

알루미늄 합금 피스톤과 스틸 단조 피스톤의 내구성능에 관한 실험적 연구

김 현 철^{*1)} · 이 종 인¹⁾ · 박 종 호²⁾

자동차부품연구원 첨단동력IT종합연구센터¹⁾ · 충남대학교²⁾

An Experimental Study on Durability Performance of Aluminum Alloy Piston and Steel Forging Piston

Hyunchul Kim^{*1)} · Jongin Lee¹⁾ · Jongho Park²⁾

¹⁾Advanced Power&IT Research Center of Korea Automotive Technology Institute, 74 Yongjung-Ri, Pungse-Myun, Chonan 330-912, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Chungnam University, Daejeon 305-764, Korea

(Received 6 July 2004 / Accepted 27 August 2004)

Abstract : The goal of this research is to confirm reliable durability and evaluate the engine performance of the current aluminum alloy piston and the newly developed steel forging piston. For such purpose, the test environment was built with 2.9l target engine mounted on the engine dynamometer and additional exhaust gas analysis system. Using the test environment, engine performance test was conducted, and durability test was also conducted using a dedicated piston durability test equipment for 400,000 km. As a result of the experiment, similar durability was appeared for both aluminum piston and steel piston, and the engine output power and torque are slightly reduced because of 158% heavier weight of the steel piston compare to the aluminum alloy piston.

Key words : Diesel engine(디젤기관), Direct injection(직접분사), Aluminum alloy piston(알루미늄 합금 피스톤), Steel forging piston(스틸 단조 피스톤), Durability performance test(내구 성능시험), Exhaust gas(배출가스)

1. 서 론

디젤엔진에서 배출되는 NOx와 PM을 저감하며 연비를 향상시키기 위해서는 연소압력을 상승시켜 효과적인 연소가 이루어지도록 하여야 한다. 그러나 기존의 알루미늄 합금 피스톤으로는 고성능, 고효출력을 요구하는 디젤엔진에 효과적으로 대응할 수 없으므로 스틸 단조 피스톤을 개발하여 적용시키고 있다. 디젤엔진용 스틸 단조 피스톤은 대형 상용차량에서부터 중·소형 차량에까지 모두 적용시킬 수 있을 뿐만 아니라 2사이클 엔진과 선박용 디젤엔진

에도 적용이 가능한 전략 상품이다. 1990년대 초반 Z. Dursunkaya¹⁻³⁾ 등에 의하여 분절형(articulated) 스틸 단조 피스톤의 시뮬레이션 및 연소실, 냉각갤러리 최적화가 연구된 이후 Peter Kemnitz⁴⁾ 등이 고부하 디젤엔진에 적합한 일체형(mono) 스틸 단조 피스톤의 최적설계에 관한 연구를 수행하여 급속한 발전을 이루었다. 이러한 기술을 상용화한 미국의 FM(Federal Mogul), 독일의 MAHLE사는 세계 시장의 대부분을 차지하고 있다. FM, MAHLE에서는 디젤엔진의 유동 및 연소해석, 피스톤의 열응력 해석, 동역학 해석을 비롯한 각종 시뮬레이션을 통해 구축한 설계데이터를 이용하여 연소실의 최적설계를 도모하고, 소재개발을 통하여 경량화를 달성하여

*To whom correspondence should be addressed.
hckim@katech.re.kr

가격 및 내구성 측면에서 실용 가능한 스틸 단조 피스톤을 개발한 후 생산하고 있으나, 높은 가격을 형성하고 있어 국내에서 개발 완료 시 시장규모가 매우 크다. 본 연구는 이러한 상황을 배경으로 하여 연소실 최적화를 통하여 제작된 스틸 단조 피스톤 시제품을 대상으로 알루미늄 합금 피스톤과의 엔진 성능 비교 시험 및 피스톤 전용시험기를 통한 400,000km 내구시험을 수행하여, 개발된 스틸 단조 피스톤의 내구 신뢰성을 검증하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 대상 엔진의 제원

본 연구에서 적용한 대상 엔진은 터보차저와 인터쿨러가 장착된 기계식 직접분사방식의 2.9L디젤 엔진으로 주요제원은 Table 1과 같다.

Table 1 Specifications of diesel engine

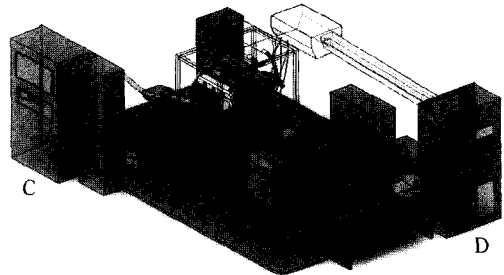
항목	제원
종류	디젤, 4 사이클
실린더 수 및 배열	직렬 4, 횡치
연소실 형식	Re-Entrant
변속 방식	MT
연료분사 방식	기계식 DI
총 배기량(cc)	2902
실린더 내경×행정(mm)	97.1×98
압축비	19.3
압축 압력(Kg/cm ² -rpm)	30/200
최고 출력(Ps/rpm)	135/3800
최대 토크(Kg · m/rpm)	31.5/2000
최고 속도(Km/h)	175
정속주행 연비(Km/ℓ)	20.8

2.2 실험장치

알루미늄 합금 피스톤과 스틸 단조 피스톤의 성능 및 배출가스 비교실험에 사용한 실험장치는 Fig. 1과 같으며, 주요제원은 Table 2와 같다. 실험장치는 크게 나누어 엔진동력계와 배출가스 분석계로 구성된다. 엔진동력계는 EC 타입의 동력계(AVL B-220 EC/160kW급)와 동력계 제어장치(Puma 5.3), 연료온도 제어 및 연료소비율 측정 장치(AVL733S), 냉각수 온도 제어장치(AVL553), 흡입공기 유량계, 매연 측정기 등으로 구성되어 있다.

Table 2 Specification of experimental equipment

측정 장치 및 설비	제원	
엔진 동력계	모 델 명	B-220(EC Type)
	제 조 원	AVL(오스트리아)
	회전력(흡수)	509N · m (3,00010,000rpm)
	회전수(흡수)	10,000rpm MAX
	동 력(흡수)	160KW (3,00010,000rpm)
배출가스 분석계	모 델 명	MEXA-9100D EGR
	제 조 원	Horiba(일본)
	분 석 가 스	CO, CO ₂ , THC, NO _x



A : Engine B : Dynamometer
C : Exhaust Analyzer D : Dynamometer Control Desk
E : Intercooler F : Fuel Consumption Meter
G : Water Controller H : Smoke Meter I : Muffler

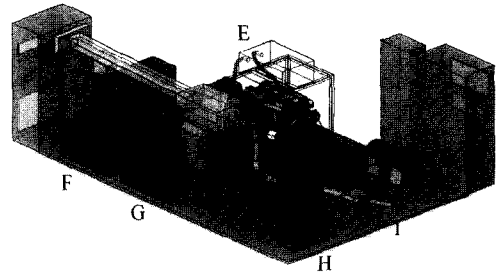


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

배출가스 분석계는 엔진의 배출가스 중에서 CO, THC, CO₂, NO_x를 배기관에서 직접 Sampling 하여 분석할 수 있는 장비로서 CO 및 CO₂는 비분산 적외선 분석법(NDIR: Nondispersive Infrared), THC는 가열식 불꽃 이온화검출기법(HFID: Heated Framed Ionization Detector)과 NO_x는 화학 발광법(CLD: Chemiluminescence Detector)을 이용하여 측정한다.

2.3 실험방법

알루미늄 합금 피스톤과 스틸 단조 피스톤의 출

력 및 배출가스 측정은 자동차 기관출력 실험방법 (KS R 0071)에 의하여 실험하였다. 실험에 앞서 권장된 엔진 길들이기 운전을 실시하였고, 연료분사 펌프를 정해진 전체 부하상태로 설정하여 Table 3과 같이 엔진회전수를 1,000rpm 에서부터 3,800rpm 까지 500rpm 씩 단계적으로 상승시키며 안정화된 상태에서 각각의 회전수당 출력 및 배출가스를 측정 한 후 기록하였다. 인터쿨러의 냉각효율을 알루미늄 합금 피스톤과 스틸 단조 피스톤 실험에 동일하게 맞추기 위해 인터쿨러를 제작하여 설치하였다. 터보차저에서 압축된 고온의 공기를 실차와 같은 냉각효율을 낼 수 있도록 하였고, 냉각액이 라디에이터 면에 전체적으로 퍼질 수 있도록 냉각액 입구와 라디에이터 사이에 방사형 철판을 놓았다. 인터쿨러 입구와 출구 쪽에는 각각 압력센서와 온도센서를 장착하였다. 한편, 스틸 단조 피스톤은 크라운과 핀 보스(pin boss)부로 형성된 상부와 알루미늄 스커트로 이루어진 하부로 구성된 분절형 피스톤이므로 교체작업 시 주의가 필요하다. 피스톤 교체작업 시에는 연소실을 형성하고 있는 엔진블록과 엔진헤드가 분리되기 때문에 연소실 체적변형에 유의하며 규정 토크에 의하여 조립하였다. 알루미늄 합금 피스톤으로 출력 및 배출가스를 측정하고 동일한 조건하에 스틸 단조 피스톤으로 바꾸어 같은 방법으로 성능시험을 하였다. 엔진 성능시험 후 알루미늄 합금 피스톤 및 스틸 단조 피스톤 내구시험기로 주행거리 400,000km를 내구시험하고 피스톤의 핀 홀(pin hall) 수직 진원도를 접촉식 3차원측정기로 측정하여 각각의 변형율을 비교 하였다.

Table 3 Exp. condition of engine performance test

NO	Engine Speed (rpm)	Throttle (%)	Driving Time (min)
1	1000	100	5
2	1500	100	5
3	2000	100	5
4	2500	100	5
5	3000	100	5
6	3500	100	5
7	3800	100	5

3. 실험결과 및 고찰

3.1 엔진 성능시험

Fig. 2 ~ Fig. 5까지 알루미늄 합금과 스틸 단조 피스톤에 대한 엔진 성능시험⁵⁾ 결과를 정리하여 나타 내었다. 알루미늄 합금 대비 스틸 단조 피스톤의 엔진 성능시험 결과 출력, 토크, BSFC 등이 비슷한 경향으로 나타났다. 또한, 오일 온도와 냉각액 온도, 배출가스 온도 모두 알루미늄 합금과 스틸 단조 피스톤이 거의 일치하는 경향으로 나타났다. Fig. 2의 알루미늄 합금 및 스틸 단조 피스톤을 장착한 2.9L 디젤엔진의 토크와 Fig. 3의 출력을 살펴보면 디젤 차량의 주 운전구간(2,000rpm~2,500rpm)과 최대 출력 운전구간(3,500rpm~3,800rpm)에서 토크와 출력이 조금씩 떨어지는데 이것은 같은 구간에서의 배압이 약간 높고, Fig. 4와 같이 단위 마력당 연료소모율이 조금 높은 것으로 보아 알루미늄 합금 피스톤 (760g)과 스틸 단조 피스톤(1,200g)의 중량차로 인한 결과로 추정된다. 대상엔진의 오일제트에서 실린더 내부로 토출되는 오일펌프의 토출량은 정격 출력시 60 l/min으로 알루미늄에 비하여 열전도율이 낮은 스틸 단조 피스톤의 오일에 의한 냉각 효율이 떨어질 것으로 예상했지만 실험결과에서는 알루미늄 합금 피스톤과의 차이는 작은 것으로 나타났다.

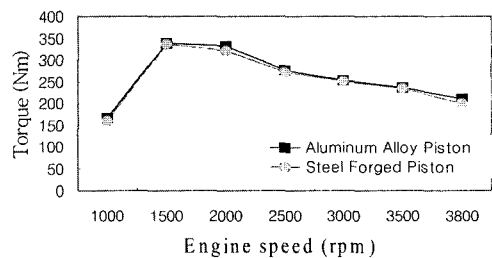


Fig. 2 Variation of torque versus engine speed

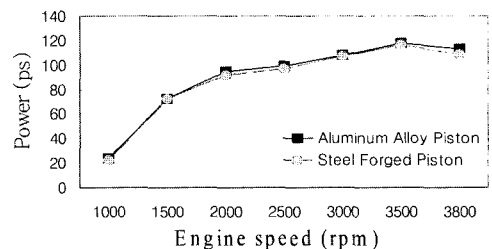


Fig. 3 Variation of power versus engine speed

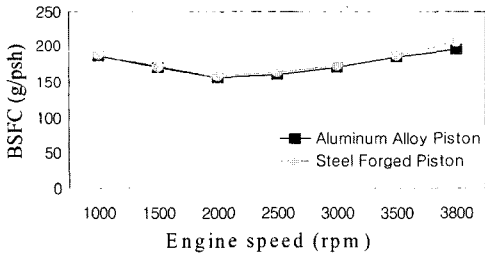


Fig. 4 Variation of BSFC versus engine speed

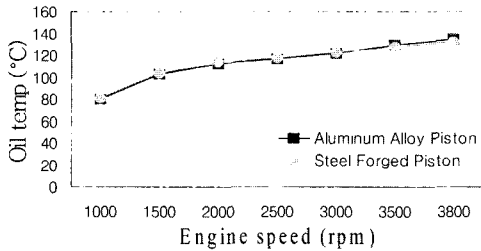


Fig. 5 Variation of oil temperature versus engine speed

3.2 배출가스 측정

배출가스⁶⁾ 측정시 알루미늄 합금 피스톤과 스틸 단조 피스톤은 전 구간에서 비슷한 경향으로 검출되었다. 2,000rpm~2,500rpm 구간인 주 운전영역에서 배출가스가 가장 적게 검출되는 일반적인 경향을 보이고 있었으며, EGR의 작동상태도 양호하였다. Fig. 6의 THC는 측정단위 100ppm에서 볼 때 그래프상의 편차는 미세한 것으로 수치적인 변화는 거의 없다고 볼 수 있다. Fig. 7의 CO와 Fig. 8의 CO₂ 그리고 Fig. 9의 smoke 모두 주 운전영역 구간에서 배출량이 현저히 감소하는 것을 볼 수 있다. Fig. 10에서 나타난 NO_x의 경우도 주 운전영역 2,000rpm에서부터 급격히 감소되는데 이것은 EGR이 작동하면서 나타나는 현상으로 판단된다.

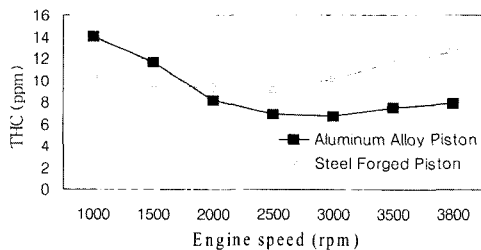


Fig. 6 Variation of THC versus engine speed

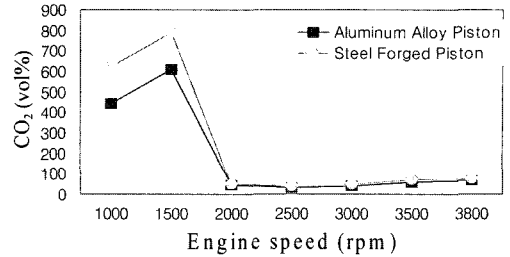


Fig. 7 Variation of CO versus engine speed

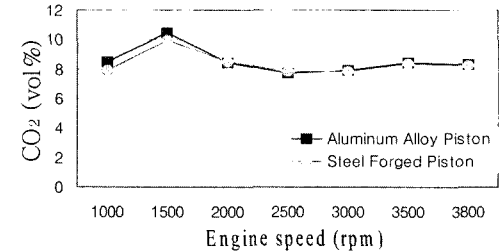


Fig. 8 Variation of CO₂ versus engine speed

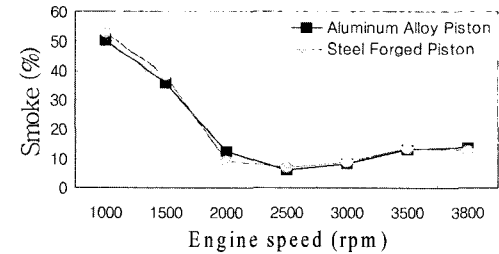


Fig. 9 Variation of smoke versus engine speed

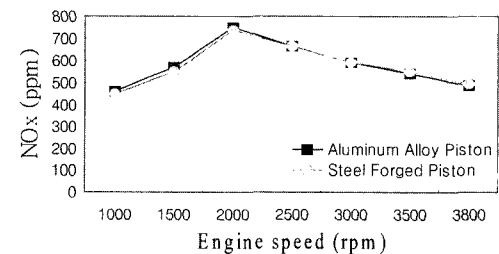


Fig. 10 Variation of NO_x versus engine speed

3.3 내구 성능시험

피스톤 내구시험기는 servo controller, 오실로스코프, 컴퓨터, 오일탱크, 모터, 피스톤 펌프, 오일필터, accumulator 등으로 구성되어 있으며, 132kW 380V의 동력을 이용하여 2000L 용량의 탱크 내부 오일을 최대 320bar까지 가압한 후 최대 회전수 48,000rpm으로 피스톤 하우스 내부에 주입시키는

피스톤 전용 내구시험기이다. 이 피스톤 내구시험기는 소형 가솔린 엔진에서부터 대형 상용차량용 디젤 엔진 뿐만 아니라 선박용 디젤 엔진의 피스톤까지 내구시험을 수행할 수 있는 장치이다.

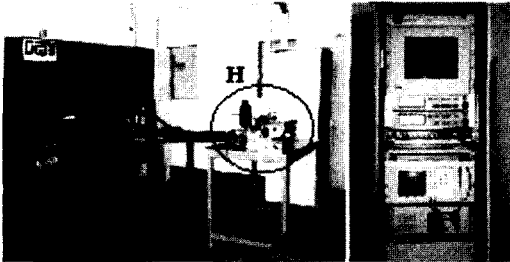


Fig. 11 Durability test machine for piston

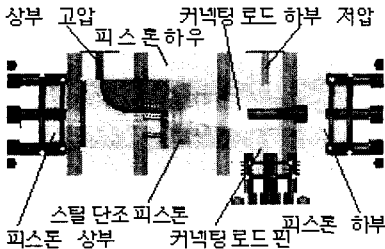


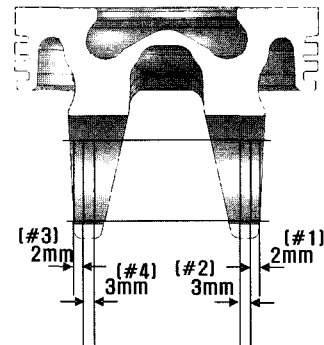
Fig. 12 Housing for piston durability test

Fig. 11에 피스톤 내구시험기의 모습을 나타내었다. Fig. 11중에서 오른쪽은 피스톤 내구시험기를 제어하는 컨트롤러이다. 타원형 "H"로 표시한 것은 엔진의 단기통 실린더에 해당하는 피스톤 내구시험기 하우징으로 Fig. 12에서 보는 바와 같이 구성되어 있으며, 이곳에 분절형 스틸 단조 피스톤이 장착되고 대상차량의 엔진제원에 의하여 가혹조건인 1.5배를 적용함으로써 피스톤의 내구시험을 수행한다. 일반적으로 피스톤의 내구신뢰성 시험은 주행거리 100,000km를 수행하여 하우징을 분해한 후 시험한 피스톤의 핀 홀 수직 진원도를 Fig. 13과 같이 측정하여 시험전과의 데이터와 비교함으로써 피스톤의 신뢰성을 판단한다. 대상 피스톤의 시험모드는 Table 4와 같이 설정한다. 이때의 회전수는 1cycle당 0.035초로 하여 28Hz(약 6,850rpm)이다. 이것을 20회 반복하여 100,000 cycle을 운전한 후 피스톤의 이상여부를 확인하고 3차원측정기로 핀 홀의 진원도를 측정한다.

핀 홀 수평거리의 10% 안쪽 위치에서 시험전과 후의 수직 지름을 측정하여 그 차이가 20 μ m 이내에 있으면 압력에 의한 피스톤의 내구성은 신뢰할 수 있다. 본 연구에서 제작한 스틸 단조 피스톤의 시험전과 후의 핀 홀 수직 진원도 측정값은 Fig. 13에 있으며, 이 데이터를 알기 쉽게 진원도 상에 표시한 것이 Fig. 14이다. 이 그림에서 스틸 단조 피스톤의 내구시험 전과 후 측정값 차이가 20 μ m 이내의 범위에

Table 4 Running mode of piston durability test

Block	item	offset (bar)	duration time(sec)	frequency (Hz)	duration cycle(No)	amplitude (bar)
High (Low) Pressure Part	RAMP	5→110 (5→20)	8			
	FADE IN	110(20)	15			
	SINE	110(20)		28	50,000	70(15)
	FADE OUT	110(20)	15			
	REPEAT			20		
	RAMP	110→5 (20→5)	8			



NO	시험 전	스틸 단조 피스톤 실험 후			
		10만Km	20만Km	30만Km	40만Km
#1	32.0380	32.0377	32.0374	32.0370	32.0366
#2	32.0368	32.0366	32.0362	32.0359	32.0356
#3	32.0418	32.0415	32.0412	32.0410	32.0407
#4	32.0390	32.0387	32.0385	32.0382	32.0379

NO	시험 전	알루미늄 합금 피스톤 실험 후			
		10만Km	20만Km	30만Km	40만Km
#1	32.0421	32.0417	32.0413	32.0409	32.0403
#2	32.0445	32.0441	32.0438	32.0434	32.0429
#3	32.0485	32.0482	32.0477	32.0473	32.0468
#4	32.0404	32.0400	32.0396	32.0391	32.0386

Fig. 13 Measurement point of piston pin hole

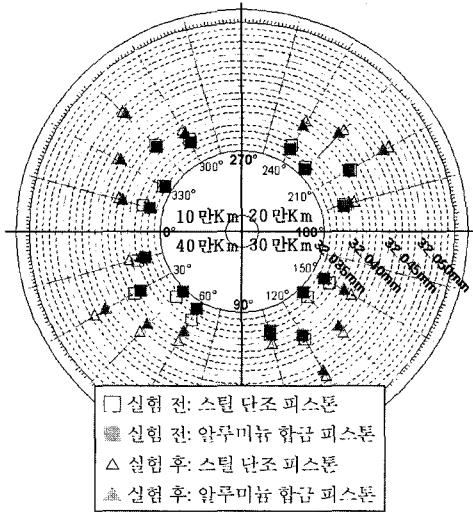


Fig. 14 Measurement results of piston endurance test(before and after) (한눈금 1 μ m=0.001mm)

있다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 알루미늄 합금 피스톤과 분절형 스틸 단조 피스톤의 엔진 성능시험과 피스톤 내구시험기를 이용한 내구시험을 통하여 얻은 결과를 비교 분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 알루미늄 합금 피스톤과 스틸 단조 피스톤이 엔진동력계 상에서 보인 성능은 거의 비슷한 것으로 나타났다.
- 2) 고부하 영역에서 알루미늄 합금 피스톤 대비 158%의 스틸 단조 피스톤 중량으로 인하여 출력과 토크가 약간 낮아지는 것으로 나타났다.
- 3) 알루미늄 합금 피스톤과 스틸 단조 피스톤의 배출가스 측정치를 비교해 본 결과 거의 일치하는 배출가스가 검출되었다.
- 4) 디젤엔진용 알루미늄 합금 피스톤과 스틸 단조 피스톤의 내구시험을 400,000km 수행하여 내구신뢰성을 입증하였다.

- 5) 엔진동력계 및 피스톤 내구시험기에서 실시한 알루미늄 합금 피스톤과 스틸 단조 피스톤의 성능 시험 이외에도 차량상태에서의 시험 및 시뮬레이션 결과를 비교하여 설계에 반영할 필요가 있다.

References

- 1) Z. Dursunkaya and R. Keribar, "Simulation of Secondary Dynamics of Articulated and Conventional Piston Assemblies," SAE Transactions, Vol.101, No.3, pp.853-861, 1993.
- 2) Jose M. Martins Leites and Roberto C. De Camargo, "Articulated Piston Cooling Optimization," SAE 930276, 1993.
- 3) Elsbett, Klaus, Guenter, Ludwig, Behrens, Michael, "Ferrum Piston for Diesel Engines-A two-piece optimized Articulated Piston Design," SAE Special Publications, pp.79-85, 1985.
- 4) P. Kemnitz, O. Maier and P. Klein, "Monotherm, a New Forged Steel Piston Design for Highly Lpoaded Diesel Engines," SAE 2000-01-0924, 2000.
- 5) D. S. Baik, S. K. Oh and Y. C. Han, "Engine Performance and Combustion Characteristics on the Variation of Injection Characteristics in Diesel Engine with Common Rail System," Transactions of KSAE, Vol.11, No.4, pp.52-57, 2003.
- 6) H. K. Kim, C. H. Jeon and Y. J. Chang, "A Study on the Emission Characteristics in 4 Stroke Large Propulsion Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.9, No.5, pp.38-45, 2001.
- 7) H. C. Kim, B. S. Kim, W. Kang and Y. S. Yoo, "Optimization of Combustion Chamber and Three Dimensional Analysis of Fluid Characteristics for Light Duty Diesel Engine," 2004 KSAE Fall Conference, Vol.I, pp.271-277, 2003.