

uv detector, pilot burner에 냉각공기가 공급되며, 배기저항을 줄이고자 ID fan을 설치하였다. 부하조절은 공기량을 제어하고 gas/air ratio controller에 의해 가스를 제어하는 방식이다. 버너 각 각에 온도계를 설치하여 배가스의 상태를 모니터링 하였고 절환주기(reverse period)는 3분으로 설정하였다. 절환밸브는 pneumatic type을 사용하였다. 축열체 장입은 상부에서 이루어지고 배출은 하부에서 이루어진다. 이러한 축열버너는 시스템의 복잡성으로 설치장소가 확보되어야 하므로 기존 B-C 버너 설치 위치인 지하에 설치가 곤란하였다. 따라서 도가니 상부에 설치하였다.

앞에서 언급하였듯이 축열버너의 위치가 로 내부 상부에 위치하므로 하부로의 열전달이 충분하지 못할 경우 도가니의 윗 부분과 아랫부분에 온도차가 발생하여 아연에 포함되어 있는 철(Fe)성분이 응고되거나 로내 온도가 설정온도에 이르지 못할 수도 있다. 따라서 축열버너를 적용하기 전에 이에 대한 모의실험을 실시하여 문제점을 파악하고자 하였다.

모델로서 축소로틀 설계 제작하였고 열원으로서는 실험의 간편성을 위해 공기를 사용하였다. 이때 실제 로와 역학적 유사율(similitude)을 맞추기 위해 Re number를 일치시켰으며 유량조절은 질량유량계(Sierra)를 사용하였다. 실험변수로는 현재 도가니 위치를 바꾸는 것 외에는 대안이 없었으므로 도가니의 위치를 로내 상하 유동이 원활하도록 적절히 바뀌가면서 실험을 실시하였다. 열부하로서는 물을 사용하였고 축소로내 온도는 120℃를 유지하였고 온도조절은 공기용 온풍기(LEISTER KSR)를 사용하였다. 로내 온도분포를 측정하기 위해서 상하 좌우에 4개의 온도계를 설치하였다. Table 1에 모의실험에 대한 조건을 정리하였다.

Table 1 Simulative experimental condition of oxide furnace

기하학적상사율	Model 1:18
역학적 상사율	Re 36,500(hot air)
실험 변수 : 도가니 위치	
열부하	물
로내 온도	120℃

3. 실험결과

3.1 모의실험결과

Fig. 2는 도가니 위치에 따른 축소로 내 온도분포 결과이다. 기존 도가니 위치(로 중앙에 균일 배열)일 때 최고 최저 온도차는 2%, 도가니를 최고온도 지역(버너의 반대측)으로 배열했을 때는 4%로 차이가 더 커졌으며 이는 최고온도를 나타내는 지역에 도가니가 설치됨으로써 하부로 고온이 유입되지 못한 결과로 판단된다. 도가니를 로 중앙에 배열했을 때는 3%로 처음의 균일배열과 비슷한 결과를 나타냈고, 양 측면으로 도가니를 분산 배열했을 때는 5%씩 차이가 났으며 이는 가장 온도차가 심한 경우로 상하의 순환류 형성에 가장 안 좋은 배열로 생각된다. 따라서 도가니의 위치를 바꾸는 것으로는 로내의 상하부 온도차를 줄일 수 없을 것으로 판단된다.

따라서 로내 운전압력에 변화를 시도하여 봤다. 현재 운전되고 있는 로내 압력이 10mmH₂O이므로 로내 압력을 20mmH₂O로 승압하여 운전했을 때의 온도분포를 측정하여 봤다. 결과에서 볼 수 있듯이 실험범위내의 로내압 증가폭에 따라서는 온도분포는 거의 무관한 것으로 나타났다.

따라서 도가니의 위치를 바꾸거나 로내압 승압을 통해서 버너가 상부로 위치됨에 따라 발생될 수 있는 로내 상하부 온도차를 해결할 수는 없는 것으로 판단되므로, 우선 축열버너를 설치하여 운전한 후, 로내의 상하부 온도차에 의한 문제가 발생하게 되면 하부에 보조버너를 설치하여 문제를 해결하기로 하였다.

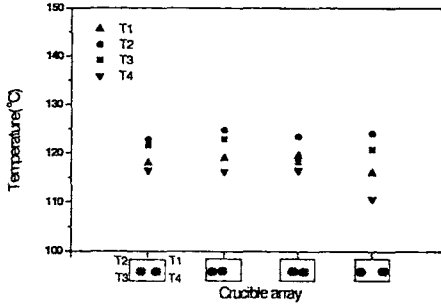


Fig. 2 Temperature distribution according to the crucible array

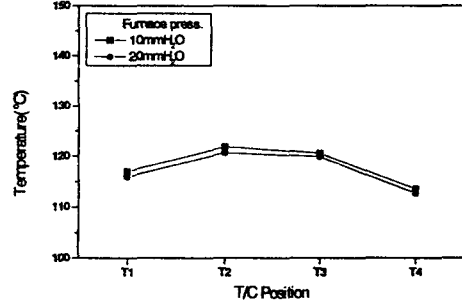


Fig. 3 The effect of furnace pressure on furnace temperature distribution

3.2 연소성능

축열버너 설치 가동 후에는 공연비 제한에 의한 CO 발생현상은 나타나지 않았다. 이는 고온공기 사용으로 공연비를 제한하여도 완전연소가 가능한 결과이다. 배가스온도는 축열체에서 폐열회수가 충분히 이루어져 200°C 이하를 유지하였다. 그러나 예열공기를 사용하는 축열연소의 특성상 thermal NOx 메커니즘에 기인한 NOx 발생이 증가하였다. 이는 본 축열버너가 향후 규제될 NOx 값을 감안할 때 해결해야 할 문제점이다. 지구 온난화 물질인 CO2는 탄소원자가 적은 천연가스가 상대적으로 적게 배출되었고 황산화물은 전혀 배출되지 않았다. 버너 1과 2의 측정된 공연비가 다르게 나타난 이유는 두 대의 버너의 공연비 제어 및 튜닝이 균일하게 이루어 지지 못한 결과로 판단된다. 로내 압력은 축열버너 사용으로 전체적으로 상승하였으며 지역적으로는 불균일하게 분포하였다. 즉 연소버너측에서는 60mmH2O로 상승하고 배기버너측은 10mmH2O로 나타났다. 위의 사진은 로내의 축열버너에서 안정적으로 형성된 천연가스화염이다.



이상의 결과에서 볼 때 로내부에서 배가스 농도와 압력의 불균일은 생산되는 산화철이 도가니 내부에서 발생되므로 본 로에서는 문제점으로 발생되지는 않았지만 가열체가 로 내부에서 노출된 상태라면 로내 불균일한 압력 및 농도 분포로 제품에 문제점이 발생할 수 있을 것으로 사료되므로 이러한 경우에 보다 구체적인 축열버너의 해석과 해결이 필요하겠다.

Table 2 Exhaust gas compositions of B-C and NG flame in the furnace

사용연료	배가스온도 (°C)	O2 (%)	CO (ppm)	NOx (ppm)	SO2 (ppm)	CO2 (%)
B-C	530	1.4~1.6	106~110	440~450	140	13.5
NG	Burner 1	95	4.2~4.3	2	-	8.9
	Burner 2	135	0.5~1.2	2	-	10.5

3.3 절환주기

축열버너에서 절환주기는 중요한 운전변수이다. 통상적으로 절환주기를 짧게 하면 열회수율은 향상되나 절환밸브 및 주변작동 기기의 내구성이 떨어지는 문제가 있으므로 이에 대한 적절한 선택이 요구된다. 따라서 본 사업에 적용된 축열버너 시스템의 적절한 절환주기를 결정하기 위해 절환주기에 따른 연소용 공기 및 배가스의 온도분포를 측정하였다.

Fig. 4는 절환주기에 따른 연소용 공기 및 배가스의 축열체 전후 온도경향이다. 절환주기 1분인 경우, 절환주기마다 배가스 및 연소용 공기의 온도역전현상이 나타났으며 배가스 및 공기의 고온부는 센서의 위치를 충분히 확보할 수가 없어서 실제값(약 1200℃)보다 훨씬 낮게 측정되었다. 배가스 성분분석에서도 알 수 있었듯이 두 대의 버너 공연비가 정확히 일치하지 않는 관계로 공기 및 배가스 온도의 절대값이 정확히 일치하지 않고 있는 것을 볼 수 있었다. 고온부의 온도상승시(배기모드) 로내의 고온에 의한 즉각적인 온도상승이 느리게 일어나고 있는데 이는 센서설치공간 확보문제로 인해 온도계가 축열체 중간에 설치된 결과이다. 실제 고온부의 온도상승경향은 훨씬 점근적인 경향을 나타내게 된다.

절환주기가 2분, 3분으로 길어 질수록 두 버너의 공기비 차이에 의한 온도차가 좁혀지는 경향을 나타내고 있다. 절환주기가 3분이 되면 이러한 온도차는 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 절환주기가 길어질수록 고온부의 최저온도는 감소하고 배가스온도는 증가하는 경향을 나타내 폐열회수율은 떨어지는 것을 알 수 있다. 이때 증가한 배가스온도는 절환주기 1분대비 약 20℃정도이며, 열효율로 환산시 1% 정도의 상승분이므로 절환주기를 1분으로 설정함으로써 얻는 이점은 미비하다고 할 수 있겠다.

따라서 절환밸브의 내구성과 시스템의 안전성, 축열체가 ball type, 두 버너의 온도편차 등을 감안하여 폐열회수율이 다소 떨어지더라도 절환주기를 3분으로 설정하였다.

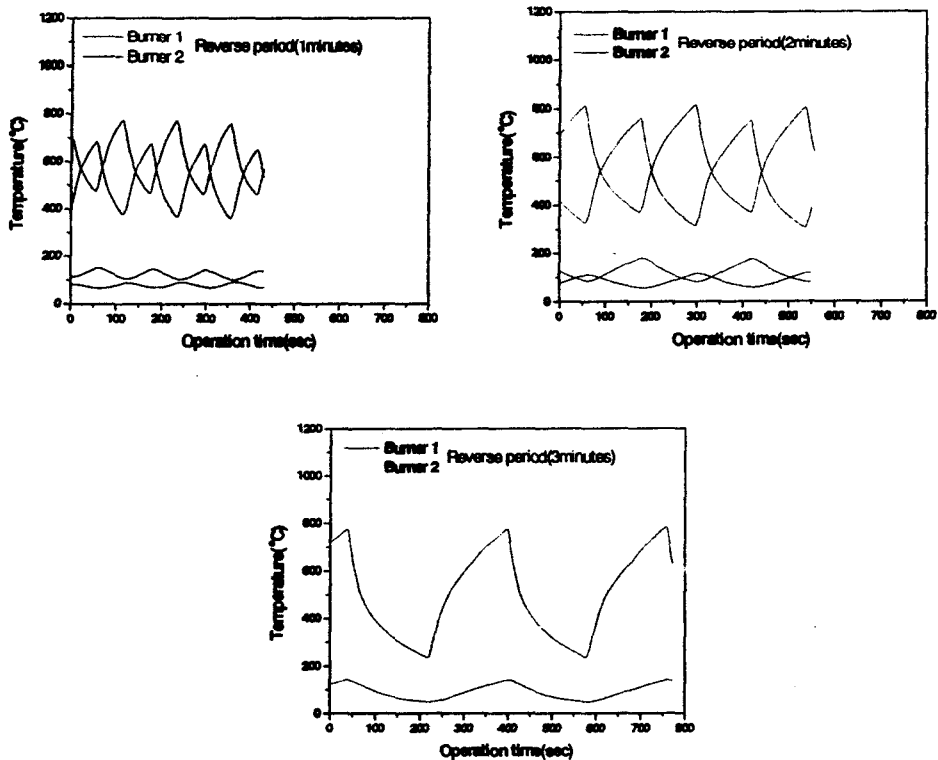


Fig. 4 Air and exhaust gas temperature profile according to operation time

3.4 열정산

연료전환 전후에 따른 산화로의 열정산을 비교해 보기 위해 연료사용량과 생산량 데이터를 수집하여 분석하였고 table 3에 정리하였다.

Table 3 The comparison of manufacturing datum of B-C and NG fuel

사용연료	생산량	작업일수	연료사용량		Kcal/ton	비고
			Nm3, l	Nm3, l /ton		
NG	1,682,765	128	153,597	91.3	958,650	33% 절감
B-C	1,032,220	73	148,124	143.5	1,435,000	

수집된 데이터로부터 알 수 있듯이 축열식버너를 적용하여 기존 B-C 사용대비 단위생산량당 투입에너지는 33% 절감을 이룩하였다. 이 기본데이터인 단위생산량당 투입에너지(kcal/ton)를 입열로 결정하였고 흡수열은 가열물인 용융아연이 증발할 때까지 흡수한 열량(420 → 907 °C, Cm)으로 정의하였고 배가스손실열은 측정된 배가스성분분석과 온도를 통해 계산하였다. 이에 대한 결과가 table 4에 정리되었다. 로내부로 투입된 입열을 감소시켜로의 효율이 33%에서 50%로 향상된 것을 알 수 있었다.

Table 4 The comparison of heat balance of B-C and NG fuel

항목	B-C		NG		비고
	kcal/ton		kcal/ton		
입열	1,435,000		958,650		33% 절감
흡수열	475,470	33%	475,470	50%	
배가스손실열	280,399	20%	41,176	4%	
기타손실열	679,131	47%	442,004	46%	

4. 결론

- 1) 로내의 균일한 온도분포를 위해서는 화실의 구조와 화염의 적절한 matching이 중요하며
- 2) 축열식 버너를 적용하여 안정적 화염의 형성을 확보하였고, 33% 에너지 절감으로 경제성을 확보하였고 로 효율을 33%에서 50%로 증가시킬 수 있었다.
- 3) 축열버너의 투자회수기간을 단축하기 위해서는 축열연소시스템의 효율향상 필요하며, 이는 honeycomb 축열계의 적용과 작동밸브 성능향상을 통해 절환주기(reverse period)를 1분이내로 단축하여 이룩할 수 있겠다.
- 4) 질소산화물(NOx)의 증가로 저 NOx 축열식 버너의 개발이 필요겠다.

참고문헌

1. Alexis G. Pincus, Melting Furnace Design in the Glass Industry, Books for Industry (1976).
2. Stephen R. Turns, An Introduction to Combustion, McGraw-Hill (1996).
3. 가스사용설비의 운전 최적화방안 연구, 한국가스공사 연구개발원, (2001).