

해양구조물용 저온 고강도 Casting Steel 소재 개발

이수호[†]*, 한기형*, 배재류*, 김태원**, 박상식**, 강충길***

대우조선해양주*
㈜석진금속**
부산대학교 기계공학부***

A Study on the Low Temperature & High-strength Low-alloy Material for
Casting Steel of the Offshore Structures

Soo-Ho Lee[†]*, Ki-Hyoung Han*, Jae-Ryu Bae*, Tae-Won Kim**, Sang-Sik Park**
and Chung-Gil Kang***

Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd.*
Sekjin Metal Co., Ltd.**
School of Mechanical Engineering, Pusan National University***

Abstract

The high-strength low-alloy(HSLA) steels have low carbon contents(0.05~0.25% C) in order to produce adequate formability and weldability, and they have manganese contents up to 1.7%. Small quantities of silicon, chromium, nickel, copper, aluminum, molybdenum are used in various combinations. The results contained in this paper can provide the valuable information on the development of -40°C low temperature HSLA. Furthermore, the present experimental data will provide important database for casting steel materials of the offshore structure.

※Keywords: Offshore structure(해양구조물), Low-temperature(저온), High-strength(고강도), Low-carbon alloy(저탄소합금), Casting steel(주강)

1. 서론

세계 주조선산업은 2005 년의 경우 전년대비 약 7.5%의 높은 증가세를 보이고 있고, 국내에서도

접수일: 2008 년 6 월 19 일, 승인일: 2008 년 7 월 14 일

†교신저자: oceanlove@dsme.co.kr, 055-680-7504

자동차, 조선, 기계, 철강 등 전후방 관련 산업 군에 미치는 직간접 경제파급효과가 매우 큰 모든 사업의 뿌리산업으로 기여해 왔다(Lee 2007).

고강도 저탄소강은 일반적으로 C 0.15%, Mn 1.65%, P 와 S 의 경우 0.035% 내외의 극소량의 구성된다. 이외에도 Cu, Ni, Nb, N, V, Cr, Mo, Si, Zn 등의 미량원소가 적절한 구성비로써 포함된다

(Michael and David 1992).

특히 Rudder Horn 등에서 주조품 사용량이 감소하고 있는 상선(Park 2006)과는 달리 해양구조물용 저온 고강도 Casting Steel 부품은 북극해를 비롯한 자원개발 영역 확대추세를 배경으로 개발요구가 증가하고 있다.

이와 같은 소재는 특징적으로 -40°C 에서 충격시험과 저탄소 및 고강도, 우수한 용접성능을 동시에 요구하고 있다. 특수소재를 적용한 주조성형품은 반잠수식시추선(Semi-submersible drilling rig)의 기둥(Column)과 폰툰, 기둥과 상부 데크가 만나는 응력집중부(Node), 계류 및 시추용 파이프 연결부, 해저유정부 등에 주로 사용된다.

지금까지 저온 특성의 탄소강 주조를 위한 소재 및 열처리 방법에 대한 연구는 국내에서도 일부 진행되어 왔다(Chae et al. 2004). 그러나 시장규모가 작고, 소재의 조성 및 열처리 등의 요구조건이 까다롭기 때문에 소재의 개발에 대한 연구가 활성화되지 못하였다.

DNV(20001)등 해외 선급규정에서도 해양구조물을 위한 주조용강의 저온특성에 대한 기준이 설정되어 있지 않고 있는 등 급격하게 변화하는 설계환경과 주문주의 요구사항에 따른 화학적 조성, 기계적 강도를 모두 충족시키는 소재개발에 대한 연구가 충분히 이루어지지 못하고 있었다.

국내 출원특허(Nam et al. 1989)의 경우 저탄소 고강도 특성은 탄소함유량 0.08~0.12%, 인장강도 472MPa로 DNV NV480W 소재의 수준에 해당되나 온도조건은 -20°C 를 적용하고 있어 현재의 요구수준에 미달하고 있다.

한국, 일본, 미국, 유럽의 등록특허 기술들을 분석한 한국특허정보원의 특허맵(KIPI 2007)에 따르면, 저온영역에서는 $-196\sim-40^{\circ}\text{C}$ 영역의 저온 주강용 소재개발이 있어 왔으나 대부분 탄소함유량과 강도 기준은 충족하지만 경도값에 대한 규정이 없고, Ni 함유량이 너무 높아 해양구조물용으로써는 경제성이 떨어지는 것(Katsuragi et al. 2007)으로 확인되었다.

따라서 본 연구에서는 탄소함유량을 0.25%

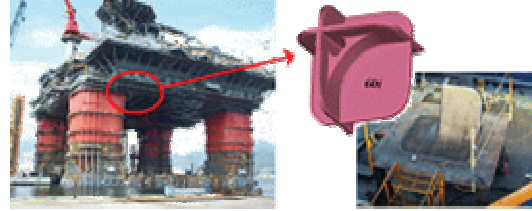


Fig. 1 Shape & section of the casting steel for offshore structure

이하로 설정한 가운데 미량원소의 함유량을 3 가지로 변화시킨 조건으로 나누어 시편을 개발하였고, 다양한 열처리 조건을 적용하여 강도, 인장율, 연신율, 단면수축율, 충격치 등 기계적 물성치의 목표수준을 DNV-OS-B101 NV 550 W 소재품질기준에 -40°C 충격시험 조건을 추가한 상태로 설정하여 비교평가하였다.

또한 개발소재의 용접성능 확보를 위해 탄소당량(CE)과 용접균열감수성지수(Pcm)를 산출하여 적절성을 판단하였다.

2. 해양구조물용 Casting steel 소재

해양구조물에 적용 중인 Casting steel 부품의 대표적인 사례라고 할 수 있는 반잠수식시추선의 응력집중부와 적용형상 및 실물은 Fig. 1 과 같다.

대형화, 심해화, 극해진출 등의 메가트렌드를 보이는 해양시추구조물 특성상 설치해역의 수심이 깊을수록, 크기가 커질수록 보다 높은 응력이 발생되며, 반복하중으로 작용하는 특성을 가지고 있다. Casting steel 부품은 응력집중부에서 극후판 사용시 과도한 용접과 균열, Lamella Tearing 발생 가능성(Bang et al. 1999)을 차단하고, 응력분포에 따른 적절한 형상적 대처가 가능하다.

그러나 선급규정에서는 Casting Steel 을 위한 탄소함금강의 Charpy V-notch Test 의 조건을 0°C 로 규정하고 있는 관계로, 이보다 높은 수준이 요구되는 심해 및 극해지역에서의 적용을 위해서는 주문주 사양서에서 요구하고 있는 -40°C 에서의 충격시험조건을 충족할 필요가 있다.

3. 소재특성 및 시험조건

3.1 소재특성

저온 고강도 Casting Steel 용 소재로 개발한 시편의 화학적 조성비는 Fig. 2 와 같다.

소재의 개발과정은 화학적 조성에 대해 탄소 함유량 0.25%를 기본 제어요소로 설정하였으며 개발과정으로 일환으로 진행된 한국, 미국, 유럽 등의 등록특허 기술들을 분석한 한국특허정보원의 특허맵(2007)을 토대로 나머지 미량원소들의 함유비의 적절성을 찾는 시행착오 방식을 선택해 완료하였다.

개발된 소재는 노르웨이 선급(DNV) 규정에서의 기준치와 비교해 볼 때 탄소함유량은 0.25%에 비해 모두 낮으며, 미량원소들 가운데 Mn, Si, P, S 등과 Cr, Ni, Mo 등의 조합으로 이루어져 있다.

이들 미량원소들은 강도, 저온취성, 경도 등에 영향을 미치는 요소들이며, 최종 소재의 용접성능 확보를 위한 조건과 대비하여 적절성이 검증되어야 한다.

용접성능 확보를 위한 탄소당량(CE)과 용접균열감수성지수(Pcm) 값은 Fig. 2 의 화학적 조성비를 식(1), 식(2)에 적용함으로써 확인이 가능하다.

$$CE = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14 \quad (1)$$

$$Pcm = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B \quad (2)$$

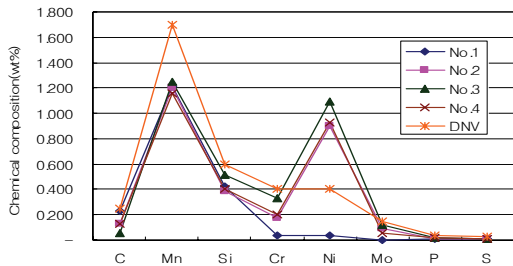


Fig. 2 Chemical composition of test specimens

3.2 열처리 조건

열처리조건은 탄소함유량의 차이에 따라 Fe-상태도를 고려하여 Table 1 에서와 같이 설정하고 각 조건에 따른 열처리 후의 조직상태와 기계적 성질의 변화를 관찰하였다.

1 차적으로 As-cast 상태로 응고된 주조상 조직을 탄소함유량에 따라 850~920℃에서 가열한 후 형성된 오스테나이트 상태의 조직을 40℃ 이하의 냉각수로 급랭시켜 마르텐사이트 (Martensite) 조직을 얻었다.

마르텐사이트 조직은 급랭 처리에 따라 탄소가 확산할 만한 시간적 여유가 없어 a-철 내에 탄소원자가 고용상태로 남아있게 되면서 경도를 증가시켜 높은 취성의 성질을 가지게 된다.

때문에 취성의 저감과 조직 인성의 확보, 급랭에 따른 잔류응력 감소를 위해 뜨임 처리(Tempering)를 실시하였으며 잔가지상의 마르텐사이트 조직을 조대하고 구상화된 안정적 조직으로 유도할 수 있었다.

Table 1 Test condition of specimens

	Quenching (Water Cooling)	Tempering (Air Cooling)	Numbers of test
No.1 (0.232%C)	850℃ / 2hr	450~600℃ / 2hr	4Times
No.2 (0.126%C)	920℃ / 2.5hr	580℃ / 3~6hr	4Times
No.3 (0.056%C)	920℃ / 2.5hr	500~580℃ / 6hr	3Times
No.4 (0.125%C)	920℃ / 2.5hr	580℃ / 5hr	3Times

4. 결과 및 고찰

4.1 조직변화 양상

Fig. 3 은 개발된 소재에 대해 열처리를 실시하기 전에 관찰한 200 배율의 탄소함유량 변화에 따른 각각의 미세조직 단면이다. 탄소함유량이 낮을 수록 초석 페라이트(Ferrite)와 오스테나이트(Austenite) 사이의 원자배열이 잘 연결되지 않아 부정합경계면 (Incoherent interface)이 생성된 형태로 관찰되었으며, 주강품의 전형적인 조직사진이라고 할 수 있다.

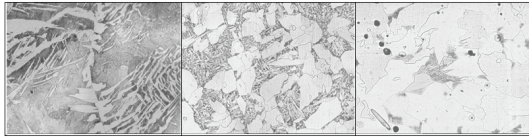


Fig. 3 Comparison of microstructure(x200) of 0.232%, 0.126%, 0.056% before heat treatment

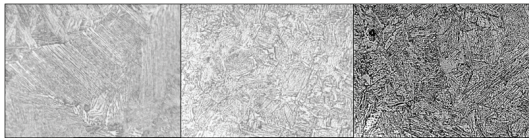


Fig. 4 Comparison of microstructure(x500) of 0.232%, 0.126%, 0.056% after quenching

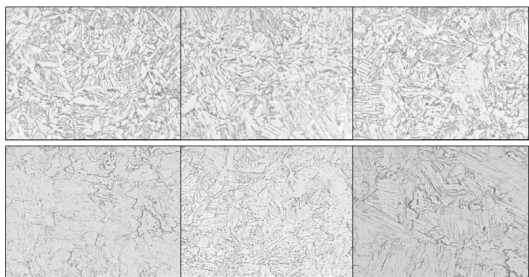


Fig. 5 Comparison of microstructure(x500) of 0.126%(top; 4~6 time interval), 0.056%(bottom; 500~580 °C temperature interval) after tempering

Fig. 4 는 주조상 조직을 개선하고 동시에 주조응력을 제거하기 위하여 탄소함유량에 따라 1 차적으로 담금질(Quenching)을 한 조직사진을 관찰한 그림이다.

탄소함유량이 적을수록 미세한 가지상 마르텐사이트로 변태됨을 확인할 수 있었다. 그러나 평행하게 배열되는 부분인 다발(Packet)이 탄소함유량이 작아짐에 따라 현저하게 발달되는 것을 확인 할 수 있었다.

이는 각 다발의 마르텐사이트 가지들이 서로 다른 방향성을 가지고 있어 조직관찰시 부식액 나이탈용액을 사용한 에칭(Etching)에 따라 각기 다른 부식특성이 관찰되는 것으로 사료된다.

Fig. 5 는 담금질에 의해 경화된 강의 취성을

줄이고 인성을 높이기 위하여 뜨임 처리를 한 이후 적용시간과 탄소함유량을 달리한 재료에 대한 미세조직을 관찰한 것이다.

뜨임 처리를 통해 잔가지상이 많이 제거되고 초기 오스테나이트와 다발 내의 조대하고 구상화된 시멘타이트(Cementite)의 입자가 생성되는 것을 확인하였다. 이는 비슷한 방향으로 배열된 다발 내의 잔가지상들 사이에 소경각경계가 소멸되고 동시에 소경각경계의 감소에 따라 전체 전위농도가 감소하며 재배치되기 때문으로 사료된다.

4.2 조직 분석

주강품 제조시 A3(변태점 온도 910 °C) 혹은 Acm(오스테나이트로부터 시멘타이트가 석출하기 시작하는 온도) 선 이하로 냉각속도를 느리게 하여 초석 페라이트의 연결이 끊어진 부분이 많도록 해야 하며, 보다 미세한 마르텐사이트 조직을 얻기 위해서는 모상인 오스테나이트의 조직이 조밀해야 한다는 것을 파악할 수 있었다.

탄소함유량에 따라 용탕에서 응고될 때 온도감소량과 탄소함유량에 따른 펄라이트(Pearlite) 양, 펄라이트 속에서 생성되어가는 오스테나이트의 핵 생성 속도가 다르기 때문에 탄소함유량이 적을수록 오스테나이트의 핵 생성을 위한 탄소의 확산이 느려져 오스테나이트가 발달하지 못한다는 것을 실험을 통하여 알 수 있었다.

인장시험 결과 탄소함유량이 가장 높았던 0.232%C 에서는 충분한 강도를 나타내었지만, 연신율과 단면감소율 및 충격시험 에너지 값이 목표하는 값에 근접하지 못하였다. 이것은 뜨임 처리한 마르텐사이트 조직에 여전히 잔가지상이 많이 존재하였기 때문으로 판단된다.

탄소함유량이 0.126%C 일 때는 마르텐사이트의 다발이 0.232%C 일 때 보다 작아짐으로 해서 뜨임 이후 작은 잔가지상들이 많이 없어졌고 초기 오스테나이트와 다발 안에 조대한 시멘타이트 입자를 만들었기 때문에

뜨임 처리 시간의 변화와는 상관없이 인장과 연신을 단면감소율이 목표치를 상회한 것으로 판단된다.

탄소함유량이 0.056%C 인 뜨임 처리된 마르텐사이트 조직은 조대화로 인해서 보다 좋은 파괴인성을 나타내는데 조직의 조대화로 인하여 강도값은 상대적으로 낮은 것으로 나타났다.

4.3 기계적 성질

Fig. 6, Fig. 7 및 Fig. 8 은 탄소함유량과 열처리조건의 변화에 따른 개발된 소재의 각각의 시험편에 대한 기계적 성질을 조사하여 비교한 그래프이다.

No.4 소재는 화학적 조성 및 기계적 물성치에 대해 포항산업과학원(RIST)의 공인시험 인증을 거쳤다.

No. 1 을 제외한 소재의 경우 단면감소율과 연신율의 목표치를 상회하는 결과가 얻어졌다.

탄소함유량이 상대적으로 높은 0.232%의 시험편의 열처리조건에 따른 기계적 성질을 비교해본 결과 인장강도와 항복강도 값은 목표치를 만족하는 결과치를 얻을 수 있었다.

그러나 저온(-40℃)에 대한 충격시험값은 No.4 를 제외하고는 목표치인 68Joule 을 근소한 범위에서 만족하지 못하였으며, No.1 은 저조한 값을 나타내었다.

또한 탄소함유량 0.056%인 소재의 열처리 후 기계적 성질을 조사한 결과 탄소함유량이 매우 낮은 수치에서는 저온 충격성과 연신율, 단면감소

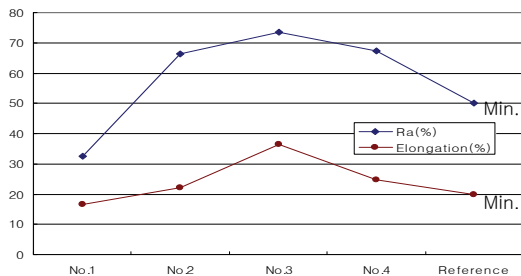


Fig. 6 Ratio of reduction of area and elongation

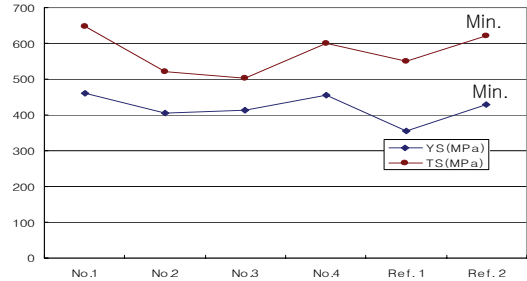


Fig. 7 Comparison of yield and tensile strength

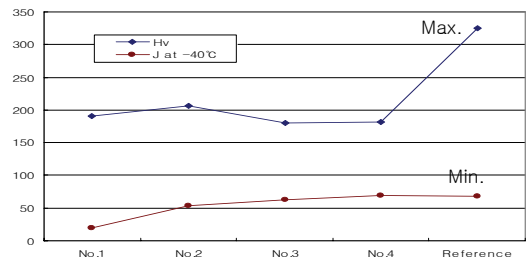


Fig. 8 Comparison of hardness and Charpy V-notch test

율을 확보 할 수 있었으나 인장강도 값을 충족시키기가 어렵다는 것이 확인되었으며, 0.125%의 탄소함유량에 따라 580℃에서 5 시간 뜨임 처리를 한 조건에서 1 차 목표치(DNV NV 550 W)인 항복강도 및 저온충격성, 용접성능 등을 모두 충족하는 결과 값을 얻게 되었다.

4.4 용접성능

Table 2 에서 보는 바와 같이 개발된 각각의 소재에 대한 Pcm 은 0.186~0.312 범위로, CE 는 0.411~0.450 범위를 보이고 있으며 No.1 이 Pcm 요구치를 벗어난 것을 제외하고는 모두 ASTM A751 기준을 충족하는 것으로 나타났다.

Table 2 Comparison of CE & Pcm

	No.1	No.2	No.3	No.4	Reference (ASTM A751)
CE	0.450	0.423	0.411	0.411	Max. 0.490
Pcm	0.312	0.239	0.186	0.231	Max. 0.250

5. 결론

본 연구는 해양구조물용 응력집중부에 사용되는 저탄소 저온 고강도 Casting Steel 부품 소재개발을 위해 탄소함유량을 3 가지 조건으로 나누어 시편을 확보하였고, 열처리 조건 변화에 따른 화학적 조성 및 기계적 성질의 비교를 통해 다음 결론을 얻었다.

(1) 개발소재는 탄소함유량 0.125%로 인장강도(600 MPa) 및 항복 강도(456 MPa)를 포함한 기계적 물성치가 우수하며 -40℃에서의 충격시험값 70J 을 얻음으로써 해양구조물용 주강재료로 적합한 수준인 것으로 나타났다.

(2) 열처리 조건에서 580℃에서 5 시간을 적용하였을 때 미세조직의 단면이 우수하고, 기계적 성질도 우수한 것으로 밝혀졌다.

(3) 개발소재는 탄소당량(CE) 0.411, 용접균열감수성지수(Pcm) 0.231 로 용접성능 면에서 만족할만한 결과를 얻었다.

개발소재는 저온취성을 더욱 강화하기 위해 화학적 조성에 있어 Mn 과 Ni, Mo, Cr, V 등 미량원소의 성분조성에 대해 부분적으로 재조합하는 연구가 추가 보완되어야 할 것으로 사료된다. 개발된 소재는 부분 보완 후 해양구조용 주조부품과 신개념 표준형강재(Bulb bracket) 개발에 활용할 계획으로 있다.

후 기

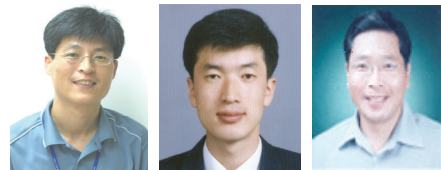
본 논문은 지식경제부 부품소재기술개발사업 지원과제의 일부로 수행된 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- Nam, K.H., Jang, Y.S. and Keum, C.H., 1989, "Low Alloy Steel & Manufacturing Method," The Korean Intellectual Property Office, KR 10-1989-0002010.
- Chae S.E., Park, J.H., Kim, G.C. and Nor, W.J., 2004, "Method for Refining Extra Low Carbon

Steel with High-tension," The Korean Intellectual Property Office, KR 10-2004-0116124.

- Korea Institute of Patent Information, 2007, Patent Map of Casting Steel for Offshore Structures, Seoul.
- Bang, H.S., Kim, S.J., Kim, J.M., Jang, W.S. and Kwon, Y.S., 1999, "A Study of Lamella Tearing Being Produced by Corner Joint Welding in Box Column of Ultra Thick Plate," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 36, No. 4, pp. 95-104.
- DNV, 2001, Metallic Materials Offshore Standard DNV-OS-B101, pp. 31-34.
- Katsuragi and Nonomura, Ojiro, Izutsu, 2007, Casting Steel Having High Strength and Low Thermal Expansion, EP 1 589 123 A1.
- Lee, S.M., 2007, "Current Status of Worldwide Casting Industry and Industry Prospects of Each Country, " Journal of the Korean Foundrymen's Society, Vol. 27, No. 3, pp. 101-116.
- Michael F.A. and David R.H. Jones, 1992, Engineering Materials 2, Oxford, Pergamon Press.
- Park, S.G., 2006, "Optimizing Design For Rudder Horn, " Special Issue of the Society of Naval Architects of Korea, pp. 77-80.



< 이 수 호 > < 한 기 형 > < 배 재 류 >



< 김 태 원 > < 박 상 식 > < 강 충 길 >