

고강도 저합금강 용접금속의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 니켈 함량의 영향

강용준* · 장지훈* · 박상민** · 이창희*[†]

*한양대학교 신소재공학부

**현대중합금속

Influence of Ni on the Microstructure and Mechanical Properties of HSLA Steel Welds

Yongjoon Kang*, Jihun Jang*, Sangmin Park** and Changhee Lee*[†]

*Division of Materials Science and Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

**Reseach & Development Dept., Pohang Plant, Hyundai Welding, Pohang 790-240, Korea

[†]Corresponding author : chlee@hanyang.ac.kr

(Received August 8, 2012 ; Revised August 28, 2012 ; Accepted August 29, 2012)

Abstract

The microstructure and mechanical properties of the high-strength low-alloy steel weld metals with a variation of nickel content were investigated. The weld metals with a variation of nickel content from 2.3 to 3.3 wt% were prepared using Gas Metal Arc Welding process. The amount of acicular ferrite decreased with increasing nickel content; this is accompanied with an increase in the region of bainite and martensite, hence the hardness and tensile strengths were increased with the increase in nickel content, whereas the impact energy was deteriorated.

Key Words : Weld metal; Acicular ferrite; Nickel; Impact toughness

1. 서 론

최근 한랭지에서의 에너지 수송 및 심해에서의 에너지 자원 채굴을 위한 라인파이프와 대형 해양구조물의 수요가 급증함에 따라 높은 강도를 가지면서 동시에 우수한 저온인성을 갖는 구조용 강재들이 개발되고 있다¹⁻²⁾. 한편 이러한 강재들의 용접금속에 대한 기계적 성능을 확보하기 위하여 용접와이어에 대한 개발도 지속적으로 이루어지고 있으며, 용접금속의 미세조직에 대한 많은 연구가 활발히 진행되고 있다.

저합금강은 용접 후 냉각되면서 약 800~500℃ 범위에서 오스테나이트-페라이트 변태를 하게 되는데, 이때 열역학적으로 에너지가 가장 높은 오스테나이트 입계에서 입계페라이트(Grain boundary Ferrite)가 가장 먼저 생성되고, 위드만슈테텐 페라이트 (Widmanstätten

Ferrite)가 입계페라이트로부터 생성되어 성장하게 되며, 냉각이 더 진행되면서 오스테나이트는 침상 페라이트, 베이나이트, 마르텐사이트와 같은 저온상으로 변태하게 된다. 베이나이트 및 마르텐사이트와 같이 취성이 큰 조직은 강도를 높게 하는데 효과적이지만 저온인성을 크게 저하시키며, 침상 페라이트 조직은 오스테나이트 결정립 내부에 있는 비금속 개재물로부터 핵생성되어 사방으로 성장해 나가기 때문에 래스(lath)들이 서로 결속되어 있는 구조를 가지고 균열전파에 대한 저항성이 높아서 용접금속의 강도와 저온인성을 동시에 향상시킨다³⁻⁹⁾. 따라서 용접금속이 높은 강도와 함께 우수한 저온인성을 확보하기 위해서는 각 미세조직을 적절하게 제어하는 것이 중요하며, 이는 용접금속의 화학 조성, 냉각속도, 산소함량, 오스테나이트 결정립 크기 등에 의해서 결정된다¹⁰⁻¹³⁾. 특히 망간, 니켈, 몰리브덴, 크롬 등의 합금원소의 함량이 용접금속의 미세조직

형성 및 기계적 특성을 결정하는데 중요한 영향을 미친다고 알려져 있다.

일반적으로 니켈은 용접금속의 충격인성 향상에 탁월한 효과를 보인다¹⁴⁾. 하지만 최근에는 고강도강 용접금속에서 니켈 함량이 증가할수록 임계점까지는 저온 충격인성이 향상되다가 임계점을 지나면서 감소된다는 연구 결과들이 보고되고 있다¹⁵⁻¹⁶⁾. 그러나 고강도강 용접금속에서 이러한 기계적 특성 변화를 유발하는 야금학적인 요인에 대한 연구가 아직 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 인장강도가 900 MPa급인 고강도저합금강 용접금속에 대하여 니켈 함량이 미세조직 변화와 기계적 특성 변화에 미치는 영향을 분석하였고, 이들의 상관관계를 고찰하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험재료

본 연구에서 모재는 Fig. 1과 같이 두께 20 mm의 ASTM AH36 강재를 개선각을 45°로 하여 사용하였고, 용접은 가스 메탈 아크 용접 (Gas Metal Arc Welding)으로 실시하였다. 용접금속의 니켈 함량을 다르게 하기 위하여 3종류의 메탈 코어드 와이어 (Metal Cored Wire)를 제작했으며, 와이어가 함유하고 있는 니켈 분말의 양만 다르게 제어하였다. 약 20 kJ/cm의 입열량으로 7층 15패스를 아래보기 용접하였다. 보호가스는 CO₂를 사용하였으며, 층간 온도는 150°C로 하

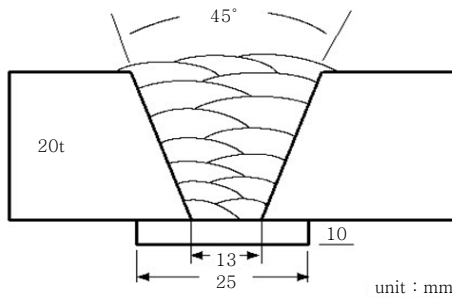


Fig. 1 Joint geometry for the welds

Table 1 Chemical composition of the weld metals (wt.%)

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Al	Ti	B	N	O
MN23	0.06	0.26	1.6	2.3	0.30	0.43	0.020	0.07	0.0005	0.0044	0.0359
MN30	0.06	0.31	1.8	3.0	0.34	0.50	0.023	0.10	0.0006	0.0062	0.0376
MN33	0.06	0.31	1.8	3.3	0.34	0.48	0.023	0.10	0.0006	0.0092	0.0372

P<0.016, S<0.008

였다. 용접금속의 화학 조성은 OES(Optical Emission Spectroscopy)로 분석하였다.

2.2 기계적 특성 평가

기계적 특성 평가를 위해 비커스 경도기, 인장시험기, 샤르피 충격시험기를 사용하였다. 샤르피 충격시험은 -40~-20°C, -196°C에서 실시하였다. 인장시험 시편과 샤르피 충격시험 시편은 각각 ASTM E8과 ASTM E23을 따라 가공하였다.

2.3 미세조직 분석

미세조직 분석을 위해 광학현미경(Optical Microscopy, 이하 OM), 투과전자현미경(Transmission Electron Microscopy, 이하 TEM), 전자 후방산란 회절 분석(Electron Backscattered Diffraction, 이하 EBSD)를 사용하였다. OM 관찰을 위해 미세연마 후, FeCl₃ 용액(FeCl₃ 5 g + 100 ml distilled water)으로 에칭 하였으며, IIW DOC. IX-1533-88에 제시된 방법을 이용하여 상분율을 측정하였다. 개재물 크기분포 및 화학조성 분석을 위해 TEM을 사용하였으며, 시편준비는 레플리카 방법으로 하였다. 결정립간의 방위차는 EBSD를 사용하여 분석하였으며, EBSD 관찰 시편은 5% perchloric acid + 95% methanol 전해액을 사용하여 전해연마 하였다. 또한 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy, 이하 SEM)을 사용하여 샤르피 충격시험 시편의 파단면을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 화학조성 및 기계적 특성 평가

본 연구에서 제작한 용접금속의 화학조성을 Table 1에 나타내었다. 용접금속의 니켈 함량만 2.3~3.3 wt.%로 변화하였고, 다른 원소들의 함량은 거의 일정하게 유지되었다. 니켈의 산소 친화력은 실리콘, 망간과 같은 원소들에 비해 훨씬 낮으므로 용접금속의 산소함량도 거의 변화가 없었다¹⁷⁾. 따라서 용접금속 개재물의

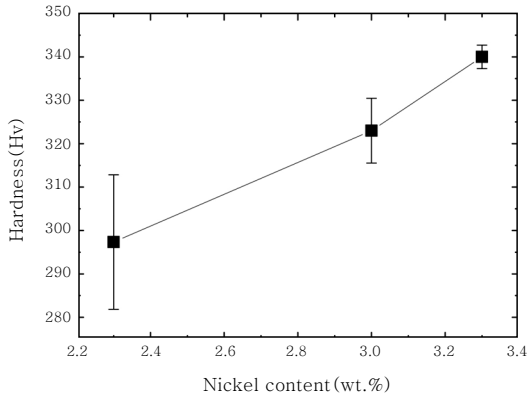


Fig. 2 Vickers hardness of the weld metals as a function of nickel content

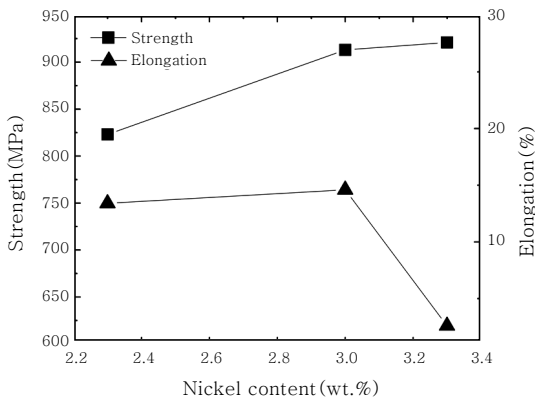


Fig. 3 Tensile strength and elongation of the weld metals as a function of nickel content

부피 분율도 거의 변화가 없을 것으로 사료된다.

용접금속의 기계적 특성 평가 결과를 Figs. 2-4에 나타내었다. 저온충격인성은 샤르피 충격시험을 3회 실시하여 평균값으로 나타내었다(Fig. 4). 용접금속의 니켈 함량이 증가함에 따라 경도 및 인장강도는 증가하였으나, 연신율 및 저온충격인성은 감소하였다.

3.2 미세조직 분석

OM을 통해 관찰한 용접금속의 대표적인 조직사진을 Fig. 5에 나타내었으며, 각상들의 정량적인 분석결과를 Table 2에 나타내었다. 용접금속에 니켈, 망간, 몰리브덴, 크롬과 같이 경화능을 향상시키는 원소가 상당량 첨가되었기 때문에 대부분 저온변태상으로 구성되어 있었다. 니켈 함량이 증가함에 따라 베이나이트와 마르텐사이트가 초기 오스테나이트 결정립을 따라 형성되면서 침상페라이트의 분율은 감소하였다. 즉, 용접금속의 니켈 함량이 증가함에 따라 취성이 큰 베이나이트와 마르텐사이트 상의 분율이 증가하면서 침상페라이트 분율이

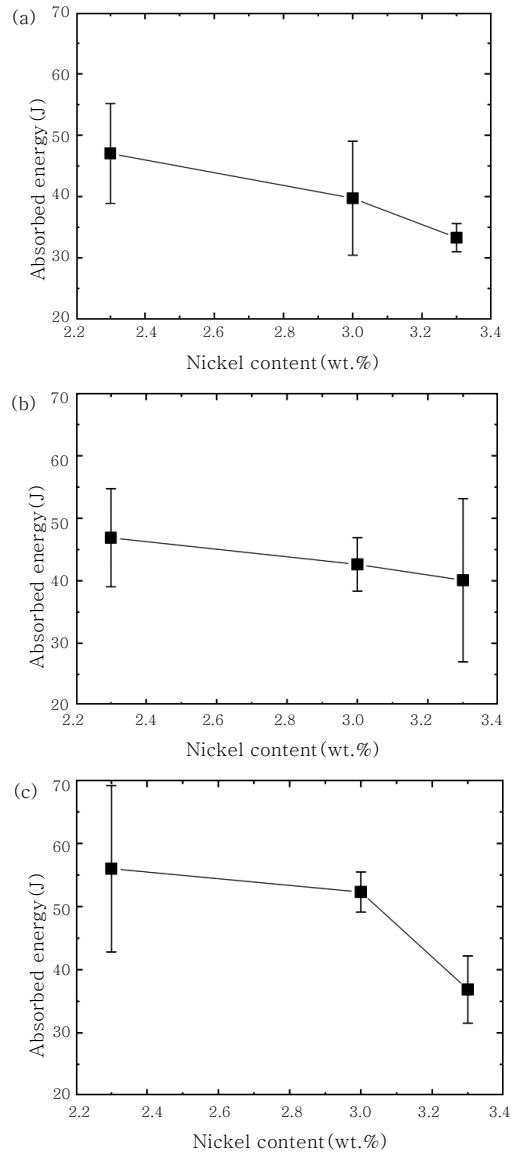


Fig. 4 Absorbed energy of the weld metals at different temperatures as a function of nickel content: (a) -40 °C; (b) -30 °C; (c) -20 °C

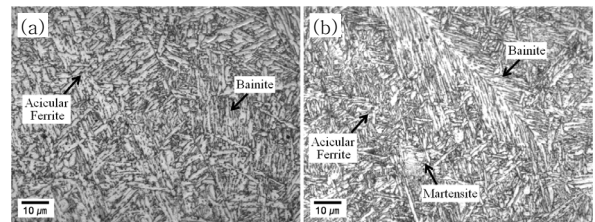


Fig. 5 Optical micrographs of the weld metals: (a) MN23; (b) MN33

감소하였기 때문에 경도 및 인장강도가 증가함과 동시에 연신율 및 저온충격인성이 감소하는 것을 알 수 있었다(Figs. 2-4).

침상페라이트는 베이나이트와 동일한 베이나이트 변태의 산물이지만 핵생성 장소의 차이로 인해 다른 형태를 갖는다¹⁸⁾. 즉, 베이나이트 조직이 초기 오스테나이트 결정립계로부터 핵생성되어 결정립 내부로 성장하는데 반하여, 침상페라이트는 초기 오스테나이트 결정립 내부에 있는 비금속 개재물로부터 핵생성되어 사방으로 성장해 나가게 된다. 따라서 베이나이트와 침상페라이트는 동일한 상변태 온도에서 핵생성 장소 밀도 및 비금속개재물 특성에 따라 경쟁적으로 생성되게 된다. 본 연구에서 상변태 거동이 달라지는 이유를 규명하기 위하여 오스테나이트 결정립 크기 및 비금속개재물에 대한 분석을 실시하였다.

우선 TEM을 통해 비금속개재물 크기분포와 화학조성을 분석하여 Fig. 6와 Fig. 7에 나타내었다. 평균 개재물의 크기는 MN23 용접금속과 MN33 용접금속이 각각 532 nm와 587 nm로 거의 변화가 없었으며, 화학 조성은 용접금속의 니켈함량에 관계 없이 티타늄과 망간이 주요 성분인 산화물로 이루어져 있었다. 즉, 용접금속의 니켈 함량이 변화하더라도 비금속개재물의 특성에는 변화가 없음을 알 수 있었다.

주상정의 초기 오스테나이트 결정립 크기는 그 폭을 측정하였으며, 니켈 함량이 증가함에 따라 감소하는 것

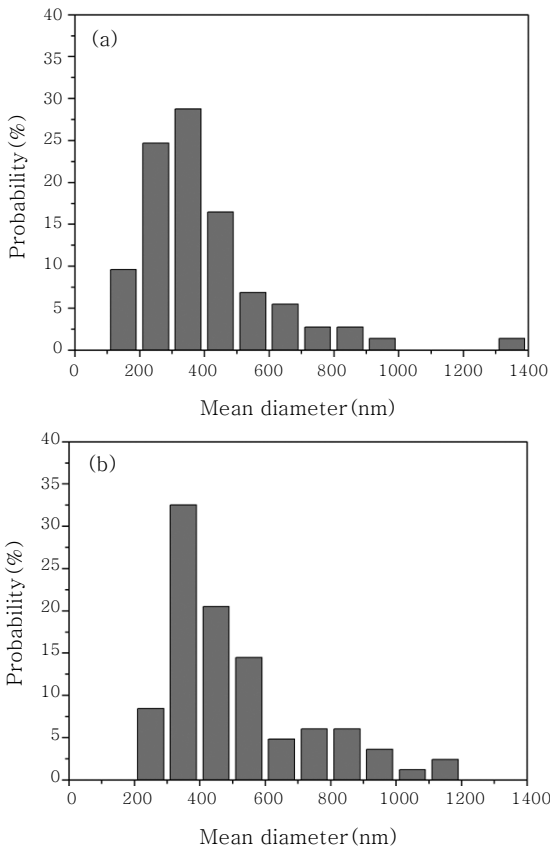


Fig. 6 Size distribution of inclusions contained in the weld metals: (a) MN23; (b) MN33

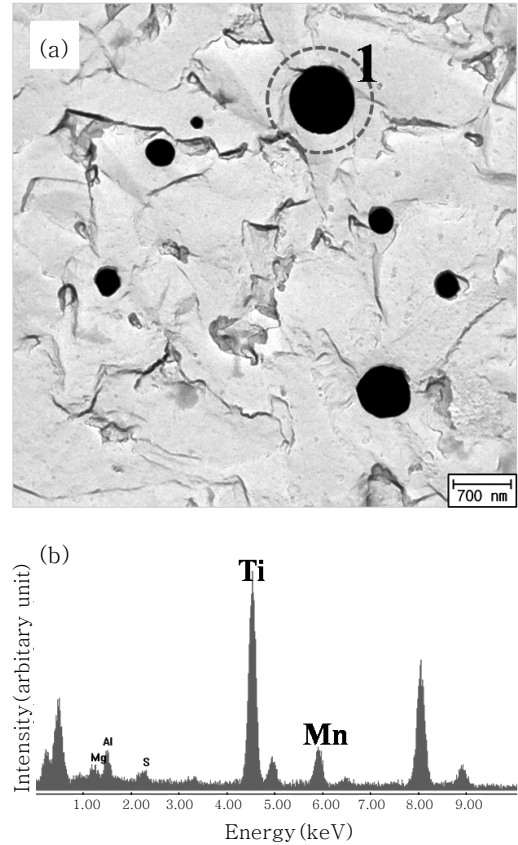


Fig. 7 TEM analysis of inclusions contained in the weld metal MN23: (a) BF image; (b) EDS obtained from area 1

을 알 수 있었다(Table 2). 초기 오스테나이트 결정립 크기는 합금원소에 의한 solute drag effect와 개재물의 pinning effect에 의해 영향을 받는다¹⁹⁾. 하지만 본 연구에서 개재물의 크기분포에는 차이가 없으므로 (Fig. 6), 초기 오스테나이트 결정립 폭의 감소는 니켈의 solute drag effect에 의한 것으로 판단된다. 이러한 효과에 의해 상대적으로 초기 오스테나이트 결정립계의 면적이 넓어지게 되어 베이나이트와 마르텐사이트의 분율이 증가한 것으로 사료된다. 일반적으로 초기 오스테나이트 결정립계의 면적이 증가하게 되면 입계페라이트 및 위드만슈테텐 페라이트의 생성이 촉진되지만, 본 연구에서는 합금원소가 상당량 첨가되어 경화능

Table 2 Percentages of microstructural constituents and columnar width of the weld metals

	MN23	MN30	MN33
Acicular ferrite (%)	77	75.5	56.5
Bainite (%)	12	14.5	22
Martensite (%)	11	10	21.5
Columnar width (μm)	61	53	47

이 충분히 크기 때문에 관찰되지 않았다.

EBSD 분석을 통해 15° 이상의 고경각으로 구분된 유효결정립을 Fig. 8에 나타내었으며, 결정립의 방위차에 따른 분율을 측정하여 Fig. 9에 나타내었다. 평균 유효결정립도는 대략 4.7 μm 에서 3.9 μm 로 약간 감소하였으며, 래스 폭과 길이의 비(ratio)가 증가하는

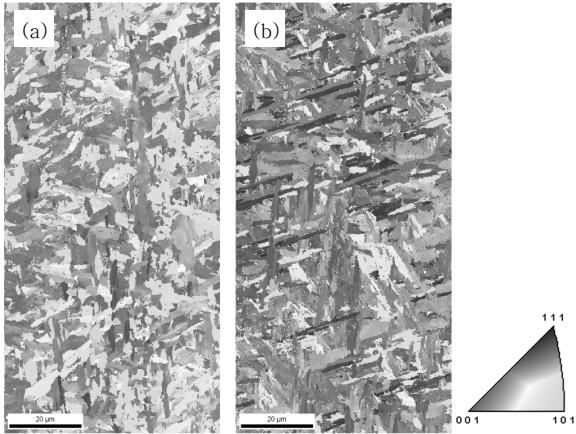


Fig. 8 Inverse pole figure [001] color maps of the weld metals: (a) MN23; (b) MN33

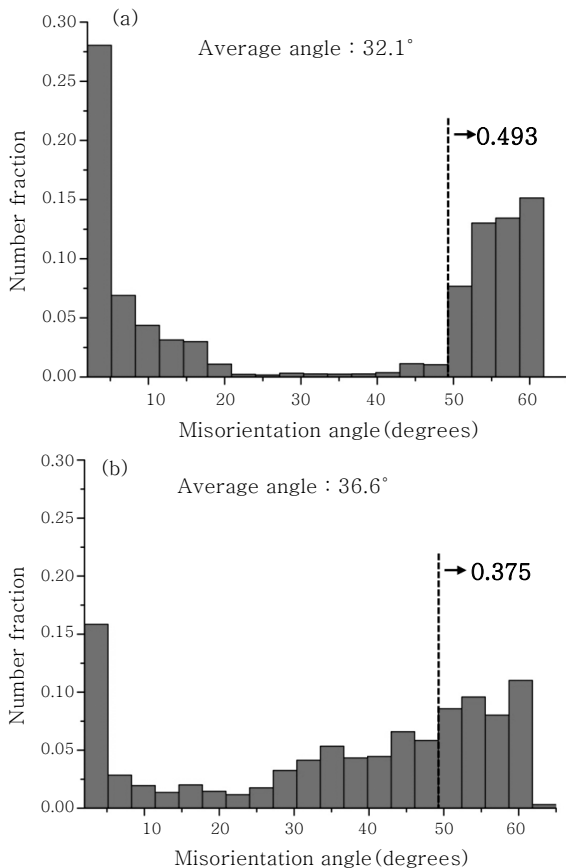


Fig. 9 Distribution of the misorientation of the weld metals: (a) MN23; (b) MN33

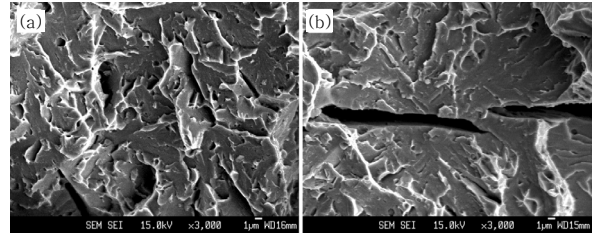


Fig. 10 SEM fractographs of the weld metals: (a) MN23; (b) MN33

것을 관찰하였다. 즉, 침상페라이트는 니켈 함량이 증가할수록 더욱 미세하게 형성되었는데, 이는 오스테나이트 안정화 원소인 니켈이 첨가됨에 따라 페라이트 상변태가 지연되었기 때문인 것으로 판단된다. 평균 방위각의 경우 MN23 용접금속보다 MN33 용접금속이 크게 나타났으나, MN23 용접금속의 경우 20~47° 사이의 방위각은 거의 존재하지 않으며, 47° 이상의 고경각 결정립의 분율이 매우 높은 것을 확인할 수 있었다. 한 개의 오스테나이트 결정립 안에서 페라이트 상변태를 하게 되면 20~47° 사이의 방위각이 형성되지 않으므로²⁰⁾, 침상페라이트 분율이 높은 MN23 용접금속에서 Fig. 9a와 같은 방위각 분포가 나타나는 것으로 사료된다. 따라서 평균 방위각의 크기보다는 47° 이상의 고경각 결정립의 분율이 저온충격인성 확보를 위해 더 중요한 것으로 판단된다.

벽개파괴 양상 비교를 위해 -196°C에서 실시한 샤르피 충격시험 시편의 파단면을 SEM으로 관찰하여 Fig. 10에 나타내었다. 침상페라이트 분율이 높은 MN23 용접금속의 경우 벽개파면의 크기가 미세하게 형성되었고, MN33 용접금속의 경우 벽개파면이 상대적으로 크게 형성되었으며 2차 균열도 발견되었다. 47° 이상의 고경각 결정립의 분율이 높은 MN23 용접금속이 균열전파를 효과적으로 방해하여 벽개파괴 시 균열전파경로가 자주 바뀌게 되면서 벽개파면의 크기가 미세하게 형성되었으며, 상대적으로 베이나이트 분율이 높은 MN33 용접금속의 경우 균열전파에 대한 저항이 낮아져서 벽개파면 크기가 상대적으로 크게 형성되었고, 균열이 취성이 큰 조직의 내부로 전파되기도 하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 고강도 저합금강 용접금속의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 니켈 함량의 영향을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 용접금속의 니켈 함량이 증가함에 따라 경도 및 인장강도는 증가하지만, 연신율 및 저온충격인성은 감

소하였다.

2) 용접금속의 니켈 함량이 증가함에 따라 침상페라이트 분율은 감소하였고, 베이나이트 및 마르텐사이트 분율이 증가하였다. 침상페라이트 분율이 감소함에 따라 47° 이상의 고경각 결정립의 분율이 낮아졌으며, 이에 따라 균열전파에 대한 저항이 낮아져서 벽개파괴 시 파면의 크기가 상대적으로 크게 형성되었다.

3) 용접금속의 니켈 함량이 증가함에 따라 니켈의 solute drag effect에 의해 초기 오스테나이트 결정립 폭이 감소하였고, 상대적으로 초기 오스테나이트 결정립계의 면적이 넓어지게 되어 베이나이트와 마르텐사이트의 분율이 증가하였다.

4) 용접금속의 니켈 함량이 비금속개재물 크기분포와 화학조성에는 영향을 미치지 않았다.

후 기

본 연구는 지식경제부 소재원천기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. S. Y. Shin, S. Y. Han, B. Hwang, C. G. Lee, S. Lee : *Materials Science and Engineering A*, **517** (2009), 212
2. J. Y. Koo, M. J. Luton, N. V. Bangaru, R. A. Petkovic : *Proc. of ISOPE-2003*, (2003), 10
3. E. Levine, D. C. Hill : *Metallurgical Transactions A*, **8A** (1977), 1453
4. R. A. Farrar, P. L. Harrison : *Journal of Materials Science*, **22** (1987), 3812
5. S. Ohkita, Y. Horii : *ISIJ International*, **16** (1995), 1170
6. J. S. Byun, J. H. Shim, J. Y. Suh, Y. J. Oh, Y. W. Cho, J. D. Shim, D. N. Lee : *Materials Science and Engineering A*, **319** (2001), 326
7. J. S. Lee, S. H. Jeong, D. Y. Lim, J. O. Yun, M. H. Kim : *Metals and Materials International*, **16** (2010), 827
8. J. Lee, S. Kim, B. Yoon, H. Kim, S. Kil, C. Lee : *Journal of KWJS*, **29-1** (2011), 65 (in Korean)
9. D. H. Kang, H. W. Lee : *Metals and Materials International*, **17** (2011), 963
10. W. W. Bose-Filho, A. L. M. Carvalho, M. Strangwood : *Materials Characterization*, **58** (2007) 29
11. J. C. F. Jorge, L. F. G. Souza, J. M. A. Rebello : *Materials Characterization*, **47** (2001) 195
12. R. A. Farrar, Z. Zhang, S. R. Bannister, G. S. Barritte : *Journal of Materials Science*, **28** (1993), 1385
13. S. Liu, D. L. Olson : *Journal of Materials Engineering*, **9** (1987), 237
14. S. H. Kim, C. Y. Bang, K. S. Bang : *Journal of Materials Science*, **36** (2001), 1197
15. W. Wang, S. Liu : *Welding Journal*, **81** (2002), 132
16. D. S. Taylor, G. M. Evans : *Metal Construction*, **15** (1983), 438
17. H. J. T. Ellingham : *Journal of the Society of Chemical Industry*, **63** (1944), 125
18. A. A. B. Sugden, H. K. D. H. Bhadeshia : *Metallurgical Transactions A*, **20A** (1989), 1811
19. J. W. Martin, R. W. Doherty : *Cambridge University Press*
20. A. F. Gourgues, H. M. Flower, T. C. Lindley : *Materials Science and Technology*, **16** (2000), 26