멀티버너 보일러용 열교환기 모듈 특성 시험 - 모듈 순서에 따른 특성결과

강 새 별†·김 종 진*·안 준*

Experimental Study on Thermal Characteristics of Heat Exchanger Modules for Multi Burner Boiler

Sae Byul Kang, Jong Jin Kim, Joon Ahn

Key Words: Boiler(보일러), Finned Tube(핀튜브), Heat Exchanger(열교환기), HRSG(폐열회수보일러), Multi-burner(멀티 버너), Steam(증기).

Abstract

We develop a heat exchanger modules for a multi-burner boiler. The heat exchanger module is kind of a heat recovery steam generator (HRSG). This heat recovery system has 4 heat exchanger modules. The 1st module consists of 27 bare tubes due to high temperature exhaust gas and the others consist of 27 finned tubes. The maximum steam pressure of each module is 1 MPa and tested steam pressure is 0.7 MPa. In order to test these heat exchanger modules, we make a 0.5t/h flue tube boiler (LNG, 40 Nm^3/h).

We tested the heat exchanger module with changing the position of each heat exchanger module. We measured the inlet and outlet temperature of each heat exchanger module and calculated the heat exchange rate. The results show that if module C is placed at second stage (the 1st stage is always module O, bare tube module), there is no need to attach an additional heat exchanger module. In this case the exit temperature of module C is low enough to enter an economizer which is more effective in heat recovery than a heat exchanger module.

기호설명

c_p	: 비열	[kcal/kg℃]
F	: 표준 유량	[Nm^3/h]
$\dot{m}$	: 유량	[kg/h]
P	: 압력	[Pa, bar]
q	: 열교환량	[kcal/h]
T	: 온도	[℃]
V	: 유량	[m^3/h]
x	: 거리	[m^3/h]
Δ	: 차이	-
$_o$	: 표준상태, (0℃, 1 atm)	

† 회원, 한국에너지기술연구원
E-mail : byulkang@kier.re.kr
TEL : (042)860-3321 FAX : (042)860-3098
* 한국에너지기술연구원

1. 서 론

보일러는 사용처에 따라 가정용, 산업용, 발전용 보일러로 구분할 수 있다. 이 중 산업용 보일러는 산업용에너지로 사용되는 연료의 약 54%를 사용하고 있다. 또한 국가 총 연료사용량 중 산업용 보일러에서 사용하는 연료는 약 25%정도 사용한다고 보고되었다. 이처럼 에너지 다소비

기기인 산업용 보일러는 우리나라 산업계의 생산성 및 경제성에 미치는 영향이 크다고 할 수 있으며, 산업용 보일러의 효율 증대 및 공해 물질의 저감은 국가 에너지 절약 및 환경 보호에 지대한 영향을 미치게 된다. 이러한 에너지 다소비의 산업용보일러 효율을 1%만 올려도 그 기술적 파급효과는 매우 크며 국가적 에너지 절약 효과도 매우 크게 된다. 또한 기후 변화 협약 및 에너지 가격 상승으로 인해 산업용 보일러에 대한 고효율 기술개발이 요구되고 있으며, 온실가스 및 배기가스 배출 규제로 인해 저공해 연소 기술 개발 또한 요구되고 있다.

최근 보일러에 대한 연구개발은 소형화, 고성능화 및 저공해화에 대해 많이 진행되고 있다. 보일러를 소형화하기 위해서는 연소실의 최적화 및 열 흡수부의 최적화를 통해 달성할 수 있다. 연소실의 최적화를 위해서는 여러 기술이 개발되고 있으며, 특히 일본 미우라공업주식회사(三浦工業)에서는 물결주름 버너(corrugated burner)와 무연소실(non furnace) 형태의 수관군내 연소 기술을 사용하여 800~2,000kg/h급 초소형 보일러를 개발하였다. 기존의 보일러는 버너를 통해 연소되는 연소 반응 공간을 위해 어느 정도 연소실 공간을 확보해야 되므로 보일러의 크기를 줄이는데 제약이 있었다.(일반적으로 보일러의 연소실은 전체 부피의 40~70%정도 체적을 점유함) 하지만 새로운 연소실 개념의 이 보일러는 연소 및 열전달이 수관군관내에서 동시에 진행시켜 보일러 본체 크기를 기존 동일 사양 대비 50%까지 줄일 수 있다고 하였다. 또한 연소가스가 수관군내에 직접 접하게 되어 비교적 저온 연소를 하게 된다. 이를 통해 저NOx(25PPM O_2 0%기준)를 달성할 수 있었다고 하였다. 이러한 기술에 촉매를 사용하여 NOx를 현재 수준의 1/25인 1PPM이하로 개발할 것이라고 발표하였다. 연소실 소형화할 수 있는 기술로써 하나 이상의 연소기를 사용하여 연소실 길이방향으로 크기를 축소할 수 있는 기술이 개발되고 있다. 일반적으로 화염은 길이방향으로 길게 늘어지는 형태를 가지고 있으며, 보일러 연소실의 길이는 연소 화염의 길이에 비례하여 커지게 된다. 이러한 화염의 길이를 줄이기 위해 여러 기술이 개발되고 있으며, 하나 이상의 연소기를 사용하는 멀티 버너 기술이 그 중 하나이다. 하나의 연소기를 사용하는 대신 작은 용량의 연소기를 2개 이상 사용하게 되면 저부하시 고효율화를 이룰 수 있고, 연소 화염길이가 작게 되어 보일러 연소실의 길이방향의 크기를 줄일 수 있다. 열흡수부에 대한 소형화 또한 여러 기술이 사용되고 있으며 일반적으로 핀튜브 수관을 사용을 통해 열전달계수를 증가시키는 방법을 사용한다.

본 연구에서는 소형화, 고성능화 멀티 버너 보일러에 사용될 핀튜브 열교환기 모듈에 대한 특성시험을 수행하였다. 열교환기를 모듈형태로 제작하여 시스템의 구성을 최적화할 수 있도록 도모하였고, 핀형태의 수관을 사용하여 수관의 열전달의 촉진하였다. 연구에 사용된 열교환기 모듈은 4종류로 제작하였다. 4종류의 모듈중에 하나는 수관을 나관(bare tube)으로 제작하였고, 나머지 3개는 핀이 부착된 수관으로 제작하였다. 열교환기 모듈에 대한 특성을 시험하기 위해 0.5t/h 규모의 노통 보일러를 사용하였다. 제작된 모듈에 대해 순서를 달리하여 열교환 특성 시험을 수행하였다.

2. 본론

2.1 열교환기 모듈 및 실험용 보일러 제작

본 연구에 사용할 열교환기 핀튜브 모듈은 모두 4종류로 제작하였다. 수관의 직경은 50.8mm이며 재질은 STBH340이다. 폭방향으로 9열과 유동방향으로 3열을 배치하여 하나의 모듈에 총 27개의 수관을 사용하였다. 수관 사이의 간격은 폭방향으로는 85mm이며, 유동방향으로는 120mm이다. 수관의 상하를 연결해주는 강수관이 있으며, 증발된 증기는 배플 형태의 기수분리기가 내장된 헤더를 거처 증기관으로 배출된다. 4종류의 모듈은 수관 직경은 동일하며 외관에 나선형태로 감겨있는 핀(SPCC)의 형상이 다르다. 각 모듈의 형상을 표 1에 나타내었다. 각 모듈에 전극봉 수위계, 펌프 및 유량계를 각각 설치하여 독립적으로 급수 및 증발유량을 계측할 수 있는 시스템을 구축하였다. 수위는 수관과 헤더 사이의 연락관에 전극봉을 조절하였다. 또한 각 전열 핀튜브 모듈의 위치를 변경할 수 있게 제작하였으며 O-C-B-A, O-A-B-C, O-B-A-C로 순서를 달리하여 열교환기 전열 특성시험을 수행하였다. 본 연구에 사용한 한 핀튜브 열교환기 사진을 Fig. 1에

Table 1 Details of water tubes and fin.

Description	Material	Fin geometry (height × thickness × pitch)
Module A	STBH340	9mm × 2mm × 2/in
Module B	STBH340	9mm × 2mm × 3/in
Module C	STBH340	12.7mm × 2mm × 4/in
Module O	STBH340	bare tube

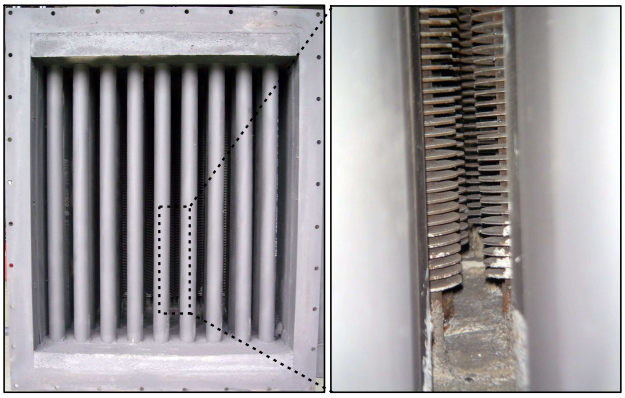

Fig. 1 Pictures of heat exchanger module.

나타내었다. 그림에서 앞부분은 나관(O모듈)이며 그 뒤로 핀이 부착된 수관이 보이고 있다.

지금까지 설 ㄴ명한 열교환기 모듈에 대한 특성 시험을 수행하기 위해 0.5t/h급 노통보일러를 사용하였으며, 노통 보일러에 300,000kcal/h 용량의 LNG버너(P3M, Sookook co.)를 부착하였다. 버너의 최소용량은 55,900kcal/h이고 최대용량은 300,000kcal/h 이며, 0.55kW 용량의 송풍기가 부착되어 있는 모델이다. 본 노통보일러의 전열면적은 3.58m^{3}이며, 노통 형태의 연소실, 상부의 증기를 모아 배출하는 헤더 및 급수부로 구성되어 있다. 보일러의 전체길이는 1,870mm이며 높이는 2,188mm이다. 연소실에서 연소가스로부터 열을 흡수하여 증발된 증기는 보일러 상부 헤더에서 기수가 분리된 후 증기 파이프를 통해 배출된다. 정격 증기 압력은 1.0 MPa이며 안전을 위해 설정된 보일러 정지 압력은 0.8 MPa이다. 0.75kW 펌프를 사용하여 급수하였으며 전극봉 위치에 따라 간헐적으로 급수를 하였다. 또한 급수량을 측정하기 위해 급수 펌프와 보일러 사이에 전자기 방식의 유량계(KTM-800, Korea Flow Meter co.)를 사용하였다. 보일러에 공급되는 LNG열량을 계산하기 위해 터빈식 가스유량계(KTM-550, Komter)를 설치하였다.

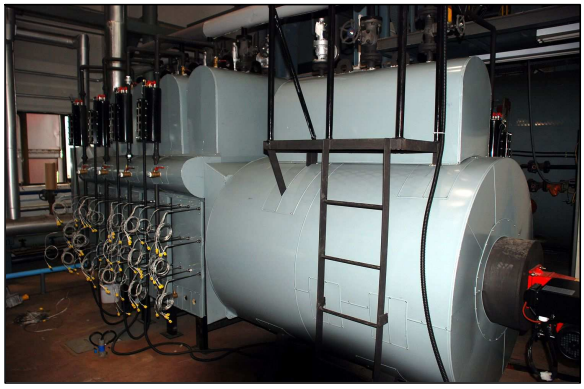

Fig. 2 Installation of boiler and heat exchanger.

또한 가스량을 표준 유량으로 계산하기 위해 압력게이지(PSCD05000CAAG, Sensys)와 T형 열전대(1/16") 열전대를 부착하여 다음과 같은 식 (1)으로 표준유량(Nm^3/h, 1기압 0℃)으로 변환하였다.

$$F = V\frac{P}{P_o}\times\frac{T_o}{T} \tag{1}$$

제작된 보일러와 모듈들은 보일러-O-C-B-A 순서대로 배치 후 시험을 하였으며, 그 이후 보일러-O-A-B-C, 보일러-O-B-A-C 순서로 배치를 달리하여 시험을 수행하였다.

2.2 열교환기 모듈 특성시험

본 연구는 전열 핀튜브 모듈에 대한 전열 특성을 파악, 분석하는 것이다. Fig. 3과 같이 각 핀튜브 모듈에 9개씩 열전대를 부착할 수 있게 구멍을 가공하였으며, 4개 모듈에 36개의 온도 측정점을 가공하였다. Fig. 3에서 1번열은 배기가스 온도를 측정하기 위해 보일러 출구부에 상, 중, 하 (250mm 간격) 3점을 가공하였다. 그리고 각 모듈에서 수관을 지나면서 배기가스 온도 변화를 측정하기 위해 수관과 수관 사이에 온도 측정 구멍을 배치하였으며 그 간격은 120mm이다. 1번째 핀튜브 모듈의 온도 측정점과 배기가스 온도 측정점 사이의 거리는 145mm이다 (Fig. 3에서 ❶번과 ❷번 측정점 사이의 거리). 보일러에서 배출되는 연소가스의 온도가 800 ~ 900℃ 정도이므로 K형 열전대(1/4")를 사용하여 온도를 계측하였다.

온도 측정 부위를 Fig. 4에 도식하였다. 폭방향으로의 온도는 Fig. 4의 4번 수관과 6번 수관사이를 10mm 간격으로 측정하였으며(Fig. 4에서 가운

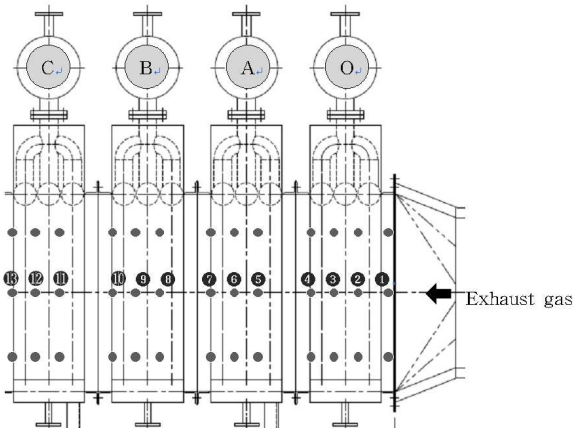

Fig. 3 Temperature sensing points of each heat exchanger modules.

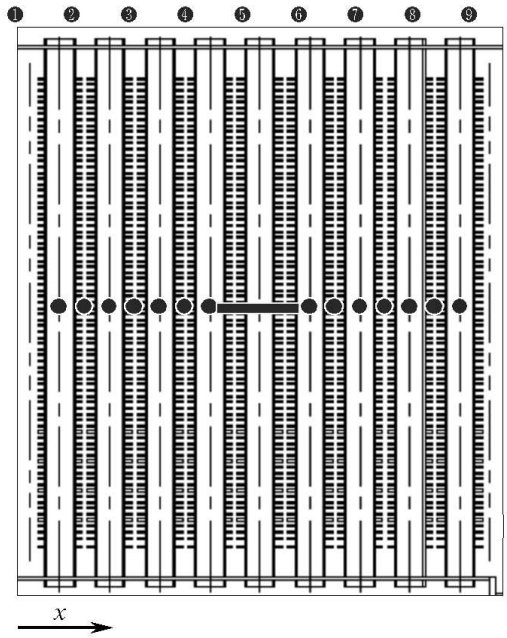

Fig. 4 Spanwise temperature sensing points and index of water tube.

데 사각형 부분), 나머지 수관에서는 온도가 가장 높을 것으로 예상되는 수관과 수관 사이와 온도가 가장 낮을 것으로 예상되는 수관 중심 후단을 측정하였다. 온도 측정은 보일러를 충분히 가동한 후 정상상태로 도달했을 때 측정하였으며 한 포인트에서 온도를 측정할 때 5분동안 측정하였다. 열전대를 다음 측정 위치로 옮긴 후 온도가 수렴하는 시간을 충분히 두어(5 ~ 10분) 측정을 시작하였다.

계측에 사용된 센서는 핀튜브 모듈 온도를 측정하기 위한 K형 열전대, 연소기에 공급되는

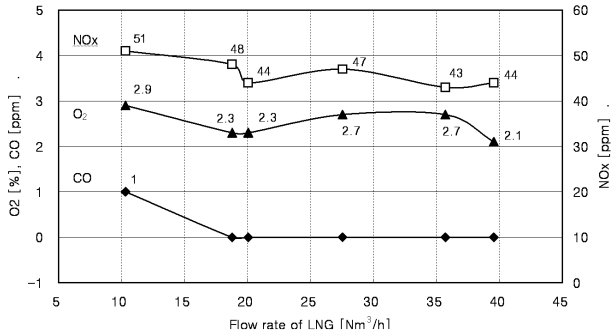

Fig. 5 Results of exhaust gas analysis of burner.

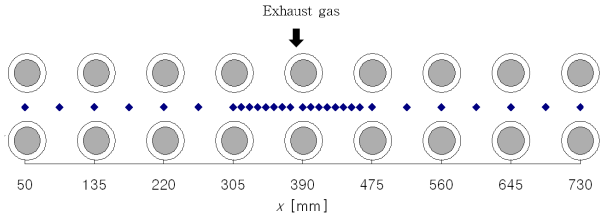

Fig. 6 Schematic diagram of finned water tube and temperature measuring points.

LNG 온도, 압력 및 가스유량을 계측하기 위한 T형 열전대, 압력계 및 유량계, 보일러 발생하는 증기 압력을 측정하기 위한 압력계 (PSCD0015KAAG, Sensys) 그리고 보일러와 각 핀튜브 모듈에 공급되는 물의 유량을 측정하기 위한 유량계를 사용하였으며, 이 모든 데이터는 A/D컨버터(GL-450, Midilogger)을 통해 컴퓨터로 수집하였다.

보일러에 설치된 연소기에 대한 배기가스 분석 시험을 수행하였다. 배기가스 분석계(Eurotron)를 사용하여 설치된 보일러에 대해 각 부하별 배기가스 분석을 실시하였으며, 측정된 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 각 부하별로 배기가스에 포함된 O_2의 농도는 2.1 ~ 2.9%로 양호한 수준이며, CO의 값은 1ppm 미만이었다. 이를 통해 연소가 원활히 이루어지고 있음을 알 수 있다. 또한 NOx의 경우 51ppm 미만으로 낮은 수준임을 알 수 있다.

2.3 열교환기 모듈 특성시험 : O-C-B-A

제작된 열교환기 모듈을 보일러-O-C-B-A순서대로 배치한 후 열교환 전열 모듈 시험을 수행하였다. 보일러 부하 100% (39.8Nm^3/h, 31.4kg/h)일 때 각 모듈에서의 배기가스 온도 분포를 계측하였다. 배기가스의 산소농도는 2.9%(공기비 : 1.16)

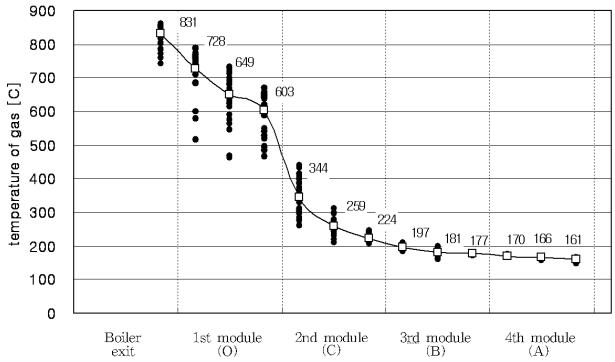

Fig. 7 Streamwise temperature distribution of each module of O-C-B-A at 100% load.

였다. 산소농도로부터 공급된 공기량을 계산해보면 488.9Nm^3/h (629.2kg/h)이다. 보일러에 공급된 총 유량은 660.6kg/h이다. 보일러 내부 온도가 일정해질 때까지는 보일러 운전시작부터 약 3시간 정도 걸렸다. 폭방향으로 측정한 위치를 Fig. 6에 나타내었으며 하나의 위치에서 29점의 온도를 계측하였다.

Fig. 7은 각 핀튜브 모듈의 중심부 온도를 한 그래프에 나타낸 것이다. 가운데 흰 사각형(□)과 숫자는 각 열에서 평균온도를 나타낸다. 실제 평균온도는 각 측정점에서 유속을 측정하고 유속과 온도를 적분하여 평균을 하여야하지만 배기가스의 유속을 측정하지 않아 산술평균으로 계산하였다. 이 그림에서 확인할 수 있듯이 2번 모듈(C)의 첫 번째 수관을 통과하면서 열교환이 가장 많이 일어나고 있음을 알 수 있다. 특히, 두 번째 모듈인 C 모듈을 지난 후에는 배가스 온도가 224℃까지 떨어진 것을 알 수 있다. 이 온도는 전열 튜브내에 있는 포화수 온도와 100℃내외의 차이이며 이런 조건에서는 전열 모듈을 추가로 설치하는 것보다 절탄기(economizer)를 설치하는 것이 배가스 열에너지를 흡수하는데 있어 더 효과적일 것이다.

각 모듈 및 수관에서의 열교환량을 계산하면 다음 식 (2)와 같다.

$$q = \dot{m} c_p \Delta T \qquad (2)$$

여기서 $\dot{m}$은 앞에서 계산한 배기가스 질량유량으로 660.6 kg/h이며, c_p는 배기가스의 비열로 0.33 kcal/kg℃를 사용하였다. 각 모듈 및 각 수관에서의 열교환량을 계산하여 Table 2에 정리하였다. 1번 모듈에서는 전체 열교환량의 34%인 49.6 Mcal/h의 열량을 배기가스로부터 얻고, 2번 모듈에서는 전체 열교환량의 57%인 82.6Mcal/h의 열량을 배기가스로부터 흡수하고 있다. 3번과 4번 모듈에서는 열교환량이 각각 7.1%, 2.4%인 것을 알 수 있다.

Table 2 heat transfer rate of each module of O-C-B-A condition.

	1st module			2nd module			3rd module			4th module		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
q	22,369	17,134	10,094	56,497	18,593	7,523	5,964	3,394	971	1,444	1,006	1,053
[kcal/h]	49,597			82,613			10,330			3,503		
q/q_{total}	15.3	11.7	6.9	38.7	12.7	5.2	4.1	2.3	0.7	1.0	0.7	0.7
[%]	34.0			56.6			7.1			2.4		

2.4 열교환기 모듈 특성시험 : O-A-B-C

보일러-O-C-B-A순서에 대한 전열 모듈시험이 끝난후 전열모듈 배치를 보일러-O-A-B-C 순서대로 설치하여 전열 모듈 시험을 수행하였다. 보일러 100% 부하일 때에는 보일러에 공급된 LNG는 44.8 Nm3/h 이며, 발생된 증기 압력은 0.7 MPa이다. 배기가스 산소 농도는 1.8%이며 이 값을 사용하여 공기비를 계산하면 1.09이다.

모듈의 순서를 바꾸기 전인 O-C-B-A 조건에서는 두 번째 모듈을 지났을 때 온도가 약 224℃까지 낮아졌으나, 현재 O-A-B-C 모듈 조건에서는 두 번째 모듈을 지났을 때 배기가스 온도가 약 362℃로 O-C-B-A 모듈대비 약 138℃정도 높은 것을 알 수 있다. 이런 배치에서는 전열 모듈을 더 추가하는 것도 좋을 것이다. 각 전열 모듈에서 열교환량을 Table 3에 나타내었다. 표에서 보는 것과 같이 두 번째 모듈에서의 열교환량이 다소 떨어진 것을 알 수 있다. 또한 3번째 모듈에서 어느 정도 열량을 흡수하고 있다. 이 배치에

Table 3 heat transfer rate of each module of O-A-B-C condition.

	1st module			2nd module			3rd module			4th module		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
q	23,683	13,039	9,547	27,073	15,548	10,801	14,706	5,138	4,195	8,288	2,386	774
kcal/h	46,268			53,422			24,040			11,448		
q/q_{total}	17.5	9.6	7.1	20.0	11.5	8.0	10.9	3.8	3.1	6.1	1.8	0.6
[%]	34.2			39.5			17.8			8.5		

서는 3번째 모듈까지 설치하고 4번째 모듈 대신에 절탄기를 설치하는 것이 더 효과적일 것이다.

2.5 열교환기 모듈 특성시험 : O-B-A-C

보일러-O-A-B-C순서에 대한 전열 모듈시험이 끝난후 전열모듈 배치를 보일러-O-B-A-C 순서대로 설치하여 전열 모듈 시험을 수행하였다. 보일러 100% 부하일 때에는 보일러에 공급된 LNG는 41.7 Nm^3/h 이며, 발생된 증기 압력은 0.7 MPa이다. 배기가스 산소 농도는 1.8%이며 이 값을 사용하여 공기비를 계산하면 1.09이다.

O-B-A-C 모듈 조건에서는 두 번째 모듈을 지났을 때 배기가스 온도가 약 316℃이다. 이런 배치에서는 전열 모듈을 더 추가하는 것도 좋을 것이다. 각 전열 모듈에서 열교환량을 Table 4에 나타내었다.

Table 4 heat transfer rate of each module of O-B-A-C condition.

	1st module			2nd module			3rd module			4th module		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
q	22,984	14,054	6,232	31,068	15,823	6,352	8,147	3,976	2,644	8,636	986	949
kcal/h	43,270			53,243			14,767			10,571		
q/q_{total}	18.9	11.5	5.1	25.5	13.0	5.2	6.7	3.3	2.2	7.1	0.8	0.8
[%]	35.5			43.7			12.1			8.7		

3. 결 론

본 연구에서는 멀티버너 보일러용 열교환기 모듈에 대한 특성시험을 하였다. 열교환기 모듈에 대한 소형화를 위해 핀튜브 모듈형으로 개발하였으며, 0.5t/h급 보일러에서 그 성능을 확인하였다. 본 연구에서는 전열 모듈 순서를 변화시켜 그 특성을 확인하였다. 개발된 열교환기 모듈에 대한 성능 및 특징은 다음과 같다.

(1) O-C-B-A배치 조건에서 보일러 부하별 특성시험 결과 첫 번째 모듈(O, 나관)보다 두 번째 모듈(A, 핀튜브)에서 열전달이 더 많이 발생하였다. 100% 부하시 첫 번째 모듈에서 열교환량은 전체 열교환량의 34%인 49.6Mcal/h 였고, 두 번째 모듈에서 열교환량은 전체 열교환량의 57%인 82.6 Mcal/h였다.

(2) O-C-B-A조건에서는 두 번째 모듈을 지난후 배가스 온도가 약 224℃까지 떨어져 3번째 모듈 이후에는 추가 전열 모듈을 설치하는 것보다 절탄기를 사용하여 배가서 열에너지를 회수하는 것이 더 효과적이다.

(3) O-A-B-C 및 O-B-A-C 배치 조건에서는 배가스 온도가 두 번째 모듈을 지나더라도 300℃이상이며, 3번째 모듈을 추가로 설치한 후 절탄기를 설치하는 것이 열에너지 회수에 더 효과적이다.

(4) 본 연구를 통해 모듈형 열교환기를 개발하였고, 향후 모듈의 배치 및 보일러 용량에 따른 평가등을 통해 열교환기에 대한 최적 설계를 도모할 수 있다.

후 기

이 논문은 에너지관리공단 에너지·자원기술개발 중·대형사업의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) El-Wakil, M. M., 1984, "Powerplant technology," McGraw-Hill.

(2) Incropera, F. P., DeWitt, D. P., 1996, "Introduction to heat transfer," John Wiley & Sons.

(3) Kays, W. M., London, A. L., 1984, "Compact heat exchangers," McGraw-Hill.

(4) Kim, N. H., Shin, T. R., Han, S. P., 2007, "Heat transfer characteristics of Individual rows for fin and tube heat exchanger," *Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, Vol. 19, No 2, pp. 149~155.

(5) Rohsenow, W. M., Hartnett, J. P., Ganic, E. N., 1985, "Handbook of heat transfer applications," McGraw-Hill.