

3드럼 수관식 폐열보일러의 최적설계

이 관 중^{*}, 한 진 호^{*}

일성엔지니어링(주), ^{*}한국산업기술대학교

Optimum Design of Waste Heat Boiler with Water Tube and Three Drum

Kwan-Jong Lee^{*}, Jin-Ho Han^{*}

Il Sung Engineering, Boyong Building, Sungsan-Dong, 208-1, Mapo-Gu, Seoul 121-846, Korea

^{}Korea Polytechnic University 3Ga-101, Jungwang-Dong, Shihung 429-793, Korea*

(Received October 10, 2006; revision received November 6, 2006)

ABSTRACT: This study is to optimize design parameters for waste heat recovery boiler with water tube and three drum. The design optimization considered here is to find the most economic dimension of the boiler considered which results in a minimum cost in producing a unit amount of steam per given period of operation. For this purpose, optimize design have to determine what are the main parameters of affecting the total cost of producing a unit amount of steam which is comprised of manufacturing cost of the boiler, operating cost of the fan etc.

Key words: Waste heat boiler with water tube(수관식 폐열보일러), Heat transfer coefficient(전열계수), Total annual cost(연간 총비용), Heating surface(전열면적), Interest rate(이자율)

기 호 설 명

A : 전열관 표면적 [m^2]
 h : 열전달계수 [$W/m^2 \cdot K$]
 Q : 열전달률 [W]
 T_{in} : 폐가스 인입온도 [K]
 T_{out} : 폐가스 출구온도 [K]
 V : 폐가스유량 [Nm^3/h]
 v : 폐가스속도 [Nm/s]

상첨자

* : 무차원 변수

하첨자

∞ : 덕트 유입공기

그리스 문자

ν : 동점성계수 [m^2/s]

1. 서 론

폐열보일러는 제철소, 각종 화학공장, 시멘트공장 등 제품생산과정에서 발생하는 배열, 소각로에서 발생하는 배열, 엔진에서 발생하는 배열 등의 냉각이나 열회수 목적으로 사용되고 있다. 또한, 고온 폐가스의 열을 이용하여 온수 또는 증기를 발생시켜 건물의 난방을 비롯하여 산업용 및 대규모의 발전용에 이르기까지 모든 분야에

† Corresponding author

Tel.: +82-2-325-2824; fax: +82-2-325-2679

E-mail address: kwanj@hanmail.net

이용되고 있다.

폐열보일러의 종류는 구조에 따라 원통 보일러, 수관 보일러 및 주철제 보일러 등 크게 3가지로 분류하고 있다.⁽¹⁾

수관식 보일러 타입의 경우 원통 보일러에 비해 타입선정, 설계방법, 수관배열방법 등 복잡한 구조를 가지고 있다.⁽²⁾

수관식 폐열보일러의 경우 동일한 가스량, 가스조성, 온도조건에서도 뚜렷한 설계기준이 없어 보일러 제작업체별 보일러의 기본사양이 서로 다르다. 예를 들면 보일러 수관의 폭의 피치, 길이의 피치, 수관의 높이, 수관의 직경, 수관의 배열 방법 및 수량이 다르고 가스속도도 다르게 나타나고 있다.⁽³⁾

일반적으로 폐열보일러는 본체구조에 따라 회수열량 및 압력손실 정도가 변하고, 제조비용 및 운전비용 등이 다르게 나타난다. 여기서 폐열보일러의 구조를 어떻게 하면 최저의 설비투자를 하여 최대의 폐열을 회수할 수 있는지는 폐열보일러 설계자나 사용자 등이 산업현장에서 항상 직면하게 되는 중요한 문제 중의 하나이다.

수관식 폐열보일러 최적설계의 의미는 최저의 설비투자 및 운전비용으로 최대의 폐열을 회수하여 최대의 증기를 발생시키는 보일러로 정의하고자 한다.

본 연구내용은 국내에서 제작되고 있는 실제 수관식 폐열보일러를 모델화하였고, 보일러 설계

시에 고려해야 하는 폐열조성, 가스량, 가스온도는 국내에서 실제 사용하고 있는 조건을 기준으로 하였으며, 제작조건 및 법적 조건 등 설계제한조건을 고려한 주요 설계변수의 최적조건을 도출하는 데 노력하였다.

최적조건 기준은 폐열보일러의 폐열을 최대한 회수하면서 설계제한조건들을 만족하면서 투자비용 및 운전비용이 최소가 되는 조건을 기준으로 하였다.

이러한 기준의 최적설계조건을 선정하기 위하여 시뮬레이션 프로그램을 작성하여 폐열회수에 영향을 미치는 설계변수를 분석하여, 설계변수의 변화에 따라 폐열보일러에서는 전열 및 압력손실의 변화, 보일러의 크기 및 변화 등을 작성된 프로그램을 이용하여 분석하고 투자비의 연간비용이 최소가 되는 설계조건을 고찰하였다.

2. 수관식 폐열보일러 특성

본 연구의 대상인 수관식 폐열보일러는 Fig. 1과 같이 윗부분에는 1개의 기수드럼과 아랫부분에는 2개의 수드럼이 구성되어 있으며, 기수드럼과 수드럼 사이에는 수관으로 구성되어 있다. 수관 외부로는 방열손실을 줄이고, 효율을 높이기 위해서 수냉벽을 설치하였으며, 이 수냉벽은 수관 사이를 판으로 용접하여 견고하게 구성되어 있다.

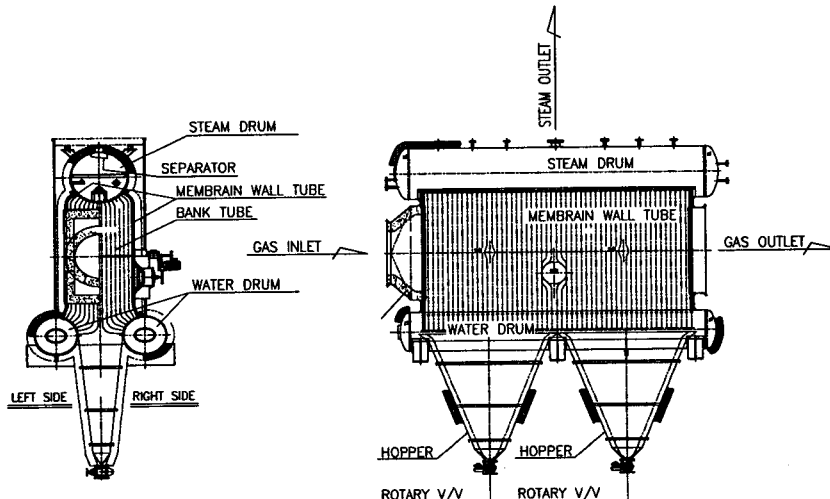


Fig. 1 Schematic diagram of waste heat boiler with water tube.

수관의 배열은 폐가스의 분진부착을 최소화하기 위해서 사각 배열방식으로 하였으며, 고온의 폐가스가 폐열보일러 수관을 통해 분진 및 환경처리시설을 차례로 통과하고 유인송풍기와 연돌을 통하여 대기로 배출되며, 고온의 폐가스의 열이 수관을 지나면서 수관 안의 물에 전달되어 소요 증기를 발생시킨다.

기수드럼은 수부와 증기부로 구분되어 있으며, 드럼 안에 기수분리기를 설치하여 증기와 수분을 분리하여 발생증기의 건도를 높이는 구조로 구성하였다.

이와 같은 수관식 폐열보일러는 주요한 구성요소가 모두 동체 내부에 설치되므로, 각 구성요소가 독립적이지 않고 서로 밀접한 관계에 있으며, 한 구성요소의 제원이 다른 구성요소의 제원 결정에 절대적인 영향을 미친다.

3. 폐열보일러 최적화 설계

3.1 최적화 설계의 개념 및 방법

폐열보일러의 설계는 폐가스의 조성 및 가스량, 가스 온도조건, 그리고 소요증기의 압력 및 용량, 주문자의 요구조건, 제조공정의 특성, 원재료의 규격 등 여러 가지의 설계사양을 만족하고, 또한 정부 또는 관계기관이 규정하고 있는 법적 조건을 충족하는 구조제원을 결정하는 일련의 과정이라 할 수 있다.

그러나 이러한 조건들을 모두 충족할지라도 폐열보일러 설계자가 폐열보일러 각 구성요소의 구조제원, 예로서 수관의 직경, 수관의 폭 방향의 피치 및 길이 방향의 피치, 수관의 배열방법 등을 어떻게 결정하느냐에 따라서 전열성능 및 압력손실이 변하기 때문에 보일러의 크기와 제작비용 및 운전비용 등이 서로 다른 결과의 설계가 가능하다. 그러므로 여러 가지 보일러 제원에 대한 평가기준이 요구되며, 이 평가기준은 경제성이라 할 수 있다. 즉, 폐열가스로부터 동일한 열량을 흡수할지라도 관련 비용이 최소가 되는 보일러 설계가 필요하며, 이러한 설계를 최적화 설계로 정의할 수 있다.

폐열보일러는 모든 비용이 증기의 생산원가에 귀결되므로 최적화 설계를 위해서 증기의 생산원가에 영향을 미치는 설계변수를 찾아내고, 이 설

계변수의 변화에 따라 증가되는 비용과 감소되는 비용을 일정기준의 단위시간당 비용(일반적으로 연간비용)으로 산출하여, 이 비용의 합이 최소가 되는 설계변수의 조건을 고찰하기에 가능하다.

3.2 시뮬레이션 프로그램의 구성

최적설계를 위해서 사용된 시뮬레이션 프로그램은 국내보일러 메이커에서 실제 사용되고 있는

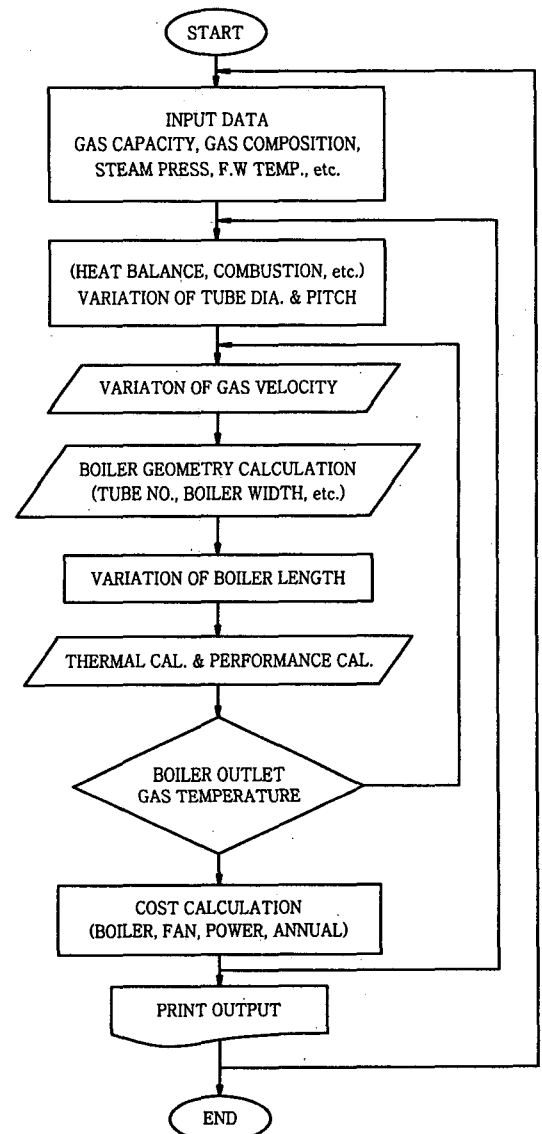


Fig. 2 Flow chart of simulation program.

프로그램이며, 이 프로그램의 시뮬레이션 결과와 설치 완료된 폐열보일러 성능시험 결과를 비교해보면 증기용량 및 보일러 후단의 배기가스 온도 차이는 3% 이내로 신뢰할 수 있는 프로그램이다. 이에 본 논문도 실제 폐열보일러 설계에 사용되고 있는 당사의 열 설계용 시뮬레이션 프로그램을 사용하였다.

본 연구에서 사용한 프로그램의 흐름도를 Fig. 2에 명기하였다.

3.3 시뮬레이션에 적용한 입력자료

수관식 폐열보일러의 중요한 설계변수인 수관의 폭, 길이 방향의 피치와 가스속도의 최적조건을 규명하기 위하여, 폐열보일러 용량 7.47 t/hr, 폐가스량은 13,543 Nm³/hr으로 고정시키고, 폐열보일러 연간가동시간별(3,000, 4,000, 5,000, 6,000, 7,000, 8,000 Hr/Yr) 조건, 설계변수 변화에 따른 보일러의 전열성능과 압력손실의 변화, 폐열보일러의 크기와 송풍기 용량의 변화, 이들과 관계되는 보일러 제조비용과 송풍기 가격의 변화 및 연간비용 등의 변화를 시뮬레이션하였다.

Table 1은 시뮬레이션 과정에서 적용한 입력자료를 정리한 것으로써 폐열보일러의 운전압력은 국내 수관식 폐열보일러의 평균 운전압력인 2MPa로 하였고,⁽²⁾ 폐열보일러 출구 배기가스의 온도는 일반적으로 선진국에서 적용하고 있는 설계기준

Table 1 Input data for simulation

Operation pressure	2 MPa	
Steam temperature	Saturated steam	
Boiler capacity	7.47 t/hr	
Waste gas flow	13,543 Nm ³ /hr	
Inlet gas temp.	1,100℃	
Outlet gas temp.	264℃	
Gas composition (Vol. %)	CO ₂	8.24%
	H ₂ O	4.21%
	SO ₂	0.01%
	O ₂	10.27%
	N ₂	77.27%
Temperature of feed water	20℃	
Reference temperature	20℃	
Life time of boiler	8 years	
Interest rate	12%	

을 적용하여, 운전압력 2MPa의 포화온도인 214℃보다 약 50℃ 높은 264℃로 하였다.⁽³⁾

폐가스의 가스조성은 연소되는 소각물질에 따라 변할 수 있으나 국내 소각물질의 가스량 조성 중 N₂ 성분이 77.3%이고 기타 가스성분 변화에 따라 비열차이는 크게 변하지 않으므로 실제 수관식 폐열보일러에 사용한 폐가스조성을 사용하였으며, 연간비용 산출시의 보일러의 기준수명은 국내 폐열보일러의 수명인 8년으로 하였고, 이자율은 현재 적용되고 있는 12%를 기준하였다.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

4.1 설계변수가 전열계수에 미치는 영향

용량 7.47 t/hr 폐열보일러에서 수관의 폭 방향의 피치 및 길이 방향의 피치 변화에 따른 수관에서의 복사, 대류 및 총괄 전열계수의 변화를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 3은 수관의 길이 방향 피치를 98 mm로 고정하고, 폭 방향의 피치를 변화시킨 경우로서, 폭 방향의 피치가 커질수록 복사전열계수는 증가하고, 대류전열계수는 감소함을 보여주고 있다. 한

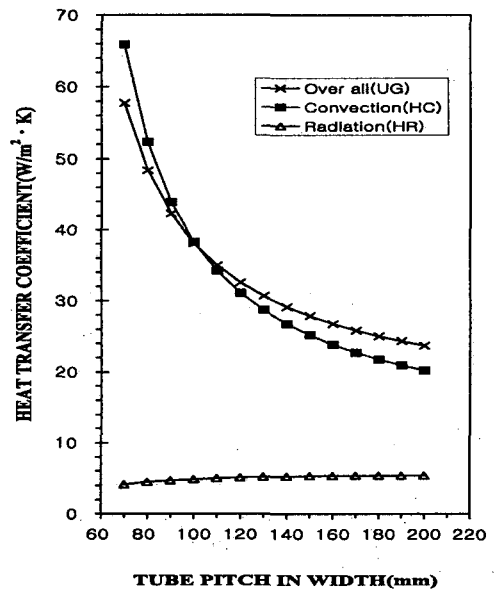


Fig. 3 Variation of heat transfer coefficient with tube pitch in width (capacity: 7.47 t/hr, tube pitch in length: 98 mm).

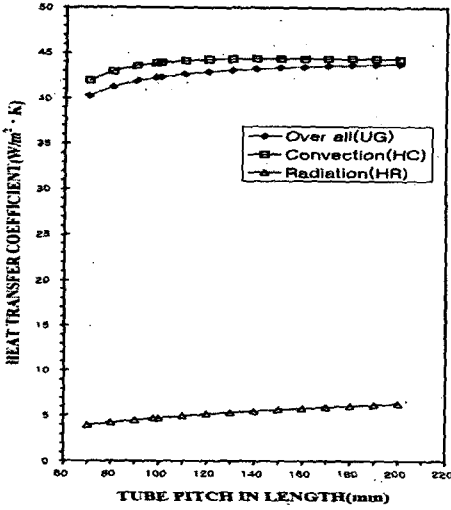


Fig. 4 Variation of heat transfer coefficient with tube pitch in length (capacity: 7.47 t/hr, tube pitch in width: 90 mm).

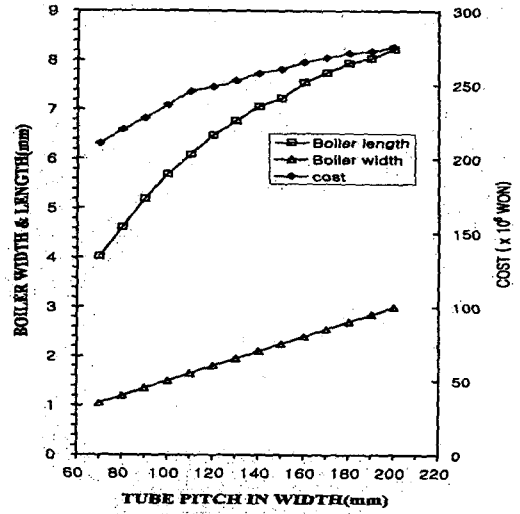


Fig. 5 Variation of boiler width, length and cost with tube pitch in width (capacity: 7.47 t/hr, tube pitch in length: 98 mm).

편 그림에서와 같이 수관에서의 전열은 복사에 비하여 대류전열이 상대적으로 매우 큰 것을 알 수 있으며, 이에 따라 총괄 전열계수도 대류와 유사하게 수관의 폭 방향 피치가 증가함에 따라 감소하고 있다. 그러나 복사전열계수의 상승으로 인하여 감소율이 대류에 비하여 적게 나타나고 있다.

Fig. 4는 수관의 폭 방향의 피치를 90 mm로 고정하고, 길이 방향의 피치를 변화시킨 경우이다. 총괄 전열계수는 대류와 유사하게 폭 방향 피치가 98 mm까지는 급격하게 상승하다가 그 이후부터는 상승 곡선이 완만하게 진행하다가 110 mm 이후부터는 거의 변화가 없다. 또한 두 그림의 결과로서 폭 방향의 피치 변화에 대한 전열계수는 길이 방향의 피치 변화보다 더욱 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다.

4.2 수관의 폭 피치 변화가 폐열보일러의 크기 및 가격에 미치는 영향

Fig. 5은 7.47 t/hr 용량의 폐열보일러에서 길이 방향의 피치를 98 mm로 고정하고, 폭 방향의 피치 변화에 따른 보일러 폭과 길이 및 보일러의 가격변화를 나타낸 것이다.

그림에서 폭 방향의 피치가 커짐에 따라 보일러 폭과 길이가 직선적으로 증가함을 보여주고 있

다. 한편 수관의 폭 방향의 피치가 커짐에 따라 보일러의 가격도 비례적으로 증가한다. 즉, 폐열보일러의 가격은 폭 방향의 피치가 커질수록 증가하는 것으로 분석된다.

4.3 가스속도가 폐열보일러의 전열면적에 미치는 영향

Fig. 6는 7.47 t/hr 용량의 폐열보일러에서 길이 방향의 피치를 98 mm로 고정하고, 폭 방향의 피치 변화에 따른 가스속도와 전열면적 변화를 나타낸 것이다.

그림에서 폭 방향의 피치가 증가함에 따라 가스속도는 급격하게 감소하는 반면, 전열면적은 거의 직선에 가깝게 기울기가 증가한다.

한편 가스속도 2 Nm/sec까지는 급격하게 감소하고, 1.5 Nm/sec 이하에서는 변화가 적게 나타나고 있다. 따라서 보일러의 전열면적이 폭 방향의 피치와 가스속도 변화에 좌우되고 있음을 보여주고 있다.

4.4 수관의 폭 방향 피치 변화에 따른 연간 총비용

Fig. 7은 연간 가동시간이 7,000 Hr/Yr 기준으로

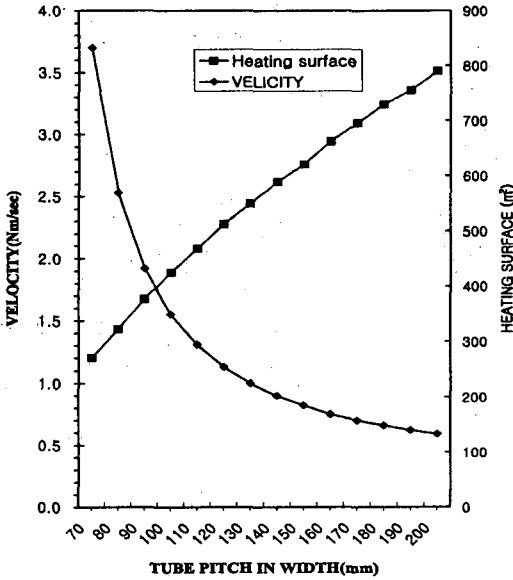


Fig. 6 Variation of heating surface and velocity with tube pitch in width (capacity: 7.47 t/hr, tube pitch in length: 98 mm).

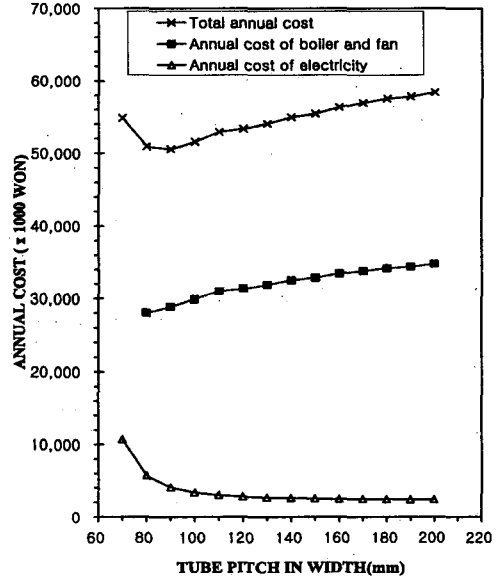


Fig. 7 Variation of annual cost with tube pitch in width (capacity: 7.47 t/hr, tube pitch in length: 98 mm).

하였고, 길이 방향의 피치를 98 mm로 고정하고, 폐열보일러 용량을 7.47 t/hr, 폐가스량을 13,543 Nm³/hr로 가동했을 경우에 수관의 폭 방향의 피치 변화에 따른 폐열보일러의 연간 전력비, 연간 고정비, 연간 총비용 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 수관의 폭 방향의 피치가 커짐에 따라 연간 전력비는 점점 감소함을 나타내고 있으며, 고정비는 반대로 점점 증가하고 있음을 나타내고 있다.

연간 전력비의 변화와 연간 고정비의 변화에 따라 연간 총비용은 90 mm까지 감소하였다가 100 mm부터는 증가한 곡선을 이루고 있다. 여기서 총비용이 최소로 되는 수관의 피치는 90 mm와 100 mm임을 알 수 있다.

4.5 가동시간에 따른 최적 수관의 폭 방향 피치 변화 및 최적 가스속도 변화

Fig. 8은 연간 가동시간에 따른 최적 수관의 폭 피치 및 최적 가스속도 변화를 나타내었다. 그림에서 연간 가동시간이 증가함에 따라 최적 수관의 폭 방향의 피치 곡선이 점점 커지고, 최적 가스속도 곡선은 점점 감소함을 나타내고 있다.

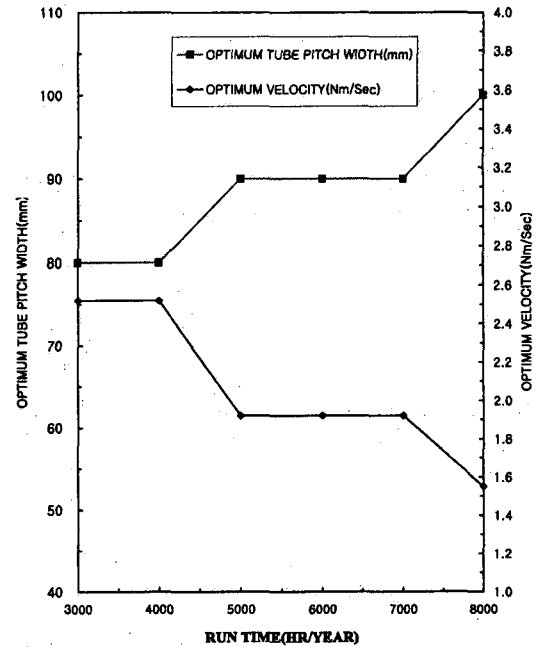


Fig. 8 Variation of optimum tube pitch and optimum gas velocity at each annual running time of boiler (capacity: 7.47 t/hr, tube pitch in length: 98 mm).

5. 결 론

3드럼 수관식 폐열 보일러의 최적설계를 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 수관식 폐열보일러의 최적화 설계를 위해서는 수관의 폭 방향의 피치를 보일러의 가동시간에 따라서 다르게 적용하는 것이 좋으며, 수관의 최적 피치는 폐열보일러의 연간 가동시간과 반비례하여 감소하고, 연간 가동시간별 수관의 최적 폭 방향의 피치는 다음과 같이 도출되었다.

Run time (Hr/Yr)	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000
Pitch in width (mm)	80	80	90	90	90	100

(2) 최적의 가스속도는 운전시간에 반비례 관계를 보이고 있으며, 운전시간별 가스속도의 최적조건은 다음과 같이 도출되었다.

Run time (Hr/Yr)	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000
Optimum gas velocity (Nm/s)	2.52	2.52	1.92	1.92	1.92	1.55

(3) 수관식 폐열보일러의 운전시간이 짧은 경우에는 최적조건이 고정비 영향을 받고, 반대의 경우에는 전력비의 영향을 받는 것으로 나타났

다. 또한, 가동시간의 증가에 따른 최적속도는 감소하고, 최적 수관의 폭 방향의 피치는 비례적으로 증가됨을 알 수 있다.

참고문헌

1. Korea energy management corporation, 2004, Boiler and Pressure Vessel Code, Vol.1, p. 142.
2. Lee, C. Y., 1989, Technology development for high efficiency LNG fired boiler, Korea Institute of Energy Research, p. 25.
3. Lee, K. J., 1995, Optimum design of waste heat boiler with fire and smoke tube, p. 2.
4. Chadderton, D. V., 1981, Optimization of fire-tube shell boiler design parameters, J. Inst. of Energy, Vol. 5, pp. 205-212.
5. Sung, D. Y., 1992, A study on the optimum design of fire and smoke tube boiler through computer simulation, p. 33.
6. Ganapathy, V., 1981, Optimum design of waste heat boiler, Hydrocarbon Processing, Vol. 7, pp. 167-168.
7. Lee, C. Y., 1989, Manual for boiler thermal calculation, Korea Institute of Energy Research, pp. 5-175.