

가솔린엔진 대상 성능시험시의 노킹보정률을 사용한 엔진 수정토크의 편차개선

조 윤 호^{*1)} · 김 우 태¹⁾ · 배 충 식²⁾

현대자동차 가솔린엔진시험팀¹⁾ · 한국과학기술원 기계공학과²⁾

Method of Decreasing the Deviation of Corrected Engine Torque using Knock Correction Rate in Gasoline Engine Performance Test on Dynamometer

Yoonho Cho^{*1)} · Wootai Kim¹⁾ · Choongsik Bae²⁾

¹⁾Gasoline Engine R&D Team, Hyundai Motor Company, 772-1 Jangdeok-dong, Hwasung-si, Gyeonggi 445-706, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea

(Received 31 May 2007 / Accepted 6 November 2007)

Abstract : Recent trends of development in small size gasoline engines are both to have higher compression ratio for the purpose of improved fuel consumption and to advance spark timing up to DBL in a low to mid engine speed region for a good acceleration performance of vehicles. However, there occurs the deviation of corrected engine torque results during engine performance test on dynamometer because test conditions influence the onset of knock. Therefore, this research shows the test deviation of corrected engine torque decreases when knock correction rate is used.

Key words : Engine performance(엔진성능), Knock(노킹), Spark timing(점화시기), Knock correction rate(노킹보정률)

1. 서 론

최근의 자동차용 양산엔진의 개발경향은 기술적인 측면에서의 발전이 소비자의 구매 심리를 자극하기 위한 차량의 상품성을 높이기 위한 방법으로 진행되어 가고 있는 추세이다. 일례로 일반적인 차량구매자들은 탑재된 엔진의 최고출력을 그 차의 모든 동력성능을 대변하여 이해하는 경향이 있을 정도로 엔진의 성능 향상은 차량의 상품성 효과에 직접적으로 영향을 미칠 수 있다. 특히 엔진의 전개 성능(WOT, Wide-Open Throttle Performance)은 차량의 발진가속성, 추월가속성 등의 동력성능에 직접

적인영향을 미치기 때문에 매우 중요하다고 할 수 있다.

이러한 엔진의 전개성능을 향상시키는 방법으로 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 즉, 엔진의 흡입 공기량을 더 많이 주입시켜 체적효율을 증대시키는 방법, 엔진 운동부의 마찰일을 감소시켜 기계효율을 증대시키는 방법, 밸브시기, 밸브리프트, 연료분사시기, 점화시기 등의 최적화를 통하여 연소효율을 증대시키는 방법이다.¹⁾ 특히 양산되거나 개발 중인 2.0L이하의 저배기량 가솔린엔진 탑재차량의 경우, 실용영역에서의 토크향상을 위하여 엔진의 저중속영역인 1000~3000rpm의 고부하조건 점화시기를 노킹(Knock)이 발생하는 DBL(Detonation Border

*Corresponding author, E-mail: icengine@hyundai-motor.com

Line) 조건으로 설정하고 있는 추세이다.

한편, 열효율 증가에 의한 연비향상을 목적으로 가솔린엔진의 고압축비화에 대한 많은 연구들이 진행 중이나, 이러한 압축비의 증가는 가솔린엔진의 노킹 발생을 증가시키게 된다.²⁾ 이러한 노킹을 제어하기 위하여 최근 대부분의 엔진들은 실린더블록에 장착된 Knock 센서를 사용하여 노킹에 의해 발생한 압력파의 진동신호를 기준으로 노킹발생여부를 판단한 후 노킹이 발생하면 점화시기를 지각시키고 노킹이 발생하지 않으면 점화시기를 진각시키는 방법을 사용하고 있다.

가솔린엔진의 노킹에 영향을 주는 인자들에 대한 실험으로 그동안 많은 연구가 진행되어, 각 인자들의 엔진의 연소특성, 성능, 배출가스 등에 대한 영향도 파악결과들이 발표되었다.³⁻⁶⁾ 특히 엔진 개발과정에서 토크측정을 위하여 주로 엔진 대상 (Engine Dynamometer)에서 실시되는 전개성능시험의 점화시기를 DBL로 설정할 경우, 노킹강도 (Knock Intensity)가 흡기온도, 대기압력, 습도 조건 등의 영향을 받아 동일한 엔진 및 동일한 압축비 조건에서도 수정토크(Corrected Torque)의 편차가 발생하게 된다. 본 연구에서는 동일한 엔진에서의 흡기온도, 대기압력, 습도 변화에 따른 점화시기의 변화를 측정하고, 노킹보정률(Knock Correction Rate)이라는 실험상관식 개념을 도입함으로써, 점화시기가 DBL로 설정되었을 때의 노킹발생에 의한 수정토크 편차를 줄여 그 결과들을 비교 분석하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험 대상 엔진 및 장치구성

본 연구에 사용한 엔진은 1.6L DOHC 4밸브의 상용화된 엔진으로 사양 및 제원은 Table 1에 제시하였다.

Table 1 Engine specifications

Bore × Stroke	77mm × 85.44mm
\Valve timing (IVO/IVC/EVO/EVC)	10°ATDC/63°ABDC/ 40°BBDC/3°ATDC
Compression ratio	10.5
Fuel	Gasoline (Unleaded, RON92)

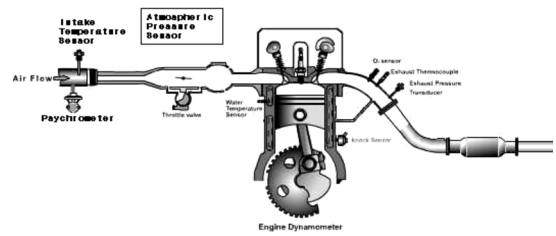


Fig. 1 Schematic diagram of engine WOT performance test

공연비(Air/Fuel Ratio)는 모든 운전조건에서 12.8로 동일하게 설정하였고, 엔진 냉각수는 출구온도 기준으로 85±1°C에서 제어하여 공연비와 냉각수온이 노킹에 줄 수 있는 영향을 배제하였다. 흡기온도와 상대습도/절대습도/수증기분압은 각각 엔진흡기 Duct내 삽입된 열전대(Thermocouple)와 건습구습도계를 이용하여 측정하였으며 대기 압력은 시험실내 설치된 대기 압력센서로 측정하였다. Fig. 1에 엔진 전개성능 시험장치의 구성도를 도시하였다.

2.2 실험 방법

본 연구는 크게 엔진 시험조건에 따른 점화시기 변화, 노킹특성을 파악하는 시험과 점화시기에 따른 토크 변화특성 및 노킹보정률 상관식을 구하는 시험으로 나누어 수행되었다.

동일한 시험실에서 연중 월별 엔진 시험조건 (흡기온도, 대기압력, 습도)의 변화를 관찰하고 점화시기 차이가 큰 두 시점에서의 노킹특성 변화를 파악하는 시험을 하였다. DBL관별은 Knock 센서에 의한 EMS(Engine Management System)의 기매핑된 Knock Calibration 결과를 이용하였다. 그리고 이와 같이 얻어진 시험결과들을 바탕으로 점화시기에 따른 토크 변화 시험(점화시기 Sensitivity 시험)과 노킹보정률 상관식을 구하는 실험을 수행하여 엔진의 전 부하성능시험 시 동일 엔진에서 발생할 수 있는 노킹발생에 의한 수정토크 보정을 평가하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 연중 월별 엔진 시험조건 변화

Fig. 2는 동일 시험실에서 1년간 관찰한 1500rpm 전개조건(A/F=12.8)에서의 월평균 상대습도, 수증기분압, 흡기온도, 대기압력, 점화시기의 변화(DBL

의 변화)를 나타낸 결과이다. 연중 엔진시험 조건은 비교적 고온다습한 6~8월의 여름철에 습도와 흡기 온도가 높고 대기 압력이 낮은 결과를 보이고 있으며, 습도의 최대 변화량은 상대습도 63%, 절대습도 70%로 나타났다. 습도가 높은 6~8월의 점화시기대 비 습도가 낮은 11~2월의 점화시기가 1~2도 지각되는 경향을 보인다.

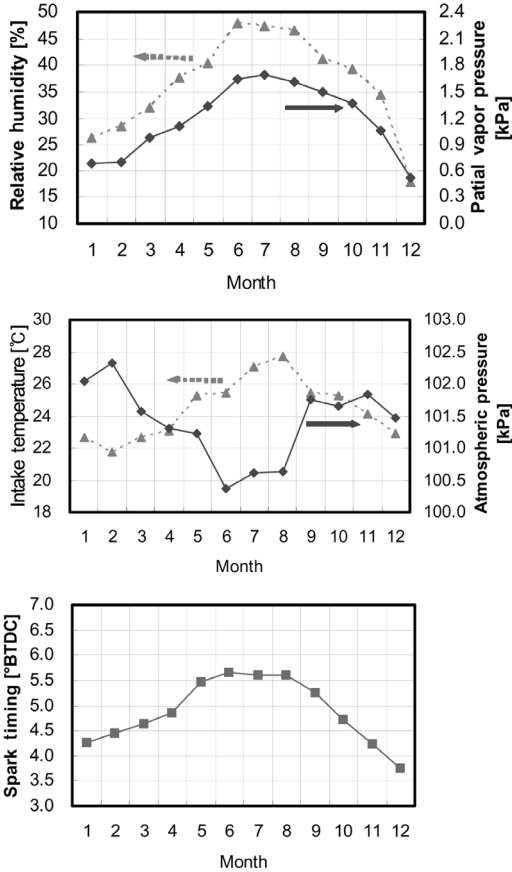


Fig. 2 Variation of test cell conditions and spark timing during one year

3.2 점화시기 Sensitivity 시험

Fig. 3은 시험엔진의 3000rpm 이하 저 중속 영역의 전개조건(A/F=12.8)에서의 점화시기를 Knock 센서 미제어상태로 DBL-1.5°에서부터 DBL+0.75°까지 0.75°간격으로 진각시켰을 때의 엔진토크의 변화를 보여준다(그래프의 붉은 심벌은 DBL을 나타냄). 실험엔진의 경우, 엔진rpm에 따라 0.61~1.15

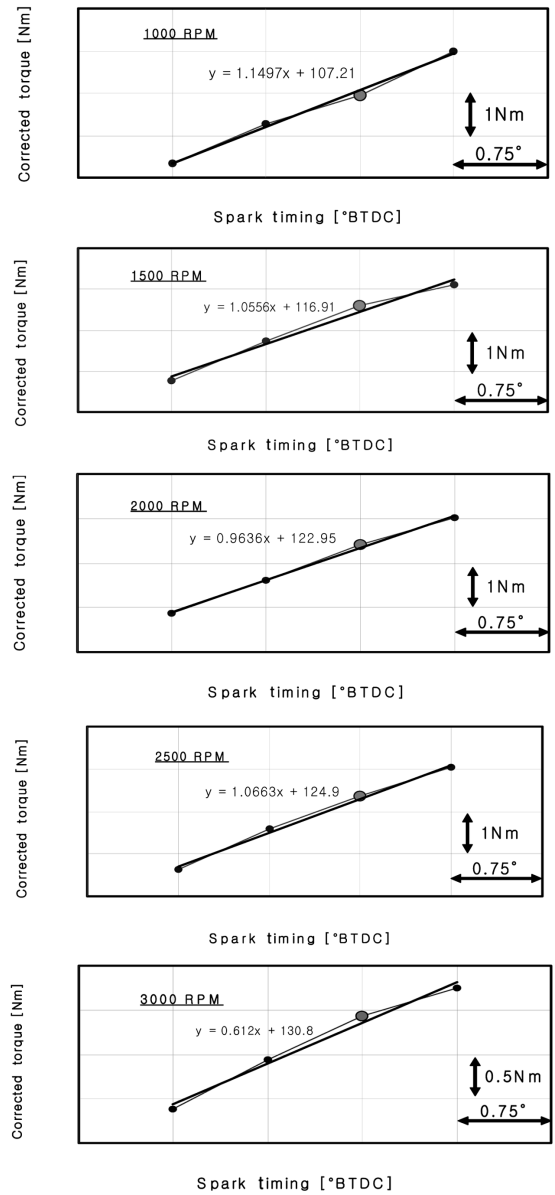


Fig. 3 Variation of engine torque according to spark timing advance

Nm/Deg의 토크 기울기값(Torque Gradient)을 갖는다. 일반적으로 가솔린엔진에서는 토크가 MBT (Minimum advance for Best Torque)에 이르기 전까지 점화시기를 진각함에 따라서 엔진토크가 증가하는 관계를 가진다. 이는 점화시기를 진각시키면 TDC 전에서의 압력상승 증가를 가져오고 TDC에서 높은 압력이 팽창행정 동안에도 높은 압력을 유지하여

결과적으로 팽창일이 증가하기 때문이다.⁷⁾

3.3 노킹보정률 상관식

Fig. 4,5,6은 각각 엔진의 전개 운전조건에서 흡기 온도, 습도(수증기분압), 대기압력 변화에 따른 DBL 점화시기의 변화 결과를 추세선(Curve-Fitting)으로 도시한 것이다.

일반적으로 엔진으로 유입되는 공기의 흡기온도가 증가하면, 연소실내 말단가스(End Gas)의 자발화 발생 가능성이 많아지는 것으로 알려져 있으며⁸⁾, 결과적으로 노킹특성이 악화되어 DBL점화시기가 지각된다. Fig. 4에서의 엔진실험 결과에서 보듯이 흡기온 10°C 증가시 DBL이 1.12°지각되는 경향을 나타내고 있다.

엔진이 운전되는 주위 공기 중의 습도가 증가하면, 흡입 공기 중의 수분함유량도 증가하여 공기의 충전 효율 감소와 화염전파속도 감소에 의한 연소 속도 및 연소온도가 감소하기 때문에 노킹발생이 억제되는 효과가 있는 것으로 알려져 있다.⁸⁾

Fig. 5에 1.11 kPa의 수증기분압 감소 시 1°의 DBL 점화시기가 지각되는 영향을 도시하였고, 절대습도 증가에 따라서 노킹발생이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6에서는 대기압력 1kPa 증가에 따라 0.33°의 DBL이 지각되는 결과를 보여 주고 있는데, 이는 엔진 운전 시 대기 압력이 증가하면 엔진의 과급효과(supercharging effect)로 인하여 체적효율이 증가하고 이에 따른 엔진의 유효압축비(Effective Compression Ratio)가 증가하여 노킹발생이 증가하기 때문이다.

본 실험에서 얻은 흡기온도, 습도, 대기 압력에 대한 DBL 점화시기 변화의 효과를 1차의 선형성을 고려하면 중첩원리(Principle of Superposition)로 다음과 같은 노킹보정률 상관식을 구할 수 있게 된다.

$$\text{Knock Correction Rate [°CA]} = 1.11\Delta P_{\text{vap}} - 1.12 \left(\frac{\Delta T_{\text{int}}}{10}\right) - 0.33 \Delta P_{\text{atm}} \quad (1)$$

노킹보정률은 표준조건대비 어떤 시험조건의 흡기온도, 습도, 대기 압력의 차이를 비교하여 노킹발생에 의한 점화시기 보정량을 의미한다. 본 실험에

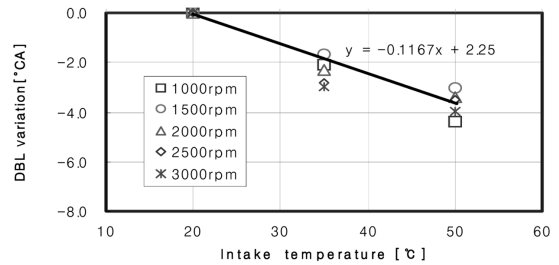


Fig. 4 Variation of DBL according to intake temperature

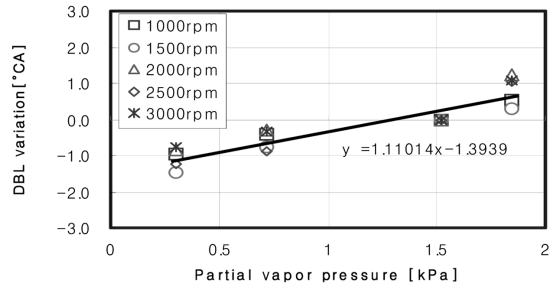


Fig. 5 Variation of DBL according to humidity condition (partial vapor pressure)

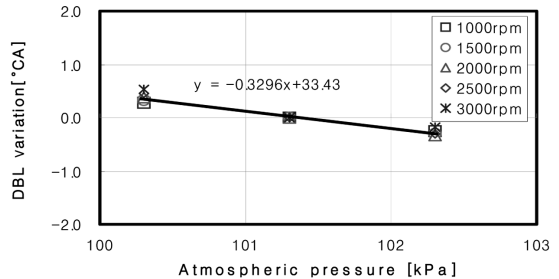


Fig. 6 Variation of DBL according to atmospheric pressure

서 정의된 표준조건인 흡기온도, 절대습도, 대기 압력은 각각 20°C, 1.52kPa, 101.3kPa이며, 식 (1)의 ΔT_{int} , ΔP_{vap} , ΔP_{atm} 은 표준조건대비 변화량을 의미한다.

3.4 노킹보정률에 의한 수정토크 보정

일정한 엔진속도에서 엔진으로 유입되는 공기량은 흡기온도, 습도, 대기압력 등의 운전조건에 따라 변하기 때문에, 일반적으로 전개상태의 엔진 성능 시험시 엔진 시험조건에 대한 표준화를 하기 위해 SAE, DIN, BS, JIS 등의 수정계수를 사용한다. 본 실험에서는 SAE 성능 수정계수를 사용하였고, 다음의 식 (2)에 의해 계산하였다.⁹⁾

$$\text{Correction Factor} = \left(\frac{99}{P_d} \sqrt{\frac{T_{\text{int}} + 273}{298}} \right), \quad P_{\text{dry}} = P_{\text{atm}} - P_{\text{vap}} \text{ [kPa]} \quad (2)$$

여기서 P_{dry} , P_{atm} , P_{vap} 는 각각 건조공기의 분압, 대기압력, 수증기분압을 나타낸다.

Table 2와 Table 3에 각각 서로 다른 엔진 운전조건과 그에 따른 엔진 실험결과를 정리하였다. Test 1은 8월의 시험결과이고 Test 2는 11월의 시험결과로 흡기온도, 대기압력, 습도 조건에서 차이를 보이고 있다.

Test 2에서 Test 1대비 엔진의 Raw토크(uncorrected torque)가 증가하였는데, 이는 흡기온도 감소와 대기압력 증가로 공기밀도가 증가하여 체적효율이 상승하였고, 절대습도 감소에 따른 유리한 연소 특성 때문인 것으로 보인다. 그러나 체적효율 증가에 의한 유효압축비 증가로 노킹특성이 악화되어

Table 2 Comparison of engine test conditions

RPM	T _{int} (°C)		P _{atm} (kPa)		P _{vap} (kPa)	
	Test1	Test2	Test1	Test2	Test1	Test2
1000	27.6	25.5	100.6	101.8	1.5888	1.0612
1500	27.7	25.4	100.6	101.8	1.6137	1.0677
2000	27.5	25.4	100.6	101.8	1.5849	1.0654
2500	27.6	25.4	100.6	101.8	1.6012	1.0233
3000	27.8	25.3	100.6	101.8	1.6326	1.0058

Table 3 Comparison of engine test results

RPM	Raw engine torque (% ^{주1)})		Correction factor (SAE)		Corrected engine torque (Nm)	
	Test1	Test2	Test1	Test2	Test1	Test2
1000	100.00	101.64	1.005	0.981	108.21	107.25
1500	100.00	101.64	1.006	0.980	122.29	121.12
2000	100.00	101.80	1.005	0.981	132.69	131.82
2500	100.00	102.22	1.005	0.980	139.59	139.13
3000	100.00	102.47	1.006	0.980	142.06	141.77
RPM	DBL spark timing (CA°) ^{주2)}		Volumetric efficiency (%)		Air density (kg/m ³)	
	Test1	Test2	Test1	Test2	Test1	Test2
1000	0.0	0.9	80.8	81.7	1.166	1.189
1500	0.0	1.1	85.1	86.1	1.166	1.189
2000	0.0	1.0	90.6	91.3	1.167	1.189
2500	0.0	0.8	91.1	91.9	1.167	1.189
3000	0.0	0.7	92.3	92.9	1.166	1.189

주1) Test2의 Raw Engine Torque는 Test1 대비 퍼센트 증가량임.

주2) Test2의 DBL점화시기는 Test1 대비 지각량임.

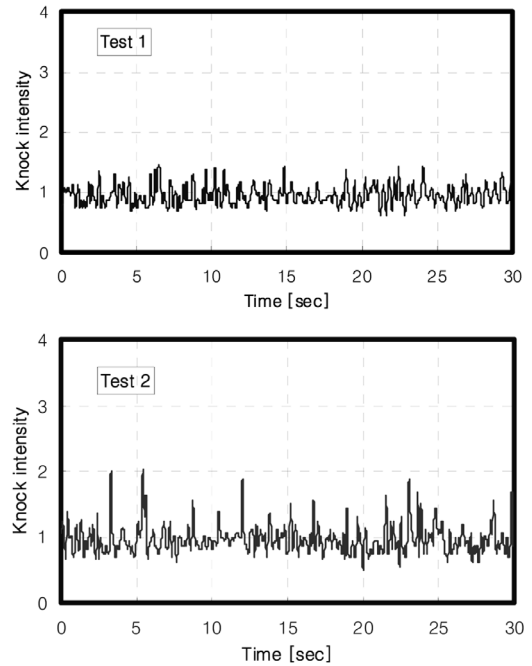


Fig. 7 Comparison of band-pass-filtered knock signals (1500rpm/WOT)

DBL 점화시기가 지각되는 결과를 가져와 엔진 수정토크는 감소하게 된다. 엔진 실린더블록에 장착된 양산차량의 Knock 센서로 1500rpm 전개조건에서 노킹강도를 측정된 결과, Fig. 7에서 보여주듯이 Test 1에서보다 Test 2에서의 노킹강도 신호가 더 악화되는 결과를 나타내었다.

식 (1)의 실험 상관식으로부터 얻은 노킹보정률과 점화시기 Sensitivity 시험에서 구한 각 rpm에서의 토크 기울기 값으로부터 노킹보정에 의한 토크량을 아래 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\text{Knock-Corrected Torque [Nm]}$$

$$= \text{Knock Correction Rate [Deg]} \times \text{Torque Gradient [Nm/Deg]} \quad (3)$$

식 (3)으로부터 최종으로 아래와 같은 노킹보정율을 고려한 총수정토크를 구할 수 있게 된다.

$$\text{Total Corrected Torque [Nm]}$$

$$= \text{Corrected Torque [Nm]} + \text{Knock-Corrected Torque [Nm]} \quad (4)$$

Fig. 8에 Test 1과 Test 2의 노킹보정률 상관식 적

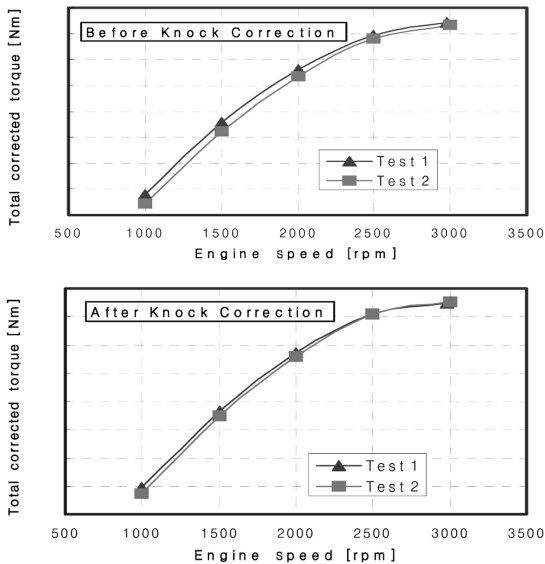


Fig. 8 Comparison of total corrected torque according to knock correction

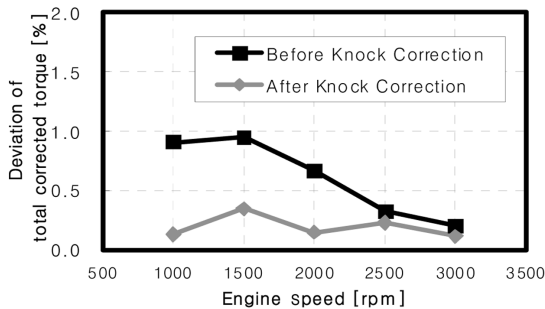


Fig. 9 Comparison of deviation of total corrected torque

용 전후에 따라 식 (4)로부터 구한 총수정토크 실험 결과를 비교하였다. 노킹보정률 상관식 적용 후 동일엔진에서의 노킹발생에 따른 성능시험 편차를 1500rpm 이하의 저속영역의 경우 1% 수준에서 시험 오차 수준인 0.5% 이하로 개선된 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

4. 결론

동일한 엔진에서 주위의 대기조건 차이에 의해 발생하는 노킹발생에 따른 엔진의 성능시험 편차를 노킹보정률 상관식 도입을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 엔진의 성능 시험 시, 흡기온도, 대기압력, 습도의 주위 대기조건 차이에 의하여 점화시기의 변화(DBL의 변화)가 나타나, 동일 엔진에서 성능 시험결과의 편차가 발생한다.
 - 2) 흡기온 10°C 증가 시 1.12°, 수증기분압 1kPa 감소 시 1.11°, 대기압력 1kPa 증가시 0.33°의 DBL 점화시기가 지각되는 되는 결과를 얻은 후, 이를 중첩의 원리로 다음과 같은 노킹보정률 상관식을 얻을 수 있었다.
- $$\text{Knock Correction Rate } [^\circ\text{CA}] = 1.11\Delta P_{\text{vap}} - 1.12 \left(\frac{\Delta T_{\text{int}}}{10} \right) - 0.33 \Delta P_{\text{atm}}$$
- 3) 각 엔진rpm에서의 점화시기 변화에 따른 토크 변화 특성을 파악한 점화시기 Sensitivity 시험을 통해 얻은 토크 기울기 값과 노킹보정률 상관식을 이용해 노킹보정에 의한 토크량을 계산할 수 있었다.
 - 4) 서로 다른 대기조건에서의 노킹보정 전후의 엔진 성능시험시의 총수정토크를 비교한 결과, 최대 1%의 편차를 시험오차 수준인 0.5% 이하로 개선시킬 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학재단의 우수 연구 센터 (ERC)의 지원 아래 연소 기술 연구 센터의 과제로써 수행되었으며, 이에 관계 기관에 감사의 뜻을 표합니다.

References

- 1) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, New York, 1988.
- 2) K. Morikawa, M. Kaneko, Y. Moriyoshi and M. Sano, "A New Combustion Method to Suppress Knocking in High Compression Ratio Spark Ignition Engine," Internal Combustion Engine Symposium, p.106, 2005.
- 3) J. A. Harrington, "Water Addition to Gasoline - Effects on Combustion, Emissions, Performance and Knock," SAE 820314, 1982.
- 4) S. S. Lee, An Experiment on the Effects of Inlet Air Temperature and Humidity on Knock, 90003818, Engine Test Report, Powertrain R&D Center, Hyundai Motor Company, 90003818,

- 1994.
- 5) T. H. Lee and K. M. Chun, "An Experimental Study of the Effects of Water Vapor in Intake Air on Combustion and Knock Characteristics in a Spark Ignition Engine," Transactions of KSAE, Vol.6, No.1, pp.205-212, 1998.
 - 6) M. Haghoie, "Effects of Fuel Octane Number and Inlet Air Temperature on Knock Characteristics of a Single Cylinder Engine," SAE 902134, 1990.
 - 7) C. R. Ferguson, Internal Combustion Engines - Applied Thermosciences, John Wiley & Sons, New Jersey, 1986.
 - 8) B. Grandin, H. Angstrom, P. Stalhammer and E. Olofsson, "Knock Suppression in a Turbocharged SI Engine by Using Cooled EGR," SAE 982476, 1998.
 - 9) R. Stone, Introduction to Internal Combustion Engines, Macmillan, UK, 1992.