

수치해석을 이용한 HRSG(Heat Recovery Steam Generator) 증기 드럼 설계

안 준,^{*1} 이 윤 식,² 김 종 진²

STEAM DRUM DESIGN FOR A HRSG BASED ON CFD

J. Ahn,^{*1} Y.S. Lee² and J.J. Kim²

HRSG (Heat Recovery Steam Generator) is a boiler to recover heat from the exhaust gas of an engine and to generate steam for more power generation or process. For the HRSG, water-tube type boiler is commonly adopted to accommodate the working pressure or capacity requirement of the system. The water-tube type boiler has a steam drum to separate steam from the water-steam mixture supplied from the evaporator tube (riser). The drum should be sized properly to separate the steam by the gravity and auxiliary internals, such as a demister, which are installed to filter the steam. To size the steam drum and to estimate the filter efficiency of drum internals, the velocity distribution inside the drum needs to be identified. In the present study, a series of CFD has been conducted to find the velocity distributions inside steam drums for conventional HRSGs and water-tube type industrial boilers. The velocity distributions obtained from the simulation have been normalized and a correlation to predict them has been found. The correlation is applied to the steam drum design by determining a proper position of a demister to show proper separation performance.

Key Words : 열회수 증기발생장치(HRSG), 전산유체역학(CFD), 증기 드럼(Steam Drum)

1. 서 론

최근 에너지 자원의 고갈과 온실효과에 의한 기후 변화가 세계적인 문제로 제기되면서 장기적으로는 이산화탄소의 배출이 없는 신재생에너지의 개발과 보급이 단기적으로는 에너지의 합리적 이용이 요구되고 있다. 에너지의 합리적 이용이라는 측면에서 고온이 요구되지는 않지만 많은 에너지를 사용하고 있는 증기 생산이나 냉난방에는 가스터빈과 같은 원동기에서 전기를 생산하는 등의 유효 일을 얻은 후 발생하는 배열을 활용하는 방안이 제안되었다. 이러한 방안의 대표적인 예로 열병합 발전이나 복합 발전이 있다. 열병합 발전은 배열을 냉난방에 활용하는, 복합 발전은 배열을 이용하여 증기를 생산하여 증기 터빈을 가동하는 방식으로 추가적인 전기를

얻는 발전 시스템을 의미한다[1].

온수를 생산하는 열병합 발전을 제외하면 열병합 발전이나 복합 발전에는 원동기의 배열을 활용하여 증기를 발생시키는 보일러가 설치되는데 이를 열회수 증기발생장치(HRSG: Heat Recovery Steam Generator)라고 한다 (Fig. 1(a)). 산업용 보일러에는 노통연관식, 관류식, 수관식이 주로 사용되는데 HRSG에도 이 세 가지 방식이 모두 사용된다. 그러나, 복합발전의 경우와 같이 고압의 증기를 생산하는 경우나 용량이 큰 경우에는 주로 수관식이 적용되고 있다[2].

수관식 보일러는 Fig. 1(b)와 같이 상승관, 증기드럼, 강수관으로 구성된다. 상승관에서는 원동기로부터 얻은 배가스로부터 열을 전달받아 증기가 생산되어 기포율 0.8 부근인 상태로 증기드럼에 공급된다. 증기드럼에서는 증기와 포화수의 밀도차를 이용하여 증기를 분리하여 수요처에 공급하고 분리된 포화액은 강수관을 통해 재순환시키게 된다. 재순환 메커니즘은 HRSG의 배치 방식에 따라 차이가 있는데 Fig. 1(b)에 제시한 수평형 HRSG의 경우 별도의 동력 없이 밀도차에 의한 자연대류에 의해 재순환이 이루어진다[3].

접수일: 2010년 12월 11일, 수정일: 2011년 2월 11일,

게재확정일: 2011년 2월 14일.

1 정희원, 국민대학교 기계시스템공학부

2 한국에너지기술연구원

* Corresponding author, E-mail: jahn@kookmin.ac.kr

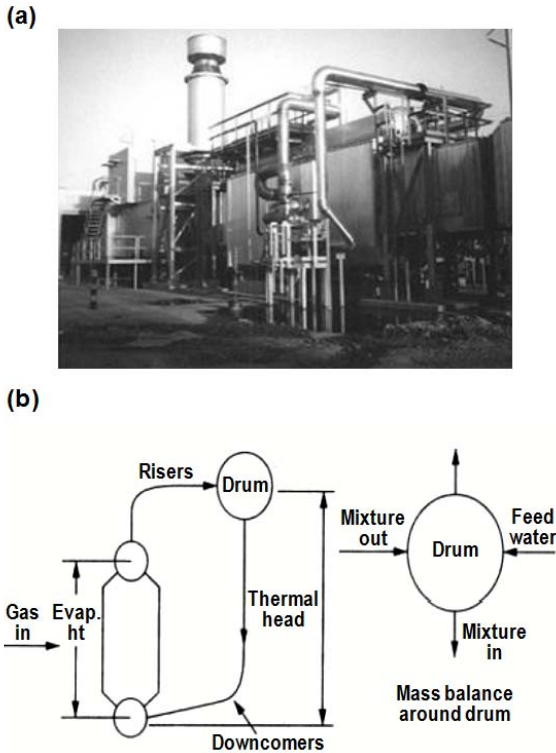


Fig. 1 Horizontal type HRSG (Heat Recovery Steam Generator) [2]; (a) photograph; (b) schematic diagram

증기드럼은 상승관에서 공급된 기수혼합물로부터 증기를 분리하는 역할을 한다. 상승관에서 공급된 기수혼합물은 증기드럼 내부에 표준 수위 (NWL: Normal Water Level)를 형성하게 되고 증기는 증기드럼 상부에 형성된 증기 공간을 거쳐 증기 출구를 빠져 나간다 (Fig. 2). 표준 수위면은 Fig. 2(a)와 같이 일반적으로 증기 드럼의 중앙에 위치하게 된다. 표준 수위면 부근에서는 상승하는 기포가 파괴되면서 액적이 생기게 되는데 액적이 증기에 포함되면 증기의 건도를 떨어뜨리므로 증기드럼의 체적은 증기 공간에서 액적이 분리될 수 있도록 설계되어야 한다[4].

증기드럼에서의 기수분리는 기본적으로 기체와 액체의 밀도차이를 이용하는데 HRSG의 작동압력이 증가하면 기체와 액체의 밀도차가 감소하여 중력분리가 어려워진다. 또한 증기 터빈을 구동하는 경우와 같이 높은 건도가 요구되는 경우 드럼 내부에 필터나 원심분리장치와 같은 내부장치(Drum internal)를 설치하기도 한다(Fig. 2). 작동압력이 증가하면 밀도가 증가하여 단위 체적에서 분리할 수 있는 증기의 질량은 증가하는 것은 알려져 있지만(Fig. 3(a)) 정량적인 이론이 정립되어 있지는 않고 증기 드럼의 체적 선정 및 내부 장치 설계

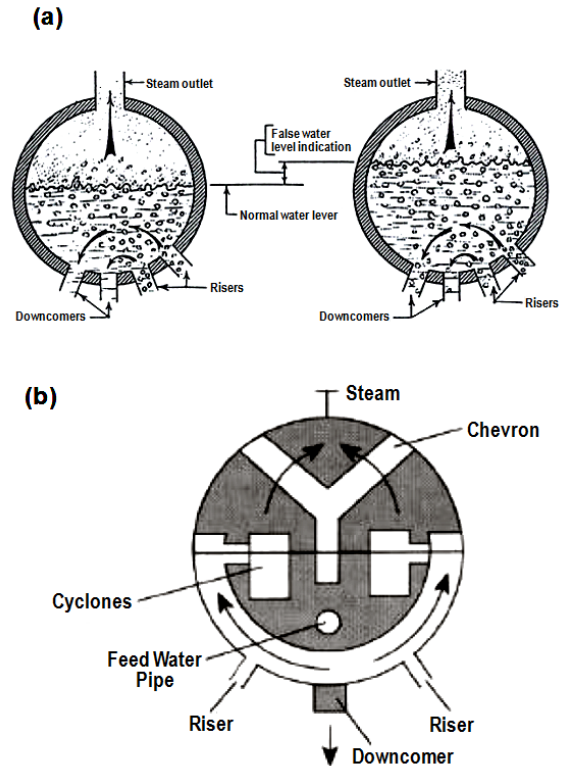


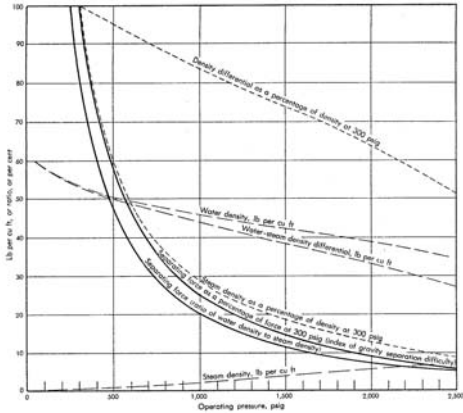
Fig. 2 Steam drum for a HRSG; (a) gravity separation [4]; (b) drum internals [2]

는 경험에 의존하고 있다[5].

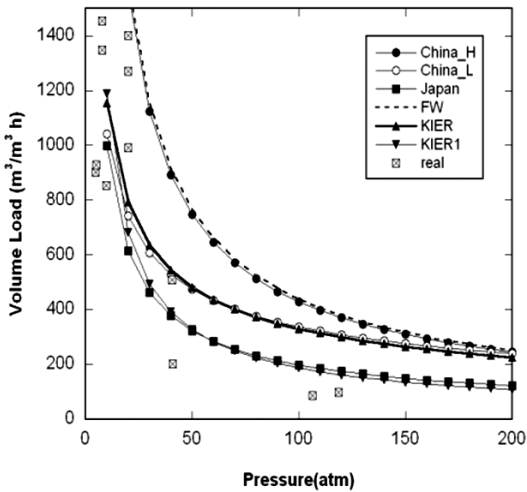
드럼의 체적은 단위체적에서 분리용량을 작동 압력에 따라 산정한 경험식이 사용되는데[6] 문헌에 나타난 경험식은 Fig. 3(b)에 보인 것과 같이 식에 따라 2배 정도까지 차이를 나타내고 있다. 또한 원심분리장치나 필터와 같은 내부 장치를 설계하기 위해서는 액적의 크기와 증기 드럼 내부의 속도분포 등의 정보가 필요하지만 현재까지 드럼의 중횡비나 작동 압력 등에 따른 관계식 등이 제시된 바가 없어 이 또한 경험에 의존하고 있다.

이에 본 연구에서는 수치해석을 통해 증기 드럼 내부의 속도분포를 구하고 증기 드럼의 기하형상이나 작동압력 등의 운전 조건에 따라 속도 분포를 예측할 수 있는 관계식을 도출하고자 한다. 증기 드럼은 산업용에서 발전용까지 다양한 용량과 작동압력에 사용되므로 본 연구에서는 Table 1에 제시한 11가지의 HRSG 및 수관식 보일러 증기드럼의 설계 자료를 확보하여 수치해석을 수행하였다.

수치해석 결과에서 증기출구 중심축 위치에서 수직방향 속도 성분을 추출하여 NWL에서의 Reynolds 수, 증기 출구에서



(a)



(b)

Fig. 3 Steam separation capacity per volume depending on the operating pressure; (a) experimental data [4]; (b) empirical correlations in comparison with design data

Table 1 Reference steam drums

Category	Model	Working Pressure	Capacity
Industrial (Commercially Available)	HS 1	1 MPa	6 ton/hr
	HS 2	10 kg/cm ²	10 ton/hr
	HS 3	10 kg/cm ²	30 ton/hr
	HS 4	12 kg/cm ²	60 ton/hr
Industrial (Research Purpose)	Multi 1	5 atm	70 kg/hr
	Multi 2	0.8 MPa	2 ton/hr
	Multi 3	0.8 MPa	6 ton/hr
HRSG for CHP	Samsung S	0.85 MPa	4,276 kg/hr
	Samsung L	0.85 MPa	9,275 kg/hr
Energy Plant	Davy	5.5 MPa	135 ton/hr
	ABB	10 MPa	70 ton/hr

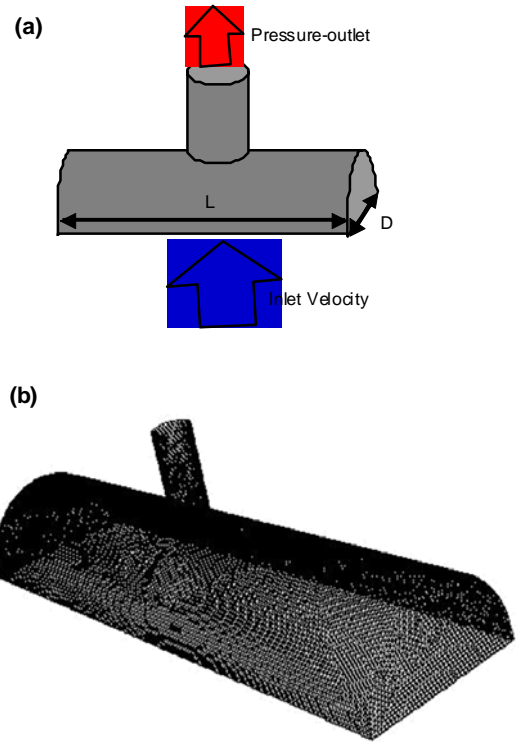


Fig. 4 CFD Modeling of a steam drum; (a) computational domain and boundary conditions; (b) grid system

의 Reynolds 수, 작동 압력, NWL과 증기 출구의 면적비 등에 대하여 관계를 구하였고 이 중 가장 상관관계가 높은 출구 Reynolds 수에 대한 상관식을 제안한다.

2. 수치해석 기법

증기 드럼 내부의 온도 분포는 작동 압력에서의 포화온도가 되므로 본 연구에서는 유동 분포만을 해석하였다. 유동 해석을 위한 지배방정식은 비압축성 Navier-Stokes 방정식이며 해석에는 상용 프로그램인 Fluent를 이용하였다. 연속방정식과 운동량방정식의 연결에는 SIMPLE 알고리즘을 적용하였고 운동량 방정식의 대류항은 유동장 내부에서 해의 급격한 변화가 없을 것으로 예상하여 수렴성이 좋은 2차 정확도의 Upwind 차분식을 선택하였다.

계산영역은 Fig. 4(a)와 같이 증기드럼 내부의 증기 공간 및 증기 출구가 포함되도록 설정하였다. 격자는 Fig. 4(b)와 같이 육면체 격자를 사용하였고 계산 조건 및 기하 형상에 따라서 10만개에서 50만개의 격자를 사용하였다. 경계조건은

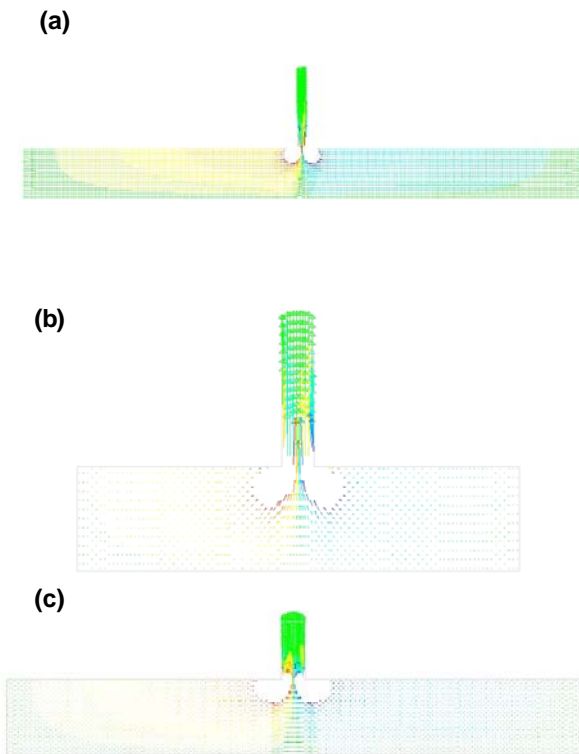


Fig. 5 Velocity vectors inside the steam drum; (a) for a commercially available industrial 10 t/h class boiler; (b) for a HRSG of a 3 MW class gas turbine based CHP system; (c) For a HRSG of a combined cycle power plant

경우, 계산 영역의 입구가 되는 표준수위면에는 증기용량에 해당하는 균일질량유속을 부과하였다. 출구에는 유동 박리영역보다 충분히 크도록 계산영역을 확보한 후 압력출구조건을 부과하였다.

유동 영역은 난류이고 지배적인 길이 스케일이 존재하지 않으므로 난류모형은 표준 k-e 모형을 사용하였다. 본 연구의 초점은 전체적인 속도 분포 형태로서 벽면의 항력이나 열전달이 상대적으로 중요하지 않으므로 벽면에는 표준 벽함수 조건을 부과하여 경제적인 해석이 이루어지도록 하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 증기드럼 내부의 속도분포

증기드럼 내부의 속도분포는 수치해석을 수행한 11가지 경우에 대해 대체로 유사한 형태로 나타났다. 대표적인 세 가지 경우로서 상용 제품인 산업용 보일러(Fig. 5(a)), MW급 가스

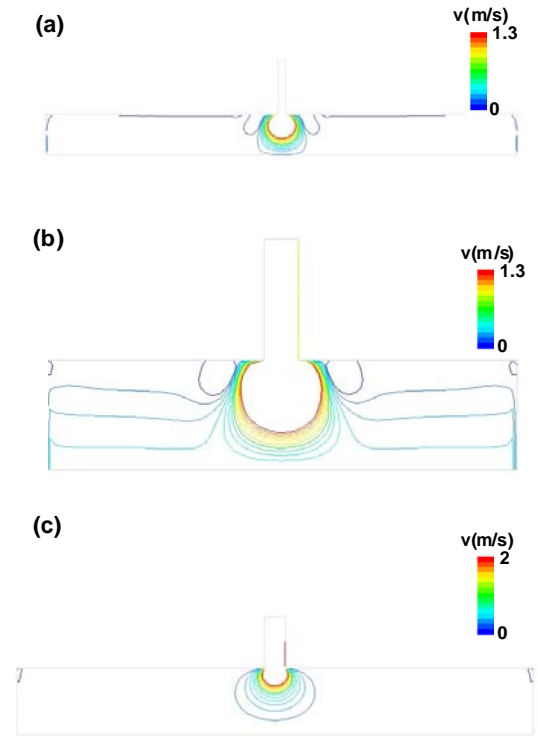


Fig. 6 Contours of the vertical component of velocity inside the steam drum; (a) for a commercially available industrial 10 t/h class boiler; (b) for a HRSG of a 3 MW class gas turbine based CHP system; (c) for a HRSG of a combined cycle power plant

터빈 열병합 발전용 HRSG(Fig. 5(b)), 복합화력발전용 HRSG(Fig. 5(c))에 대하여 속도분포를 제시하였다. 공통적으로 표준수위면에서 출발한 증기가 증기공간을 거쳐 증기출구로 빠져나가는 형태의 속도분포를 보인다(Fig. 5). 증기출구의 입구영

역에서는 세 경우 모두 유동이 박리되어 증기 출구 중심부에서 유동이 가속되었다가 박리영역이 지난 이후에 관 유동 형태를 회복하는 것을 관찰할 수 있다.

속도 벡터(Fig. 5)에서 확인하였듯이 증기 출구에서 유동 박리에 의한 가속이 발생하므로 단순한 연속방정식만으로는 속도분포를 예측하기 어렵다. 증기 출구 상류 위치에 필터 등을 설치할 경우 액적 입자의 크기 및 필터 입구의 속도에 따라 필터 효율이 결정되어 필터의 크기 및 설치 위치를 설계하기 위해서는 증기 공간 내부의 속도 분포에 대한 정보가 필요하다[7, 8]. 증기 출구 부근에서는 수직 방향 속도 성분이 중요하고 Demister 등의 필터도 증기 출구 유동 방향에 수직으로 설치되므로 본 연구에서는 수직방향 속도에 주목하여

분석을 수행하였다.

증기 공간 내에서 중력 분리가 이루어지기 위해서는 관성력에 비해 중력이 커야 한다. 이와 같은 조건을 만족하기 위한 허용 속도(v_a)는 식 (1)과 같은 경험식이 보고되고 있다 [6].

$$v_a = 0.1((\rho_l - \rho_v)/\rho_v)^{0.5} \text{ (m/s)} \quad (1)$$

식 (1)에서 구한 속도를 최고 수준으로 하여 속도 Contour를 그려보면 증기 공간 내에서 중력 분리가 효과적으로 이루어지는 영역을 관찰할 수 있다.

증기 공간 내의 수직 방향 속도 성분의 Contour를 보면 Fig. 5에서 관찰한 세 가지 경우 모두 유사한 분포를 보인다 (Fig. 6). Contour의 범위는 각각의 조건에서 식 (1)의 v_a 를 최고 범위로 설정하였다. Contour에서 최고 범위를 벗어나는 영역은 중력분리가 이루어지기 어려운 공간을 의미한다. 증기 공간 내부 대부분의 영역에서 중력분리가 이루어지지만 중형비가 작은 Fig. 6(b)의 경우 증기 출구 부근의 비교적 넓은 영역에서 중력분리가 이루어지기 어려운 것을 볼 수 있다. 증기를 직접 사용하여 작동압력이 10기압 부근인 Fig. 6(a), (b)의 경우 증기출구 부근에 재순환 영역이 형성되어 수직방향 속도가 음이 되는 영역이 관찰되지만 작동압력이 높은 Fig. 6(c)에서는 관찰되지 않는다.

3.2 속도분포 상관식

증기드럼에는 증기의 건도를 높이고 드럼의 체적을 줄이기 위해서 또는 작동압력이 높은 경우 분리 효율을 높이기 위하여 다양한 내부장치를 설치한다 (Fig. 2(b)). 이와 같은 내부장치를 설계하기 위해서는 증기 드럼 내부의 속도분포가 필요하다. 예를 들어 필터의 일종인 Demister의 경우, 입구 속도가 필터 효율을 얻을 수 있는 범위 내에 있어야 하며 필터 효율과 입구 속도가 결정되어야 개방면적 및 두께를 결정할 수 있다[8].

산업용 보일러와 열병합 및 복합 발전에 사용되는 HRSG를 포함하는 11가지 경우에 대하여 수치해석을 수행한 결과 증기드럼 내부의 속도분포는 대체로 유사하게 나타났다(Fig. 5, 6). 이는 증기드럼 내부의 속도분포를 관계식으로 정리하여 내부장치 설계에 사용할 수 있는 가능성을 의미한다. 증기드럼 내부의 속도분포를 나타내는 관계식을 구하기 위하여 본 연구에서는 먼저 수치해석 결과로부터 증기 출구의 중심 축을 따라 속도 분포를 추출하고 출구 속도 및 Drum의 반지름으로 무차원화하였다(Fig. 7(a)). 속도분포를 다항식, 지수함수 등의 형태로 가정하여 회귀분석을 수행한 결과 속도 분포를 $(y/R)m_1$ 의 지수함수형태로 가정한 경우가 0.999이상의 가장

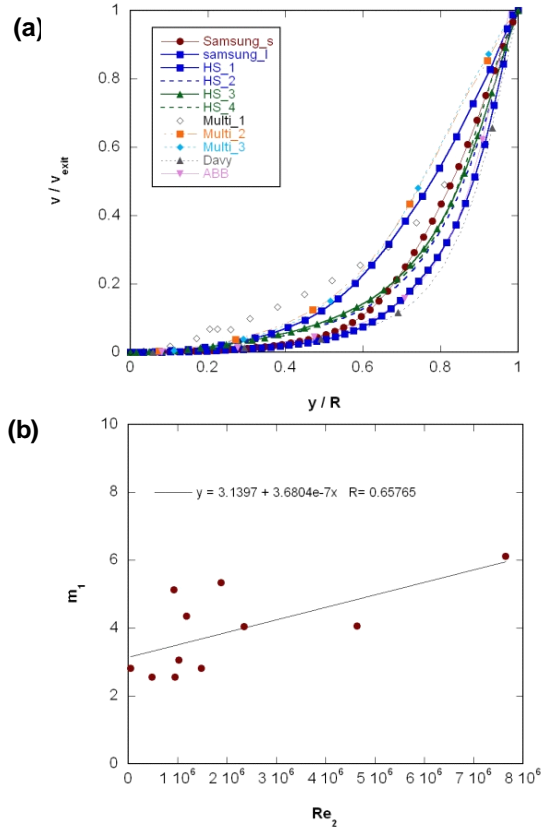


Fig. 7 Velocity profiles along the centerline of the steam exit; (a) velocity profiles; (b) correlation to predict the profile

높은 상관계수를 나타내었다.

수치해석을 수행한 11가지 검증 자료에 대하여 함수의 지수인 m_1 을 구해 표준수위면에서의 Reynolds 수, 증기 출구에서의 Reynolds 수, 작동 압력, 표준수위면과 증기 출구의 면적비 등에 대하여 상관관계를 구하였다. 각각에 대하여 상관계수를 구한 결과 표준수위면에서의 Reynolds 수는 0.56, 증기 출구에서의 Reynolds 수는 0.66, 작동압력은 0.59, 면적비는 0.22의 상관도를 나타내었다. 따라서 지수 m_1 에 대하여 가장 높은 상관계수($R=0.66$)를 나타낸 출구에서의 Reynolds 수에 대하여 상관식을 구하였다(Fig. 7(b), 식 (2), (3)).

$$\frac{v - v_{NWL}}{v_{exit} - v_{NWL}} = (y/R)^{m_1} \quad (2)$$

$$m_1 = 3.14 + 3.68 \cdot 10^{-7} Re_{exit} \quad (3)$$

수치해석 결과 및 해석을 통해서 도출한 관계식을 검증하

기 위해서는 증기드럼 내부의 속도 분포에 대한 실험 자료가 필요하다. 그러나 고압의 증기드럼 내부에서 속도 분포를 측정하는 것은 거의 불가능하여 실험 자료는 구할 수 없었다. 본 연구에서는 드럼 내부 장치로서 Demister를 포함하는 경우 (Table 1, Davy)에 대하여 식 (2), (3)에 제시한 결과식으로 Demister의 위치를 선정해보고 실제 도면과 비교하는 것으로 상관식의 유용도를 검증하였다.

Demister의 설치 위치는 입구에서 유속이 최적의 분리효율을 갖도록 결정한다. 예제에서 작동압력은 5.5 MPa, 용량은 135 ton/hr이며(Table 1), 증기 드럼의 직경은 2500 mm이다. 작동압력 및 용량을 기준으로 표준수위면과 출구의 면적으로부터 각각의 위치에서 유속을 계산하면 각각 0.073 m/s 및 8.3 m/s가 된다. Demister를 구성하는 다공체를 널리 사용되는 York421을 선택하였을 때 해당 압력에서 기수분리가 가장 잘 이루어지는 최적 속도는 약 0.5 m/s로서[8] 식 (2), (3)을 이용하여 해당 위치를 찾아보면 수면으로부터 670 mm로 구해진다. 도면을 확인한 결과 Demister는 수면으로부터 655 mm 높이에 설치되어 있어 본 연구에서 도출한 식을 바탕으로 드럼 내부장치를 설계할 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 HRSG와 산업용 수관식 보일러에 사용되는 11가지 증기드럼의 증기공간 내부 유동에 대하여 수치해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 증기 드럼의 체적 산정은 경험에 의존하며 문헌 상에 나타난 경험식 사이에는 체적 부하량 기준 2배까지 차이가 있는 것을 확인하였다.
- (2) HRSG 및 산업용 수관식 보일러 11가지 경우에 대하여 수치해석을 수행하여 증기 출구 중심축을 따라 수직 속도분포를 구해본 결과 표준수위면으로부터 높이에 대하

여 지수함수 분포를 나타낸다.

- (3) 증기드럼 내부의 수직 속도분포와 표준수위면으로부터 높이 상관식의 지수는 증기출구에서의 Reynolds수에 가장 높은 상관관계를 보인다.
- (4) 증기드럼 내부에 실제 Demister가 설치된 경우의 속도분포 변화는 추후 연구할 예정이다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 신진연구지원 사업에 의해 수행되었고 2010년도 국민대학교 교내 연구지원금으로부터 일부를 지원받았으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 1992, Stultz, S.C. and Kitto, J.B., Steam - Its Generation and Use 40th Ed. Vol.II, Babcock & Wilcox, pp.31-1~31-13.
- [2] 1991, Ganapathy, V., Waste Heat Boiler Deskbook, Fairmont, pp.1-33.
- [3] 1999, Ishigai, S., Steam Power Engineering - Thermal and Hydraulic Design Principles, Cambridge Univ. Press, pp.204-255.
- [4] 1961, Shields, C.D., Boilers - Types, Characteristics and Functions, McGraw-Hill, pp.231-244.
- [5] 1992, Stultz, S.C. and Kitto, J.B., Steam - Its Generation and Use 40th Ed. Vol.I, Babcock & Wilcox, pp.5-12~5-19.
- [6] 1984, 王孟浩, 中華人民共和國機械工程指導性技術文件 -JB/Z 201-83, 中華人民共和國機械工程, pp.49-76.
- [7] 1954, Ravese, T., "The Application and Development of the Turbo Steam Separator," Combustion-July 1954, pp. 45-48.
- [8] 1956, Coulter, E.E., "Development of Steam Washers for Silica Removal," Proc. American Power Conference, Vol.18, pp.629-638.