

강판 종별 온도에 따른 산화 민감도 조사

김주한 · 이기만[†]

순천대학교 기계 · 우주항공공학부

Investigation of Oxidation Sensitivity with Temperature of Steel Plate Type

JUHAN KIM, KEEMAN LEE[†]

School of Mechanical and Aerospace Engineering, Suncheon National University, 255 Jungang-ro, Suncheon 57922, Korea

[†]Corresponding author :
kmlee@schnu.ac.kr

Received 23 September, 2019

Revised 9 October, 2019

Accepted 31 October, 2019

Abstract >> Experiments were conducted to investigate the sensitivity of steel plate oxidation with temperature in a simulated furnace. Used steel plates were a general steel and a high tensile steel. Porous media burner (PM burner) used in model furnace was made for uniform temperature profile. The surrounding temperature was controlled by adjusting the flow rate of the mixture in the combustor. Oxide layer analysis was performed using SEM image analysis and EDS line scanning. Both steel sheets showed a tendency to increase the thickness of the steel sheet surface oxide layer as the temperature increases, and it was confirmed that the flaking phenomenon in surface oxidation layer appeared when the temperature was above a certain temperature.

Key words : Combustion in porous media(다공체 내 연소), Surface oxidation(표면 산화), High temperature oxidation(고온산화), SEM image analysis (SEM 이미지 분석), EDS line scanning analysis (EDS 선 분석), Continuous annealing line(연속식 소둔설비)

1. 서론

냉간 압연(이하, 냉연) 강판은 수많은 제품을 생산하는 데에 있어 가장 중요한 소재이다. 냉연된 강판은 냉연 시 형성된 응력으로 인해 경도가 높고, 가공성이 떨어진다. 이로 인해 열처리 공정인 소둔로(燒鈍爐)에서 650-800°C로 가열 후 균일한 온도를 유지함으로써 재결정 현상에 의해 내부응력과 경도가 내

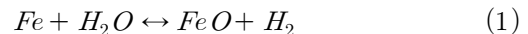
려가고 가공성이 개선된다. 소둔방식은 상자형 설비인 batch annealing furnace (BAF)와 연속소둔 설비인 continuous annealing line (CAL)으로 구분하고 있으며, 최근에는 연속 열처리 소둔 방식이 주로 사용되고 많은 연구가 진행되고 있다¹⁻³⁾. 이 연속 열처리로(爐)는 강판을 예열하는 예열대(preheating section, PHS), 표면 불순물을 제거하고 급속 가열하는 가열대(heating section, HS), 환원분위기에서 조직 재결정

과 결정립을 성장시키는 균열대(soaking section, SS) 그리고 강판을 천천히 냉각시키는 서냉대(slow cooling section, SCS)로 이루어져 있다. 이 영역 중 강판의 가열특성과 분위기의 조건으로 인해 강판 품질에 가장 많은 영향을 끼치는 구간은 가열대와 균열대이다. 두 공정은 주로 강판을 직접 가열해주는 직화(direct firing) 영역과 열처리 공정 내부의 무산화(non oxidation) 분위기 형성과 강판의 균일한 온도를 유지하기 위해 라디언트 버너를 이용한 간접가열방식의 radiant tube (RT) 영역으로 구성되어 있다. 강판의 품질향상을 위해 CAL 설비에서는 온도편차가 적고 로(爐) 내의 청정성이 우수한 radiant tube 방식의 간접가열 구간을 늘리려는 추세이나 간접가열에 따른 과도한 연료소비가 문제점으로 지적이 되고 있다. 이에 비해 직접가열 공정인 가열대는 종래 직화버너가 화염이 긴 형태의 제트분사 방식으로 인해 강판의 승온시간 단축 및 불균일한 가열에 대한 문제점이 계속해서 제기되어 왔다^{4,7)}. 이러한 문제점을 개선하기 위해 본 연구팀은 가열대 버너로 이전 연구에서 사용된 다공체 내 초과 엔탈피 연소 기술(excess enthalpy combustion in porous media)을 적용하였다.

다공체 내 연소기술은 다공체의 많은 미세 기공 내부에서 연료와 산화제의 혼합기를 연소시켜 안정된 화염을 유지시키는 기술이다. 종래의 연소기에 비해 더 높은 연소속도 및 단위체적당 에너지 방출률이 우수해서 보다 콤팩트한 소형의 버너설계가 가능하다. 다공체 내 연소기술에서 나타나는 초과엔탈피 연소의 개념은 Weinberg^{8,9)}에 의하여 처음으로 소개되었다. 초과엔탈피 연소는 다공판 구조로 인해 연소 생성물에서 미연 혼합기로 열을 재순환시킴으로써 유입조건에서 예측된 단열화염온도보다 더 높은 온도로 연소가 가능하다. 이 현상은 미연 혼합기의 예열효과에 따른 반응성을 증가시켜 기존의 가연한계가 확장되므로 낮은 열량의 혼합기에서도 안정적인 연소를 제공할 수 있다. 또한, 다공체 내 연소기술은 균일한 온도 분포와 적은 양의 질소산화물 및 일산화탄소를 생성하는 것으로 잘 알려져 있다¹⁰⁻¹³⁾.

이처럼 냉연강판 열처리 공정중 가열대에서 강판을 650-850°C로 가열한 후 균열대에서 일정시간 유지함으로써 재결정 현상에 의해 경도, 항복점 및 항장력이 낮아지기 때문에 강판을 이용한 제품의 가공성이 향상된다. 하지만 이러한 열처리과정 중 특히 초기 가열대에서 강판 주위로 가열버너의 연소분위기 가스에 의해 산화막이 형성되는데 강판에 과도한 산화막이 존재하게 된다면 도금 등과 같은 표면처리가 불량해져 강판품질에 치명적인 영향을 미치게 된다. 이 경우 강판 표면에서 연소가스의 온도와 성분은 강판의 산화 및 환원 거동에 큰 영향을 미치게 되는데 이는 연소조건에 따라 달라진다. 이 조건은 크게 연소 분위기가스에 잔존하는 산소가 존재하는지 여부에 따라 희박한 연소조건과 과농한 연소조건으로 나누어지는데 이를 각각 산화성 분위기, 환원성 분위기라고 한다. 하지만 연소가스 중에 잔존 산소가 존재하지 않는 환원성 분위기라도 강판 표면에 산화가 발생하게 되는데, 이는 고온의 연소 분위기가스에 존재하는 H_2O 와 CO_2 가 강판 표면과 반응하여 생기는 고온산화 현상의 일종으로 발생되게 된다^{14,15)}.

이처럼 고온의 열처리 분위기에서 철(Fe)이 H_2O 와 CO_2 같이 가열버너의 연소생성물로부터 산화와 환원되는 거동을 수식으로 표현하면 다음의 식으로 표현된다.



즉, 연소 분위기가스 중 H_2O 와 CO_2 가 증가하게 되면 철의 산화반응이 활발해지며, H_2 와 CO 가 증가하게 되면 철의 환원반응을 증진시키게 된다. 따라서 가열대에서 운전조건은 이러한 환원성 분위기를 조성을 위해 연료가 과잉한 조건의 당량비로 운전하게 된다. 이전 연구에서 Kim 등¹⁶⁾은 다양한 조건 중 대표적인 산화, 환원성 분위기와 일정 산화 시간인 체류시간에 따라 일반강판의 표면 산화 거동을 SEM 이미지 및 EDS 분석을 통해 확인하였고, 동일한 실험 장치로 환원성 분위기에서 체류시간에 따라 일반

강판과 고장력강판의 표면 산화 거동을 비교하였다¹⁷⁾. 하지만 이러한 연소 분위기가스의 성분과 체류시간 뿐만 아니라 강판 주위의 연소가스 온도도 산화와 환원반응에 큰 영향을 끼친다. 이와 관련한 연구로 Zheludkevich 등¹⁸⁾은 은과 산소원자의 산화반응에서 분위기 온도가 미치는 영향에 대해서 조사하였다.

따라서 본 연구에서는 이전에 사용한 허니컴 형태의 SiC 다공체 가열버너로 화염이 다공체 내부에 잠겨있는 초과엔탈피 연소기술을 이용하여 가열대와 균열대를 모사한 랩-규모의 강판산화 실험 장치를 통해 실제 사용되는 냉연강판의 표면 온도와 주위 분위기온도에 따른 산화거동을 파악하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에 적용된 랩-규모의 버너와 강판 열처리로를 모사한 가열부와 계측장치는 이전 연구와 유사한 실험 장치로 Fig. 1에 나타내었다^{16,17)}. 버너는 다공체를 이용한 예혼합 초과엔탈피 연소기로, 구성은 직경 30 mm, 두께 10 mm의 SiC 세라믹 허니컴을 상부에 배치시켰으며(Fig. 1[a]), 중앙에 두께 20 mm,

기공률 20%의 세라믹 보드를 사용하여 화염의 역화를 방지하였다(Fig. 1[b]). 그리고 세라믹 보드 아래에 직경 3 mm의 지르코니아(ZrO_2) 볼을 배치시켜 예혼합된 가스를 균일한 유동장으로 공급하였다(Fig. 1[c]). 내부가 진공인 직경 60 mm 이중 석영관을 사용하여 가열된 다공체 버너의 측면으로부터 대류열전달의 열손실 방지와 다공체 내 안정된 화염을 관찰하였다(Fig. 1[d]). 또한, 열처리로를 모사한 시험용 가열부도 고온 분위기 유지를 위해 75 mm 단열

Table 1. Experimental conditions

Parameters	Range	
Fuel	CH ₄	
Oxidation	Air	
Equivalence ratio (Φ)	1.4	
Mixture velocity, V_m (cm/s)	15, 20, 25, 30, 35	
Residence time (sec)	General steel	20
	High tensile steel (CP)	44

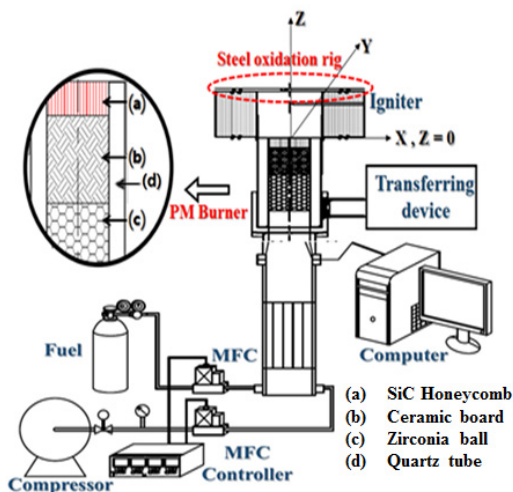


Fig. 1. Schematic diagram of experimental set-up

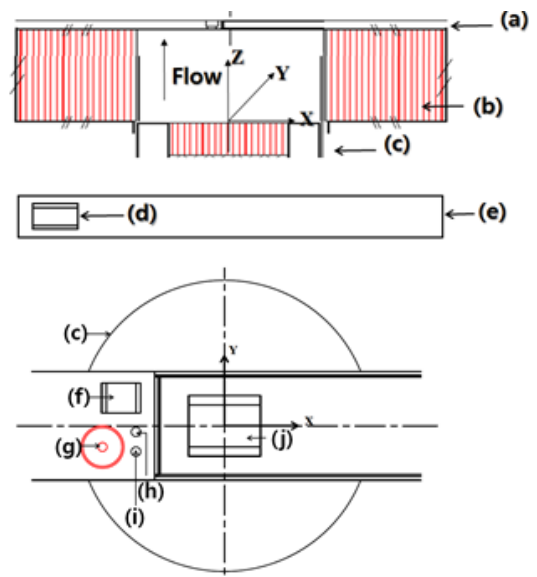


Fig. 2. Schematic diagram of steel plate oxidation jig for experimental steel oxidation rig (a) rig for measuring temp. and sampling steel, (b) insulating materials, (c) burner, (d) sampling steel, (e) carrier for sampling steel, (f) pyrometer for steel temp., (g) shield T.C (K-type) for steel, (h) surround temp., (i) sampling hole, (j) location of oxidation steel for SEM & EDS

재를 사용하여 대기로의 열손실을 최소화 하였다.

실험에 사용한 예혼합 가스는 liquefied natural gas (LNG)의 주성분인 메탄(99.99%)과 압축공기(99.99%)를 사용하였으며 지르코니아 볼 하단에 허니컴(honey comb)으로 구성된 정체실에서 충분히 혼합이 이루어지도록 한 후 버너에 공급되도록 하였다. 각각의 유량은 버블유량계를 이용하여 보정된 질량 유량계를 사용하여 조절하였다. 이에 대한 실험 조건들을 Table. 1에 간단히 나타내었다.

Fig. 2는 강판 열처리로를 모사한 가열부를 간략하게 보여주고 있다. (a)는 시편을 직접 삽입하는 산화실험용 리그, (b)는 단열재, (c)는 버너로 (d)에 강판 시료를 고정시켜 시편 이송장치 (e)를 이용하여 버너 중심부에 위치하도록 하였다. 이 때 다공체 내 초과엔탈피 연소기술 특성상 높은 복사열 전달로 인한 강판 시료의 산화 영향을 고려하고자 시편 이송장치(e)의 하부를 뚫어 시료를 다공체 버너에 직접 노출시켰다. (g)는 직경 1.5 mm 쉴드형 K-type 열전대를 사용하여 강판 표면의 온도를 실시간으로 측정하였다. 연소실 내의 분위기온도는 (h) 홀에 직경 1.5 mm 쉴드형 K-type 열전대를 삽입하여 시편이송장치와 동일한 높이에서 강판 주변의 분위기 온도를 측정하였다. (g)와 (h)홀에 장착된 두 열전대는 열전대 레코더(GP10, Yokogawa, Tokyo, Japan)를 사용하여 보정된 온도값을 실시간으로 측정하였다. 실험용 리그 아래에 연소가스의 농도를 분석하기 위해 (i) 홀에 직경 1.5 mm 연소가스 측정기를 설치하여 채취 후 고농도 가스 분석기(Vario+, MRU/Germany, CH_4 , CO : NDIR 방식, H_2 : TCD 방식)를 사용하여 정량적으로 분석하였다.

2.2 실험 방법

2.2.1 강판 시편 제작

본 연구에서 사용된 산화실험용 강판은 약 0.45 mm의 두께를 가지는 일반 강판과 1 mm 두께의 고장력(高張力) 강판을 사용하였다. 고장력 강판의 종류는 CP 강(complex phase steel, CP)이며, 미세한 결정립

의 복합조직과 Ti, Nb, V 등으로 구성된 석출물로 인해 강도가 높고 굽힘 가공성이 우수하여 자동차의 서스펜션, 새시 등의 구조부재나 각종 강도 보강재에 주로 사용된다. 스트립 캐스팅한 강판의 판재들은 시험하기에 적당한 크기(10 mm × 10 mm)의 시편으로 가공하였다. 그 후 강판의 단면을 연마(polishing)하여 스트립 캐스팅 동안에 발생된 표면층의 불균일도를 제거하였다.

2.1.2 실험 조건

실험실 규모의 강판 산화 장치에서 운전조건을 Table 1에 간략하게 나타내었다. 먼저 강판 종별 온도에 따른 산화 민감도를 분석하기 위해 환원성 분위기인 당량비(Φ) 1.4에서 혼합기의 유속을 변수로 설정하여 강판의 표면과 분위기온도를 변화시켰다. 또한, 실제 조업 중인 본 연구의 참고 열처리로인 H사의 CAL 소둔로에서 강판의 이송속도(meter per minutes, mpm)를 통해 본 연구의 실험 로(爐) 내부에서는 일정 산화시간을 체류시간(residence time)이라 정의하였고, 체류시간은 조업 중인 본 연구 대상설비의 풀림시간과 두께에 의한 열전도율의 차이를 고려하여 일반강판 20 sec, CP강판은 44 sec로 고정하여 산화실험을 진행하였다.

2.1.3 분위기 연소가스의 온도와 성분 조성방법

강판 시편 산화에 영향을 주는 분위기 연소가스의 온도와 성분을 조성하기 위하여 혼합기의 유속을 변수로 설정하였고 앞 절에서 설명한 실험 장치를 이용하여 측정하였다. 혼합기 유량은 점화 전에 버블유량계를 이용하여 질량유량계(MFC)의 오차를 보정하였다. 그 후 연소실을 모사한 석영관과 단열재의 과도한 손상을 막기 위해 당량비(Φ) 1.0, 유속 20 cm/s 조건으로 예열을 한다. 이 때 초기 점화가 되면 화염은 다공성 매체 버너의 재질인 SiC 허니컴 상단에 부착이 되나, 약 300 sec (5분)가 경과하게 되면 갑자기 큰 소음과 함께 화염이 다공체 내부로 전파하기 시작한다. 그런 뒤 약 800 sec 후에는 다공체 내부로 완

전히 들어가 역화방지기 역할의 세라믹 보드와 다공체인 SiC 허니컴 사이에 위치하여 안정적으로 잠김 화염(submerged flame)형태로 존재하게 된다. 이처럼 안정적인 잠김 화염으로 된 상태가 확인되면 각 조건에 맞는 유속으로 혼합기를 공급하여 약 2,700 sec 후에 안정화된 온도와 분위기 연소가스 성분을 측정하였다.

2.1.4 강판 산화실험

온도에 따른 강판의 산화 특성을 파악하기 위하여 2.2.1에서 언급한 바와 같이 일정한 크기로 가공하였다. 안정적인 온도와 농도분포에 도달한 것으로 판단되면 강판의 시편을 Fig. 2(d)에 부착하여 Fig. 2(e)의 이송장치를 통해 가열부 중심인 Fig. 2(j)에 오도록 하였다. 강판 별로 각기 다른 이송속도에 해당되는 체류시간으로 가열한 후에 식히는 방법으로 산화실험을 진행하였다. 가열로 실험이 완료된 강판 시편은 약 20°C의 물로 급속 냉각시켰다. 산화실험을 마친 시편은 표면의 산화층 손상을 고려하여 콜드마운팅(cold-mounting)과 폴리싱(polishing) 작업을 한 후 전계방사형 주사현미경(FE-SEM)을 이용하여 촬영하였다. 촬영한 SEM 이미지를 2,000-5,000배까지 확대하여 시편 표면에 생성된 산화층의 두께를 측정하였고, 좀 더 면밀히 분석하기 위해 energy dispersive spectroscopy (EDS) 라인스캐닝(line scanning) 분석

방법을 이용하여 산화철(FeO) 내 산소원자의 분포를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 각 조건에 따른 온도 및 농도특성

Fig. 3은 강판 시편에 영향을 주는 분위기 연소가스의 온도를 조성하는 과정을 보여주고 있다. 800 sec 이하에서는 2.1.3에서 언급한 바와 같이 동일한 예열 조건으로 인해 시간별 온도의 변화가 유사한 것을 볼 수 있으며, 800 sec에서 잠김 화염 상태가 확인되면 해당되는 혼합기의 유속조건으로 변환하게 된다. 800 sec 이후에는 각기 다른 온도 거동을 보이게 되는데, 혼합기의 유속이 증가함에 따라 온도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 당량비가 1.4로 일정한 상태에서 혼합기 유속이 증가함에 따라 연료인 메탄과 산화제인 공기의 공급량도 많아지게 되고, 연료와 산화제 증가로 인한 복사에너지와 발열량 증가로 온도가 상승하는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 4는 혼합기 유속별 일반강판 시편의 표면 온도를 시간별로 나타낸 그래프이다. 분위기 연소가스의 온도가 증가함에 따라 시편의 표면 온도도 함께 증가하는 것을 볼 수 있다. 그런데 Fig. 3에서와는 달리 시편의 표면온도는 초기점화 후 잠김 화염이 나

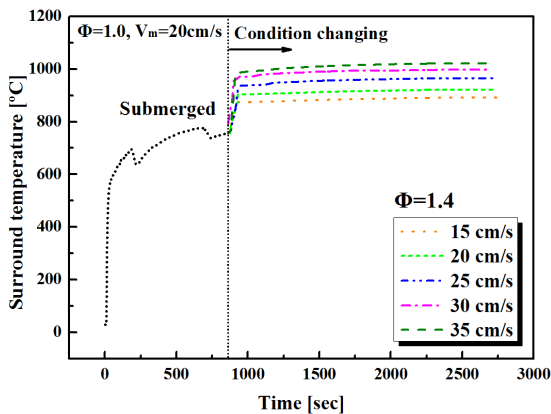


Fig. 3. Surrounding temperature around general steel plate with mixture velocity (V_m)

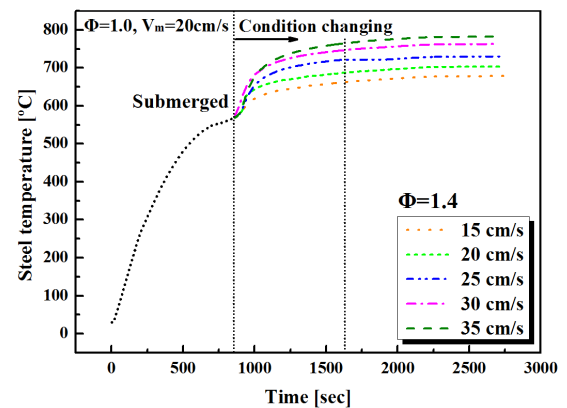


Fig. 4. Surface Temperature of general steel plate with mixture velocity (V_m)

타나는 데 걸린 시간의 약 2배인 1,600 sec 이후에 거의 일정한 온도를 유지하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5는 버너 점화 직후 강판 시편 주위의 분위기 연소가스의 농도 분포를 나타낸다. 점화 후 800 sec까지는 당량비 1.0으로 연소하여 연소가스 조성에서 H_2 와 CO 가 존재하지 않는 것을 확인할 수 있다. 800 sec 후 화염이 잠긴 상태가 되면 각 조건에 맞는 혼합기의 유속을 적용하게 되는데, 가열로 내에 산화성 분위기를 조성하는 원소인 O_2 는 더 이상 존재하지 않게 되고 환원성 물질인 H_2 와 CO 가스가 눈에 띄게 발생하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3과 마찬가지로 초기 점화 후 약 800 sec 이후에는 매우 안정적인 분위기 연소가스의 농도 분포로 유지되고 있음을 볼 수 있다.

안정적인 연소조건일 때 강판 시편의 표면 온도 및 분위기 온도와 가열로 내의 분위기 연소가스 성

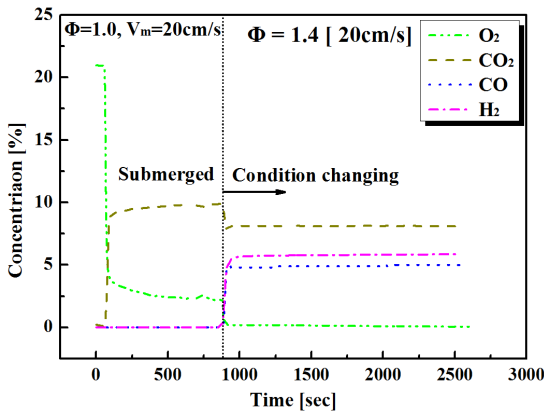


Fig. 5. Exhaust gas concentration around steel plate surface

Table 2. Temperature & exhaust gas concentration with mixture velocity (V_m)

ϕ	V_m (cm/s)	Temperature (°C)		Product gases (%)			
		Surface	Surround	O_2	CO_2	CO	H_2
1.4	15	678.5	892.1	0	8.05	5.01	5.81
	20	703.5	922.1	0	8.08	4.99	5.79
	25	730.1	966	0	8.13	4.97	5.75
	30	763	998.4	0	8.07	4.98	5.78
	35	782.5	1022.1	0	8.11	4.97	5.77

분의 결과 값을 Table 2에 나타내었다. 이를 통해 혼합기의 유속이 증가됨에 따라 강판 시편의 표면과 가열로 주변 분위기 온도는 점진적으로 증가하지만 분위기 연소가스의 성분 비율은 당량비가 고정된 관계로 비슷하게 측정되는 것을 확인할 수 있다.

3.2 강판 종별 온도에 따른 SEM 분석

Fig. 6은 본 연구에 사용된 일반강판과 CP강판에서 혼합기의 유속에 따른 SEM 이미지를 보여주고 있다. Fig. 6(a)는 일반강판, (b)는 CP강판이며 사진마다 산화층의 구간을 노란 선으로 구분하고 평균 두께(t_{mean})를 μm 단위로 표시하였다. SEM 이미지는 보는 바와 같이 전체적으로 산화층이 발생한 것으로 확인이 되었으며, 강판의 종류와 상관없이 산화층의 두께는 유속에 따라 점진적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 25 cm/s 이하의 낮은 유속에서는 일반강판보다 CP강판의 산화층 두께가 비교적 더 두꺼운 것을 알 수 있는데 이는 CP강판과 일반강판의 승온 속도를 고려하여 체류시간을 선정하였지만, CP강판이 일반강판에 비해 분위기 가스에 더 오래 노출되어 생긴 현상이라고 판단할 수 있다. 그러나 30 cm/s 이상의 유속에서는 고장력 강판인 CP강판이 일반강판보다 산화층 두께가 작아지는 것으로 나타나 일정 열용량 이상에서는 고온산화에 대한 저항성능이 우수한 것으로 보인다.

Fig. 6(a4), (a5), (b4), (b5)에서는 여러 층으로 이루어진 두꺼운 산화층이 발달된 것을 확인할 수 있는데, 이는 발달된 산화층 내에서 발생하는 산화된 피막들의 박리(剝離)현상으로 균열된 산화층 사이로 분위기 가스 내 산화성분인 H_2O 와 CO_2 가 깊이 침투하여 여러 층이 생긴 현상이며, 이로 인해 산화층이 두꺼워지게 된 것이다. 또한, Fig. 6(a4), (a5), (b4), (b5)의 SEM 이미지를 통하여 CP강판이 일반강판보다 산화층 두께가 상대적으로 얇고 비교적 일정한 산화층을 확인할 수가 있다. 이는 고온에서 CP강판이 일반강판보다 산화층이 쉽게 떨어져나가지 않고 산화성분들의 유입을 억제하는 효과가 있는 것으로

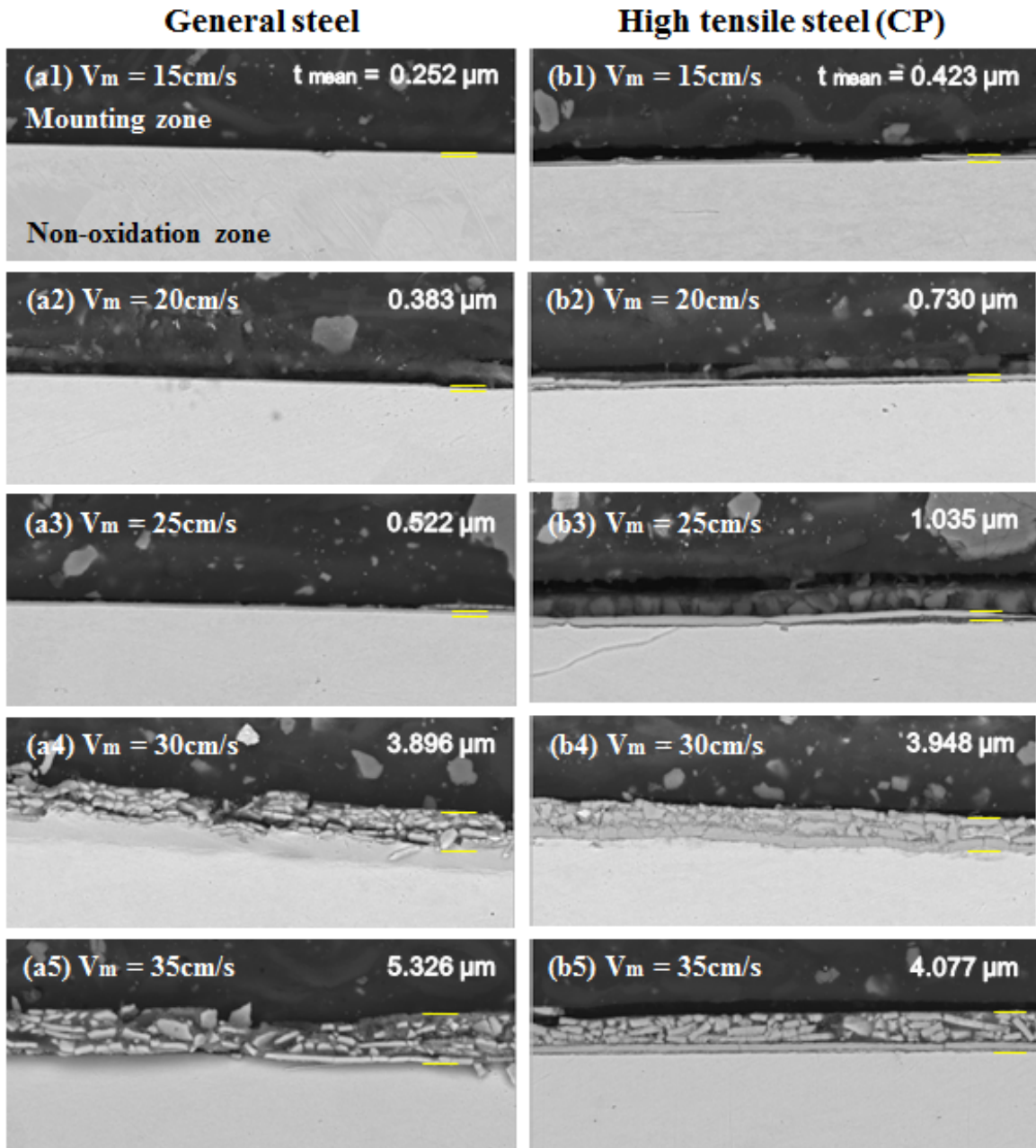


Fig. 6. SEM image of general steel plate and high tensile steel plate according to mixture velocity (V_m)

판단할 수 있다.

Fig. 7은 강판 주변의 분위기 온도와 SEM 이미지를 이용하여 취득한 강판 종별 산화층의 평균 두께를 나타낸 그래프이다. 분위기 온도가 890-965°C 구

간에서는 일반강판과 CP강판 모두 온도에 따른 산화층의 두께가 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이후 온도에서는 앞서 기술한 박리현상으로 인해 산화층의 두께가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있

다. 또한 890-965°C 구간에서는 CP강판이 일반강판에 비해 산화층의 증가 폭이 컸지만 그 이후인 박리

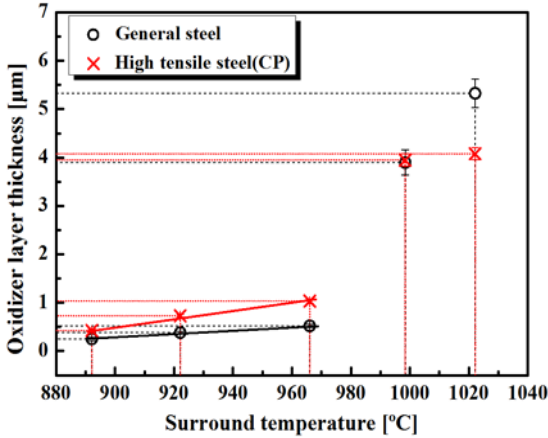


Fig. 7. Oxidation thickness with temperature of general and High tensile steels by SEM image analysis

현상 구간에서는 일반강판의 산화층 증가 폭이 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 매우 흥미로운 현상으로 추후 연구를 통해 다양한 연소조건이 박리현상에 미치는 영향을 파악하여 보고하려고 한다.

3.3 강판 종별 온도에 따른 EDS 분석

Fig. 8과 Fig. 9는 강판의 종류별 분위기 온도에 따른 산화 특성을 면밀히 분석하기 위하여 시편의 표면으로부터 산화된 정도를 파악하고자 산화성분인 산소원자(O)의 침투거리를 EDS line scanning 분석을 통해 취득한 결과를 보여준다. 산소원자의 성분에 대한 EDS 분석의 결과 값은 크게 3가지 영역(mounting zone, oxidation zone, non_oxidation zone)으로 구분하였고, 이를 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. Mounting zone은 산화실험 이후 마운팅 및 폴리싱

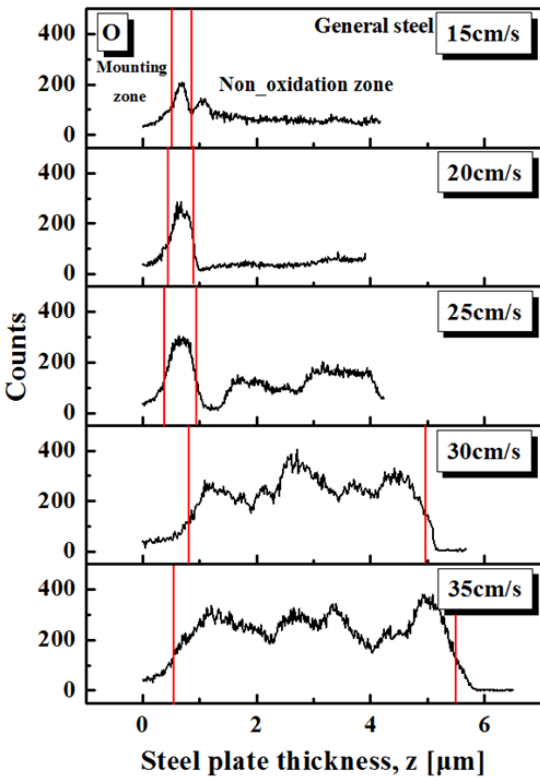


Fig. 8. Oxidation layer of general steel plate confirmed by EDS line scanning analysis

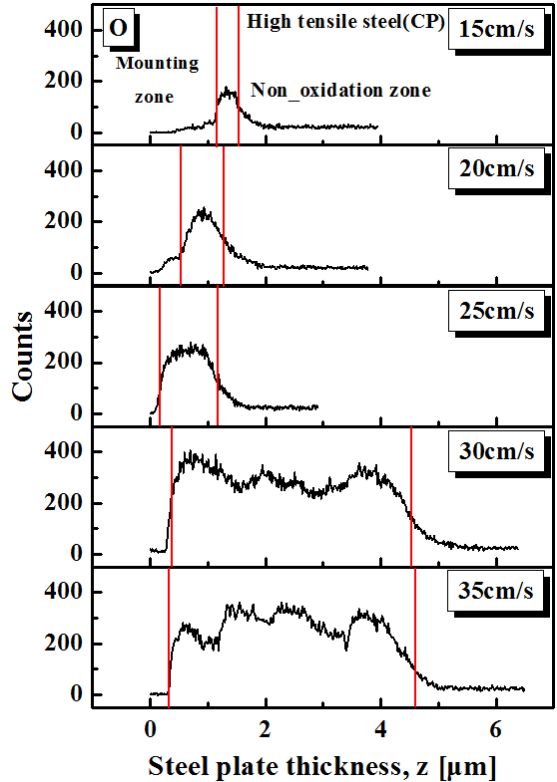


Fig. 9. Oxidation layer of high tensile steel plate confirmed by EDS line scanning analysis

작업으로 인하여 관찰된 층으로, 결과 값에는 주로 탄소원자(C)가 많이 분포하게 된다. 그 이후 oxidation zone은 산화철(FeO)이 생성된 영역으로 Fig. 8과 Fig. 9에 붉은 실선으로 나타내었다. 이 영역에서는 산소원자(O)가 많이 분포하게 되고 SEM 이미지에서 분석한 산화층 두께와 유사한 것을 확인할 수 있다. 이는 강판 주변의 분위기 온도가 증가할수록 산화성 분인 H_2O 와 CO_2 가 철(Fe)과 반응이 더 활발하게 일어난다는 것을 알 수 있다. Non_oxidation zone은 산소원자의 반응이 일어나지 않은 영역으로 결과 값에는 주로 철(Fe) 성분이 관찰되는 영역이다. SEM 이미지를 분석한 결과와 유사하게 혼합기의 유속에 따라 산화층의 두께가 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있으며, 두 강판 모두 유속 30 cm/s 이상에서는 박리현상으로 인해 떨어져 나간 틈 사이로 산화성물질인 H_2O 와 CO_2 가스가 지속적으로 유입이 이루어지게 된다. 이는 강판 표면에 산화층 두께를 증가시키는 결과를 가져오는 것을 알 수 있다.

비록 H_2 와 CO 가 존재하는 환원성 분위기이지만 분위기 연소가스 내 CO_2 와 H_2O 가스로 인해 두 강판 모두 표면에 산화철(FeO)이 형성되는 것을 알 수 있었고, 혼합기의 유속에 따른 온도증가로 산소원자의 분포층이 더 두꺼워지고 일정 온도 이상에서는 박리현상이 발생하여 산소원자가 깊게 침투하여 분포함으로써 강판 품질에 악영향을 미칠 수 있다는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

다공체 내 초과엔탈피 연소 기술을 이용하여 모사된 연속 열처리 로(爐)에서 강판의 종류별 온도에 따른 산화특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 로(爐) 내 분위기 온도에 대한 변수를 주기위해 혼합기의 유속을 달리하였고 혼합기의 유속에 따라 온도가 선형적으로 증가하고, 유속이 증가함에도 불구하고 분위기 연소가스의 조성비는 거의 일정하게 분포하는 것을 확인하였다.

2) 강판 종별 온도에 따른 산화층 두께는 SEM 이미지와 EDS line scanning 분석을 통하여 혼합기의 유속과 온도가 증가함에 따라 강판 종류에 상관없이 증가하는 것을 확인하였다.

3) 비교적 낮은 유속에서는 CP강판이 일반강판에 비해 산화층 두께가 두꺼운 것으로 나타났는데 이는 실제 조업 중인 연속소둔로의 승온속도를 고려한 체류시간으로 인해 CP강판이 일반강판에 비해 분위기 연소가스에 더 오래 노출되어 생긴 결과로 판단된다.

4) 일정 분위기 온도 이상에서는 두 강판 모두 표면에 박리현상이 나타났고 이를 통하여 CP강판이 일반강판에 비해 박리현상에 의한 산화층 생성에 면역 성능이 있는 것으로 판단하였다.

후 기

본 연구는 2019년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구이다(No. 2015-2010-103630).

References

1. G. Erdem and Y. Taptik, "Effect of hot rolling conditions to produce deep drawing quality steels for continuous annealing process", *Journal of Materials Processing Technology* 170, 2005, 17-23, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.04.097>.
2. T. C. Chen, C. H. Ho, J. C. Lin, and L. W. Wu, "3-D temperature and stress distributions of strip in preheating furnace of continuous annealing line", *Applied Thermal Engineering* 30, 2010, 1047-1057, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.01.018>.
3. S. Li, Q. Chen, and G. B. Huang, "Dynamic temperature modeling of continuous annealing furnace using GGAP-RBF neural network", *Neurocomputing* 69, 2006, 523-536, doi: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2005.01.008>.
4. H. S. Park and K. J. Riu, "Effect of Combustion Characteristics of the Burners for Non Oxidizing Direct Fired Furnaces on the Oxidation of the Surface of Steel Plate", *Mechanical Eng. Korea Society*, Vol. 23, 1999, pp. 330-341, Retrieved from <http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE00343397>.
5. T. Takno and K. Sato, "An Excess Enthalpy Flame Theory", *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 20, 1979, pp. 73-84, doi:

- <http://doi.org/10.1080/00102207908946898>.
6. J. R. Howell, M. J. Hall, and J. L. Ellzey, "Combustion of Hydrocarbon Fuels within Porous Inert Media", *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 22, 1996, pp. 110-115, doi: [http://doi.org/10.1016/0360-1285\(96\)00001-9](http://doi.org/10.1016/0360-1285(96)00001-9).
 7. D. Huin, P. Plauder, and J. B. Leblond, "Oxidation of Metals", *JSME Int. Jr., Series II*, 2005, 64, pp. 131-133, doi: <https://doi.org/10.1007/s11085-005-5718-x>.
 8. F. J. Weinberg, "Combustion Temperatures: The Future?", *NATURE*, Vol 233, 1971, pp.239-241, doi: <https://doi.org/10.1038/233239a0>.
 9. F. Weinberg, "Heat-Recirculating Burners: Principles and Some Recent Developments", *Combust. Sci. and Tech.*, 1996, Vol. 121, pp. 3-22, doi: <https://doi.org/10.1080/00102209608935584>.
 10. G. P. Gauthier, G. M.G. Watson, and J. M. Bergthorson, "Burning rates and temperatures of flames in excess-enthalpy burners: A numerical study of flame propagation in small heat-recirculating tubes, *Combustion and Flame* 161 (2014), pp. 2348-2360, doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2014.02.011>.
 11. S. Zhengchang and L. Boquan, "Numerical simulation of excess-enthalpy combustion flame propagation of coal mine methane in ceramic foam", *Mining Science and Technology (China)* 20, 2010, pp. 248-253, doi: [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60192-7](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60192-7).
 12. C. Keramiotis, B. Stelzner, D. Trimis, and Maria Founti, "Porous burners for low emission combustion : An experimental investigation", *Energy* 45, 2012, pp. 213-219, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.12.006>.
 13. C. J. Tseng, "Effects of hydrogen addition on methane combustion in a porous medium burner", *International Journal of Hydrogen Energy* 27, 2002, pp. 699-707, doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(01\)00173-2](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(01)00173-2).
 14. N. Birks, G. H. Meier, and F. S. Pettit, "Introduction to the High Temperature Oxidation of Metals", Vol. 2, pp. 101-110, doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139163903>.
 15. T. Nakamura, T. Matsumoto, H. Tada and K. Sugiura. "Chemistry of Nanomolecular Systems: Towards the Realization of Molecular Devices", *ISIJ Int.*, 49, 4, 2009, pp. 564-573, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05250-1>.
 16. S. G. Kim, K. J. Kang, and K. M. Lee, "A Study on Behavior of Steel Surface Oxidation with Characteristics of the Combustion", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 28, No. 4, 2017, pp. 392-400, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2017.28.4.392>.
 17. S. G. Kim and K. M. Lee, "A Study on Behavior of Surface Oxidation with Steel Type", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 29, No. 4, 2018, pp. 378-385, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.4.378>.
 18. M. L. Zheludkevich, A. G. Gusakov, A. G. Voropaev, A. A. Vecher, E. N. Kozyrski, and S. A. Raspopov, "Oxidation of Silver by Atomic Oxygen", *Oxidation of Metals*, Vol. 61, 2004, 39-48, doi: <https://doi.org/10.1023/B:OXID.0000016275.96500.24>.