

모듈형 수관식 보일러를 위한 열교환 모듈의 열전달 특성

안 준[†], 김 종 진^{*}, 강 새 별^{*}

국민대학교 기계시스템공학부, *한국에너지기술연구원

Heat Transfer Characteristics of Heat Exchange Module for a Water Tube Type Modular Boiler

Joon Ahn[†], Jong Jin Kim^{*}, Sae Byul Kang^{*}

School of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

*Korea Institute of Energy Research, Daejeon 500-700, Korea

(Received December 23, 2011; revision received January 9, 2012)

ABSTRACT: A finned tube type heat exchange module has been proposed for a multi-burner water tube boiler. Fin density and length increase in streamwise direction to equalize the evaporation for each module, which makes it difficult to apply conventional bulk design procedure. The design program has been improved by updating data for every row of tubes along the flow. A numerical simulation has been also conducted to evaluate the effect of inlet conditions and validated with experiment. The heat transfer of the first row has been underpredicted by the conventional Zhukauskas correlation, since the acceleration of the flow due to the blockage is not fully inflected. The fin tip temperature is also underpredicted by Bessel solution, because of the interaction with neighboring fins.

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

기 호 설 명

그 리 스 문 자

D : 튜브 직경 [m]
 h : 열전달계수 [W/m^2K]
 Nu : Nusselt 수, $h D/k$
 Re : Reynolds 수, $u D/\nu$
 T : 온도 [$^{\circ}C$, K]
 T_i : 입구온도 [$^{\circ}C$, K]
 T_s : 튜브표면온도 [$^{\circ}C$, K]

ν : 동점성 계수 [m^2/s]
 θ : 무차원 온도

1. 서 론

일반적으로 수관식 보일러가 사용되는 중대형 산업용 증기보일러의 경우(Fig. 1), 보일러의 용량이 증가하는 것과 더불어 버너도 대형화되어 부하 변동에 따른 연소제어가 어려워진다.⁽¹⁾ 즉, 증기수요에 따라 연소 부하를 바꿀 경우 유해 배출물인 CO나 NOx의 발생을 억제하는 데 어려움이 따르게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 복수의 버너를 도입하여 NOx나 CO의 발생을 엄격하게 제어하며 중

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4833; fax: +82-2-910-4839

E-mail address: jahn@kookmin.ac.kr

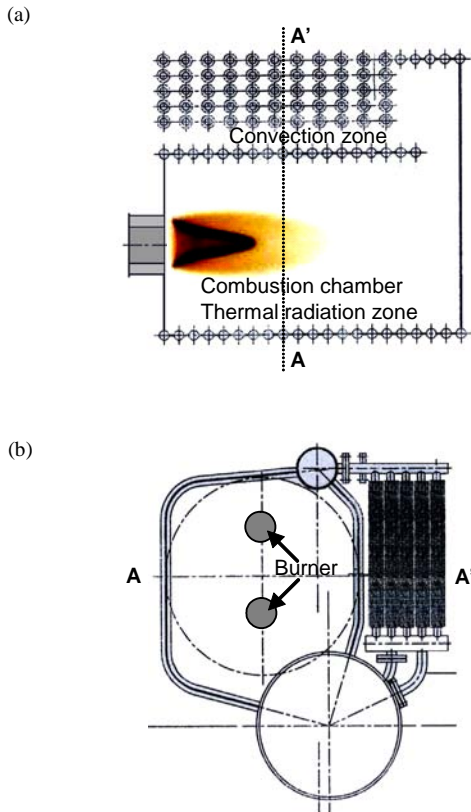


Fig. 1 Cross-section of water tube boiler; (a) streamwise cross-section; (b) normal cross-section of the present multi burner water tube boiler.

대형 보일러 시스템을 구축하는 개념이 제안되었다.

다중(Multi) 버너를 도입할 경우 단일 버너에 비해 화염의 길이가 짧아지게 되어 작은 공간에서 효율적으로 증기를 발생시켜야 한다. 따라서 수관의 열전달을 촉진시킬 대책이 필요하다.⁽²⁾ 본 연구에서는 Fig. 1(b)와 같이 버너를 상하로 배치하여 중횡비를 높여 환을 설치하기 유리한 형태의 수관식 보일러를 제안하였다. 수관에 환을 설치하면 짧아진 화염으로도 증기를 효과적으로 발생시켜 보일러 시스템의 체적을 절감할 수 있다.

환이 설치된 전열모듈의 경우 튜브로의 열전달량이 크게 증가하여 유동방향으로 온도 및 열물성이 급격하게 변화하여 나관에서 활용한 벌크 해석을 사용하기 어려워진다.⁽³⁾ 특히 유동방향으로 열전달 특성에 따라 환의 높이와 밀도를 변화시킬 경우 각 열에 대해 해석을 수행해야 환 형상 변화에 따른 특성을 정확히 반영할 수 있다. 이에 본 연구에서는 유동방향 열에 따라 열전달을 계산할 수 있도록 설계 프로그램을 보완하고 기존의 Zhukauskas 상관

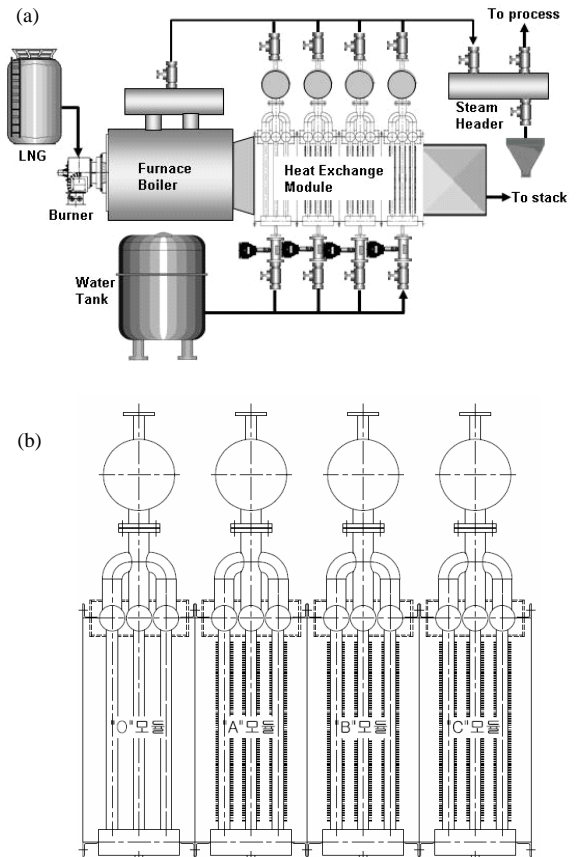


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup; (a) 0.5 t/h class model; (b) heat transfer module.

식⁽⁴⁾이 반영하지 못하는 입구조건의 영향을 보기 위하여 수치해석을 수행하여 실험결과와 비교하였다.

2. 실험장치 및 수치해석 기법

2.1 실험장치

실험장치는 수관식 보일러의 복사전열부를 노통보일러로 모사하고 후단에 개발하고자하는 전열모듈을 설치하여 Fig. 2(a)와 같이 구성하였다. 연료는 LNG로 100% 부하 조건에서 40 Nm³/h의 유량으로 공급된다. 전열 모듈의 단면은 0.8×0.9 m로 노통보일러 출구 온도가 1000℃일 경우 유동방향의 벌크 속도가 약 0.71 m/s가 된다.

전열모듈은 Fig. 2(b)와 같이 1개의 모듈에 폭방향으로 지름이 50.8 mm인 9개의 튜브가 3열로 설치되어 있다. 튜브의 폭방향 간격은 85 mm, 모듈 안에서 유동방향 간격은 120 mm이다. 하나의 모듈

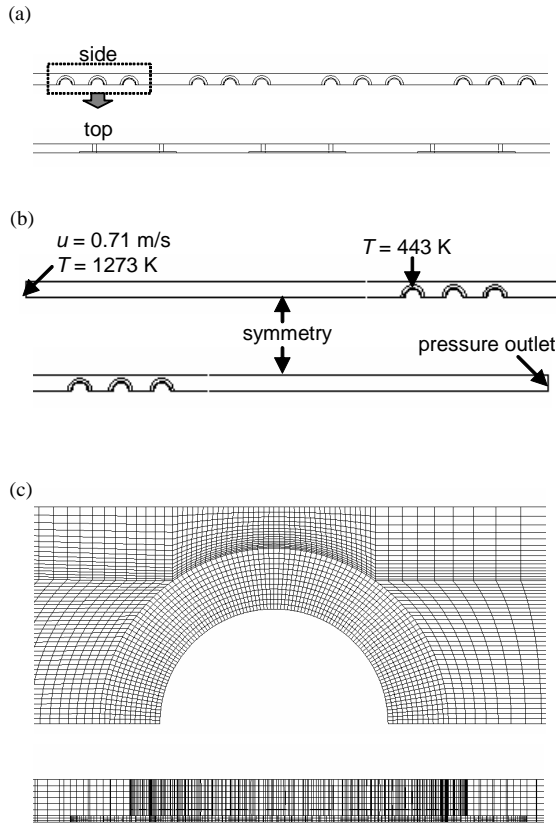


Fig. 3 Computational domain and grid system; (a) modeling of heat transfer module; (b) boundary conditions; (c) grid system.

Table 1 Module geometry

module	height	peak/in
A	9 mm	2
B	9 mm	3
C	12.7 mm	4

은 유동방향으로 3열의 관군으로 구성되며 유동방향의 길이는 500 mm이다. 4개의 모듈이 직렬로 연결되어 있으며 각 모듈에 설치된 환의 형상은 Table 1에 정리하였다. 모듈 안에 열전대를 설치하여 유동의 온도를 측정, 열설계 프로그램을 검증할 수 있도록 하였고 모듈에 공급되는 물의 양을 측정하여 증발량을 구하였다.

2.2 수치해석 기법

상관식이 반영하지 못하는 입구조건의 영향 및 실험으로 측정하기 어려운 유동현상을 파악하기 위

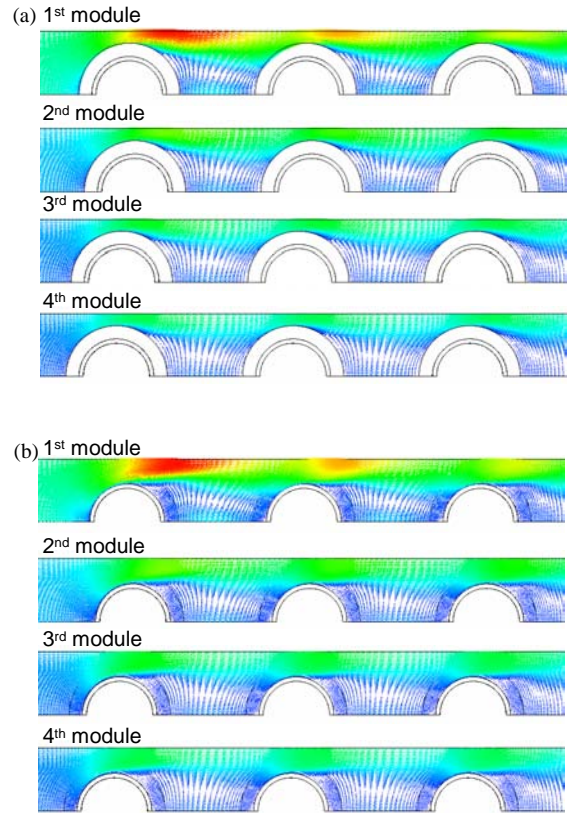


Fig. 4 Velocity vectors for the heat transfer module A; (a) at the enter of the fin; (b) at the gap between fins.

하여 수치해석을 수행하였다. 계산영역은 Fig. 3과 같이 유동방향으로 4개의 모듈을 포함하고 폭방향으로 환이 설치된 주기의 1/2을 계산영역으로 설정하였고 O 모듈에 대해서는 2차원 해석을 수행하였다. 유동방향의 입구와 출구로는 경계조건을 부과하기 위하여 입구와 출구에 각각 1.5 m의 가상 계산영역을 설정하였다. 격자계는 Fig. 3(c)와 같이 육면체 격자를 사용하였고 환이 설치된 모듈의 경우 약 400,000개의 격자를 사용하였다.

지배방정식은 비압축성 유체에 대한 연속, 운동량, 에너지 방정식으로 상용 소프트웨어인 FLUENT를 이용하였다. 난류모델로는 튜브에 의해 생긴 길이 차원이 지배적일 것으로 판단하여 RNG *k*-*e* 모형을 사용하였다. 환의 효율을 구하기 위하여 환의 전도를 고려한 복합열전달 해석을 수행하였고 재료로는 AISI 자료를 참고하여 환의 재료인 SPCC의 물성을 입력하였다. 연소가스의 밀도는 비압축성 이상기체 방정식으로 구하였고 열물성은 300, 500, 1,000 K의 자료를 입력, 구간별에 따라 선형적으로 변화하도록 하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 모듈별 성능 특성

실험을 수행한 Fig. 2(b)와 같은 형상에 대한 수치해석에 앞서 각 모듈의 특성을 파악하기 위하여 유동방향으로 같은 모듈을 배치한 형상에 대하여 수치해석을 수행하고 상관식과 비교하였다. 수치해석을 통해 구한 A 모듈의 유동장(Fig. 4)을 보면 편이 있는 경우, 없는 경우 모두 튜브 뒤에 와류쌍이 튜브 사이를 채우고 있는 것을 볼 수 있다. 상류에 위치한 모듈에서는 튜브 사이에서 유동이 강하게 가속되는 현상이 관찰되고 2번째 모듈 이후로는 완전 발달된 형태를 보인다.

모듈 입구의 온도를 1,000°C로 부과하고 각 형상별 첫 번째 모듈의 온도장을 Fig. 5에 제시하였다. 흰이 있는 위치에서는 첫 번째 전열관에서도 흰이 표면온도에 가까운 온도를 보여 흰 효율이 매우 높은 것을 볼 수 있다. 첫 번째 전열관 선단부 열경계

층은 각 형상이 비슷한 두께를 나타내지만 C 모듈의 경우 전열면적이 넓어 하류로 갈수록 급속히 주유동이 냉각되어 첫 번째 모듈을 통과하면 튜브표면온도에 가까운 분포를 갖게 된다. 흰 사이에서는 흰의 높이와 밀도가 증가할수록 열전달계수가 감소하여 C, B, A 모듈의 순서로 열경계층이 두꺼워지는 것을 관찰할 수 있다.

수치해석으로 구한 주유동의 온도변화를 Zhukauskas 상관식^(5, 6)으로 예측한 값과 Fig. 6에 비교, 제시하였다. 모듈이 모두 같은 흰 튜브로 구성되어 상관식과 수치해석 결과가 대체로 잘 일치하고 있다. 본 연구에서 실험한 모듈의 경우 흰 효율이 높아 흰 높이가 같은 A, B 모듈의 경우 밀도가 증가한 B 모듈이 하류로 진행할수록 온도가 빠르게 감소하고 흰 높이와 밀도가 가장 큰 C 모듈의 경우 급격하게 튜브 표면온도로 수렴하는 것을 볼 수 있다.

상관식으로 구한 Nusselt 수는 하류에서는 수치해석 결과와 비교적 잘 일치하지만 상류에서는 수

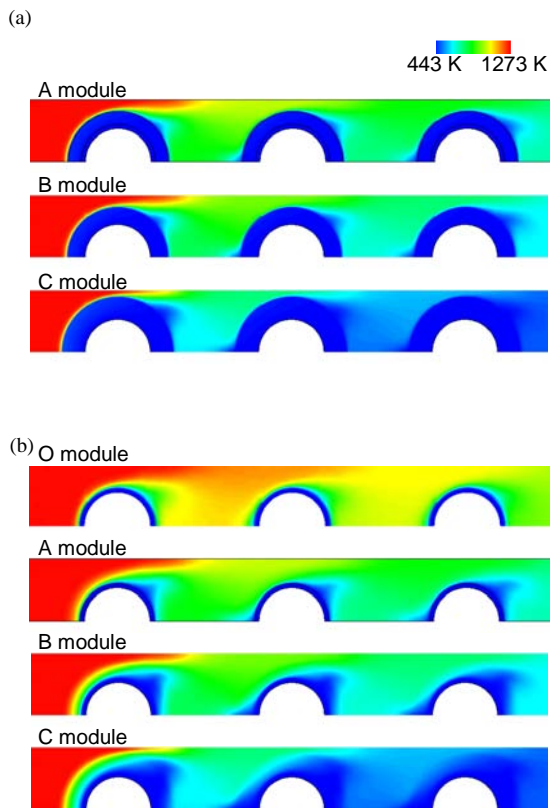


Fig. 5 Local temperature distribution at the 1st module; (a) at the center of the fin; (b) at the gap between fins.

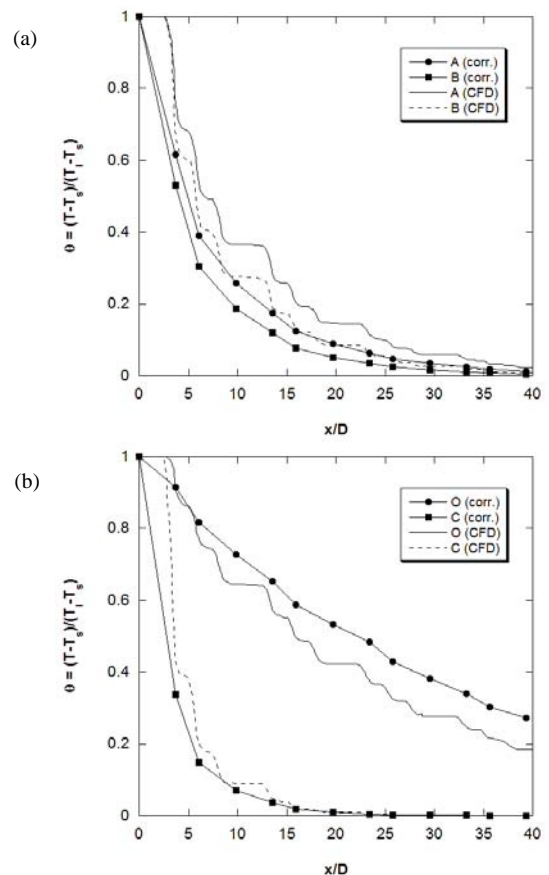


Fig. 6 Temperature variation along the streamwise direction; (a) A, B type module; (b) O, C type module.

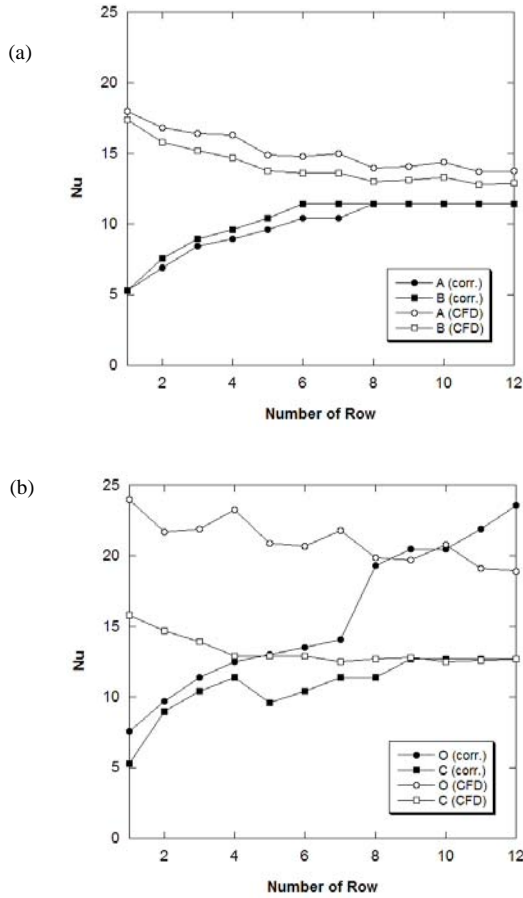


Fig. 7 Nusselt number of finned tubes for heat transfer module; (a) A, B type module; (b) O, C type module.

치해석 결과보다 작은 값을 나타낸다(Fig. 7). 상관식의 경우 튜브를 통과하면서 생기는 후류의 영향이 없는 상류측 튜브의 열전달계수를 낮게 예측하지만 수치해석 결과는 재순환 영역 이후에 생기는 경계층의 회복과 유동면적이 감소하면서 생기는 가속효과(Fig. 4) 등의 영향으로 높은 열전달계수를 보인다. 특히 이와 같은 영향이 집중되는 4, 7, 10번 열에서 열전달계수가 상승하는 현상을 관찰할 수 있다.

본 연구에서 레이놀즈 수는 200~800의 범위로 열전달계수가 작아 높은 흰 효율을 나타낸다(Fig. 5(a)). 따라서 흰 팁의 온도도 재료의 내열한계보다 훨씬 낮은 값을 나타낸다(Fig. 8). 수치해석 결과를 단일 흰에 대한 해석해⁽⁵⁾로 예측한 결과와 비교해보면, 실선으로 표시한 수치해석 결과가 원형 기호로 표기한 해석해보다 대체로 높은 값을 나타낸다. 특히 상류에 설치된 흰의 박리점 앞에서 큰 차이를 보인다.

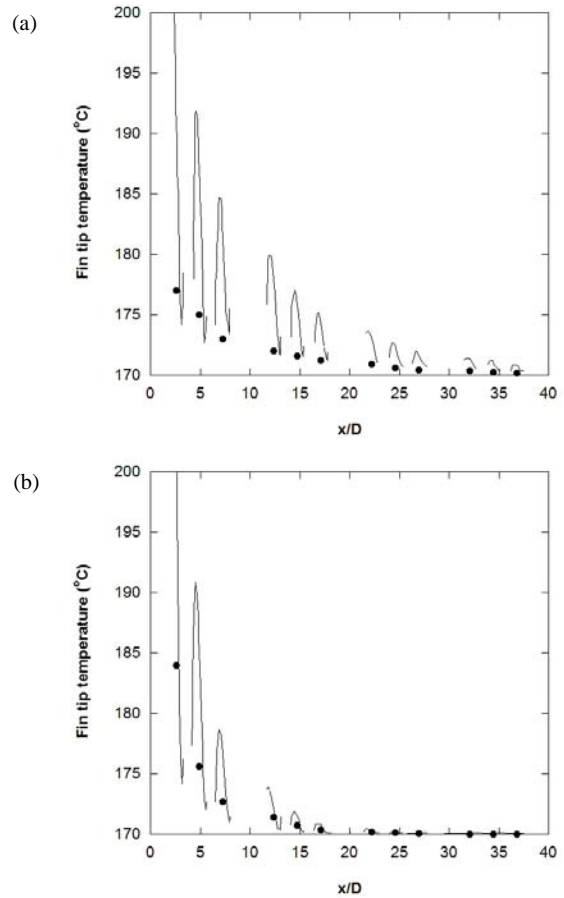


Fig. 8 Fin tip temperature prediction; —, CFD; ●, Analytic solution; (a) A type module; (b) C type module.

3.2 증발관 수치해석

수치해석 및 상관식에 의한 예측결과를 실험과 비교하기 위하여 측정을 통해 구한 입구온도를 경계조건으로 부과하고 OABC 순서로 모듈을 배열한 격자를 작성 수치해석을 수행하였다. 수치해석(CFD) 결과를 각 열에 대하여 실험식을 적용한 설계값(corr.), 각 모듈에 대해 관군 실험식을 적용한 설계값(bulk) 및 실험 결과(exp.)와 비교하여 Fig. 9 및 Fig. 10에 제시하였다.

유동방향으로의 온도변화를 보면(Fig. 9) 작동 압력에서의 증발 온도가 고정되어 있으므로 모든 결과가 대체로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 유로 면적 감소에 의한 가속이 발생하는 O 모듈 영역과 A 모듈의 첫 번째 튜브에서 수치해석이 상관식보다 실험과 잘 일치하는 것을 관찰할 수 있다.

증발관으로 전달되는 열량을 계산해 보면(Fig. 10), 실험결과가 수치해석이나 상관식에 의한 예측

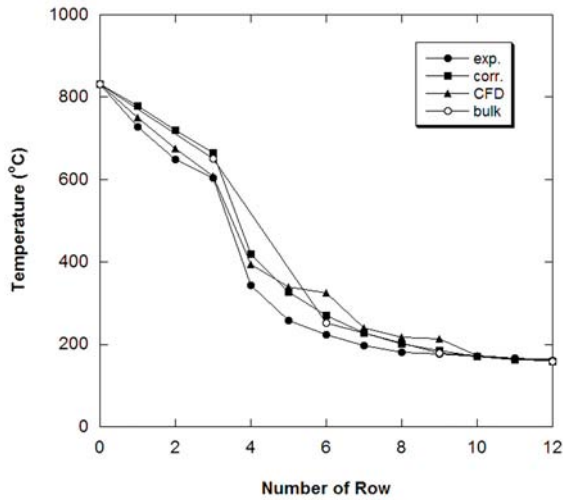


Fig. 9 Temperature drop along the heat transfer module.

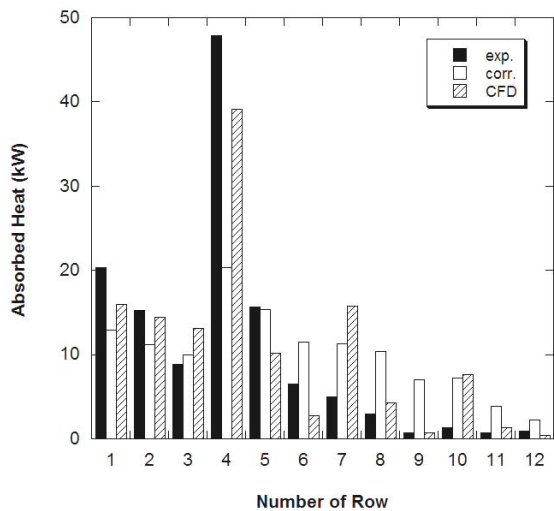


Fig. 10 The amount of heat transferred to the finned tubes of heat transfer module.

에 비해 상류에서 전달되는 열량이 큰 경향을 보인다. 나관으로 이루어진 첫 번째 모듈과 2번째 모듈의 첫 번째 열에서 수치해석이 상관식에 비해 실험 결과에 가까운 결과를 보인다. 대부분의 증기가 1, 2번 모듈에서 생산되어 3, 4번 모듈에 해당하는 7번 열 이후에서는 CFD에 의한 예측성능 향상이 명확하지 않은 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 다중버너 수관식 보일러를 위한

전열 모듈에 대하여 수치해석 및 상관식을 통해 성능을 예측 실험과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서 관찰한 흰 튜브 모듈의 경우 수치해석으로 구한 열전달계수가 상류에서 상관식으로 구한 값보다 큰 값을 보였다.

(2) 수치해석으로 예측한 흰 튜브의 온도는 해석해보다 박리점 앞을 중심으로 높은 값을 보였다.

(3) 수치해석으로 구한 열전달 특성은 단면이 변화하여 유동이 가속하는 위치에서 상관식보다 실험과 잘 일치하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 에너지·자원기술개발사업에 의해 수행되었고 교육과학기술부 신진연구지원사업에 의해 일부를 지원받았으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ahn, J., Hwang, S., Kim, J. J., and Kang, S. B., 2009, Heat transfer on the combustion chamber of water tube type boiler with multiple burners, *Trans. KSCFE*, Vol. 14, No. 2, pp. 77-83.
2. Ahn, J., Kim, J. J., and Kang, S. B., 2009, Combustion characteristics of a staged burner for a boiler, *Trans. KSME*, Vol. 33, No. 10, pp. 767-772.
3. Ganapathy, V., 1991, *Waste Heat Boiler Desk-book*, Prentice Hall, pp. 131-203.
4. Lee, K. J. and Han, J. H., 2006, Optimum design of waste heat boiler with water tube and three drums, *Trans. SAREK*, Vol. 18, No. 12, pp. 992-998.
5. 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. KSME*, Vol. 35, No. 2, pp. 215-220.
6. Incropera, F. P. and De Witt, D. P., 1990, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 3rd Ed., John Wiley and Sons.