

# 커먼레일 디젤기관의 인터쿨러 대체용 볼텍스 튜브 장치의 성능특성에 관한 실험 연구

임 석 연<sup>\*1)</sup> · 최 두 석<sup>2)</sup> · 류 정 인<sup>3)</sup>

충남대학교 대학원 기계공학과, BK21 메카트로닉스사업단<sup>1)</sup> · 공주대학교 기계자동차공학부<sup>2)</sup> ·  
충남대학교 기계공학부, BK21 메카트로닉스사업단<sup>3)</sup>

## An Experimental Study on the Performance Characteristics of the Vortex Tube for Substitution of the Intercooler in a Common-rail Diesel Engine

Seokyeon Im<sup>\*1)</sup> · Dooseuk Choi<sup>2)</sup> · Jeongin Ryu<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Graduate School of Mechanical Engineering, BK21 Mechatronics Group, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

<sup>2)</sup>Division of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University, Cheonan 330-717, Korea

<sup>3)</sup>Department of Mechanical Engineering, BK21 Mechatronics Group, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received 26 November 2007 / Accepted 31 January 2008)

**Abstract** : An object of this study is to confirm performance characteristics of the vortex tube apparatus for substitution of the intercooler in a common-rail diesel engine. The turbo pressure, the intake air flow rate and the  $\Delta T_c$  decrease ratio of the intercooler were measured in a experimental engine. The vortex tube apparatus was made after confirmation of the geometric phenomena in fundamental experiments. To investigate energy separation characteristics of the vortex tube, the measured turbo pressure was applied to the vortex tube inlet and the  $\Delta T_c$  decrease ratio was compared with one of the intercooler in the cold air mass flow ratio similar to the intake air flow rate of the experimental engine. From the results, we found that the energy separation ratio is increased according to of the inlet pressure and the  $\Delta T_c$  decrease ratio of the vortex tube apparatus is higher than one of the intercooler at low engine speed and engine load of medium and low.

**Key words** : Vortex tube(볼텍스 튜브), Common-rail diesel engine(커먼레일 디젤기관), Turbo intercooler(터보 인터쿨러), Wastegate turbocharger(웨스트 게이트 터보차저), Energy separation(에너지 분리)

### Nomenclature

- $y_c$  : cold air mass flow ratio  
(cold air mass flow/inlet air mass flow)
- $\Delta T_c$  : temperature difference between inlet air and cold air, K
- $\Delta T_h$  : temperature difference between inlet air and hot air, K

### 1. 서론

디젤기관은 가솔린 기관에 비해 높은 열효율에 따른 연비향상과 배기가스 저감대책에도 유리하여 세계 각국에서 기술 개발 연구가 활발히 이루어지고 있다.

디젤기관의 터보차저는 엔진에 유입되는 공기의 밀도를 증가시키는 과급장치로서 엔진의 대형화 없이도 기관출력을 극대화시키고 배출가스를 저감시킴으로서 디젤기관의 성능을 극대화시킨다.

\*Corresponding author, E-mail: imsy95@hotmail.com

그 중 WGT(wastegate turbocharger)는 부스트 압력을 형성하기 시작하는 엔진회전수를 저회전수 영역 쪽으로 옮기고, 고회전수에서 발생하는 과도한 압력을 조절하기 위해 wastegate port를 열어 배기가스 중 일부를 터빈으로 보내지 않고 배기관으로 bypass 시키는 방식으로 출력 증가, 매연 및 배기가스를 저감시키게 된다.<sup>1,2)</sup>

그러나 공기압축 시 과급공기의 온도가 상승되기 때문에 과급된 공기의 온도를 낮추기 위해 기관의 충전효율을 향상시키기 위해 인터쿨러를 함께 사용한다.<sup>3)</sup> 가열된 공기를 냉각수나 대기의 찬공기로 냉각시키는 기존의 인터쿨러는 핀-튜브 또는 플레이트-핀 열교환기가 많이 사용되는데, 냉각수로 냉각시키는 경우, 압축공기를 냉각수 온도보다 더 낮출 수 없는 문제점이 발생하고, 공기냉각방식의 경우에는 차량의 주행속도 및 대기조건에 의해 영향을 받는 문제점이 발생할 수도 있다.

간단한 구조의 관을 이용하여 어떠한 화학적 변화나 연소현상 없이 압축공기로부터 저온공기와 고온공기를 분리하는 에너지 분리장치인 볼텍스 튜브는 Ranque<sup>4)</sup>에 의하여 처음 발견된 후 Hilsch<sup>5)</sup>에 의하여 널리 알려지게 되었으며, 이후 에너지 분리가 일어나는 원인과 그 응용에 관하여 많은 사람들에 의하여 연구가 수행되고 있다.<sup>6-9)</sup>

볼텍스 튜브 장치는 작동부의 움직임이 없고, 구조가 간단하며, 조작이 간편할 뿐만 아니라 순간적인 ON/OFF가 가능하며, 유지비용도 적어 매우 경제적인 장점을 가지고 있다.

이런 특성들을 가지는 볼텍스 튜브장치를 터보차저에 의해 과급된 고온의 압축공기 냉각에 적용하게 되면 주위환경에 공기냉각효과가 영향을 받지 않으며, 기관의 저회전수 및 저부하 조건에서도 높은 공기냉각효과를 기대할 수 있을 것이다.

따라서 본 실험은 터보차저 인터쿨러가 장착된 커먼레일 디젤기관에 장착되는 인터쿨러를 대체하기 위한 볼텍스 튜브장치를 제작하여 측정된 터보차저 부스트압력을 장치 입구부에 적용한 후 그 성능특성을 파악하여 커먼레일 디젤기관에서 인터쿨러 대체 적용 가능성을 파악하는데 그 목적을 두고 있다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 엔진 실험 장치 및 방법

인터쿨러의 과급공기 냉각율과 터보차저 부스트 압력을 확인하기 위해 사용된 기관은 터보차저 인터쿨러가 장착된 소형 4기통 커먼레일 디젤기관으로서 주요제원은 Table 1과 같다.

Fig. 1은 엔진 데이터 측정에 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸 것으로, 실험 장치는 EC동력계(AVL, 300kW), 동력계 컨트롤부, 센서부 및 데이터 획득부분으로 구성되어 있다.

기관 실험용 인터쿨러 장치는 기관회전수 4000rpm, 기관부하 100%조건에서 터보차저에 의한 과급공기의 냉각율을 60%정도로 유지할 수 있도록 인터쿨러 장치에 수냉식 냉각장치를 장치하여 인터쿨러의 냉각성능을 유지시킨 후 실험하였다.

터보차저 부스트압력과 인터쿨러에 의한 과급공

Table 1 Specifications of test engine

Items	Specifications
Combustion chamber	Direct injection
Engine model	4 - stroke/DI
Total displacement(cc)	1979
Bore × Stroke (mm)	81 × 96
Compression ratio	17.7 : 1
Maximum power (ps/rpm)	111/4000
Maximum torque (kg m/rpm)	25.5 / 2000
Turbocharger type	WGT

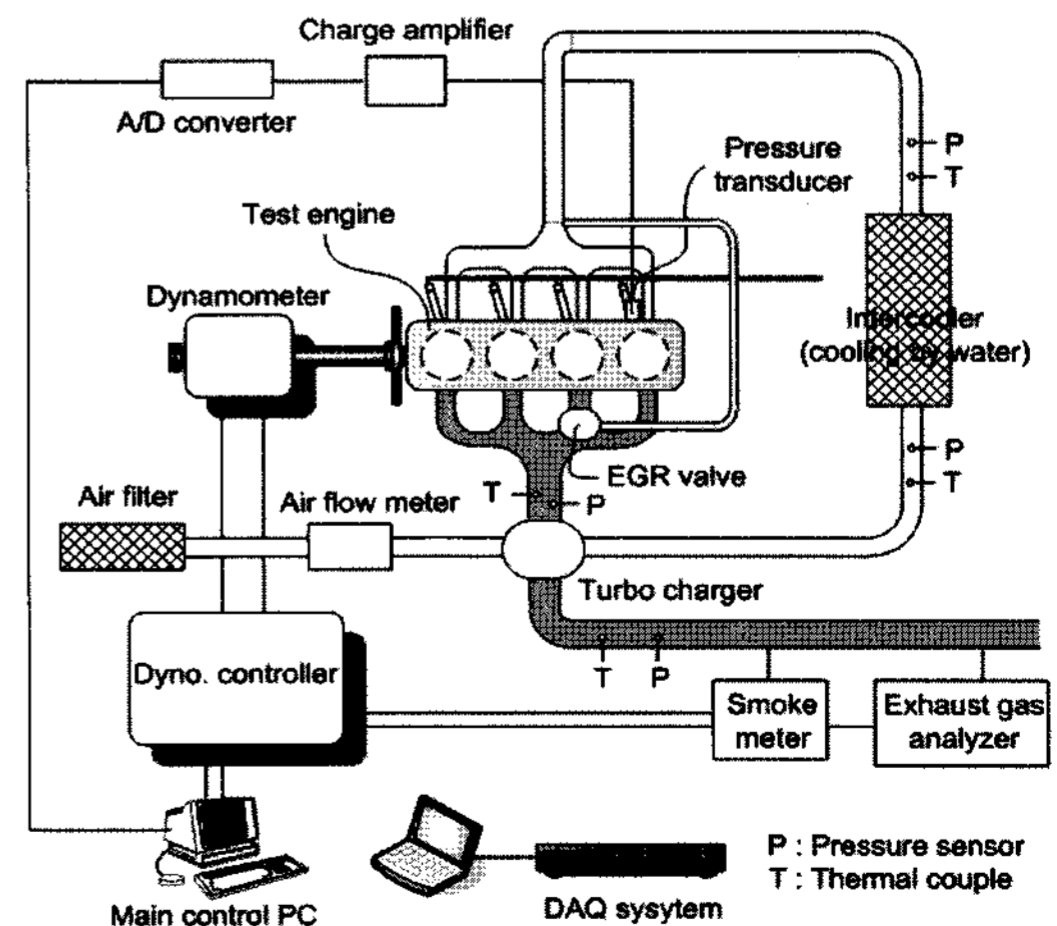


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus for a experimental engine

기의 냉각율을 측정하기 위해 인터쿨러 전·후단에 각각 압력센서와 열전대를 장착하여 각각의 압력변화와 온도변화를 측정하여 A/D변화장치를 통해 PC에서 처리하도록 하였다.

실험은 기관회전수 1000rpm~4000rpm까지 500rpm 간격으로 하고, 기관부하는 최대토크를 기준으로 하여 25%, 50%, 75% 및 100%의 조건에서 이루어졌다.

또한, 각 조건별로 엔진에 유입되는 공기량을 확인하기 위해서 에어필터와 터보차저 사이에 핫와이어 방식의 흡입유량계(Sensyflow, 720kg/h)를 설치하여 흡입유량을 측정하도록 하였다.

### 2.2 인터쿨러 대체용 볼텍스 튜브 장치 및 측정 방법

인터쿨러 대체를 위한 볼텍스 튜브 장치의 제작은 저온공기의 에너지 분리효율을 극대화할 수 있도록 선행연구<sup>8,9)</sup>를 통해 볼텍스 튜브 장치의 기하학적 형상을 확인한 후 제작하였다. 제작된 볼텍스 튜브 장치의 상세 치수는 Table 2와 같고, Fig. 2는 볼텍스 튜브 장치 사진을 나타낸 것이다.

Fig. 3은 볼텍스 튜브 장치의 에너지 분리 특성을 확인하기 위한 실험 장치도로서 압축공기를 볼텍스 튜브 장치에 공급하기 위한 공기공급부, 기하학적 형상에 의해 제작된 볼텍스 튜브 장치부와 온도, 압력 및 유량을 측정하는 데이터 처리부로 구성되어 있다.

볼텍스 튜브 장치의 에너지 분리특성을 확인하기 위해 열전대는 입구, 온기 출구 및 냉기 출구에 각각 장치하였고, 입구압력을 확인하기 위해 압력게이지를 입구부분에 장착하였다. 측정에 사용된 압력게이지와 열전대는 예비 실험을 통하여 보정한 후 사용하였다.

볼텍스 튜브 장치의 입구 공급 압력에 따른 유량과 저온공기유량비( $y_c$ )를 확인하기 위해 볼텍스 튜브 장치의 저온출구 부분에 장착된 유량계는 차압을 이용하여 유량을 측정하는 공기유량계를 사용하였고, 측정된 데이터는 온도에 따른 보정 계수식을 적용하여 사용되었다.

볼텍스 튜브 장치는 입구에 공급되는 압축공기압력에 의해 에너지 분리효율이 크게 차이가 나기 때

Table 2 Dimensions of vortex tube (unit : mm)

Items	Specifications
Tube length (L)	930
Tube inner diameter (D)	65.9
Nozzle diameter ( $d_n$ )	8.8
Cold end orifice ( $d_c$ )	37
Nozzle holes ( $H_n$ )	6
Nozzle area ratio ( $S_n$ )	0.164

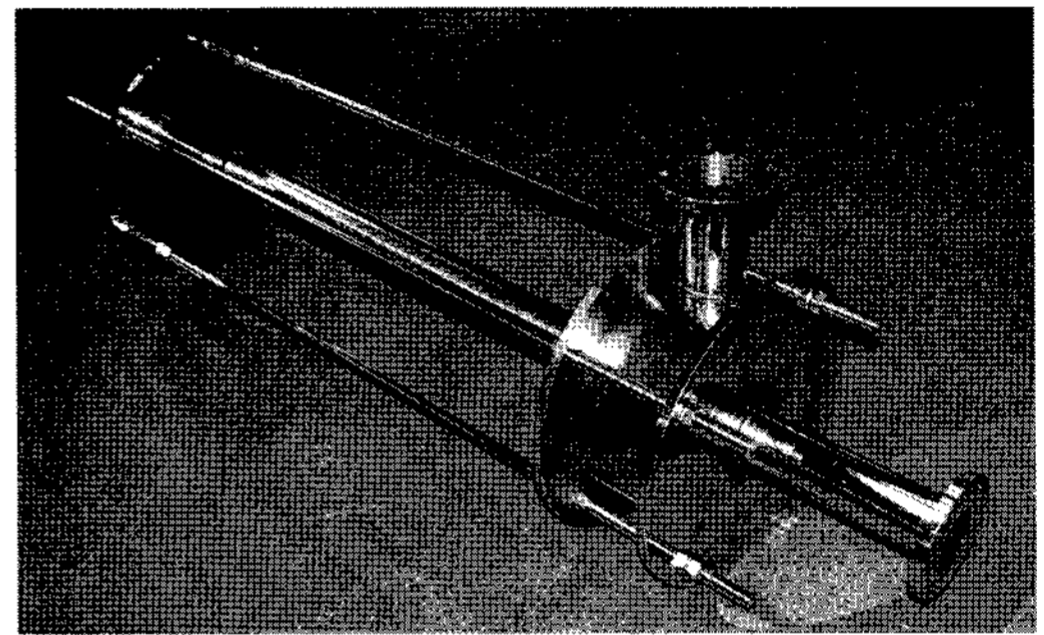


Fig. 2 Photo of the vortex tube for substitution of the intercooler

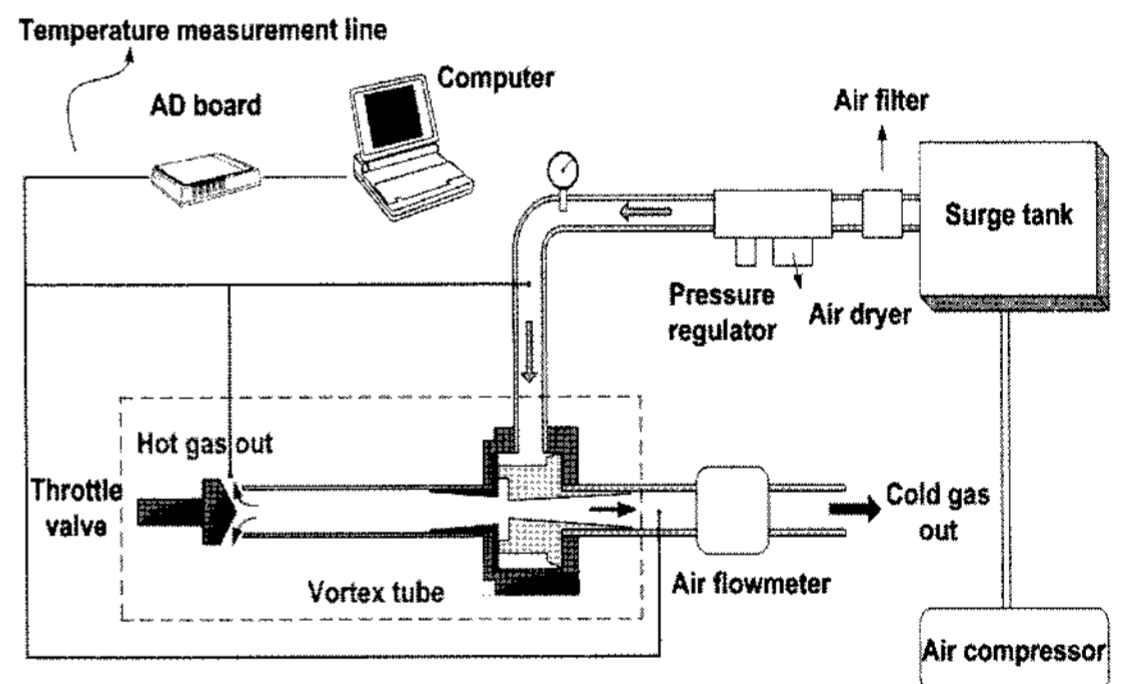


Fig. 3 Schematic of experimental apparatus

문에 제작된 장치의 공급압력에 따른 에너지분리 효율을 확인하기 위해서 입구의 공급압력을 터보차저 부스트압력 구간과 비슷한  $0.2\text{kgf/cm}^2 \sim 1.4\text{kgf/cm}^2$ 까지  $0.2\text{kgf/cm}^2$ 간격으로 하여 에너지 분리특성을 확인하도록 하였다. 또한 고온출구 부분의 면적에 따라 에너지 분리특성이 달라지기 때문에 면적을 조절할 수 있도록 throttle valve를 두어 저온공기 유량비( $y_c$ )를 0.1~0.9까지 조절하여 그 특성을 확인하였다.

또한, 측정된 유량과 실제 기관의 흡입유량과 비교하여 유량이 비슷한 지점의  $y_c$ 에서의 공기냉각율과 실제 기관에서 인터쿨러에 의한 냉각율과 비교

하도록 하였다.

각 조건에서의 실험은 볼텍스 튜브 장치에 압축 공기를 공급하고 압력을 일정하게 유지시킨 후 각 측정부의 온도가 정상상태( $\pm 0.2K$ )에 도달하도록 충분한 시간을 두고 측정하였다.

데이터 획득은 각 부분에 장착된 열전대와 A/D 변환장치를 통해 PC에서 처리되도록 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 4,5는 터보차저 인터쿨러가 장착된 상용 커먼레일 디젤기관의 기관회전수 및 기관부하 별 터보차저 부스트압력과 흡입공기량을 나타낸 것이다. 터보압력과 흡입 공기량 모두 기관회전수와 기관부하가 증가함에 따라 증가함을 보이고 있다.

Fig. 6,7은 제작된 볼텍스 튜브 장치의 성능 특성

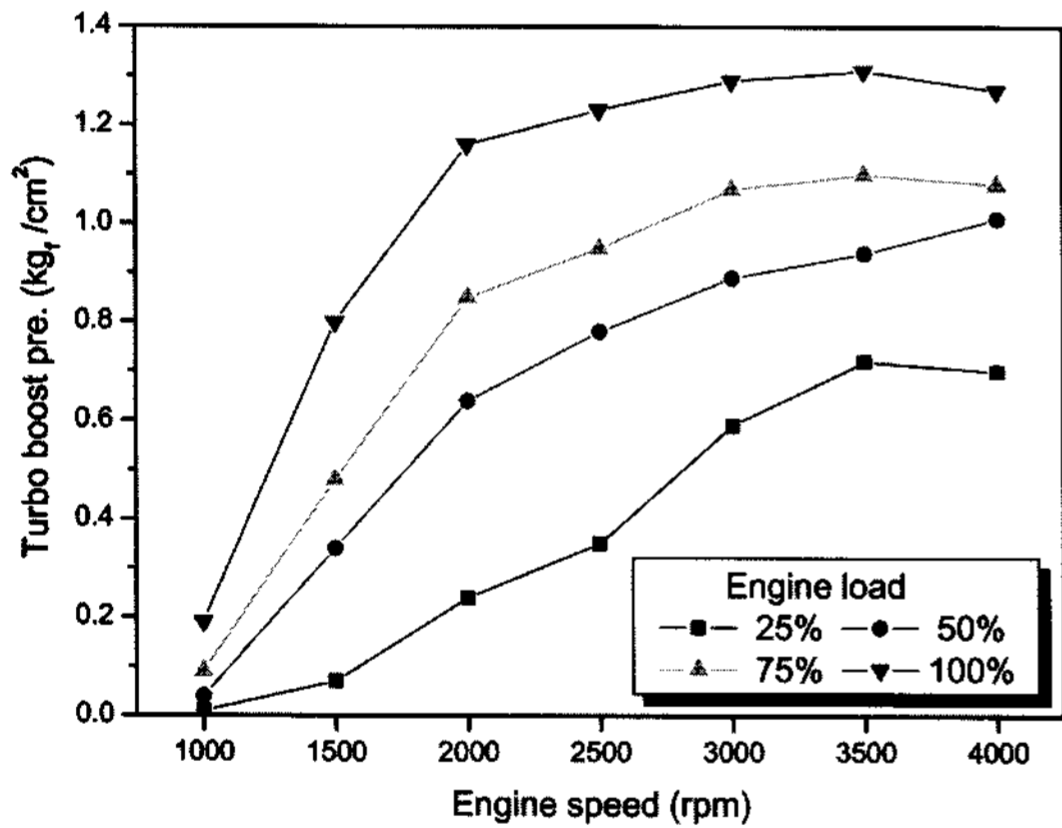


Fig. 4 Turbo pre. under engine speed and load

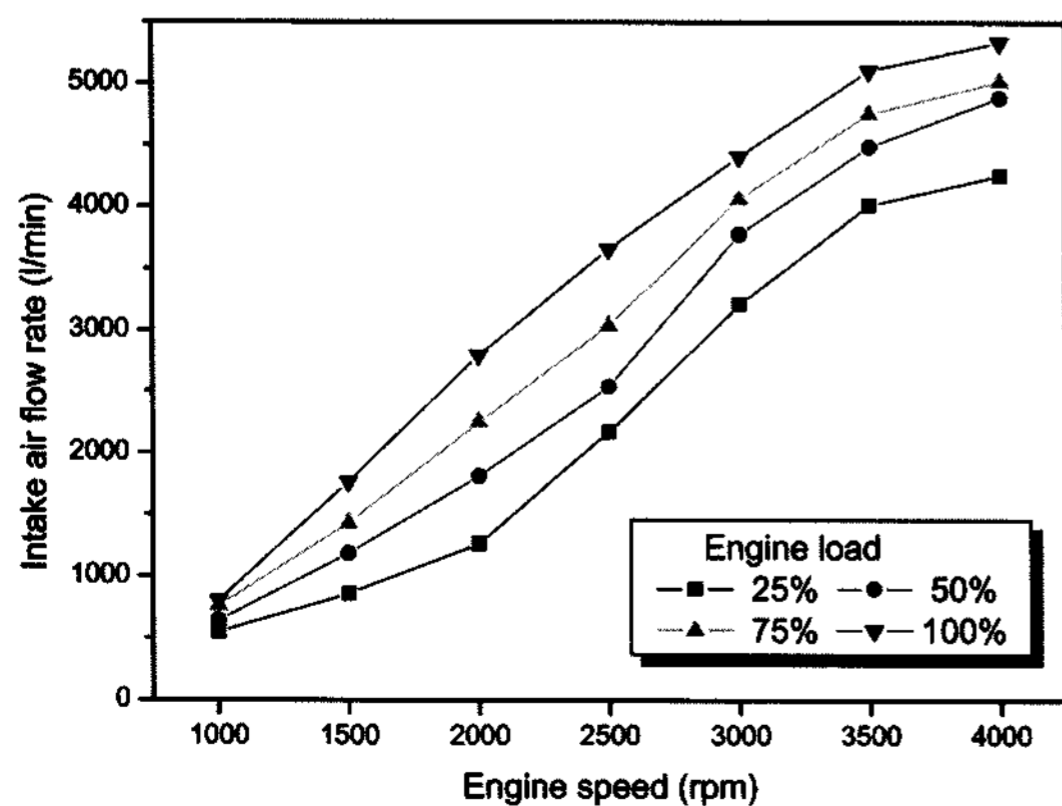


Fig. 5 Intake flow rate under engine speed and load

을 확인하기 위해 상온(298K)에서 터보 부스트압력과 비슷한 압력구간인  $0.2kgf/cm^2 \sim 1.4kgf/cm^2$ 에서  $\Delta T_c$ ,  $\Delta T_c$ 냉각율과  $\Delta T_h$ ,  $\Delta T_h$ 상승율을 나타낸 것이다.  $\Delta T_c$ ,  $\Delta T_c$ 냉각율과  $\Delta T_h$ ,  $\Delta T_h$ 상승율 모두 볼텍스 튜브 장치의 입구 압력이 증가함에 따라 모두 증가함을 보이고 있다. 이는 입구공급압력의 증가에 따라 동일한 노즐로 유입되는 유량이 증가하면서 노즐부를 통과하는 유속이 증가하여 볼텍스 튜브내 운동량도 활발해지고 이에 볼텍스 튜브내의 각속도 차도 커짐에 따라 에너지 분리가 커지게 되어 온도상승률과 온도냉각율이 증가하게 되는 것으로 사료된다.

$\Delta T_c$ 의 냉각율은  $y_c = 0.5 \sim 0.6$ 사이에서 가장 높게 나타나는 반면에  $\Delta T_h$  상승률은  $y_c = 0.7 \sim 0.9$ 구간에서 가장 높은 효율을 보이고 있다.  $y_c$ 가 증가함에 따라서 고온출구의 유출 단면적이 적어져 고온공기층의 일부가 고온출구로 유출되지 못하고 역류

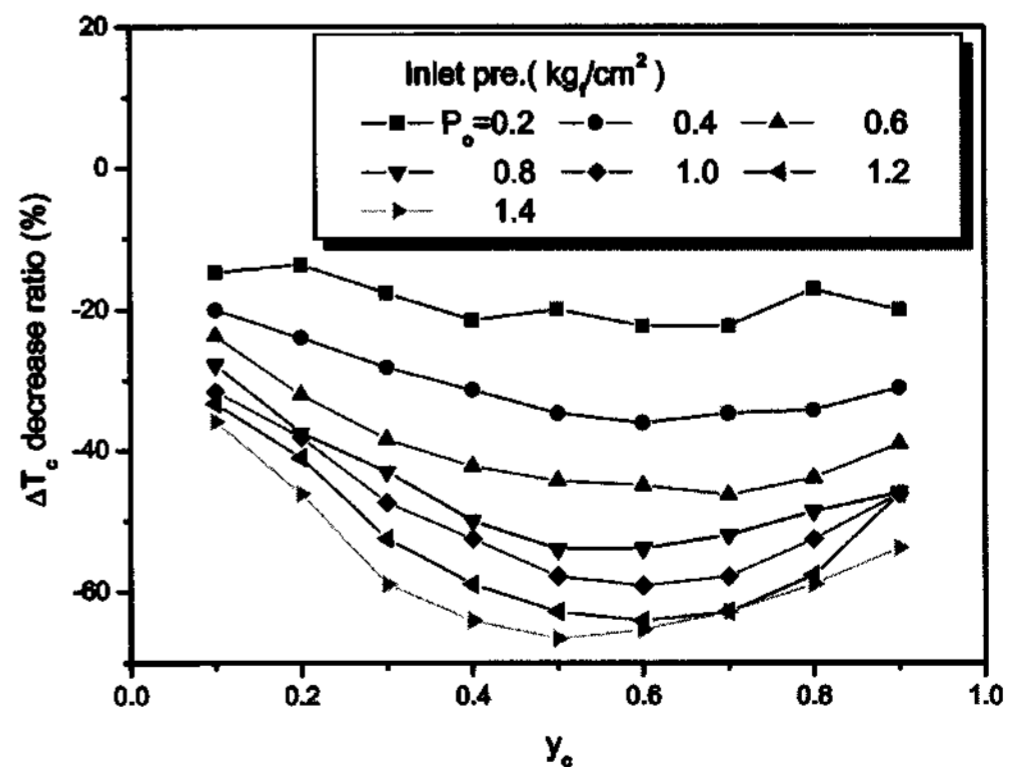
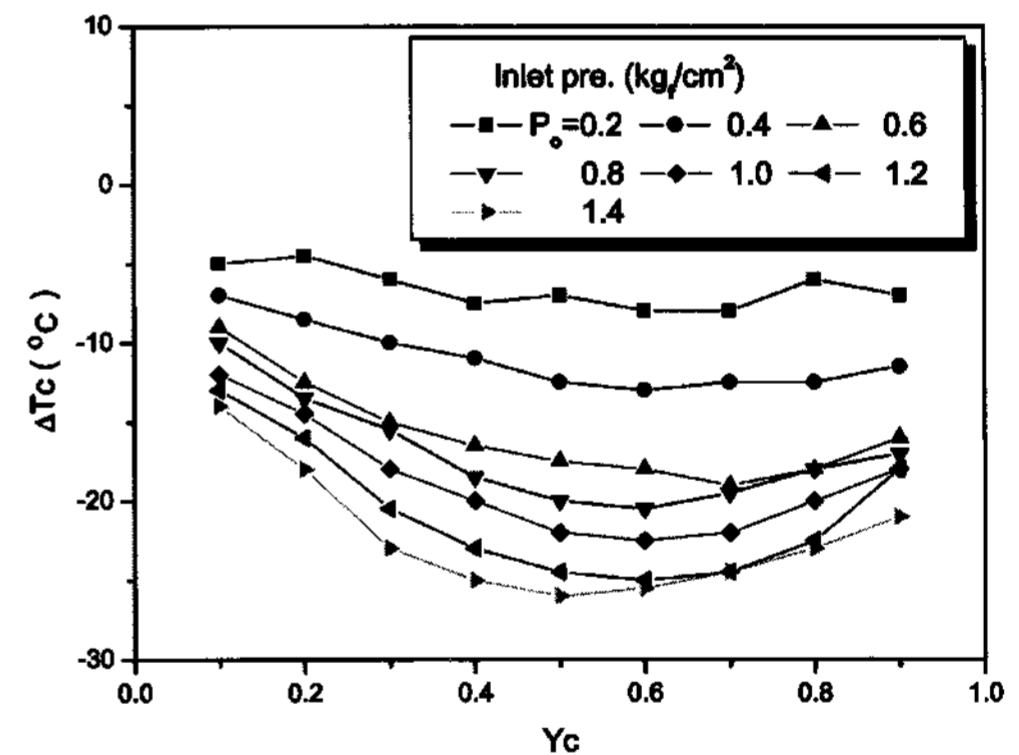


Fig. 6 Comparison of  $\Delta T_c$  and  $\Delta T_c$  decrease ratio under vortex tube inlet pressure ( $T_0=298K$ )

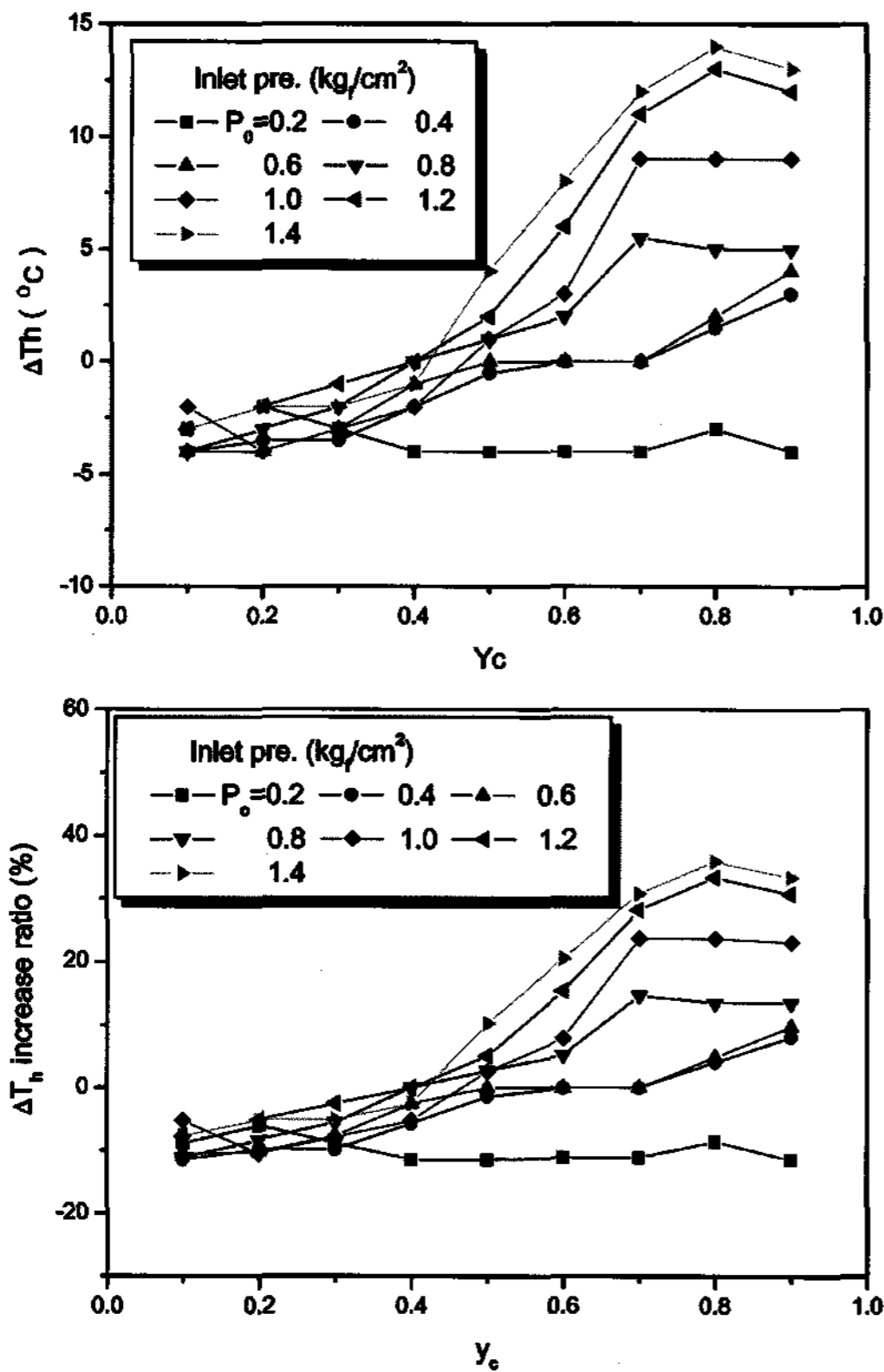


Fig. 7 Comparison of  $\Delta T_h$  and  $\Delta T_h$  decrease ratio under vortex tube inlet pressure ( $T_0=298K$ )

되어 저온출구로 유출되어  $\Delta T_c$ 의 냉각율이 감소하는 것으로 생각되어 지고,  $\Delta T_h$  경우에는 고온출구의 단면적이 넓은 경우 볼텍스 현상에 의해 에너지 분리된 고온 공기층만 고온 출구로 유출되어야 하지만 출구면적이 넓기 때문에 분리된 고온공기와 일부의 저온공기가 같이 유출되어 온도상승률이 저하되는 것으로 사료된다. 또한,  $y_c$ 가 1에 가까워짐에 따라 에너지 분리효율이 저하되는 이유는 고온출구 면적의 감소로 인하여 볼텍스 튜브내의 유동저항이 증가하여 에너지 분리가 감소되는 것으로 생각되어 진다.

실험용 엔진에서 측정된 터보차저 부스트압력과 동일하게 볼텍스 튜브 장치의 입구에 공급압력을 유지하였을 경우,  $\Delta T_c$ 의 냉각율이 가장 좋은  $y_c$ 구간에서의 유출유량은 실제 기관에 흡입되는 공기량보다 많게 된다. 이렇게 되면 저온 출구 부분에서 유출된 찬 공기가 모두 엔진으로 유입되지 않고, 엔진의

흡기다기관에서 정체되어 볼텍스 튜브의 유동을 방해하여 볼텍스 튜브의 에너지 분리효율을 저하시키게 될 것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 비록  $\Delta T_c$ 의 냉각율은 감소되지만 throttle valve를 조절하여  $y_c$ 를 낮추어 줄 필요가 있다.

Fig. 8은 실제 기관의 흡입공기량과 동일한 유량이 되는  $y_c$ 와 이때의  $\Delta T_c$  냉각율을 나타낸 것이다.

볼텍스 튜브 설계 시 실제 기관의 흡입유량 범위가 넓어 중회전수 및 중부하의 터보차저 부스트압력 조건에 맞추어 제작하였기 때문에 고회전수영역에서는 상대적으로 터보차저 부스트압력과 흡입공기량이 증가하기 때문에  $y_c$ 가 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한, 저부하의 터보차저 부스트 압력 조건에서는 흡입유량에 비해 터보차저 부스트 압력이 매우 작기 때문에 입구 압력에 의해 냉기 출구 유량이 결정되는 볼텍스 튜브 장치에서는 고부하 영역의 터보압력 조건에 비해서  $y_c$ 가 더 커지게 되는 것이다. 따라서  $\Delta T_c$ 의 냉각율은  $y_c$ 에 의해 크게 좌우되기 때문에 인터쿨러 대체용 볼텍스 튜브 장치의 형상 설계 시 유출유량이  $\Delta T_c$ 의 냉각율이 최대가 되는  $y_c$ 가 되도록 하는 것이 중요한 인자라 할 수 있을 것이다.

본 실험을 위해 제작된 볼텍스 튜브 장치는 선행 연구에 의하여 소형 볼텍스 튜브 장치를 제작하여 최적의 기하학 형상에 따른 볼텍스 튜브의 유출유량을 확인한 후 실제 커먼레일 디젤기관의 흡입유량과 비교하여 최적의 냉각효율을 가지는  $y_c$ 가 될 수 있도록 고려되어 제작되었다. 흡입유량이 비슷한  $y_c$ 에서의  $\Delta T_c$ 의 냉각율은 저회전수 및 중·저부하 영역에서는 실제 엔진실험에서 얻어진 흡입공기 냉각율보다 냉각율이 더 높게 나타나는 것을 확인할 수가 있었다. 그러나 고회전수 및 고부하영역의 터보차저 부스트압력 조건에서는 기관에서 요구되어지는 흡입유량이 증가되기 때문에 에너지 분리효율이 최대인  $y_c$ 보다 실제  $y_c$ 가 증가하여 에너지 분리효율은 저하되었으나, 인터쿨러의 공기 냉각율과 비슷해짐을 확인할 수 있었다.

만약, 고회전수 및 고부하영역의 터보차저 부스트압력 조건에서 실제 인터쿨러의 냉각율보다 높은 냉각효과를 기대하기 위해 볼텍스 튜브의 에너지

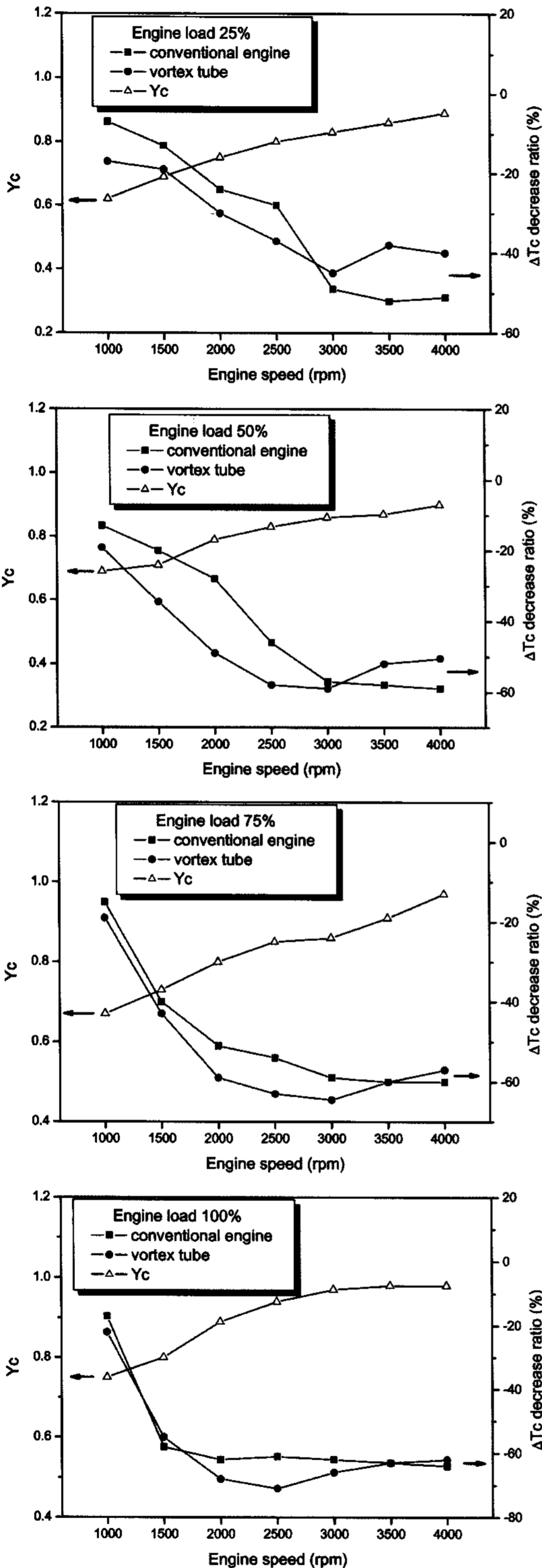


Fig. 8 Comparison of  $y_c$  and  $\Delta T_c$  decrease ratio under engine speed and load

분리효율이 악화되지 않는 설계범위에서 볼텍스 튜브 장치 내 노즐의 면적을 증가시킨다면, 저회전수 및 저부하영역의 터보차저 부스트압력 조건에서 오히려 냉각효과는 악화될 수 있을 것이다. 따라서 위와 같은 문제점을 해결하기 위해 볼텍스 튜브 장치 내 노즐의 면적을 입구 공급압력에 따라 가변할 수 있는 장치를 고안한다면 보다 더 높은 에너지 분리효율과 냉각율을 얻을 수 있을 것이라 생각된다.

#### 4. 결론

터보차저 인터쿨러가 장착된 커먼레일 디젤기관의 인터쿨러 대체용 볼텍스 튜브 장치를 제작하여 실제 기관 적용에 앞서 제작된 장치의 성능 특성을 확인한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 볼텍스 튜브 장치의 에너지 분리특성은 입구 공급압력에 따라 증가되었고,  $\Delta T_c$  냉각율은  $y_c = 0.5 \sim 0.7$ 일 경우와  $\Delta T_h$ 의 상승률은  $y_c = 0.7 \sim 0.9$  구간에서 각각 최대로 나타났다.
- 2) 실제 디젤기관의 흡입공기량과 비슷한 볼텍스 튜브 장치의 저온출구 유출유량은 모든 터보차저 부스트압력 구간에서 볼텍스 튜브의 스톱 밸브 조절에 의해 제어됨을 확인할 수가 있었다.
- 3) 인터쿨러에 의한 흡입공기 냉각율보다 저회전수 및 중·저부하 영역의 터보차저 부스트압력 구간에서 볼텍스 튜브 장치에 의한 압축공기 냉각율이 더 높게 나타남을 알 수가 있었다.

상기 특성들로 볼 때 본 실험 장치는 저온공기유량비의 조절에 의해 고회전수 및 고부하 영역의 터보차저 부스트압력조건에서 보다 저회전수 및 중·저부하 영역의 터보차저 부스트압력조건에서 압축공기냉각율이 더 크게 나타나는 만큼 차후 실제 커먼레일 디젤기관에 적용 실험 시 저회전수 및 저부하 영역에서 더 큰 효과를 기대할 수 있을 것이다.

#### 후 기

이 논문은 충남대학교 교원연구력 강화사업에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

#### References

- 1) J. H. Cheong, S. H. Cho and C. H. Kim, "Effect

- of Variable Geometry Turbocharger on HSDI Diesel Engine," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.303-308, 1999.
- 2) I. H. Park, M. S. Park, H. J. Ahn, J. H. Kim and D. C. Han, "Performance Enhancement of a Turbocharger Using a Variable Geometry Compressor," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.143-147, 2005.
  - 3) K. H. Ryu and T. Y. Chung, "A Study on Performance and Exhaust Gas Characteristics of the Diesel Engine with Turbocharger and Intercooler," Transactions of KSAE, Vol.7, No.7, pp.86-93, 1999.
  - 4) G. J. Rague, United State Patent, Serial No. 646.020, Applied December 6, 1932.
  - 5) R. Hilsch, "The Use of Expansion of Gases in a Centrifugal Field as a Cooling Process," Review of Scientific Instruments, Vol.8, No.2, pp.108 -113, 1947.
  - 6) O. Andm and M. Baki, "An Experimental Study on the Design Parameters of a Counter-flow Vortex Tube," Energy, Vol.31, pp.2763-2772, 2006.
  - 7) M. H. Saidi and M. S, Valipour, "Experimental Moldeling of Vortex Tube Refrigerator," Applied Thermal Engineering, Vol.23, pp.1971-1980, 2003.
  - 8) D. J. Oh, S. Y. Im, M. K. Yoon and J. I. Ryu, "An Experimental Study on the Energy Separation in a Low Pressure Vortex Tube for Engine," Transactions of KSAE, Vol.10, No.5, pp.235-241, 2002.
  - 9) D. J. Oh, An Experimental Study on the Characteristics of a Low Pressure Vortex Tube, Chungnam National University, Ph. D. Dissertation, 2003.