

Vortex Tube의 승용 디젤기관 배기가스 온도 분리특성에 관한 연구

정 영 철¹⁾ · 최 두 석^{*2)} · 임 석 연³⁾ · 김 홍 주⁴⁾ · 류 정 인⁵⁾

충남대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 공주대학교 기계자동차공학부²⁾ · 자동차부품연구원³⁾ ·
공주대학교 대학원 기계공학과⁴⁾ · 충남대학교 기계공학과⁵⁾

An Experimental Study on Characteristics of Temperature Separation in a Vortex Tube for Diesel Engine Exhaust Gas

Youngchul Jung¹⁾ · Dooseuk Choi^{*2)} · Seokyeon Im³⁾ · Hongju Kim⁴⁾ · Jeongin Ryu⁵⁾

¹⁾Graduate School of Mechanical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

²⁾Division of Mechanical & Automative Engineering, Kongju National University, Cheonan 330-717, Korea

³⁾Korea Automotive Technology Institute, 74 Yongjung-ri, Pungse-myeon, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea

⁴⁾Graduate School of Mechanical Engineering, Kongju National University, Chungnam 330-717, Korea

⁵⁾Department of Mechanical Engineering, BK21 Mechatronics Group, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received 17 April 2009 / Accepted 8 July 2009)

Abstract : An object of this study is to confirm the opening amount of the throttle valve that is begun the temperature separation of vortex tube for various engine speed and load condition in a common rail diesel engine. The vortex tube located at downstream of the exhaust manifold is a device separating the incoming exhaust gas to hot and cold stream. To find optimum separation efficiency of vortex tube, the opening amount of throttle valve has been investigated for various engine speed and load conditions. Engine speed was found that the influence of engine speed was dominant compared with that of engine load. As engine speed was increased, the throttle opening amount starting temperature separation was reduced.

Key words : Vortex tube(볼텍스 튜브), Temperature separation(온도분리), Common-rail diesel engine(커먼레일 디젤기관), Energy separation(에너지분리), Exhaust gas(배기가스)

1. 서 론

화석연료의 사용은 탄소, 산소, 질소, 수소, 인, 황의 6원소의 발생을 급격히 증가시켰다. 주목받고 있는 대기 오염 물질로는 메탄과 질소산화물이 있다. 자동차, 화력발전소, 공장 등에서 다량으로 배출되는 질소화합물(NOx)은 강한 햇빛과 접촉하면 다른 화합물질과 반응하여 오존을 발생시킨다. 오존은 많은 도시에서 발생하고 있는 광화학 스모그의 주

성분으로서, 이 오염물질의 피해는 더욱 커지고 있으며 각국의 배출가스 규제는 더욱더 강화되고 있어 그 대응기술의 개발은 점점 더 어려워지고 있는 실정이다.

볼텍스 튜브(vortex tube)의 에너지 분리특성은 기관에서 배출되는 배기가스를 감소시킬 수 있는 한 방법으로 최근에 제안되고 있다.

간단한 구조의 관을 이용하여 어떠한 화학적 변화나 연소현상 없이 압축공기로부터 저온공기와 고온공기를 분리하는 볼텍스 튜브는 Ranque¹⁾에 의하

*Corresponding author, E-mail: dschoi@kongju.ac.kr

여 처음 발견되어 Hilsch²⁾에 의하여 널리 알려지게 되었으며, 이후 에너지 분리가 일어나는 원인과 그 응용에 관하여 많은 사람들에 의하여 연구가 수행되어 지고 있다.

볼텍스 튜브의 에너지 분리 현상에 대하여 보편적으로 받아들여지고 있는 이론은 Fulton³⁾이 제안한 것으로 압축된 유체는 관의 접선방향의 노즐을 빠른 속도로 통과하는데 노즐 벽면 쪽은 상대적으로 속도가 느리고 중심 부분은 빠른 속도를 갖는 “자유 볼텍스”(ωr²=const.)가 형성된다. 이때 유동이 스톨 밸브를 향하여 진행하면서 자유 볼텍스는 유체 층 사이의 마찰로 볼텍스 튜브의 중심부에서 “강제 볼텍스”(ω=const.)로 변하게 되는데 이러한 유동형태의 변화로 인하여 관의 중심에서 벽면 방향으로 운동량 전달이 일어나게 되어 볼텍스 중심이 외부 층 보다 더 냉각된다. 그러나 에너지 균형을 이루기 위하여 열이 내층으로 이동하지만 운동량 전달이 열의 이동보다 더 크므로 외부 층의 공기는 정체온도(static temperature)가 상승되어 고온 유동으로 되면서 스톨 밸브를 통해 유출된다. 이때, 내부 층의 유체는 받은 열에너지보다 더 큰 운동량을 잃음으로 더 낮은 온도가 되고, 입구온도보다 낮은 저온 유동이 되어 저온출구 오리피스를 지나 외부로 배출되고 이때의 에너지 분리특성은 스톨 밸브의 열림 량과 입구의 유량 및 압력에 따라 다르게 나타난다.

본 실험은 볼텍스 튜브를 승용 디젤기관의 배기관에 설치하고 엔진 회전수와 부하조건에 따라 스톨 밸브 열림 량을 조절하여 Hot gas와 Cold gas로

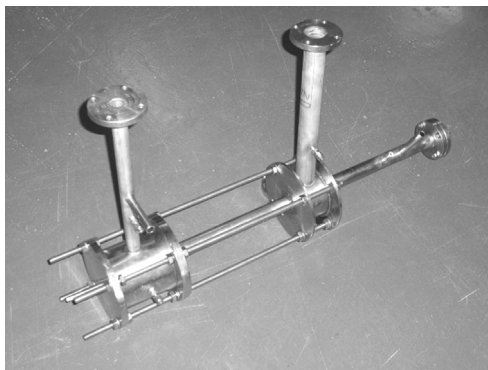


Photo. 1 Vortex tube

분리되는 볼텍스 튜브의 온도분리 특성을 확인하고 스톨 밸브 열림 량에 따른 온도 분리 특성을 기준으로 하여 엔진 적용가능성을 검토하는 것에 그 목적이 있다. 실험에 사용된 볼텍스 튜브 장치는 Photo 1에 나타내었다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 볼텍스 튜브의 제작은 저온공기의 온도 분리효율을 극대화할 수 있도록 선행연구^{4,5)}를 통해 확인된 볼텍스 튜브 장치의 기하학적 형상을 확인한 후 제작하였다. 제작된 볼텍스 튜브 장치의 상세 치수는 Table 1과 같다.

실험에 사용된 기관은 터보차저 인터쿨러가 장착된 수냉식, 4행정, 4기통 배기량 2,000cc의 커먼레일 디젤기관으로서 주요제원은 Table 2와 같고, 실험에 사용된 측정 장치의 개략도는 Table 3과 Fig. 2에 각각 나타내었다.

실험은 기관의 회전속도를 일정하게 한 후 기관 부하를 가변시키는 방법으로 수행되었고, 엔진동력계는 와전류 동력계(eddy current dynamometer ; Hwanwoong Co. Ltd, 130kW)가 사용되었다.

볼텍스 튜브의 온도 분리 특성 실험은 기관회전수 1,500rpm~3,000rpm까지 500rpm 간격으로 하고,

Table 1 Dimensions of vortex tube (unit : mm)

Items	Specifications
Tube length (L)	280
Tube inner diameter (D)	20
Nozzle diameter (d _n)	3
Cold end orifice (d _c)	12
Nozzle holes (H _n)	6
Nozzle area ratio (S _n)	0.164

Table 2 Specifications of test engine

Items	Specifications
Engine type	Water cooled 4 stroke cycle 4 cylinder engine
Total displacement	1,991cc
Bore × Stroke	83 × 92 mm
Max. power	115ps/4000rpm
Max. torque	26.5kg · m/2,000rpm
Fuel injection	Bosch CRDI
Turbocharger	Waste gated t/c

Table 3 Specifications of measurement equipment

Items	Specification
Dynamometer	Hwanwoong Co. Model DYTEK-130 Absorption torque : 343N · m Absorption power : 130kW
Fuel flow meter	AND Co. type HF-2000GD Capacity : 2100g, resolution : 0.01g
Pressure transmitter	KELLER Co. Series 21PRO Signal Output 4...20mA Pressure Range 0~4bar(0~400kPa)

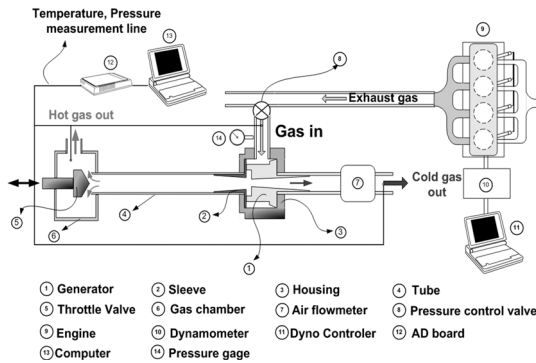


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus for application to experimental engine

기관부하는 최대토크를 기준으로 하여 25%, 50% 및 100%의 조건에서 수행되었다.

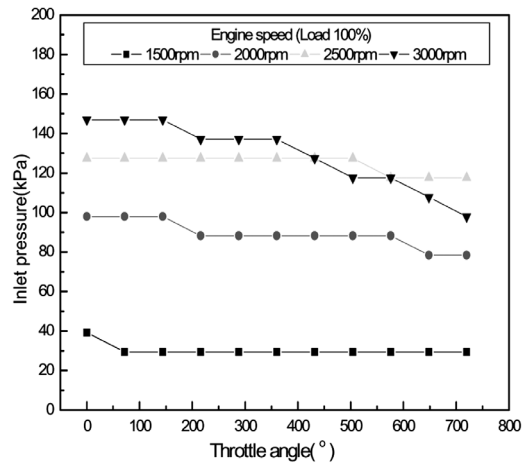
볼텍스 튜브의 온도 분리특성에 영향을 주는 저온공기 유량은 스로틀 밸브를 열림 각도로 조절하였다(72°회전시 0.2mm 씩 증가함).

볼텍스 튜브의 배기가스 온도 분리특성을 측정하기 위하여 볼텍스 튜브는 기관의 배기관에 단열 처리하여 설치하였고 스로틀 밸브 열림량을 나타식으로 그 각도를 조절하였다, 열전대와 압력게이지를 볼텍스 튜브의 입구, 온기출구 및 냉기출구에 각각 설치하고, 예비실험을 통하여 보정한 후 사용하였으며 압력은 게이지 압력을 사용하였다.

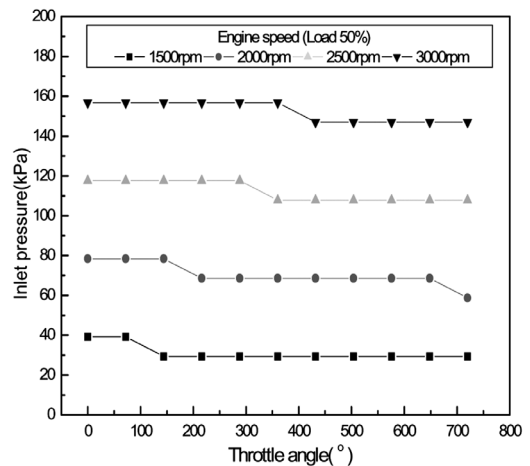
3. 결과 및 고찰

3.1 볼텍스 튜브 입구압력 특성

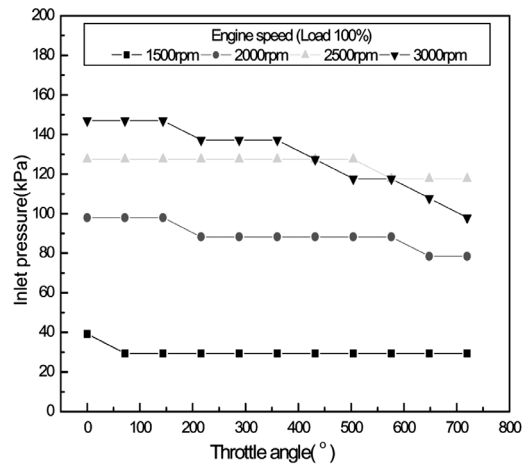
Fig. 2는 기관회전수 1,500rpm~3,000rpm 영역에서 기관부하 조건에 따른 스로틀밸브의 열림 각도별 볼텍스 튜브의 입구압력을 나타낸 것이다.



(a) Load 25%



(b) Load 50%



(c) Load 100%

Fig. 2 Vortex tube inlet pressure under engine speed and load

기관의 회전수와 부하가 증가할수록 기관의 배기 가스 배출 유량과 압력이 증가하므로 볼텍스 튜브의 입구압력이 상승하는 것을 확인할 수 있다.

그러나 스로틀 밸브의 열림 량이 증가함에 따라 볼텍스 튜브의 입구압력이 감소하는 것은 스로틀 밸브의 온출구로 부터 배출되는 배기가스량이 증가하여 볼텍스 튜브 내부 유동저항이 감소하기 때문에 볼텍스 튜브의 입구압력이 감소하는 것으로 사료된다.

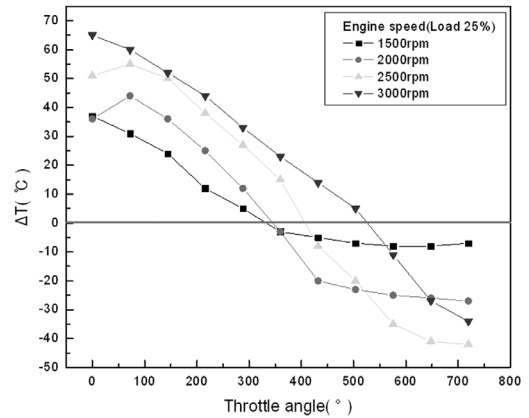
3.2 기관 운전조건에 따른 볼텍스 튜브의 온도 분리 특성

Fig. 3은 기관회전수와 부하조건에 따라 볼텍스 튜브의 냉 출구와 온 출구에서 배출되는 Hot gas 온도(T_h)와 Cold gas 온도(T_c)의 차이를 스로틀 밸브의 열림량에 따라 나타낸 것이다.

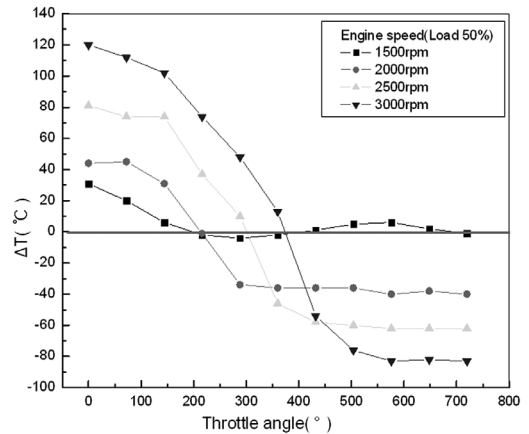
볼텍스 튜브 입구로 유입된 고온 고압의 배기 가스는 볼텍스 튜브의 내부에서 온도가 분리된 후에 냉출구와 온출구로 각각 배출 된다. 이때 스로틀 밸브의 열림 량을 조절하여 기관의 부하조건과 회전 수조건에 따라 볼텍스 튜브의 온도 분리 특성을 확인할 수 있다.

그래프의 (+)값은 냉 출구의 가스 온도가 온 출구의 가스 온도 보다 높은 경우로써 볼텍스 튜브의 온도분리 특성이 시작되지 않은 구간이며 0°C를 기준으로 (-)값의 구간에서 온도분리 특성이 시작되는 것을 확인할 수 있다.

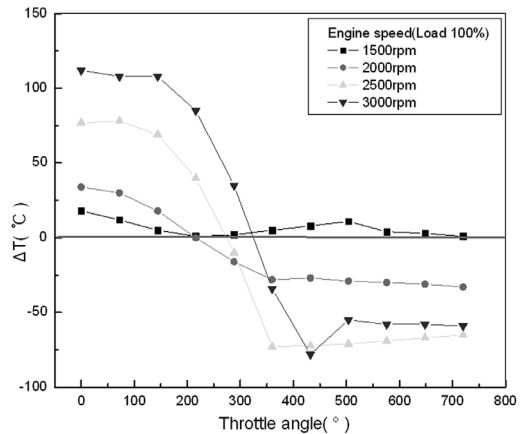
Fig. 3을 통해 기관의 부하조건과 회전수 그리고 볼텍스 튜브 스로틀밸브의 열림 량에 따라 온도분리 특성이 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 기관의 회전수와 부하조건에 따라 기관의 배기가스 배출량이 증가하거나 감소하게 되며 결국 볼텍스 튜브로 유입되는 배기가스의 압력과 유량도 변화하게 된다. 또한, 볼텍스 튜브의 스로틀밸브 열림 량에 따라 볼텍스 튜브의 질량유량비와 볼텍스 튜브 내부 유동 저항이 변화하게 되어 온도 분리특성은 엔진 운전조건에 따라 다르게 형성된다. 동일한 부하 조건인 경우 저속회전 영역보다 고속회전 영역에서 스로틀밸브 열림 각도가 작은 구간부터 볼텍스 튜브의 온도 분리 특성이 시작되는 것을 확인할 수 있다.



(a) Load 25%



(b) Load 50%



(c) Load 100%

$$\Delta T = T_c - T_h$$

$$\Delta T = 0; \text{ 냉출구와 온출구의 온도차이 없음}$$

Fig. 3 Temperature difference between hot gas and cold gas under engine speed and load

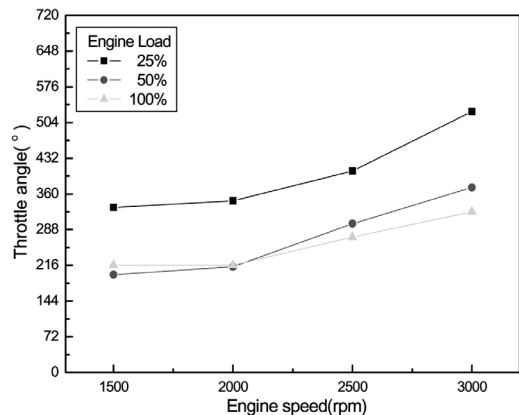
이것은 기관의 고속회전 영역에서는 볼텍스 튜브의 입구 공급압력이 증가하여 노즐로 유입되는 유량이 증가하고 노즐부를 통과하는 유속이 상승하여 볼텍스 튜브 내부의 운동량이 증가한다. 이에 따라 볼텍스 튜브의 내부로 유입된 배기가스가 볼텍스 튜브 내부에서 유동저항의 증가로 회전각속도가 상승하여 온도 분리 효과가 증가하게 되어⁶⁾ 분리 특성이 저속의 조건 보다 고속의 조건의 경우 스로틀 밸브의 열림 량이 작은 구간에서 부터 에너지 분리가 시작되는 것으로 사료된다.

부하조건이 50%까지는 기관의 부하조건이 증가할수록 스로틀 밸브의 열림 량이 작은 구간부터 에너지 분리가 시작되는 것을 확인 할 수 있었으나 부하조건 50%초과 100%까지는 볼텍스 튜브의 스로틀 밸브 열림 량에 따른 온도 분리효과가 유사하여 좀더 세분화된 부하 조건별 실험이 필요하다고 판단된다.

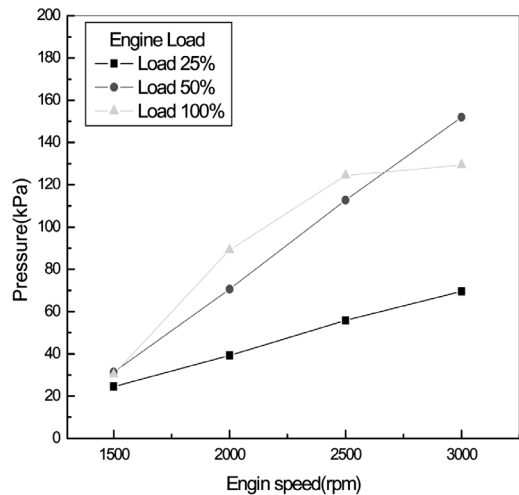
3.3 기관의 운전조건에 따른 스로틀 밸브의 열림 각도 특성

Fig. 4는 25%, 50%, 100% 기관 부하조건에서 볼텍스 튜브의 입구로 유입된 배기가스의 압력과 온도분리가 시작된 스로틀밸브의 열림 각도를 기관회전수 별로 나타낸 것이다. 기관 부하 25%의 경우 (Fig. 4(a)), 1,500rpm-300°, 2,000rpm-350°, 2,500rpm-400°, 3,000rpm-500° 부근에서, 기관 부하 50%의 경우 (Fig. 4(a))는, 1,500rpm-200°, 2,000rpm-250°, 2,500rpm-300°, 3,000rpm-400° 부근에서 온도 분리 특성이 시작되는 것을 확인할 수 있으며, 기관 부하 100%의 경우 (Fig. 4(a))에는 1,500rpm-200°, 2,000rpm-250°, 2,500rpm-300°, 3,000rpm-350° 부근에서 온도 분리 특성이 시작되는 것을 확인할 수 있다.

기관의 회전수와 부하조건에 따라 온도 분리 특성이 시작되는 스로틀 밸브의 열림 각도가 다르게 나타나는 것은 부하조건과 회전수가 변화할수록 배기관에서 배출되는 배기가스의 유량과 압력이 변화하고 이에 따라 볼텍스 튜브의 입구에 공급되는 압력과 유량이 변화하여 나타나는 현상으로 판단된다. 볼텍스 튜브의 온도 분리특성이 시작되는 구간은 엔진의 회전수와 부하조건에 따라 다르게 나타



(a) Throttle angle vs. engine speed



(b) Inlet pressure vs. engine speed

Fig. 4 Comparison of inlet pressure and throttle angle between the engine speed and load

나고 있으며 기관의 부하조건 변화에 의한 영향보다는 기관의 회전수 조건 변화에 의한 영향이 볼텍스 튜브의 온도 분리특성에 영향이 더 큰 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

승용 디젤기관의 배기관에 볼텍스 튜브 장치를 장착하고 엔진 회전수와 부하조건에 따라 온도 분리가 시작되는 볼텍스 튜브의 스로틀 밸브 열림 량을 확인하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 볼텍스 튜브 입구 압력과 유량 조건은 온도 분리

특성의 중요한 변수이며 기관의 부하와 회전수 조건의 변화에 따라 배기가스의 압력과 유량이 변화하고 이에 따라 볼텍스 튜브의 입구 공급 조건이 변화하여 온도 분리 특성이 각각 다르게 나타났다.

- 2) 동일한 입구 공급 조건의 경우 볼텍스 튜브의 스로틀밸브 열림 량의 변화에 따라 온도 분리 특성이 변화하며 기관의 회전수와 부하 조건에 따라 온도분리 특성이 시작되는 구간은 각각 다르게 나타나고 있으므로 기관의 운전 조건에 따라 스로틀밸브 열림 량을 각각 다르게 조절해야 한다.
- 3) 볼텍스 튜브의 온도 분리특성은 기관의 부하조건 변화에 의한 영향보다 기관 회전수 조건 변화에 의한 영향이 지배적임을 확인하였다.

References

- 1) G. J. Rague, United State Patent, Serial No. 646.020, December, 1932.
- 2) R. Hilsch, "The Use of Expansion of Gases in a

Centrifugal Field as Cooling Process," The Review of Scientific Instruments, Vol.18, No.2, pp.108-113, 1947.

- 3) C. D. Fulton, "Ranque's Tube," Refrig. Engineering, Vol.5, pp.473-479, 1950.
- 4) 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.
- 5) D. J. Oh, An Experimental Study on the Characteristics of a Low Pressure Vortex Tube, Chungnam National University, Ph. D. Dissertation, 2003.
- 6) S. Y. Im, D. S. Choi and J. I. Ryu, "An Experimental Study on the Performance Characteristics of the Vortex Tube for Substitution of the Intercooler in a Common-rail Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.16, No.3, pp.172-178, 2008.