

# 현대 H21/32 중속 디젤엔진 실린더 헤드포트 최적화 연구

김 병 윤\* · 김 진 원\* · 갈 상 학\*\*

## A Study on the Optimization of Cylinder Head Port Flow for Hyundai H21/32 Medium-Speed Diesel Engines

Byung-yoon Kim, Jin-won Kim and Sang-hak Ghal

**Key Words:** Marine Diesel Engine(선박용 디젤엔진), Cylinder Head Port(실린더 헤드포트), Flow Coefficient(유량계수), Swirl Ratio(스월비), Steady Flow Test Rig(정상류 유동 실험 설비), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학)

### Abstract

Since the characteristics of combustion and pollutant in Diesel engines were mainly effected by the characteristics of in-cylinder gas flow and fuel spray, an understanding of those was essential to the design of the D.I. Diesel engines. The improvement of volumetric efficiency of air charging into combustion chamber is a primary requirement to obtain better mean effective pressure of an engine. Since parameters such as the air resistances in intake and exhaust flow passages, valve lift and valve shape influence greatly to the volumetric efficiency, it is very important to investigate the flow characteristics of intake and exhaust port which develops air motion in the combustion chamber.

In this study, two approach methods were used for design intake and exhaust port; experiment and computation which were made by using steady flow test rig and commercial CFD code. This paper presents the results of an experimental and analytical investigation of steady flow through the prototype cylinder head ports and valves of the HHI's H21/32 HIMSEN Engine.

### 1. 서 론

최근 선박용 디젤엔진의 고출력, 저연비, 저유 활유 소비율, 저공해화 등에 대한 사회적 요구와 사용자의 관심을 충족시켜야 한다. 이를 위해서는 디젤연소에 대한 제반 현상들을 파악하는 일이 매우 중요하다고 인식되고 있지만, 연소과정은 매우 복잡한 현상으로 흡·배기 포트와 밸브 형상, 연소실 형상, 연료분사계, 연료분부, 분부연소 등과 같이 다양한 관점에서 많은 연구가 진행되고 있다.

특히 흡·배기 포트와 밸브가 장착되는 내연기관의 실린더 헤드 흡·배기 포트는 최적의 체적 효율과 스월을 갖고서 연소공기를 실린더 내에 채우고 연소가스를 실린더 밖으로 배출시키는 과정에서 유동손실(압력강하), 포트 벽과 가스사이의 열교환, 압력파의 영향, 가스의 관성효과 등이 유동에 관여하나 유동손실의 영향이 가장 큰 지배요인으로 알려져 있다.

일반적으로 흡·배기 포트의 유동을 파악하기 위해 패들 휠(혹은 베인) 방식이나 허니콤 형상의 임펄스(혹은 모멘텀) 방식을 사용하는 정상류 유동 실험 장치가 유용한 수단으로 적용되고 있다. 또한 LDV, HWA(열선유속계)를 이용하는 다차원 유속측정법과 각종 전산유체해석 코드를 이용하는 유동해석법 등이 흡·배기 포트와 실린더 내부의 유동현상을 이해하는데 유용한 수단으로 적용되고 있다. 그러나 해석적 접근방법은 경비절

\* 현대중공업(주) 산업기술연구소

\*\* 회원, 현대중공업(주) 산업기술연구소

E-mail : turbo1@hhi.co.kr

TEL : (052)230-3223 FAX : (052)250-9588

감이나 연구의 신속성 그리고 설계 단계시 기본 데이터를 제공할 수 있다는 장점을 충분히 인식되고 있지만 흡기 포트, 밸브, 연소실 등의 형상이 복잡하고 또한 난류유동에 대한 고려와 연소현상을 포함하여 해석하는 문제는 상당한 어려움이 수반되므로 아직은 기본적인 단계이나 수치해석의 기법이나 컴퓨터의 고속화에 의해 그 개발이 기대되고 있다. 따라서 새로운 엔진의 실린더 헤드를 설계하고 개발하기 위해서는 반드시 유동 실험과 해석이 적절히 활용되어야 한다.

대부분의 실린더 내의 유동은 3차원이며 그 형상의 복잡성으로 일반적인 직교좌표계보다는 비직교 좌표계의 적용이 필수적이며 대부분의 연구는 연소와 밸브의 움직임을 무시한, 즉 피스톤의 움직임을 배제한 단순화된 정상상태에서의 유동 해석이 주류를 이루고 있다. 그리고 지금까지 국내의 연구는 대부분 자동차 혹은 트럭용 고속 디젤엔진에 한정되어 이루어져 선박용 중속 디젤엔진의 연구는 거의 전무한 실정이다. 그러나 정상류 유동 실험설비를 통한 현대중공업(주)의 선박용 주·보기 및 육상용 중속 엔진의 고유모델(H21/32 HIMSSEN)용 실린더 헤드포트 개발에 대해서는 이전에 발표되었다.

본 연구에서는 궁극적으로 실제 엔진 내에서의 피스톤의 움직임을 고려하고 밸브의 개폐 작용 및 연소현상을 포함할 최적설계를 목표로 하여, 그 첫 단계로 상용 CFD 코드를 활용한 해석기법을 이전의 정상류 유동실험에 연계하여 그 결과를 상호비교하기 위해 흡·배기 포트 유동 현상을 해석한 것에 관해 설명한다.

## 2. 실험 및 해석 방법

### 2.1 정상류 유동 실험

내연기관의 흡·배기 포트 유량계수와 흡기 포트에 의해 실린더 내에서 생성되는 스웰을 실제 운전되는 엔진에서 신뢰성 있게 측정하는 것은 거의 불가능하므로 통상 정상류 유동 실험 설비를 이용하여 평가된다.

본 실험에서는 측정장치가 단순하고 실린더 직경이 큰 엔진에도 쉽게 적용가능한 패들 휠 미터가 사용되었으며, 그 실험설비의 구성은 Fig. 1과 같다.

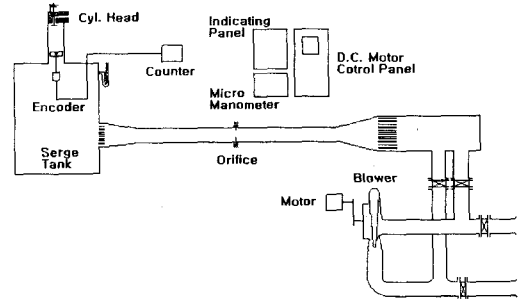


Fig. 1 Schematic of steady flow test rig

실험에 사용된 실린더 헤드포트 유동특성 실험에는 CAD-CAM 시스템을 이용하여 제작된 두 가지 유동모델인 Model-1, Model-2(Model-1의 흡기 포트만 개선)와 다양한 유동실험 경험을 기초로 제작된 실제 HIMSSEN H21/32 엔진에 탑재된 실물이 사용되었다. Fig.2와 Fig.3은 유동모델을, Fig.4는 실제 헤드를 나타낸 사진이다.

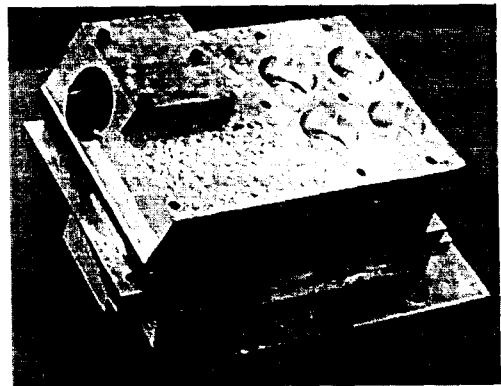


Fig. 2 Flow model-1 of cylinder head port

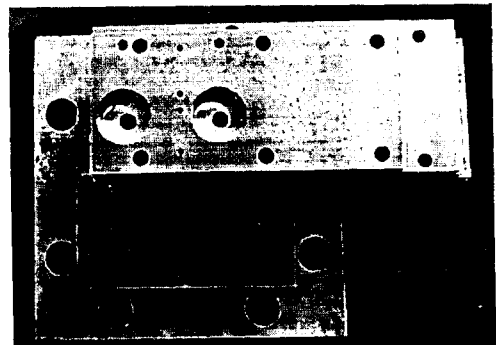


Fig. 3 Flow model-2 of cylinder head port

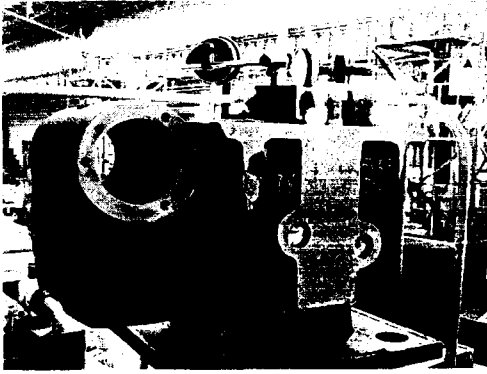


Fig. 4 HIMSEN H21/32 cylinder head

## 2.2 흡기 포트 유동해석

실린더 헤드의 흡기포트에 대한 유동해석에는 초기에 설계된 Model-1과 초기 모델의 흡기 포트를 수정한 Model-2 두 종류에 대해 수행되었다.

계산을 위한 격자 생성은 3차원 CAD 파일에서 추출한 IGES 형식을 GAMBIT이라는 격자생성을 위한 상용 소프트웨어를 사용하였다. 이 IGES 파일은 포트 부분만 있기 때문에 여기에 밸브부분과 실린더 부분에 대한 격자를 설계 도면을 갖고 소 직접 생성하였다. 또한 포트 입구와 실린더 출구에는 경계조건의 영향을 받지 않도록 확장된 격자가 추가되었다.

격자는 사면체(tetrahedral)를 사용하여 비정렬격자로 생성하였다. 격자수는 초기모델의 경우 150,000~20,000개 정도이며, 수정모델의 경우 320,000개 정도이다. 초기모델의 격자수가 작은 것은 초기모델의 격자를 생성할 때 전산장비의 한계로 더 이상 격자를 넣을 수가 없었기 때문이다. Fig. 2와 3에 Model-1과 Model-2에 대한 격자의 모양을 나타내었다. 특히 밸브가 있는 부분에 많은 수의 격자를 구성하였다.

계산은 유동실험과 마찬가지로 무차원 밸브리프트(밸브 리프트/밸브 시트 내경) 0.04에서 0.4 범위에서 Model-1의 경우 0.04의 등간격으로 10가지에 대해, Model-2의 경우 0.08의 등간격으로 5가지 경우에 대해 정상상태에서의 계산을 수행하였다.

계산에는 열유체 해석을 위한 상용프로그램인 Fluent v5.를 사용하였다. 난류모델은  $k-\epsilon$  모델을 사용하였으며 입구와 출구에서의 속도분포를

직접 지정하는 것이 일반적이거나, 본 해석에서는 그 속도분포에 대한 정확한 정보가 없어 입출구부에 압력 조건을 사용하였다. 입구부의 압력은 0Pa로 정의하였고 출구부의 압력을 -2500Pa로 정의하여 두 지점에서의 압력차에 의해 유동이 발생하는 것으로 하였다.

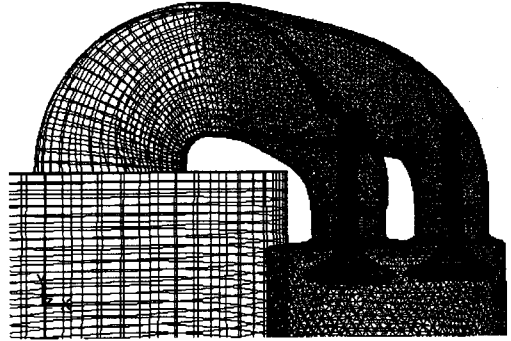


Fig. 5 Calculation grid of Model-1

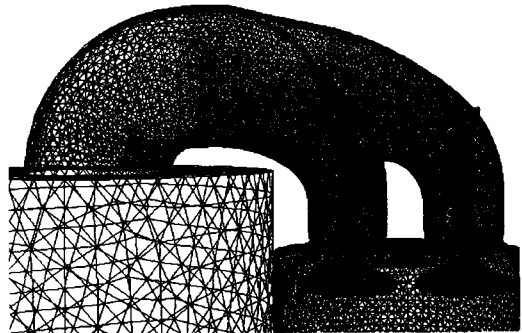


Fig. 6 Calculation grid of Model-2

본 연구에서 실험과 해석결과를 비교하기 위해 사용된 스윙비와 질량유량은 아래의 식을 사용하여 계산하였으며 계산의 위치는 실린더 직경의 1.75배에 해당하는 곳이다.

$$S = \frac{8G}{mv_0B} \quad (1)$$

여기서,  $G$ 는 실린더 단면에서의 각운동량,  $m$ 은 그 단면에서의 질량유량,  $v_0$ 는 특성속도,  $B$ 는 실린더 직경을 나타낸다. 또한 위 식에서

$$G = \int_{A_c} \rho v_{\theta} v_z dA \quad (2)$$

$$\dot{m} = \int_{A_c} \rho v_z dA \quad (3)$$

$$v_0 = \left( \frac{2(p_0 - p_c)}{\rho} \right)^{1/2} \quad (4)$$

위 식에서 밀도는  $\rho$ , 축방향 속도성분  $v_z$ , 원주방향 속도성분  $v_\theta$ , 단면적  $A_c$ , 흡기 포트의 입구 압력  $p_0$ , 출구 압력  $p_c$  이다.

### 3. 해석결과 및 고찰

#### 3.1 흡기 포트의 유동 특성

흡기 포트의 유동 해석은 실험과의 비교를 위해 실험과 동일한 조건의 무차원 밸브리프트(밸브 리프트/밸브 시트 내경)마다 정상상태의 유동에 대해 수행되었다.

Fig. 7은 Model-1 포트내부의 속도분포를 밸브 리프트가 최대인 25.6mm인 경우 대해 나타낸 것이다. 그림에서 포트 바닥면은 낮은 속도분포로 넓게 분포하고 있고 유동방향에서 밸브 스템 뒤 쪽에도 낮은 속도분포를 보여주고 있어 이 영역에서는 유동의 재순환에 의한 정체영역이 생기고 있음을 알 수 있다.



Fig. 7 Velocity magnitude at x-direction

Fig. 8은 Model-2의 흡기 포트 입구와 밸브 중심에서의 속도벡터를 나타낸 것이다. 포트 입구의 단반경에서 순환영역에 의한 유동의 정체현상이 발생되고 있으며, 밸브 보스 하단에서는 밸브 스템이 장애가 되어 정체현상이 관찰되고 있다. 그러나 이러한 부분에서의 유동 정체는 완전히 제거할 수 없고 가능하면 주된 유동에 손실을 최소화시킬 수 있으면 바람직한 설계라 할 수 있다.

역방향흐름은 포트형상이 흐름방향으로 갖는 곡률 때문에 생기는 흐름박리 현상으로 판단된다. 이러한 역방향흐름이 존재하는 영역에서는

x축을 중심으로 하는 와류가 형성되고 있다. 이와 같은 역방향흐름이나 와류는 유동이 충분히 흐르도록 하는데 방해요인이 될 것이다. 이러한 와류의 형성은 이와 같이 한쪽에서 역방향흐름이 생김으로 해서 발생하는 것으로 보인다. 역방향흐름이 한쪽으로 치우쳐 있음으로써 두 개의 흡기포트에 공급되는 유량이 달라질 것을 알 수 있으며 계산결과 입구쪽에 가까운 포트가 먼쪽보다 유량이 더 작게 흐르는 것을 알 수 있었다. Fig. 9는 각 헤드모델의 개별 포트를 흐르는 유량을 계산한 결과를 나타낸다.

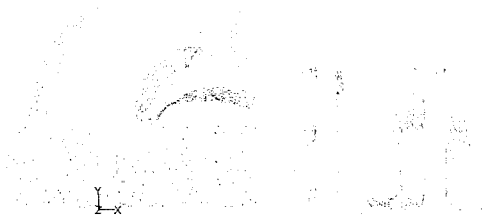


Fig. 8 Velocity vector in port of Model-2

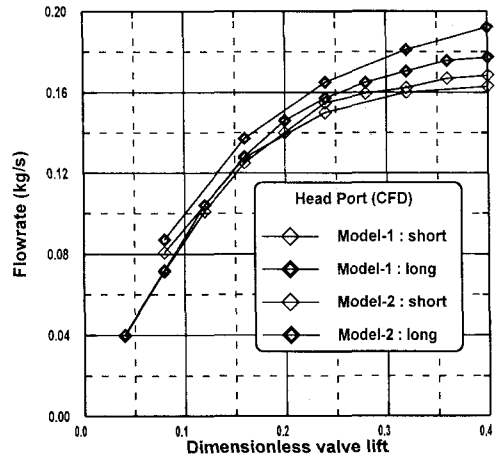


Fig. 9 Flowrate of intake ports

Model-1과 Model-2 두 가지 경우 모두 입구에서 먼 쪽의 포트가 유량이 많이 흐르는 것을 볼 수 있는데 그 차이가 Model-2의 경우가 더 두드러지게 나타나고 있다. Model-2에서 이와 같은 차이가 크게 나타나는 것은 두 개의 포트 단면적에 차이가 나기 때문이다(Model-1의 단면적 : 0.002814/0.002814  $m^2$ , Model-2의 단면적 :

0.002948/0.002847  $m^2$ ). 양쪽 포트의 유량이 차이가 생기면 개별 포트의 유량계수가 달라지게 된다.

Fig. 10은 Model-1과 Model-2에 대한 실린더의 밸브 하단 단면에서의 반경방향 속도벡터를 나타낸 것이다. 전체적인 속도벡터의 경향은 유사하지만 Model-2의 경우 배기 밸브가 놓이는 곳에 큰 영역에 걸쳐 작은 와류가 보이고 유동은 실린더 축방향이 지배적인 것으로 보이는 반면에 Model-1에서는 유동은 왼편으로 치우쳐 상대적으로 오른쪽에서 커다란 와류가 생성되고 밸브에서 나온 유속이 서로 중첩되어 실린더 벽 쪽까지 다 다르고 있음을 알 수 있다.

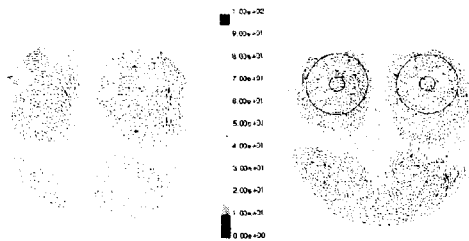


Fig. 10 Velocity vector in bottom of valve (left : Model-1, right : Model-2)

Fig. 11에서 Fig. 16은 스윙을 측정하기 위해 패들휠이 설치된 위치, 즉 실린더 직경의 1.75배의 단면에서의 속도벡터를 Model-1과 Model-2에 대해 나타낸 그림이다. 전반적인 경향으로써 낮은 밸브 리프트에서는 여러 개의 와류가 형성되지만 밸브 리프트가 커질수록 한 방향의 큰 와류가 유동장을 형성하고 있음을 알 수 있다.

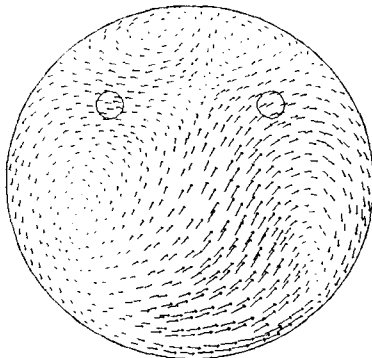


Fig. 12 Velocity vector of Model-1 at 1.75B ( $h_v=15.36$ )

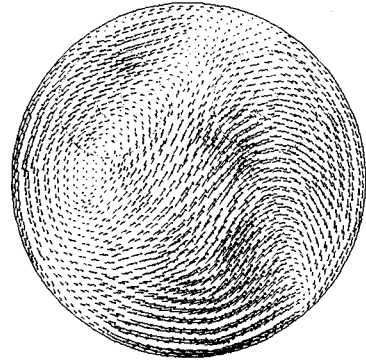


Fig. 12 Velocity vector of Model-2 at 1.75B ( $h_v=15.36$ )

고유모델용 실린더 헤드 흡·배기포트를 개발하기 위해 유동실험(실제 헤드) 및 해석(Model-1과 Model-2)을 수행한 결과, 포트를 통과하는 유량과 스윙비에 대해 서로 비교한 것을 Fig. 13에 나타내었다.

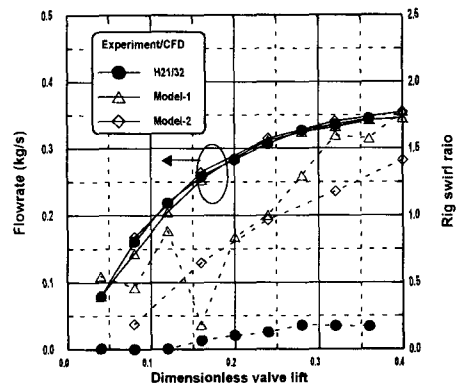


Fig. 13 Comparison between test and analysis results of flowrate and swirl

그림에서 실제 헤드(H21/32) 실험결과와 유동모델(Model-0과 Model-1)의 해석결과는 전 구간의 무차원 밸브 리프트에서 거의 유사하다. 따라서 유량계수가 유량에 비례하므로 유동해석에 의해 흡기 포트를 설계할 수 있을 것으로 판단된다. 스윙비의 경우 실험과 해석결과는 매우 많은 차이를 보이는데 이는 스윙을 평가하는 방식이 실험의 경우 실린더 내 유동을 실린더 축에 대해 대칭이고 강제 회전유동으로 가정하는 반면에 해석에서는 실험과 같은 가정이 필요없이 바로 회

진모멘텀을 계산하여 스월을 산출하는 차이가 있다. 따라서 실험과 해석에서 구한 스월비를 비교하는 것은 한계가 있는 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

현대중공업(주)이 선박용 주·보기 및 육상 발전용으로 개발한 중속 엔진 H21/32의 실린더 헤드 포트에 대한 유동 해석과 실험결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실린더 헤드포트의 유량에 대한 정상류 유동실험 및 유동해석 결과는 상당히 양호한 일치를 보여주고 있으며, 따라서 유동해석은 포트 형상의 설계나 개선을 위한 검증에 즉각적으로 활용할 수 있음을 알았다.

(2) 스월비의 경우는 실험과 해석결과가 많은 차이를 보이는데, 이는 스월을 산출하는 방식의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 향후 이에 대한 개선연구가 필요함을 알 수 있었다.

(3) 현대 H21/32 HIMSEN 엔진의 흡기 포트는 유동실험 평가에 사용된 Model-2이고 배기 포트는 Model-1의 것이 적용되었다.

#### 참고문헌

- (1) 김진원, 갈상학, "중속 디젤 엔진의 실린더 헤드포트 유동 특성 실험 연구", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 B편, 2001.
- (2) 현대중공업(주), "Cylinder Head Port 유동의 수치해석", 산학공동연구보고서, 1997.
- (3) Heywood, J. B., "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw- Hill, 1989.
- (4) Gale, Nige F. "Diesel Engine Cylinder Head Design: The Compromises and the Techniques", SAE Paper 900133, 1990.
- (5) Monaghan, M. L. and Pettifer, H. F., "Air Motion and Its Effect on Diesel Performance and Emissions", SAE Paper 810255, 1981.
- (6) Stone, C. R. and Ladommatos, N., "The Measurement and Analysis of Swirl in Steady Flow", SAE Paper 921642, 1992.
- (7) Taylor, D. O. and Lane, R. S., "Similarity Parameters for Evaluating Swirl and Flow Characteristics of Intake Ports for Direct-Injection Engines", ASME 73-DGP-9, Diesel & Gas Engine Power Conference and Exhibit, Washington, D.C., April 1-4, 1973.