

중속 디젤엔진의 실린더 헤드포트 유동 특성 실험 연구

김진원* · 갈상학**

An Experimental Study of the Flow Characteristics of Cylinder Head Port for Medium-Speed Diesel Engines

Jin-won Kim and Sang-hak Ghal

Key Words: Diesel Engine(디젤엔진), Cylinder Head Port(실린더 헤드포트), Flow Coefficient(유량 계수), Swirl Ratio(스윙비), Steady Flow Test Rig(정상류 유동 실험 설비), CAD-CAM Prototype(캐드-캠 시작품)

Abstract

Since the characteristics of combustion and pollutant in Diesel engines were mainly affected 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 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.

This paper presents the results of an experimental investigation of steady flow through the various kinds of commercial cylinder head ports, and the development procedures of HHI's H21/32 prototype cylinder head ports.

1. 서 론

최근 선박용 디젤엔진은 고출력, 저연비, 저유 활유 소비율, 저공해화 등의 사회적 요구를 충족 시켜야 한다. 이를 위해서는 디젤연소가 주된 관심사로, 이것을 파악하는 일이 매우 중요하다고 인식되고 있지만, 연소과정은 매우 복잡한 현상으로 흡·배기 포트와 밸브 형상, 연소실 형상, 연료분사제, 연료분무 등과 같이 다양한 관점에서 많은 연구가 진행되고 있다.

특히 흡·배기 포트와 밸브가 장착되는 내연기관의 실린더 헤드는 연료분사밸브를 탑재하고 연소가스를 밀폐하며 고온의 연소가스에 의한 연소부품들의 허용온도를 유지시키는 등의 다양한 역할을 담당하므로 실린더 헤드를 설계할 경우 실린더당 흡·배기 밸브의 개수와 크기, 흡·배기의 유동방향, 캠축 설치위치, 분사밸브 종류, 헤드 볼트 개수와 크기 등과 같은 일차적인 사항들을 먼저 결정한 후, 이를 바탕으로 흡·배기 포트의 형상이 설계된다. 흡·배기 포트는 최적의 제적효율과 스윙을 갖고서 연소공기를 실린더 내에 채우고 연소가스를 실린더 밖으로 배출시키는 과정에서 유동손실(압력강하), 포트 벽과 가스사이의 열교환, 압력과의 영향, 가스의 관성효과 등이 유동에 관여하나 유동손실의 영향이 가장 큰

* 현대중공업(주) 산업기술연구소
** 회원, 현대중공업(주) 산업기술연구소
E-mail : turbo1@hhi.co.kr
TEL : (052)230-3223 FAX : (052)250-9588

지배요인으로 알려져 있다.

일반적으로 흡·배기 포트의 유동을 파악하기 위해 적용되는 기술로는 LDV, HWA(열선유속계)를 이용하는 다차원 유속측정법과 각종 전산유체 해석 코드를 이용하는 유동해석법 등이 흡·배기 포트와 실린더 내부의 유동현상을 이해하는데 활용되고 있지만, 여전히 패들 휠(혹은 베인) 방식이나 허니콤 형상의 임펄스(혹은 모멘텀) 방식을 사용하는 정상류 유동 실험 장치가 유용한 수단으로 적용되고 있다.

지금까지 국내의 연구는 대부분 자동차 혹은 트럭용 고속 디젤엔진에 한정되어 이루어져 선박용 중속 디젤엔진의 연구는 거의 전무한 실정이다. 그리고 해석적 접근방법은 설계에 유용한 수단이지만 설계 검증에는 다소 문제점을 안고 있어 새로운 엔진의 실린더 헤드를 설계하고 개발하기 위해서는 반드시 유동 실험이 수반되어야 한다.

본 논문에서는 현대중공업(주)의 선박용 주·보기 및 육상용 중속 엔진의 고유모델(H21/32 HIMSEN) 개발을 추진하는 과정에서 디젤연소의 초기과정에 커다란 영향을 미치는 실린더 헤드 포트를 자체 개발하기 위해 정상류 유동 실험설비를 이용하여 기존 중속 엔진(실린더 직경이 200~280mm의 4종류)에서의 유동특성치를 파악하여 H21/32 고유모델 1호 엔진(실린더 직경이 210mm)의 실린더 헤드 흡·배기 포트 개발에 관한 내용을 설명한다.

2. 실험장치 및 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.

정상류 유동실험 설비를 이용해서 엔진 실린더 내에서의 스웰을 측정하는 것에는 패들 휠(혹은 베인) 미터법과 임펄스(혹은 모멘텀) 미터법의 2종류가 있다. 임펄스 미터법은 실린더 내부의 유동이 실린더 축의 일직선상에 발휘되는 토크(torque)를 허니콤(honeycomb)으로 측정하고, 이는

각방향의 운동량 유속(angular momentum flux)과 동일하므로 스웰은 유동분포와 무관하게 측정될 수 있다는 장점이 있다. 반면에 패들 휠 미터법은 실린더 내부 유동은 강체 볼텍스(rigid vortex)이고 실린더 라이너에 축 대칭이고 유동분포가 일정하다는 이상적인 가정이 필요하지만 광범위한 실린더 직경에 대해 쉽게 적용 가능하다는 장점이 있다. 본 실험에서는 측정장치가 단순하고 실린더 직경이 큰 엔진에도 쉽게 적용가능한 패들 휠 미터를 사용하였다.

흡·배기 포트의 유량계수와 흡기 포트의 스웰을 측정하기 위한 실험설비의 구성을 Fig. 1에 나타낸다.

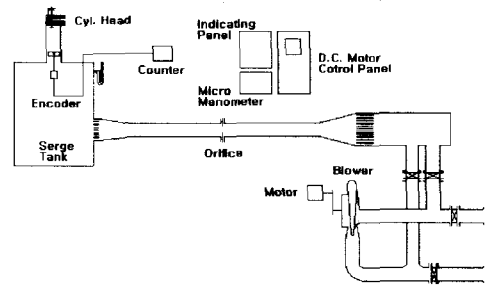


Fig. 1 Schematic of steady flow test rig

측정대상의 실린더 헤드는 실제 엔진의 실린더 직경과 동일한 더미 실린더 위에 장착되고, 대부분의 선박용 디젤엔진은 각각 두 개의 흡·배기 밸브를 갖고 있으므로 두 개의 밸브 변위를 일정하게 유지시키기 위해 눈금 간격이 0.01mm인 다이얼 게이지가 실린더 헤드 상부에 설치된다. 그리고 동일한 실험장치를 이용해서 흡·배기 포트 유동실험을 수행하기 위해 흐름의 방향을 바꿔주는 밸브가 배관에 설치되었다. 유량은 블로워에 연결된 D.C. 모터의 회전수를 미세 조정함으로써 탱크의 차압을 일정하게 유지시킨 후 배관에 설치된 오리피스의 차압을 마이크로 마노미터로 여러 번 읽어 시간 평균한 값에서 산출된다. 일반적인 형상의 패들 휠은 실린더 내부에 설치된 인코더와 연결되어 실린더 헤드 밑면에서 실린더 직경의 1.75배 위치에 놓여진다. 인코더로 감지된 패들 휠의 회전속도는 카운터로 읽혀지고, 이 회전수는 스웰로 환산시키는데 사용된다. 패들 휠 각 부위의 치수는 실린더 직경에 따라 결정되고, 그 형상은 Fig. 2와 같다.

실험은 흡·배기 밸브의 변위(hv)에 대해서 밸브 시트 내경(dv)으로 무차원시킨 $h_v/d_v=0.04, 0.08, \dots, 0.4$ 의 10개의 서로 다른 밸브 변위에서 수행되었다. 흡입 실험의 경우에는 서지탱크와 대기와의 차압 $\Delta P=250\text{mmAq}$ 의 압력강하를 다양한 포트 실험결과와 비교하기 위해 고정시켰다. 이것은 0.975의 압력비에 해당된다. 배출 실험의 경우, 평균적으로 흡기 포트보다 높은 압력강하를 보이므로 서지탱크와 대기와의 차압 $\Delta P=500\text{mmAq}$ 의 압력강하를 사용하여 측정되었다. 이것은 0.95의 압력비에 해당된다.

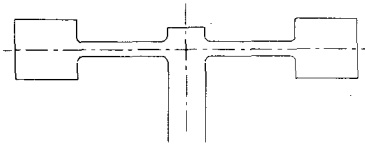


Fig. 2 Geometry of paddle wheel

2.2 실험 헤드의 종류와 모델 제작

실린더 헤드포트 설계는 엔진의 출력, 연비, 배출가스 유해성분에 커다란 영향을 준다. 따라서 흡기 포트는 연소용 공기 유동과 실린더 내에서의 공기 운동의 최적화를 도모할 수 있도록 설계되어야 하며, 배기 포트는 엔진의 펌핑 손실과 고온의 연소 가스에서 실린더 헤드와 냉각수로의 열전달을 최소화시킬 수 있도록 설계되어야 한다.

실린더 헤드 흡·배기 포트의 배열에는 일반적으로 실린더 내부에서의 흡·배기 유동의 방향에 따라 cross-flow 형상의 siamized 혹은 tandem 형과 U-flow 형상이 있다. 이들 형상은 실린더 헤드 초기 개념설계 단계에서부터 밸브의 개수와 크기, 캠축 위치, 헤드 볼트 개수와 크기, 인젝터 종류 등을 고려하여 결정된다. 실험에 사용된 실린더 헤드는 모두 U-flow 형상으로 헤드의 동일 측면에 흡기 포트의 입구와 배기 포트의 출구가 있다. 대부분의 엔진이 U-flow를 채용하는 이유 중에는 흡·배기 매니폴드의 설치와 흡·배기 밸브 구동부와 연료분사펌프 설치가 용이하고 설계가 단순하기 때문이다. 그리고 선박용 중속 디젤엔진은 출력을 높이기 위해 대부분 과급시스템을 적용하고 있으며, 많은 연소용 공기를 실린더 내에 충전시키고 연소가스를 배출시키기 위해

흡·배기 밸브는 각각 2개로 총 4개의 밸브가 실린더 헤드에 장착되며, 이로 인해 연료 분사 노즐은 실린더 헤드의 중앙에 설치되어 있다.

실험에 사용된 실린더 헤드 포트에는 실린더 직경이 200mm에서 280mm 범위의 기존 생산중인 중속 디젤엔진 4가지 종류와 당사 고유모델 중속 엔진(H21/32)을 개발하기 위해 모델로 제작된 2가지 종류, 그리고 최종 선정된 모델로, 고유모델 엔진에 탑재시키기 위해 제작된 것이 있다. 기존 생산품의 엔진들은 실린더 직경, 행정, 출력, 흡·밸브 직경, 시트 직경, 시트 각도 등이 모두 달라 직접적인 비교는 곤란하겠지만, 당사 개발 모델들(H21/32와 H25/33)을 개발하기 위한 설계 지침을 마련하고 실린더 직경의 차이에 따른 흡·배기 포트 유동 특성들을 사전에 검토하기 위해 실험에 사용되었다. 기존 엔진과 고유모델 엔진의 기본 사양과 흡·배기 밸브 및 시트의 주요 치수를 Table. 1에 나타낸다.

Specification		T1	T2	T3	T4	T5
Bore		200	200	225	280	210
Stroke		300	280	300	320	320
Intake	Head Dia.	64.2	73.0	70.0	90.0	77.0
	Lift	15.0	16.5	17.0	22.0	17.5
	Seat Angle	30.0	20.0	30.0	30.0	30.0
Exhaust	Head Dia.	64.2	66.0	70.0	90.0	72.0
	Lift	15.0	16.5	17.0	22.0	17.5
	Seat Angle	45.0	30.0	30.0	30.0	30.0

Table. 1 Specification of test engine and valve

Table. 1에서 T1에서 T4는 기존 엔진을, T5는 현대중공업(주) 고유모델 H21/32 엔진을 나타내며, 흡·배기 포트 각각의 실험 결과에서 무차원 밸브 변위에 대한 유량계수와 스윌을 나타낼 때 범례로 사용될 것이다.

기존 엔진의 실린더 헤드는 엔진에 탑재되기 전의 상태로 정상류 유동실험 설비에서 직접 유동특성을 파악할 수 있지만, 새로운 엔진의 실린더 헤드를 개발하기 위해서는 설계된 실린더 헤드 포트 형상을 실험 설비에 적용 가능하도록 실제 크기의 모델로 제작하는 것이 개발비용을 절약하고 개발기간을 단축시킬 수 있다. 최근에는 경쟁이 치열한 자동차, 전자업계 등에서 빠른 제품개발과 생산을 위해 금형 및 몰드의 쾌속조형 기술(Rapid Prototyping Technology)을 적용하고 있

지만, 본 연구에서는 3차원 CAD 시스템으로 작성된 데이터를 CAM 시스템으로 전송하고 CNC 밀링 기계를 이용하여 실린더 헤드 포트 모델을 제작하였다. Fig. 3과 Fig. 4에는 3차원 CAD 형상과 이에 기초하여 제작된 실린더 헤드 포트 모델을 나타내고 있다. Fig. 3에서 왼쪽은 흡기 포트이고, 오른쪽은 배기 포트이다.

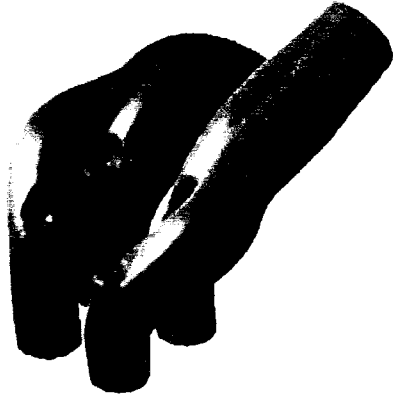


Fig. 3 3-D CAD geometry of test model head

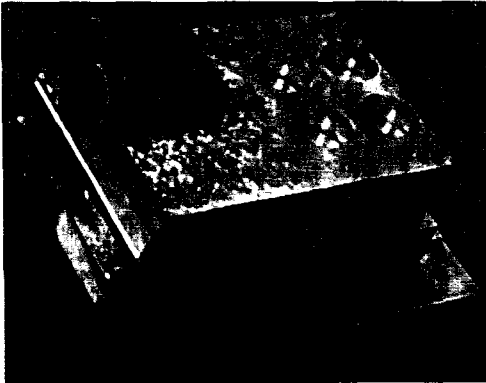


Fig. 4 Flow model of cylinder head port

Fig. 4와 같은 실린더 헤드 포트의 실제 모델은 정상류 유동실험 설비에서 흡·배기 포트의 유동 특성이 파악되었으며, 기존 엔진의 실린더 헤드 포트 실험결과와도 비교, 검토되었다. 그리고 포트의 유량계수와 스윙이 최적화되도록 2차 설계 변경된 모델을 추가 제작하여 정상류 유동실험 설비에서 그 특성을 평가한 후, 엔진 사이클 해석과 연계하여 최종 설계 검증을 수행하여 당시의 고유모델 H21/32 중속엔진에 탑재하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 흡기 포트의 유동 특성

흡기 과정에 대한 밸브의 영향은 유동손실, 즉 압력강하와 포트 벽과 가스사이의 열교환 등이 있다. 특히 열교환을 무시할 수 있다고 가정하면 유동손실에 의해 가장 큰 영향을 받게되고 이는 포트 내 저항으로 작용하여 압력강하를 유발시켜 체적 효율(흡입 공기 체적/실린더 체적)을 감소시키게 되므로 밸브포트 내에서의 압력강하를 감소시키는 것이 바람직하다. 이를 판단할 수 있는 중요한자료는 포트 내 유로와 밸브형상의 저항에 밀접한 관계가 있는 유량계수이다.

먼저, 고정된 압력차로 손실과 장애물이 없이 밸브시트의 면적 $F_v = \pi z d_v^2 / 4$ (z 는 밸브 개수)을 통과하는 이론 공기 유량이 다음 식(1)과 같고, 오리피스로 측정되는 실제 공기 유량을 G 라 하면 흡기포트가 갖는 유량계수(C_f)는 이론 유량(G_{theo})과 실제 유량의 비로, 다음 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{theo} = \gamma F_v \sqrt{2g \frac{\Delta p}{\gamma_m}} \quad (1)$$

$$C_f = \frac{G}{G_{theo}} \quad (2)$$

여기서 γ 는 포트 출구에서의 단열 팽창된 공기의 밀도이고, γ_m 은 입구와 출구 조건에서 공기의 평균 밀도이며 g 는 중력 가속도이다.

유동저항은 레이놀즈 수나 압력비의 함수이지만 같거나 비슷한 압력조건과 레이놀즈 수에서 측정된다면 여러 가지 포트에 대한 유동특성은 무차원 밸브 리프트 h_v/d_v 에 대한 유량계수 곡선에 의해 비교될 수 있다. 이 경우 기준치로써 밸브 시트 내경(d_v)이 사용된다.

실린더 내로 유입되는 공기는 행정체적 V_h 와 동일한 부피의 원형 강체(solid body)처럼 회전하고, 이때 강체의 각 운동량은 유입되는 공기의 순간 모멘트들의 합과 같다고 가정한다. 또한 유입 공기는 비압축성이다. 흡기 포트에 의해 실린더 내부에서 형성되는 스윙 유동을 정량화시키기 위해 무차원 스윙비(S_r)를 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$S_r = \frac{n_D}{G} \frac{\rho V_h}{30} \quad (3)$$

패들 휠의 속도(m_0) 측정에 사용되는 패들 휠의 치수와 위치는 실린더 안지름에 의해 정해진다. 무차원 스윙비는 패들 휠의 속도와 흡입유량 G 사이의 관계를 무차원 밸브 변위로 그래프에 나타낸다.

Fig. 5는 무차원 밸브 변위에 대한 5 종류의 실린더 헤드 흡기 포트의 유량계수를 나타낸 그래프이다.

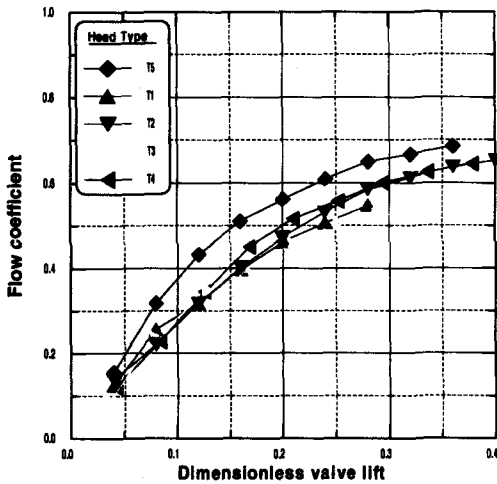


Fig. 5 Flow coefficient of intake ports

Fig. 5에서 측정점의 개수가 다른 것은 실험에 사용되는 헤드는 실제 엔진에 탑재되는 것으로서 실험 가능한 밸브 변위의 범위가 흡·배기 밸브 스프링과 밸브 보스에 의해 제한을 받기 때문이다.

그림에서 유량계수는 대부분의 실린더 헤드에 대해 무차원 밸브 변위가 커질수록 포물선 형태로 증가되고 있음을 알 수 있다. T3의 경우 무차원 밸브 변위가 0.25 이후부터는 유량계수 기울기가 타 모델에 비해 낮아지고 있지만, 실제 엔진의 밸브 변위에 가깝기 때문에 실용상의 문제는 없다.

T5의 경우 타 모델들보다 상당히 높은 유량계수를 갖는 것으로 나타났다. 이는 흡기 밸브의 치수가 실린더 직경에 비해 타 모델보다 크고, 이로 인해 유동이 통과하는 밸브주위의 면적이 증가되어 포트를 통과하는 유량이 증가하는 효과가 있기 때문이다. 또한 밸브와 라이너의 간섭이 없는 설계를 채택함으로써 유동방향에 대한 장애물이 없어져 유량계수를 증가시킬 수 있었

다. 그리고 실린더 헤드 화염면과 밸브 시트 교축부 내경 그리고 밸브 시트 곡면 기울기 등에 대한 최적 설계도 유량계수를 향상시키는데 큰 효과가 있었다.

Fig. 6은 무차원 밸브 변위에서 측정된 패들 휠의 회전속도에서 구한 무차원 스윙비를 나타낸 것이다.

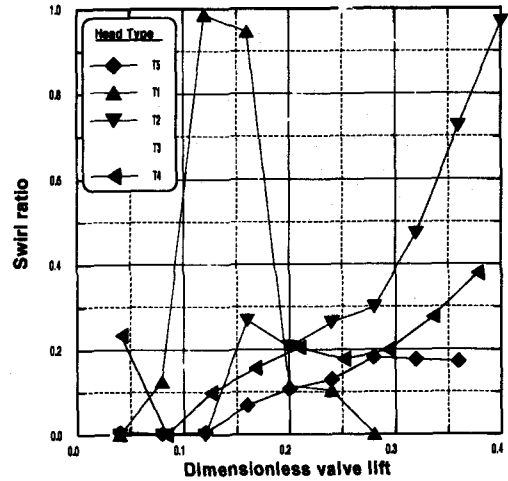


Fig. 6 Swirl ratio of intake ports

스윙비는 헤드의 종류에 따라 커다란 차이를 보여주고 있다. T1과 T3의 경우 타 모델과는 다르게 무차원 밸브 변위 0.1과 0.25사이에서 우세한 특성을 보여주고 있다. 이는 앞서 유량계수에서 살펴보았듯이 밸브와 실린더간의 간섭에 의해 실린더 반경 방향으로의 유동을 가속시키는 효과 때문으로 보여진다. 일반적으로 선박용 중속 디젤엔진의 실린더 헤드 포트는 directed 포트이므로 스윙의 생성은 밸브 시트 주위의 유동 분포에 영향을 받는다.

T2의 경우, 무차원 밸브 변위가 커질수록 스윙비가 상승하고 있는데, 이는 흡기 포트와 밸브의 설계 차이에 기인하는 것으로 보인다. 즉, T1과 T5와 비슷한 실린더 직경을 가지며 밸브 직경은 T1보다는 크고 T5보다 약간 작다. 그리고 타 모델들의 흡·배기 포트가 실린더 헤드 중심에 거의 대칭으로 배열되어있지만 T2는 흡기 포트는 실린더 헤드 중심에 상당히 가깝게 설치되어 있다. 또한 밸브 시트 각도도 타 모델은 30° 인 반면에 20° 로 설계되어 있다.

T5의 경우, 전반적으로 타 모델의 헤드보다 스

월비가 낮은 경향을 나타내고 있는데, 이는 유량계수와 스월비가 어느 정도 trade-off의 관계가 있기 때문으로 보인다. 따라서 향후 엔진의 성능과 배출가스 유해성분에 대한 충분한 데이터가 확보되고 개선의 여지가 충분히 있다고 판단되면, 향후 흡기 포트의 설계 변경에는 유량계수와 스월의 관련성에 초점을 맞출 필요가 있을 것으로 보인다.

3.2 배기 포트의 유동 특성

배기 포트의 유동 특성 분석은 스월을 고려하지 않는다는 점에서 흡기 포트와 동일하다. 대부분의 연구들은 흡기 포트의 유동 특성을 규명하는데 관심을 두고 있지만, 엔진의 사이클 해석에는 흡·배기 밸브가 열리고 닫히는 overlap 기간동안 연소가스가 실린더로 역류하거나 실린더가스가 흡기로 역류하는 현상이 발생하게 된다. 또한 엔진 사이클 해석에서 터보 차저의 성능을 예측하고 엔진과의 매칭을 검토할 때도 배기 포트의 유량계수가 반드시 필요해진다.

Fig. 7은 다섯 종류의 실린더 헤드 배기 포트 유동 실험 장치에서 얻어진 유량계수 결과이다.

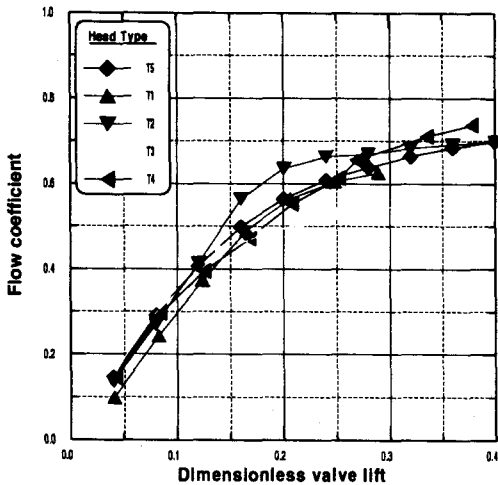


Fig. 7 Flow coefficient of exhaust ports

그림에서 T3, T4, T5는 거의 유사한 경향을 보이는 반면에, T1과 T2는 다소 상이한 결과를 나타내고 있다. 특히 무차원 밸브 변위 0.8에서 0.32의 범위 내에서의 곡선은 커다란 차이를 보여준다. T3는 타 모델에 비해 펌핑 손실이 큰 경우의 경향과 일치하고 있어 배기 밸브 시트와

포트 내의 단면적에 대한 설계 변경이 필요하다고 보여진다.

4. 결론

현대중공업(주)이 선박용 주·보기 및 육상 발전용으로 개발한 중속 엔진 H21/32의 실린더 헤드 포트에 대한 유동 특성 실험 결과는 다음과 같다.

(1) 선박용 중속 디젤엔진은 차량용 고속 디젤엔진에 비해서 스월이 낮은 연소실 형상을 채택하고 있지만, 스월이 연소 공기와 연료분무의 혼합에 가장 큰 영향을 주는 인자이므로 유량계수도 높으면서 적당한 스월을 갖는 흡기 포트와 밸브를 설계하는 것이 중요하다.

(2) 당사가 개발한 H21/32 엔진의 흡기 포트 스월은 상대적으로 작은 수치를 보이고는 있지만 유량계수는 기존 모델보다 상당히 높은 값을 가지고 있어 양호한 엔진 성능이 기대된다. 또한 배기 포트의 유량계수도 타 모델과 유사하고 일반적인 경향을 나타내고 있어 포트 형상 설계는 매우 타당하다고 판단된다.

참고문헌

- (1) Monaghan, M. L., Pettifer, H. F., "Air Motion and Its Effect on Diesel Performance and Emissions", SAE paper 810255, pp.1119-1135, 1981.
- (2) Gale, N. F., "Diesel Engine Cylinder Head Design: The Compromises and the Techniques", SAE paper 900133, 1990.
- (3) Tippelmann, G., "A New Method of Investigation of Swirl Ports", SAE paper 770404, 1977.
- (4) Thien, G., "Entwicklungsarbeiten an Ventilkanaelen von Viertakt-Dieselmotoren", Ingenieurzeitschrift 8/9, 291-302, 1965.
- (5) Heywood, J. B., "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, 1988.
- (6) 川上雅由, 菊地吉郎, 大西 進, "中速ディーゼル機関の燃焼に関する研究", 日本船舶機関學會誌 第19卷 第5號, 1984.