

압전식 압력센서에서 발생하는 열충격 효과 정량화

이 석 환 · 최 욱 · 배 충 식*

KAIST 기계공학과

Quantification of Thermal Shock in a Piezoelectric Pressure Transducer

Seokhwan Lee · Wook Choi · Choongsik Bae*

Department of Mechanical Engineering, KAIST, 373-1 Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea

(Received 15 May 2005 / Accepted 6 July 2005)

Abstract : One of the major problems limiting the accuracy of piezoelectric transducers for cylinder pressure measurements in an internal combustion (IC) engine is the thermal shock. Thermal shock is generated from the temperature variation during the cycle. This temperature variation results in contraction and expansion of the diaphragm and consequently changes the force acting on the quartz in the pressure transducer. An empirical equation for compensation of the thermal shock error was derived from consideration of the diaphragm thermal deformation and actual pressure data. The result indicate that the thermal shock equation provides reliable correction based on known surface temperature swing.

Key words : Piezoelectric pressure transducer(압전식 압력센서), IC engine(내연기관), Thermal shock(열충격), Diaphragm(진동판), Error compensation(오차보정)

1. 서 론

크랭크 각도 수준의 해상도에서 측정되는 압력 데이터는 엔진 시스템의 성능을 평가하는데 가장 널리 쓰이는 인자중의 하나이다. 근래에는 압전식 압력센서(Piezoelectric pressure transducer)를 이용하여 실린더 압력을 측정하고 있으며, 정상 열적 조건(Steady thermal condition)에서의 정밀도는 오차가 1% 이내로 매우 정확하다.¹⁾ 하지만, 압력 센서가 간헐적인 화염(Intermittent flame)에 의해서 생기는 고온 조건에 노출되게 되면 센서의 정밀도는 상당히 감소한다. 보통 열충격(Thermal shock)이라고 불리는 압력 하강 효과가 생기는 이유는 화염에 의해서 실린더 내부 온도가 급격하게 변하고 이 온도변화

가 압력센서에 내장된 진동판(Diaphragm)을 열적 변형시키면서 생기기 때문이다. 열충격은 최대 50kPa을 넘어서는 압력 하강 효과를 만들어내며 배기 과정에서 심하게 나타나지만, 심지어는 흡기 과정에도 영향을 미쳐 도시유효평균압력(Indicated Mean Effective Pressure)값이 10% 이상의 오차를 보이기도 한다.^{2,3)}

열충격에 의한 오차를 줄이기 위한 일반적인 방법이 있는 건 아니지만, 대부분의 연구자들은 압력 센서의 설계나 효과적인 압력센서의 장착방법 개발에 많은 노력을 기울였다. 그 방법의 일환으로 열차단기(Heat shields) 부착,⁴⁾ 압전판을 실리콘으로 코팅, RTV 실리콘 사용,⁵⁾ 압력센서를 Recess 방식으로 장착,⁴⁾ 수냉식 압력 센서 사용¹⁾ 등의 방법을 이용하였다. 실리콘으로 진동판 앞부분을 코팅하거나 수

*To whom correspondence should be addressed.
csbae@kaist.ac.kr

냉식 압력센서를 사용하는 경우에는 화염에 의해 생기는 급격한 온도변화를 줄일 수 있다. 위에서 언급한 기계적인 방법들은 열충격에 의해서 발생하는 오차를 줄이는데 성공하였지만 내구성에 문제가 있거나 추가적인 공간이 필요한 단점들이 있다. 이러한 단점들 때문에 열충격을 보정하기 위한 수치적인 방법들이 제시되었다. 1967년 Brown은 압력센서의 표면온도와 열충격 사이에는 매우 밀접한 관련이 있다는 사실을 실험과 계산을 통하여 밝혀내었다.⁶⁾ 이를 바탕으로 실제 압력값을 이용하여 열충격 오차 보정식을 추정하기도 하였다.⁷⁾

본 연구에서도 열충격은 압력센서 진동판의 표면온도와 밀접한 관계가 있다는 사실에 기초하여 열충격 보정식을 개발하고 압력오차를 줄이고자 하는 시도를 하였다. 보정식을 구하기 위한 첫 번째 단계로 디젤 엔진에서 여러 엔진 회전수, 부하조건에서 무냉각 방식(un-cooled)의 압력센서와 기준 센서가 되는 수냉식(water-cooled) 압력센서의 압력값을 비교하였다. 그리고 보정식을 구한 후, 가솔린 엔진에서 운전조건(엔진회전수, 부하, 점화시기, 공연비)에 따른 열충격 효과를 살펴보았다.

2. 실험장치

본 연구에서는 압력센서 장착에 필요한 공간이 충분히 큰 대형 디젤 엔진과 엔진운전 조건에 따른 효과를 살펴보기 위한 가솔린 엔진을 각각 사용하였으며, 엔진의 사양은 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다. 열충격 측정을 위해서 두 종류의 압력센서를 디젤 엔진에 장착하였다. 첫 번째 센서는 수냉식 압력센서(Kistler 6067B)로 열충격에 의한 영향이 적으므로 기준 센서로 사용할 수 있고, 두 번째 센서는 무냉각 방식의 압력센서(Kistler 6125A)로 크기가 작아서 엔진 실린더 내부 장착이 용이하며 정확도가 뛰어나서 엔진 실린더 압력 측정에 널리 사용되고 있지만, 열충격 오차에는 취약한 모델이다. 두 가지 압력센서의 상세 내역은 Table 3에 나타내었다. 6기통 디젤 엔진의 2번 실린더를 가공하여 두 가지 타입의 압력센서를 동시에 Vertical flushing 방식으로 장착하였으며, 가솔린 엔진에는 무냉각 방식의 압력센서만 장착하였다. 압력 센서 진동판의 표면

온도를 측정하기 위하여 표면온도 측정이 가능하며 응답속도가 micro-second 단위의 고속열전대(Med-therm J-type eroding junction)을 설치하였다.

디젤 엔진에서 여러 엔진 회전수(1200, 1500, 1800rpm)와 부하(최대 엔진 부하의 10, 20, 30, 40%) 조건에서 얻은 데이터를 보정식을 구하는데 사용하였으며, 가솔린 엔진에서는 여러 운전조건에서 표면온도를 측정 한 후에 미리 구한 보정식을 사용하여 엔진운전 조건에 따른 열충격을 계산하였다.

Table 1 Specifications of the diesel engine

Specification	Resources
Type	Diesel
Cylinder	6
Bore (mm)	130
Stroke (mm)	160
Connecting Rod Length (mm)	269.3
Displacement (cc)	12000
Compression Ratio	15

Table 2 Specifications of the gasoline engine

Specification	Resources
Type	Gasoline
Cylinder	4
Bore (mm)	87.5
Stroke (mm)	101
Connecting Rod Length (mm)	151
Displacement (cc)	2400
Compression Ratio	9.4

Table 3 Technical data of the transducer

Technical data	Water-cooled	Un-cooled
Range (bar)	0~250	0~250
Sensitivity (pC/bar)	-25	-15
Natural frequency (Hz)	90	75
Temperature range (oC)	-50~350	-50~350
Linearity (%FSO)	<0.5	<0.5
Thermo shock (Bar)	<-0.2	<-0.5
Model	Kistler 6067B	Kistler 6125A

3. 실험결과

3.1 열충격 경향

Fig. 1은 수냉식 압력센서로 측정된 디젤 엔진에서의 일반적인 연소압력과 무냉각 방식의 압력센서와 비교해서 얻은 열충격에 의한 압력오차를 나타내고 있다. 열충격 현상은 화염이 진동판으로 전파되는 연소 과정에서 발생하여 팽창 과정동안 증가하면서 최고값을 보이다가 배기과정에서 회복세를 보인다. 비록 수냉식 압력센서에서도 열충격 효과를 완전히 제거하지 못하지만, 본 연구에서는 그 존재를 무시하였다. 열충격 효과는 어느 한 점에서만 존재하는게 아니라 전체 싸이클에 분포하므로 IMEP 값에도 상당히 큰 영향을 미치게 된다. 이는 IMEP 값이 전체 싸이클에서 실린더 부피 변화에 따른 압력값을 적분하여 얻기 때문이다.

3.2 배기 블로다운(Blow-down) 과정 중에 발생하는 열충격 효과

정상 운전 조건에서 압력센서에 압력이 가해지면 진동판 내부의 수정(quartz)에 기계적인 변형이 생기며, 이 변화량이 곧 압력값이다. 간헐적인 화염이 진동판에 전해지게 되면 급격한 표면온도 변화가 생기게 된다. 진동판의 양단은 고정되어 있으므로 표면온도의 변화는 y 방향으로의 부가적인 열변형을 주게 되고, 이것이 압력 오차로 작용하게 된다. 즉, 열충격에 의해서 생기는 진동판의 추가적인 열변형량이 압력오차의 원인이 되는 것이다.⁸⁾

Fig. 2는 가솔린 엔진의 배기 블로다운 과정에서 엔진 부하에 따른 실린더 압력값을 모델링 작업과

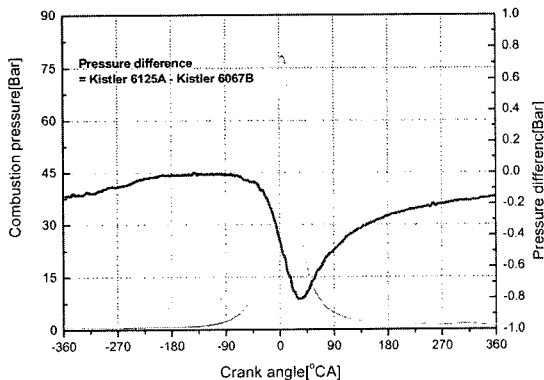
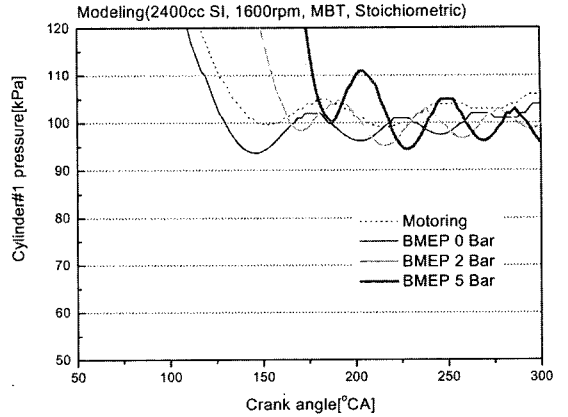
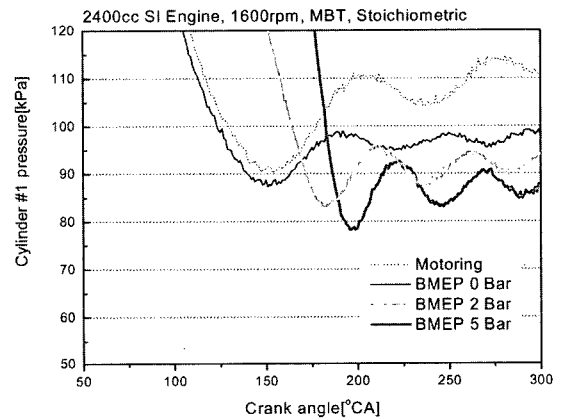


Fig. 1 Difference between the water-cooled transducer and un-cooled transducer outputs in a diesel engine (400 cycle ensemble averaged data)



(a) Modeling



(b) Experimental results

Fig. 2 Comparison of the modeling and experimental results of cylinder pressure at the blow-down process according to engine load in a gasoline engine

실험한 결과에 따라서 나타낸 것이다. 모델링 한 결과를 살펴보면 배기과정에서 실린더 압력이 엔진 부하에 상관없이 거의 대기압으로 일정하지만 실제 실험결과에서는 엔진 부하가 높은 경우(BMEP 5Bar)가 낮은 경우(BMEP 0Bar)에 비해 실린더 압력이 낮다. 이는 열충격 효과에 의한 것으로 부하가 증가할수록 열충격이 증가하여 압력 하강 효과가 크기 때문이다.

3.3 엔진회전수와 부하에 따른 표면 온도와 열충격 사이의 상호관계

측정 오차를 줄이기 위하여 400 싸이클에 대한 데이터를 받아서 평균값을 취하였으며, Low-pass 필터

터를 사용하여 변동을 줄였다. Fig. 3은 디젤 엔진에서 엔진회전수와 부하의 변화에 따른 표면온도를 나타낸 것이다. 엔진회전수의 증가에 따라서 화염이 진동판에 머무를 수 있는 시간이 감소하기 때문에 표면온도도 감소하게 된다. 엔진부하가 증가하면 최고 연소압력이 높아지게 되므로 표면온도도 증가하게 된다. 표면 온도가 최대인 점은 연소로 인해 생기는 화염이 진동판으로 전파되는 TDC(top dead center) 를 조금 지난점이다.

Fig. 4는 열충격에 의해 발생하는 압력 차이와 표면 온도 변화량과의 상관관계를 나타낸 것이다. 이 결과는 열충격에 의한 압력오차와 표면온도 변화량 사이에는 밀접한 관계식이 존재한다는 Brown⁶⁾의 예전연구를 다시 확인시켜주고 있다. 두 곡선은 서

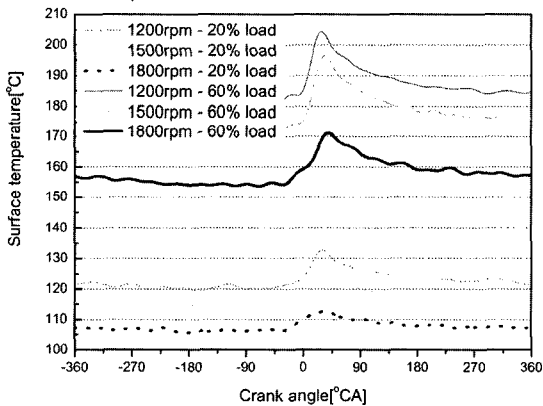


Fig. 3 Surface temperatures according to engine speed at the diesel engine

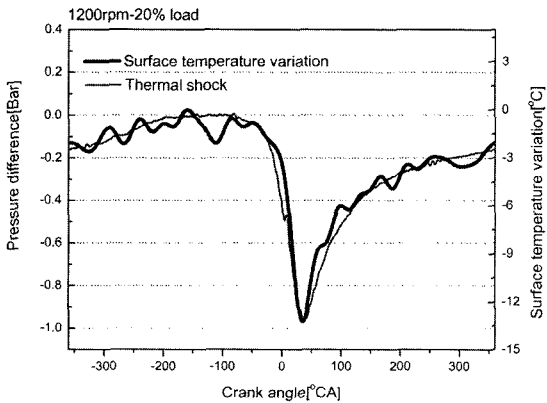


Fig. 4 Correlation between surface temperature and thermal shock at the diesel engine

로 다른 단위와 크기를 가지지만, 그 형태가 거의 동일하며 최고점이 존재하는 위치와 배기과정에서의 회복 경향이 같다.

3.4 열충격 오차 보정식에 포함되어 있는 상수 A,B를 구하는 방법

1995년에는 Higumi가 실제 압력값을 이용하여 열충격 보정식을 구하였다.⁷⁾ 열충격에 의해서 생기는 오차는 진동판의 표면온도 변화량과 비례한다는 사실에 기초해서 다음과 같은 식이 유도되었다.

$$\Delta p = -\sqrt{A\Delta T^2 + B\Delta T} \quad (1)$$

여기서, A와 B는 실험을 통하여 구할 수 있는 상수이다.

식 (1)에 포함되어 있는 상수 A, B의 값을 구하기 위하여 열충격 변화량을 제공하여 표면온도 변화량의 함수로 나타내어 본다. 식 (1)은 다음과 같이 바뀌어져서 표현이 된다.

$$\Delta p^2 = A\Delta T^2 + B\Delta T \quad (2)$$

식 (2)를 이용하여 표면온도에 따른 그래프를 그린 후 curve fitting 방법을 이용하여 실험 결과를 포함할 수 있는 2차 다항식 곡선을 구하면 A, B 값을 구할 수 있다. Fig. 5는 여러 엔진 회전수에서 2차 다항식 곡선을 이용하여 A, B 값을 구하는 방법을 나타내고 있다. 2차 곡선은 실험결과를 잘 포함하고 있으며, 표면 온도 변화량 곡선의 변동을 줄이면 더 정확한 결과를 얻을 수 있다.

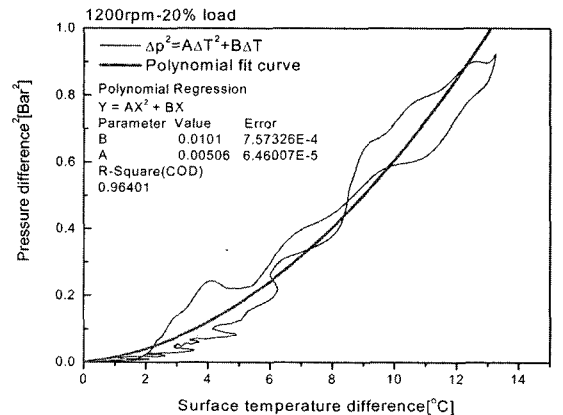


Fig. 5 2nd order of polynomial fit curve to determine constants A, B

Table 4는 12번의 엔진 실험으로부터 구한 상수 A, B 값을 정리한 것이다. 정확도를 나타내는 R₂ 값은 모든 경우에서 90% 이상을 보이고 있다. A, B의 평균값은 각각 62.7과 3.5이며 식 (1)은 최종적으로 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta p(kPa) = -\sqrt{62.7\Delta T^2 + 3.5\Delta T} \quad (3)$$

Table 4 Constants A and B from the experimental results

Set	A	B	R-square
1(1200-10)	65.4	0.5	91.7%
2(1200-20)	50.6	101	96.4%
3(1200-30)	60.2	-19.5	94.0%
4(1200-40)	69.5	-55.3	96.5%
5(1500-10)	57.9	-11.4	96.3%
6(1500-20)	53.4	36.5	97.2%
7(1500-30)	62.9	1.5	95.3%
8(1500-40)	64.4	-9.7	97.4%
9(1800-10)	66.7	-30.2	98.1%
10(1800-20)	73.0	-20.9	97.0%
11(1800-30)	63.2	-22.5	94.2%
12(1800-40)	65.2	69.2	96.5%
Mean value	62.7	3.5	-

Fig. 6은 실험으로부터 구한 12개의 열충격 오차 보정식과 평균값으로 구한 대표 보정식을 나타내고 있다. 모든 곡선들은 표면 온도 변화량과 열충격 사이에 비례하는 관계를 보인다. 상수 A, B의 평균값으로 구한 대표 보정식도 나머지 곡선들과 거의 동일한 경향을 보이고 있다.

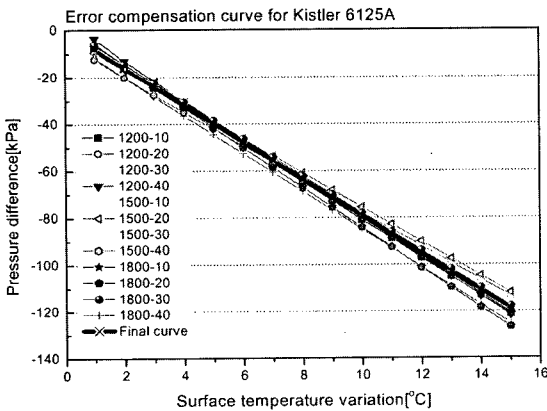


Fig. 6 Thermal shock error compensation equations and final representative curve

3.5 가솔린 엔진에서 운전 조건이 열충격에 미치는 영향

Fig. 7 ~ Fig. 10에서는 가솔린 엔진에서 엔진회전수, 부하, 분사시기, 공연비의 운전조건이 열충격에 미치는 영향을 나타내었다. 또한, 시험센서(Kistler 6125A)에서 측정된 IMEP 값과 보정식 (3)을 사용하여 보정된 값으로 계산한 IMEP 값의 차이도 각각의 그래프에 표시하였다.

엔진회전수 변화가 열충격에 미치는 영향을 Fig. 7에 나타내었다. 열충격은 낮은 엔진회전수 조건인 1200rpm에서 -37kPa(-2.87% IMEP error)의 최대값을 보인다. 열충격이 2800rpm보다 1200rpm 조건에서 더 큰 이유는 압력 센서의 진동판이 낮은 엔진회전수에서 온도 변화 조건에 더 오래 노출되며, 이는 진동판에 전달되는 열이 증가하기 때문이다. 하지만, 각각의 엔진회전수 조건에서 열충격의 차이는 크지 않다. 엔진회전수 1200rpm에서 2800rpm 사이의 결과를 살펴보면 최대 열충격은 -34kPa에서 -37kPa 사이에 존재하고 있으며, IMEP 오차는 -2.78%에서 -2.82% 정도이다.

Fig. 8은 엔진부하가 열충격에 미치는 영향을 나타낸 그래프이다. 엔진부하는 열충격에 가장 큰 영향을 미치는 조건이다. 엔진부하가 커지면 실린더의 최고 압력도 증가하게 되고, 결국 표면온도의 변화량도 증가한다. 최대 열충격은 엔진부하가 BMEP 2Bar에서 BMEP 9.5Bar(WOT)로 증가함에 따라

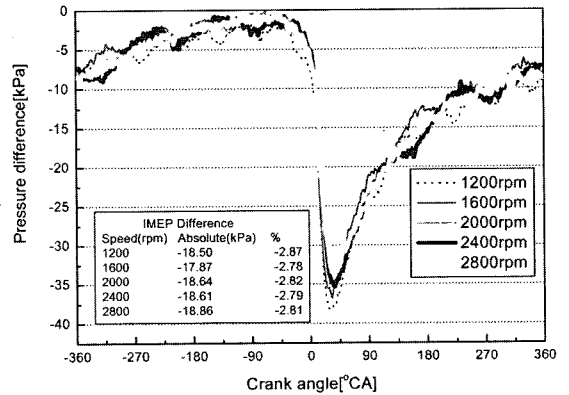


Fig. 7 Effects of engine speed on thermal shock error of an un-cooled transducer in a gasoline engine. BMEP 6Bar, Stoichiometric AFR, MBT conditions (300 cycle averaged data)

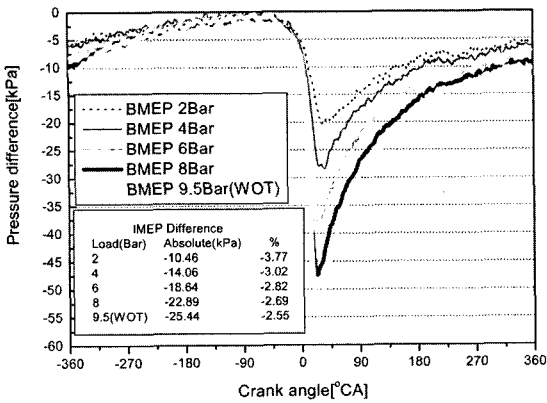


Fig. 8 Effects of engine load on thermal shock error of an un-cooled transducer in a gasoline engine. 2000rpm, Stoichiometric AFR, MBT conditions (300 cycle averaged data)

-20kPa에서 -54kPa까지 변화를 보인다. IMEP 값의 오차는 -3.77%에서 -2.55% 사이로 계산되었다. 부하의 증가에 따라서 열충격과 IMEP 값의 절대값은 증가하지만, 높은 부하에서 상대적으로 IMEP 값이 크기 때문에 퍼센트 값은 오히려 감소한다.

Fig. 9는 점화시기가 열충격에 미치는 영향을 나타낸 그래프이다. 점화시기가 진각 될수록 표면온도의 변화량은 커지며, 이는 곧 열충격의 증가로 이어진다. 최대값은 점화시기가 MBT(Maximum Brake Torque) 조건에서 15도 진각 되었을 때 -52kPa(-3.81 IMEP error)로 측정되었다. 점화시기가 진각되면

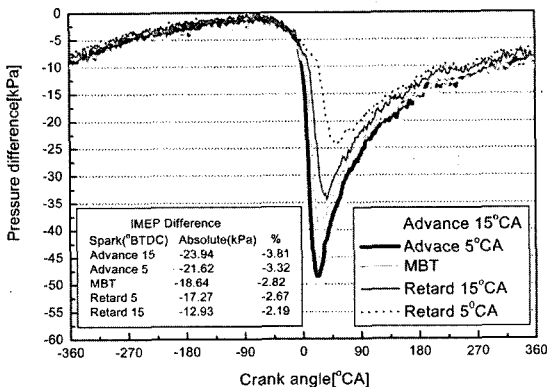


Fig. 9 Effects of ignition timing on thermal shock error of an un-cooled transducer in a gasoline engine. BMEP 6Bar, 2000rpm, Stoichiometric AFR conditions (300 cycle averaged data)

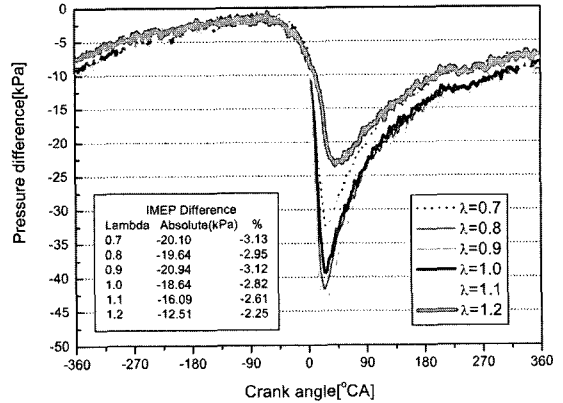


Fig. 10 Effects of air/fuel ratio on surface temperature and thermal shock error of an un-cooled transducer in a gasoline engine. BMEP 6Bar, 2000rpm, MBT conditions (300 cycle averaged data)

연소 지속 기간이 길어져서 센서의 진동판이 화염에 노출되는 시간도 길어지며, 연소압력과 표면온도가 높아지므로 열충격도 커지는 것이다.

Fig. 10은 공연비가 열충격에 미치는 영향을 나타낸 그래프이다. 열충격은 약간 농후한 영역인 공연비 0.9인 조건에서 최대치를 나타내고 있다. 공연비가 0.7에서 1.2로 변화함에 따라서 열충격은 -12.51 kPa에서 -20.94kPa로 변하며, IMEP 오차는 -2.25%에서 -3.12% 사이 값을 나타내고 있다. 공연비의 변화에 따른 열충격은 일정한 경향을 설명하기 어렵다. 이것은 희박한 공연비 영역의 경우에는 연소압력이 낮음에도 불구하고 화염 전파 속도가 느리기 때문에 화염이 센서의 진동판에 머무를 수 있는 시간이 늘어나는 반면, 농후한 영역의 경우에는 실린더 압력은 높지만 연소 속도가 빨라서 화염이 진동판을 빨리 스쳐 지나간다. 이런 복합적인 요인들에 의해서 열충격 효과가 일어나는 것이다.

Fig. 11은 가솔린 엔진에서 열충격을 보정한 경우와 보정하지 않았을 경우 측정되는 실린더 압력을 흡기, 배기과정에서 나타낸 것이다. 열충격 오차는 흡기과정에 비해서 배기과정에서 심각하게 발생하며, 오차 보정을 하지 않은 경우에는 배기과정에서 큰 차이가 발생함을 알 수 있다. 하지만, 오차 보정을 한 경우에는 압력곡선이 이론적인 궤적을 따라가고 있다. 이 결과는 무냉각 방식 압력 센서에서 발

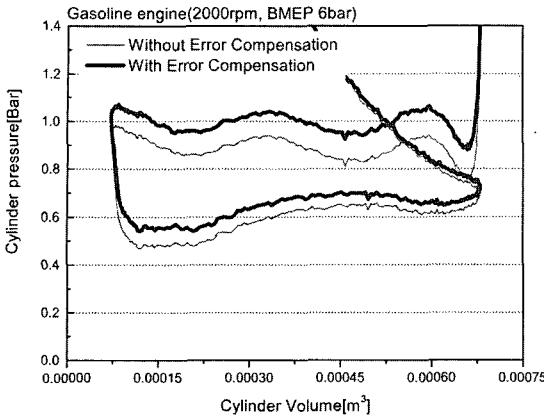


Fig. 11 Comparison of the pressure traces with and without error compensation for the gasoline engines

생하는 열충격은 (3)식을 이용하여 보정이 가능하다는 사실을 보여주고 있다.

3.6 열충격에 의해서 발생하는 IMEP 오차를 줄이기 위한 오차 보정식 개발

IMEP는 전체 싸이클에서 실린더 부피 변화에 따른 압력을 적분하여 구한 값이므로 열충격은 IMEP 값에 큰 영향을 미치게 된다. Fig. 12는 엔진 운전 조건에 따른 IMEP 오차와 실린더 최대압력과 관계식을 각각 그룹별로 나타낸 것이다. 엔진부하는 관계식에 가장 큰 영향을 미치는 인자이며, 부하의 변화에 따라서 IMEP 오차는 최대 압력값과 비례하는 관계에 있다. 부하 조건과 비슷하게 분사시기와 공연비 조건에서도 최대 압력에 비례해서 IMEP 오차 값이 증가한다. 엔진회전수 조건에서는 선형적인 관계를 보이지 않으나, 무시할 수 없을 정도의 오차를 보인다. 이전 연구에서도 엔진 부하가 최대압력과 IMEP 오차 사이의 관계에서 가장 큰 영향을 미치며, 엔진 회전수 또한 무시할 수 없는 영향을 미친다고 하였다.³⁾ IMEP 오차는 최대 압력치에 비례하며, 엔진회전수 변화에 의해서 생기는 오프셋(offset)이 있다는 점을 이용하여 다음의 IMEP 오차 보정식 (4)를 구하였다. 이 식은 본 연구에 사용한 실험엔진에서만 유효한 보정식이다.

$$IMEP_{corr} = IMEP_{meas} + (F \times P_{max}) + offset \quad [Bar] \quad (4)$$

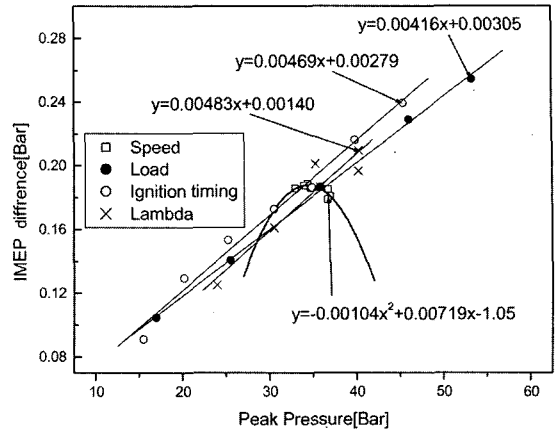


Fig. 12 Identification of the individual effects of speed, load, ignition timing and AFR on the correlation between IMEP difference and peak pressure

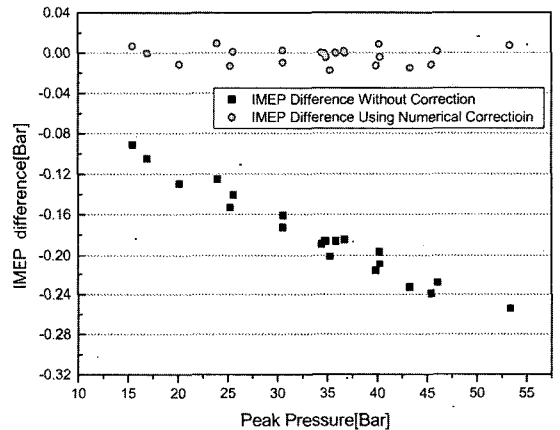


Fig. 13 Absolute IMEP difference between measured and modified with thermal shock correction equation versus the peak pressure with and without the use of the thermal shock correction

$$F = 0.0000834 \left(\frac{rpm}{1000} \right) - 0.00051 \left(\frac{rpm}{1000} \right) + 0.00502$$

$$Offset = 0.01534 \left(\frac{rpm}{1000} \right)$$

이 보정식의 정확도를 확인하기 위하여 수냉각 방식의 압력센서에서 구한 IMEP 값과 열충격 오차를 보정한 후 구한 IMEP 값의 차이를 IMEP 오차 보정식을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 대하여 비교해 보았다. Fig. 13은 최대 압력의 변화에 따라 IMEP 오차 보정식을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에서의 IMEP 차이값을 비교한 그래프이다.

오차 보정을 하지 않은 경우에는 최대 압력의 증가에 따라서 IMEP 차이도 증가하였지만 보정 한 경우에는 최대 압력에 상관없이 거의 IMEP 차이가 없다.

4. 결론

열충격에 의해서 생기는 압력센서 오차를 표면온도 변화량을 측정하여 조사하였다. 또한, 열충격과 열충격에 의해 발생하는 IMEP 오차를 줄이기 위한 수치적인 오차 보정식을 개발하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 압력센서 진동판의 표면온도 변화량과 압력센서에서 발생하는 열충격은 밀접한 상관 관계가 있다.
- 2) 엔진 실린더에 장착된 무냉각 방식에서 발생하는 열충격은 실험적으로 구한 보정식에 의해서 보정 할 수 있다.
- 3) 열충격 오차 보정식을 이용하여 가솔린 엔진에서 엔진회전수, 엔진부하, 점화시기, 공연비 등의 엔진운전 조건이 열충격에 미치는 영향을 살펴 보았다. 열충격은 엔진회전수가 낮을수록, 엔진부하가 커질수록, 점화시기가 진각 될 수록, 공연비를 약간 농후하게 하는 조건에서 최대가 된다.
- 4) 열충격에 의해서 발생하는 IMEP 오차도 보정식을 적용하여 오차를 줄일 수 있다. IMEP 계산 결과에서 엔진부하와 엔진회전수 조건이 오차에 가장 큰 영향을 주었다. IMEP 오차 보정식은 모든 엔진조건에서 정확한 IMEP 값을 계산하는데 있어 유용하다.

후 기

본 연구는 두뇌한국 21(BK 21), 미시간 대학(University of Michigan), 국가지정연구실 사업(National Research Laboratory scheme)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

References

- 1) R. H. Kuratle and B. Marki, "Influencing Parameters and Error Sources During Indication on Internal Combustion Engines," SAE 920233, 1992.
- 2) P. V. Puzinauskas, J. C. Eves and N. F. Tillman, "Measuring Absolute-Cylinder Pressure and Pressure Drop Across Intake Valves of Firing Engines," SAE 941881, 1994.
- 3) H. S. Rai, M. F. J. Brunt and C. P. Loader, "Quantification and Reduction of IMEP Errors Resulting from Pressure Transducer Thermal Shock in an S.I. Engine," SAE 1999-01-1329, 1999.
- 4) A. L. Randolph, "Cylinder-Pressure-Transducer Mounting Techniques to Maximize Data Accuracy," SAE 900171, 1990.
- 5) R. A. Stein, D. Z. Mencik and C. C. Warren, "Effect of Thermal Strain on Measurement of Cylinder Pressure," SAE 870455, 1987.
- 6) W. L. Brown, "Methods for Evaluating Requirements and Errors in Cylinder Pressure Measurement," SAE 670008, 1967.
- 7) A. Higumi, T. Suzuki, M. Yoshida and Y. Oguri, "Improvement of Error in Piezoelectric Pressure Transducer," SAE 1999-01-0207, 1999.
- 8) H. J. Schafer, "Thermal Stress on a Piezoelectric Pressure Transducer in the Combustion Chamber of an SI Engine," SAE 850374, 1985.
- 9) P. V. Puzinauskas, W. M. Mathis and M. A. Dzieciuch, "Quantification and Modeling the Effects of Thermal Shock on Combustion Pressure Transducers," SAE 2001-01-3491, 2001.
- 10) S. H. Lee and C. S. Bae, "Quantification the Effects of Thermal Shock in Piezoelectric Pressure Transducer," Fall Conference Proceedings, Vol.II, KSAE, pp.378-383, 2004.