

## 라디에이터 통과풍량 확보를 위한 수치적 검토

김 은 필\* · 강 상 훈\*\*

Numerical Analysis for Improving Passing Flow Rate  
Quantity about a Radiator

E-P Kim · S-H Kang

**Key words** : Automobile(자동차) Cooling System(냉각계), Galerkin Method(갈라킨 방법), Pressure Drop(압력강하), Projection Scheme(Projection방법), Radiator(라디에이터)

## Abstract

This paper describes the analysis of flow field using a projection finite element method. The projection scheme with a pressure correction is presented for the analysis of an incompressible Navier-Stokes flow. The projection scheme is analyzed numerically and applied to the well-known bench marking problems such as a lid driven cavity. Finally, the projection scheme is applied to a flow through the automobile's front. In the automobile's cooling system, the flow through its front is very important to a cooling performance. The results show that the flow quantity increases by locating the position of bumper to the further front position of a car. And, the improvement on the suction part below a bumper achieves the more passing flow quantity. The attachment of an air dam increases passing flow quantity causing the pressure rise to the front part and the pressure drop beneath a car.

## 1. 서 론

본 연구는 엔진의 성능향상에 관련 있는 풍량을 확보하는 것에 관한 연구이다. 자동차 엔진은 최고 온도가 2000°C 이상 3000°C까지도 올라가게 되고, 이러한 과열 현상은 실린더의 형태를 변형시킨

다거나 윤활 기능의 저하로 자동차의 성능저하를 초래한다. 이러한 성능저하를 해결하기 위해, 엔진 냉각장치에 대한 연구가 필요하다. 자동차 엔진 냉각장치 중 냉각성능에 가장 큰 영향을 미치는 라디에이터에 대한 연구는 엔진에서 과열된 냉각수와 차가운 외부공기와의 직접적인 열전달에 관여하

\* 부경대학교 기계공학부(원고접수일 : 2000년 7월)

\*\* 플러스 인터내셔널

는 가장 중요한 부분이다. 따라서, 라디에이터의 냉각성능을 향상시키기 위해서는 외부공기를 라디에이터로 유입하는 통과풍량을 확보하는 것이 중요하다. 또한 라디에이터로의 유동은 차량의 외형과도 밀접한 관련이 있다. Summa 등<sup>(1)</sup>은 반복적인 점성, 포텐셜 유동 가정을 통해 차량 주위 유동에 관한 연구를 하였으며, Shaw<sup>(2)</sup>는 수치해석을 통한 차량 주위 유동에 관한 연구를 수행하였으며, Himeno 등<sup>(3)</sup>은 다중블록 격자계를 사용하여 자동차 주위 유동을 해석하였고, Donald 등<sup>(4)</sup>은 자동차 주위 유동에 대해 준 3차원 난류유동에 대한 수치해석을 하였다. Shibata 등<sup>(5)</sup>은 라디에이터 통과풍량 확보를 돕는 intercooler의 최적 설계에 대한 연구를 수행했으며, 유정열 등<sup>(6)</sup>은 라디에이터를 포함하여 엔진룸 내의 유동을 2차원적으로 나타내었고, 또한 에어댐의 효과와 번호판 등의 영향도 고려하였다. 최도형 등<sup>(7)</sup>은 라디에이터를 통과할 때의 유동장을 단순화하여 항력 변화를 예측하였고, 에어댐의 부착효과에 대한 영향도 고려하였다. 박찬국 등<sup>(8)</sup>은 라디에이터를 구성하는 각 요소에 대해 에너지방정식을 적용하여 라디에이터의 냉각성능과 방열면적에 관한 연구를 하였다.

본 연구에서는 라디에이터의 통과풍량 확보를 위한 여러 가지 개선사항을 검토하기 위하여 레이놀즈 수에 따른 통과풍량의 차이, 라디에이터 그릴 부분과 범퍼 아래 흡입구 부분에서의 유량 차이, 통과풍량에 대한 기여도를 비교, 차량 내부 유동장을 변화시켜 라디에이터 통과풍량을 개선 할 수 있는 범퍼 뒷부분 위치의 변화를 고려하였다. 그리고 라디에이터 통과풍량을 개선할 수 있는 에어댐의 설치를 통해 라디에이터 통과풍량 확보의 개선 방향과, 내 외부 유동장 변화와 차량 전진속도에 따른 변화도 연결시켜 해석하고자 한다.

## 2. 지배방정식 및 경계조건

실제적인 계산영역은 매우 복잡하므로 본 논문에서는 외부공기가 라디에이터로 진입하는 부분까지의 형상을 계산영역으로 선택하였다.(Fig. 1 참조) 라디에이터 진입로까지의 유동특성 및 유량 예측을 해석하기 위해 아래와 같이 가정하였다.

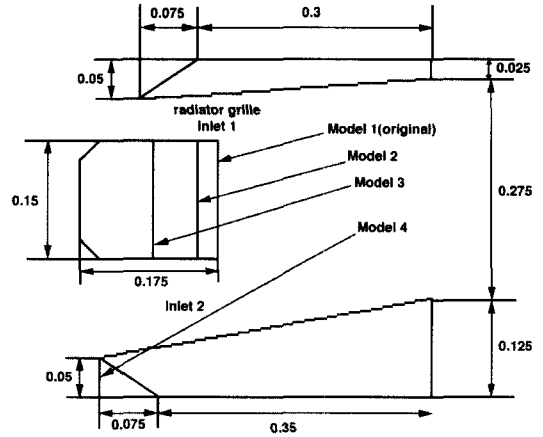


Fig. 1 Computational domain

- ① 2차원 비정상상태, 비압축성 유동이다.
- ② 유체의 점성계수와 밀도는 일정하게 유지된다.
- ③ 중력과 부력은 무시한다.

이상의 가정에서 연속방정식, 운동량방정식을 직교 좌표계에서 텐서를 사용하여 나타내면 다음과 같다.

연속방정식 :

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

운동량방정식 :

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

여기서  $u_i$ 는 속도,  $P$ 는 압력을 나타내며  $i$ 와  $j$ 의 범위는 1에서 2이며,  $\rho$ 는 밀도,  $\mu$ 는 점성계수이다.

본 논문에서는 입구에서 압력, 속도가 주어지며 출구에서는 모든 변수에 대하여 Neumann 조건을, 벽면에서의 속도 성분은 모두 아래와 같은 점착조건을 적용하였다.

$$u_{wall} = v_{wall} = w_{wall} = 0 \tag{3}$$

본 논문에서는 유한요소법 중에서 Galerkin 방법<sup>(9,10)</sup>과 Projection 방법<sup>(11)</sup>을 적용하였으며 수치적 정확도를 검토하였다. 수치해석에 대한 자세한 설명은 참고 논문에서 상세하게 설명하였으므로 여기서는 생략한다.

### 3. 결과 및 토론

#### 3.1 Lid driven cavity 유동

먼저 Galerkin방법과 Projection방법을 적용하여 Lid driven cavity 유동에 대해 비교하였다. Fig. 2는 cavity 유동의 계산을 위한 기하학적인 크기와 격자계를 나타낸다. Table 1은 Galerkin방법과 Projection방법으로 정상상태에 도달할 때까지 계산한 CPU 시간이며, 계산은 펜티엄II-400에서 실행하였다. Projection방법이 Galerkin방법에 비해 격자수 6939일 때, 3배정도 계산시간이 단축되며, 격자수 13857일 때는 11배정도 계산시간이 단축됨을 알 수 있다. Table. 2는  $Re=100$ 에서의 가운데 위치에서의 최대속도를

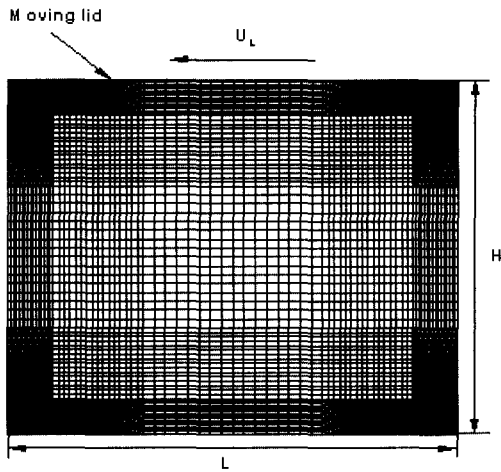


Fig. 2 Geometry and grid of lid driven cavity

Table 1 CPU Time Comparison at different grid systems

	Grid number	Galerkin scheme	Projection scheme
CPU Time (sec)	6939	285	99
	13857	5146	466

Table 2 Maximum velocities through the center-line

	Bruneau [12]	Ghia [13]	Botella [14]	Galerkin scheme	Projection scheme
Re=100	0.2106	0.2109	0.2140	0.2101	0.2138
Re=1000	0.3764	0.3829	0.3886	0.3776	0.3880

Bruneau<sup>(12)</sup>, Ghia<sup>(13)</sup>, Botella<sup>(14)</sup>의 결과와 비교하였다. Galerkin방법과 Projection방법 모두 만족할 만한 결과를 내고 있다. Fig. 3은 Reynolds 수가 1000인 경우에 대해 가운데 위치에서의 속도장에 대해 기존의 결과와 비교하였다. Projection방법은 Ghia, Botella의 결과와 거의 일치하며, Galerkin방법은 약간 차이가 나지만, 거의 일치한다고 볼 수 있다. Table. 3은 중심와류의 중심위치, 왼쪽 아래 와류의 중심위치, 오른쪽 아래 와류의 중심위치를 비교하여 나타내고 있는데 모두 잘 일치하고 있다. Lid driven cavity 유동을 통해 볼 때, 두 방법 모두 만족할 만한 결과를 내고 있으며, 유체 유동장 해석에 적합함을 알 수 있고, 계산시간 면에서 볼 때, Projection방법이 더 효과적이며, 특히 격자수가 많아질수록 이러한 경향이 더 뚜렷해짐을 알 수 있다. 이상과 같은 결론으로 이후 계산은 Projection방법을 사용하여 결과를 얻었다.

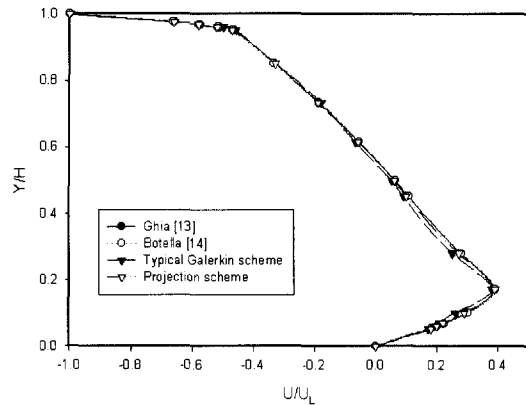


Fig. 3 Velocity profiles at vertical centerline at Re=1000

Table 3 Center locations of vortex at Re=1000

Positions	Bruneau [12]	Ghia [13]	Botella [14]	Projection scheme
Center, x	0.4687	0.4687	0.4692	0.4690
Center, y	0.5586	0.5625	0.5652	0.5648
Lower left, x	0.1289	0.1406	0.1360	0.1358
Lower left, y	0.1094	0.1094	0.1118	0.1116
Lower right, x	0.9141	0.9141	0.9167	0.9148
Lower right, y	0.0820	0.0781	0.0781	0.0782

3.2 라디에이터 통과 풍량

본 논문에서 사용한 형상은 Fig. 1에 나타내었으며 형상의 모든 치수 단위는 미터(m)이다. 그리고 기본 형상은 Fig. 1에서 모델 1이다. 내부 유동장의 변화를 보기 위해 범퍼의 뒷면을 차량의 전방으로 0.025m, 0.075m 이동시킨다. 0.025m 이동시킨 형상은 모델 2, 0.075m 이동시킨 형상은 모델 3, 그리고, 차량 앞부분의 형상 변화가 어떠한 영향을 미치는가 보기 위해 범퍼 밑에 에어뎀을 설치하는데, 에어뎀이 설치된 형상은 모델 4이다. 계산에 사용된 형상은 Fig. 4와 같은 6648개의 격자계에 6336개의 요소이다.

3.2.1. 범퍼 위치의 영향

먼저 입구에서의 레이놀즈수를 차의 속도와 차체의 높이, 공기의 동점성계수로 하여  $Re=400$ ,  $Re=600$ ,  $Re=800$ 으로 변화시켜 유동특성 및 압력특성에 대해 살펴보았다. Fig. 5는 레이놀즈수  $Re=800$ 에 대해 각각의 모델에 대해 유동의 유선을 나타내고 있다. 모델 1~4 모두 범퍼 뒷 부분에 와류가 생기며 전체적인 유선은 비슷한 경향을 나타내고 있다. Fig. 6은 레이놀즈수가 800일 때 모델 1~3의 출구 속도장을 비교하였는데, 모델 1보다 모델 2가 조금 더 속도가 증가하였고, 모델 3의 경우 속도가 상당히 많이 증가하였다. 유량을 계산하기 위하여 아래와 같이 단위면적당 유량에 관한 식을 정의한다.

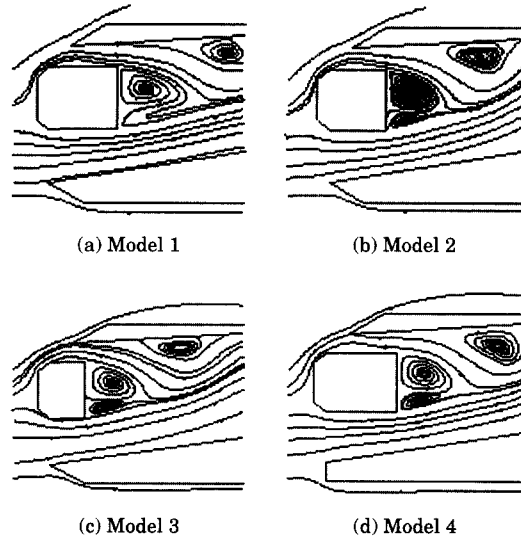


Fig. 5 Streamlines at  $Re=800$

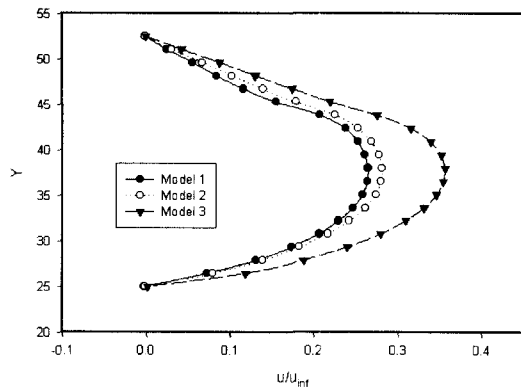


Fig. 6 Model 1, 2, and 3 Velocity profile at  $Re=800$

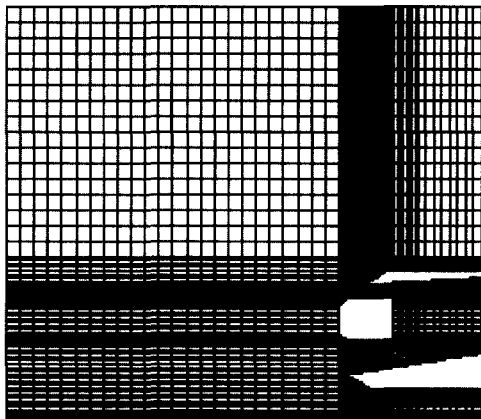


Fig. 4 Grid system of Model 1

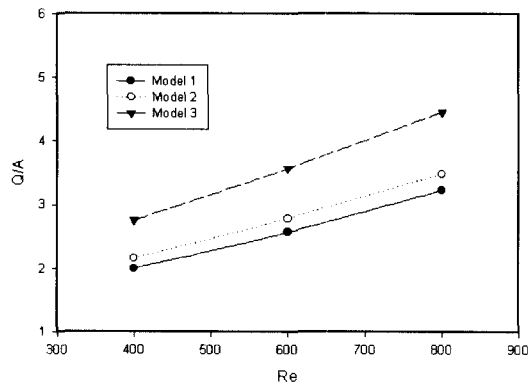


Fig. 7 Flow rate of Model 1, 2, and 3

$$\frac{Q}{A} = \sum_{i=1}^n \frac{u_i}{u_{\infty}} \quad (4)$$

Fig. 7은 모델 1~3의 레이놀즈 수에 따른 단위 면적당 유량을 비교하였는데, 모델 1~3의 유량의 차이가 뚜렷하게 보인다. 따라서, 모델 1에서 모델 3으로 적용할 때 출구에서의 속도가 증가하며, 유량이 증가함을 알 수 있다.

3.2.2. 두 흡입구 사이의 차이

차량 안으로 외부 공기가 들어오는 흡입구는 범퍼 윗쪽의 라디에이터 그릴 부분과 범퍼 아래 부분의 흡입구가 있다. 두 흡입구 사이의 유량의 차이를 분석하여, 유량 확보에 큰 기여도를 하는 쪽에 대한 개선방향을 알 수 있다. Fig. 8은 모델 1에 대해서 라디에이터 그릴 부분과 범퍼 아래 흡입구 부분의 속도장을 나타낸 것이다. 레이놀즈 수가 클수

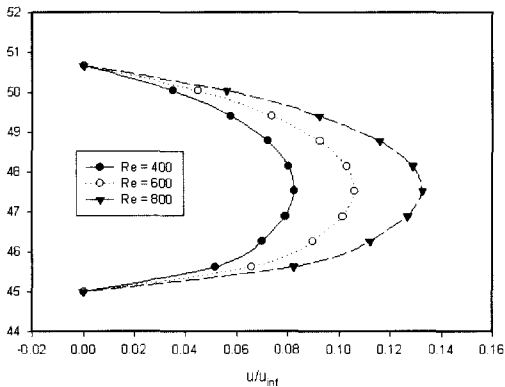


Fig. 8 Model 1 Inlet\_1 velocity profile

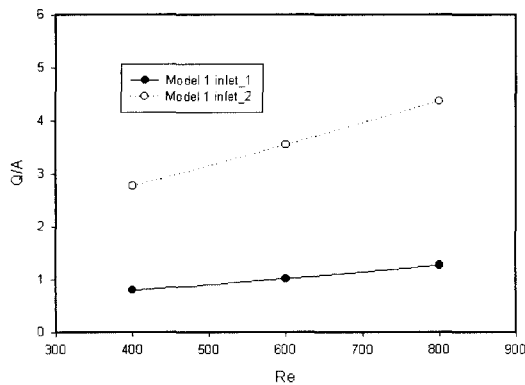


Fig. 9 Flow rate of Model 1 Inlet 1 and Inlet 2

록 속도가 증가하고 있으며, Fig. 9는 모델 1에 대해서 레이놀즈 수에 따른 라디에이터 그릴 부분과 범퍼 아래 흡입구 부분의 단위 면적당 유량을 나타낸 것인데, 라디에이터 그릴부분에 비해 범퍼 아래 흡입구 부분의 유량이 3~4배정도 많으며, 레이놀즈수가 증가할수록 이러한 경향은 더 뚜렷해진다 것을 알 수 있다. 이러한 사실로부터 라디에이터 통과풍량 확보를 위해서는 범퍼 아래 흡입구 부분의 유량을 증가시키기 위한 방법을 모색해야 한다는 것을 알 수 있다.

3.2.3. 에어댐 부착 효과

라디에이터 통과풍량을 증대시키기 위한 다른 방안 중의 하나가 차량 범퍼 아래 부분의 외형에 에어댐을 부착하는 것이다. 이러한 에어댐은 차량 앞부분의 압력증대를 도모하고, 또한 차체 밑 부분의 압력을 떨어뜨려 전체적으로, 압력증대를 통해 유량 확보를 하고자 하는 방법이다. 본 논문에서는 에어댐의 부착이 근처의 영역에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보고자 한다. Fig. 10은 레이놀즈 수가 800일 때, 모델 1과 에어댐을 부착한 모델 4와의 속도장을 비교하였다. 이 그림에서는 에어댐을 부착했을 때, 속도가 더 낮게 나왔다. 하지만, 이것은 에어댐 부착으로 인한 차량 앞부분 압력상승과 차체 밑면의 압력강하 효과를 고려하지 못하여 나타난 것으로 보인다. Fig. 11은 모델 1과 모델 4의 압력장을 비교하였다. 여기서의 압력은 무차원화시킨 값이다. 에어댐 부착으로 인하여 범퍼 앞쪽 압력 값이 높아진 것을 볼 수 있다. 범퍼 윗 부분인

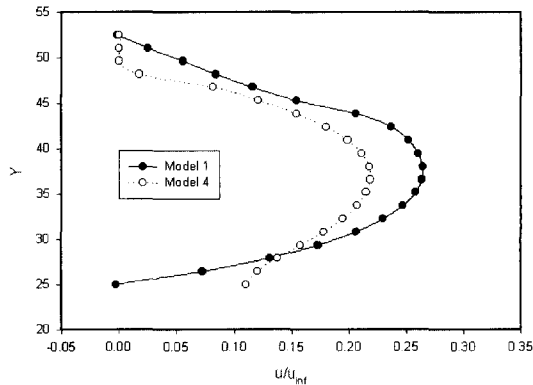
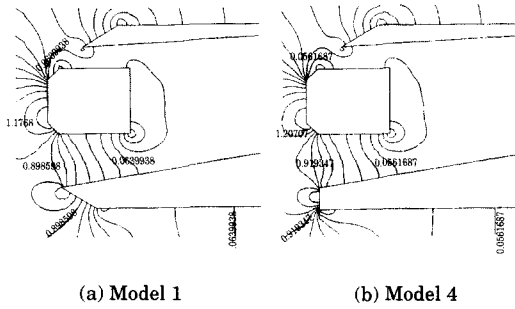


Fig. 10 Model 1 and 4 Velocity profile at Re=800



(a) Model 1 (b) Model 4

**Fig. 11 Pressure contour at Re=800**

라디에이터 그릴 입구 부분의 압력 값은 거의 변동이 없다. 따라서, 에어댐의 부착은 차체 앞부분의 압력 값을 높이고, 결과적으로 라디에이터 후방의 압력과 관련이 있는 차체 밑면의 압력과의 차이를 크게 해서, 압력차이를 이용해 통과풍량을 증가시키기 위한 방안이란 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

지금까지 차량내의 라디에이터 통과풍량 확보를 위해 범퍼 위치의 변화와 에어댐을 고려한 4가지 모델을 채택하여 범퍼 위치 변화에 따른 영향, 라디에이터 그릴 부분과 범퍼 아래 흡입구 부분의 유량 기여도, 에어댐의 영향에 대해서 살펴 보았다. 이상의 과정에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 내부 유동장을 변화시키는 방안의 하나로 범퍼의 위치를 차량의 전방으로 많이 이동시키면 차량 외형을 변화시키지 않으면서, 통과풍량을 증가시킬 수 있다.
2. 라디에이터 그릴과 범퍼 아래 부분 흡입구중 범퍼 아래 흡입구 부분의 유량이 그릴에 비해 많으므로, 범퍼 아래 흡입구 부분에 대한 개선을 통해서 통과풍량 확보를 달성할 수 있다.
3. 에어댐의 부착은 차량 앞부분 압력상승과 차체 밑면의 압력강하 효과를 통해 통과풍량 확보를 증대시키는 방법이다.

#### 참고문헌

[1] Summa, J. M. and Maskew, B., "Predicting

automobile aerodynamic characteristics using an iterative viscous/potential flow technique", SAE paper 830303, 1983

[2] Shaw, C. T., "Predicting vehicle aerodynamics using computational fluid dynamics-a user's perspective", SAE paper 880455, 1988

[3] Himeno, R. and Takagi, M., "Numerical analysis of the airflow around automobiles using multi-block structural grid", SAE paper 900319, 1990

[4] Willoughby, D. A., Williams, J., "A quasi three dimensional computational procedure for prediction of turbulent flow through the front end of vehicles", SAE paper 850282, 1985

[5] Shibata, Y., Hosaka, S., Fujitani, K., and Himeno, R., "A numerical analysis method for optimizing intercooler design in the vehicle development process", SAE paper 900080, 1990

[6] 유정열, 윤홍열, 이훈구, "엔진룸 내의 열유체 유동의 2차원 수치시뮬레이션", 한국자동차공학회논문집 Vol.14, No.6, pp. 99~104, 1992

[7] 최도형, 이용호, "자동차 냉각장치를 통하는 유동에 의한 항력 변화 예측", 한국자동차공학회논문집 Vol. 14, No.5, pp.128~135, 1992

[8] 박찬국, 이종범, 임호룡, 정우인, "자동차 엔진 방열기의 냉각 성능 및 방열 면적 예측에 관한 연구", 한국자동차공학회논문집 Vol. 5, No.3, pp.117~127, 1997

[9] Kim, E., "A mixed Galerkin method for computing the flow between eccentric rotating cylinders", Int. J. Numer. Meth., Vol. 29, pp. 877~885, 1998

[10] 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

[11] Baker, A. J., "Finite element computational fluid mechanics", McGraw-Hill

[12] Bruneau, C. H., Jouron, C., "An efficient scheme for solving steady incompressible Navier-Stokes equations", Journal of Computational Physics, Vol. 89, pp.389~413, 1990

[13] Ghia, U., Ghia, K. N., Shin, C. T., "High-Resolution for incompressible flow using the Navier-Stokes equations and a multigrid method", Journal of Computational Physics, Vol. 48, pp.387~411, 1982

- [14] Botella, O., Peyret, R., "Benchmark spectral results on the lid-driven cavity flow", Computers and Fluids, Vol. 27, pp.421~433, 1998

## 저 자 소 개



**김은필(金恩弼)**

1962년생, 1987년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1991년 피츠버그대학 기계공학과 졸업(공학석사), 1995년 피츠버그대학 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 부경대학교 기계공학과 전임강사



**강상훈(姜尙勳)**

1974년생, 1997년 부산대학교 기계공학과 졸업, 2000년 부산대학교 기계공학과 대학원졸업(공학석사), 현재 플러스 인터내셔널 근무