技術資料

단롤법을 이용한 연자성 재료의 주조기술

성진경, 김문철

Single Roll Casting Techniques for Soft Magnetic Metal Strip

J. K. Sung and M. C. Kim

1. 서 언

본 자료는 연자성 판재 제조에 응용되고 있는 단롤(single roll) 급속냉각 주조기술을 소개하는 것을 목적으로 한다. 급속냉각 주조기술이란 용탕을 냉각매체(냉각롤등)에 공급하여 용탕에서 직접 얇은 판재를 제조하는 기술이다. 또한 연자성 재료(soft magnetic materials)란 자장이 외부에 가해질 때 재료내부의 자구가 자화방향과 동일한 방향으로 쉽게 배열하는 재료를 의미한다. 상용화 되어있는 연자성 재료로는 비정질 합금, 전기강판, Permalloy 및 Ferrite등이 있으며 주요 용도는 변압기, 모터, 발전기 코아등의 자심재료로 사용되고 있다. 한편 급냉법을 이용하여 연자성 재료를 개발하려는 시도는 크게 세가지 방향으로 전개되었다. 첫째는 급냉응고(rapid solidification)로 인해 고상에서도 액체금속의 원자구조를 유지시켜 우수한 연자성 물성을 나타내려는 경우(액체금속이 유리전이온도에 도달하는 냉각속도가 원자가 이동하여 결정질 합금을 형성하는 속도보다 빠른경우), 둘째는 기존에 알려진 상온취성을 나타내는 결정질 합금에 급속냉각(rapid quenching)기술을 적용시킨 경우, 그리고 마지막으로 직접주조법(direct casting)인 급속냉각법을 이용하여 스트립을 제조하여 기존공정의 단계를 생략함으로서 설비비 및 에너지 비용을 낮추려는 경우등이다.

2. 급냉 연자성 재료 개발 동향

급냉법을 이용한 연자성 재료의 주조는 비정질 합금 스트립 주조가 그 대표적예다.

1960년 Pol Duwez는 액체금속을 구리판에서 급속 응고(splat quenching)시킬 경우, 비정질 합금을 제조할 수 있다는 사실을 발견하였다[1]. 이런 비정질 합금중 연자성 특성을 나타내는 합금은 매우 우수한 철손특성을 나타냈다. 그 이유는 높은 비저항을 갖고있고 또한 결정자기이방성의 없다는 특징때문이었다. 이에따라 많은 연구가 비정질합금 스트립을 양산할 수 있는 기술에 집중되었다. 그림 1은 액체금속을 냉각매체로 급냉응고시키는 여러 공정의 냉각속도를 보여주고 있다[2]. 70년대에는 폭 2~4mm, 두께 20~30 ㎛ 스트립을 연속적으로 제조할 수 있는 기술인 Chill Block Melt Spinning기술이 사용되었다. 그러나 이 기술은 스트립의 폭을 5mm이상 증가시킬 수 없었다. 따라서 대량생산이 불가능하여 70년대 중반 철계 비정질 스트립 가격은 $300/kg 정도로 매우 비쌌다. 1977년 Allied Chemical Co.의 Narasimhan이 Planar Flow Casting법을 개발하여 비로서 광폭의 스트립 생산이 가능해졌으며, 폭 5mm이상 스트립을 생산할 수 있게 되었다[3]. 또한 노즐 및 공정의 개량에 힘입어 철계 비정질 합금의 경우, 대량 구매시 1995년 기준 가격으로 $3/kg 정도로 감소하여 경합재인 방향성 전기강판(Hi-B) 가격인 $2/kg정도에 근접할 수 있었다.

일단의 연구자들은 비정질 스트립의 제조 외에도 결정질 연자성 합금 스트립 제조에 급냉법을 적용시켰는데, 그 대상은 상온 취성을 나타내는 결정질 합금이었다. 자왜가 0인 Fe-6.5%Si[4-7], 또한 자왜 및 자기이방성이 0인 Sendust(Fe

산업과학기술연구소(RIST)

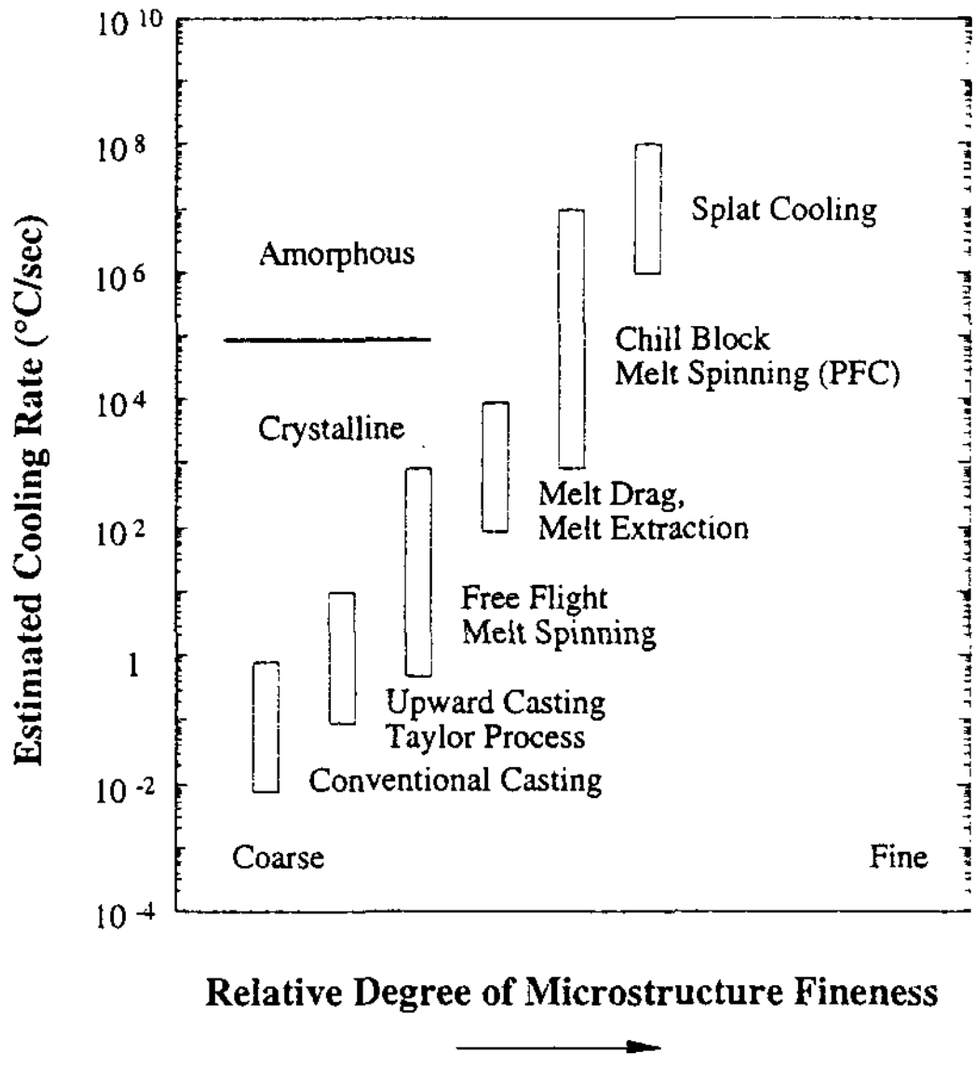

그림 1. 주조방식에 따른 냉각속도 및 미세조직 특징

-9.6%Sia5.4%Al)[8] 등은 이매 오래 전부터 자기특성이 뛰어나다고 알려져 있었으나 상온 취성으로 판재화가 어려웠다. 이러한 합금은 Chill Block Melt Spinning 및 Planar Flow Casting법을 이용하여 용탕에서 직접 스트립으로 제조되었다. 이 접근방식은 급냉법을 이용하여 판재를 제조할때 열간 및 냉간압연을 생략할 수 있다는 점 때문에 냉간압연시 상온취성을 나타내는 우수한 연자성재료 스트립제조에 응용되었다. 그런데 이렇게 제조된 스트립은 우연히도 급속 냉각(10^5 ~10^6℃/sec, rapid quenching)에 의해 기존의 재료에서는 볼수 없었던 상온 연성을 나타냈다. 즉 열간압연한 재료의 경우, Fe-6.5%Si, Sendust등은 B_2 및 $D0_3$등의 규칙격자 형성으로 인하여 상온에서 취성을 나타냈으나, 급속 냉각법을 사용하면 규칙격자 형성속도보다 스트립 냉각속도가 더 빨라 규칙격자 형성이 억제돼 상온에서 연성을 나타내게 되었다.

한편, 비정질을 중심으로 급냉법을 이용한 연자성 재료의 활용이 현실화 됨에 따라, 전기강판 제조업체들은 비정질재료와 전기강판 간의 연자성 특성 차이를 감소시키고, 가격을 차별화하려고 노력하였다. 이에 따라 전기강판 제조업체들은 기존 방향성 및 무방향성 전기강판의 자기특성 향상 및 제조원가 절감에 큰 관심을 기울이게 되었다.

특히 원가를 절감하려는 노력은 80년대 한창 진행되던 박판주조기술(strip casting)개발과 접목되어, 기존 공정에서는 열연 및 냉연을 이용하여 제조하던 규소강판을 직접 주조법을 이용하여 용탕에서 직접 0.2~2mm 스트립을 제작하려고 시도하였다. 원가가 낮아지는 이유는 설비투자의 단순화에 따른 투자감소, 장비운용비 절감, 에너지 비용의 감소등을 들 수 있다. 즉 기존 방식에 비하여 ingot를 재가열하고 압연하여야 하는 번거로움이 사라져서(그림 2[9]) 장비와 설비에 들어가는 자본이 감소하고, 기계의 단순화에 따라 인력이 줄며, 높은 효율에 따라 energy가 감소한다. 또한 설비가 간단해짐에 따라 공장의 생산규모를 큰 설비의 증가없이도 쉽게 늘릴 수 있고, 재가열이 생략됨에 따라 공장의 생산규모를 큰 설비의 증가없이도 쉽게 늘릴 수 있고, 재가열이 생략됨에 따라 slab 재가열에 의해 좌우되던 coil size가 더 커질수 있게 되었다. 이러한 경제적 장점은 이미 오래전부터 인지하고 있었음에도 불구하고 직접주조 공정이 상업화되지 못한 이유는 기술적인 문제들이 해결되지 못했기 때문이다. 즉 용탕의 순도 및 온도제어기술, 고온내화물의 부재등이 기술적인 난제로 대두되어 그

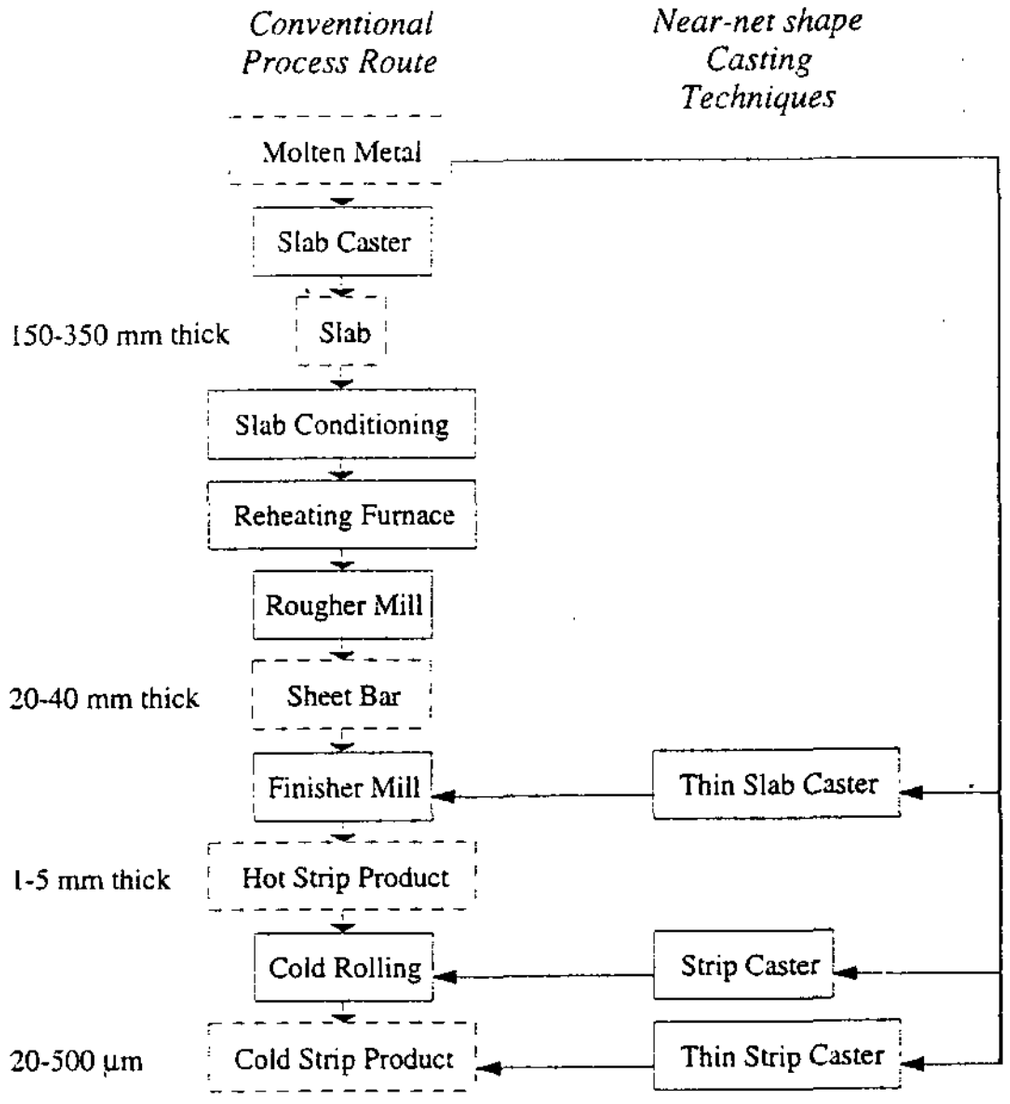

그림 2. 판상제품을 제조하는 제조공정도

해결이 직접 주조법의 관건이 되었는데, 최근 이 문제들에 대한 해결책이 활발히 연구되고 있다.

3. 연자성 판재 제조에 이용되는 직접 주조방법

그림 3은 최종산물의 형태에 따라 응고법을 분류한 것이다[10]. 스트립 형태의 최종산물을 얻어내는 방법으로는 Chill Block Melt Spinning (CBMS), Pendent Drop Melt Extraction (PDME), Planar Flow Casting(PFC), Melt Drag(MD), Crucible Melt Extraction(CME) 그리고 Twin Roll Strip Casting(TRSC)등이 있음을 알 수 있다. 이러한 급냉법중 연자성재료의 판재 제조기술에 응용되고 있는 기술은 PFC, CBMS, MD 및 TRSC등이다. PFC, CBMS는 얇은 스트립(<100㎛)제조에 쓰이고, MD 및 TRSC등은 주로 두께 200~2,000㎛ 스트립제조에 사용된다. 본고에서는 단롤법인 CBMS, PFC, 및 MD공정에 대해 살펴볼 것이며, 특히 대량 생산공정이 확립되어 비정질 합금 스트립 생산에 직접 사용되고 있는 PFC공정에 대해 자세히 살펴 보겠다.

3.1 Chill Block Melt Spinning

Melt Spinning이란 용탕분사 노즐과 강제냉각 매체를 이용하여 스트립을 용탕에서 직접 제조하는 방법으로, Chill Block Melt Spinning(CBMS)과 Planar Flow Casting(PFC)이 있다. 이중 CBMS은 1958년에 Pond에 의해 개발 되었다[11]. 이 공정은 냉각롤과 노즐 사이의 gap을 충분히 떨어뜨린 상태에서 노즐에 압력을 가하여 노즐끝의 원통형 구멍(slot)을 통하여 용탕을 냉각롤에 분사시켜 스트립을 제조하는 공정이다(그림 4). 이때 분사된 용탕은 회전하는 냉각롤에 접촉하여 응고가 일어나기 시작하며, 스트립과 용탕이 공존하는 구간을 형성되는데 이를 소위 puddle이라 부른다. 이 puddle의 형태 및 안정성이 양호한 스트립 제조의 관건이다. CBMS의 경우, 스트립폭은 puddle의 폭과 같으며, 이 크기가 분사되는 용탕 지름의 약 2배 이하에서 puddle이 안정하고 한다. 따라서 4-5mm 이상의

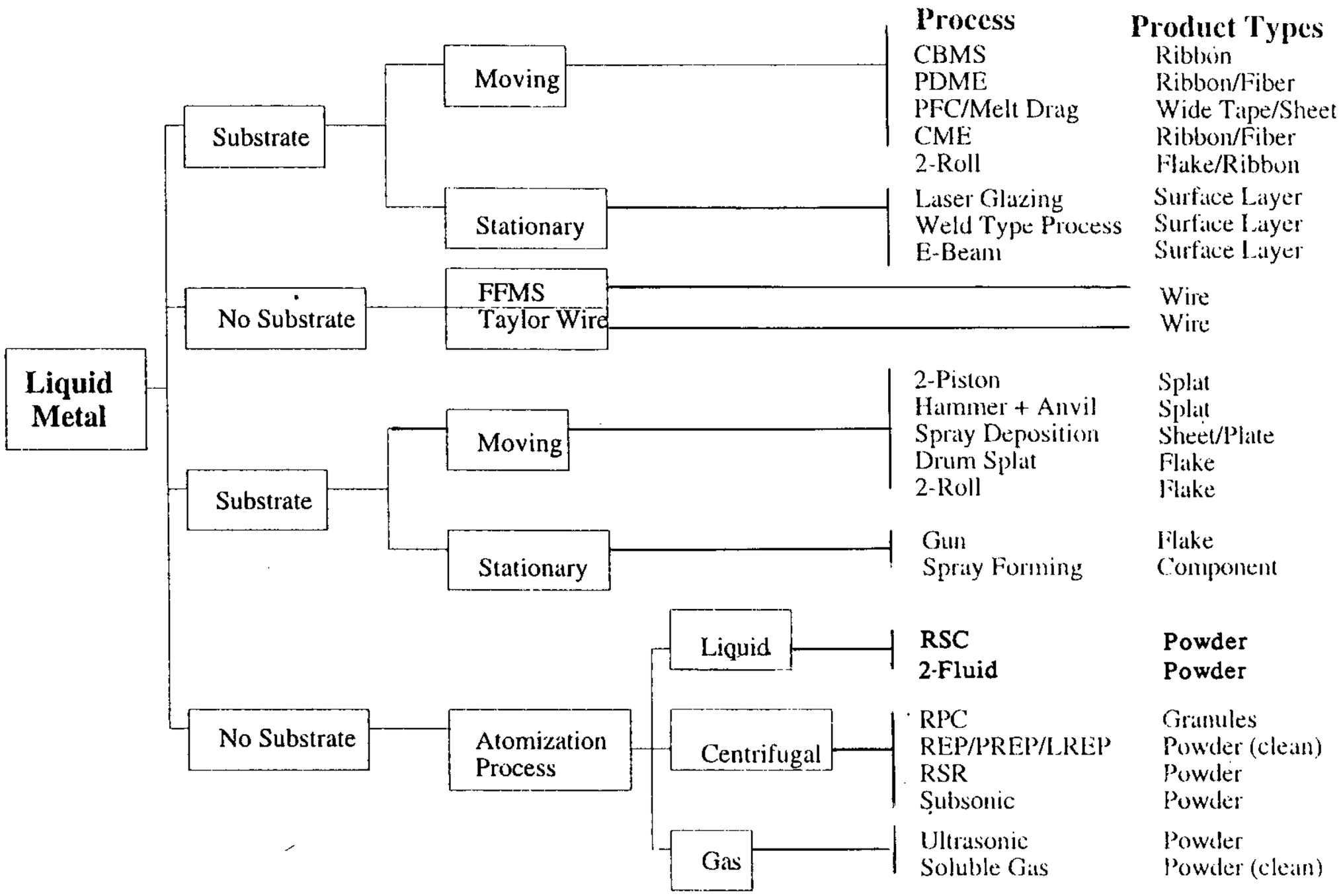

그림 3. 최종산물 형태에 따른 응고법의 분류

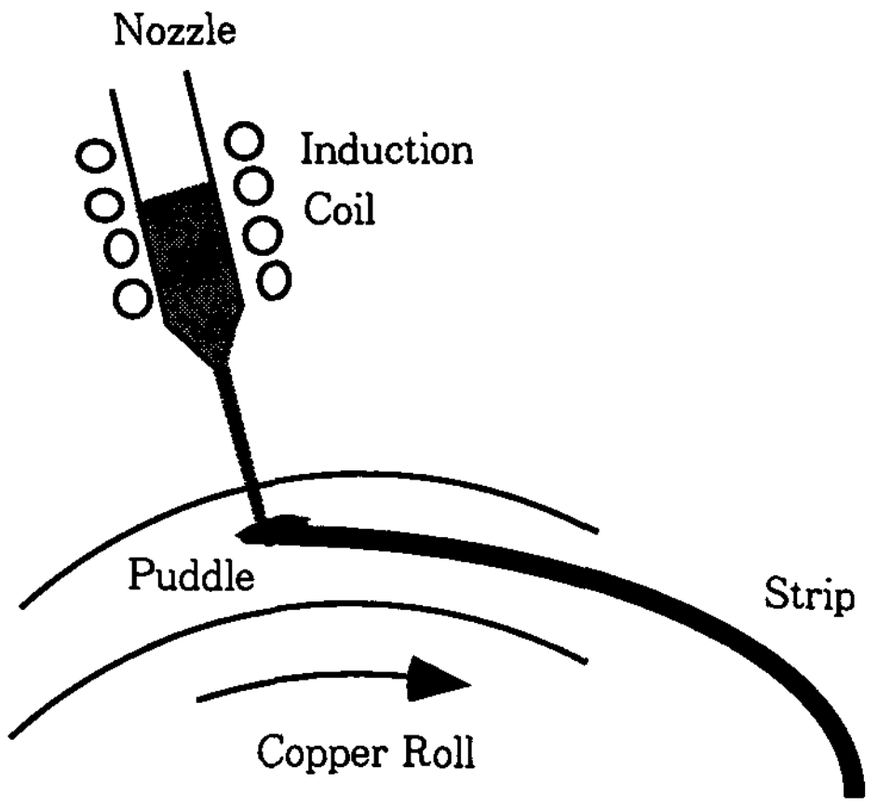

그림 4. chill block melt spinning개략도

폭을 갖는 스트립을 제조할 때는 puddle이 불안정해져 두께가 불균일해진다[12~14].

CBMS의 경우 공정에 대한 분석이 완벽하게 되어있지 않다. 그 이유는 70년대 말, PFC공정이 개발된 이후 CBMS공정의 용도는 실험실에서 소량의 스트립 제조에만 사용되어 대량생산을 위한 공정분석이 필요치 않았기 때문이다. Energy 및 mass balance equations을 이용하여 CBMS공정을 분석하여 보면 다음과 같다. CBMS의 경우, 원형의 노즐 슬롯(slot)을 통하여 용탕을 분사하며 이때의 냉각 롤과 노즐의 간격은 충분히 커서 노즐 슬롯에서의 용탕 분사량은 puddle에서의 응고 현상과 무관하여 영향을 받지 않는다. 따라서 CBMS공정에서 스트립의 두께를 결정하는 요소로는 단위 시간당 용탕 분사량과 냉각 롤의 선속도 및 스트립 폭등이며, 두께는 다음과 같은 mass balance equation 식으로 표현 된다[15].

$$Q = V_{roll} \times t_{strip} \times w$$

Q : 단위 시간당 용탕분사속도($=V_{slot} \times \pi r^2$)

V_{slot} : 슬롯에서의 용탕의 선속도

r : 슬롯의 반경

V_{roll} : 냉각 롤의 선속도

t_{strip} : 스트립의 두께

w : 스트립의 폭

CBMS에서는 스트립의 폭을 정확히 예측할 수 없다. 따라서 위 식에서 스트립 폭에 대한 부분을 삭제한 후 두께에 대해서 정리하여 다음과 같은 비례관계를 얻었다.

$$t_{strip} \propto Q \times V^{-A}_{roll} = (V_{slot} \times \pi r^2) \times V^{-A}_{roll}$$

A : 0.65~0.85

이때 단위 시간당 용탕 분사량(Q)이란 결국 슬롯에서의 용탕의 선속도 V_{slot}을 결정함으로써 구해지는데, 이는 간략화된 형태의 energy balance equation을 통하여 비교적 정확하게 예측될 수 있다.

$$\frac{1}{\rho_{liq}}(P_{ambient} - P_{applied}) + \frac{V^2_{slot}}{2} = 0$$

ρ : density

P : pressure

그러므로 CBMS 공정에서는 제조변수와 스트립 두께간에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$t_{strip} \propto (P_{ambient} - P_{applied})^{0.5} \times V^{-A}_{roll}$$

3.2 Planar Flow Casting(PFC)

PFC 공정은 대량생산에 적용되고 있는 유일한 급냉공정이다. 미국의 Allied Signal사는 현재 연산 6만톤 정도의 생산규모를 보유하고 있으며, 독일, 일본, 중국, 러시아등도 이미 PFC 공정을 확립하고 있다고 알려지고 있다. 국내에서는 이 공정을 양산단계까지 확립할 예는 없으며, 공정 확립을 위해 산업과학기술연구소, 전기연구소 및 (주)유유가 연구를 수행중에 있다. PFC공정이란 직사각형 형태의 노즐 슬릿을 통하여 가압된 용탕을 판상(planar flow)형태로 냉각롤에 공급하여 스트립을 제조하는 공정이다(그림 5). 앞서 살펴본 CBMS의 단점은 분사되는 용탕의 형태가 원통형이므로 스트립의 폭을 넓게할 수 없다는 점이며, 이를 극복하기 위해 용탕의 흐름을 판상형태로 변화시킨 공정이 PFC 공정인 것이다. 그런데, 노즐 슬릿을 떠난 용탕이 판상형태로 냉각롤에 공급되기 위해서는 노즐팁과 냉각롤 사이가 매우 좁아야 한다. 그 이유는 용탕이 높은 표면장력을 갖고 있기 때문에 초기 판상형태의 용탕은 일정 거리가 지나면서 원통형태를 취하여 용탕 표면적을 최소화하려는 경향을 갖게되어, 용탕이 노즐 슬릿형태를 유지하는 구간은 노즐 끝에서 불과 1mm 이내가 된다. 따라서 롤과 노즐 간격을 좁게하여 판상의 용탕 흐름을 유지한 상태에서 냉각 롤을 통하여 용탕을 응고시켜 스트립을 제조하는 방식이 개발되었는데, 이를 planar flow casting이라 한다. 이공정의 특징은 광

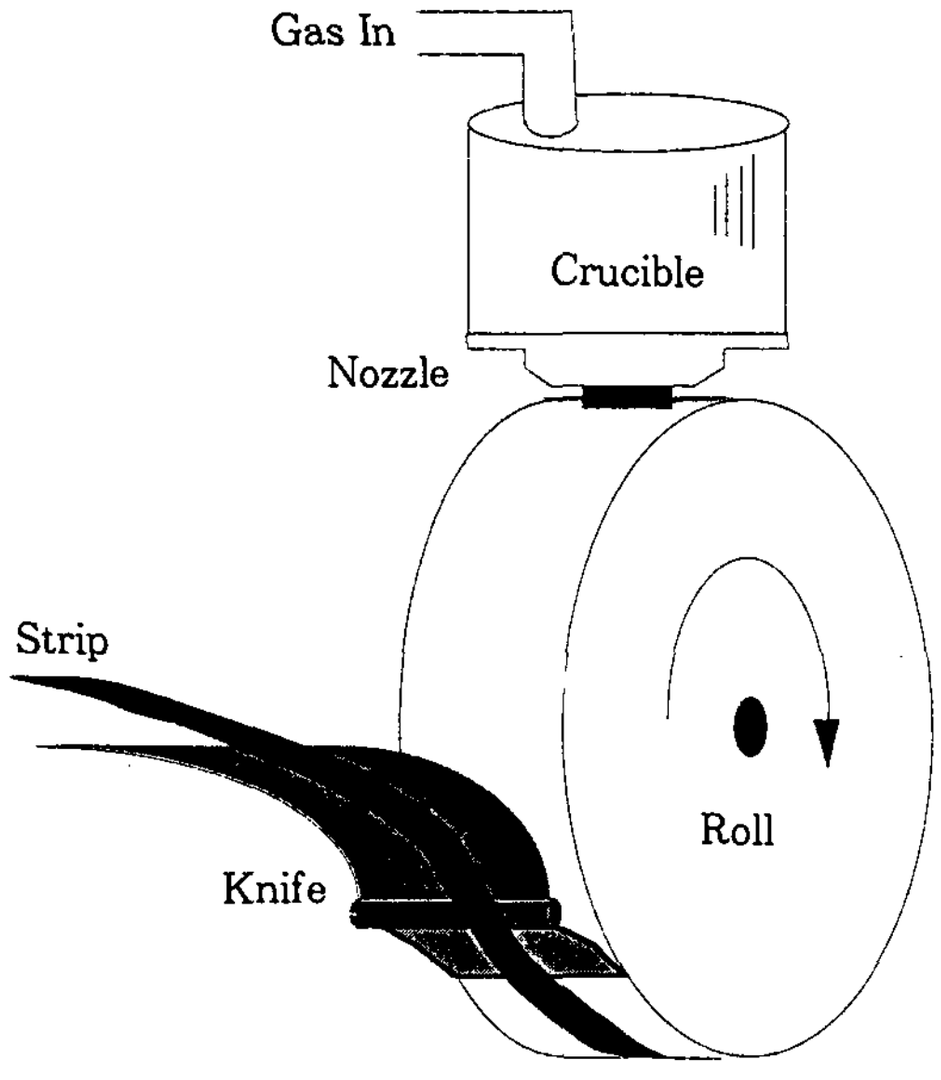

그림 5. PFC공정 개략도

폭의 스트립을 제조하기 위해 직사각형의 슬릿을 사용하며, 용탕이 노즐 슬릿 폭 보다 작은 gap에서 직사각형 형태로 기계적인 제한을 받으며 주조되는 공정이므로 스트립의 폭을 크게 늘일 수 있어, 폭 300mm까지 균일한 스트립을 제조할 수 있다고 한다. 그림 6은 스트립 제조시 제조변수의 변화폭을 보여주고 있다. 이 공정에서는 특히 냉각롤과 노즐사이가 매우 좁아, puddle에서 용탕거동이 제조변수에 크게 영향을 받는다고 알려져 있다. 공정이란 측면에서 보면 puddle의 안정성은 분사압력, 냉각롤 속도, 노즐 슬릿 폭, gap등에 의해 크게 좌우되며, puddle에서 용탕은 점도가 비교적 낮고 표면장력이 커야 puddle이 안정화 된다고 한다.

롤과 노즐 간격을 좁게한 결과 얻어진 장점은 다음과 같다.

1. 스트립의 폭을 30cm까지 변화시킬 수 있다.

2. 노즐과 냉각롤 사이의 gap이 작아질수록 냉각속도가 일정하게 증가한다.

3. melt puddle이 비교적 동요가 없고 안정하여 스트립이 균일하다.

4. 스트립의 두께를 20-80㎛까지 변화시키기 용이하다.

PFC공정은 용해 및 용탕공급, 주조, 후처리등으로 구분될 수 있다. 그림 7은 각 단계에서 확립되어야 할 기술을 보여주고 있다. 이중 PFC공정의 특징적인 면에 대해 살펴보면 다음과 같다. 용탕공급방식은 탕도설계 및 가압방식을 결정하는 중요한 요소다. 용탕공급 방식은 크게 연속식과 단속식으로 구분된다. 단속식은 그림 5가 보여주듯이 용해와 용탕공급 그리고 분사가 동일한 폐쇄 chamber에서 이루어지며 용해가 완료되면 stopper나 gate등을 사용하여 용탕을 노즐에 공급하게 된다. 한편 연속식의 경우는 대량생산을 위하여 조업도중 지속적으로 용탕을 공급하는 방식인데 용해는 용탕공급 방식과 분리되어 외부에서 이루어지며 노즐의 용탕분사압력은 용탕의 탕위로 조절 된다. 연속식 공정에서 가장 중요한 요소기술은 공정시간을 결정하는 노즐의 수명이다. 노즐은 용손이 적어야 하며, 열충격성에 강해서 조업도중 파손되지 말아야 한다. 또한 용탕과 젖음성(wettability)이 작아 용탕이 노즐 끝에서 퍼져 응고가 일어나면 안된다.

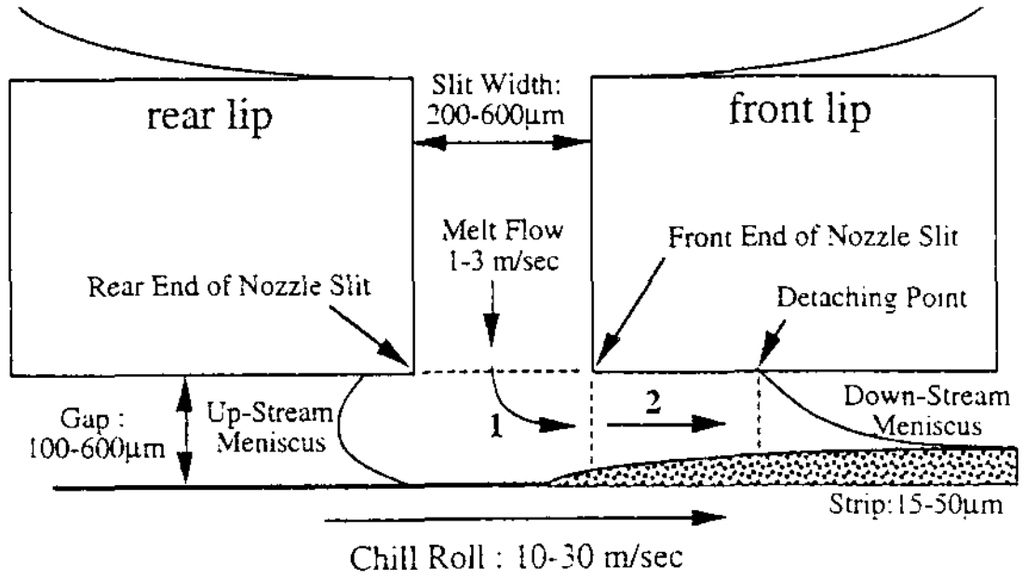

그림 6. PFC공정중 puddle에서의 스트립 형성 개략도

두께조절은 PFC공정에서 매우 중요한 요소다. 그 이유는 스트립 두께가 일정해야 균일한 형태의 철심등을 대량생산 가능하기 때문이다. 예를 들어 보자면 20㎛두께의 스트립에서 두께 편차가 2㎛라면 이는 평균 10%의 두께 편차다. 이를 1%로 줄이기 위해서는 한 공정내에서 두께 편차가 0.2㎛여야 하므로 정밀한 두께제어가 필요하다. 균일한 두께를 얻기 위해서는 한 공정중 노즐에서의 단위 시간당 용탕공급량이 일정하여야 하며 이러한 목적을 달성하기 위하여는 제조변수의 변화가 작아야 하는데 그중 중요한 사항은 다음과 같다. 첫째, 노즐과 롤사이의 간격인

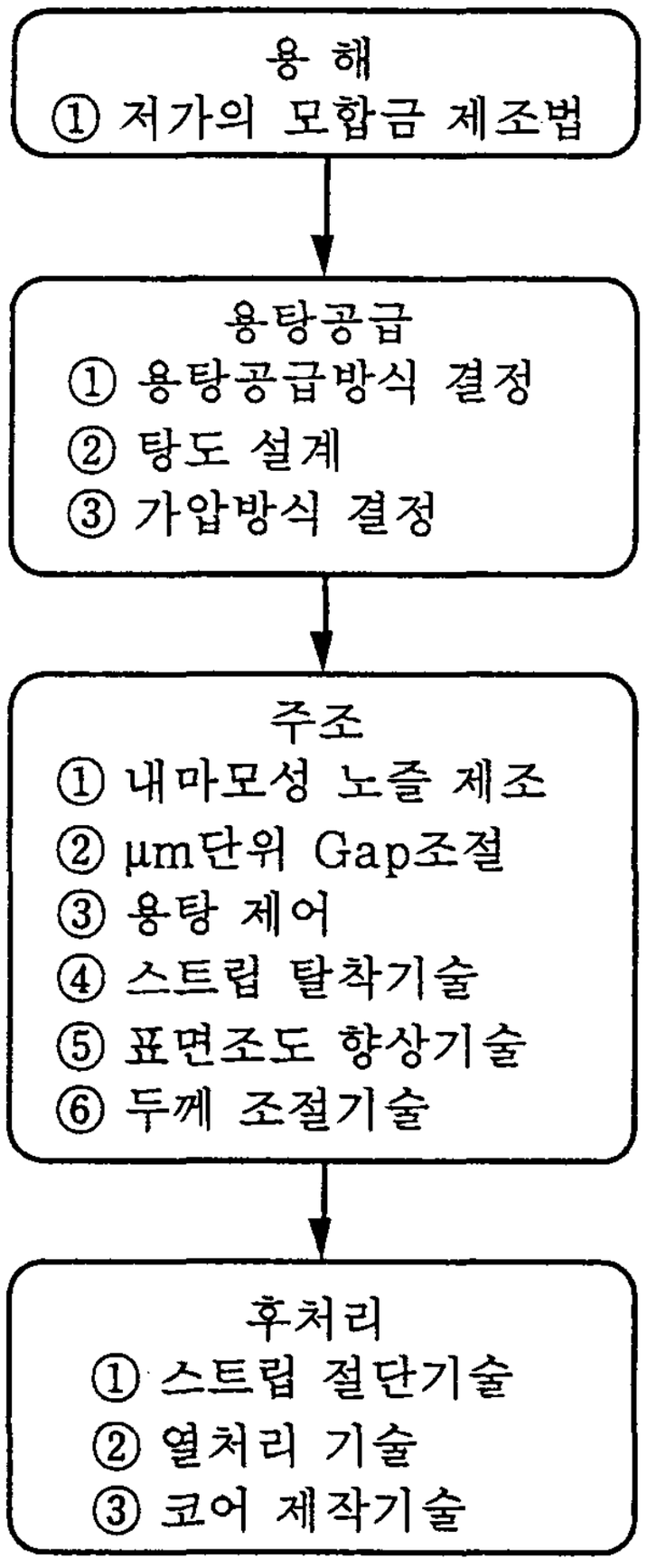

그림 7. PFC공정을 이용한 연자성 비정질 스트립 제조의 요소기술

gap이 수 ㎛단위로 조절 되어야 한다. gap을 변화시키는 요소로는 노즐 및 노즐 지지장치의 열팽창, 냉각롤의 가열에 따른 crown현상등이 있다. 따라서 gap을 정밀 조절하기 위하여 레이저 등을 이용한 gap 측정 및 스테핑 모터를 이용한 gap 조절이 필수적이다. 둘째 공정도중 슬릿폭이 일정해야하며 이를 위하여는 용손이 적은 노즐을 사용하여야 한다. 셋째, 철정압 및 분위기 가스 압력의 합이 일정한 값을 갖도록 하여야 한다. 이를 위하여 철정압을 결정하는 탕위 측정 및 분위기 가스압 조절장치가 필요하다.

용탕에서 스트립이 제조된 후 적절한 위치에서 냉각롤로 부터 박리 되어야 한다. 박리현상은 롤과 용탕간의 젖음성때문에 기인한다고 알려져 있다. PFC공정 초기에 스트립이 롤에서 박리하는 거리는 매우 짧으며, 공정이 진행됨에 따라 박리거리가 증가한다. 그 이유는 공정도중 냉각롤의 온도가 상승하여 롤과 용탕의 젖음성이 향상되기 때문으로 알려져 있다. 스트립과 롤사이에 박리가 일어나지 않게되면 주조된 스트립이 냉각롤을 타고 고속으로 붙어돌고 결국 노즐과 충돌하여 노즐이 깨지는 현상이 발생할 수 있다. 노즐과 롤이 충돌하면 한 공정이 실패일뿐 아니라 노즐을 통해 대량의 용탕이 쏟아져 나와 위험한 상황이 전개될 수도 있다. 박리를 위한 장치로는 얇은 판을 롤에 근접시켜 스트립을 강제로 롤에서 박리시키는 knife등이 이용되고 있다. 한편 스트립 제조시 권취기(winding machine)를 적용하면 박리문제를 해결할 수도 있다. 즉, 공정초기에 자연 박리된 스트립을 권취기에서 주조속도와 동일한 속도로 권취할 경우, 박리를 유도할 수 있다. 권취기에는 중앙에 회토류계의 경자성 합금을 설치하여 강한 자장을 이용하여 초기 스트립을 권취한다고 한다.

PFC 공정에서는 롤쪽 표면에 미세한 표면결함인 air pocket이 발생한다. air pocket이란 puddle의 up-stream meniscus에서 boundary layer를 따라돌던 공기가 용탕과 접촉시 급격히 열팽창하며 용탕과 롤사이로 끼어들어 발생하는 문제로 인식되고 있다. air pocket이 발생하면 주위와 냉각속도가 차이가 나서 스트레스를 유발하게 되며 따라서 자구형태에 영향을 주며 자구이동을 방해하여 자성 특성이 저하하게 된다. 이 현상을 제어하는 방법으로는 용탕과 롤간의 젖음성 향상 및 공기의 열팽창 감소법이 있다. 용탕과 롤간의 젖음성을 향상시키기 위하여 냉각안정기(quenching stabilizer)등을 사용하여 주조분위기를 He, CO등으로 변화시키는 경우, 주조속도를 증가시켜 롤온도를 상승시키는 경우등이 있다. 한편 공기의 급격한 열팽창을 막기 위하여 롤을따라 붙어도는 공기를 아크 플라즈마로 가열하기도 한다.

3.3 PFC공정 분석

공정의 이해가 양질의 스트립 생산 및 품질 예측을 가능하게 하기 때문에 PFC공정을 분석하려는 많은 시도가 있었다. 전술한 바와 같이 상

용화되어있는 급냉응고기술은 현재 PFC공정이 유일하므로 이 공정의 스트립 형성 기구에 대해 자세히 살펴 볼 필요가 있다. PFC공정에 대한 분석은 puddle의 영향이 고려되어야 한다. PFC 공정의 경우, CBMS와는 달리 노즐 슬릿과 냉각 롤간의 간격이 매우 좁으므로 puddle에서 변수 즉 용탕의 표면 장력 및 응고 현상이 노즐 슬릿에서의 용탕흐름에 영향을 줄 수 있다. 또한 노즐슬릿 폭에 비하여 노즐과 롤 간의 간격(gap)이 좁기때문에 용탕경로가 축소되는 효과가 있어서 노즐 슬릿에서의 용탕 흐름에 영향을 줄 수 있다.

PFC공정 분석은 두가지 방향으로 진행되었다. 그 첫째는 energy balance equation(Bernoulli equation)을 이용하여 두께를 예측하는 방법을 개발하는 것이었으며, 둘째는 스트립 제조의 핵심 부분인 puddle의 용탕유동 및 응고를 분석하려는 수치해석이었다. 두께를 예측하는 식을 구하기 위하여 주로 energy balance equation을 이용하였다. 그러나 이러한 접근은, PFC공정을 단순하게 유체역학적으로만 고려하여 응고의 영향을 완전히 배제하였으며, puddle내부에서의 온도분포, 용탕의 유동현상, 스트립이 형성되는 응고현상, up-stream 및 down-stream mensici의 표면장력 영향등을 전혀 예측할 수 없다. 반면, 수치해석을 이용하여 스트립 형성을 살펴보는 경우, puddle에서의 열 및 유체의 지배방정식 및 초기 및 경계조건을 알면 puddle내부의 응고 및 온도 분포, 용탕의 유동현상등을 예측할 수 있다. 그러나 이러한 접근의 단점은 초기 및 경계조건을 가정하여야 하는데 있다. 즉 응고현상의 경우 냉각롤과 puddle사이의 열전달 상수, 급냉응고에서 필수적으로 일어나는 과냉(supercooling)을 가정하여야 한다. 또한 up-stream 및 down-stream menisci의 표면장력 영향 및 puddle의 온도 분포에 따른 표면 장력 및 용탕의 점도등도 고려되어야 한다.

3.3.1 두께예측식

Fiedler 등[16] 및 Anestiev[17]는 PFC공정에서의 puddle의 역할을 유체 역학적 측면인 용탕경로 축소로 단순화 시켰다. 이들이 유체 역학적인 측면만을 고려한 이유는 스트립 제조조건의 변화에 따른 두께 변화가 energy balance equation의 예측과 일치하기 때문이다. 즉 gap이 일정할때, 스트립의 두께는 냉각롤 속도에 반비례하고($\propto 1/V_{roll}$), 분사 압력의 0.5승에 비례하며($\propto \{P_{applied}-P_{ambient})^{0.5}\}$), 슬릿 폭에 비례하였다($\propto b$). 이러한 결과는 앞서 살펴본 CBMS의 결과와 유사한 것으로, 그 의미는 PFC공정도 유체흐름으로 설명할 수 있다는 근거를 제시하였다.

Fiedler등의 경우, 스트립의 두께를 다음과 같은 식으로 표현하였다.

$$t_{strip}=K\times\{2\times(P_{applied}-P_{ambient})/\rho\}^{0.5}\times b/V_{roll}$$

$K: (2/3)\times(h/b)^{0.25}$ when $h<b$

$(2/3)$ when $h \geq b$

b : 슬릿 폭

h : gap

이러한 식의 유도는 앞서 살펴본 CBMS와 유사하다. 즉 위 식에서 $[\{2\times(P_{applied}-P_{ambient})/\rho\}^{0.5}\times b/V_{roll}]$의 부분은 mass balance 및 energy balance식에서 나온 결과이다. 위의 접근 방식에서 특이한 점은 비례상수 K이다. 즉 실험 결과 두께 예측치와 실험 결과가 일치하지 않아서 이를 보정하려고 상수 K를 넣었는데 이 값의 물리적 의미는 viscous flow에 의한 마찰손실(2/3)과 노즐 슬릿과 gap간의 크기 차이에 따른 용탕경로 축소의 영향($(h/b)^{0.25}$)으로 해석하였다. Fiedler등은 위 식을 여러 비정질 재료에 적용시켰는데 그 예는 $Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$, $Fe_{81}B_{13.5}Si_{3.5}C_2$, $Co_{69}Fe_{4.5}Cr_2Si_{2.5}B_{22}$, $Fe_{80}B_{20}$, $Fe_{70}Cr_{10}$, $B_{13}Si_7$등이다. 이 접근방식의 문제점은 (2/3)란 값이 Fiedler 등이 주장한 바와 같이 제조변수와는 무관한 상수인지가 불분명하며 또한 gap의 영향이 $(h/b)^{0.25}$으로 표현되는 이유가 불분명하다는 것이다. 위의 식에서 사용한 (2/3)란 유체역학에서 소위 'discharge coefficient'라 불리우는 상수로 그 값은 분사조건에 따라 0.6~0.9 정도로 변화한다고 알려져 있다[18]. gap의 스트립 두께에 미치는 영향의 경우, Fiedler 등이 직접 그 물리적 의미를 설명하지는 않았지만 실험 결과를 (h/b)에 연관지은 점은 매우 독창적이며 또한 명쾌한 해석이었다. 즉 gap의 영향을 용탕 경로의 축소로 보고 이 결과를 실험에 적용시켜 지수 0.25를 구해 냈다. 그러나 앞서 서술한 바와 같이 discharge coefficient가 상수가 아니므로 그 에러의 영향이 이미 $(h/b)^{0.25}$ 안에 포함되어 있으므로 이를 보

정해 주어야만 한다.

최근 이러한 문제점을 극복하기 위한 노력이 있었는데, Anestiev는 완전한 형태의 energy balance식에 마찰손실을 고려하여 이 문제에 접근하였다. 그는 Fiedler등이 사용한 discharge coefficient 대신 마찰손실계수(friction-loss coefficient)를 사용하여 제조변수의 변화에 따른 마찰손실의 변화를 예측하였다. 또한 gap의 영향도 용탕경로의 축소에 따른 마찰손실로 해석하였는데, 그는 PFC 공정의 puddle부근의 형태를 elbow with sharp corner로 가정하여 Idelchik [19]가 제안한 마찰손실계수를 사용하여 마찰손실을 보정하였다. 이러한 접근법은 제조변수의 변화에 따른 마찰손실의 변화를 수학적으로 매우 잘 나타내준다는 장점이 있다. 그러나 이 분석은 전부 가정을 기초하여 수행되었으며, 이를 검증하는 실험이 수행되지 않았다. 즉 PFC공정에서 gap의 영향은 elbow with sharp corner로서 볼 수 있는지 여부가 의문으로 남아있다. 그 이유는 PFC 공정의 경우, 위의 가정과는 달리 냉각 롤이 puddle의 아래쪽에서 빠르게 회전하고 있으므로 마찰 손실이 줄어들 것이며, 또한 puddle은 마찰손실이 일어나는 conduit의 벽에 의해서 유지되는 것이 아니라 마찰손실이 없다고 볼 수 있는 free surface가 표면장력에 의해서 형태를 유지하는 것이기 때문이다. 더구나 Anestiev의 두께 예측식은 non-linear형태로 컴퓨터의 도움으로 풀어야 한다는 단점이 있다.

3.3.2 PFC공정의 율속단계

PFC공정 분석의 주류는 수치해석을 통한 puddle의 분석이다. PFC의 공정은 냉각롤과 노즐 사이에서 용탕의 응고가 일어나는 버퍼(buffer)인 puddle을 형성하게 되며, 이 puddle의 형태 및 기능적인 이해가 PFC공정 이해의 핵심으로 인식되어 왔다. PFC공정에서 puddle의 형태는 냉각롤과 노즐사이의 좁은 간격때문에 노즐팁(tip)에 의하여 제한받으며 up-stream 및 down-stream menisci의 표면장력 및 제조조건에 따른 puddle 내부의 압력 영향으로 곡률을 갖게 된다. 또한 슬릿을 통하여 분사된 용탕이 스트립으로 응고되는 구간이다. 이러한 puddle은 실험적으로 관찰 및 분석이 난해한데, 이는 온도가 매우 높고(>1000℃), 간격이 좁으며(<1mm) 또한 냉각롤이 빠른 속도로 이동(>15m/sec)하기 때문이다. 따라서 많은 연구가 수치해석을 이용하여 puddle에서의 거동, 즉 스트립 제조시 냉각롤의 온도상승 puddle내부의 용탕 유동 및 온도분포, 스트립의 응고현상, 스트립의 두께등을 예측하려고 하였다.

수치해석을 이용한 PFC공정의 분석은 크게 두가지 방향으로 나누어 볼 수 있다. 즉 PFC공정에서 스트립이 형성되는 과정이 열적인 관점에 의하여 지배되느냐(heat transfer controlled) 혹은 유체역학적인 관점에서 지배되느냐(momentum transfer controlled)하는 두가지의 분석방식이다[20]. 이러한 관점들은 유체와 열중 어느것이 puddle에서 더 상대적으로 효과적이냐 하는 의견에 따라 선택되었다.

'열적인 관점이 지배적이다'란 thermal boundary layer가 momentum boundary layer보다 훨씬 커서 응고는 puddle안에서 이미 끝나고 puddle밖으로 나온 스트립은 이미 고체의 형태라는 관점이다. 이러한 관점은 용탕의 Prandtl number($Pr=\nu/\alpha$, ν: kinematic viscosity, α: thermal diffusivity;열과 유체의 상대적 boundary layer의 전파 능력)가 매우 작아서 thermal boundary layer의 전파 속도가 momentum boundary layer의 전파 속도보다 매우 빠를것이라는 점에 착안한 분석이다[21]. 일반적으로 액체 금속의 경우 $Pr=0.01\sim0.1$ 범위의 값을 갖으며, 또한 laminar flow의 경우 $\delta_{momentum}/\delta_{thermal}\approx Pr^n$($\delta$: boundary layer thickness)으로 나타낼 수 있으며 이때 지수 n은 양의 상수이다. 따라서 냉각 롤과 puddle사이의 이상적인 열전달을 가정하면($h_{roll-puddle}\approx$무한대), thermal boundary layer의 두께는 momentum boundary layer의 두께보다 훨씬 두껍다는 것을 이해할 수 있다. 이러한 분석이 내포한 가정은 냉각 롤과 puddle사이의 열전달이 매우 효율적으로 일어난다는 것이다. 위의 경우를 철에 적용시키면 다음과 같다.

$\nu=\eta/\rho=5\times10^{-3}(Kgm^{-1}\,sec^{-1})/7800(Kgm^{-3})$
$=6\times10^{-7}(m^2sec^{-1})$
$\alpha=\kappa/\rho\,C_p$
$=20(W\,m^{-1}K^{-1})/7800(Kgm^{-3})/750(J\,K^{-1}Kg^{-1})$
$=3.4\times10^{-6}(m^2sec^{-1})$
$Pr\approx0.1$

따라서 thermal boundary layer의 두께는 momentum boundary layer의 두께보다 훨씬 두꺼울 것이다. 이러한 분석은 그러나 열전달 상수, $h_{roll-puddle}$가 무한대가 아니기 때문에 그 정당성을 검증 받아야만 한다. 즉 냉각 롤과 puddle사이의 열전달은 롤과 용탕의 젖음성과도 밀접한 연관이 있어서 그 영향을 고려한다면 thermal diffusivity가 작아지고 이에따라 Prandtl number는 커진다. 따라서 두 boundary layer의 비교 자체의 정당성이 의문시 된다.

반면 '유체역학적인 관점이 지배적이다'란 용탕의 응고가 어떤 이유로 지연되어 puddle에서 끌려나오는 용탕 상태의 momentum boundary layer가 puddle의 바깥쪽에서 응고되어 스트립이 형성된다는 관점이다. puddle에서의 용탕 응고 지연의 이유로는 용탕의 큰 과열(superheating), 냉각 롤과 용탕 계면의 접촉 불량(낮은 열전달 상수, $h_{roll-puddle}$) 및 급냉 응고시 발생하는 높은 과냉(supercooling)등이다.

위의 두가지 의견은 PFC공정 이해에 매우 중요한 관점이므로 각 경우의 정당성 및 부당성을 지적하는 많은 논문이 있다. 이러한 논문들은 스트립 두께와 제조변수간의 관계에서 혹은 puddle의 실험적 관찰을 각 의견의 예측과 비교, 분석하여 PFC공정의 율속단계를 찾으려 하였다. 그 대표적인 예가 두께(t_{strip})와 접촉 시간($t_{contact}=L/V_{roll}$;L : puddle length)의 관계를 통한 분석이다. 실험적으로 스트립의 두께는 접촉시간과 다음과 같은 관계를 갖고 있다고 알려져 있다.

$$t_{strip} \propto (t_{contact})^m = (L/V_{roll})^m$$

이때 지수 m은 0.5근방의 값을 갖는다고 알려져 있다. 이러한 실험결과가 의미하는 바란 접촉시간이 스트립의 두께를 결정한다는 의미이므로, momentum boundary layer나 thermal boundary layer의 두께가 접촉 시간과 관계가 있는지 그리고 그 관계는 위의 실험결과와 일치하는지에 관한 분석이 필요하다.

Vincent등[22]의 경우 puddle에서의 momentum transfer에 대하여 분석하였다. 즉 puddle에서 단위 시간당 빠져나오는 용탕양 Q는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Q = w \int_0^H V(h)\, dh$$

이때, V(h)는 Puddle에서의 냉각 롤과 수평방향으로의 용탕진행 속도를 나타내며, h 및 H는 puddle의 냉각 롤로부터의 높이를 뜻한다. 이때 $Q = V_{roll} \times t_{strip} \times w$, 또 $H > t_{strip}$이므로 위 식은 스트립의 두께에 대하여 다음과 같이 정리 될 수 있다.

$$t_{strip} = \int_0^\infty \frac{V(h)}{V_{roll}}\, dh$$

이때 적분 구간이 H에서 무한대로 바뀐 이유는 momentum transfer가 효율적인 구간이 스트립의 두께이고 gap이 스트립 두께보다는 훨씬 커서 H를 무한대로 가정하여도 변동이 없기 때문이다. 따라서 이때의 t_{strip}은 momentum transfer에 의한 displacement boundary layer의 두께가 되는 것이다. laminar flow의 경우, V(h)를 수치해석을 이용하여 풀면, 위식의 답은

$$t_{strip} = 1.72(\nu \times t_{contact})^{0.5}$$

로 표현된다. 이러한 결과는 PFC공정이 momentum transfer에 의하여 좌우된다는 가능성을 높게 하였다. 이 분석의 가정은 점도(viscosity)가 일정하다는 점이며 또한 용탕의 흐름이 laminar flow라는 것이다.

그러나 한편, 열전달 상수를 무한대로 가정하면 thermal boundary layer의 두께도 접촉시간의 0.5승에 비례한다는 분석 결과가 있다[23]. 이러한 결과는 유체역학이나 열전달이나 모두 그 지배방정식이 유사하기 때문에 유도된 결과로 결국 두께가 어떻게 표현되느냐를 통하여 스트립 형성 기구를 살펴본다는것은 불가능하다는 결론에 도달한다. 이러한 결론은 최근 Granasy[23]에 의해서 종합적으로 확인되었는데, 그는 컴퓨터 모델링을 이용하여 두가지 율속단계의 경우를 열전달 상수를 변화시켜 재현해 보았다. 그 결과 열전달 상수가 작은 경우(momentum transfer controlled : $h<10^5$)m값은 0.5~0.55정도였으며 또한 열전달 상수가 큰 경우(heat transfer controlled : $h>10^7$) m값은 0.5정도를 나타냈다. 또한 양 기구가 서로 동시에 작용하는 경우에는 m값이 0.7까지 증가하였다($10^5<h<10^7$).

실험을 통하여 율속단계를 결정하려는 시도도 있었는데 이는 주로 스트립의 표면온도를 측정하여 puddle밖의 스트립의 형태가 액상인지 고상인지를 결정하여 액체의 온도영역이라면 mo-

mentum transfer controlled이고 고체의 온도영역이라면 heat transfer controlled라고 결정하는 것이다. 비정질 합금의 경우, puddle을 빠져나가는 용탕의 온도가 비정질 형성온도(유리전이온도)보다 높다고 알려져 있다. 따라서 이 경우는 스트립 형성기구가 momentum transfer에 의하여 좌우되며 응고는 puddle밖에서 완료된다고도 말할 수 있다. 반면 결정구조를 갖는 재료의 경우에는 열전달이 스트립 형성기구로 결론이 내려진 경우도 있다.

결론적으로 PFC 공정의 올속단계는 현재의 지식으로는 논란의 여지가 많이 내재되어 있다.

3.4 Melt Drag Process

MD 및 TRSC공정을 이용하여 연자성 재료를 제조하려는 노력은 주로 규소강판에 집중되어 있다. 이중 MD를 이용한 연구는 미국의 Allegheny Ludlum 및 한국의 RIST에서 연구중이다. 일반적으로 MD는 턴디쉬 형태에 따라서 개방 턴디쉬식과 폐쇄턴디쉬식으로 구분된다(그림 8[24,25,9]). 폐쇄 턴디쉬식은 주로 얇은 스트립 제조시에 사용되며 개방 턴디쉬식은 상대적으로 두꺼운 스트립의 제조에 쓰인다. 폐쇄 턴디쉬식은 Battelle에서 개발된 것으로 melt drag의 기본 아이디어를 제공한 모델인데 현재 얇은 스트립 제조는 주로 PFC 공정에 의해서 이루어지므로 크게 사용되는 예는 없다. 요즘 주로 사용되는 MD는 개방 턴디쉬식으로 0.2-2mm 두께의 판재를 제조할 수 있다.

개방 턴디쉬식 MD의 각 공정은 용해, 용탕공급, 박판주조, 후처리 등의 4단계로 나누어 각 단계별 특징 및 공정상 필요한 문제를 살펴보겠다(그림 9)[26].

3.4.1 용해와 용탕공급

양질의 스트립을 제조하기 위하여는 용탕이 이물질에 오염되지 않아야 하며, 용탕안에 불순물 및 게제물을 제거할 수 있는 장치가 있어야 한다. 산화에 의한 게제물의 제거는 용탕 분위기를 조절함으로써 가능하다. 질소 가스는 질화물을 형성할 가능성이 있으므로 주로 argon 가스를 많이 이용하나 가격이 비싸다는 단점이 있다. 또한 용해시 유의할 점은 합금 원소중 주변과 반응성이 좋거나 증기압이 높은 재료를 사용할 경우

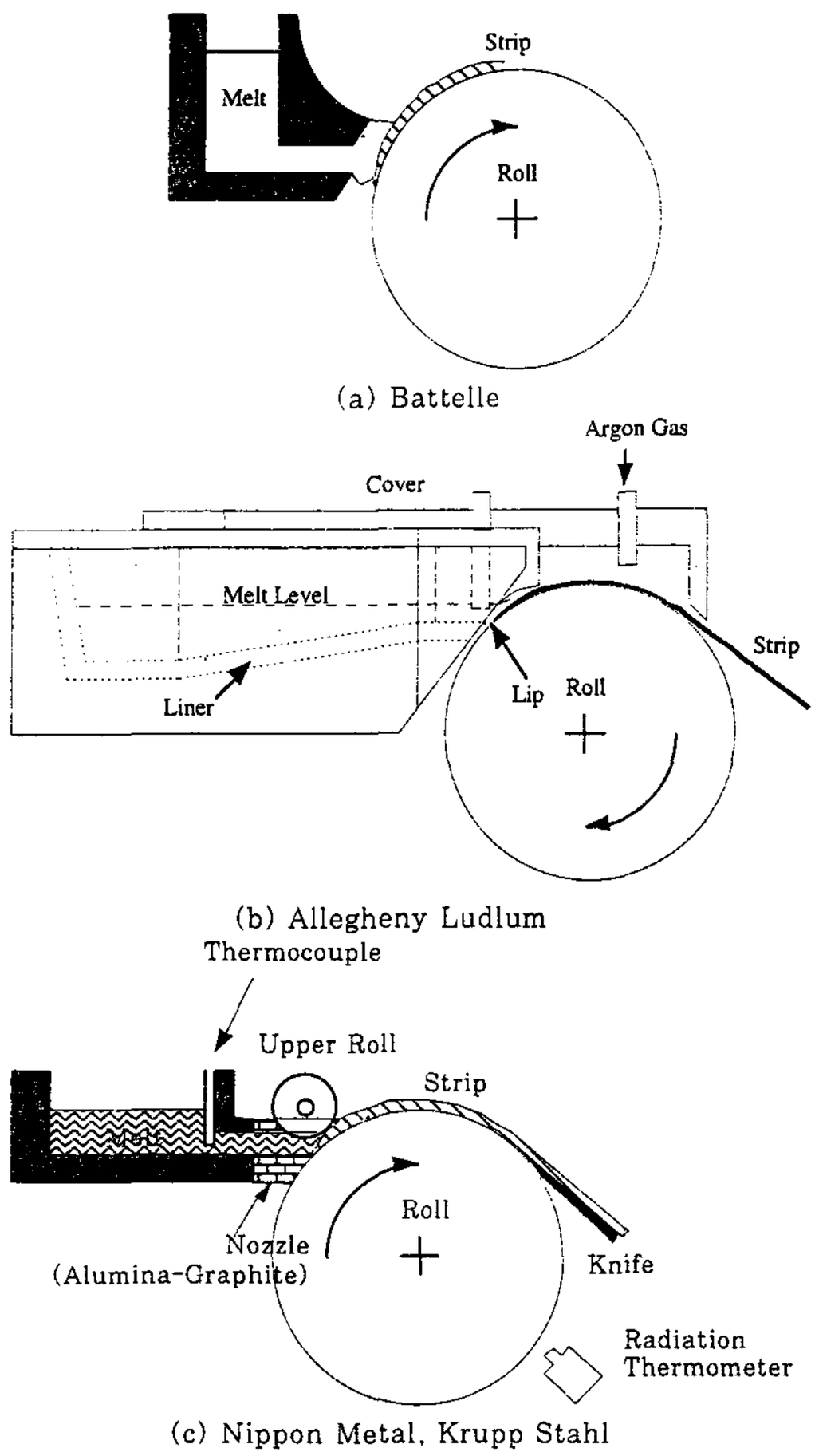

그림 8. MD공정 (a)폐쇄 턴디쉬식 및 (b),(c)개방 턴디쉬식

에는 원하는 조성을 얻을 수 없으므로 이러한 사항에 유의하여 내화물 및 합금계를 선정하여야 한다.

용탕의 온도제어는 용탕공급장치의 매우 중요한 부분이다. 용탕의 온도는 용탕의 반응성, 점성, 표면장력, 밀도등 용탕의 성질에 영향을 미치므로 매우 정밀하게 조절하여야 한다고 한다. 특히 냉각롤과 용탕이 접촉하는 턴디쉬의 용탕 pool에서는 용탕온도 제어가 매우 중요하다. 그 이유는 턴디쉬에서의 용탕흐름이 laminar flow 이기 때문에 턴디쉬의 용탕 pool 안에 온도구배가 형성되고 이에 따라 외부에서의 열공급 없이는 용탕의 온도제어가 안되기 때문이다. 이러한

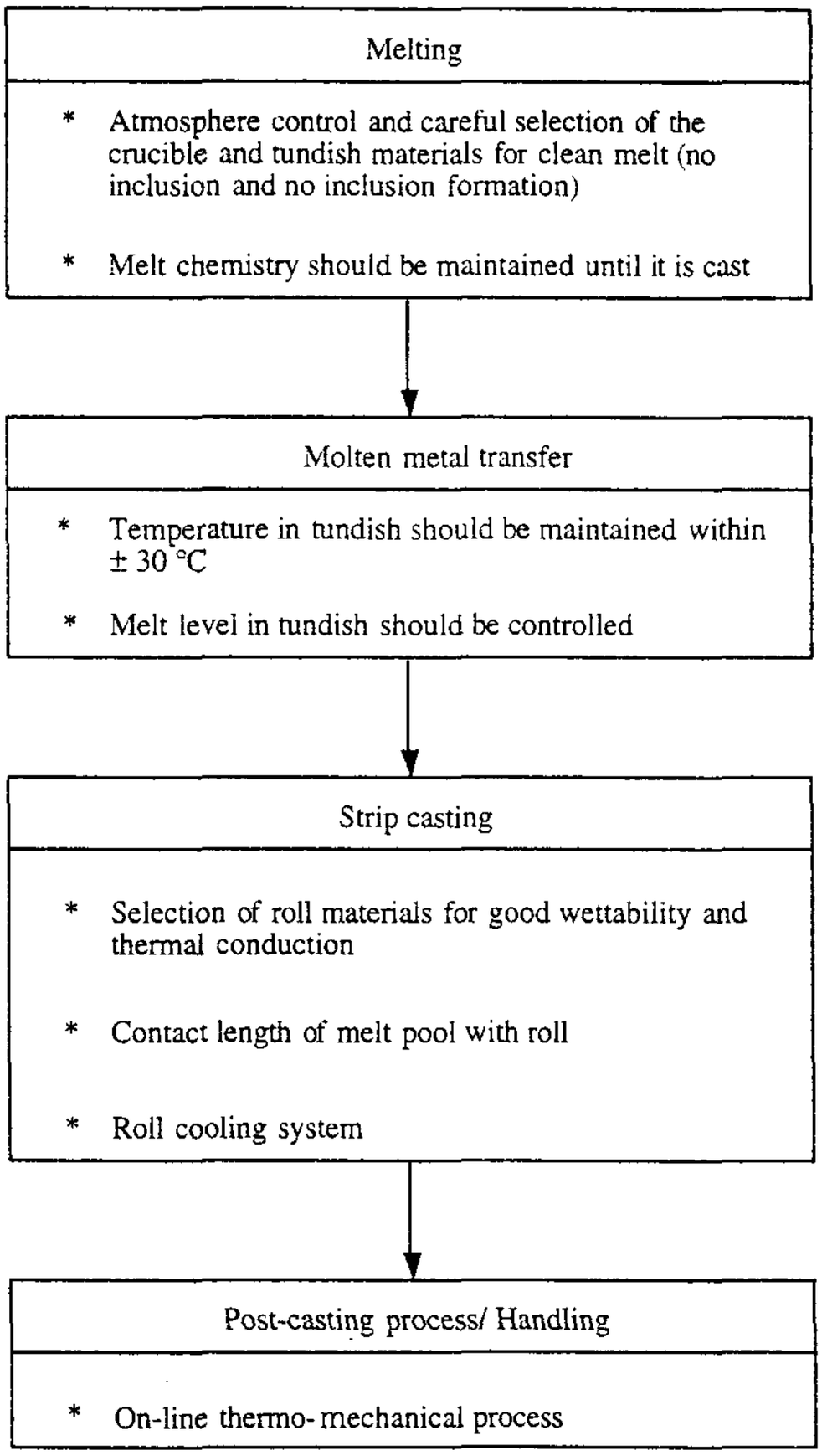

그림 9. Melt Drag 공정개략도

문제의 해결을 위하여 턴디쉬에서 용탕의 흐름형태를 이해하여 온도구배가 최소가 되도록 턴디쉬를 설계하여야 한다.

턴디쉬에서 용탕 수위는 스트립의 두께를 결정하는 중요한 요소이다. 따라서 용탕수위는 조절되어야 하며, 용탕수위 제어에는 접촉식과 비접촉식 센서가 사용될 수 있다. 비 접촉식은 레이저등을 이용하는 방식이고 접촉식은 float등을 이용한다고 알려져 있다. 또 다른 방식으로는 용탕 턴디쉬의 무게를 측정함으로서 용탕양을 조절하는 방식이다. 턴디쉬의 무게는 일정하므로, 용탕이 들어있는 턴디쉬의 무게는 곧바로 용탕의 무게로 환산되며 그에 따라 용탕수위는 일정하게 조절될 수 있다. 어떤방식이 이용되는지 간에 턴디쉬에서의 용탕수위는 조절되어야 하며, 이는 양질의 스트립 제조에 필수불가결한 요소이다.

냉각롤과 함께 회전하는 공기의 boundary layer도 간혹 문제를 일으킨다고 알려져 있는데, 이는 냉각롤에 붙어도는 공기중의 산소가 주조과정에 영향을 끼치기 때문이라한다. 철계 합금을 주조할 경우 발열반응인 산화가 일어나는데 특히 스트립의 끝쪽 부근의 표면적이 체적에 비해 커서 산화에 따른 열발생에 영향을 받는다고 한다. 스트립 끝쪽의 열발생은 스트립에 온도구배를 발생시키고 그에따라 말림현상이나 crack을 유발시킨다고 한다. 또한 boundary layer가 스트립과 냉각롤 사이에 끼게되면 열전달을 저해시킬뿐만 아니라 불균일하게 만들어서 표면 조도에도 나쁜 영향을 미친다고 한다.

3.4.2 Strip Casting 및 주조 후처리

Melt Drag공정에서 스트립이 형성되는 과정은 다음과 같이 설명될 수 있다. 용탕이 차가운 냉각롤에 닿으면 열전도가 용탕에서 냉각롤 쪽으로 일어나며, 용탕이 냉각롤에 빼앗긴 열량이 응고가 일어날 만큼 충분하면 스트립이 형성되기 시작한다.

이러한 과정은 순간적으로 일어나며 열전도에 따른 응고는 그림 10에서와 같이 점 a에서 시작하여(턴디쉬의 바닥) 점 b에서(턴디쉬에서 용탕의 최고 수위) 끝나는 것으로 알려져 있다. 점 a에서 시작된 응고는 응고된 층이 연속적으로 열을 냉각롤쪽으로 전달하며 성정하여 스트립의 두께가 두꺼워 진다. 이러한 측면에서 관찰한다면 스트립의 두께를 좌우하는 인자는 내부적 인자와 외부적 인자로 대별할 수 있다. 내부적 인자란 열전달에 영향을 미치는 인자를 말하며

- 냉각롤 표면의 온도
- 냉각롤 표면의 재질
- 냉각롤 표면의 형태
- 냉각롤의 냉각방식
- 용탕의 온도

등을 들 수 있다. 위의 인자들은 용탕과 냉각롤 사이의 경계면(interface)에서의 열전달을 좌우하는 인자와 냉각롤 자체의 열전달에 관계된 인자로 나눌 수 있다. 즉 냉각롤 표면의 온도, 표면재질, 표면 형태 등은 용탕의 젖음성(wettability)에 영향을 미치고 그에 따라 열전달 상수에 영향을 미쳐 용탕에서 냉각롤로의 열전달에

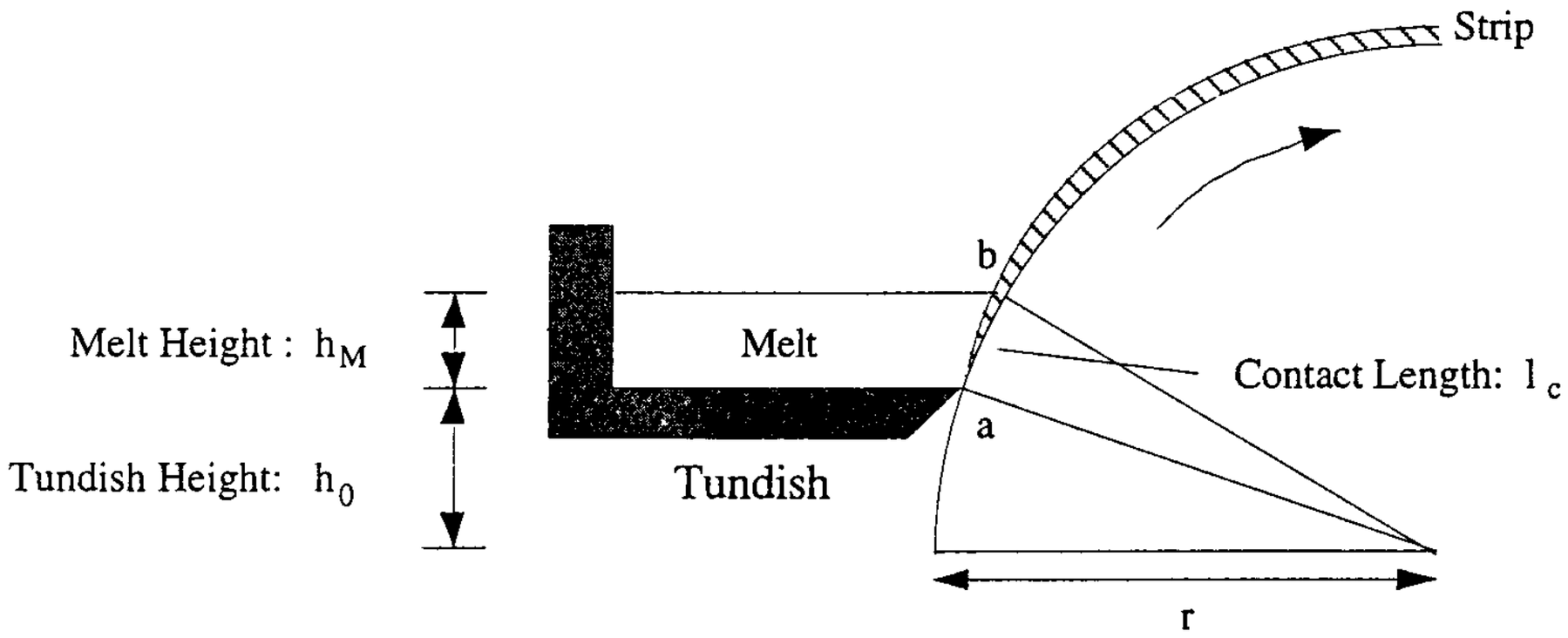

그림 10. MD공정에서 스트립이 형성과정

영향을 미치게 된다. 또한 냉각롤의 냉각방식, 냉각롤의 재질등을 냉각롤 내부에서의 열전달에 밀접한 관계를 맺고 있다.

외부적 인자는 용탕이 냉각롤과 접촉하는 시간인 접촉시간(contact time)을 변화시키는 요소로

- 냉각롤 속도
- 용탕높이
- 턴디쉬의 위치(angular position of tundish)

등을 들 수 있다. 열 전달을 결정하는 인자들이 일정하게 주어진다면 스트립 두께는 용탕이 냉각롤에 접촉하는 시간에 따라 증가할 것이다. 즉 냉각롤의 속도가 일정하다면 용탕의 깊이가 깊을수록 응고가 일어나는 구간이 길어져서 두께가 두꺼워지고, 동일용탕깊이에서는 냉각롤의 속도가 감소할수록 응고가 일어나는 시간이 길어져서 상대적으로 두꺼운 스트립을 제조할 수 있다. 또한 동일 냉각롤 속도 및 용탕 깊이에서도 턴디쉬의 위치에 따라 냉각롤의 곡률이 변화해서 용탕이 냉각롤과 접촉하는 길이가 달라지고, 그에 따라 응고시간이 변화해서 스트립의 두께가 변화할 수 있다.

접촉시간을 위의 세 변수로 표시하면 다음과 같다.

$$\text{contact time} = \frac{\text{contact length}}{\text{roll speed}}$$

냉각롤 속도는 실험조건에서 주어지므로 접촉길이만 구하면 접촉시간을 구할 수 있다. 접촉시간과 스트립 두께 사이에는 실험적으로 다음과 같은 관계가 성립한다고 알려져 있다.

$$t_{strip}(mm) = K\,(t_{contact}(sec))^{0.5}$$

t_{strip} : strip thickness

K : contant(thermal properties of melt and substrate)

$t_{contact}$: 접촉시간

stainless steel을 구리 냉각롤에서 스트립으로 제조할 경우 K값은 2.19, 주석 스트립을 제조할 경우에는, 3.27로 알려져 있다[27].

이렇게 제조된 스트립은 공기와 접촉하는 표면쪽 품질에 문제가 있는 것으로 알려져 있다. 즉 공기와 접촉때문에 용탕에 slag가 형성되어 스트립에 결함을 유발시키거나, 응고가 불균일하게 일어나서 결함이 생기는 경우가 발견된다. 또 주조된 스트립의 free surface는 냉각롤쪽 표면에 비하여 상대적으로 온도가 높기때문에 조심스럽게 다루어야 부주의로 인한 cracking을 막을 수 있다. 스트립의 표면조도는 불균일한 응고에서 기인한다. MD 스트립의 경우, 주조후에 표면조도 및 기계적 성질 향상을 위하여 thermo-mechanical treatment가 필요하다고 알려져 있다.

4. 급냉 연자성 스트립의 특성

급속냉각법으로 제조될 수 있는 연자성 재료는 비정질합금 스트립, 초미세결정립 합금, Fe-6.5%Si, 및 규소강판을 들수 있다. 도표 1은 이 합금을 포함한 대표적 연자성 합금의 자기 특성을 보여주고 있다. 또한 그림 11은 상용 주파수대에서 각 연자성 재료의 철손특성을 보여준다. 이중 PFC공정으로 제조되는 가장 대표적인 연자성

표 1. 비정질 및 경합재의 고주파특성 비교

Materials	조 성	Bs (T)	Tc (℃)	λ (ppm)	ρ (μΩm)	μ (50kHz 0.1T)	W(w/kg) (100kHz 0.2T)
비정질(Fe계)	FeSiB	1.56	415	27	1.37	4000	700
비정질(Co계)	CoFeNiBSi	0.55	205	<1	1.42	30000	40
Nanocrystalline	FeMoCuBSi	1.2	600	1	1.1	40000	50
Supermendur	FeCoV	2.33	950	80	0.35	1500	1200
Fe : 6.5% Si	FeSi	1.8	700	<1	0.82	1000	1000
Deltamax	FeNi	1.6	480	25	0.45	4000	600
Supermalloy	NiFeMo	0.82	400	1	0.55	15000	100
H7C4 ferrite	MnZnFeO	0.5	215	−2	1.00e+8	230	120

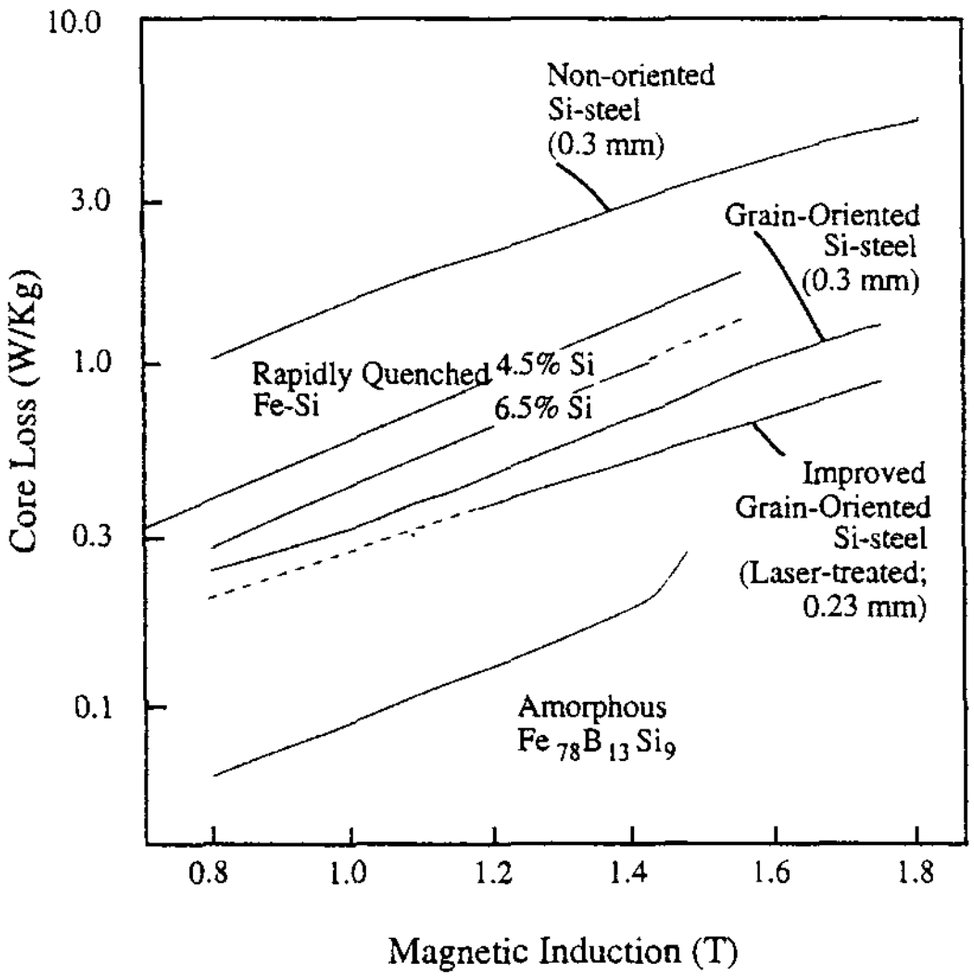

그림 11. 연자성재료의 상용주파수대(50~60Hz) 철손 특성

재료는 비정질 합금 스트립인데, 비정질 합금 스트립의 개발 방향은 크게 두가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째 방향은 포화자속밀도가 높고 철손이 낮아서 상용주파수대의 철심으로 사용되는 철계 비정질 합금 스트립이다. 현재 미국에서는 주상 변압기용 철심재료가 방향성 전기강판에서 철계 비정질 합금 스트립으로 대체중에 있다고 한다. 둘째 방향은 포화자속밀도는 낮으나 자왜가 작아 고주파대에서 우수한 자성 특성을 나타내는 코발트계 비정질 합금 스트립이다. 최근 전자기기의 소형화 및 고주파화가 진행되고 있기 때문에 앞으로 코발트계 비정질 합금 수요는 크게 증가할 것으로 전망되고 있다. 한편 특정 조성의 철계 비정질 합금 스트립을 결정화온도 이상에서 열처리하면 초미세 결정립(Nanocrystalline)을 형성하며 자왜가 작아져, 고주파에서 포화자속밀도도 높고 투자율이 큰 우수한 특성을 나타낸다고 한다. 그러나 이재료는 이미 결정화가된 재료이기 때문에 기계적 충격에 매우 약하다는 단점이 있다. Fe-6.5%Si의 경우 자왜가 0이라는 특성때문에 일본을 중심으로 PFC공정을 통하여 스트립의 특성을 주로 연구하였다. 그러나 PFC공정으로 제조된 Fe-6.5%Si스트립은 그 용도가 불확실하다는데 문제점이 있다. 표 1 및 그림 11에서 살펴보듯이 상용주파수대나 고주파대에서 Fe-6.5%Si의 자성특성은 비정질 합금 스트립에 비해 열등하다. 미국의 Allied Chemical Co.는 이미 80년대 중반에 Fe-6.5%Si 스트립의 생산에 성공을 발표하였으나 상용화시키지 않은 점은 응용분야 개척에 어려움이 있기 때문으로 추측된다. Fe-6.5%Si 스트립이 적용될 수 있는 분야는 현재 방향성 및 무방향성 전기강판이 사용되고 있으나 성능이 떨어지는 중주파대의(400~1000Hz) 철심등이다. 이러한 용도로 사용되기 위해서는 두께 200~300㎛의 스트립으로 제조되어야 하며 PFC공정으로 이정도 두께의 스트립을 안정적으로 제조하기란 어렵다. MD를 이용하여 규소강판을 제조하려는 연구는 현재 산업과학기술연구소에서 진행중이다. MD로 제조된 규소강판은 스트립의 공기쪽 표면에 주조조직인 (200)〈0vw〉집합조직이 강하게 형성된다. 적정조건하에서 제조된 규소강판을 적정조건에서 열처리 시키면(200) 극점강도가 random대비 약 15배에 달했다. 규소강판의 (200)면은 자화난이

방향인 〔111〕방향이 없는 자화용이면으로 규소강판의 이상적 집합조직으로 알려져 있으나, 현재로는 상업적 제조법이 확립되어 있지 않다. 따라서 현재 진행중인 연구는(200) 집합조직 강화 및 스트립 주조조건 확립을 목표로 하고 있다.

참 고 문 헌

[1] W. Klement Jr., R.H. Willens, and Duwez : Nature, Vol. 187(1960) p.809

[2] F. R. Mollard : Journal of Metals, 34, March(1982) pp.565-571

[3] M. C. Narasimhan : US Patent No. 4221257(1980)

[4] K. Narita, N. Teshima, Y. Mori, and M. Enokizono : IEEE Trans. Mags., Vol. Mag -17(1981) p.2857

[5] J. E. Wittig, E. Vogt, and G. Frommeyer : Ultramicroscopy, Vol. 30(1989) p.172

[6] C. F. Chang, R. L. Bye, V. Laxmanan, and S. K. Das : IEEE Trans, Mags., Mag-20, No.4, July(1984) p.553

[7] Y. Sato, T. Sato, and Y. Okazaki : Mater. Sci. Eng A, Vol. 99(1988)p.73

[8] K. I. Arai, N. Tsuys, K. Ohmori, T. Yamamoto, and T. Miyazaki : J. Mag. Mag. Mat., Vol. 19(1980) p.85

[9] Lee L. Teoh : Iron and Steel Engineer, December (1988) pp.34-40

[10] S. J. Savage and F. H. Froes : Journal of Metals, 36, April (1984) pp.34-40

[11] R.B. Pond : USP Patent No. 2825108 (1958)

[12] T.R. Antong : J. Appl. Phys., Vol. 49 (1978) p.829

[13] T.R. Antong : J. Appl. Phys., Vol. 50 (1979) p.245

[14] H.E. Cline : J. Appl. Phys., Vol. 50(1979) p.239

[15] Z. Sun and H. A. Davies : Mater. Sci. Eng., 98(1988) p.71

[16] H. Fiedler, H. Muhlbach, and G. Stephani : J. Mat Sci, Vol 19, 1984, p.3229

[17] L.A. Anestiev : Mater. Sci. Eng., A131 (1991) p.115

[18] R. D. Blevins : Applied Fluid Dynamics Handbook, Van Nosrand Reinhold Co (1984) p.42

[19] I. E. Idelchik : Handbook of Hydraulic Resistance, Hemishere Publishing Co (1986) p.293

[20] S. Kavesh : in Metallic Glasses ASM, Metals Park, Ohio(1978) p.36

[21] H. A. Davies : in Rapidly Quenched Metals, Eds. S. Steep and H. Warlimont, North-Holland, Amsterdam(1985) p.101

[22] J. H. Vincent, H.A. Davies, and J. G. Herbertson : in Continuous Casting of Small Cross Sections, Eds. Y. V. Murty and F. R. Mollard, Met. Soc. AIME, Warrendale, Penn(1981) p.103

[23] L. Granasy : Mater. Sci. Eng., A123 (1990) p.L5

[24] S. M. Pimputkar : R. S. Carbonara, J. J. Rayment, J. L. McCall and A. H. Clauer, in : Proc. 5th Intern. Conf. on Rapidly Quenched Metals RQ5, eds. S. Steeb and H. Warlimont(North-Holland, Amsterdam, 1984) p.95

[25] R. K. Pitler : Advanced High-Temperature Alloys, S. M. Allen, R. Pelloux and R. Widmer eds.,(ASM, Metals Park, Ohio 1986), 1-10

[26] R. S. Carbonara : Casting of Near Net Shape Products, edited by Y. Sahari, J. E. Battles, R. S. Carbonara, and C. E. Mobley, TMS(1988) p.169

[27] J. P. Birat and L. Sosin : Proc. Inter. Conf. on New Smelting Reduction and Near Net Shape Casting Technologies for Steel, The Korean Inst. of Metals and The Inst. of Metal, UK(1990) p.591