

기술자료

대형주강품의 응고거동과 결함에 대한 사례연구

박홍일[†] · 김우열 · 배차현 · 김창규 · 김성길* · 권호규* · 전창석* · 오진석*

부경대학교 신소재공학부

*대창중기(주)

A Case Study on the Solidification Behavior and Defects of Heavy Steel Castings

Heung-Il Park[†], Woo-Yeol Kim, Cha-Hun Bae, Chang-Gyu Kim, Sung-Kil Kim*,

Ho-Gyu Kwon*, Chang-Suk Jeon*, and Jin-Suk Oh*

Pukyong National University, Div. of Advanced Materials Science and Engineering, 100 Yongdang-Dong, Nam-Gu, Pusan, 608-739, Korea

*Daechang Cast & Machinery Co., Ltd, 1508-5 Dadae-dong, Saha-Gu, Busan, Korea

1. 서 론

선박에는 Main bearing support(MBS), Chain wheel, Propeller boss, Tiller, Bell mouth, Stern boss, Rudder horn, Rudder carrier 등의 대형 주강품이 사용된다(Fig. 1 참조). 주강품이 대형화될수록 응고시간이 길어지기 때문에 응고조직의 조대화화 함께 합금성분의 편석현상을 피할 수 없다. 고품질의 대형 주강품을 제조하려면 주강의 응고거동과 편석현상을 제어하는 기술이 확립되어야 한다. 본 강연에서는 금속의 거시적 응고조직 특성과 편석의 생성기구에 대하여 간략하게 설명하고, 대형 주강의 응고조직 특성과 이와 관련된 편석 결함에 대한 연구결과의 몇 가지 사례를 소개한다.

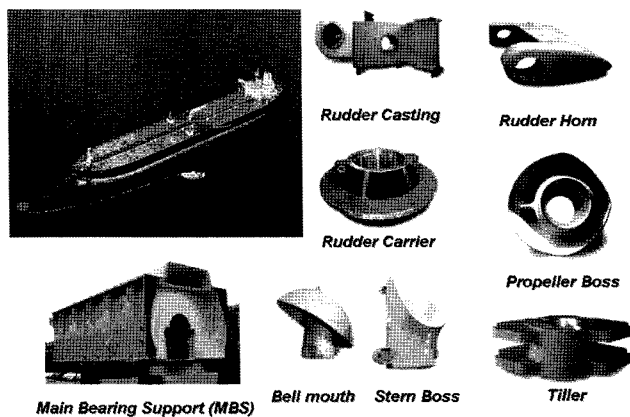


Fig. 1. Steel casting parts for ship building.

2. 주조의 10계명

- (1) 양질의 용탕을 제공한다(Provide a good quality melt)-최적의 주입온도와 화학조성, 최소의 잔류가스과 개재물 혼입.
- (2) 주입류 선단의 난류화를 억제한다(Avoid liquid front damage)-최소 난류화에 의한 산화물 생성 및 혼입 억제.
- (3) 연속 주입한다(avoid arrest of the liquid front)-최적 주입속도에 의한 탕경 발생 억제.
- (4) 충만 주입한다(Avoid bubble damage)-탕구계의 불충분한 충만에 의한 공기 혼입 억제.
- (5) 중자 가스결함을 억제한다(Avoid core blows)-중자 및 주형에서 발생하는 가스 억제.
- (6) 수축결함을 억제한다(Avoid shrinkage damage)- 급탕성(feeding capacity)를 향상시키는 구조방안 채택.
- (7) 용탕대류를 촉진시킨다(Avoid convection damage)-후육부의 부적절한 용탕대류는 편석과 수축결함을 유발.
- (8) 편석억제방안을 수립한다(Plan segregation distribution)-주조품의 두께변화 또는 응고속도차에 기인하는 화학성분 편석을 억제.
- (9) 잔류응력을 제어한다(Control residual stress)-주물형상, 냉각속도 또는 열처리에 기인하는 잔류응력 최소화.
- (10) 위치결정점을 설계한다(Provide location points)-치수 기준점 또는 가공 기준점을 설계.

3. 금속의 거시적 응고조직

주형속에서 용융금속이 응고될 때, 응고조직은 첨가되어 있는

[†]E-mail : castpark@pknu.ac.kr

“본 기술자료는 2006년도 한국주조공학회 춘계학술발표 및 기술강연대회에서 발표된 내용임”

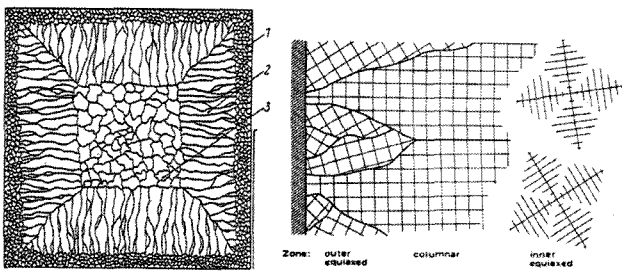


Fig. 2. Sketch of macrostructures of ingot showing chill zone, columnar zone and equiaxed zone.

용질원소의 함량과 성질, 사용되는 주형의 크기, 형상 및 성질, 그리고 주입온도와 주입 방법에 따라 크게 달라진다.

Fig. 2는 전형적인 주괴의 응고조직을 나타낸다. 주괴는 3가지의 응고조직으로 구성된다. 최외층은 미세등축결정(fine equiaxed grains or chill grains), 중심부는 등축결정(equiaxed grains), 그리고 미세등축결정과 등축결정의 중간부분에 주상결정(columnar grains)을 나타내며, 대부분의 합금은 이 3가지의 거시적 조직이 혼재한다. 미세등축결정은 일반적으로 육안관찰이 곤란하다. 주상결정의 응고조직은 순금속에서 흔히 관찰되며, 과열된 합금용탕을 금형에 주입하거나 인위적으로 용탕대류를 억제시킬 때 관찰할 수 있다. 주괴의 응고조직이 결정성장의 방향성이 없는 등축결정으로 응고하는 것이 가장 바람직하다. 이 등축결정은 화학조성과 물리적 성질이 상당히 균질하기 때문에 단조, 압연과 같은 후속가공에 가장 적합한 응고조직이 된다.

4. 금속의 응고형태

용융금속이 주형속에서 응고할 때 나타나는 응고형태(solidification morphology)를 대별하면 Fig. 3과 같이 주형벽

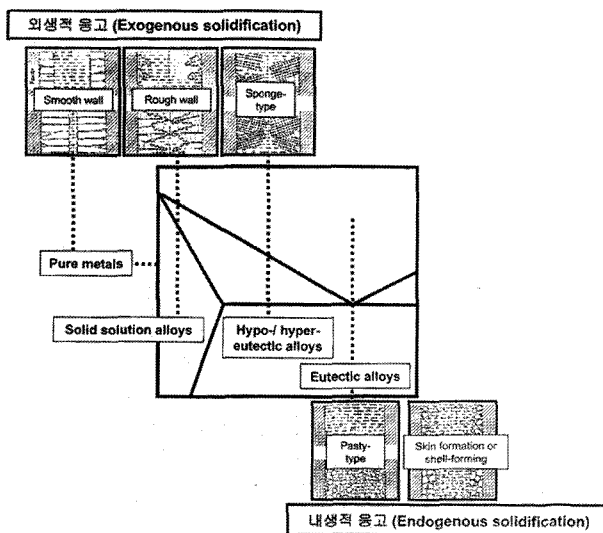


Fig. 3. Solidification morphology of metals.

면으로부터 응고가 순차적으로 진행되는, 즉 고상과 액상사이 에 분명한 경계를 나타내면서 응고가 진행되는 표피 생성형 응고형식(skin formation type solidification)과 고상과 액상사이 에 고액 공존층이 넓게 형성되면서 응고가 진행되는 죽모양 응고형식(mushy or pasty type solidification)으로 나눌 수 있다. 그리고 이들 응고형식은 주형벽쪽에서 우선적으로 응고가 일어나는 외생적 응고(exogenous solidification)와 용탕속에서 응고가 일어나는 내생적 응고(endogeneous solidification)으로 나눌 수 있다.

Fig. 3의 (a),(b),(c)는 외생적 응고의 모식도를 나타내며, Fig. 3의 (d),(e)는 내생적 응고의 모식도를 나타낸다. (a)는 평활한 고액계면 응고형태로 순금속의 대표적인 응고형태이다. (b)는 거칠은 고액계면을 나타내며 대부분의 실용합금은 수지상으로 결정이 성장한다. 그리고 (c)는 스펀지상(sponge type)의 응고형태를 나타내며, 응고온도 범위가 좁은 합금을 서냉할 때 나타난다. 응고는 주형벽면으로부터 수지상으로 성장하지만 완전한 응고각을 형성하지 못하고 거의 동시에 응고하기 때문에 미세수축공이 발생하기 쉬운 합금의 응고형태이다. (d)는 응고온도 범위가 넓은 합금을 서냉할 경우의 응고형태이며, (e)는 공정합금이나 등축결정을 생성시키는 합금을 급냉시킬 경우에 나타나는 응고형태이다.

Fig. 4는 공업용 순수 알루미늄(>99.5 wt.%Al), TiB를 첨가하여 개량처리된 순수 알루미늄 및 Al-4.5 wt.%Si 합금의 응고조직과 고액계면의 형태를 보여준다.

5. 대형 MBS 주강품의 냉각속도 측정

Fig. 5는 세라믹 샌드 주형으로 제조된 제품중량 9톤급의 선박용 MBS 대형 주강품의 냉각속도를 측정한 사례이다. 주입중량은 16톤이었으며, 주입온도는 약 1550°C이었다. 화학조성은 0.17%C-0.45%Si-0.75%Mn을 목표로 하였다. 주강품의 표면에서 50 mm 떨어진 세라믹 주형의 냉각속도를 측정한 결과, 900°C까지 약 700분 (12.5시간), 700°C까지 약 1500분 (25시간)이 소요되었다. 한편 주강 용탕과 직접 접촉한 냉금(250×120×100 mm)의 냉각속도를 측정한 결과 1000°C까지 약 1500분 (25시간), 900°C까지 냉각되는데 3000분(50시간)

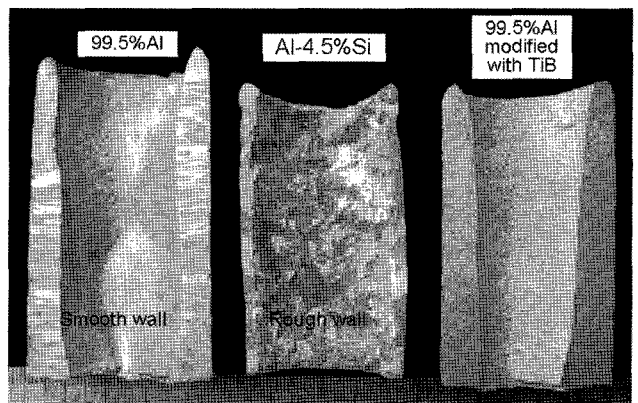


Fig. 4. Solid/liquid interface morphology of Al-alloys.

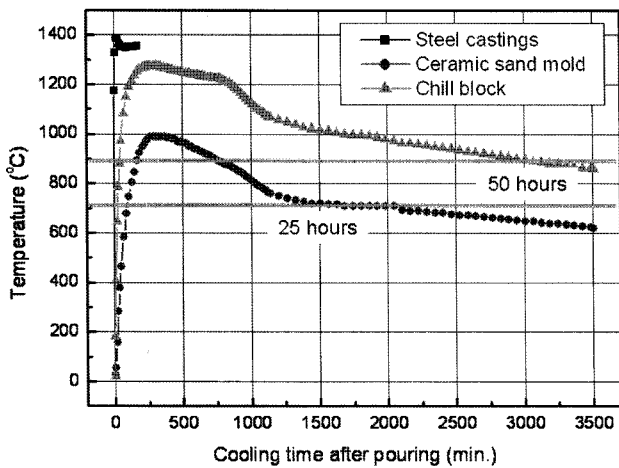


Fig. 5. An example of cooling rates of steel castings, ceramic sand mold and chill block.

이상 소요되었다. 이로부터 사형주형에 주입된 대형주강품은 매우 서냉되고 있어 응고조직의 조대화와 합금조성의 편석경향을 쉽게 예측할 수 있다.

6. 주강의 거시적 편석

합금용탕을 주형에 주입하여 응고시킨 주조품 또는 주괴를 제조할 때, 주조기술자들은 합금원소들의 편석이 없는, 화학성분이 균질한 주조품 또는 주괴를 제조한다는 것이 얼마나 어려운 일인지 잘 알고 있다.

편석은 크게 미시적편석(microsegregation)과 거시적 편석(macroseggregation)으로 분류된다. 이들 편석형태와 생성위치는 합금의 물리적 성질, 열적대류, 결정성장의 형태, 그리고 응고시 자유결정(free crystal)의 거동에 큰 영향을 받는다.

고용체 합금의 유심조직(cored structure)에서 흔히 관찰되는 미시적 편석은 고온의 어닐링으로 제거된다. 그러나 V편석과 역V편석(강괴의 P, S 편석), 부편석(負偏析, Cu-Sn합금의 tin-sweat), 중력편석(Sn-Sb 합금에서 초정의 부상) 및 대상편석(Ni-C-S 합금의 일방향 응고)등의 거시적 편석은 어닐링 등의 열처리로 제거되지 않고, 이들 편석은 최종 제품의 결함으로 이행된다.

Fig. 6은 강괴(steel ingot)에서 관찰되는 정편석(positive segregation), V편석(V-segregation), 역V편석(inverse V-segregation) 및 부편석(negative segregation)의 거시적 편석을 개략적으로 그린 것이다.

7. 대형 주강품의 성분편석

Fig. 7은 MBS (L70MC S17F)의 압탕부에 대한 C, Si, Mn, P, S 성분의 분석 결과를 나타낸다. 화학성분의 분광분석은 주조품 하단에서 압탕상부까지 20 mm 간격의 종방향으로 분석하였다. 화학 성분의 분석 결과를 보면 주조품 구역은 목표 규격치 범위를 만족하고 있으나, 주조품 구역 보다 응고속

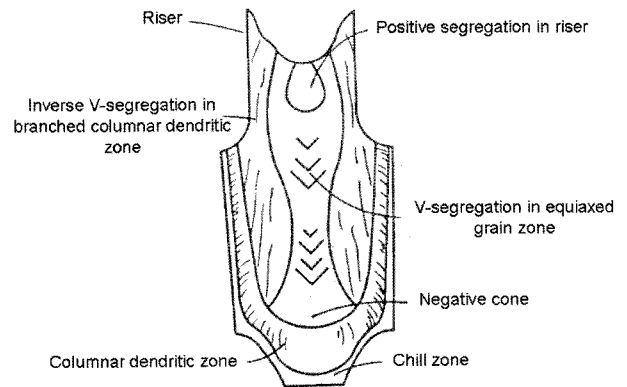


Fig. 6. Typical macrosegregation observed in steel ingots.

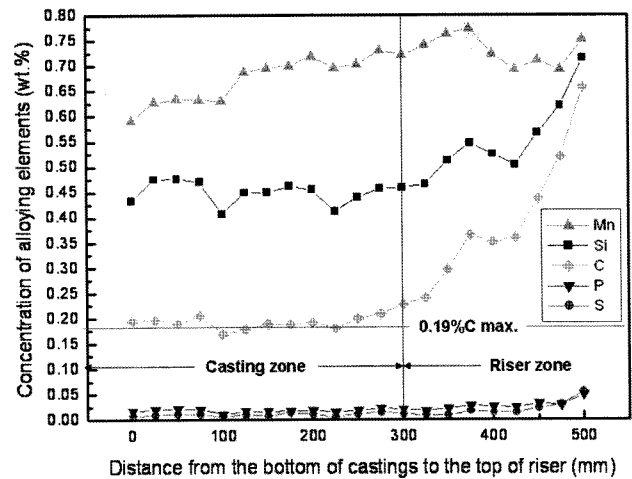


Fig. 7. Concentration of alloying elements for MBS L70MC as-cast steel castings.

도가 늦은 압탕부에서는 성분원소의 농화현상이 급증하였다. 압탕부에서 C은 목표 조성 0.19%의 3배 이상, Si은 목표 조성 0.45%의 1.5배 이상, 그리고 Mn은 목표 조성 0.6%의 1.3배 이상 농화되었다. 그리고 P, S 역시 압탕부에서 농화되는 편석 경향을 보였으나 이들 원소의 함량은 0.035% 이하의 범위에 있었다.

8. 대형주강품의 역V편석 생성위치와 형상

Fig. 8은 MBS 주방품 (L70MC S17F)의 직경 400 mm 압탕부에 대한 설피 프러이트 일레이다. Fig. 6과 Fig. 7에서 보는 바와 같이 압탕의 상부 중심부는 C, Si, Mn의 정편석(positive segregation)을 보이고 있으며, 전형적인 역V편석(inverse V-segregation or ghost)을 나타내었다.

Fig. 9는 설피 프러이트 시험으로 역V편석이 관찰된 판상 주강품의 거시적 조직을 나타낸다. Fig. 8의 설피 프러이트 시험에서 역V형상으로 나타난 끈 모양(string-type)의 편석과 비교하여 보면, 이들 역V편석상은 동심원을 그리는 판상 또는 필

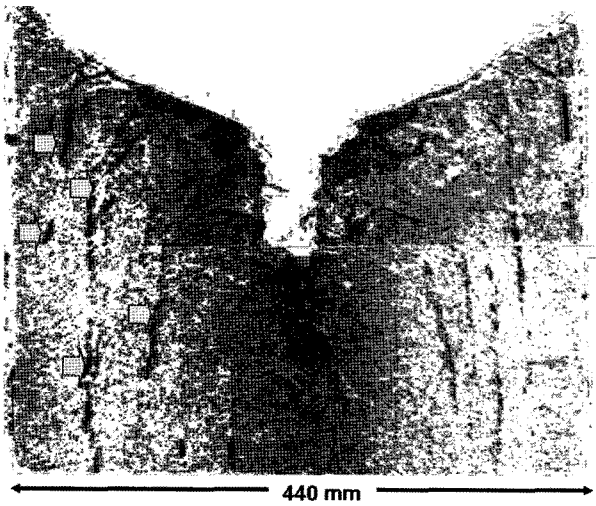


Fig. 8. Typical inverse V-segregation observed in riser of MBS L70MC as-cast steel castings by sulfur print test.

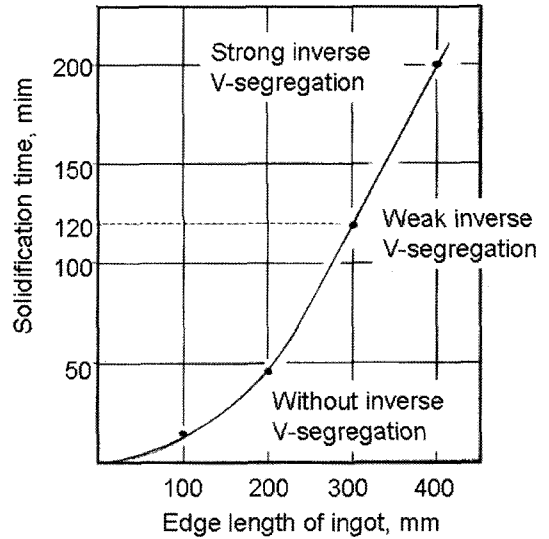


Fig. 10. Relation between solidification time and inverse V-segregation.

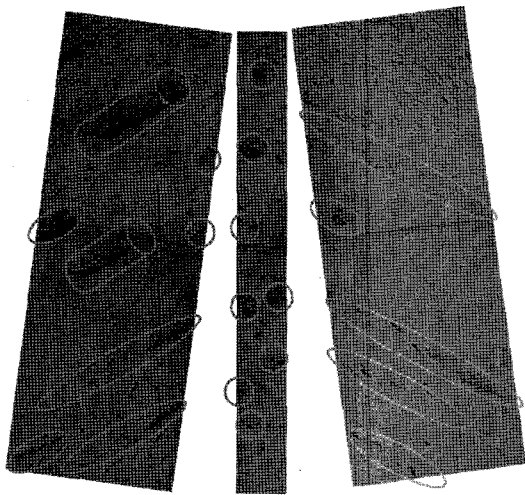


Fig. 9. Footprints of ghost-like sulfides in steel castings.

름상으로 존재하는 것이 아니라 서로 길이가 다른 봉상의 편석결정군이 일정한 경사각을 이루면서 불규칙하게 나열된 분포특성을 보였다. 이들 역V편석대의 크기와 편석이 나타나는 위치가 매우 무질서하기 때문에 유령편석(ghost)이라고도 불린다.

Fig. 10은 역V편석의 생성에 미치는 응고시간의 영향을 나타낸다. 실험 결과에서 보듯이와 같이 역V편석은 응고시간이 최소 120분 이상 소요되는 강괴에서 나타남을 알 수 있다.

9. 역V편석의 생성기구 고찰

이론적으로 역V편석은 부화용강(富化熔鋼)의 부상에 기인한다고 알려져 있다. 그러나 역V편석의 생성과정은 불명확하며, 이에 대한 연구 결과도 미흡하다.

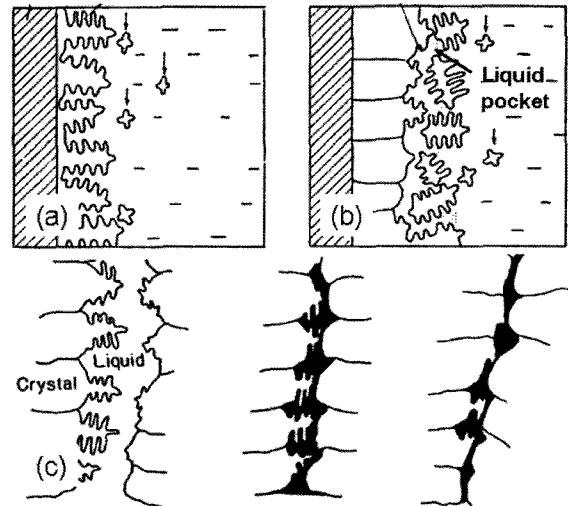


Fig. 11. Formation of inverse V-segregation by string-type segregation mechanism.

Fig. 11는 주강에서 흔히 줄무늬 형식으로 나타나는 역V편석의 생성기구를 모식적으로 보여준다. 주형에 용탕이 주입되면 결정립은 안정한 응고각의 형성에 앞서 적당한 크기로 성장하여 침전할 때 까지 대류에 의하여 하강, 부상을 반복한다. 이들 결정립이 Fig. 11(a)와 같이 응고각을 형성한 주상정의 선단에 부착하면, 이들 결정이 성장하여 분기상 주상정대(branched columnar zone)를 형성한다. 이와 같은 주상정 선단에서 부착 및 성장하는 침전결정은 Fig. 11(b)와 같이 수직상 가지 사이에 구립된 액상 주머니(liquid pocket)를 형성한다. 주변의 결정이 성장함에 따라 고립된 액상내의 S 및 P와 같은 용질 원소는 농화되며, 이 비중이 작은 농화액상은 상방향으로 부상하여 Fig. 11(c)와 같이 줄무늬 형식의 역V편석을

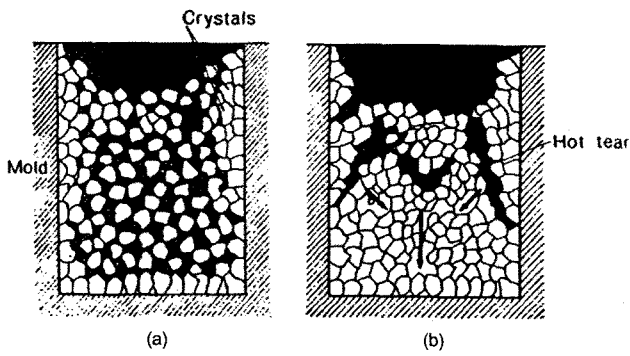


Fig. 12. The process of forming V- and inverse V-segregation.

생성시킨다는 설도 있다.

Fig. 12는 등축결정립 구역에서 V편석과 역V편석의 생성되는 과정을 모식적으로 나타낸 것이다. Fig. 12(a)는 주형속에 결정의 침전추적(沈澱推積) 현상을 나타낸다. 주형벽면의 외층부 결정립 사이에는 잔류하는 액상이 거의 없이 서로 접촉하여 응착력이 발생한다. 그러나 주형 중심부의 결정립들은 Fig. 12(b)와 같이 응착력이 매우 약하기 때문에, 응고가 진행됨에 따라 주괴 상부의 중심부에 있는 등축결정이 화살표 방향으로 아래로 쳐져서 역V모양의 틈새(열간균열 hot tearing)가 생긴다. 이 틈새는 용질원소로 농화된 잔류액상으로 채워지고, 그 결과 편석으로 나타나게 된다. 이러한 역V편석은 등축결정구역 뿐만 아니라, 수축에 기인하는 전단응력이 걸리거나 또는 중심부 등축결정의 처짐 현상이 심하게 일어날 경우 주상정 결정 구역에서도 나타난다는 보고도 있다.

10. 대형주강품의 거시적 응고조직에 의한 냉각속도의 계산

주조품의 냉각속도(dT/dt)는 고액계면의 이동속도로 표시되는 응고속도(solidification rate, dX/dt)와 온도구배(temperature gradient, dT/dx)를 곱한 값이다. 용질의 함량이 일정할 경우 응고속도가 빨라지면 수지상으로 응고되며, 응고속도가 느려질수록 세포상조직, 무조직으로 응고형태가 이행된다. 한편 응고속도가 일정할 경우 용질의 함량이 많으면 수지상으로 응고하고, 용질함량이 적어질수록 세포상으로, 그리고 순금속이면 무조직으로 응고한다.

공업용 합금에는 상당량의 합금원소가 첨가되어 있기 때문에 모든 실용합금의 수지상으로 응고한다고 보면 된다. 수지상의 생성기구는 고액계면의 용질 편석에 기인하기 때문이다. 따라서 어떤 합금의 용질농도가 일정하다면 냉각속도(cooling rate)가 빨라질수록 수지상 가지의 간격(dendrite arm spacing)은 조밀해진다. 그러나 냉각속도가 느려지면 조대한 수지상으로 응고하여 미세수축공이 빈발하고, 기계적 성질이 약화된다.

대부분의 주조공장에서 사용되는 주형은 제품 형상과 크기, 합금의 종류에 따라 일정하다. 주형의 종류가 일정하면, 주형의 열적특성값도 일정하므로 응고과정에서 용탕의 온도구배 일정

하다고 보아도 무방하다. 그러나 실제 주조공정에서 주입된 용탕의 응고속도, 즉 고액계면의 이동속도를 측정하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 어떤 특정의 주조공정으로 제조된 주조품의 응고조직으로부터 수지상 가지의 간격을 측정하면, 이 주조품이 어느 정도의 냉각속도로 응고되었는가를 유추할 수 있다.

Fig. 13은 C함량이 0.1-0.9% 범위의 상용 탄소강의 2차수지상 간격(SDA, secondary dendrite arm spacing)과 냉각속도와의 관계를 나타낸 것이며, SDA와 냉각속도 R 사이에 아래와 같은 실험식을 도출하였다. 즉

$$d = 709 R^{-0.386}$$

Fig. 14는 대형 주강품의 응고조직의 일례를 나타낸다. 대가선법으로 실측한 SDA의 평균값은 630 μm 이었으며, 이 값을 윗식에 대입하여 계산한 결과 냉각속도는 1.35 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 이었다. 이 결과로부터 대형 주강품은 매우 서냉되고 있기 때문에 결정립의 조대화화 함께 편석에 기인하는 품질문제가 항상 나타날 수 있음을 알 수 있다.

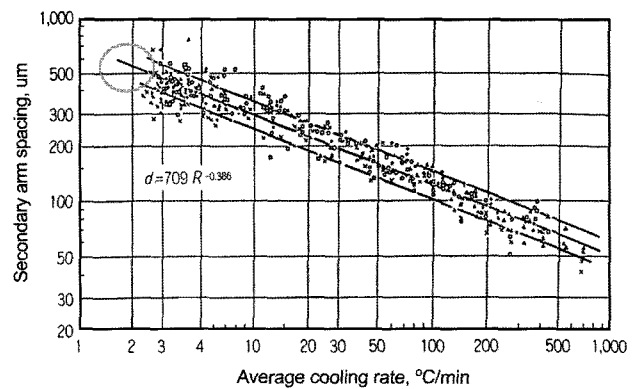


Fig. 13. Some experimental data on dendrite arm spacing in commercial steels containing from 0.1 to 0.9%C.

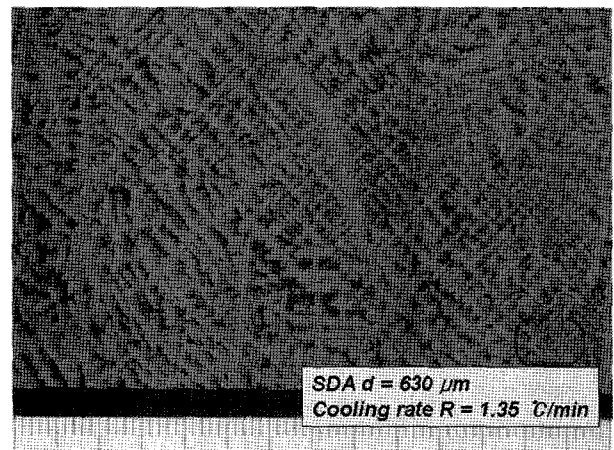


Fig. 14. An Example of solidification macrostructure of as-cast steel containing 0.19%C.

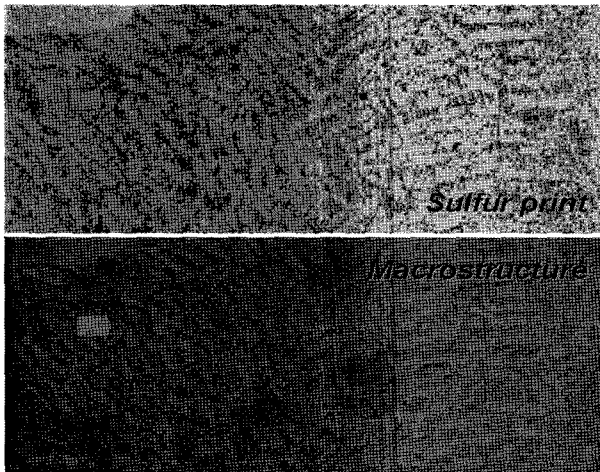


Fig. 15. Microsegregation of sulfides in steel castings.

11. 주강 응고조직과 유화물의 미세편석

Fig. 15는 대형 주강품에서 채취한 판상시험편의 설퍼 프린트와 거시적 응고조직을 비교한 것이다. 수지상의 결정립을 구성하는 세포상(cell)의 입계에 유화물의 미세적 편석이 관찰되었으며, 수지상 결정립의 경계에는 유화물이 편석되어 균열처럼 관찰되었다. Fig. 16은 거시적 응고조직에서 균열로 관찰된 부분을 연마하여 나이탈 용액으로 부식한 미세조직을 나타낸다. 거시적 응고조직의 입계에 해당하는 곳에서 MnS 유화물이 군집하여 나타남을 볼 수 있다.

감사의 글

본 기술강연내용의 일부는 2004년도 산업자원부 지역산업기술개발사업 “세라믹 샌드 특수주조법을 이용한 대형 주강품의 생산기술 개발” 에서 얻어진 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] A. Ohno, The Solidification of Metals, Chijin Shokan, 1976.
- [2] Casting, Metal Handbook, 10th edition, Vol. 15, 1998.
- [3] R. Heine, C. R. Loper, and P. C. Rosenthal, Principles of Metal Casting, McGraw-Hill, 1967.
- [4] Steel Casting Handbook, 4th edition, Steel Founders' Society, 1970.

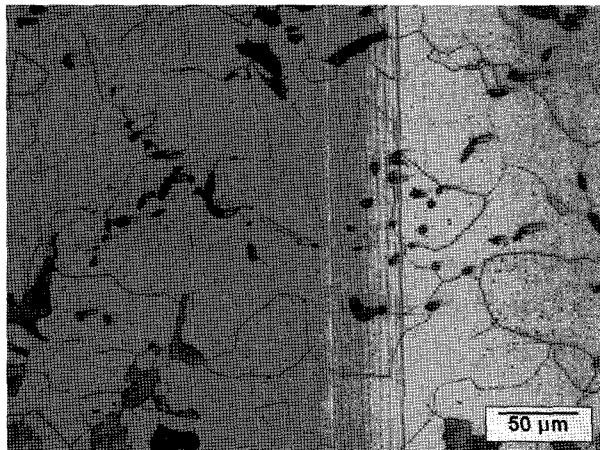


Fig. 16. Segregation of MnS sulfides in grain boundaries.