

논문

수평연속주조에 의한 과공정 Al-Si합금 제조에 관한 연구

류봉선, 지무성*, 박원욱

A Study on Manufacturing Process of Hypereutectic Al-Si Alloy via Horizontal Continuous Casting

Bong-Sun You, Mu-Sung Ji and Won-Wook Park

Abstract

The equipment for the horizontal continuous casting was built to produce hyper-eutectic Al-Si bars with a small cross-section of 25mm in diameter. The manufacturing processes including withdrawal cycle and secondary cooling methods were modified to refine the primary and the eutectic Si. The longitudinal casting speeds varied over the ranges of 670-1100mm/min for pure Al, and 200-350mm/min for Al-17wt%Si alloy. Due to the difference of cooling rate in the mould, microstructural asymmetry between the lower and the upper part of bar was observed. Thus, manufacturing processes such as cooling and withdrawal method were optimally combined to get the homogeneous cast structure. With the increase of casting speed, the primary Si size was refined down to 30 μ m near the surface, and 80 μ m in the center of the bar.

1. 서론

공장자동화와 원가절감을 위한 공정단축에 관심이 커지면서 Cu계 합금이나 일부 귀금속의 제조에 이용되던 수평연속주조법[1,2]을 Al합금에 적용하고자 많은 관심이 모아지고 있다. 특히 수직방식에서는 제조가 곤란한 Al 소경봉의 경우에는 수평연속주조법을 적용함으로써 높은 냉각 속도에 의한 조직미세화가 가능하고 공정제어가 쉽기 때문에 새로운 생산기술로서 주목받고 있다.

본 연구에서는 이와 같은 수평연속주조에 의한 소구경의 고규소 Al합금의 제조공정을 확립하고 그 특성을 평가하고자 하였다. 고규소 Al-Si합금의 용탕을 정제처리한 후 수평연속주조기의 고효율 냉각 mould에서 응고시키고, 정출하는 초정 Si를 미세하고 균일하게 분포시킴으로써 특성

이 우수한 소구경의 봉재를 후공정 없이 직접 제조하고자 하였다. 또한 이와 같은 고규소 Al합금의 수평연속주조에서 발생하는 봉재단락의 원인 및 내·외부 결함의 원인에 관하여 분석하였다.

2. 실험방법

2.1 연속주조설비 제작

수평연속주조장치는 합금용해를 위한 용해로, 용탕의 미세화제 첨가나 flux처리를 위한 보온로, 냉각설비, 취출기 등으로 분류할 수 있다. 본 실험에서는 Fig. 1과 같은 수평연속주조설비를 제작하였다. 용해로 및 보온로가 일체형이고 고밀도의 graphite block을 가공하여 만든 용해도 가니는 약 50kg의 용량으로서 용탕출구부에 feed tube를 접속시켜 열효율 및 냉각능을 높이고자 하였다. 또한 로의 내부는 완전 밀폐시키고

한국기계연구원(Korea Institute of Machinery & Materials)

*수원전문대학(Suwon Industrial College)

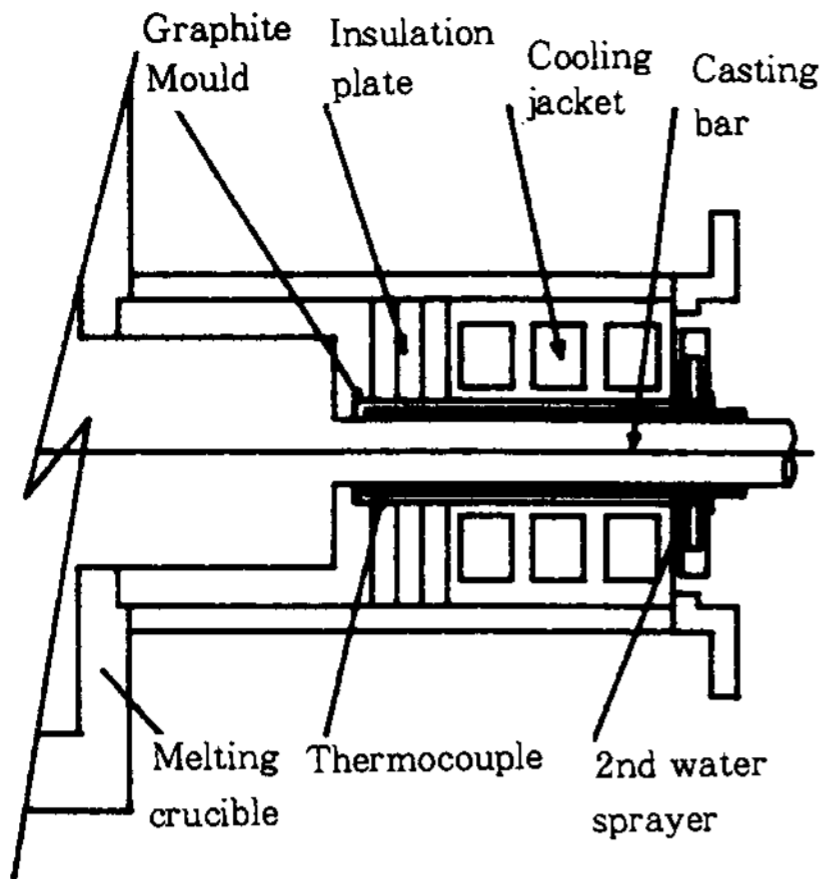


Fig. 1. Schematic view of the continuous casting unit.

좌우에 불활성 가스를 주입하여 graphite 부품의 산화를 억제하였다.

용해로에서 응고된 용탕은 feed tube를 통해 cooling jacket으로 둘러싸인 mould내부로 유입되면서 응고가 시작된다. 이 단계에서 제품의 표면 및 내부 결함을 제거하기 위한 mould설계 기술[3-6]이나 cooling jacket 및 취출cycle 등의 작업조건은 노하우로 분리되어 있다. 따라서 mould의 설계는 수평연속주조기의 핵심부라 할 수 있다. 본 실험에서 사용한 mould재료는 윤활 특성이 우수한 graphite를 사용하였고 mould의 외곽에 cooling jacket을 부착[7]하였다.

Fig. 2에는 실험을 위해 설계 및 제작된 cooling jacket, 2차 sprayer, 단열판, feeder tube 및 이와 조립되는 graphite mould의 조립형상을 나타내었다. Jacket의 외부는 cooling jacket과 도가니의 완전한 밀착을 위해 stainless steel을 사용하였다. Mould끝에는 2차 냉각sprayer를 설치하였으며 mould내의 상하면 온도분포 및 sump의 형성위치와 냉각조건을 알아보기 위하여 mould내에 직경 2mm의 hole을 6개 방사형으로 가공하여 1.7mm의 K-type 열전대를 삽입하여 온도변화를 측정하였다. 한편 mould내에서 형성되는 sump의 위치를 분석함으로써 break out을 방지하기 위해 mould의 내면벽에 0.5mm반원형의 groove를 가공하였다.

가공된 groove는 응고되는 봉재의 표면에 흔적을 남기게 되며, groove의 수 및 위치를 확인

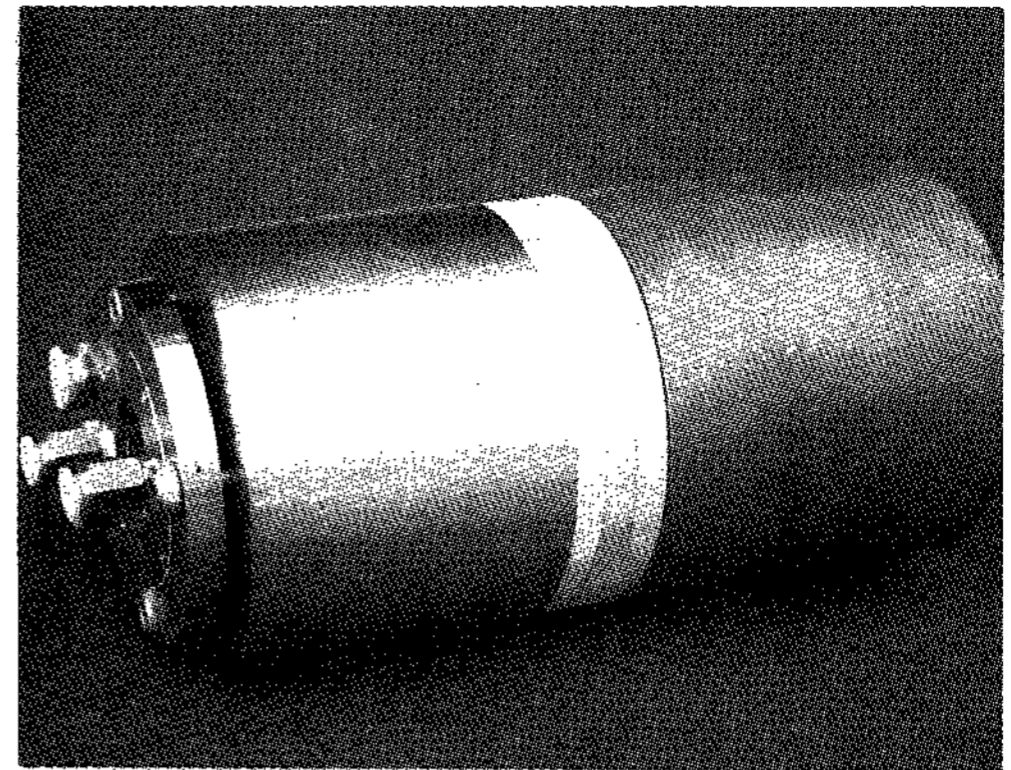


Fig. 2. Water cooling system assembled by feeder tube, insulator, cooling jacket and water sprayer.

함으로써 용탕이 mould내에서 응고하는 시점을 추정할 수 있고, 그 결과에 따라 주조속도를 제어할 수 있도록 하였다.

사용한 취출기로는 servo-motor에 연결되는 감속기를 통해 roll의 전진이나 후진속도 및 거리를 조절할 수 있도록 하였으며 전진, 정지, 후진, 정지단계에서 속도 및 시간 조절이 가능한 상하 roll형 취출기를 사용하였다.

2.2 연속주조실험

수평연속주조재의 건전도를 판단하는데는 크게 편석과 외관형상 및 주조조직으로 나누어 평가할 수 있으며[8,9] 결함을 최대한 억제하거나 제거하기 위한 방법으로 주조속도, 냉각수량 및 윤활유의 종류등 적절한 주조조건을 선택과[9, 10] mould내에서의 용탕의 흐름을 조절하는 방법[11,12]등을 생각할 수 있다.

본 실험에서는 Al-Si합금 봉재를 제조함에 있어 취출속도(주조속도), 냉각수량 및 냉각방법 등의 영향을 조사하여 이들 주조조건이 제품에 미치는 영향 즉 주조조직 및 표면형상에 미치는 영향을 조사하였다. 먼저 주조가 용이한 순 Al을 용해하여 670-1100mm/min의 주조속도로 주조하여 주조조건을 설정하였으며, 다음으로 목표합금인 과공정Al-Si합금을 용해주조 하였다. 합금의 용탕정제를 위해 Ar gas bubbling하였으며, 산화방지를 위한 flux나 초정 Si의 미세화를 위한 P합금 등의 미세화제는 사용하지 않고 연속

주조에 의한 냉각속도 영향만을 분석하고자 하였다. 출탕온도는 합금의 액상선보다 70-80°C 높은 온도로 하였으며 그 외의 각종 공정조건은 Table 1과 같다.

취출된 연주봉재에 정출한 초정Si의 분포 및 크기를 확인하기 위하여 macro- 및 microetching 한 후 광학현미경을 통해 각 작업조건에 따라 Si의 분포와 크기를 조사하였다. 또한 연속주조공정에서 나타난 연주봉재의 결함이나 단락된 봉재를 조사하여 결함 및 단락의 발생원인에 관해 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 주조조직

Fig. 3은 제조한 순 Al봉재의 단면주조조직이다. 봉재표면의 chill zone에서 부터 columnar조직으로 성장한 주괴의 조직을 관찰해 보면 먼저 주조속도가 느린 경우(Fig. 3의 a) 응고의 중심부가 봉재의 상부로 약간 이동함을 볼 수 있다. 즉 주조속도가 느린 경우에는 도식한 바(Fig. 4의 a)와 같이 열중심선이 mould의 상부로 향하며 조직의 분포는 중심선을 기준으로 볼 때 불균형상태에 놓이게 된다.

이는 주조속도에 따른 열방출효과의 차이에 의한 것으로 다음과 같이 설명할 수 있다. 주괴의 아랫부분은 응고한 봉재 자체의 중량에 의해 mould내벽과의 접촉이 용이하기 때문에 쉽게 냉각이 진행되며, 상대적으로 낮은 온도의 액상금속은 비중차에 의해 아랫부분으로 향하고 mould하부의 냉각은 더욱 빠르게 진행된다. 한편 응고

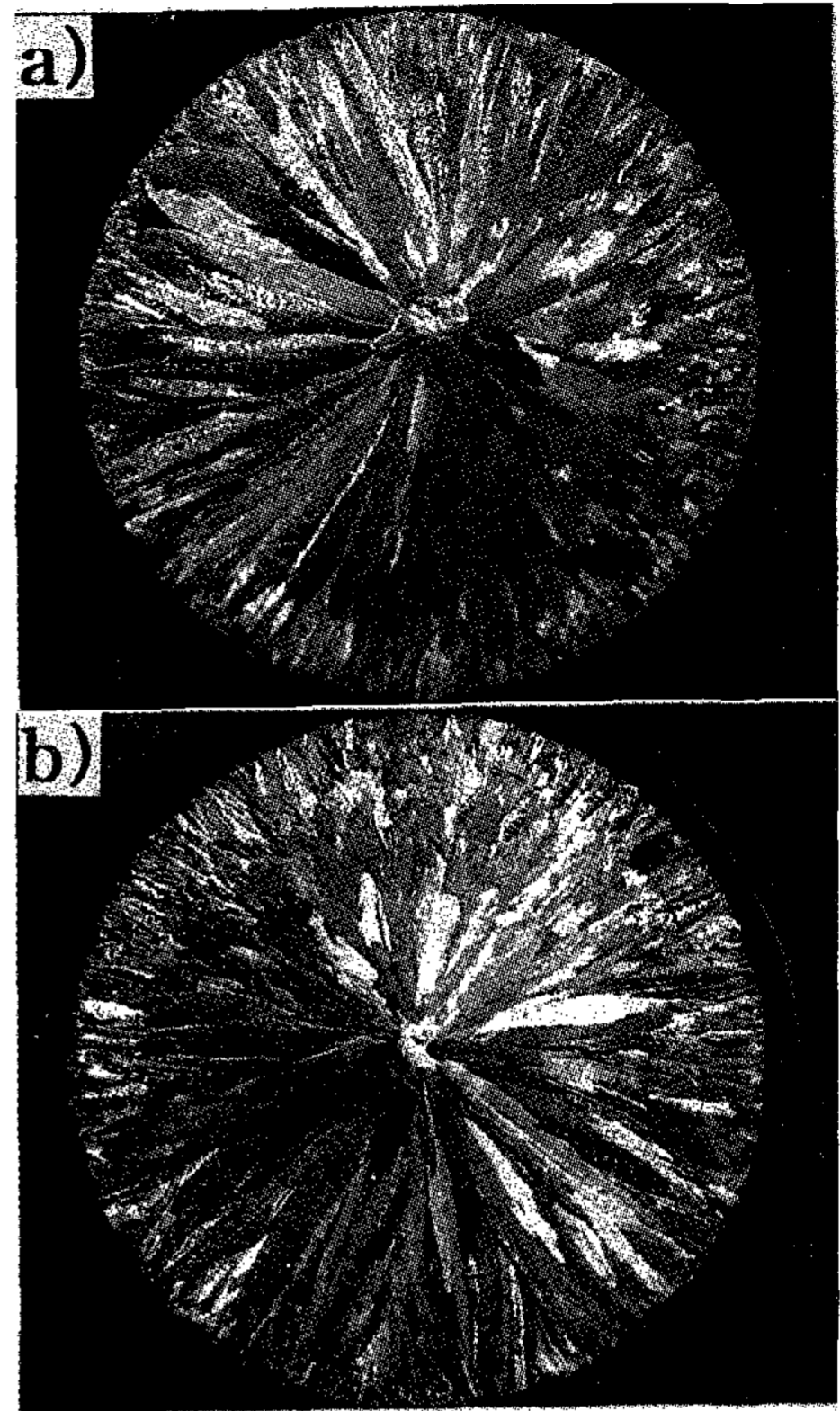


Fig. 3. Microstructures of Al bar produced on the condition of A-1(a) and A-2(b) in table 1.

수축한 봉재가 mould하부와 보다 밀착됨으로써 주괴의 상부에서는 mould와 응고한 소재와의 공기층이 형성되고 mould로의 열전달이 늦어짐으로써 응고속도가 감소한다. 용탕의 흐름외에도 주조속도가 느린 경우에는 주괴내 sump의 깊이가 얕게되어 높은 온도의 용탕이 상부쪽으로 이

Table 1. Continuous casting condition of Al and Al-17Si alloy.

		Pitch (mm)	Forward/Stop.(sec)	Backward (mm/sec)	First Cooling (ℓ/min)	Water Sprayer	Withdrawing Speed (mm/min)
Pure Al	A-1	28	1.0/1.5	—	5~7	○	672
	A-2	28	1.0/1.0	—	5~7	○	840
Al-Si	B-1	5	0.2/0.8	—	5	×	300
	B-2	5	0.2/0.8	—	5	○	300
	C-1	3.4	0.2/0.8	—	8	×	200
	C-2	3.4	0.2/0.8	—	4	○	200
	D-1	7	0.4/0.8	—	5	○	350
	D-2	18	1.5/0.8	5/0.2	14	○	310

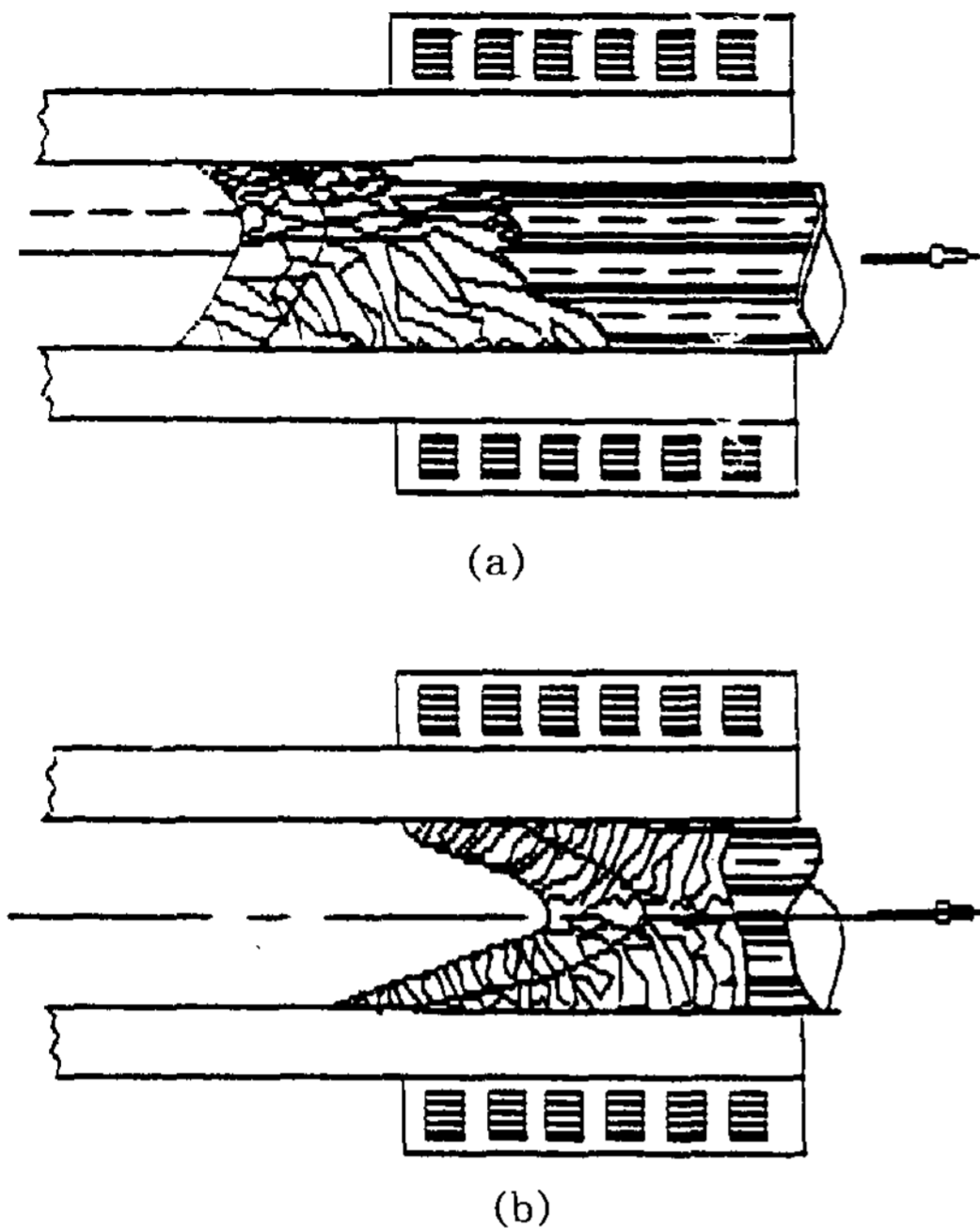


Fig. 4. Schematic representation of solidification at low(a) and high(b) casting speed.

동하는 것을 방해하지 않는다. 또한 낮은 주조속도에서는 주괴의 응고시간이 길기 때문에 표면응고층이 상대적으로 두껍게 형성됨으로써 충분한 탕압에도 불구하고 상부의 응고수축에 의한 공기층을 억제할 수 없게 된다. 이와는 반대로 Fig. 3의 (b)에 나타낸 바와 같이 높은 주조속도에서는 액상의 sump가 깊게 형성되고 이에 따라 표면응고층의 두께가 얇고 연약하기 때문에 탕압에 의해 응고층이 연신되어 mould내벽을 딱 채울 수 있다. 따라서 mould내벽과의 접촉면적이 크기 때문에 봉재 상하부에서의 열전달효과는 낮은 주조속도에서 만큼 큰 차이를 보이지 않게 된다 (Fig. 4의 b). 결과적으로 주괴상하부에 형성되는 조직은 상대적으로 균일하며 열중심선 또한 축의 중심축과 거의 일치하게 된다. 즉 주괴조직의 상하부 불균형은 주조속도를 높임으로써 감소시킬 수 있으며 빠른 주조속도는 이밖에도 조직을 미세화하는 효과가 있다.

과공정 Al-Si합금에서는 첨가된 Si의 응고에 따른 잠열이 크기(50.665 KJ/mole) 때문에 순 Al의 취출속도 보다 비교적 느린 속도에서 취출 조건 및 냉각수량을 변화시켰다. Fig. 5의 a~d)

에는 Table 1의 B 및 C의 조건에서 제조한 봉재에서 단면 가장자리부의 조직을 나타내었다. 초정으로 정출한 Si의 크기는 작업조건에 따라 크게 변화하고 있음을 알 수 있다. 300mm/min의 취출속도에서 2차냉각수의 분무없이 주조한 a)에 비해 같은 취출속도에서 2차냉각수를 분사한 b)의 초정Si의 크기가 미세한 경향을 나타내었다. 또한 200mm/min의 속도에서 cooling jacket에 유입되는 1차냉각수의 양에 따른 변화를 조사한 c, d)의 경우 냉각수의 양이 적은 d)에 비해 냉각수량을 증가시킨 c)에서 초정Si의 크기가 미세한 것으로 나타났다. 그러나 2차 냉각수유무의 측면에서는 2차냉각수를 분무하지 않은 c)의 초정Si이 2차 냉각수를 분무한 d)의 초정Si보다 미세한 경향으로 같은 영향을 조사한 a) 및 b)의 결과와는 상반된다. 이와같은 결과로부터 cooling jacket내에서 Al-Si합금의 응고양상을 추정해 볼 수 있다. 2차냉각수의 유무보다 cooling jacket에 유입되는 1차 냉각수의 양이 초정 Si의 크기를 결정하는데 보다 우세하게 작용한다는 것은 본 실험조건외 범위에서 합금용탕의 응고는 대부분 mould내의 1차 냉각지역에서 일어나고, 따라서 cooling jacket의 냉각능 즉 냉각수량이 합금응고시 냉각속도를 결정하는 주요 변수임을 나타낸다. 또한 취출속도의 영향만을 비교할 수 있는 b)와 d)의 경우, 취출속도가 빠른 b)의 초정Si 크기가 보다 미세한 것으로 미루어 취출속도에 따른 냉각속도의 변화 또한 매우 큼을 알 수 있다.

초정 Si이 가장 미세한 c)봉재의 경우 초정 Si의 크기는 30~40 μ m의 크기에서 부터 100 μ m 이상이 공존하였으며, 전체적으로 봉재의 중심부에서 정출한 초정Si의 크기가 봉재의 표면부 보다 조대한 경향을 나타내고 있는 것으로 판단하여 용탕의 응고시에 sump의 형성으로 인해 봉재의 표면부와 내부에서 냉각속도의 차이는 큰 것으로 추측된다.

취출속도를 보다 증가시킨 Fig. 6의 a,b)나 취출시 전진단계를 길게 한 후 후진단계를 사용한 경우(c,d)의 초정 Si은 80 μ m이하로 미세화되었으며 비교적 고르게 분포되어 있는 경향을 나타내었다. 이와 같이 초정 Si의 크기는 용탕처리공정에서 초정Si의 미세화를 위한 첨가제처리를 하

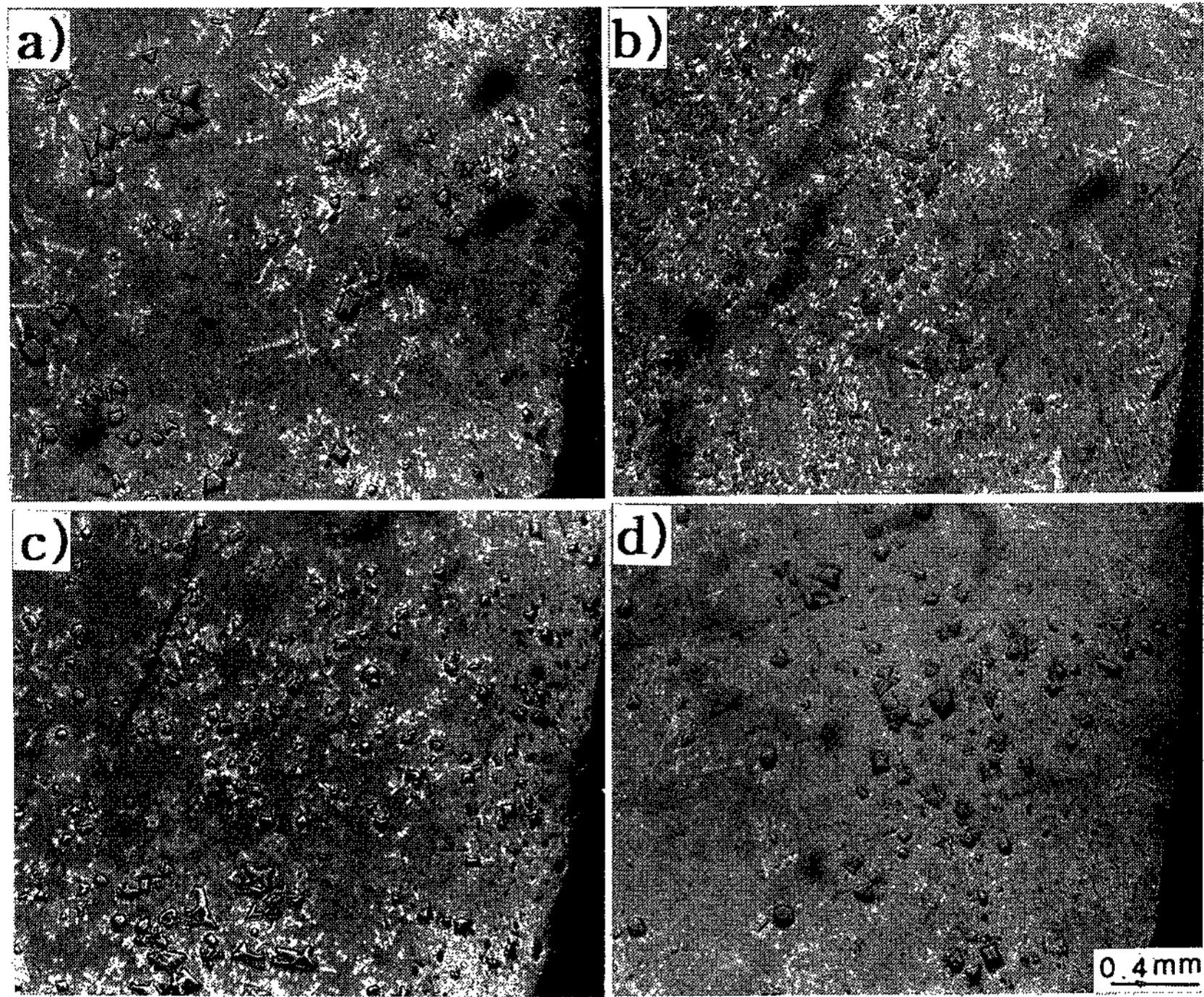


Fig. 5. Microstructures of Al-17Si alloy produced under the condition of B-1(a), B-2(b), C-1(c) and C-2(d) in Table 1.

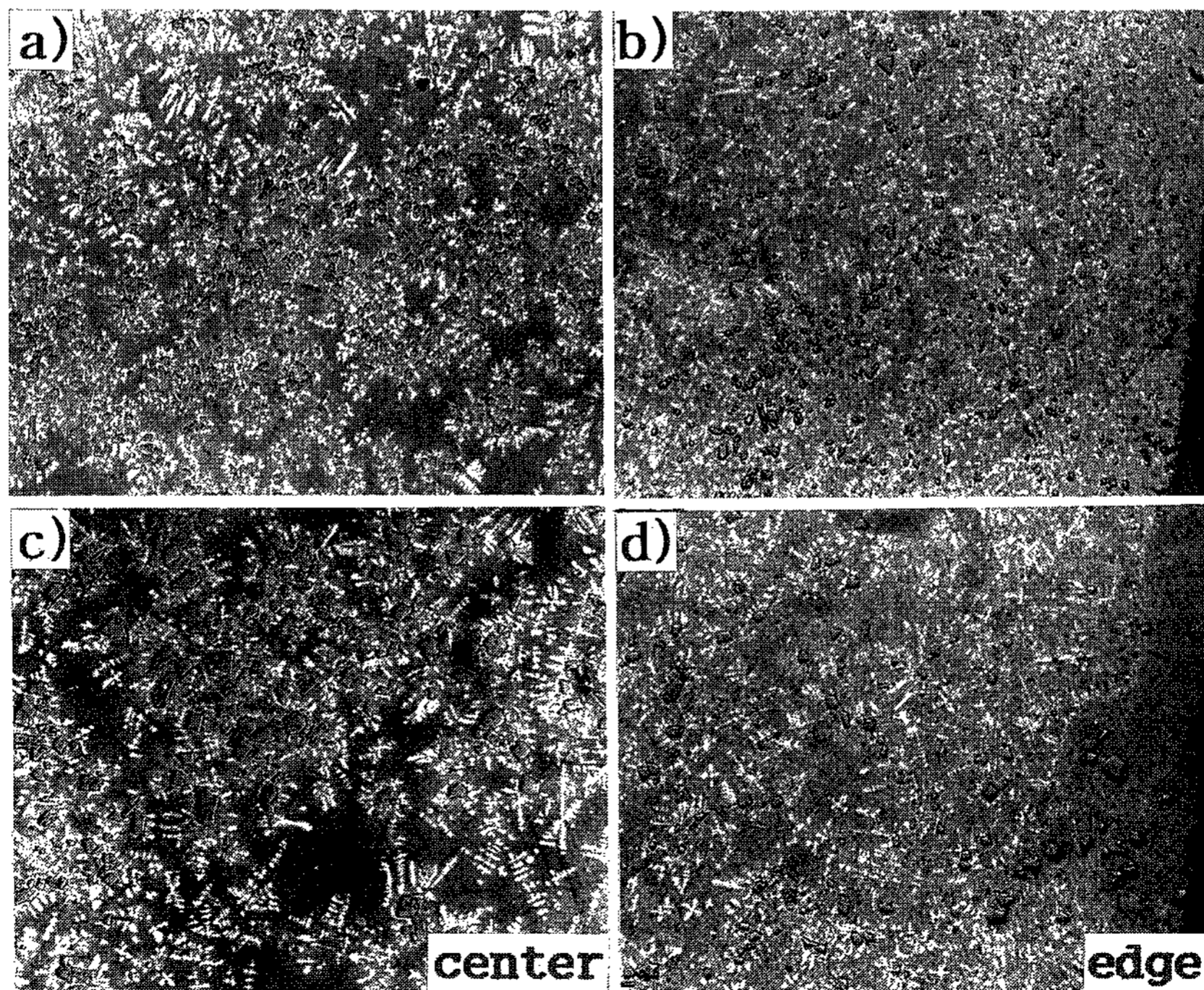


Fig. 6. Microstructures of Al-17Si alloy produced under the condition of D-1(a,b) and D-2(c,d) in table 1.

지 않았던 점을 고려할 때 비교적 미세한 것으로 판단하여 수평연속주조에 의해 소구경 봉재를 제조할 경우 미세화제 첨가에 의한 용탕처리효과와 수평연속주조에 의한 냉각속도 증가효과를 병행한다면 초정 Si의 미세화 효과는 매우 클 것으로 예상된다.

3.2 표면상태

Table 1의 조건 D로 제조한 Al-17%Si합금 봉재의 표면 상태는 Fig. 7과 같이 비교적 매끄러운 표면 상태를 나타내었으며 취출공정에서 간헐취출에 따른 pitch의 크기와 동일한 크기의 취출흔적이 나타나고 있다. 이와 같은 취출흔적이거나 표면상태는 취출속도의 변화나 cooling jacket에 유입되는 냉각수의 양에 따라서는 큰 변화가 없는 것으로 확인되었다. 그러나 취출공정에서 후진단계의 유무에 따라서 탕경계의 형상은 큰 차이를 나타내었다. 후진단계를 사용하지 않은 a)의 경우는 다른 A, B 및 C조건에서 제조한 봉재의 탕경계와 동일한 형태로서 탕경계부에 거친 요철흔적이 확인되었고 일부 crack의 발생장소로 확인된 반면 후진단계를 사용한 b)에서는 탕경계부의 요철흔적이 확인되지 않았다.

간헐취출을 사용하는 수평연속주조에서 탕경계부의 응고는 합금용탕의 mushy zone의 크기, 유동도, 탕압, pitch의 길이 및 속도 등의 영향을

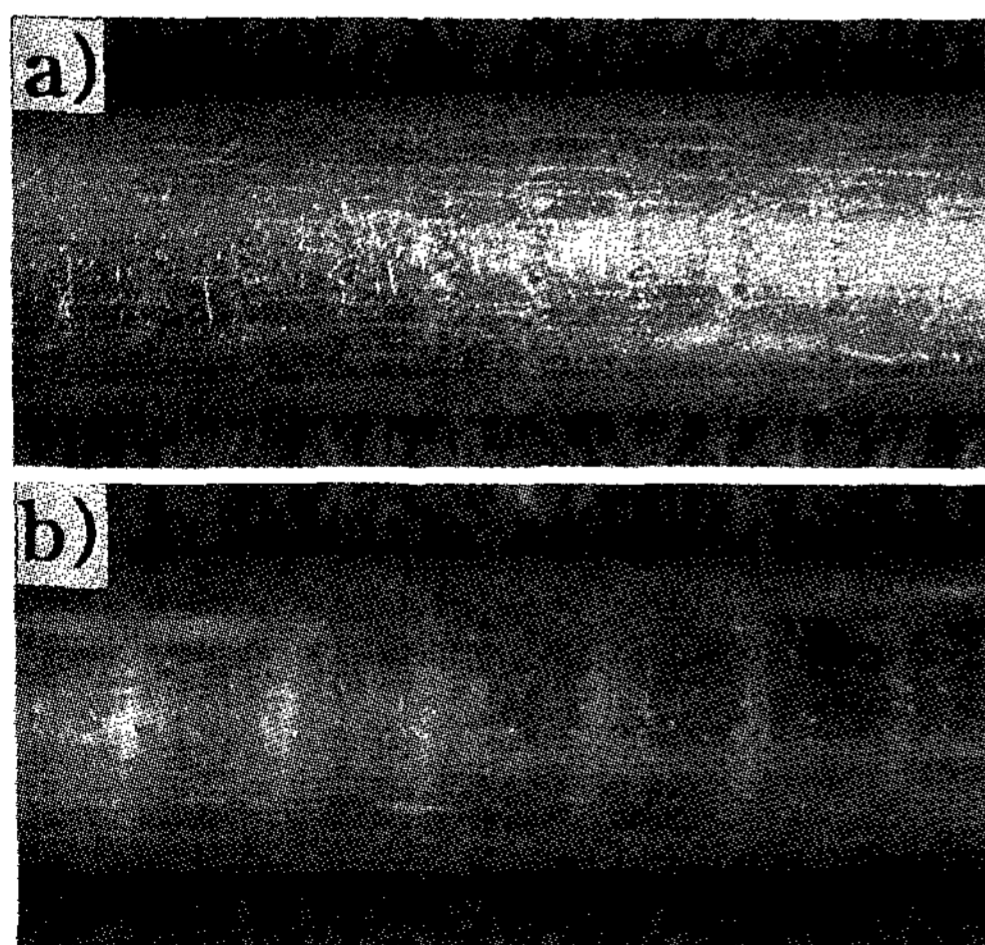


Fig. 7. Surface appearances of Al-17Si alloy produced under the condition of D-1(a) and D-2(b) in table 1.

받는다. 취출방법을 단순히 전진/정지 2단계의 반복 cycle로 주조한 경우 응고한 소재는 소정의 거리만큼 인출된 후 정지단계에 일정시간 유지한다. 이때 새로 유입된 용탕은 mould에서 표면으로부터 shell을 형성한다. 형성된 shell은 정지단계에서 충분히 두꺼워져 일정강도를 유지함으로써 전진단계에서 파괴되지 않고 응고한 봉재를 따라 취출된다. 새로 유입된 용탕과 응고한 shell의 경계에서는 용탕의 유동도에 따라 공간을 충분히 채우지 못할 경우 경계부에서 요철이나 결함을 유발한다. 특히 본 실험에서 주조한 Al-Si합금은 mushy zone이 크기 때문에 응고직전의 용탕은 유동도가 떨어져 탕경계부의 형상이 거칠었던 것으로 판단된다. 그러나 후진/전진/정지 3단계의 반복 cycle에서는 전진단계 이전에 약간의 후진단계를 도입한 cycle로서, 정지단계에서 형성된 shell이 mould표면과 융착되어 있어서 취출되지 못하여 파단(breakout)되는 것을 방지하고, 후진단계에서 shell과 용탕과의 압축력에 의해 용탕과 shell을 welding시켜 주는 작용을 함으로써 탕경계에서의 결합발생을 억제하기 때문에 탕경계의 응고형상은 차이가 나는 것으로 판단된다.

3.3 결함분석

연주공정 중에는 주조조건에 따라 Fig. 8과 같은 결함이나 봉재가 단락되는 현상이 발생하였다. a) 및 b)와 같은 봉재의 공동형성이나 단락 현상은 용탕의 소모에 의한 봉재 형상의 소멸과는 달리 sump의 형상이 남겨진 채로 급격한 파단이 일어난다. 취출봉재의 급격한 단락이나 공동의 발생원인은 보고되어 있는 ring이론[13]에 의한 것으로 판단된다. mould와의 계면에서 응고된 용탕의 shell은 두께가 얇고 취약하기 때문에 취출에 따른 전진공정에서 응고된 봉재와 같이 취출되지 못하고 mould내벽에 welding된 채로 남아 있을 수 있다. 이렇게 형성된 ring은 응고한 봉재가 취출된 후 새로 유입된 용탕이나 후진공정에 의해 재용해되거나 파괴되지 않으면 그 크기가 성장하게 되고 그에 따라 ring의 입구는 작아지게 되어 용탕의 흐름을 방해한다. 이와 같은 ring의 형성에 의해 봉재에 공급되는 용탕은 원활하게 유입되지 못하고 그 결과 공동이 생기

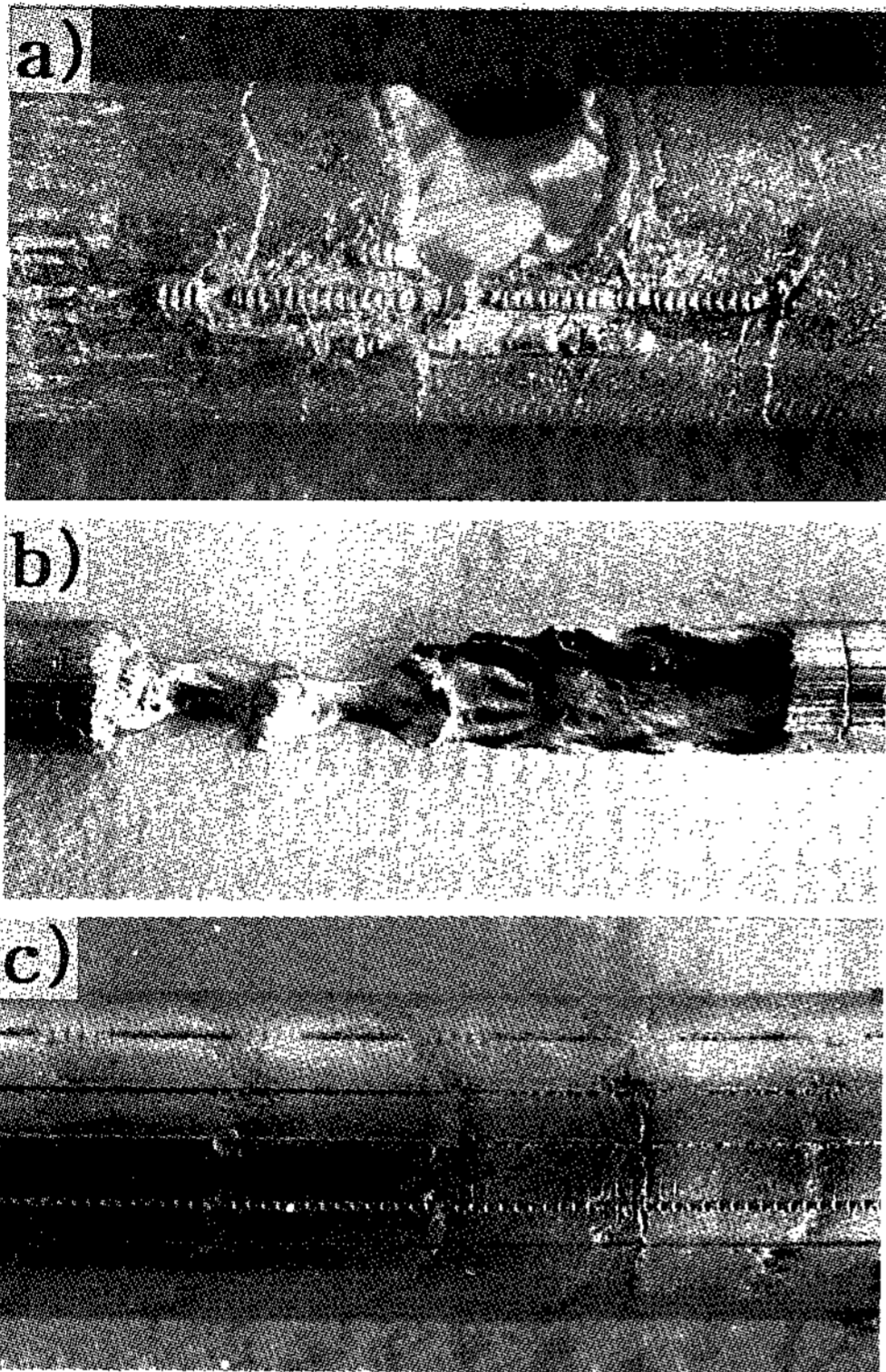


Fig. 8. Void(a), breakout(b) and crack(c) in continuously cast bar.

거나 심한 경우 ring의 입구가 완전히 막혀 취출되던 봉재가 단락되기도 한다. 이와 같은 ring의 형성을 억제하기 위해서는 후진단계가 필요하며, 각 cycle마다 후진 공정이 곤란한 조업의 경우라면 일정한 횟수의 전진cycle후에 한번은 후진단계를 주어 형성된 ring을 파괴하여 공동이나 단락 현상을 억제할 수 있다. 반면 취출기의 cycle 변환이 순조롭지 못하거나 취출기 roll의 회전이 안정적이지 못해 roll의 떨림이 mould방향으로 전달될 경우에는 c)와 같이 탕경계부에서 봉재의 단면을 가로지르는 crack이 발생되었다.

한편 제조조건에 따라 봉재의 내부에 공동이 형성되는 Fig. 9의 a)와 같은 결함이 확인되었는데, 공동은 Al-17Si합금에서 약 350mm/min.의 취출속도에서부터 발생하기 시작하여 취출속도의 증가에 따라 크기 및 분율이 커지는 것으로 나타났다. 이와같은 내부 공동발생은 취출속도가 현저히 높았던 조건에서 주조한 순 Al에서는 나타나지 않았던 결함으로서 합금의 mushy zone

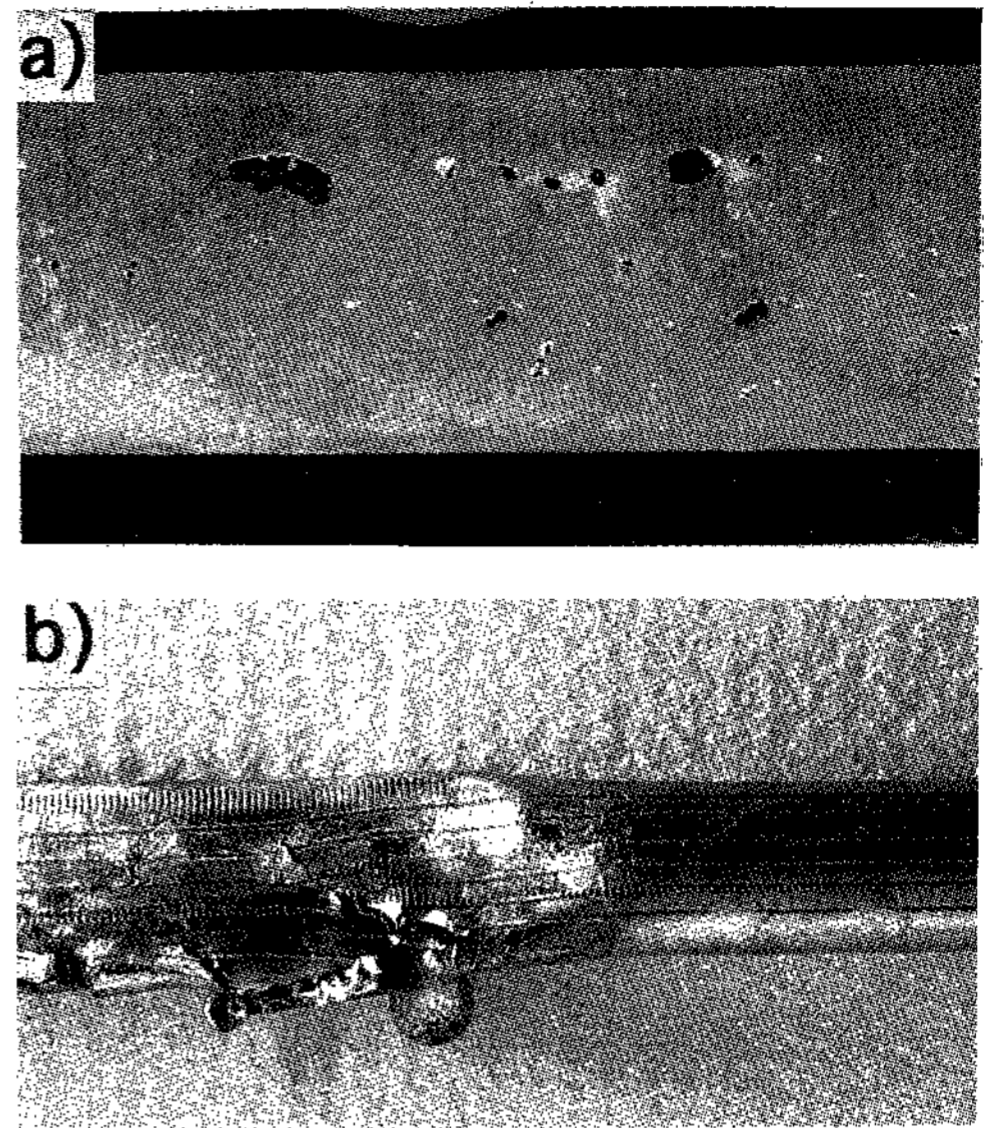


Fig. 9. Cast defect(a) and irregularly deformed bar (b) due to improper casting condition

의 크기와 관계하는 것으로 사료된다. Mushy zone이 큰 합금을 일정속도 이상으로 취출할 경우, 특히 Al-Si합금에서와 같이 Si의 매우 큰 잠열로 인해 응고가 느리게 진행되는 조건에서는 sump의 깊이가 크게되고 따라서 고상선 및 액상선의 형상이 Fig. 10과 같이 봉재의 진행방향과 평행하게 형성될 수 있는 경향이 커진다. 이는 Fig. 9의 b)에 제시한 바와 같이 봉재내부에 있는 용탕의 미응고로 인해 취출기의 roll에서 봉재형상이 변형되는 것으로도 예상할 수 있다. 즉, Al-15Si합금을 2차 냉각수의 분무없이 660mm/min.의 속도로 취출했을 경우에 발생한 봉재의 결함으로, mould에서 표면응고는 완료되어 $\phi 25\text{mm}$ 의 봉재형상을 유지하면서 취출되지만 봉재의 내부는 미응고상태로 남아 mould의 끝에서 1260mm의 거리에 위치한 취출기의 상하 roll에 의해 봉재가 변형되면서 내부의 미응고 용탕이 빠져나온 결과이다. 따라서 취출속도는 보다 느리지만 mushy zone의 크기가 보다 큰 Al-17Si합금의 응고양상도 동일할 것으로 예상되며 Fig. 10과 같은 기구에 의해 공동이 형성될 것으로 추측된다. 이와같은 결함분석 결과로부터 고규소 Al합금과 같이 mushy zone이 큰 합금의 수평연속주조에서는 봉재단락의 원인이 되는

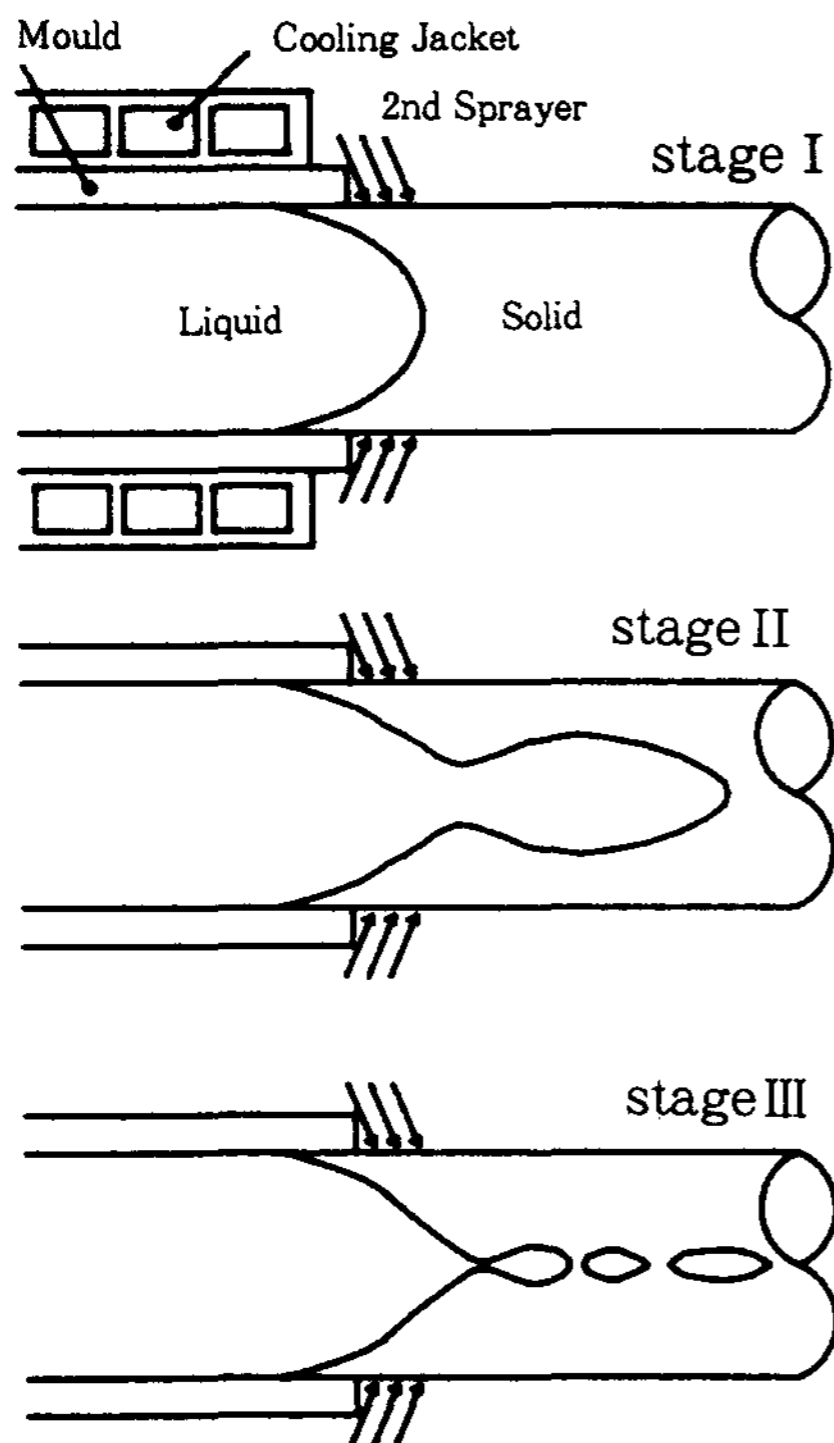


Fig. 10. Schematic representation of void formation mechanism in the cast bar.

ring의 제거를 위해 취출 cycle에서 후진공정을 도입하고, 봉재 내부의 공동형성을 억제하기 위해서는 취출되는 봉재의 내부까지 충분히 응고시키기 위한 냉각방법이 요구된다.

4. 결 론

1) 직경 25mm의 봉재를 수평연속주조할 수 있는 설비를 설계 및 제작한 후 순Al을 705°C의 용탕온도에서 672~1120mm/min.의 속도로 수평연속주조하였다. 제조한 봉재의 표면에는 탕경계가 뚜렷하게 나타났고, 봉재의 미세조직은 간헐취출에 따라 단속적으로 변화하였으며 주조속도의 증가에 따라 열중심선은 봉재의 중심으로 이동하는 것으로 확인되었다.

2) Al-17%Si합금의 연속주조에서는 전진공정을 짧게 변화시키고 전체적인 주조속도를 증가

시킴으로써 표면상태가 개선되었으며, 간헐취출에 따른 탕경계 요철형상 및 탕경계부의 결함은 취출 cycle에서 후진단계를 이용함으로써 억제할 수 있었다.

3) 봉재에 정출한 초정Si은 표면부위의 30 μ m에서 중심으로 가면서 100 μ m이상의 크기로 증가하였으며 봉재내부에 약간의 편석이 확인되었다.

4) 봉재의 단락 및 결함의 발생원인을 분석한 결과 mushy zone이 큰 고규소 Al합금에서 mould내벽에 형성되는 ring이 단락의 원인인 것으로 분석되었으며, 용탕의 유동성 및 sump의 깊이는 봉재의 표면 및 내부결함을 좌우하는 것으로 확인되었다.

참 고 문 헌

- [1] H. Steen, L. Backerud : Scandinavian J. Metall., 7 (1978) 271
- [2] D. C. Weckmen, P. Niessen : Z. Metallkde, 75, 5 (1984) 332
- [3] Rovert. B. Powers : Light Metal Age, 12 (1975) 5
- [4] E. F. Emley : Inter. Metals Rev., 6 (1976) 75
- [5] 松尾 守 : 輕金屬, 39, 7 (1989) 524
- [6] 友弘一良, 高橋靖弘, 三田村良太 : 輕金屬, 35, 2 (1985) 112
- [7] J. C. Attwood, D. W. Davies : Foundry Trade Journal, 10 (1983) 365
- [8] Utrich Heubner, Edgar Lossack, Bruno Prinz : Z, Metallkunde, Bd. 72 (1981) 149
- [9] W. Schneider : Metal, 6 (1986) 568
- [10] W. Schneider : Aluminium, 5 (1985) 338
- [11] R. E. Spear, R. T. Craig, C. R. Howle : J. Metals, 10 (1971) 42
- [12] M. S. Ji, W. Schmitz, S. Engler : metall, 45 (1991) 148
- [13] R. G. Piesche : J. Inst. Met., 95 (1970) 339