

열전대 보상회로에 의한 실린더 내에서의 압축온도 측정 Measurement of Compression Temperature in Cylinder by using the Compensation Circuit of Thermocouple

권 순 익*
Soon-Ik Kwon*

<Abstract>

The purpose of this study is to measure the compression temperature in cylinder by using the fine thermocouple. As for using the thermocouple, it's response time delay should be regarded, even if it is a fine one. So, the output of thermocouple needs some compensation. The compensation circuit, which consists of a differential and an adding circuit is used for the compensate the time lag. And the time constant of the compensation circuit is determined the time between the TDC and the maximum point of the thermocouple output. Using this compensation circuit, the compression temperature is investigated of the cylinder in the diesel engine.

Key words : *Thermocouple, Compression Temperature, Response Time Delay, Compensation Circuit*

1. 서 론

실린더 내에서의 압축온도는 연료의 착화지연기간에 큰 영향을 미치며, 특히 디젤기관에서의 착화지연기간은 연소에 영향을 미쳐 기관의 성능과 배기배출물에 영향을 주고 있다. 따라서 실린더 내의 압축온도는 기관의 성능뿐만 아니라 배기 특성에도 영향을 미치고 있다.

실린더 내에서의 압축온도를 측정하는 방법은 크게 2가지로 나눌 수 있다. 하나는 압축 개시점부터 배기 밸브가 열리기 직전까지의 기간 내에서 적용 가능한 이상기체의 상태방정식을

이용하여 계산에 의해 구하는 방법이고, 다른 하나는 열전대나 저항온도계 등을 이용하여 직접 측정하는 방법^{1)~5)}이다.

계산에 의해 구하는 경우, 압축시작점의 온도와 압력 및 압축종료시의 압력으로부터 폴리트로프 지수를 구하면, 압축 직후의 실린더 내의 온도와 압축비 및 폴리트로프 지수로부터 압축 후의 온도를 구할 수 있다. 이 때 구해지는 온도는 실린더 내의 가스의 평균온도가 된다.

두 번째 경우는 열전대나 저항온도계를 이용한 접촉식 방법과 방사온도계를 이용한 비접촉

* 정회원, 두원공과대학 기계과 부교수, 工博
일본 廣島大學 졸업
456-890, 경기도 안성시 죽산면 장원리 678
E-mail : sikwon@doowon.ac.kr

본 연구는 두원공과대학의 학술연구비의 지원에 의하여 수행되었습니다.

방식이 있으나, 사용상의 편리성과 경제적인 면에서 접촉방식이 많이 이용되고 있다. 이 접촉방식을 이용하여 얻어진 온도는 실린더 내에 설치된 온도 센서 주위의 부분적인 온도이다.

열전대를 이용하여 온도를 계측하는 경우, 아주 가는 선을 이용한다 해도 그 열용량 때문에 반드시 응답지연이 존재한다. 이 응답지연을 보상해 주지 않으면 실제 온도보다 어느 시간 지연 뒤에 최고 온도가 출력되며, 그 최고온도도 실제 온도와 상당한 차이를 나타내게 된다. 그 차이는 응답지연이 길면 길수록 최고 온도차도 크게되어 정확한 온도 계측을 위해서는 반드시 응답지연을 보상해 주어야 한다.

응답지연을 보상해 주는 방법으로는 열전대의 응답지연을 보상회로를 이용하여 순간 순간의 변화를 자동적으로 보정해 주는 방법과 블로우바이 가스량을 실제로 측정하여 계산식에 의해 보정해 주는 방법 및 실험에 의해 열전대의 응답지연 시간을 정확히 계측하여 그 시간만큼만 보상해 주는 방법 등이 있다.

본 연구에서는 간편성 및 정확도 측면에서 열전대를 실린더 내에 삽입하여 가스 온도를 직접 측정하였으며, 그 출력을 OP Amp의 연산기능을 이용한 보상회로에서 응답지연을 보상하여 실린더내의 압축온도를 구하였다.

2. 열전대에 의한 온도계측의 원리^{6)~9)}

열전대를 이용하여 과도현상의 온도변화를 측정할 때, 점점의 열용량과 열전달율에 의해 응답지연시간, 즉 시정수(Time constant)는 존재하나, 보상회로를 이용함으로써 변동온도의 측정도 가능하다. 이 방법은 최초 Shepard⁸⁾에 의해 확립되어 Lockwood 등⁹⁾에 의해 화염중의 변동온도 측정에 이용되었다.

지금 이용된 열전대의 금속선이 어느 정도 가늘고, 점점의 직경이 금속선과 동일하며, 단면내의 온도가 일정하다는 가정 하에서 온도 T °K의 가스 중에 가는 금속선을 놓아두고, 그 양 끝은 금속선과 동일한 재료로 만들어진 직경이 큰 지주로서 고정되어 있다고 할 때, 그 한 쪽 끝에서 거리 x의 점에 있어서의 가는 금속선의 온도 θ °K는 전기저항의 온도계수를 무시하면 다음 식으로 표시된다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = K \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{1}{\tau} (T - \theta) \quad (1)$$

여기서 K : 온도전도율 t : 시간

T : 주위 가스의 실제온도

θ : 열전대 출력상의 온도

τ : 금속선의 온도변화의 시정수
(Time constant)

식(1)에서, 우변 제1항은 지주에의 열전도에 관한 항으로 실제 측정을 할 경우, 선의 직경에 대해 열전대의 길이가 200배 이상이 되면 무시할 수 있으므로

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{\tau} (T - \theta) \quad (2)$$

따라서, 식(2)로부터

$$T = \theta + \frac{1}{\tau} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3)$$

여기서, 시정수 τ 는 다음의 방법으로 구할 수 있다.

τ 는 열용량과 열전달률에 의존하므로 열용량이 일정할 때는 Nusselt 수와 다른 몇 개의 무차원수로 정리되며, 이 경우는 Nusselt수(Nu) 혹은 Reynolds수(Re)로서 설명될 수 있다.

$$\tau = \frac{c \cdot \gamma \cdot d^2}{4 \cdot Nu \cdot \lambda} \quad (4)$$

$$Nu = C \cdot \sqrt{Re} = C \left(\frac{\omega \cdot d}{\nu} \right)^m \quad (5)$$

여기서,

c : 비열 γ : 비중량 λ : 열전달율

C : 정수 ω : 유속 d : 선 직경

ν : 동점성계수 m : 0.4 ~ 0.6

따라서 계측에 사용된 열전대의 위치에서의 가스의 유속을 알면 식(4)로부터 τ 가 구해지나, 측정점의 유속을 계측하는 것은 곤란하므로 본 연구에서는 실제 열전대 출력의 응답지연을 계측하는 방법으로 시정수 τ 를 구하여 온도를 보정하였다.

3. 실린더 내의 압축온도 측정방법 및 장치

3.1 열전대 응답지연 시간 보상회로

실린더 내의 온도 측정은 선경 $\phi 50 \mu\text{m}$ 의 K

형의 열전대를 이용하였으며, 점점의 열용량과 열전달율에 의해 응답지연이 발생한다. 이 응답지연을 보상하기 위해서 열전대의 출력을 1차 지연으로 보고 OP 앰프의 연산기능을 이용한

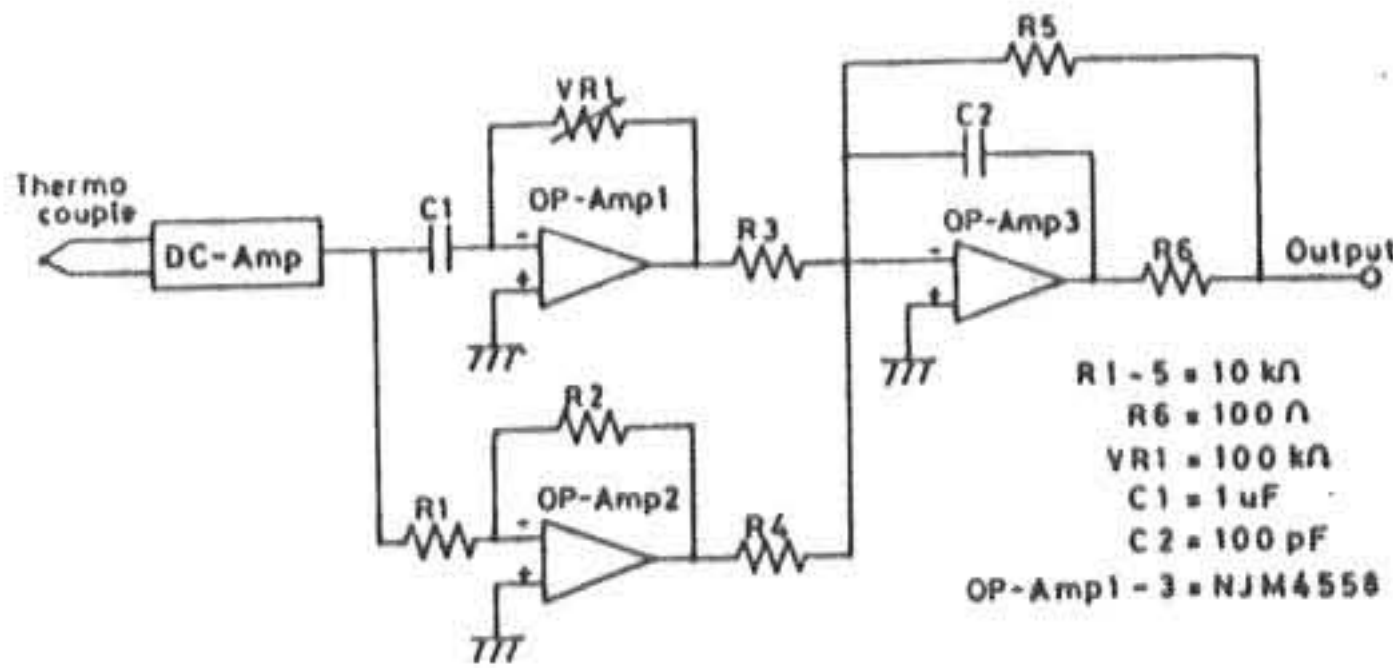


Fig.1 Compensation Circuit

보상회로를 만들어 응답지연에 따른 실린더내 온도의 보상을 하였다. 앞서 설명한 식(3)이 그 기초식으로 Fig.1에 미분회로와 가산회로로 구성된 보상회로를 나타낸다.

3.2 열전대의 응답지연 시간 측정

열전대의 응답지연을 측정하기 위해 Fig.2과 같은 장치를 고안하였다. 모터와 크랭크 기구②를 사용하여 열전대③의 선단을 히터⑥에 의해 가열된 열풍이 흐르고 있는 원통 내에 출입시킨다. 이 경우 원통내의 온도는 약 200℃, 압력은 대기압, 열전대가 열풍내를 출입하는 회수는 매분 600회이다. 이 조건하에서 열전대의 선단이 원통내의 최고 온도점에 도달할 때의 펄스 발생기①에서 발생하는 펄스와 열전대 출력의 최고값을 나타낼 때까지의 시간차 τ_2 를 디지털 메모리 스코프를 이용하여 측정한 결과 열전대의 응답시간 지연은 26ms이며, 이때 모터링 하에서의 공기유동은 무시하였다. 이 측정치와 응답지연 측정장치의 분위기조건 및 예상되는 실린더 내의 분위기조건 하에서 Scadion 등¹⁾의 식(6)을 이용하여 엔진 모터링 때의 실린더 내에서의 열전대의 응답지연 τ_1 을 계산하였다.

식(6)은 기관회전수 300rpm 하에서 선경 10 μm , 25.5 μm , 38 μm 의 저항온도계를 이용하여 실린더 내의 압축온도를 측정한 결과로부터 구한 식이다.

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{0.5} \left(\frac{N_2}{M}\right)^{0.5} \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{0.07} \quad (6)$$

여기서,

τ_1 : 기관에서의 열전대의 응답지연시간(ms)

τ_2 : 응답지연측정장치에서 얻은 열전대의 응답지연시간(ms)

P_1 : 실린더내 압력(3.0MPa)

P_2 : 측정장치에서 열풍내의 압력(0.1MPa)

T_1 : 실린더내의 온도(700~900K)

T_2 : 측정장치에서 열풍의 온도(473K)

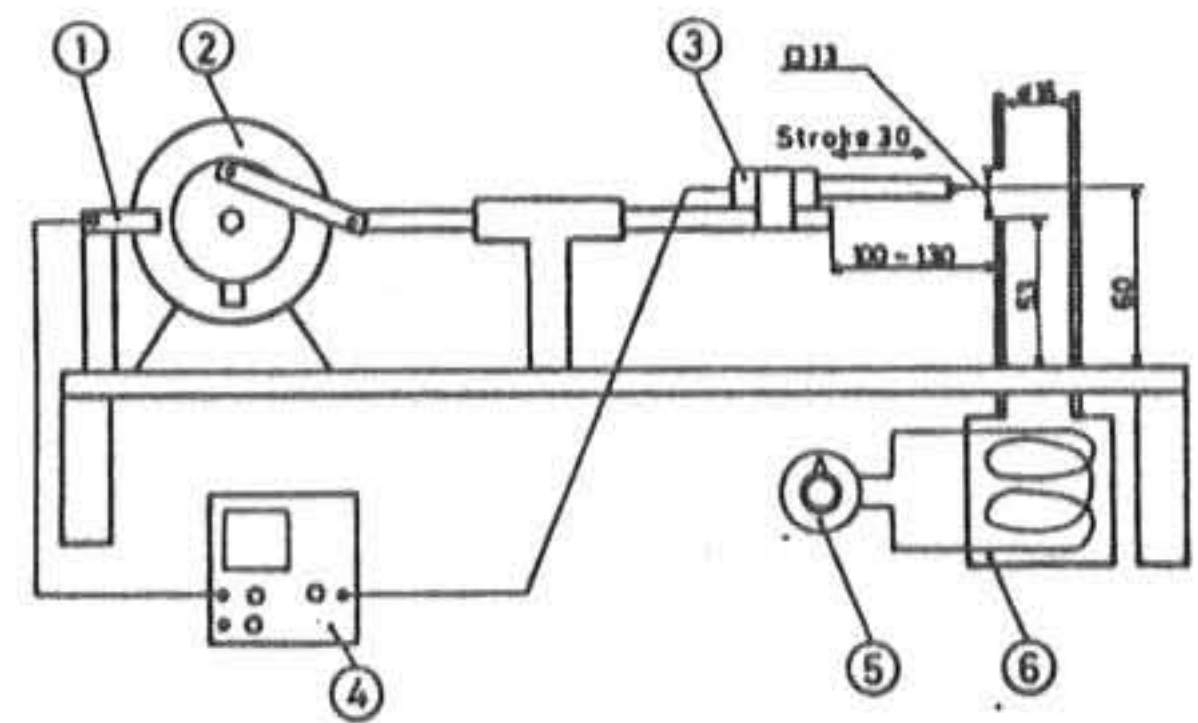


Fig.2 Apparatus to Measure the Response Delay Time

3.3 응답지연시간의 결정

디젤기관을 모터링 운전 할 때의 열전대의 출력과 보상된 실린더 내의 압축온도 곡선을 Fig.3에 나타낸다.

여기서 점선은 열전대로서 측정된 보상전의 실린더내의 압축온도 곡선이며, 실선은 열전대 출력의 최고점이 TDC에 오도록 보상한 온도곡선이다. 또한, 일점쇄선은 식(6)을 이용하여 얻어진 응답지연시간(τ_1)을 시정수로서 보상한 온도곡선을 나타내고 있다.

우선 식(6)에 의해 계산된 응답지연시간($\tau_1 = 4.88\text{ms}$)을 보상회로의 시정수로서 보상한 후의 열전대의 출력 즉 온도를 구한 것이 Fig.3의 온도곡선(B)이며, 보상되기 전의 열전대 출력의 최고점과 TDC 사이의 시간차(Fig.3에서의 Time Delay)를 보상회로를 이용하여 보상한 곡선이 (A)이다. 이 경우 열전대 출력의 최고점과 TDC사이의 시간차는 약 4.11ms이고, 온도곡선 (A)와 (B)의 최고 온도점의 위상차는 그림에 나타낸 것처럼 0.77ms(4.7 °CA)이다.

Fig.3에서 온도곡선(B)가 최고온도를 나타낼 때의 (A),(B)의 온도차는 최대 약 18℃에 지나

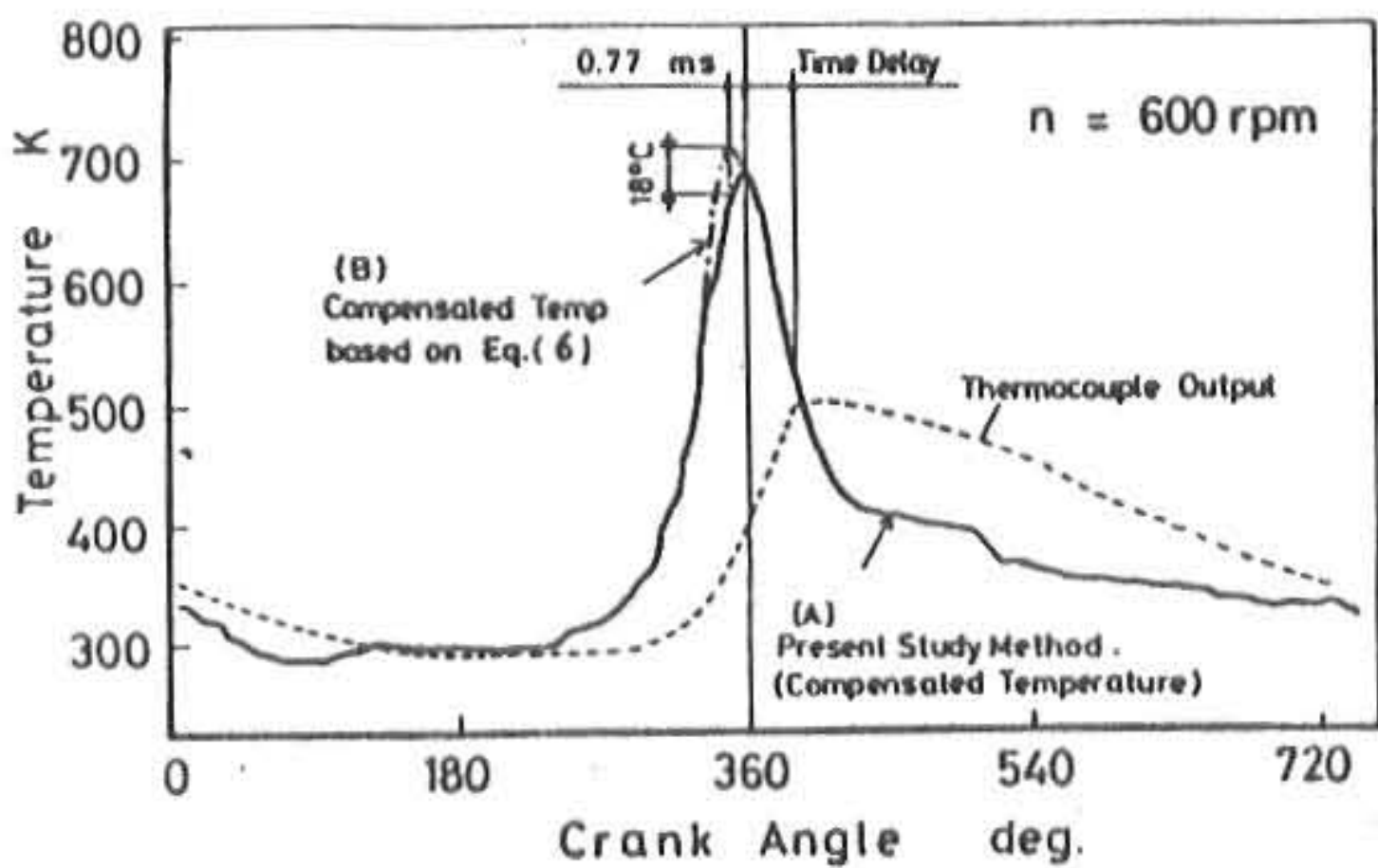


Fig.3 Compensated Temperature in Cylinder

지 않는다. 두가지 방법에 의해 계측된 온도차가 작기 때문에 본 연구에서는 편의상 TDC에 최고온도가 되도록 열전대 출력을 보정한 온도곡선을 실린더내의 가스온도로 사용하였다.

3.4 압축온도의 계측장치 및 방법

실린더 내의 온도 측정은 선경 $\phi 50 \mu\text{m}$ 의 K형의 열전대를 연료분사 노즐내에 삽입하는 방식으로, 열전대 접점의 위치는 벽면으로의 열손실 효과가 가장 적은 위치인 연소실 중앙에 Fig.4와 같이 설치하였다.

압축온도 계측에 사용된 기관은 직경 135mm, 행정 130mm의 단기통 직접 분사식 디젤 기관이며, 압축비는 15.5이다. 실험에 이용된 압축온도 계측장치의 개략도를 Fig.5에 나타낸다.

실험은 냉각수 및 오일 온도를 $80 \pm 3^\circ\text{C}$ 의 상태로 유지하며, 기관 회전 속도를 600rpm으로 고정하여 열전대로서 압축 및 팽창행정 시의 온도를 계측하였다. 흡기 온도는 흡기 포트 입구에서 측정하였으며 흡입 공기량은 서어지 탱크 입구에 설치된 공기 유량계로서 측정하였다. 실린더 내의 압축압력 측정은 피에조식 압력 변환기(AVL, QC32C-E)를 그 끝단이 연소실 bowl의 가장자리에 오도록 설치하여 측정된 압력 변환기의 출력 신호를 기록하였다. 또한 실린더내의 압축온도 변화를 위해 서어지 탱크 내에 히터를 설치하여 흡입 공기의 온도를 변화시켰다.

열전대에는 전기식 빙점조에 보상접점을 만들어 이것을 기준온도 0°C 로 하였으며, 열전대의 출력은 직류 증폭기를 이용하여 100배 증폭

시켰다.

각 데이터의 샘플링은 플라이휠에 부착된 720개의 기어를 전자 픽업(Pick up)으로 출력시켜 0.5°degCA 간격으로 샘플링 하였으며, 그 결과치는 100사이클의 평균값으로 나타내었다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 열전대 선경에 따른 압축온도 비교

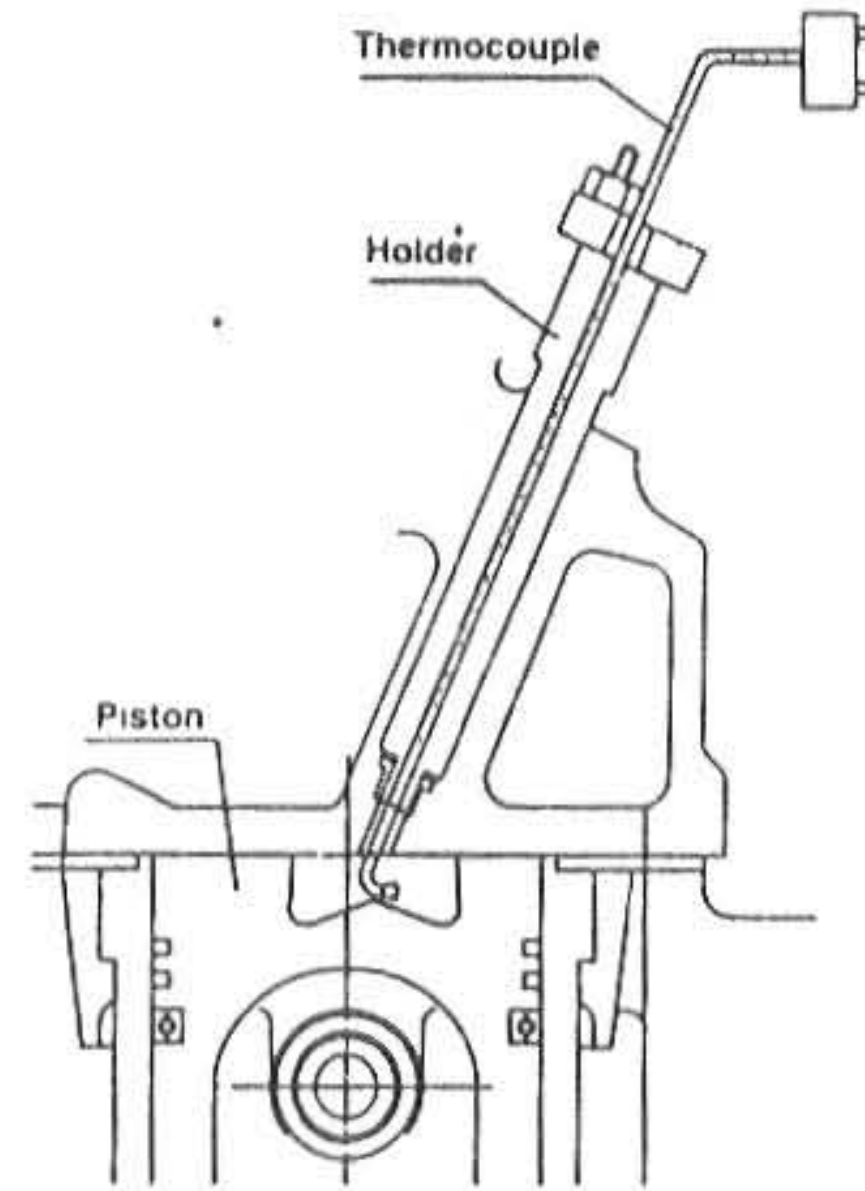


Fig.4 Probe Installed on Cylinder Head

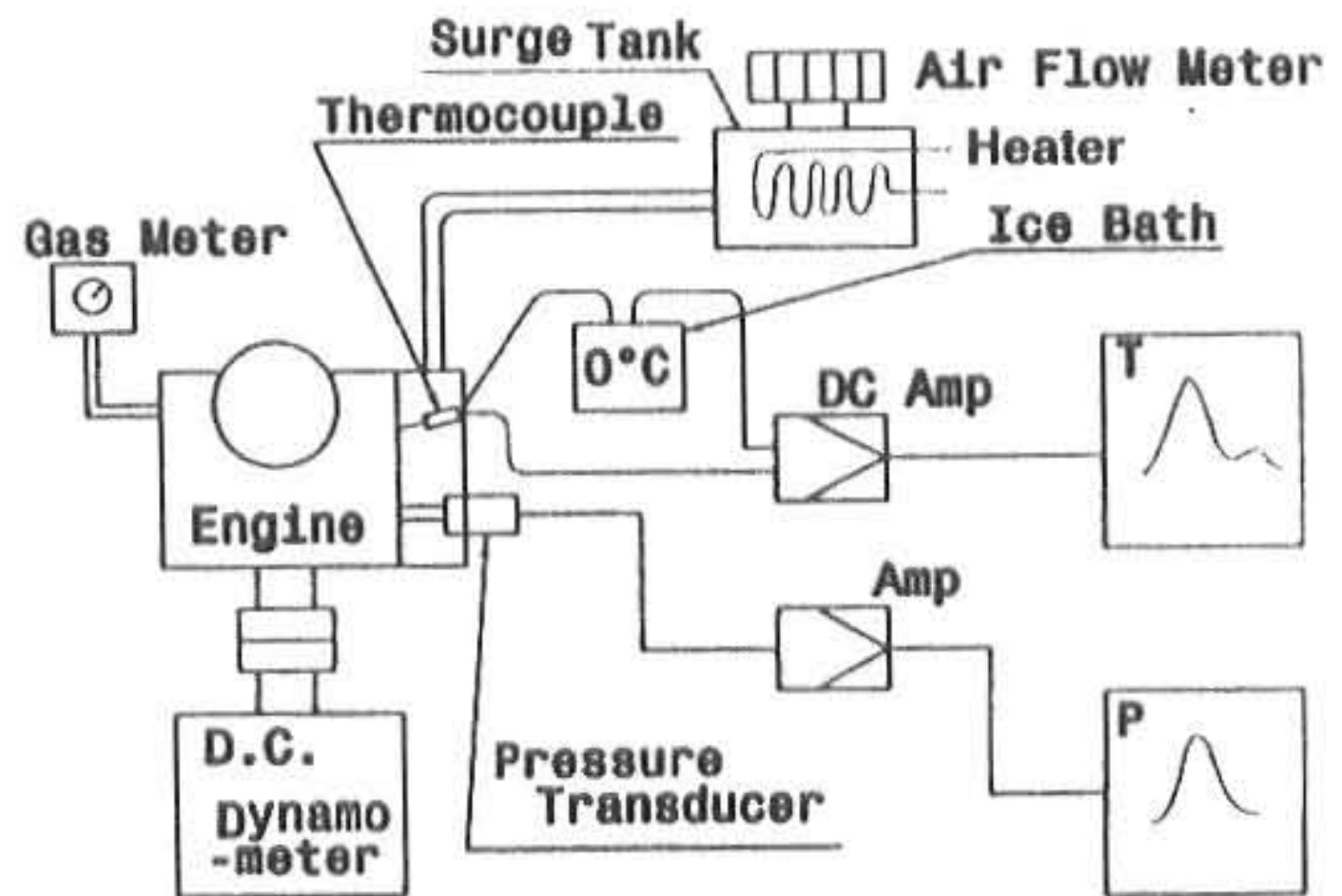


Fig.5 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

선경 $\phi 50 \mu\text{m}$ 과 $\phi 100 \mu\text{m}$ 의 열전대를 이용하여 각각 16ms와 20ms의 서로 다른 응답지연 시간을 보상회로에 의해 보정한 후의 실린더내의 온도변화를 Fig.6에 나타낸다. 두 종류의

온도가 잘 일치하고 있어 보상회로에 의한 실린더 내의 온도 측정 방법이 유효한 것으로 생각할 수 있다. 본 실험에서는 응답성이 빠른 $\phi 50\mu\text{m}$ 의 열전대를 사용하였다.

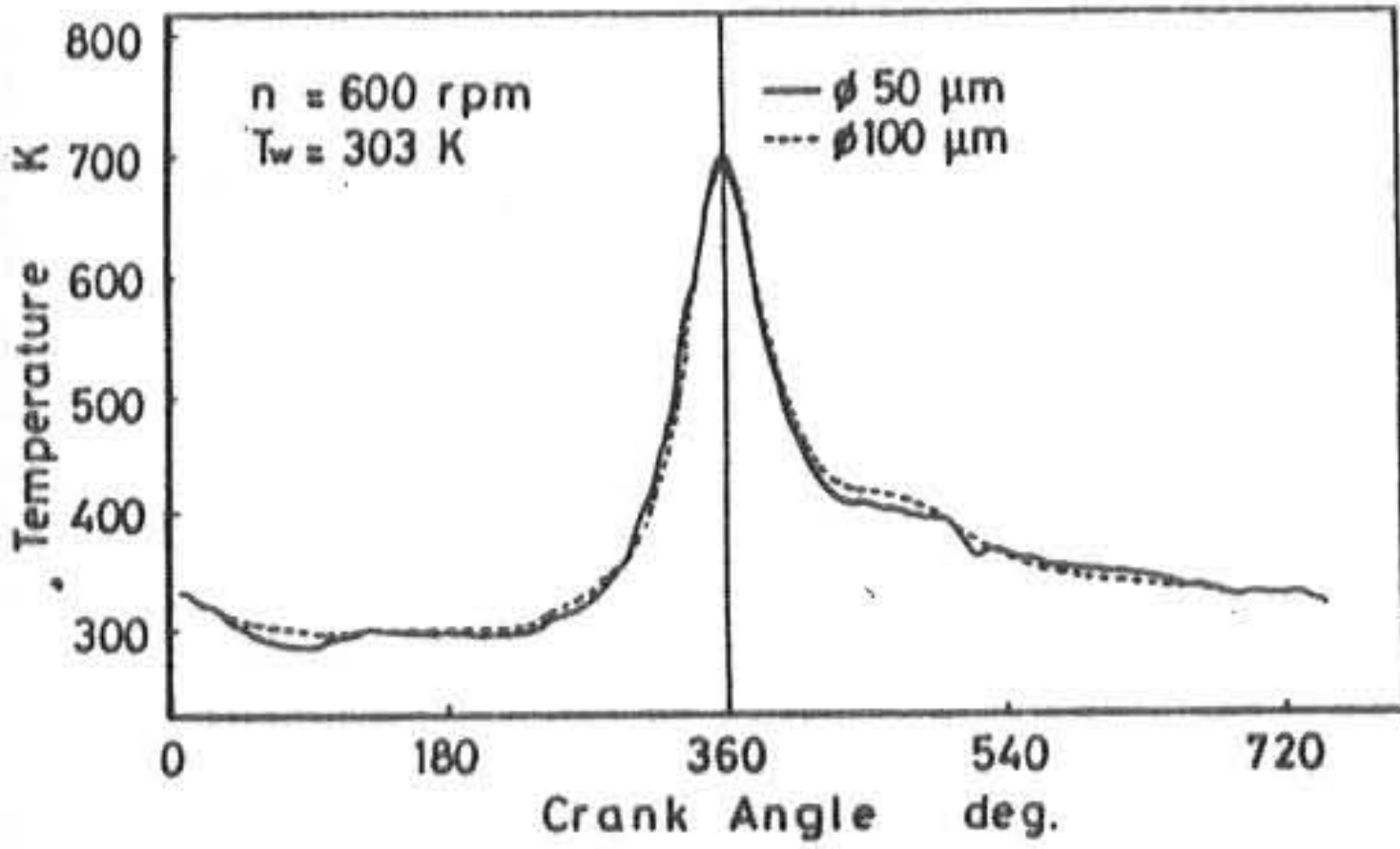


Fig.6 Thermocouple Output of Different Diameters on Motoring Condition

4.2 실린더내의 압축온도의 계산치와 측정치의 비교

열전대를 이용하여 실린더내의 압축시작의 온도와 실린더내의 압력으로부터 다음 식의 계산에 의해 압축종료시의 온도 즉 TDC에서의 온도를 구할 수 있다.

$$P_a \cdot V_a^m = P_c \cdot V_c^m \quad (7)$$

$$m = \frac{\log(P_c/P_a)}{\log(V_a/V_c)} \quad (8)$$

$$T_c = T_a \cdot (V_a/V_c)^{m-1} \quad (9)$$

여기서,

P: 실린더내 압력(MPa) V: 실린더내 체적(cm^3)

T: 실린더내 온도(K) m: 폴리트로프지수

첨자 a: 흡입상태 첨자 c: 압축종료 상태

계산으로 압축온도를 구하는 방법으로 T_a 에 흡기관 내의 온도와 압축 시작 때의 실린더내의 온도를 대입하여 구하는 2가지 방법이 있으며, 이 두 방법에 대해 Table 1에 정리하였다.

Table 1의 여러 가지 방법에 의해 구해진 실린더내의 압축온도를 Fig.7에 나타내었다. 여기서 횡축에 나타낸 흡기온도는 서지 탱크에 설치된 히터에 의해 흡기온도를 상승시킬 때 열전대로서 측정된 흡기 포트 입구에서의 온도를 나타낸다.

Table 1 Methods to obtain the Compression Temperature in Cylinder

Fig.7	압축온도 구하는 방법	조건
측정 온도	(A) 보상회로 부착 열전대로서 직접측정	$P_c=32\text{ata}$ $P_a=1\text{ata}$ $V_c=128\text{cc}$ $V_a=1860\text{cc}$
계산 온도	(B) T_a 값으로 (A)방법에서 측정된 압축시작 때의 온도를 (9)식에 의해 구한 온도	
	(C) T_a 값으로 흡기관내에서 측정된 온도를 (9)식에 의해 구한 온도	

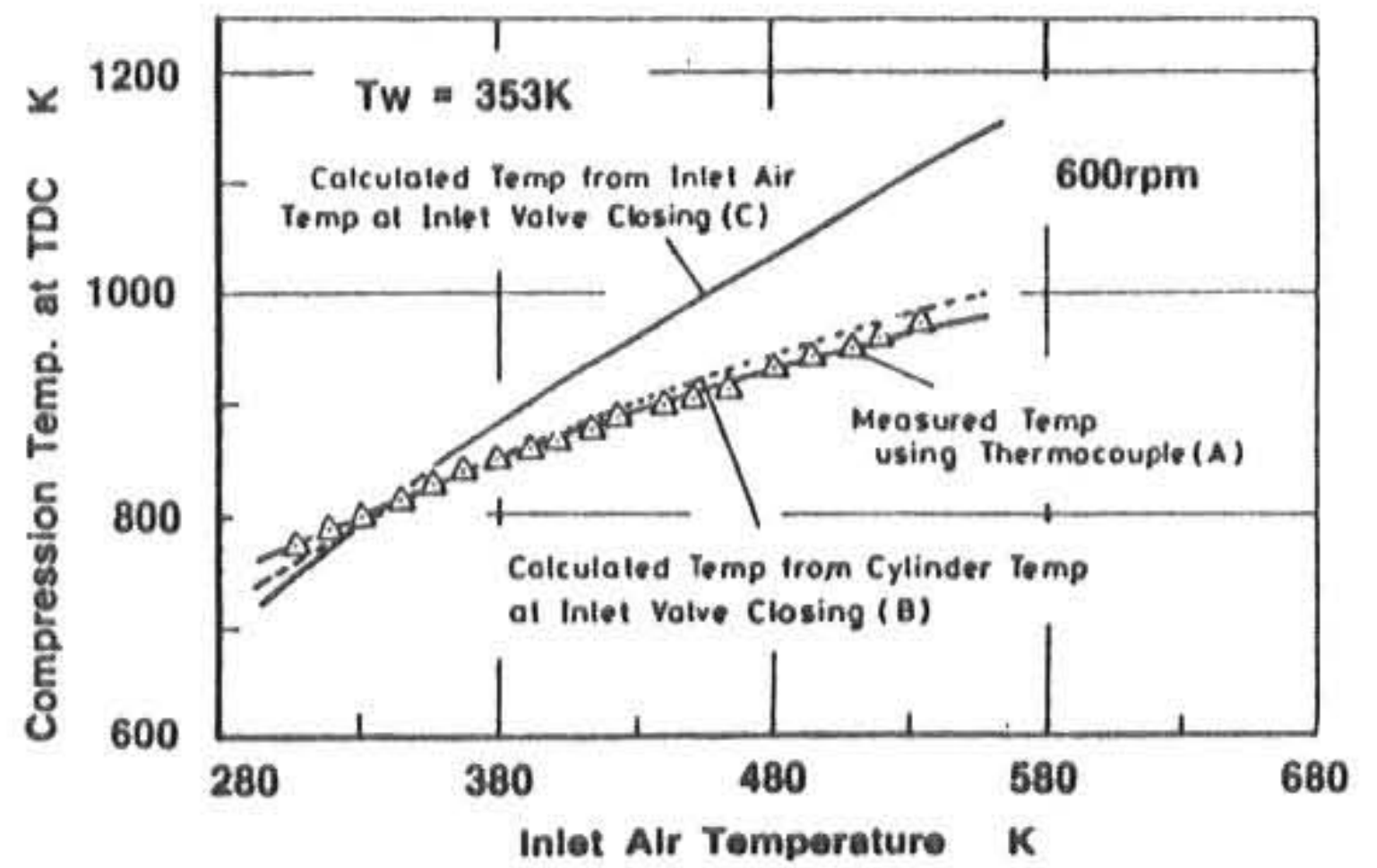


Fig.7 Comparison of Calculated and Measured Compression Temperature

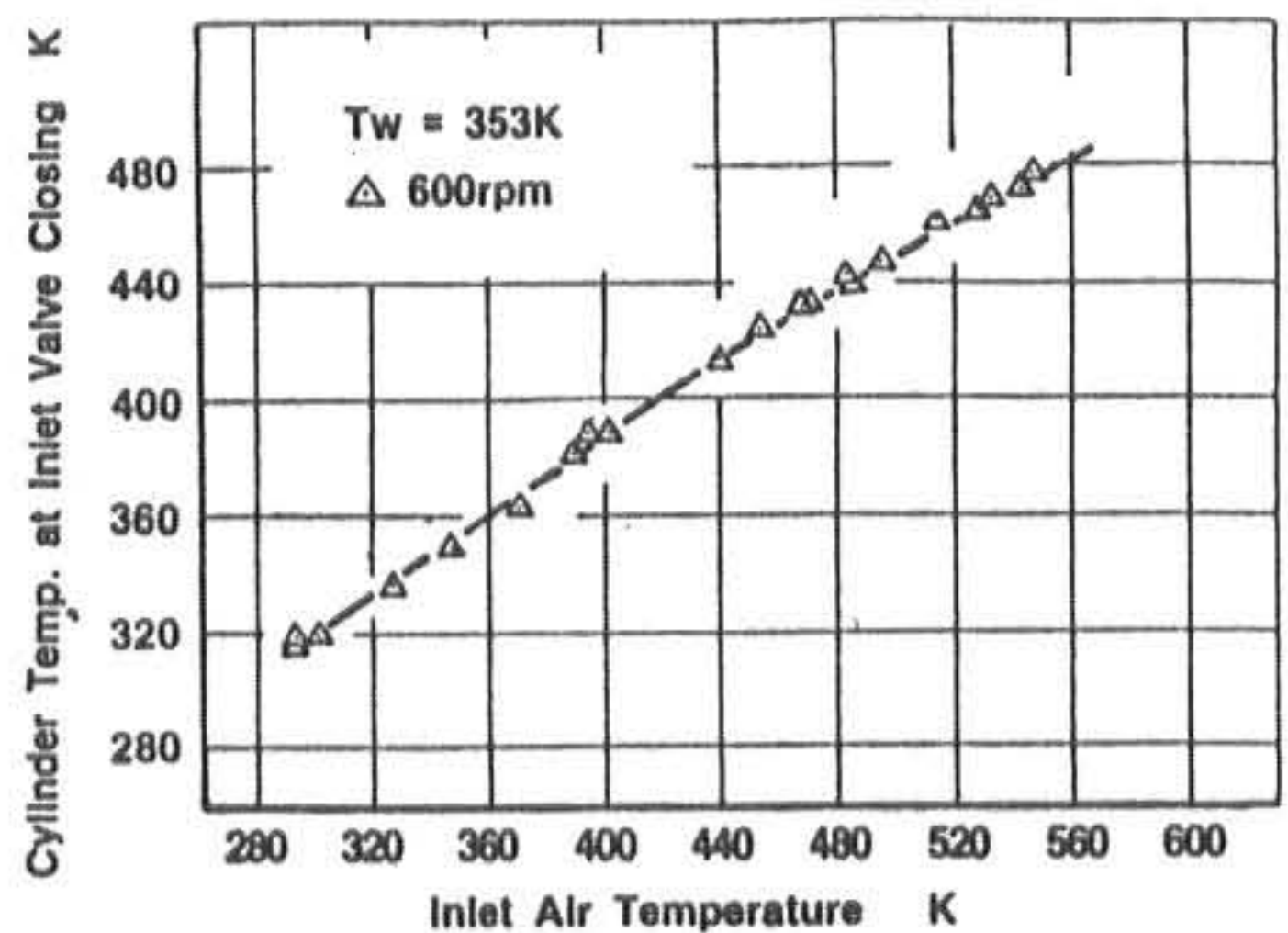


Fig.8 Relationship between the Inlet Air Temperature and the Cylinder Temperature at Inlet Valve Closing

기관회전수 600rpm에서 보상회로가 부착된 열전대를 이용하여 직접 측정된 압축온도(A)와 압축시작 때의 실린더내의 온도를 T_a 에 대입하여 구해진 압축온도(B)는 거의 일치하고 있다.

그러나 흡기포트 입구에서의 온도를 T_a 의 온도로서 대입하여 계산된 압축온도(C)는 흡기 매니폴드 내의 온도가 높은 경우에는 압축온도(A),(B) 보다도 더욱 높은 온도를 나타내고 있다. 이것은 흡입공기의 온도가 냉각수 온도 T_w 보다 높으면 실린더 내에 유입된 흡입공기가 벽면을 통해 방열되어 압축 초기의 온도가 Fig.8에 나타난 것처럼 흡기관 내의 온도보다 낮으나, 계산에서는 이것을 무시하고 높은 온도로서 계산하고 있기 때문이다.

벽면으로의 열손실이 원인인 것은 압축온도(C)는 매니폴드 내의 온도가 냉각수온도 $T_w=353K$ 보다 높아지는 지점에서 압축온도(A),(B)에 비해 높은 압축온도를 나타내고 있으며, 그 차는 냉각수 온도를 기준으로 흡입공기의 온도와 함께 증가 또는 감소하고 있다. 즉 냉각수 온도보다 흡입공기의 온도가 낮은 경우, 실린더 내에 들어온 공기가 벽면으로부터 열을 흡수하기 때문에 압축 초기의 온도는 흡기포트 입구 온도보다 높게되나, 계산에서는 낮은 흡입온도를 그대로 사용하고 있기 때문에 압축온도가 실제로 측정된 온도보다 낮게 되어있다.

이상의 검토 결과, T_a 에 측정된 압축초기의 온도를 사용하여 식(9)의 계산에 의해 얻어진 압축완료 시점 즉 TDC에서의 온도와 보상회로를 이용하여 직접측정에서 얻어진 압축온도가 거의 같음을 알았으며, T_a 에 흡입 매니폴드 내의 온도를 사용하여 계산된 한 압축온도가 높은 이유도 명확하게 되었다.

계산을 이용하여 압축온도를 구하는 경우에는 항상 실린더내의 압력을 구하지 않으면 안된다. 그러나 압력의 측정에는 특별한 주의를 해야할 필요가 있으나, 열전대를 이용하는 것은 온도의 도출이나 정도의 면에서도 기술적으로 간단하다. 이러한 점에서 보상회로가 부착된 열전대에 의한 온도 측정법은 약간의 오차는 있으나 실린더내의 압축온도 측정에 유효하다고 볼 수 있다.

5. 결론

디젤기관에서의 실린더 내의 압축온도는 기관의 성능뿐만 아니라 배기 특성에도 영향을

미치고 있다. 이 실린더내의 압축온도를 측정하기 위해 선경이 가는 K형 열전대를 이용하였다. 열전대는 아무리 가는 선을 이용해도 그 열용량 때문에 반드시 응답지연이 존재하므로 이 응답지연을 보상해 주기 위해 본 연구에서는 미분회로와 가산회로로 구성된 응답시간 지연 보상회로를 고안하여 실린더내의 압축온도를 구하는 방법을 확립하였다. 그 결과 약간의 오차는 포함하고 있으나, 양호한 실린더내의 압축온도 측정이 가능하였다.

참고문헌

- 1) Scadion, M.D. and Worshawsky, I., Experimental Determination of Time Constant and Nusselt Number for Bare Wire Thermocouples in High Velocity Air Streams and Analytic Approximation of Conduction and Radiation Errors, NACA Tech. Note 2599, 1952
- 2) Nagao, F., Nishiwaki, K., Okada, T. and Matsuoka, H., The Method of Cylinder Gas Temperature in I.C. Engine, Trans. of JSME, Vol.36, No.282, 1970
- 3) 金田影夫, 内燃機關のガス温度の測定, 日本機械學會 第134回講演會, p.17, 1978
- 4) 長尾不二夫, 内燃機關の シリンダ内ガス温度の測定法, 日本機械學會論文集, Vol.32, No.282 p.303, 1970
- 5) 宮阪憲治, 水谷幸夫, 熱電帶による温度變動の測定, 第14回燃焼Symposium, pp.200-202, 1976
- 6) 温度計測實務委員會, 温度計測の實務, 日本工業出版社, p.17, 1988
- 7) エンジンの温度測定, 日本機械學會基準, JSME S007, pp.61-67, 1986
- 8) Shepard, C. E. and Worshawsky, I, NACA Tech. Note, p.2703, 1952
- 9) Lockwood, F.C.K. and Odidi, A.O.O., Measurement of Mean and Fluctuating Temperature and of Ion Concentration in Round Free-Zet Turbulent Diffusion and Premixed Flame, 15th Int. Symp. on Combustion, p.561, 1975