

.....  
 論 文  
 .....

## 쌍롤 주조법에 의해 제조한 알루미늄 합금의 미세조직

박종우, 김희수, 백남익\*

### Microstructures of Twin Roll Cast Aluminum Alloys

Jong-Woo Park, Hee-Soo Kim, and Nam-Ik Baik\*

#### Abstract

Several aluminum based alloys were fabricated by a twin roll strip casting mill. As-cast microstructures and microsegregations of these aluminum alloys were investigated by means of optical microscope, scanning electron microscope and electron probe micro analysis. Clear distinction on microsegregation among the alloy systems was observed, that is, A1235 and A8011 alloys showed diffused segregation in the middle of the strip, while A3003 and A5086 alloys revealed a centerline segregation consisted of lamellar structure. Above center line segregation was resulted from enrichment of the alloying elements such as Mn, Fe, Cu, Si and eutectic reaction in central region of the alloy strip.

#### 1. 서 론

일반적으로 알루미늄 및 알루미늄 합금의 박판 제조는 반연속 주조법인 DC(direct chill casting)주조법[1]으로 주조시킨 slab을 압연하여 열간압연과 냉간압연을 거쳐 생산하고 있다. 그러나 용탕으로부터 직접 수 mm까지의 박판을 만드는 연속주조 방법을 응용하면 설비투자비, 에너지 소비율이 적고, 그리고 원료에 대한 제품의 비를 높힐 수 있으므로 최근에 많이 이용되고 있다[2]. Hunter Engineering법[3]과 Scal 3C법[4]은 대표적인 twin roll 용탕 압연법인데 이 방법으로 박판을 제조하게 되면 주조중 재료가 roll에 의해 강하게 접촉하게 되어 용탕의 응고수축에 따른 air gap이 형성되지 않고 기존의 DC 제조법에 의해 생산되는 것보다 냉각속도가 빠른 소재를 얻을 수 있다. 그러나 용탕 압연법에 의해 박판을 제조하게 되면 압연률에 의해 변형을

일으키게 되며 구조적으로 압연판의 중심부분에 편석이 생기기 쉬우며 표면은 롤 표면에 의한 표면결함도 생성될 소지가 있으며 심하면 edge crack이나 edge에 의한 tearing이 발생될 수도 있다.[5] 따라서 압연조건과 조업시에 세심한 제어가 요구되고 있다. 이러한 twin roll 용탕압연법에 의해 생산되는 재료는 순알루미늄 합금, Al-Mn계 합금[6], 또는 Al-Fe계 합금을 중심으로 많은 연구가 행해지고 있다. 그러나 이 방법은 지금까지 비교적 저합금계의 생산에 이용되어 각종 합금원소가 주조조직에 미치는 영향에 관한 연구는 많지 않으며 특히 고 마그네슘 합금에 대해서는 거의 연구된 바 없다. CC(continuous chill, 연속주조)법은 roll, belt, block 등으로 이루어진 장치를 사용하여 연속주조하는 방법으로 DC(direct chill casting)주조보다 최근에 개발된 방법이다. 본 연구에서 연속주조 방법으로 사용한 연속주조 설비는 프랑스 Pechiney사 제품으

한국과학기술연구원 금속연구부(Division of Metals, KIST, P.O.Bos 131, Cheongyang, Seoul 130-650)

\*선문대학교 공과대학 금속재료공학부(\*Department of Metallurgical Engineering, Sun Moon University, Asankun, Choongnam 336-840)

로 roll을 순환수로 냉각하는 수평 roll caster로서 일명 3C(continuous chill casting)법이라고도 불리운다.

따라서 본 연구에서는 연속주조법의 제조공정과 이 제조공정에 의해 생산된 여러가지 합금, 즉 Al-Mg계 합금을 중심으로 Al-Mn계와 기타 Al합금을 대상으로 각 합금의 응고조직 및 편석과 같은 응고특성에 대하여 조사, 검토하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 알루미늄 strip의 제조

본 실험에서 사용한 연속주조기는 수평 roll caster로서 개략적인 제조공정도는 Fig. 1과 같다. 그림에서 보는 바와같이 주요설비로는 용해로, 고온 유지로, 탈가스 설비, 주조기, coiler로 구성되어 있다. 용해에 사용된 금속은 고순도 Al (99.8% 이상)을 비롯하여 회수율을 감안해서 모합금을 구입하여 사용하였다. 성분은 경동식 용해로에서 조정되고 용탕을 탈가스 처리한 후 ceramic filter로 보내진다. 실험에 사용한 연속주조기의 냉각롤 크기는 960mm이고, 최대 coil 폭은 1800mm이고 판의 두께는 4~12mm이며, 롤의 선속도는 분당 1미터 정도이다.

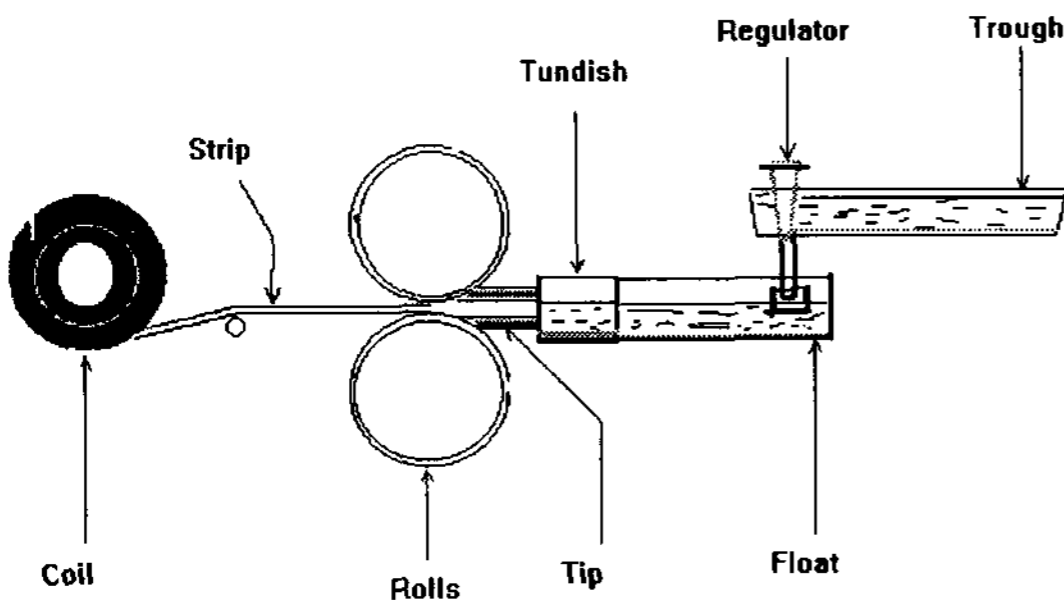


Fig. 1. Schematic configuration of continuous chill cast process.

Fig. 2는 연속주조기의 응고 영역을 도식적으로 나타낸 그림으로서, 표면 상태, 주조 조직 등에 큰 영향을 미치는 주요한 인자를 나타내고 있다.

Roll의 냉각 및 표면 상태는 strip의 형상과 표면 품질에 영향을 미치며, strip 두께, 중앙부의 거시 편석, 입계 편석, 결정립경 및 strip 표면의

줄모양 등은 응고 영역의 조건에 영향을 받는다. Roll 내부는 냉각수가 순환되어 응고 및 냉각속도가 매우 빠르므로 roll 출구에서 나오는 strip의 온도는 약 300°C였다.

실험에 사용한 A1235, 8011, 3003, 5052, 5086 합금들의 판 두께는 8mm로 일정하게 하였으며 그 화학성분을 Table 1에 나타내었다.

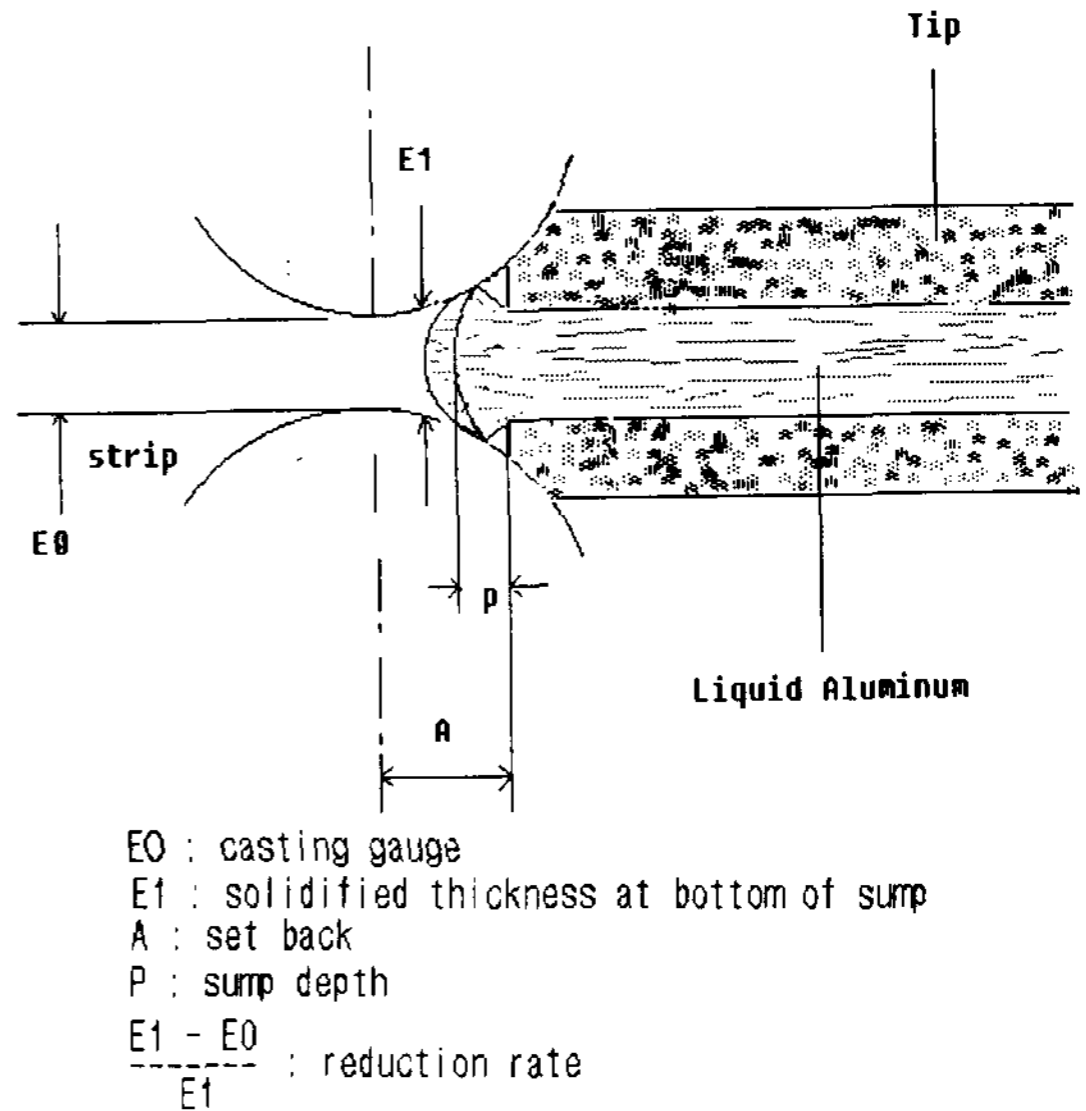


Fig. 2. Schematic diagram of a twin roll strip caster focussed on the solidification region.

Table 1. Chemical compositions of various strip casted alloys(weight %).

Alloy	Mg	Cu	Mn	Si	Fe	Cr	Al
A1235	-	0.05	-	0.65(Si+Fe)	-	-	rem.
A3003	0.09	0.15	1.13	0.19	0.60	0.01	rem.
A5052	2.43	0.03	0.10	0.16	0.50	0.20	rem.
A5086	3.67	-	0.28	0.05	0.06	0.05	rem.
A8011	-	0.008	0.004	0.726	0.885	-	rem.

### 2.2 미세조직 관찰 및 EDS분석

연속주조법에 의하여 제조된 합금은 roll과 접촉하는 외각부터 중심까지 다른 형태의 미세 조직이 나타나게 된다. 이러한 조직의 차이점을 조사하기 위하여 각 합금의 길이방향 단면을 연마 후 Kroll시약(중류수 92ml : 질산 6ml : 불산 2ml)으로 약 30초간 부식하였다.

또 연속 주조한 합금중 중앙부 편석이 관찰된 합금에 관하여 중앙부위에 있어서의 미소성분분

석을 하기 위해 가속전압이 20kV인 주사전자현미경의 EDS를 사용하여 중심선 편석부를 구성하고 있는 약 30μm의 공정조직을 중심으로 strip의 가운데 쪽 약 0.12mm 부분을 두께방향으로 선분석하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 알루미늄 시료의 미세조직

Photo 1은 A1235 합금과 A8011 합금의 미세조직을 strip 표면 부근부터 중심부까지 부위별로 나타낸 사진이다.

두 합금은 모두 표면 부근은 roll에 의한 강한 냉각으로 인해 매우 미세한 수지상(dendrite) 조직과 조밀하고 미세한 정출상을 보여준다. 이러한 조직은 표면에 가까운 부위에서는 주상정의 미세조직이고 내부로 갈수록 점차 성장하여 중심 부근은 냉각속도가 늦어져 조대한 등축상의 정출상과 수지상 조직을 보이지만 조대조직은 중심부에 국한되고 전반적으로 조직이 양호하다고 보여진다.

Photo 2는 A3003 합금과 A5086 합금의 미세조직을 부위별로 나타낸 것이다. A3003 합금

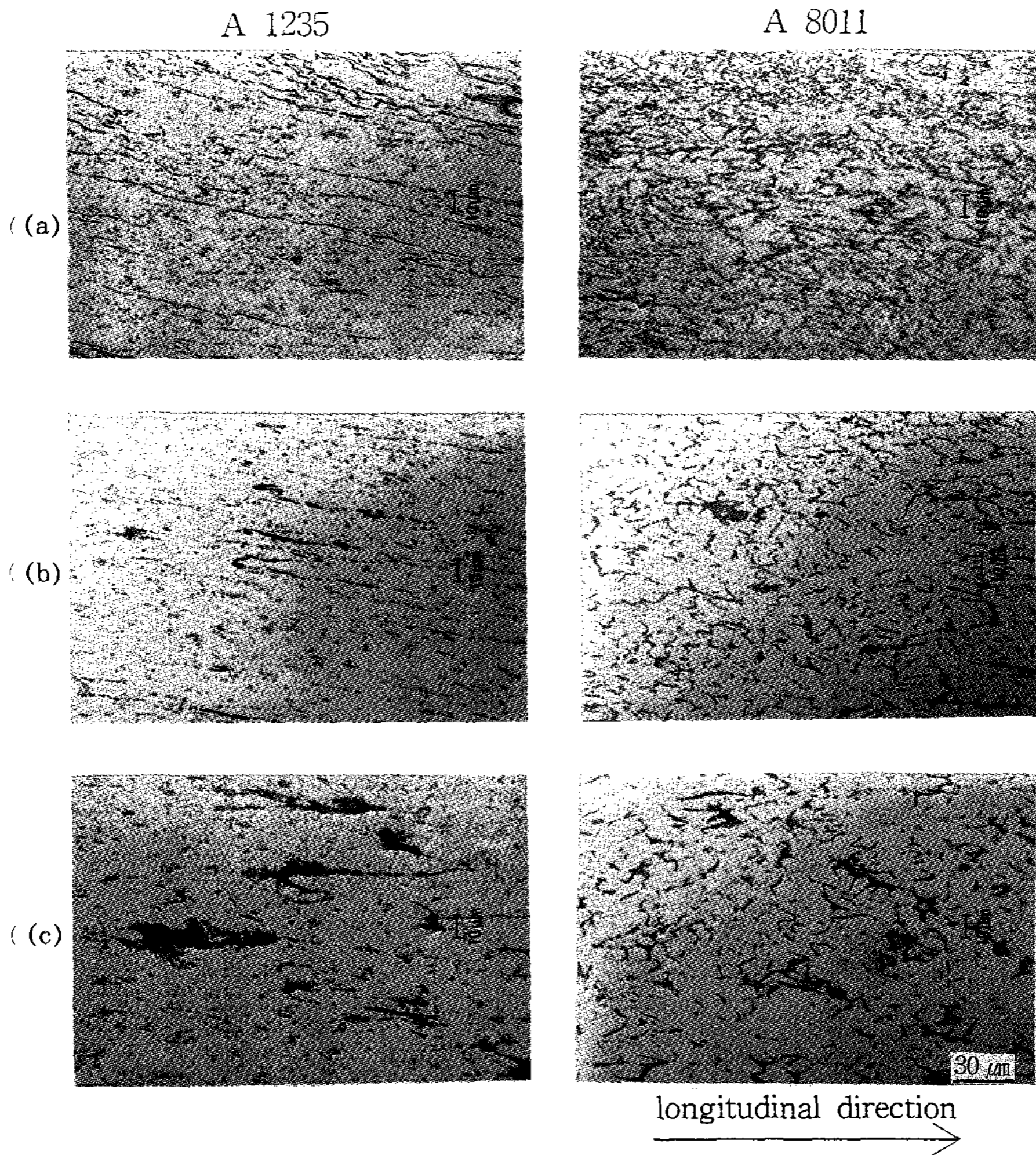


Photo 1. As-cast structures of longitudinal section of strip cast A 1235 A 8011 alloys.

- (a) near the strip surface
- (b) between the surface and center
- (c) center region

의 조직은 앞서 두 합금과 같이 표면 부근은 미세하고 중심으로 갈수록 점차 조대해지는 경향을 보인다. 그러나 A5086 합금은 다른 합금과는 달리 중심부의 조대화 현상이 없이 전반적으로 미세한 조직을 보여주고 있다.

수지상 조직은 응고 속도가 빨라질수록 미세해지며 보통 수지상 암 간격,  $D(\mu\text{m})$ 와 냉각속도,  $V(\text{C}/\text{초})$ 는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$D \times V^n = C$$

여기서  $n$ 과  $C$ 는 각 합금계에서 실험적으로 정해지는 상수이고 Al-0.25/0.55Fe 합금계의 경우 각각 0.33과 33.4이다.[7] 이 관계식과 조직사진

으로부터 구한 응고속도를 A1235와 A8011 합금에 대해서 구해 보았는데, 표면 부근은 100°C/초 이상, 중심부는 약 50°C/초 라고 추정되었다. 일반적으로 roll과 직접 접촉하는 금속의 표면부위는 응고 속도가 가장 빠르므로 이 부분의 수지상 조직은 다른 부분보다 미세하고[8] 내부로 들어갈수록 냉각효과가 감소하여 조직은 조대해진다. A1235, 8011, 3003, 5086 등의 주조조직이 내부로 갈수록 조대해지는 것은 이러한 원리로 설명할 수 있다. 그러나 주조 속도가 응고 속도와 일치하는 중심부분의 응고 속도도 매우 빠르므로[6] A5086에서와 같이 중심부가 미세

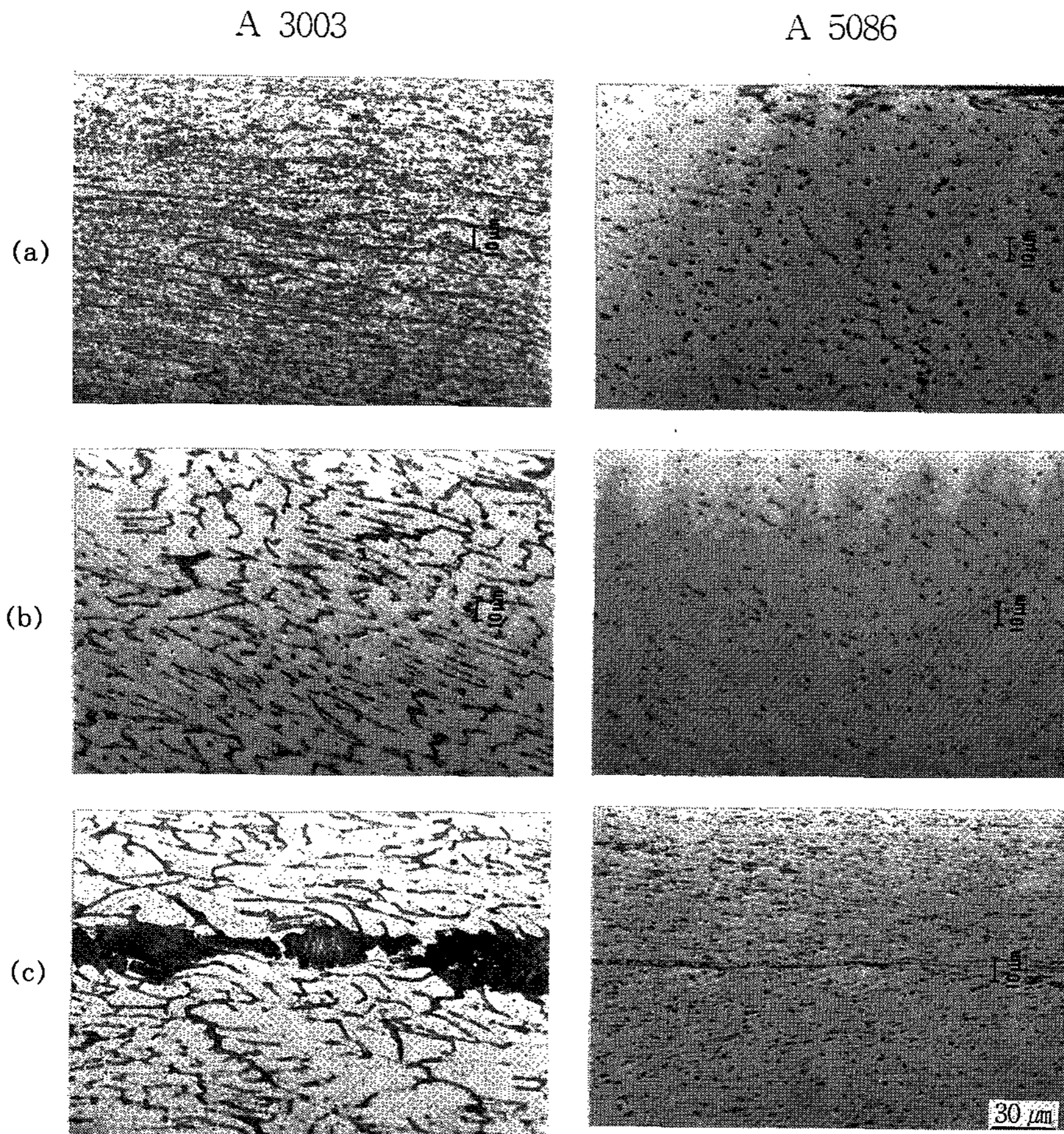


Photo 2. As-cast structures of longitudinal section of strip cast A 3003 and A 5086 alloys.

- (a) near the strip surface
- (b) between the surface and center
- (c) center region

한 조직을 갖기도 한다. 주조조직은 냉각효과 외에도 합금원소에 따른 수지상 형상의 차이, 응고 구간의 변화, 응고 계면의 형상 및 최종 응고시의 공정조성과 상분을 등 여러가지 변수의 영향을 받기 때문에 합금계에 따라 다른 양상을 나타낼 수 있다.

Photo 1과 Photo 2의 또 다른 특징으로서 모든 합금은 중심 부분에 정출물이 다른 부위보다 높은 밀도로 몰려있는 이른바 중심선 편석(center line segregation)[9] 볼 수 있다. 연속주조법은 일종의 가압응고 process로 가압에 의해 용질원소가 많은 용탕이 판재중심부에 몰려 중심선 편석의 원인이 된다고 사려된다[10]. 이러한 중심선 편석은 합금에 따라 그 양상이 달라져 A1235와 A8011처럼 넓게 분산된 형태와 A3003과 A5086처럼 중심부에 선모양으로 집중

된 형태의 두가지 유형으로 분류할 수 있다. 여기서는 전자를 A형, 후자를 B형이라 부르기로 한다.

합금에 따른 중심선 편석의 차이는 Photo 3에서 더욱 뚜렷하게 알 수 있다. 즉 A형의 A1235와 A8011은 뚜렷한 편석층이 없이 편석부위가 넓게 분산된 반면 B형의 A5052와 A5086은 편석이 중심부로 집중되어 뚜렷한 편석층이 나타난다.

B형의 중심선 편석이 입체적으로 어떠한 형상을 갖는지를 알기 위하여 가장 뚜렷한 중심선 편석을 보인 A3003 합금의 길이방향과 수직방향 단면을 조사하고 Photo 4에 나타내었다. 여기서 중심선 편석은 길이방향으로는 10-20 $\mu$ m 두께로 길게 연결되어 있지만 수직방향으로는 수백  $\mu$ m 씩 떨어진 불연속 분포를 갖는다. A5086의 경우

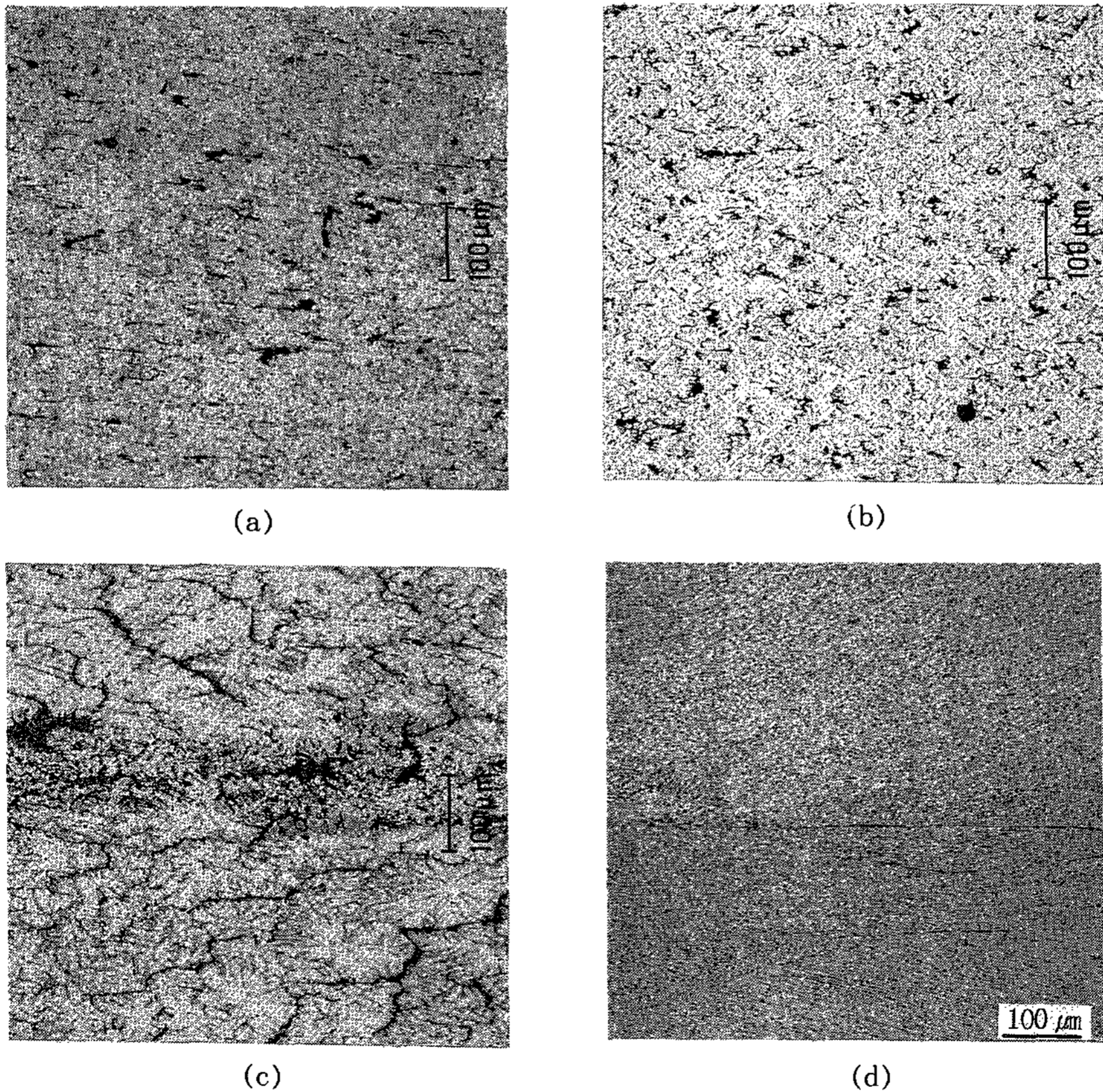
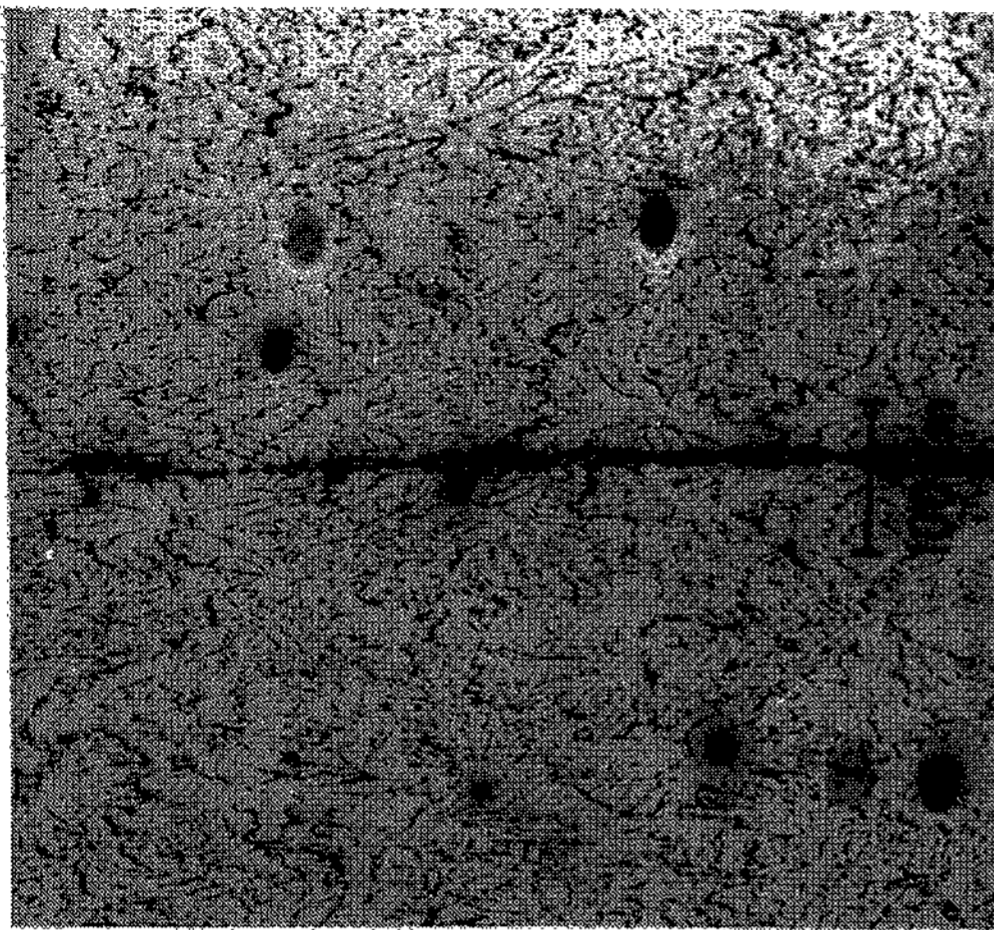
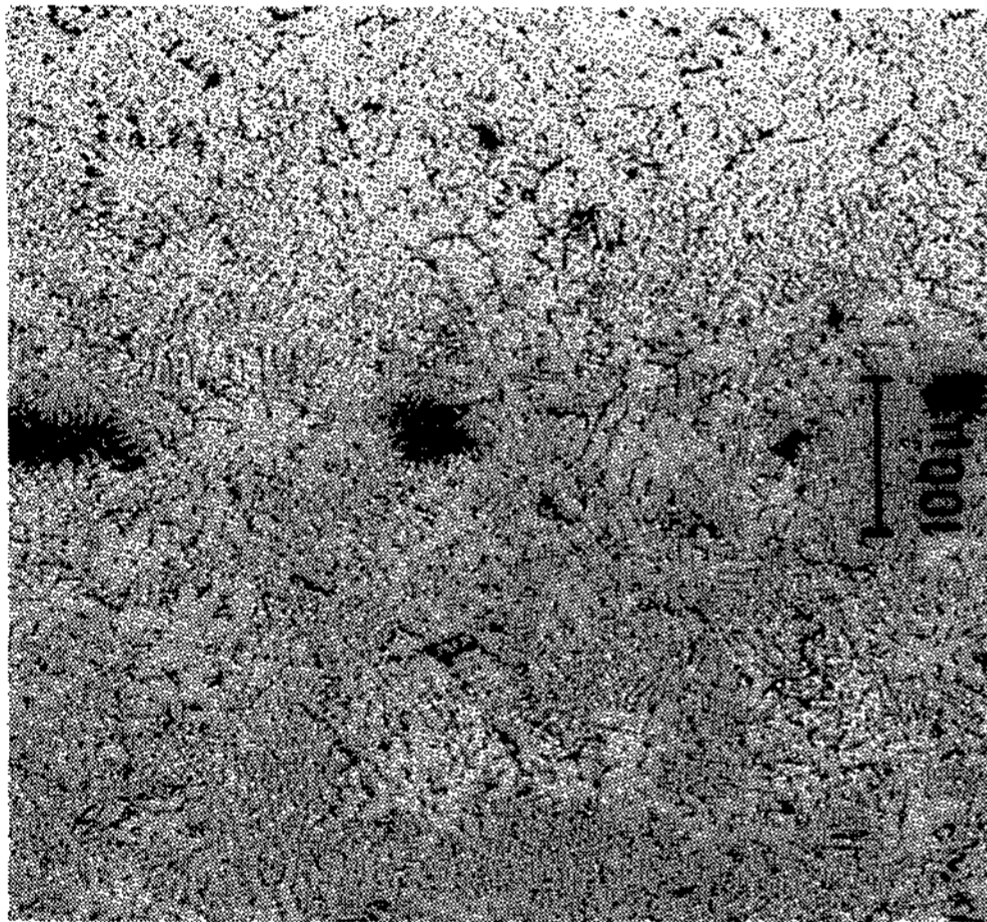


Photo 3. As-cast microstructures near the center line of (a) A 1235 (b) A 8011 (c) A 5052 and (d) A 5086 alloy



(a)



(b)

Photo 4. Center line segregation pattern of A 3003 alloy.

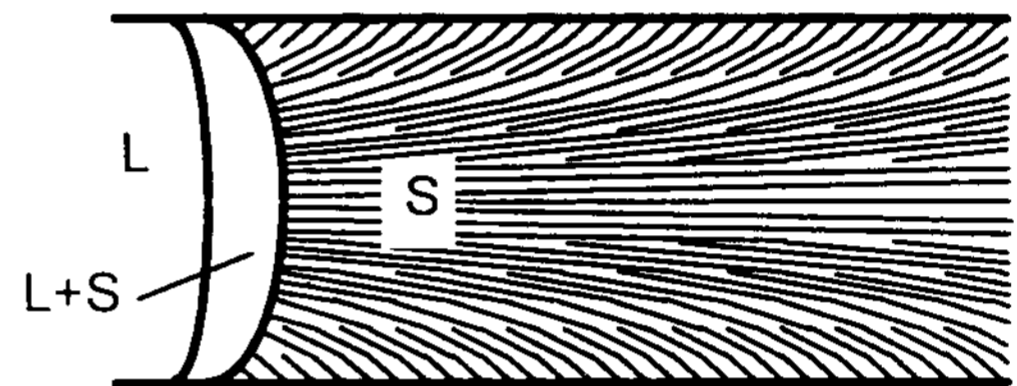
(a) longitudinal section and (b) transverse section.

도 압연수직방향으로는 중심선 편석이 토막토막 끊어진 불연속 선형의 분포를 갖는 것이 관찰되었다. 따라서 중심선 편석의 입체적인 구조는 여러개의 길다란 편석물이 압연방향으로 나란히 중심면에 배열된 형태를 갖는다고 볼 수 있다.

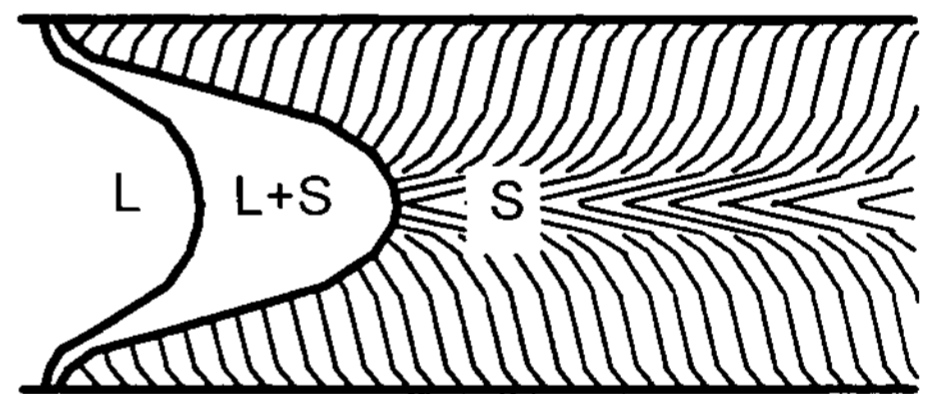
B형의 합금이 A형의 합금보다 중심선 편석이 더 심한 것은 이들 합금이 다량의 합금 원소를 함유하여 고액응고 구간이 더 넓기 때문이다. 응고구간이 넓어지면 중심부는 응고가 늦어지므로 연속주조시 액상-고상 계면이 더욱 예리하게 깊

어지고 중심선 편석은 더 뚜렷한 형태로 나타난다.

수지상의 성장 방향은 응고 계면에 수직이므로 수지상의 성장각도를 측정하면 응고계면의 형상을 추정할 수 있다. 즉 Fig. 3에 나타낸 것처럼 수지상정(경우에 따라서는 주상정 : columnar crystal)은 응고계면과 strip면이 수직에 가까우면 strip 표면과 작은 각도를 이루면서 거의 평행하게 성장하고 응고계면이 깊은 골을 형성하면 큰 각도로 성장한다. 전자는 용질원자의 농축부가 넓게 퍼진 A형이고, 후자는 농축부가 중심에 집중된 B형이다.



(a)



(b)

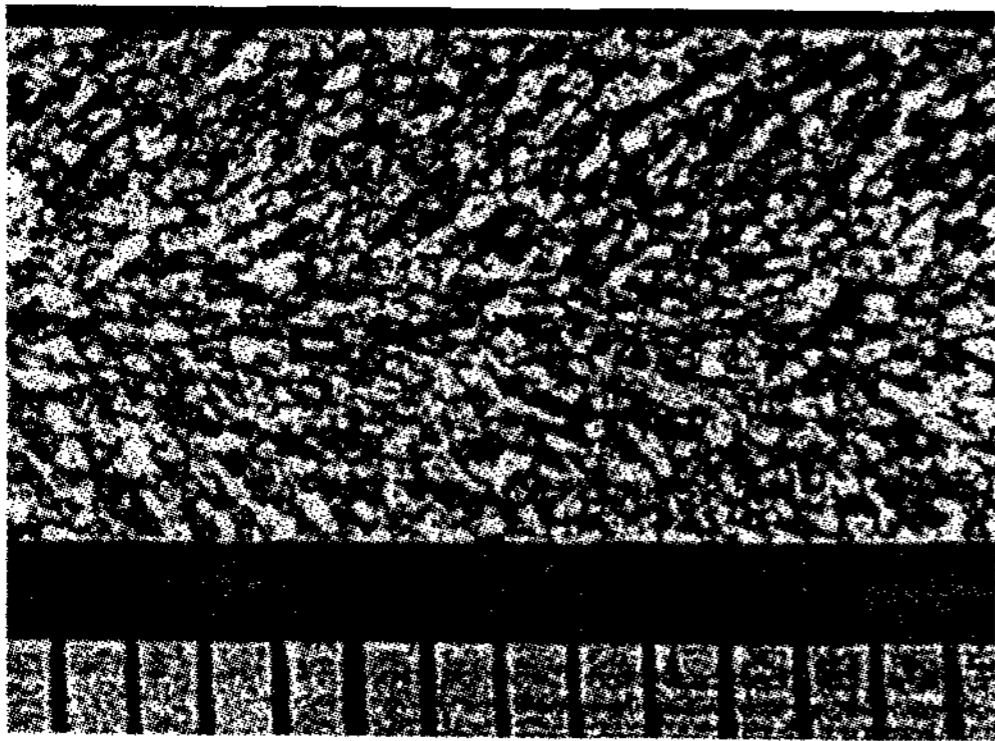
Fig. 3. Schematic profile of solid-liquid interface and columnar structure.

(a) Type A : near-planar interface

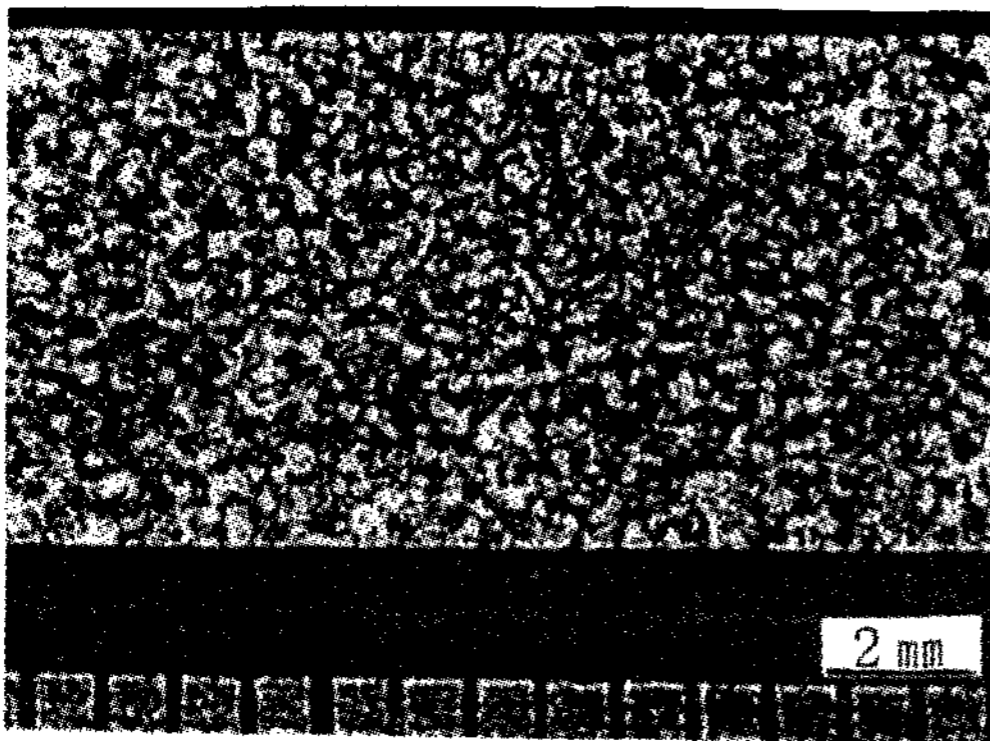
(b) Type B : bulged interface

Photo 5는 B형 편석형에 속하는 A5086 strip의 길이방향과 그 수직방향 단면을 조사한 거시조직이다. 등축형의 폭방향 단면조직과 막대형의 길이방향 단면조직으로부터 주상정은 윗표면으로부터 30-40°, 아랫표면으로부터 약 20-40°의 각도로 비스듬히 coil 길이방향으로 성장하여 응고시 중심부는 응고계면이 깊은 골을 형성하였음을 알 수 있다. 이 결과는 응고계면의 형상이 편석 형태와 깊은 관련이 있음을 잘 입증하고 있다.

Table 2는 각 합금의 미세조직 사진으로부터 수지상의 성장각도를 측정하여 정리한 것이다.



(a)



(b)

Photo 5. Macrostructure of a strip casted A 5086 alloy (a) longitudinal section and (b) transverse section.

Table 2. Angles between the strip top surface and dendrite growth direction of various alloys.

Type	Alloy	near top surface	between top surface and center line
A	A1235	8-12°	6-10°
	A8011	8-10°	12-16°
B	A3003	8-12°	15-22°
	A5052	15-18°	22-30°
	A5086	20-30°	28-32°

이 표로부터 B형은 A형보다 수지상의 성장각도가 훨씬 더 크며 최대각도가 약 20°를 넘어서면 A형이 B형으로 바뀌는 것을 알 수 있다. 이 결과는 중심선 편석이 수지상의 성장각도 다시 말해 응고계면의 형상과 직접적인 관련이 있음을 입증한다. 즉 앞서 언급한 것처럼 B형은 넓은

응고구간으로 인해 응고계면이 깊은 골을 형성하여 최종 응고부위인 중심부에 용질원자가 농축된 결과 중심부에 편석층을 형성한다.

### 3.2 Strip 편석부위에 있어서의 미소성분분석

연속주조에 의해 제조한 Al 합금은 합금의 응고속도, 응고조직, 용질농도에 따른 고상 및 액상의 용질 재분배등의 결과로 연속주조한 소재의 중심부위로 편석이 되기 쉽다. 중심편석이 생성되는 구동력으로는 주로 응고수축의 영향을 들 수 있으며[11] Fredriksson등[12]은 응고 수축보다는 응고완료 직전의 중심부와 표면 응고층과의 열수축 차이에 기인한다고 하였다.

알루미늄 연속주조로 제조한 박판중에서 중앙 편석이 또렷한 A3003, A5052, A5086 합금에 대해서 SEM의 EDS 분석을 실시하였다. Photo 6은 A3003, A5052, A5086 합금에 대한 EPMA 분석결과를 한눈에 파악할 수 있도록 line profile한 것을 나타내고 있다.

Table 3은 각 합금의 중앙선 편석 부위에 대한 미소 성분분석 결과를 나타낸 것이다. 중앙선 부위 분석치는 두 곳 이상 포인트를 분석하여 평균치를 나타낸 것이고 기지는 중앙선 부위에서 떨어진 곳에 있는 넓은 부위를 분석한 결과이다.

이 결과를 살펴보면 합금에 따라 편석되는 성분원소가 상이하였는데, A3003 합금에서는 거의 모든 원소의 편석이 두드러졌으며, 특히 Fe와 Cu의 정편석이 심하게 나타났다. A5052 합금에서는 Mn 원소를 제외한 모든 원소가 중앙부위에 편석되었으며, Table 3에서 보듯이 Mg원소는 거의 3배, Si원소는 기지에 0.16%가 함유된 것에 비해 중앙 편석선 부위에서는 2.86% 정편

Table 3. Chemical composition near center line of strip casted alloys(wt%).

alloy element	A3003		A5052		A5086	
	center line	matrix	center line	matrix	center line	matrix
Fe	4.4	0.6	2.7	0.5	-	-
Si	0.6	0.2	2.9	0.2	8.9	0.1
Mg	-	-	7.9	2.4	4.9	3.7
Mn	2.4	1.1	0.1	0.1	0.3	0.3
Cr	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.1
Cu	1.1	0.2	0.5	0.0	0.0	0.0

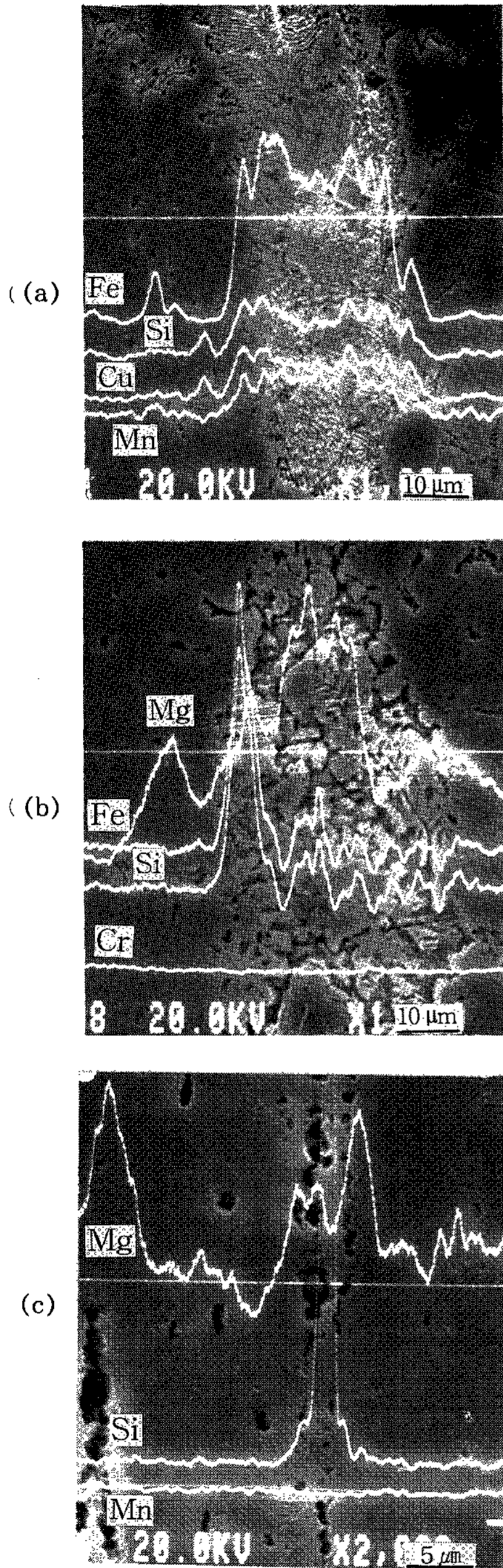


Photo 6. Line scanning concentration profile of EPMA analysis of the center line segregation  
 (a) A 3003 (b) A 5052 and (c) A 5086 alloy

석되어 있었다. 또 미소량이 함유된 Cu성분도 편석이 심하게 나타났다.

또 A5086 합금에서는 중앙선 편석부위가 다른 합금계에 비해 매우 좁게 불연속선으로 나타났다. 이 합금은 모재 중 Si 함량이 0.05% 함유하고 있는데 Photo 6(c)의 중앙부위 중 검게 보이는 부위에서는 Si이 100배 이상 정편석된 8.91%를 함유하고 있었다.

#### 4. 결 론

1) 쌍롤구조법으로 제조한 합금의 구조조직은 표면 부위가 미세한 수지상(dendrite)조직과 조밀하고 미세한 정출상을 보이지만 내부로 갈수록 점차 조대하게 나타났다.

2) 쌍롤구조 조직의 거시편석은 주로 strip의 중심부에서 나타났다. 편석의 형태는 A1235와 A8011 등 저합금계에서는 넓게 분산된 반면 A3003, A5086 등 고합금계에서는 중심면에 길다란 선형으로 집중되는 경향을 보였다.

3) 수지상은 strip면과 일정한 각도를 이루면서 성장하였으며, 이 각도가 클수록 편석층이 중심부로 집중되는 경향을 나타내어 최대각도가 20° 이상이면 뚜렷한 편석층을 형성하였다.

4) 중앙선 편석이 나타난 합금계에 대해 박판 중앙부위의 미소성분 분석을 실시한 결과, A3003 합금에서는 Fe, Si, Cu 등의 원소가 저용점의 공정반응을 유발하여 lamellar 조직을 생성함으로써 발생하였다.

5) A5086합금은 합금량이 많음에도 불구하고 다른 합금에 비해 전반적으로 조직이 미세하였으며 특히 중심부에는 매우 미세한 수지상 조직과 구형에 가까운 미소 편석물을 나타내었다.

6) A5052 합금에서는 Fe, Si, Mg, Cu 원소가 편석되었는데 Si은 거의 18배가 정편석되었다. 같은 계열의 A5086 합금에서는 Mg 원소가 균일하게 분포되었으나 Si원소는 거의 공정조성에 가깝게 심하게 정편석되었다.

#### 참 고 문 헌

[ 1 ] Kishori Lal and J. Lakner : Light Metal Age, 48 10 (1990) 23



- [ 2 ] A. I. Nussbaum : Light Metal Age, 49 4 (1991) 8
- [ 3 ] G. Vassily : Light Metal Age, 33 10 (1975) 5
- [ 4 ] P. Crouzet : Light Metal Age, 33 10 (1975) 17
- [ 5 ] H. Westengen, K. Nes : Light Metals, TMS-AIME, (1984) 1111
- [ 6 ] E. Nes, Blindern, and S. Slevolden, Havik : Aluminium 55 1 (1979) 319
- [ 7 ] 三木功, 小菅張弓, 長浜勝介 : 輕金屬, 25 (1975) 1-9
- [ 8 ] D. Altenpohl and D. Uelze : Metals and Materials, Feb. (1971) 65
- [ 9 ] I. Jin, L. Morris and J. Hunt : Light Metals, TMS-AIME, (1982) 873
- [10] 渡邊良夫, 森山勉, 宇野照生 : 住友輕金屬技報, 33 1 (1992) 1
- [11] R. Mehrabian : Metall. Trans., 1 (1970) 1209
- [12] H. Fredriksson : Scan. J. of Metall, 12 (1983) 3

### 미국 주조공학회 강좌

- Plastic Pattern Materials Technology Workshop :  
'96. 4. 30~5. 2(3일간) 매일 09:00~16:00시  
미주조공학회 기술연구소(Des Plaines, Illinois)
- Nonferrous Melting Technology & Practices :  
'96. 4. 30~31(2일간) 매일 09:00~16:00시  
미주조공학회 기술연구소(Des Plaines, Illinois)
- Gating & Riser Design :  
'96. 5. 14~15(2일간) 매일 09:00~16:00시  
Ramada-Yankee Drummer Inn(Auburn, Massachusetts)
- Electrical Equipment & Furnace Maintenance :  
'96. 5. 14~16(3일간) 매일 09:00~16:00시  
Drawbridge Estate(Ft. Mitchell, Kentucky)
- Gating & Riser Design :  
'96. 5. 20~23(3일간) 매일 09:00~16:00시  
미주조공학회 기술연구소(Des Plaines, Illinois)