

경사진 배플이 있는 셸측의 수치적 해석

김 은 필*

Numerical prediction of shell-side flow with inclined baffles

E. Kim

Key words : Baffle(배플), Finite Element Method(유한요소법), Galerkin Method(갈라킨 방법), Heat Exchanger(열교환기), Heat Transfer(열전달), Pressure Drop(압력강하)

Abstract

A finite element method is applied to investigate the characteristics of the fluid flow and heat transfer performance in a channel in terms of the various effects of baffle cuts, baffle angles, and leakages. The results show that the decrease of a baffle cut gives a good heat transfer enhancement. However, it also increases pressure drop. In the case of an inclined baffle, the result shows that the pressure drop decreases with a reasonable heat transfer performance. But a steeply inclined baffle gives adverse effects on the performance of the channel. The clearances between baffle-to-shell and tube-to-baffle affect the overall performance. The effects of these parameters are discussed in details.

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. 이는 두 물체간의 열을 주고받는 것을 목적으로 하는 곳에서는 바람직한 현상이다. 또한 채널에서의 배플을 따라 흐르는 유동은 셸-튜브 열교환기와 같은 형상이다. 이는 튜브 내부의 유체와 외부의 유체 사이의 열을 교환하는 것을 목적으로 한다.

이와 같은 대상은 매우 복잡한 형상을 가지고 있

어 지금까지 전산유체역학적 접근이 어려웠다. 이에 대한 연구는 1930년대부터 시작되었지만, 초기 연구에서는 셸 내부 유동이 이상적인 관군, 혹은 단 하나의 튜브만을 거쳐 흐른다고 가정하였다. 이상적인 튜브 배열에 대한 연구도 불완전하게 이루어졌다. 1940년대 후반부터는 해석적 방법이 제안되는데 이 때부터 튜브의 틈새유동 및 튜브 번들과 셸과의 측면 유동 등에 대한 연구가 행하여졌다. Tinker¹⁾는 압력 강하와 열교환기의 성능에 대한 연구에 있어 열교환기 내부의 유동을 처음으로 교차 유동, 배플-셸 누수, 배플-튜브 누수, 측면 유동 등의 부분적인 유동으로 나누는 방법을 사용하였

* 부경대학교 기계공학부(원고접수일 : 2000년 7월)

다. 그러나 이때에는 컴퓨터가 발달하지 못한 관계로 이상적인 관군을 제시하되 틸새유동과 측면유동과의 상호작용까지는 해석하지 않은 '준-해석적' 방법이 제시되었다.⁽²⁾ Stehlik 등^(3,4)은 배플에 부과되는 압력이 셸-튜브형 열교환기의 수명을 단축시키는 중요한 요소라는 점에 착안, 전열효과를 유지하면서 열교환기에 걸친 압력손실을 감소시키는 방법으로서 배플에 경사를 주었을 때의 효과를 실험을 통하여 고찰하였다. 최근에는 Prithiviraj 등⁽⁵⁾이 수치적으로 셸-튜브형 열교환기의 기본적인 형상에 대하여 유체역학적인 측면과 열전달적인 측면을 연구하였다. 그러나 그들의 수치해석 기법은 1차 정확도를 가지고 있어서 결과에 대한 검증이 필요하다.

본 연구에서는 수치적으로 유한요소법 중에 칼라킨 방법(Galerkin method)을 사용하였다. 유체유동 문제의 지배방정식 중 Navier-Stokes 방정식의 대류항은 이산화하는데 중요하다. 이는 대류항의 이산화가 해의 정확도에 크게 영향을 미치기 때문이다. 대류항을 1차 정확도를 가지는 풍상기법(upwind scheme)을 사용하면 본 문제와 같은 유동의 박리와 재부착이 일어나는 복잡한 현상에서 정확한 해를 기대할 수 없다. Khosha 등⁽⁶⁾은 2차 정확도를 가지는 중앙기법(central scheme)을 제시하였다. 그러나 그들의 이산화기법은 격자에 상당히 민감하다. 최근에 Lube 등⁽⁷⁾은 대류항에 대한 새로운 기법을 제시하였다. 그가 제시한 방법은 2차 정확도를 가지며 고 Reynolds수에서도 높은 정확도를 나타낸다. 본 연구에서는 그가 제시한 방법을 사용하였다.

지금까지의 연구는 실험이 많으며 수치적으로는 간단한 형상에 대하여만 연구되어 왔고 또한 수치해석의 결과들은 해의 정확도에 대한 검증이 부족하였다. 그리고 기존의 직교류형 배플은 전열면적의 정체영역이 많고 압력강하가 크며 정체구역에서 파울링(fouling)에 의한 부식이나 파공을 초래하기 쉽다. 경사진 배플을 사용할 경우 정체영역을 줄일 수 있으며 파울링에 대하여 강하다. 본 연구에서는 수치적인 검증과 함께 셸-튜브형 열교환기의 특성을 결정하는 요소에 대하여 배플 컷, 배플 경사각 그리고 배플-튜브 및 배플-셸 누수 등에

대하여 자세하게 연구하였다.

2. 지배방정식 및 경계조건

배플과 튜브가 존재하는 2차원 채널의 해석을 위해 다음과 같은 가정을 하였다. (Fig. 1 참조) 유동은 2차원 정상상태, 비압축성, 유체의 물성치는 일정하다. 그리고 작동유체가 높은 점도이므로 층류로 가정하였다. 위와 같은 가정하에서 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식은 다음과 같다.⁽⁸⁾

연속방정식 :

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

운동량방정식 :

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial P}{\partial x_i} \tag{2}$$

에너지방정식 :

$$\rho c_p u_j \frac{\partial T}{\partial x_i} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} \tag{3}$$

여기서 u_i 는 속도, P 는 압력을 나타낸다. i 와 j 의 범위는 1에서 2이며, ρ 는 밀도, μ 는 점성이다.

유동해석을 위한 경계조건은 다음과 같다. 셸의 입구측 노즐은 바닥에 위치하며 입구 속도와 온도는 일정하다고 가정하였다. 튜브는 입구측 속도를 셸의 입구속도와 동일하게 주었으며 일정한 입구 온도로 가정하였다. 채널의 입구측으로부터 유입되는 유량은 출구측으로 모두 유출되어 전체 해석영역을 통하여 질량보존법칙이 만족되도록 적용하였다. 출구는 마찬가지로 바닥면에 존재하며 모든 변수에 대하여 Neumann 경계조건을 적용하였

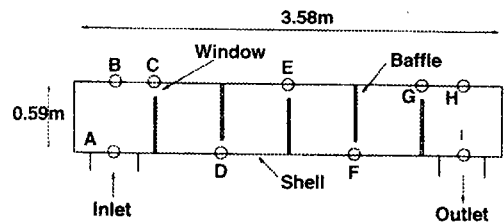


Fig 1. Schematic geometry of a channel with tubes and baffles

다. 벽면에서는 유체에 대하여 점착조건을 적용하였으며, 온도는 벽에서 외부와 단열되어 있다고 가정하였다.

3. 틈새 유동의 계산

Fig. 1은 열팽창 및 제작상의 편의를 고려해 배플-튜브, 배플-셀 사이에 미소한 간극을 가지고 있다. 측면유동(bypass)이라 부르는 틈새는 적재된 튜브들 중 가장 바깥쪽에 존재하여 셀과의 간격이 좁은 곳을 말하는데 이는 튜브 적재 방식에 따라 존재하지 않기도 하고 앞의 두 틈새 유동과는 다소 다른 특성을 가지므로 본 논문에서는 고려하지 않기로 한다.

셀 내부를 흐르는 유체들 중 대부분이 교차류의 흐름을 따라가지만 압력차에 의해 일부는 앞서 말한 배플-튜브 및, 배플-셀 사이에 존재하는 틈새를 지나게 된다. 그리고 이를 통하여 흐르는 누수는 튜브를 질러 흐르는 십자류로부터 분리됨으로 인해 전열효과와 압력손실에 영향을 끼치게 된다. 물론 유체 역학 이론과 실험을 통하여 알려진 대로 누수는 전반적인 압력 손실을 줄이는 대신 동시에 전열 효과도 감소시키는 것으로 알려져 있다. 일반적인 셀-튜브형 열교환기에서 간극의 크기는 배플-셀이 2mm, 배플-튜브가 0.3mm 정도로, 이는 전체 영역에 비해 대단히 미소하므로 수치 해석시 내부의 틈새로 한 곳에 집중시켜 계산하였다.

4. 수치해석 및 검증

본 연구에서는 Navier-Stokes 방정식을 이산화하는데 유한요소법 중에서 Galerkin 방법을 사용하였다. 혼합문제에서 Babuska-Brezzi 조건을 만족하도록 보간함수를 설정하였다.⁽⁸⁾ 비선형 방정식에 대한 반복은 Newton방법을 사용하였다.⁽⁹⁾

먼저 본 계산 결과의 신뢰성을 위해 같은 후향계단(backward facing step)의 형상에서 채널내부로 흐를 때 유동현상을 기존의 연구결과와 비교하여 보았다. Fig. 2는 Ghia 등⁽⁸⁾, Mansour 등⁽⁹⁾, Armaly 등⁽¹⁰⁾의 결과와 본 연구에서의 결과를 층류상태인 경우에 유동의 박리와 재부착점을 비교한

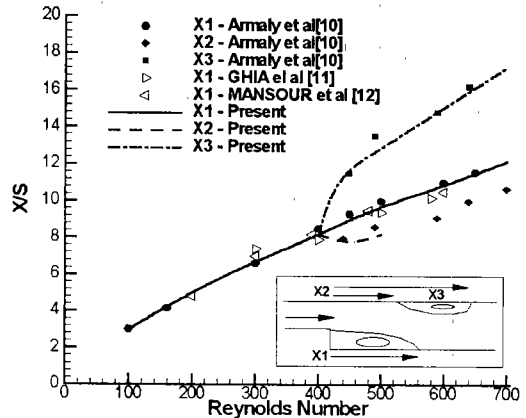


Fig. 2 Locations of separation and reattachment

것이다. $Re \leq 400$ 에 대해서는 아래쪽 면에서 한 개의 재순환 영역(recirculation zone)이 형성된다. 이 영역을 해석하는 데는 1차 정확도의 수치해석 방법을 사용하여도 수치적인 허위 확산(false diffusion)을 일반적으로 무시할 수 있지만 Reynolds수가 커질수록 유동의 구조가 복잡해지고 박리점과 재부착이 일어나는 여러 개의 순환 영역이 생기는 경우에는 수치의 정확도를 높여야 한다. 본 계산에서는 전체적으로 2차 정확도로 격자수 3473와 요소 3328개로 계산하였다. 특히 Reynolds수 400보다 큰 경우에는 상부의 재순환 영역을 정확히 예측하기 위하여 격자수를 배로 증가시켰으며, 이후 격자수를 증가시켰으나 재부착점의 변화가 적어 계산은 격자수가 배인 경우로 하였다. Fig. 2에서는 낮은 Reynolds수뿐만 아니라 높은 Reynolds수에서도 기존의 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

5. 결과 및 고찰

배플은 채널 내부에서 유동을 우회시킴으로 유체가 채널 내에서 오래 있으므로 열전달 현상을 향상시키고 또한 튜브를 수평으로 지지함과 동시에 튜브의 진동을 억제하는 기능이 있다. 그러나 부적절한 배플은 유동에서 정체영역을 생성하므로 낮은 전열효과와 재순환 영역을 발생시키며 또한 모서리에서의 박리를 생성시켜 압력손실을 가져오게 된다. 본 연구에서는 20%, 25%, 30%의 세 가지

배플 컷에 대한 효과를 고찰하였으며 배플 컷은 다음과 같이 정의한다.

$$\text{BaffleCut}(\%) = (\text{채널높이} - \text{배플길이}) / \text{채널높이} \times 100 \quad (6)$$

Fig. 3은 본 연구에서 사용된 격자체계 중 하나를 간략하게 표시한 것이다. 입구와 출구는 Fig. 1을 참조하기로 한다. Fig. 4는 배플 컷의 변화에 따른 유선을 나타낸 것이다. 배플 컷은 식(6)에 의하여 20%, 25%, 30%로 변화시켰다. 배플 컷의 크기가 증가하더라도 유동의 형태는 비슷한 것을 알 수 있다. 다만 배플 컷이 작은 경우에는 유동의 재순환 영역이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 압력변화를 나타낸 것으로 무차원 압력에 대한 정의는 $\Delta P^* = \Delta P / (\rho V_{\max}^2 / 2)$ 와 같다. 배플 컷이 커질수록 압력손실이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 배플영역을 통과할 때 상대적으로 넓은 면적을 통과하기 때문이다. Fig. 6은 온도장을 나타낸 것으로 배플 컷이 클수록 윈도우 영역으로 흐르는 평행류가 많아져 전열효과가 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

배플에 경사를 주게 되면 전열효과를 유지하면서 압력 손실을 줄이고 또 배플에 의해 발생하는 유동의 진동도 감소시키는 장점이 있으나, 반면 제작과 시공이 힘들다는 단점도 있다. 본 논문에서는 배플의 경사각 ψ 가 각각 0° , 18° , 그리고 25° 인 경



Fig. 3 Grid system for the calculation of flow

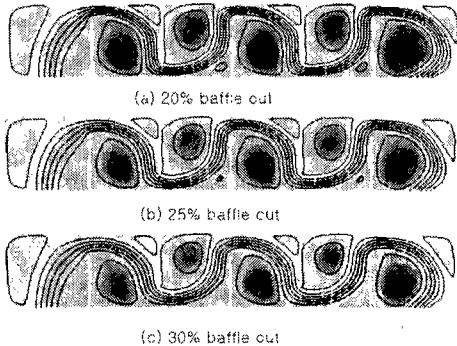


Fig. 4 Streamlines at Re=350

우에 대해 검토해 보았다. Fig. 7은 다양한 배플 경사각에 대한 유선을 타나낸 것이다. 경사각이 클수록 재순환 영역의 변화가 일어나는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 압력손실 분포에서 18° 의 경사각을 가진 배플에서는 약간의 압력 손실의 감소를 기대

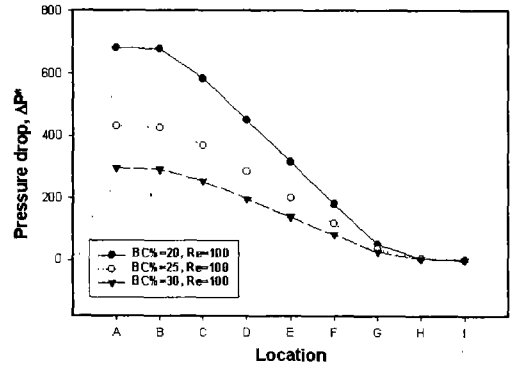


Fig. 5 Pressure drop distribution with respect to various baffle cuts at Re=100

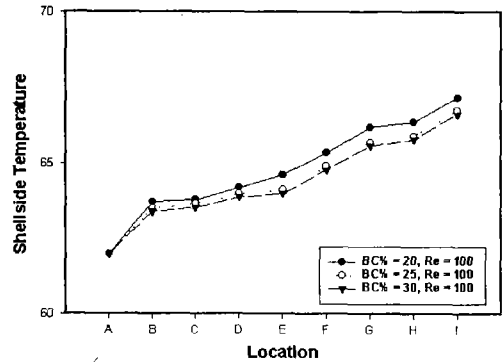


Fig. 6 Temperature distribution with respect to various baffle cuts at Re=100

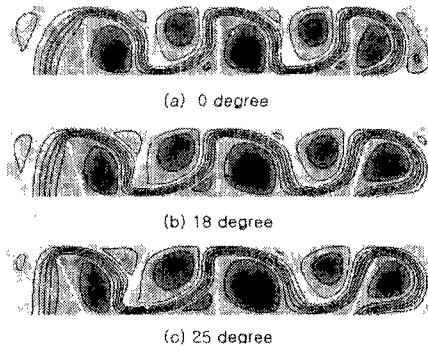


Fig. 7 Streamlines at Re=550

할 수 있다. Fig. 9에서는 18°의 경사각을 가진 배플이 보다 좋은 전열효과를 가져오는 것을 보여 준다. 25°의 경사각을 가진 배플의 전열 효과가 그다지 크지 않은 것은 정체영역에서의 와류를 제거함과 동시에 2번째 배플까지의 튜브측에서의 재순환 영역도 축소된 것이 그 원인이라 할 수 있다. 또한 이는 Fig. 7에서 나타난 배플을 지난 부분에서의 와류영역의 크기가 전열효과와 직접적으로 비례하진 않음을 알 수 있다. 또, 경사각을 가진 배플에서는 튜브측의 재순환 영역이 매우 크게 발달하여 셀측까지 넓게 분포하므로 보다 나은 전열효과를 기대할 수 있음을 알 수 있다. 한편 25°의 경사각은 오히려 압력 손실과 전열효과가 모두 좋지 않은 결과를 가져왔다. 따라서 배플 경사각은 그 크기와 개선 효과가 반드시 비례하지만은 않으며 본 연구 대상에서는 긍정적인 효과를 가져오는 임계 각도

가 25°미만에 존재한다고 추정할 수 있다.

앞서 언급한 바와 같이 배플-셀 및 배플-튜브간에 발생하는 자연적인 누수에 의한 효과를 연구하기 위하여 Delaware 대학의 실험 보고서를 근거로 하여 Table 1과 같이 두가지 누수 모델을 정의하였다. Fig. 10은 누수모델을 적용한 경우의 유선을 나타낸 것이다. 누수모델을 설정한 경우에 유동이 틈사이로 지나가는 것을 확인할 수 있다. 특히 배플과 셀 사이에서 유체가 확실하게 흐르는 것을 알 수 있는데 이는 이 영역에서 압력변화가 크게 일어나기 때문인 것으로 생각된다. Fig. 11로부터 간극이 커질수록 압력손실이 줄어드는 것을 볼 수 있으며 Fig. 12에서는 누수에 의한 전열효과의 감소를 확인할 수 있다. 누수 모델의 압력 손실을 나타낸 그래프에서 국소적으로 압력손실이 증가하는 곳이 발견되는데, 이는 누수를 통과한 유동이 와류로 발달하며 압력손실을 증가시키는데 기인한다고 볼 수 있다. 누수의 양은 튜브-배플 간에서 클램프라든가 배플-셀 간에서 강철판과 같은 기구를 이용

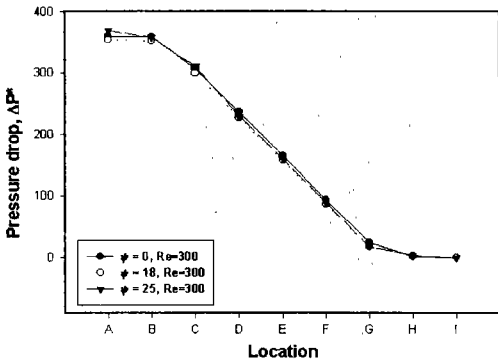


Fig. 8 Pressure drop distribution with respect to various baffle angles at Re=300

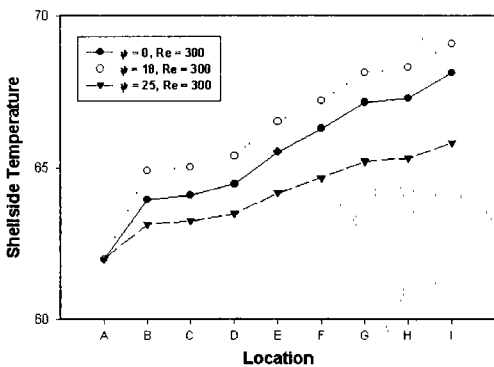


Fig. 9 Temperature distribution with respect to various baffle angles at Re=300

Table 1 Leakage flow model with respect to various clearance

	Leakage Model 1	Leakage Model 2
Baffle-Shell clearance	2.03mm	3.03mm
Baffle-Tube clearance	0.254mm	0.354mm



Fig. 10 Streamlines of a channel with clearances

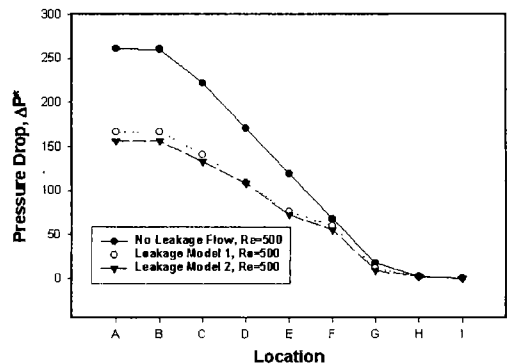


Fig. 11 Pressure drop distribution with respect to various clearance at Re=500

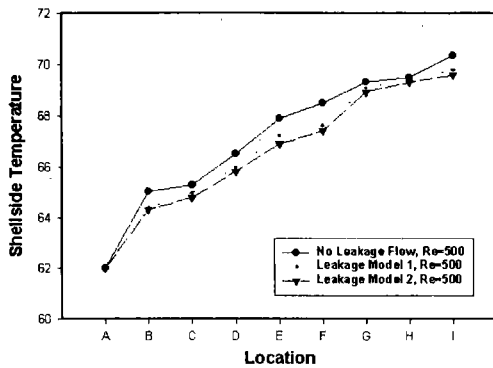


Fig. 12 Temperature distribution with respect to various clearance at Re=500

하여 인공적인 방지가 가능하지만 그에 상응하는 비용이 요구되므로, 필요한 열교환기의 특성을 파악하여 누수를 효과적으로 제어하여야 한다.

본 연구는 셸-튜브형 열교환기의 단순화한 모델로 압력강하 및 열전달에 미치는 원인을 수치 해석적인 방법으로 규명하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 배플 컷이 커짐에 따라 압력손실과 열전달 효과가 모두 감소하고 있다.
2. 배플이 경사각을 가지면 압력손실은 작고, 열전달 효과는 매우 크다는 것을 알 수 있다. 그러나 경사각을 너무 크게 하면 효율이 떨어진다.
3. 틈새를 통해 흐르는 누수는 압력 손실과 열전달 효과를 동시에 떨어뜨리는 작용을 한다.

참고문헌

1. Tinker, T., "Shell-side characteristics of shell-and-tube heat exchangers : a simplified rating system for commercial heat exchangers", Trans. ASME, pp. 36~52, 1958.
2. Bell, K. J., "Final report of the cooperative research program on shell-and-tube heat exchangers", Bulletin 5, University of Delaware Engineering Station, 1963.
3. Stehlik, P., Nemicansky, J., and Kral, D., "Comparison of correction factors for shell-and-tube heat exchangers with segmental or helical baffles", Heat Transfer Engineering, Vol. 15, pp.55~65, 1994.

4. Kral, D., Stehlik, P., Van Der Ploeg, H. J., and Master, B. I., " Helical baffles in shell-and-tube heat exchangers, part 1 : experimental verification", Heat Transfer Engineering, Vol. 17, pp.93~101, 1996.
5. Prithiviraj, M., and Andrews, M. J., "Three dimensional numerical simulation of shell-and-tube heat exchangers. part II : foundation and fluid mechanics", Num. Heat Transfer, Vol. 33, Part A, pp.817~828, 1998.
6. Khosla, P. K., and Rubin, S. G., "A diagonally dominant second-order accurate implicit scheme", Computer Fluids, Vol. 2, pp. 207~209, 1974.
7. Lube, G., and Tobiska, L., " A nonconforming finite element method of streamline-diffusion type for the incompressible Navier-Stokes equation", J. Comp. Math., Vol. 8, pp. 147~158, 1990.
8. Kim, E., "A mixed Galerkin method for computing the flow between eccentric rotating cylinders", Int. J. Numer. Meth., Vol. 29, pp. 877~885, 1998.
9. Kim, E., and Szeri, A. Z., "On the combined effects of lubricant inertia and viscous dissipation in long bearing", ASME J. Tribology, Vol. 119, pp. 76~84, 1997.
10. Ghia, H. N., Oswald, G. A., and Ghia, U., "A direct method for the solution of unsteady two-dimensional incompressible Navier-Stokes equations", 2nd Symp. Aspects of Aerodynamic Flows, California State University, 1987.
11. Mansour, N. N., and Moin, P., "Computations of turbulent flows over a backward-facing step", Fourth Symp. on Turbulent Shear Flow, Karlsruhe, 1983.
12. Armaly, B. F., Durst, F., Pereira, J. C. F., and Schonung, B., " Experimental and Theoretical Investigation of Backward Facing Step Flow", J. Fluid Mech., Vol. 127, pp. 473~496, 1983.

저 자 소 개



김은필(金恩弼)

1962년생. 1987년 부산대학교 기계공학과 졸업. 1991년 미국피츠버그대학 기계공학과 졸업(공학석사). 1995년 미국피츠버그대학 기계공학과 졸업(공학박사). 현재 부경대학교 기계공학부 전임강사.