

## 모듈형 2 t/h급 수관식 보일러의 열전달 특성

안 준\*† · 황상순\*\* · 김종진\*\*\* · 강새별\*\*\*

\* 국민대학교 기계시스템공학부, \*\* 인천대학교 기계시스템공학부, \*\*\* 한국에너지기술연구원

### Heat Transfer Characteristics of 2 t/h-Class Modular Water-Tube-Type Boiler

Joon Ahn\*†, Sang Soon Hwang\*\*, Jong Jin Kim\*\*\* and Sae Byul Kang\*\*\*

\* School of Mechanical Engineering, Kookmin Univ.,

\*\* School of Mechanical Engineering, Univ. of Incheon,

\*\*\* Korea Institute of Energy Research

(Received January 16, 2012 ; Revised August 21, 2012 ; Accepted August 21, 2012)

**Key Words:** Tube bank (관군), Water tube boiler (수관식 보일러), Heat transfer (열전달)

**초록:** 본 논문에서는 다중 버너를 채택한 2 t/h 급 수관식 보일러 환(fin)이 설치된 증발관 모듈이 제안하였다. 환의 형상은 보일러를 구성하는 각각의 모듈에서 고르게 증발이 이루어질 수 있도록 설계하였다. 이를 위해서 기존의 벌크 설계 과정이 아닌 각각의 열에 대해 에너지 보존을 고려하는 방식으로 설계를 수행하였다. 설계한 증발관 모듈로 2 t/h 급 수관식 보일러를 제작하여 성능을 실험하여 설계를 검증하였다. 설계 과정에서 고려되지 않은 입구 조건 등의 2, 3차원 효과를 파악하기 위하여 수치해석을 병행하였다. 수치해석은 환 팁의 온도도 예측하기 위하여 증발관의 전도를 포함한 복합열전달해석을 하였다. 환이 설치될 경우 환의 크기와 밀도가 증가할수록 열전달 계수가 상관식보다 낮아졌고 수치해석으로 구한 환 팁의 온도는 해석해로 예측한 값보다 높게 나타났다.

**Abstract:** A finned-tube-type evaporator module has been proposed for a 2 t/h-class water-tube-type industrial boiler with multiple burners. The geometry of the fins was changed at each module to equalize the evaporation. The modules were designed by considering the energy balance at each row rather than by following a conventional bulk design procedure. The designed module was built into a 2 t/h-class water-tube-type boiler, and its performance was tested. A numerical simulation was also conducted to evaluate the two- or three-dimensional effects of factors such as the inlet conditions. The numerical simulation also included the conjugate heat transfer problem to predict the fin tip temperature. The heat transfer coefficient with fins is lower than that obtained from the empirical correlation of a bare tube. The fin tip temperature from CFD is higher than that from the analytical solution.

### 1. 서론

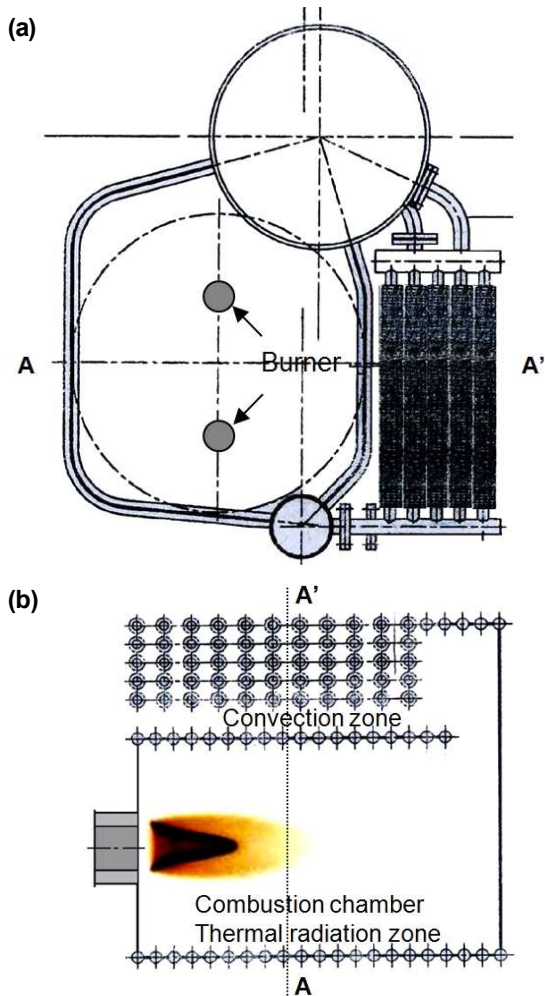
최근 에너지 자원의 고갈이 현실화되고 이산화탄소 배출에 따른 지구 온난화의 영향이 가시화되면서 화석 에너지 이용 절감은 국가적 과제로 대두되고 있다. 우리나라의 에너지 소비구조를 보면 대부분의 에너지 자원을 수입에 의존하고 있으며 수출 주도형의 경제 구조로 인해 산업 부문에서 전체 에너지의 50%를 사용하고 있다. 산

업 부문의 에너지 소비량 중 40% 이상은 산업용 보일러에서 사용되고 있어 산업용 보일러는 에너지 이용 효율을 향상시킬 경우 가장 큰 에너지 절감효과를 기대할 수 있는 기기라고 할 수 있다.

산업용 보일러에는 주로 노통연관식, 수관식, 관류식의 보일러가 주로 사용되는데, 설비의 교체를 통해 큰 에너지 절감효과를 기대할 수 있는 중대형 설비의 경우에는 수관식 보일러(Fig. 1)가 주로 채택되고 있다. 중대형 설비의 경우, 보일러의 용량이 증가하는 것과 더불어 버너도 대형화 되어 부하 변동에 따른 연소제어가 어려워진다.

† Corresponding Author, [jahn@kookmin.ac.kr](mailto:jahn@kookmin.ac.kr)

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

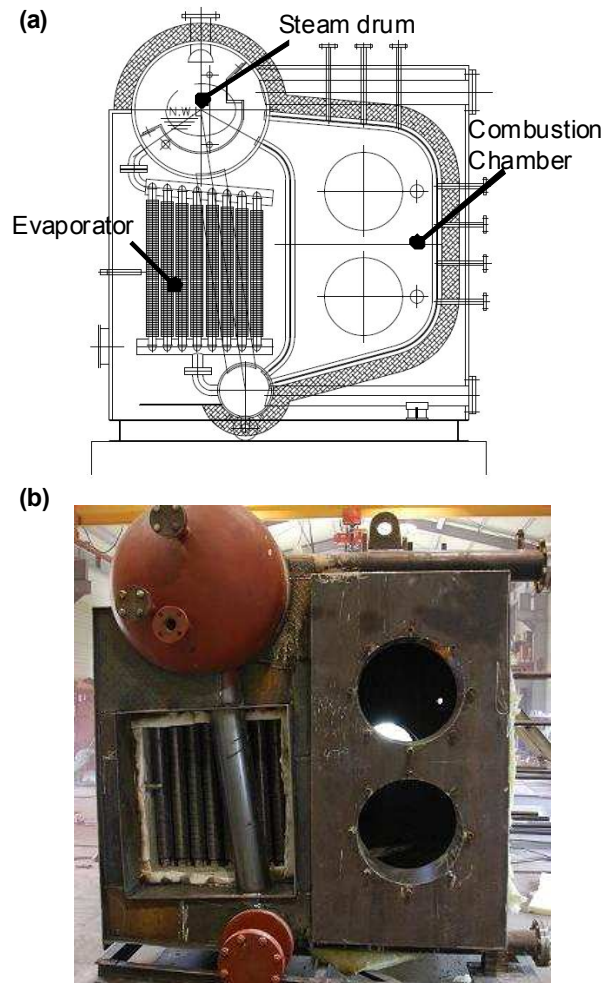


**Fig. 1** Cross-section of water tube boiler; (a) normal cross-section of multi burner water tube boiler; (b) streamwise cross-section

즉, 증기수요에 따라 연소 부하를 바꿀 경우 유해 배출물인 CO나 NOx의 발생을 억제하는 데 어려움이 따르게 된다. 이러한 문제는 2개 이상의 버너를 채택하여 버너의 대수 제어를 통해 부분부하를 구현함으로써 해결할 수 있다.<sup>(1,2)</sup>

다중(Multi) 버너를 도입할 경우 단일 버너에 비해 화염의 길이가 짧아지게 되어 작은 공간에서 효율적으로 증기를 발생시켜야 하므로 증발관의 가스 측 열전달을 촉진해야 한다. 본 연구에서는 Fig. 1(a)와 같이 버너를 상하로 배치하여 종횡비를 높여 Fin을 설치하기 유리한 형태의 수관식 보일러를 제안하였다. 수관에 Fin을 설치하면 짧아진 화염으로도 증기를 효과적으로 발생시켜 보일러 시스템의 체적을 절감할 수 있다.

수관식 보일러는 Fig. 1(b)에 보인 바와 같이



**Fig. 2** Present multi burner water tube boiler; (a) drawing for manufacturing; (b) photograph before insulation

복사 열전달이 중요한 연소실과 대류 열전달이 중요한 증발관군으로 나누어 열설계를 수행하게 된다. 연소실의 경우 본 연구에서 채택한 다단연소 저 NOx 버너를 도입했을 때의 열전달<sup>(3)</sup> 및 2개의 버너를 상하로 배치한 연소실에서의 열전달<sup>(2)</sup>에 대하여 기존의 열설계 프로그램을 검증하고 수치 해석을 수행하여 자세한 물리적 현상을 파악하였다.

증발관의 경우에는 유동 방향으로 Fin의 형상이 변화할 때의 열전달 특성을 0.5 t/h 급의 모형 수관식 보일러를 제작하여 실험을 수행하였다.<sup>(4,5)</sup> 유동 방향의 Fin 형상 변화 및 부분부하 운전 조건에 따른 열전달 실험 결과를 기존의 열설계에 사용하던 Zhukauskas 관계식(식 (1),  $C$ ,  $n$ 은 관군 배열,  $Re_{D,max}$ 의 함수<sup>(6)</sup>)과 비교하였으며 각 열에

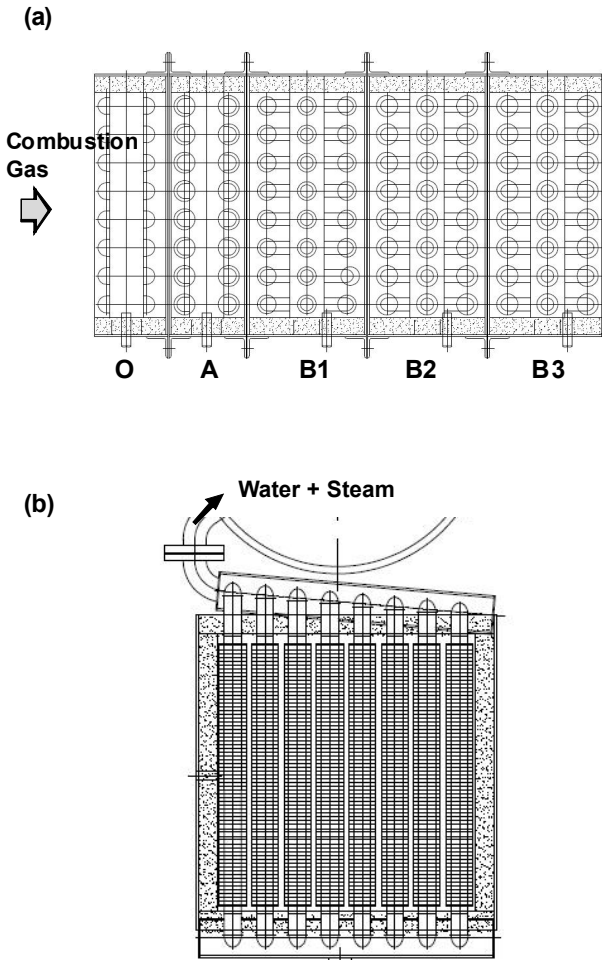


Fig. 3 Evaporation tube module; (a) Streamwise cross section; (b) Streamwise normal cross section

대하여 열정산을 거치도록 열설계 프로그램을 보완하였다.<sup>(7)</sup>

$$N_D = C Re_{D,max}^n Pr^{0.36} \left( \frac{Pr}{Pr_s} \right)^{1/4} \quad (1)$$

본 연구에서는 선행 연구로 수행한 0.5 t/h 급 모형 실험 결과<sup>(1)</sup>를 바탕으로 2대의 버너가 설치된 2 t/h 급 수관식 보일러를 설계, 제작하여 실험을 수행하였고 설계 프로그램을 검증하였다. 증발관에서 실험식에 의한 열설계와 실험결과를 비교하였으며 둘 사이의 차이를 이해하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 본 논문에서는 수치해석, 실험, 열설계 결과를 서로 비교하여 열설계에서 고려하지 못한 3차원 효과 및 Fin 내부에서의 온도분포가 열전달 특성에 미치는 영향을 제시한다.

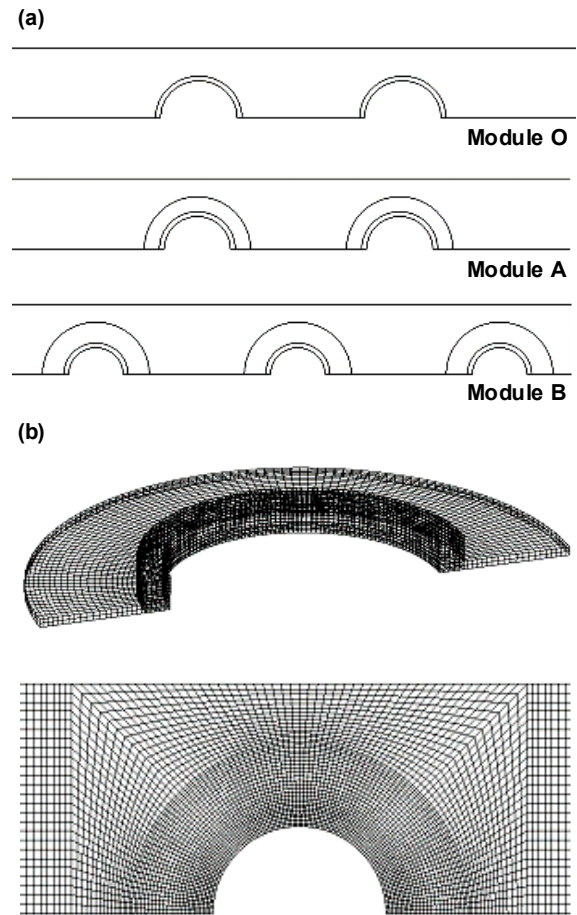


Fig. 4 Computational domain and grid system; (a) modeling of evaporator module; (b) grid system

## 2. 실험장치 및 수치해석 기법

### 2.1 실험장치

실험장치는 2 t/h 급의 수관식 보일러로서(Fig. 2) 100% 부하 조건에서 2 t/h의 증기가 발생하게 된다. 버너는 Fig. 2(b) 사진에 나타난 장착 위치와 같이 2개를 상하로 배치하였다. 연료는 LNG로서 100% 부하 조건에서 각각 65 Nm<sup>3</sup>/h의 유량으로 공급하였고 전자유량계(Oval 社)로 각각의 버너에 공급되는 연료의 유량을 측정하여 발열량을 기준으로 열효율을 계산할 수 있도록 하였다.

증기를 생산하기 위한 물은 Fig. 2(a)의 상부 드럼의 수위를 일정하게 유지하도록 공급하여 발생한 증기의 건도와 급수량을 통해 증발량을 구할 수 있도록 하였다. 급수는 인버터로 제어하였으며 급수량은 전자 유량계(Kometer 社)로 측정하

였다.

증발관은 Fig. 3에 보인 것과 같이 Fin-tube 열교환기로서 유동방향에 따라 Fin의 높이 및 밀도, tube 직경에 변화를 주었다. Fin-tube는 모두 5개의 모듈로 구성되어 가장 상류 쪽에는 외경 50.8 mm 2열의 나관으로 구성된 O 모듈이 있고 뒤에는 45 mm 관에 9mm 높이의 fin이 1 inch에 2개씩 설치된 A 모듈이 연결된다. A 모듈 뒤에는 관경 38.1 mm에 12.7 mm fin이 1 inch에 3개씩 설치된 B 모듈 3개가 직렬로 연결되어 있다.

모듈과 모듈 사이에서는 증발관을 통과한 연소가스의 온도를 측정하여 열전달 특성을 파악할 수 있도록 하였다. 연소가스의 온도는 K형 다중 측정 열전대(4 point)를 사용하여 측정하였고 자료 획득 장치(미디로거, GL-800)를 통해 컴퓨터에 저장하여 안정된 통계를 구하였다. 배기가스 분석을 위해 가스 분석계(Greenline MK-2, Testo 350)을 사용하였으며 실험 중 배기가스 산소 농도는 4%로 유지하였다.

## 2.2 수치해석 기법

본 연구에서는 Fin-tube로 구성된 증발관 모듈에 대하여 수치해석을 수행하였다. 증발관 모듈은 Fig. 3과 같이 폭방향으로 8개의 수관이 배치되어 있는데 본 연구에서는 하나의 모듈 내부에서의 3차원 효과보다는 각 모듈의 유동 방향의 형상 변화에 초점을 맞추어 계산영역을 Fig. 4(a)와 같이 1/2 주기를 취해 대칭조건을 부과하고 수치해석을 수행하였다. 지배방정식은 비압축성 유체에 대한 연속, 운동량, 에너지 방정식으로 상용 소프트웨어인 FLUENT를 이용하였다. 난류모델로는 튜브에 의해 생긴 길이 차원이 지배적인 것으로 판단하여 RNG  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다.

격자계는 Fig. 4(b)와 같이 3차원 육면체 격자를 사용하였고 격자수는 모듈의 형상에 따라 차이가 있지만 각각의 모듈에 대하여 약 150,000개 전체적으로 약 600,000개의 격자를 사용하였다. 경계조건으로서 입구에서는 연소계산을 통하여 부하율 100% 연료량에서 배가스 산소농도 4%에 해당하는 질량 유속을  $1.168 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 을 부과하였고 물성은 연소계산을 통해 얻은 조성을 바탕으로 구하도록 하였다. 입구 온도는 실험값으로부터 1105 K으로 설정하였고 계산 영역 출구에는 압력출구 조건을 부과하였다.

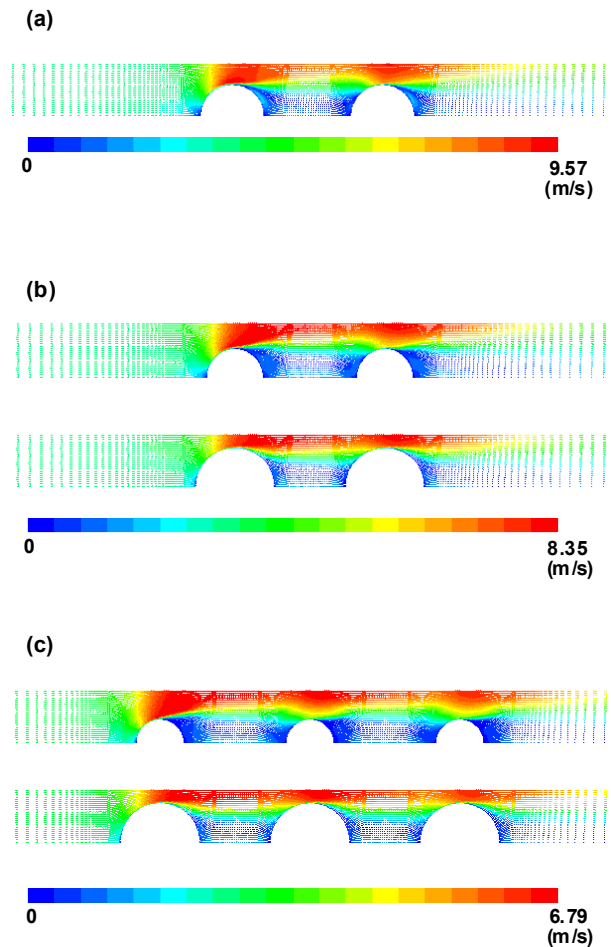


Fig. 5 Velocity vectors from CFD; (a) O module; (b) A module; (c) B module

증발관에 대해서는 Fin 바닥면에 등은 조건을 부과하고 Fin에 대해서는 전도를 고려한 복합열전달 해석을 수행하였다. Fin 바닥면에서의 온도는 보일러 작동 압력에서의 포화 온도인 458 K를 부과하였다. Fin의 열전도도는 재질(SPCC)의 물성(AISI)을 참고하여  $59 \text{ W/mK}$ 으로 계산을 수행하였다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 유동장 및 온도장

수치해석을 통해 구한 유동장을 보면(Fig. 5), 세 가지 모듈 형태에서 공통적으로 튜브 뒤에 와류쌍이 형성되어 튜브 사이를 채우고 있는 유동 형태를 보이고 있다. 튜브 지름 기준의 Re 수는 모듈에 따라 2,700에서 3,400의 범위로서 시간 평

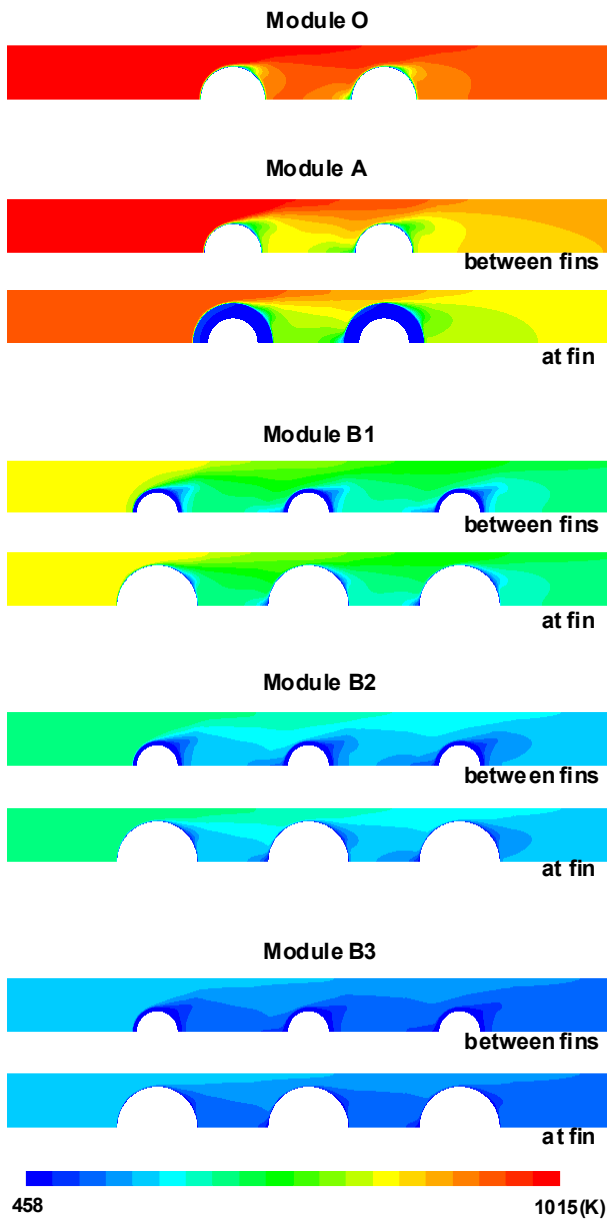


Fig. 6 Local temperature distribution

균 유동장 형태는 유사하게 나타난다. 정량적으로는 O, A, B 모듈 순으로 튜브 직경이 감소하면서 유로 면적이 증가하여 유속이 감소하는 것을 볼 수 있다. 박리점은 Fin이 없는 위치에서는 110°부근에 형성되고 Fin이 있는 위치에서는 100°부근으로 앞당겨 지는 것을 관찰할 수 있다.

각 모듈에서의 온도장 분포는 Fig. 6에 제시하였다. 유동장과 마찬가지로 온도장도 각 모듈에서 Re 수에 큰 차이가 없으므로 절대값은 차이를 보이지만 전체적으로 유사한 형태의 분포를 보인다.

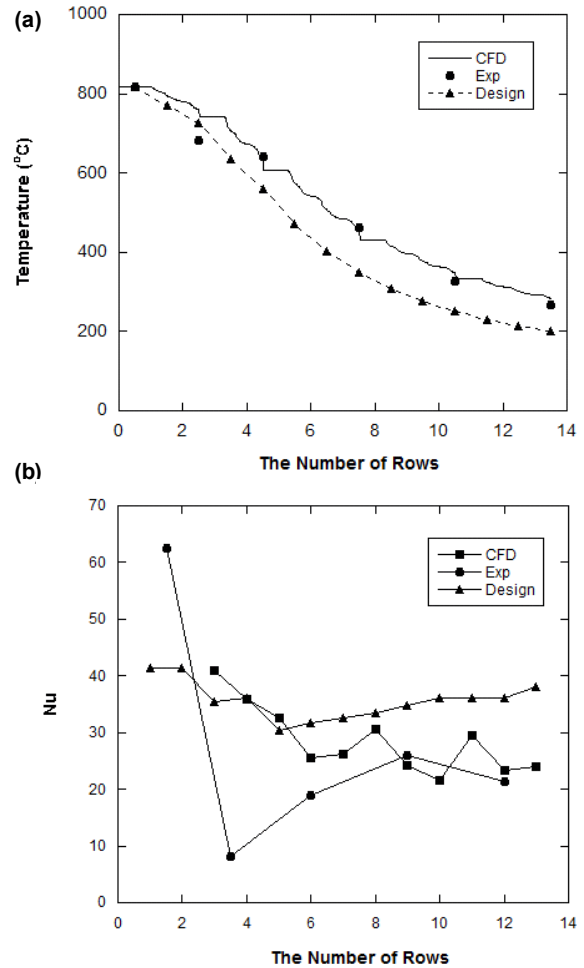


Fig. 7 Heat transfer characteristics of the evaporator module; (a) streamwise temperature variation; (b) Nusselt number

다. Fin이 설치된 위치와 Fin 사이 위치 모두 박리점에서 하류 방향으로 저온 영역이 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 각 모듈에서 2번째 열 이후에 위치한 튜브의 경우 정체점 부근에도 저온 영역이 형성된 것을 관찰할 수 있는데 이는 튜브에서 형성된 와류쌍이 튜브 사이의 공간을 채웠기 때문인 것으로 보인다.

### 3.2 열전달 특성

연소가스가 증발관에 열을 전달하면서 온도가 감소하는 특성을 보면 (Fig. 7(a)), Fin이 설치되기 시작하는 3번째 열 이후에서 측정된 연소가스의 온도가 Zhukauskas 상관식(식 (1))으로 예측한 값 (Design)보다 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 반면 수치해석 결과는 실험결과를 하류까지 잘 따라가는 것을 볼 수 있다. 이는 정열배열로 배치

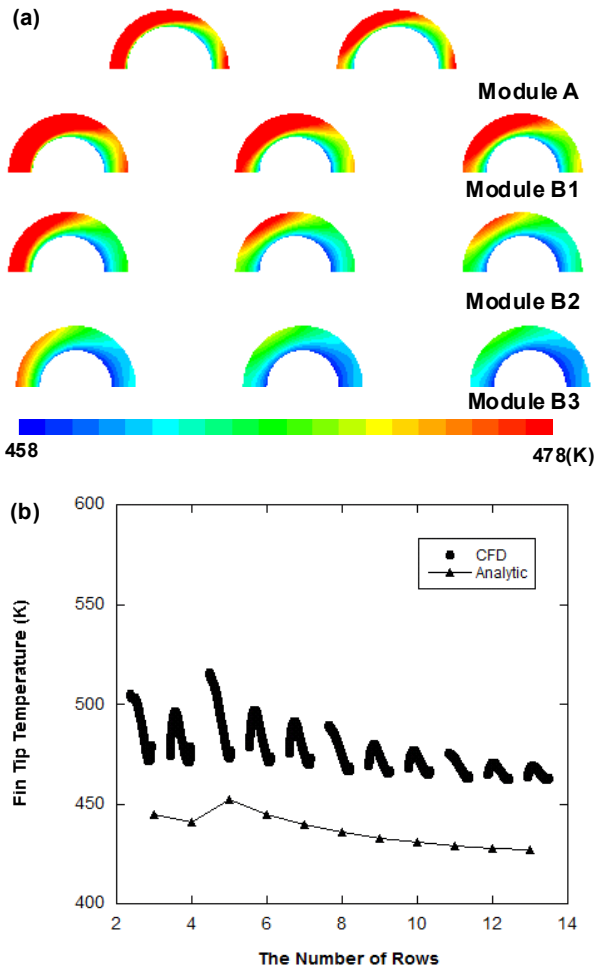


Fig. 8 Heat transfer at fins; (a) local temperature distribution; (b) fin tip temperature

되어 튜브 사이를 재순환 영역이 채우고 있고 Fin 사이에서의 열전달 계수가 Fin이 없을 때에 비해 감소하면서 생긴 현상으로 보인다.

연소가스의 엔탈피 변화로부터 열전달계수를 구해보면 (Fig. 7(b)), B1 모듈 이후에 열전달 계수가 관계식으로 구한 값에 비해 30%이상 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 Fin에 의해 열경계층의 두께가 증가했기 때문인 것으로 보인다. 수치해석 결과도 Fin 설치에 따라 열전달계수가 저하되는 현상을 예측하고 있다.

복합 열전달 해석을 통해 구한 Fin 내부의 온도분포 (Fig. 8(a))를 보면 상류 위치에 고온 영역이 집중되고 있는 것을 볼 수 있다. 튜브 사이에 재순환 영역이 형성되면서 각 모듈에서 2번째 튜브 이후에는 고온 영역이 정체점에서 하류방향으로 이동한 것을 관찰할 수 있다. 그러나 전체적

으로 Fin 온도는 230℃ 이내로 내열 범위 내에서 높은 Fin 효율로 작동할 것으로 예측되었다.

내열 범위 내에서 Fin이 동작하도록 설계하고 Fin의 효율을 예측할 경우 1차원 열전도 해석을 이용한 Bessel해 (식 (2))를 사용한다.<sup>(8)</sup>

$$\frac{\theta(r_2)}{\theta_b} = \frac{K_1(mr_2)I_0(mr_2) + I_1(mr_2)K_0(mr_2)}{K_1(mr_2)I_0(mr_1) + I_1(mr_2)K_0(mr_1)} \quad (2)$$

수치해석 결과로 구한 Fin tip 온도를 Bessel해와 비교해 보면 수치해석 결과가 20℃이상 높은 것을 볼 수 있고 설계에 Bessel해를 사용할 경우 보정이 필요할 것으로 보인다.

### 3. 결론

본 연구에서는 2 t/h급의 다중버너 수관식 보일러를 위한 증발관 모듈에 대하여 수치해석 및 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서 관찰한 증발관 모듈의 경우 Fin이 설치된 영역에서 상관식보다 열전달율이 작았고 수치해석으로 이를 예측할 수 있었다.

(2) 수치해석 결과 Fin의 온도는 안전한 내열 범위 내에 분포하였으나 Bessel해 보다는 다소 높은 값을 보였다.

(3) 상관식을 위한 Fin-tube 열전달 설계의 정확성을 높이기 위해서는 표면 온도 설정, Fin 효율 등에서 보정이 필요함을 확인하였고 이는 추후 부분부하 해석 및 실험을 통해 도출할 예정이다.

### 후기

본 연구는 지식경제부의 에너지·자원기술개발사업 및 한국에너지기술연구원 2011년 주요사업 위탁과제로 지원받았으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- (1) Ahn, J., Kim, J. J. and Kang, S. B., 2012, "Heat Transfer Characteristics of Heat Exchange Module for a Water Tube Type Boiler," *Trans. of the SAREK*, Vol. 24, No. 3, pp. 265~270.
- (2) Ahn, J., Hwang, S. S., Kim, J. J. and Kang, S. B., 2009, "Heat Transfer at the Combustion Chamber of a Water Tube Type Boiler with Multiple Burners", *Trans. of the KSCFE*, Vol. 14,

- No. 2, pp. 77~83.
- (3) Ahn, J., Kim, J. J. and Kang, S. B., 2009, "Combustion Characteristics of a Staged Burner for a Boiler," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 33, No. 10, pp. 767~772.
- (4) Kim, J. J., Choi, K. S., Ki, H. C. and Kang, S. B., 2008, "Experimental Study on Thermal Characteristics of Heat Exchanger Modules for Multi Burner Boiler - Part Load Test Results," *Proc. of the SAREK Summer Annual Meeting*.
- (5) Kang, S. B., Kim, J. J. and Ahn, J., 2008, "Experimental Study on Thermal Characteristics of Heat Exchanger Modules for Multi Burner Boiler," *Proc. of the KSME Fall Annual Meeting*.
- (6) Incropera, F. P. et al, 2009, *Introduction to Heat Transfer 5<sup>th</sup> Ed.*, Wiley, pp. 412~423.
- (7) Kang, S. B., Kim, J. J. and Ahn, J., 2009, "Development of Heat Transfer Calculation Program for Finned-Tube Heat Exchanger of Multi-Burner Boiler" *Proc. of the KSME Fall Annual Meeting*.
- (8) Ahn, J. and Kim, J. J., 2011, "Heat Transfer Characteristics of 0.5 t/h Class Non-Furnace Boiler with a Metal Fiber Burner," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 35, No. 2, pp. 215~220.