

## 대형 LPG 엔진의 노크 특성에 관한 연구

### The Study on Knock Characteristics of Heavy Duty LPG Engine

황승환\*, 이정원\*\*, 민경덕\*  
Seunghwan Hwang, Joungwon Lee, Kyoungdoug Min

#### ABSTRACT

LPG has been well known as a clean alternative fuel for vehicles. Recently, several LPG engines for heavy duty vehicles have been developed, which can replace some diesel engines that are one of the main sources for air pollution in the urban area. Because cylinder bore of heavy duty LPG engine is larger than that of gasoline, the study of knock characteristics of LPG engine are needed. In this study, the knock characteristics were investigated with various engine speed, air excess ratios and LPG fuel compositions. Experimental results indicated that the Knock occurrence probability decreases with increasing engine speed and propane fraction of fuel. The Knock occurrence probability is highest at excess air ratio of 1 and decreases as the mixture strength became leaner.

주요기술용어 : LPG engine(LPG 엔진), Knock(노크), Excess air ratio(공기과잉율), Engine speed(엔진 회전속도), LPG fuel composition(LPG 연료 성분)

#### 1. 서 론

버스나 트럭에 사용되는 대형 상용 디젤 차량 으로부터 배출되는 입자상 물질 및 질소산화물 과 같은 유해 배출물이 대도시의 주된 환경오염 원으로 인식되어 중대형 차량용 디젤 엔진을 대 처할 수 있는 저공해 엔진 개발의 필요성이 증가 하고 있으며, 이에 따라 많은 연구들이 진행되고 있다.

LPG 연료는 기존의 연료들에 비해 단위 중량 당 발열량과 옥탄가가 높으며, 특히 유해 배기가

스를 적게 배출하는 청정 연료로 알려져 있어<sup>1,2)</sup> 최근 LPG 엔진에 관한 연구가 많은 관심을 끌고 있다. LPG 엔진은 소형 승용차에 오래 전부터 사 용되어 왔기 때문에 충전설비 등의 기반시설 구 축이 잘되어 있어 다른 대체 연료보다 유리한 점 을 가지고 있다. 그러나, 기체 상태로 공급하는 연료의 특징 때문에 체적효율이 떨어져, 동일한 배기량의 가솔린 엔진에 비해 출력이 10~20% 저감되는 것으로 알려져 있다.<sup>3)</sup> 이와 같은 문제 점을 해결하기 위해서 흡기효율을 향상시키기 위한 방법으로 흡기포트 분사방식의 LPG 엔진 이 연구되고 있으며,<sup>4)</sup> 연소실을 최적화하고 압 축비를 증가시킴으로써 출력을 향상시키려하고

\* 회원, 서울대학교 기계항공공학부

\*\* 회원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

있다. 그러나 대형 LPG 엔진의 경우 연료인 LPG의 옥탄가가 가솔린에 비해 크나 실린더 내경이 커지기 때문에 말단 가스의 자발화에 의해 발생하는 노크 현상이 엔진 개발에 있어서 큰 제한 조건이 된다. 따라서 본 연구에서는 대형 LPG 엔진에서의 노크 현상을 분석하기 위해서 엔진회전 속도, 공기과잉율, 연료의 조성에 따른 노크 특성을 연구하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에 사용된 엔진은 전기점화 LPG 실험용 단기통 1858CC 엔진으로 그 제원은 Table 1과 같다.

이 엔진은 상용 디젤 엔진을 기초로 제작된 단기통 엔진으로서 엔진 헤드는 기존의 디젤 엔진의 헤드를 사용하였으며, 인젝터 위치를 가공하여 스파크 플러그를 설치하였다. 연료는 액상과 기상으로 공급할 수 있도록 하였으며, 액상 연료는 LPG 인젝터(DEKA-II, bottom feed type)를 사용하여 PC-ECU로 제어하여 공급하였다. LPG 연료를 액상인 상태로 공급하기 위해서 LPG 연료통을 질소가스로 2MPa까지 가압하여 연료공급압이 2MPa로 유지될 수 있도록 하였다. 기상의 연료는 인젝터와 같은 위치에 설치된 공급관으로 가압을 하지 않은 상태로 연속적으로 공급하였으며, 계량 밸브를 설치하여 유량을 조절하였다.

Table 1 Engine specification

Engine type	SI LPLI single cylinder engine
Combustion system	Bowl-in-piston chamber
Bore × Stroke	130 × 140(mm)
Displacement volume	1858 CC
Compression ratio	10
I VO	BTDC 18°
I VC	ABDC 50°
E VO	BBDC 50°
E VC	ATDC 18°

연소실 압력으로부터 노크 현상을 측정하기 위해서 압력센서를(6016B, Kistler)설치하였으며, 알리아징 현상을 제거하기 위해서 샘플링 주파수를 100kHz로 하여 측정하였다.

공기과잉율을 측정하기 위해서 광역산소센서(Mexa-110 λ, Horiba)를 배기포트에 설치하였다. 오일과 냉각수 온도 측정을 위해 K형 열전대를 설치하였으며, 냉각수 온도 조정 장치를 설치하여 일정한 냉각수 온도에서 운전되도록 하였다. Fig. 1에 실험장치의 개략도를 나타내었다.

### 2.2 실험방법

노크 실험은 전부하 조건에서 실험하였으며 냉각수 온도는  $80 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 유지하였다.

LPG 엔진의 기본 성능 실험 및 엔진회전속도와 공기과잉율 변화에 따른 노크 특성 실험은 프로판과 부탄의 질량비가 6:4인 연료를 인젝터로 액상으로 분사하여 실험하였다.

엔진회전속도에 따른 노크 실험은 900, 1200, 1500rpm에서 점화시기를  $2^\circ$ 씩 진각시키며 공기과잉율 1에서 실험하였다.

공기과잉율의 영향을 알아보기 위해서 1200 rpm에서 공기과잉율을 0.8~1.2까지 0.1씩 증가시키며 실험하였다.

연료성분에 따른 특성을 알아보기 위해서 프로판, 부탄 99.9%, 그리고 프로판과 부탄의 질량비가 6:4인 연료를 사용하여 공기과잉율 1에서 실험하였다. 이 때 프로판과 부탄 99.9% 연료는

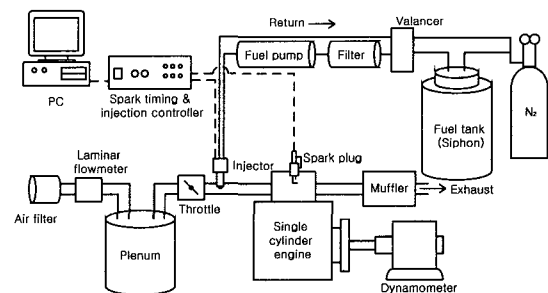


Fig. 1 Schematic diagram of LPG single cylinder engine

기체 상태로 공급하였으며 사용된 3가지 연료의 물성치는 Table 2와 같다.

### 3. 대형 LPG 엔진의 성능 실험

LPLI(Liquid phase LPG injection) 시스템은 흡기포트에 액체상태로 연료를 분사하는 방식이다. 상온에서 연료의 주성분인 프로판과 부탄의 증기압이 대기압보다 높기 때문에 흡기포트로 분사된 연료는 바로 증발하게 되며, 연료의 증발잠열에 의해 주위의 온도가 낮아지게 된다. 따라서 분사시기에 따라 체적효율이 변하게 되므로 최적의 분사시기를 설정하기 위하여 연료분사시기를 압축상사점부터(0°) 크랭크 각도로 80°씩 증가시키며 560°까지 실험을 수행하였다. 이때 연료 분사량은 240°에서 분사할 때 공기과잉율이 1이 되는 분사량으로 각 분사시기마다 일정하게 분사하였으며 그 실험 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

Table 2 Data on fuel properties

	Propane (100%)	Propane + butane(6:4)	Butane (100%)
Density at 25°C (kg/m <sup>3</sup> )	1.808	2.01	2.417
Heat of vaporization (kJ/kg)	425.74	438.2	386.1
LHV at 25°C, 100kPa,(MJ/kg)	46.357	46.07	45.742
Vapor pressure at 20°C(kPa)	847	616	210

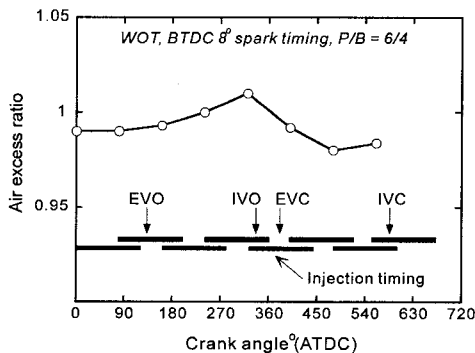


Fig. 2 IMEP and λ according to injection timing

그림 아랫부분에 굵은 실선으로 나타낸 것이 연료 분사시간이며, 공기과잉율의 값은 각 연료분사 시작점에 맞추어 표시하였다. 연료분사시기에 따른 공기과잉율 변화를 살펴보면 연료분사량이 일정하지만 분사시기에 따라 공기과잉율이 변하며, 흡기 밸브가 열리기 직전인 320°에 연료를 분사하는 경우가 가장 희박하고, 흡기 밸브가 닫히기 전인 480°에 분사하는 경우가 상대적으로 농후하게 나타났다. 이와 같은 결과의 원인은 흡기 밸브가 열리기 전에 분사된 LPG 연료는 흡기행정중에 증발하여 흡기온도를 낮추어 체적효율을 증가시키고, 흡기밸브가 닫히기 바로 전에 분사된 연료는 그 사이클 동안 일부만 유입되고 나머지는 다음 사이클에 유입되므로 그 기간동안 혼합기 온도가 상승하여 체적효율이 떨어지기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 실험은 체적효율이 최대가 되는 BTDC 40°에서 연료를 분사하여 수행하였다.

LPG 엔진의 성능확인을 위하여 900, 1200, 1500rpm에서 전부하, MBT 조건에서 실험을 수행하고 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

엔진회전속도가 증가할수록 IMEP는 감소하나 출력이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 엔진회전속도가 증가할수록 체적효율이 감소되기 때문에 IMEP 값이 감소하는 것이다.

### 4. 대형 LPG 엔진의 노크 특성

노크는 연소실 말단가스의 자발화에 의하여

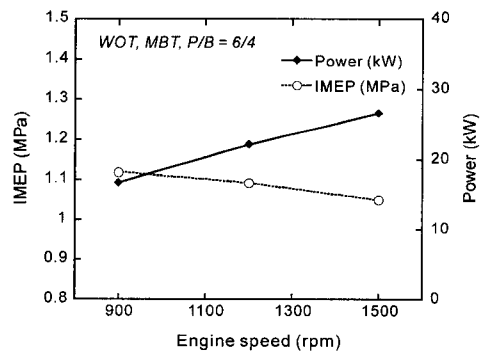


Fig. 3 IMEP and power characteristics according to engine speed at WOT and MBT conditions

발생되며 이로 인하여 연소실에 특정한 주파수 성분의 압력파가 발생된다. 그러므로 연소실 내부의 압력을 측정하고 노크주파수 대역의 필터를 사용하여 노크 강도를 측정할 수 있다.

노크가 발생한 사이클을 주파수 분석한 결과 노크주파수의 1차~3차 모드가 5~12kHz 사이에 존재하므로, 3~14kHz 대역 통과 필터를 사용하여 필터링 한 후 최대값과 최소값의 차이를 노크 강도로 설정하는 진폭해석법을 사용하여 노크 강도를 구하였다.(Fig. 4)

노크 사이클 판정은 측정된 실험조건 중 노크가 발생하지 않은 사이클의 최소 5%의 평균 진폭값보다 3배 이상의 큰 진폭값을 가지는 사이클로 판정하였다.<sup>5)</sup>

엔진회전속도에 따른 노크 발생 점화시기와 발생률을 알아보기 위해서 공기과잉율 1에서 점화시기를 2° 씩 진각시켜 실험하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

노크 발생 점화시기는 엔진회전속도가 증가할수록 진각되어 나타난다. 이는 엔진회전속도가 증가할수록 실린더내의 혼합기 유동 속도가 증가하여 화염전파속도가 증가하기 때문에 미연가스의 자발화가 잘 일어나지 않는 것으로 판단된다.

전부하 운전조건에서는 최대 출력을 얻기 위해서 공기과잉율이 0.9정도의 농후한 상태에서 운전되며 또한 급가감속과 같은 비정상운전 조건시 공기과잉율 변화가 발생하게 된다. 이는 노

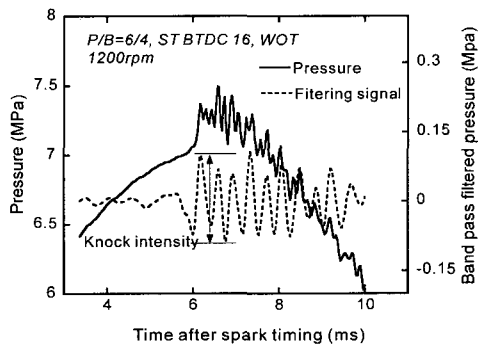


Fig. 4 In-cylinder pressure and band pass filtered pressure

크 발생에 영향을 미치므로<sup>6)</sup> 공기과잉율에 따른 노크 특성을 알아보기 위해서 공기과잉율을 0.8~1.2까지 0.1씩 증가시키며 실험하고 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

공기과잉율 1인 경우 가장 진각된 점화시기에서 노크가 발생하였다. 공기과잉율 0.8과 0.9의 농후한 상태에서는 공기과잉율 1보다는 2° 정도 진각된 점화시기에서 노크가 발생하고 있으며 점화시기와 발생률이 비슷한 경향을 나타내고 있다. 공기과잉율이 1이상의 경우에는 희박할수록 점화시기가 더 진각된 상태에서 노크가 발생되고 있으며, 공기과잉율 1.1에서는 공기과잉율 0.8과 0.9의 농후한 상태와 노크 발생점화시기는 같으나 발생률이 줄어든 형태로 나타났다.

Fig. 7에 각 점화시기에 대한 최고 압력 값을 나타내었다.

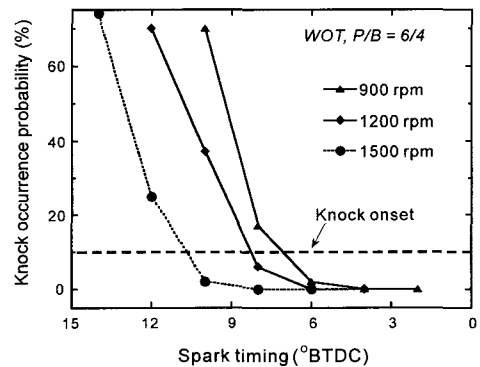


Fig. 5 Knock occurrence spark timing and probabilities according to engine speed at WOT conditions

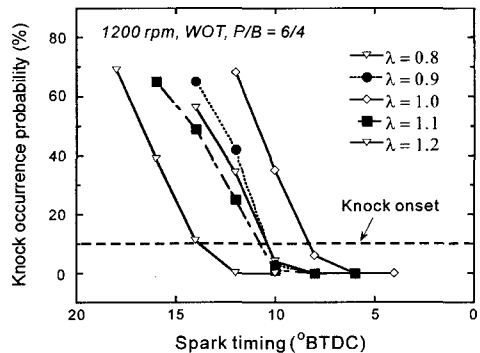


Fig. 6 Knock occurrence spark timing and probabilities according to  $\lambda$  at 1200rpm and WOT conditions

같은 점화시기의 경우 공기과잉율이 0.8일 때 가장 높은 압력을 나타내었다. 이는 연료분사량이 증가함에 따라 다른 조건보다 연료 증발에 의하여 혼합기 온도가 보다 많이 떨어지고 그에 따라 체적 효율이 커져 실린더로 유입되는 연료량이 증가하여 연소에 의한 압력상승률이 커지기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 노크가 10% 발생되는 점화시기를 노크 발생 점화시기로 할 경우 그 때의 최고 압력값을 비교해보면 0.8과 0.9의 경우 약 5.6MPa 정도이며 이론공연비와 희박한 경우는 5.2MPa 정도에서 노크가 발생되고 있다. 농후한 경우는 체적효율의 증가에 따라 유입된 혼합가스의 양이 증가하기 때문에 노크가 발생할 때의 최고 압력이 높아도 온도는 같은 압력의 이론공연비와 희박한 경우보다 떨어지게 되므로 보다 높은 압력에서 노크가 발생하는 것이며, 또한 혼합가스가 자발화하기 위해서 필요한 산소의 농도가 작기 때문에 이론공연비 보다 더 진각된 점화시기에서 노크가 발생하는 것으로 판단된다. 희박한 경우는 화염전파속도의 감소와 유입된 연료량이 적어 이론공연비와 공기과잉율 0.8과 0.9에 비해 동일 점화시기에서 압력 상승율이 작기 때문에 보다 진각된 점화시기에서 노크가 발생하는 것으로 판단된다. 전반적으로 노크가 발생하는 최고 압력의 차이가 적기 때문에 일정한 온도 조건 이상부터 노크가 발생하는 것으로 생각된다.

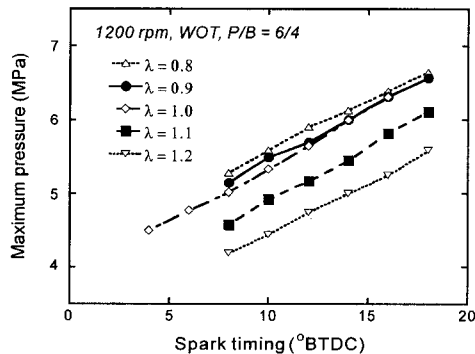


Fig. 7 Maximum pressure according to  $\lambda$  at 1200rpm and WOT conditions

이와 같은 실험을 통하여 노크 발생률은 공기과잉율에 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다.

LPG 연료는 주로 부탄과 프로판으로 구성되며 메탄과 에탄 등이 소량 포함되어 있다. LPG는 계절에 따라 그 구성성분이 변하므로 연료성분에 따른 노크 특성의 연구가 필요하다.

프로판, 부탄, 그리고 프로판과 부탄의 질량비가 6:4인 3가지 연료를 가지고 노크 실험을 수행하고 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

순수 부탄의 경우 점화시기가 ATDC 8°에서 노크가 발생하기 시작하며 연료 중 프로판의 비율이 증가할수록 점화시기가 보다 진각된 조건에서 노크가 발생하고 있다. 부탄과 프로판의 저위발열량은 각각 45.74와 46.36(MJ/kg)로 비슷하나 옥탄가의 경우 각각 94와 112로 크게 차이가 난다. 따라서 연료중 프로판의 함량이 많을수록 노크가 잘 일어나지 않는다.

노크가 10% 발생되는 지점을 노크 발생 점화시기로 할 경우 프로판과 부탄이 6:4로 혼합된 연료의 경우 프로판과 거의 같은 노크 점화시기를 나타내고 있다.

노크 발생 점화시기 보다 더 진각시킨 경우 노크 발생률의 증가율은 모두 비슷하게 나타나고 있다.

노크가 발생한 점화시기부터 2°씩 진각시켜 4°까지 진각시켰을 때의 노크 강도 분포를 Fig. 9에 나타내었다.

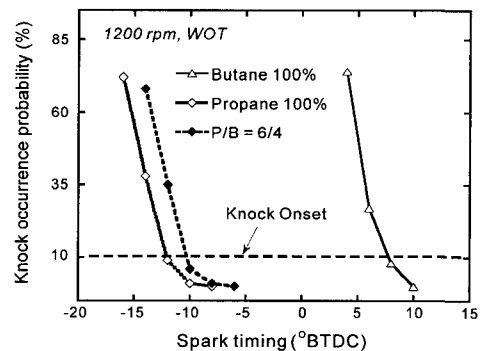


Fig. 8 Knock occurrence probabilities according to LPG fuel compositions at 1200rpm and WOT conditions

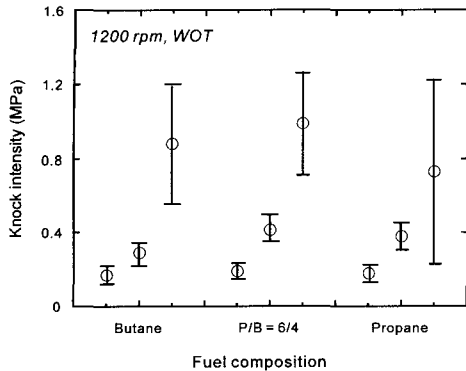


Fig. 9 Knock intensity distributions according to LPG fuel compositions at 1200rpm and WOT conditions

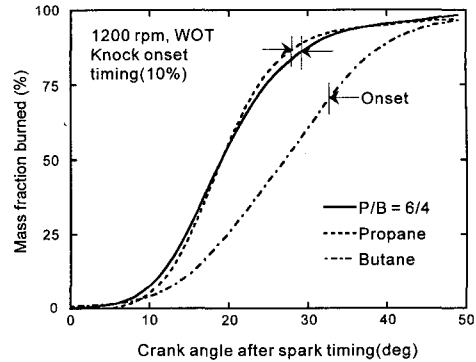


Fig. 10 The comparison of mass fraction burned according to LPG fuel compositions at knock on-set conditions

부탄과 혼합연료인 경우는 점화시기를 노크 발생 점화시기보다 진각시킬 때 발생하는 노크 사이클들의 노크 강도 분포가 비슷한 경향을 보이고 있으나 프로판의 경우 점화시기가 4° 진각되었을 때 노크 강도가 작은 것부터 큰 경우의 분포 변화가 크게 나타나고 있으며 노크 사이클들의 평균 노크 강도 값도 다소 작게 나타나고 있다.

각 연료에 대하여 노크 발생 점화시기에서 구한 질량연소율 곡선을 Fig. 10에 나타내었다.

노크가 발생하는 지점의 연소율을 살펴보면, 프로판의 경우 가장 연소가 많이 이루어진 상태에서 노크가 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 자발화 할 수 있는 연료의 양이 가장 적고 또한 순수 프로판의 경우 옥탄가가 높아 자발화가 크게 일어나지 못하는 것으로 판단된다.

연료성분에 따른 노크 실험 결과 연료중 프로판 성분이 증가할수록 노크 발생률이 감소하는 경향을 나타냈으며, 노크 발생 점화시기 보다 더 진각시킬 경우 노크 발생률은 비슷하나 노크 강도의 크기는 상대적으로 작은 값을 나타내고 있다.

## 5. 결론

대형 LPG 엔진에서 엔진회전속도, 공기과잉률, 연료 구성 성분에 따른 노크 특성 실험을 수행한 결과로부터 다음의 결론을 얻었다.

1) 엔진회전속도가 증가할수록 화염전파속도의 증가에 따라 노크 발생 확률이 저감된다.

2) 공기과잉률 1에서 노크 발생 확률이 가장 높았으며 농후한 경우는 공기과잉률이 1인 경우보다 노크 발생 확률이 낮아지나 농후 정도에 따라서는 그 확률의 변화가 작게 나타났다. 희박한 경우는 희박해질수록 노크 발생 확률이 감소하는 경향을 나타내었다.

3) 연료중 부탄의 성분이 많을수록 노크 발생률이 증가하였으며 프로판과 부탄의 질량비율이 6:4인 경우는 순수한 프로판과 비슷한 노크 발생률을 나타내었다. 노크 발생 점화시기보다 더 진각시켰을 때 연료 성분에 상관없이 발생확율은 비슷하게 증가하나 프로판을 연료로 사용하는 경우 다른 연료보다 노크 강도가 다소 작게 나타났다.

## 후 기

이 연구는 “저공해 대형 LPG 엔진개발 사업”의 일환으로 수행되었으며, 도움을 주신 LPG 자동차 보급협의회와 한국기계연구원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 1) D. Dardalls, R. D. Matthews, D. Lewis, K.

- Davis, "The Texas Project, Part5-Economic Analysis : CNG and LPG Conversion of Light-Duty Vehicle Fleets," SAE 982447, 1998.
- 2) M. E. Payne, J. S. Segal, M. S. Newkirk, L. R. Smith, "Use of Butane as an Alternative Fuel - Emission from a Conversion Vehicle Using Various Blends," SAE 952496, 1995.
- 3) World LP Gas Association, "Automotive LP Gas - Today's Fuel for a Cleaner Tomorrow," 3rd Edition, 1998.
- 4) 김창업, 오승목, 강건용, "대형엔진용 액상분사식 LPG 연료공급 방식에 대한 기초연구 (1)," 한국자동차공학회논문집, 제9권 제4호, pp.85-91, 2001.
- 5) J. H. Lee, S. H. Hwang, J. S. Lim, D. C Jeon, Y. S. Cho, "A New Knock Detection Method Using Cylinder Pressure, Block Vibration and Sound Pressure Signals from a SI Engine," SAE 981436, 1998.
- 6) 김현용, 이종화, 박경석, "가솔린 엔진에서 급가속 운전시 노킹 측정 및 분석," 한국자동차공학회논문집, 제7권 제9호, pp.28-35, 1999.