

세라믹 열교환기의 시범화 사업
홍기석, 우상국, 한인섭, 서두원, 이시우, 유지행
한국에너지기술연구원 에너지재료연구센터

A Demonstration Project of Ceramic Heat Exchanger
K.S. Hong, S.K. Woo, I.S. Han, D.W. Seo, S. Lee, J.H. Yu
Energy Materials Research Center, Korea Institute of Energy Research

1. 서 론

우리나라의 2004년 에너지통계를 살펴보면 에너지 국외 의존도 97.3%, 석유수입증가율 1위, 석유수입 세계 3위(약 300억달러)에 있었고, 국제유가의 경우 2004년 33.64 달러에서 2005년 49.37 달러, 2006년 평균 58.69 달러로서 작년보다 18.9% 상승하였으나 4월 현재의 경우 72달러(브렌트유가)에 달하는 등 상승을 계속하고 있다.

따라서 우리나라의 경우 석유수입금액이 가중되어 각종 산업 생산활동에 큰 장애가 될 것으로 우려되고 있으며, 특히 석유수입량의 50.9%에 달하는 산업분야의 경우 에너지 다소비업종인 제철·제강분야, 요업분야, 화학공업분야 및 금속 분야의 경우 고온폐열을 회수하지 않고 그대로 버림으로써 제품가격의 상승, 국제경쟁력의 약화 및 에너지낭비를 초래할 수가 있다.

따라서 각종 에너지사용 기기의 효율을 높이거나 고성능 제어장치를 개발하는 등의 간접적인 방법을 연구하는 동시에 현재 다량으로 배출되고 있는 여러 가지 폐열을 유용한 이용 방법을 다각적으로 개발하여 에너지의 효율적인 이용과 에너지절약을 도모하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

이러한 에너지절약을 위한 열회수 장치로는 폐열보일러, 열교환기, 소재의 예열 등이 있는데 그 중에서 버너에 예열공기를 공급시킴으로써 연소공기의 온도를 증가시켜 연료절감을 가져오는 열교환기에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 그러나 현재 사용되고 있는 금속재 열교환기의 경우 800℃ 이상의 고온에서는 산화, 부식, creep 현상과 화학반응에 의한 침식 작용을 일으켜 사용에 한계가 있다.

이에 반하여 세라믹 열교환기는 산화, 부식, creep현상에 강하고 1400℃까지의 폐열에 사용할 수 있으므로 금속재 열교환기에 비하여 20~25% 정도의 추가 에너지절약이 가능함과 아울러 금속재 열교환기 보다 사용수명이 3배 정도 길고 경제성도 상당히 높으므로 이의 개발이 시급하다고 할 수 있어 당연구원에서는 세라믹 열교환기에 필요한 세라믹 전열관 및 세라믹 부품을 국산화함과 동시에 세라믹 열교환기를 제작하여 알루미늄 용해로에 적용하는 “국산 세라믹 전열관 및 부품을 이용한 세라믹 열교환기 시범화 사업”을 수행하였으며, 이를 간단히 설명하면 다음과 같다.

2. 세라믹 열교환기의 제작 및 설치

2-1. 세라믹 열교환기 설치로의 현황

시범적용업체로 선정된 A업체는 15ton/ch 원통형의 알루미늄 용해로(tilting로 형식) 2대(1, 2호기)와 18ton/ch(3호기) 알루미늄 용해로(tilting로 형식)를 보유하고 있다. 이 사업이 실행되기 전에는 생산성이 좋은 15ton/ch 용해로 2대를 사용하고 있었고, 큰 용량의 알루

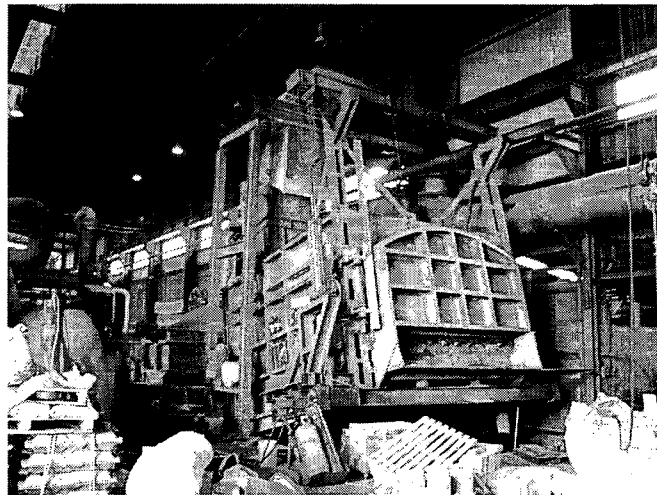
미늄 용해로 3호기(18ton/ch)는 열효율이 떨어지고 폐열회수시스템이 되어 있지 않았으므로 본 시범화사업의 시범대상로 적용로 선정하였다.

시범대상로로 선정된 3호기는 1, 2호기와는 다른 박스형 tilting로이며, 1, 2호기와는 달리 폐열회수 장치인 원통형 열교환기도 설치되어 있지 않고, 배기가스가 높아(1000~1100℃)용해로 열효율이 낮아 사용하지 않았으나 생산량증가에 따라 사용이 불가피하므로 세라믹 열교환기설치를 통하여 경제성을 확보토록 할 예정이다.

[그림 1]과 같은 알루미늄 용해로 3호기는 가동일수는 많지 않지만 시험가동과 부족한 생산량을 맞추기 위하여 몇 번 가동한 적이 있다. <표 1>은 부족한 생산량을 맞추기 위하여 2005년 5월과 6월에 3호기를 가동한 실적을 나타낸 것으로서, 3호기의 원단위가 43.92 원/kg 로 나타나 1, 2호기의 평균값인 29.62 원/kg에 비하여 약 1.48배의 원단위를 나타내고 있었다.

<표 1> 적용업체의 연료사용량 및 생산량 (3호기)

월	생산량 (kg)	연료사용량 (kg)	제품 ton당 연료사용량 (kg/ton)	연료사용금액 (원)	원단위 (원/kg)
5	88,120	7,210	81.63	4,042,953	45.88
6	731,348	54,727	74.83	30,687,217	41.96
합 계	790,744	61,937		34,730,170	
월평균	395,372	30,969	78.33	5,788,362	43.92



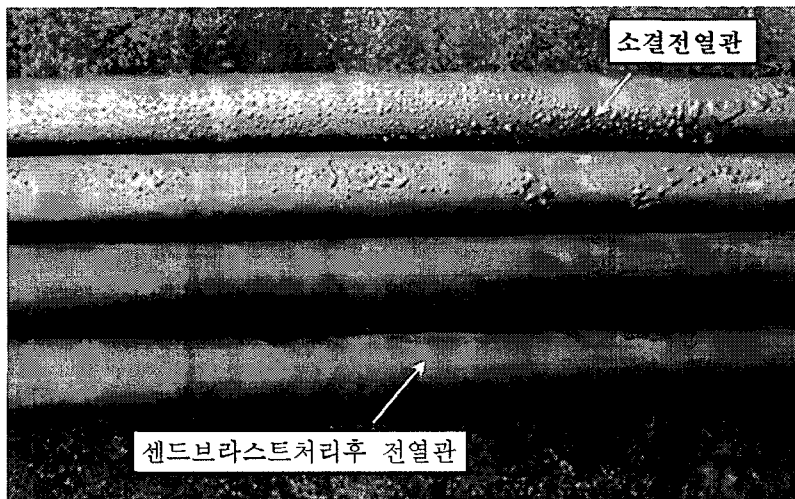
[그림 1] 시범적용 알루미늄 용해로 (3호기)의 tilting 모습

2-2. 세라믹 열교환기의 제작

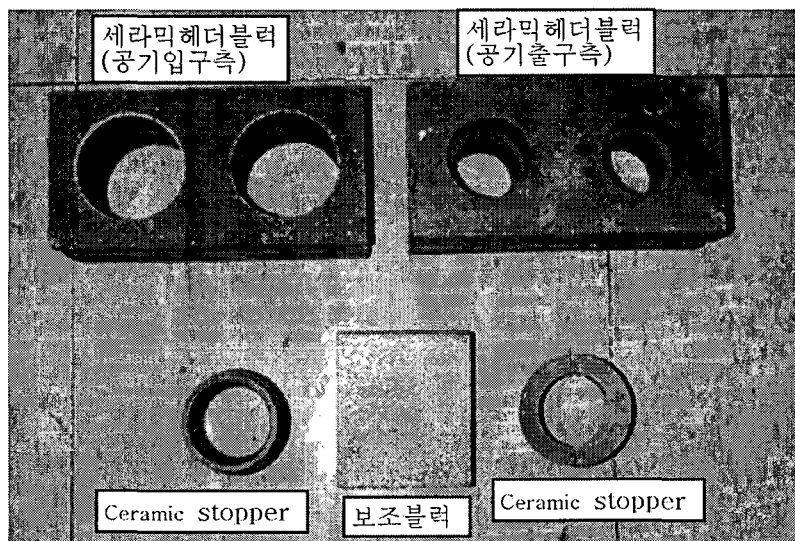
산업용 요·로의 고온폐열회수를 위한 tube type 세라믹 열교환기의 설계방법은 크게 tube-in-shell, tube-in-tube 방식으로 구분할 수 있으나 tube-in-tube 방식의 경우 이중의

세라믹 전열관을 사용함으로써 열교환기의 제작원가가 높아지고, 조립과정이 복잡하여 조립 시 파손이 쉽다는 단점이 있으므로 본 과제에서는 tube-in-shell 방식을 채택하였다.

tube-in-shell 방식에 있어서도 직관을 그대로 사용하는 방법과 직관 내외부에 핀을 부착하는 방법, U자관을 사용하는 방법 등이 있으나, 제작코스트, compact성, 신뢰성, maintenance성 등을 종합적으로 분석하여 보면 직관을 그대로 사용하는 것이 우수하므로 이를 선정하였으며, 연소배가스의 배출은 1-pass방식을 연소용 공기의 예열방식은 2-pass방식을 채택하였고, 세라믹전열관은 [그림 2]와 같은 길이 1.2m, 전열관의 외경 40mm, 내경 30mm로 하였다. 특히 세라믹 열교환기의 경우, 금속재 열교환기와는 달리 용접이라든가 환관 등의 기계적 접합이 불가능하므로 [그림 3]과 같은 세라믹 헤더 블럭과 세라믹 스톱퍼를 사용하였고, 세라믹 헤더 블럭의 경우, 블럭의 중앙에 요철(凹凸)을 주어 적층 및 조립이 쉽도록 하고, 이를 근간으로 하여 시범적용 알미늄 용해로에 설치될 세라믹 열교환기를 설계·제작하였다.



[그림 2] 세라믹 전열관의 후처리 전후의 모습

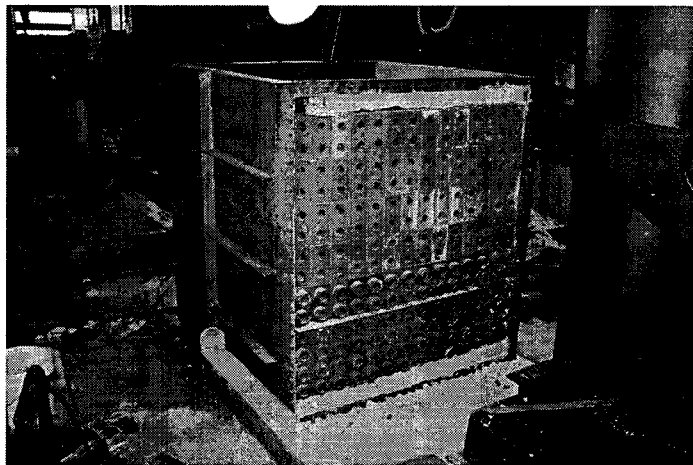


[그림 3] 세라믹 열교환기 조립을 위한 세라믹 부품

<표 2>는 제작될 세라믹 열교환기의 기본 설계방식을 나타낸 것이며, 이외에 공기누설을 최대한 방지할 수 있고, 전열관의 열팽창에 대비하는 구조, 전열관의 파손 시 교환이 가능한 구조, 배기가스 중에 포함된 soot 및 분진과 알루미늄 용해 시 배출되는 비산 알루미늄 등의 이물질을 제거할 수 있는 구조로 설계하였으며, [그림 4]는 세라믹 열교환기를 제작하는 과정을 나타낸 것이다.

< 표 2 > 세라믹 열교환기의 설계방식 및 사용전열관의 치수

열교환기 설계방식			사용 전열관 (국산 SiC전열관 : 40mmOD×30mmID)			
열교환 방식	배가스 pass방식	공기 pass방식	전열면적 (m ²)	전열관 수 (개)	전열관 길이 (m)	전열관 두께 (mm)
대류 (직교류)	1	2	28.3	196	1.2	5



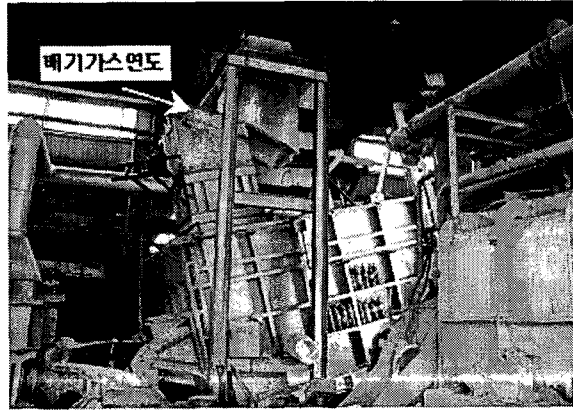
[그림 4] 세라믹 열교환기의 제작
(헤더 블럭 및 전열관 설치가 완료된 상태)

2-3. 세라믹 열교환기의 설치

세라믹 열교환기가 설치될 시범적용로(18ton/ch)는 알루미늄을 용해한 후 로체를 [그림 5]와 같이 tilting시켜 용해된 용탕을 합금로로 흘러보내는 구조로 되어 있으며, 이러한 구조는 연도가 tilting 시 로체와 분리되어 열교환기를 설치하기는 곤란한 구조이다. 즉 세라믹 열교환기를 기존의 연도에 설치할 경우 열교환기 무게에 의하여 용해로의 tilting 시 많은 기계적 무리가 따르고, 배기가스 배관이나 공기배관이 곤란하여 열교환기를 설치할 수 없는 구조이다.

따라서 열교환기를 설치하기 위하여는 로의 구조개선이 선행되어야 하므로 로 상부의 연도를 폐쇄하고 로의 측면에 연도를 [그림 6]과 설치하여 열교환기를 설치하기로 하였으며, 알루미늄 용해로의 tilting을 부드럽게 하기 위하여 [그림 7]과 같은 스위밍 밸브를 설치하였다. 스위밍 밸브의 설치가 끝난 후 연도를 확장하여 세라믹 열교환기를 설치하였으며, [그림

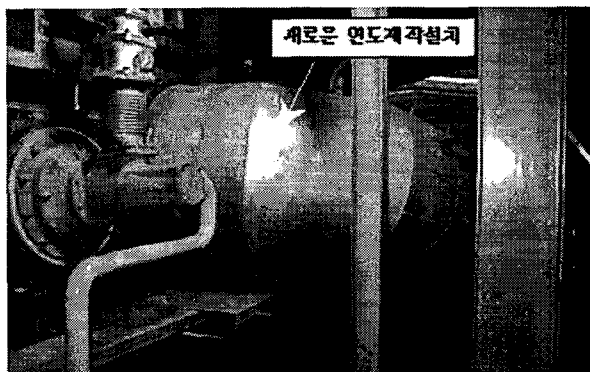
8]은 열교환기의 설치가 완료된 후의 모습을 나타낸 것이다.



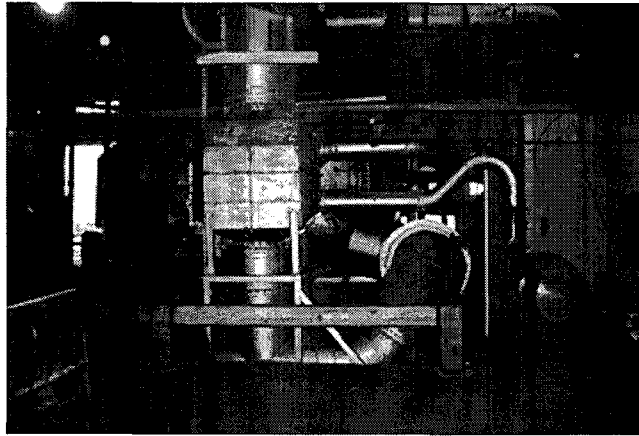
[그림 5] 세라믹 열교환기 설치로의 연도



[그림 6] 알루미늄 용해로의 연도개조 부위



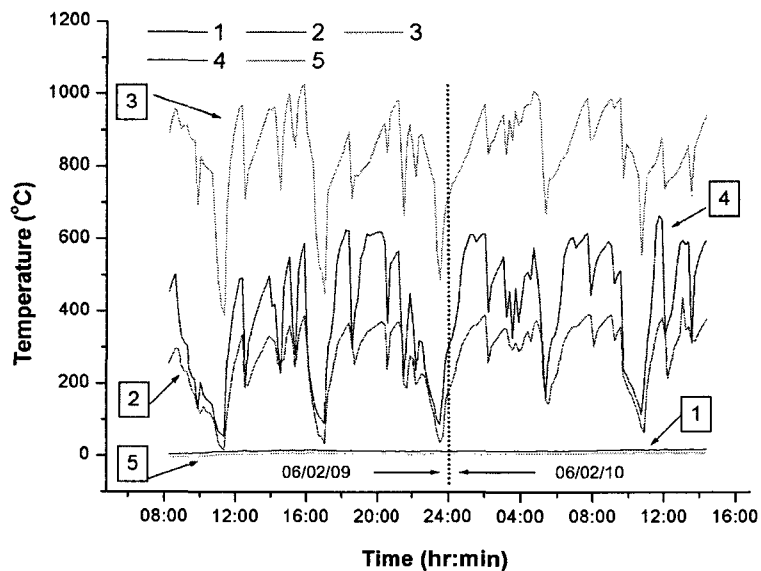
[그림 7] 새로운 연도의 제작 및 스위밍밸브 설치



[그림 8] 열교환기 및 부대설비 설치 후의 모습

3. 세라믹 열교환기의 성능실험

일반적으로 열교환기를 설치하여 예열공기를 연소용 공기로 사용하면 연소온도가 높아지기 때문에 연소효율이 좋아져 불완전연소가 적어지고, 그을음 발생도 감소함으로써 로의 전반적인 효율이 증대한다. 그러나 열교환기가 설치되기 전과 비교하여 연소용공기온도, 배관의 압력손실, 공기의 유속 및 유량 등에 차이가 있으므로 사전에 열풍 버너 및 부속장비의 교체, 버너의 가스량 조절, 송풍기의 댐퍼 조정 및 연도의 댐퍼 조정 등을 통하여 연소상태를 최적의 상태로 만드는 것이 필요하고, 성능실험을 위하여 공기입·출구, 배기가스 입·출구에 열전대를 설치할 수 있는 구멍을 뚫어 필요 시 온도와 배기가스분석이 가능하게 하여야 한다. [그림 9]는 성능실험에서 나타난 배기가스 입·출구의 온도와 예열공기 온도를 나타낸 것이다.



[그림 9] 세라믹 열교환기의 성능실험 결과

1. 열교환기 입구측 공기온도 2. 예열공기 온도 3. 열교환기 입구측 배기가스 온도

4. 열교환기 입구측 배기가스 온도 5. 외기 온도

열성능 실험 결과, [그림 9]에서 보는 바와 같이 열교환기 입구의 배기가스 온도가 가장 높은 950~1000℃ 사이에서 예열공기 온도는 380~400℃ 정도를 나타낸 반면 열교환기 출구측의 배기가스 온도는 600~620℃를 나타내는 현상이 일어나 정상적인 열교환기 작동이 일어나는 것이 발견되었으며, 이때의 생산량과 LPG가스 생산량의 변화는 <표 3>과 같다.

이와 함께 하루 용해회수 5ch과 용해시간이 2004년의 4.8시간으로 회수와 용해시간이 열교환기 설치전과 근접하는 바람직한 현상이 일어났으나 1, 2호기 용해로와는 차이가 있어 이것은 용해로의 형식과 크기에 따른 것이 아닌가 생각된다. 연료사용량의 경우 <표 4>에서 보는 바와 같이 열교환기를 설치하기 전보다 17.2kg(연료)/ton 낮아져 23%의 에너지 절감이 일어났다.

<표 3> 성능실험 시의 에너지 사용량 및 Ton당 에너지 사용량

실험일시	주조량 (kg)	에너지 사용량 (LPG : kg)	Ton당 에너지 사용량 (kg/ton)
2006. 2.7	11,318	1,590	140.46
2.7	11,142	924	82.91
2.7	11,054	516	46.68
2.8	11,265	732	65.00
2.8	11,247	484	43.04
2.8	10,935	776	71.00
2.8	11,195	713	63.65
2.8	15,710	799	50.83
2.9	16,292	830	50.97
2.9	12,561	789	62.79
2.9	14,713	806	54.77
2.9	14,214	779	54.80
2.10	15,433	764	49.51
2.10	15,794	808	51.18
2.10	13,826	963	69.66
전체합계	196,699	12,273	62.39
첫째 차지 제외 합계 및 평균	185,381	10,683	57.63

<표 4> 열성능 실험 결과

용해시간(hr)		원단위(kg/ton)		에너지 절감율 (%)
열교환기 설치 전	열교환기 설치 후	열교환기 설치 전	열교환기 설치 후	
4.5~5.0	4.5~5.0	74.83	57.63	23

4. 결 론

시범적용로에 세라믹 열교환기 설치하여 23%의 연료절감이 가능하였다. 이는 적용기업체에서 계획 중인 18,000ton/년으로 하여 연료절감 비용을 계산하여 본 결과 <표 5>에서 보는 바와 같이 연간 약 2억원의 연료비 차액이 발생하여 투자회수 기간은 약 0.39년 (세라믹 열교환기 제작비용 7800만원 가정)으로 나타나 경제성이 상당히 우수한 것으로 나타났다.

따라서 기술이전업체를 통한 세라믹 전열관 및 부품의 가격을 낮출 경우, 그 경제성은 더욱 높아질 것으로 생각되며, 알루미늄 용해로와 동용해로와 같이 부식성 가스를 배출하거나, 800℃ 이상의 고온 폐열을 배출하는 제철·제강로 및 열처리로 등에 세라믹 열교환기를 사용할 경우 그 효과는 더욱 증대할 수 있을 것으로 생각된다.

<표 5> 열교환기 설치 전·후의 연료사용 금액

구 분	생산 계획량 (ton/년)	생산 원단위 (kg(가스)/ton)	LPG 가스 가격 (원/kg)	총 연료사용 금액 (원/년)
열교환기 설치 전	18,000	74.83	677.27원	912,242,053.8
열교환기 설치 후	18,000	57.63	677.27원	702,559,261.8
차액 (원)	-	-	-	209,682,792.0