

흡기관내 와류생성기가 압축착화엔진의 수분 농도 분포 및 연소성능 향상에 미치는 영향

정석훈* · 서현규†

Effect of Vortex Generator in Intake Pipe on the Moisture Concentration Distributions and Combustion Performance in a CI Engine

Seok Hoon Jeong and Hyun Kyu Suh

Key Words: Blade shape(블레이드 형상), Moisture concentration(수분 농도), Evaporated liquid mass(증발량), Turbulence intensity(난류 강도), Velocity field(속도장)

Abstract

In this work, optimization of blade shape for the improvement of mixture formation and vortex of intake port was performed by numerically, and the combustion performance of CI engine with optimized blade shape was investigated. To achieve this, 3 types of blade shape were studied under the different air flow mass conditions and the numerical results were investigated in terms of humidification water, moisture concentration, and velocity distributions. Evaporated liquid mass was also compared under various test conditions to reveal the turbulent intensity in an intake port. It was observed that the optimized blade shape can improve the humidification water, moisture concentration, and velocity distributions of intake port inside. The evaporated liquid mass was also increased under the conditions with blade. Especially, low NOx emissions was observed with optimized blade condition.

1. 서 론

최근 유로-6 규제를 포함한 내연기관의 강화되는 배기 배출물 규제에 따라서 저공해 고효율, 고효율 엔진 개발을 위한 많은 노력과 연구가 전 세계적으로 계속되고 있다^(1,2). 특히, 열효율이 높은 디젤 직분사(DI) 엔진의 배출물 저감을 위해 전·후처리 과정의 최적화연구가 활발히 진행되고 있다^(3,4,5).

전처리과정 중에서 터보 차저, 슈퍼 차저 이외에도 연

소실 내의 유입공기의 유로형상변경을 통하여 Swirl 유동의 방향성을 강화하고, 같은 체적에서 Stroke의 길이를 증가시켜 흡입공기의 Tumble 강화가 연료와 공기의 혼합기에 미치는 영향에 대한 연구 또한 활발히 진행되고 있다^(6,7).

대부분의 연소실 내부 유동에 관한 연구는 흡기 밸브를 포함하고 있는 실린더 헤드와 흡기관 형상 설계를 변경하는 연구^(8,9)가 대부분이다. 그러나, 실린더 헤드는 엔진의 크기와 종류마다 다르며 흡기관 형상도 차종마다 다르기 때문에 흡기의 유로 형상을 변형하여 실린더 내부의 유동 특성을 변형하는 것은 많은 연구시간과 비용이 발생한다. 또한, 재설계가 필요하여 생산원가와 기초 연구 비용이 높아지는 문제가 있다.

직분사 엔진의 실린더 내부로 유입되는 흡입공기의 회전성을 강화하였을 때, 연료의 미립화 증진과 연소체

(Received: 11 Sep 2018, Received in revised form: 3 Dec 2018, Accepted: 11 Dec 2018)

*국립공주대학교 기계공학과 대학원

†서현규, 회원, 국립공주대학교 기계자동차공학부

E-mail : hksuh@kongju.ac.kr

TEL : (041)521-9264 FAX : (041)555-9123

적이 증가하여 연소성능이 향상된다는 연구가 있지만^(10,11) 이러한 연구의 대부분은 흡기포트, 흡기밸브의 형상을 변경하는 연구였다. 이러한 이유로 기존의 엔진 형상을 유지하면서 흡입공기의 회전성을 강화하는 연구가 필요하다.

본 연구에서는 블레이드 형상에 따른 와류생성과 이에 따른 난류강도를 수치 해석적으로 확인하여 최적화 설계를 수행하였다. 또한, 최적화된 블레이드형상의 와류생성기를 디젤 직분사 엔진의 흡기관에 설치하여 연소에 미치는 영향을 파악하는 것을 목표로 하였다.

2. 수치해석 조건 및 실험 방법

2.1 수치해석 대상

수치해석에 사용된 흡기관의 직경은 48 mm로 설정하였고, 흡기관 형상에 130°의 경사를 주어 총 240 mm 가로 길이의 흡기관을 설계하였다.

흡기관내의 와류생성을 위해 블레이드의 형상을 변경하여 흡기관 단면의 와류 강도와 속도장(Velocity field) 및 수분 농도(Moisture Concentration) 분포를 수치해석을 통하여 비교하였다. 또한, 물의 증발량(Evaporated liquid mass)을 이용하여 흡기관내의 와류생성에 의한 혼합강도를 비교하였다.

본 연구에 적용된 흡기관의 형상은 Fig. 1과 같다. 흡기 유동 연구시 블레이드에 의한 퇴적물 생성 혹은 내구성 문제를 고려하여 블레이드 설치 위치를 흡기관 입구로부터 50 mm 부분인 흡기 필터 뒤에 설치하였다.

블레이드는 Fig. 2와 같이 3가지 형상을 가지고 있다. Case 1(Non-blade)은 블레이드가 없는 조건이며, Case 2(Blade type1)는 유입공기의 회전성만 주는 조건으로 블레이드에서 기본이 되는 형상이다. Case 3(Blade type2)는 난류강도를 강화하기 위해 보조 날개형상을 추가하여 설계하였다. Case 4(Blade type3)는 Case 2의 형

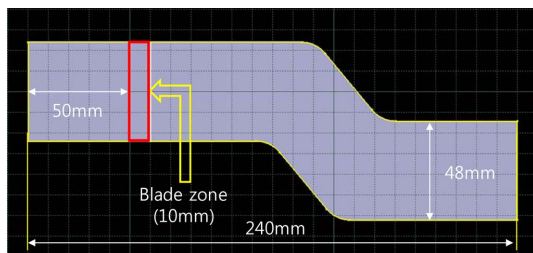
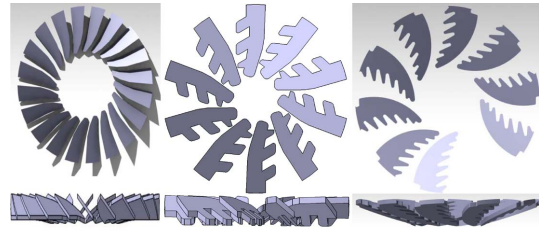


Fig. 1 Schematics of intake pipe geometry



(a) Blade type1 (b) Blade type2 (c) Blade type3
Fig. 2 Schematics of blade shape

상에서 날개의 앞에 곡면을 주어 중앙 부분의 유동 흐름을 원활하게 하고, 역류를 감소하게 하는 것을 목표로 설계하였다.

2.2 수치해석 조건

수치해석을 위한 난류모델은 K-zate-f를 사용하였다. 해석에 사용된 난류 모델의 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot \left[-\rho I + \mu(\nabla u) + (\nabla u)^T - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)I \right] + F$$

$$\rho(u \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \epsilon$$

$$\rho(u \cdot \nabla)\epsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{e1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{e2} \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \epsilon = e_p$$

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, P_k = \mu_T \left[\nabla : (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}(\nabla \cdot u)^2 \right] - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot u$$

상기 모델을 사용한 연구 결과의 신뢰성 검증은 실험 결과와 비교를 통해 수행하였다.⁽¹²⁾

흡기관내의 온도 조건은 동일하게 상온(20°C)으로 설정하였다. 또한, 블레이드에 의한 와류생성을 비교하기 위해 블레이드의 설치 후단 10 mm에서 1 mg의 물을 분무하였다. 유입공기의 유량은 실험에 사용된 500 cc

Table 1. Numerical analysis conditions

Item	Specifications
Turbulence equation	K-zate-f
Water injection mass (mg)	1
Intake air temperature (K)	293.15
Air intake mass flow rate (g/s)	4.3 (800 rpm), 7.5 (1400 rpm), 10.8 (2000 rpm), 14.0 (2600 rpm)

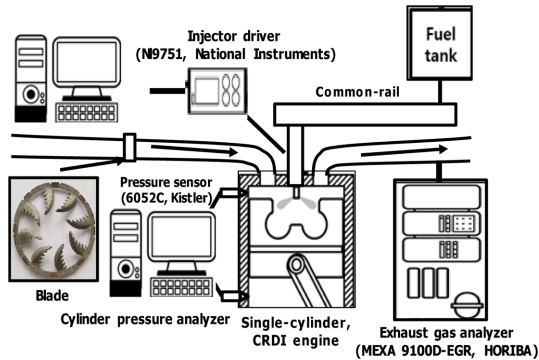


Fig. 3 Schematics of test engine

Table 2. Specifications of diesel engine

Item	Specifications	
Engine type	Single cylinder, CRDI	
Bore / Stroke	83 mm / 92 mm	
Displacement	498cc	
Compression Ratio	17.7	
Fuel injection system	Common-rail	
Valve type	DOHC 4 valves	
Injector	Nozzle	5 hole mini-sac type
	Hole diameter	0.168 mm
	Injection angle	154°

단기통 엔진을 기준으로 800 rpm에서 2,400 rpm까지의 흡기 유량을 참고하여 선정하였다. 수치해석에 사용된 해석조건은 Table 1에 나타내었다.

2.3 엔진 실험 방법

블레이드에 의한 유입 공기 난류형성이 디젤 엔진의 연소에 미치는 영향을 알아보기 위해 블레이드를 단기통 직분사 디젤엔진의 흡기관에 설치하여 블레이드의 유·무에 따라서 실험 결과를 비교하였다. 실험에 사용된 단기통 디젤엔진의 개략도를 Fig. 3에 나타내었으며, 자세한 제원은 Table 2와 같다.

3. 수치해석 결과

3.1 흡기관내 유동 분포 특성 비교

블레이드 형상에 따른 와류 생성의 영향을 파악하기

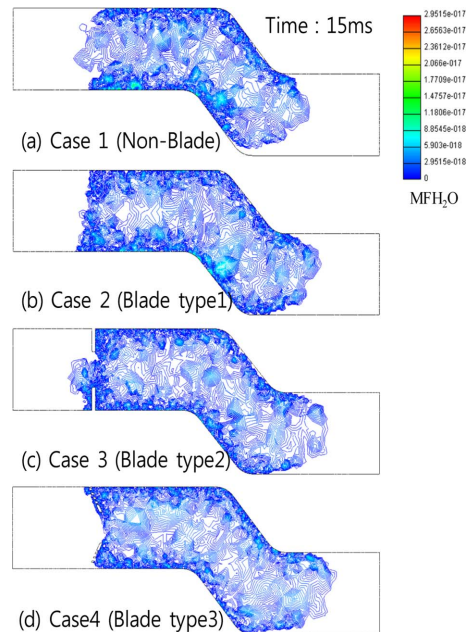


Fig. 4 Effect of blade shape on the humidification water distributions (inlet flow rate = 7.5 g/s)

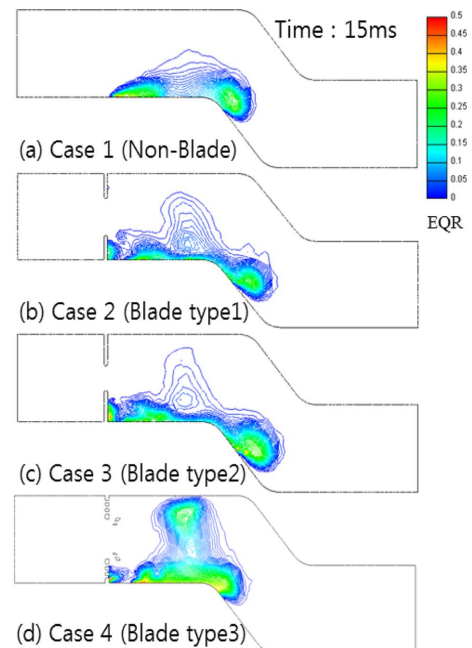


Fig. 5 Effect of blade shape on the moisture concentration distributions (inlet flow rate = 7.5 g/s)

위해 분사된 물의 분포와 증발량을 비교하였다. 같은 흡기 유량에서 블레이드 형상에 따라 흡기관에 분사된 물

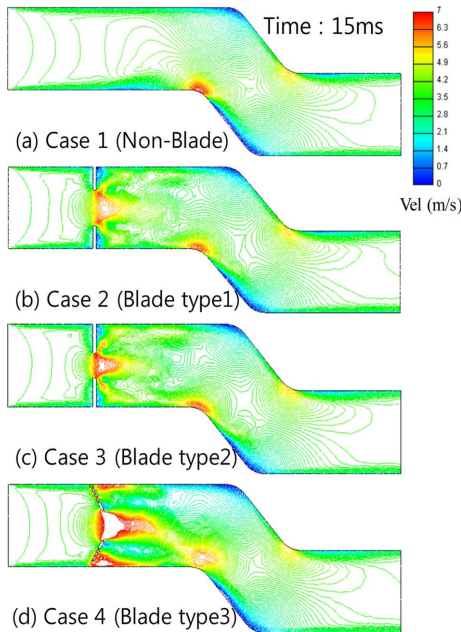


Fig. 6 Effect of blade shape on the velocity distributions (inlet flow rate = 7.5 g/s)

의 분포 특성을 Fig. 4에 나타내었다.

실제 물의 증발량은 온도 변화가 없는 유동에서 물이 받은 난류에너지이므로 난류에너지와 물의 증발량은 비례한다고 판단되어 블레이드의 후단 10 mm 부분에 물을 분사하여 난류에너지를 예측하였다. 비교 결과, 블레이드를 설치하지 않은 Case 1에 비해 블레이드가 설치된 Case들에서 동일한 시간에 물-공기 혼합기의 도달거리가 더 먼 것을 확인하였다. 또한, Case 2와 Case 3에서 역류가 발생하였지만 Case 4에서는 역류가 발생하지 않았다. 이는, Case 4의 곡면과 보조 날개의 영향으로 유동 흐름의 회전성이 강화되기 때문으로 판단된다.

블레이드 형상에 따른 흡기관내의 수분 농도 분포도와 속도분포도를 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 나타내었다.

물의 수분 농도 분포는 블레이드가 없는 Case 1에서 분사된 방향인 파이프의 아래에 몰려 후단으로 전파되는 현상을 관찰할 수 있었다. 반면에, 블레이드가 설치된 Case 2와 Case 3에서는 블레이드가 난류를 생성하면서 관의 중앙부의 수분 농도가 높아지는 것을 관찰할 수 있었다. Case 4에서는 블레이드가 유입공기의 회전성을 강화시켜 관의 윗부분까지 분사된 물이 혼합되어

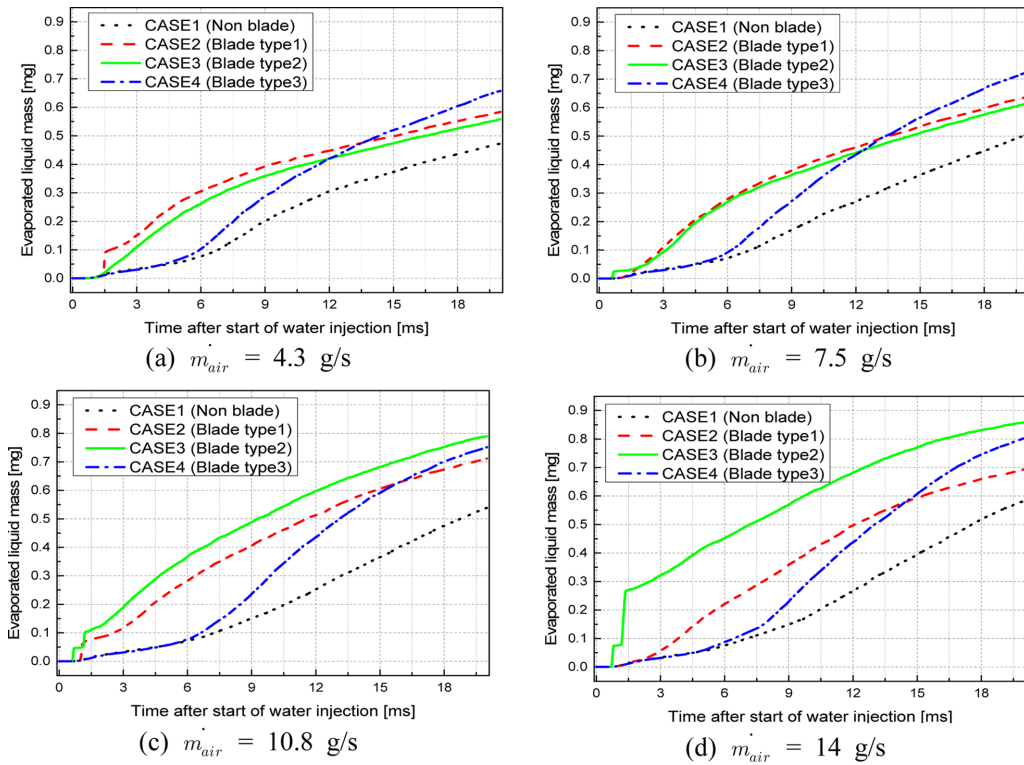


Fig. 7 Effect of inlet flow rate on the evaporated liquid mass

수분 농도가 높아졌다고 판단된다.

블레이드 유무에 따른 관내 유동 물질의 전체 속도분포도를 비교한 결과, 블레이드가 설치된 조건에서 블레이드가 노즐과 같은 작용을 하여 흡기관내의 중앙부분의 속도는 증가하는 것을 확인하였다. 특히, 노즐의 형상과 가장 가까운 Case 4의 경우는 관의 중앙부의 속도 분포가 다른 Case에 비하여 상대적으로 빠른 것을 확인하였다. 이러한 결과는 Fig. 5의 수분 농도 분포도와 유사한 결과이다.

3.2 흡기관내 난류강도 비교 결과

기존 대부분의 수치해석 결과는 단면의 결과값을 비교하여 전체의 결과로 설명하는 경우가 많았다. 그러나, 단면결과는 경향을 나타낼 수는 있으나 전체의 결과를 정확하게 나타낸다고 보기 힘들다. 따라서, 본 연구에서는 난류에너지가 증가할수록 물에 전달되는 운동에너지와 미립화에 의한 증발량이 증가한다고 판단하여 해석 체적 안에서 물의 증발량을 Fig. 7과 같이 비교하였다. Fig. 7에서와 같이 Case 1과 Case 4의 경우, 물분사 후 6 ms 부근에서 증발량이 급격하게 증가했다. 이는, Fig. 4에서와 같이 블레이드의 보조날개와 곡면이 유동 흐름의 역류를 억제하고, 흐름의 회전 방향성을 증가시켜서 공기의 유동을 원활하게 만들어 분무 후단에서 물의 증발이 활발하게 발생한다고 판단된다. 반면에, Case 2와 Case 3에서 물분사 초기에 난류에 의한 증발량이 급증하는 현상을 관찰할 수 있었다. 이는, Fig. 4에서 보인 것과 같이 유동흐름의 역류로 인하여 블레이드와 물의 충돌에 의한 증발량 증가로 판단된다. 이와 같은, 역류에 의한 증발은 유동 전체에 악영향을 미치므로 결과에서 배제하는 것이 옳다고 사료된다.

4. 엔진 실험 결과

수치해석의 결과를 참고하여 가장 적합하다고 판단된 Case 4(blade type3)를 기반으로 엔진 성능 실험을 진행하였다.

블레이드 유·무에 따른 실린더 최고 압력과 열 방출율의 비교 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 블레이드 설치시 흡입 공기에 회전성 증가, 연료의 미립화 증진과 더불어 흡기관 중심부에서 수분의 농도와 속도가 증가하여, 실린더 안으로 빠르게 유입된다. 그 결과, 실린더 내에 수분이 분포하는 시간이 증가하고, 온도를 낮추는 효과를

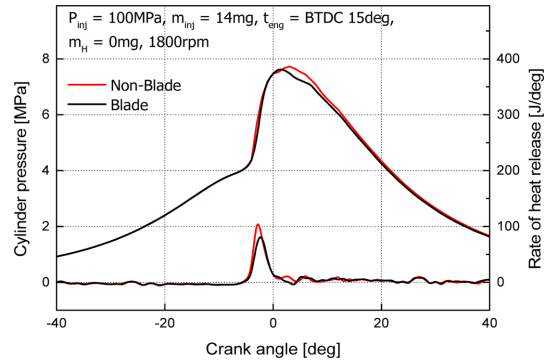


Fig. 8 Effect of blade on the cylinder pressure and ROHR

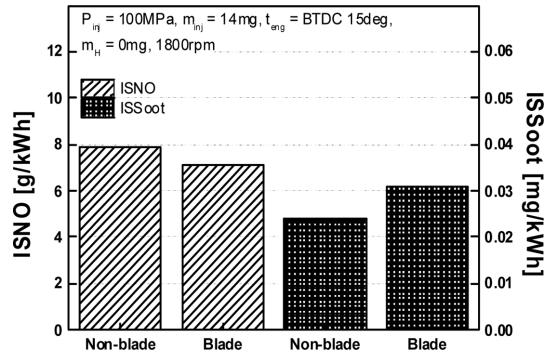


Fig. 9 Effect of blade on the ISNO and ISSoot generation

보인 것으로 판단된다. 따라서, 최고 연소 압력과 열방출율이 다소 감소하는 경향을 보인다고 판단된다.

블레이드 유무에 따른 ISNO와 ISSoot의 배출 결과를 Fig. 9에 그래프로 나타내었다. 배기 배출물 경향에서도 열방출율이 높은 블레이드가 없는 조건에서 ISNO가 증가하여 배출되는 경향을 보였다. ISSoot의 경우, 블레이드가 없는 조건에서 연소 최고 온도가 높기 때문에 Soot이 더 적게 배출되는 것으로 나타났으나, 높은 연소온도로 인해 실험 결과와 같이 Soot의 생성량 자체가 매우 적은 것을 확인 가능하였다.

4. 결 론

본 연구는 수치해석과 실험연구를 이용하여 블레이드가 난류강도와 엔진 연소에 미치는 영향을 고찰하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 흡기관내의 Case 4의 블레이드 형상이 유동의 역류를 억제하는 효과를 보였다. 이는 돌출부와 면의 곡선

이 유동을 사전 방향으로 흐르도록 유도하면서 역류는 감소하고, 와류는 증가 했다고 판단된다.

2. 블레이드 유무에 따른 관내 속도분포도를 비교한 결과, 블레이드가 설치된 조건에서 블레이드가 노즐과 같은 작용을 하여 흡기관내의 중앙부분의 속도는 증가 하는 것을 확인하였다. 특히, 노즐의 형상과 가장 가까운 Case 4의 경우는 관의 중앙부의 속도분포가 다른 Case에 비하여 상대적으로 빠른 것을 확인하였다.

3. 블레이드 설치시 흡입 공기에 회전성 증가, 연료의 미립화 증진과 더불어 흡기관 중심부에서 수분의 농도와 속도가 증가하여, 실린더 안으로 빠르게 유입된다. 그 결과, 실린더 내에 수분이 분포하는 시간이 증가하고, 온도를 낮추는 효과를 보인 것으로 판단된다. 따라서, 최고 연소 압력과 열방출을 값이 다소 감소하는 경향을 보인다고 판단된다.

4. 배기 배출물 경향에서도 열방출율이 높은 블레이드가 없는 조건에서 ISNO가 증가하여 배출되는 경향을 보였다. ISSoot의 경우, 블레이드가 없는 조건에서 연소 최고 온도가 높기 때문에 Soot이 더 적게 배출되는 것으로 나타났으나, 생성량 자체가 매우 적은 것을 확인 가능하였다.

후 기

이 논문은 2017년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구 재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입 (NRF-2017R1D1A3B03032337).

참고문헌

- (1) C. S. Bae, Y. J. Jung, "Fuel Economy Improvement of Automotive Engines", Auto Journal of KSAE, Vol. 34, No. 1, 2012, pp. 39~45.
- (2) S. S. Moon, "Engine Research Trend in Japan : Challenges to Achieve 50% Engine Thermal Efficiency", Auto Journal of KSAE, Vol. 36, No. 7, 2014, pp. 14~18.
- (3) G. S. Cha, C. H. Oh, "Impact of oxygen content on particulates emission in Gasoline Direct Injection Engine",

KSAE Annual Conference Proceedings, 2012, pp. 460~464.

- (4) T. M. Kim, S. K. Park, H. C. Oh, H. W. Lee, M. S. Sohn, K. H. Lee, "Characteristics of Pre - Ignition on Different Lubricant and Fuel in Turbo-charged Direct Injection Spark Ignition Engines", KSAE Annual Conference Proceedings, 2016, pp. 38~38.
- (5) D. K. Kang, "Development of Automotive Technologies in Europe", Auto Journal of KSAE, Vol. 35, No. 6, 2013, pp. 60~65.
- (6) S. J. Choi, C. H. Jeon, Y. J. Jang, "Lean Combustion Characteristics in a S. I Engine with SCV by Operating Conditions," Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol. 24, No. 2, 2000, pp. 161~168.
- (7) G. S. Jeong, C. H. Jeon, Y. J. Jang, "A Study of the Combustion Characteristics Using a 2-valve SI Optically Accessible Engine with SCV," Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol. 25, No. 12, 2001, pp. 1692~1701.
- (8) J. W. Chung, K. H. Lee, C. S. Lee, "A Study on the Effects of Swirl Flow Generated by SCV on the Combustion Characteristics of the D.I. Diesel Engine", KSAE Annual Conference Proceedings, Vol. 10, No. 2, 2002, pp. 31~39.
- (9) D. R. Rhim, S. K. Lee, M. J. Kim, J. W. Chung, W. Kang, "Swirl Flow Characteristics in a Diesel Engine with Intake Port Design", Proceedings of the KFMA Annual Meeting, 2007, pp. 313~318.
- (10) M. Baratta, D. Misul, E. Spessa, L. Viglione, G. Carpegna, F. Perna, "Experimental and numerical approaches for the quantification of tumble intensity in high-performance SI engines", Energy Conversion and Management, 2017, pp. 435~451.
- (11) K. H. Lee., Y. T. Han., H. Y. Jeong., Y. C. Leem., "A Study on the Effects of Intake Port Geometry on In-Cylinder Swirl Flow Field in a Small D.I. Diesel Engine", KSAE Annual Conference Proceedings, Vol. 12, No. 6, 2004, pp. 38~45.
- (12) S.H. Min, H. K. Suh, "Effect of operating conditions on the combustion and emission characteristics in small HSDI CI engine", Korean Soc. Mech. Technol, Vol. 17, No. 4, 2015, pp. 699~706.