

## 용융아연 도금강판의 도금밀착성 개선

김종상, 배대철

산업과학기술연구소 표면처리연구부

### Improvement of Coating Adherence of Hot-dip Galvanized Sheet Steels

Jong-Sang Kim and Dae-Chul Bae

Department of Surface Treatment

Research Institute of Industrial Science and Technology

#### Abstract

In the present work the adhesion failure of a hot-dip galvanized coating has been studied as a function of gas composition temperature of strip and of atmospheric gas in furnace. The adhesion failure of the hot-dip galvanized coating is classified as three mechanisms: carbon deposition, oxide film formation and alloy layer formation. The adhesion failure due to oxide film formation decreased markedly by increasing the gases temperature of direct fired furnace (DF) in order to improve the reducing ability of steel strip. Optimum conditions of operating and manufacturing facilities for improving the coating adherence are suggested by analyzing the interface between steel substrate and coating layer.

#### 1. 서 론

용융아연 도금강판은 초기에는 주로 전자재분야에 사용되었으나 최근에 자동차, 가전제품등으로 용도가 확대되면서 요구되는 품질특성도 다양화 및 고급화되고 있다. 용융아연 도금강판에 요구되는 품질 중에 가장 중요한 항목으로서 가공시의 도금밀착성을 들 수 있다. 그러나 연속용융 도금라인(Continuous Galvanizing Line: CGL)에서의 조업초기 설비불안정 및 적정조업 조건의 미확보로 인해 간혹 발생하는 도금박리로 인해 수요가의 claim 및 불만사항이 제기되고 있다.

용융아연 도금강판의 도금밀착성은 소지강판의 표면정정도, 노내 강판 및 분위기 기체온도, 분위기 기체조성, 도금욕조성, 도금부착량 및 강판두께등의 큰 영향을 받는다. 그러나 아직까지 용융아연 도금강판의 도금박리기구에 대해서는 체계적으로 밝혀져 있지않은 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 용융아연 도금강판의 도금박리를 유형별로 분류하고 그 원인을 규명하고자 하였다. 또한 CGL설비 개선 및 조업조건의 변경에 따른 도금층과 소지철판계면을 분석함으로써 최적조건을 도출하고자 하였다.

#### 2. 실험 방법

용융도금강판은 포항제철 광양제철소의 No. 1 CGL에서 노내 분위기 기체조성, 노내기체온도 및 강판온도를 변수로 하여 채취하였다. 이때 도금욕온도는 460℃, 도금욕조성은 0.18%Al, 0.08%Pb, 0.01%Fe, balance Zn로 하였으며 도금소재 강판은 0.8mm두께의 저탄소강을 대상으로 하였다.

용융아연 도금강판의 상대밀착성은 180 balance 효과를 나타내는 Look-forming tester를 사용하여 시험한 후 육안 및 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy, SEM)로 관찰하였다. 도금박리가 발생한 시편은 AES(Auger Electron Spectroscopy)로 도금층과 소지철계면에서 주요 원소들의 depth profile를 측정함으로써 도금박리 원인을 규명하고자 하였다. 또한 Look-forming test후 도금박리가 발생했을 때와 밀착성이 양호한 정상도금재의 경우 실제조업 data를 비교 분석하고, 설비개선 및 조업조건변경에 따른 도금밀착성시험을 통하여 최적조건을 도출하고자 하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1. 도금밀착성과 CGL공정과의 관계

일반적으로 CGL에서의 용융도금밀착성과 관련되는 각 공정별 문제점을 요약하여 Table 1에 나타내었다. 도금소재인 냉연강판은 알칼리탈지 라인에서 일부 압연유등의 불순물을 제거한 후 폐열을 이용하여 예열로(Preheating furnace)에서 강판온도를 약 250℃로 승온시킨후 직화가열로(Direct Fired furnace : DFF)로 들어가게 된다.

광양 No. 1 CGL의 DFF는 Selas의 수직로로서 4개의 zone으로 구성되어 있으며 강판온도를 600~700℃로

급속가열함과 동시에 잔존압연유를 휘발, 제거시키고 강판표면에 존재하는 철산화물의 두께를 최소화시키는 작용을 한다.

강판은 DFF를 지나 간접가열로(Radiant tube furnace)인 가열대(Heating), 균열대(Soaking), 급속냉각대(Gas jet cooling), 과시효대(Overaging) 및 최종냉각대(Final cooling)를 거치면서 원하는 기계적성질을 얻고 H<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>분위기(HN<sub>x</sub>)하에서 일부잔존 산화막을 환원시킨후 약 460℃의 도금욕으로 들어가게 된다. 이때 도금부착량과 도금욕조성 등에 따라 도금밀착성이 변화될 수 있다.

#### 3.2. 도금박리유형

용융아연도금층은 Fig. 1에 개략적으로 나타낸 것처럼 여러층으로 구성되어있다. 소지철에 가까운 곳으로부터  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\zeta$ ,  $\eta$ , 상으로 구성되어 있는데, 이중에서 상은 취약한 급속산화합물로서 powdering의 원인이 되므로 형성을 억제하여야 한다.<sup>1)</sup> 이들 합금상의 조성 및 두께는 도금욕조성, 침적시간, 도금부착량, 도금욕온도, 소지철조성등에 큰 영향을 받는다. 또한 도금하기 직전의 소지철표면은 철산화물 또는 탄소등의 불순물이 존재하는데, 임계농도를 초과하면 도금박리 또는 도금층균열 형성이 원인이 될 수 있다.

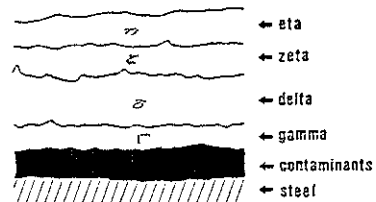


Fig. 1 Schematic representation of a typical hot-dip galvanized coating

Table 1. Principle trouble related with adhesion failure at hot-dip galvanizing line

공정	도금소재	알칼리탈지	예열로	직화가열로	간접가열로	도금욕	Air wiping
문제점	·소재결합 ·강성분 ·Rust ·소재두께	·압연유의 불충분한 탈지	·산소혼입 가능성 ·강판온도 과다상승	·적정공연비 ·적정로내 분위기 제어 ·적정강판 온도유지 ·설비 및 조업 안정화	·수소농도 저하 ·적정강판 온도확보	·Low Al에 의한 과합금화	·과도금 ·후도금

Fig. 2는 Look-forming test시 도금박리가 발생한 용융아연 도금강판표면을 AES로 C, O, Fe 및 Zn의 depth profile을 분석한 결과를 나타낸 것으로 도금박리 유형은 탄소증착, 산화막형성 및 합금층형성 박리기 구로 분류할 수 있다. 일반적으로 도금 소재인 냉연강판 표면에는 약 400~1000Å 정도의 산화피막이 존재하나 산화막형성박리의 경우 약 1 $\mu$ m정도 두께의 산화피막이 존재하였으며, 탄소증착박리의 경우 표면

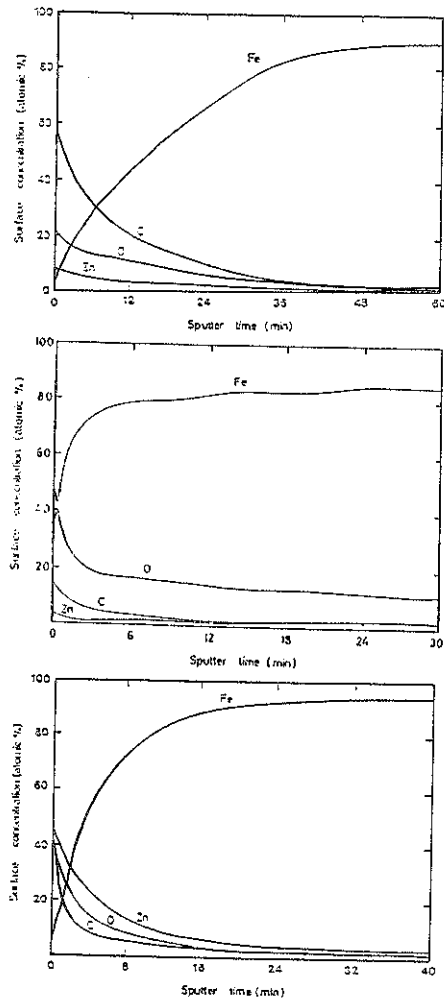


Fig. 2 AES depth profiles of hot-dip galvanized coatings with various adhesion failure : (a) carbon deposition(sputter rate was 45 Å/min) : (b), oxide film formation(sputter rate was 45Å /min for first 10 min and 375 Å /min thereafter) : (c), alloy layer formation(sputter rate was 45Å /min)

탄소층이 산화피막층보다 두껍게 나타났다. 반면에 합금화아연 도금강판(Galvannealed sheet)를 제조하기 위해 도금욕내 A1농도를 급격히 낮추는 과정에서 간혹 발생하는 합금층형성 박리의 경우에는 표면탄소 및 산화피막이 적은대신, Fe-Zn합금층이 두껍게 형성되어 있음을 알 수 있다.

#### 가. 탄소증착박리

냉연강판표면에 잔류하는 냉간압연유는 강판두께에 따라 약 200~400mg/m<sup>2</sup> (단면기준) 존재하게 된다. 일반적으로 압연유는 약 400~500°C의 강판온도 영역에서 유지시 대부분 분해, 휘발하여 제거된다. Sela 자료<sup>2)</sup>에 의하면 DFF를 통과시 약 3mg/m<sup>2</sup>으로 감소시킬 수 있다고 보고하고 있다. 그러나 잔류압연유가 많은 후물재(t)1.2mm)의 경우 line speed가 빠르거나 충분한 강판온도를 확보하지 못했을 경우 미처 휘발되지 못하고 강판표면에 탄화피막을 형성하여 도금박리의 원인이 될 수 있다.

탄소증착의 다른 원인으로는 DFF에서 낮은 공연비(air-fuel ratio)에 기인한 과도한 미연소기체(CO+H<sub>2</sub>)들의 화학반응에 의한 탄소증착 가능성이 있다. 여기서 공연비는 연소기체 1Nm<sup>3</sup>을 연소시킬때 실제 투입된 공기량의 비를 의미한다. 그러므로 탄소증착에 의한 박리를 최소화하기 위해서는 예열로에 진입되기전에 전처리공정에서 충분한 알칼리탈지 및 DFF의 공연비를 상향조절할 필요가 있다. 또한 DFF로내 CO+H<sub>2</sub>량은 line trouble 발생시 큰 변동을 나타내므로 조업 및 설비안정화가 필수적이다.

#### 나. 산화막형성박리

용융아연 도금공정에서 강판표면의 산화막형성원인은 대략 다음과 같이 추정할 수 있다.

(1) 예열로내의 산소혼입 가능성 및 강판온도가 과도하게 높을때 : 현재는 노외부로부터의 공기혼입가능성을 최소화하기 위해 예열로 입측에 seal roll을 설치하였으며, 예열로내에는 자동산소분석기를 설치하여 완전동적연소 system을 구축하였다. 또한 예열로내의 강판온도가 250°C이상으로 과도하게 높게되면 산화막형성이 촉진되나, 강판온도를 정확하게 측정할 수 없는 어려움이 있으므로 강판온도 예측모형을 이용하여 관리하고 있다.

(2) DFF의 공연비가 과도하게 높을때 : 도금강판은 예열로에서 약 250°C이하의 온도를 유지하면서 DFF로 인입되거나 환원영역으로 들어가기에 충분한 온도로 가열되기 전까지는 산화된다. 환원하면 DFF의 상부 zone에서 공연비가 높아 과도하게 산화되면 하부위 환원영역(zone 4)에서 산화피막을 충분히 환원시킬 수 없으므로 적정 연소비에 따른 연소분위기 및 강판온도를 관리해야 한다.

DFF를 통과한 후 잔류산화피막은 간접가열로내의  $\text{HNx}$ 분위기하(10%  $\text{H}_2$ )에서 일부 환원될 수 있다. 산화피막이 환원되는 속도는 수소분위기농도나 강판온도를 증가시킴으로서 향상시킬 수 있는데 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 수소농도를 5에서 25%로 증가시킴에 따라 가공시 도금층균열이 현저하게 감소함을 알 수 있다. 이때 각 DFF zone별 공연비는 각각 4.4(zone 1), 4.2(zone 2), 4.1(zone 3) 및 4.0(zone 4)으로 유지하였다.

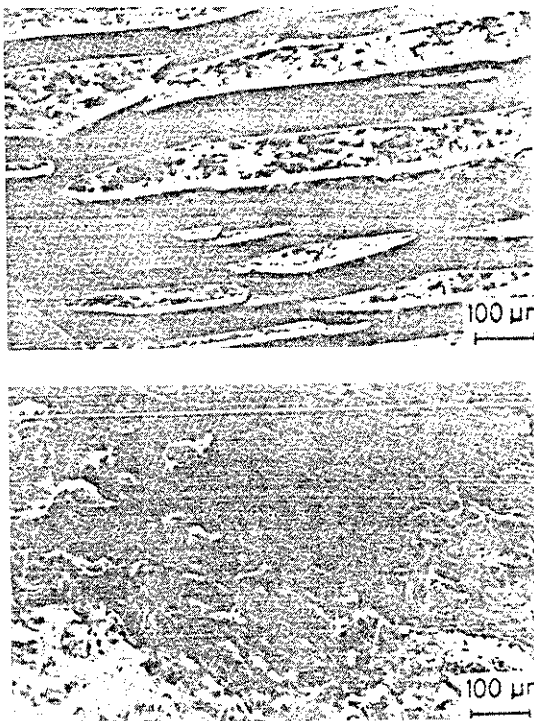


Fig. 3 Scanning electron micrographs of the surface appearance of the hot-dip galvanized coatings after Lock-forming test as a function of hydrogen concentration in radiant tube furnace : (a), 5% and (b), 35%

그러나 수소농도의 상승운전에 따른 폭발위험성을 최소화하기 위해서는  $\text{N}_2$  quick purge system, explosion port설치등 안전장치를 보완하여야 한다. 이밖에도 도금욕에 인입되는 snout 부위에는 별도로 75~100% 수소 line을 설치하여 외부공기침입에 의한 산화가능성을 철저히 제거할 필요가 있으며, 노의 누수 방지를 위해 노내 이슬점(dew point)의 주기적인 점검이 필요하다.

### 다. 합금층박리

취약한 합금층형성에 의한 도금박리는 합금화 아연 도금강판을 생산하기 위해 도금욕내 Al 농도를 순수 Zn ingot를 투입하여 급격히 낮추는 과정에서 간혹 발생하였다. 일반적으로 Al은 강판표면에 잔류하는 철산화물을 일부 환원하는 역할과 동시에 Fe와 우선 반응하여 Fe-Al-Zn합금층을 형성함으로써 취약한 Fe-Zn 합금층형성을 억제함으로써 가공성을 높이는 목적으로 첨가된다<sup>3)</sup>. 그러나 합금화아연도금강판은 도장성(paint ability)을 향상시킬 목적으로 도금욕내 Al농도를 낮추어 Fe-Zn 합금층형성을 촉진시킨다<sup>4)</sup>. 과도한 합금화는 가공시 powdering의 원인이 되며, 단시간내에 급격한 Al농도감소는 국부적으로 도금욕내 Al농도의 불균일화를 초래하여 합금층형성을 촉진할 가능성이 있다. 이러한 사실을 뚜렷히 확인하기 위해서 Fig. 4는 합금층박리가 발생한 도금층의 단면조직으로서 도금층균열이 Fe/Zn계면이 아닌 도금층내에서 발생하였으며 균열발생부위(A)의 Fe 함량은 EDS (Energy Dispersive Spectrometer)로 분석한 결과 약 21%로 취약한  $\gamma$ 층에 해당됨을 알 수 있었다.

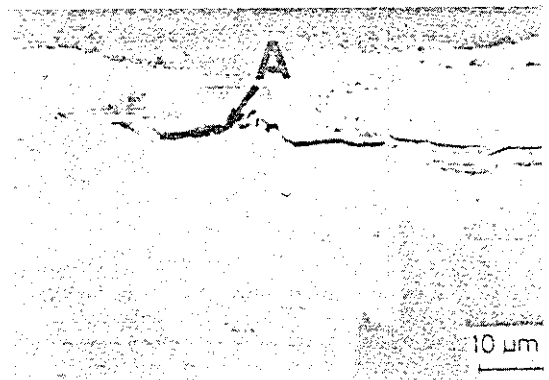
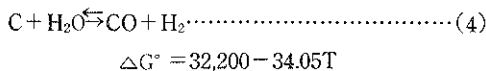
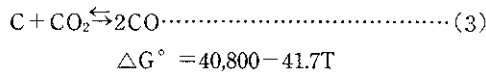
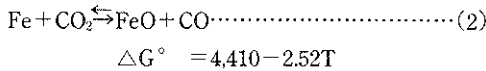
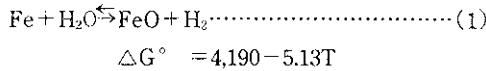


Fig. 4 Scanning electron micrograph of the cross section of a hot-dip galvanized coating

4. 고찰

4.1. DFF내 기체반응 및 조업실제

DFF의 분위기 기체성분 중 강판표면과의 반응에 참여하는 것은 CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O로서 이들 연소기체 분위기에서 단시간내에 강판의 산화를 억제하면서 표면의 잔류압연유를 제거하여야 하는데, 이때 노내의 주요 기체반응은 다음의 고체-기체 평형관계식으로 나타낼 수 있다<sup>6)</sup>.



위의 기체반응은 온도뿐만 아니라 각 기체성분의 분압에 의해 반응이 지배된다. 예를 들면(1)반응의 자유에너지(free energy :  $\Delta G$ )는 반응평형상수(K)와 다음관계식으로 나타낼 수 있다.

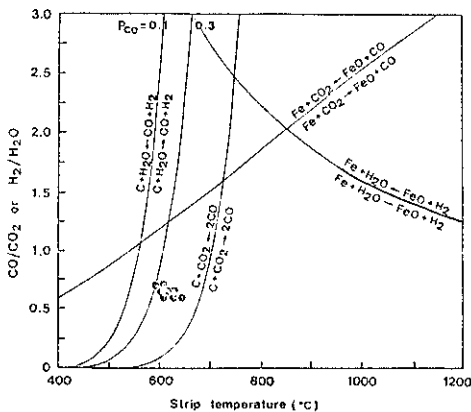


Fig. 5 Equilibrium curves for the atmospheric gas reactions in DFF at different temperature

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln K \dots\dots\dots (5)$$

여기서  $\Delta G^\circ$  는 표준자유에너지, R은 기체상수, T는 절대온도를 나타낸다. 열역학적평형에서  $\Delta G = 0$  이므로

$$K = \exp(-\Delta G^\circ / RT) = \exp(5.13/R - 4190/RT) \dots\dots\dots (6)$$

또한  $K = a_{\text{FeO}} \cdot P_{\text{H}_2} / a_{\text{Fe}} \cdot P_{\text{H}_2\text{O}} \dots\dots\dots (7)$ 로 나타낼 수 있는데, 고체상태의 활동도(activity)는 1로 가정하면

$$K = P_{\text{H}_2} / P_{\text{H}_2\text{O}} \dots\dots\dots (8)$$

결과적으로 (6) 및 (8)식으로 부터  $P_{\text{H}_2} / P_{\text{H}_2\text{O}}$  분압비와 강판표면온도의 함수로서 (1) 반응을 plot할 수 있음을 알 수 있다. 이와같은 방법으로 (1)~(4) 반응을 강판온도와 CO/CO<sub>2</sub> 또는 H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 분압비로 plot하면 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다.

(1) 및 (2) 반응식에 의해 강판표면의 산화-환원영역이 나타나고 (3) 및 (4) 반응식에 의해 탄소증착 또는 소실(deposition or dissolution) 영역이 나타난다. 이때 (4) 반응식의 기체반응은 3가지 기체성분이 관여하므로 CO성분이 분압에 따라 반응곡선이 변화한다. 실제조업에서는 DFF출축의 강판온도가 600~700°C, Pco=0.1~0.3, Pco/Pco2가 0.5~0.7범위에 들어감으로 실제조업 data를 Fig. 5에 적용하면 강판표면은 약산화분위기를 유지하면서 일부 탄소가 증착되기 영역에 속함을 알 수 있다. 또한 예비실험 분석결과<sup>6)</sup>에 의하면 DFF zone 4의 CO+H<sub>2</sub>를 5~7%, 강판온도는 650±20°C로 관리하면 Pco/Pco2는 0.3~0.4범위에 들게되어 (3) 반응의 탄소소실영역에 놓이게 되므로 탄소증착억제 및 산화반응억제 측면에서 유리하였다. 이때 강판온도는 600°C이하로 낮게하면 탄소증착반응이 촉진되는 반면, 700°C이상으로 증가시키면 과산화에 의한 도금박리 발생율이 높게 나타났다.

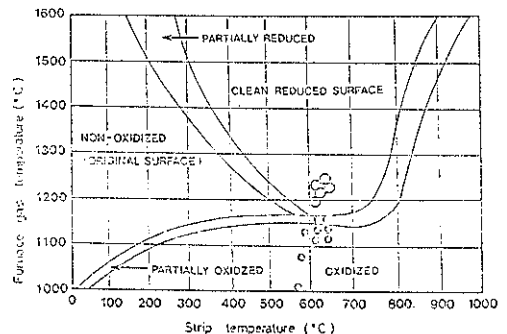


Fig. 6 Effect of gases temperature in DFF containing 4 to 6 vol. % combustibles (CO+H<sub>2</sub>) and 0% oxygen on the reaction of oxidation-reduction of strip as a function of strip temperature : ○, good adhesion ; ●, adhesion failure

그러나 위의 열역학적평형 산화-환원반응식은 강판 온도와 노내 기체온도가 동일하다고 가정했을때 실제는 노내 기체온도가 강판온도보다 높게되는 비평형상태에 놓이게 된다. Selas자료<sup>2)</sup>에 의하면 연소기체 중에 미연소분(CO+H<sub>2</sub>)를 4~6%로 잔존시킨후 강판온도와 노내기체 온도차를 크게 하면 철산화물에 대해 비평형 환원영역이 형성되는 것을 발견하였다.(Fig. 6).

도금박리가 다량 발생했을때 DFF zone4의 노내온도는 Fig. 6에서 볼수 있듯이 대부분 1150°C미만임을 알수 있는데, 이는 Selas diagram상의 부분환원 또는 산화영역에서 속하게 되므로 불충분한 환원에 의한 산화막형성박리가 발생했으리라 판단된다. 현재는 DFF zone4에서 강판의 환원능력을 향상시키기 위해 다음과 같이 조업 조건 및 설비를 개선하였다.

(1) 간접가열로부터 DFF로 유입되는 HNX유량의 감소: 예를들어 HNX유량을 900에서 750 Nm<sup>3</sup>/hr로 감소시킨 결과 약 40°C의 온도증가 효과가 있었다. (2) DFF출측의 boot section에 electrical heater 및 screen설치: 간접가열로 부터 유입되는 차가운 HNX(780~800°C)기체에 의한 온도강하를 보상하거나 유입량을 최소로 하기 위해 설치하였다.

(3) 로의 최대용량 운전: DFF zone 4의 최대온도를 1150에서 1300°C로 상향 조정하고 협폭재의 경우 energy 절감목적으로 강판의 edge side의 burner를 power off시키는 burner trimming를 금지시켜 노를 최대용량으로 운전하였다. 결과적으로 DFF zone 4의 기체온도를 약 1200°C이상의 완전환원 영역에 속하게 되어 산화막형성박리를 현저히 감소시킬 수 있었다.

그러나 실제로 DFF zone 4에서 측정되는 조업조건에 따라 6~10%로 Selas diagram 상의 4~6%보다 높게 나타나므로 CO+H<sub>2</sub>량 변동에 따른 강판온도 및 노내 기체온도의 함수로 plot하여 Fig. 7에 나타내었다. 노내의 CO+H<sub>2</sub>량이 증가함에 따라 강판의 환원영역은 더욱 넓어지게 되어 노내 기체온도가 다소 낮게 유지

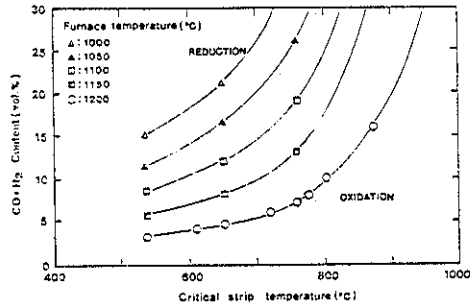


Fig. 7 The variation of CO+H<sub>2</sub> content in each DFF zone vs time

되어도 강판을 환원시킬 수 있음을 알 수 있다. 그러므로 노내 CO+H<sub>2</sub>량이 높게되면 (3) 및 (4)반응에 의해 탄소증착반응이 발생할 가능성이 높으므로 CO+H<sub>2</sub>는 5~7%, 노내기체온도는 1200°C이상, 강판온도는 650±20°C로 관리하는 것이 탄소증착반응 억제와 강판산화피막의 환원측면에서 필요하다.

#### 4.2. DFF분위기기체 조성제어

광양제철소 No. 1 CGL의 DFF각 zone별 적정연소기체조성을 computer로 simulation한 결과는 Table 2에 나타내었다.

그러나 실제 각 zone별 CO+H<sub>2</sub>은 강판온도 및 노내기체온도, 공연비 및 DFF연료로서 사용되는 COG (Coke Oven Gas) 조성 및 설비안정화등에 영향을 받는다. 예를 들면 도금박리가 발생했을때 DFF zone 4의 공연비를 4.0으로 고정시키더라도 노내 CO+H<sub>2</sub>량은 8~16%로 변동이 심하게 나타났다.

최근에는 광양제철소에서는 각DFF zone에 on-line CO+H<sub>2</sub> 분석기를 설치하여 노내 기체성분변동을 감시할 뿐만 아니라 premix burner로 구성된 DFF zone 4의 경우 일정공연비제어 방식에서 탈피하여 pilot burner에서 COG를 연소시킬 때 나오는 CO+H<sub>2</sub>량을 측정하여 공기투입량을 자동조절함으로써 DFF zone 4로

Table 2 Optimum atmospheric gas composition of DFF

Zone	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO+H <sub>2</sub>	CO/CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	Air ratio※
1	2.06	1.91	5.97	21.75	3.97	0.35	0.09	0.95
2	2.29	2.06	5.73	21.65	4.35	0.39	0.10	0.93
3	2.6	2.48	5.32	21.05	5.08	0.49	0.12	0.91
4	2.98	3.28	4.59	19.65	6.26	0.65	0.17	0.85

※Air ratio means actual air-fuel ratio per theoretical air-fuel ratio.

인입되는 CO+H<sub>2</sub>량을 종전의 5±3% 변동폭에서 6±1% 이내로 제어하는 방식을 채택한 결과 노내기체 성분변동을 6±2%로 관리할 수 있게 되었다. 이때 pre-mix valve의 공기와 COG기체에 의한 압력차(ΔP)는 burner flame의 균질성을 유지하기 위해 100 Pa이내로 관리하여야 한다.

DFF zone 1~3에서 CO+H<sub>2</sub>량의 변동은 COG조성의 변화뿐만 아니라 하부 zone에서 인입되는 폐가스성분의 영향을 고려하여야 한다. 예를 들면 광양제철소의 연중 COG의 calorie변동은 약 4,130~4,500Kcal/Nm<sup>3</sup>으로, 이는 이론공연비가 4.15~4.59로 변동됨을 의미한다. 환연하면 노내 공기비(=실제투입공연비/이론공연비) 및 CO+H<sub>2</sub>량이 COG조성변동에 따라 변화함을 알 수 있다. 그러므로 현재는 on-line gas chromatograph를 설치하여 3분 주기로 COG성분을 분석하고 이론공연비를 계산하여 공기투입량을 자동조절하여 nozzle-mix burner로 구성된 DFF zone 1~3의 공연비를 변화시켜 일정 공기비를 유지하도록 동적제어된다. 그러나 이러한 조건하에서도 제어 loop가 실제로는 3분주기동안 COG조성이 변화함에 불구하고 동일하다고 가정했기 때문에 Fig. 8에서 보는 바와같이 목표성분 대비±1%로 편차가 있음을 알 수 있다.

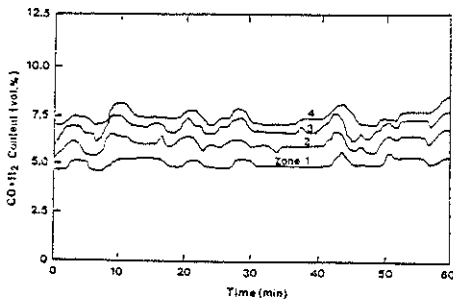


Fig. 8 Effect of CO+H<sub>2</sub> content on the reaction of oxidation and reduction of steel as a function of strip temperature at different furnace gas temperature

## 5. 결 론

- 1) 용융아연 도금층의 도금박리는 탄소증착, 산화막 형성 및 합금층형성에 의한 기구로 분류할 수 있었다.
- 2) 산화막형성에 의한 도금박리는 DFF zone 4의 노내온도를 1200°C이상으로 증가시켜 강판의 환원능력을 향상시킨 결과 현저히 감소하였다. 이때 DFF zone 4의 CO+H<sub>2</sub>량은 5~7%로 유지하면서 강판온도는 650±20°C로 관리하는 것이 탄소증착 반응억제 및 강판산화피막의 환원측면에서 필요하다.
- 3) DFF 내의 CO+H<sub>2</sub>량은 COG조성, 공연비 및 설비안정화에 크게 영향을 받는다. 노내 CO+H<sub>2</sub>변동요인을 최소화하기 위해 on-line CO+H<sub>2</sub> 분석기 및 고속 gas chromatograph를 설치할 필요가 있다고 사료된다.

## 후 기

본 연구는 1990년도 포항제철 특별지원사업(0508M)으로 수행되었으며 연구지원을 해주신 포항제철 및 산업과학기술연구소에 감사의 뜻을 표합니다. 아울러 본 실험에 많은 도움을 준 유봉환씨의 용융도금연구실원 여러분께 감사 드립니다

## 참고문헌

1. Y. Tokunaga, M. Yamada and T. Hada : 철과 강, 72(1986) 997
2. Selas data : private communications, 1990
3. G. J. Harvey and P. D. Metcer : Metall. Trans., 4(1973)619
4. H. Nitto, T. Yamazaki, . . Morita, K. Yabe and S. Bandoo : 철과 강, 70(1984)1719
5. K. Okamoto, H. Miwa and Y. Fukuoka : NkK report(Japan), 56(1972) 279
6. 김종상 : 산업과기연 특별지원사업보고서(0508M), 1990