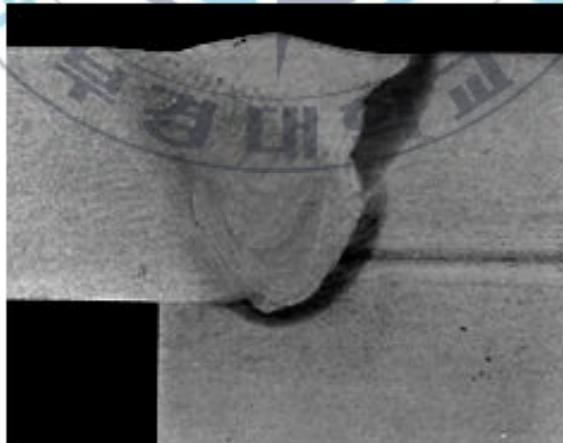


Fig. 3.12 Appearance of R4 cross section

3.7 결론

펄스파라미터 변경에 따른 최적 펄스 파형 설정실험과 그루브 형상에 따른 적층계획을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 펄스 에너지와 상대적 아크길이를 조절하여, 최적 펄스 파형을 결정하였고, 340A기준 펄스 에너지 +4에서 상대적 아크길이 -16조건이었다.
- 2) R4시험편으로 기존의 용접조건과 동일하게 적층 계획하여 용접하여 단면을 검토한 결과 용접결함이 없었다.
- 3) R31, R32 시험편에서 $\Phi 1.4$ 와이어로 펄스용접을 적용하여 용접부 단면을 검토한 결과 Pass2에서 Pass1을 충분히 재용융시켰고 용접결함이 없었다.

제 4장 SM45C 혼합물에 따른 경화성 조직 변화

4.1 서언

본 장에서는 SM45C의 혼합물에 따른 WM의 경화성 조직을 검토하기 위하여 용접부 단면의 경도분포를 측정하고, 용접부에서 SM45C의 용융 단면적과 전체 용접단면적의 비를 식으로 만들었다.

4.2 SM45C 혼합물 개념

Fig. 4.1에서와 같이 Ad , Ac , At 를 나타내어 정의하였고, 식(4.1)에서와 같이 용착단면적과 SM45C의 용융단면적, SHT55의 용융단면적을 더하여 전체 용접단면적을 계산하고 SM45C용융단면적을 이 전체 용접단면적으로 나누어 비를 계산하여 RAc 라고 정의 하였다.

$$RAc = \frac{Ac}{Ad + Ac + At} \times 100 \quad \text{----- (4.1)}$$

RAc : SM45C 혼합률

Ad : 용착단면적

Ac : SM45C 용융단면적

At : SHT55 용융단면적

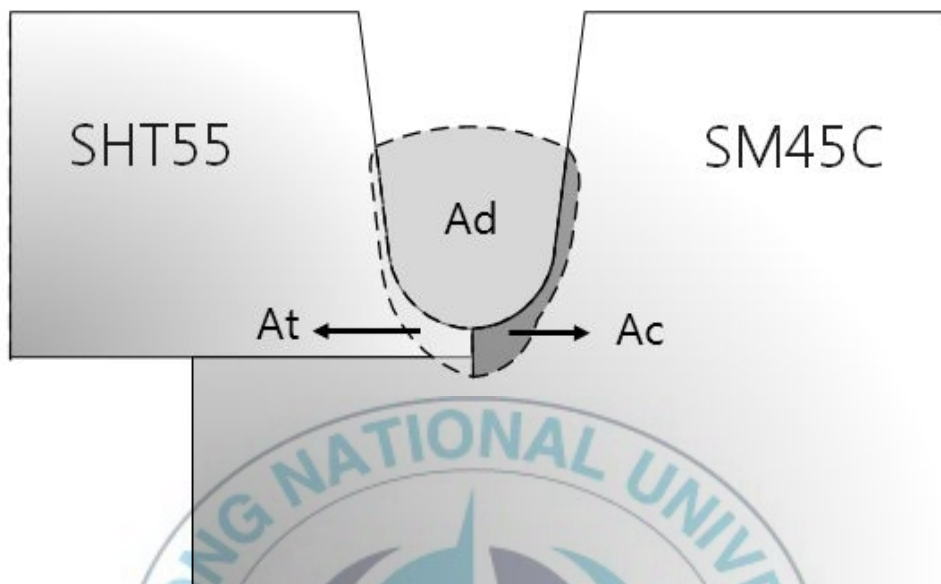


Fig. 4.1 Schematic of weld cross section

4.3 R4, R3-1, R3-2 시험편 단면 검토

4.3.1 RAc 비교

Fig. 4.2와 같이 R4의 용접부 단면에서 Ad, At, Ac를 측정하여 RAc를 계산한 결과 30%의 SM45C 혼합률이 나타났다.

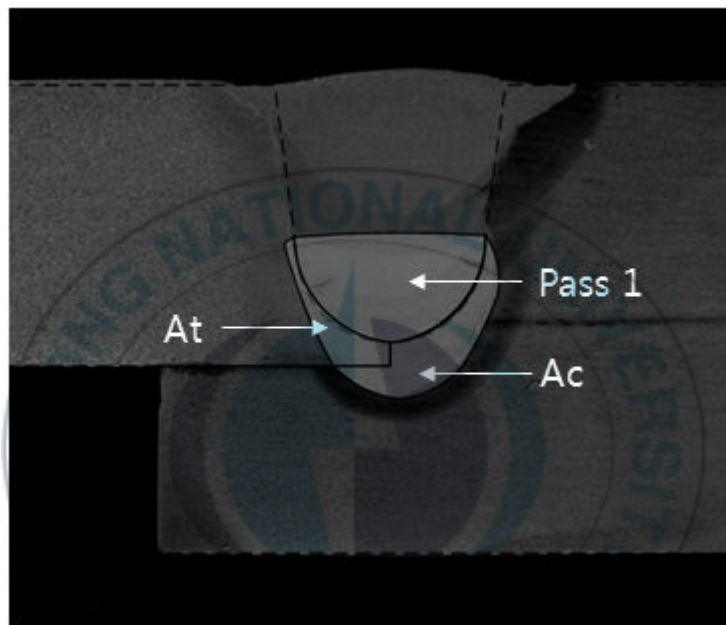


Fig. 4.2 Cross section of R4

Table 4.2 Experimental conditions

Ad	26.2mm ²
Ac	13.5mm ²
At	5.2mm ²
RAc	30%

Fig. 4.3와 같이 R31의 용접부 단면에서 Ad, At, Ac를 측정하여 RAc를 계산한 결과 11%의 SM45C 혼합률이 나타났다. 이는 pass1에서 낮은 용입으로 Ac와 At가 작아지고 pass2로 다시 재용융되면서 Ad의 양은 많아지므로 이와 같은 결과가 나왔다고 판단된다.

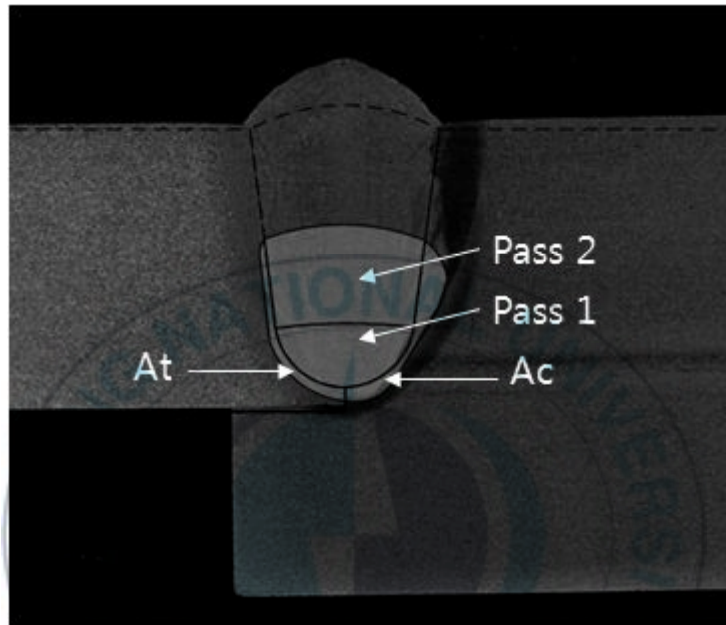


Fig. 4.3 Cross section of R31

Table 4.3 Experimental conditions

Ad	38.2mm ²
Ac	5.3mm ²
At	3mm ²
RAc	11%

Fig. 4.4와 같이 R32의 용접부 단면에서 Ad, At, Ac를 측정하여 RAc를 계산한 결과 23%의 SM45C 혼합물이 나타났다. 이는 R31과 마찬가지로 pass2로 pass1을 재용융 시킴으로서 얻어진 결과로 판단된다.

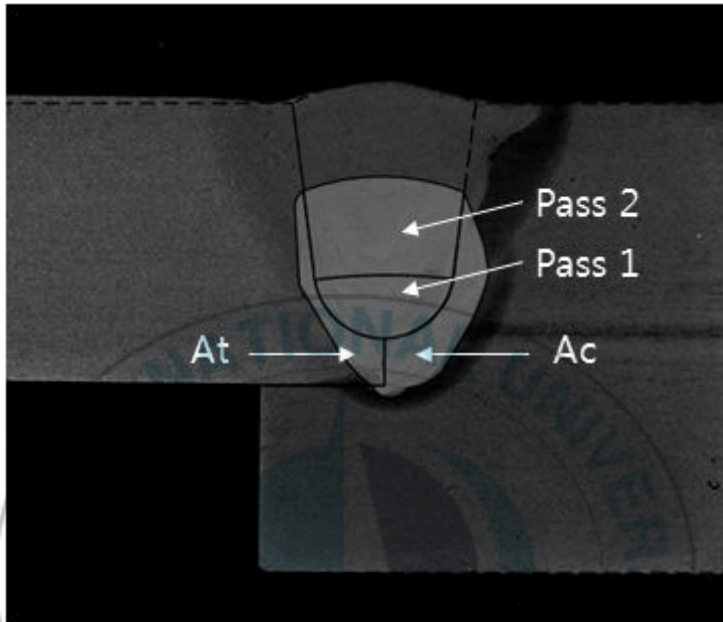


Fig. 4.4 Cross section of R32

Table 4.4 Experimental conditions

Ad	38.2mm ²
Ac	13.5mm ²
At	7.1mm ²
RAc	23%

4.3.2 용접금속 조직 검토

각 시험편의 용접금속 조직을 검토한 결과 R31, R32, R4로 시험편의 RAc가 높아질수록 고 탄소강의 조직이 형성되었으며 이로인하여 WM의 경도가 높아졌을 것 이라고 판단된다.

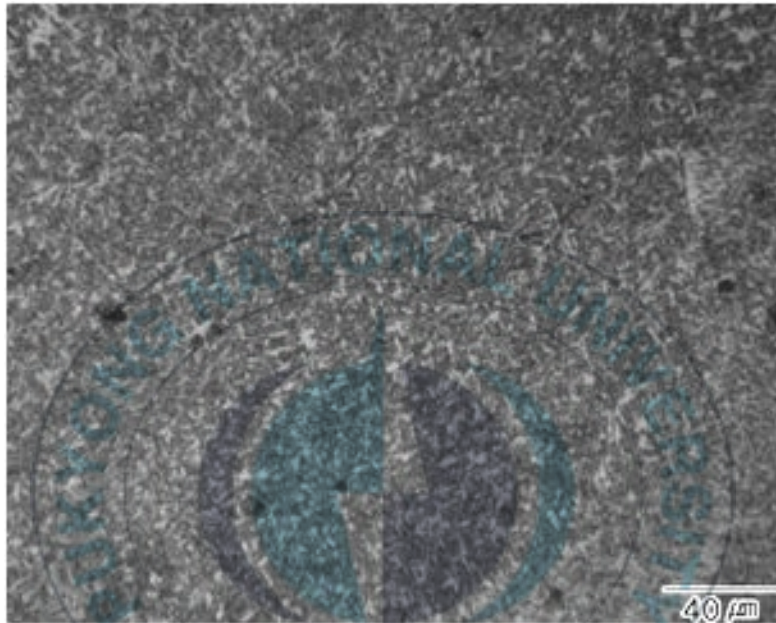


Fig. 4.5 Microstructure of R4 (x500)

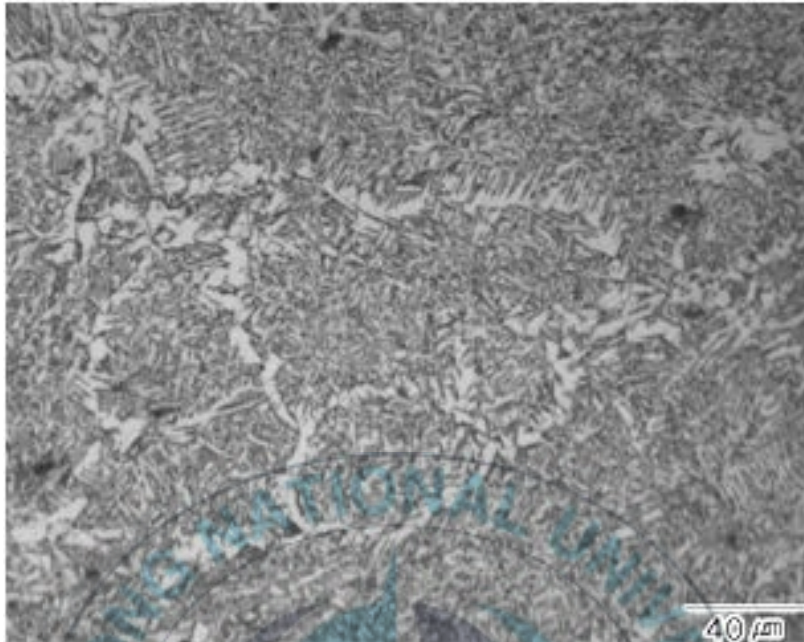


Fig. 4.6 Microstructure of R32 (x500)

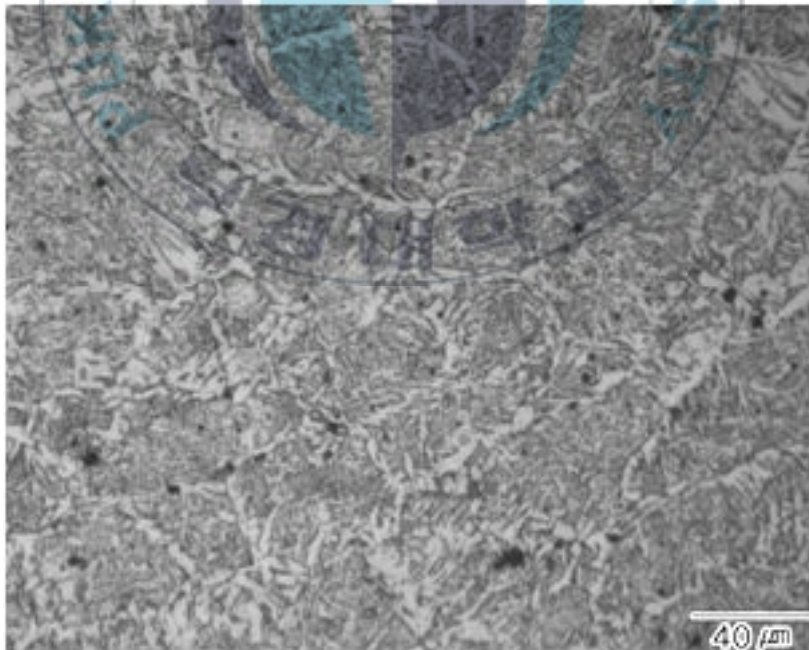


Fig. 4.7 Microstructure of R31 (x500)

4.3.3 경도 분포 검토

R4시험편의 WM 경도분포는 Fig. 4.8과 같이 WM에서 경도가 급격하게 상승하는 분포 특성을 가졌으며 WM의 평균 경도는 383Hv로 모재의 약 250Hv에 비하여 경도가 상당히 증가하였다.

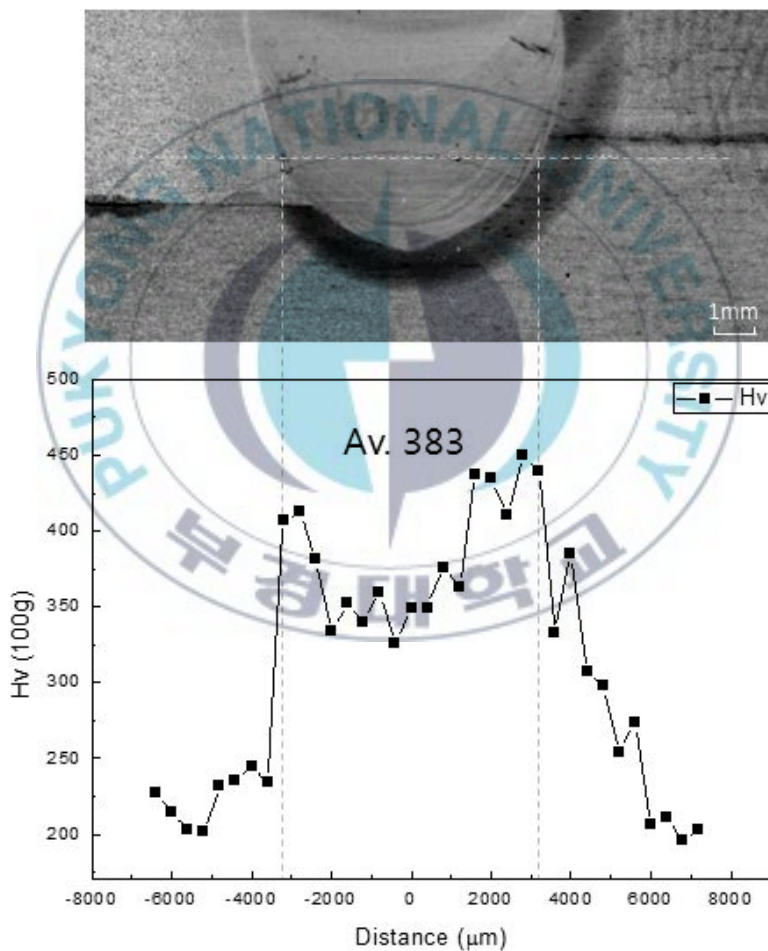


Fig. 4.8 Hardness distribution of R4

R31시험편의 WM 경도분포는 Fig. 4.9과 같이 WM의 평균 경도는 248Hv로서 모재의 약 250Hv와 유사한 경도분포를 가졌으며, SM45C가 있는 HAZ부에서 약간의 경도가 높아진 부분을 제외하고 완만한 경도분포특성을 가졌다.

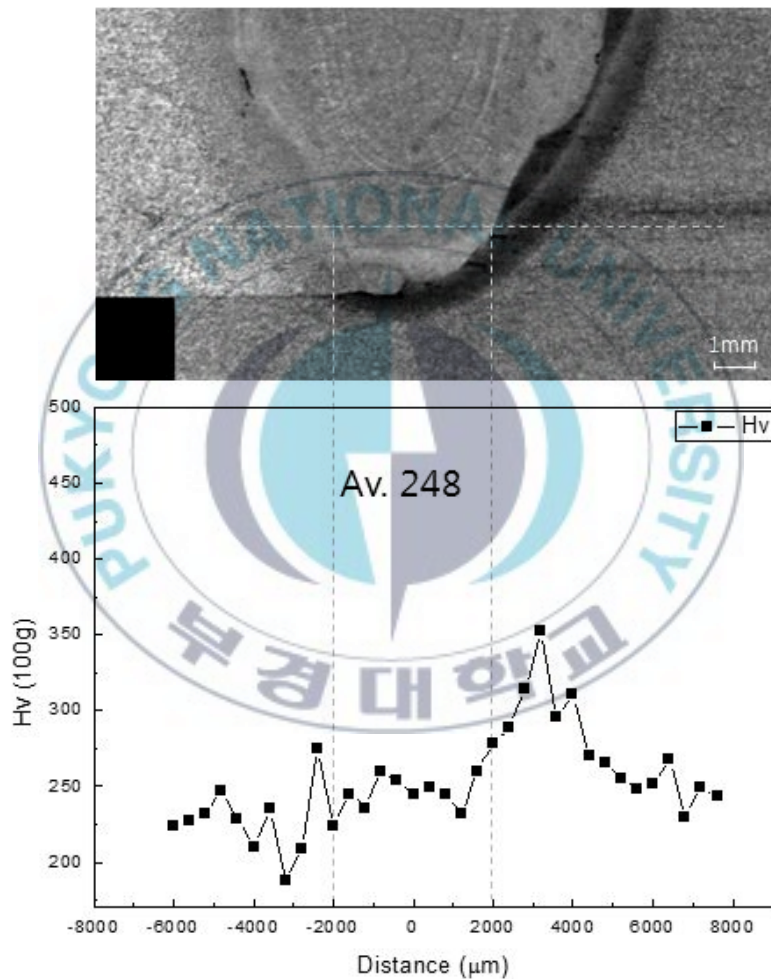


Fig. 4.9 Hardness distribution of R31

R32시험편의 WM 경도분포는 Fig. 4.10과 같이 WM의 평균 경도는 278Hv로서 모재의 약 250Hv 보다는 높지만 WM과 모재가 유사한 경도 분포를 가졌으며, SM45C가 있는 HAZ부에서 약간의 경도가 높아진 부분을 제외하고 완만한 경도분포특성을 가지는 R31시험편과 비슷한 경향을 보였다.

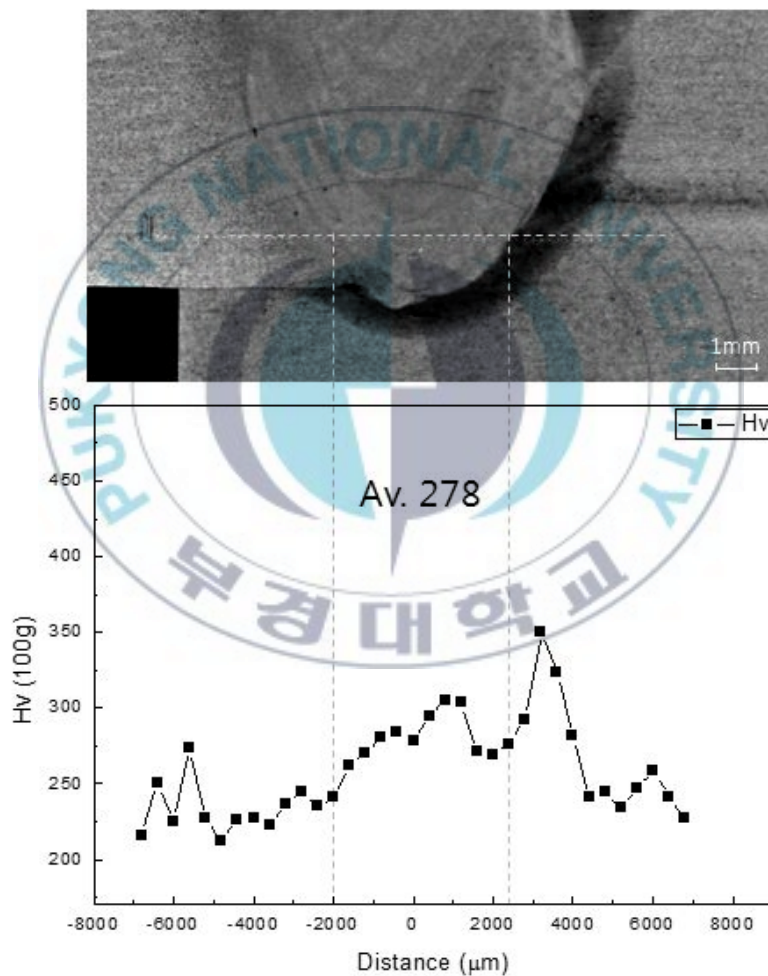


Fig. 4.10 Hardness distribution of R32

4.3.3 결과 및 고찰

각 시험편의 RAc를 참고하여 선형 회귀분석을 통해서 RAc에 따른 WM의 경도는 비례적인 관계를 가진다는 것을 알 수 있었다. RAc가 증가 할수록 WM의 경도는 증가하여 피로수명은 감소할 것이라고 예상 할 수 있다.

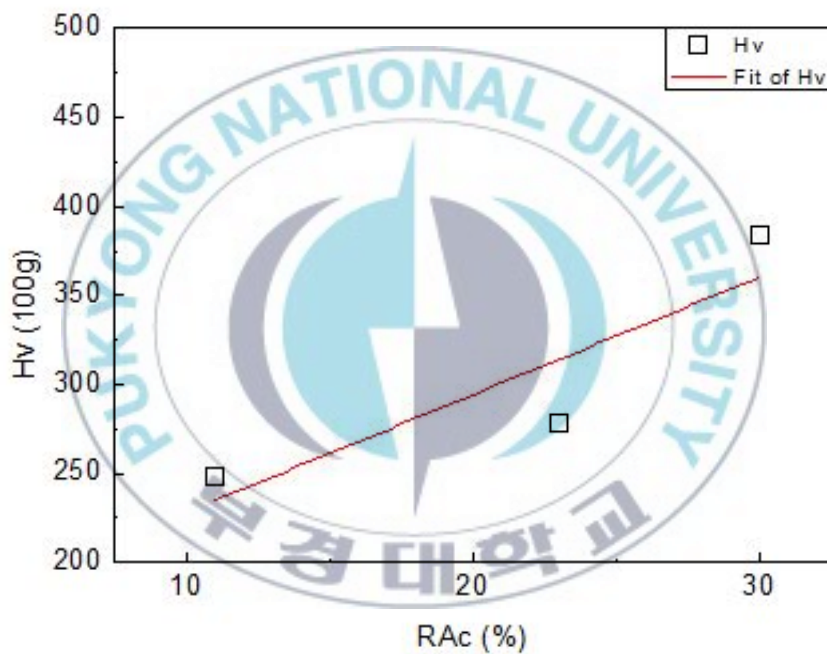


Fig. 4.11 WM Hardness to RAc

4.4 결론

SM45C혼합물(RAc)에 따른 WM의 경화성 조직을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 각 용접시험편 별로 RAc를 측정한 결과 R4는 30%, R32는 23%, R31은 11%로 나타났다.

2) 용접부 단면적의 경도를 측정한 결과 R4 WM의 평균경도가 383Hv로 가장 높았고 RAc가 낮은 R32, R31 순으로 WM의 평균경도는 감소하는 것을 알 수 있었다.



제 5장 피로시험

5.1 서언

본 장에서는 제 4장에서 만들어진 시험편을 피로시험용 시험편으로 가공하여 3가지 조건의 하중에서 피로시험을 통하여 S-N curve를 나타내고 상대적으로 R4와 피로강도를 비교하였다.

5.2 피로시험을 통한 R4 S-N 커브

5.2.1 시험재료 및 방법

Fig. 5.1의 피로시험기를 이용하여 시험을 진행하였고, 균열이 발생하여 시험편이 파단 되었을 때를 피로수명으로 측정하였다.



Fig. 5.1 Fatigue testing machine

시험편의 단면적을 96mm^2 로 동일하게 Fig. 5.2과 같이 피로시험용 시험편으로 가공하였으며, 피로시험조건은 Table 5.1에서 보이듯이 응력비 0.1에 주파수 5Hz로 14.7kN, 17.66kN, 23.52kN의 3가지 하중조건에서 시험을 진행하였다.

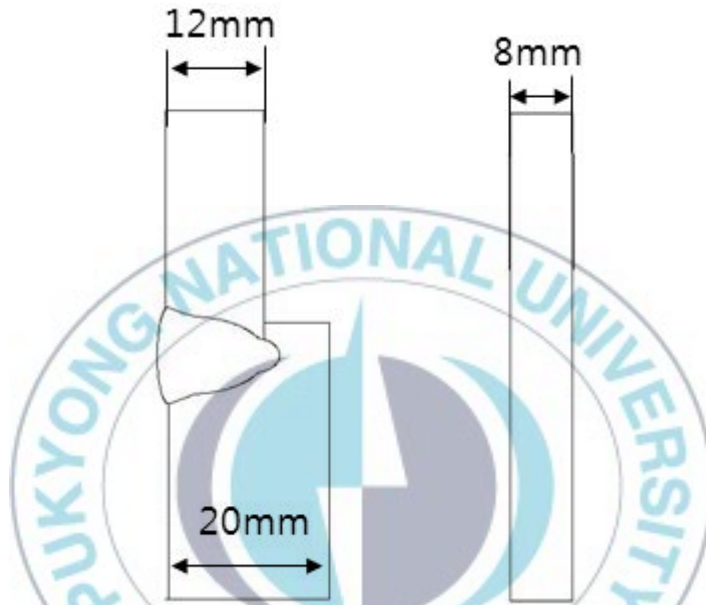


Fig. 5.2 Design of fatigue test specimen

Table.5.1 Fatigue test conditions

Stress ratio	0.1		
Waveform Frequency	Sine curve, 5Hz		
Cross section area	96mm^2		
Load	14.71kN	17.66kN	23.52kN
Stress	153.2MPa (15.6kg/mm^2)	183.9MPa (18.8kg/mm^2)	245.2MPa (25kg/mm^2)

5.2.2 기존 R4 시험편 시험결과 및 고찰

3가지 하중조건에서 각 조건 당 2개의 시험편을 시험한 결과 Fig. 5.3의 S-N curve를 얻을 수 있었다. 가장 큰 하중조건인 23.52kN에서 R4 시험편의 평균 피로수명은 약 3.4만 cycle이고, 17.66kN에서 약18만cycle 14.71kN에서 약 42만 cycle로 나타났다.

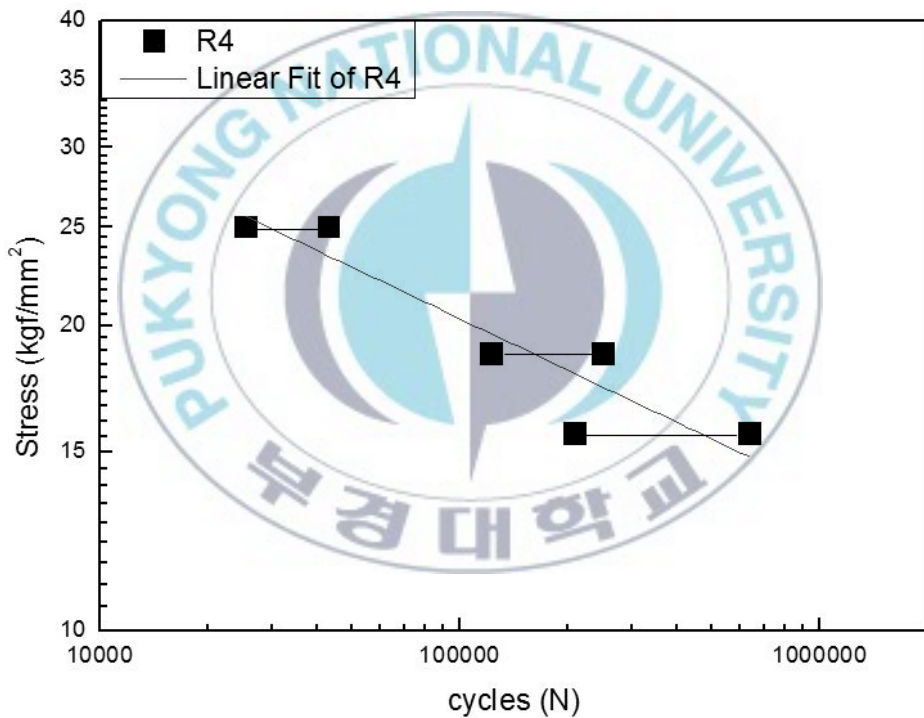


Fig. 5.3 S-N curve of R4

5.3 피로시험을 통한 S-N커브 비교

3가지 하중조건에서 R4, R31, R32시험편 모두 각 조건 당 2개의 시험편을 시험한 결과 Fig. 5.4의 S-N curve를 얻을 수 있었다. R31, R32모두 R4보다 피로수명이 상대적으로 증가된 것을 볼 수 있다.

최대하중조건인 23.52kN에서 수평 Notch길이를 기존 R4의 10mm에서 5mm, 3mm로 감소시킬수록 피로수명은 증가하는 경향이 나타났다.

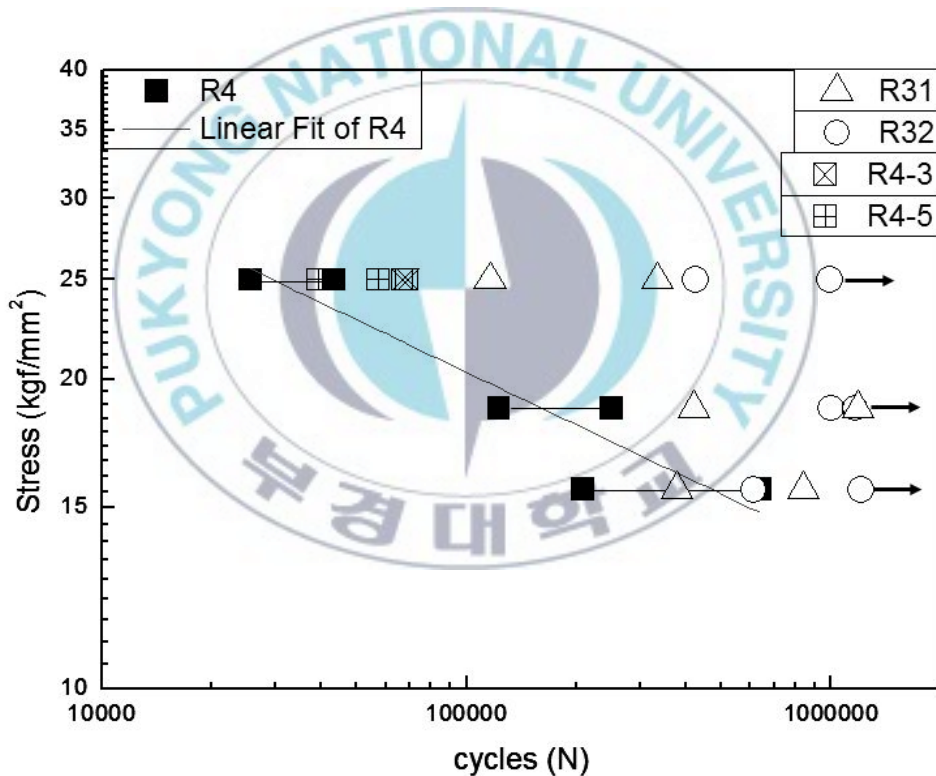


Fig. 5.4 S-N curve of all specimens

5.4 수평 Notch길이에 따른 피로강도 비교 및 검토

최대하중조건인 23.52kN에서 R4시험편의 수평 Notch길이가 증가함에 따라 피로수명이 감소하는 경향을 Fig. 5.5에 나타내었다. 이는 동일한 하중에서 파괴 Mode I의 속도는 같기 때문에, 수평 Notch부의 길이가 증가함에 따라 파괴 Mode II에 의하여 피로균열이 발생할 확률이 높아진다는 것을 입증 할 수 있었다.

K.W Nam¹⁰⁾의 논문에서도 마찬가지로 Fig. 5.6에서와 같이 기존의 균열길이가 증가할수록 균열성장이 빠르게 진행된다는 것을 알 수 있었다.

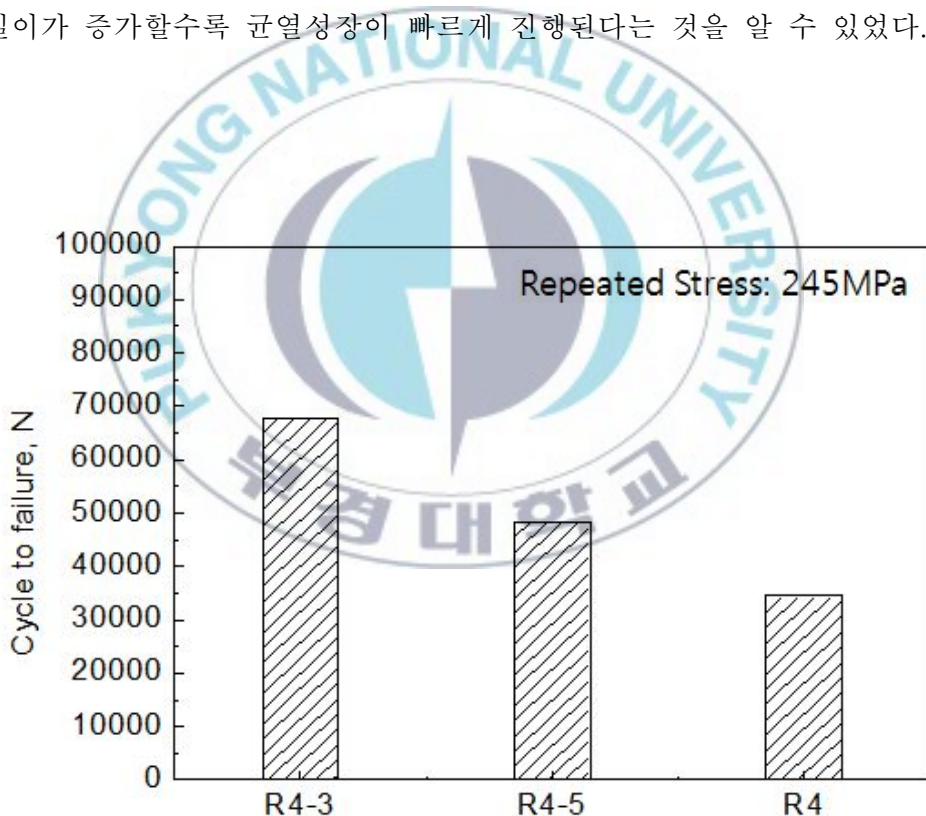


Fig. 5.5 Fatigue cycle to horizontal notch length

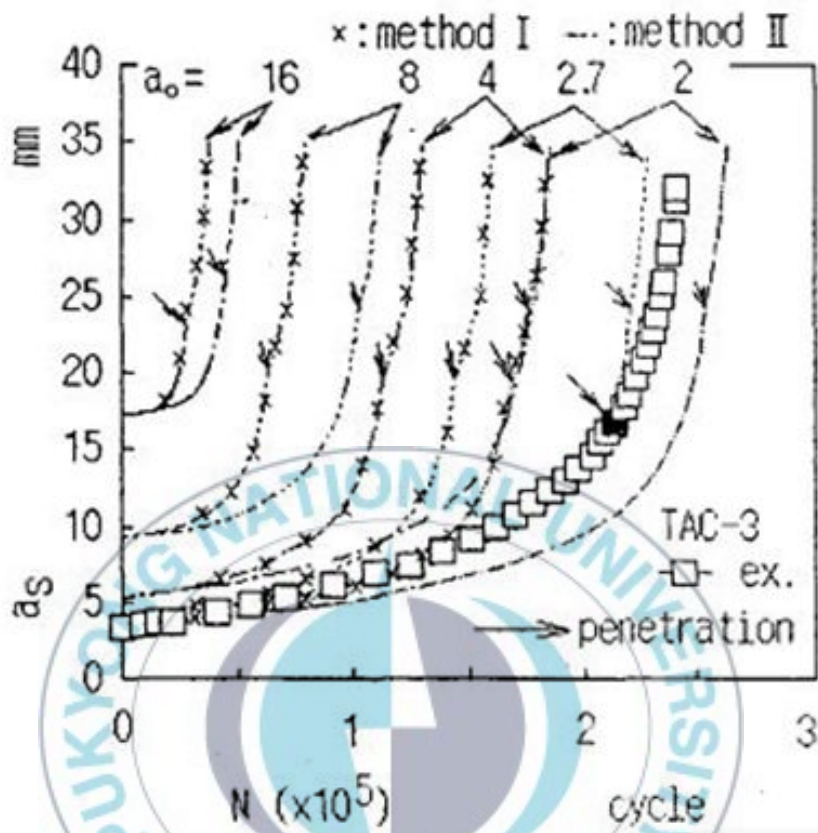


Fig. 5.6 Comparison of crack growth by variety of crack length¹⁰⁾

5.5 R31의 미용입부에 의한 피로수명 감소

RAc가 감소하면 WM의 경도가 감소하였고 이를 토대로 RAc가 11%로 최소인 R31의 피로수명이 가장 길게 나타날 것이라 예상 하였지만, 결과적으로 RAc가 23%인 R32의 시험편의 수명이 가장 길게 나타났다. 이는 Fig.5.7의 그림에서 보이듯이 (c)R31 LP의 시험편의 루트부에서 약 0.5~1mm의 미용입부가 발생하였고, 이로 인하여 피로수명이 감소한 것으로 판단된다.

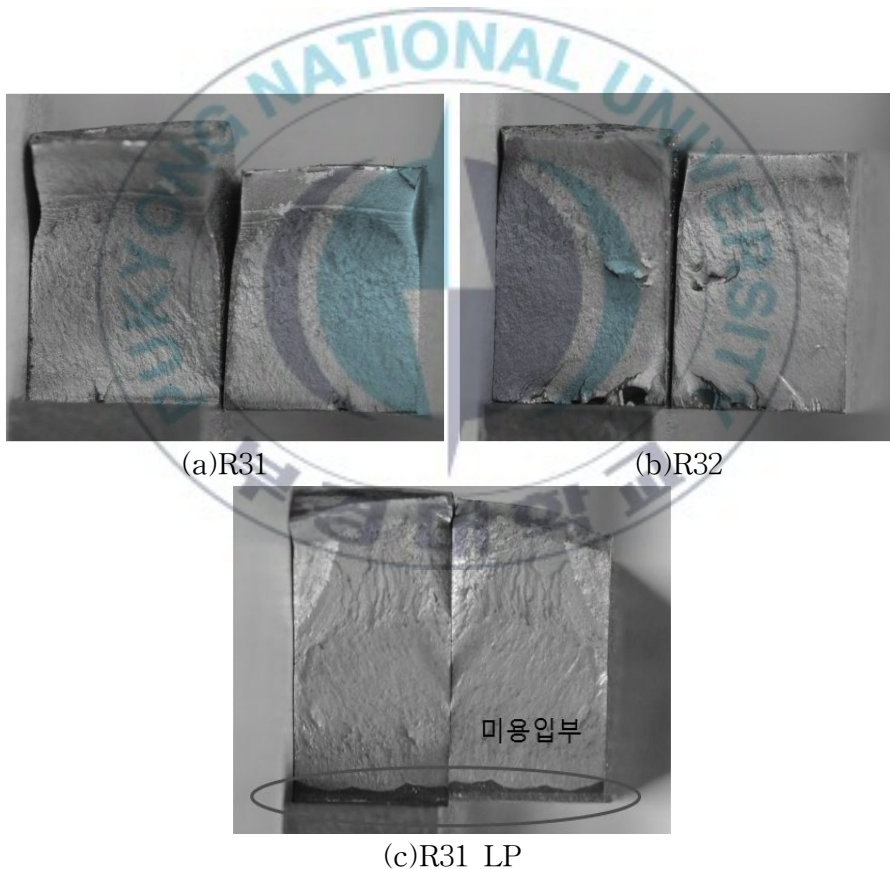


Fig. 5.7 Comparison of fracture

5.6 결론

3가지 하중조건에서 R4, R31, R32의 시험편을 피로시험 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) R4 시험편의 평균 피로수명은 약 3.4만 cycle이고, 17.66kN에서 약18만cycle 14.71kN에서 약 42만 cycle로 나타났다.

2) R31, R32모두 R4보다 피로수명이 상대적으로 증가된 것을 볼 수 있다.

3) RAc가 11%로 가장 낮은 R31보다 RAc가 23%인 R32시험편의 피로수명이 더 높게 나왔는데, 이는 R31-LP 시험편의 경우 루트부의 미용입부가 발생하여 피로수명이 감소하였다고 판단된다.

제 6장 결론

유압실린더 튜브 Semi-narrow gap 원주용접부에서 $\Phi 1.4\text{mm}$ 와이어 펄스 GMAW 최적화를 통하여 적층설계와 공정개발을 수행하여 3가지 하중 조건에서 R4, R31, R32의 시험편을 피로시험 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) R31, R32 시험편에서 $\Phi 1.4\text{mm}$ 와이어로 펄스용접을 적용하여 용접부 단면을 검토한 결과 pass2에서 pass1을 충분히 재용융 시키면서, 용접결함이 없는 최적화 펄스용접 공정을 확립하였다.
- 2) 탄소함량이 높고 경화성이 강한 SM45C혼합물(RAc)을 낮추기 위하여 pass1의 전류를 낮게하여 용입을 작게 하면서 용착단면적을 감소시켜 pass2 용접에 의해 Pass1의 비드를 재용융시키는 전략으로 루트부 WM의 경도를 낮게 할 수 있었다.
- 3) 초기 피로균열 발생부인 수평 Notch 팁 부근의 WM경도를 낮게 한 R3 시험편이 R4 시험편 보다 현저히 피로수명이 길어졌고, 또한 동일한 그루브의 용접부에서 수평 Notch길이를 짧게 하여 피로균열 발생수명을 길게 하면 전체 피로수명이 길어지게 되고 이 현상에 대한 파괴 역학적 모델을 확립하였다.

참 고 문 헌

- 1) Young Bum Kim, 굴삭기 유압실린더의 내구설계 기법에 관한 연구, 대한기계학회논문집 A권 제34권 12호, 2010, 1901~1907
- 2) AWS : Welding Handbook, Vol. 2, 8th Ed, 1991.
- 3) Modern Welding, 11th edition, p258
- 4) P. Praveen, M.J. Kang, P.K.K.V. Yarlagadda : Drop transfer mode prediction in pulse GMAW of aluminum using statistical model ; journal of materials processing technology 201 ,2008, 502-506
- 5) James M.Gere, Mechanics of materials 6th edition, 2009, 138-144
- 6) Z. Barsoum, B. Jonsson, Influence of weld quality on the fatigue strength in seam welds, 2010, Engineering failure analysis volume 18. issue 3, 971-979
- 7) Y. Kim, B.Y Lee, 용접 구조물의 피로수명 향상기법(I), 대한용접접합학회지 Vol39, 2012
- 8) K.J Kirkhope et.al, Weld detail fatigue life improvement techniques, Part 1; review. Marine Structure 12, 1999, 447-474
- 9) SM. Cho, 기계계의 신뢰성과 부재의 피로파괴, 한국마린엔지니어링학회지 제12권 4호 215-225, 1988
- 10) K.M Nam, 응력집중부를 갖는 표면균열재의 균열길이 변화에 따른 피로거동, 한국해양공학회지 제9권 1호 1995.6, 83-91

학위과정 중 주요 학술지 게재 및 발표논문과 특허

1. 주요 학술지 게재 논문

1) 변재규, 조상명, Semi-narrow gap 맞대기 용접부에서 피로강도 향상을 위한 펄스GMAW 공정개발, 대한용접접합학회지, 투고중

2. 학술발표대회 발표논문

1) Hot wire TIG용접에 의한 파이프 내면의 인코넬625 육성용접 공정 개발에 관한 연구, 대한용접.접합학회 춘계학술발표대회, 2011.04.07

2) TIG 육성용접에서 용착금속 용융효율 향상을 위한 용가재 횡단면 형상의 검토, 대한용접.접합학회 춘계학술발표대회, 2011.04.07.

3) 파이프 내면 TIG 육성용접에서 생산성 향상을 위한 공정개발, 한국마린엔지니어링 학회, 2011.06.09.

4) 슈퍼듀플렉스 STS TIG용접부의 PREN에 미치는 실드가스 중 N_2 의 영향, 대한용접.접합학회 추계학술발표대회, 2011.11.10

5) The study on Nitrogen Partitioning into the welded metal of Super Duplex Stainless Steel by TIG welding, International Welding/Joining Conference-Korea 2012, 2012.05.09.

6) 슈퍼듀플렉스 STS 용접부의 내공식성 향상을 위한 용접공정개발, 한국마린엔지니어링학회, 2012.06.23

7) Semi-narrow gap 맞대기 용접부에서 피로강도 향상을 위한 펄스GMAW 공정개발, 대한용접.접합학회 추계학술발표대회, 2012.11.23

3. 특허

- 발명의 명칭 : 가스노즐, 이를 구비하는 용접토치 조립체 및 용접장치

출 원 인 : 부경대학교 산학협력단

발 명 인 : 조상명, 서지석, 함효식, 변재규

- 발명의 명칭 : 저항용접용 박판 적층물 및 그 제조방법

출 원 인 : 부경대학교 산학협력단

발 명 인 : 조상명, 변재규



감사의 글

학부 2학년 때 조상명교수님의 재료역학 수업을 들으면서 용접이 재밌다는 것을 알게 되었고, 3학년 여름방학이 되어서야 실험실에 들어오게 되었습니다. 처음에는 대학을 나와서 무엇을 해야 할지도 모르는 저에게 용접프로세스 실험실은 많은 용기와 희망을 주었고, 석사과정을 무사히 마치도록 도와주신 교수님, 선배님, 후배님, 친구들, 가족들에게 진심으로 감사드립니다

지도교수님이신 조상명 교수님께서서는 용접에 관한 지식과 열정을 가르쳐 주셨습니다. 학문적인 부분 외에도 엔지니어로서 갖추어야할 소양과 덕목을 깨우쳐주신 교수님께 감사드립니다.

대학원 과정에서 석사로서 가져야할 지식과 인품을 알려주신 김우열 교수님, 그리고 학부 때 지도교수님으로서 제가 용접엔지니어가 되도록 도움을 주신 박홍일 교수님, 그리고 논문을 완성하도록 많은 도움을 주신, 김성규 교수님, 방국수 교수님, 이병우 교수님, 서원찬 교수님, 이길근 교수님께 진심으로 감사드립니다. 타과 교수님이시지만 항상 친절하게 해주신 정병호 교수님 감사드립니다.

학부와 석사과정을 함께 하며 지냈던 연구실원들에 감사드립니다. 먼저 연구실 선배로써 항상 밝은 웃음으로 도움주시고 연구실의 발전을 위해 뛰어다니는 오동수 선배님, IWJC로 같이 밤새며 자료 만드셨던 이재형 선배님, 약 10년간 연구실의 암모나이트로 남아계셨던 함효식 선배님, 언제 오실지 기다려지는 고미혜 선배님, 중고를 좋아하는 임성빈 선배님, 이것저것 하고 있는 김성호 선배님, 크리스찬인지 의심가는 정연호 선배님, 재호만 이빠하는

하중문 선배님, 살찌지 않는 박경도 선배님, 진지하고 소심한 서지석 선배님, 말하면 깨는 신희섭 선배님, 소고기 안 사주는 손창희 선배님, 잘사는지 궁금한 김남규, 잘사는지 궁금한 2인 김우연, 샤코 박효희, 턱두개 하현주, 보트릭스 오선호, 이거다 거짓말 손민수, 고집쟁이 박정현, 여자친구에게 묶여 사는 김영섭, 희재는 오늘도...김희재, 아직도 어색한 김재웅, 그리고 항상 그림자처럼 붙어 다니며 희노애락을 함께한 내 철없는 동기 전재호, 놀려도 놀려도 다시 일어나는 잡초 조영주에게 고마움을 전합니다.

마지막으로 제가 석사과정을 끝까지 마칠 수 있도록 도움을 주시고 믿어주셨던 아버지, 어머니, 누나, 친지분들 모두 감사드립니다. 그리고 늘 곁에 있어준 여자친구에게 사랑한다는 말을 전합니다.

