

## 연소 특성에 따른 강판 표면 산화거동에 관한 연구

김슬기<sup>1</sup> · 강기중<sup>2</sup> · 이기만<sup>3,†</sup>

<sup>1</sup>순천대학교대학원 우주항공공학과, <sup>2</sup>부산대학교대학원 기계공학과, <sup>3</sup>순천대학교 기계 · 우주항공공학부

### A Study on Behavior of Steel Surface Oxidation with Characteristics of the Combustion

SEULGI KIM<sup>1</sup>, KIJOONG KANG<sup>2</sup>, KEEMAN LEE<sup>3,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Aerospace Engineering, Suncheon National University School, 255 Jungang-ro, Suncheon 57922, Korea

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Pusan National University Graduate School, 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

<sup>3</sup>School of Mechanical and Aerospace Engineering, Suncheon National University 255, Jungang-ro, Suncheon 57922, Korea

†Corresponding author :  
kmllee@scnu.ac.kr

Received 31 July, 2017  
Revised 18 August, 2017  
Accepted 30 August, 2017

**Abstract >>** An experimental study was conducted to investigate behavior of steel surface oxidation with characteristics of the combustion. The excess enthalpy combustion in porous media system was applied to implement the direct radiation heating system. The surface oxidation thickness (SOT) of fuel-lean was thicker than the SOT of fuel-rich. Also, the SOT was increased by increasing residence time. Detailed explanations were given by SEM and EDS analysis.

**Key words :** CAL(연속열처리 로), Combustion in porous media(다공체 내 연소), Oxidation(산화), Reduction(환원), Surface oxidation(표면 산화), Heating rate(승온속도), Heat treatment(열처리)

## 1. 서론

산업용 냉연강판의 대표적인 열처리 로(爐)인 연속 소둔로인 일명 CAL (continuous annealing line) 설비는 크게 가열과 냉각설비로 구성되어 있다. 이 경우 열처리 설비는 공정에 따라 예열대 (preheating section, PHS), 가열대(heating section, HS), 유지대(soaking section, SS) 및 냉각대(cooling section, CS)로 열처리 영역이 구분 되는데, 이들 영역 중 열처리 로의 투입 에너지와 강판의 품질

에 가장 많은 영향을 미치는 영역은 가열대 공정이다. 이러한 가열대 공정은 주로 열처리 온도까지 급속한 승온을 위해 버너로 강판을 직접 가열하는 직화(direct firing) 영역과 강판의 균일 온도 유지 및 무산화(none oxidation) 분위기에서의 열처리를 위해 라디언트 튜브를 이용한 간접 가열방식의 radiant tube (RT)영역으로 구성된다.

하지만, 최근의 CAL 설비에서는 강판의 품질 향상을 위해 온도 편차가 적고 로(爐)내 청정성이 우수한 사유로 열처리를 위한 에너지(연료) 소비

량이 증가함에도 불구하고 부득이 라디언트 튜브 방식의 간접 가열 구간을 늘리려는 경향이 있어, 에너지 다소비 설비인 열처리로의 공정효율 개선을 위해 종래 장염(長焰)형태 제트분사 방식에 따른 직화 가열 공정의 문제점인 비균일 가열과 승온시간 단축에 대해 개선 필요성이 꾸준히 제기되어 왔다<sup>1)</sup>.

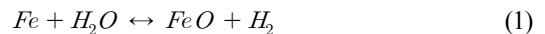
강판의 수요량이 1990년 이후에 급증하였고, 요구의 특성 또한 다양화됨에 따라 다양한 강판 제조 기술이 개발되고 있을 뿐만 아니라, 다양한 용도에 따른 수요도 급증하고 있는 실정이다. 최근에는 사회적 과제로서 자원 순환형 사회 구조화, CO<sub>2</sub> 절약형 설비 요구 및 개선과 함께 생산성과 품질 향상의 대한 기술적 대응이 요구되고 있다.

이에 본 연구에서는 연속 열처리로의 핵심 공정인 가열대열처리 구간에서 제트식 버너로 강판을 직접 가열하는 종래 직화 가열 버너의 문제점을 개선하기 위해 제안된 다공체 내 초과엔탈피 연소 기술(excess enthalpy combustion in porous media)을 적용하였다<sup>2)</sup>.

다공체 내 연소는 일반적으로 연료의 완전 연소를 위해 필요로 하는 넓은 연소 공간 대신에, 다공체의 많은 미세 기공 내부에서 연료와 산화제의 혼합기를 연소시키는 기술이다. 또한 이때 내부 기공에는 연속적인 화염들이 존재하게 되고, 인접하는 고체상의 다공체와 열적 상호작용을 하게 된다. 이로 인한 미연가스의 예열효과는 이론 최대치인 단열화염온도 이상의 화염을 생성시키며 이를 초과엔탈피연소라 한다. 이와 같은 연소는 자체적인 열 재순환으로 인하여 가연한계(flammability limits)가 확장되므로, 저열량 연료의 연소 혹은 연료의 초희박 또는 초과농 조건에서 안정적인 연소를 제공할 수 있다. 또한 고체상 다공체로 인해 높은 복사에너지 전환율을 가지며, 초고온의 화염 온도와 미세 기공 내부에서의 화염 면적 증가는 높은 체적부하 연소가 가능케 한다. 또한 환경적 측면에서 다공체 내 연소는 높은 화염 온도에도 불구하고 적은 양의 질소산화물을 생성하는

것으로 잘 알려져 있다<sup>3)</sup>.

한편, 앞서 설명한 냉연강판의 열처리 공정 중 가열대의 직화 공정은 연속적으로 일정 라인속도로 이동하고 있는 강판에 대하여 표면의 과도한 산화를 방지함과 동시에 강판의 표면 온도가 700-770°C까지 가열하는 것을 주요 기능으로 한다<sup>4)</sup>. 강판의 과도한 산화가 이루어지게 되면, 강판 표면에 산화피막이 잔존하게 됨으로서 도금 등과 같은 표면처리가 불가능해진다. 특히 강판 표면 부근에서의 연소가스의 온도와 조성분포는 강판의 산화 및 환원 거동과 밀접한 관계가 있으며 이는 연소 조건에 의하여 지배되는 것으로 여겨진다. 일반적으로 희박한 연소조건에서 연소가 이루어져 이후 연소분위기 가스 중 잔류 산소가 존재하는 상태를 산화성 분위기라고 하며, 과농한 연소조건에서 연소되어 생성된 연소생성물 가스를 환원성 분위기라고 하지만, 연소가스에 존재하는 H<sub>2</sub>O와 CO<sub>2</sub>가 강판 표면을 산화시키는 역할을 하기 때문에 연소 생성 가스 중에 잔류산소가 존재하지 않더라도 강판 표면의 산화가 발생하게 된다.



화학 평형론적 관점에서 보면 강판의 표면은 고온 분위기 하에서 H<sub>2</sub>O와 CO<sub>2</sub>에 의해서 산화되며 H<sub>2</sub>와 CO에 의해 환원이 되게 됨을 의미한다. 즉, 연소가스 중 H<sub>2</sub>O와 CO<sub>2</sub>가 증가함에 따라 위 식 (1), (2)의 순반응이 활발해지며 이는 철의 산화를 촉진시킨다. 반대로 H<sub>2</sub>와 CO의 증가는 식 (1), (2)의 역반응이 활발해지며, 이는 철의 환원을 증진시키게 되며, H<sub>2</sub>의 농도가 소재의 산화 또는 환원에 밀접한 관계가 있는 것으로 보인다<sup>5-10)</sup>.

따라서 강판 표면 부근에서 고온의 연소가스 온도와 조성 분포는 소재인 강판의 산화 및 환원 거동과 직접적인 관계가 있으며, 강판의 이송속도에 따른 체류시간은 연속 열처리로인 CAL 설비의 고온 분위기에서 강판표면의 산화-환원 반응시간과

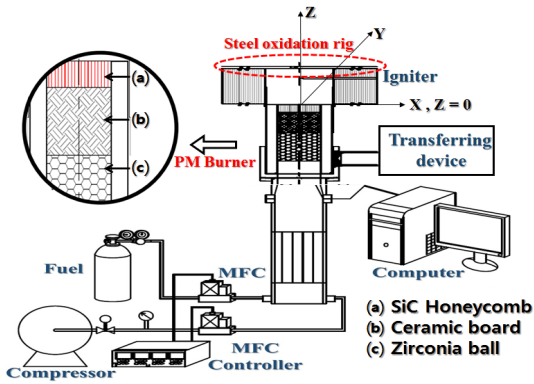


Fig. 1. Schematic diagram of experimental set-up

밀접한 관련이 된다. 이에 본 연구에서는 연속열처리로의 직화 가열대 연소방식으로 다공체 내 초과엔탈피 연소기술을 적용하여 실험실 차원의 강판 산화 모사 시험로를 통해 시판중인 열처리용 강판의 승온속도 및 연소조건에 따른 소재 표면의 산화 기초 특성을 파악하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

본 연구에서 사용한 실험 장치는 유량 조절부, 노즐부, 측정부로 구성되어 있으며 Fig. 1에 간략하게 표시하였다. 실험실 규모의 직화용 열처리 버너는 예혼합 연소방식의 초과엔탈피 연소기로 (a) 직경 30 mm, 두께 10 mm의 SiC 세라믹 허니컴을 사용하였으며, 화염의 역화를 방지하고자 (b) 두께 20 mm 기공률 20%의 세라믹 보드를 사용하였다. 예혼합된 가스의 균일한 유동장 형성을 위하여 (c) 직경 3 mm의 지르코니아 볼을 세라믹 보드 아래에 위치시켰다. 다공체 내 정지된 화염의 시각화와 다공체 측면으로부터의 대류열전달의 열손실을 방지하고자 직경 60 mm의 이중 켈츠(Double Quartz) 구조로 다공체 복사 연소기를 구성하였다. 또한 시험용 로는 열처리로의 고온 분위기 모사를 위해 75 mm의 로용 단열재를 사용하여 대기로의 열손실을 방지하였으며, 연소조건에

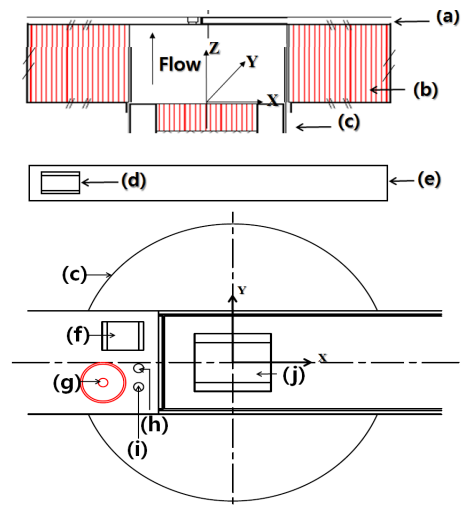


Fig. 2. Schematic diagram of steel plate oxidation jig for experimental steel oxidation rig (a) rig for measuring temp. and sampling steel, (b) insulating materials, (c) burner, (d) sampling steel, (e) carrier for sampling steel, (f) pyrometer for steel temp., (g) shield T-C (K-type) for steel, (h) surround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

따른 강판 표면의 온도(770°C)를 구현하고자 상하 높이 조절이 가능한 이송장치(transferring device)를 사용하여 열처리 가열용 버너와 강판간의 거리를 조절하였다.

연료는 LNG의 주성분인 메탄(99.99%)을 사용하였으며, 산화제는 압축공기(99.99%)를 사용하였다. 연료와 산화제는 지르코니아 볼 아래 허니컴으로 구성된 정체실에서 충분히 예혼합되도록 한 후 버너에 유입되도록 하였다. 각각의 유량은 버블유량계를 통해 보정된 질량 유량계(MFC)와 Lab-view 기반의 컨트롤러를 통해 유량을 조절하였다.

생성된 연소가스는 외부로 배출되도록 하였으며, 산화 실험용 리그(Rig) 지지대에 강판 표면 및 분위기 온도와 연소가스의 농도 측정을 위한 측정용 홀을 가공하였다. 또한 강판 주위의 연소가스 농도와 온도 측정을 위한 홀의 위치 및 산화 실험 중 리그에 위치하게 되는 강판의 위치를 Fig. 2에 간략히 표시하였다.

Fig. 2(a)는 산화 실험용 리그, (b) 단열재, (c) 버너를 나타내며 상하 높이 조절이 가능한 이송장치

를 통해 (a)와 (c) 사이의 거리를 조절하였다. 강판 표면 산화거동을 파악하고자 강판을 (d)에 부착하여 (e)이송장치를 통해 버너 중심부에 위치시켜 실험을 실시하였다. 실시간(real time)으로 강판의 온도를 확인하고자 Fig. 2(f)에 강판(10×8 mm, 두께 0.45 mm)을 위치시켜 비접촉식 온도계인 광(光) 고온계(pyrometer)를 통해 측정하였으며, 산화 실험을 실시하는 강판과 똑같은 조건의 강판(10×10 mm, 두께 0.45 mm)을 (g)에 위치시켜 직경 1.5 mm 쉴드형(Shield; 쉴드) K-type 열전대 사용하여 강판의 온도를 실시간으로 측정하였다. 연소가스의 온도는 Fig. 2(h) 위치의 홀을 통해 직경 1.5 mm 쉴드형 K-type 열전대를 사용하여 측정하였으며, 버너와 강판 사이의 공간에 대한 연소가스의 농도는 Fig. 2(i) 위치의 홀에서 직경 1.5 mm Sampling Probe를 통하여 흡입된 후 고농도 가스 분석기(Vario<sup>+</sup>, MRU/Germany, CH<sub>4</sub>, CO : NDIR 센서 and H<sub>2</sub> : TCD 센서)를 이용하여 측정하였다.

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 시편 준비

산화실험용 강판은 약 0.45 mm 두께인 스트립 캐스팅한 강판 판재를 시험하기 적당한 10 mm × 10 mm 크기로 방전 가공하여 만들었다. 산화실험 전에 스트립 캐스팅 동안에 발생된 표면층의 불균일도를 제거하기 위해 실험용 강판을 약 200 μm 정도 밀링 가공하였다. 또한 표면 산화거동 조사의 정확도를 높이기 위해 강판의 단면 연마(Polishing) 처리하였으며, 산화 실험 이후 강판 또한 단면연마 처리하여 분석을 실시하였다.

### 2.2.2 농도 및 온도 측정

버너와 강판 사이의 공간에 분포하는 연소 생성 가스의 온도와 조성을 파악하기 위하여 2.1절에서 설명한 바와 같은 장치를 구성하였다.

Fig. 3은 산화 실험 리그를 통해 다공체 복사 버너의 점화 이후 강판의 표면 온도와 강판 주변 고

온의 분위기 가스 온도가 정상상태로 유지되는 경우를 나타내며, 특히 Fig. 2(f) 위치에서 비접촉식 광-고온계(pyrometer)를 사용하여 측정한 강판 표면 온도 결과와 Fig. 2(g) 위치에서 직경 1.5 mm 쉴드형 K-type 열전대를 사용하여 측정한 표면 온도의 두 측정값이 거의 유사한 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서의 온도 측정방법은 강판의 온도 변화를 충분히 대변할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 4는 버너 점화 후 강판 주위 산화-환원성 연소가스 및 연료의 농도 분포를 나타낸 그래프이다. Figs. 3과 4에서 볼 수 있듯이 버너 점화 후 화염은 다공체인 SiC 허니컴 상단 표면에 부착된 후

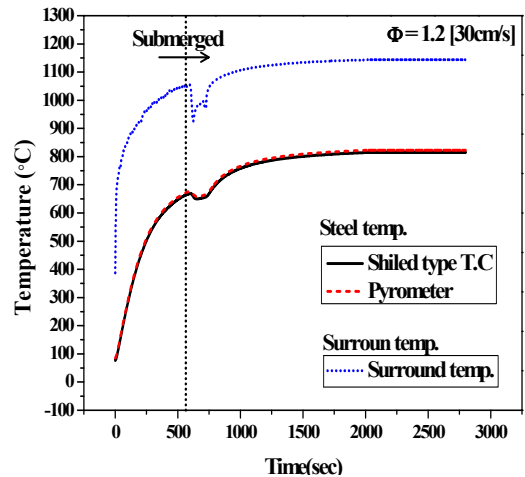


Fig. 3. Steel and surround temperature at  $\Phi = 1.2$ ,  $V_M = 30c$  m/s

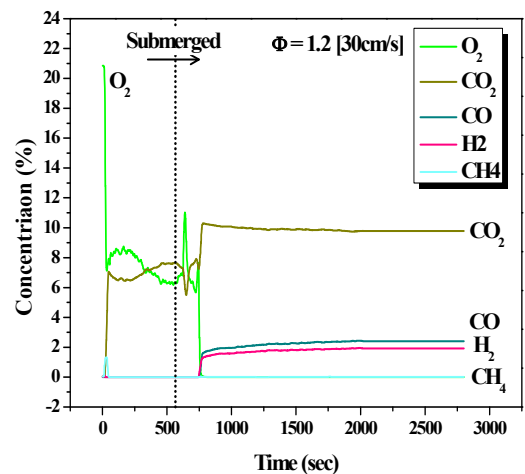


Fig. 4. Concentration of combustion at  $\Phi = 1.2$ ,  $V_M = 30c$  m/s

Table 1. Experimental conditions

Parameters	Range
Fuel	CH <sub>4</sub>
Oxidation	Air
Equivalence ratio ( $\Phi$ )	0.8, 1.2
Mixture velocity, $V_M$ (cm/s)	20, 25, 30, 35
Residence time (sec)	10, 16, 20, 26
Steel temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	$770 \pm 10$

180-360초(3-6분) 경과하게 되면 다공체 내부로 타고 들어가 Submerged 상태가 된다. Submerged된 화염은 약 180초(3분) 후 기공률 20%인 세라믹 보드에 의해 더 이상 파고 들어가질 않고 다공체와 세라믹 보드 경계층에서 안정적인 화염으로 존재하게 된다. 따라서 이와 같은 상태의 화염을 안정화된 정상 상태라 하며, 산화실험 조건에 해당되는 온도 및 농도는 화염이 안정화된 약 15분 이후의 값을 사용하여 비교하였다.

### 2.2.3 강판 산화 실험

다공체 내 초과엔탈피 연소기술을 적용한 버너의 강판 표면 산화 특성을 파악하기 위하여 2.1절에 언급한 바와 같이 강판을 10 mm × 10 mm 크기로 가공하였다. 연소상태가 전술한 바와 같은 방법으로 정상 상태에 도달한 것으로 판단되면 실시간으로 측정되고 있는 Fig. 2(f), (g) 위치에서 강판의 표면 온도가 목표 온도(770 $^{\circ}\text{C}$ )에 도달한 후 강판을 Fig. 2(d)에 부착하여 Fig. 2(e) 이송장치를 통해 강판이 가열용 다공체 복사 버너의 중심부인 Fig. 2의 (j) 위치에 오도록 하였다. 또한 강판의 이송속도에 따른 일정 체류시간 이후 강판을 인출하는 방법으로 산화 실험을 진행하였다. 산화 실험을 실시한 강판은 마운팅(mounting)한 후 주사전자 현미경(SEM)을 통하여 1,000배에서 3,000배로 확대하여 표면에 부착된 산화층의 두께를 측정하였다. 산화층 두께 energy dispersive spectroscopy (EDS) 분석을 하여 산화층 내 산소의 농도가 5% 이상일 때를 기준으로 하여 산화 두께를 측정하였으며, SEM 분석을 통해 산화층이 뚜렷이 구별되

Table 2. Concentration of combustion with Mixture velocity( $V_M$ )

Eq ( $\Phi$ )	$V_M$ (cm/s)	Concentration of product gases (%)			
		O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>
0.8	20	4.99	8.38	0	0
	25	5.11	8.30	0	0
	30	4.94	8.31	0	0
	35	5.09	8.34	0	0
1.2	20	0	9.61	2.10	1.95
	25	0	9.66	2.29	2.01
	30	0	9.53	2.28	2.09
	35	0	9.56	2.30	2.05

는 층을 기준으로 하여 두께를 측정하였다. 산화층 두께는 각각의 조건마다 15-20회 산화 실험을 반복 실시하였으며, 측정결과와 편차는 0.05-0.1% 이내인 것으로 확인하였다. 따라서 측정결과를 평균하여 산화층의 두께를 비교하였다.

### 2.2.4 실험조건

본 연구에서는 강판의 열처리 연소조건에 따른 강판 표면의 산화 거동을 파악하고자, 산화성 분위기인 희박조건은 당량비( $\Phi$ ) 0.8인 경우와, 환원성 분위기인 과농 조건은 당량비( $\Phi$ ) 1.2로 하여 산화실험을 실시하였다. 이 경우 열처리 소재 표면 온도는 혼합기의 유속( $V_M$ )을 20, 25, 30, 35 cm/s로 조절하여 종래 열처리 공정 중 직화 가열대 공정에서의 소재 표면 온도(770 $^{\circ}\text{C}$ )를 구현하였다<sup>9)</sup>. 또한, 소재의 승온 속도에 따른 산화거동을 파악하고자 각각의 승온속도(68, 44, 26 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ )에 따른 실험으로 내부에 일정 체류시간을 변수로 하여 실험을 실시하였으며, 이러한 본 연구의 실험조건들을 Table 1에 간단히 정리하여 나타내었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 연소 조건에 따른 표면 산화 거동

다공체 내 초과엔탈피 연소기술을 적용한 직화용 버너에서 연소 분위기에 따른 강판 표면 산화

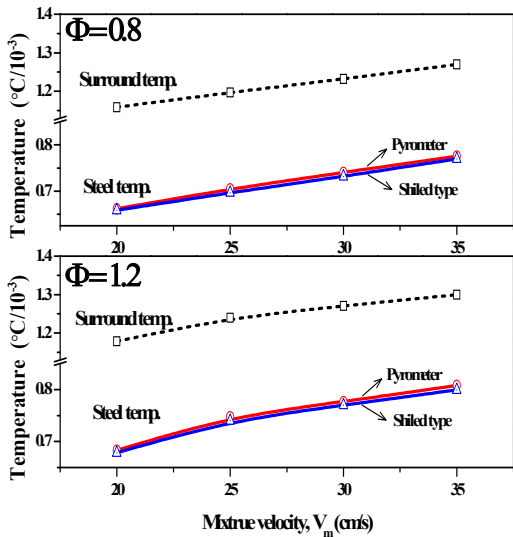


Fig. 5. Steel and surround temperature with mixture velocity ( $V_M$ )

거동을 파악하기 위해 각각의 당량비( $\Phi$ )에서 혼합기의 유속을 조절하여 열처리용 강판의 소재 표면 온도( $770^{\circ}\text{C}$ )에 도달하는 조건을 찾고자 하였다.

Table 2에 각각의 당량비( $\Phi$ )에서 혼합기 유속 ( $V_M$ )에 따른 연소가스의 농도를 간략히 나타내었다. Table 2에서  $V_M$ 이 증가함에 따라 농도 분포는 거의 일정한 것을 볼 수 있다. 또한 전반적으로 희박 조건일 때는 잔류 산소가 존재하는 것을 볼 수 있으나, 과농 조건일 때는 잔류 산소가 거의 존재하지 않는 것을 볼 수 있다. 또한  $\text{H}_2$ 와  $\text{CO}$ 의 농도 분포도 희박 조건일 때 더 작은 것을 볼 수 있다. 이에 대한 자세한 고찰은 다음 절에서 하고자 한다.

Fig. 5에 각각의 당량비에서  $V_M$ 에 따른 강판의 표면 온도와 강판 주위의 분위기 온도를 그래프로 나타내었다. 실선은 강판의 표면 온도, 점선은 연소 분위기 가스의 온도를 나타낸다. 이 경우 강판의 표면온도는 2.2.3절에서 설명한 바와 같이 광고온계와 열전대로 측정된 온도 값이 거의 동일하게 나타나 Fig. 5에서도 두 종류의 온도 차이가 없음을 보여주고 있다.  $V_M$ 이 증가함에 따라 가열 열량의 증가로 인해 강판의 표면 온도 및 연소가스의 온도가 증가하는 하는 것을 볼 수 있다. 또한  $\Phi = 0.8$ 에서  $V_M = 35 \text{ cm/s}$ 인 경우와,  $\Phi = 1.2$ 에서

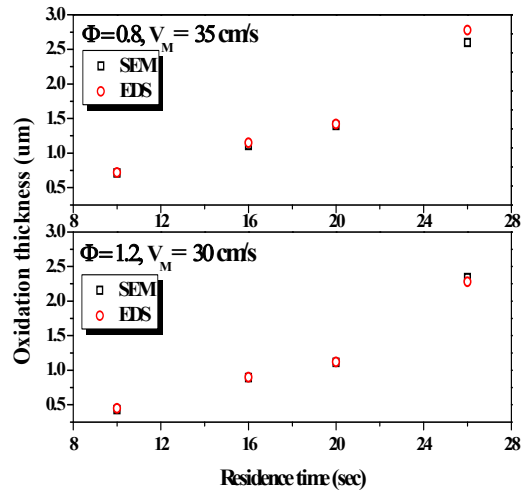


Fig. 6. Oxidation thickness in depth direction with residence time by EDS, SEM analysis

$V_M = 30 \text{ cm/s}$  경우에서 강판의 표면 온도가 기준 열처리 로 내 강판의 표면 온도( $770^{\circ}\text{C}$ )와 근접한 것을 알 수 있다.

따라서, 산화성 분위기인 희박조건  $\Phi = 0.8$ 에서는  $V_M$ 을  $35 \text{ cm/s}$ 인 경우에, 환원성 분위기인  $\Phi = 1.2$ 의 과농 조건에서는  $V_M$ 이  $30 \text{ cm/s}$ 인 경우에서 연소분위기에 따른 표면 산화 거동을 파악하였다.

먼저, Fig. 6은 대표적인 산화-환원 거동으로 산화 및 환원성 분위기에서 2.2.2절에 언급한 바와 같이 EDS 분석을 통해 산소(O) 원자의 농도를 기준으로 하여 측정된 두께 방향의 산화층 두께와 SEM을 통하여 측정된 두께를 체류 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 정밀한 EDS와 SEM의 두 가지 측정 결과가 거의 일치하는 것을 볼 수 있으며, 이를 통해 본 연구에서 산화층 두께 측정의 기준이 타당한 것으로 판단할 수 있었다. 또한, Fig. 6의 결과를 통해  $V_M = 35 \text{ cm/s}$ ,  $\Phi = 0.8$ 의 산화성 분위기인 희박조건에서는 산화층의 두께가 더 큰것으로 확인되었다.

Fig. 7은 산화되기 전(前) 강판의 SEM 이미지와 연소가스의 산화조건에 따라 10 sec의 체류시간 동안 산화실험을 실시한 강판의 SEM 분석 이미지를 보여주고 있다. Fig. 7(a)은 대표적인 산화 전 강

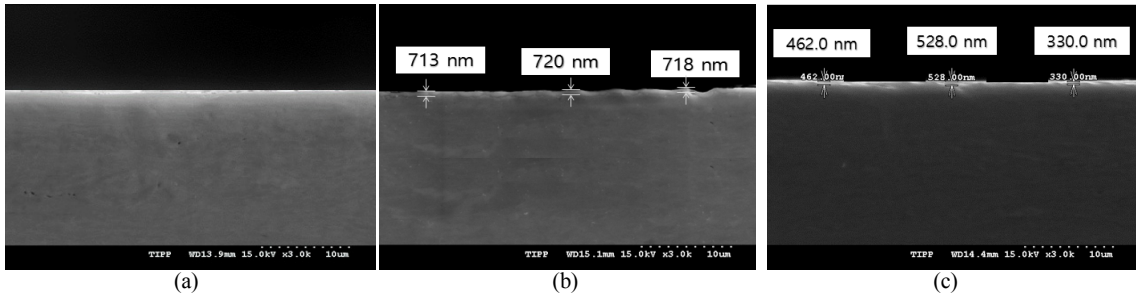


Fig. 7 SEM image with equivalence ratio on oxidation time = 10 sec (a) before oxidation, (b) after oxidation  $\Phi = 0.8$ , (c) after oxidation  $\Phi = 1.2$

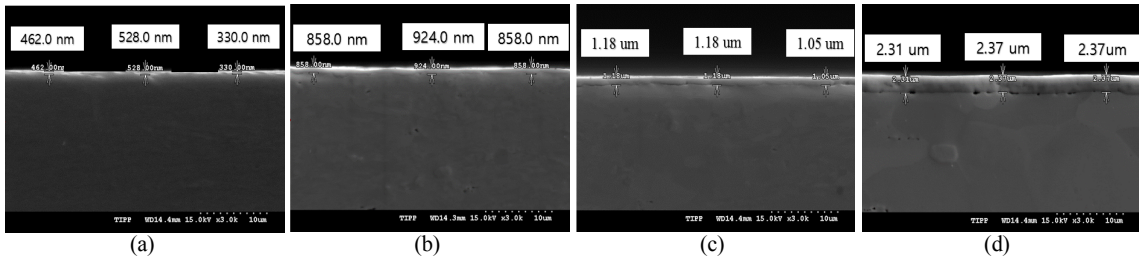


Fig. 8 SEM images in  $\Phi = 1.2, V_M = 30 \text{ cm/s}$  with residence time for (a) 10 sec, (b) 16 sec, (c) 20 sec, (d) 26 sec

판을 나타내며, Fig. 7(b)는 산화성 분위기의 희박 조건인  $\Phi = 0.8$  조건에서, Fig. 7(c)는 환원성 분위기의 과농 조건  $\Phi = 1.2$  조건인 경우를 나타낸다. 강판의 산화 전(前)과 후(後)를 비교하였을 때, 산화층이 확연히 생성된 것을 볼 수 있다. 또한 (c)에서 보여주고 있는 과농 조건보다 (b)의 희박 조건인 경우에서 산화층의 두께가 더 크게 성장한 것을 볼 수가 있다. 이는 Table 2에서 확인한 바와 같이 희박 조건일 때 존재하는 잔류 산소와 식 (1)과 (2)의 순 반응을 촉진시키는  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ 의 존재로 인하여 강판의 표면 산화를 촉진시켜 나타나는 것으로 판단된다. 또한 소재의 표면 환원을 촉진시키는  $\text{H}_2$ 의 농도가 과농 조건인 경우보다 희박 조건일 때가 더 적기 때문에 표면 산화가 발달된 것으로 볼 수 있다<sup>9)</sup>.

### 3.2 산화 조건에 따른 표면 산화 거동

본 절에서는 다공체 내 초과엔탈피 연소기술을 적용한 직화 버너에서 산화 조건에 따른 표면 산화 거동을 파악하고자 한다.

강판을 가열 중심부에서 승온 속도에 따라 실험로 내부에서의 일정 산화 시간을 체류시간(residence time)이라 명칭하며, 이에 따른 영향을 살펴보고자 한다. Fig. 8은  $\Phi = 1.2, V_M = 30 \text{ cm/s}$ 일 때 승온속도에 따른 일정 체류시간에 따라 산화 실험을 실시한 강판을 SEM으로 측정한 이미지이다. SEM 이미지를 통해 실제 로(爐) 내부에서는 이송되는 강판 강판의 체류시간이 증가함에 따라 산화층이 뚜렷이 구별되며, 두께가 증가하는 것을 볼

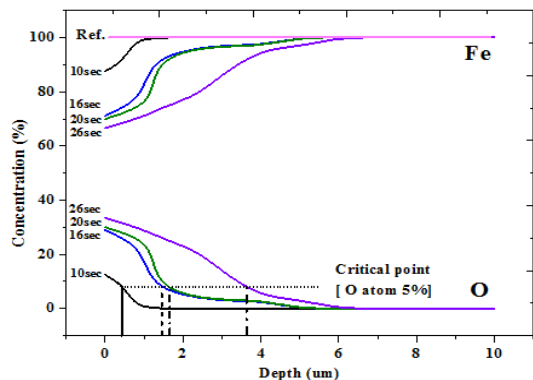


Fig. 9. Fe and O of concentration in depth direction with residence time by EDS analysis

수 있다. 이러한 특성에 대해서는 Fig. 9을 통해 설명하고자 한다.

Fig. 9는 환원성 연소 분위기인  $\Phi = 1.2$ 에서 강판의 표면 온도가  $770^{\circ}\text{C}$ 에 도달하는 혼합기 속도인  $V_M = 30\text{cm/s}$ 인 경우, 강판의 표면으로부터 깊이 방향의 철(Fe)과 산소(O) 원소 성분을 EDS 분석으로 측정된 결과이다. 그래프에서 나타난 바와 같이 체류시간이 증가함에 따라 산소 원자의 확산 깊이가 증가한 것을 볼 수 있다. 따라서 체류시간이 증가함에 따라 강판 표면으로부터 강판의 깊이 방향으로 산소 원자가 확산되어 침투됨에 따라 표면 산화층의 두께가 증가한 것으로 판단된다. 또한, 이를 통해 산소 원자의 확산 거동에서 어느 일정한 체류시간 이하인 경우에는 강판의 표면 산화층이 존재하지 않는 것을 볼 수 있어, 급속한 강판의 승온 성능을 만족할 수 있는 연소버너의 성능 개선 등을 통해 최적의 열처리 조건을 만족시킬 수 있음을 암시해 주고 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 연속열처리 로(爐)의 직화 가열 대 연소방식으로 다공체 내 초과엔탈피 연소기술을 적용하여 실험실 차원의 산화 실험을 모사할 수 있는 실험로를 통해 시판 중인 열처리용 강판의 강판을 승온 속도 및 연소 조건에 따라 소재 표면에 대한 산화 기초 특성을 파악하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 비접촉식인 광-고온계인 pyrometer와 접촉식인 쉴드형 열전대를 이용하여 강판의 온도를 측정하였으며, 이와 같은 방법으로 측정된 온도 값이 거의 동일한 것으로 확인되었다. 이를 통해 본 연구의 온도 측정방법이 각각의 연소조건에서의 강판의 온도를 충분히 대변할 수 있을 것으로 판단하였다.

2) 실제 열처리 로와 동일한 강판 표면온도 ( $770^{\circ}\text{C}$ )를 구현하고자 산화성과 환원성 분위기의 당량비에서 혼합기의 유속을 조절하여  $\Phi = 0.8$ 에

서  $V_M = 35\text{ cm/s}$ ,  $\Phi = 1.2$ 에서  $V_M = 30\text{ cm/s}$ 인 경우에서 강판의 표면 온도 조건이 만족하는 것을 확인하였다.

3) 산화층의 두께 변화를 파악하고자 강판 표면으로부터 깊이 방향의 EDS 분석을 통하여 산소 원자의 확산 깊이가 과농 조건에서 더 큰 것을 확인하였으며, SEM 분석을 통해서도 산화층의 두께가 더 큰 것을 확인하였다.

4) 이는 희박조건에서는 연소가스 내 강판의 산화를 촉진시키는  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ 로 인해 산화되었으며, 과농 조건에서는 산화된 강판의 환원을 촉진시키는  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  가스의 영향으로 인하여 표면 산화층이 덜 발달된 것으로 판단된다.

5) 강판의 체류시간에 따른 산화에서는 EDS 분석을 통해 강판 내 산소 원자의 확산 깊이를 측정하여 강판이 열처리로 내부에서 체류하게 되는 시간이 증가함에 따라 표면 산화층의 두께가 증가하는 것을 확인하였다.

6) 일정 체류시간 이하에서는 표면 산화층이 존재하지 않아 단시간 내 강판의 높은 승온 성능을 구현하기 위한 직화 버너의 연소성능 개선 필요성도 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제이다(NO. 2015-2010-103630).

#### References

1. 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.
2. T. Takno and K. Sato, "An Excess Enthalpy Flame Theory", Combust. Sci. Tech., Vol. 20, 1979, pp. 73-84.
3. 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. 121-145.
4. M. Katsuki, Y. Mizutani, T. Ogawa, and K. Hatta, "The Oxidation Behavior of Metal Surface in a Flame", JSME Int. Jr., Series II, Vol. 35, No. 1, 1990, pp. 110-115.
  5. D. Huin, P. Plauder, and J. B. Leblond, "Oxidation of Metals", 64, 2005, pp. 132-133
  6. N. Birks, G. H. Meier, and F. S. Pettit, "Introduction to the High Temperature Oxidation of Metals", Vol. 2, pp. 101-110.
  7. Y. Suzuki, T. Yamashita, and Y. sugimoto, "Chemistry of Nanomolecular Systems: Towards the Realization of Molecular Devices", ISIJ Int., 49, 4, 2009, pp. 564-573.
  8. F. M. Pereira, A. A. M. Oliveira, and F. F. Fachini, "Maximum Superadibatic Temperature for Stabilized Flames within Porous Inert Media", Combust. Flame, Vol. 158, 2011, pp. 2283-2288.
  9. J. B. Lee, " Effect of Alloying Elements and Annealing Condition on Surface Oxidation Behavior during Annealing of 25 mass % Mn Steel Sheet", Council of the graduate school of Kyunpook national university, 2008, pp. 1-50.
  10. M. S. Kim, "Study on Surface Oxidation and Galvanizability of TRIP Steel", Council of the graduate school of Sunchon national university, 2013, pp. 1-157.