

피스톤 냉각용 엔진오일 제트 유동특성 Flow Characteristics of Oil Jet for Cooling a Piston

리리·이종훈·정호윤·이연원·김재환

L. Li, J. H. Lee, H. Y. Jung, Y. W. Lee and J. H. Kim

Key Words : Oil jet(오일제트), Oil gallery(오일갤러리), Secondary flow(2차유동), Jet flow(제트유동)

Abstract : An efficient cooling system for a piston of an automotive engine is very important. Therefore a large capacity gasoline engine or diesel engine has adopted the direct injection cooling system to increase its cooling efficiency. In this direct cooling system, an cooling oil is injected to a piston directly using an oil jet and this cooling oil flows through an oil gallery inside the piston. Flow rate and injection accuracy of this cooling oil are very important because these are main factors that have influence on its efficiency. The purpose of this study is to understand the changes of flow characteristics with various curvatures and diameters of an outlet nozzle and to check whether engine oil enters into the oil gallery well or not. From this study, we found that secondary flow was formed in a curved part of jet due to centrifugal force and irregular flow pattern appeared at the jet outlet. This pattern has influence on flow characteristics of engine oil entering the gallery. These simulation results have a good agreement with experiments.

1. 서 론

최근 자동차의 대중화로 인하여 자동차산업은 급속한 발전을 이루었다. 그리고 수요의 증대와 더불어 고품질과 내구성의 향상이 요구되어지고 있다. 이에 더욱 효율적인 시스템의 개발이 이루어지고 있고, 오일제트도 이러한 측면에서 만들어진 시스템이다. 자동차의 신차개발에 있어, 엔진의 중요성은 매우 크다. 자동차 엔진에서의 온도상승은 내부 부품의 변형을 가져올 수 있기 때문에 효율적인 냉각 시스템은 필수적이다.

기존의 오일제트는 피스톤의 하부만을 냉각시켰기 때문에 대용량의 가솔린엔진 혹은 디젤엔진에서는 효율이 높지 않았다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 피스톤 내부에 오일 갤러리를 형성하고 오일제트로부터 분사된 오일이 피스톤 내부에 설치된 갤러리 안으로 직접 흘러 들어감으로써 더욱 냉각 효과를 증대시킬 수 있게 된다. 따라서 노즐로부터 나온 엔진오일이 오일 갤러리로 얼마나 유입 되는지가 엔진의 냉각

성능을 결정하는 중요한 요인이 된다. 또한 오일제트의 경우 충분한 엔진오일의 양을 정확한 위치, 즉 오일갤러리로 정확하게 분사하여 주는 것이 엔진의 냉각 성능을 결정하게 된다. Min등¹이 엔진에 대하여 각 냉각방식의 효과를 살펴보았으며, Yoo등²은 실험을 통해서 레이놀즈수에 따른 초기 유동장에서 난류 제트 유동특성을 연구하였다.

따라서 본 연구에서는 먼저 오일제트의 곡관부에 곡률반경을 세 가지 변화시키면서 각 경우에서의 관내부에서의 유동 특성과 오일제트의 노즐을 통해서 분사되는 엔진오일의 유동특성을 관찰하려, 곡률 반경과 분사형상과의 상관관계를 파악하여 최적화된 형상 설계를 위한 기초 자료로 사용할 수 있게 한다. 그리고 세 가지 중에 두 케이스 노즐출구 직경을 변화시키면서 분사형상의 변화를 관찰하였고 엔진오일이 갤러리 입구에 정확하게 들어가는지 확인하였다. 수치해석은 널리 사용되고 있는 상용코드인 FLUENT를 사용하였으며, 비교실험은 (주)이원정공 기술연구소에서 이루어졌다.

2. 수치해석

2.1 형상 및 격자

본 연구에 사용된 오일제트는 현재 생산되고 있

접수일 : 2006년 7월 22일, 채택확정 : 2006년 10월 9일
이연원(책임저자) : 부경대학교 기계공학부
E-mail : ywlee@pknu.ac.kr Tel. 051-620-1417
리리, 이종훈, 정호윤 : 부경대학교 대학원 기계공학부
김재환 : 이원정공 기술연구소

는 모델 중 하나를 채택하여 수치해석을 실시하였으며, Fig. 1과 같이 오일제트는 크게 체크밸브부와 노즐부로 나눌 수 있다. 체크밸브는 분사되는 엔진 오일의 유량을 조절하는 부분을 말하며, 노즐은 정확한 분사 위치를 결정하기 위해 사용된다. 본 연구에서는 체크밸브부의 유동은 제외하고 곡관부와 노즐로부터 피스톤 하부 오일갤러리 입구까지의 제트 유동부의 유동특성을 조사하였다.

Fig. 2에 엔진내부와 장착된 오일제트를 보여주고 있다. 수치해석을 수행하기 위해 곡관부분과 제트유동부분 두 부분을 해석영역으로 정하였으며, 피스톤의 위치는 피스톤이 상사점에 도달하였을 때로 하였다.

계산격자는 Fig. 3과 같이 ICEM CFD를 이용하여 육면체 격자를 형성하였다. 곡관부분 격자개수는 34만개, 제트유동부분 격자개수는 25만개를 생성하였다.

2.2 경계조건 및 물성치

본 연구에서 사용된 엔진오일은 디젤엔진용 SAE10W30 엔진오일을 사용하였다. 온도의 경우 엔진내부에서는 작동 상태 등에 따라 내부 온도가 변하지만 본 연구에서는 실험 조건과 같은 90℃으로 설정하고 계산을 수행하였다. 따라서 엔진오일의 물성치 역시 유온 90℃일 경우의 물성치를 사용하였다. 곡관부분에서의 경계조건은 Table 1과 같이 나타내었다. 입구에서는 일정 압력을 가하였고 출구 조건의 경우 대기압조건을 적용하였다. 실제 엔진 내부의 조건은 피스톤의 상하 왕복운동에 의해 시간에 따라 변화하지만, 실험에서는 대기압조건으로 실험을 진행하였기 때문에 두 결과를 비교하기 위해 대기압 조건을 적용하였다. Table 2에서는 제트 유동부분의 경계조건은 나타내었다.

2.3 해석방법

곡관의 곡률반경 6mm, 8mm, 10mm에 대하여 수치해석을 수행하여 유동특성을 관찰하였다.

2-phase 유동문제를 풀기 위하여, VOF(Volume of Fluid) 모델로 수치해석을 실시하였다. 엔진오일 내부의 공기 함유량은 무시하고 엔진오일만 노즐을 통과하게 가정하였다. VOF 모델은 두 유체 사이에 정확한 계면이 존재하는 이상(二相) 유동을 적용할 때 두 유체 사이에는 계면이 존재한다는 것을 알 수 있다. 이러한 경우 VOF 모델을 적용하면 각 유체의

유동과 물리적 특징 등을 표현할 수 있다.

유동장을 계산하기 위해 standard $k-\epsilon$ model 을 사용하였고, 그 수식은 다음과 같다:

$$\text{연속방정식 } \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

운동량방정식

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + (\mu + \mu_t) \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

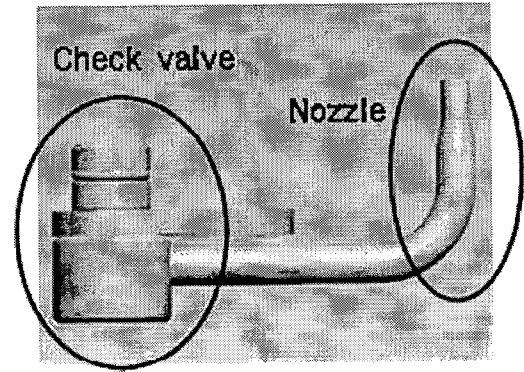


Fig. 1 Geometry of oil jet

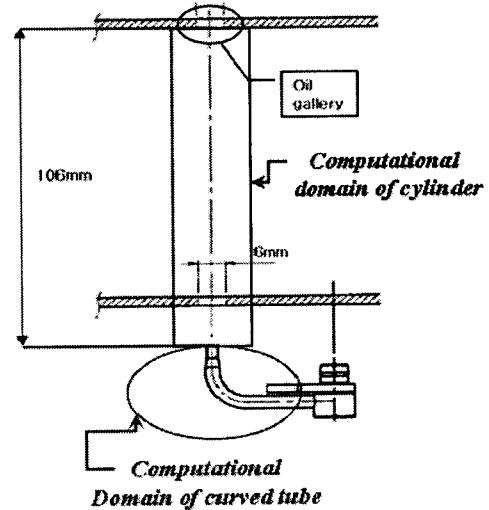
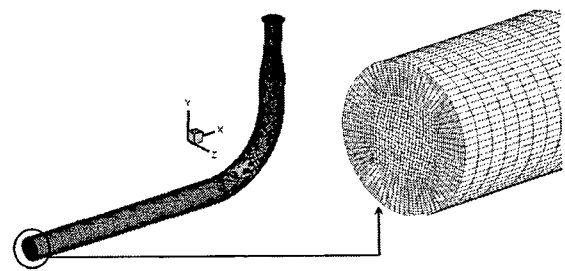
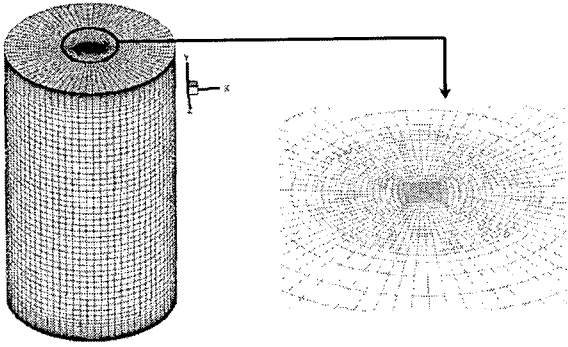


Fig. 2 Schematic diagram of oil jet system



(a) Curved tube part



(b) Jet flow part

Fig. 3 Computational grid system of oil jet

Table 1 Boundary conditions at curved tube part

Inlet	Pressure	280 kPa
Outlet	Pressure	Atmospheric pressure
Tube	Wall	No slip

Table 2 Boundary conditions at jet flow part

Inlet	Velocity	Velocity profile
Outlet	Pressure	Atmospheric pressure
Jet flow	Wall	No slip
Bottom	Wall	No slip
Top	Wall	No slip

난류운동에너지방정식

$$\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (3)$$

G_k : 평균속도 구배에 의한 난류운동에너지 발생
 σ_k : k 의 난류 프란틀수(1.0)

난류운동에너지 소산율 방정식

$$\rho u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

σ_ϵ : ϵ 의 난류프란틀수 (1.3)

$C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$

난류점성계수

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

$$C_\mu = 0.09$$

3. 수치해석 결과

3.1 곡률반경에 따른 유동특성

일반적으로 곡관에서 유동은 굽은 면을 따라 흐르는 유동에 의해 생성되는 원심력, 관성력, 점성력 등의 상호작용으로 인하여, 주유동 방향 속도와 압력손실이 공간적으로 재분배되어 곡관 내부에서는 나선형의 복잡한 대칭형 2차유동이 발생되어진다. 이 유동은 Dean number라는 무차원수에 의해 그 발달 정도를 판별할 수 있다. Dean number는 곡관의 형상(곡률반경과 관의 직경)과 유체의 속도에 의해 결정된다. 본 연구에서 곡관부분을 예로 들어 보면 다음과 같다.

$$d = 0.0027m$$

$$r = 0.008m$$

$$De = \sqrt{\delta} Re \quad (6)$$

$$Re = 2aU/\nu \quad (7)$$

여기서 ν 는 본 연구에서 적용한 조건에 맞춰 SAE10W30 등급의 엔진오일이 유온 90℃일 때의 동점성계수를 나타낸다.

일반적으로 알려진 바에 의하면, 직관에서 유동이 발달할 수 있는 길이(L_s)는 아래의 식을 통해서 구할 수 있다. (Fargie and martin (1971))³

$$L_s = 0.125aRe \quad (8)$$

곡관에서 유동이 발달할 수 있는 길이(L_c)와 직관에서 유동이 발달할 수 있는 길이(L_s)의 비는 아래의 식에서 구할 수 있다(Yao and Berger(1975))⁴.

$$L_c/L_s = 8e_1/\sqrt{De} \quad (9)$$

e_1 은 2의 값을 가지며 위에 공식을 통해서 곡관에서 2차유동이 충분히 발달할 수 있는 길이는 $L_c = 0.181m$ 이다. 곡관의 입구에서 노즐의 출구까지의 거리가 0.0225m이고, 따라서 오일제트에서는 2차유동이 발생하지 않는다는 것을 의미하는 것은

아니다. 다만 충분히 발달한 2차 유동을 관찰할 수 없음을 말하는 것이다.

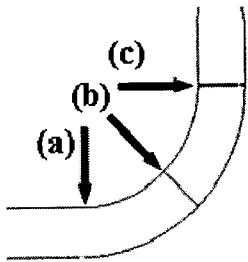


Fig. 4 Sections at curved tube

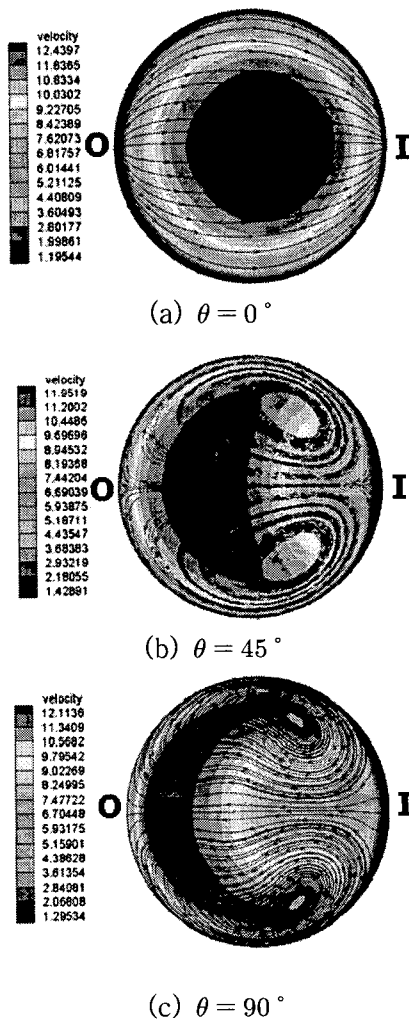


Fig. 5 Streamlines and velocity contours at various sections of curved tube

Fig. 4에 비교를 위한 곡관부의 세 부분의 위치를 나타냈으며, Fig. 5는 각 단면에서 유동방향을 유선으로 나타냈고 유동속도 크기는 속도 contour로 나타내었다. 첫 번째 주류방향 위치($\theta = 0^\circ$)에서 2차 유동이 비록 크기는 작지만 단면 전체에 걸쳐 완전히 곡관의 안쪽 벽면을 향하고 있음을 확인할 수 있

으며, 이것은 이 유동에서 곡관의 정보가 상류방향으로 전파되기 때문이다. 속도 전체적으로는 원형속도분포를 그대로 유지하고 있음을 알 수 있다. $\theta = 45^\circ$ 에서 와동은 곡관의 바깥쪽을 향해 벽면을 따라 특징적인 꼬리를 형성하며 그림 상에 나타낸 바와 같이 2개의 대칭적인 와동을 가지는 유동의 형태로 발전되는 것을 알 수 있다. 속도 contour는 점점 알파벳 C와 같은 형상으로 변해 가는 것을 확인할 수 있다. $\theta = 90^\circ$ 에서는 2차유동의 강도는 전체적으로 감소한다. 관 중심에서는 주류방향 속도의 국소 최소값이 나타나고, 곡관 바깥쪽 벽면 근처에서는 주류방향 속도가 다시 증가한다.

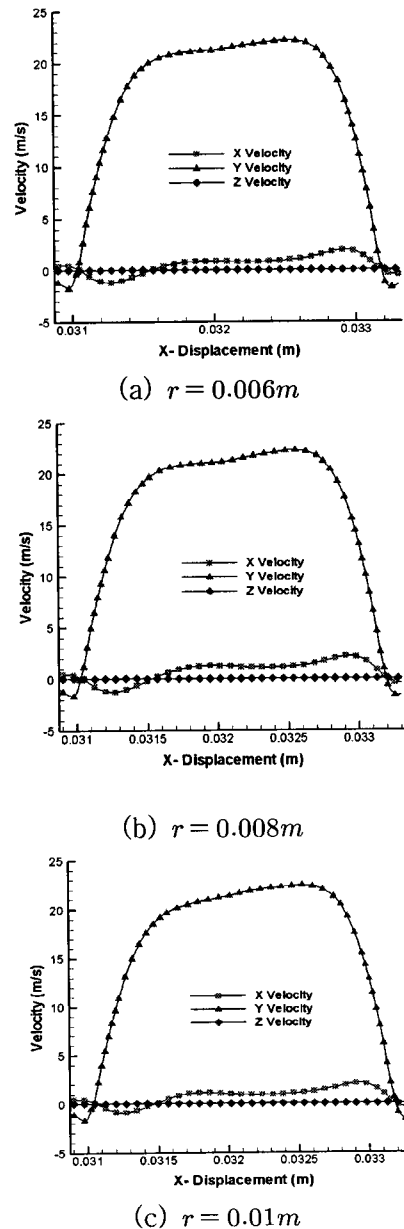


Fig. 6 Velocity components at outlet of nozzle for various curvatures at $d = 0.00185m$

노즐출구에서 속도의 분포를 살펴보면 Fig. 6과 같이 나타났다. 출구에서는 곡관부에서 발생한 2차 유동이 소멸되어 관찰되지 않고 관을 따라 Y방향의 속도가 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 제트유동에서 흔히 볼 수 있는 노즐 출구에서의 와동흐림 현상에 의해 역류가 생김을 볼 수 있다. X방향의 속도를 살펴보면 관의 중심을 기준으로 +X방향에서는 양의 속도 분포를 나타내고 -X방향에서는 양의 속도를 나타낸다. 그리고 Y방향의 속도 분포 역시 관의 중심

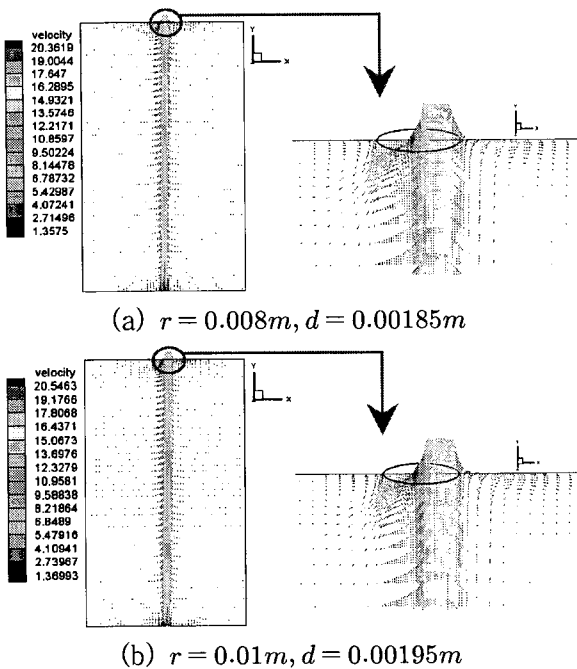


Fig. 7 Comparison of velocity vector for different curvature and outlet of nozzle at $t=0.01s$

부분에서 +X방향의 속도 값이 전체적으로 크게 나타난 것을 알 수 있다. 이는 곡관에서 발생하는 원심력에 의한 영향이 남아있음을 나타낸다.

3.2 제트유동부분에서의 유동특성

제트유동의 같은 경우는 엔진오일이 분사하기 때문에 VOF 모델을 사용했다. 본 연구에서는 곡률반경이 $r = 0.008m, r = 0.01m$ 일 때 곡관 출구 속도분포를 제트유동 입구속도로 이용하여 계산했다. 그 결과는 Fig. 7에 속도 벡터로 나타내었으며 공기와 오일의 속도분포를 동시에 나타내고 있다. 즉 제트유동의 중심축으로부터 멀어지면서 속도가 급격히 줄어드는 것을 볼 수 있는데 이 부분은 공기의 속도 분포이다.

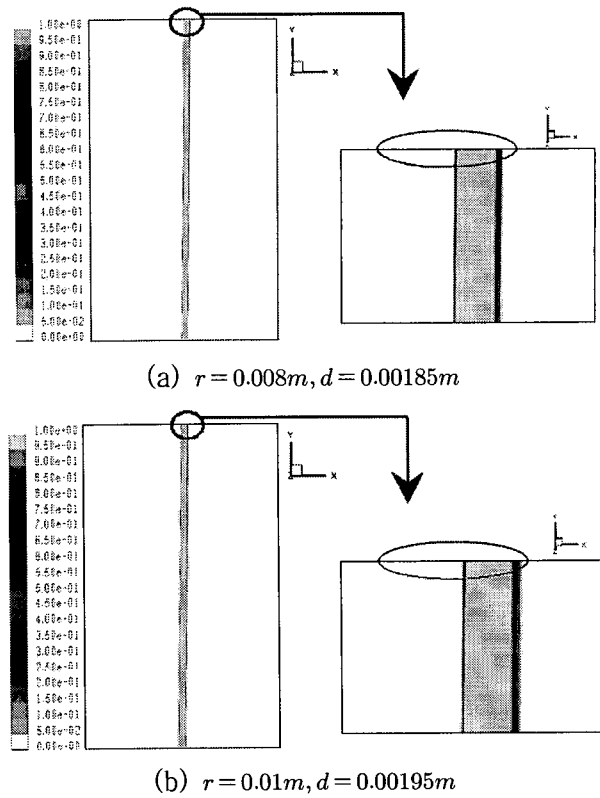


Fig. 8 Comparison of volume of fraction for different curvature and outlet of nozzle at $t=0.01s$

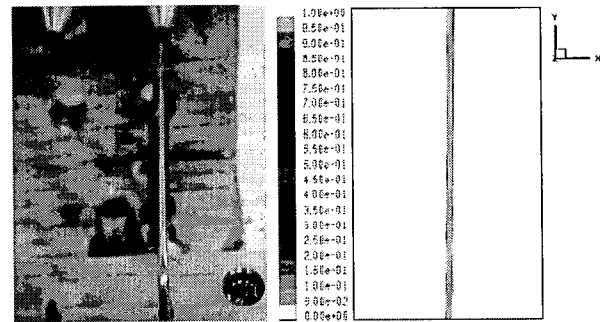


Fig. 9 Comparison of oil jet flow for experimental photography and computational result

유체의 점성으로 인하여 엔진오일이 분출됨에 따라 오일의 유동에 의해 공기의 유동이 형성됨을 알 수 있다. 그리고 제트유동입구로부터 엔진오일이 분출되어 나올 당시는 제트유동 중심축의 오일의 속도가 빨랐지만, 제트유동 입구로부터 멀어지면서 완전히 발달된 유동의 형태를 보이고 있으며, 그림 좌측에 제트유동의 출구 부분을 확대한 것을 나타내었다. 확대된 부분에서 출구 주위의 유동은 출구의 벽면으로 인하여 제트유동 주위로 순환유동이 생성되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8에서 엔진오일의 volume fraction을 나타내

고 있다. 중간의 제트류 부분이 1의 값을 가지고 주위의 여백 부분이 0의 값을 나타낸다. 즉 중앙부분이 엔진오일이 100%임을 나타내고 나머지 부분은 공기가 100%임을 나타낸다. 본 연구에서 중요한 목적 중에 하나는 엔진오일이 오일갤러리 입구에 잘 들어가는지 체크하는 것이다. 이 그림을 통해서 엔진오일이 오일갤러리 입구에 잘 들어가는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 9는 수치해석과 실험의 비교 결과로서 잘 일치함을 보여주고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 자동차 엔진 냉각용 오일제트에 대한 연구를 수행하였고, 오일제트 노즐의 다양한 형상에 따라 내부의 유동특성에 따른 연구를 수행하였으며, 결론은 다음과 같다.

먼저 일반적으로 유체가 곡관을 지날 때 나타나는 2차유동이 오일제트의 곡관 부분에서 역시 관찰되었으며, 출구 유동분포에 영향을 미친다. 그리고 제트유동 부분에서 분사하는 형상이 분산하지 않고 일직선으로 갤러리로 들어가는 것을 확인 하였으며 이러한 수치해석 결과는 실험과 잘 일치하여 전산해석의 타당성을 보여준다.

후 기

본 연구는 산업자원부/한국산업기술재단의 지역 혁신인력양성사업 및 2006년도 누리사업의 연구결과로 수행되었음. 또한 비교실험은 (주)이원정공 기술연구소에서 행하여졌음을 밝혀 사의를 포함.

참고문헌

1. B. S. Min, F. S. Kim J. K. Choi and G. S. Choi, 1999, "A study on the Method and Effect of Piston Cooling", Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 7, No. 3, pp. 87~93.
2. Y. S. Yoo, J. M. Yang and J. Y. Yoo, 1995, "An Experimental Study on the effect of Reynolds number on the initial flow region of axisymmetric turbulent jet", KSME International Journal, Vol. 1, No. 2, pp. 384~389.
3. Fargie, D. and Martin, B. W. 1971, "Developing

- laminar flow in a pipe of circular cross-section", Proc. Roy. Soc. London Ser. A321, pp. 461~476.
4. Yao, L. S. and Berger, S. A. 1975, "Entry flow in a curved pipe", J. Fluid Mech. 67, pp. 177~196.
5. X. Guan and T. B. Martonen, 2000, "Flow Transition in Bends and Applications to Airways", J. Aerosol Sci Vol. 31, No. 7, pp. 833~847.
6. Jure Marn, Primoz Ternik, 2006, "Laminar flow of a shear-thickening fluid in a 90° pipe bend", Fluid Dynamics Research 38, pp. 295~312.