

동심원관-pin fin 열교환기를 이용한 소형 증기보일러 대류실 설계

김성일* · 최상민**

The design of heat exchanger of small size steam boiler using the concentric annuli tube with pin fin

Sungil Kim*, Sangmin Choi**

ABSTRACT

The configurations of the heat exchanger of the boiler can be determined from the trade-off between the heat transfer area which is related to the capital cost and the pressure drop which is related to operating cost. In this study, 3.5 ton/hr small size marine boiler having concentric annuli tubes is the design boiler. To determine the optimizing point, according to diameter, number, length of tube, heat transfer, pressure drop, operating cost and capital cost have been calculated. Also, when the fin tube is replaced by the bare tube design parameters changed have been calculated.

Key Words : Concentric Annuli, Overall heat transfer coefficient, pressure drop, cost. fin tube

가정용 보일러나 선박용 보일러는 보일러 크기나 전열량을 살펴보면 소형 보일러로 구분된다. 소형 보일러의 주요 특징은 공간상의 제약이 많아 compact size로 설계가 된다는 점이다. 이렇게 소형 크기로 만들기 위해 보일러는 최소 면적으로 최대한의 열 교환이 이루어지는 것을 목표로 설계가 이루어진다. 따라서 단위 면적당 열 전달량이 큰 밀집형 열 교환기가(compact heat exchanger) 주로 사용된다. 밀집형 열 교환기는 보통 단위 면적당 전열 면적이 $700(m^2/m^3)$ 보다 큰 열교환기를 말한다. 이런 밀집형 열교환기에 대한 설계 기술은 많은 연구가 있었고 진행되는 상황이다. 하지만 이런 소형 보일러들 중에서 본 연구에서 다루는 선박용 보일러와 같은 경우에는 상대적으로 긴 튜브와 다소 큰 원통형의 fin이 달린 동심원관 으로 이루어진 비교적 큰 열교환기를 가지고 있다. 많은 Finned tube 형태 중에서 그림 Fig .1 과 같은 형태를 지닌 finned tube에 대한 설계 방법과 과정에 대한 연구가 미흡한 상황이다. 그래서 본 연구에서 다음과 같은 관점에서 증기발생량이 3.5ton/hr (열부하 2350kW) 선박용 보일러를 설계 하고자 한다. 열 교환기 설치에 따른 열 전달량에 대한 해석과 급기와 배기에서의 마찰손실에 의한 송풍기나 펌

프의 구동 동력에 따른 operating cost 그리고 보일러의 크기와 무게에 대한 관점으로 해석을 하고자 한다. 또한 bare-tube와 finned-tube에 대해서 전체 비용과 열 전달량에 대해서 비교해 보았다.

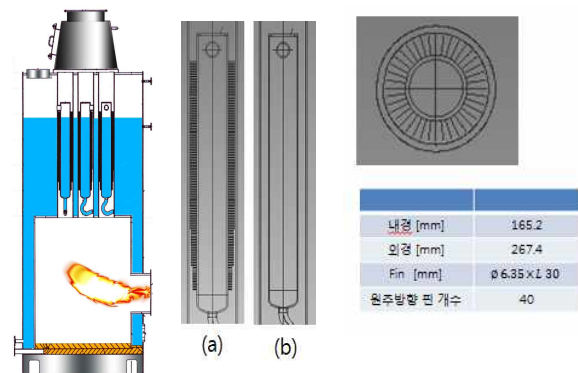


Fig. 1 Schematic diagram of marine boiler and finned and bare tube

열 교환기 성능 분석을 위한 가스 압력강하와 열전달 및 경제성을 계산하기 위해 모델을 단순화하여 아래와 같은 과정을 거쳐 계산을 하였다. 우선 총합 대류실 열전달 계수는 다음과 같다.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\eta \times h_i} + \frac{1}{\eta \times (h_{o,c} + h_{o,r})} + \frac{\varepsilon}{\eta}} \quad (1)$$

* 한국과학기술원 기계공학과
 ** 연락처, smchoi@kaist.ac.kr
 TEL : (042)350-3030 FAX : (042)-350-3210

여기서 η 는 총합 표면 효율, h_i 는 관내 열전달 계수, $h_{o,c}, h_{i,r}$ 는 각각 관외 대류 열전달 계수, 복사 열전달 계수, ε 는 관외 오염계수이다. 관외 오염계수는 0.0008로 가정 하였다.[1] 실제 계산을 해보면 관내 열전달 계수와 관외 복사 열전달 계수는 영향을 적게 미치고 관외 대류 열전달 계수에 의해 총합 열전달 계수에 대한 값이 결정되게 된다. 관외 대류 열전달 계수는 Nu를 이용하여 구할 수 있다. 동심원 관에 대한 Nu는 Davis[2]의 다음 관계식을 이용하여 계산하였다.

$$Nu = 0.038a^{0.15}(a-1)^{0.2}Re^{0.8}Pr^{\frac{1}{3}}\left(\frac{u}{u_w}\right)^{0.14} \quad (2)$$

여기서 a 는 외관과 내관 직경의 비다. u 는 가스 밀도, u_w 는 관 벽에서의 가스 밀도 이다. 그리고 Re 수를 구하기 위해 수력직경과 대류실 가스 유동 단면적은 다음과 같이 가정 하였다.

$$D_h = \frac{4A}{P}, A = A_o - A_i - A_{fin} \quad (3)$$

여기서 A 는 가스 유동 단면적은 외관단면적 (A_o)에서 내관 단면적(A_i)과 총 fin의 면적 (A_{fin})의 차로 구하였다.

보일러의 압력강하를 계산하기 위해 필요한 항목의 요소는 아래 표와 같다.

Table 1. Components of pressure drop

연소실	확대부(Δp_1)
	유동경로(Δp_2)
	축소부(Δp_3)
대류실	유동경로(Δp_4)
	확대부(Δp_5)
Stack	유동경로 (Δp_6)
	출구손실(Δp_7)
자연 통풍	자연통풍손실(Δp_8)

따라서 보일러의 전체 압력강하 식은 다음과 같다

$$\Delta p_{total} = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 + \Delta p_4 + \Delta p_5 + \Delta p_6 + \Delta p_7 + \Delta p_8 \quad (4)$$

여기서 확대 손실, 유동경로 마찰 손실, 축소 손

실 식은 다음과 같다.

$$\Delta p_1 = f \frac{\rho V^2}{2} = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \frac{\rho V^2}{2} \quad (5)$$

$$\Delta p_2 = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} \quad (6)$$

$$\Delta p_3 = f \frac{\rho V^2}{2} = 0.5 \left(1 - \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^{1.25}\right) \frac{\rho V^2}{2} \quad (7)$$

식(6)의 fin이 달린 동심원관에 대한 마찰계수는 $f = 0.053$ 으로 가정하였다. [2] 또한 $A_1 < A_2$ 이다. 한편 자연통풍손실은 고온가스에서의 밀도가 상대적으로 작기 때문에 유동 흐름이 발생하는데 보일러 입구에서 Stack 부분으로 갈수록 가스온도가 낮아져서 가스유동을 방해할 하기 때문에 손실로 분류 된다. 식은 다음과 같다.

$$\Delta p_8 = (\rho_1 - \rho_2)gh \quad (8)$$

하지만 위에 압력손실들 중에 보일러 전체 압력 손실을 대부분 차지하는 요소는 대류실 유동경로 손실과 연소실 확대부 손실이다. 각각 계산한 결과 전체손실의 약 75%, 18.3% 차지한다.

경제성 관점에서 살펴보면 Capital cost와 Operating cost를 고려하였고 다른 부수적인 비용은 고려하지 않았다. Capital cost(C_c)는 대류실 무게와 관련이 있고 Operating cost(C_{op})는 압력강하로 인한 pumping 동력과 관련이 있다. 각각 C_c, C_o 는 다음과 같은 식으로 계산하였다.[4]

$$C_c = V \times \rho \times C_{mass} \quad (9)$$

$$C_{op} = \Delta p_{total} \times \dot{Q} \times C_{elec} \times Y \quad (10)$$

여기서 $V(m^3)$ 는 tube와 fin의 부피, $C_{mass}(won/kg), C_{elec}(won/kwh)$ 는 각각 단위 질량당 가격과 전기요금이다. 그리고 $\rho(kg/m^3)$ 는 강관의 밀도, $\dot{Q}(m^3/s), Y(hr)$ 는 가스 유량과 전체 운영시간 이다. 본 연구에서는 C_{mass} 는 1200 won/kg, C_{elec} 는 67 won/kwh Y (hr)는 17520hr라 가정하였다.

위의 식과 과정을 토대로 $UA, \Delta p, cost$ 를 대류실 튜브의 개수와 튜브 직경에 따라 계산 하였다. 그 결과 아래 그래프와 같다. Fig. 1에서 튜

브의 개수가 증가 할수록 압력강하가 감소하는 것을 볼 수 있는데 이것은 압력강하를 결정하는 주요소 인 가스유동 속도 값이 관의 개수가 증가 할수록 감소하기 때문이다. 또한 관의 직경이 작을수록 대류실 가스 속도 값이 커지고 유동경로의 압력강하에서 D값이 작아지므로 L/D가 커지기 때문에 전체 압력강하는 커진다.

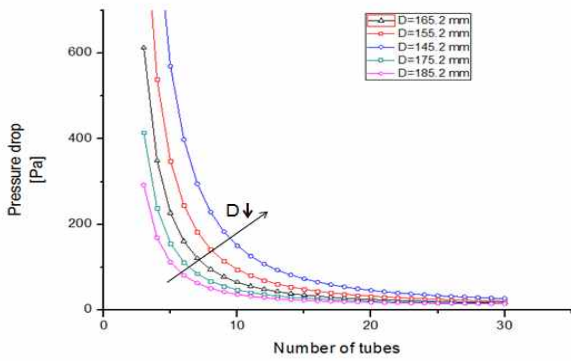


Fig. 1 Pressure number vs. number of tubes

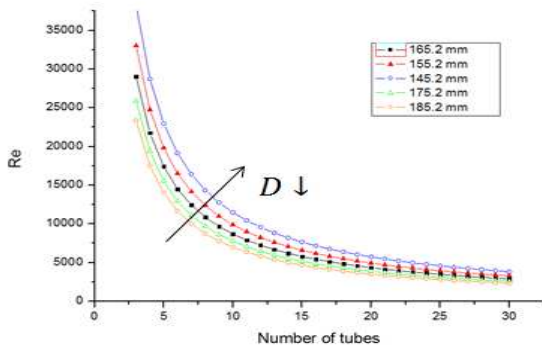


Fig 2 Reynolds number vs. number of tubes

Fig. 2와 Fig. 3를 살펴보면 튜브 개수가 증가할수록 관의 직경이 커질수록 가스 유동 속도가 작아지기 때문에 Re가 작아짐을 확인 할 수 있다. 그 결과로 인해 총합 열전달 계수가 작아진다. 하지만 관의 개수가 많아질수록 전열 면적이 커지므로 UA를 구해보면 증가한다. 즉 관의 개수가 많아질수록 열 전달 계수가 작아지는 것보다 전열 면적의 커지는 영향이 크기 때문에 전열량이 커진다.

Fig. 4는 관의 개수에 따른 capital cost와 operating cost를 나타내는데 관의 개수가 증가할수록 capital cost가 증가하는 반면에 앞에서 살펴본 것과 같이 압력강하가 작아지므로 operating cost가 작아진다. 즉 열전달량을 높이기 위해 전열 면적을 크게 할 경우 관의 개수가

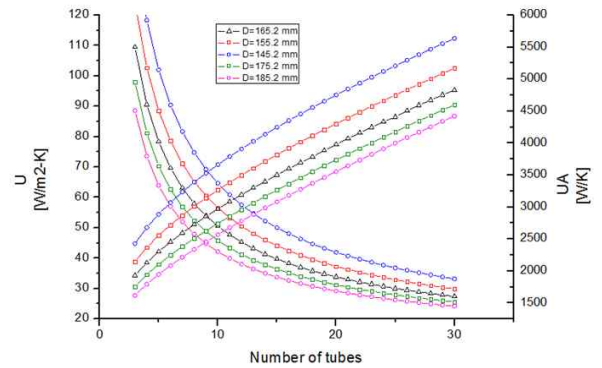


Fig. 3 U, UA vs. number of tubes

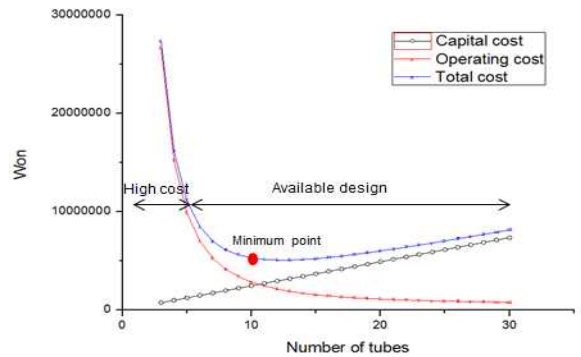


Fig. 4 Total cost vs. number of tubes

증가하게 되면 operating cost는 작아지는 대신에 capital cost가 증가하므로 설계자는 최적의 전열 면적을 결정해야 한다. 현재 3.5톤 증기 보일러의 관의 개수가 10개로 설계 되었는데 그림과 같이 관의 개수가 10개일 때 최소 cost를 나타내는 것과 동일한 결과임을 확인 할 수 있다. 또한 capital cost는 선형적으로 증가하는 반면에 operating cost는 지수 적으로 감소하기 때문에 관의 개수가 다소 적을 때 total cost가 상당히 크게 된다. 따라서 그 점 이하에서의 관을 설계할 경우는 비경제 적 이기 때문에 available design의 관 숫자 범위가 존재하게 된다.

Fig. 5를 살펴보면 관의 개수와 관의 직경을 일정하게 가정하고 관의 길이를 증가시키면 전열 면적은 증가하는 반면에 L/D가 커지므로 압력강하가 증가함을 확인 할 수 있다. 또한 총합 열전달계수는 거의 일정하다고 할 수 있다. 따라서 적절한 관의 길이가 선정되어야 한다.

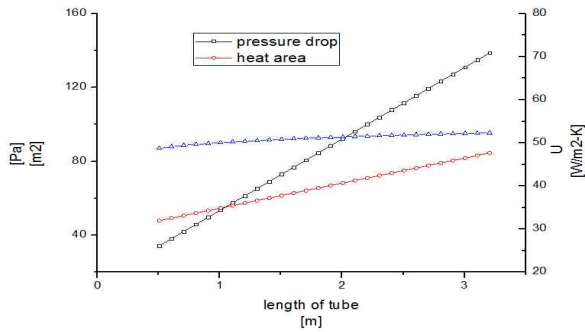


Fig. 5 Area, pressure drop, U vs. length of tubes

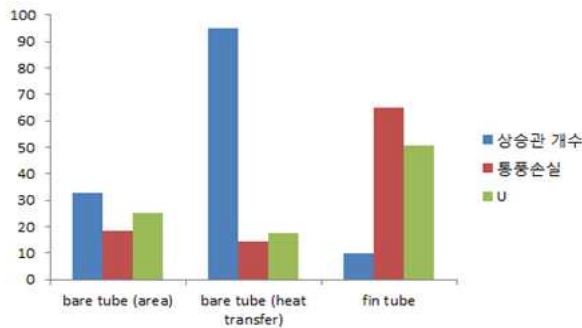


Fig. 6 bare tube vs. finned tube (U)

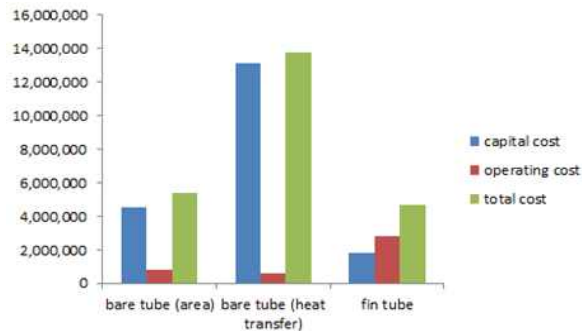


Fig. 7 bare tube vs. finned tube (cost)

Fig. 6 와 Fig. 7은 finned tube와 bare tube를 비교해 보았다. 본 연구에서는 bare tube를 두 가지 관점에서 살펴보았다. Finned tube와 같은 전열 면적이 필요한 경우와 같은 열 전달량을 전달하기 위해 필요한 bare tube 개수를 정한 경우이다. 그 결과 각각 33, 95개이다. 압력강하, 두 가지 경우의 총합 열전달 계수, capital cost, operating cost를 비교해 보았다. bare tube 일 경우 관의 개수가 많아지므로 finned tube 보다 압력강하가 작아지지만 가스유동 속도가 감소하기 때문에 총합 열 전달계수가 작아진다. 따라서

같은 열을 전달하기 위해서 finned tube와 같은 면적을 사용할 경우보다 상대적으로 더 많은 튜브가 필요하게 된다. Fig. 7을 살펴보면 bare tube의 operating cost가 finned tube 보다 적지만 관의 개수가 상대적으로 fin tube보다 훨씬 많이 필요하기 때문에 capital cost의 급격한 증가로 인해 total cost를 비교해보면 finned tube가 경제적이다.

본 연구에서 보일러의 대류실 튜브 설계 시 관의 개수, 길이 직경에 대한 열 전달 관점과 경제적인 관점에서 설계 방안을 제시 하였다. 보일러 전열 면적을 높이고자 많은 수의 tube를 사용할 경우 전열량은 커지고 압력손실이 작아진다. 하지만 총 열전달계수는 작아지고 capital cost가 증가할 뿐만 아니라 보일러 크기와 무게가 커지는 단점이 있다. 즉 대류실 성능과 관련이 있는 총합 대류 열전달 계수, 압력강하, 전열량, capital cost, operating cost, 그리고 소형 보일러에서 주요하게 고려 되어 할 사항인 크기와 무게 등 이런 사항들을 모두 고려하여 최적의 설계 점을 찾아야 하며 본 연구는 이러한 점들을 반영하여 다른 tube나 fin의 종류에 따라 열 교환기 설계 시 응용이 될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원 가치제조 기계사업단(BK21)의 지원을 받아 이루어졌습니다.

참고 문헌

- [1] “고효율 상용 보일러 기술개발을 위한 보일러 열설계 메뉴얼”
- [2] K. MAUBACH “ROUGH ANNULUS PRESSURE DROP-INTERPRETATION OF EXPERIMENTS AND RECALCULATION FOR SQUARE RIBS” Heat Mass Transfer. Vol 15. pp2489-2498. 1972
- [3] Nguyen Minh Phu, 이근식 “Characteristics of the Water Pressure Drop Considering Heat Transfer in the Evaporator and Condenser of a Water Chiller” 대한기계학회논문집 B권, 제35권 제12호, pp.1293~1300, 2011
- [4] E.S.Kim, C.H.Oh, S.Sherman “Simplified optimum sizing and cost analysis for compact heat exchanger in VHTR” Nuclear Engineering and Design 238(2008) 2635-2647
- [5] J.DIRKER, J.P.MEYER “Convective Heat Transfer Coefficients in Concentric Annuli” Heat Transfer Engineering, 26(2):38-44, 2005