

세라믹스의 축열연소시스템 응용

한동빈* · 박병학 · 김영우 · 배원수
포항산업과학연구원 소재/공정 연구센터
(1998년 12월 24일 접수)

Ceramic Application for Regenerative Burner System

Dong Bin Han*, Byung Hark Park, Young Woo Kim and Weon Soo Bae
Center for Materials and Processing, RIST, Pohang 790-390, Korea
(Received December 24, 1998)

초 록

최근 에너지 절약을 위하여 기존 버너를 개선시킨 축열식 연소시스템이 개발되어 실용화되고 있는데, 기존버너에 비하여 소형으로 높은 열효율, 저 유해가스방출 및 로내 균일 온도분포의 장점을 지니고 있다. 이 시스템의 중요구성부품중 하나인 축열체는 저비중, 고 표면적 및 높은 비열의 특성을 지녀야 하며 고온에서의 우수한 기계적, 열적 특성 및 화학적 안정성을 지닌 세라믹스가 가장 적합한 소재로 판단된다. 본 연구내용에서는 알루미나 볼, 튜브, Foam 및 상용 Honeycomb등의 축열체를 이용하여 실험후 그 효율을 알아 보았으며 본 연구 논문은 세라믹스의 또 다른 고온용 구조재료로서의 응용을 소개하는데 그 목적이 있다.

ABSTRACT

Recently, regenerative burner system was developed and begins to be gradually used for better energy savings. Compared to conventional burner system, the regenerative one has the several merits such as higher fuel efficiency, light weight of apparatus, low harmful toxic gas and homogeneous heating zone, etc. The regenerative material, a very important component of the new regenerative burner system should possess the properties of low specific density, higher surface area and high specific heat capacity. Ceramics is the best regenerative material because of stable mechanical properties even at high temperature and better thermal properties and excellent chemical stability. In this study, alumina ball, alumina tube, 3-D ceramic foam and honeycomb as regenerative materials were tested and evaluated. The computer simulation was conducted and compared to the result of field test. This paper is aimed to introduce a new application of ceramics at high temperature.

Key words : Regenerative ceramics, Energy saving, Thermal Properties, Efficiency

1. 서 론

축열식 연소 시스템은 일부 선진국에서 개발 후 실용화한 최신 연소 기술로서 균일한 기존 버너에 비하여 가열로의 균일한 온도분포, 배출 유해가스 저하, 고 열효율을 특징으로 하며 특히 설비의 소형화 및 경량화등의 장점도 갖고 있다. 축열연소시스템의 구성은 Fig. 1-A와 같으며, 작동원리는 상/하부 연소시스템이 일정 주기로 교대 작동하게 된다.

축열 연소 시스템은 두 개의 버너가 한조로 구성되어 한쪽의 버너가 연소하면 반대쪽 버너는 고온의 연소가스를 축열체를 통하여 축열후 배기하며 이같은 반복 작동은 고속 절환밸브에 의하여 20-60초 정도 시간차로 이루어진다. 연소공기가 버너에 공급시 축열체로 부터 고온의

열을 회수함으로써 높은 폐열을 이용할 수 있는 초 고온 연소기술이며 연료원단위 30%절감, 질소산화물 100 ppm 이하, 이산화탄소 30%저하 등의 효과를 기대할 수 있다.

이 연소시스템의 기능을 극대화하기 위하여는 주요구성부품[Fig. 1-B]인 축열체의 바른 선택이 필수적이며 선택된 축열체는 축열, 보열, 방열 기능을 파손없이 고온에서 장기간 수행할 특성을 지니고 있어야 한다. 즉, 축열체는 기존연소시스템의 열교환장치에 해당한다고 볼 수 있다.

축열체는 축열 및 방열기능을 최대화하면서 연소시스템 가동중 고온에서의 내열충격성 및 화학적 안정성을 유지해야 한다. 또한 열전달 특성이 우수하고 비열 값도 큰 것이 바람직하다. 버너작동시 발생하는 열을 축열체간에 신속히 흡수하고 재가동 초기 방열함으로써 유입된 연소

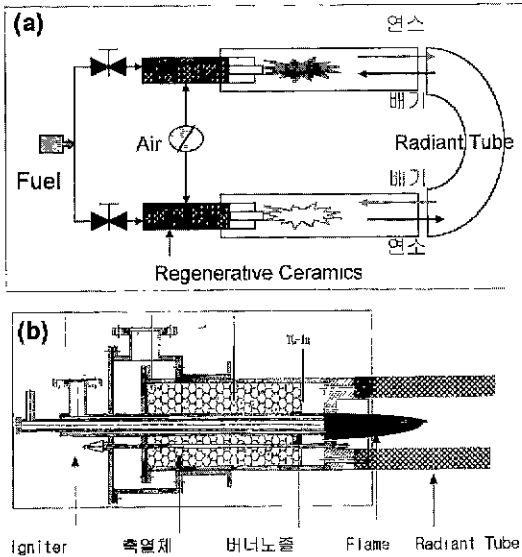


Fig. 1. Regenerative burner system.

공기 예열을 촉진시켜야 하는 기능을 지닌다. 고온에서 장시간 사용하는 부품으로서 기계적 특성 또한 우수해야 한다.

소재에는 금속이나 세라믹스의 두 물질체가 있으나 축열체로 세라믹스가 가장 적합하다. 금속 재질 경우 제조가 용이하고 취급시 파손의 부담이 없고 가격적인 측면 [재활용 기능]에서 장점은 있으나, 연소 시스템의 고온 조업온도를 고려할 때 금속은 용점이 낮아 사용온도에 제한을 받으며 내산화성 및 내식성이 우수하지 못하다. 반면 세라믹은 취성의 단점이 있으나, 고온에서 장시간 사용할 때에도 기계적 특성 [인성, 강도, 경도]의 변화가 거의 없으며 화학적으로도 매우 안정하다. 특히 고온에서 금속은 열간 변형이 시간이 경과함에 증대되어 장시간 사용시 축열체 용기의 파손은 물론 연소시스템의 훼손이 야기될 수 있으나 세라믹스를 축열체로 사용할 때 이런 점은 극복될 수 있다.¹²⁾

기본적 특성 이외에 축열, 보열, 방열의 반복 기능을 원활히 수행하기 위해서 축열체의 형상 또한 중요한 사항이다. 더운공기[Hot air]와의 접촉 시간 및 접촉 면적, 보열을 위한 축열체 체적을 최대화 해야 하는 점 이외에 압력문제가 생기지 않는 구조를 지녀야 한다. 따라서 Ball이나 3차원 random 구조형의 foam, tube bundle 또는 honeycomb 구조가 바람직하다.

그러나 현재까지 축열체에 대한 구체적인 연구가 되어 있지 않으며 연소시스템에 따라 축열체의 선택도 변해야 하는데, 현재로는 Ball과 Honeycomb의 형상이 가장 많이 이용되고 있으며 화학적인 측면에서는 Al₂O₃[알루미나]

및 Cordierite[2MgO 2Al₂O₃ 5SiO₂]가 이용되고 있다. 그러나 Honeycomb 경우는 고온 기계적 특성이 나빠 장시간 사용할 때 부서지는 경우가 많이 발생하고 있으며 제작 사양의 제한으로 그 활용성이 낮다. 따라서 세라믹스의 새로운 분야 활용차원에서 체계적인 연구가 필요하다.³⁻⁸⁾

2. 실험방법

2.1. 축열체 형상의 이론분석

외국에서 개발된 ball형[직경 35 mm이상]을 기본으로 연소시스템에 적합한 ball크기와 형상에 대하여 computer simulation을 수행하였다. 축열체가 들어가는 축열체 용기가 직경 5-6 mm의 구멍을 갖는 방사구조로서 되어 있기에 ball의 크기를 직경 7.5 mm에서 35 mm로 정하고 기존 외국사용중인 축열체가 효율이 낮은 점을 감안하여 축열체에 터널형의 구멍을 만들었다.

이론 분석의 조건은 축열체가 가동중에 약 800°C 부근의 온도에 노출되고 다시 상온의 연소공기가 유입됨을 감안하여 20°C까지의 냉각 조건으로 축열체내의 온도분포를 시간에 따라 알아보았다. 축열연소시스템의 조업주기는 20-60초내로 알려져 있으며 POSCO개발중인 연소시스템의 경우 30초가 절환 조업주기로 가장 적당한 것으로 실험결과 나타나 있다.

Fig. 2에 조업 조건과 축열체 ball의 크기 및 형상에 따른 이론적 해석 결과를 나타내었다. 직경 7.5 mm[Fig 2-a]경우 15초내 형상에 관계없이 축열 및 방열이 모두 이루어졌으며 직경 35 mm ball 경우[Fig 2-b] 내부에 hole이 5개 정도 있어도 조업주기 30초내에 완전한 축열과 방열이 이루어지지 않음을 알 수 있다. 내부에 hole을 주는 이유는 hot/cold air의 흐름을 원활히 하여, 축열체와 공기의 접촉 면적을 극대화시켜 효율을 높이는 목적 이외에 압력 손실 문제를 해결하고자 함이다. 본 연구의 주 관심 축열체인 직경 15 mm 경우[2-c]내부에 3 및 5개 hole 그리고 25 mm 경우[2-d] 내부에 5개 hole 갖는 ball이 30초 조업 주기에 가장 축열과 방열기능은 효율적으로 수행할 수 있는 축열형상임을 알 수 있다.

2.2. 축열소재

본 연구에서 채택한 축열체는 앞서도 이론분석결과를 토대로 직경 15 mm ball 및 tube형 세라믹 소결체[96%순도를 갖는 알루미나]를 제작하였고 Foam 및 Honeycomb은 상용품을 구입하여[Fig. 3] 축열체의 다양한 형상에 따른 시스템 효율을 관찰하였다.

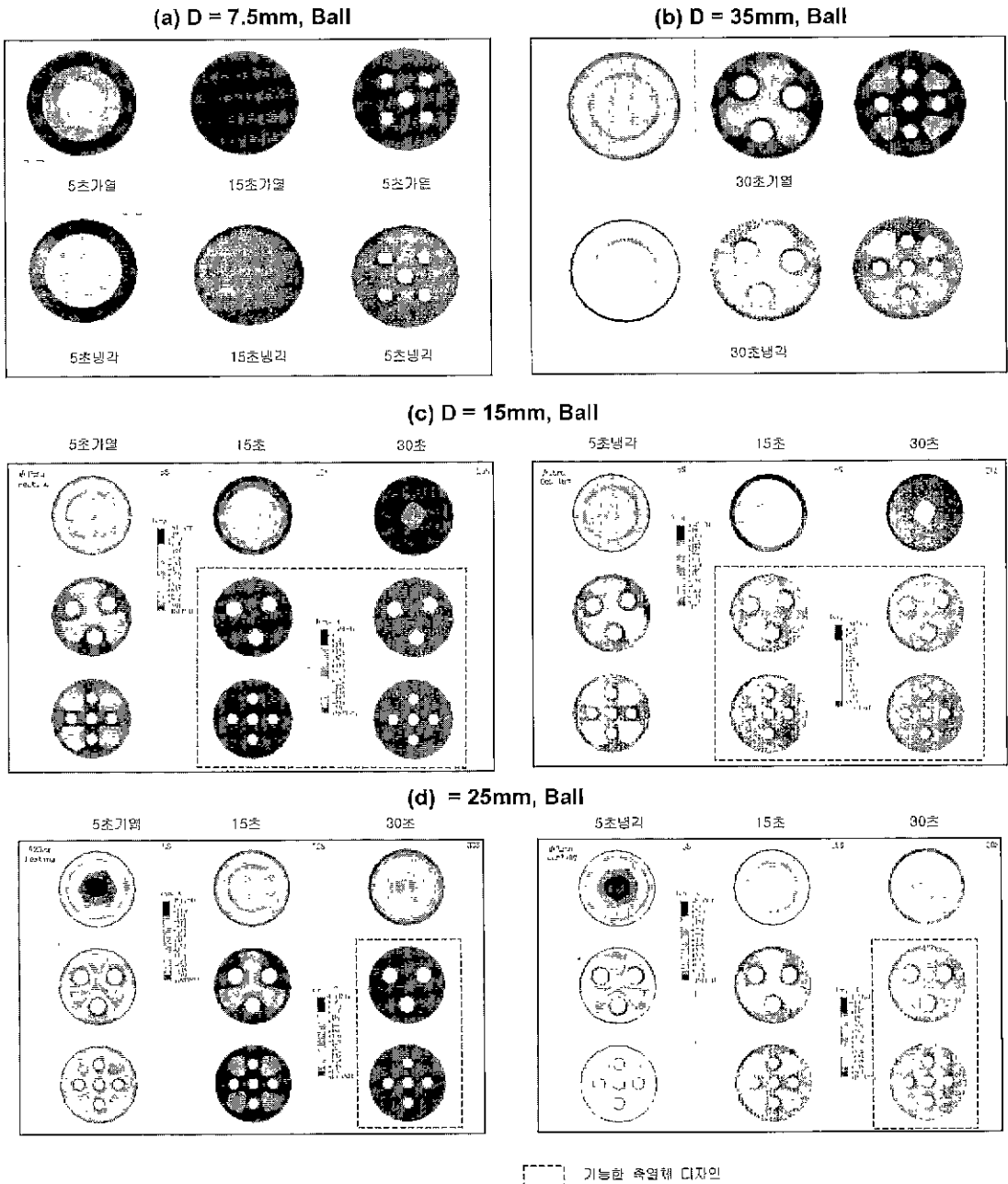


Fig. 2. Finite element analysis of thermal distribution.

2.3. 축열체의 실험방법

본 연구에서는 아직 이론적으로 정립되지 않은 축열체에 대하여 축열시스템과의 상호 관계를 규명하고자 현장의 실로[현재 개발중]가 아닌 축열체 성능만을 평가할 수 있는 설비를 Fig. 4과 같이 1개의 버너를 이용하여 제작하였다

축열체 용기의 내부크기는 200W×200L×300H[mm]이며 배가스온도는 800°C를 유지하도록 연소공기를 유입시켰다. 1개의 버너를 이용하여 축열공정시 열이 축열체 용기로 유입되게 하였고 30초후 냉각작업은 축열용기하단에 설치된 튜브를 이용하여 대기중으로 열을 방열시킴으로 조업 조건을 시뮬레이션하였다. 온도측정은 축열체 용

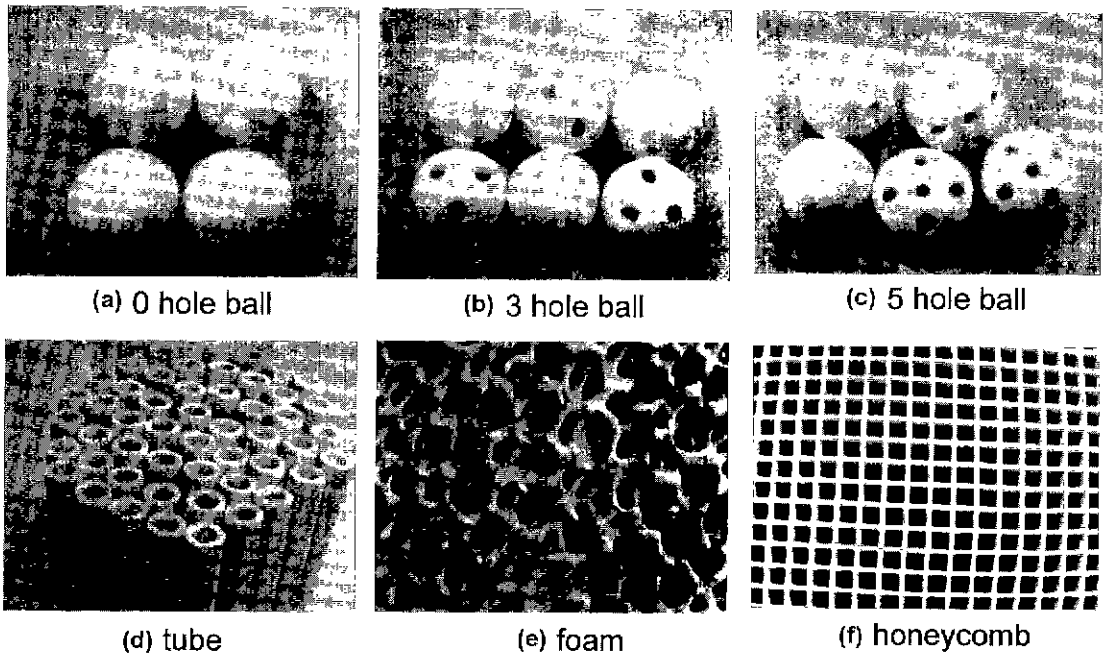


Fig. 3. Regenerative materials used in this study.

기의 하단, 중간, 상단 에서 이루어졌으며 측정된 온도는 효율평가에 이용하였고 효율평가에 이용된 공식은 아래와 같다.¹⁾

$$\text{예열공기현열 } [P] = [A_0 \times M \times C_p \times \Delta T] / [T_a - T_0] \quad (1)$$

$$\text{배가스현열 } [G] = [G_0 + A[M+1]] \times C_p \times [T_g - T_0] \quad (2)$$

$$\text{출구가스 현열 } [Q] = [G_0 + A[M+1]] \times C_p \times [T_r - T_0] \quad (3)$$

$$\text{연소효율 } [N]\% = \frac{\text{He} + P - G}{\text{He}} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{시스템 효율 } [Ns]\% = \frac{\text{He} + Q_f}{\text{He}} \times 100 \quad (5)$$

$$\text{배가스이용률 } [PB]\% = \frac{P}{G} \quad (6)$$

여기서 T_0 는 배가스온도, T_a : 예열공기온도, T_r : 출구온도이다. M 의 값은 1.12 [$110\text{Nm}^3/\text{h}$ 유입, 이론치 $M=1$], T_0 는 대기온도 [20°C], 발열량 H_c 는 COG 경우 $4400\text{Kcal}/\text{Nm}^3$ 으로 계산하였다. 여기서 A_0 는 $110\text{Nm}^3/\text{h}$ 이다.

[참고]

0°C 1기압에서 COG $1\text{Nm}^3/\text{h}$ 에 공기 $4.48\text{Nm}^3/\text{h}$ 배합비로 연소가스 $5.15\text{Nm}^3/\text{h}$ 가 반응 하고 나머지는 불완전 연소이다. 실험에서 $22\text{Nm}^3/\text{h} \times 4.48 = 98.6\text{Nm}^3/\text{h}$ 일때 $M=1$ 이다.

3. 실험결과

3.1. 축열체특성

본 연구에서 제작된 96% Al_2O_3 [Ball/Tube]의 특성치를 Table 1에 정리하였다. 축열체로서 경도 및 압축강도는 크게 문제가 되는 물성은 아니다. 열충격 실험결과와 ΔT 는 water-quenching에 의한 급냉실험으로 얻은 결과로서 실제로 축열체료를 연소 시스템에 장입, 조업시 Air에 의한 온도 변화보다도 열충격효과가 크다. 따라서 일반 조업시의 가열/냉각 온도차를 감안할 때 알루미늄은 열충격에 의한 파손은 발생하지 않을 것으로 판단되었고 실제 다수의 고온 반복실험에서 파손된 알루미늄 축열체는 발견되지 않았다. 열충격실험에 의한 강도 저하는 약 220°C 온도차에서 발생하였고 미세한 microcrack은 $\Delta T = 500^\circ\text{C}$ 부근에서 관찰되었다.

열팽창은 알루미늄이 다른 세라믹스에 비하여 다소 큰 편이나 사용온도가 1000°C 부근이고 가열공정후 냉각공정간의 조업주기가 60초 미만[20-60초]에 이루어지기 때문에 열팽창 특성분체도 크게 고려의 대상이 아니다. 축열체 역할을 극대화 시키기 위하여는 비열수치가 관건중 하나이다. 이는 소재자체의 대체 이외에는 수치적으로 크게 향상시킬 수 없는 사항이다. 개선이 요구되는 물성은 축열체 형성변형에 의하여 단점을 보완하는 것이 바람직하다.

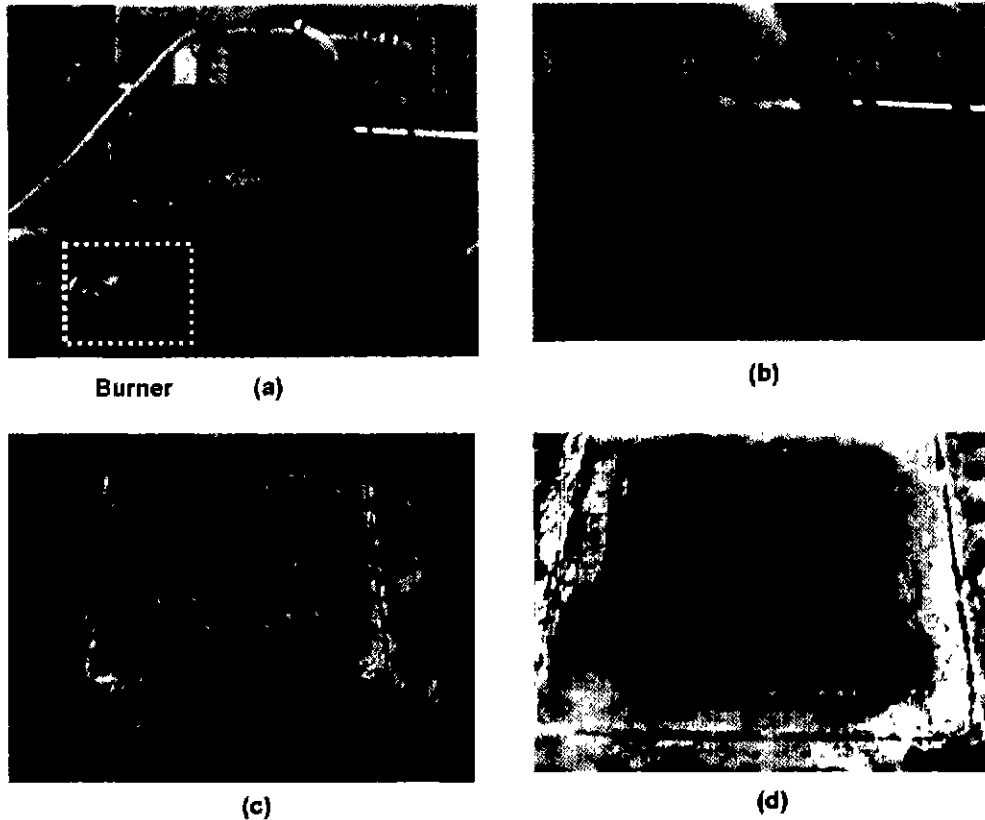


Fig. 4. Pretest device and regenerative ceramics.

Table 1. Properties of 96% Al₂O₃ used in This Study

Density g/cm ³	Strength MPa	Compressive strength MPa	Toughness MPa m ^{1/2}	Hardness GPa	Thermal conductivity cal/cm s °C	Thermal expansion coeff. 10 ⁻⁶ /°C	Specific heat cal/g °C	Thermal shock ΔT, °C
3.7	300	1900	2.3	16	0.08	8.2	0.2	220

Table 2. Regenerative Materials

(unit : mm)

	Ball 0	Ball 3	Ball 5	Tube 5/3	Tube 10/7	Tube 10/7
Size [mm]	D=15 No Hole	D _{ball} =15 D _{hole} =3 3 Hole	D _{ball} =15 D _{hole} =2 5 Hole	D _{out} =5 D _m =3 L=300	D _{out} =10 D _m =7 L=300	D _{out} =10 D _m =7 L=100
Unit volume[cm ³]	1.77	1.51	1.48	3.77	12.01	4.01
Unit surface area[cm ²]	7.06	10.06	12.20	75.61	160.94	54.2
Total volume[cm ³]	7788	6644	6512	5275	4804	4804
Total surface area[cm ²]	31064	44264	53680	121040	64406	65016

전체체적 및 표면적 : 축열체 용기내 투입된 축열체 전부

3.2. 실험결과

Fig. 4과 같이 제작된 실험로를 이용하여 축열체의 성능 평가를 하였으며 이때 사용된 축열체는 3종류 Ball,

2종류 Tube[D_{out/in}=10/7, 5/3 mm], Foam, Honeycomb의 단일형 이외에 Ball+Tube+Ball, Tube+Ball+Tube 혼합 형태로 축열 성능 실험을 수행하였다. 축열용기내 잠입된

Table 3. Results of Test and Efficiency Comparison

	Exhaust gas temp.[°C]	Preheat air temp.[°C]	Outlet temp.[°C]	P [Kcal]	G [Kcal]	Q [Kcal]	N [%]	N ₁ [%]	PB [%]
Ball 0 hole	806	729	413	18.7	23.5	11.9	94.9	87.8	79.4
Ball 3 hole	807	715	187	18.3	23.6	5.0	94.4	94.8	77.7
Ball 5 hole	803	740	283	19.0	23.5	7.9	95.4	91.8	80.9
Tube,L300 D=5/3	805	724	458	18.6	23.6	13.1	94.9	86.4	78.9
Tube,L300 D=10/7	809	732	261	18.8	23.7	7.2	95.0	92.5	79.4
Tube,L100 D=10/7	802	667	350	17.1	23.5	9.9	93.4	89.8	72.8
B-T-B [Ball/Tube/Ball]	820	732	265	18.8	24.0	7.4	94.6	92.4	78.3
T-B-T [Tube/Ball/Tube]	818	724	188	18.6	23.9	5.1	94.5	94.8	77.6
Foam	792	711	291	18.2	23.2	8.1	94.9	91.6	78.8
Honeycomb 100CPSI	802	744	333	19.1	23.5	9.4	95.5	90.3	81.5

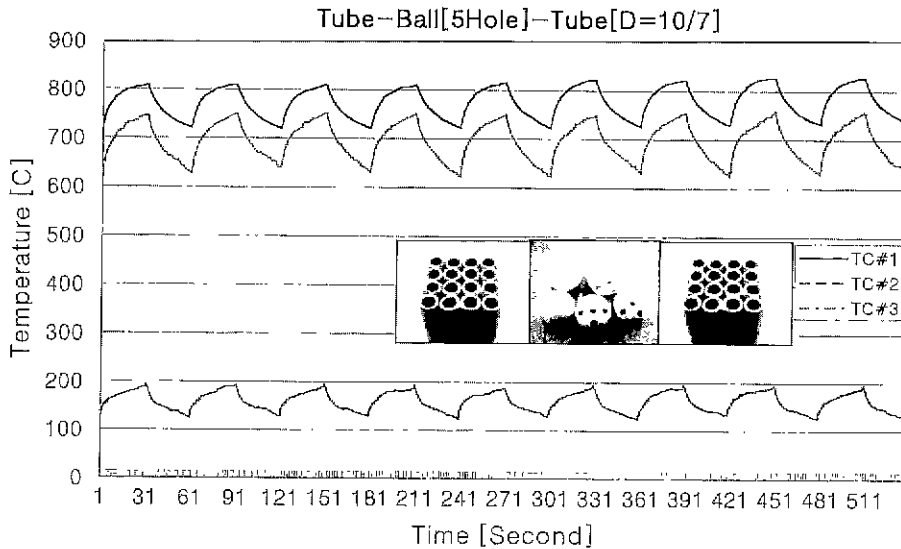


Fig. 5. Temperature measurement vs Time.

축열체는 Ball 경우 4400개정도, Tube 경우 $D_{out/in}=5/3$ mm가 1600개, $D_{out/in}=10/7$ mm가 400개 사용되었다. 축열체의 사양은 Table 2에 정리하였다.

Table 2의 적용 축열재료에 대하여 측정된 온도는 Fig. 5와 같은 graph로 나타내어졌으며 이 때 Thermocouple 1은 실험장치중 버너에서 축열체 용기의 하단부위 온도(버너배가스온도)를, TC # 2 축열체 중간부위, TC # 3은 열이 축열체를 통과하여 나가는 부위 온도를 측정하는 것이다. 실험은 가열 및 냉각을 각각 30초 주기로 수행하였다. 각 축열체의 실험결과중 측정온도, 현열, 효율 수식 [1-6]은 Table 3에 정리하였다.

실험에서는 배기가스온도를 가급적 800°C로 고정하기 위하여 필요 연소공기를 유입시켰으나 설비상의 문제로

다소 온도 편차를 보이고 있다. 각 경우에 대하여 현열 및 효율을 계산한 결과 연소 효율 측면에서 5 hole ball, Tube $D_{out/in}=10/7$, honeycomb의 축열체가 95%이상 효율을 나타내고 있어 일반적 효율 95% 수준보다 높게 나타났다. 그리고 중요한 배기가스효율은 5 hole ball과 honeycomb이 각 80.9%, 81.5%로 나타나 일반적 효율 80%를 만족하고 있다

시스템 효율 측면에서는 다소 상반된 결과를 보이거나 아직 설비 자체가 안정화 되어 있지 않고 계속 개선중이며 시스템 효율에 대한 계산은 현 단계에서 검증이 필요한 사항이다. 이런 설비상의 문제가 다른 효율에 영향을 미치는 것을 배제할 수는 없지만 축열연소시스템 효율에 대하여 선진국 사례에 배가스 및 연소효율에 대한 비교

가능한 수치[각각 80%,95%]가 있으나 시스템 효율은 현 단계에서 비교가 불가능하다. 측정된 온도에 많은 차이를 보이고 있으나 [특히 출구 온도], 효율면에서 미비한 차이로 보아 효율 계산에 대한 재검증도 필요할 것으로 보인다. 그러나 축열 연소시스템의 본 목적으로 볼 때 축열체의 성능을 배가스효율에 의하여 선정하는 것이 바람직하다고 보며 초기 언급한 바와 같이 본 연구 내용은 세라믹스의 고온에서의 적용 가능한 새로운 응용 분야를 소개함에 있기에 다소의 논란여지는 향후 정리될 것으로 기대된다.

축열체가 시스템내에서 배기가스 효율을 높이는 mechanism은 일반적으로 축열체 상호간의 열적 특성에 의한 축열 및 전도 현상과 축열체간을 hot air가 흐르면서 열을 전하는 대류현상으로 볼 수 있다. 5 hole ball 이 3종류의 ball중에서 우수한 결과를 보이는 것도 이런 두가지 현상이 적절히 조화를 이루어 발생할 수 있는 구조를 지닌 것으로 판단된다. Tube $D_{out/in}=10/7$ 축열체 결과는 전도현상보다는 hot air가 바로 축열체용기를 통과하여 배기가스로 나가면서 온도를 상승시키 것으로 보여 축열체로서 장기간 사용할 때 축열 및 방열의 기능을 원활히 수행할 것으로 보여지지 않는다. 5 hole ball 및 $D_{out/in}=10/7$ mm Tube를 이용하여 ball+tube+ball 및 tube+ball+tube의 혼합형 구조로 실험을 한 결과는 예상 외로 낮았다.

본 연구과제에서 축열체의 형상과 축열 성능간의 상호 관계를 규명하기 위하여 Table 2와 3에 나타난 것처럼 축열체 전체 체적 및 표면적 간의 관계를 비교하였으나 뚜렷한 경향을 찾지 못했다. 분명한 것은 축열체의 화학적 성분(즉, 축열체의 기계적/열적, 및 화학적 특성)은 소재의 내구성[수명]과 관련된 것으로 축열/보열/방열의 특성은 축열체의 형상과 관련이 있음을 알 수 있다. 이는 5 hole ball 축열체가 최소 체적 및 최대 표면적으로 높은 효율을 나타내고 있어 효율이 축열체 표면적[Total surface area]과 더 밀접한 관계가 있는 것을 증명하고 있다.

Honeycomb 및 ceramic foam경우도 높은 효율을 나타내고 있으나 수차례에 걸친 반복 실험 후 축열체가 파손되어 소재자체의 고온 기계적 특성을 개선하지 않는 한 현재 개발중인 축열식 연소시스템에 장기간 사용할

수 없는 것으로 판단된다.

4. 결 론

1) 96% 순도의 Al_2O_3 소결체도 기계적/열적 특성 평가 결과 축열체 사용 가능성이 입증되었으며 따라서 현재 선진국에서 사용중인 고가의 99.9% 순도 알루미늄 축열체를 대신할 수 있어 국산화를 통한 수입 대체 효과를 얻을 수 있다.

2) 알루미늄 불에 관한 축열체의 형상 이론 분석에 의하면 3개 및 5개의 hole을 갖는 직경 15 mm 알루미늄 ball, 그리고 5개 hole을 갖는 25 mm ball이 30초 조업 주기에 적합한 축열/방열기능을 갖는 것으로 판단되었다.

3) Ball, tube, ball과 tube의 혼합구조, foam 및 honeycomb등은 축열체 형상과 효율면에서 직접적인 관계를 나타내고 있지 않았으나 5 Hole Ball 및 Honeycomb이 배가스효율 80%이상, 연소효율 95% 이상을 보였다.

4) 향후 안정적인 축열식 연소시스템이 구성되면 축열체 형상과 연소시스템의 효율에 대한 규명 및 추가 연구가 필요할 것으로 고려된다.

REFERENCES

1. POSCO철비기술부 열기술팀, "축열연소시스템 국산화 개발 추진 계획서," 1-15 (1996).
2. 이홍립, "엔지니어링 세라믹스," pp 26-30, 반도출판사 (1990).
3. P.G. Klemens, "Thermal Conductivity," in Theory of Thermal Conductivity ed by R.P.Tye, pp1-68, Vol 1., Academic Press, London (1969)
4. G.W. Slack, "The Thermal Conductivity of Non-Metallic Crystals," Solid State Physics 34, 1-71 (1979).
5. A.D.Braultsford and K.G Major, "The Thermal Conductivity of Aggregates of Several Phases, Including Porous Materials," *Br J. Appl. Phys.*, (15), 313-319 (1964).
6. Ceramic Source '96 pp 334, American Ceramic Society (1996).
7. S.P. Parker[ed], "Heat Transfer," in McGraw-Hill Encyclopedia of Physics, pp422-430, McGraw-Hill Book Company (1983).