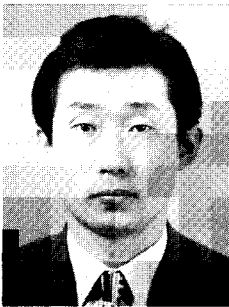


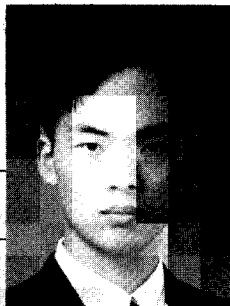
# 비정질 스트립 제조 및 응용기술 동향



박 원 옥

(KIMM 재료기술연구부)

- '74 - '78 서울대학교 금속공학과(학사)
- '79 - '81 서울대학교 금속공학과(석사)
- '81 - '85 서울대학교 금속공학과(박사)
- '89 - '90 The University of Sheffield, Visiting Scientist
- '85 - 현재 한국기계연구원 책임연구원



문 병 기

(KIMM 재료기술연구부)

- '90 - '94 충남대학교 재료공학과(학사)
- '94 - '96 충남대학교 재료공학과(석사)
- '96 - 현재 한국기계연구원 연구원

## 1. 서 론

비정질(amorphous) 합금은 금속을 용융된 상태에서 열전도도가 높은 매체를 통하여 약 백만°C/초의 빠른 속도로 냉각시키는 급냉응고법을 사용하여, 결정화할 시간이 없이 액상에서의 무질서한 상태를 고체화시킨 비평형상 재료를 일컫는 말로서, 특히 두께가 얇은 비정질 스트립(strip : '박대' 또는 '리본')을 얻는 방법에는 단롤법(single roll method)이 많이 활용되고 있다. 단롤법이란 고속 회전하고 있는 롤의 표면에 용융금속을 분사시키고, 롤 위에서 급냉응고시켜 두께가 얇은 스트립을 얻는 방법으로서, 1973년에 미국의 Allied Signal Inc.에서 Metglas라는 이름으로 상품화 하였다. 초기의 비정질 스트립은 판폭이 2~5mm, 두께가 약 수십 $\mu$ m 정도였는데, 광폭의 스트립은 PFC(Planar Flow Casting)법이라고 불리는 새로운 주조방법이 개발됨으로써 얻어졌으며, 1978년부터 Electric Power Research Inst. (EPRI)의 자금지원에 의한 기술개발을 통해 1980년 50mm, 1982년 170mm, 1987년 200mm 등으로 비약적인 발전을 거듭하였다.

현재는 Allied Signal Inc. 등에서 판폭이 약 200mm 이상, 판 두께가 30 $\mu$ m 정도인 비정질 스트립이 생산되고 있다. 비정질 합금 및 스트립의 이용에 대해서는 지금까지 여러 분야에서 검토되어, 변압기 및 전자기기부품용 비정질 자성 스트립, 브레이징용 Ni 및 Cu계 접합 스트립, 센서 및 차폐재료 등에서 실용화되어 있으며 그 수요가 점증하는 추세에 있다. 반면, 국내에서의 비정질 합금에 대한 연구는 학계와 연구소를 중심으로 응용 및 개발 연구 수준에 머물러 있으며, 금성전선, 삼성

기술원, 표준연구소, 한국기계연구원 등에서 전자 부품 및 브레이징용 접합재료의 응용에 대한 소규모의 연구가 진행되었다. 이로 인해 최근 수천 대 비정질 변압기가 한국전력에 납품되고 있으나, 소재는 SMPS 등 일부 소형 core용도외에는 대부분 수입되고 있는 실정이다. 따라서, 본고에서는 시장수요에 부응하고 실용화촉진을 위하여, 광폭의 스트립의 제조방법과 아울러 두께가 100 $\mu$ m 정도로 두꺼운 스트립의 제조방법, 그리고 이들 스트립의 응용분야 등에 대해 소개하였다.

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

Planar Flow Casting (PFC)법은 스트립을 용융 금속으로부터 직접 제조하는 기술로서, crucible tip의 구멍을 긴 직사각형의 slit(슬릿)형으로 가공한 후 회전하는 롤과 tip이 거의 밀착한 상태에서 용융금속을 분사하는 방법이다. 이 경우 제조되는 스트립의 폭은 약 2 inch 이상까지 가능하며 slit길이가 거의 같은 상태로 유지된다. 이 방법은 단롤법 중 crucible tip과 롤과의 간격이 상당히 큰 상태에서 구형의 구멍을 통하여 용융금속을 분사시켜 약 3~4mm 폭의 스트립을 제조하는 Chill Block Melt Spinning(CBMS)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 표면 위에 형성된 응고 전의 용탕 웅덩이)이 CBMS법에서는 롤 표면 위로의 용탕분사량과 롤 회전속도에 의해 주로 조절되지만 PFC법에서는 용융금속의 crucible tip과 롤 사이의 간격에 의해 지지된다. 따라서, 응고된 스트립의 윗 표면은 CBMS의 경우 자유응고된 표면이지만 PFC법에서는 tip의 표면에 의해 스트립 윗 표면의 상태가 결정된다. 이에 비해 실제 조

업에서는 crucible 외에 텨디쉬를 사용하여 스트립이 연속으로 제조되며, 이때 텨디쉬 내의 용융 금속의 비중에 따라 분사압력이 일정하도록 조절된다.

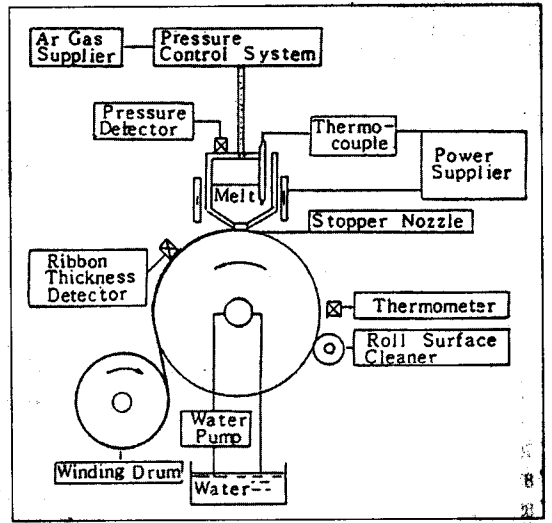


그림 1. 스트립 제조장치 개략도

일반적으로 PFC법으로 광폭비정질을 제조하기 위해서는 다음의 3가지 사항이 중요하다.

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

위의 공정변수들이 잘 조절될 경우에는 용융 금속의 분사시 melt puddle이 안정해지고 스트립의 특성제어가 가능해진다. 그러나 각 공정변수들은 상호 유기적인 관계를 가지고 있으므로 최적조건을 잡기 위해서는 전체적인 조업조건들의 각 영향을 파악해야 하며, 이에 따른 이론적 정립이 수반되어야 한다.

그림 2는 PFC법으로 스트립이 제조될 때의 노즐의 형상과 롤과의 관계를 나타낸 것으로서, melt puddle의 안정화가 스트립제조에 있어 중요한 역할을 한다. 노즐 slit의 폭(a)은 용융금속의 양과 흐름을 조절하게 되므로 응고되는 스트립의 양과 일치하도록 결정해야하며, 롤의 회전속도는 균일한 두께의 비정질 스트립이 얻어지도

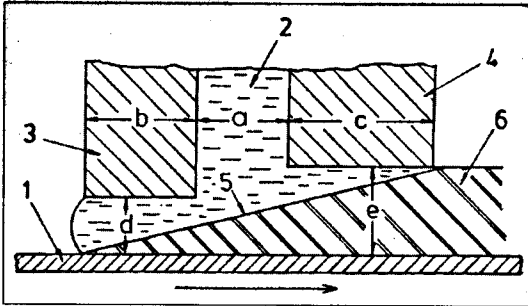


그림 2. 노즐 팁 형상과 롤 표면과의 용탕응고관계

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

록 정해야 한다. 또한, 노즐 팁의 1st lip과 2nd lip의 두께는 용융금속의 안정에 큰 영향을 미치는 요소이다. 1st lip이 너무 얇으면 lip이 용융금속을 지지해주지 못하므로 분사시 용융금속이 1st lip 방향으로 흘러나갈 염려가 있으며 너무 두꺼우면 off-center mounting(노즐을 롤 정점으로부터 앞부분에 위치시켜 용탕의 분사각도를 조절하는 방법)을 택할 경우 노즐 팁과 롤과의 간격을 줄일 수 없는 단점이 생기므로 lip의 두께는 slit폭의 1.5~3배가 적합하다. 2nd lip에 있어서는 두께가 너무 얇으면 역시 용융금속을 지지해 주지 못하고 응고된 스트립의 윗면의 표면 상태를 조절하지 못하게 되며, 너무 두꺼우면 그림 2의 응고계면(5)과 2nd lip이 겹치게 되어 스트립 제조시 tip의 심한 마모현상이 발생하게 된다. 한편, 노즐 팁과 롤의 간격에 있어서는 간격이 스트립두께보다 작을 경우에는 응고계면과 노즐 사이에 마찰이 생기고, 너무 크면 용융금속의 흐름을 조절하기 어렵게 된다. 또한 용융금속의 흐르는 속도는 2nd lip과 응고된 리본사이의 점성유통에 의해 주로 결정되며 slit폭에 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 진공 이외의 분위기, 예를 들어 Ar, N<sub>2</sub> 또는 공기중에서 자주 발생되며 롤의 높은 회전 속도에 의해 스트립제조에 악영향을 미칠 수 있다. 일반적으로 진공에서 작업할 때에는 용탕과 롤 표면과의 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 $\mu$ m의 비정질 스트립을 보여주고 있다.

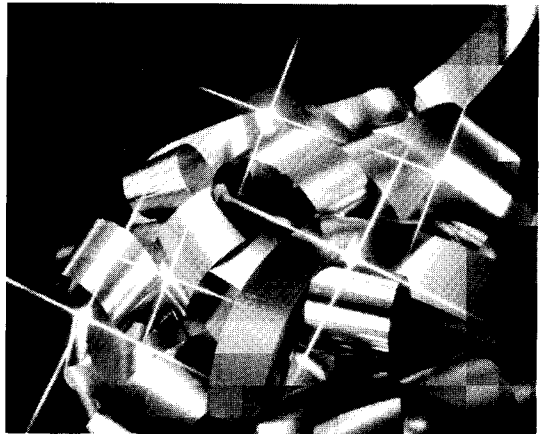


그림 3. PFC법으로 제조된 비정질 스트립

### 3. 스트립의 광폭화 방안

PFC법으로 얻어지는 광폭스트립에 있어 용탕의 안정한 흐름과 제어를 위해서는 다공노즐을 사용하는 것이 매우 유리하다. 특히 현재 생산되는 폭 20cm 이상의 스트립은 단일 slit 모양의 노즐로는 안정한 스트립제조가 어렵다. 대량생산에 있어 다공노즐을 이용해 PFC법에서와 같은 평평한 스트립을 얻기 위해서는, 노즐 slit의 형상과 개수 및 간격 등이 최적화되어야 한다. 퍼들의 형상을 안정시키기 위해서는 slit에서 분출하는 용융시료의 양을 스트립의 판폭 방향에서 가능한 한 균일하게 하는 것이 중요하다. 이 점에

서, 예를 들어 그림 4에 나타낸 것 같은 slit형상을 가지는 다공노즐이 유효하다. 결국, 이러한 slit을 사용하면 퍼들 일체화에 악영향을 미치지 않고, 용융시료의 분출량을 스트립의 판폭 방향에서 균일하게 유지할 수 있기 때문이다. 그림 4에 나타내었듯이 노즐slit의 형상에 있어서는, slit 형태의 중요요소로서 새롭게 slit의 경사  $\alpha$ 가 더해진다. 각종의 요소 중 slit의 롤 회전방향의 길이  $a$ 와 slit의 경사  $\alpha$ 를 변화시킨 각종 노즐을 이용한 주조실험에 의하면, 스트립의 두께와 함께 스트립의 자유표면에서의 요철 정도에 차이가 나는 것이 발견된다. 따라서, 균일한 두께의 스트립을 얻기 위해서는 그림 4의  $a$ ,  $b$ ,  $c$ 와  $\alpha$  및  $L$ 의 길이를 적당히 조절하는 것이 중요하다.

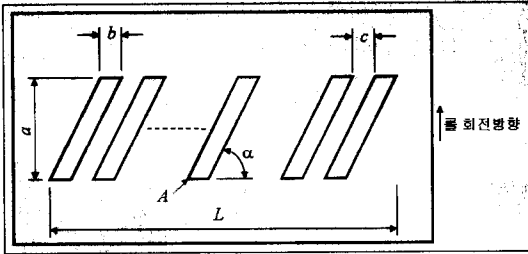


그림 4. 광폭의 스트립을 제조하기 위한 노즐 팁 형상  
 $a$ ,  $b$ ,  $c$ : slit의 치수 및 간격  
 $\alpha$ : slit의 경사도,  $L$ : slit의 전체길이

#### 4. 스트립 두께의 증대방안

일반 단롤법에서 제조되는 약 50 $\mu$ m까지의 스트립 두께보다 두꺼운 스트립은 취급이 용이하고 생산성이 높은 장점으로 인하여, 주상변압기 철심재료 등 비교적 대형부품 제조용으로 적합하므로 연구개발의 주요대상이 되어 있다. 비정질 스트립을 100 $\mu$ 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. 그것은 ① 서로 이웃하는

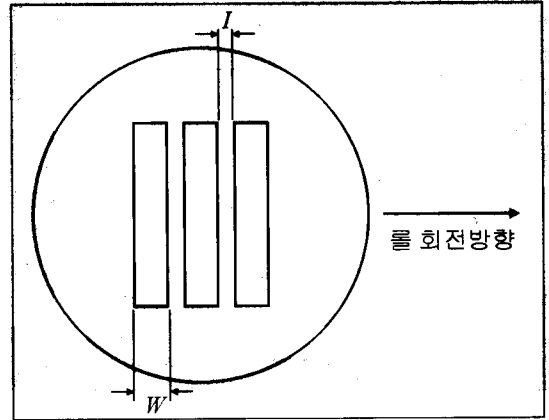


그림 5. 두꺼운 스트립 제조를 위한 멀티슬릿의 모식도  
 $I$ : 노즐의 slit폭,  $W$ : 멀티슬릿의 간격

슬릿의 간격과 ② 슬릿의 총 개수이다. 이웃하는 슬릿의 간격은 냉각속도에 영향을 주는 중요요소이며, 슬릿의 총 개수(다중도)는 스트립의 판 두께에 관한 인자이다. 비정질이 형성되는 합금의 경우 슬릿간격에 따라 실험한 X선 회절(回折)결과에 의하면, 스트립의 롤 표면은 슬릿간격이 2mm 이하인 때 비정질 구조를 갖게되지만, 3mm가 되면 예리한 결정립 피크가 나타나고, 4mm에서는 비정질패턴은 거의 없어져 예리하고 큰 피크만 나오게 된다. 한편 자유표면은 롤 측면만큼 현저하진 않지만, 슬릿 간격 4mm에서 결정화된 피크들이 발견된다. 이와 같이, 슬릿 간격은 냉각속도를 결정하는 중요한 요소이므로, 합금의 종류와 슬릿 폭 등에 대해 적절한 범위를 설정하지 않으면 안 된다. 한편, 슬릿 총 개수는 스트립의 판 두께에 관련되는데, 겹치는 슬릿의 수를 늘림으로써 스트립의 판 두께는 급격히 증가한다. 따라서, 멀티슬릿법에 의해 슬릿 총 개수 및 롤 표면속도를 적절하게 선택하면, 판 두께 100 $\mu$ m정도까지 스트립의 두께증가가 가능하다. 멀티슬릿법에 있어 두꺼운 스트립이 얻어지는 이유는, 슬릿을 다중화하는 것에 의해 냉각능력이 향상되고, 퍼들 내의 응고속도가 빨라지기 때문이라고 추정된다. 그림 6은 폭이 25mm인 스트립을 제조할 경우 슬릿 폭을 0.4mm, 슬

릿간격을 1mm로 고정하여 실험한 결과로서, 슬릿의 다중도와 스트립의 두께에 따른 냉각속도의 변화를 보여주고 있는데, 같은 판 두께에 대해 슬릿 다중도가 증가하는 만큼 평균 냉각속도는 증가하고, 같은 냉각속도일 때 슬릿 다중도가 증가하는 만큼 판 두께는 증가하게 되는 것으로 분석된다.

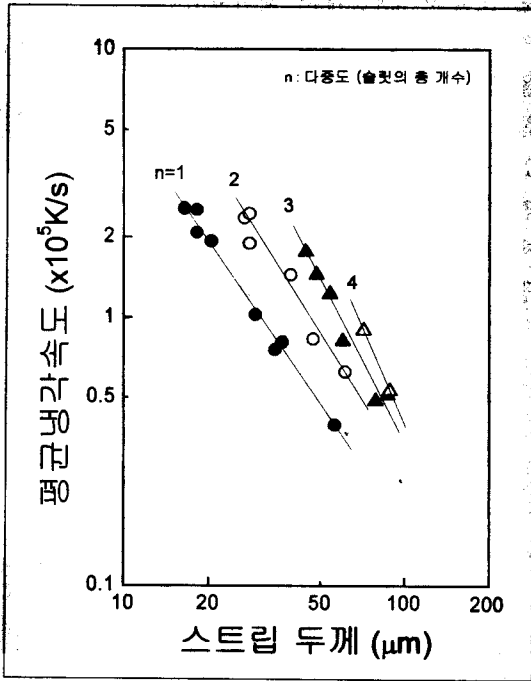


그림 6. 슬릿의 다중도와 스트립 두께에 따른 평균냉각속도의 변화

### 5. 비정질 스트립의 응용분야

급냉응고법으로 제조된 비정질 스트립의 주된

응용분야는 자성재료분야이다. 특히 Fe-Si-B계 비정질스트립을 주상변압기의 철심재료로 사용하는 응용분야는 크게 진전된 상태로서, 기존의 Si-Steel 철심재료를 미국의 경우 약 8%, 일본의 경우 약 3% 정도 이미 대체하여 사용중이며, 미국에서는 Star Project로써 2000년대까지 100% 대체계획을 추진중이다. 표 1은 동남아시아의 비정질 변압기코아 공장 현황을 나타낸 것으로서, 한국의 경우에도 비정질 스트립수요가 빠른 속도로 증가할 것으로 예상되고 있다.

자성재료에 있어 다음으로 수요가 큰 분야는 일정한 전압과 전류를 공급하는 전기 및 자기부품용 연자성 소형 코아(soft magnetic core)로서, 가포화코아, 초크코아, 역률보상코아, 승압트랜스코아, 비드코아 용도로 주로 쓰이고 있으며(그림 7), 현재 미국, 일본, 독일을 비롯하여 한국의 Amos Ltd.에서도 실용화에 성공한 상태이다. 또

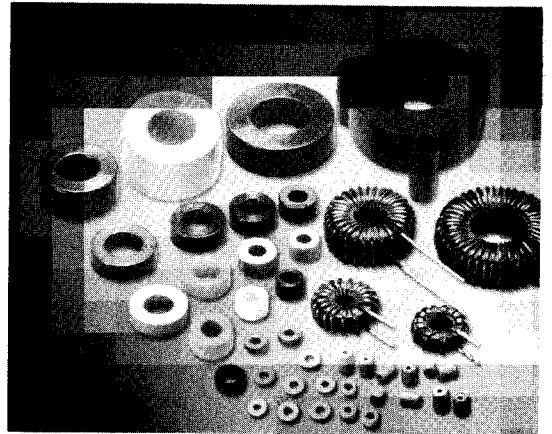


그림 7. 비정질 스트립을 이용하여 제조된 각종 코아 부품들

표 1. 동남아시아의 비정질 변압기코아 공장 현황

구분	제조업체	비정질 수요량(톤/년)	비고
일본	日立, 三菱, 高岳, 東芝, 大變	5,000	'97년에 10만대 (3%/년) 변압기 사용
한국	제룡(주)	2,000	한전에서 기존변압기 철심재료 대체 예정
중국	Zhangiang의 2개업체	450 ~ 6,000	Pudong단지내 공장 설립
인도	USHA 등 6개업체	5,000	년 15만대 생산능력 보유
대만	4개업체	-	1천대 설치 완료
필리핀, 베트남, 방글라데시 등			비정질 코아 공장설립 검토중

한, 고투자율을 이용한 자기헤드, 승압트랜스, 가포화리액터용 코아, 노이즈 필터, 초크코아 등과 고자속밀도를 이용한 모터철심, 전자용 트랜스, 고자왜를 이용한 응력 및 거리센서 등이 이미 실용화되어 있다. 타 분야에서는 브레이징 재료가 큰 용도로 등장하고 있고, 초전도재료로서 He액면계, 정화용으로서 기름정화 필터장치 등이 시판되고 있다.

이 외에도 Allied Signal Inc.을 중심으로 한 선진국에서는 장래에 자기증폭기, inverter, 자기변조기, 초고속 pulse system과 위성통신용 laser의 pulse전원, 센서용 transducer, 방범 system용 target, 콘크리트 및 타이어 보강재, 스프링재, 지연선재, 수소저장합금 등에 용도를 넓혀 갈 것으로 예상된다.

## 6. 결 론

금속합금 스트립의 제조, 스트립의 광폭화 및 두께증가를 위한 급냉응고기술은 비평형상 구조 재료 및 기능재료에 대한 수요증가에 따라 앞으로 제조공정에 대한 연구가 더욱 활발해질 것으로 전망된다. 다공노즐을 이용하는 주조방법에서도 노즐과 slit형태를 최적화하면, 지금까지의 PFC법에서 얻어지는 스트립보다 우수한 스트립을 얻을 수 있고, 이 방법에 의하면 판폭을 자유롭게 제어할 수 있어서, 판폭의 제한을 없앨 수 있을 것으로 생각된다. 또한 멀티슬릿법에 의하면 판 두께 100 $\mu$ m 정도까지의 양호한 스트립의 제조가 가능하므로 이의 실용화 및 응용에 대한 광범위한 연구가 필요한 단계에 있다.