

## 중형 디젤엔진의 터보차저 과급 시스템 최적화에 관한 연구

김기두† · 윤옥현\* · 갈상학\* · 하지수\* · 김호익\*\* · 김주태\*\*

(원고접수일 : 2004년 7월 2일, 심사완료일 : 2004년 9월 2일)

### A Research on the Optimization of Turbocharging System in a Medium Speed Diesel Engine

Ki-Doo Kim† · Wook-Hyun Youn\* · Sang-Hak Gal\* · Ji-Soo Ha\* · Ho-Ick Kim\*\* · Ju-Tae Kim\*\*

**Abstract** : In order to improve engine performance while overcoming the weak points of Pulse and MPC(Modular Pulse Converter) turbocharging system, a new turbocharging system, "Hi-Pulse system", has been introduced and developed for medium speed diesel engine, HYUNDAI HiMSEN engines. Hi-Pulse system is to utilize not only the benefits of MPC system at higher load but also the ones of Pulse system at lower load. As for the results, the specific fuel oil consumption and NOx emission were lowered compared with the Pulse and MPC system.

Performance simulation were carried out to optimize intake and exhaust timing and exhaust duct arrangement and to improve the performance of Hi-Pulse system engine.

**Key words** : Turbocharging System, MPC system, Pulse System, Performance Simulation, Medium Speed Diesel Engine

#### 1. 서 론

내연기관의 과급기는 대기 중의 공기를 압축하여 연소실로 보내는 장치로 동일 크기의 엔진에 더 많은 공기를 공급할 수 있어 엔진의 출력 및 효율을 높이는 데에 결정적인 역할을 하여 왔다. 이에 따라 현재의 중·대형 엔진에 필수적인 장치이며, 그 동안 많은 연구와 발전이 있었다. 과급방법은 여러 가지가 있으나, 터보차저 과급이 가장 일반적인 방법이다. 이는 엔진의 연소 후 발생하는 고온/고압의 배기가스를 이용하여 터보차저 터빈

을 구동시키고 이와 동일 축에 연결이 되어 있는 압축기를 회전시켜 대기 중의 공기를 압축하여 연소실로 보내는 역할을 한다. 이에 따라 폐기될 수 있는 배기가스를 이용하는 측면에서 장점이 있으며, 배기가스를 이용하여 터빈을 구동시키는 방법에 따라 과급 방법이 분류된다.

터보차저 과급 방법은 크게 정압형(Constant Pressure)과 펄스형(Pulse Pressure)의 두가지로 나뉘며, 전자는 1915년도에 후자는 1925년도에 Alfred J. Büchi에 의해 발명되었다.<sup>(1)</sup> 이후 정압 및 펄스형의 중간 형태인 MPC

† 책임저자(현대중공업 산업기술연구소 엔진연구실), E-mail : kdkim@hhi.co.kr, T : 052)230-3227

\* 현대중공업 산업기술연구소 엔진연구실

\*\* 현대중공업 엔진기계사업본부 엔진기술개발부

(Modular Pulse Converter) 등의 개선형이 사용되었다. 현재의 중형 디젤엔진은 펄스 형 및 MPC(Modular Pulse Converter)가 주로 사용되고 있다. MPC 과급 시스템은 부분부하 및 가속성능이 좋지 않은 면이 있으며, 펄스형 과급 시스템은 고부하에서의 성능 저하와 시스템이 복잡하다는 단점이 있다.<sup>[2], [3], [4], [5], [6]</sup>

본 연구에서는 기존 터보차저 과급 시스템의 단점을 개선하는 방안을 도출하였다. 기존 시스템에 대한 특성을 검토하고 문제점을 파악하였으며 이를 해결할 수 있는 최적의 과급 시스템을 고안하였다. 그리고 엔진 성능 해석 기술을 통해 본 과급 시스템을 HYUNDAI HiMSEN 엔진에 최적화하는 연구를 수행하였다.<sup>[7], [8]</sup>

## 2. 과급 시스템 성능 비교

### 2.1 펄스형 과급 시스템

엔진 성능 측면에서는 펄스형이 우수한 것으로 알려져 있으며 펄스형 과급 시스템의 특성을 살펴보면 다음과 같다. 5개의 실린더를 갖는 경우의 펄스형 과급 시스템 형상, 배기관내 압력 맥동 및 흡·배기 밸브 리프트 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 5개의 실린더인 경우 착화 순서는 크랭크축의 진동이나 구조적인 측면에서 1-2-4-5-3의 순서로 결정을 한다.

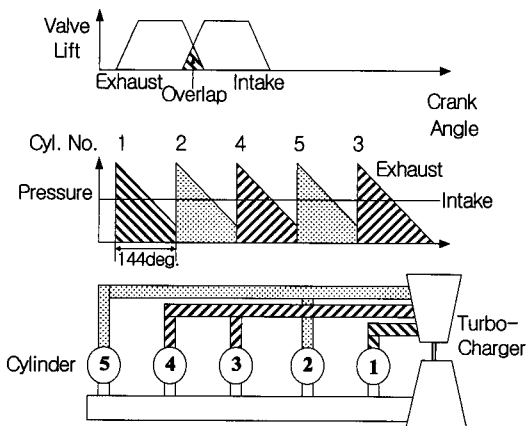


Fig. 1 Characteristics of pulse turbocharging system

이러한 경우 그림과 같이 각 실린더 간 착화 시점의 간격은 균일한 엔진 출력을 위해 720°를 5로 나눈 144°이다. 이에 따라 각 실린더의 흡·배기 밸브 타이밍도 동일한 간격을 가지며 그림과 같이 1번 실린더의 배기밸브가 열린 직후, 배기관에 압력맥동이 발생하며, 144° 후에 다음의 착화 순서를 갖는 2번 실린더에서 배기관내 압력맥동이 발생한다. 이때 발생하는 압력맥동은 흡기 압력보다 상당히 높기 때문에, 1번 및 2번 실린더를 동일 배기관으로 연결하면 2번 실린더의 압력맥동 발생 시점에 1번 실린더는 흡기 및 배기 밸브가 모두 열려 있는 소기과정이라서 1번 실린더의 소기 효율이 매우 떨어지고, 흡기관내로 배기가스가 역류할 가능성이 있다. 이에 따라 1번 및 2번 실린더는 동일한 배기관으로 연결하기 어렵고 그림과 같이 2-5번 실린더, 3-4번 실린더를 연결하고 1번 실린더는 바로 터빈에 연결하여, 총 3개의 주 배기관을 갖는 다소 복잡한 과급 시스템으로 설계를 할 수 있다. 이러한 방식으로 펄스형 과급 시스템을 설계하면 5, 6, 7, 8 및 9 실린더의 터보차저 장착 엔진에 대해 Fig. 2와 같이 배기관의 배열을 만들 수 있다. 즉 5, 7 및 8 실린더 엔진은 2-Pulse형, 6 및 9 실린더 엔진은 3-Pulse형의 과급 시스템이 된다. 그림과 같이 2-Pulse형의 과급 시스템인 5, 7 및 8 실린더 엔진은 다소 복잡한 과급 시스템으로 구성되어 있다. 이에 따라 제작 및 조립에 있어서도 좋지 않은 특성을 갖는다. 또한 이들은 터보차저 효율적인 측면에서도 3-Pulse형 보다 좋지 않은데, 이를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에 1-Pulse 형 및 2-Pulse 형 과급 시스템의 배기관내 압력, 흡기 압력 및 연소실 압력을 나타내었다. 3-Pulse형인 경우 그림과 같이 배기관에는 3개의 압력 맥동이 형성되어 터빈으로 전달되고 압력맥동은 지속적으로 연결이 되어 터빈에 전달된다. 2-Pulse형, 특히 1개의 실린더가 바로 터빈에 연결이 되는 경우에는 그림과 같이 배기관에 압력 맥동이 2개 및 1개가 형성되어 지속적으로 터빈에 에너지를 전달하지 못하며, 저압의 부분에서는 터빈에서 역류의 가능성도 있어, 터빈의 효율을 악화시킨다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는 4개의 실린더를 연결하는 4-Pulse형이 타당하나 과급 시스템을 구성하기가 어렵다.

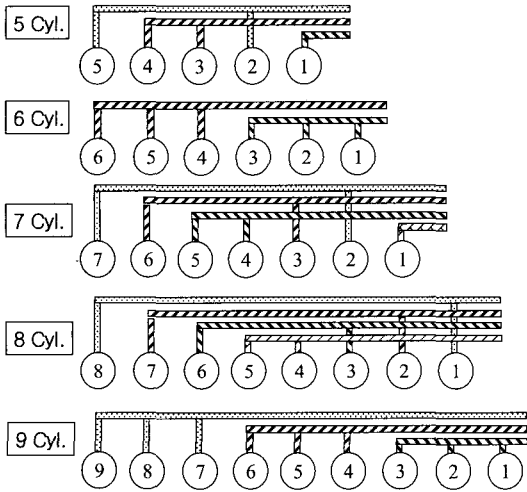


Fig. 2 Exhaust duct arrangements of pulse turbocharging system

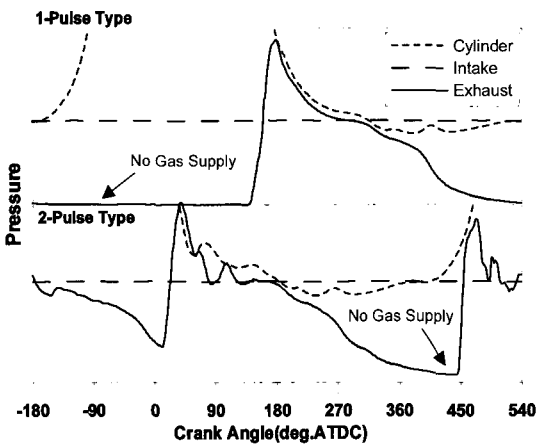


Fig. 3 Characteristics of 1 and 2-Pulse type turbocharging system

2.2 개선형 과급 시스템

4개의 실린더를 연결하는 과급 시스템은 배기관 내 압력맥동이 각 실린더의 소기효율 악화 및 연소실 가스가 흡기로 역류될 가능성이 있기 때문에 배기관 지름을 크게 하는 방법 등으로 압력 맥동

의 크기를 줄여야 한다. 그러나 이에 따라 실린더 출구에서 발생된 압력맥동을 그대로 이용하여 터보차저를 구동시키려는 펄스형 과급 시스템의 장점이 감소되며, 추진기용 엔진 및 발전기의 급속 부하상승에서 중요한 엔진 가속성능이 악화된다.

이를 해결하는 방법으로 Fig. 4와 같이 펄스 과급 시스템의 양 끝단을 서로 연결하는 방법을 검토하였으며 이를 Hi-Pulse 과급 시스템으로 명명하였다.

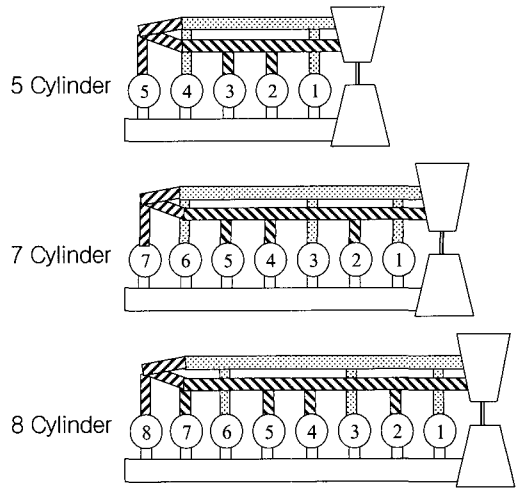


Fig. 4 Exhaust duct arrangements of Hi-Pulse turbocharging system

Fig. 4에서와 같이 Hi-Pulse 과급 시스템은 2-Pulse 시스템보다 배기관의 개수가 많이 줄어들어 제조 원가 및 엔진 조립의 측면에서도 장점이 있다. 그림과 같이 모두 두 개의 주 배기관을 가지고 있으며 터빈에서 가장 먼 쪽의 실린더 출구 배기관과 두 개의 주 배기관이 연결이 되어 있다.

5 실린더인 경우의 Hi-Pulse 과급 시스템의 배기관 내 압력 특성을 Fig. 5에 나타내었다. 압력 특성 해석에 이용한 해석도구는 일반적으로 연소 성능해석에 이용하고 있는 Ricardo사의 WAVE 소프트웨어를 이용하였다. 배기압력은 1번 실린더 출구 배기관에서의 값을 나타내었다. 그림과 같이 동일 주 배기관에 연결이 되어 있는 1번 및 4번 실린더에서 발생되는 압력맥동은 흡기압력 보다 높은 압력맥동의 크기를 유지하고 있으며, 두 개

의 주 배기관이 연결되어 있는 시스템의 특성으로 2 및 3번 실린더에서 발생된 압력맥동도 1번 실린더 출구 배기덕트까지 전달되고 있으며, 그 크기는 흡기압력 보다 다소 적음을 알 수 있다. 이러한 특징 때문에 Fig. 5의 1번 실린더 흡·배기 유량 특성을 살펴보면 흡기밸브가 열린 초기, 흡기유량의 급격한 증가가 줄어들며, 배기되는 가스의 양이 다소 적어 소기효율이 떨어지고 흡입 공기량이 줄어든다. 이때는 압력 선도에서 나타나듯이 360° 부근에서 1번 실린더의 흡·배기 밸브가 모두 열리는 소기구간이다. 이때 2번 실린더에서 전달되는 배기관내의 압력맥동이 전달되어 1번 실린더 출구부 배기관 압력이 상승되고 배기가 원활하지 않기 때문이다. 만약 2번 실린더에서 전달된 압력맥동의 크기가 더 커지면 흡입 공기량 악화 및 연소된 가스의 흡기 포트에 역류하는 등의 문제가 발생할 수 있다. 이는 엔진에 따라 다른 특징을 나타내므로 각각의 엔진은 그에 맞는 Hi-Pulse 과급 시스템이 되도록 설계되어야 한다.

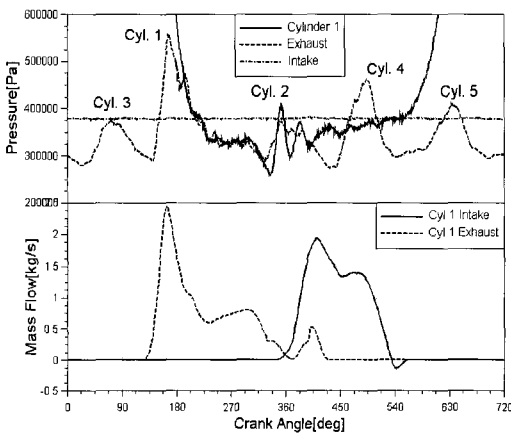


Fig. 5 Pressure and mass flow characteristics of Hi-Pulse turbocharging system

Fig. 6에 각 과급 시스템에 대한 성능 특성 측정 결과를 나타내었다. Hi-Pulse 과급 시스템은 100% 부하에서 2-Pulse 보다 낮으면서 MPC와 동일한 연료소비율을 얻었으며, 저부하에서는 MPC보다는 우수하고, Pulse와 유사한 성능을 얻었다. NOx 측면에서는 대부분의 부하에서 Hi-

Pulse 과급 시스템이 다른 시스템보다 우월하다. 일반적으로 Pulse 과급 시스템은 높은 압력 맥동을 이용하여 에너지 이용 효율이 높으며, MPC 시스템은 Pulse 시스템보다는 압력 맥동이 낮지만 비교적 균일한 압력 맥동으로 터보차저와의 Matching이 유리해 100% 부하의 성능을 향상시킬 수 있다. Pulse 과급 시스템과 유사한 Hi-Pulse 과급 시스템은 MPC보다는 부분부하의 효율이 좋다. 그리고 압력 맥동은 Pulse 과급 시스템보다는 균일하게 터빈으로 전달된다. 이에 따라 Hi-Pulse 과급 시스템은 고부하에서는 MPC의 장점을 저부하에서는 Pulse 과급 시스템의 장점을 이용할 수 있다. 이러한 결과로 Fig. 6과 같이 Hi-Pulse 과급 시스템의 엔진 성능 특징이 나타나는 것으로 판단된다.

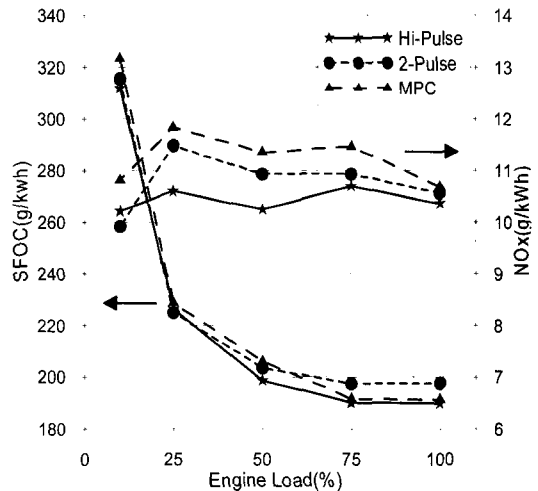


Fig. 6 Comparison of turbocharging system performance

### 3. Hi-Pulse 과급 시스템 성능 개선

Hi-Pulse 과급 시스템의 단점은 성능해석 기술을 이용한 시스템 최적화로 해결될 수 있다. 최적화 요소에는 흡·배기 밸브 타이밍, 착화순서, 배기관 배열 및 형상 등이다.

HYUNDAI HiMSen 7H21/32 엔진을 대상으로 과급 시스템 개선을 위해 성능 해석을 수행하였다. 우선 해석 검증을 위해 7H21/32 엔진에

대해 성능 해석 모델링을 작성하였다. 해석 모델링을 Fig. 7에 나타내었으며, Fig. 8에 100% 부하에서의 성능 해석 결과를 나타내었다.

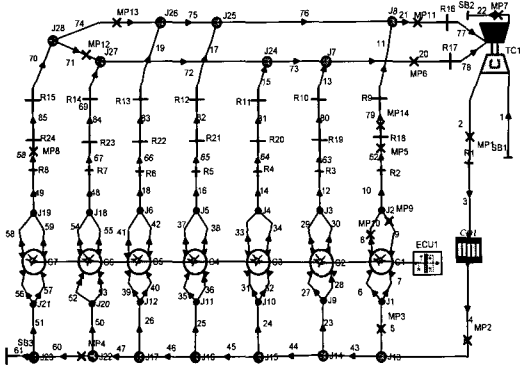


Fig. 7 Simulation model of 1-4-5-7 exhaust duct arrangement

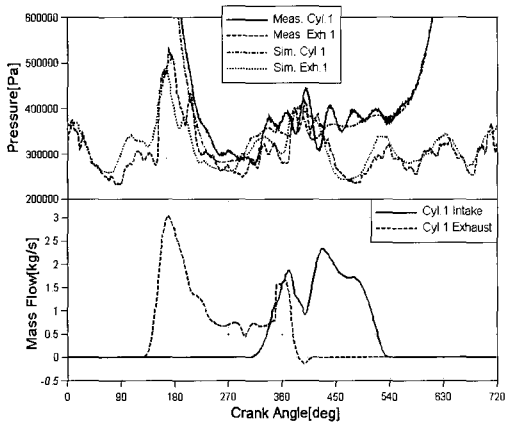


Fig. 8 Simulation results of 1-4-5-7 arrangement at 100% Load

흡·배기되는 공기 및 가스의 특성을 검토하기 위해서 연소실 압력, 흡기 및 배기압력에 대해 실험 및 해석 결과를 나타내었다. 또한 해석 결과의 흡·배기 질량 유량도 나타내었다. 그림과 같이 1번 실린더 출구의 배기관 내의 압력은 실험 결과와 전 사이클에 걸쳐 유사하나, 실험 결과의 압력은 작은 압력맥동이 다소 많다. 실린더 1번에서 흡·배기 질량 유동은 크랭크 각도 360° 이후에 흡기가 잘 이루어지지 않고 있다.

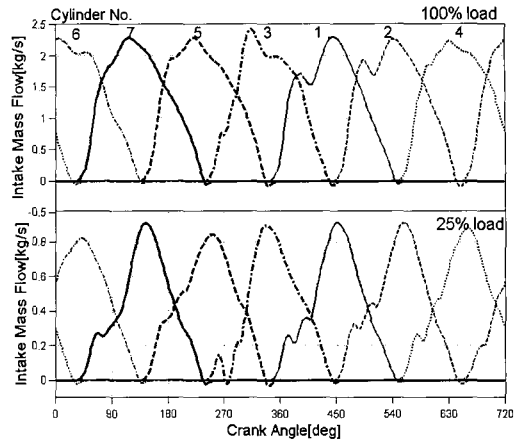


Fig. 9 Simulation results of new valve timing

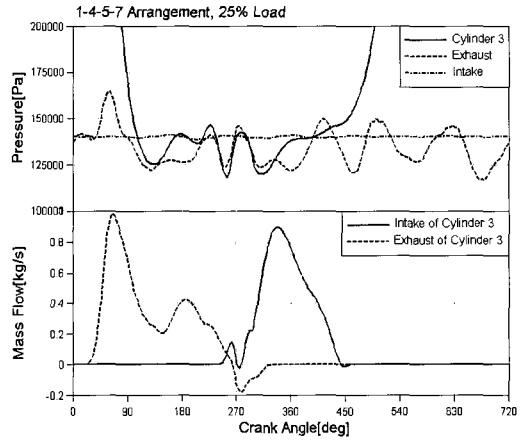


Fig. 10 Simulation results of Cylinder 3 with new valve timing

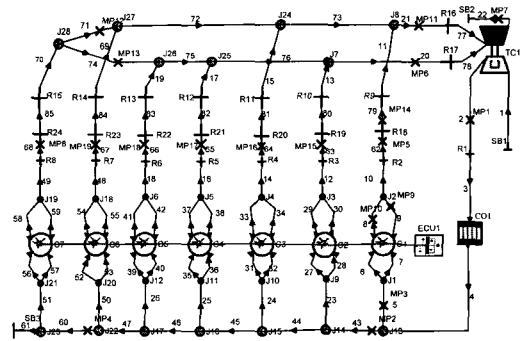


Fig. 11 Simulation model of 1-3-6-7 exhaust duct arrangement

소기과정의 개선을 위해 흡·배기 밸브 타이밍을 변경하여, 배기밸브가 닫히는 시기를 늦추었으며, 흡기밸브가 열리는 시기도 늦추었다. 이러한 흡·배기 밸브 타이밍을 이용한 성능 해석 결과를 100% 및 25% 부하에 대해서 Fig. 9에 나타내었다. 기존과는 다르게 100% 부하에서 초기 흡기과정이 개선되었으나, 25% 부하에서는 3번 실린더에 약간의 역류와 흡기가 원활하게 이루어지지 않고 있다. 이의 원인을 살펴보기 위해 Fig. 10에 실린더 3번의 배기관 및 흡기 압력을 동시에 나타내었다. 그림과 같이 1-2-4-6-7-5-3의 착화 순서에 따라 실린더 3번 출구 배기관에 각각의 실린더에서 발생된 압력파가 전달되고 있으며, 3번 실린더의 흡기가 시작할 때, 2번 실린더에서 발생된 압력맥동이 전달되어 3번 실린더의 소기과정을 악화시키고 있는 것으로 나타났다. 이를 해결하기 위해 3번 실린더에 대한 2번 실린더의 영향을 감소시키기 위해 배기관의 배열을 변경하였다. 이를 Fig. 11에 나타내었으며 그림과 같이 1-3-6-7 번 실린더를 동일 주 배기관으로 연결하고, 2-4-5번 실린더를 동일 주 배기관으로 연결하고 두 개의 주 배기관을 7번 실린더 배기관과 연결하는 시스템이다. 성능 해석 결과, Fig. 12와 같은 결과를 얻었으며, 실린더 1번의 흡기 및 배기 유동 특성은 1-3-6-7 배기관 배열이 우수함을 알 수 있다.

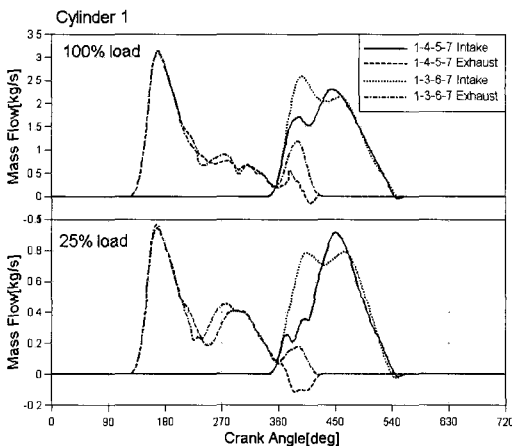


Fig. 12 Simulation results of 1-3-6-7 exhaust duct arrangement

#### 4. 결 론

중형 디젤 엔진 성능 향상을 위한 새로운 형태의 Hi-Pulse 과급 시스템을 개발하였으며, 이를 HYUNDAI HiMSEN 엔진에 적용한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Hi-Pulse 시스템은 고부하에서는 MPC 과급 시스템, 저부하에서는 Pulse 과급 시스템의 장점을 갖는다.
2. Hi-Pulse 시스템은 연료소비율 및 NOx 발생량 등의 엔진 성능적 측면과 생산/제작의 측면에서 우수하다.
3. Hi-Pulse 시스템의 연소실 가스 역류 등의 단점은 성능 해석 기술 등을 통한 시스템 최적화로 해결하였다.

#### 참고문헌

- [1] N. Watson and M.S. Janota, "Turbocharging the Internal Combustion Engine", Macmillan Press LTD, 1982.
- [2] K. Zinner, "Supercharging of Internal Combustion Engines", Springer-Verlag, 1978.
- [3] S. Shuai, J. Wang and Y. Liu, "Experimental and Theoretical Study on the Swirl Exhaust system for Diesel Engines", Seoul 2000 FISITA, 2000.
- [4] F. Trenc and F. Bizjan, "Influence of the Exhaust System on Performance of a 4-Cylinder Supercharged Engine", Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol. 120, 1998.
- [5] H. Bozung, "The Significance of Exhaust-gas Turbocharging for Cost-effective Diesel Engine Operation", CIMAC 1983.
- [6] T. Azuma, T. Yura and Y. Tokunaga,

"Some Aspects of Constant Pressure Turbocharged Marine Diesel Engines of Medium and Low Speed", Journal of Engineering for Power, Vol. 105, 1983.

[7] J.T. Kim, et. al, "Development of a new medium speed diesel engine-HYUNDAI H21/32", Vol. 1, Page 47, CIMAC 2001.

[8] J.T. Kim, et. al, "Expansion of HYUNDAI's medium speed diesel engine family, HiMSEN", CIMAC 2004.



**갈상학 (葛相學)**

1960년 11월생. 1983년 울산대학교 기계공학과 졸업(학사). 1985년 경북대학교 기계공학과 졸업(석사). 1985년 현대엔진공업주식회사. 1990년~현재 현대중공업 산업기술연구소 재직중.



**하지수 (河芝洙)**

1960년 6월생. 1983년 서울대학교 항공공학과 졸업(학사). 1985년 한국과학기술원 항공공학과 졸업(석사). 1991년 한국과학기술원 항공공학과 졸업(박사). 1991년~현재 현대중공업 산업기술연구소 재직 중.

**저 자 소 개**



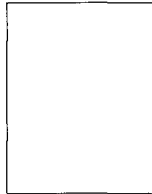
**김기두 (金基斗)**

1968년 1월생. 1990년 충북대학교 기계공학과 졸업(학사). 1992년 한양대학교 기계공학과 졸업(석사). 1992년~현재 현대중공업 산업기술연구소 재직 중.



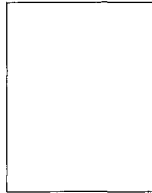
**윤옥현 (尹旭鉉)**

1970년 8월생. 1997년 울산대학교 기계공학과 졸업(학사). 1999년 부산대학교 기계공학과 졸업(석사). 1999년~현재 현대중공업 산업기술연구소 재직 중.



**김호익 (金鎬翊)**

1965년 3월생. 1992년 울산대학교 기계공학과 졸업(학사). 1994년 울산대학교 기계공학과 졸업(석사). 1994년~현재 현대중공업 엔진기술개발부 재직중.



**김주태 (金柱泰)**

1957년 3월생. 1983년 부산대학교 기계공학과 졸업(학사). 1995년 울산대학교 기계공학과 졸업(석사). 1983년~현재 현대중공업 엔진기술개발부 재직중.