

출 · 입구 위치에 따른 배플을 갖는 원통내 유동특성에 대한 수치해석 Numerical Analysis of Flow Phenomena in Cylindrical Shell with Baffle according to the Position of Inlet and Outlet

신용한 · 사이드 · 전영철 · 정한식 · 정효민

Y. H. Shin, S.M. Sayeed, Y. C. Jeon, H. S. Chung and H. M. Jeong

(접수일 : 2010년 12월 07일, 수정일 : 2011년 07월 22일, 채택확정 : 2011년 08월 11일)

Key Words : Baffle(가로막), Cylindrical Shell(원통), Pressure Drop(압력강하)

Abstract : A numerical simulation on the flow field was carried out on the cylindrical shell with baffles. The steady incompressible 3-D Navier-Stokes solution is obtained with the actual operational condition and geometry of the heat exchanger. The effect of the location of inlet and outlet on the cylindrical shell with baffle is investigated by varying flow rate. The angle between the location of In/Outlet and baffle cutting part is 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150° and 180°. The present results show that the pressure drop is dependent on Reynolds number in the inlet area and position of inlet and outlet; i.e., the pressure drop increases with increasing Reynolds number and the pressure drop decreases with increasing angle between baffle cutting part and position of inlet and outlet.

1. 서 론

채널 내의 유동은 오래전부터 많은 학자들에 의해 공학적인 목적으로 연구되었다. 배플이 존재하는 채널은 유체유동의 흐름을 막아 우회토록 함으로써 유체가 채널 내에 머무르는 시간을 길게 한다. 채널내에서 배플을 따라 흐르는 유동은 수리학적으로 중요한 부분이며, shell and tube 열교환기의 설계 시 shell측의 기초자료로써 활용되며, 유동의 형상은 유사하다. Shell-and-Tube 열교환기는 가격이 저렴하고 유지 보수가 간편하며, 다양한 크기의 제작이 가능하며, 내압성이 좋으므로 공기조화설비, 화학플랜트 및 발전설비 등 산업공정용 열교환기로 널리 사용되고 있다. 전체 산업공정용 열교환기의 약 60% 이상을 차지하고 있다.¹⁾

따라서 shell-and-tube 열교환기에 대한 많은 연구가 수행하고 있으나 유체의 입·출구 위치 및 형상, Head의 형식, 배플의 형상 및 간격 등 고려해야 할

설계 인자들이 다양하고 shell 내 유동 및 열전달 현상이 복잡하기 때문에 그 특성을 파악하는데 한계가 있다.

Tinker²⁾는 압력 강하와 열교환기의 성능에 대한 연구에 있어 열교환기 내부의 유동을 처음으로 교차 유동, 배플-셸 누수, 배플-튜브 누수, 측면 유동의 부분적인 유동으로 나누는 방법을 사용하였다. Stehlik³⁾은 배플에 부과되는 압력이 shell and tube 열교환기의 수명을 단축시키는 중요한 요소라는 점에 착안, 전열효과를 유지하면서 열교환기에 걸쳐 압력손실을 감소시키는 방법으로서 배플에 경사를 주었을 때의 효과를 실험하였다.

Huadong Li 등⁴⁾은 배플 간격에 따른 열전달과 압력강하의 관계에 대하여 연구하였다. 완전하게 발달된 배플 구획 내에서 각 튜브 표면의 국소 열전달 계수를 나타내었으며, 같은 레이놀즈 수에서 압력 강하와 평균 열전달 계수를 통해서 배플 간격이 주는 영향에 대하여 연구하였으며, Shah 등⁵⁾도 배플 수에 따라 열전달량에 미치는 영향을 연구하였다.

이상천 등⁶⁾은 실험을 통해 다양한 값의 배플 간격과 배플수에 대하여 유동 조건을 변화시킬 때 열전달량과 열전달계수를 측정하였다. 측정 결과를 Bell-Delaware법에 따라 계산한 열전달량과 열전달계수와 비교하여 비균등 배플간격 교정계수의 영향

정효민(교신저자) : 경상대학교 정밀기계공학과·해양산업연구소

E-mail : hmjeong@gnu.ac.kr, Tel : 055-646-4766

신용한,사이드 : 경상대학교 대학원 정밀기계공학과

전영철 : (주)유엔에스 (U&S Co. LTD)

정한식 : 경상대학교 정밀기계공학과·해양산업연구소

을 고찰하여 새로운 상관식을 제안하였다. 박명관 등⁷⁾은 관(tube) 길이에 따른 최적의 가로막 수를 TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association) E 형태의 열교환기의 실험을 통하여 연구하였다.

설계인자 중 배플의 형상 및 간격, 관군의 배치에 관한 연구는 지속적으로 연구되어 지고 있다. 상대적으로 shell-and-tube 열교환기의 설계인자중 유체의 입·출구 위치 및 형상에 대한 연구는 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 수치해석을 통해 shell 입·출구 위치 및 입구 유량을 변화시켜 내부의 유동 및 압력강하 특성을 파악하고, 이를 토대로 최적 입출구 위치를 구하기 위한 기초 자료를 수집하고자 한다.

2. 이론적 배경 및 해석 모델

2.1 수치해석 모델

본 연구에 사용된 모델은 Table 1과 같은 형상을 갖는 실린더 형상의 원통을 사용하였고, 입출구의 직경은 11.4 mm이며, 수치해석을 위해 사용한 유속은 0.88 m/s ~ 1.76 m/s 이며 이를 모델의 입구 수력직경을 기초로 한 Reynolds 수로 표시하면 Table 2와 같다. (Fig.1 참조) 원통내의 입구 측으로부터 유입되는 유량은 출구 측으로 모두 유출되어 전체 해석영역을 통하여 질량보존법칙이 만족 되도록 적용하였다. 배플을 갖는 원통을 수치해석하기 위한 격자수는 약 25만개의 Polyhedral을 사용하였다.

Table 1 Fixed geometric parameters

Shell size	D_s	169 mm
Shell length	L	344.6 mm
Baffle cut	B_c	15 %
Baffle thickness	B_t	3 mm
Central baffle spacing	B	50 mm
Number of baffles	N_b	5

Table 2 Boundary conditions

Inlet (Velocity-inlet)	$Re = 10000$
	$Re = 12500$
	$Re = 15000$
	$Re = 17500$
	$Re = 20000$
Outlet (Pressure outlet)	Atmospheric pressure

2.2 입·출구 위치

Fig. 2에서와 같이 입·출구의 위치는 창(배플의 절단부분)에 대해 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150° 그리고 180° 각각 위치하며, 그 위치에 따라 수치해석을 수행하였다.

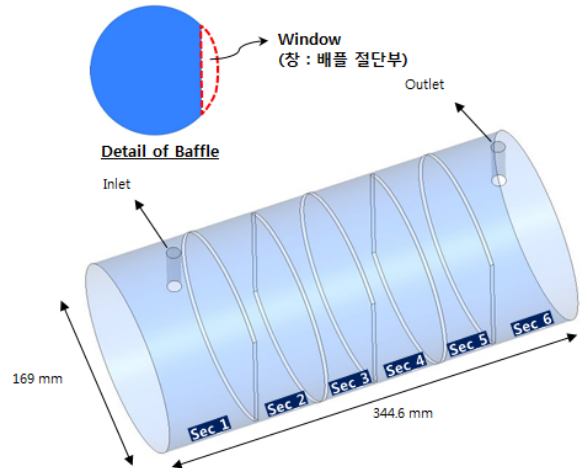


Fig. 1 Geometry of the model

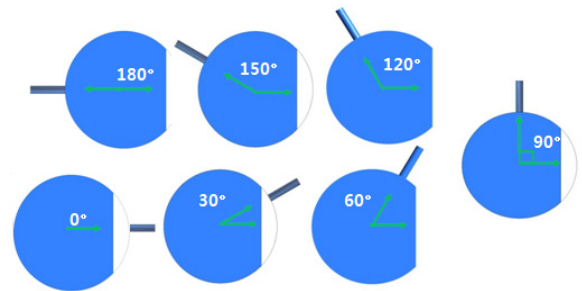


Fig. 2 The position of the inlet and outlet

2.3 지배방정식

수치해석을 수행하기 위하여 유한체적법(FVM)에 근거한 범용 프로그램인 FLUENT를 사용하였다. 본 연구에서는 3차원 정상상태 비압축성 점성유동을 고려하였다. 이에 대응하는 지배방정식의 연속방정식, 운동량 방정식은 다음과 같다.

연속방정식:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

운동량방정식:

$$\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\rho \partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} ((\nu + \nu_t) (\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}))$$

난류모델은 이미 공학적으로 타당성을 검증 받은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며, 벽 근처에서는 박리

(separation)를 잘 묘사하는 Non-Equilibrium Wall Function을 사용하였다. 기본 방정식의 대류 항과 확산 항은 2차 상류차분법으로 이산화 하였다. 속도 압력 연성에 대해서는 Patankar에 의하여 제시된 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 수렴판정은 모든 잔차 값이 10^{-3} 이하가 되고, 입·출구 측의 질량유량이 일정하게 되면 수렴한 것으로 판정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유동현상

Fig. 3은 입·출구의 위치 변화에 따른 유선을 나타낸 것이다. 배플은 채널 내부에서 유동을 우회시킴으로 유체가 채널 내에서 오래 있으므로 열전달 현상을 향상시키는 역할을 한다. 그와 함께 창(배플 절단부)에 대한 입·출구의 위치는 shell 내부 유동의 흐름에 상당한 영향을 주게 된다. 특히나 Sec_1과 Sec_6(입·출구의 부분)에서 입·출구의 위치에 따라 상이한 유동의 흐름을 보여주고 있다. 유동의 흐름이 입구를 통해 처음 원통내로 들어오면 Sec_1에서는 혼란된 모습을 보이거나 한 단계씩 배플을 거쳐 흐르고 배플에 따라 주 흐름의 방향으로 유동이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 부적절한 위치를 가질 경우 원통 내부 유동에서 정체영역을 생성하여 낮은 전열효과와 재순환 영역을 발생시키며 또한 배플의 모서리에서 박리를 생성시켜 압력손실을 가져오게 된다.

3.2 압력강하 및 난류운동에너지

시스템효율에서 압력강하 및 열전달률은 중요한 준이 된다. 압력강하는 그 시스템의 부하이며, 손실인 반면 열전달률은 시스템이 행할 수 있는 능력이다. 최적의 시스템이란 압력강하가 낮고 열전달률이 높은 값을 가지는 시스템이다. 본 연구는 수리학적인 면에서만 수행 되어졌으며, 열전달률을 대신해 난류

운동에너지의 값을 측정하였다. 난류운동에너지의 값이 높다는 것은 그 지역 내에서 유동의 흐름이 활발하다는 것이며, 그로인해 두 유체간의 열교환량이 증가한다고 판단할 수 있다.

7개의 입·출구 위치에 대한 압력강하 및 난류운동에너지(TKE, turbulent Kinetic Energy)를 수치해석으로 구하였으며, 그 결과를 Fig. 5, Fig. 6과 Fig. 7에서 보여주고 있다.

Fig. 4와 같이 압력 및 난류운동에너지는 각 배플을 기준으로 원통의 체적을 등분하여 총 6구간을 만들고 그 구간에 따른 평균 압력 및 난류운동에너지를 구하였다. 입·출구도 포함하여 계산하였다.

원통1의 중앙부분에서는 각 변수에 따른 영향이 적었으나 입·출구 부분에서는 상당한 변화를 볼 수 있었다. 전체적으로 입구 쪽에서 다음 배플로 넘어갈 때 압력변화가 크게 나타난다. 배플이 완충 및 흡수 역할로 인한 유동의 에너지 소모로 인해 압력이 크게 감소하는 것으로 사료된다. 창과 입·출구 위치의 각이 클수록 각 부분의 평균 압력차이가 적은 이유 및 Sec_2에서 압력이 올라가는 이유는 각이 크게 되면 입구 측에서 나오는 유량의 흐름이 창(배플의 절단부)쪽으로 향하기 때문에 이며, 그로인해 입구로 통해 들어온 전체 유량 중 많은 부분의 유량이 곧바로 창을 통해서 흘러가기 때문이다. 이것은 출구 쪽에서도 같은 현상을 볼 수 있다.

Fig. 3의 유동의 흐름을 통해서도 확인할 수 있다. 또한, Sec_6과 Sec_5의 압력 차가 큰 것을 볼 수 있는데 여기서는 압력평균을 낼 때 출구 측 관까지 포함하여, 그 값이 급격하게 떨어지는 수치를 나타낸 것으로 사료된다.

동일한 Reynolds 수하에 Sec_2부터 난류운동에너지의 변화는 입·출구의 위치를 변화하여도 그 값에는 큰 변화가 없었다. 다만 다른 위치에 비해 0°일 상대적으로 낮은 값을 가진다.

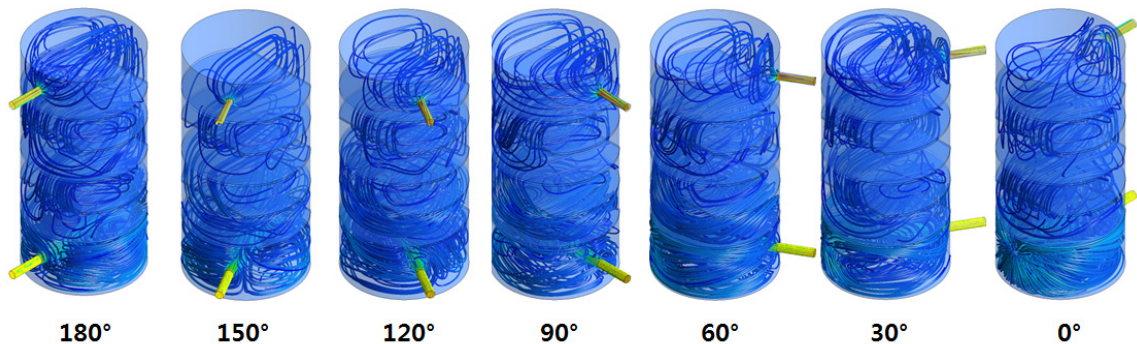


Fig. 3 Streamline in the shell with Re=15000

유량이 배플을 거치면서 일정한 흐름을 가져 이런 현상을 나타낸 것으로 사료된다. 반면, Sec_1과 Sec_6 즉, 입·출구 측에서는 상당한 변화를 관찰 할 수 있다.

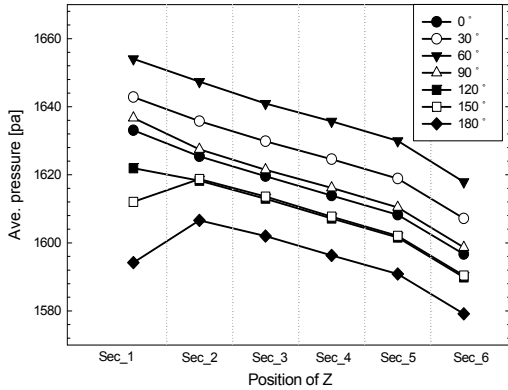


Fig. 5 Average of pressure in the shell with Re=15000

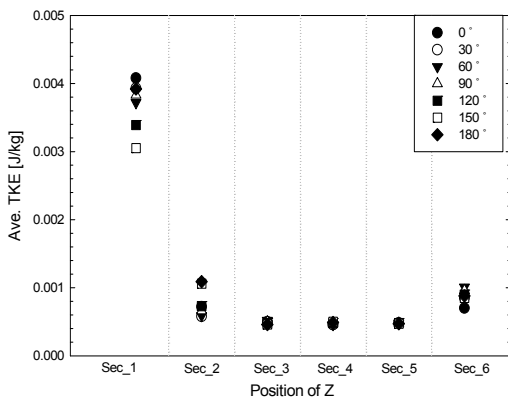


Fig. 6 Average of TKE in the shell with Re=15000

Fig. 6은 배플을 가진 원통내의 압력강하와 난류운동에너지의 관계를 알아보기 위해서 도식한 그래프이다.

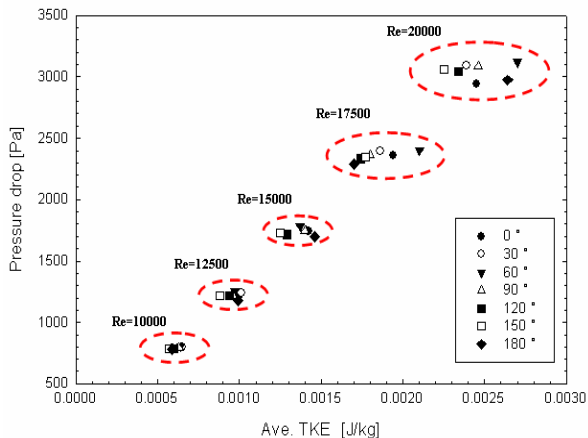


Fig. 7 Pressure drop in the shell with Ave. TKE

유동의 흐름에 관해서만 고려한 해석이므로 두 값을 비교했을 때 값이 그래프상에서 오른쪽으로 치우친 형상이 수리학적 판단에서 시스템 성능이 우수하다고 판단할 수 있다. 저 레이놀즈수에서는 비슷한 값을 보이나 고 레이놀즈수로 갈수록 그 값들의 차이는 크게 나며, 특히나 60°일 때 압력강하는 비슷하나 난류에너지는 다른 경우에 비해 높은 값을 가진다.

5. 결론

본 연구에서는 수치해석을 통해 배플이 있는 원통의 입·출구 위치를 변화시켜 압력강하 및 난류운동에너지에 미치는 영향에 대하여 연구하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 입·출구의 위치 변화에 따른 shell 내의 각 부분의 평균압력변화는 창과 입·출구위치의 각도가 작을수록 압력손실이 다소 커지고 각도가 클수록 작아지는 경향을 가진다.
- (2) Sec_2에서 Sec_5까지의 평균 난류운동에너지의 값은 차이나 없었으며, Sec_1과 Sec_6에서 큰 변화를 확인 하였다.
- (3) 최종적으로 전체 해석 모델의 압력강하와 평균 난류운동에너지를 비교하면, 고 레이놀즈수일 때 60°일 때 효율이 우수하다고 사료된다.

수치해석을 통해서 알아본 결과 입·출구에서의 적절한 기하학적인 모델은 전체 시스템에 큰 영향을 줄 것으로 사료되며, 향후 여기에 지속적인 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업핵심기술개발사업 및 지역전략기획기술개발의 지원과 중소기업청의 중소기업기술혁신사업의 지원으로 이루어 졌으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. P. Dutta and S. Dutta, 1998, Effect of Baffle Size, Perforation on Internal Heat Transfer Enhancement, Int. J. Heat and Mass Transfer,

- Vol. 41, No. 19, pp. 2133-2147.
2. T. Tinker, 1958, "Shell-side characteristics of shell-and-tube heat exchangers : a simplified rating system for commercial heat exchangers", Trans. ASME, pp. 36-52.
 3. P. Stehlik, J. Nemcansky and D. Kral, 1994, "Comparison of correction factors for shell-and-tube heat exchangers with segmental or helical baffles", Heat Transfer Engineering, Vol. 15, pp. 55-65.
 4. Huadong Li and Volker Kottke, "Effect of baffle spacing on pressure drop and local heat transfer in shell-and-tube heat exchangers for staggered tube arrangement," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 41, no. 10, pp. 1303-1311, 1998.
 5. R. K. Shah and A. Pignotti, 1997, "Influence of a finite number of baffles on Shell and Tube heat exchanger performance" Heat Transfer Engineering, Vol. 18, No. 1, pp. 82-94.
 6. S. C. Lee, Y. W. Cho and S. C. Nam, 1997, "Effect of Baffle Parameters on heat transfer in shell and tube heat exchangers" KSME(B), Vol. 1, No. 1, pp. 185-194.
 7. M. K. Park, Y. H. Lee and S. Y. Kim, 2001, "An experimental study of Shell and Tube heat exchanger performance with baffle spacing," KSME(B), Vol. 25, No. 12, pp. 1748-1755.