

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0095

CFD 기법을 이용한 실린더헤드 가스켓홀 통과 유량의 최적화

Numerical Optimization of the Coolant Flow Rates through Cylinder Head Gasket Holes by applying CFD Techniques

백 경 옥*, 이 상 호**, 조 남 효*
Kyung-Wook Baek, Sang-Ho Lee, Nam-Hyo Cho

ABSTRACT

Simple design methods were developed to control the coolant flow rates through cylinder head gasket holes. Applying the concept of flow through an obstruction the ratio of intake to exhaust side flow rates could be easily controlled while maintaining the flow rates per cylinder of the original model. Flow distribution in the coolant passage of the original model was calculated by CFD and the flow rates at the gasket holes were modified based on the calculation results. The calculated flow rates of the modified gasket holes were reasonably close to target values. For more accurate control of the flow rate distribution, a design method with iterative CFD calculations was also suggested. The final size of gasket holes for the target flow rates were obtained just after a few optimization iterations. These methods can be very useful for the optimization of heat transfer characteristics in engine cylinder head and block.

주요기술용어 : CFD (Computational Fluid Dynamics; 전산유체역학), Engine Coolant Passage Optimization (엔진냉각수 유로 최적화), Cylinder Head Gasket Hole (실린더헤드 가스켓홀), Heat Transfer Coefficient (열전달계수)

Nomenclature

A : gasket hole area
 dA : computational cell area on a gasket hole section
 Q : volume flow rate at a gasket hole

V : velocity component normal to a gasket hole section
 α : flow coefficient ($=Q/A/\sqrt{2\Delta P/\rho}$)
 ΔP : pressure difference between a gasket hole and the outlet of engine coolant passage
 Re : Reynolds number

* 회원, 고등기술연구원

** 회원, 대우자동차

Subscripts

- av* : average
- hole* : gasket hole
- i* : computational cell index on a gasket hole
- n* : optimization iteration level
- t* : target

1. 서 론

엔진내부의 냉각수 유로의 설계 개발은 엔진 성능과 직결되어 있는 아주 중요한 일로써 시작 엔진 제작 및 엔진시험을 수차례 반복하는 장기간의 단계를 거치는 작업을 통해 최종적으로 완료하게 된다. 엔진의 출력과 운전 조건을 고려한 적절한 냉각수 유로의 설계는 엔진성능과 배기가스 저감을 위해 필수적인 것으로써 최근 십여년 동안 CFD 기술을 직접 엔진설계에 응용하여 냉각수 유로 설계를 검토하고 최적화하는 일이 필수적인 개발 단계가 되어가고 있다. 이를 통해 이전의 장기간에 걸친 시행착오적인 엔진개발 단계를 획기적으로 단축시키는 한편 유로내의 냉각수 유속분포, 압력분포, 열전달계수 등과 같은 더 상세한 정보를 얻을 수 있게 되었다.

냉각수 유동해석에 관한 연구는 1980년대 말부터 본격적으로 보고되었다. Aoyagi 등¹⁾은 FEM 기법을 이용하여 하나의 실린더에 대한 냉각수 유동해석을 시도하였다. Sandford와 Postlethwaite²⁾는 상용 CFD 코드를 이용하여 단순화된 냉각수 유로 장치내의 유속분포를 해석하였고 다양한 유동가시화 기법을 이용한 실험결과와도 비교 분석하였다. Porot와 Menegazzi³⁾는 실제 엔진의 냉각수유로 전체 형상을 X-ray CT (computed tomography) 기술을 이용하여 추출한 후 이를 CFD 해석에 이용하였으며 냉각수 유로를 최적화하여 엔진냉각성능을 최적화하는 기술을 보고하였다. 그밖에도 실제 엔진에 대한 냉각수유동 해석을 통해 상세한 유동정보를 엔진 설계에 이용하는 사례가 많이 보고되었

다.⁴⁻⁶⁾

본 연구에서는 CFD 기법을 이용하여 실린더 헤드 가스켓홀을 통과하는 냉각수 유량을 설계자가 원하는 대로 배분할 수 있는 방법을 개발하였다. 냉각수 유로 형상을 변경하지 않고 가스켓홀 크기만을 최적화하여 통과유량을 변경하고 이를 통해 냉각효과를 최적화하는 것에는 여러 가지 제한이 있기는 하지만 신속한 엔진시험을 통해 냉각효과를 검증해 볼 수 있는 장점이 있으므로 엔진개발에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

2. 냉각수 유동분포 제어

2.1 목적함수

본 논문에서는 가스켓홀을 통과하는 유량을 제어하여 실린더헤드내 냉각수 유동분포를 변경코자 하였으므로 Eq. 1과 같이 가스켓홀을 통과하는 유량과 설계자가 미리 설정한 목표유량과의 차이를 목적함수(object function)로 설정하였다.

$$f = \frac{\sum_{\text{gasketholes}} |Q_i - Q|}{\sum_{\text{gasketholes}} Q} \quad (1)$$

가스켓홀을 통과하는 냉각수 유량 Q는 Eq. 2와 같이 CFD 해석을 통해 얻어진 속도분포를 이용하여 계산하게 된다.

$$Q = \sum_i V_i dA_i \quad (2)$$

2.2 흡배기측 냉각수유량 조절방법

효과적인 엔진냉각을 고려할 때 일반적인 냉각수 유량의 배분법칙은 흡기매니폴드측보다는 배기측 실린더헤드 부위로의 냉각수 유량이 더 크도록 설계한다.⁴⁾ 본 논문에서는 가스켓홀의 크기만을 변경하여 유량 배분을 조절코자 하였으며 원관내의 평판 오리피스를 통과하는 유체에 대한 베르

누이 이론을 응용하였다.⁷⁾ 가스켓홀을 통과하는 유량과 평균유속은 다음 식과 같이 표현될 수 있으며 이는 CFD 해석 결과 얻어지는 값이다. 가스켓 전후의 압력강하 ΔP 는 냉각수유로 출구에서의 정압과 각 가스켓홀에서의 정압차로써 CFD 해석 결과 얻어지며 유량계수 α 는 다음과 같이 정의된다.

$$A_{hole} = \sum_i dA_i,$$

$$Q_{hole} = V_{av} A_{hole} = a \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} A_{hole}. \quad (3)$$

각 실린더별로 블록에서 헤드로 유입되는 냉각수 유량이 서로 다른 가스켓홀 설계에서도 비슷하게 유지된다면 각각의 가스켓홀을 통과하는 냉각수유량은 해당 가스켓홀의 면적에 따라 크게 변화하지 평균유속 V_{av} 는 크게 변화하지 않을 것이다. 이러한 가정 아래 다음 식과 같이 흡배기측 가스켓홀을 통과하는 냉각수 유량비를 설정할 수 있다.

$$Q_{cylinder} = \sum_{intake} V_{av} A_{hole} + \sum_{exhaust} V_{av} A_{hole},$$

$$\left(\sum_{intake} V_{av} A_{hole} \right) : \left(\sum_{exhaust} V_{av} A_{hole} \right)$$

≡ Ratio of intake to exhaust side
flow rates determined by engine designer (4)

Eq. 4의 첫 번째 식은 한 실린더의 흡배기측 가스켓홀을 통과하는 유량의 총합이 직전 설계 단계에서의 유량과 같다는 것을 나타낸다. 두 번째 식은 설계자에 의해 설정된 실린더별 흡배기측 가스켓홀을 통과하는 유량비를 나타낸다. 만일 실린더별 미지수인 가스켓홀 면적 A_{hole} 이 2개 이상이라면 상기 식 이외의 추가 상관식이 필요하게 된다. 이때에는 흡배기측 각각의 가스켓홀에 대한 유량비를 적절히 설정하여 해결하면 된다. 본 논문에서 사용된 엔진은 실린더별로 3개의 가스켓홀이 있었지만 배기측의 작은 홀들은

변경하지 않고 흡배기측 각각 한 개의 가스켓홀만을 변경하였다.

미지수인 가스켓홀 면적 A_{hole} 은 다음과 같이 계산할 수 있다. 먼저 초기 가스켓홀 설계안에 대한 CFD 해석결과와 Eq. 2, 3을 이용하여 평균유속 V_{av} 과 실린더별 유량 합계 $Q_{cylinder}$ 를 계산한다. 이 값들을 이용하여 새로운 가스켓홀 설계안에 대한 면적 A_{hole} 을 Eq. 4를 이용하여 계산한다.

2.3 실린더별 냉각수유량 조절 방법

만일 목표로 하는 실린더별 유량배분이 초기 설계안과 크게 다를 때에는 가스켓홀 전후의 압력강하 영향이 커지므로 평균유속 V_{av} 변화도 무시할 수 없게 된다. 이런 경우에는 다음과 같은 반복계산 방법을 사용하면 목표유량을 만족시키는 가스켓홀 면적을 구할 수 있다.

Step 1:

$$V_n = \frac{Q_n}{A_n} \quad (5)$$

현재 반복 CFD 계산 수준인 (n) 단계에서의 CFD 해석 결과를 이용하여 가스켓홀에서의 평균유속을 계산한다.

Step 2:

$$A_{n+1} = \frac{Q_i}{V_n} \quad (6)$$

각 가스켓홀에 대한 목표유량과 Step 1에서 계산된 평균유속을 이용하여 다음 ($n+1$) 단계의 가스켓홀 면적을 계산한다.

Step 3:

새로운 가스켓홀 크기에 대한 CFD 계산결과를 생성하고 ($n+1$)수준의 CFD 해석을 수행한다.

Step 4:

A_{n+1} 을 계산하고 목적함수(Eq. 1) 값이 허용오

차 이하로 떨어질 때까지 Step 1부터의 단계를 반복한다. Fig. 1은 이러한 반복계산 단계를 도시한 그림이다.

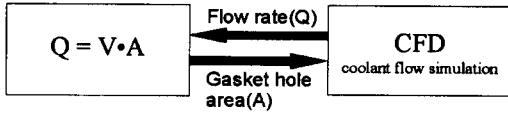


Fig. 1 Iterative control procedure of the flow rates at gasket holes

3. 수치해석 상세

3.1 수치해석 방법

본 연구에서 제시된 가스켓홀 통과 유량 조절 방법을 검증하기 위해 대형 상용차용 직렬6기통 디젤엔진의 경우를 해석하였다. 이 엔진의 냉각수 흐름도를 Fig. 2에 나타내었다. 냉각수는 오일 쿨러를 통과한 후 실린더블록 측면의 저장공간(storage tank)을 통하여 실린더헤드와 실린더블록의 냉각수 통로를 거쳐 배기측에 있는 출구를 통해 빠져 나가게 된다.

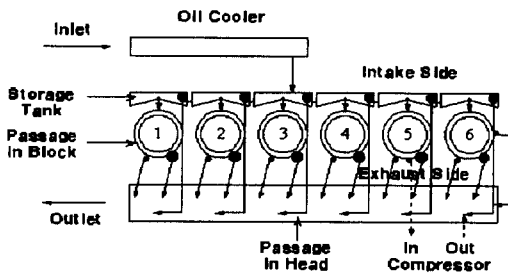


Fig. 2 Schematic diagram of coolant flow direction (shaded circles: gasket holes)

Fig. 3은 본 해석에서 사용된 CFD 계산 격자를 보여주고 있다. 격자생성은 상용코드인 ICEM CFD/CAE를 사용하였다. 실린더헤드는 4면체 격자를 사용하여 자동적으로 생성케 하였는데 약

180,000개의 격자를 사용하였으며 실린더블록과 가스켓은 6면체 격자로 약 100,000개의 격자를 사용하였다. CFD 해석에는 상용코드인 Star-CD를 사용하였다. 난류모델은 RNG k-epsilon 모델을 사용하였고 대류항 차분법엔 상류항차분법(Upwind difference scheme)을 사용하였다. 입구 경계조건으로는 주어진 엔진회전수에 따른 워터펌프 유량, 난류강도 5%, 난류길이척도로 입구수력직경의 10%를 설정하였고 출구 경계조건으로는 일정 압력을 설정하였다. 냉각수 온도는 80℃ 조건을 설정하였다.

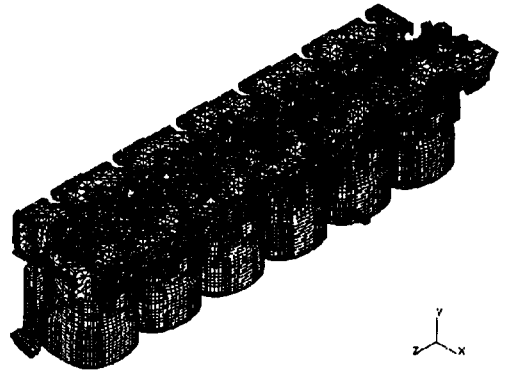


Fig. 3 Computational grid for coolant flow passages

3.2 가스켓홀 부근 격자생성

가스켓홀 통과유량을 최적화하기 위해서는 많은 가스켓홀의 크기를 수시로 변경해야 하므로 간편한 격자생성 기법이 요구된다. 사용된 코드인 Star-CD에서는 경계면에서의 격자가 서로 달라도 유동해석이 가능하여 블록과 헤드의 격자는 변경하지 않고 가스켓홀의 크기 변경에 따른 가스켓 격자만을 수시로 대치하면 되었다. 경계면에서의 가스켓홀 부분의 격자는 Fig. 4에 도시되어 있다. 하나의 가스켓홀에는 대략 75개의 격자를 설정하였고 유동방향으로는 3개를 설정하였다.

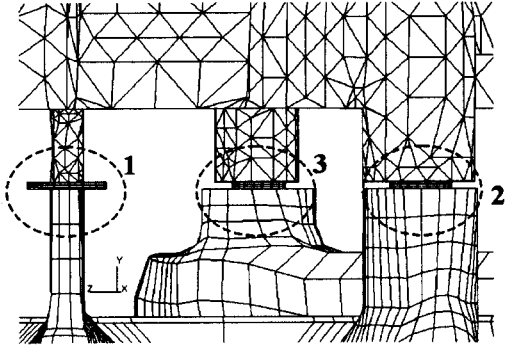


Fig. 4 Detailed view of computational meshes near the gasket holes of cylinder no. 1 constructed with an arbitrary coupled method (the numbers are corresponding to Fig. 5)

4. 결과 및 토의

4.1 흡배기측 유량조절 결과

Fig. 5에서 보듯이 실린더별 가스켓홀은 흡기측에 하나, 배기측에 2개가 있다. 배기측 가스켓홀 중 상대적으로 작은 가스켓홀(1,4,7,10,13,16)과 19번홀은 그 크기를 고정하였으며 유량 최적화에는 흡배기측 각각 하나의 가스켓홀만을 이용하였다. 초기 가스켓 설계안에 대한 CFD 해석 결과 흡배기측 유량배분은 23%:77%로 나타났으며 흡배기측 유량조절을 위해 3:7과 4:6의 두 가지 경우를 해석하였다.

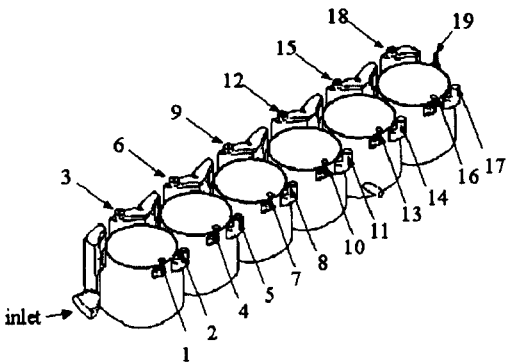


Fig. 5 Numbering of the gasket holes

Fig. 6, 7은 흡배기측에 대한 목표 유량비가 각각 3:7인 경우와 4:6인 경우를 초기 가스켓 설계안(23:77)의 경우와 비교한 도표이다. 목표 유량비가 3:7인 경우 초기 설계안의 가스켓홀 면적과 크게 다르지 않으므로 CFD 해석 결과의 유량 배분과 크게 다르지 않은 것을 볼 수 있다. 그러나 4:6의 경우 큰 차이를 보여 주고 있다.

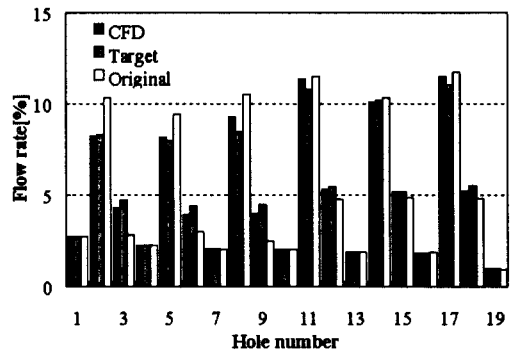


Fig. 6 Distribution of the flow rates at the gasket holes (3:7 case)

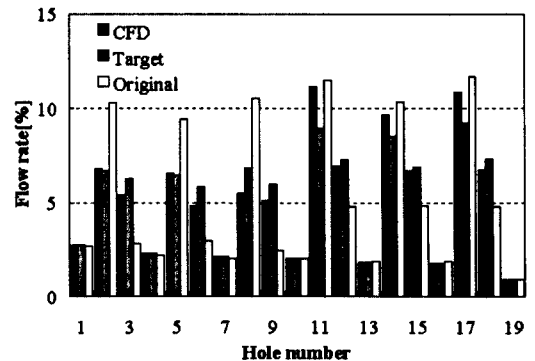


Fig. 7 Distribution of the flow rates at the gasket holes (4:6 case)

Fig. 8은 상기 3가지 경우에 대한 가스켓홀 통과 평균유속을 비교한 도표이다. 냉각수 입구측에 인접한 3,6,9번 가스켓홀에서는 초기 가스켓

설계안과 비교하여 큰 차이를 보여주고 있다. 이것은 이들 가스켓홀과 출구사이의 압력강하가 다른 부분과 비교하여 상대적으로 크므로 가스켓홀 크기의 변화에 따른 평균유속 변화가 심하기 때문인 것으로 생각된다. 계산된 목적함수는 3:7, 4:6 각각의 경우에 4.1%, 10.4% 이었다.

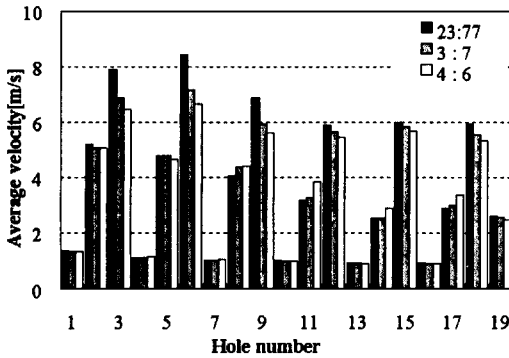


Fig. 8 Distribution of average velocity at the gasket holes

4.2 실린더별 유량조절 결과

초기 가스켓 설계안과 크게 다른 유량배분 경우의 가스켓홀 크기를 설정하기 위해 반복적인 방법을 이용하였다. 다음 Table 1에서 보는 것과 같이 두 가지 임의로 설정된 실린더별 유량배분에 대한 최적화 해석을 수행하였다. 냉각수 출구에서 상대적으로 멀리 떨어진 실린더에서의 열전달을 촉진하려는 의도에서 Case 1은 유량배분을 선형적으로 변화시켰고 Case 2는 6번 실린더만 집중해서 유량을 크게 증가시킨 경우이다.

Fig. 9, 10은 Case 1에 대한 최적화 계산에서

Table 1 Target flow rate in each cylinder(%)

Cylinder no.	1	2	3	4	5	6	sum
Original	16	15	15	18	17	19	100
Case 1	9	12	15	18	21	25	100
Case 2	15	14	14	16	16	25	100

목적함수와 실린더 별 유량 변화를 보여주는데 목적함수 값이 2% 이하가 될 때까지 3~5번의 반복계산이면 충분하였다. Fig. 11, 12는 두 경우 모두 3번째 단계 계산 이후의 실린더별 계산 유량이 목표유량과 흡사함을 보여준다.

Fig. 13은 레이놀즈상사(Reynolds analogy)를 이용하여 CFD 해석결과에서 열전달계수를 유추한 결과이다. 검은색 기호는 배기밸브 브릿지 부분에서의 국소적인 열전달 계수를 표시한 것이고 회색 기호는 실린더헤드에서 냉각수가 접하는 전체 표면적에서 평균 열전달계수를 표시한 것이다. 5, 6번 실린더에서 배기밸브측 열전달 계수가 상대적으로 큰 것은 Case 1,2의 경우에서

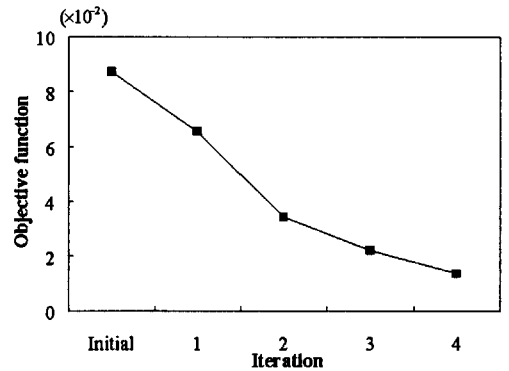


Fig. 9 Variation of the object function (Case 1)

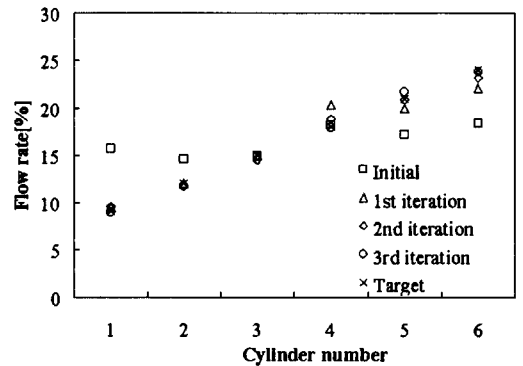


Fig. 10 Convergence history of the flow rates in the cylinder (Case 1)

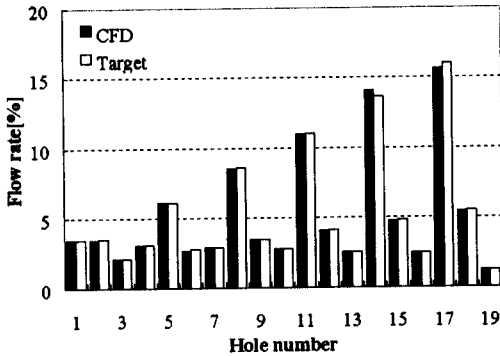


Fig. 11 Distribution of the flow rates at the gasket holes after third optimization iteration (Case 1)

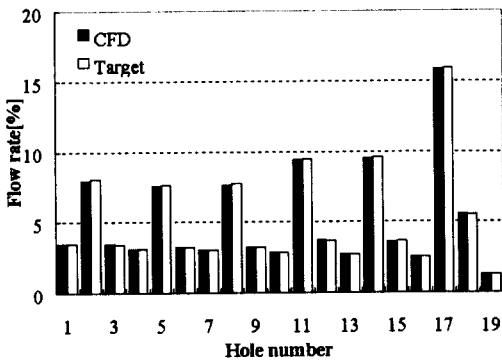


Fig. 12 Distribution of the flow rates at the gasket holes after third optimization iteration (Case 2)

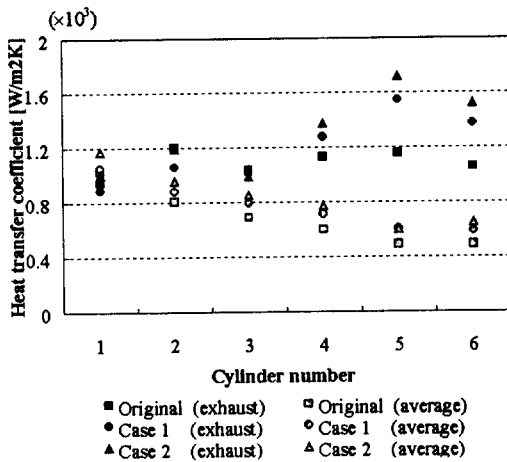


Fig. 13 Comparison of the heat transfer coefficients near the exhaust ports and the area-weighted average values

의도한 것처럼 이 부분의 낮은 평균 열전달계수를 높이려는 의도의 결과이다. 그러나 결과적으로는 전체 실린더헤드 부분에서 평균열전달계수가 증가하게 되었다. 실린더별 평균 열전달계수의 변화를 목적함수로 하여 가스켓홀 최적화도 시도할 수 있을 것으로 생각되나 근본적으로는 냉각수유로의 형상 최적화가 필요할 것으로도 판단된다.

4.3 가스켓홀 통과 유동특성

Fig. 14는 초기설계 가스켓의 경우 워터펌프를 통해 유입되는 유량의 레이놀즈수 증가에 따른 이상속도($\sqrt{2\Delta P/\rho}$)와 유량계수의 변화를 보여주고 있다. CFD 해석결과 이상속도는 레이놀즈수에 따라 선형적으로 변화하고 유량계수는 거의 변화없이 일정한 것으로 해석되었다. 이것은 원관내 오리피스홀을 통과하는 유체의 유량계수는 오리피스홀의 형상 및 레이놀즈수의 역함수에 비례한다는 일반적인 유동특성을 고려할 때 본 연구의 해석 대상에서처럼 레이놀즈수가 큰 경우에는 오리피스홀의 형상에만 영향을 받게 되는데⁷⁾ Fig. 14는 이러한 특성을 잘 보여주고 있다.

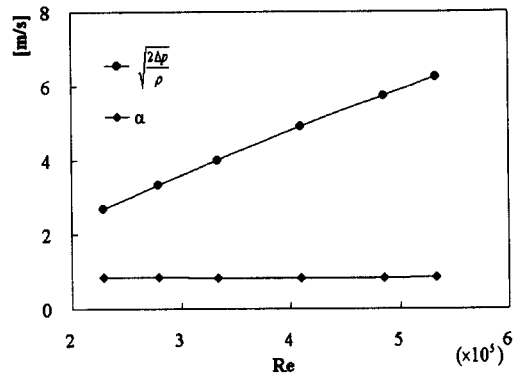


Fig. 14 Variation of the ideal velocity and the flow coefficient at the hole no. 2 of the original gasket

5. 결 론

본 논문에서는 CFD 기법을 이용하여 엔진 냉각수유로내의 유량 배분을 조절하는 방법을 제안하였다. 실린더헤드 가스켓홀의 크기만을 변경하여 냉각수유로의 흡배기매니폴드 측의 유량 배분 비율을 조절하거나 설계자가 임의로 설정한 실린더별 유량 배분을 만족시키는 최적화 방법을 개발하였다. 임의로 설정된 가스켓홀을 통과하는 목표유량과 실제유량과의 차이인 목적함수를 서너 차례의 최적화 반복계산만으로도 만족할 만한 수준으로 낮출 수 있었다. 이 방법은 설계 변경 및 검증 엔진시험에 오랜 시간이 필요한 엔진 냉각수 유로의 직접적인 변경보다는 가스켓홀의 크기만을 최적화하여 엔진본체의 열전달 특성을 제어할 수 있는 방법의 기초가 될 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- 1) Y. Aoyagi, Y. Tahenaka, S. Niino, A. Watanabe, and I. Joke, "Numerical Simulation and Experimental Observation of Coolant Flow Around Cylinder Liners in V-8 Engine", SAE Paper 880109, 1988.
- 2) M. H. Sandford and I. Postlethwaite, "Engine Coolant Flow Simulation - A Correlation Study", SAE Paper 930068, 1993.
- 3) P. A. Porot and P. Menegazzi, "Understanding and Improving Evaporative Engine Cooling at High Load, High Speed by Engine Tests and 3D Calculations", SAE Paper 971792, 1997.
- 4) J. I. Lee and N. H. Cho, "Numerical Analysis of Gasoline Engine Coolant Flow", SAE Paper 950274, 1995.
- 5) N. Hur, S. Y. Yoon, W. K. Cho, and K. H. Kim, "A Numerical Simulation of Flows in an Engine Cooling Passage", Journal of Korean SAE, Vol. 1, No. 933733, pp. 3240, 1993.
- 6) T. E. Cardinal, P. S. Dugdale, and D. G. Madden, "Review of Saturn's Power train Analysis Methodology", SAE Paper 910683, 1991.
- 7) Frank M. White, "Fluid Mechanics", McGraw-Hill Book Company, New York, pp. 360~369, 1988.
- 8) "Star-CD Manuals v. 3.0", Computational Dynamics Ltd, London, 1998.