회주철 용접부 금속조직의 특성에 관한 연구

- 용접금속조직과 균열 감수성에 대하여 -

정 호 신^{*,†} · 방 국 수^{**} · 오 창 수^{***}

^{*}부경대학교 공과대학 재료공학과

^{**}부경대학교 공과대학 신소재시스템공학과

^{***}부경대학교 대학원

Study on Metallurgical Characteristic of Weld Metal for Gray Cast Irons

- Weld Microstructure and Crack Sensitivity -

Ho-Shin Jeong^{*,†}, Kook-Soo Bang^{**}, and Chang-Soo Oh^{***}

^{*}Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea

^{**}Advanced Material System, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea

^{***}Graduate School, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea

[†]Corresponding author : hsjeong@pknu.ac.kr

(Received February 4, 2018 ; Revised February 13, 2018 ; Accepted February 20, 2018)

Abstract

The purpose of this study is evaluation of proper welding condition in order to solve the problems such as cast iron weld cracking, HAZ embrittlement. The formation of martensite in welding of the gray cast iron by arc welding is related to weld cracking. The effect of pre-heating and post-heating to microstructure and hardness of weld joint were examined. Main results obtained were as follows.

In case of autogenous welding by GTAW, the number of crack was significantly decreased with increasing welding heat input and pre-heat temperature. But crack sensitivity was increased by martensite formation due to increasing cooling rate with increasing of base metal thickness.

In case of bead on plate welding by GTAW, crack sensitivity was increased with increasing welding current, and welding current exhibiting no crack was increased with pre-heat temperature.

The most of cracks formed at deposited weld metal were solidification crack in the case of 316L buttering. The main cause of GTAW deposited metal cracking was martensitic transformation. The GTAW range for crack free was very severe and narrow.

To minimize the welding crack sensitivity, buttering gray cast iron by 316L welding electrode was very effective and the application of preheating made welding range broad.

Key Words : Gray cast iron, Autogenous GTAW, Pre-heating, Post-heating, Weld crack, Martensite

1. 서 론

회주철은 탄소를 상당히 많이 함유하기 때문에 탄소강에 비해 용융온도도 낮고, 유동성이 우수하므로 주조하기가 용이하며, 각종 부재의 형상 설계도 자유롭고 성형성도 양호하다. 또한 진동 흡수성도 뛰어나서 각종

공작기기, 제철, 제지, 인쇄 등의 분야에도 널리 사용되고 있다. 최근에는 각종의 해양 플랜트, 대형 선박의 엔진, 철도차량용의 대형 디젤 부품의 실린더 채킷이나 실린더 라이너, 디젤 엔진의 프레임 소재 및 특히 해양 구조물 분야에서는 저압 밸브, 각종 레버, 콕 핸들, 플리 및 각종 기어뿐만 아니라 파이프 이음쇠, 선박의 창문 고정용구 등으로도 널리 사용되고 있다. 또한 해양

구조물 분야에서는 알칼리 환경에서는 철강재료보다 내식성이 좋기 때문에 내식성이 요구되는 해양구조물에도 널리 사용되고 있다¹⁾. 이와 같이 광범위한 분야에서 사용되는 회주철은 용접성이 매우 나쁘다는 치명적인 문제를 가지고 있지만²⁾ 최근에는 공학적인 환경이 다양하게 변함에 따라 이러한 주철제의 각종 기기의 성능 향상과 수명 연장을 위하여 회주철의 용접이 요구되고 있다. 그러나 회주철의 용접에 관해서는 간단한 교과서적인 일반적인 부분이 알려져 있을 뿐 용접조건이나 최적의 용접법 등 확립된 데이터가 매우 드문 실정이다. 이와 같은 측면에서 회주철의 주조 제품에 존재하는 각종의 결함의 보수에 의한 충전이나 보수 용접 기법의 정립이 요구되고 있다. 특히 각종 산업 기계에 있어서 강도가 요구되는 주조부품에서의 균열이나 결함에 대해서 보수 용접의 필요성이 높아지고 있으며, 복잡한 형상의 주조품의 경우에는 분해주조 후에 용접에 의해서 최종적으로 조립하는 것이 가능하게 되면 그 이점은 매우 클 것이다. 그러나 일반적으로 회주철은 열충격에 약하고³⁾ 연신율이 작은 등 근본적으로 탄소강에 비해서 용접하기 곤란하고 신뢰성이 있는 용접기술은 현재 확립되어 있지 않다^{4,5)}. 최근에는 원자력 발전소를 비롯하여 각종 화력발전소의 각종 부품의 보수 용접 신제품의 용접에 대한 신뢰성 높은 용접기법이 요구될 뿐 아니라 친환경 분야에서도 점점 더 엄격한 용접 관리가 요구되고 있기 때문에 이러한 측면에서 회주철의 용접 기술은 향후 적극적으로 개발하여야 하는 기술 분야라고 말할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 용접하기 매우 어려운 소재인 회주철에 대하여 현장에서의 회주철 용접시에 최적의 용접조건 확립을 목적으로 다양한 조건으로 GTAW용접하였다. 또한 주철의 보수용접시에 열응력에 의한 균열 발생을 방지하기 위하여 오스테나이트계 스테인리스 용접재로 버터링 용접할 경우의 용접조건과 균열 방지 가능 범위를 체계적으로 조사하였다. 특히 예열 및 후열의 효과와 이에 따른 용접부의 조직 변화 및 경도를 조사함과 아울러 균열이 발생되지 않는 용접조건을 정립하고자 하였다. 또한 용접이음부의 경도 및 조직에 미치는 용접조건 영향과 용접부의 조직학적인 특성에 대해서도 연구하였다.

2. 실험 방법

2.1 소재

본 실험에서 사용한 회주철 시험편은 JIS FC 250 등급의 편상흑연주철로 사형 주조한 후 절삭 가공하여 두께 20mm, 길이 160mm, 폭 90mm로 하여 실험에

Table 1 Chemical composition of gray cast iron(wt.%)

FC 250	C	Si	Mn	P	S	Fe
	3.18	2.51	0.87	0.058	0.023	bal.

Fig. 1 SEM microscopy of gray cast iron base metal

사용하였으며, 시험편의 기지조직은 펄라이트와 일부 페라이트가 혼재되어 있는 소재이다. 실험에 사용한 소재의 화학성분을 Table 1에, 전자현미경 조직 사진을 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 용접 조건 및 용접부 균열

회주철 용접시 발생하는 용접균열 감수성과 용접조건과의 관계를 조사하기 위하여 Autogenous GTAW와 그라비티 용접하였다. GTAW 용접시에는 용접 토치를 자동주행대차에 고정하여 정속 주행하게 함으로써 용접 속도를 일정하게 유지하였다. 용접전류는 60~150A로 변화시켰으며, 용접전압은 20V, 용접속도는 30cm/min, Ar 가스 유량은 분당 10리터로 하였으며, 예열온도는 실온~573K의 용접조건으로 용접하였다.

주철 용접시의 균열 발생 방지에는 Ni이나 오스테나이트계 스테인리스강으로 버터링하는 것이 유효하다고 알려져있기는 하지만⁶⁾ Ni은 가격이 비쌀 뿐 아니라 주철용접에 적용할 경우 포징 반응에 의해 고온균열이 발생할 가능성이 크다. 따라서 재료의 특징과 경제성 등을 고려하여 316L 계통의 오스테나이트계 스테인리스강을 버터링용의 소재로 하였다. 이와 같이 버터링용접이 유효하다고 알려져있기는 하지만 유용한 체계적인 데이터가 없는 것이 현실이다. 이와 같은 측면에서 버터링 용접조건과 유효 예열온도 및 균열 감수성과의 관계를 체계화하고자 할 목적으로 316L로 그라비티용접하였다. 그라비티 용접시에는 그라비티 용접기에 STS316 용접봉을 용접기 홀더에 장착하여 분당 약 15cm로 용접하였다.

용접후에는 각 용접조건별 균열 발생 개수 및 현미경

조직과의 관계를 조사하여 이를 균열감수성으로 하였고, 또한 예열 조건에 따른 용접균열 감수성 변화를 조사하였다.

용접부의 균열은 용접후 완전히 냉각된 후 염료침투 검사 방법에 의해 검사하였으며, 용접중앙부의 용접 비드 길이 15cm 당 존재하는 균열 숫자를 조사하였다.

2.3 용접부의 경도

회주철의 용접시 용접부는 용접입열에 의해 변태를 동반하며, 변태 조직의 종류에 따라 경도의 변화가 생기며, 용접부의 경도는 용접부의 균열 발생과 밀접한 관련을 갖게 된다. 이러한 측면에서 예열 및 후열 처리 후에 따른 용접부의 경도 변화를 마이크로 비커스 경도기를 이용하여 조사하였다. 경도 측정시에는 하중 500그램, 시간 15초의 조건으로 0.25mm 간격으로 측정하였다. 또한 용접후 용접부의 경도를 용접금속과 열영향부에 대하여 측정하였으며, 용접 후 열영향부에 생성된 마르텐사이트 조직 생성 여부나 경도에 미치는 예열 및 후열처리의 영향을 조사하고자 하였다. 후열처리 온도는 473K로 하여 후열처리시간에 따른 경도 변화도

측정하였다.

2.4 용접부의 조직

회주철 모재의 조직은 흑연과 펄라이트 기지조직으로 되어있지만, 용접하면 용접열에 의해 조직의 변화가 생기게 되며, 이러한 조직의 변화에는 용접입열량, 예열 및 후열처리 온도 등이 영향을 끼치게 된다. 이와 같은 인자에 따라 생성되는 조직의 변화 및 각종 원소의 농도 분포를 광학현미경, SEM, EDS 등에 의해 조사하여 최적의 현미경조직이 얻어지는 조건을 설정하고자 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 용접전류와 균열 감수성

Table 2에는 GTAW로 bead on plate 용접한 조건과 균열과의 관계를 나타내었다.

이 표에서 알 수 있는 바와 같이 실온, 293K, 323K, 373K, 473K 및 573K로 예열한 경우는 용접전류가

Table 2 Welding condition of autogenous GTAW

No. of specimen	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed, cm/min	Preheat temperature(K)	Heat Input (J/cm)	Number of crack
1	130	20	30	293	5200	15
2	140	20	30	293	5600	15
3	150	20	30	293	6000	13
4	130	20	30	323	5200	12
5	140	20	30	323	5600	12
6	150	20	30	323	6000	12
7	130	20	30	373	5200	12
8	140	20	30	373	5600	12
9	150	20	30	373	6000	11
10	130	20	30	473	5200	9
11	140	20	30	473	5600	8
12	150	20	30	473	6000	9
13	130	20	30	573	5200	8
14	140	20	30	573	5600	7
15	150	20	30	573	6000	6
16	120	20	30	573	4800	6
17	110	20	30	573	4400	6
18	100	20	30	573	4000	7
19	90	20	30	573	3600	5
20	80	20	30	573	3200	5
21	70	20	30	573	2800	3
22	60	20	30	573	2400	No crack

70A 이상의 모든 용접조건에서 용접부에서 균열이 발생하였고, 예열온도가 573K에서는 60A 이하인 경우에만 용접균열이 발생하지 않았다. 이 결과로부터 회주철을 보수용접이나 본 용접할 경우에는 용접 입열조건과 예열온도가 매우 중요한 인자임을 확인할 수 있었다. 특히 주조품 신재에 존재하는 국부적인 결함, 예를 들면 기공이나 수축공 등을 제살용접할 경우에는 불가피하게 GTAW할 수 밖에 없고, 이 경우에는 특히 보수용접이 까다롭기 때문에 가능한 한 전류값을 낮추어야 할 것으로 사료된다.

Table 2의 실험결과에서 알 수 있는 바와 같이 예열온도가 높아질수록 균열감수성이 낮아지는 용접전류 값도 동시에 증가함을 나타내고 있다. 이러한 이유는 예열온도가 일정한 경우에는 용접전류가 증가하면 용접시에 용착량이 증대됨에 따라서 그 열충격이 증가하여 용접균열이 발생하는 원인이 되기 때문에, 예열온도가 높아지면 용접전류가 증대되어도 열충격이 완화되어 용접균열이 발생하지 않는 것으로 사료된다. 본 실험에서는 실질적으로 현장 작업시 573K 이상으로 예열하기는 매우 어렵기 때문에 최고 예열온도를 573K로 하였다. 용접후에는 각 용접조건별 균열 발생 개수 및 현미경조직과의 관계를 조사하였으며, 또한 예열 조건을 변화시켜 용접균열 감수성 변화를 조사하였다.

균열이 발생하지 않는 최적 용접 조건을 설정하기 위한 목적으로 예열온도를 변화시켰지만 예열온도 573K까지는 균열이 전혀 발생하지 않는 경우가 없었다. 그 이유는 회주철이 근본적으로 재료 특성상 연신을 값이 거의 0이며 열충격에도 매우 약하기 때문이다.

이와 같은 측면에서 열충격을 줄이고 용접부에 작용하는 용접 과정 중 및 냉각과정에 발생하는 스트레인값을 줄이는 것이 핵심적인 것으로 판단된다. 따라서 가능한 한 적정한 예열온도조건에서 입열량을 줄여 나가는 것이 균열 발생의 방지에 기여할 것으로 사료되므로 예열온도를 573K로 하여 용접 전류를 단계적으로 줄인 결과 용접전류가 60A 이하이어야 균열이 발생하지 않는다는 것을 알 수 있었다. 이와 같이 전류값이 낮은 경우에는 1회당의 용착량은 적어지는 단점이 있지만 균열 발생 방지라는 측면에서는 주철의 보수 용접에 매우 필요하고 중요한 사항이라고 판단된다.

Table 3에는 STS316 오스테나이트계 스테인리스 용접봉으로 그래비티 용접한 경우의 용접 조건과 균열 발생과의 관계를 나타내고 있다. 이 표에서 알 수 있는 바와 같이 주철 용접시에 발생하는 열응력을 완화하기 위한 버터링 효과도 대체로 예열온도가 높아질수록 증가하여 균열의 수가 적어지는 경향이다.

Table 3 The relation between gravity welding conditions, preheat temperature and weld crack sensitivity

Currents (A)	Voltage (V)	Preheat temperature (K)	Welding Speed (cm/min)	Remarks
70.0	24.2	293	64.5	No crack
80.0	24.5	293	64.5	“
100.0	26.0	293	64.5	cracks
120.0	27.0	293	64.5	“
130.0	26.5	293	64.5	“
80.0	25.5	323	70	No crack
100.0	25.0	323	70	cracks
125.0	26.0	323	70	“
150.0	30.0	323	70	“
85.0	25.5	373	70	No crack
100.0	26.0	373	70	“
125.0	26.0	373	70	“
150.0	30.0	373	70	cracks
85.0	25.0	423	63	No crack
90.0	26.5	423	63	“
112.5	26.5	423	63	“
132.5	27.0	423	63	cracks
82.5	26.0	473	63	No crack
110.0	25.5	473	63	“
130.0	28.0	473	63	cracks
85.0	25.0	573	63	No crack
90.0	25.5	573	63	“
112.5	26.0	573	63	“
135.0	28.0	573	63	cracks

Table 3의 결과로부터 예열온도와 용접전류로 균열 발생을 종합적으로 정리하여 나타낸 것이 Fig. 2이다. 이 그림으로부터 균열 발생을 방지할 수 있는 예열온도와 용접전류와의 상관관계를 명확히 할 수 있으며 버터링 용접시의 유효한 데이터로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

3.2 후열처리 및 경도

Fig. 3은 316L 용접봉으로 예열하지 않고 그래비티 용접한 용접부이음부 단면의 용접금속과 열영향부의 경계부에 대한 As-welded 상태의 경도 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 경도는 용융계면

Fig. 2 No crack-crack boundary for gray cast iron welding for buttering

Fig. 3 Hardness change for gravity welding without pre-heating

에서 가장 높고, 용융계면에서 멀어질수록 경도는 낮아지는 경향이다. 또 예열온도의 변화에 따른 각 위치별 경도에는 일률적인 상관관계는 확인하기 어렵다. 그러나 용융계면에서 멀어질수록 경도는 급격하게 낮아지기 때문에 균열에 가장 취약한 부위는 용융계면이나 그 인접부일 것으로 사료된다.

Fig. 4는 용접부를 473K에서 20분간 후열처리한 경우의 경도 분포를 나타낸 것이다. 이 경우에도 As-welded의 경우와 마찬가지로 용융계면에서 경도가 가장 높고, 이 용융계면에서 멀어질수록 경도가 낮아지는 경향이다. As-welded와 비교하여 용융계면의 경도에는 그

Fig. 4 Hardness change after post heat treatment for 20min. at 473K

다지 변화가 없지만 용융계면에서 멀어질수록 경도가 상당히 낮아지는 것을 알 수 있다. 즉 회주철 용접부의 경도를 낮추기 위해서는 용접후의 짧은 시간의 열처리라고 하더라도 후열처리가 경도 완화에는 상당히 효과적임을 확인할 수 있다.

3.3 용접부의 조직

Fig. 5는 373K에서 10분간 후열처리한 후의 용융계면의 현미경조직 사진이다. 이 사진으로부터 판상의 마르텐사이트를 확인할 수 있다. 또한 예열온도 373K, 473K, 573K의 조건으로 10분간 후열처리한 조직으로부터 예열온도가 높을수록 정확한 양을 측정하기는 힘들지만 일부 템퍼드 마르텐사이트도 존재하였다. 또한 예열온도 573K인 경우에는 래스 마르텐사이트 인접부에 일부 펄라이트 기지에 판상의 마르텐사이트가 생성되었음을 확인할 수 있었다. 이러한 판상 마르텐사이트

Fig. 5 Martensitic structure formed at weld interface after post weld heat treatment at 373K

는 래스 마르텐사이트보다 탄소함유량이 높은 경우에 발생하기 때문에 예열온도를 573K 이상으로 하여 용접하면 냉각속도가 느려지므로 이로 인해 용접경계부에 어느 정도 탄소의 확산이 이루어져 탄소를 많이 함유한 판상의 마르텐사이트가 발생한 것으로 사료된다.

Fig. 6은 GTAW 용접한 경우의 HAZ의 현미경 조직을 나타낸 것으로 용접열에 의해 분해되지 않은 흑연과 마르텐사이트 변태에 의해 생성된 경화조직을 나타낸 것이다. 이 사진으로부터 그래파이트(사진중의 G)와 용융계면에서 상당히 떨어진 위치임에도 용접과정중의 열에 의해 냉각과정중에 마르텐사이트(사진 중의 M)가 생성되는 것을 확인할 수 있고 균열이 발생되지 않는 조건을 찾기 위해서는 여하히 마르텐사이트 조직의 생성을 막는 것과 마르텐사이트 조직의 생성이 불가피할 경우에는 용접부에 연성을 부여하거나 열응력을 최소화할 수 있도록 하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 모재와 용접부의 파단면의 파괴 양상을 비교하기 위하여 액체질소 중에 모재를 투입한 후 충격시험기로 인위적으로 파괴시킨 후의 모재의 파면을 나타낸 것으로 전형적인 취성 파면을 나타내는 리버 패턴(사진중의 R.P.)과 입계 파괴의 양상을 나타내고 있다.

Fig. 6 Graphite and martensite at HAZ

Fig. 7 SEM fractography of gray cast iron base metal

Fig. 8은 GTAW 용접한 경우의 용착금속부에 발생한 균열을 갖는 시편을 전자현미경으로 관찰하기 위하여 액체 질소 중에 5분간 침지한 후 충격 시험기의 해머로 타격하여 파괴시켜 용접중에 발생한 균열의 파면을 관찰한 시편의 SEM사진이다. 이 사진에서 왼쪽 부분은 모재이며 오른쪽은 용접금속부이다. 용융계면을 경계로 확연하게 조직이 다르고 왼쪽의 모재 부분은 회주철의 인위적으로 파단된 부분에 해당하며 오른쪽의 용접금속이 용접과정중에 생성된 파면이다. 이 파면은 상당히 평탄하며 취성파면으로 주로 연성의 저하에 의해 발생하는 연성저하 균열의 특징을 가지는 것으로 사료되며 회주철의 용접 균열은 연성의 부족에 기인하여 발생하는 연성 저하 균열이 대부분인 것으로 사료된다. 따라서 회주철 용접후에는 냉각과정 중에 연성이 낮아지는 온도 범위에서 가능한 한 열충격이 가해지지 않도록 서서히 냉각하는 것이 균열 방지 측면에서 유리할 것으로 사료된다.

Fig. 9에는 316L 용접봉으로 그래비티 용접한 경우에 용접부에 발생한 균열의 전자현미경 사진이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 균열은 전형적인 고온균열의 형태이며 버터링 용접조건을 정립하기 위하여 오스테나이트계 용접봉으로 그래비티 용접한 거의 대부분의 균열은 용착금속인 스테인리스 측에서 발생하였다. 이것

Fig. 8 SEM of gray cast iron weld metal crack

Fig. 9 Solidification crack of STS316L stainless deposited metal welded by gravity welding

은 오스테나이트계 스테인리스강 자체가 상당히 연성적이며 이에 따라 용접시에 발생된 열응력을 흡수할 수 있는 유효한 수단으로 작용할 수 있는 반면에 오스테나이트계 스테인리스강은 고온균열 감수성이 크기 때문에⁷⁻¹⁰⁾ 버터링할 목적으로 오스테나이트계 스테인리스강을 적용할 경우에 상당한 주의가 필요하다는 것을 의미한다. 특히 주철은 다른 철강재료에 비해 불순물 원소인 유황과 인의 함유량이 많기 때문에 이것이 오스테나이트계 스테인리스 용착금속에 불순물을 공급하는 역할을 할 수 있기 때문에 근본적으로 고온균열 감수성이 큰 오스테나이트계 스테인리스 용접봉을 버터링 재료로 사용할 경우에는 가능한 한 용접과정 중에 발생하는 수축응력을 줄이는 것이 중요하다는 것을 의미한다. 또한 역으로 이와 같은 현상은 버터링할 경우에는 오스테나이트계 용착금속에 균열이 발생하지 않는 조건만 만족되면 균열이 발생되지 않는다는 의미가 되기 때문에 상당히 넓은 범위의 용접 조건을 설정할 수 있게 된다는 것이다. 이와 같은 결과는 Fig. 2의 결과와도 상통하는 것이다. 따라서 예열하여 가능한 한 용접부에 작용하는 응력을 줄이는 것이 버터링 효과를 극대화할 수 있는 수단임을 알 수 있었다.

Fig. 10는 니켈, 크롬 및 유황의 분포 상태를 용융계면을 가로질러 EDS로 선분석한 결과이다. 흑연이 존재하는 오른쪽이 모재이며 중앙부가 용융계면, 왼쪽이 용접부이다. 이 결과로부터 알 수 있는 바와 같이 아크열에 의해 용접금속 측에는 흑연이 존재하지 않고 모두 분해되어 기지조직에 고용된 것으로 사료된다. 이에 따라 용접금속부의 기지 조직은 상대적으로 탄소 농도가 높아지게 되고, 이에 따라 아크 용접하면 상대적으로 마르텐사이트 변태가 용이하게 되리라는 것은 쉽게 유추할 수 있다. 또한 유황의 분포 상태를 보면 회주철과 유황 사이에 농도 차이가 거의 없고, 이에 따라 상당량의 유황이 회주철 측에서 스테인리스강 측으로 확산되어 간 것으로 사료된다. 이에 따라 316L로 버터링한 부분의 유황 농도값이 높아지기 때문에 316L은 근본적으로 고온균열이 발생되기 쉬운 상태가 될 수 있다는 것

Fig. 10 EDS analysis across weld interface for Cr, Ni and S

을 반증하는 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 현장에서의 아크용접에 의한 회주철 용접시 용접균열 발생, 열영향부 취화 및 마르텐사이트 생성과 같은 문제점들을 해결하기 위한 최적의 용접조건 확립을 목적으로 연구를 수행하였다. 용접조건 중 예열이나 후열처리에 따른 용접부의 조직학적인 특성 변화에 대해서 조사하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 삽입금속을 사용하지 않고 GTAW로 autogenous 용접하는 경우에는 예열온도나 용접입열량이 증가하면 균열감수성은 낮아지는 경향을 확인할 수 있었다. 용접입열량과 예열온도가 증가하면 그만큼 냉각되는 속도가 느려지게 되므로 취약한 마르텐사이트의 생성 경향이 둔화하게 되고 예열온도가 높아지면 용접금속에는 흑연의 분해, 고용 및 확산에 의해 판상의 마르텐사이트가 생성되는 것으로 사료된다.

2) 예열온도 473K까지는 용접계면부에 주로 래스 마르텐사이트가 형성되지만 예열온도 573K 이상에서는 래스 마르텐사이트와 일부 펄라이트 기지 내에 판상의 마르텐사이트가 생성되어 혼재된 조직이 존재하게 되는 경향이였다.

3) 후열처리 시간이 길어짐에 따라서 용접경계부 및 열영향부의 경도가 낮아지지만 최초의 짧은 시간 후열처리에서 경도 저하 경향이 나타날 뿐 후열처리 시간이 길어져도 예열하지 않은 조건을 제외하고는 후열처리에 의한 경도 완화 효과는 크지 않았다.

4) 용접 입열량을 가능한 한 적게 하고 예열 온도를 높여야 용접부에 가해지는 열충격을 완화하여 균열이 발생하지 않고 아크용접 할 수 있을 것이다.

5) 316L용접봉을 사용하여 SMAW Process로 그래비티 용접한 경우, 예열하지 않고 용접하면 용접전류값이 낮아도 용접균열이 발생하였으나, 예열하여 용접하면 예열온도의 증가에 따라 용접전류가 높아져도 용접균열이 발생되지 않는 범위도 확대됨을 확인할 수 있었다. 따라서 버터링 용접하기 전에 예열하는 것이 매우 효과적인 균열 방지 대책임을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2015년)에 의하여 연구되었음

ORCID: Ho-Shin Jeong: <http://orcid.org/0000-0003-4238-827X>
ORCID: Kook-Soo Bang: <http://orcid.org/0000-0002-9062-8824>

References

1. Elliott, R., Cast iron Technology, *Butterworths*, (1988)
2. Hosino, Study on characteristics on cast iron, *Bulletin*
3. Metals Handbook Committee, *Properties and Selection of Metals. Metals Handbook*, 1, 9th Edition, ASM, (1990), 307
4. Welding Series Committee, Kantokoro of Cast Steel & Cast Iron, *Sannpo Publishing*, (1978), 108
5. H.S. Jeong, K.S. Bang, Friction Weldability of Grey Cast Iron-by the Concept of Friction Weld Heat Input Parameter, *Journal of Welding and Joining*, 32(3) (2014), 95-101
<http://dx.doi.org/10.5781/JWJ.2014.32.3.95>
6. E. N. Gregory, Welding the cast irons, *Metal Construction*, 20(2) (1988), 63-68
7. D. J. Widgery, Effects of Sulphur and Phosphorus on Weld Metal Solidification Cracking, *Metal construction and British Welding J.* 17(8) (1970), 333-338
8. J. C. Lippold, W. F. Savage, Solidification of Austenitic Stainless Steel Weldments: Part 3 - The Effect of Solidification Behavior on Hot Cracking Susceptibility, *Welding Journal*, 61(12) (1982), 388-s-396-s
9. F. C. Hull, Effect of Delta Ferrite on The Hot Cracking of Stainless Steel, *Welding Journal*, 46(9) (1967), 399-s-408-s
10. V. P. Kujannpaa, Formation of Hot Crack in Austenitic Stainless Steel Welds, *Welding Journal*, 65(8) (1986), 203-s-212-s