

기술자료

# 급냉응고법에 의한 스트립 제조기술

박원욱

## Strip-Making Technology via Rapid Solidification

Won-Wook Park

### 1. 서 론

용융된 금속을 열전도도가 높은 매체를 통해 초당 약 백만 °C의 빠른 속도로 냉각시킴으로써 비평형상 재료를 제조하는 방법을 급냉응고법이라 하며, 이 중에서 특히 두께가 얇은 strip을 얻는 방법으로 단롤법(single roll method)이 많이 활용되고 있다. 단롤법이란 고속회전하고 있는 롤의 표면에 용융금속을 분사시키고, 롤 위에서 급냉응고시켜 박대(thin strip)를 얻는 방법으로서, 이 단롤법을 이용하여 처음 얻을 수 있던 박대는 판폭이 겨우 수 mm이며, 판 두께가 약 수 십  $\mu\text{m}$  정도였다. 광폭의 박대는 PFC(Planar Flow Casting)법이라고 불리는 새로운 주조방법이 개발됨으로써 얻어졌으며, 현재는 미국의 Allied Signal Inc. 등에서 판폭이 약 200 mm 이상, 판 두께가 30  $\mu\text{m}$  정도인 아몰퍼스(비정질) 박대가 생산되고 있다. 아몰퍼스 합금 및 박대의 이용에 대해서는 지금까지 여러 분야에서 검토되어, 변압기 및 전자기기부품용 비정질 자성용 박대, 브레이징용 Ni 및 Cu계 접합박대, 센서 및 차폐재료 등에서 실용화되어 있으며 그 수요가 점증하는 추세에 있다. 따라서, 본고에서는 시장수요에 부응하고 응용분야의 다양화를 위하여, 광폭의 박대의 제조방법과 아울러 두께가 100  $\mu\text{m}$  정도인 thick strip의 제조방법에 대해 소개하였다.

### 2. Planar Flow Casting(PFC)법에 의한 박대 제조

Planar Flow Casting (PFC)법은 박대를 용융금속으로부터 직접 제조하는 기술로서, crucible tip의 구멍을 긴 직사각형의 슬릿(slit)형으로 가공한 후 회전하는 롤과 tip이 거의 밀착한 상태에서 용융금속을 분사

하는 방법이다. 이 경우 제조되는 리본의 폭은 약 2 inch 이상 가능하며 슬릿길 이와 거의 같은 상태로 유지된다. 이 방법은 단롤법 중 crucible tip과 롤과의 간격이 상당히 큰 상태에서 구형의 구멍을 통하여 용융 금속을 분사시켜 약 3~4 mm 폭의 리본을 제조하는 CBMS(Chill Block Melt Spinning)법을 개조한 것으로서, 실험실에서는 합금의 용해시 회전롤과 crucible의 간격을 크게 유지시켰다가 용융금속의 분사시에만 간격을 줄이도록 고안한 장치를 사용하고 있다. 그림 1은 스트립 제조장치의 개략도를 나타낸 것으로서, melt puddle(롤 표면위에 형성된 응고전의 용탕 웅덩이)이 CBMS법에서는 롤 표면위로의 용탕분사량과 롤 회전속도에 의해 주로 조절되지만 PFC법에서는 용융금속의 crucible tip과 롤사이의 간격에 의해 지지된다. 따라서, 응고된 스트립의 윗 표면은 CBMS의 경우 자유 응고된 표면이지만 PFC법에서는 tip의 표면에 의해 리본 윗표면의 상태가 결정된다. 이에 비해 실제 조업에서는 crucible외에 턴디쉬를 사용하여 스트립이 연속으로 제조되며, 이때 턴디쉬 내의 용융금속의 비중에 따라 분사압력이 일정하도록 조절된다.

일반적으로 PFC법으로 광폭비정질을 제조하기 위해서는 다음의 3가지 사항이 중요하다.

- 1) crucible의 노즐설계
- 2) 롤의 회전속도와 용융금속의 분사량제어
- 3) 노즐과 롤과의 간격조절

위의 공정변수들이 잘 조절될 경우에는 용융금속의 분사시 melt puddle이 안정해지고 리본의 특성제어가 가능해진다. 그러나 각 공정변수들은 상호 유기적인 관계를 가지고 있으므로 최적조건을 잡기 위해서는 전체적인 조업조건들의 각 영향을 파악해야 하며, 이

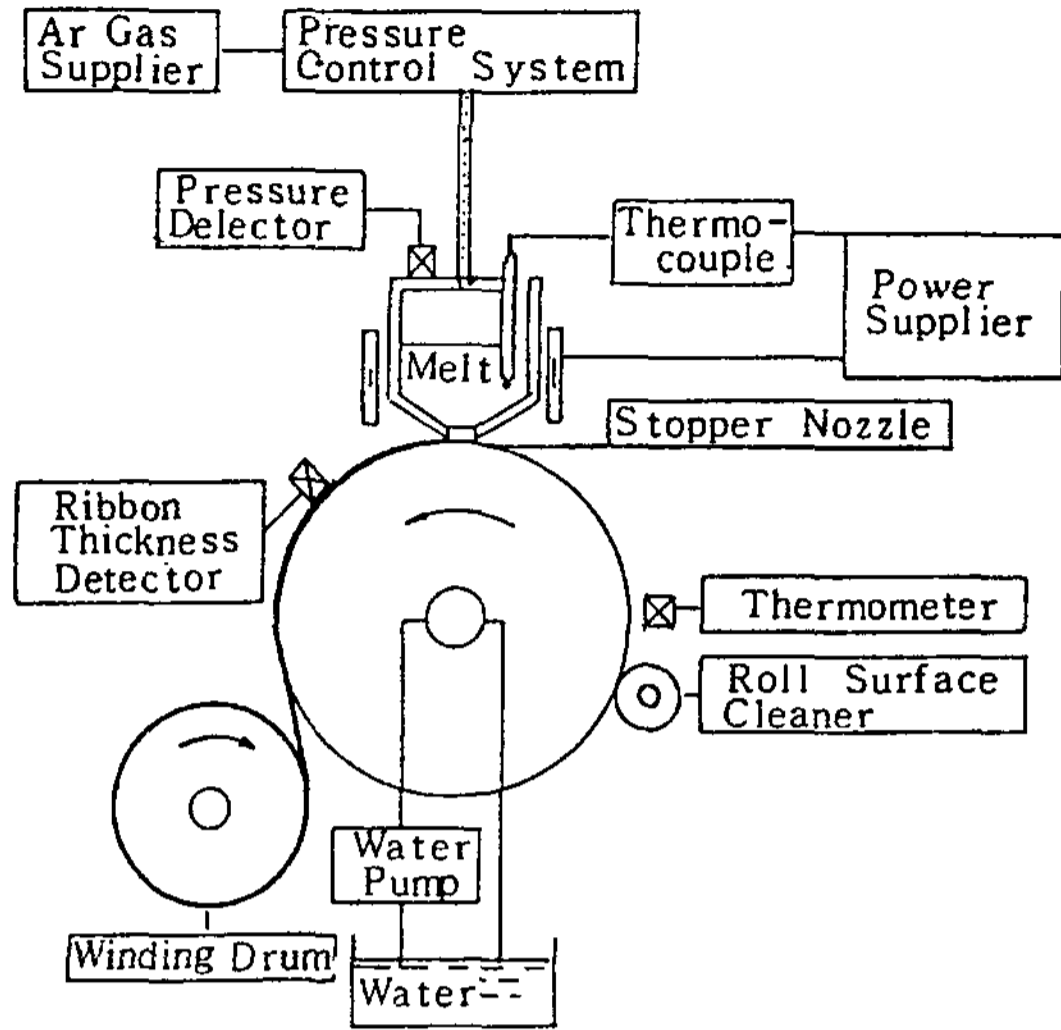


그림 1. 스트립제조장치 개략도.

에 따른 이론적 정립이 수반되어야 한다.

그림 2는 PFC법으로 리본이 제조될 때의 노즐팁의 형상과 롤과의 관계를 나타낸 것으로서, melt puddle의 안정화가 스트립제조에 있어 중요한 역할을 한다. 노즐 슬릿의 폭 (a)는 용융금속의 양과 흐름을 조절하게 되므로 응고되는 리본의 양과 일치하도록 결정해야 하며, 롤의 회전속도는 균일한 두께의 비정질박막이 얻어지도록 정해야 한다. 또한, 노즐 팁의 1st lip과 2nd lip의 두께는 용융금속의 안정에 큰 영향을 미치는 요소이다. 1st lip이 너무 얇으면 lip이 용융금속을 지지해 주지 못하므로 분사시 용융금속이 1st lip 방향으로 흘러나갈 염려가 있으며 너무 두꺼우면 off-cent-

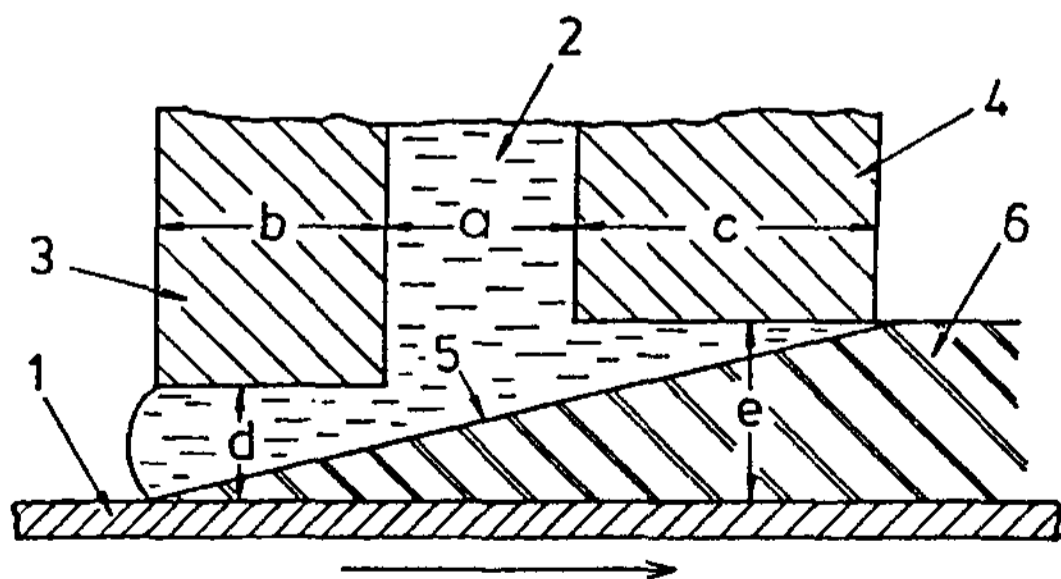


그림 2. 노즐팁형상과 롤 표면과의 용탕응고관계.

1. Cu-Be chill substrate (moving roll), 2. 용융된 금속, 3. 1st lip 4. 2nd lip, 5. 응고계면, 6. 응고된 리본, a: slit의 폭, b: Nozzle tip의 1st lip 두께, c: Nozzle tip의 2nd lip 두께, d: 1st lip과 롤과의 gap, e: 2nd lip과 롤과의 gap.

er mounting (노즐을 롤 정점으로부터 앞부분에 위치시켜 용탕의 분사각도를 조절하는 방법)을 택할 경우 노즐팁과 롤과의 간격을 줄일 수 없는 단점이 생기므로 lip의 두께는 슬릿폭의 1.5~3배가 적합하다. 2nd lip에 있어서는 두께가 너무 얇으면 역시 용융금속을 지지해 주지 못하고 응고된 리본의 윗면의 표면상태를 조절하지 못하게 되며, 너무 두꺼우면 그림 2의 응고계면(5)와 2nd lip이 겹치게 되어 리본제조시 tip의 심한 마모현상이 발생하게 된다. 한편, 노즐팁과 롤의 간격에 있어서는 간격이 리본두께보다 작을 경우에는 응고계면과 노즐사이에 마찰이 생기고, 너무 크면 용융금속의 흐름을 조절하기 어렵게 된다. 또한 용융금속의 흐르는 속도는 2nd lip과 응고된 리본사이의 점성유동에 의해 주로 결정되며 슬릿폭에 의해 주로 결정되는 것은 아니다.

PFC법의 성공은 용융금속이 롤의 표면에 완전히 접촉(wetting)되는 것을 전제로 하고 있는데, 용융금속의 얇은 층은 롤의 표면과 완전히 접촉되지 않으므로 상업적으로 유용하지 않은 구멍이 많이 포함된 스트립이 제조된다. 이러한 현상은 진공이외의 분위기, 예를 들어 Ar, N<sub>2</sub> 또는 공기중에서 자주 발생되며 롤의 높은 회전속도에 의해 리본제조에 악영향을 미칠 수 있다. 일반적으로 진공에서 작업할 때에는 용탕과 롤표면과의 접촉이 좋아져서 냉각속도가 증가하게 된다. 그러나, 진공도가 너무 높은 경우에는 롤표면에 스트립이 달라붙을 우려가 있으므로 적당한 진공도를 유지하여야 한다. 그림 3은 PFC법으로 제조된 두께 약 30 μm의 비정질 스트립을 보여주고 있다.



그림 3. PFC법으로 제조된 비정질 스트립.

### 3. 박대의 광폭화 방안

PFC법으로 얻어지는 광폭스트립에 있어 용탕의 안정한 흐름과 제어를 위해서는 다공노즐을 사용하는 것이 매우 유리하다. 특히 현재 생산되는 폭 20 cm 이상의 스트립은 단일 슬릿 모양의 노즐로는 안정한 스트립제조가 어렵다. 대량생산에 있어 다공노즐을 이용해 PFC법에서와 같은 평평한 박대를 얻기 위해서는, 노즐 슬릿의 형상과 개수 및 간격 등이 최적화되어야 한다. 퍼들의 형상을 안정시키기 위해서는 슬릿에서 분출하는 용융시료의 양을 박대의 판폭방향에서 가능한 한 균일하게 하는 것이 중요하다. 이 점에서, 예를 들어 그림 4에 나타낸 것 같은 슬릿형상을 가지는 다공노즐이 유효하다. 결국, 이러한 슬릿을 사용하면 퍼들 일체화에 악영향을 미치지 않고, 용융시료의 분출량을 박대의 판폭방향에서 균일하게 유지할 수 있기 때문이다. 그림 4에 나타내었듯이 노즐슬릿의 형상에 있어서는, 슬릿 형태의 중요요소로써 새롭게 슬릿의 경사  $\alpha$ 가 더해진다. 각종의 요소 중 슬릿의 물 회전방향의 길이  $a$ 와 슬릿의 경사  $\alpha$ 를 변화시킨 각종 노즐을 이용한 주조실험에 의하면, 박대의 두께와 함께 박대의 자유표면에서의 요철 정도에 차이가 나는 것이 발견된다. 따라서, 균일한 두께의 박대를 얻기 위해서는 그림 4의  $a, b, c$ 와  $\alpha$  및  $L$ 의 길이를 적당히 조절하는 것이 중요하다.

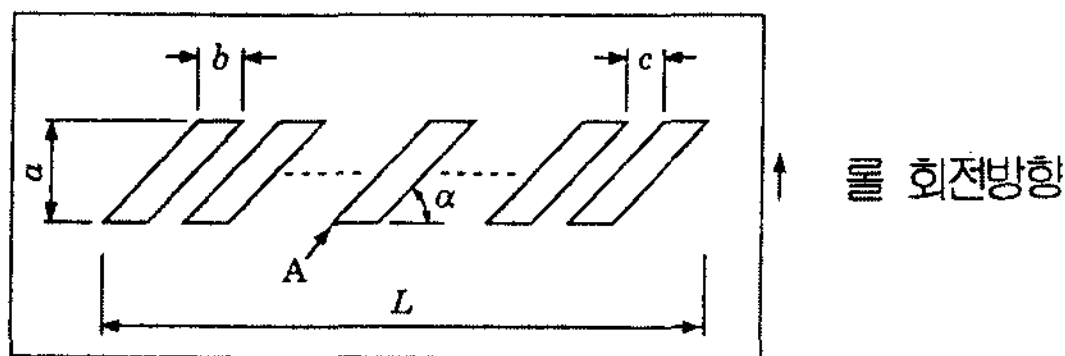


그림 4. 광폭의 스트립을 제조하기 위한 노즐 틱 형상.  
a,b,c: slit의 치수 및 간격,  $\alpha$ : slit의 경사도, L: slit의 전체길이

### 4. Thick Strip 제조

아몰퍼스 박대를 100  $\mu\text{m}$  정도의 두께로 제조하기 위한 주조방법에서는 그림 5에 나타내었듯이 멀티슬릿 노즐을 이용하는 것이 유리하다. 멀티슬릿 노즐은 같은 길이의 여러 개 슬릿을 작은 간격으로 배열한 노즐이다. 이러한 노즐을 이용하는 멀티슬릿법에서는 PFC법에 비해 새로 2개의 제조요소가 더해진다. 그것

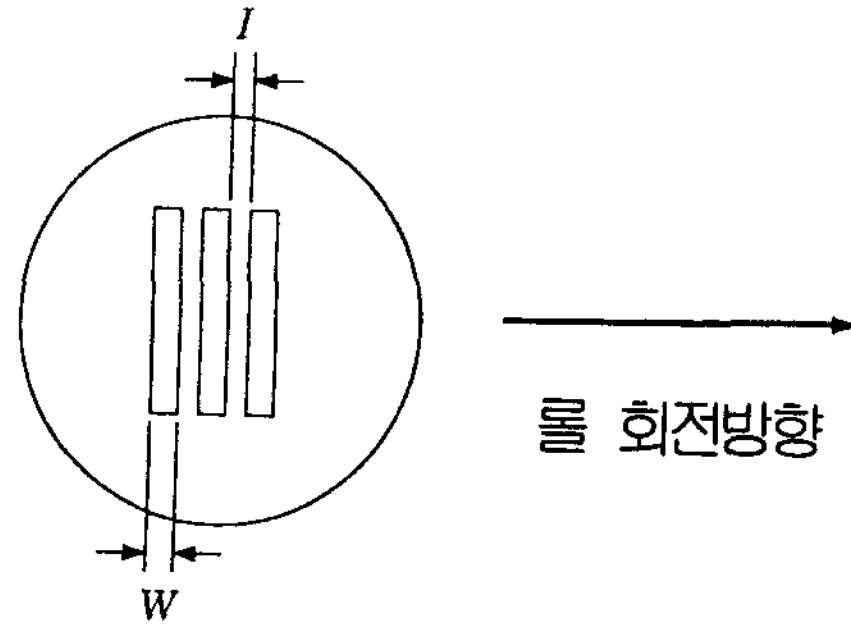


그림 5. Thick Strip 제조를 위한 멀티슬릿의 모식도.  
I: 노즐의 slit 폭, W: Multislit의 간격

은 ① 서로 이웃하는 슬릿의 간격과 ② 슬릿의 총 개수이다. 이웃하는 슬릿의 간격은 냉각속도에 영향을 주는 중요요소이며, 슬릿의 총개수(다중도)는 박대의 판 두께에 관한 인자이다. 비정질이 형성되는 합금의 경우 슬릿간격에 따라 실험한 X선 회절(回折)결과에 의하면, 박대의 물표면은 슬릿 간격이 2 mm 이하인 때 아몰퍼스 구조를 갖게되지만, 3 mm가 되면 예리한 결정립 피크가 나타나고, 4 mm에서는 비정질패턴은 거의 없어져 예리하고 큰 피크만 나오게 된다. 한편 자유표면은 물 측면만큼 현저하진 않지만, 슬릿 간격 4 mm에서 결정화된 피크들이 발견된다. 이와 같이, 슬릿 간격은 냉각속도를 결정하는 중요한 요소이므로, 합금의 종류와 슬릿 폭 등에 대해 적절한 범위를

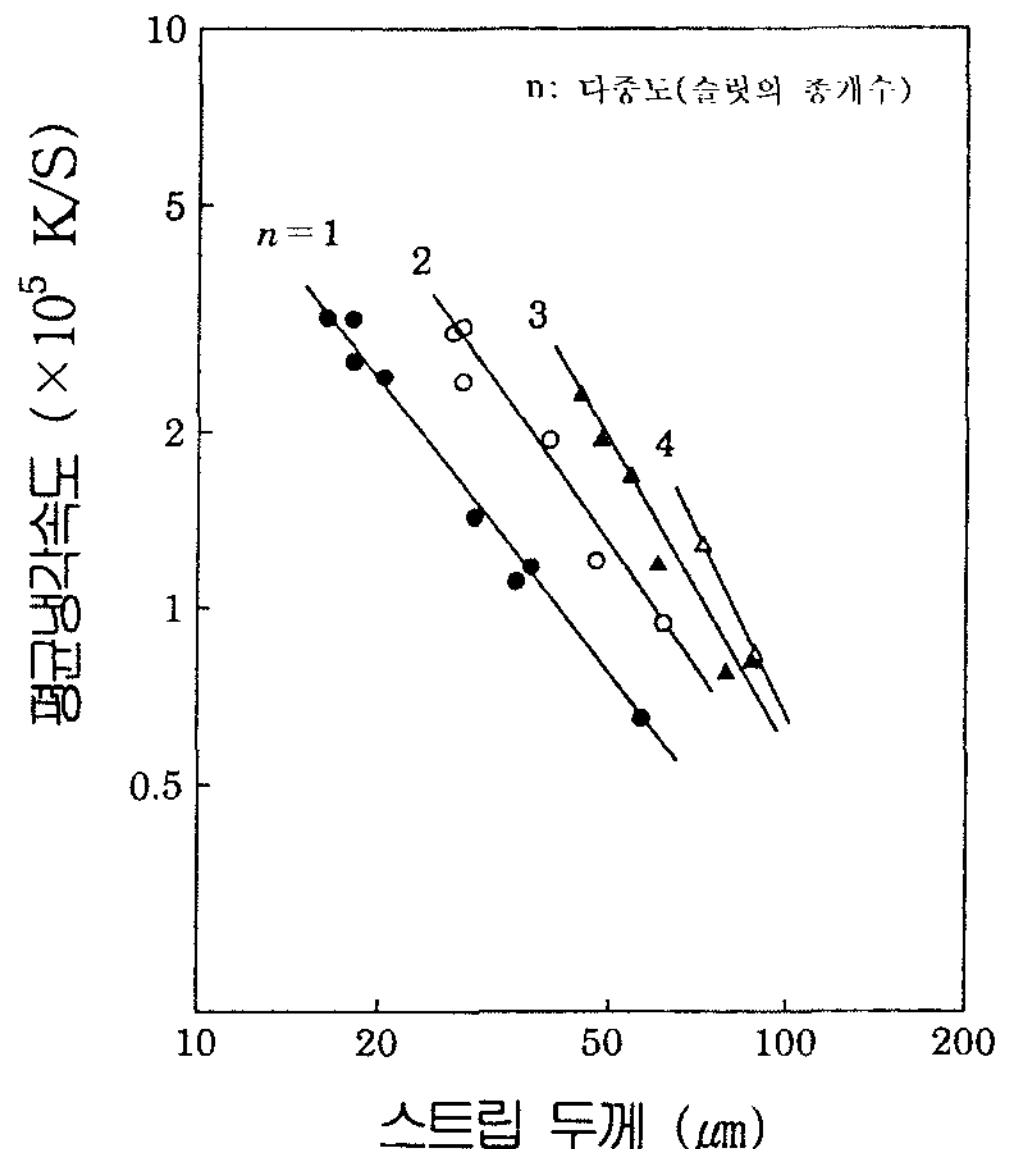


그림 6. 슬릿의 다중도와 스트립두께에 따른 평균냉각속도의 변화.

설정하지 않으면 안 된다. 한편, 슬릿 총 개수는 박대의 판두께에 관련되는데, 겹치는 슬릿의 수를 늘림으로써 박대의 판두께는 급격히 증가한다. 따라서, 멀티슬릿법에 의해 슬릿 총 개수 및 롤표면 속도를 적절하게 선택하면, 판 두께 100  $\mu\text{m}$  정도까지 스트립의 두께 증가가 가능하다. 멀티슬릿법에 있어 thick strip이 얻어지는 이유는, 슬릿을 다중화하는 것에 의해 냉각능력이 향상하고, 퍼들 내의 응고속도가 빨라지기 때문이라고 추정된다. 그림 6은 폭이 25 mm인 스트립을 제조할 경우 슬릿폭을 0.4 mm, 슬릿간격을 1 mm로 고정하여 실험한 결과로서, 슬릿의 다중도와 스트립의 두께에 따른 냉각속도의 변화를 보여주고 있는데, 같은 판 두께에 대해 슬릿 다중도가 증가하는 만큼 평균 냉각 속도는 증가하고, 같은 냉각속도일 때 슬릿 다중도가 증가하는 만큼 판 두께는 증가하게 되는 것으로 분석된다.

### 5. 결 론

금속합금 박대의 제조, 박대의 광폭화 및 두께증가를 위한 금냉응고기술은 비평형상 구조재료 및 기능재료에 대한 수요증가에 따라 앞으로 제조공정에 대한 연구가 더욱 활발해 질 것으로 전망된다. 다공노즐을 이용하는 주조방법에서도 노즐과 슬릿형태를 최적화하면, 지금까지의 PFC법에서 얻어지는 박대보다 우수한 박대를 얻을 수 있고, 이 방법에 의하면 판폭을 자유롭게 제어할 수 있어서 판폭의 제한을 없앨 수 있을 것으로 생각된다. 또한 멀티슬릿법에 의하면 판두께 100  $\mu\text{m}$  정도까지의 양호한 thick strip의 제조가 가능하므로 이의 실용화 및 응용에 대한 광범위한 연구가 필요한 단계에 있다.

## 國內外 鑄物關聯行事

1998

11월 1일 ~ 11월 3일  
International Technical & Marketing  
Conference  
Honolulu, Hawaii, 미국

11월 1일 ~ 11월 4일  
20th International Die-casting  
Congress and Exposition  
Cleveland, Ohio, 미국

11월 6일  
한국주조공학회 23기 정기총회,  
추계학술발표 및 기술강연대회  
서울

11월 6일 ~ 11월 9일  
일본주조공학회 제133차  
전국강연대회  
가나자와工業大學,  
이시가와(石川), 일본

11월 8일 ~ 11월 10일  
International Conference on Molten  
Aluminium Processing  
Orlando, FL., 미국

11월 14일 ~ 11월 18일  
2nd International Conference on  
Processing Materials for  
Properties (PMP '99)  
샌프란시스코, 미국

11월 25일 ~ 11월 27일  
International Scientific - Technical  
Conference  
"Foundry and Metallurgy process and  
Technology"  
Minsk, BELARUS

11월 25일 ~ 11월 28일  
제4회 국제 주조, 단조, 공업로  
및 열처리 산업전  
한국종합전시장(KOEX)

12월 2일 ~ 12월 5일  
EUROMOLD 98-3. Int. Messe fur Modell-  
Werkzeug-, Formbau, Frasmachines Rapid  
Prototyping, Computersimulation und  
Software  
Frankfurt, 독일