

전자기력을 이용한 연속용융도금

박 정 렬

포항제철(주) 기술연구소 광양압연연구그룹

Continuous hot-dip metallizing using electromagnetic force

Jeong-Real Park

Kwangyang Rolling Products Research Group
POSCO Technical Research Laboratories
699 Kumho-dong, Kwangyang, Chonnam, 545-090
Republic of Korea

1. 서 론

전자기야금^{1,2)}은 전자유체역학을 이용하여 용융 금속의 운동을 유용하게 조절하는 야금분야이다. 전자유체역학(MHD : magnetohydrodynamics)은 1942년에 이르러 Alfven에 의해 체계화되어 그 후 본격적으로 용융금속의 운동에 응용되기 시작하였다. 즉 용융금속(용융염, 통전용액 또는 플라즈마)과 같은 통전성의 유체에 자기장이 인가되면 유체에 Maxwell식에 의해 전위(Faraday법칙) 및 전류(Ampere법칙 및 Ohm법칙)가 유도되고, 유체의 전류(유도 및 인가)와 자기장(인가 및 유도)이 작용하여 유체에 전자체적력(Lorenz법칙)을 유발시키며, 본 힘은 Navier-Stokes식에 의해 유체를 운동시키며, 일부에너지를 유체를 가열시킨다.

본 운동의 주요한 야금분야 응용^{1,2)}으로는 용융 금속의 유동을 촉진시키는 전자교반 작용에 의한 용탕내 개재물의 유동분리 및 주조시 등축정의 미세한 응고조직형성 및 용융금속의 pumping에 의

한 수송, 용융금속의 유동을 억제시키는 전자기적 반작용에 의한 연주시 용탕면과 내부의 유속진정 및 주조시 주상정형상 촉진(필요한 경우) 및 두 용융금속의 섞임을 방지한채로 응고시키는 복층구조, 용융금속의 자유표면형성 촉진작용에 의한 무주형 연주(Al과 같이 전기전도도가 높고 비중이 가벼울 경우) 및 반접촉 연주(Fe와 같이 전기전도도가 낮고 비중이 무거울 경우), 용융금속내 통전성이 다른 개재물에 전자기력의 차별 작용에 의한 분리, 용융금속의 유동 자체를 전자기화한 유동관찰 등이 있다. 본 응용들의 특징은 전자기력의 비접촉성, 고밀도성, 청정성 및 우수한 제어성이며, 응용결과 고품질화, 실수율 및 생산성 향상, 공정 개선, 신제품 개발을 달성할 수 있다.

용융도금도 용융금속속과 피도금체와의 운동을 이용하는 분야로서 MHD를 응용할 수 있으며, 1960년대 후반부터 실제로 시도되어 왔으며 일부는 상업화되었다. 관련 세부기술의 종류와 내용, 문제점과 현황 및 전망을 서술하고자 한다.

2. 연속 용융도금 공정의 문제점

강판의 연속 용융아연 도금공정은 1936년 미국 철강회사 Armco에서 개발 착수되어 Sendzimir³⁾에 의해 특허화된 후 현재의 공정으로 개량 발전되어 왔다⁴⁾. 본 공정은 coil형의 강판 strip을 연속적으로 입력 및 전처리 부분, 로내 가열탈지 및 환원 및 소둔처리 부분, 도금욕 및 부착량 조절에 의한 도금 부분과 합금화(필요시) 및 냉각 부분, skin pass 및 후처리 및 출력 부분으로 이루어져 있다. 이 중 도금 부분은 본 공정의 중심으로서 Fig. 1과 같이 강판이 소둔로 끝의 환원 분위기에서 도금욕으로 인입되어 sink roll에 의해 수직상방으로 방향 전환한 후 correcting roll 및 stabilizing roll을 거치면서 강판의 진동을 억제하고 수직을 유지시킨 후 점성유동의 용융도금층이 두껍게 도금된 상태에서 도금욕을 떠나자마자 gas wiping방법에 의해 도금층을 원하는 두께로 공기 또는 질소(액체아연의 산화감소 목적)로 불어서 깎아내린다.

본 도금욕 내에는 침적된 sink roll, correcting roll 및 stabilizing roll 축수부(journal bearing type)의 마멸에 따른 정비부하와 그에 따른 생산성 감소, 침적 roll의 구동에 따른 욱내 dross의 강판에 부착 및 압착 박힘, 침적 roll 표면과 강판

과의 밀착에 따른 강판 표면불량(roll 표면mark 전사 및 slipping 자국)과 같은 도금표면 품질 문제점이 발생하고 있다. 근본적으로 도금욕내 침적 roll들을 모두 제거한 상태에서 강판이 roll과의 접촉없이 도금욕을 통과하는 획기적인 구조적 개선이 필요하다. 또한 현재와 같은 연속 용융아연도금 공정에서는 고속박도금을 실시하고 있으며, 본 경우 gas wiping시 극심한 소음발생, 각인 용융금속의 splashing, 그로 인한 line속도제한(통상 최대180mpm), gas blow mark등 도금표면결함, 고가의 질소 wiping등으로 환경적, 생산적, 품질적 및 제조원단위 상승 등 구조적인 문제점과 제한점이 항상 동반된다. 근본적인 해결을 위해서는 gas wiping을 대체하는 획기적인 방법이 필요하다. 또한 강판이 용융Zn도금욕 통과시 Fe성분이 용해확산되어 Zn-Fe 화합물을 석출시키며, 본 화합물은 도금욕내 Al성분에 의해 Zn-Fe-Al 화합물로 일부 변환되어 도금욕과 비중분리 제거되지만 일부는 여전히 Zn-Fe 화합물 형태의 미소개재물로 남아 도금욕내에 dross로서 도금층내에 포함되어 도금층의 결함으로 형성된다. 도금욕 화학변화없이 본 dross제거가 필요하다.

3. 용융도금욕 전자기 부양

3.1. 수평부양 및 수평깎음

Fig. 2는 이동자기장을 인가하여 용융도금욕을 수평부양시켜 연속수평도금 및 도금층의 수평깎음을 나타내는 간략 단면도⁵⁾이다. 즉 용융도금욕내 roll을 제거하고, 도금욕 표면이하에서 도금욕을 수평관통하여 피도금체의 입측 및 출측 통로를 만든 후 본 양측 통로 주위에 선형유도기를 설치하여 자기장의 이동방향이 도금욕쪽으로 배향시키면 양측통로로 유출되려는 용융금속에 유입방향으로 전자기 체적력이 발생하여 유출을 막을 수 있다. 피도금체가 연속적으로 탈산 및 예열을 거쳐 도금

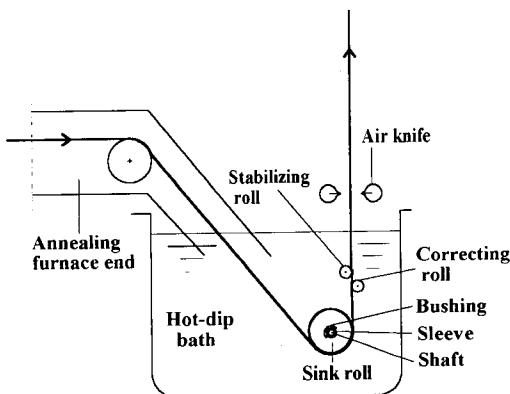


Fig. 1. A schematic of hot-dip galvanizing bath of a continuous galvanizing line.

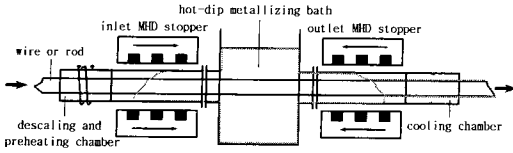


Fig. 2. A schematic of a continuous horizontal hot-dip metallizing line ("Delot Process") using travelling magnetic flux after Birger et. al.⁵⁾

속 입측 통로로 들어와서 도금욕내를 직진하여 출측통로로 빠져 나간다. 이 때 출측에서는 이동자기장의 세기를 조절하여 유출 도금량을 조절하게 되므로 도금부착량조절이 가능하다. 용융 Al 및 용융 Zn 연속도금에 사용되고 있다.

강판 strip의 연속용융아연도금에 본 공정을 적용하려는 특허^{6,7)}가 있었지만 강판의 자기장내 불안정성 및 도금후 일정거리 이상 수평유지(특히 합금화처리 경우)와 이 구간에서의 급냉응고와 상방으로의 방향전환 및 합금화 급속가열 등의 문제점이 있어 상업화로 개발되지 못한 것으로 추정된다. 그러나 일차원적인 물체 즉 선재와 봉재의 경우 직경이 이차원적인 판재두께보다 훨씬 두껍고, 또한 원통형의 선형유도기 중심에 대해 대칭이 되어 자기장 내에서 안정성을 유지할 수 있으므로 1994년 J. Delot⁸⁾에 의해 "Delot process"라는 이름으로 특허화되고 동시에 상업화(본 처리장치와 전처리인 플라즈마 가열 탈산 처리장치 포함)되었다⁹⁾. 기존의 batch도금과 같은 도금전처리와 본처리 및 후처리 같은 많은 설비와 공정과 노동과 환경 문제가 없으며, 기존대비 공정 및 제어도 간편하여 경제성이 높으며, 도금층 두께도 원하는 두께로 균일하게 깎을 수 있으며, 도금층과 소재와의 밀착성 등의 품질도 우수하여 선재, 봉재 및 각재의 강재 연속용융도금의 신공정이다. 특히 콘크리트 철근의 연속용융아연도금에 적용한 결과 기존의 유기피복(에폭시) 철근대비¹⁰⁾ 근본적인 내식성(희생 양극성)이 우수하고, 도금층의 가공성이 우수하며, 특히 소재 및 콘크리트와의 접착성이 우수하여, 거친 건설현장에서의 표면손상도 문

제가 되지않아 종합적인 경쟁력이 높아서 고급의 방식 및 강도를 요구하는 건축 및 토목 구조물에 사용되고 있다⁹⁾.

3. 2. 수직부양

3. 2. 1. 선형유도형 연속수직 용융도금

Fig. 3은 이동자기장을 인가하여 용융도금욕을 수직부양시켜 연속수직도금을 실시하는 설비의 간략 단면도¹¹⁻¹³⁾이다. 용융도금욕내 각종 roll들을 전부 제거한 후 도금욕 바닥을 수직관통시켜 피도금체의 입측통로를 만들고 통로 주위에 선형유도기를 설치하여 자기장의 이동방향이 중력방향과 반대로 배향시키면 통로내 용융금속에 수직상방의 체적력이 유발되어 용융금속의 유출없이 수직부양되며, 강판strip이 도금욕 하부로부터 상부로 관통하면서 도금되고, 관통후 gas wiping으로 도금부착량을 조절한다. 도금욕의 크기를 작게하고 주위에 premelting pot를 설치하여 도금용 금속을 용해 및 공급한다. 도금층 교체시 strip을 절단할 필요없이 기존 도금욕을 뽑아내고 premelting pot에 준비된 교체도금욕을 공급하여 단시간에 도금욕 교체가 가능하다.

현재 제철장비업체-연구소-철강회사인 Manne-smann-Bardin-Sollac이 공동개발¹³⁾중이며 용융아

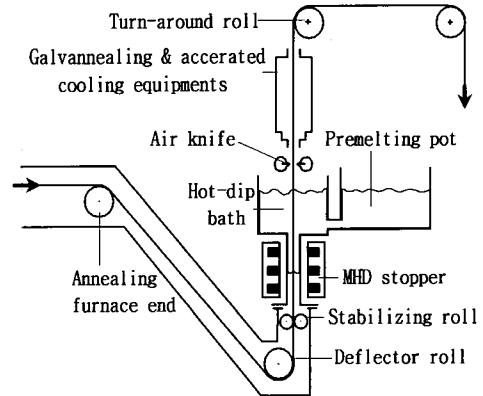


Fig. 3. A schematic of a continuous vertical hot-dip metallizing line using travelling magnetic flux after Paramonov.¹¹⁾

연도금의 경우 pilot line(러시아의 Bardin 연구소)에서 강판 폭 250mm 라인속도 26mpm에서 연속조업이 가능한 상태이다. 본 공정의 상업화를 위해서는 scale-up 및 고속화에 따른 제문제점 해결을 위한 추가 개발이 필요한 상황이고 현재 추진중이다.

3. 2. 2. 고주파 2단 코일형 연속수직 용융도금

Fig. 4는 고주파 자기장을 인가하여 용융도금욕을 수직부양시켜 연속수직도금을 실시하는 설비의 간략 단면도¹⁴⁾이다. 도금욕 바닥의 관통통로(내부 간격 약 10mm) 주위에 2단코일을 설치하여 고주파(20kHz범위) 전류를 흘려 고주파 자기장(0.4Tesla 범위)을 통로내 용융금속 및 도금강판 strip에 가해주면, 용융금속에 대해서는 수직상방의 체적력이 유도되어 부양되고(본 예의 경우 용융아연욕 높이 488mm 부상) 자기장내 강판에 대해서는 전후면에서 직각방향으로 미는 힘이 작용하여 강판이 자기장 통로의 중앙에 위치하게 되어 안정성을 갖게되는 장점이 있다.

본 공정은 호주의 BHP 철강회사에서 1991년부터 개발착수하였지만 진행현황은 알려진 바가 없다. 고주파 자기장에 의한 상당한 가열 효과때문에 상용화에 문제가 되는 것으로 예상된다.

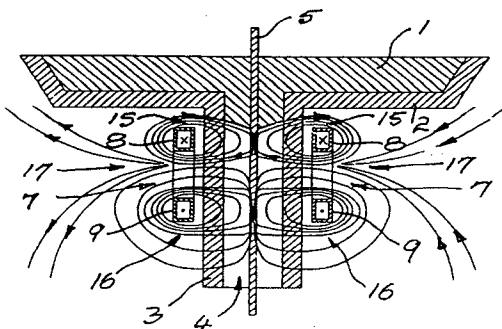


Fig. 4. A schematic of a continuous vertical hot-dip metallizing line using transverse magnetic flux : 1. molten metal bath; 2. pot floor; 3. duct; 4. strip inlet passage; 5. steel strip; 7. coils; 8. upper coil; 9. lower coil; 15, 16 and 17 are virtual poles, after Morrison et. al.¹⁴⁾

4. 용융도금층 전자기 wiping

4. 1. 고주파 코일형 전자기 wiping

Fig. 5는 강판 strip의 연속용융(아연)도금 공정에 있어 용융도금층의 기존 gas wiping 대신 고주파 코일 전자기(EM) wiping¹⁵⁻¹⁸⁾을 실시하는 설비의 간략 개념도¹⁵⁾이다. British Steel¹⁶⁾과 Benelux 3국 제철소 주관 CRM¹⁵⁾ 연구소에서 개발시도 및 진행되었었다. 기존 gas knife lip 위치에 동파이프를 설치해 강판과 간격 10mm 정도 유지하면서 강판 주위에 한바퀴 감은 후 (또는 강판 전후면전에 별도 동 파이프 설치후) 동 파이프 내부에 냉각수를 흘리면서 표면에 고주파(200kHz 범위) 고전류(1500A 범위)를 통전시키면 동 파이프 주위와 도금층과 소지강판에 고주파 자기장을 발생시키고 도금층에 유도전류가 발생하여 상호작용하여 도금층에 체적력이 발생한다. 본 체적력의 강판에 직각성분은 도금층을 압착시켜 도금층 두께를 감소시키고, 중력성분은 도금층 자체를 중력과 같이 아래로 당겨서 도금층 두께를 점성 변형시켜 감소시킨다. 고주파 EM wiping에서는 강판 직각성분의 체적력이 중력성분의 10배 이상이 되어 주로 도금층 압착 및 강판 진행에 의해 부착량이 감

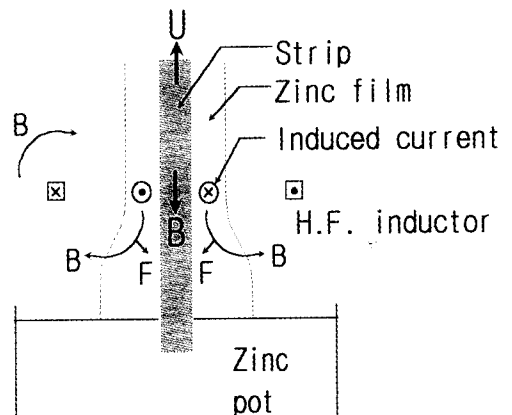


Fig. 5. A schematic of electromagnetic wiping for a continuous galvanizing line using high-frequency longitudinal flux after Malmendier et. al.¹⁵⁾

소한다^{15,16)}. 본 EM wiping에서는 인가 주파수, 전류 및 강판과 코일간의 간격에 의해 깎움력을 조절할 수 있다¹⁵⁾.

CRM 연구소¹⁵⁾가 본 장치를 개발제작하여 pilot line에서 폭 300mm 강판의 저속(50mpm 이하) 연속용융아연도금에 시험한 결과 강판은 고주파 자기장 내에서 대단히 안정되어 중앙위치를 유지하며, 도금층은 강판 중앙부위뿐만 아니라 변방부위에서도 균일하게 깎인다고 보고되고 있다. 그러나 본 깎음에는 Fig. 6과 같이 깎여진 도금층 두께의 한계치(약 100g/m²/side)가 나타나서 본부착량 이하로는 깎을 수 없고, 도금층에 유도된 고주파 전류에 의해 도금층이 합금화처리 온도범위 이상으로도 가열되는 단점이 생겼다. 결과적으로 본 EM knife 자체로는 기존 gas knife를 완전히 대체할 수

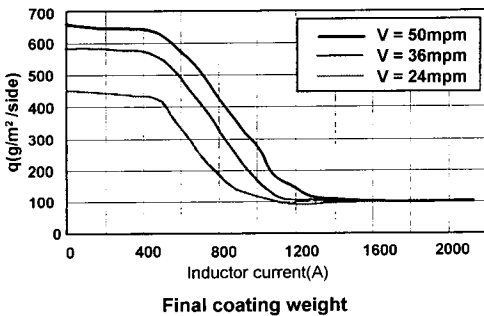


Fig.6. Final coating weight vs. inductor current in the high-frequency longitudinal flux wiping after Malmendier et. al.¹⁵⁾

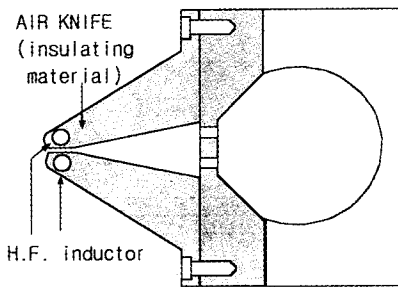


Fig. 7. Cross-sectional view of combined knives with gas knives and high-frequency longitudinal flux knives after Malmendier et. al.¹⁵⁾

없고 Fig. 7과 같이 기존 gas knife에 병설하여 병용^{15,19)}하도록 개발되고 있어, 기존 gas wiping 압력을 줄일 수 있고, 특히 합금화처리를 필요한 승은 효과가 있어 유리하다고 제시되지만 기능면 장치면 및 운영면에서 효율적이지 못해 실용성이 적다.

4. 2. 선형유도형 전자기 wiping

Fig. 8은 강판 strip의 연속용융(아연)도금 공정에 있어 용융도금층의 기존 gas wiping 대신 다상(multiphase)의 선형유도기를 이용한 EM wiping^{15,20-22)}의 간략 개념도¹⁵⁾이다. 중력역방향으로 이동하는 도금층에 수직한 방향으로 자기장을 작용하여 본 자기장을 중력방향으로 이동시키면 본 자기장과 도금층에 유도된 전류에 의해 도금층 내에 주로 중력방향으로 전자기 체적력인 Lorentz force가 작용하여 도금층의 점성 하방운동이 일어나 두께가 얇아진다. 용융도금층을 깎는데 필요한 체적력²³⁾은 다음과 같다.

$$F = (2/9) \eta U/t^2$$

여기서 η 점도, U 강판속도 및 t 용융도금층 두께이며, 용융아연도금의 경우 대표적인 예로 460℃ 도금욕으로부터 도금층 90g/m²/side을 180mpm

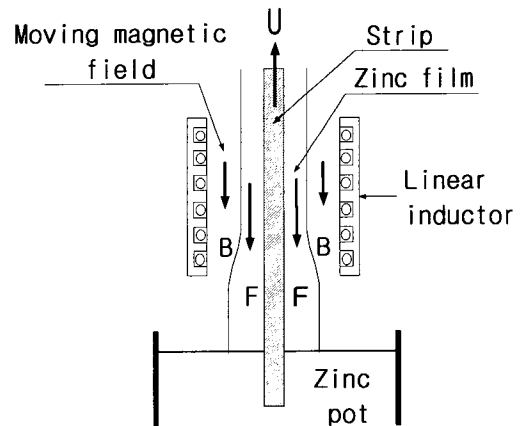


Fig. 8. A schematic of electromagnetic wiping for a continuous galvanizing line using travelling magnetic flux after Malmendier et. al.¹⁵⁾

으로 도금시킬 경우 깎음력 F 는 약 $10\text{N}/\text{cm}^3$ 로서 이는 용융아연 무게의 158배에 해당한다. EM wiping에서 이런 힘 이상이 발생할 수 있어야 한다. 본 EM wiping force^{1, 2)}는 저주파 선형 유도기에 인가된 전류의 제곱과 주파수에 비례하고, 전후 유도기 간격의 제곱에 반비례하므로 전류(또는 인가전압), 주파수 및 간격을 조정하여 도금부착량을 조절할 수 있다. 그러나 주파수의 경우 주파수 증가에 의한 깎음력 증가보다는 도금층 및 강판의 유도기열 증가효과가 커지므로 저주파(예를 들면 100Hz 이하) 자기장에서의 EM wiping이 유리하다. 그러나 저주파 선형유도 자기장 내에서 강자성체인 일반강판은 원천적으로 불안정하고 진동 자기장에 따라 전후면으로 진동²¹⁾하고 강판의 좌우 가장자리가 뒤틀려 각각 전자석면에 흡착²²⁾하는 단점이 있어 현재 실용화되지 못하여, 안정화를 위한 개발이 선행되어야 한다. 또한 도금판 좌우 가장자리 부분은 덜 깎여 고도금이 될 경우 적합한 조절이 필요하다.

4. 3. 회전 자석형 전자기 wiping

Fig. 9는 강판 strip의 연속용융(아연)도금 공정에서 용융도금층의 기존 gas wiping 대신 상호 자

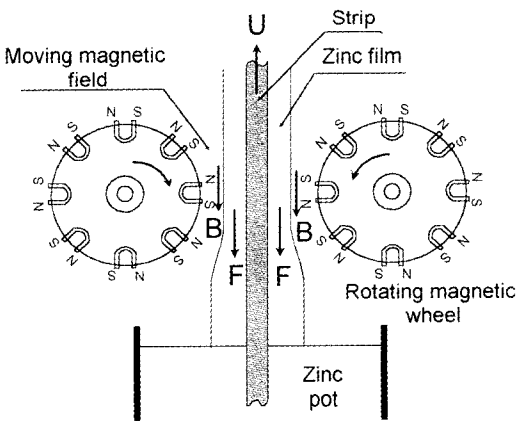


Fig. 9. A schematic of electromagnetic wiping for a continuous galvanizing line using magnetic drums after Ungerholm.²⁰⁾

극이 반대로 배열되는 두개의 자석원통집합체의 회전에 의한 EM wiping을 실시하는 간략 단면도²⁰⁾이다. 선형유도형과 마찬가지로 도금층에 수직한 자기장을 중력방향으로 이동시켜 도금층을 중력방향으로 깎는 방법이다.

선형유도형과 같은 방법으로 자기장의 세기 및 회전에 의한 자기장 주파수 및 두 회전체간의 간격에 의해 깎음력과 도금부착량이 결정된다. 본 기계적 회전방법의 장점은 도금강판과 고속 회전 자석체 사이에 air pad층이 형성되어 본 자기장 내에서 강판이 자석체로의 흡착을 막을 수 있으나, 본 자기장 내에서 강판의 진동, 양 edge부의 뒤틀림, 자석집합체의 기계적 및 열적 불안정성 등의 문제점이 있다. 도금판 edge부에서는 wiping이 약하여 별도의 side wiper를 필요로 할 것으로 예상된다. 아직 실용화되지 못하고 개발 시도 중에 있다.

5. 용융도금욕 개재물 제거

Fig. 10은 전자기력을 이용한 용융금속 중의 개재물을 제거하는 방법중 직류 전류와 직류 자장을 동시에 직접 인가하여 개재물을 제거하는 방법²⁴⁾을 나타낸다. 개재물의 전기전도도가 용융금속의 전기전도도보다 크면 개재물에 전류가 많이 흘러 개재물에 Lorentz force가 크게 작용하여 그 방향으로 운동해 가고, 반대이면 반대방향으로 분리된다.

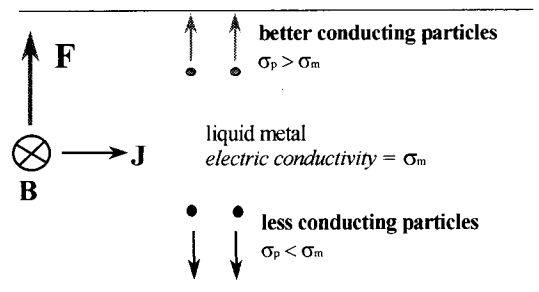


Fig. 10. Principle of electromagnetic separation of dross in hot-dip metallizing bath after J. P. Park.²⁴⁾

용융아연도금육의 경우 강판의 Fe가 도금육에 용출하여 Fe-Zn 및 Fe-Al계의 미세 dross가 석출되어 도금층에 묻혀 들거나 박혀 들어 도금결함이 된다. 이런 dross를 포함한 용융도금액을 적합하게 설계된 통로에 흘리면서 통로 주위에 전자기장을 인가하여 dross를 분리제거할 수 있다. 특히 자기장과 전류를 직접 인가하므로 유도 전자기장을 이용할 경우보다 MHD 힘을 효율적으로 발생시키므로 dross분리를 쉽고 효율적으로 수행할 수 있다. 특히 직류 전자기장을 이용할 경우 용융금속 전체에 균일한 힘이 작용하므로 용융금속체 중앙의 부유 dross도 쉽게 분리할 수 있으므로 최근 용융Zn 및 용융Al 도금육의 개재물 분리에 적용 시도되고 있다²⁴⁾.

6. 결 언

내식성 향상을 위해서 연속용융도금강재의 수요는 계속 증가하고 있으며 자동차, 외관과 같은 고품질의 용융도금층(합금화 용융아연도금) 강재 수요가 최근 급격히 증가하고 있다. 생산공정면에서도 생산비용 감소 및 고속박도금화와 고품질화와 환경친화적인 공정의 개선 및 혁신이 진행되고 있으며, 경쟁 공정인 전기도금을 능가하도록 추진되고 있다. 전자유체역학을 이용하여 용융도금육 부양 및 이송, 용융도금층 깎음 및 용융도금육 개재물 제거는 이런 공정혁신을 가능케 하며, 동반기술(내열 및 제어 및 냉각)의 발달은 이런 공정혁신의 실현을 앞당길 것이다.

참 고 문 헌

1. S. Asai : Nishiyama Memorial Lecture, 129 & 130, ISIJ (1993).
2. S. Asai : Nishiyama Memorial Lecture, 153 & 154, ISIJ (1994).
3. T. Sendzimir : U.S. Patent 2,110,893, March (1938).
4. J. I. Butler, D. J. Beam and J. C. Hawkins : Iron and Steel Engineer, Feb. (1970) 77.
5. B. Birger, H. Strekalov and Y. Volkov : Conf. Proc. Corrosion Control-- 7th APCCC, China, Vol.2 (1991) 1380.
6. K. Kawakae : Japanese Patent 50-3036, Jan. (1975)
7. S. Kanbara : Japanese Patent 50-28439, Mar. (1975).
8. J. Delot : U.S. Patent 5,338,581, Aug. (1994).
9. V. Dorsten and G. Sanchez : Proc. of the 1996 66th Annual Conf. of the Wire Association International Inc., Charlotte, NC, USA, (1996) 44.
10. L. Flynn : Roads & Bridges, Nov. (1993) 44.
11. V. Paramonov : Proc. of Int. Conf. 21st Cent. Steel Ind. of Russia and CIS, Moscow, Russia, Vol.5 (1994) 5.
12. K. M. Frommann, V. A. Paramonov and B. L. Birger : Proc. of 'GALVATECH'95, Chicago, IL, USA (1995) 189.
13. K. Frommann and V. A. Paramonov : Proc. of GALVATECH'98, ISIJ, Chiba, Japan (1998) 739.
14. B. Morrison, R. Osterberg, R. Payling, C. Baharis, J. O'neill, D. Jinks and P. Ellis : International Patent WO 96/03533.
15. M. Malmendier, J. Crahay, J.-F. Noville and S. Wilmotte : Proc. of GALVATECH'98, ISIJ, Chiba, Japan (1998) 751.
16. C. Lloyd-Jones, H. A. Barker and V. J. Wornerr : Ironmaking and Steelmaking, Vol.25 No.2 (1998) 117.
17. T. Sato, T. Ishii, S. Sygiyama and A. Yada : U. S. Patent 5,384,166, Jan. (1995).
18. Y. Okubo and T. Morikawa : Japanese Patent 8-127854, May (1996).

19. Y. Nagai, E. Ikesaki, G. Umeno and N. Okada : Japanese Patent 61-266560, Nov. (1986).
20. K. E. Ungerholm : British Patent 1,221,905, Feb. (1971).
21. D. Ten, S. Matzhara and K. Nakamoto : Japanese Patent 6-108220, Apr. (1994).
22. D. Ten, S. Matzhara and K. Nakamoto : Japanese Patent 7-113157, May (1995).
23. J. A. Thornton and H. F. Graff : Met. Trans. B, Vol.7B (1976) 607.
24. J. P. Park : Ph.D. dissertation, Nagoya University, Nagoya, Japan (1994).