

## LFG와 LNG 혼합연료의 조성에 따른 다관형 열교환기에서의 열전달 특성

전용한<sup>†</sup> · 김용 · 서태범<sup>\*</sup>

인하대학교 대학원, <sup>\*</sup>인하대학교 기계공학과  
(2005년 10월 24일 접수, 2006년 1월 24일 채택)

### Heat Transfer Characteristics of Tube Bundle Type Heat Exchanger for LFG and LNG Mixed Fuel

Yong-Han Jeon<sup>†</sup>, Yong Kim and Chong-Bo Kim<sup>\*</sup>

Graduate School, Inha University

<sup>\*\*</sup>Department of Mechanical Engineering, Inha University

(Received 24 October 2005, Accepted 24 January 2006)

#### 요 약

본 연구에서는 LFG와 LNG의 혼합연료의 연소가스측 열전달 특성을 LFG, LNG 단독 연료와 비교함으로써 실험적으로 연구하였다. 실험을 위하여 파일럿 연소시스템을 제작하였으며, 연소시스템의 열교환부에는 수직·수평 배플을 가지는 다관형 열교환기를 설치하였다. 실험은 연료 주입 방식, 저위발열량, 메탄의 조성(44.5%, 54.5%)의 서로 다른 조건에서 수행되었다. 본 연구를 통하여 동일한 레이놀즈 수에서 LNG의 연소가스측누셀트 수는 LFG보다 큼을 알 수 있었으며, LFG의 경우에 LFG와 LNG 혼합 연료가 LFG 단독 연료보다 큼을 확인하였다. 따라서, LFG를 사용하는 경우 LFG 단독 연료를 사용하기보다는 LFG에 LNG를 적절히 첨가시켜 사용하는 것이 열전달이 향상되며, 발생 LFG의 공급 불안정성을 완화하는데 기여할 수 있다고 판단된다.

**주요어** : 매립지 가스, 다관형 열교환기, 대수평균온도차, 열전달 계수

**Abstract** — The purpose of this study is to investigate experimentally the heat transfer characteristics of combustion gas of a mixture fuel of LFG and LNG as compared LFG, LNG. A Pilot combustion system is constructed. Tube bundle type heat exchangers with vertical and horizontal baffles are used, and the experiment is carried out for different operating conditions, the heating value, the concentration of methane (44.5%, 54.5%). The results show that the Nusselt number of LNG is higher than that of LFG at the same Reynolds number, and in case LFG, the Nusselt number of the mixture of LFG and LNG is larger than that of LFG alone. Therefore, heat transfer is improved by using LFG that is added to LNG pertinently, if and instability of LFG supply will be relaxed.

**Key words** : LFG, Tube bundle type heat exchanger, LMTD, Heat transfer coefficient

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
Graduate School, Inha University  
Tel: 032-862-7313  
E-mail: cv76@netian.com



## 1. 서 론

LFG(Landfill Gas)는 쓰레기 매립장에서 발생하는 가스로써, 주요 성분은  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ , 및 미량의  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ 로 구성되어 있다. 매립가스의 약 90% 이상은 메탄( $\text{CH}_4$ )과 이산화탄소( $\text{CO}_2$ )로 이뤄져있어 지구온난화를 유발하는 대표적인 온실가스인 동시에 미량인 황화수소나 메틸머캅탄 등은 심각한 악취를 유발하기도 한다. 지구온난화에 기여하고 있는 온실가스의 종류는 이산화탄소( $\text{CO}_2$ ), 메탄( $\text{CH}_4$ ), 아산화질소( $\text{N}_2\text{O}$ ), 프레온가스( $\text{CFC}_3$ ), 육불화황( $\text{SF}_6$ ) 및 대류권의 오존( $\text{O}_3$ )이 대표적인 물질들로서 일명 온실효과가스라 부르며, 그 중 가장 많은 것은  $\text{CO}_2$ 인데 현재 온난화에 약 50%의 비중으로 기여하고 있다. 그 다음으로 기여도가 높은 것은  $\text{CH}_4$ 로  $\text{CO}_2$ 에 비해 대기중에서 차지하고 있는 농도는 100분의 1로 적으나  $\text{CO}_2$ 의 21배에 달하는 지구온난화 가스로서의 효과가 있는 것으로 알려져 온난화에의 기여도는 18%를 차지하고 있다. 또한 그 농도는 매년 0.9%씩 증가하고 있다. 그러나 이중에서 메탄가스는 LNG(저위발열량 10,500 kcal/ $\text{m}^3$ )의 주요 성분이며, 저위발열량이 3,000~6,000 kcal/ $\text{m}^3$  정도로 가스 연료로서의 이용가능성이 충분하다. 매립가스는 매립 폐기물 톤당 112~230  $\text{m}^3$  발생하게 되며, 매립 후 2~3년 내에 최대량이 발생되고 매립 후 20~30년까지 생성이 가능한 특성을 가지고 있다. 따라서 이를 회수하여 활용하는 것은 환경보호 측면에서 뿐 아니라 경제적으로도 직접적인 이익을 창출할 수 있다.

전세계적으로 지난 20여년간 300여개의 매립가스이용 플랜트가 운영되고 있는 것으로 파악되고 있다. 미국, 독일 및 영국이 전체의 약 76%를 차지하고 있어 이들 국가에서 매립가스 이용이 가장 활발히 이루어지고 있다. 가스 이용 시설은 1970년대 중반이후 지속적으로 건설, 운영되어 왔는데 이들 세 나라를 중심으로 살펴보면 전력생산이 전체의 39%, 열 회수가 23%, 열 병합발전이 14%, 업 그레이딩 형태로 분리·정제하여 직접 연료로의 이용이 6%, 기타 20% 정도이다. 미국은 70% 이상을 전력생산에 이용하고 있는데 이것은 전기에너지의 장점인 에너지 이용도의 우수성, 즉 거리제한에 관계없이 수요처의 확보가 가능하다는 장점이 있기 때문인 것으로 생각된다.

국내에서는 매립지가 광역화되면서 매립된 폐기물량이 100만  $\text{m}^3$  이상의 매립지가 13개소에 달하고 있지만, LFG의 이용은 미미한 상태이다. 전국 폐기물매립의 절반을 차지하고 있는 수도권 매립지와 서울 상암동 난지도 매립지(지역 난방)외에는 대부분의 매립지가 발생 LFG의 대부분을 자연상태로 대기방출 및 소각시키고 있어, 가스연료로서의 활용을 추진해야 할 필요가 있다.

매립지에서 발생되는 LFG의 조성을 유지하고 악취성

물질의 대기로의 방출을 줄이며, 지하로의 가스 이동을 감소시키기 위한 LFG 회수 시스템에 대한 연구들<sup>[1][3]</sup>과 LFG를 이용하여 LFG 단독 연료, LFG+LPG 등 저위발열량이 높은 연료들을 혼합했을 때의 연소 특성에 관한 연구<sup>[4]</sup> 역시 이미 수행되었다. 또한 셀 앤 튜브형태의 열교환기에서 배플의 크기나 배플 사이의 간격, 그리고 셀 안에서의 관군의 배열 등 공기, 물 등을 작동유체로 한 실험이나 계산은 많이 이루어져왔다.

Saffar-Avval and Damangir<sup>[5]</sup>은 수치해석적인 방법으로 셀-앤-튜브 열교환기의 배플 사이의 최적의 간격을 구하기 위한 실험식을 제시했다.

Li<sup>[6]</sup> 등은 다른 배플 간격을 가지는 셀-앤-튜브 열교환기의 국소 열전달 계수와 압력강하에 관하여 조사하였으며, 동일한 레이놀즈 수에 대해 압력 강하와 평균 열전달량은 배플 간격이 커질수록 증가한다는 논문을 발표하였다. 또 다른 연구논문에서는 디스크와 도넛형태의 배플을 사용하여 열전달과 압력강하에 관해 실험적으로 조사하였으며, 원통 셀에 사용되는 분절형 배플을 사용하는 경우보다 열교환기의 효율성이 명백히 증가한다고 결론을 내리고 있다. Sparrow and Perez<sup>[8]</sup>는 배플과 셀 사이의 거리를 변화시키면서 튜브당 열전달 계수를 측정, 배플과 배플사이의 셀 측 평균 열전달 계수에 대한 실험적인 연구를 수행하였다. 하지만 LFG 연소가스측의 조성이나 성분 변화에 따른 열전달 특성을 다룬 연구들은 미비하며, 상용화되어 있는 열교환기를 LFG 열교환 시스템에 그대로 사용하고 있는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 파일럿(Pilot) 연소시스템을 실제 제작하여 열교환기 내에서의 열전달 특성을 상용 연료인 LNG, LFG에 LNG를 혼합한 경우에 대하여 비교·검토 하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2-1. 실험장치

본 실험을 위해 준비한 실험장치를 Fig. 1에 나타내었다. 열교환기는 배플의 HE-1, 2 다관형 열교환기로(Fig. 3 참조) 외경 19.05 mm의 매끈한 동관을 사용하였으며, 길이 450 mm, U-튜브 길이 45 mm, 전체 길이 540 mm이며, 동 용접으로 제작되었다. 전체의 열수는 맨 아래 7열, 그 위에 6열, 교대로 7열 4개, 6열 3개 총 46개의 정삼각 엇갈림 배열이 되도록 하였다. 양끝의 U-튜브를 제외하고 동관길이 400 mm 지점에 400×400 mm 크기의 사각 스테인리스 판으로 각 동관을 고정시키고 길이 방향에 수평하게 셀 수력지름의 2/3 크기를 가지는 배플을 삽입하였다. 열교환기로 유입되는 연소가스 입구 측의 단면적은 133.3×400 mm로서 동일하다. Fig. 2과 Fig. 3에 열교환기의 형태와 세부적인 치수를 나타내었다.



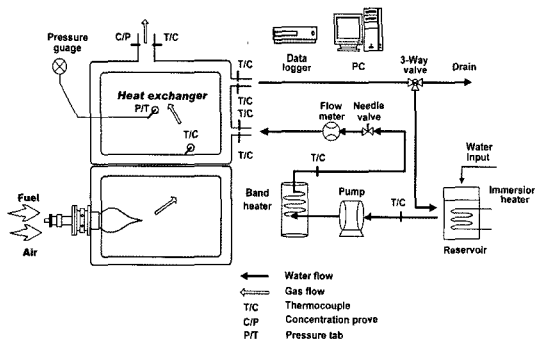


Fig. 1. The schematic of combustion system.

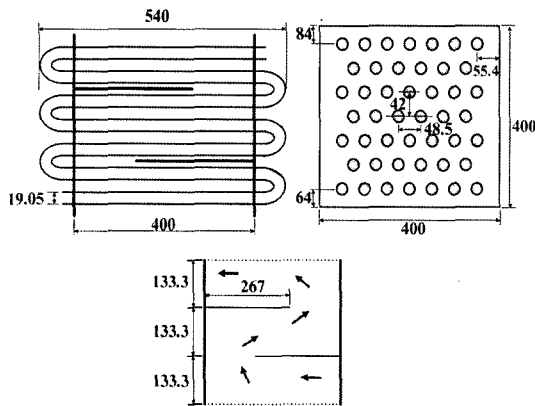


Fig. 2. HE-1 heat exchanger.

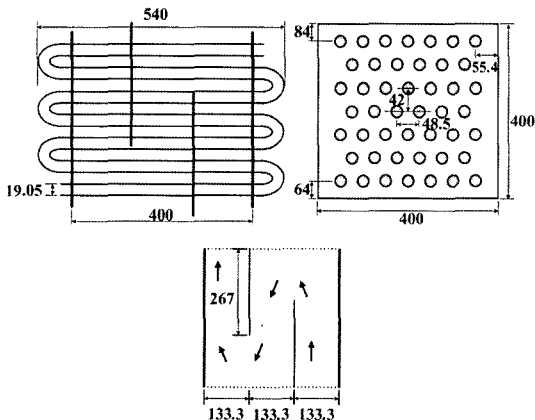


Fig. 3. HE-2 heat exchanger.

연소 가스측 열전달계수 측정을 위해서는 셀측의 입·출구 온도, 튜브측의 입·출구 온도를 측정해야 한다. Fig. 1의 전체 개략도에서 나타난 것처럼 연소가스 입구 양측에 K-type 열전대를 셀 내부 내화보드로부터 70 mm

인 지점에 삽입하고 연소가스 출구측에도 같은 종류의 열전대를 반경 45 mm인 지점에 삽입하여 온도를 측정하였다. 또한 연소가스 출구에 연소가스의 농도를 측정하기 위한 농도측정 센서를 설치하였다. 튜브 입·출구 역시 T-type 열전대를 2개씩 180° 간격으로 설치했다. 압력을 측정하기 위하여 열교환기 중심 부분에 압력계를 설치하였으며, 유량을 측정하기 위해 터빈유량계를 사용하였다. 튜브측 입구 온도를 가능한 정확히 조절하기 위해 슬라이더스가 연결된 3 kW 용량의 밴드 히터를 설치하였으며, 열교환기 출구측 고온의 물을 이용해 입구측 물 온도를 높이기 위해 일부는 배수시키고 일부는 사용하도록 바이패스 밸브를 사용하여 조절하였다. 그리고 데이터 취득장치를 이용하여 모든 측정 데이터를 획득·저장하였다.

## 2-2. 실험 방법

KS B 8127(한국 산업규격)에서는 보일러가 소비하는 가스량이 가장 많은 사용 상태에서 난방 환수구 온도  $30 \pm 0.5^\circ\text{C}$ , 난방 출구 온도  $50 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 규정하고 있다. 본 실험에서 사용되는 연소시스템은 지역난방을 위한 산업용 보일러이므로 일반 가정용 보일러에 비해서 입·출구 온도차, 온도 범위 역시 커진다. 서울 상암동 일부 주택지, 월드컵 주경기장에 LFG 단독 연료만을 이용하여 지역 난방수를 공급하는 상암 플랜트의 경우 난방 출구 온도  $120^\circ\text{C}$ , 환수 온도  $65^\circ\text{C}$ 로 규정하고 있다. 그러나, 파일럿 플랜트의 개념을 지니는 본 시스템에서는 열교환기 입구 온도  $35 \pm 0.5^\circ\text{C}$ , 출구 온도  $75 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 고정시키고 즉 입·출구 온도차  $40^\circ\text{C}$ 인 상태에서 연료 종류의 변화에 따른 연소가스측 열전달계수 변화와 LFG의 연료량 조절에 의한 연소가스의 조성 변화에 따른 연소가스측 열전달계수 변화에 초점을 맞추었다.

실험 조건은 각각 동일한 연소 저위발열량으로 맞추어진 4가지 연료 조성에 따라 구분된다.

실험 조건은 각각 동일한 연소기 저위발열량으로 맞추어진 4가지 연료 조성에 따라 구분된다. Table 1에 나타난 것과 같이 case 1, case 2, case 3, case 4로 나누어 HE-1, HE-2 열교환기 모두 저위발열량을 20000~45000 kcal/hr 범위에서 10000 kcal/hr 씩 증가시키며 수행하였다. Case1, 3의 경우에 사용된 연료는 LNG로서  $\text{CH}_4$  89.8%,  $\text{C}_2\text{H}_6$  7.5%,  $\text{C}_3\text{H}_8$  2%의 조성을 갖는다. Case 2, 4의 경우는 김포 매립지에서 발생하는 LFG의 조성( $\text{CH}_4$  54.5%,  $\text{CO}_2$  37.5%,  $\text{N}_2$  7%,  $\text{O}_2$  1%)을 모사하기 위해 LNG와  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ 를 화학 반응식에 근거(저위발열량에 따른)하여 적절히 섞어 LFG를 모사하였다. 그리고 조성 변화에 따른 LFG의 성분비는  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  양을 조절하여 연소기 측방향으로 주입되는 메탄의 양



Table 1. Fuel injection method.

구분	연소기 축방향		연소기 선회방향	
	연료	(%)	연료	(%)
Case 1	LNG	100	.	0
Case 2(54.5%)	LFG	100	.	0
Case 2(44.5%)	LFG	100	.	0
Case 3	LNG	54	LNG	46
Case 4(54.5%)	LFG	70	LNG	30
Case 4(44.5%)	LFG	74	LNG	25

을 54.5%, 44.5%로 고정시켰다. 연소기 선회방향으로 주입되는 되는 LNG의 양과 전체 공기의 양은 각 저위발 열량에 따라 case별로 동일하게 맞추었다.

실험 절차는 먼저 펌프를 가동시켜 열교환기 튜브측에 물을 순환시킨 후 연소기에 점화한다. 열교환기 튜브측 입구온도  $35^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 를 맞추기 위해 수조에 히터 2개를 설치하여 초기 온도를 올린다. 그와 동시에 슬라이더스를 일정한 전압으로 밴드 히터를 통해 물 온도를  $2^{\circ}\text{C}$  증가되도록 고정시킨 후 열교환기 출구측에서 배수되는 고온의 물 일부를 수조로 바이패스시켜 열교환기 입구온도를 맞춘다. 연소기가 점화되어 열교환기 튜브 출구 온도가 계속 상승되면 니들 밸브를 이용, 유량을 조절하여 열교환기 출구 온도를  $75 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 에 고정시키후 각 저위발 열량에 따른 셀측 연소가스 입구 온도가 정상 상태에 도달할 때 까지 시스템을 가동시킨 후 정상 상태에 도달하면 각 측정 지점에서의 측정값을 읽어 저장시킨다. 4가지 연료 주입방식과 저위발열량, 메탄의 조성에 따라 동일한 조건하에서 반복 측정한다. 온도 측정을 위해 사용되는 열전대는 셀측 입구 온도 2개, 출구 온도 1개, 열교환기 튜브측 입·출구 온도 각각 2개씩, 수조 출구 온도 1개 그리고 밴드 히터 출구 온도 1개 총 11개가 사용하였고, 압력계와 유량계를 포함해 모두 개의 측정값을 데이터 취득장치와 프로그래밍 언어를 이용하여 부착된 각각 열전대의 데이터들을 획득, 저장 하였다.

### 2-3. 실험 데이터 처리 과정

총괄열전달계수는 물의 입·출구 온도를 측정하여 얻어진 열전달량(Q)로부터 식(1)을 활용하여 구할 수 있다. 얻어진 총괄열전달계수를 이용하여, 식(2)에서 연소가스측의 대류열전달계수를 계산하였다.

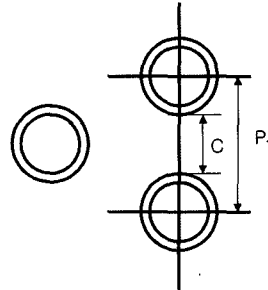
$$Q = UAF\Delta T_{lm} \quad (1)$$

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (2)$$

셀 측을 지나는 유동은 튜브 관군과 배플들을 통과하므로 속도가 일정하다고 볼수 없다. 따라서, 속도를 구

하기 위해  $D_e$ (equivalent diameter),  $A_s$ (characteristic area)를 정의하였다.

수직 배플에서의  $D_e$ (equivalent diameter)는 식(3)과 같이 정의한다.



$$D_e = \frac{3.44 P_T^2}{\pi d_o} - d_o \quad (3)$$

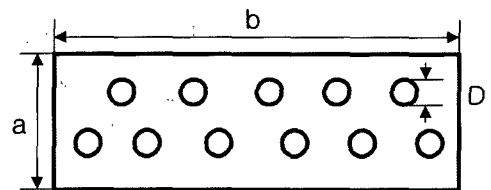
여기서,  $P_T$ 는 튜브 피치,  $d_o$ 는 튜브 외경이다.

$$A_s = \frac{D_h C B}{R_T} \quad (4)$$

여기서,  $D_h$ 는 셀 측 수력 지름,  $C$ 는 인접 튜브간 거리,  $B$ 는 배플 사이의 거리이다.

$$Nu_o = \frac{h_o D_e}{k_o} \quad (5)$$

수평 배플에서의  $D_h$ (hydraulic diameter),  $D_e$ (equivalent diameter)는 다음과 같이 정의한다.



$$D_h = \frac{4A}{P} = \frac{4(ab - \pi D^2 N/4)}{2(a+b) + \pi DN} \quad (6)$$

$$D_e = \frac{4A}{P_e} = \frac{4(ab - \pi D^2 N/4)}{\pi DN} \quad (7)$$

여기서,  $A$ 는 셀 측의 연소가스의 평균 유동 단면적이고,  $P$ 는 유동을 고려한 셀 측의 평균 접수길이(wetted perimeter),  $P_e$ 는 열전달 면적을 고려한 셀 측의 평균 접수길이이다.

$$Nu_o = \frac{h_o D_e}{k_o} \quad (8)$$



$$Re_o = \frac{V_o D_h}{\nu_o} \quad (9)$$

### 3. 실험 결과 및 고찰

본 실험은 매립지 가스를 연료로 사용하여 지역난방에 필요한 열을 공급하기 위해 산업용 보일러 형태에 초점을 맞추어 연소시스템을 설계·제작하였다. 본 실험의 연소 시스템은 크게 두 부분으로 나눌 수 있으며, 연소 장치부와 열교환부(다관형 열교환기)로 구성된다. Fig. 2과 Fig. 3에 나타난 것처럼 열교환부 즉 열교환기는 2가지로 구분되는데 즉, 같은 크기의 사각 셀안에 엇갈림 배열을 갖는 관군을 가지며 셀에 삽입되는 배플의 방향에 따라 구분된다. 연소기에 주입되는 연료의 주입방식에 따라 4가지 case, LFG의 연소기 축방향의 메탄 성분(44.5%, 54.5%)에 따라 2가지 case, 총 6가지로 구분하여 실험이 수행되었다. Case 3, 4는 연소기 축방향 이외에 선회 방향으로 공기와 LNG가 주입되는데 각 case에서 저위발열량 증가시 동일한 값을 유지시키고 축방향에서만 연료량을 변화시켰다.

#### 3-1. 연료 종류에 따른 비교

Fig. 4~5는 HE-1, HE-2의 저위발열량에 따른 총괄 열전달 계수의 변화를 보여주고 있다. 여기에서의 case 2, 4는 LFG의 축방향 메탄 조성 54.5%만을 기준으로 LNG와 비교된다. 저위발열량 증가에 따른 열전달 계수는 각 case 별로 볼 때 큰 차이는 보이지 않으면서 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 유사한 열전달 계수를 가지지만 case 4의 경우가 가장 작다.

Fig. 6~7은 연소가스측 레이놀즈 수에 따른 연소가스측 평균 누셀트 수의 변화를 보여주고 있다. case 2, 4가 case 1, 3에 비해 같은 누셀트 수에서 높은 레이놀즈

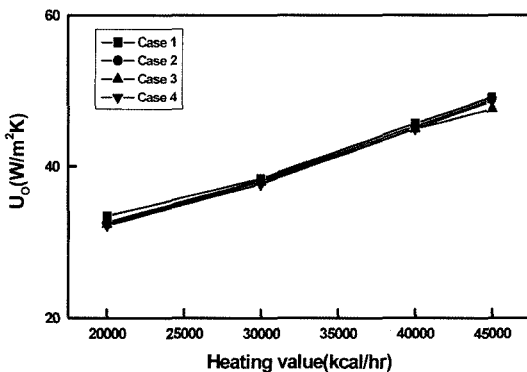


Fig. 4. Overall heat transfer coefficient of HE-1 for various heating values.

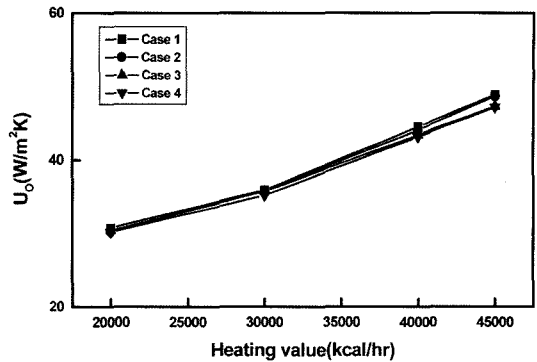


Fig. 5. Overall heat transfer coefficient of HE-2 for various heating values.

즈 수를 가지는데 이것은 주입되는 연료와 공기의 혼합 가스의 평균 밀도가 case 2의 경우는 case 1, 3의 1.65 배, case 4의 경우는 1.46배이므로 case 1, 3의 경우 질

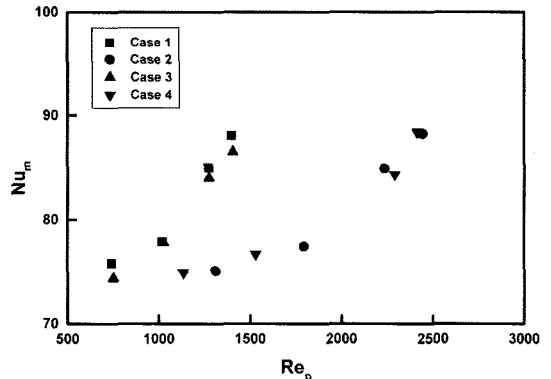


Fig. 6. Average Nusselt number distribution of HE-1 along the Reynolds number.

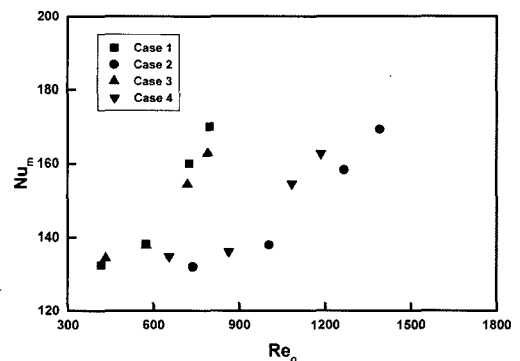


Fig. 7. Average Nusselt number distribution of HE-2 along the Reynolds number.



량유량이 case 2, 4에 비해 절반 정도이다. 따라서, 동일한 유동 단면적을 가질 때 연소가스측의 레이놀즈 수는 case 2, 4의 경우가 case 1, 3에 비해 크게 나타난다. 그리고 동일한 연소가스측 레이놀즈 수를 기준으로 보면 case 1, 3이 case 2, 4에 비해 큰 평균 누셀트 수를 갖는다는 것을 알 수 있다. 즉, 연료주입방식에 관계없이 LNG를 연료로 사용(case 1, 3) 할 때가 LFG를 사용(case 2, 4) 할 때보다 누셀트 수가 크다. 이는 LNG는 메탄 함유량이 98% 이상이지만 LFG는 54% 정도이기 때문에 실험 동안의 연소가스 온도가 차이 나기 때문이다. Case 별로 살펴보면 case 1, case 3, case 4, case 2의 순서로 평균 누셀트 수가 작아지는 경향을 보인다.

열교환기 별로 살펴보면 평균 누셀트 수는 HE-1, 즉 수직 배플을 삽입한 경우 74~88, HE-2, 즉 수평 배플을 삽입한 경우 132~169의 범위를 가진다. 저위발열량이 45000 kcal/hr 일때를 기준으로 HE-2의 경우가 약 1.92배 큼을 알 수 있다. 하지만 총괄열전달계수 측면에서 HE-1이 32~49, HE-2가 29~48로써 총괄열전달계수

는 유사하게 나타났다. 전체 평균적으로 볼 때 HE-1의 경우가 HE-2보다 총괄 열전달 계수는 약 1.05배 크게 나타났다. 연소가스 측 평균 누셀트 수를 계산시  $D_c$  값이 HE-2가 HE-1보다 1.92배 크므로 두 가지 열교환기의 형태와 Nusselt 수 정의에 따른 차이로 할 수 있다.

### 3-2. LFG의 메탄 조성에 따른 비교

Fig. 8~9는 저위발열량에 따른 총괄 열전달 계수를 나타낸다. Fig. 8~11은 case 2, 4의 경우 연소기 축방향의 메탄 조성 44.5%와 54.5%를 기준으로 LFG만을 비교하였다. Case별로 유사한 값을 가지며 메탄 함량이 많은 경우가 총괄열전달계수가 크게 나타난다. 이는 LFG 내에 함유된 메탄이 가장 총괄열전달계수에 영향을 미치는 가장 큰 인자임을 알 수 있다.

Fig. 10~11은 연소가스측 레이놀즈수에 따른 연소가

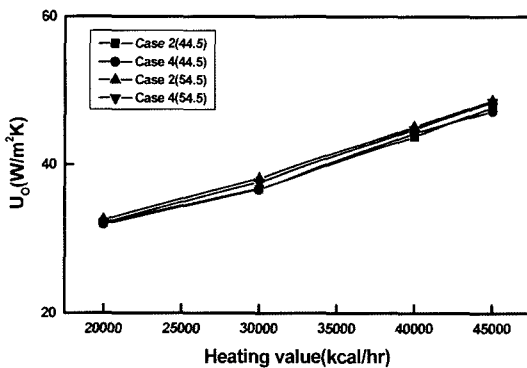


Fig. 8. Overall heat transfer coefficient of HE-1 for various heating values.

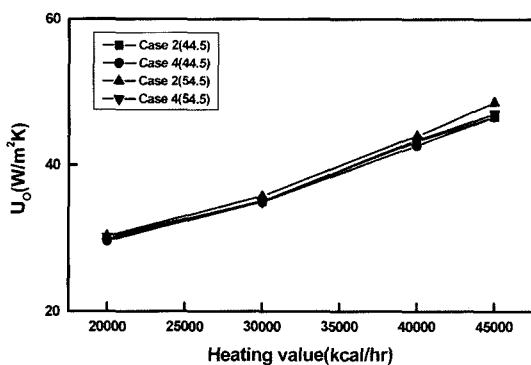


Fig. 9. Overall heat transfer coefficient of HE-2 for various heating values.

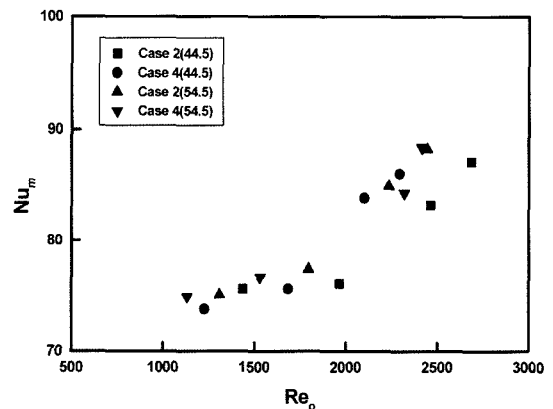


Fig. 10. Average Nusselt number distribution of HE-1 along the Reynolds number.

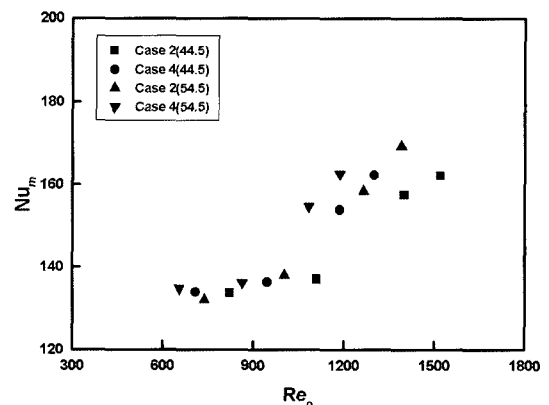


Fig. 11. Average Nusselt number distribution of HE-2 along the Reynolds number.



스추 누셀트 수의 변화를 나타낸다. case4(54.5%), case 4(44.5%), case 2(54.5%), case 2(44.5%)의 순서로 누셀트 수가 작아지며, 축 방향으로 LFG가 주입되는 경우 레이놀즈 수가 큰 차이가 나지는 않지만 선회방향으로 LNG와 공기의 혼합가스를 주입하는 경우가 축방향의 경우보다 누셀트 수가 큰 값을 나타낸다. 이는 연소가스가 선회방향으로 연료를 주입 했을 시 연소가스가 머무르는 시간이 더 많기 때문이다.

#### 4. 결 론

파일럿 플랜트 개념의 연소시스템을 제작하여 열교환부에 관하여 실험적으로 연구를 수행하였다. 연소기에 주입되는 주 연료의 종류에 따른 비교에서 LNG를 사용하는 경우와 LFG를 사용 지역 난방에 필요한 열을 공급하기 위한 연소시스템 구현을 위해 파일럿 플랜트 개념의 연소시스템을 제작하여 열교환부에 관하여 실험적으로 연구를 수행하였다. HE-1과 HE-2 열교환기 모두 위의 결과에서 볼 수 있듯이 유사한 경향을 보인다. 연소장치 측면에서 볼 때 NOx와 CO의 양이 다른 세가지 방식에 비해 case 4의 경우가 가장 적게 발생한다.

열교환부 측면에서 볼 때 저위발열량에 따른 연소가스측 평균 누셀트 수와 총괄 열전달 계수는 큰 차이를 보이지는 않지만 가장 낮은 분포를 보인다. 연소가스측 레이놀즈 수에 따른 연소가스측 누셀트 수와 총괄 열전달 계수는 연료 주입방식을 떠나 LFG를 주 연료로 사용하는 case 2, 4 경우가 LNG를 주 연료로 사용하는 case 1, 3 경우보다 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 그리고 LNG의 경우는 연소기 축방향으로만 연료가 주입되는 경우가 그렇지 않은 경우보다 열전달 계수가 크며, LFG의 경우 선회방향으로도 연료가 주입되는 경우가 열전달 계수가 큼을 알 수 있다.

LFG의 메탄 조성변화 측면에서 볼 때 저위발열량에 따른 열전달 특성은 연소기 축방향으로 그리고 동시에 메탄 함량이 많은 경우가 그렇지 않은 경우보다 크며, 레이놀즈 수에 따른 열전달 특성은 연소기 선회방향으로도 연료가 주입되는 경우가 크다.

따라서, LNG를 연료로 사용하는 경우보다는 열전달 계수는 작게 나타나지만 LFG를 사용하는 경우 LFG 단독 연료를 사용하기보다는 LFG에 LNG를 적절히 혼합하여 사용하는 것이 열전달이 향상 되며, 발생 LFG의 공급 불안정성을 완화하는데 기여할 수 있다고 판단된다.

#### 후 기

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

#### 기호설명

$D_o$	: 열전달을 고려한 수력 지름[m]
$D_h$	: 수력 지름[m]
$h$	: 대류열전달계수 [ $W/m^2 \cdot K$ ]
$k$	: 열전도도 [ $W/m \cdot K$ ]
$N$	: 튜브 수
$P$	: 젖수길이(wetted perimeter)[m]
$P_e$	: 열전달을 고려한 젖수길이[m]
$P_t$	: 튜브 피치[m]
$T_{lm}$	: 대수 평균 온도차 [ $^{\circ}C$ ]
$U$	: 총괄열전달계수 [ $W/m^2 \cdot K$ ]
$Re$	: 레이놀즈 수
$Nu$	: 누셀트 수

#### 하첨자

$i$	: 튜브 안측
$o$	: 튜브 외측

#### 참고문헌

- Martin, S. "Landfill gas extraction technology: study, simulation and manually controlled extraction", Bioresource Technology, 1997, 62, 47-5.
- 강원석. 매립지 관리 및 매립가스(LFG)의 활용기술, 한국 지역 난방 공사, 1999.
- Park, J.W.; Shin, H.C. "Surface emission of landfill gas from solid waste landfill", Atmospheric Environment, 2001, 35, 3445-3451.
- Jung, T.J. A study on the Combustion Characteristics of the LFG Mixing Gas, MS thesis, Inha University, Incheon, Korea, 1999.
- Saffar-Avval, M.; Damangir, E. "A general correlation for determining optimum baffle spacing for all types of shell and tube exchanger", Int. J. Heat Mass Transfer, 1994, 38(13), 2501-2506
- Li, H.; Kottke, V. "Effect of baffle spacing on pressure drop and local heat transfer in shell-and-tube heat exchanger for staggered tube arrangement", Int. J. Heat Mass Transfer, 1997, 41(10), 1303-1311.
- Incropera, F.P.; Dewitt, D.P. Fundamentals of Heat and Mass transfer, 4th ed., John Wiley-Sons, New York, 1996.