

■■■■■■■■■■
論 文
 ■■■■■■■■■■

연속주조된 강재 슬래브 표면의 Oscillation Mark 형성에 관한 평가

박태호[†] · 김지훈^{*} · 최 주^{**} · 예병준

An Assessment on the Formation of Oscillation Mark of the Continuously Casted Steel Slabs

Tae-Ho Park[†], Ji-Hun Kim^{*}, Joo Choi^{**}, and Byung-Joon Ye

Abstract

In early solidification during the continuous casting of steel slabs, the formation of oscillation marks on the surface of slabs was mainly affected by carbon contents and casting conditions. The control of oscillation mark is required for the HCR(Hot Charged Rolling) process because the deep oscillation marks seriously deteriorate the surface qualities of steel slabs. The metallographic study has revealed that the oscillation mark can be classified principally according to the presence or absence of a small 'subsurface hook' and the depth of the oscillation marks in the subsurface structure at the basis of individual oscillation marks. The subsurface hook of oscillation marks was either straight or curved. When the amount of overflow was small and the subsurface hook was formed in the top of oscillation marks, the subsurface hook was straight and the oscillation mark was shallow. The oscillation marks without subsurface hook have small early solidification shell and were formed wide. The actual negative strip time(t_N) was changed by the effect of meniscus level fluctuation Therefore irregular early solidification shell and oscillation mark were formed.

(Received September 9, 2003)

Key words : Continuous casting, Oscillation mark, Pitch, Depth, Meniscus level fluctuation

1. 서 론

연속주조된 강재 슬래브 표면에는 oscillation mark (OSM)가 형성된다. 이러한 OSM는 주형(mold)내 meniscus 직하의 초기 응고시 주형 진동에 의해 불가피하게 형성되는 것으로 균열이나 편석, 비금속 개재물, pinhole 등의 표면결함을 야기하며 그 자체로서도 표면결합이 되어 HCR(Hot Charged Rolling) process를 위해서는 적절히 조절되어야 할 필요가 있다. 따라서 초기응고시 OSM의 형성기구에 관한 연구를 통해 OSM로부터 야기되는 제반 표면결함을 줄이고자 하는 시도가 계속되어져 왔다[1].

연속주조된 주편의 표면결합과 OSM의 형성은 주형

내에서의 1차 냉각에 의한 초기응고가 일어나는 과정에서 이루어지는 것으로 이에 대한 이해가 필수적이다. 주형 내에서 초기응고가 일어나는 과정에 대한 모식도를 Fig. 1에 나타내었다. 침지노즐로부터 주입된 용강과 주형사이에 윤활제로 flux를 주입하게 되는데 이것은 용강의 주입온도에 의해 용융된 flux층과 고상의 flux층을 형성하게 된다. 따라서 주형 내에서의 열전달은 meniscus 상부를 통한 복사 열전달과 열전달의 대부분을 차지하는 주형으로의 열전달을 통해서 초기응고가 일어난다고 볼 수 있다. 하지만 이 과정에서 용강의 원활한 배출을 위하여 주형 역시 상하로 진동을 하게되므로 용강의 초기 응고층은 균일하게 형성되지 못하고 표면에 주형 진동의 결과로 OSM를 남기게 된다.

경북대학교 금속공학과(Dept. of Materials Science and Metallurgy, Kyungpook National University)

*연세대학교 공과대학 재료공학부 준결정재료연구단(Center for Noncrystalline Materials, Department of Metallurgical Engineering Yonsei University)

**포스코 기술연구소 (Iron & Steel Making Research Team, Technical Research Laboratories, POSCO)

[†]E-mail : thpark@ye.knu.ac.kr

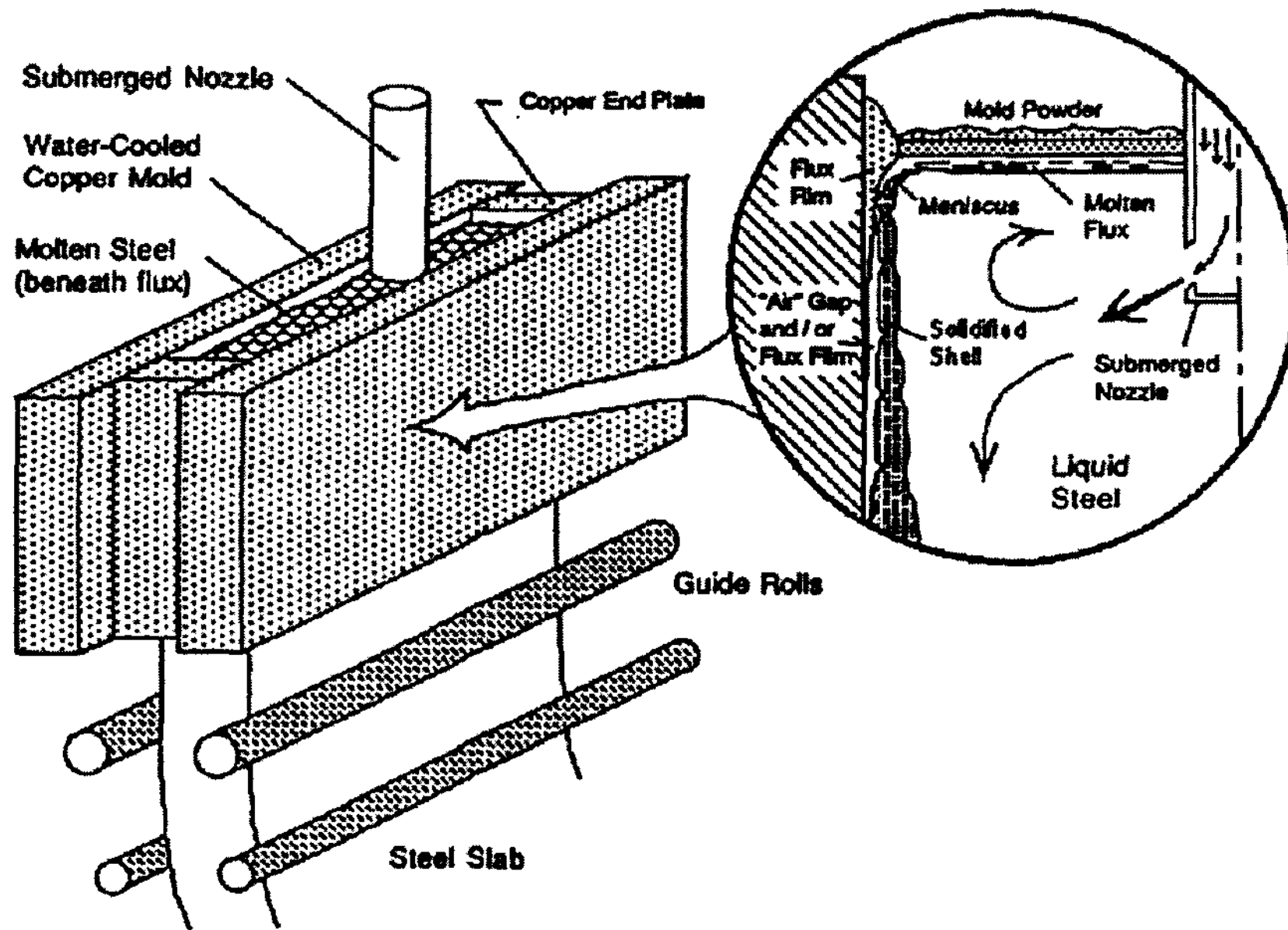


Fig. 1. Schematic of continuous casting slab caster showing mold, fluid flow, and shell growth.

연속주조시 OSM에 관한 이전 연구자들의 형성기구를 살펴보면 주형 내에서의 초기응고 과정에 대한 실험적 관찰이 곤란하다는 이유로 대부분 수치 해석적 방법에 의존하여 설명하고 있는데 이는 Table 1에 요약해 놓았고, 현재까지 overflow type과 depression type의 2가지 OSM의 형성기구에 대해 가장 정설로 여겨지는 Takeuchi와 Brimacombe의 모식도를 Fig. 2에 나타내었다[5]. 이들은 반응고 상태인 초기 응고층의 강도가 주형 진동에 따른 flux층의 압력변화에 충

분히 저항할 수 있는 경우, 상부의 용강이 overflow를 하게 되고 이를 통해 주조방향과 반대방향으로 subsurface hook가 생긴다고 하였다. 이와 다른 경우로 초기 응고층의 강도가 주형의 진동에 따른 flux층 내의 압력변화에 충분히 저항할 수 없을 정도로 약한 경우에는 overflow 없이 OSM가 생긴다고 하였다[5]. 하지만 아직까지 주형 진동에 의한 초기 응고층의 동적 응고 및 변형과정에 대한 연계해석 결과로 주편 표면에 불규칙하게 형성되는 OSM의 형성기구를 설명

Table 1. Previous results of the formation of oscillation marks.

| 연구자 | 연구 결과 | 비 고 |
|--------------------------------|---|---|
| 1978 Emi[2] | 주형 진동에 의한 liquid flux의 작용으로 형성 | 조직관찰 통해 2가지 type으로 분류 |
| 1982 Tomono[3] Saucedo[4] | meniscus에서 약간의 응고 가능 → 이를 통해 oscillation mark 형성 | mold flux의 존재 무시, heat conduction만 고려 |
| 1984 Takeuchi[5] Brimacombe | 주형 진동의 결과 flux층 내의 압력 변화와 초기 응고층의 rigidity에 따라서 depression type과 hook type 형성 | 유한차분법(FDM), 열전달 해석, flux층 유동해석결과에 따른 개념적 모식도 제안 |
| 1985 Nakato[6] | flux층의 두께변화 고찰 → meniscus level 변동으로 인해 불규칙한 oscillation mark의 형성 가능 | 응고층의 영향 무시, negative strip time에서 압력에 따른 flux channel의 두께변화만 고찰 |
| 1990 Bommaraju Saad[7] | 응고시 변태수축으로 형성되는 air gap의 두께 계산 | 주형 진동, flux층 내의 압력변화 무시 |
| 2000 Klaus[8] | 고상분율 100%인 응고층에 국한하여 beam bending 이론을 적용 변형해석 → depression type의 oscillation mark 형성과정 제안 | mushy zone의 영향 무시, 불규칙한 oscillation mark의 형성기구 설명 곤란 |

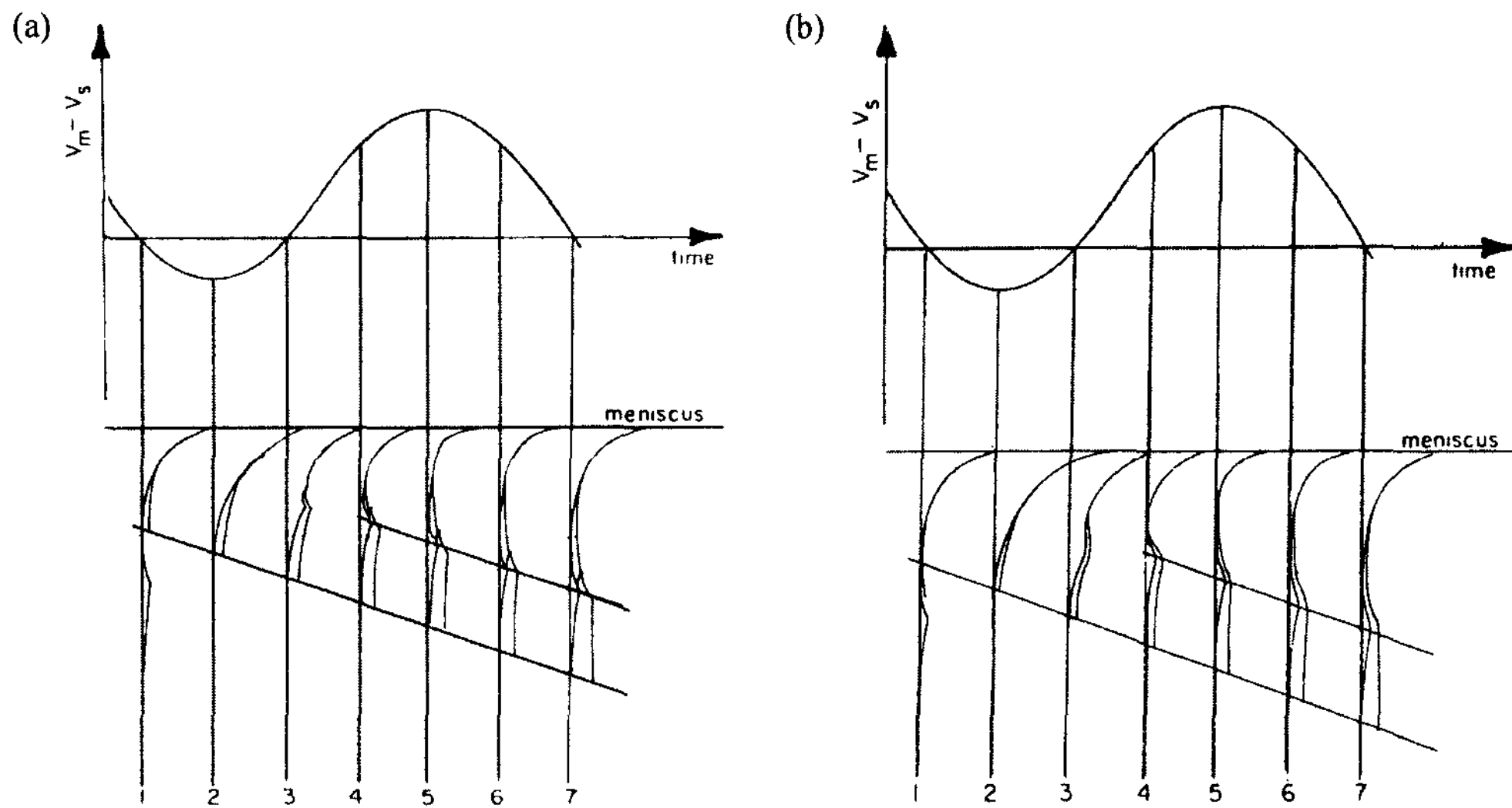


Fig. 2. Schematic representation of the formation of an oscillation marks.[5] a) with subsurface hook b) without subsurface hook

할 수 있는 수학적 모델은 보고된 바가 없다.

본 연구에서는 강종별로 주조 조건에 따른 OSM에 대해 기존의 연구결과를 토대로 측정된 OSM의 간격 (pitch)과 깊이(depth)에 대한 주조조건의 영향에 대해 고찰해 보았다. 또한 동일한 강종에서도 OSM가 매우 깊어진 부분과 거의 사라져 버린 부분이 동시에 혼재 하면서 mark의 깊이와 간격이 넓은 편차를 보이는 것에 대하여 미세조직 관찰을 통해 살펴보고, mark의 깊이와 hook의 유무에 따라서 각 OSM를 4가지 형태로 분류하여 이전 연구자들의 형성기구를 바탕으로 불규칙한 OSM의 형성에 대해 조사해 보았다.

2. 실험 방법

본 실험을 위한 연주기는 2 strand의 수직만곡형이고, 연속주조된 슬래브의 표면에 형성된 OSM는 슬래브 단변부(narrow face)에서 가장 두드러지게 나타나므로, 실 조업중인 탄소 조성과 주조속도에 따라 slab의 좌측 단변부에서 각각 시편을 채취하였다. 주편은 절단 가공후 표면을 50% HCl 내에서 12시간 정도 산세처리와 brushing을 하였고 시편의 외관 및 OSM의 깊이와 간격을 각각 조사하였다. 시편에 대한 성분, 주조 조건에 대한 자료는 Table 2에 나타낸 바와 같다. 채취된 각 시편에 대하여 윤곽 형상 측정기로 내측과 외측의 모서리에서 각각 10 mm 떨어진 부위와 시편의

중앙 부위에서 각각 80 mm 길이에 대하여 OSM의 깊이와 간격을 측정하였다. 측정된 mark의 깊이와 간격에 대하여 탄소함량 및 주조조건이 미치는 영향에 대하여 조사하였고, OSM의 깊이에 따른 미세조직 관찰을 통하여 각 OSM를 분류한 후 이전 연구자들에 의한 OSM의 형성기구에 근거를 두고 불규칙한 OSM에 대해 고찰해 보았다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. OSM에 미치는 주조 조건의 영향

극저탄소강과 중탄소강의 대표적인 슬래브 단변부 외관과 윤곽 형상 측정기를 통해 OSM를 측정된 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 극저탄소강의 경우 대체로 규칙적이고 깊이도 얇은 OSM를 보이고 있으나 부분적으로 깊고 폭이 넓은 OSM를 보이는 부분도 관찰되었다. 이에 비해 중탄소강의 경우에는 매우 깊고 폭이 넓은 OSM가 단변부 전반에 걸쳐 나타나고 있으며 OSM가 거의 사라진 경우도 관찰되었다.

주형 진동에 따른 OSM의 형성은 다음 식으로 주어지는 이론 간격(theoretical pitch)을 가질 것으로 예상되지만, 실제 측정된 mark간 간격은 이론 간격과 상당한 편차를 보이는 것으로 나타났다. Fig. 4에는 이론 간격에 대응하는 시편에서의 실측 간격을 나타낸 것으로 동일한 강종에서도 주조속도와 진동수 등의 조업조

Table 2. Casting conditions and chemical compositions of the slab samples.

| Sample No. | chemical composition | | | | | | | | | | T _c (°C) | | slab size mm | V _s m/min | f cpm |
|------------|----------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|------|---------------------|------|--------------|----------------------|-------|
| | % | | | | | ppm | | | | | Theoretical | ΔT | | | |
| | C | Si | Mn | P | S | Cu | S-Al | Nb | N | | | | | | |
| AL | 0.003 | 0.01 | 0.008 | 0.013 | 0.01 | 0.002 | 0.033 | 0.002 | 23 | | | 1420 | 1.27 | 140 ± 3 | |
| | | | | | | | | | | | | | 1.25 | 138 ± 3 | |
| A AH1 | 0.002 | 0.01 | 0.011 | 0.013 | 0.01 | 0.002 | 0.036 | 0 | 25 | 1534 | 22 | 1250 | 1.42 | 157 ± 3 | |
| | | | | | | | | | | | | | 1.39 | 155 ± 3 | |
| AH2 | 0.004 | 0.01 | 0.120 | 0.012 | 0.008 | 0.001 | 0.040 | 0.002 | 12 | | | 1250 | 1.4 | 150 ± 3 | |
| B BH | 0.161 | 0.25 | 0.056 | 0.017 | 0.008 | 0.003 | 0.026 | 0 | 0 | 1519 | 20 | 2150 | 1.03 | 113 ± 3 | |
| | | | | | | | | | | | | | 1.0 | 107 ± 3 | |
| BL | 0.08 | 0.22 | 0.099 | 0.011 | 0.002 | 0.015 | 0.020 | 0.041 | 72 | 1521 | | 1050 | 1.48 | 163 ± 3 | |
| | | | | | | | | | | | | | 1.49 | 165 ± 3 | |

A: low-carbon steel (<0.08wt.%C), B: medium-carbon steel (0.08~0.25wt.%C)

L: low casting speed (<1.3 m/min), H: high casting speed (>1.3 m/min)

T_c: tundish temperature, V_s: casting speed, f: frequency of mold oscillation

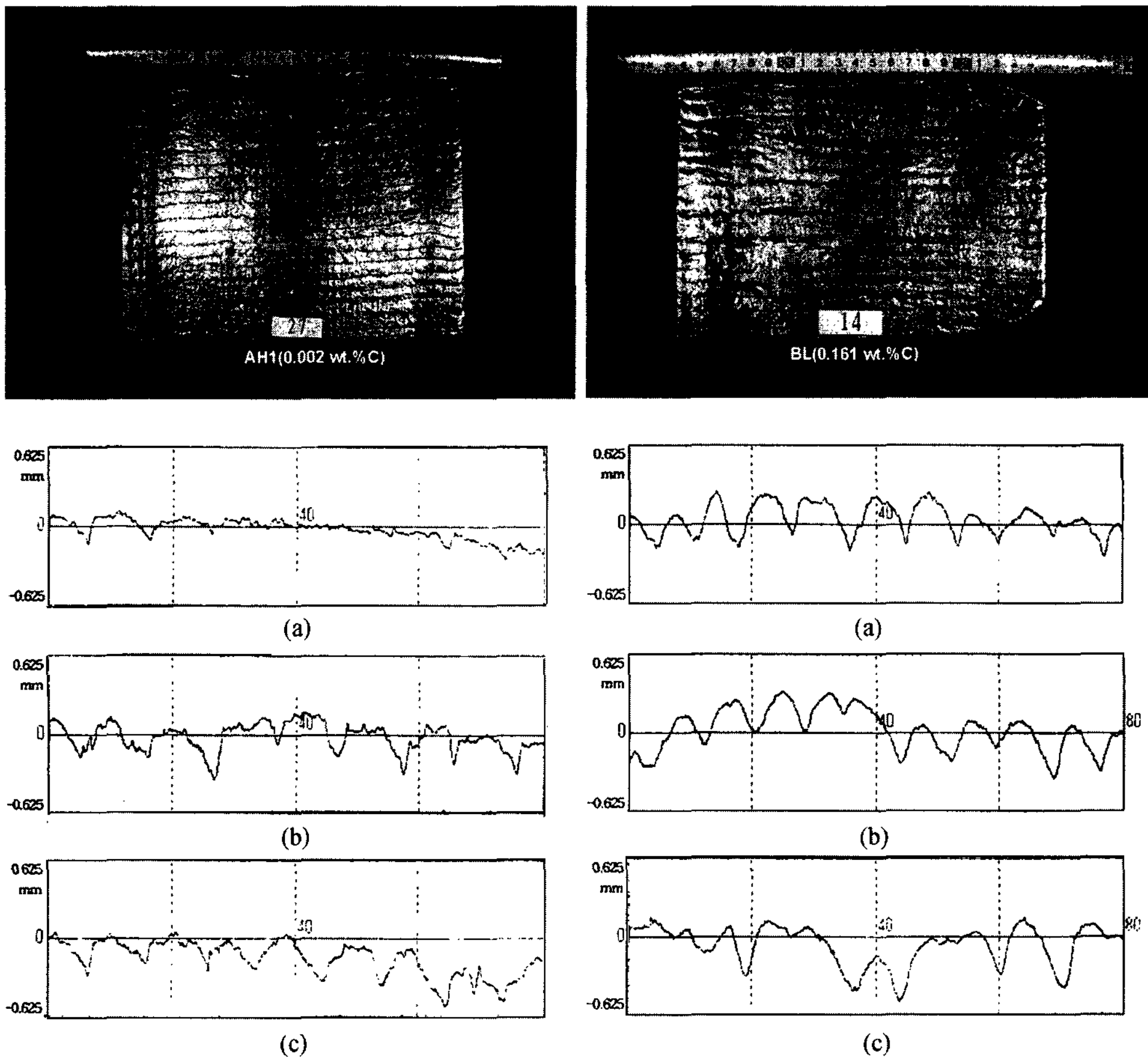


Fig. 3. Typical appearance and surface profile of left narrow face in slabs.

건이 다른 2가지 strand별로 구분해서 나타내었고, 실선은 이론적으로 계산된 간격을 나타내고 있다.

$$l = \frac{V_s}{f} \tag{1}$$

여기서 l 은 OSM의 간격(mm), V_s 는 주조속도(m/min), f 는 진동수(cpm)를 나타낸다.

이론적으로 계산된 간격은 9~9.5 mm 정도로 약 0.5 mm 정도의 범위에서 일정하게 고정되어 있는 상태로 조업중인 것을 알 수 있지만 극저탄소강의 경우보다 중탄소강의 경우에 이론간격에 대해 훨씬 큰 편차를 보이는 것으로 나타나고 있다. 대체로 이론 간격 부근에 측정된 값들이 조밀하게 분포하는 것을 알 수 있지만 주로 이론 간격 보다 다소 큰 간격을 가지는 경우가 많다는 것도 알 수 있다.

OSM가 슬래브의 표면결함으로 크게 영향을 미치는 것은 특히 그 깊이와 관계가 깊은데 이는 깊은 OSM는 균열이 형성될 수 있는 자리로서 작용할 수 있기 때문이다[5,9]. 이러한 OSM의 형성은 주형의 하향속도가 주조속도 보다 커지는 시점을 일컫는 negative

strip time(t_N)에 밀접한 관련이 있는데, OSM의 깊이와 초기 응고층의 모양을 따서 일컫는 nail-like shell의 형성을 줄이기 위해서는 t_N 을 줄이는 것이 효과적이며 이를 위해서는 높은 진동수와 작은 진폭의 주형 진동을 적용하는 경우가 유리하다는 것이 이미 보고되어져 있다[10-14]. t_N 은 다음 식으로 주어진다.

$$t_N = \frac{1}{\pi f} \arccos\left(\frac{V_s}{\pi f s}\right) \tag{2}$$

여기에서 f 는 진동수, V_s 는 주조속도, s 는 진폭을 나타낸다.

앞에서 슬래브 단면부의 외관 관찰과 윤곽 형상 측정기를 통한 OSM의 형상을 관찰해본 결과 특별히 깊은 OSM를 보이는 부분이 있는 반면에 OSM가 거의 사라진 경우도 있다는 점을 발견할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 t_N 에 따른 깊이의 불규칙성에 초점을 두어 각 강종별로 고정된 조업 조건하의 t_N 에 대한 OSM의 깊이 분포를 조사하였고, 그 결과를 Fig. 5에

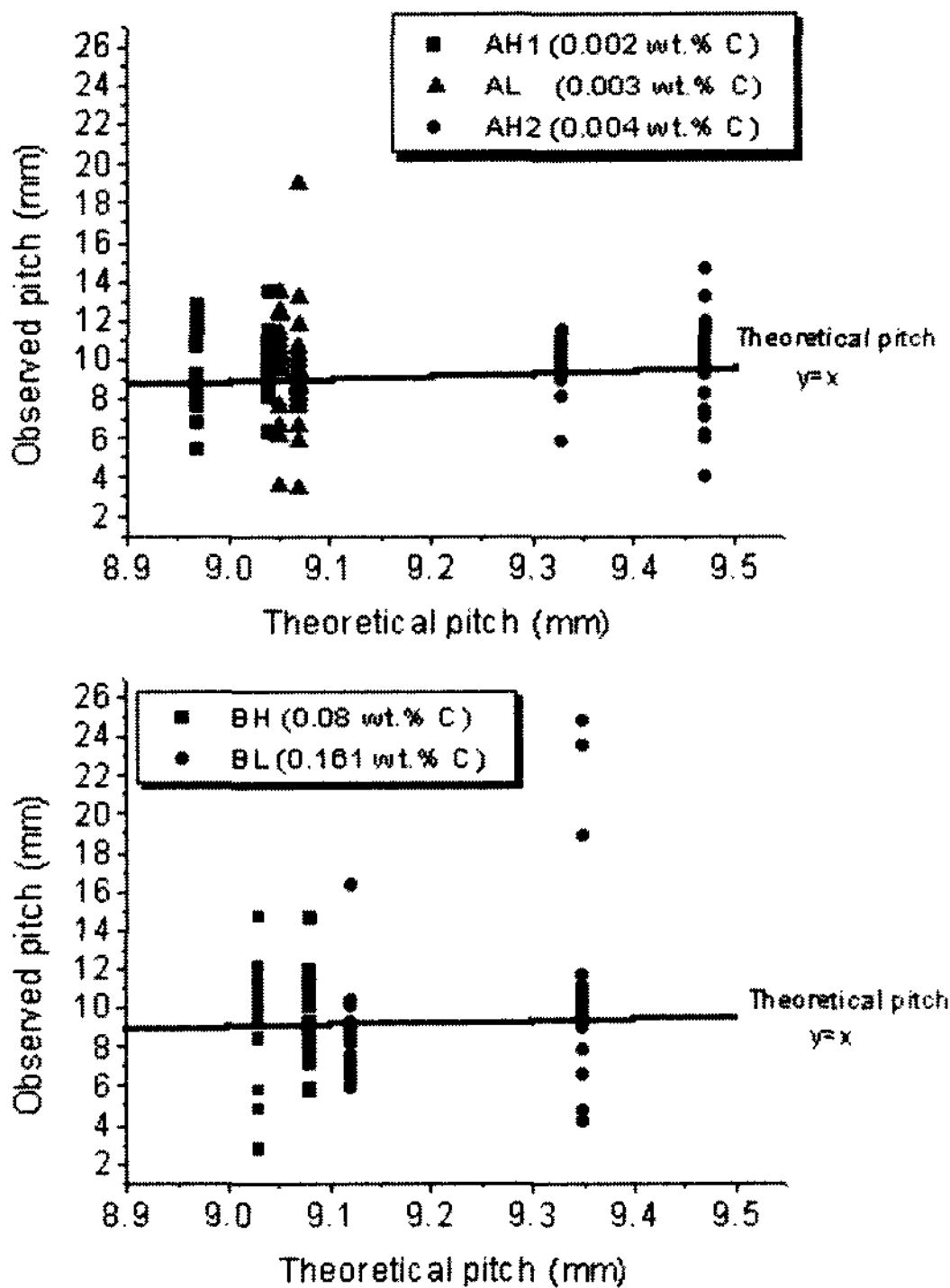


Fig. 4. The relationship between theoretical pitch and experimental pitch.

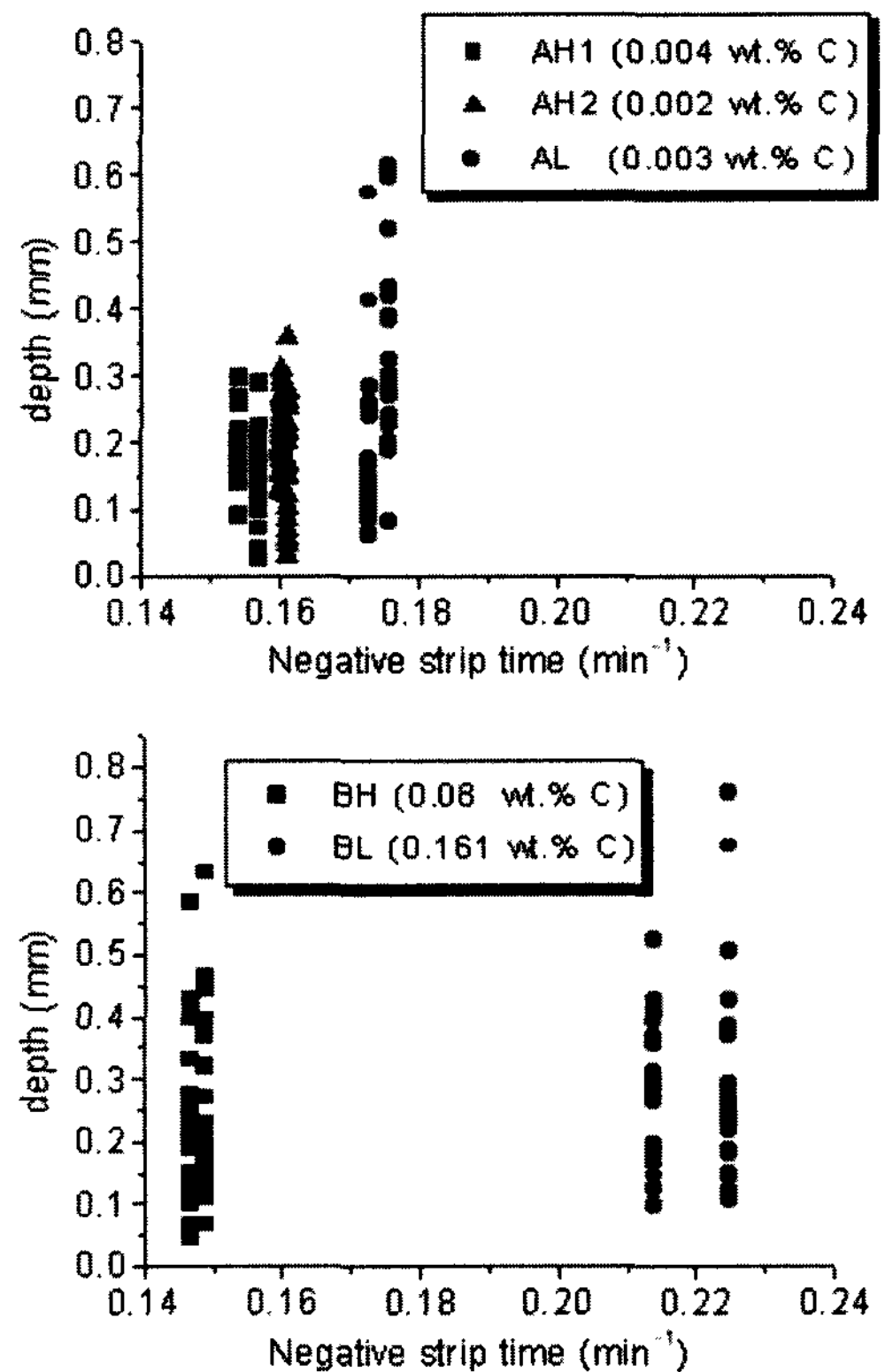


Fig. 5. The relationship between depth and negative strip time(t_N).

나타내었다. 여기서 진폭은 12 mm로 모두 고정되어 있고 강종별로 주조속도와 진동수만 다르게 조업한 경우로, 극저탄소강의 경우 t_N 이 증가할수록 OSM의 깊이가 커지면서 분포가 상당히 불규칙해진다는 점을 알 수 있지만, 중탄소강의 경우 예상 결과와는 달리 t_N 에 무관하게 불규칙한 깊이 분포를 보이고 있다는 점을 알 수 있었다.

실측 간격이 이론 간격에 비해 매우 불규칙하게 나타나는 결과에 대한 戶澤究一 등의 보고에 따르면 용강의 level 변동에 그 원인이 있는 것으로 파악되는데, 용강의 level이 일정한 경우 OSM의 간격은 이론 간격과 거의 일치하는 값을 보이거나 level이 상승하는 경우 또는 하강하는 경우에는 이론 간격에 비해 커지거나 작아지는 결과를 보인다고 하였다[15]. 또한 Nakato 등은 주형 내에서 주편과 주형 사이에 형성되는 gap의 폭을 고려하여 주형의 진동에 따른 OSM의 형성에 대하여 고찰해 보았는데 이에 따르면 meniscus level 변동이 실제적인 t_N 을 변화시키기 때문에 OSM의 깊이와 간격의 불균일성이 나타난다고 하였다[6].

따라서 본 연구에 사용된 시편의 경우 연속주조시 주형 내에서의 meniscus level 변동이 상당히 심하게 일어났다는 것을 알 수 있고, 극저탄소강에 비해 중탄소강의 경우 mark의 깊이와 간격이 매우 불규칙하다는 점을 통해 meniscus level 변동 등과 같은 요인에 대해 중탄소강이 훨씬 민감하게 영향을 받는다는 사실을 알 수 있었다. 이것은 중탄소강의 경우 극저탄소강에 비해 훨씬 넓은 응고구간을 갖고 있다는 점과 밀접한 관련이 있는데 응고 구간이 넓어질수록 반응고 상태의 초기 응고층이 갖는 강도가 저하되므로 외적 요인에 훨씬 쉽게 영향을 받을 수 있다고 생각된다.

3.2. 강종별 OSM의 미세조직

슬래브 단면부의 외관 및 각 OSM의 형상 관찰을 통해서 탄소 함량이 0.08~0.161wt.%인 중탄소강의 경우에 OSM가 깊고 불규칙하게 나타난다는 사실을 살펴보았다. 따라서 표면결함에 취약한 중탄소강 중에서 깊이와 간격의 분포가 가장 불규칙하게 관찰되었던 탄소함량 0.161wt.% 강종을 대상으로 미세조직 관찰을 통해서 불규칙한 OSM에 대해 고찰해 보았다.

Takeuchi 등은 hook의 유·무에 따른 2가지 형태의 OSM에 대해서 주형 진동에 의한 flux층 내의 압력변화와 반응고 상태인 초기 응고층의 강도에 따른 형성

과정을 개념적 모식도로 제안하였다[5]. 아울러 overflow에 의해 hook이 형성된 경우도 곡선형과 직선형의 2가지가 존재한다고 보고하였다[9].

한편 戶澤究一 등이 SUS 304를 통해 OSM를 분류한 경우는 초기 응고층을 일컫는 nail-like shell의 유무와 편석의 정도에 따라 6가지로 세분하고 있다[15].

그러나 대체로 OSM의 분류는 Darle 등이 제안한 hook가 직선인 경우와 굽어져 형성된 경우 그리고 overflow 없이 형성된 경우로 대별되며, 직선형의 hook가 곡선형의 hook에 비해 표층과 이루는 각도가 적다고 알려져 있다[16].

또한 Bobadilla 등은 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 OSM의 형성기구를 용강의 overflow가 일어난 경우와 이때 부분적으로 재용해가 일어난 경우 그리고 overflow가 일어나지 않은 경우의 3가지 유형으로 분류하여 제안하였다[17].

하지만 본 연구의 미세조직 관찰 결과 overflow의 유·무에 상관없이 OSM의 깊이가 깊은 것과 얇은 것이 존재한다는 점을 알 수 있었다. 따라서 OSM를 hook와 깊이에 따라 Fig. 7에서와 같이 4가지 형태로 분류하여 고찰해 보았다.

초기 응고층의 강도가 주형 진동에 따라 flux층 내부에 발생하는 압력변화에 일정 정도 저항할 수 있는 경우 압력을 해소시키는 방안으로 meniscus 상부의 용탕이 overflow를 일으키게 되는데 이때 초기 응고층과 overflow된 용탕의 계면을 hook라고 하며, 초기 응고층은 그 모양을 따서 nail-like shell이라고 부른다. 하지만 초기 응고층의 강도가 약해 flux층 내부에 발생하는 압력변화에 내부의 용탕과 같이 변형되는 경우에는 overflow가 일어나지 않으므로 hook는 형성되지 않게 된다[5].

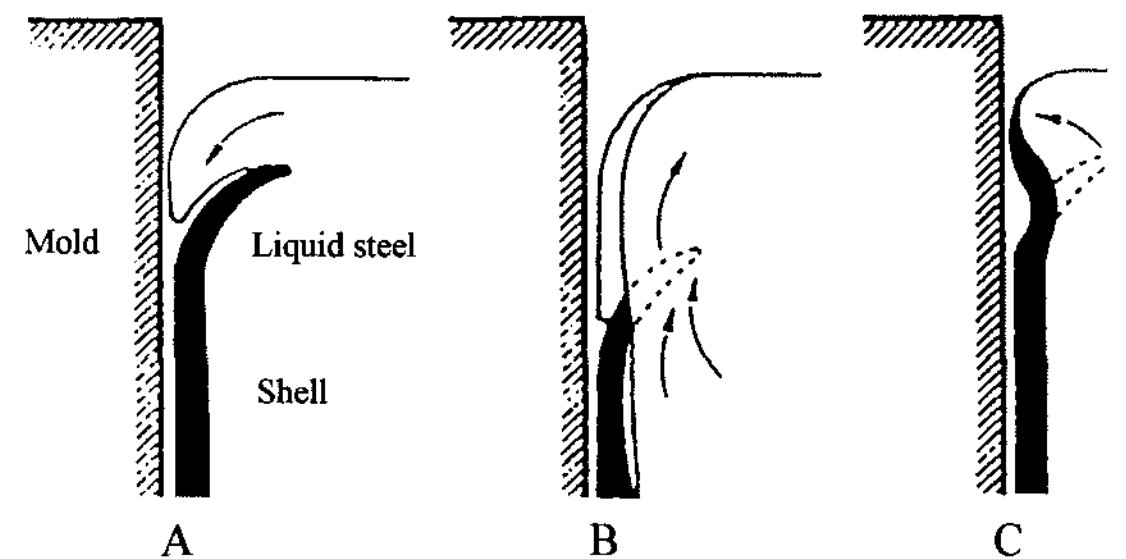


Fig. 6. Three main mechanisms for the formation of the oscillation marks.[17] (a) overflow (b) overflow + remelting (c) meniscus bent back

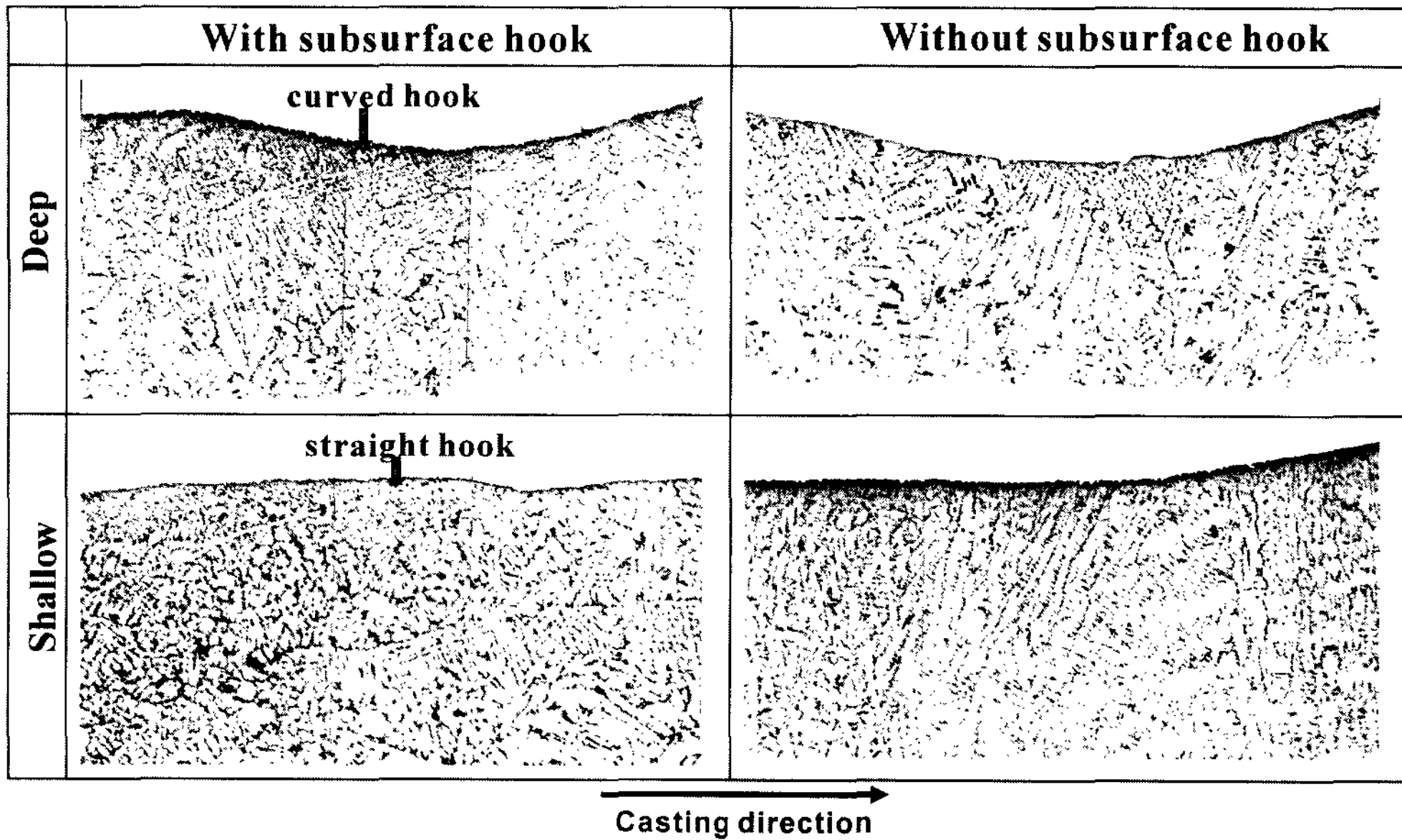


Fig. 7. Classification of oscillation marks according to the depth and subsurface hook.

Hook를 가지고 있는 깊은 OSM를 보이는 경우를 Fig. 8에 나타내었는데 hook를 경계로 응고 조직이 다르게 나타나고 있는 것으로 용탕의 overflow가 일어났다는 것을 확인할 수 있었고, 수지상이 hook에 수직인 방향으로 성장하다가 방향이 바뀐 것으로 보아 hook에 수직인 방향으로 성장한 수지상 부분이 meniscus를 따라 형성된 초기 응고층이라는 것을 알 수 있다. 또한 OSM의 bottom부에서는 초기 응고층의 폭이 매우 얇아진다는 점도 관찰되는데 이는 OSM의 형성에 따라 주형과의 국부적인 거리가 증가되므로 주형으로의 원활한 열전달이 이루어지지 못해서 나타나는 응고 지연의 결과로 알려져 있다[9].

용탕의 overflow에 의해 형성된 hook는 OSM의 bottom부에 이어져 있는 곡선형의 hook를 보이는 경우 (Fig. 8a, b)와 OSM의 bottom부에서 약간 top쪽으로 치우쳐져 형성된 직선형의 hook를 보이는(Fig. 8c) 2가지가 존재함을 알 수 있었다. 또한 hook의 중간 부분이 끊어진 듯이 보이는 부분(Fig. 8a)이 있는데 이것은 overflow된 용탕의 과열(superheat)로 인하여 초기 응고층의 일부가 재용해되어 hook의 중간 부분이 끊어진 듯이 보이는 것으로 생각된다[9].

Hook를 가지고 있는 얇은 OSM를 보이는 경우는 Fig. 9에 나타내었는데 주로 overflow가 일어났어도 그 양이 적은 경우로 hook가 OSM의 top쪽에 치우

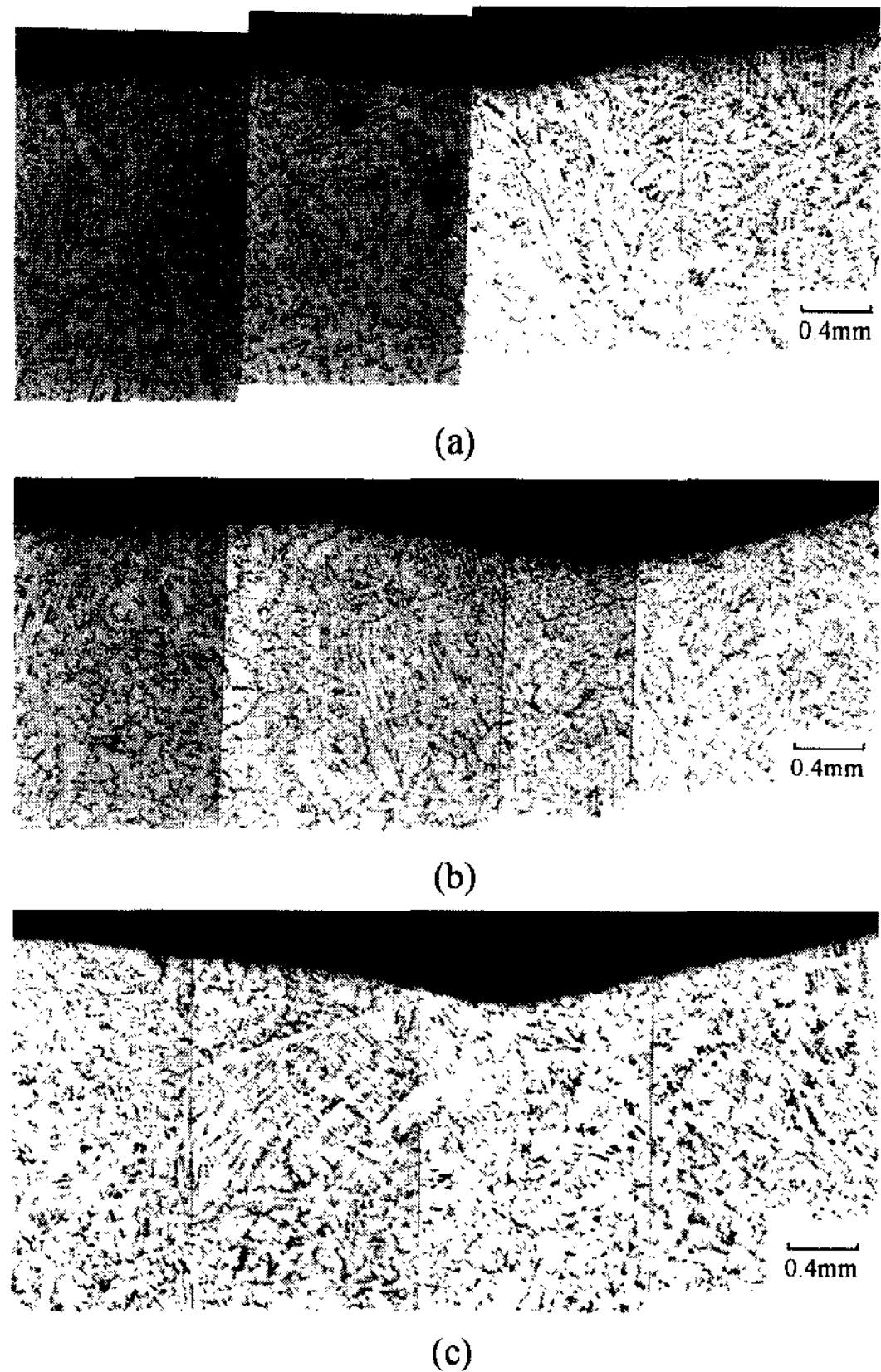
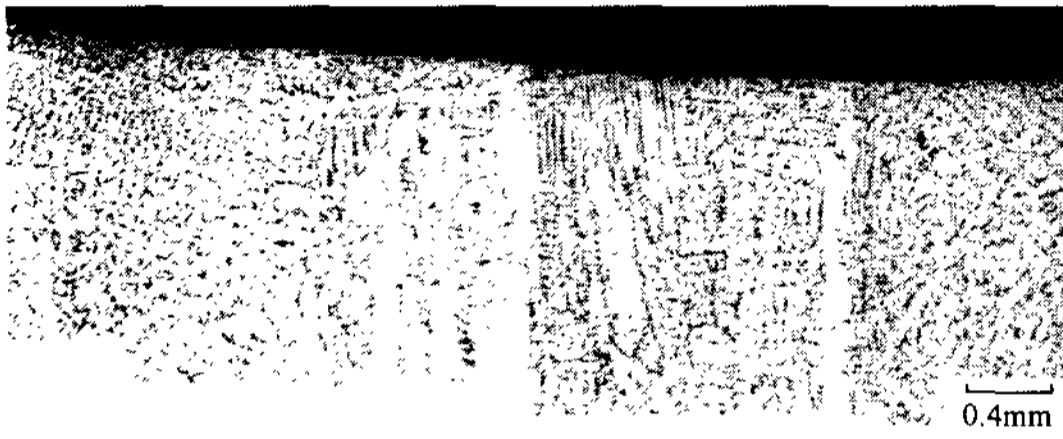


Fig. 8. Subsurface structure in the vicinity of deep oscillation marks with subsurface hook.



(a)



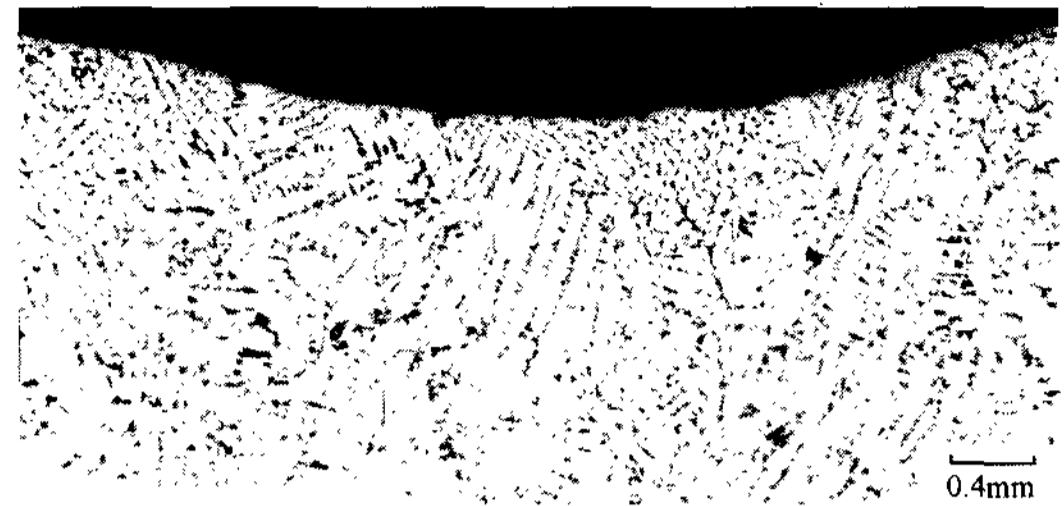
(b)

Fig. 9. Subsurface structure in the vicinity of shallow oscillation marks with subsurface hook.

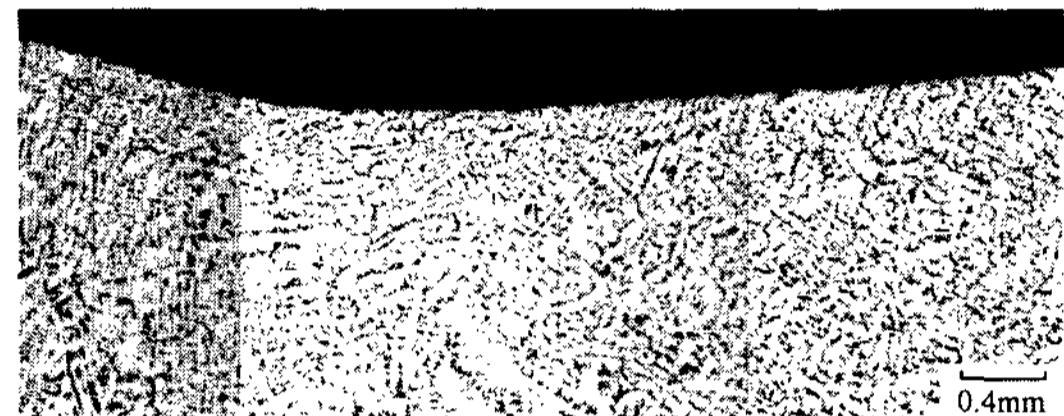
쳐져 직선적으로 형성된 것을 보여주고 있다. 그리고 이 경우 모두 깊은 OSM를 보이는 경우에 비해 초기 응고층의 폭이 크다는 사실도 알 수 있었다. 또한 직선형의 hook를 보이는 경우에 대해서 overflow된 용탕의 과열에 의해 초기 응고층의 상단 부분이 재용해되고 남은 부분이라는 Bobadilla 등의 제안과는 달리 초기 응고층이 단지 변형에 의해 직선적으로 퍼지고 overflow에 의한 재용해는 일어나지 않았다는 점도 관찰되었다. 특히 Fig. 9b의 경우에는 OSM가 매우 얇아서 거의 사라진 듯이 관찰된 부분으로 초기 응고층이 매우 크게 형성되었다는 사실을 알 수 있었다.

Hook가 없는 깊은 OSM를 보이는 경우를 Fig. 10에 나타내었는데 hook를 가지고 있는 깊은 OSM에 비해 매우 넓은 폭을 가지고 형성된다는 특징과 초기 응고층의 폭이 매우 작게 형성되어 있다는 점을 확인할 수 있었다.

Hook를 보이지 않으면서 깊이가 얇은 OSM를 보이는 경우는 Fig. 11에 나타내었다. 특히 Fig. 11b의 경우에는 윤곽형상 측정기를 통해 OSM가 거의 사라진 부분으로 측정되었던 곳으로 OSM를 향해 방향이 꺾여진 수지상들이 OSM의 bottom 부분으로 추정되는 곳에서 성장해 있고 그 주변에는 주형을 향해 표면에 수직한 방향으로 수지상들이 성장해 있는 것이 관찰되었다. 이것은 Fig. 9b의 hook를 가지고 있으면서



(a)



(b)

Fig. 10. Subsurface structure in the vicinity of deep oscillation marks without subsurface hook.



(a)



(b)

Fig. 11. Subsurface structure in the vicinity of shallow oscillation marks without subsurface hook.

OSM가 거의 사라진 부분으로 측정되었던 경우에서 초기 응고층의 수지상들이 hook에 수직한 방향으로 성장했고 overflow가 일어났다는 점과 비교해 볼 때 2가지 모두 OSM가 거의 사라진 듯 보이는 부분이지만 그 형성과정은 매우 다르다는 것을 알 수 있었다.

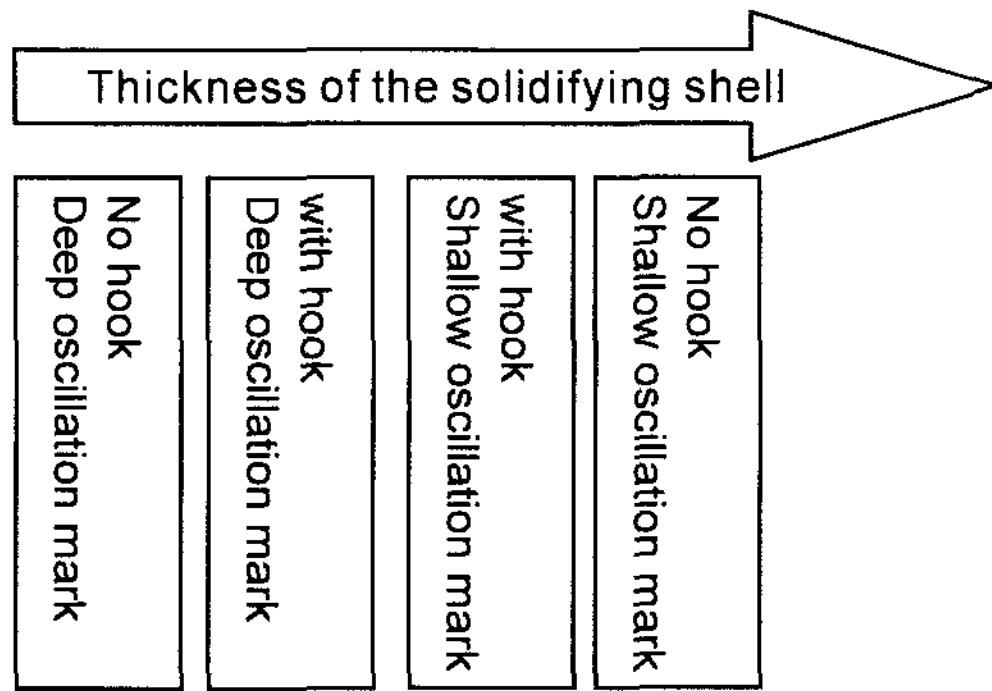


Fig. 12. The relation between the thickness of solidifying shell and the irregular oscillation marks.

중탄소강의 OSM를 깊이와 hook의 형성 유·무에 따라 분류하여 미세조직을 관찰한 결과 각기 다른 형태의 OSM 형성과정에 meniscus에서 형성된 초기 응고층의 두께가 관련되어 있다는 점을 알 수 있었고 이는 Fig. 12에 나타내었다. 초기 응고층의 두께가 매우 얇은 경우에는 overflow 없이 매우 깊고 폭이 넓은 OSM가 형성되지만, 초기 응고층의 두께가 이보다 두꺼워지면 주형 진동에 따른 flux층 내의 압력변화에 대해 일정부분 저항할 수 있는 강도를 가지게 되므로 overflow가 일어나면서 OSM의 폭이 좁아지게 되고 bottom부에 이어진 곡선형의 hook를 나타내게 된다. 초기 응고층이 더욱 두꺼워지면 OSM의 깊이는 현저히 작아지고 직선형의 hook가 OSM의 top쪽에 치우쳐 형성되므로 overflow된 용탕의 양도 매우 적어졌고, 이보다 두꺼운 초기 응고층이 형성되면 거의 OSM가 사라진 경우로 형성된다는 사실을 알 수 있었다. 하지만 응고층이 매우 크게 형성된 경우에도 overflow가 일어난 경우와 overflow 없이 형성된 경우가 존재한다는 점을 통해서 단지 응고층의 두께만으로 불규칙한 OSM에 대해 설명할 수는 없다는 것을 알 수 있다. 따라서 OSM의 형성과정에 가장 큰 영향을 미치는 초기 응고층의 두께와 주형 진동에 따른 flux층 내부의 압력변화에 대해 함께 고려해야 된다고 판단된다.

초기 응고층의 두께가 달라지는 점에 대해서 Takeuchi는 용탕 내부에서 일어나는 대류의 효과를 가지고 설명하고 있는데 meniscus에서 용탕이 대류에 영향을 받지 않게 되는 경우 응고층의 성장이 매우 용이하게 진행되지만, 침지 노즐로부터 방출되는 용강 주입류의 영향으로 meniscus에서 대류의 영향을 받게 되

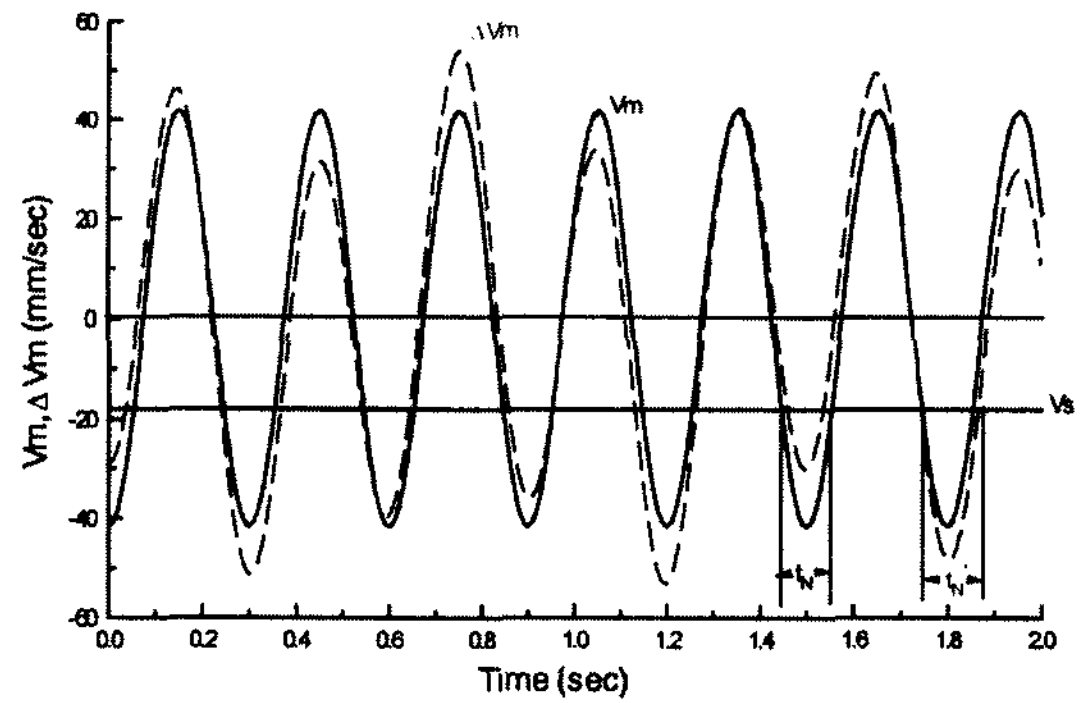


Fig. 13. Effect of level fluctuation on the real time of negative stripping at the meniscus.

는 경우에는 용강의 과열이 응고층으로 빠르게 전도되므로 응고가 지연되어 응고층이 얇게 형성된다고 제안하였다[5]. 하지만 이것만으로 초기 응고층 두께가 매우 다양하게 형성된다는 점과 이에 따른 OSM의 형성을 설명하기에는 무리가 따른다고 생각된다.

한편 Nakato는 meniscus level 변동의 영향으로 규칙적인 주형 진동이 변형되어 실제적인 t_N 과 t_p 기간이 달라지게 된다는 점을 제안하였는데 Fig. 13에 meniscus level 변동을 sinusoidal하다고 가정하여 주형 진동에 대한 영향을 나타내었다[6]. 점선으로 표시된 부분이 meniscus level 변동의 영향으로 불규칙해진 주형 진동을 나타내는데 각 strip time 뿐만 아니라 최대 속도 역시 매우 달라지고 있고 이에 따라 주형 진동의 cycle time도 달라진다는 사실을 알 수 있다. 하지만 Nakato는 OSM가 t_N 에서 형성된다고 가정하였기 때문에 OSM의 깊이가 불규칙해지는 것을 단지 t_N 의 변화로만 설명하였고 초기 응고층의 두께가 변화된다는 점은 고려하지 않으므로 불규칙한 OSM의 형성에 대해 미흡한 결론을 도출하였다.

따라서 meniscus level 변동으로 인해 주편에 대한 주형 진동의 영향이 불규칙해진다는 제안을 토대로 meniscus에서 응고층의 불규칙한 형성과 응고층에 작용되는 압력변화를 통해 관찰되었던 불규칙한 OSM의 형성에 대해 고찰해보았다. 연속 주조시 주형 진동으로 인한 flux층 내의 국부적 유동과 온도 구배가 변화되므로 인해 meniscus에서 용강의 응고는 주형 진동의 영향을 받으며 진행될 것이나 주형 진동 1 cycle을 주기로 이 상황은 반복적으로 일어날 것으로 생각된다. 하지만 Fig. 13에서 볼 수 있듯이 meniscus level

변동에 의해 t_N 과 t_p 기간이 변화되면서 주형 진동의 각 cycle time이 달라지게 된다면 meniscus에서 강의 응고 역시 각 cycle마다 규칙적으로 반복되면서 진행될 수 없다는 사실을 알 수 있다. 따라서 불규칙해진 주형 진동이 초기 응고층의 두께 편차에 대한 또 다른 원인이 될 수 있다고 판단된다. 아울러 응고층에 작용되는 flux층 내의 압력에 대해 t_N 에서는 주형으로부터 응고층을 밀어내는 압력이 작용되고, t_p 에서는 반대로 응고층을 주형쪽으로 당기는 압력이 작용되며 OSM의 깊이는 t_N 전 기간 동안 응고층이 용강 내부로 밀려나는 정도에 따라 결정된다고 알려져 있다[5,17,18]. 따라서 불규칙해진 주형 진동 패턴은 응고층의 형성뿐만 아니라 응고층에 작용되는 압력도 각 cycle마다 달라지게 만드는 결과를 초래할 것이다. 즉 OSM가 거의 사라진 부분으로 관찰되는 경우에 대해 overflow가 있는 것과 없는 것의 2가지가 존재했는데, 이는 상대적으로 매우 줄어든 t_N 으로 인해 반응응고층의 강도가 주형으로부터 밀어내는 작용을 하는 flux층 내부의 압력에 저항하여 거의 밀려나지 않거나 소폭으로 밀려나게 되므로 주형으로의 열전달이 유리한 상황에 놓이게 되어 응고층의 폭이 보다 넓게 형성될 것으로 생각된다. 아울러 이어지는 t_p 기간이 훨씬 커진 경우에는 주형 쪽으로 응고층을 당기는 압력이 크게 작용되어 응고층 상단의 용탕이 overflow를 일으킬 것으로 예상되나 주형과 응고층 사이의 거리가 상대적으로 적기 때문에 그 양은 매우 적을 것이고 반대로 t_p 역시 매우 작아진 경우에는 overflow 없이 응고만 진행되는 상황이 일어날 것으로 생각된다. 따라서 연속 주조시 meniscus level 변동 등의 요인에 의해 실제적인 주형 진동 패턴이 변화되므로 각 cycle마다 t_N 과 t_p 기간이 달라진다는 점에 착안하여 초기 응고층의 형성 및 변형과정을 고려한다면 주변 표면의 불규칙한 OSM의 형성과정에 대해 보다 실제적인 이해를 할 수 있을 것으로 판단되며, 불규칙한 OSM의 형성기구를 위해서는 불규칙해진 주형 진동 패턴에 따른 meniscus에서의 동적 응고 및 변형과정에 대한 해석 모델의 확립이 필요한 것으로 판단된다.

4. 결 론

강의 연속주조시 강종별 주조조건에 따라 슬래브 단변부에 형성된 OSM에 관하여 주조조건이 미치는 영

향과 미세조직 관찰결과로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 극저탄소강에 비해 중탄소강의 경우 깊고 폭이 넓은 OSM가 상당히 불규칙적으로 형성된 것이 관찰되었고, 간혹 OSM가 사라진 부분도 관찰되었다.

2. 이론 간격(theoretical pitch)에 대해 실측 간격은 모두 큰 편차를 보이는 것으로 나타났고, 극저탄소강의 경우 negative strip time(t_N)이 증가할수록 OSM의 깊이가 증가하면서 그 편차 역시 커지는 경향을 나타냈지만, 중탄소강의 경우에는 t_N 에 무관하게 매우 큰 편차를 보이며 분포하는 것으로 나타났다. 이것은 응고 구간이 넓어 초기 응고층의 강도가 상대적으로 약한 중탄소강의 경우 meniscus level 변동 등의 외적 요인에 더욱 큰 영향을 받게 되기 때문인 것으로 생각된다.

3. 중탄소강의 OSM는 subsurface hook의 유·무와 그 깊이에 따라 4가지로 분류할 수 있었고, hook의 모양은 깊은 OSM의 bottom부에 이어져 형성된 곡선형과 얇은 OSM의 top쪽에 치우쳐져 형성된 직선형의 2가지가 존재하는 것으로 관찰되었다.

4. 형성된 초기 응고층의 두께는 hook 없이 형성된 깊은 OSM에서 hook를 동반한 깊은 OSM, 얇고 hook가 직선형으로 형성된 경우, 그리고 hook 없이 형성된 깊이도 얇은 경우의 순으로 증가되는 경향이 있다는 점을 관찰할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] RIST : Continuous casting of steel (1991)
- [2] T. Emi, H. Nakato, Y. Iida, K. Emoto, R. Tachibana, T. Imai, and H. Bada : NOH-BOSC, "Influence of physical and chemical properties of mold powders on the solidification and occurrence of surface defects of strand cast slabs", 61 (1978) 350-361.
- [3] H. Tomono, P. Ackermann, W. Kurz, and W. Heinemann : TMS-AIME, Warrendale, PA, "Elements of surface mark formation in continuous casting of steel", (1982) 55-73.
- [4] I. Saucedo, J. Beech, and G. J. Davies : Metal Tech., "Influence of meniscus freezing on surface defect formation in cast products", 9 (1982) 282-291.
- [5] E. Takeuchi and J. K. Brimacombe : Met. Trans., "The Formation of Oscillation Marks in the Continuous Casting of Steel Slabs", 15B (1984) 493-509.
- [6] H. Nakato, T. Nozaki, Y. Habu, H. Oka, T. Ueda, Y. Kitano and T. Koshikawa : Steelmaking Conf. Proc., "Improvement of surface quality of continuously cast slabs by high fre-

- quency mold oscillation", 68 (1985) 361-365.
- [7] R. Bommaraju and E. Saad : Steelmaking conf. Proc., "Mathematical modelling of lubrication capacity of mold fluxes", 73 (1990) 281-296.
- [8] K. Schwerdtfeger and H. Sha : Met. Trans., "Depth of oscillation marks forming in continuous casting of steel", 31B (2000) 813-826.
- [9] E. Takeuchi and J. K. Brimacombe : Met. Trans., "Effect of oscillation-mark formation on the surface quality of continuously cast steel slabs", 16B (1985) 605-625.
- [10] H. Yasunaka, T. Mori, H. Nakata, F. Kamei and S. I. Harada : Steelmaking processing, "Improvement of surface quality of continuously cast steel by high cycle mold oscillation", 69 (1986) 497-502.
- [11] M. Suzuki, T. Kitagawa, S. Uchida, T. Masaoka, K. I. Ozawa and T. mori : Trans ISIJ, "Application of non-sinusoidal mold oscillation mode in high speed continuous casting", 26 (1986) B164.
- [12] H. Takeuchi, S. Matsumura, R. Hidaka, Y. Nagano, and Y. Suzuki : Tetsu-to-Hagane, "Effects of mould oscillation conditions on oscillation marks of stainless steel casts", 69 (1983) 248-253.
- [13] S. Itoyama : CAMP-ISIJ, "Effect of casting conditions on oscillation mark depth", 5 (1992) 1225-1228.
- [14] S. Okazaki, H. Tomono, K. Osaki, and Y. Akabane : Tetsu-to-Hagane, "Effect of short stroke high cycle oscillation on the strand surface quality", 68(10) (1982) S929.
- [15] H. Tozawa, H. Nakato, T. Nozaki : Japan society for the promotion of science, Solidification "Improvement of surface quality of continuously cast SUS304 stainless steel slabs", (1983) 1-31.
- [16] T. Darle, A. Mouchette, M. NaDif, M. Roscini and D. Salvadori : Steelmaking Conf. Proc., "Hydraulic oscillation of the CC slab mold at sollac florange: first industrial results, future developments", 76 (1993) 209-218.
- [17] M. Bobadilla, J. M. Jolivet, J. Y. Lamant and M. Larrecq : Materials Science and Engineering, "Continuous casting of steel: a close connection between solidification studies and industrial process development", A173 (1993) 275-285.
- [18] M. Wolf : Steelmaking Conf. Proc., "Mold oscillation guidelines", 74 (1991) 51-70.