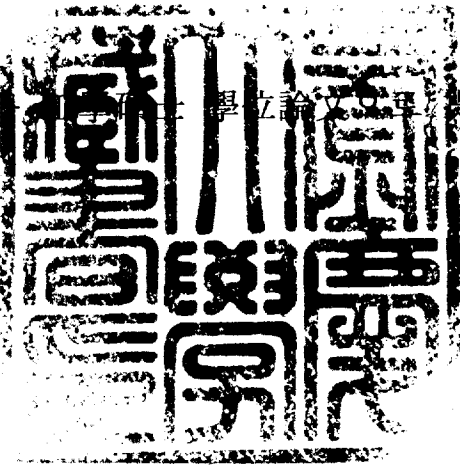


工學碩士 學位論文

자동차용 주철 금형 트리밍 날의
경화육성용접 공정개발

指導教授 趙 相 明

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함



2005年 2月

釜慶大學校 産業大學院

소재프로세스공학과

金 德 源

金德源의 工學碩士 學位論文을 認准함

2004年 12月

主 審 工學博士 金 雨 烈 (印)

委 員 工學博士 李 秉 雨 (印)

委 員 工學博士 趙 相 明 (印)

목 차

Abstract	2
제 1 장 서 론	3
1.1 연구배경 및 필요성	3
1.2 연구목적 및 개요	4
제 2 장 이론적 배경	5
2.1 서언	5
2.2 피복아크용접의 원리	7
2.3 주철용접의 이해	8
2.3.1 주철의 일반적인 조직	8
2.3.2 주철의 종류	9
2.3.3 주철의 용접성	13
2.3.4 주철의 용접재료	14
2.3.5 주철의 용접방법	16
제 3 장 SMAW를 이용한 트리밍 날의 경화육성용접	17
3.1 서언	17
3.2 실험재료 및 실험방법	18
3.2.1 실험재료	18
3.2.2 실험방법	20
제 4 장 실험결과 및 고찰	22
3.3.1 용접길이와 예열온도에 따른 용접부의 분석	22
3.3.2 용접속도와 예열온도에 따른 용접부의 분석	24
3.3.3 횡균열의 발생 메카니즘	26
3.3.4 마크로 검사를 통한 기공의 관찰	27
3.3.5 회주철 용접에서의 기공발생 메카니즘	29
3.3.6 미세조직 관찰 및 미세경도 측정	30
3.3.7 경화 육성된 날의 표면 경도	34
제 5 장 결 론	35
참고문헌	36

A Development of Hardening Overlay Welding Process on the Trimming Knife Edge of Cast Iron Die for Car Body

Duk Won Kim

Department of Materials Processing Engineering, Graduate School
Pukyong National University

Abstract

Trimming process is one of the most important procedure in field of car industrial and others. Trimming equipments consist of punch and die which can be divided into body and edge. Actually only the edge can be used to trim manufactured sheet, so these edge must be designed to endure repetitious shock and wear. Gray cast iron is suitable for trimming equipment because several industrial environment. But gray cast iron disadvantage for welding compared to steel.

The focus of this study is finding a development of hardening overlay welding process on the trimming knife edge of cast iron die for car body.

As a result, main factor of gray cast iron welding was welding speed and preheating temperature. especially, in condition of high welding speed and over 150℃ preheating temperature, improved quality was obtained.

Key Word : Trimming edge, SMAW, Length/pass, Preheating Temperature, Welding Speed, Penetration Test, Porosity, Crack, Gray Cast Iron, White Cast Iron,

제 1장 서론

1.1 연구 배경 및 필요성

판재의 성형 후 수반되는 트리밍(Trimming) 공정은 자동차 산업 및 여러 산업분야에 적용되고 있는 중요한 생산라인 중의 하나이다. 이러한 트리밍 공정에 쓰이는 장비는 크게 펀치와 트리밍 다이로 나뉘며, 이들은 골격(body) 부분과 날(edge)부분으로 구성되어있다. 실제 성형된 판재의 절단은 날 부위에 의해 이루어지며, 이러한 날은 반복되는 충격과 마모에 견딜 수 있도록 설계, 제작되어야 한다. 이는 날의 재료적 측면으로 볼 때 상당히 높은 경도 및 내마모성이 요구하며, 이를 만족할 수 있는 날의 제작은 크게 insert방식과 용접방식이 있다. insert 방식은 날 부위를 요구되는 물성치를 가진 재료의 소재를 삽입 결합하여 날 부위를 구성하는 방식이며, 용접은 날 부위를 고경도 소재로 육성용접후 가공하여 날 부위를 만드는 방식이다.

대형 판재의 경우 이러한 펀치와 트리밍 다이의 소재는 그 규모가 크고, 이에 따라 소재비용 또한 높다. 이러한 비용의 문제로 인하여 소형 트리밍 공정에서와는 달리, 그 소재를 스틸(steel)이 아닌 회주철(gray cast iron)을 많이 사용하고 있다. 또한 회주철이란 재료 특성으로 인하여 용접에 의한 날의 제작보다는 insert 방식이 많이 적용되고 있다. 하지만 이러한 insert 방식은 용접방식과 비교하여 상대적으로 날의 수명이 짧으며, 그로 인해 빈번한 날의 교체로 인한 생산성 저하를 초래한다. 그러나 일부 선진국에서는 이미 대형 트리밍 장비의 날 부분을 용접으로 제작하여 높은 생산성과 시간단축 이점을 얻고 있다. 아직 우리나라에서는 일부 자동차 산업에서 이러한 트리밍 날의 제작에 용접을 적용, 개발하고 있으나, 회주철 용접이라는 전문적인 기술 문제에 봉착해 여러 가지 문제점을 야기하고 있는 실정이다.

본 연구에서는, 이러한 회주철을 소재로 한 트리밍 날의 용접에서 발생하는 대표적인 결함인 크랙, 기공을 최소화하고 날이 요구하는 기계적 성질을 만족할 수 있는 용접공정 개발에 그 주안점을 두었다.

1.2 연구 목적 및 개요

주철은 재료적 특성으로 인해 강의 용접과는 달리 용접성이 나쁘다. 또한 용접을 하여도 우수한 품질을 100%로 획득하기란 힘들다. 이러한 이유로 주철용접은 용접 분야에서도 다소 회의적인 측면에서 다루어지고 있다. 다만 용접이 불가피한 일부 주철장비의 보수용접분야에서 완전한 품질을 얻을 수 없다는 전제하에 일부 용접이 시행되고 있는 실정이다. 또한 연구적인 측면에서의 주철용접을 제외하고, 대부분 현장에서는 고기능 용접사에 의해 경험적으로 행해지고 있는 실정이다. 또한 주철 용접대한 구체적인 방안 및 용접성에 미치는 각 인자의 영향을 정성적으로 연구한 사례가 극히 드물다.

본 연구에서는 다소 부분적이지만 이러한 주철용접에 대한 열악한 이론적인 배경을 좀더 구체화 시키고, 회주철을 소재로 한 트리밍 날의 제작에 쉴드메탈아크용접(SMAW)적용, 요구되는 용접품질을 만족할 수 있는 인자 즉, 날의 고경도, 크랙 및 기공의 최소화 등에 대한 구체적인 평가를 시행하였다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 서언

금속학적 용접, 접합은 접합 대상 부위를 가열시키거나 외력을 가하여 재료 상호간에 용해 및 응고, 확산, 소성변형 등의 금속학적 현상을 동반하는 접합형태이다.

이들은 다시 접합 현상에 따라 용융용접, 고상용접, 브레이징 및 솔더링 등으로 분류되며, 용융용접은 접합부를 국부적으로 가열하여 모재의 용융을 수반하는 접합방법으로서 용점이 같거나 비슷한 금속재료의 접합에 주로 이용된다. 또, 금속학적용접, 접합법은 Table. 2.1과 같이 분류할 수 있다. 에너지원으로서는 전기아크 또는 전기저항 등과 같은 전기적 에너지, 화학반응에 의한 화학적 에너지, 마찰 에너지 등이 사용되고 있다.

아크 용접법은 아크방전에 의해 발생하는 열원(약 6000℃)으로 용접부를 가열 용융시켜 접합시키는 방법으로 전극이 열원 및 용가재의 역할을 동시에 수행하는 소모전극식 (SMAW, GMAW, SAW, EGW)과 전극이 단순히 열원으로만 사용되는 비소모 전극식 (GTAW, PAW)으로 구분할 수 있다.

Table 2.1 Classification of various welding

에너지원	용접법	열원	압력부가여부	보호방법	비고
전기적 에너지	ESW	저항열	압력없음	플럭스	
	PW				
	PW, RW	저항열	압력없음	보호없음	
	RW				
	LBW	복사열	압력없음	보호없음	
	EBW	복사열	압력없음	진공	
	DFW	복사열	약한압력	가스 또는 진공	고상용접
	GMAW GTAW PAW EGW FCAW	아크열	압력없음	가스	
	SAW SMAW FCAW	아크열	압력없음	플럭스	
	FW FW, SW SW	아크열	소성변형	보호없음	
화학적 에너지	DFW	복사열	약한압력	가스보호	
	EXW		극심한 변형	보호없음	고상용접
	TW	반응물질	압력없음	플럭스	
기계적 에너지	CW		극심한 변형	보호없음	고상용접
	FRW	저항열	소성변형	보호없음	고상용접
	USW	저항열	약한압력	보호없음	고상용접
(주) CW : cold welding LBW : laser beam welding DFW : diffusion welding PAW : plasma arc welding EBW : electron beam welding PW : projection welding EGW : electro gas welding RW : resistance welding ESW : electro slag welding SAW : submerged arc welding EXW : explosive welding SMAW : shielded metal arc welding FRW : friction welding SW : stud arc welding FW : flash welding TW : thermit welding GTAW : gas tungsten arc welding USV : ultrasonic welding					

2.2 피복아크용접 (SMAW : Shield Metal Arc Welding) 의 원리

피복아크용접은 용접봉과 모재 간에 직류 또는 교류 전압을 걸고 용접봉 끝을 모재에 접촉시켰다가 떼면, Fig. 2.1 피복아크 용접의 원리와 같이 용접봉과 모재 사이에 강한 빛과 열을 내는 아크가 발생한다. 이 아크열에 의하여 용접봉은 녹아서 금속증기 또는 용구(globule)로 되어 용융된 모재와 융합하여 용착금속을 만든다. 이때 녹은 쇠붙이 부분을 용융지(molten weld pool), 용접봉이 용융지에 녹아 들어가는 것을 용착(deposit), 용착되어 응고한 상태를 용착금속(deposited metal), 용접시 피복제와 반응하여 용착금속을 도포하고 있는 비금속 불질을 슬래그(slag), 모재가 녹아 들어간 깊이를 용입(penetration)이라고 한다.

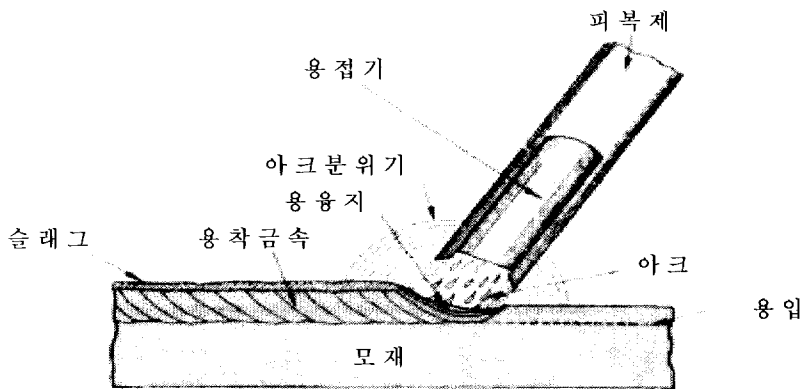


Fig. 2.1 Schematic of SMAW process

이러한 피복아크 용접회로는 Fig. 2.1과 같이 용접기(DC 또는 AC welding machine), 용접봉 홀더(Electrode holder), 용접봉(Coated or covered electrode), 아크(Arc), 모재(Base metal), 전극 케이블(Electrode cable), 접지 케이블(Ground cable)로 이루어진다. 용접기에서 발생한 전류는 용접기의 극성에 따라 흐르며, 이러한 전류의 흐름은 용접회로(Welding circuit)를 이룬다.

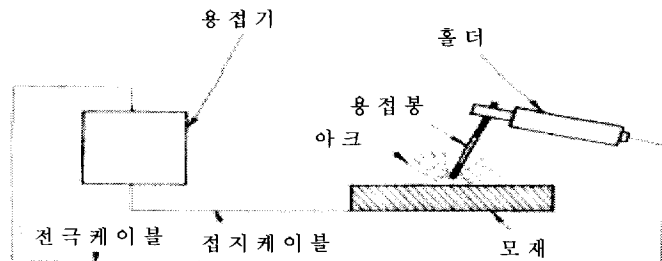


Fig. 2.2 The circuit of SMAW

2.3 주철용접의 이해

주철은 다양한 성질을 갖는 철 합금의 일종으로 조직학적으로는 탄소량이 2.0~6.67%인 철 합금이며, 고체상태에서의 기계적 가공보다는 원하는 모양으로 주조하여 제품으로 이용하고 있다. 실제 주철의 조성은 탄소 2~4%, 규소 1~3%의 경우가 많으며 첨가되는 다른 금속원소나 비금속원소에 따라 다양하고 특별한 성질을 갖는다. 화학성분을 제외하고 주철의 성질에 영향을 미치는 중요한 인자들은 응고조건과 냉각속도 및 열처리 등이다.

주철은 일반적으로 기계가공이 쉽고 넓은 영역의 강도 및 경도를 갖는 우수한 합금으로 마모, 연삭, 부식 등에 대한 저항이 우수하다. 주철이 새로이 개발되고 있는 합금과 경쟁하여 아직도 가장 널리 사용되고 있는 이유는 상대적으로 저렴한 가격과 다양한 기계적 성질이 그 요인이라 할 수 있다.

2.3.1 주철의 일반적인 조직

주철의 조직은 화학적 조성, 냉각속도, 흑연의 핵생성 정도에 따라 달라지게 된다. 주철에 함유되는 탄소량은 보통 2.5~4.5%정도인데, 그들 중 일부는 유리탄소(흑연)의 형태로 나머지 일부는 화합탄소(Fe_3C)로 존재하고 있으며, 유리탄소와 화합탄소의 비율에 따라 회주철(gray cast iron), 백주철(white cast iron), 반주철(mottled cast iron)로 구분한다. 즉, 흑연이 많을 경우에는 그 파단면이 회색을 띠는 회주철이 되고, 흑연의 양이 적고 대부분의 탄소가 화합탄소인 시멘타이트(cementite)로 존재할 때는 그 파단면이 백색을 띠는 백주철이 되며, 백주철과 회주철의 혼합조직으로 될 때를 반주철이라 한다.

2.3.2 주철의 종류

1) 회주철(Gray cast iron)

회주철은 2.0~4.5%C와 1.0~3.0%Si을 함유하고 있다. 이들 조직은 Fig. 2.3에서 보듯이 Pearlite, Ferrite 혹은 이 둘이 혼합된 기지에 나뭇가지처럼 불연속적인 흑연 즉, 편상으로 구성되어 있다. 편상흑연은 취약한 면을 형성하기 때문에 인장강도가 10~25kgf/mm²로 기계적 성질이 좋지 않다. 그러나 이들은 싸기 때문에 좋은 기계적 성질이 요구 되지 않는 곳 또는 주불무게가 문제되지 않는 곳에 널리 사용된다. 편상흑연조직의 주요 이점은 높은 기계적 Damping 용량 때문에 진동, 소음을 최소화 시켜야 하는 절삭가공기 받침 등에 사용된다.



Fig. 2.3 Pearlitic gray iron

2) 구상 흑인 주철(Nodular cast iron)

편상흑연으로 인한 기계적 성질의 취약성을 보완하기 위해 흑연의 형상을 변경 시키면 회주철의 기계적 성질이 크게 향상된다. 3.2~4.5%탄소와 1.8~2.8%규소를 함유한 용탕 중에 Mg나 Ce을 주탕 전에 첨가하면 Fig. 2.4에서 보듯이 편상 모양이 아닌 구상흑연이 생성된다. 1940년 후반에 출현된 이후 구상흑연주철은 단조주강품 및 다른 종류의 주철에 필적해서 중요성이 높아지면서 많은 곳에 사용되고 있다. 구상흑연주철은 Pearlite, Ferrite 또는 Pearlite Ferrite 기지로 되어 회주철보다 높은 인장강도(40~70kgf/mm²)와 연신율을 가진다.

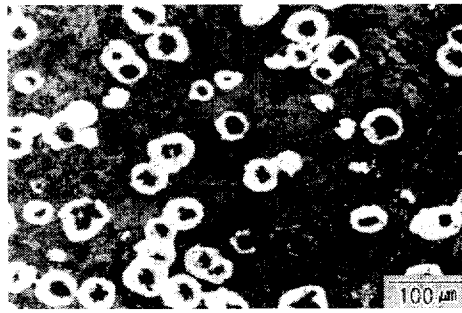


Fig. 2.4 Nodular cast iron

3) 가단주철(Malleable irons)

모든 가단주철은 백주철을 열처리 하여만든다.

백주철의 공정탄화물(Cementite)이 분해 되어 Pearlite 또는 Ferrite 기지 내에서 탄소 덩어리로 된다. 가단주철은 백심과 흑심 가단주철로 나뉘어 진다.

a. 백심가단주철(Whiteheart malleable iron)

백심가단주철 주물은 900-1000℃에서 탈탄분위기 하에서 장시간 소둔(Annealing)한다. 주물표면에서 제거된 탄소는 내부에서 확산되는 탄소로부터 약간 보충된다. 이 처리 후 백심가단주철은 탈탄된 표면층과 고탄소 중심부의 불균일한 조직이 된다. 표면 탈탄 정도는 제품의 크기에 좌우되는데 5mm이하 두께 주물의 경우 거의 탄소가 없는 상태가 된다.

b. 흑심 가단주철(Blackheart malleable iron)

흑심 가단주철은 탈탄 없이 850-950℃에서 백주철 주물을 소둔하여 만든다. 그 결과 조직은 주물의 크기에 무관하게 균일하고 Ferrite기지에 탄소가 구성되어 있다. Fig. 2.5 기계적 성질은 백심 가단주철보다 일반적으로 우수하다. 그러나 흑심 가단주철은 작업이 어렵다. 그 이유는 이를 생산하기 위한 백주철의 탄소함량이 백심가단주철의 그것보다 적기 때문이다. 흑심 가단주철의 용접성을 향상시키기 위해 탈탄 분위기에서 소둔하는 수도 있다. 이 경우 흑심가단주철의 좋은 기계적 성질과 백심 가단주철의 좋은 용접성을 함께 겸비할 수 있다.

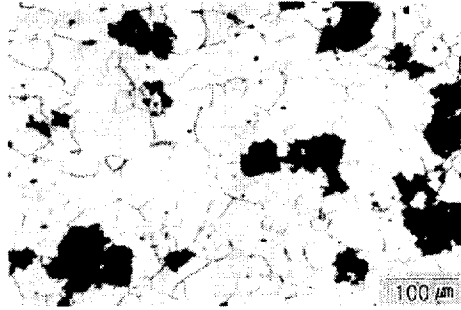


Fig. 2.5 Blackheart malleable iron

c. Pearlite malleable iron

이는 탄화물 안정화 원소를 첨가한 백주철에 대해 흑심 가단주철 소둔방법을 쓰거나 Ferrite 흑심 가단주철을 한 번 더 열처리 하여 제조할 수 있다. Fig. 2.6 Pearlite가단주철은 Ferrite 흑심 가단주철에 비해 연성은 낮고 강도는 높다.

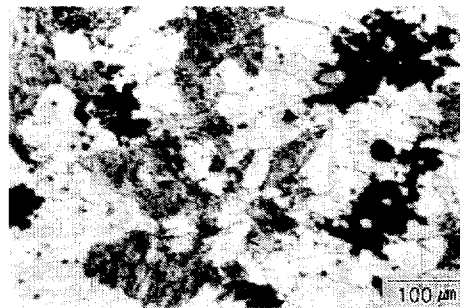


Fig. 2.6 Pearlitic malleable iron

4) Compacted graphite iron

이는 최근 새로 개발된 재료로써 편상흑연과 구상흑연 주철의 중간조직을 가진다. Fig. 2.7에서 보듯이 보통 Graphite 편상 보다 짧으면서 두껍고 또 끝부분은 둥글게 생겼다. Compacted graphite iron의 생산은 Mg의 첨가로 이루어지는데 그 양이 매우 중요하다. Ti을 0.08~0.1%, Mg을 0.015%~0.03%, 그리고 Ce을 미량첨가하면 좋은 Compacted graphite 조직을 얻는다고 보고 있다. Compacted graphite iron의 인장강도는 30 60kgf/mm²로 회주철과 구상흑연주철의 중간이고 연신율은 3 6%범위이다.

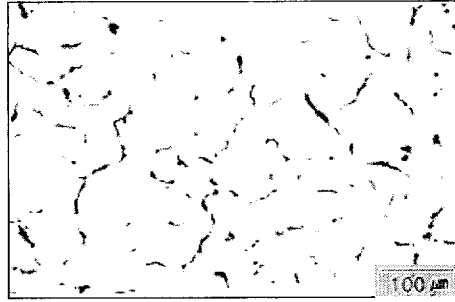


Fig. 2.7 Compacted graphite iron

5) 백주철(White iron)

백주철 응고 시 준 안정된 공정물이 생성된다. 따라서 조직은 Fig. 2.8에서 보듯이 Cementite와 변태된 Austenite로 구성되어 있다. 공정 Cementite는 성분과 냉각속도에 따라 벌집모양 또는 판 형태로 존재한다. 주어진 합금성분의 경우, 더 빠른 냉각속도는 판상의 공정 Cementite 생성을 촉진한다. 백주철은 규소함량을 낮추어서 느린 냉각속도에서도 준안정 공정응고 반응을 일어나게 한다. 또 다른 방법은 탄화물 안정화원소인 Cr등을 첨가하거나 열전도도가 높은 Mould 재료를 사용하여 냉각속도를 증가시키는 것이다. 백주철은 탄화물을 많이 함유하고 있어 경도 및 취성이 높아 Pearlite 또는 Martensite 기지의 경우 경도가 각각 400-600또는 550-800Hv를 나타낸다.

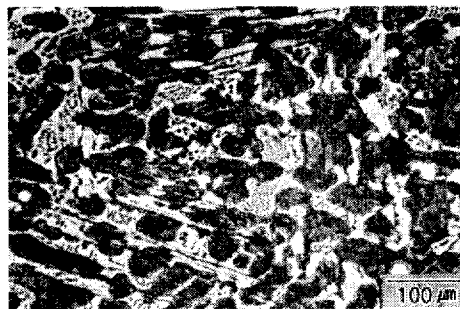


Fig. 2.8 White iron

2.3.3 주철의 용접성

1) 주철종류의 영향

탈탄된 백심가단주철을 제외하고 주철은 쉽게 용접되지 않는다. 주철의 종류에 따른 성공적인 용접을 위해서는 각기 다른 예열온도가 필요하고, Ferrite 기지를 가진 주철이 고탄소 기지의 그것보다 더 쉽게 용접이 된다. 용접성에 영향을 미치는 또 다른 변수는 흑연의 형태이다. 편상흑연주철은 분리된 흑연입자들이 약한 면을 생성하지 않는 구상 또는 가단주철보다 근본적으로 더 취성이 강하고 따라서 용접하기 어렵다.

2) 금속학적 영향

용접부가 급랭하게 되면 백선화 되면서 수축량이 편상흑연주철에 비해 현저하게 많아 높은 잔류응력 발생으로 균열의 위험성이 높다. 또 가공성 불량 및 재질의 취성이 높아 사용상 문제점이 많다. 높은 예열과 올바르게 선택한 용접재료를 사용하더라도 용접 시 흑연을 함유하고 있는 재료를 녹인다면 백주철의 생성을 피할 수는 없다.

주철 용접 시 낮은 입열을 사용하여 모재의 용융정도를 억제하고 용융금속 희석 및 취성이 높은 백주철 영역을 피하는 것이 좋다. 용융접합에서 낮은 입열의 목적은 용접부에 불연속적인 백주철을 생성시켜 이들이 용접부를 약하게 하는 효과를 감소시키는 것이다. 모재와의 융합을 피하려면 Brazing, Soldering 또는 분말용접을 하는 방법밖에 없다. 인의 함량이 높은 회주철의 경우 용고 시의 저융점의 Fe-Fe₃P 공정불을 생성하여 용착금속과 HAZ(열영향부)에 고온균열을 일으키기도 한다. 이런 결함은 특히 인의 함량이 0.5%를 넘을 때 매우 심각하고 이런 합금은 거의 용접될 수 없다. 또한 주철의 높은 탄소함량 때문에 용탕중의 산소와의 반응으로 용착금속에 기공 등이 형성되기도 쉽다.

3) 예열 및 후열

예열은 용접부의 냉각속도를 느리게 하여 Martensite 생성을 최소화하고 경도도 떨어뜨린다. 또 예열은 수축응력을 분산시켜 변형을 감소시키고 따라서 균열의 위험성도 낮춘다. 그러나 복잡한 형상의 주물을 예열할 경우 불균일한 팽창이 일어나 균열과 변형이 생길수도 있다. 이와 같은 경우 충분한 예열이 요구되나 본 실험에서는 변형의 최소화를 위해 300℃ 이상의 예열온도는 적용하지 않았다.

2.3.4 주철의 용접재료

1) 용접재료 선택시 고려할 인자들

- 가격
- 모재의 회석을 견딜 수 있는 정도
- 절삭성
 - 빠른 냉각속도에 대한 견딤성
 - 낮은 입연에서의 용접성
- 용접수축력을 흡수할 연성
- 요구되는 기계적 성질

주철용접용 재료는 주철봉, 연강봉, Ni합금봉 및 구리 합금봉이 있다. Table. 2.2에 주철 보수용접용 피복봉의 종류 및 적용부위를 나타내었다.

2) 주철 용접봉

주철봉은 모재주물과 강도와 색상 면에서 유사하다. 모재의 회석은 문제가 되지 않고 높은 예열온도를 유지하므로 경한 응고조직 및 HAZ조직을 감소시키나 완전히 제거하지는 못하기 때문에 후열처리를 하지 않을 경우 절삭성에 문제는 있을 수 있다. 수동 및 Gas 용접뿐만 아니라 MIG용접용 Cored wire도 개발 되었다.

3) Ni 합금 용접봉

순수 Ni과 Ni 45%Fe이 가장 많이 사용된다. 순수 Ni 봉은 강도가 낮아 절삭성은 좋지만 가격이 비싸고 모재 회석율이 높을 경우 흑연석출로 인해 취성이 일어나기 쉽다. 또 모재에 인의 함량이 높은 경우 균열이 생기기 때문에 특히 회주철의 경우 사용하지 않는 것이 좋다.

Ni-45%Fe은 싸고 기계적 성질이 모재와 비슷하고 회석에 잘 견디고 인으로 인한 균열에도 덜 민감하다. Austenite 주철에도 Ni-45%Fe 봉을 사용할 수 있으나 인성과 내열성이 문제가 될 때에는 곤란하다.

4) 연강용접봉

연강용접봉은 싸지만 모재로부터 탄소 이동으로 인해 경한 Martensite가 냉각시 생성된다. 백심 가단주철처럼 주철 표면이 탈탄된 경우에는 저탄소층을 용접 Bead가 침투하지 않아 성공적으로 연강 용접봉을 쓸 수 있다.

5) 구리합금 용접봉

여러 종류의 Bronze(Cu-Sn, Cu-Al 및 Cu-Al-Mn등)가 주철 용접용으로 사용된다. 주된 이점은 용접이 낮은 것이다. 유동성이 좋고 희석에 잘 견디고 상대적으로 부른다. 저용점 온도는 경한 HAZ의 생성을 억제하고 연화된 용착 부는 수축력을 흡수해 준다.

Table. 2.2 Electrodes as used repair welding in cast iron

분류	규격	특성및적용	시공조건	비고
연강 용접봉	JIS DFC Fe AWS Est DIN 8573 EFe 1 KS EGC Fe	1) 기계가공성을 요구하지 않는 부위 2) 육성용접부의 Buffer Run 3) 내마모성을 요구하는 부위	냉간용접	화학성분은 JIS Z 3252 AWS A5. 15 69 Part 1 참조
비철 합금봉	Ni계 DFC Ni AWS E Ni-Fe DIN 8573 E Ni	1) 기계적 강도를 크게 요구하지 않는 결함부위 2) 열변형을 피해야 하는 복잡한 주물보수시	냉간용접 저온예열 용접	“
	Ni-Fe 계 JIS DFC Ni-Fe AWS ENi-Fe-Cl DIN8573 ENi-Fe 1 DIN8573 ENi-Fe-2	1) Ni계 보다 기계적 강도가 높음 2) 구속력이 강한 보수용접부의 Buffer Run에 적용시 Ni계 보다 우수함	냉간용접 저온예열 용접	“
	Ni-Cu계 JIS DFC Ni-Cu AWS ENi Cu-A AWS ENi Cu-B Din8573 ENi Cu	1) 용접부의 강도가 Ni계나 Ni-Fe계 보다 낮으므로 내압성을 요구하는 부위에는 사용하지 않는 것이 좋음 2) 결함보수부의 외각 Bead 형성시 사용	냉간용접	“
	JIS DFC-Cl AWS ECl DIN 8573 EFe-C-1 DIN 8573 EFe-C-2	1) 용착금속부가 모재와 동일하게 주철로 됨 2) 기계가공성이 양호함 3) 가공 전 주방폼 보수 시	고온예열 용접	“

*용접봉의 사용 전처리 : 용접봉 사용 전에는 반드시 Rebaking 할 것.

Baking 온도 및 시간: 용접봉의 사양참조

2.3.5. 주철의 용접방법

주철의 용접방법은 Fig. 2.9 과 같이 열간 용접과 냉간 용접으로 크게 둘로 분류된다. 열간 용접법은 모재 전체를 400~600℃의 고온으로 예열하고 이 고온상태를 용접 중에도 유지한다. 용접이 끝난 후에는 서냉 하여야 하고 용접직후 응력제거 소둔을 하는 것이 바람직하다. 냉간 용접은 예열을 하지 않거나 국부적으로 낮은 온도로 가열하여 용접하는 방법이다

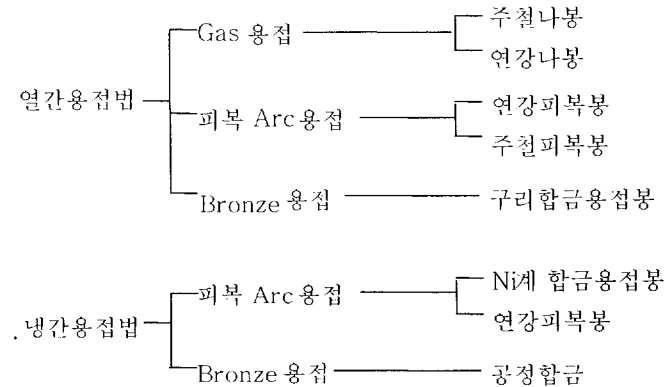


Fig. 2.9 Method of cast iron welding

열간 용접법은 HAZ의 백선화를 억제할 수 있으나 예열로 인한 cost 상승, 고온에서의 표면 산화 및 용접변형 등의 문제점이 있다. 냉간 용접법은 작업이 용이하고 변형은 최소화시킬 수 있으나 HAZ의 백선화에 의한 균열 및 기계절삭성이 떨어지는 결점이 있다. 그러나 최근에는 냉간 용접법이 많이 이용되고 있는 추세이다.

제3장 SMAW를 이용한 트리밍 날의 경화육성용접

3.1 서언

주철 밑갈기용 용접봉 및 경화육성 용접봉을 이용하여 각각의 조건하에서 용접을 시행하고, 결과를 관찰 크랙 및 기공 발생을 최소화 시킬 수 있는 용접조건과 마크로 검사 및 마이크로 조직 관찰을 통해 결함의 원인 및 그에 대한 정성적인 평가를 하였다. 그리고 예열온도에 따른 경화육성용접된 날 부위 경도 값을 측정하고, 트리밍 날로서 최적의 경도를 얻을 수 있는 예열온도를 산출하는데 관점을 두고 본 실험을 시행하였다.

3.2 실험 재료 및 실험 방법

3.2.1 실험 재료

본 실험에서 피용접재는 회주철(FC300)을 사용하였고, 모서리 부위를 반지름 6mm로 가공하여 날 부위를 육성 용접하였다. Table. 3.1은 회주철의 화학성분 및 기계적 성질을 나타내었다. Fig. 3.1은 피용접재료와 용접의 모식도이다. 그리고 실험에 사용된 용접봉은 두 종류로 하나는 주철용 용접봉(E)이며 또 하나는 경화 육성용 용접봉(AISI S-7)이다. 용접봉E는 일반적인 주철용 용접봉(연강, 니켈계, 주철계)과는 달리 Cr, Ni을 주 합금성분으로 하며, 특히 탄소함유량을 낮추고 경도를 향상시킨 용접봉이며, AISI S 7는 Shock Resisting재료의 용접에 쓰이는 용접봉이다. 용접봉 E와 AISI S-7의 특성은 Table. 3.2에 나타내었다.

Table. 3.1 Chemical compositions(wt.%) and mechanical properties

NAME OF MATERIAL	C	Si	Mn	P	S	Tensile strength (kgf/mm ²)	Hardness of material (HB)
FC300	3.0 - 3.3	1.8 - 2.3	0.6 - 1.0	0.15 이하	0.12 이하	30	217-269

Table. 3.2 Characteristic of electrode E and AISI S 7

NAME	Spec.	Hardness as weld (HRC)	Applications	Typical physical or mechanical properties	Typical chemistry
E	N/A	35	Repairing of cast iron, used as underlayment	First layer on cast iron is austenitic 53-55HRA	Special low carbon Cr, Ni, Alloy
AISI S-7	AISI S-7	56-61	Repairing of S-7 tool steel, and shear blades	N/A	C:0.5 Mn:0.5 Si:0.6 Cr:3.25 Mo:1.2 V:0.35

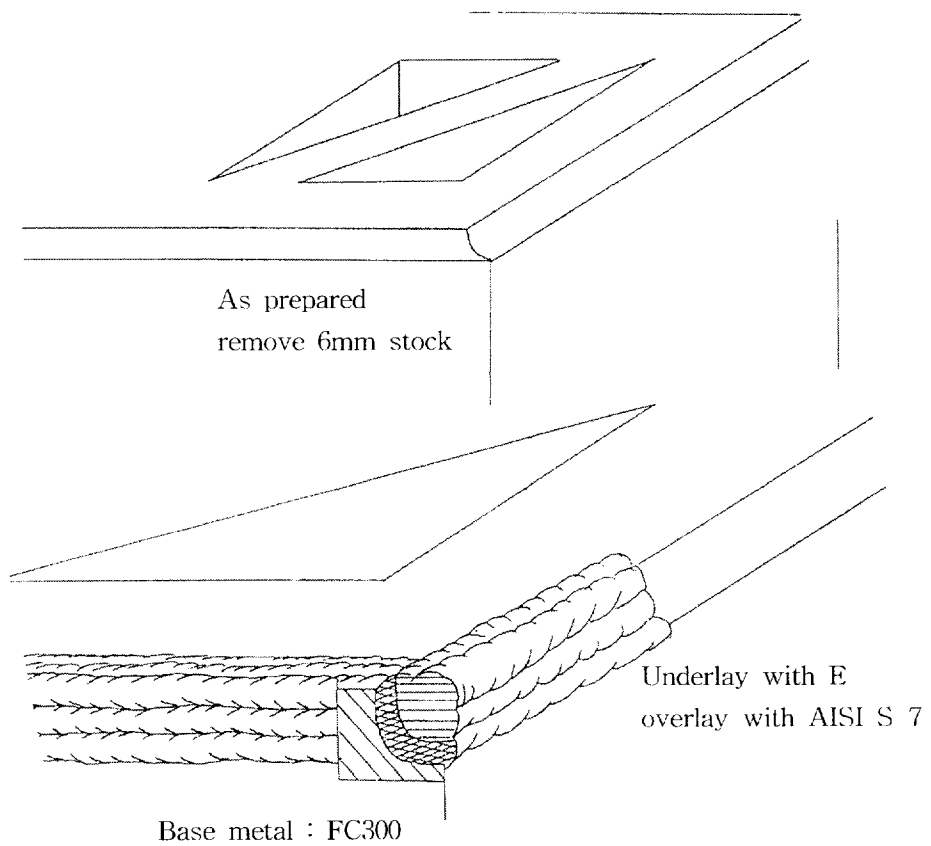


Fig. 3.1 Prepared FC300 and schematic of welding

3.2.2 실험 방법

DC인버터 아크 용접기를 사용하였고, 극성은 DCEP로 용접하였다. 용접품질에 영향을 미치는 많은 인자 중 주요인자의 선택은 주철의 용접성을 고려하여 초층 용접길이/pass(발생응력), 예열온도(냉각속도), 용접속도(입열량) 세 가지로 선택 적용하였다. 주요인자의 변화조건은 Table. 3.3에 나타내었다. 그 밖의 다른 용접 조건은 다음과 같이 변동 없이 적용하였다.

- * 예열 : 산소+LPG 버너를 이용하여 각 온도별로 가열
- * 용접전류 : 105A(3.2Φ)
- * 총 용접길이 120mm
- * 경화육성시 용접길이/pass : 120mm
- * 용착방법 : 스킵법, 후퇴법 병행
- * 용접 후 응력감소 : 볼피닝햄머를 이용 용접 후 신속히 피닝
- * 용접 후열처리 : NONE

Table. 3.3 The condition of SMAW welding

예열온도(℃)	RT		100		150		200		300	
E의 용접길이/pass(mm)	30	60	30	60	30	60	30	60	30	60
용접속도 (cpm)	60									
	100									

예열온도의 변화는 상온에서 최고 300℃까지 변화시켰다. 그이상의 온도에서는 제품의 변형이 야기되어 재가공이라는 커다란 문제를 발생시키므로 본 실험에서는 배제되었다. 그리고 용접사에 의한 전류 및 전압의 미소 변동량 무시되었다. 용접 후 액체침투탐상을 이용하여 거시적인 결함 유무를 검사하였다. 또한 결함의 원인 분석을 위해 광학현미경을 이용 용접부의 단면 및 결함부위의 미세관찰을 하였고, 마이크로 비커스를 이용 미세경도를 측정하였다.

또한 균열 및 기공이 작은 조건하에서 예열온도만을 변화시켰을 때 그에 따른 경화유성된 날의 표면경도의 변화를 보기 위해 쇼어 경도계를 이용하여 경도를 측정하였다. 날의 표면 경도변화의 관찰을 위한 조건은 Table. 3.4에 나타내었다.

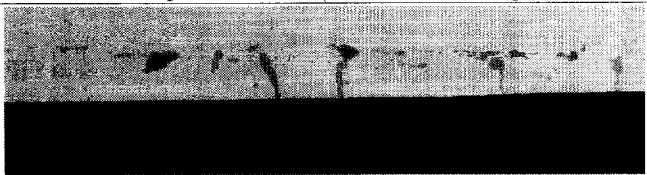
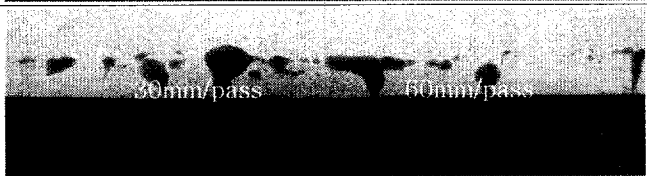
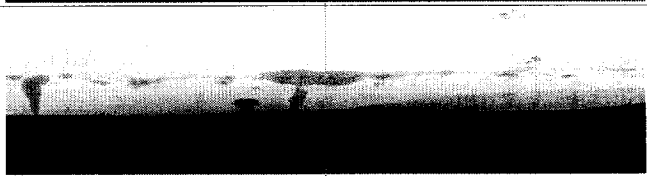
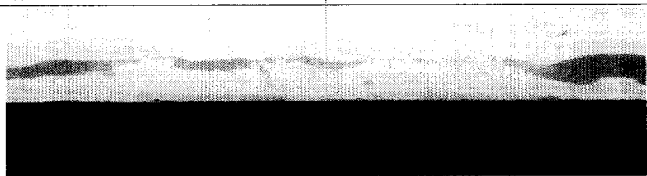
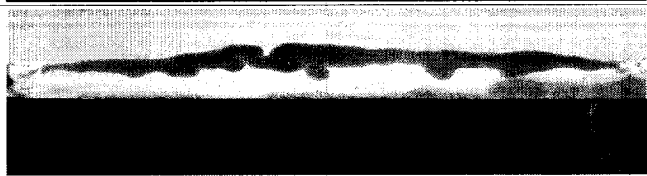
Table. 3.4 The condition of SMAW welding for hardness test

용접조건	용접속도 100cpm, 용접길이 60mm				
예열온도(℃)	RT	100	150	200	300

3.3 실험결과 및 고찰

3.3.1 예열온도와 용접길이에 따른 용접부의 분석

Table. 3.5 Welding bead in variable preheat temperature, welding length/pass and fixed welding speed

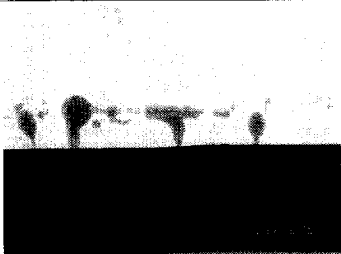
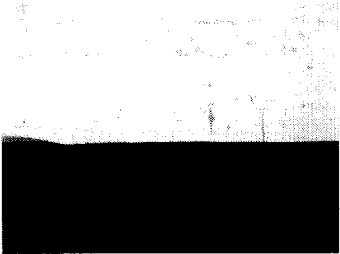
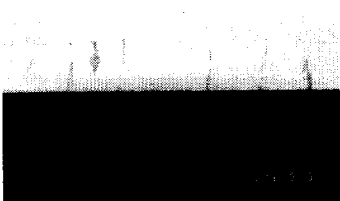
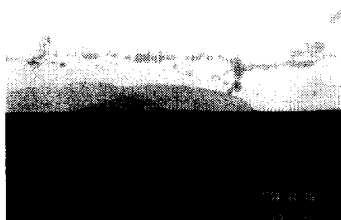
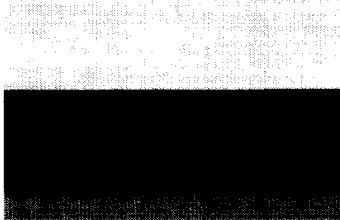
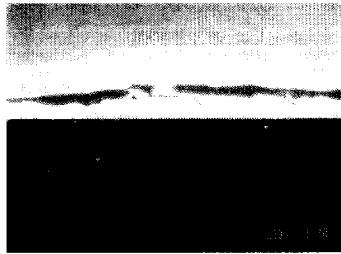
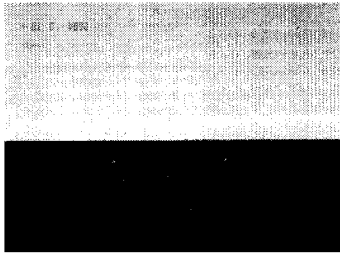
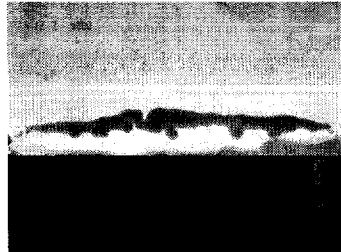
예 열 온 도	용접길이	용접길이	결합종류
	30mm/pass	60mm/pass	
RT			기공 종균열 횡균열
100			기공 종균열 횡균열
150			기공 종균열 횡균열
200			기공 종균열
300			기공 종균열
종균열 : 용접선 방향 균열 횡균열 : 용접선에 수직방향 균열			

용접속도는 60cpm으로 일정하게 유지하고 예열온도와 용접 길이만을 변화시켜 가며 용접을 한 결과를 Table. 3.5에 나타내었다. 용접길이 변화에 따른 용접품질의 변화는 나타나지 않았다. 예열온도에 따른 용접품질의 변화는 횡균열의 유무에서 관찰되었는데, RT, 100℃, 150℃에서는 중균열 과 횡균열 그리고 편향 모두가

나타났고, 200℃와 300℃에서는 횡균열을 제외한 종균열과 핀홀만이 나타났다. 그리고 예열온도가 높아짐에 따라 종균열이 더욱 두드러지는 경향을 보였다. 이러한 결과는 같은 조건하에서, 용접길이의 변화는 균열의 발생에 영향을 미치는 잔류응력의 생성에는 크게 기여하지 않으며, 또한 용접 후 발생하는 잔류응력은 신속한 피닝으로 인해 상당히 보완된다고 볼 수 있다. 즉 용접길이의 장대화로 인한 용접 품질의 저하보다는, 용접품질에 더 큰 영향을 주는 다른 중요 인자가 있는 것으로 판단된다. 이러한 관점은 회주철 용접시 생산성의 저하를 초래하는 짧은 stringer bead는 다른 중요인자만 충족된다면 간과시 되어도 된다는 가정을 낳게 된다. 또한 회주철을 소재로 하는 트리밍 날의 경화육성용접시 생산속도를 향상시킬 수 있는 GMAW의 연구에서 보다 깊게 논의 되어야 할 분야이다.

3.3.2 용접속도와 예열온도에 따른 용접부의 분석

Table. 3.6 Welding bead in variable welding speed, preheat temperature and fixed weld length

예 열 온 도	용접속도 60cpm	용접속도 100cpm
RT		
100		
150		
200		
300		

용접길이는 일정하고, 예열온도와 용접속도만을 변화시키며 용접을 한 결과를 Table. 3.6에 나타내었다. 앞선 실험에서의 결과와 동일하게 예열온도에 따른 용접품질의 변화는 저온(150℃이하)영역에서 용접속도와는 관계없이 횡균열이 발생하였고, 그 이상의 온도에서는 횡균열의 발생이 없었다. 이러한 결과는 용접선과 수직으로 발생하는 횡균열의 주된 원인은 예열온도임을 알 수 있다. 용접속도의 변화에 따르는 용접품질의 변화는 Table. 3.6에서와 같이 속도를 높임으로서 모든 예열온도에서 종균열이 발생하지 않았다. 즉 종균열은 용접길이/pass나 예열온도가 아닌 용접속도에 의해 좌우된다고 볼 수 있다. 이러한 결과의 가장 큰 원인은 입열량의 감소이다. 용접속도가 증가함에 따라 입열량이 감소하여 모재의 용융정도를 억제하고, 모재로부터 용융금속으로의 탄소의 이동량을 감소시켜, 용융금속 회석 및 취성이 높은 백주철 영역과 기공의 발생을 최소화하기 때문이다. 그러나 용융부의 백주철의 생성을 근본적으로 막을 수는 없다. 다만 입열량을 낮추어 용융부에 불연속적인 백주철을 생성시켜 이들이 용접부를 약하게 하는 효과를 감소시키는 것이다.

3.3.3 횡균열의 발생 메카니즘

AISI S 7용접재료는 우수한 기계적 성질을 얻기 위해 탄소 및 합금원소 량이 많은 재료이고, 그로 인해 경화능이 높은 재료이다. 이렇게 경화능이 높은 용접재료는 CCT Diagram에서 S곡선이 오른쪽으로 상당히 이동한 상태이다. 즉 S곡선은 탄소량 및 합금성분이 증가할수록 오른쪽으로 이동하게 된다. 결과적으로 Fig. 3.6(a)와 같이 동일한 냉각속도에서 합금량이 적은 다른 소재보다 마르텐사이트와 같은 취성이 강한 조직의 생성이 쉽다. 또한 ¹⁾Fig. 3.6(b)에서와 같이 다층 용접시 발생하는 용접선방향의 높은 인장잔류응력과 병합되어 균열의 발생과 성장을 촉진시킨다. 이와 같은 이유로 고탄소강 및 tool steel과 같이 합금량이 많은 용접재료의 다층용접에서 냉각속도를 늦추기 위해 보다 높은 예열온도가 요구되는 것이다. 본 실험에서 발생하는 횡균열의 발생 경향도 이와 같이 낮은 예열온도로 인한 빠른 냉각속도 조건하에서만 발생하였고, 냉각속도가 늦은 높은 예열온도에서는 횡균열의 발생은 대부분 없었다.

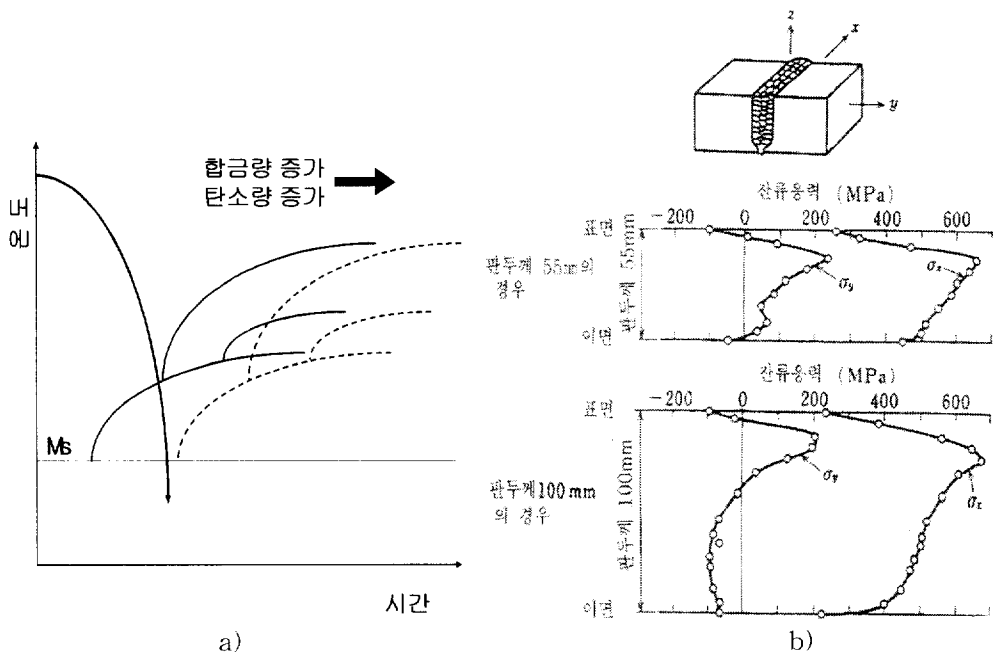
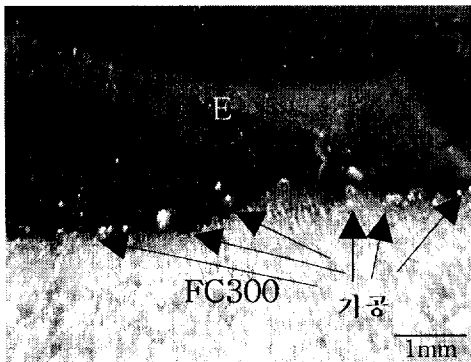


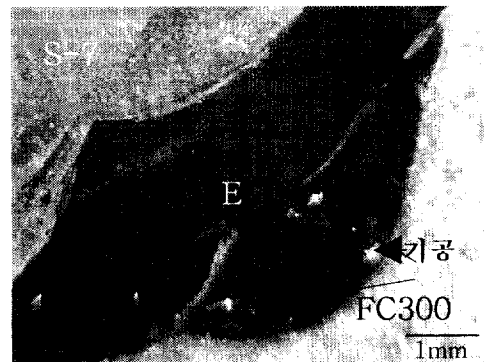
Fig. 3.6 The schematic for the movement of S curve as increase alloying and residual stress of weldment in multipass welding

3.3.4 마크로 검사를 통한 기공의 관찰

Fig. 3.7은 같은 조건(예열온도 200℃, 용접길이 60mm/pass)에서 용접속도를 변화시켰을 때의 용접부 마크로 사진이다. 회색부는 용접봉 S-7의 경화육성층이고 검은색 부분은 용접봉E로 용접한 초층부이다. 백색의 빛나는 부분은 모재인 FC300이다. 용접부의 사진에서와 같이 E로 용접한 초층 부위에 기공이 다수 발생되었음을 알 수 있다.



(a) welding speed 60cpm



(b) welding speed 100cpm

Fig. 3.7 Macro structure of the weldment in 60cpm and 100cpm welding speed

기공의 검출은 ×5배 현미경을 이용 용접부의 횡단면을 관찰, 지름 1mm이하의 기공만을 포함시켰다. 용접속도와 예열온도에 따른 단위면적당 발생하는 기공의 수를 Fig. 3.8에 나타내었다. Fig. 3.8에서와 같이 단위면적당 기공의 발생 수는 용접속도가 증가함에 따라 확연하게 감소하였다. 앞선 종관열의 발생경향과 유사하게 기공의 발생수도 용접속도의 변화에 따른 입열량의 변화에 크게 좌우된다고 볼 수 있다. 예열온도에 따른 기공발생 수는 예열온도가 증가함에 따라 미약하게 감소하였다. 그 이유는 예열온도를 높여 냉각속도를 느리게 함으로써 용접금속내 CO가스 배출시간이 충분히 확보되어 이러한 결과를 나타내었다고 보여진다

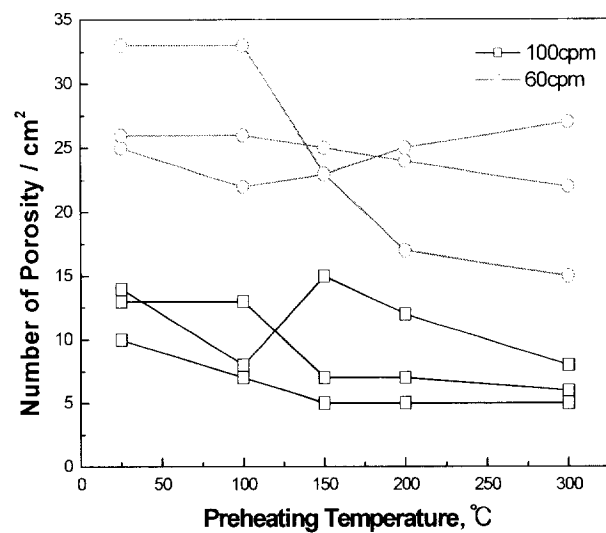


Fig. 3.8 Number of porosity/cm² in variation preheat temperature and welding speed

3.3.5 회주철 용접에서의 기공발생 메카니즘

일반적으로 용접 아크에 의한 용접 금속에서는 아크 분위기중의 가스의 활성화(이온화)에 의해, 동일한 온도에서 보통의 비아크 용해에 의한 용융 금속보다도 다량의 가스가 용해한다. 이 때문에 아크 용접부는 비아크 용해부 보다 기포가 발생하기 쉽다. 용접중에 기포를 형성하는 가스의 발생원으로서의 다음의 세 가지가 고려된다.

- 1) 용고 온도 이상에서의 용해도 변화 또는 용고 온도에서의 액체와 고체의 용해도 차이에 기초하는 가스의 방출.
- 2) 용융금속 중에서의 화학반응에 의한 가스의 발생
- 3) 아크 분위기의 가스의 물리적 연루

회주철의 SMAW에서 발생하는 기공의 주된 원인은 위의 2)항으로서 용융된 모재에서 많은 양의 탄소가 용접금속으로 이동하게 된다. 용접금속내의 탄소는 어떠한 경로로 용탕 내에 존재하는 산소와 반응하여 CO가스를 만들게 된다. 이러한 가스는 어느 압력이상에 달하면 기포를 형성하여 용융금속 내를 이동하여 대기 중으로 배출된다. 그러나 용융금속의 용고 속도가 기포의 이동(부상)속도 보다 빠른 경우에는 용고 금속 내에 남겨져 기공으로 된다. 또한 배출된 가스는 소정의 배출압력을 가지며, 회주철의 경우 많은 탄소량으로 인해 배출되는 가스의 양도 많다. 또한 이러한 가스의 배출은 액상의 스패터를 비산시키는 경우도 발생된다. 이러한 가스의 배출과 스패터의 비산은, 저전류로 용접되는 회주철의 낮은 아크력과 드려블을 일으키며, 아크안정성을 저하시키는 요인으로 작용한다. 아크안정성의 저하는 또다시 쉴드효율의 저하, 아크꺼짐과 같은 외부공기의 혼입을 유발하는 또 다른 문제점을 야기시키고, 후행된 용접에서 용접금속내 산소의 양을 증가시켜 탄소와의 화학반응률을 높여 연속적인 기공 발생을 유발시킨다. 이와 같은 회주철의 용접시 기공발생 메카니즘을 Fig. 3.9에 나타내었다.

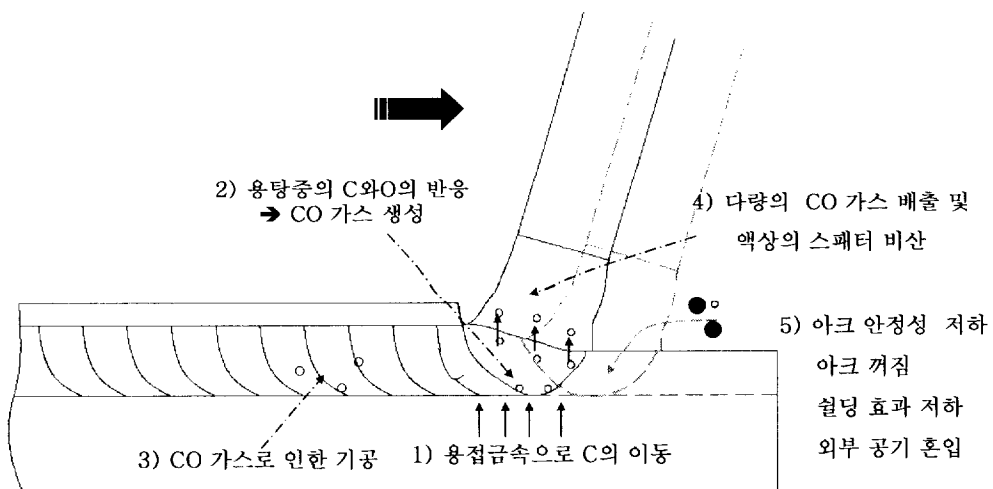


Fig. 3.9 The porosity generation mechanism of gray cast iron in SMAW

3.3.6 미세조직 관찰 및 미세경도 측정

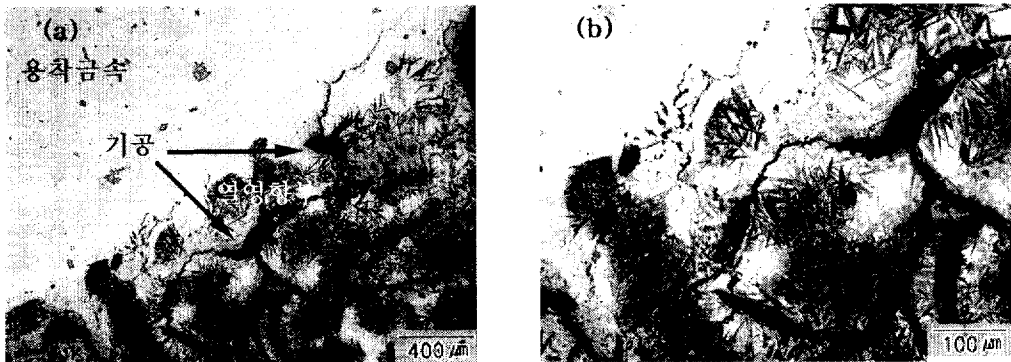


Fig. 3.10 Micro structure of the weldment in 100cpm welding speed

Fig. 3.10 용접속도 60cpm(용접길이 60mm/pass, 예열온도 200℃)에서 균열이 많이 발생한 용접부 단면사진이다. 용융선을 따라 많은 침상의 백선화 조직과 기공을 볼 수 있다. 또한 기공 주위에 균열이 발생하였음을 알 수 있다.

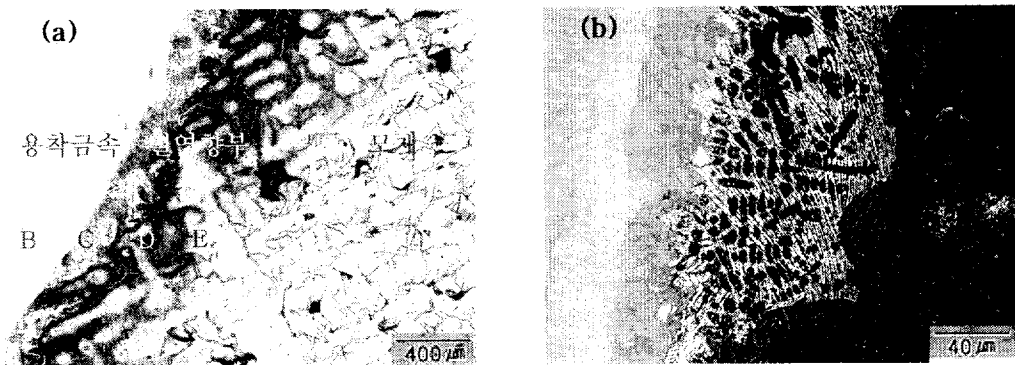


Fig. 3.11 Micro structure of the weldment in 100cpm welding speed

Fig. 3.11은 용접속도 100cpm(용접길이 60mm/1pass, 예열온도 150℃)에서 균열이 없는 양호한 품질의 용접부 단면 사진이다. (a)에서 보듯이 용융선을 따라 백선화된 조직을 관찰할 수 있다. 하지만, 그 조직이 연속적이지 않으며, 날카롭지 않다. 크랙의 발생 또한 없었다. (a)의 C지점을 좀더 배율을 높여 관찰하면 (b)에서 보듯이 침상의 세멘타이트와 흑색의 퍼일라이트를 관찰할 수 있다. Fig. 3.10과 3.11을 비교에서 중요시 되어야 할 요소는 균열의 유무와 함께 기공의 유무이다. 다시 말해 균열의 발생은 기공을 포함하고 있다는 점이다.

Fig. 3.11 (a)의 B, C, D, E의 지점을 마이크로 비커스 경도 검사한 결과를 Fig. 3.12에 나타내었다.

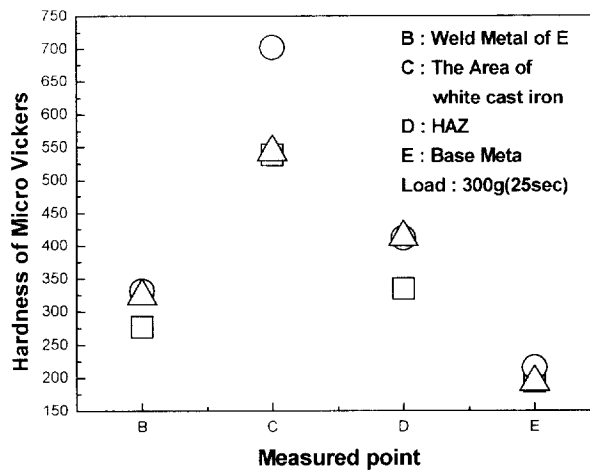
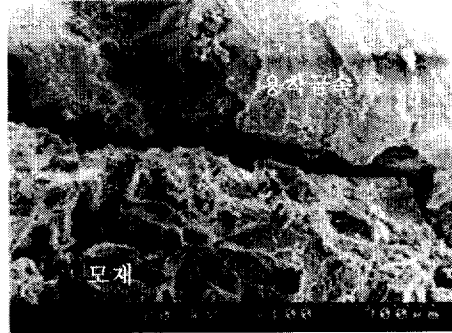
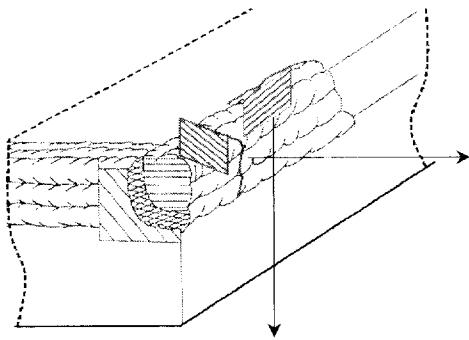
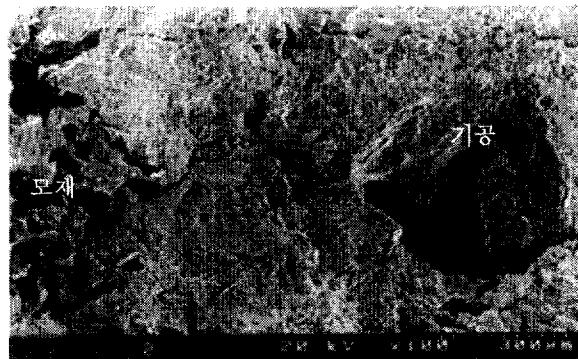


Fig. 3.11 Hardness of micro vickers in the weldment

초층 용접봉 E의 용착금속부분인 B의 경도는 일반 니켈계 용접금속보다 경도가 향상된 Hv300정도를 나타내었고, 모재의 경도는 열영향을 받아 연화되었다. 용융선 부근의 백선화된 지점의 경도는 상당히 상승되어 평균 600 Hv 이상을 나타내고 있다. 또한 백선화 구역은 많은 수축량으로 인해 높은 취성을 나타내며, 이러한 취성은 용접선과 평행한 종균열 발생의 원인이라고 말할 수 있다. 그러나 종균열 발생의 원인은 경도가 높고 취성이 강한 조직의 생성만으로는 볼 수 없다. Photo. 3.10과 3.11을 비교해 보면 두 조직 모두 경도가 높고 취성이 강한 백선화 구역을 나타내지만 균열의 생성에서는 다른 결과를 보여준다. 종균열이 있는 용접부의 백선화 부분은 종균열이 없는 용접부에 비해 상당히 날카로우며, 반드시 기공을 동반하고 있다. 즉 종균열의 발생은 취성화된 조직의 독립적인 결과이기 보다는 조직의 형태와 특히 응력의 집중을 일으키는 기공의 영향을 종합적으로 받는 것으로 여겨진다. 균열 파단면의 SEM사진(Fig. 3.12)에서도 이러한 기공을 관찰할 수 있다.



a) 횡균열의 파면



b) 종균열의 파면

Fig. 3.12 Brittle fractured surface

또한 취성이 강한 조직의 생성보다는 기공의 발생이 종균열의 발생에 좀 더 큰 기여도를 가지는 것으로 여겨진다. 그러한 이유는 Fig. 3.13에서와 같이 백선회된 조직인 아닌 기지 내에서도 기공을 중심으로 균열의 발생을 관찰할 수 있었기 때문이다. 비록 Fig. 3.13의 두 경우 모두 용융선과 근접한 기공에서 발생한 종균열이지만, 그 기지는 비교적 연성이 높은 용접봉 E로 용접된 구간이다. 결론적으로 균열의 발생은 낮은 용접속도 인한 과도한 입열량, 많은 모재용융, 그로인한 연속적인 기공의 발생이 가장 큰 원인이라고 볼 수 있다. 또한 Fig. 3.7과 같이 용접후 액체침투탐상 결과 육안상 종균열이라고 여겨진 많은 부분이 단면 관찰 결과 연속적인 기공으로 인한 결함으로 나타났다.



Fig. 3.13 The crack occurred from porosity and inclusion

3.3.7 경화 욕성된 날의 표면 경도

비교적 양호한 용접결과를 얻을 수 있었던 용접조건(용접속도 100cpm)에서 예열온도만을 변화 시켜 용접한 후 쇼어 경도계를 이용 경화욕성 용접된 날의 표면 경도를 측정하였다. 표면 경도의 측정은 각 조건에서 10회 실시하여, 최고치 및 최저치를 제외하고 나머지의 평균치로 Fig. 3.14에 나타내었다.

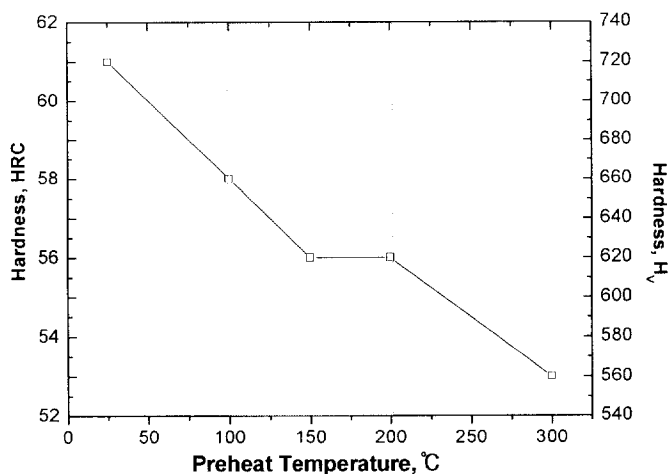


Fig. 3.14 Surface hardness of edge in variabale preheat temperature

트리밍 날로서 요구되는 경도값은 Hv 577-653이다. 이 범위를 벗어나 높거나 낮은 날이 칩핑되거나 무뎈진다. Fig. 3.13와 같이 예열온도 높아짐에 따라 평균 경도값은 낮아졌고, 요구되는 경도 값을 나타낸 용접의 예열온도 구간은 100°C, 150°C, 200°C였다.

4. 결론

자동차용 주철 금형 트리밍 날의 경화육성용접 공정개발에 관한 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 2) 용접길이/pass는 용접결합의 발생에 크게 영향을 미치지 않는것으로 판단된다.
- 3) 단위 면적당 기공 발생 수는 용접속도 빠른 경우(100cpm)보다 적게 발생하였다. 또한 예열온도가 높을수록 적게 발생하는 경향을 보였다.
- 4) 회주철의 용접에서 기공발생 주된 원인은 용융된 모재의 탄소와 월드가스내 산소의 화학반응으로 인한 CO가스의 발생이 주원인이라고 보여진다.
- 5) 횡균열의 발생은 낮은 예열온도로 인한 빠른 냉각속도, 그에 따른 경화능이 높은 S-7용접금속의 취성과 후판 다층 용접시 발생하는 용접선 길이 방향의 인장 잔류응력이 주원인이다.
- 6) 종균열은 용접속도가 60cpm(대입열)인 조건에서 발생하였고, 100cpm(소입열)에서는 발생하지 않았다. 종균열의 발생 원인은 용접에 의한 모재의 백선화와 그에 따른 취성 발생, 그리고 응력의 집중을 유발하는 기공의 연속적인 발생이 복합적으로 작용한 결과이다.
- 7) 경화 육성된 날의 표면 경도는 예열온도가 높아짐에 따라 평균 경도값이 낮아졌고, 요구되는 경도 값을 얻을 수 있는 예열온도 구간은 100℃, 150℃, 200℃였다.

참고 문헌

- 1) 최정영 : Handbook on the Strength of Weld Joints
- 2) Roger A. Bushey, The ESAB Group, inc : Welding of Cast Iron 광선이에게
불어봄
- 3) 유순영 : 주철 용접, 대한용접학회지 제 7호 제 2권(1989)
- 4) 김경중, 서정현 : 주철과 Fe-Mn-Al강 이종금속 용접부의 조직변화에 관한 연구
대한용접학회지 제 8호 제 4권(1990)
- 5) A Technical Report of Tool Steel Welding from EUREKA
- 6) T.B.Jefferson, Gorham Woods, : Metals and How to Weld Them, The James
F. LINCOLN Arc Welding Foundation(1983)
- 7) Paul M. Unterweiser, Howard E. Boyer, James J. Kubbs : Heat Treater's
Guide, American Society for Metals(1982) p269-277

감사의 말

이 논문을 완성할 수 있도록 많은 도움과, 격려, 질책을 아끼지 않고 보내주신 많은 교수님 이하 선후배님들에게 우선 감사의 말을 전합니다.

직장을 다니면서 대학원과정을 이수한다는 것이 쉽진 않았습니다. 저의 게으름과 다니던 직장과의 마찰, 다소 가정에 소홀할 수 밖에 없었던 여러 가지 상황들, 이 많은 것들이 저의 학업생활에 영향을 미쳤지만, 92년도 학부과정에 입학하여 2005년도 대학원과정을 마치기까지 저의 지나온 생활을 되새겨 보면, 이 모든 것들이 제 인생에 있어서 어쩌면 가장 즐겁고, 행복하고 중요한 시기가 아니었나 생각이 듭니다. 비록 “좀 더 열정을 가지고 노력하지 않았을까”하는 후회는 되나, 이러한 점들조차 저에게 하나의 교훈이 되고 있습니다.

인생을 살아가는 데 있어서 중요한 많은 것들을 교수님들에게 배웠고, 전공 지식과 공대생으로 가져야 할 자세 또한 배웠습니다.

김우열 교수님, 박홍일 교수님, 방국수 교수님, 이병우 교수님, 서원찬 교수님, 이길근 교수님 고개 숙여 감사드립니다. 제 인생에 있어서 아직 배움의 과정은 많이 남았습니다. 언제나 교수님들에 배운 것들은 생각하고 열정을 가지고 무언가를 이뤄나가는 인간이 되도록 노력하겠습니다.

끝으로 이 논문의 시작부터 끝까지 지도해주신 조상명 교수님께

저의 은사님으로서 최고의 역량을 발휘해주신 것에 대해, 인생을 살아가는 길잡이를 보여주신 것에 대해 무한한 감사할 드리며, Welding IT Lab의 일원으로서, 교수님의 제자로서 부끄럽지 않도록 앞으로도 열심히 노력하는 모습을 보여드리겠습니다.

오동수, 황동수, 지정민, 고명훈, 이광원 선배님,

고미혜, 조성우, 박덕조, 유광선, 조진안, 김진욱, 함효식, 황규민, 윤성종, 배광무 이상 많은 선후배 학우 여러분께 감사의 말씀을 전합니다.