

응고조직 및 성분편석에 미치는 내부냉금의 효과

김명한 · 조현남 · 김정겸 · 조형호*

충북대학교 재료공학과, 급속응고 신소재 연구실

*한국생산기술연구원

The Effect of Internal Chills on the Solidified Structure and Chemical Segregation

M.H.Kim, H.N.Jo, J.K.Kim, and H.H.Jo*

Dept. of Materials Engineering, Chungbuk National University & RASOM

*Korea Institute of Industrial Technology

(1999년 6월 8일 받음, 1999년 7월 15일 최종수정본 받음)

초 록 직경이 각각 4, 6, 8, 12 및 15mm인 순Al 또는 Al-(1.2, 3wt%)Cu 합금 내부냉금이 95mm ϕ × 200mm H 크기의 흑연 주형 중심부에 설치되었다. 이 내부냉금과 같은 조성의 용융금속이 750°C의 주입온도에서 주형에 주입되었고, 냉각속도, 응고조직 및 성분편석이 분석되었다. 주괴직경/내부냉금직경의 비가 8까지 증가될수록 결정립도, 2차수지상간격 및 성분편석이 현저하게 감소됨이 확인되었다. 그러나 이 비가 8이상이 되면, 미용해 내부냉금이 발생되고, 내부냉금의 효과는 급속히 감소되었다. 순Al 및 Al-(1.2, 3wt%)Cu 합금에서 최대 내부냉금 효과를 얻을 수 있는 적정 주괴직경/내부냉금직경의 비는 750°C 주입온도에서는 8이었다.

Abstract The pure Al or Al-(1, 2, 3wt%)Cu alloy internal chill with 4, 6, 8, 12 and 15mm ϕ , respectively, was inserted at the center of a graphite mold with the size of 95mm ϕ × 200mm H. The molten metal with the same composition as the internal chill was poured into the mold at the pouring temperature of 750°C and the cooling rates, solidified structures and chemical segregation were analyzed. The results represented that there was remarkable increase in cooling rate as well as decrease in grain size, secondary dendrite arm spacing and chemical segregation as the ratio of ingot to internal chill diameter was increased to 8. However there was a considerable drop of the internal chill effect when this ratio exceeded 8, resulting from incomplete melting of internal chills. The optimum ratio for the maximum internal chill effect of pure Al and Al-(1, 2, 3wt%)Cu alloys was 8 at the given pouring temperature.

1. 서 론

주물의 응고시 응고수축에 의한 수축불량 및 국부적인 온도 차이에 의한 불균질한 응고조직을 제어하고 방향성응고를 진행시키기 위하여 주형에 압탕을 설치하거나 또는 높은 열확산도를 갖는 냉금(chill)이 적용되어 왔다. 이때 냉금은 단부효과(end effect)를 증가시키거나 또한 정상적으로 단부효과가 일어나지 못하는 압탕 사이에 사용될 때 인위적인 단부효과를 일으킬 수 있다.

냉금에는 냉금 표면이 주형에 고정되게 사용하는 외부냉금(external chill)과 주형의 공간 내로 튀어나와 있다가 주물과 융착되어 완전히 주물의 일부가 되는 내부냉금(internal chill)으로 분류되고, 주조에 사용시 냉금 표면이 깨끗하고 녹이 없어야 냉금 사용에 따른 주조결함을 제거할 수 있다. 특히 주형내부에 삽입되어 사용되는 내부냉금은 다양한 형태를 가지며, 그 사용에 매우 주의를 요하는 것으로 냉금이 주물과 같이 융착되지 않으면 이로 인한 취약점이 생기고, 용융 금속에 둘러싸여 발생하는 가스의 배출이 어려우며, 주물의 기계적 성질과 조성이 변화될 수 있기 때문에 외부냉금보다 사용에 엄격한 제한이 따른다.¹⁾ 이러한

내부냉금은 주로 경험에 의거하여 주물생산에 적용되어 왔고, 재질별, 주입온도에 따른 적정 냉금의 치수 및 형상, 냉금과 냉금과의 간격 등 냉금설계에 관하여 체계적으로 연구된 바 없다. 본 연구에서는 단순한 형상인 순Al 및 Al-Cu 합금 빌렛 주조시 내부냉금 적용에 따른 냉각속도, 응고조직 및 성분편석의 변화를 조사하여 내부냉금 효과를 정량적 또는 정성적으로 분석하여 내부냉금의 폭넓은 응용을 위한 기초자료를 얻고자 하였다.

2. 실험 방법

내부냉금은 순Al(commercial pure Al) 및 Al-(1, 2, 3wt%)Cu 합금을 사용하여 제조되었으며, 4, 6, 8, 12 및 15mm 직경의 내부냉금을 수평식연속주조장치를 이용하여 주조후 25cm 길이로 절단하여 사용하였다. 이 내부냉금을 내부직경이 95mm, 높이가 200mm이고 두께가 10mm인 흑연주형의 정중앙부에 Fig. 1과 같이 설치하였고, 내부냉금 표면으로부터 10, 20 및 30mm 위치에 열전대를 설치하였다. 이 열전대를 다채널 방식의 온도계측기(Model: Fluke 2625A)에 연결시켜 연속적으로 온도를 측정하여 냉각곡선을 얻었다.

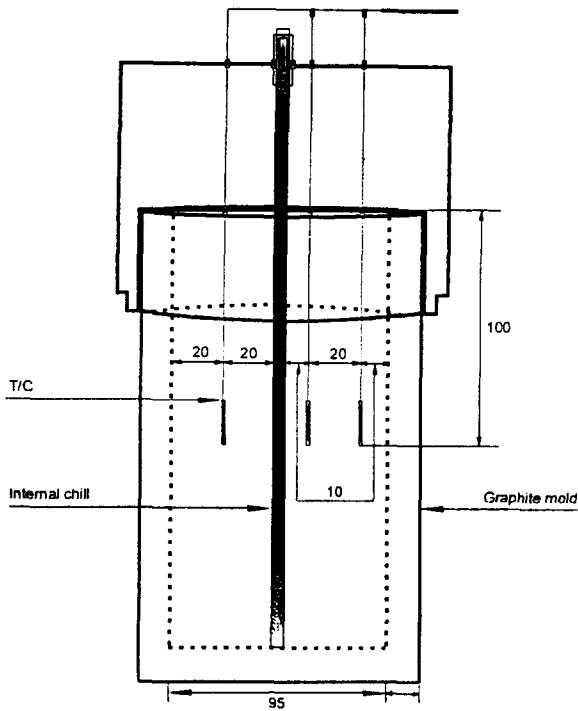


Fig. 1. The position of an internal chill and thermocouples in the graphite mold.

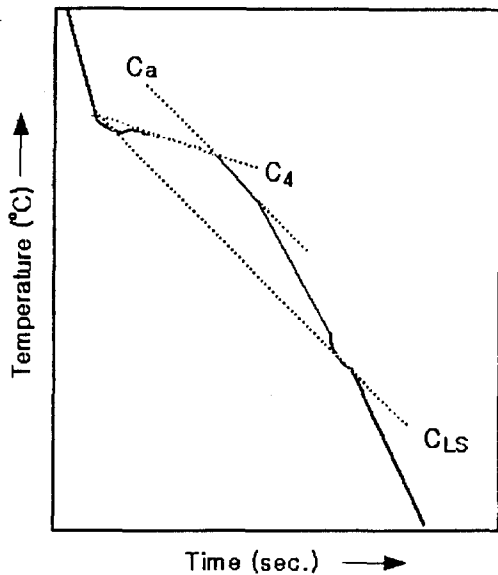


Fig. 2. The methods for measuring cooling rates from a cooling curve.

냉각속도는 이 냉각곡선으로부터 구하였고, 본 연구에서는 Fig. 2의 냉각속도 측정법²⁾ 중 C_4 법을 이용하였다 (C_4 법 : α 상 대부분이 응고가 종료하는 변곡점의 값 전의 냉각곡선으로부터 냉각속도를 구함. C_a 법 : α 상 대부분이 응고가 종료하는 변곡점의 값 아래의 냉각곡선으로부터 냉각속도를 구함. C_{LS} 법 : 액상선 온도와 고상선 온도 사이의 냉각곡선으로부터 냉각속도를 구함)

주형내 내부냉금 및 열전대 설치가 끝난 후 고주파 유도로 (50KW, Al 30kg 용해용량) 에서 내부냉금과 동일한 조

성의 순Al 및 Al-(1, 2, 3wt%)Cu 합금을 용해하였고, 750°C의 온도에서 주형에 주입하였다.

주조후 열전대 위치와 동일한 위치에서 시편을 채취하여 거시 및 미세조직, 성분분석을 조사하였다. 주괴의 거시조직을 관찰하기 위하여 주괴를 절삭하여 횡단면을 연삭한 다음 연마지(#200~#1500)로 조연마하고 왕수부식액($\text{HNO}_3:\text{HCl}:\text{C}_2\text{H}_5(\text{OH})_3 = 1:3:2$)을 사용하여 에칭한 다음 접사촬영을 하였다. 미세조직은 시료를 연마후 불산용액(1ml HF + 200ml water)과 Keller부식액(2ml HF + 3ml HCl + 5ml HNO_3 + 190ml water)으로 부식을 행한후 광학현미경을 이용하여 관찰하였다. 거시 및 미세조직 사진을 이용하여 입도 및 DAS(Dendrite Arm Spacing)가 측정되었으며, DAS측정시 교선법³⁾이 적용되었다.

거시적인 성분분석을 조사하기 위해 X-ray spectrometer를 이용하여 화학성분을 측정하였으며, 동일 부위를 3회 측정하여 평균값을 취하였다. 미세 성분 분석은 SEM-EDX(Model: Hitachi S2500C)를 이용하여 분석되었다.

3. 실험 결과 및 분석

3-1 주조금속별 내부냉금 직경에 따른 냉각속도의 변화

Fig. 3(a-c)는 순Al 및 Al-(1, 2, 3wt%)Cu 합금에서 주괴 중심부에 위치한 내부냉금 표면으로부터의 거리가 각각 (a) 10, (b) 20 및 (c) 30mm 떨어진 위치에서 내부냉금 직경에 따른 냉각속도를 냉각곡선으로부터 구하여 도시한 결과이다. Fig. 3(a)에서 각 주조금속의 내부냉금 직경에 따른 냉각속도는 직경이 6mm까지는 비교적 완만한 증가를 보이다가 그 후 대체적으로 큰 냉각속도의 증가를 나타내었고, 12mm 직경에서 최대 냉각속도에 도달된 후 15mm 직경에서는 다시 급격히 감소되었다. 주조금속에 따른 냉각속도는 순Al, Al-1wt% Cu, Al-2wt% Cu, 및 Al-3wt% Cu 합금순이었다. Fig. 3(b) 및 Fig. 3(c)의 결과는 대체로 Fig. 3(a)의 결과와 비슷한 경향을 나타냈다.

Photo. 1(a-c)는 Al-1wt%Cu합금에서 각각 (a) 내부냉금은 사용하지 않은 경우 (b) 8mm 직경의 내부냉금 및 (c) 15mm 직경의 내부냉금을 사용하여 주조된 주괴의 거시조직이다. Photo. 1(c)의 내부냉금 직경 15mm에서는 냉금이 미용해된 것을 확인할 수 있었다.

내부냉금의 냉각능은 외부냉금과 달리 고상상태에서의 냉각능과 내부냉금이 용융되어 용해열 흡수에 의한 냉각능과의 합의 크기에 좌우되며, 순Al 금속 및 Al합금의 경우 용해열이 강, 주철 및 Mg 등의 금속에 비해 월등히 커(순Al 금속 : 94 cal/gK, 저합금강 : 60~64cal/gK, 일반주철 : 50~64cal/gK)⁴⁾ 냉각속도에 미치는 영향이 매우 큼을 알 수 있다. 주물의 직경(또는 두께)에 비해 과도한 크기의 직경(또는 두께)의 내부냉금의 사용은 냉금의 미용해를 일으키며 이는 내부냉금에 의한 총 냉각능 중 용해열 흡수에 의한 냉각능을 감소시킨다. 이것이 Fig. 3(a-c)에서 15mm 직경의 내부냉금 사용시 급격한 냉각속도 감소의 원인이라 사려된다. 여기서 미용해 내부냉금은 그 기능에서 외부냉금과 가까우며, 내부냉금의 냉각효과는 외부냉금에

비해 매우 큼을 알 수 있다. Fig. 4는 Al-1wt%Cu합금에서 주형중심부에 설치된 내부냉금 표면으로부터의 거리에

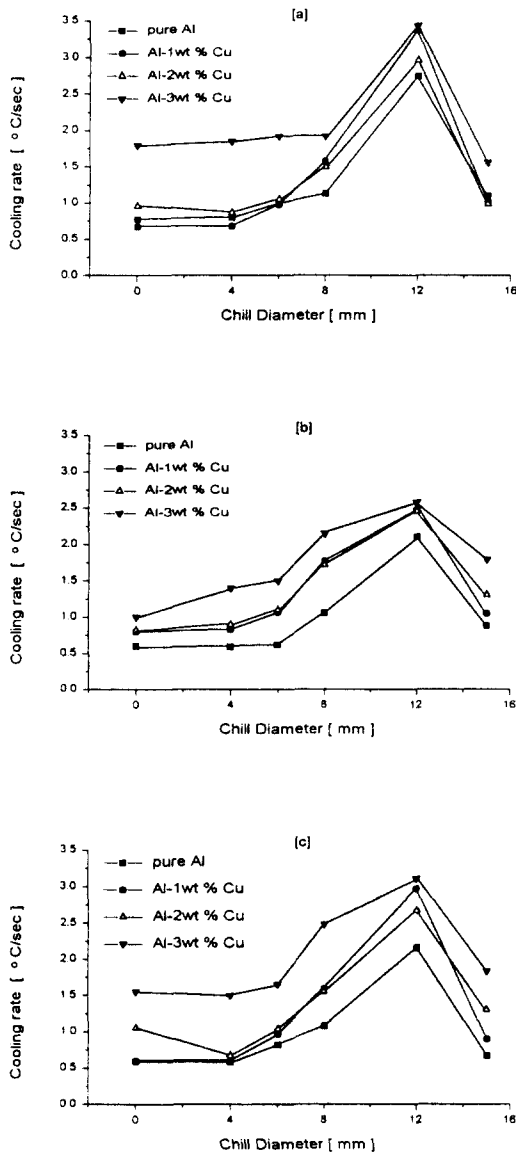


Fig. 3. The effects of cast metals with various internal chill diameters on the cooling rates at the location of (a) 10mm, (b) 20mm, and (c) 30mm distance from the chill surface.

다른 냉각속도를 나타낸 것으로 내부냉금 직경의 증가에 따른 냉각속도의 변화는 내부냉금 표면으로부터의 거리에 관계없이 모두 12mm 직경까지는 증가하다가 그 이후 15mm 직경에서는 Fig. 3의 결과와 같이 급격히 감소하는 양상을 보였다. 내부냉금 직경이 12mm의 경우 냉각효과는 내부냉금 표면으로부터 거리가 가장 가까운 10mm 부위가 가장 컸고, 그 다음은 30mm 및 20mm 부위 순서이었다. 내부냉금에 의한 냉각효과는 내부냉금 표면으로부터 가까울수록 클 것으로 예상되나, 본 실험의 경우 내부냉금 표면으로부터 30mm 부위의 경우 흑연주형벽과 가깝게 되어, 이에 따른 냉각속도의 증가로 인해 20mm 부위보다 크게 된 것으로 사려된다. 그러나 내부냉금 직경이 4, 6 및 8mm의 경우 위치별 냉각속도가 큰 차이가 없고, 또한 위치별 냉각속도도 12mm 직경의 경우와 같은 순서로 나타나지는 않고 있다. 이는 내부냉금 직경이 작은 경우 비교적 응고초기에 냉금이 용융되어 주형내에서 그 위치가 다소 변화했기 때문이라 사려된다.

직경 95mm 주괴의 중심부에 설치된 내부냉금은 중심부로부터 최소 30mm 이상의 반경에 냉각효과를 미치고 있으며, 750 °C의 주입온도에서 적절한 $\frac{\text{주괴직경}}{\text{내부냉금직경}}$ 의 비는 약 8 이하이다. 이 최대 내부냉금의 냉각효과를 나타낼 수 있는 $\frac{\text{주괴직경}}{\text{내부냉금직경}}$ 의 비는 주입온도, 주형재질 등 주조변수에 따라 변화된다.

3-2 내부냉금이 응고조직에 미치는 영향

내부냉금과 등축정 생성

Photo. 1 (a)는 내부냉금을 사용하지 않은 경우의 거시조직을 접사촬영한 결과로 주괴 표면으로부터의 넓은 주상정대와 주괴 중심부의 등축정대로 구성되어 있음을 알 수 있다. Photo. 1 (b)의 8mm 직경의 내부냉금을 사용한 경우 주상정대는 감소되고 등축정대는 증가되나, Photo. 1 (c)의 내부냉금 직경이 15mm로 증가되는 경우 주괴 중심부에 미용해된 냉금이 보이고 그 주위에 띠모양으로 얇은 등축정대가 보이고 이 등축정대 밖에 비교적 넓은 주상정대가 존재하여 내부냉금을 사용하지 않은 경우보다 등축정대가 오히려 감소되었다.

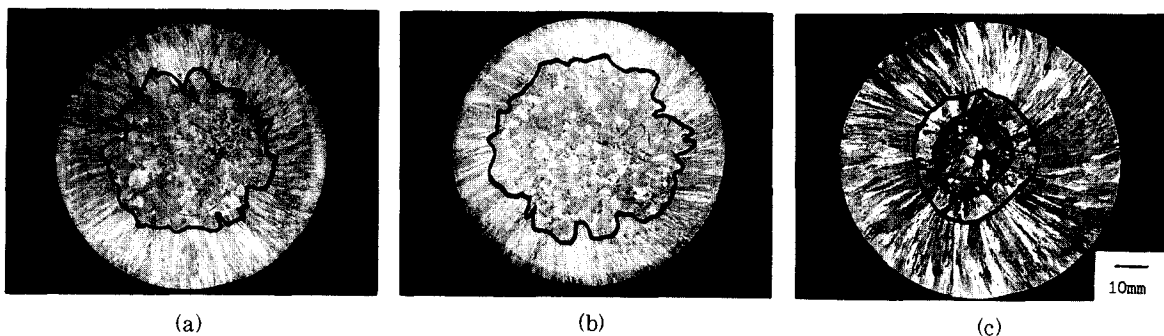


Photo. 1. The macrostructure of pure Al solidified (a) without an internal chill, (b) with an 8mm ϕ internal chill, and (c) with a 15mm ϕ internal chill.

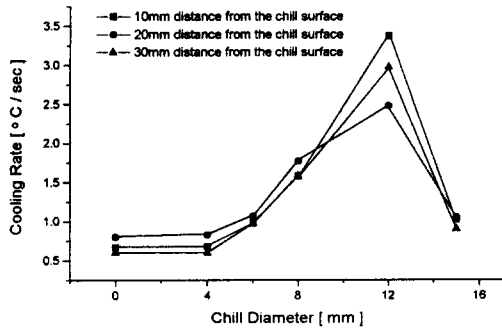


Fig. 4. The effects of internal chill diameter of Al-1wt%Cu alloy on the cooling rate according to the distance from the chill surface.

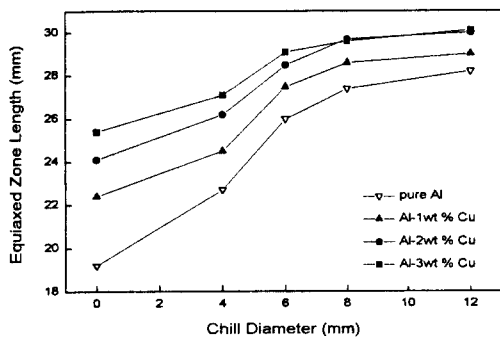


Fig. 5. The effect of internal chill diameter of pure Al and Al-(1,2,3wt%)Cu alloys on the equiaxed zone.

Fig. 5는 순Al 및 Al-(1, 2, 3wt%)Cu 합금에서 내부냉금의 직경에 따른 등축정대를 주괴 중심부로부터의 평균 길이로 나타낸 것이다.

여기서 등축정대는 각 주조금속에서 내부냉금 직경이 12mm로 될 때까지 증가하였고, 그 증가율은 순Al금속이 가장 컸다. 일정한 내부냉금 직경에서는 순Al, Al-1wt% Cu, Al-2wt%Cu 및 Al-3wt%Cu 합금 순으로 용질원소인 Cu함량이 증가됨에 따라 등축정대가 증가되었다. Fig. 6은 순Al 및 Al-(1, 2, 3wt%)Cu 합금주괴의 등축정대에서 내부냉금 직경에 따른 평균 결정립의 크기의 변화를 나타낸 것이다. 모든 주조금속에서 내부냉금 직경이 12mm 까지 증가됨에 따라 평균결정립의 감소를 보였으며, 일정한 내부냉금 직경에서는 순Al, Al-1wt%Cu, Al-2wt%Cu 및 Al-3wt%Cu 합금의 순서로 Cu함량이 증가됨에 따라 평균 결정립의 크기는 감소되었다.

Photo. 2 및 Photo. 3은 각각 순Al 및 Al-3wt%Cu 합금주괴에서 내부냉금 표면으로부터 10mm 떨어진 부위의 미세조직을 관찰한 결과이다.

여기서 순Al 및 Al-3wt%Cu 합금 모두 내부냉금 직경의 증가에 따라 결정립이 미세화 되었다. 그러나 내부냉금 직경이 6 및 8mm의 경우 내부냉금에 의한 큰 냉각효과로 인해 결정립이 방향성을 나타내었다. Photo. 4의 Al-3wt%Cu합금의 수지상조직에서 이러한 방향성을 다시 확인할 수 있었다.

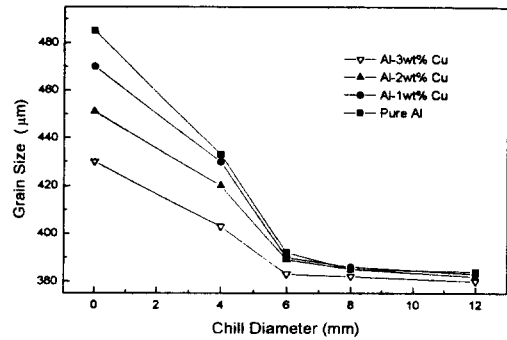


Fig. 6. The effect of internal chill diameter of pure Al and Al-(1,2,3wt%)Cu alloy on the grain size.

Fig. 7은 Al-(1, 2, 3wt%)Cu 합금에 대해 내부냉금 직경에 따른 DAS를 측정하여 나타낸 결과로 Fig. 6의 결과와 같이 내부냉금 직경의 증가에 따라 그리고 Cu함량이 증가됨에 따라 DAS가 감소하는 결과를 보이고 있다.

상기의 결과에서 95mm직경의 흑연주형 중심부에 설치된 내부냉금은 등축정대를 증가시키고, 평균 결정립 및 DAS를 감소시키는 역할을 하였음을 알 수 있다. 등축정의 생성은 조성적과냉, dendrite remelting, crystal separation 등의 이론들⁵⁾에 의해 설명되고 있고 일정 직경의 내부냉금에서 Cu함량에 따른 등축정대의 증가는 이러한 이론에 의해서 설명될 수 있다. 순Al 및 Al-(1, 2, 3wt%)Cu 합금에서 내부냉금 직경에 따른 등축정대의 변화를 Fig. 3의 내부냉금 직경에 따른 냉각속도의 변화와 관련지어 볼 때 냉각속도의 변화와 등축대의 변화가 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 냉각속도의 증가로 인해 생성된 등축정이 소멸되지 않고 생존된 비율의 증가되었기 때문이라 사려된다. 그러나 내부냉금 직경의 증가에 따른 등축정대의 증가 및 입자미세화 정도는 순Al금속이 다른 Al-Cu합금 금속보다 큰 것에 주목을 할 필요가 있다. 일반적으로 순금속은 등축정 생성이 어렵고, chill mold 사용 등에 의한 냉각속도의 증가시 주괴 전체가 주상정으로 되는 경우도 종종 발생된다. 이러한 순금속의 경우 내부냉금 직경 증가에 의한 냉각속도의 증가는 주상정 생성을 조장해야 하는데, 본 연구결과에서는 이와 반대로 등축정대의 현격한 증가를 보이고 있다. 이러한 결과는 등축정대의 증가가 내부냉금 사용에 따른 냉각속도의 증가에만 기인되는 것이 아니고 내부냉금의 용융시 부분적으로 내부냉금이 핵생성의 source로서의 역할을 하는데 기인되는 것으로 사료된다.

3-3 거시 및 미시적 편석조사

X-ray spectrometer를 이용하여 Al-(1, 2, 3wt%)Cu 합금의 거시적인 성분편석을 조사한 결과 내부냉금을 적용하지 않은 경우와 적용한 경우에 모두 거시적인 편석이 존재하지 않았다. 이는 주괴의 직경이 소구경(95mm ϕ)이라 응고시간이 짧았기 때문이라 사려된다. 주괴 직경이 대구경으로 갈수록 응고시간도 길어지고 이에 따른 거시적 성분 편석도 크게 되고, 이 경우 내부냉금 적용에 따른 거시적 편석의 감소를 확인할 수 있으리라 사려된다.

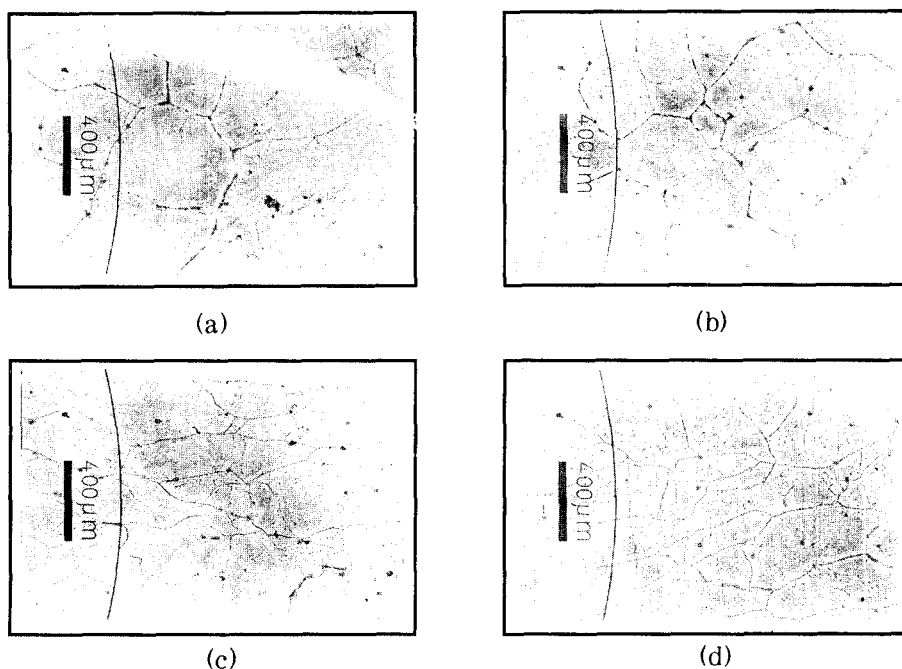


Photo. 2. The microstructures showing the grains of pure Al solidified (a) without an internal chill, (b) with a 4mm ϕ internal chill, (c) with a 6mm ϕ internal chill and (d) with a 8mm ϕ internal chill, at 10mm distance from the chill surface.

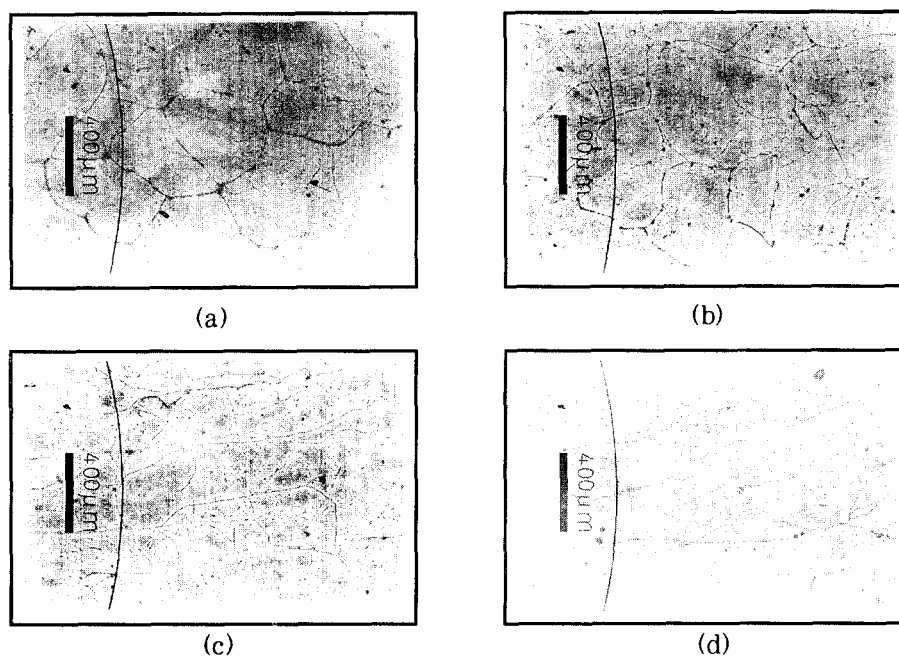


Photo. 3. The microstructures showing the grains of Al-3wt%Cu alloys solidified (a) without an internal chill, (b) with a 4mm ϕ internal chill, (c) with a 6mm ϕ internal chill and (d) with a 8mm ϕ internal chill, at 10mm distance from the chill surface.

Photo. 5(a-b)는 Al-3wt%Cu합금에서 내부냉금 사용 유무에 따른 미세성분분석을 내부냉금 표면으로부터 10mm 떨어진 부위에서 EDX분석 결과이다. Photo. 5에서 내부냉금을 사용하지 않은 경우(Photo. 5(a)) 측정위치별 Cu peak값이 심하게 변하고 있으나, 내부냉금을 사용한 경우(Photo. 5(b)) 측정 위치별 Cu peak값이 매우

균일하게 나타나 있어 내부냉금의 사용에 의해 미세성분분석의 감소가 있었음을 알 수 있다.

내부냉금 표면으로부터 20 및 30mm 떨어진 부위에서 EDX분석결과도 Photo. 5의 EDX분석결과와 일치되었으며, 이러한 결과는 내부냉금 사용에 의해 결정립미세화 및 DAS가 감소되는 데 기인된다 사려된다.

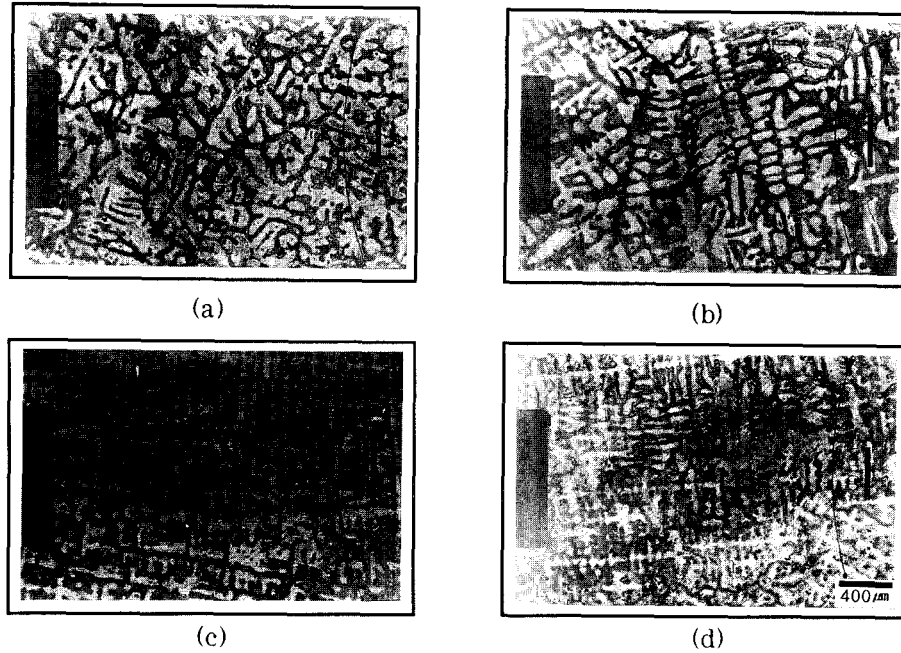


Photo. 4. The microstructures showing the dendrite growth of Al-3wt%Cu alloys solidified (a) without an internal chill, (b) with a 4mm ϕ internal chill, (c) with a 6mm ϕ internal chill and (d) with a 8mm ϕ internal chill, at 10mm distance from the chill surface.

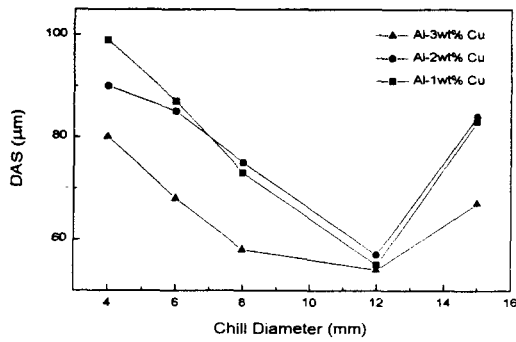


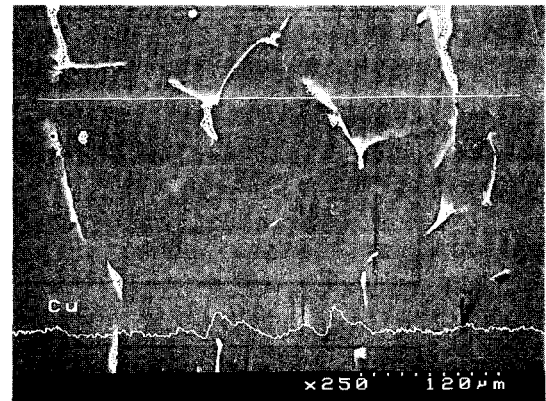
Fig. 7. The effect of internal chill diameter of Al-(1,2,3wt%)Cu alloy on the secondary dendrite arm spacing(DAS).

4. 결 론

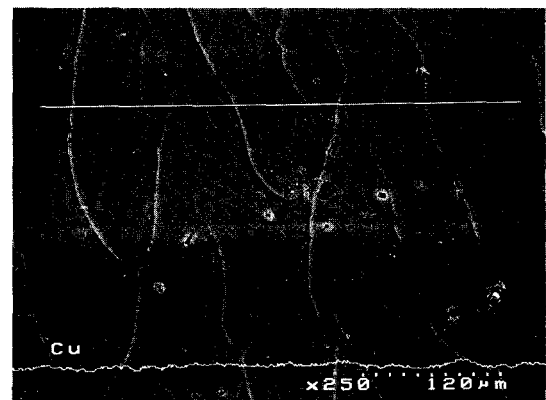
순Al 및 Al-(1, 2, 3wt%)Cu 합금 주괴 (빌렛형) 제조 시 내부냉금의 사용에 따른 응고속도, 응고조직 및 성분편석의 변화를 조사하여 내부냉금의 효과를 해석하고자 하였으며, 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1) 용해흡수열이 큰 순Al 및 Al-(1, 2, 3wt%)Cu 합금 주괴제조시 주괴 소재와 동일한 소재의 내부냉금을 사용함으로써 외부냉금에 비해 월등히 큰 냉각속도의 증가, 결정립미세화, DAS감소, 거시 및 미세성분편석 감소의 효과를 얻을 수 있었다. 이러한 결과는 지금까지 단순히 국부적 냉각속도 증가를 통한 수축공불량제거의 수단으로만 인식되어 왔던 내부냉금의 응용범위를 넓힐 수 있는 가능성을 보여준다.

2) 소정 직경의 주괴에 대해 과도한 직경의 내부냉금 사



(a)



(b)

Photo. 5. The EDX analysis for studying the microsegregation of Cu element in the Al-3wt%Cu alloy solidified (a) without an internal chill and (b) with a 8mm ϕ internal chill, respectively, at 10mm distance from the chill surface.

용은 주조시 내부냉금의 미용해를 발생시키며, 이로 인해 냉각속도, 결정립크기, DAS, 거시 및 미세성분편석에 대한 내부냉금의 효과를 현저히 감소시켰다. 순Al 및 Al-(1, 2, 3wt%)Cu 합금 주괴제조시 이러한 내부냉금 미용해에 의한 냉금효과 감소를 유발하지 않을 최대 $\frac{\text{주괴직경}}{\text{내부냉금직경}}$ 의 비는 750℃의 주입 온도 조건에서 약 8이다.

참 고 문 헌

1. 이종남 : 주조공학, 보성문화사, (1980), pp.75-77.
2. D. フルテンポール, D. ウェルツ : 輕金屬, **19**(1969), p.451.
3. E.E.Spear and G.R.Ardner : Modern Casting **43** (1963), p.321.
4. 홍준표, 박익민, 최정철 공역 : 주조용고, 반도출판사, (1992), p.18.
5. R.W.Cahn, P.Haasen : Physical Metallurgy (V.1), North-Holland 4th ed., (1996), pp.785-786.