

〈논 문〉 SAE NO. 98370020

흡기중 수증기 함량이 스파크 점화기관의 연소 및 노킹에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

An Experimental Study of the Effects of Water Vapor in Intake Air on Combustion and Knock Characteristics in a Spark Ignition Engine

이 택 현*, 전 광 민**
T. H. Lee, K. M. Chun

ABSTRACT

In this study, the effects of water vapor in inlet air on combustion efficiency, general performance, knock characteristics and emission gas concentration were investigated through the experiments of combustion and vibration analyses, emission gas analysis by changing water vapor quantity in inlet air with temperature and humidity auto control unit.

With partial vapor pressure increase, the brake torque at wide open throttle status decreased and the average ignition delay angle increased, IMEP (indicated mean effective pressure) decreased due to the late maximum cylinder pressure crank angle. Knocking was measured using the integral and 3rd derivatives of filtered cylinder pressure as knock intensity, which matched well with the method of frequency power spectrum of block vibration signal. Water vapor in intake air had influence on the spark knock sensitivity. With the increase of water vapor content in intake air NOx emission was decreased and HC emission was increased.

주요기술용어 : Water Partial Vapor Pressure(수증기 분압), Knocking(노킹), Knock Sensitivity (노크 민감도), Ignition Delay time(점화지연시간), Spark Timing(점화시기)

1. 서 론

첨단화되는 센서 기술과 아울러 마이크로 프로세싱 기술의 발달로 인하여 기관의 주변 환경 및 운전 조건에 대응한 모든 경우의 최적 점화 시기

명령이 가능하고, 유럽 및 미국 등 비교적 높은 수준의 판매지역에 대해서는 노크 센서에 의한 노킹 제어 로직을 채택하는 경우가 많고, 지속적인 기관의 피이드백 제어 및 초저 공해 기술을 통하여, 주어진 환경하에서 기관이 최대의 성능을 발휘할 수 있도록 최적 점화 시기를 실현을 위한 노력이 경주되고 있다.

노킹에 영향을 주는 인자에 대해서는 많은 실

* 정회원, 연세대학교 대학원

** 정회원, 연세대학교 기계공학과

험을 통하여 그간 많은 연구결과가 발표되었는데 최근 Stephen Russ¹⁾는 각인자에 대해 육탄가(ON-Octane Number) 요구치 측면으로서 Table 1과 같이 요약하고 있다. 이 외에 M. Haghooie²⁾는 연료 육탄가와 흡기 온도를, 이 흥철³⁾ 등과 정 일영⁴⁾ 등이 각각 연료 육탄가와 흡기 온도를 변화시키면서 흡기 온도가 높을수록 육탄가가 낮을수록 노킹 발생 확률과 강도가 높아짐을 밝혔고, S. Brussovansky⁵⁾ 등은 흡기 온도, 냉각수 온도, 퇴적물, 기관 운전 속도 등을 변수로 하여 말단가스의 열전달을 고려하여 노킹발생을 예측하고 실험 결과와 비교하였다. 그러나 습도와 관련된 제어 로직은 센서가 고가이고 응답성도 늦으므로 아직까지 점화시기 피이드백 제어 시스템에 채택된 예는 없다.

따라서 기관의 기본 점화시기의 설정시 노킹 제어 로직의 유무에 관계 없이 표준 수증기 분압을 고려하여 적정량만큼 보정하거나, 향후 제어 로직에 대기중 수증기 함량을 생각한 습도 보정 항목이 추가될 경우 기관 EMS(Engine Management System) 매핑시 흡기 온도, 냉각수 온도, 흡기관 압력 등과 함께 점화 시기 보정 인자로서 작용하여 기관의 사용 지역에 따라 노크 센서의 선택적 사용이 가능할 수도 있을 것이다. 이와 관련하여 본 연구에서는 1.6L DOHC MPI 4기통 스파크 점화 기관의 흡기중 수증기 함량과 점화시기에 따른 연소 및 노킹 특성을 알아 보고자 하였다.

Table 1 Guide Lines on the Effect of Various Parameters on the Octane Requirement of an Engine
1ON/1° 점화진각

Parameter	Sensitivity
Intake Air Temperature	1°/7K
Air Fuel Ratio	2°/1-within 5% of Stoichiometric A/F
Intake Air Depression	3° ~ 4°/10kPa
Exhaust Gas Pressure	1°/30kPa
Compression Ratio	5°/1
Coolant Temperature	1°/10K

2. 실험

2.1 실험 방법

본 실험의 목적을 위해 흡기 공조 시스템에 설치된 PID(비례적분미분) 제어기를 가동하여 건구 온도를 25° ± 1°C로 유지하면서 수증기 양을 대기중 분압으로서 우리나라 기후중 대체로 가장 건조한 낭낭을 생각한 8mmHg로부터 여름 장마철등 가장 습할 낭낭을 가정한 23mmHg까지 변화시키고 점화 진각에 따라 발생하는 노킹의 정확한 측정을 위해 플러쉬 마운트형의 압전 소자(Kistler 6053A60) 형식의 압력 센서를 연소실에 부착한 후 점화시기를 KBL(Knock border line)까지 2° 간격으로 진각시켰고 연소 분석용 자료취득 장치를 이용하여 크랭크각 0.1° 간격으로 300 사이클의 압력을 연속적으로 두 번에 걸쳐 취득하여 데이터의 신뢰성을 높였으며 이를 연소 상태 파악 및 적분법⁶⁾, 3차 미분법⁷⁾에 의해 정량화된 노킹 발생, 강도특성 파악 등에 활용하였다.

본 연구에서는 기관 노크 제어용으로 널리 이용 되고 있는 실린더 블럭 진동 신호(B&K 4382)를 압력신호와 연동하여 측정하고 이를 스펙트럼 분석하여 노킹 측정의 신뢰도를 높이고자 하였으며 CLD 법에 의한 NO_x 및 FID 법에 의한 HC 배출 가스 농도 측정을 아울러 실시 하여 수증기 함량에 따른 연소 변화를 추론 하였다.

기관 속도와 부하는 KBL과 MBT가 대체로 균접하는 상용(常用) 구간으로서 차량 조건에서 대체로 출발 모드(Launching Mode)에서 많이 사용되는 영역인 1,200rpm, 흡기관 절대압력 680mmHg와 변속기 5단에서 60~70km/h의 정속 또는 점진적 가속 구간인 2000rpm, 680mmHg을 설정하였다. 노킹에 영향을 줄 수 있는 인자인 냉각 수온은 90° ± 2°C로 정확히 조절하여 온도변화에 의한 영향을 배제하였다.

2.2 실험 장치

본 연구를 위해 사용된 실험 장비는 흡기온도와 흡기중의 수증기 함량을 조절하는 향온 향습장치, 동력계, 연소 압력 취득 장치, 주파수 분석

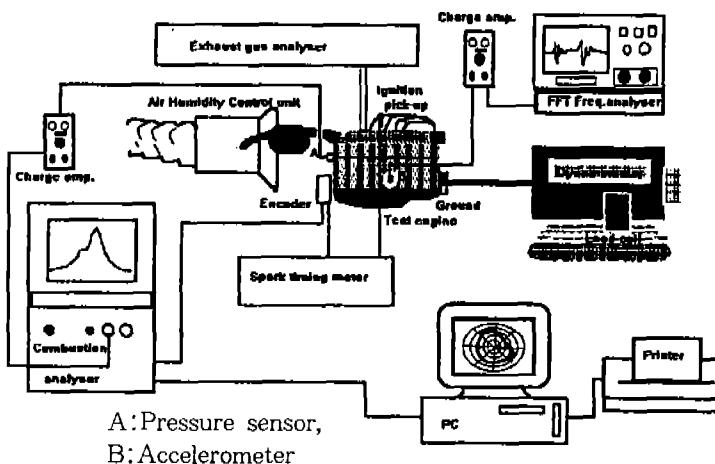


Fig.1 Schematic Diagram of Experimental Equipment

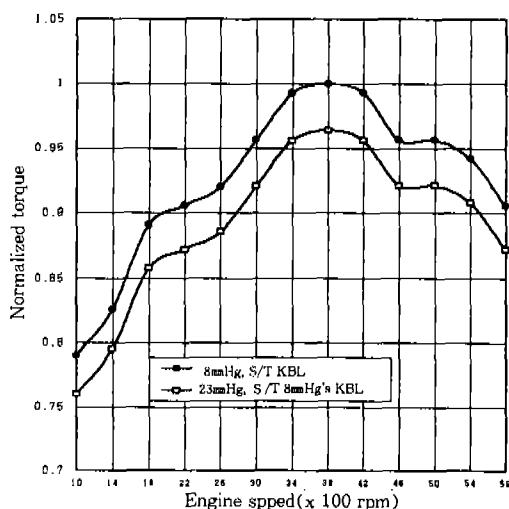


Fig.2 WOT Normalized Performance by Maximum

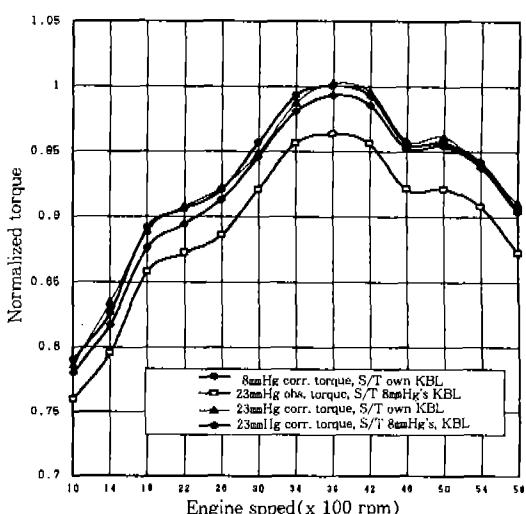


Fig.3 WOT Performance Compensation Comparison between the ISO1585 Corrected Torque and the Normalized KBL Spark Timing Torque

장치 및 배출 가스 분석 장치 등으로 구성되어 있다. 실험 장비의 구성은 Fig.1과 같다.

2.3 실험에 사용된 기관의 제원

실험에 사용된 엔진은 상용화된 DOHC(Double Over Head Camshaft) 1,598cc MPI(Multi Point Fuel Injection) 가솔린 기관으로서 연소

실은 스파크플러그가 정중앙에 위치한 펜트루우포(Pentroof) 형상이고 흡기는 자연흡입(Natural Aspiration) 방식이며 VGIS(Variable Geometric Induction System)을 채택하여 흡기효율을 높인 엔진이다. 상세한 제원은 Table 2와 같다.

Table 2 Test Engine Specification

Bore × Stroke	79 × 81.5
Compression Ratio	9.5
Air Induction	VGIS & Tumble Port
Intake Cam Duration	234(CAD)
Exhaust Cam Duration	234(CAD)
Intake Valve Timing	IVO 11 BTDC, IVC 43 ABDC
Exhaust Valve Timing	EVO 41 BBDC, EVC 13 ATDC

3. 실험 결과

3.1 기관의 성능

수증기 함량을 대기압 분압으로서 8mmHg, 23mmHg 각각에 대해 전부하 정미 출력(Wide Open Throttle Net Power)을 측정하여 Fig. 2에 관측 토크(Observed Torque)를 수증기 분압 8mmHg의 최대 토크로 노말라이징 하여 표기하였는데 수증기 분압 23mmHg가 8mmHg보다 3.8~4.0%의 토크 하락을 보임으로써 수증기 함량이 증가할수록 엔진 출력 성능이 저하된다는 주지의 사실을 입증하였다. Fig. 3에 상기의 관측 토크대신 ISO 1585(KS 0071) 출력 수정식에 의한 수정 토크로 표현하였다. 수증기 분압 8mmHg KBL 점화시기의 수정성능을 기준으로 23mmHg 동일 점화 시기 성능의 관측 토크 및 수정 토크와 수증기 분압 23mmHg 때의 KBL을 다시 측정하여 얻은 수정 성능을 동시에 비교하였다. 여기서 ISO 1585 가솔린 기관 출력 수정식에 의해 보정된 토크가 상호간 엄밀한 일치를 보이지 않았고 오히려 KBL 점화 시기간 비교가 기관 속도 전 영역에서 대체로 일치함을 보이면서 의미를 가졌다.

4,600rpm 이상의 고속 구간에서 출력 수정식과 KBL 출력 수정식이 차이를 보이지 않는 것은 고속 구간 축토크의 점화 진각에 대한 민감도가 크지 않기 때문이다.

3.2 수증기 분압에 따른 연소 및 노크 특성

수증기 분압이 변화하면서 기관 성능이 달라지는 것은 각기 다른 수증기 함량을 가진 혼합기의

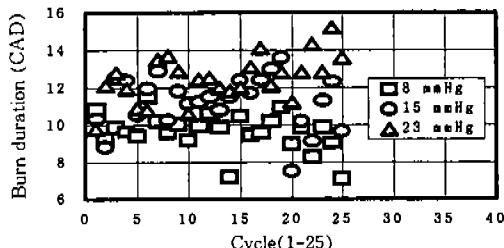


Fig. 4 0~5% Burn Duration at 1,200rpm MAP 90kPa, of 25cycles, Spark Timing 6.3° BTDC

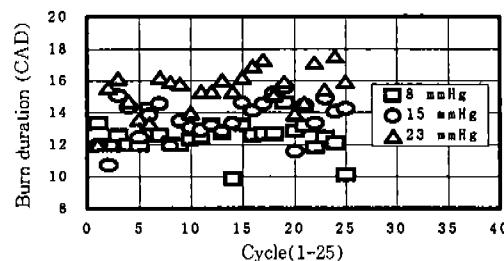


Fig. 5 5~10% Burn Duration at 1,200rpm MAP 90kPa, of 25cycles, Spark Timing 6.3° BTDC

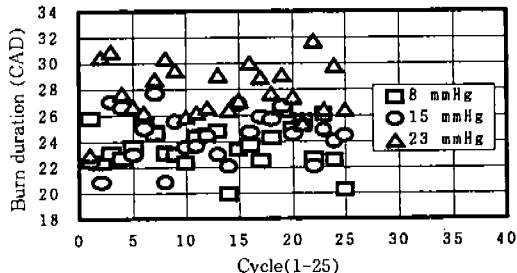


Fig. 6 10~50% Burn Duration at 1,200rpm MAP 90kPa, of 25cycles, Spark Timing 6.3° BTDC

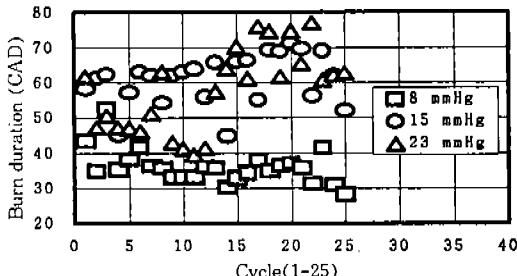


Fig. 7 50~90% Burn Duration at 1,200rpm MAP 90kPa, of 25cycles, Spark Timing 6.3° BTDC

비열비(C_p/C_v) 및 열전도성 등 열역학적 조성과 실충진률이 달라지는 요인으로 인하여 기관 연소 실에서의 연소 상태에 영향을 미치기 때문이다. 특히 혼합기중의 수증기 함량이 달라지면 말단 가스 부위의 온도 구배가 달라지고 자발화 특성에도 영향을 미치게 되어 KBL 점화시기가 바뀌게 된다.

Fig.4~Fig.7은 1,200rpm 680mmHg 점화 시기 6.3°에서 300사이클의 연소압력 데이터를 취득한 후 25개 데이터를 추출하여 화염 발달 기간 또는 점화 지연 기간인 0~5%와 5~10%, 화염 성장 및 급속 연소 기간인 10~50%, 50~90%로 나누고 수증기 분압 8mmHg(1.07kPa), 15mmHg(2.00kPa), 23mmHg(3.07kPa)에 대해서 질량 연소율의 % 연소기간을 표현하였는데 수증기 분압이 증가할수록 점화 지연 기간과 화염 성장 기간이 Table 3과 같이 평균으로 각각 약 27%, 18% 까지 길어짐을 보였고 50 % 이상의 급속연소기간에서 15mmHg까지는 70 %의 큰 폭으로 느려졌고 23mmHg에서는 경향성을 나타내지 않았다. 이는 수증기 함량이 많아질수록 비열비가 감소하고 열전도성이 저하되어 연소 가스 및 화염 온도에 영향을 주면서 화염의 성장속도가 느려지는 것으로 판단된다. 한편 수증기 함량에 따라 흡기의 실충진률에도 아울러 영향을 미치게 되는데 수증기 함량이 클수록 실흡입효율이 낮아질 것이고 연소 압력과 연소 가스 온도도 낮아져 화염의 속도가 느려지는 원인이 될 것이다. 이를 이택현 등⁹⁾이 이온 프로브를 이용하여 수증기 함량과 화염 전파속도와의 관계를 검증하

였다.

위의 결과로 말미암아 기관의 노킹 특성과 MBT 특성이 변화한다. Fig.9에 수증기 분압에 따른 노킹 특성을 점화시기를 2°씩 진각하면서 정상 또는 노킹 연소 압력의 대역 필터링 신호를 3차 미분하여 노킹 강도를 구하고 이를 실린더 블럭의 진동 신호에 의한 노킹 판별값과 비교하였는데 1,200rpm, 수증기 분압 8mmHg의 경우 20.3°에서, 15mmHg는 24.6°에서, 23mmHg는 26.7°에서 노킹 강도의 급격한 상승을 보임으로써 수증기 함량이 클수록 KBL이 상사접 전방으로 이동되고 수증기 분압 10mmHg당 대개 3.8°~4.2°의 점화 시기 민감도를 보였다.

Fig.8에 1,200rpm 및 2,000rpm의 연소 압력 취득 300 사이클에 대한 노킹 판별 과정을 정상 연소 상태와 비교 하여 적분법(Integral Method)과 3차 미분법에 의한 노킹 강도로서의 각 사이클 최대치를 나타내었는데 두 가지 방법에 의한 노킹 판별 결과는 정확히 일치하였다. 그럼에서 보는 바와 같이 1,200rpm, 수증기 분압 8mmHg(1.07kPa)의 노크 점화 시기인 20.3°가 수증기 분압이 7mmHg 증가한 15mmHg(2.00kPa)에서는 노킹 강도가 현격히 줄어듦을 보였고 기타 경우의 결과도 동일 하였다.

그러나 일반적으로 노크의 발생은 연소실 정상 화염이 느려져서 말단 가스의 자발화 화염과 충돌을 일으킨 후 이상 압력파를 형성하는 구조로 설명되고 있다.^{9), 10)} 따라서 본 시험의 결과로 미루어 수증기 함량의 증가로 인한 화염 지연이 말단 가스의 자발화 생성 구조에도 영향을 미치고

Table 3 Average and Standard Deviation(SD) of Burn Duration for Different Partial Vapor Pressure

Speed & S/T	P_H (mmHg)	Average & SD	Burn duration(CAD)			
			0~5%	5~10%	10~50%	50~90%
1,200rpm S/T 6.3	8	Avg	9.6284	12.45	23.652	35.91
		SD	1.021557	1.008505	1.633342	4.971271
	15	Avg	11.234	13.6028	24.428	61.01
		SD	1.445374	1.231812	1.897974	7.092910
	23	Avg	12.474	15.396	27.91	57.868
		SD	1.2515	1.306467	2.071332	11.72972

있는 것으로 믿어진다. 즉 흡기중 수증기의 함량이 높을수록 말단 가스부의 자발화 확률이 작아진다고 판단된다.

3.3 배출 가스 특성

기관의 배기 매니폴드 끝 플랜지부에 배출 가스 채취구를 만들어 FID 및 CLD 법으로 HC와 NO_x의 배출 농도를 각각 측정하여 Fig.3.9에 나타내었다. 기관의 운전은 실험 전영역에서 O₂ 센서 신호 피이드 백에 의한 이론 공연비 컨트롤하였으며, 따라서 수증기 함량이 증가하더라도 당량비는 항상 1.00 내외가 되도록 하였다.

기관 연소를 통한 NO_x의 대부분은 NO이고 미량의 NO₂가 섞여 있으며 1,500°C 이상의 고

온에서 체류하는 N, N₂, O, O₂, OH 등이 반응하여 생성된다. 그러므로 수증기의 함량이 증가하면 전술한 바와 같이 연소 온도가 저하되어 NO_x 생성 반응이 둔화되고 배출 농도도 저하된다. 결과에서 보여 주듯이 수증기 분압이 클수록 점화 시기가 지각될수록 NO_x 배출 농도가 감소하였는데 수증기 함량의 증가에 의해 최대 30~40ppm/mmHg의 농도 감소를 나타내었고 점화 진각에 따라서는 연소 온도의 상승으로 인해 70~80ppm/CAD의 농도 증가가 있었다.

HC의 배출은 미연 연소 성분으로서 실린더, 연소실 벽면의 저온 소염층(Quenching Zone)과 밸브, 피스톤과 실린더 벽사이, 피스톤 링 그루우브(Ring Groove)등의 틈새 체적에 잔존해

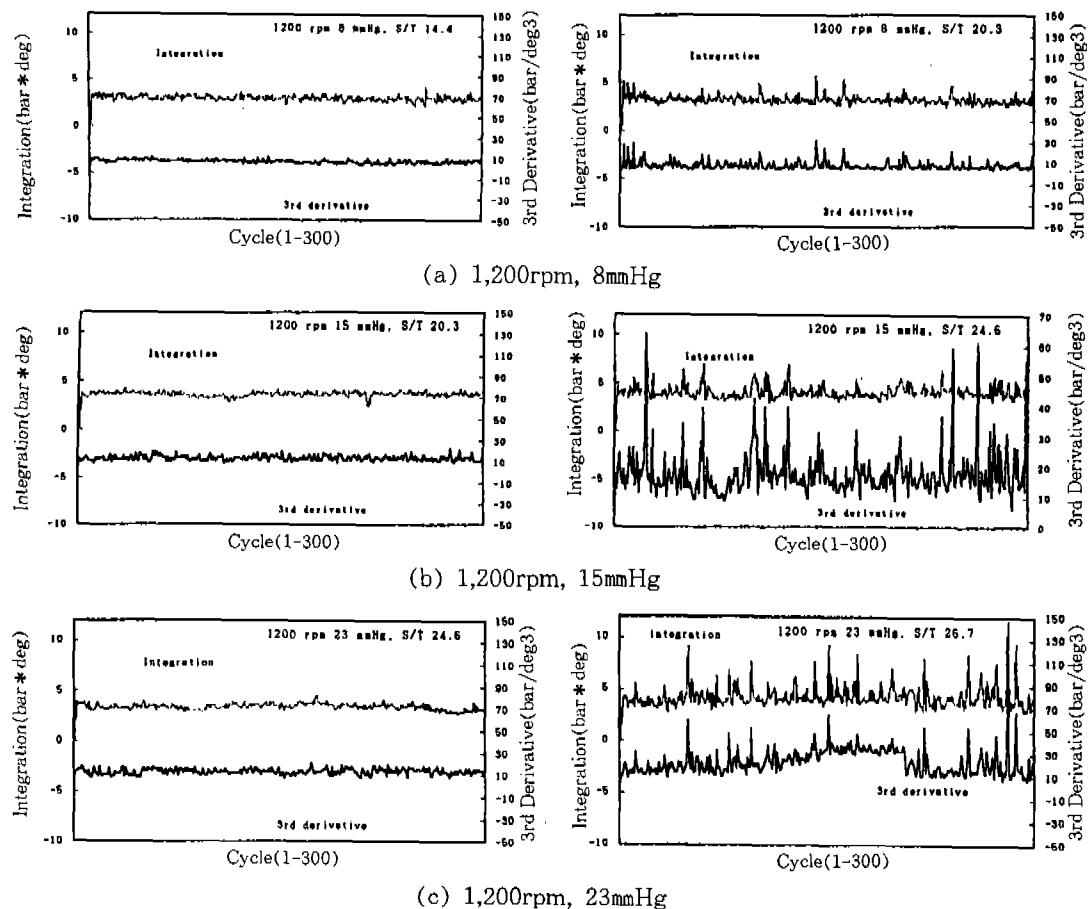


Fig.8 Knock Definition Comparison at 1,200 rpm 680mmHg, by Integration and 3rd Derivative Method

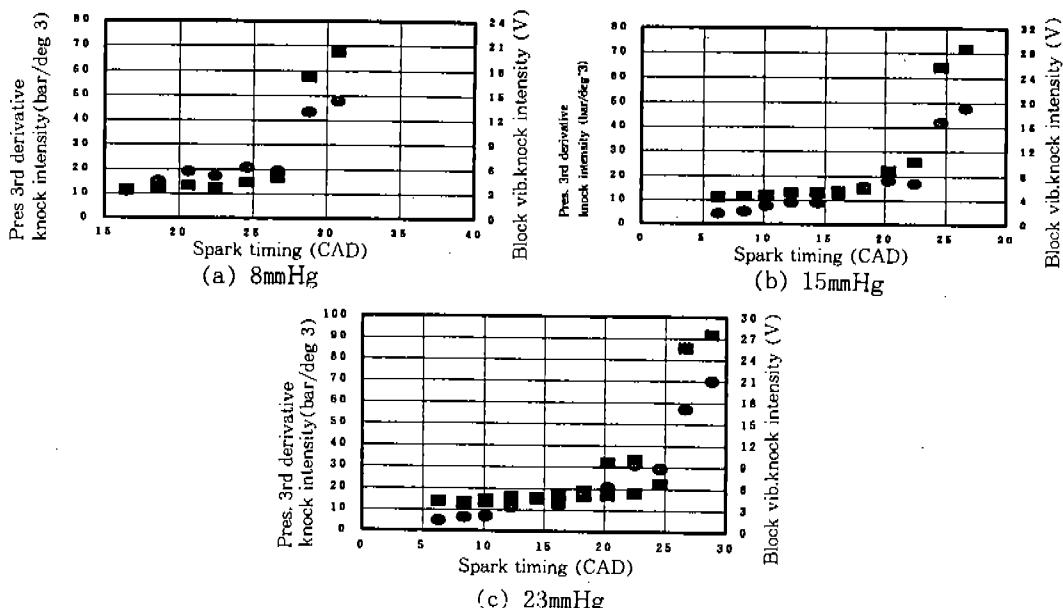


Fig.9 Knock Definition Comparison between the Pressure 3rd Derivative and the Block Vibration Acceleration Signal as a Function of Spark Timing

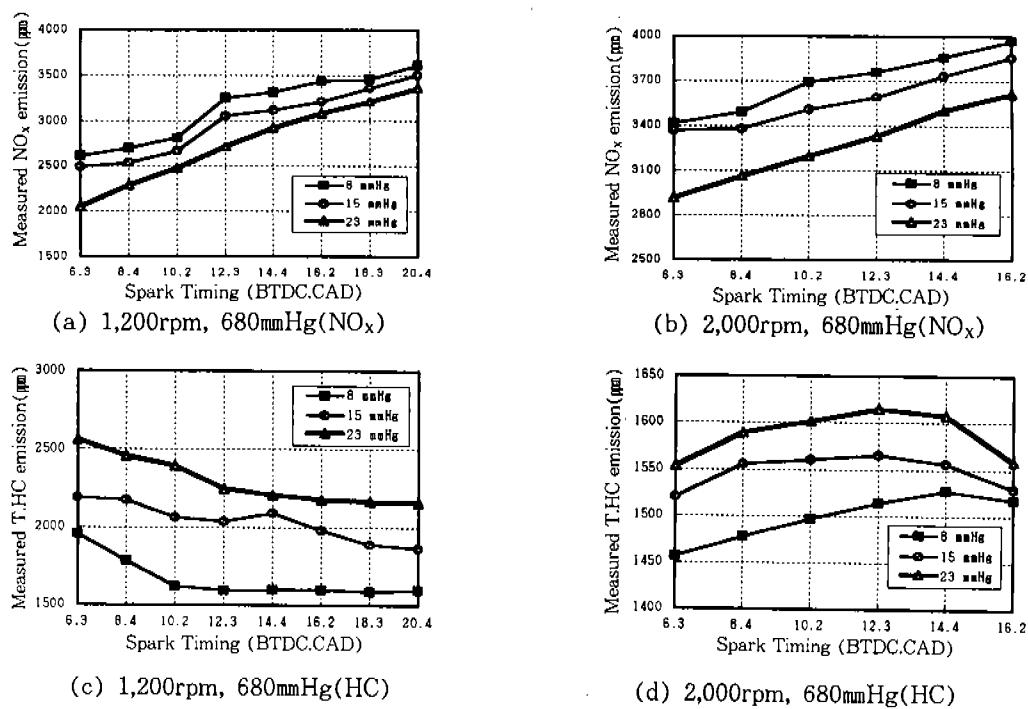


Fig.10 Emission Concentration of NO_x and HC for Different Partial Vapor Pressures as a Function of Spark Timing

있는 미연 연료 성분이 기화하여 배출되거나 오일 유막에 섞인 연료 증기 또는 불완전 연소성분에 의해 대부분 배출된다. 수증기 함량이 증가할 수록 연소 가스 온도 및 화염 온도가 낮아지고 화염 속도가 느려져 틈새 체적의 온도가 저하되어 소염층의 두께가 증가되면서 HC 배출이 많아지는 것으로 여겨진다. Fig.10와 같이 수증기 분압이 증가하면서 1,200rpm에서는 40~53ppm/mmHg가량 HC 농도가 증가하였고 2,000rpm에서는 3~7ppm/mmHg의 HC 농도증가를 보였다.

4. 결 론

본 연구에서는 4실린더 1.6L 스파크 점화기관에 대해 기관 속도 및 점화 시기를 전각하면서 수증기 함량에 따른 연소 및 배출가스 특성을 파악하고 특히 스파크 노크 특성 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 스파크 노킹 판별시 실린더 블럭 진동에 의한 노킹 강도 최대치와 연소 압력 3차 미분에 의한 노킹 강도 최대치를 동시에 측정하여 동일한 판별치를 얻었고 그들간의 상관성도 우수함을 확인하였다.
- 2) 수증기 함량에 따른 노킹 특성 실험에서 1,200rpm 680mmHg의 경우 수증기 분압이 15mmHg 증가함에 따라 보더 라인(Border Line) 노킹 발생 점화 시기가 6.4° 진각되었고 2,000rpm 680mmHg의 경우 수증기 분압 15mmHg 증가에 5.6°가 진각되어 수증기 분압 10mmHg(1.3kPa)당 크랭크각으로 약 4°의 점화 시기 민감도를 나타내었다.
- 3) 수증기 함량이 증가함에 따라 기관의 점화 지연 기간이 길어지고 연소 압력의 최대치도 동일 점화 시기에서 하락하였으며 아울러 수증기 분압 15mmHg 증가에 전부하 축 토크가 4% 가량 하락하였다.
- 4) 대기중 수증기 분압이 10mmHg 증가함에 따라 동일 점화 시기에서 NOX 배출 농도는 300~400ppm가량 감소하고 HC 배출 농도는 30~500ppm 가량 증가 하였다.

참 고 문 헌

1. Stephen Russ, "A Review of the Effect of Engine Operating Conditions on Borderline Knock", SAE960497, 1996.
2. M. Haghooie, "Effects of Fuel Octane Number and Inlet Air Temperature on Knock Characteristics of a Single Cylinder Engine". SAE902134, 1990.
3. 이홍철, 전광민, "연료의 옥탄가 변화에 따른 스파크 점화 기관의 노킹 특성의 변화", 자동차 공학회지 Vol. 14 No. 5, pp. 61~68, 1992.
4. 정일영, "흡입 공기 온도 변화에 따른 스파크 점화기관의 노킹 특성 변화", 연세대학교 대학원, 석사 학위 논문, 1992.
5. Sergei Brussovansky and John B. Heywood, "Predicting the Effects of Air and Coolant Temperature, Deposit, Spark Timing and Speed on Knock in Spark Ignition Engines", SAE 922324.
6. 김경운, "스파크 점화기관의 실린더 압력 및 블럭 진동신호를 이용한 노킹측정과 해석", 연세대학교 대학원, 박사학위 논문, 1993.
7. M. D. Checkel and J. D. Dale, "Computerized Knock Detection from Engine Pressure Records", SAE860028, 1986.
8. 이택현, 전광민, "이온 프로브를 이용한 흡기중 수증기 분압, 점화시기 및 연료 형태 변화에 따른 스파크 점화기관의 화염 전파 특성 분석", 대한 기계 학회 춘계 학술 대회 논문집 pp. 128~133, 1997.
9. Kwang-min Chun, "Charaterization of Knock and Prediction of its Onset in Spark Ignition Engine", Ph.D Thesis, Massachussets Institutue of Technology, 1989.
10. J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, 1988.