

매연여과장치의 재생특성에 관한 연구(1)

A Study on Regeneration Characteristics in DPF(1)

이 병 호*, 이 상 준**, 최 경 호***
B. H. Lee, S. J. Lee, G. H. Choi

ABSTRACT

The goals of this research are to understand the regeneration characteristics in diesel particulate filter(DPF) using the cerium additive and throttling. The effects of throttling duration and spring tension of throttling valve were studied. Measurements were made on a 6 cylinder direct injection diesel engine and included pressure drop, filter inlet temperature, oxygen concentrations, and torque. The major conclusions of this work include; (i) the pressure drop is increased with increase of the engine load and the engine speed; (ii) the inlet temperature of the filter is reached 350°C with certain engine operating condition which leads to sufficient temperature to regenerate with additive; and (iii) oxygen concentrations in the filter and engine torque during throttling operation are decreased by 2 percent and 36 percent, respectively, which are not critical about regeneration and vehicle operation.

주요기술용어 : DPF(디젤 매연여과장치), Pressure Drop(필터 배압), Regeneration Characteristics (재생 특성), Throttling Duration(재생 시간), Torque(기관출력), Mode(모드)

1. 서 론

최근 자동차에서 배출되는 유해가스에 의한 대기환경오염이 날로 심화되고 있다. 특히 디젤차량은 가솔린차량 보다 열효율이 좋고, CO₂ 배출량

이 적으며, 연비가 양호하다는 이유로 대형 동력원으로 널리 사용되고 있으나, NO_x와 입자상물질의 배출량이 많아 대기오염의 주원인이 되고 있다. 특히 전체 자동차 수의 3%에 불과한 버스, 트럭 등 대형 경유차가 전체 자동차에서 발생하는 대기오염 비중의 54%나 차지하고 있는 실정이다. 이러한 디젤차량의 배출가스 저감을 위한 기술개발은 크게 엔진개량에 의한 방법, 청정연료의 사용에 의한 방법 등의 전처리기술, 촉매 변환장치

* 창원기화기공업(주) 기술연구소

** 계명대학교

*** 정회원, 계명대학교 자동차공학과

와 입자상물질 여과장치에 의한 후처리기술로 크게 구분되어진다.

이중 입자상물질 여과장치는 다기술에 비해 개발 기간이 적게 소요되고 새로 제작되는 신규차량은 물론 현재 운행중인 차량에도 적용할 수 있을 뿐 아니라 입자상물질과 매연의 저감 효율도 매우 높다. 지금까지 국내에서 연구되고 있는 매연후처리기술은 입자상물질을 여과한 후 필터를 재생시키는 방법에 따라 일반적으로 자연재생방식과 강제재생방식으로 나누어 볼 수 있다. 여과된 입자상물질을 특별한 장치 없이 재생시키는 자연재생방식으로는 연료첨가제식^{1~3)}과 NO₂ 트랩방식⁴⁾이 있으며, 이들은 입자상물질의 재생온도인 650℃를 약 350℃ 정도로 낮추어 자연히 재생시키는 것이 공통점이다. 이와는 달리 필터에 축적된 입자상물질을 특수장치에 의해 착화시켜주는 강제재생방식은 경유버너식^{5,6)}, 전기히터식^{7,8)}, 촉매처리방식^{9,10)} 등을 꼽을 수 있다. 이러한 강제재생방식은 원하는 조건에서 입자상물질을 재생시킬 수 있지만 재생 과정 중에 연소에 의해 많은 열이 발생되므로 열용력에 의한 균열이 야기되고 있다.

필터 내의 재생 성능과 내구 성능을 고려하여, 앞서 설명한 재생 방식에 따른 최적 재생온도를 위의 문헌들을 참고로 Fig.1에 나타내었다. 경유버너식과 전기히터식과 같은 재생방식은 필터 내의 공간속도가 낮은 조건에서 원활히 작동하는데 이것은 디젤기관에의 저부하 구간에 해당하며 이에 상응하는 배기 온도는 250℃ 이하인 것으로 알려졌다. 촉매처리방식과 연료첨가제방식은 각각 350℃ 이상이 최적 재생온도 범위이며, NO₂ 트랩

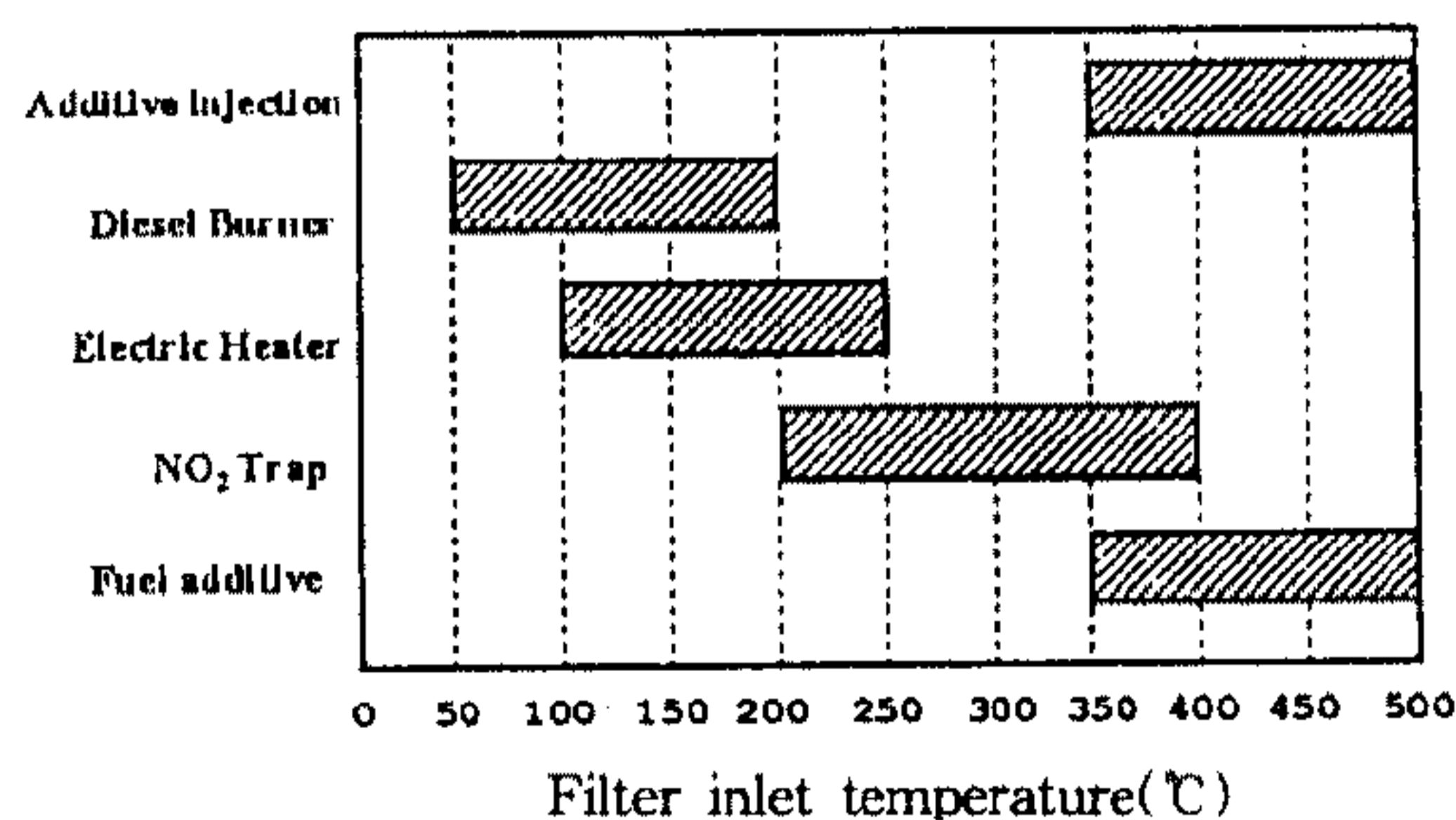


Fig.1 Optimal operation of regeneration temperature

은 200~400℃의 최적 재생온도 범위로 디젤기관의 배기가스 온도인 200~600℃를 고려할 때 비교적 이용하기 용이한 재생방식 중의 하나이나 황(S) 함유량이 10ppm 이하이어야 작동이 원활한 것으로 알려졌다. 따라서 본 연구에서는 필터 내의 입자상물질을 재생시키기 위하여 강제재생방식 중의 하나인 트로틀링 재생방식을 이용할 때 재생이 가능한 배기가스 온도 범위를 파악하고자 한다. 즉 매연여과장치의 재생성능에 영향을 미치는 요인인 필터 입구온도와 필터 내 산소 함유량 등을 트로틀링 시간과 장력을 변수로 파악하고자 하며, 이에 따른 기관출력 변화를 조사하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 연료첨가제 및 트로틀링 재생 방식에 의한 매연여과장치를 이용하였으며, 장치의 개략도는 Fig.2에 나타내었다. 매연여과장치는 시험기관의 배기 매니폴드로부터 약 1m 지점에 장착하였으며, 세라믹 필터와 트로틀링 밸브, 바이패스 밸브 및 전자제어장치로 구성되어 있다. 필터는 열에 대한 내구성이 높은 코닝사의 EX-80을 사용하였다. Table 1은 세라믹 필터의 주요 재원을 나타내었다. 이 4개의 세라믹 여과재를 시내버스용 D6BR 엔진의 배기관에 병렬로 부착하였다. 트로틀링 밸브와 바이패스 밸브는 공기 압축기에 의하여 닫히고 스프링 힘에 의해 열리게 되어 있다. 이들 밸브의 작동 상태에 따라 배기가스가 필터로 통과하는 정상 상태, 트로틀링 밸브를 닫아서

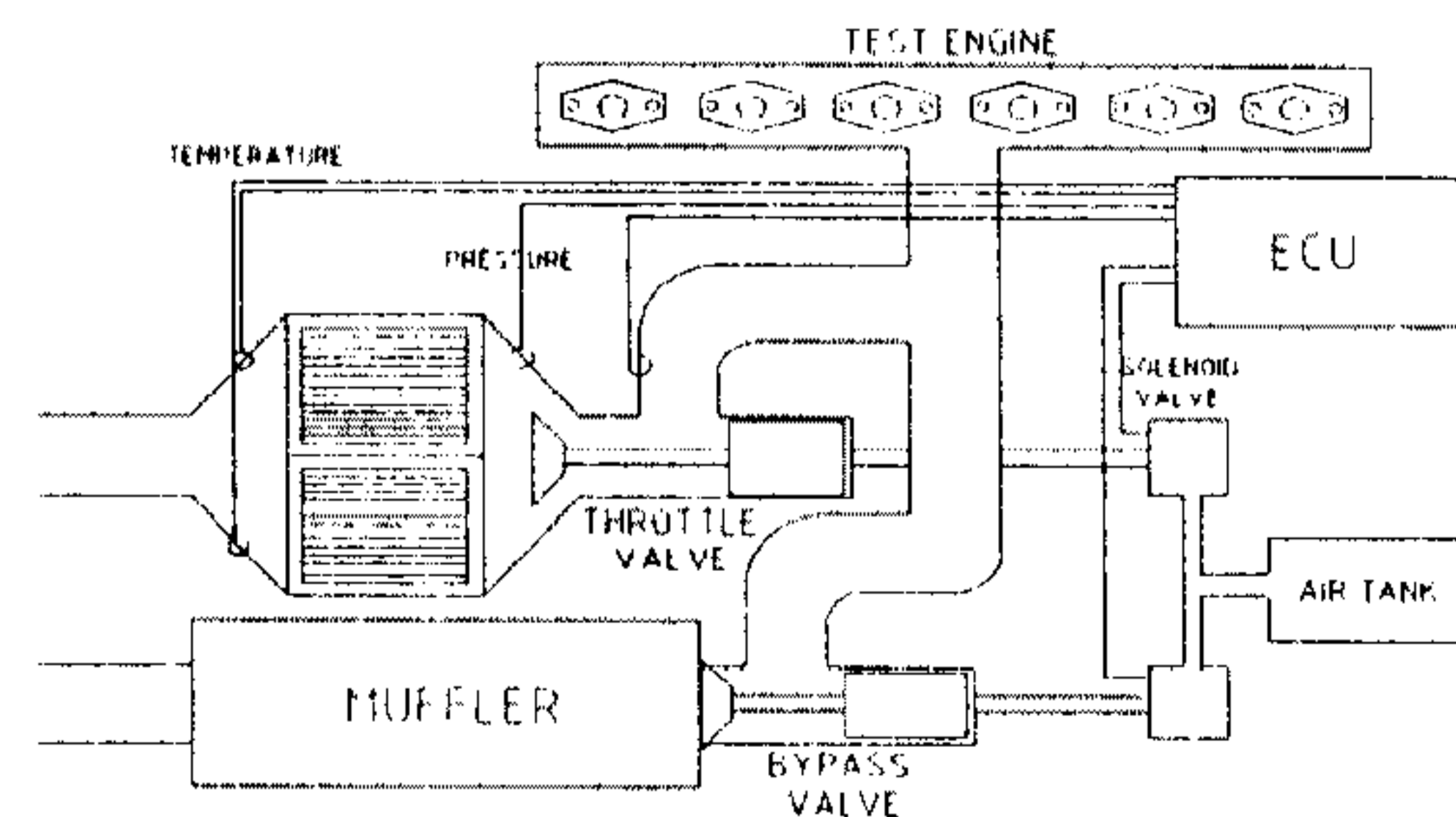


Fig.2 Schematic diagram of diesel particulate trap

Table 1 Specifications of ceramic filter

Item	Specification
Model	Coning Co.(EX-80)
Diameter×Length	5.66in×6in
Cell density	100cells/in ²
Wall thickness	0.017in
Volume	2.5 l
Filtration area	11,083cm ²
Mean pore size	12microns
Max. soot loading	15g

배기가스 유량을 감소시켜 필터로 통과하는 트로틀링 상태, 그리고 바이패스 밸브를 열어 배기가스가 필터를 통과하지 않는 바이패스 상태로 구분된다. 이들 밸브는 매연여과장치에 설치된 온도 센서와 압력 센서의 신호를 받아서 전자제어장치(ECU)에 의해 작동된다. 또한 본 실험에서는 프랑스 롱프랑사가 제조한 세륨 첨가제를 150ppm 농도로 사용하였다.

2.2 실험방법

매연여과장치에 매연을 축적하기 위하여 매연이 가장 많이 배출되는 기관회전수 1,000rpm과 기관부하 85%에서 필터의 입구 온도가 350℃를 넘지 않아 결과적으로 자연재생을 억제하면서 매연을 축적하였다. 즉 1,000rpm, 85% 부하에서 1분 50초, 공회전 상태에서 50초를 10회 반복하여 한

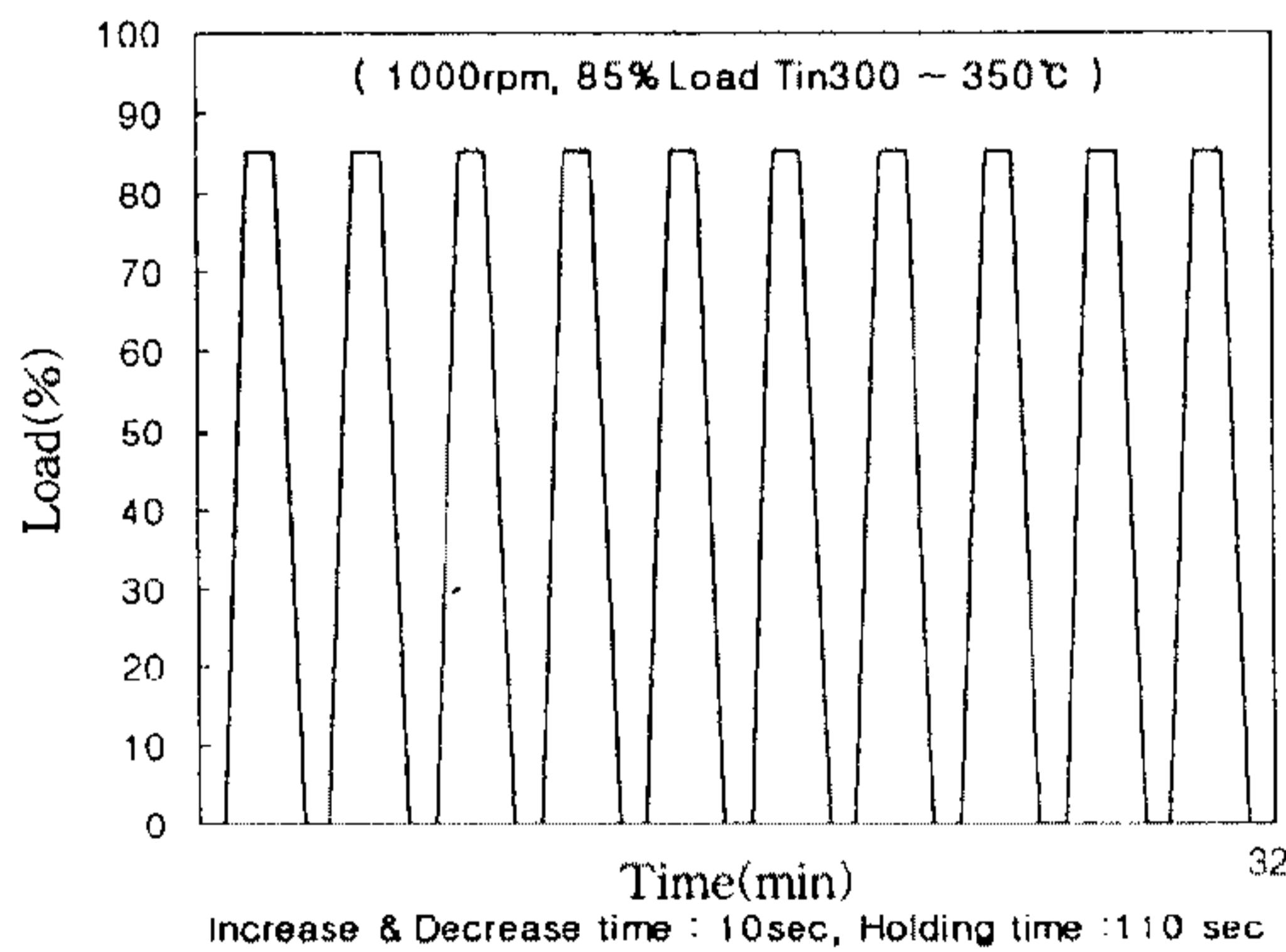


Fig.3 Particulate accumulate mode

사이클을 수행하는데 약 30분 정도 소요되는 모드를 설정하였다. Fig.3은 필터에 매연을 축적하기 위한 축적 모드를 나타내었다. 매연 축적량의 측정은 실험하기전의 필터를 분해하여 무게를 전자저울에 의해 측정한 다음, 축적 모드를 몇 회 운행한 뒤에 다시 필터를 분해하여 각각의 필터 무게를 측정하여 매연 축적량을 산출하였다. 또한 트로틀링 시에 필터 입구부의 온도 상승폭, 필터 내의 산소량, 토크 감소 등을 측정하여 적정트로틀링 시간과 트로틀링 장력을 파악하고자 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig.4는 축적 모드 실행 횟수에 대한 축적되어진 입자상물질 양을 나타내었다. 여기서 입자상물질의 증가량은 축적 모드의 실행 횟수에 대해 선형적으로 증가하고 있음을 나타내고 있다. 입자상물질 100g을 필터에 포집하기 위해서는 개략적으로 입자상물질 축적 모드를 15~16회를 실행시켜야 함을 나타내고 있으며, 이것은 약 500분 정도의 시간이 소요됨을 알 수 있다. 원활한 재생의 필터 한 개당 최대 축적량이 15g(총 60g)임을 감안할 때 약 10회 정도의 축적 모드를 운행한 다음 재생을 일으켜야 함을 알 수 있다.

Fig.5는 기관부하 75%에서의 축적된 입자상물질

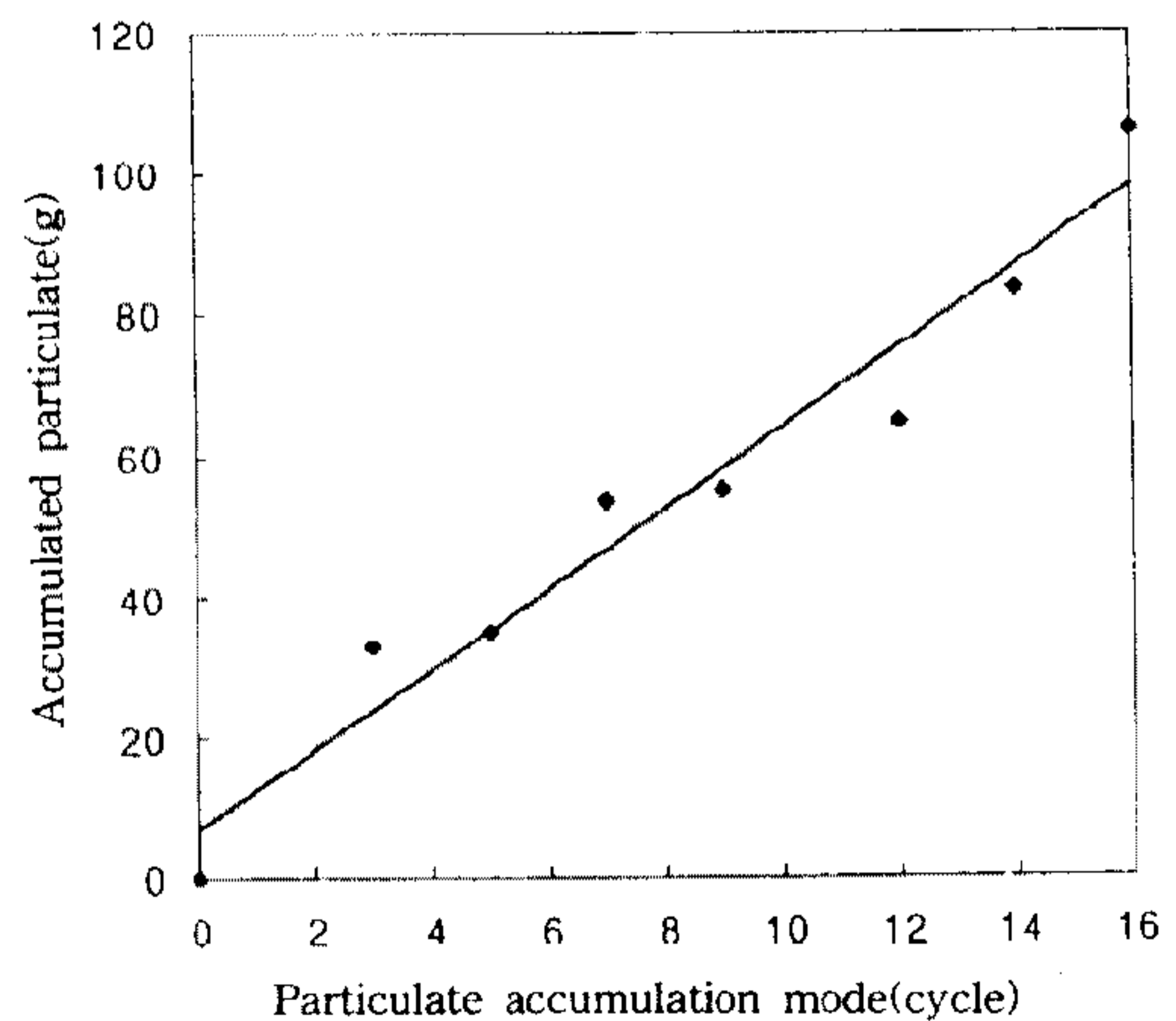


Fig.4 Accumulated particulate as a function of particulate accumulation mode cycles

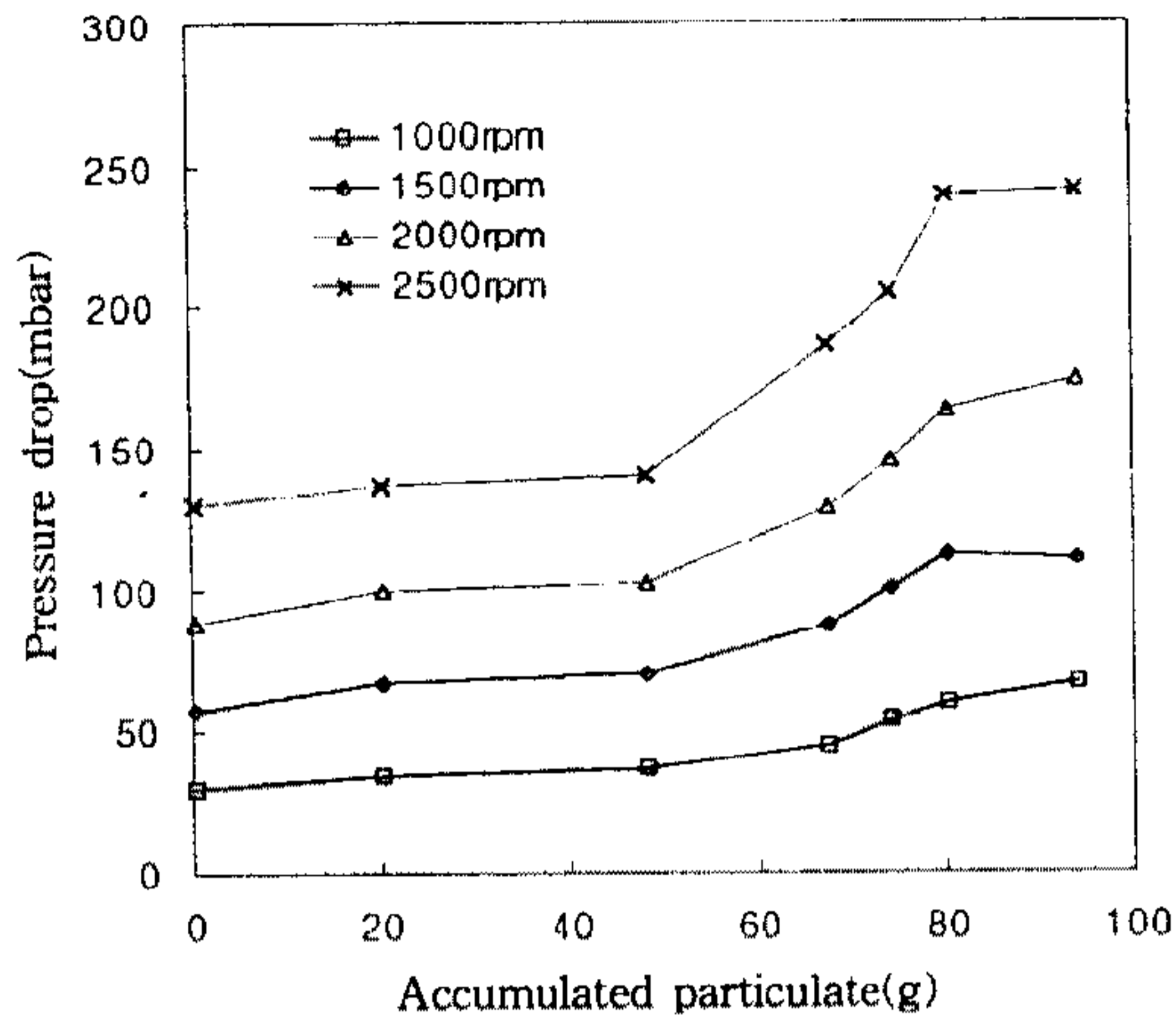


Fig.5 Pressure drop as a function of accumulated particulate at 75% load

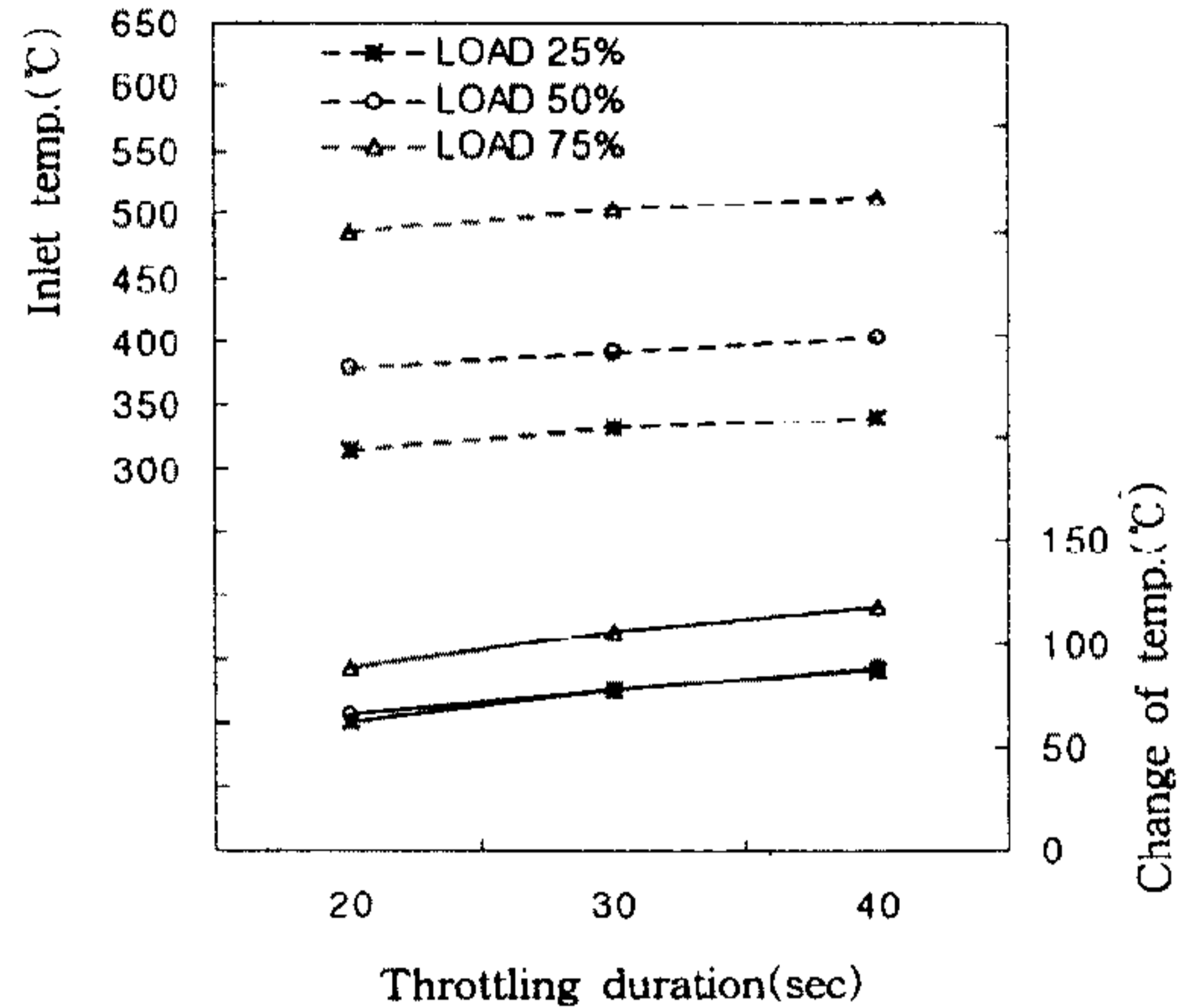


Fig.7 Inlet temp. and change of temp. as a function of throttling duration at 2,500rpm and 1.8kg/cm² of valve spring tension

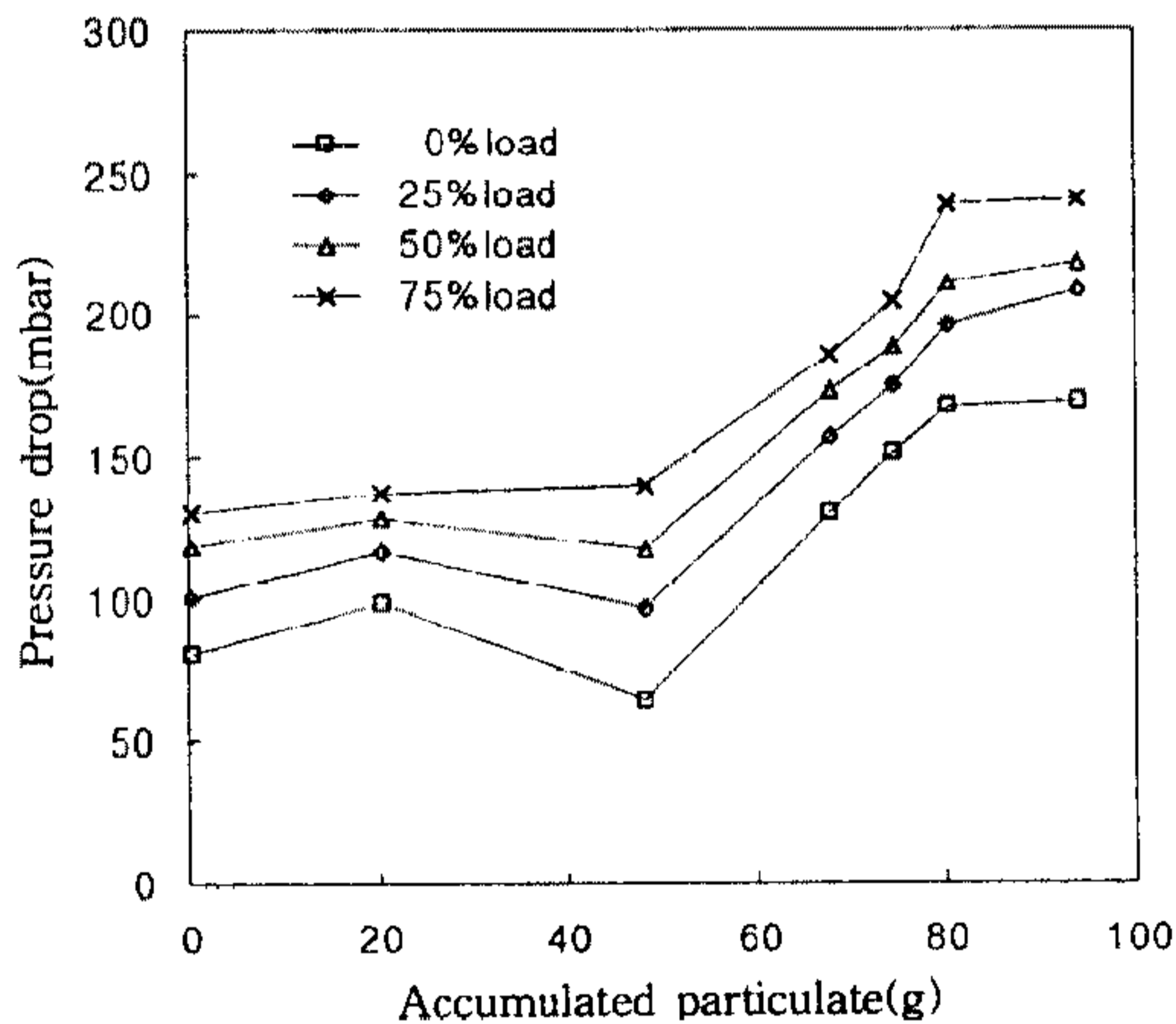


Fig.6 Pressure drop as a function of accumulated particulate at 2,500rpm

질 양에 따른 필터의 배압을 기관회전수 변화에 대해서 나타내었다. 그림에 나타난 것과 같이 필터내의 입자상물질 양이 증가할수록 배압이 증가함을 알 수 있다. 또한 동일 입자상물질 양에 대해서는 기관회전수가 증가함에 따라 배압이 증가함을 나타내고 있다. 동일 기관회전수일 때 입자상물질 양의 증가에 따른 배압 상승율이 최고 84% 인데 비해, 동일 입자상물질 양일 때 기관회전수가 고속으로 증가함에 따라 배압 상승율은 최고 330% 정도이다. 이것은 필터 내 배압은 포집된 입자상물질양보다 기관회전수, 즉 배기 유량에 더

많은 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 또한 재생시 입자상물질의 적정 축적량이 60g임을 가정할 때, 기관회전수 변화에 따라 적정 배압은 약 50~170mbar임을 알 수 있다. Fig.6은 2,500rpm에서의 축적된 입자상물질양에 따른 필터의 배압을 기관부하 변화에 대해서 나타내었다. 그림에서와 같이 동일 기관회전속도에서 입자상물질양이 증가할수록 배압은 75% 부하 조건에서 250mbar 정도까지 증가하고 있음을 알 수 있다. 그리고 동일 입자상물질양에 대하여 기관부하를 증가시킬수록 배압은 증가하고 있다. Fig.5의 결과와 비교하면, 동일 축적량의 입자상물질일 때 배압은 기관부하 보다 기관회전수에 더 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 이것은 기관부하의 영향을 받는 배기가스 온도보다는 기관회전속도의 영향을 받는 배기 유량이 압력손실에 미치는 영향이 크다는 Darcy의 법칙과 일치한다.¹⁾

Fig.7은 2,500rpm, 트로틀링 밸브 장력 1.8kg/cm²에서의 트로틀링 시간에 따른 필터 입구에서의 온도 상승폭과 온도를 기관부하에 따라 나타내었다. 그림에서와 같이 트로틀링 시간이 20초에서 40초로 증가할수록 각 부하에 대해서 온도가 350°C에서 500°C까지 상승함을 알 수 있다. 이것은 필터내의 배기가스 유속이 감소하는 시간이 길어짐에 따라 대류 열전달에 의한 손실이 감소하기 때문인 것으로 생각된다. Fig.8은 기관부하 75%,

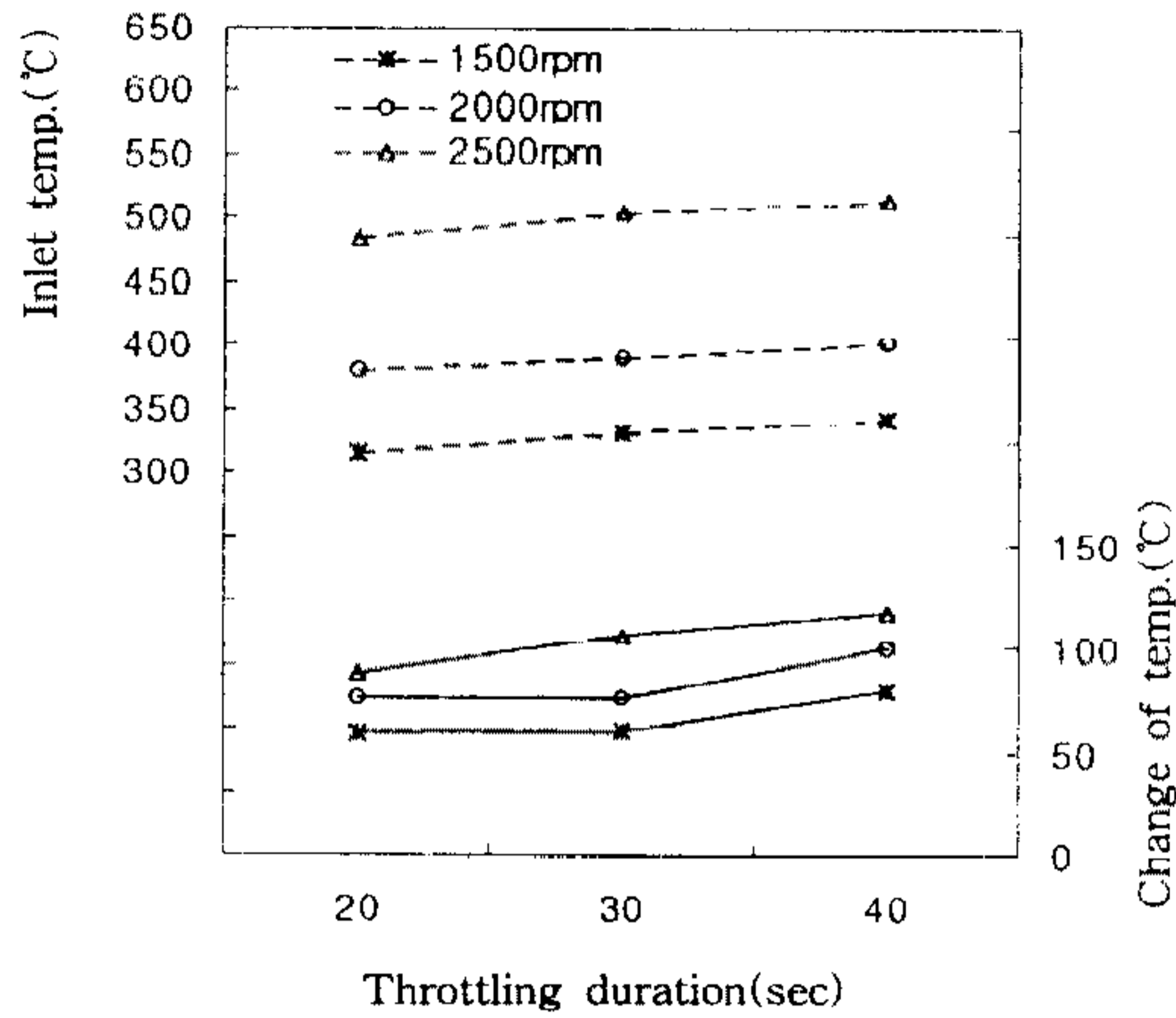


Fig.8 Inlet temp. and change of temp. as a function of throttling duration at load 75% and 1.8kg/cm² of valve spring tension

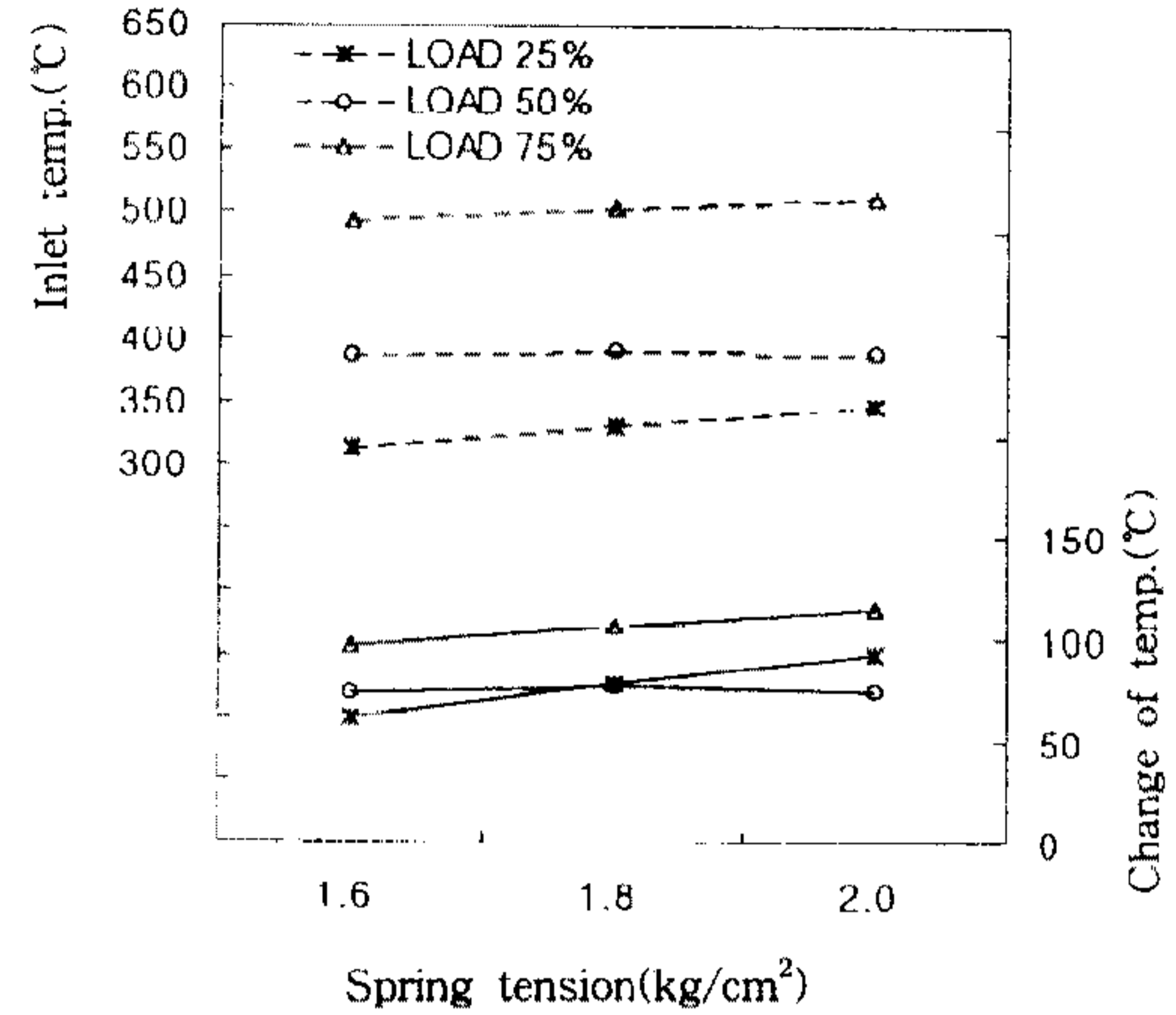


Fig.9 Inlet temp. and change of temp. as a function of spring tension at 2,500rpm and 30 second of throttling time

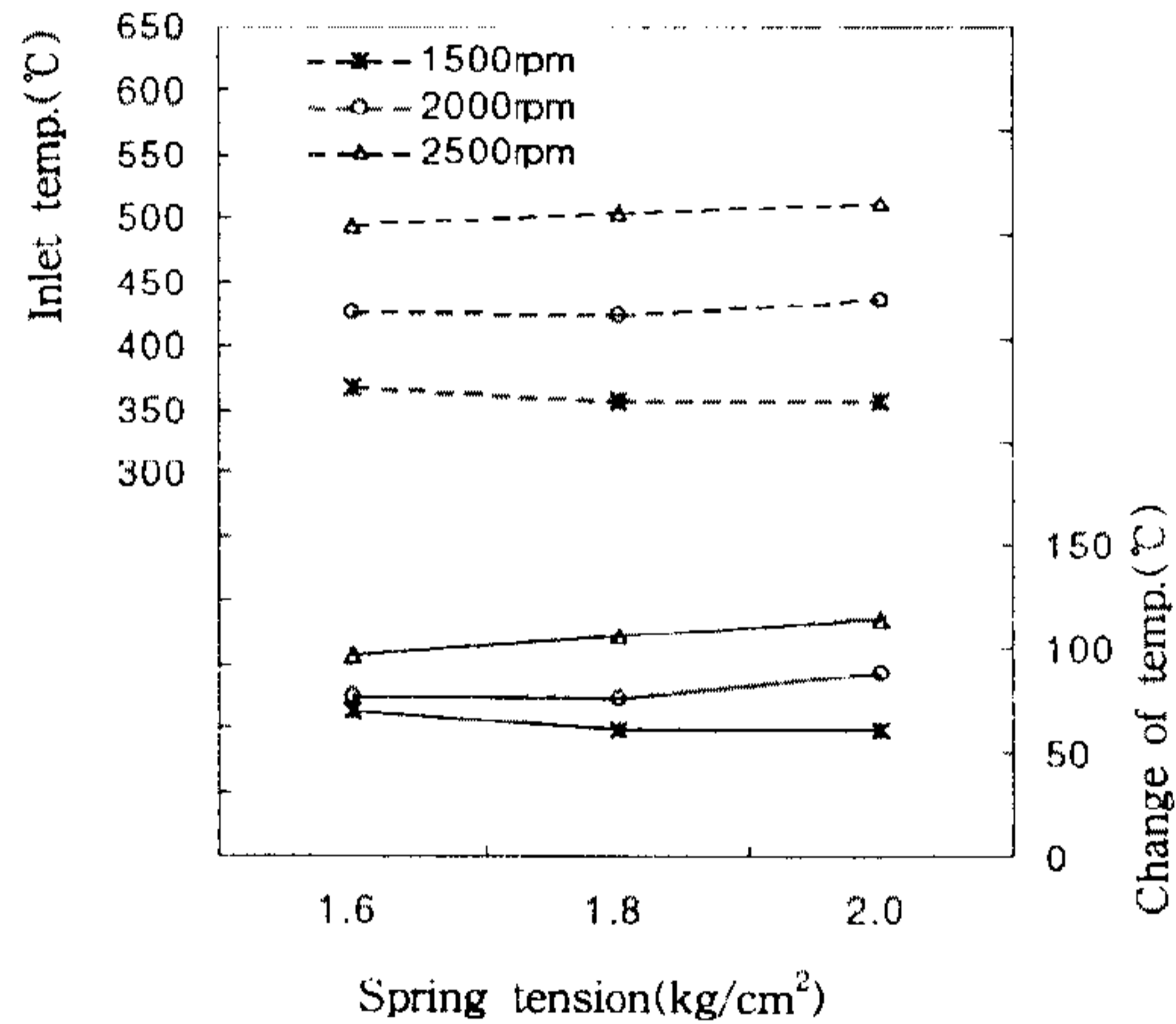


Fig.10 Inlet temp. and change of temp. as a function of spring tension at 75% load and 30 second of throttling time

밸브 스프링의 장력을 1.8kg/cm²로 고정시켰을 때의 트로틀링 시간에 따른 온도와 트로틀링에 의한 온도 변화 폭을 기관의 회전수에 대하여 나타내었다. 그림에서와 같이 트로틀링 시간이 증가할수록 온도는 상승하며, 기관회전수가 저속일 때보다 고속일 때의 온도 상승폭이 더 크다. 이러한 경향은 대류 열전달에 의한 열손실의 감소가 고속일 때 현저하기 때문인 것으로 생각된다.

Fig.9는 2,500rpm, 트로틀링 시간 30초에서의 밸브스프링 장력에 따른 필터 입구 온도와 트로틀

링에 의한 온도 상승폭을 기관부하에 대해서 나타내었다. 여기서 밸브스프링 장력이 1.6kg/cm²에서 2.0kg/cm²까지 증가할수록 필터 입구 온도는 기관부하에 따라 다소 차이가 있지만 최고 30°C 가량 상승하는 것을 볼 수 있다. 이것은 밸브의 장력의 증가로 인하여 배기 유량이 더욱 감소하여 열손실이 줄어들는데 기인하나, 밸브스프링 장력에 의한 영향은 크지 않은 것을 알 수 있다. Fig.10은 기관부하 75%, 트로틀링 시간 30초에서의 밸브스프링 장력에 따른 온도 상승을 기관회전수에 대해서 나타낸 것이다. 이 그림에서도 밸브스프링 장력의 변화에 대한 온도 상승은 각 기관회전수에 대해서 큰 영향을 미치지 않고 있음을 알 수 있다. 첨가제에 의한 최적 재생 온도가 350°C 이상이므로 Fig.7에서 Fig.10까지의 결과로 볼 때 2,500rpm, 50% 부하 이상의 구간에서 그리고 75% 부하에서는 1,500rpm 이상의 기관회전수에서 필터 입구 온도가 350°C 이상이므로 첨가제에 의한 최적 재생 온도를 만족시킴을 알 수 있다.

Fig.11은 2,500rpm, 밸브스프링 장력을 1.8kg/cm²로 고정시킨 상태에서의 트로틀링 시간에 따른 배출 산소량의 농도를 기관부하별로 나타내었으며, Fig.12는 2,500rpm 트로틀링 시간 30초에서의 밸브스프링 장력 변화에 따른 배출 산소량을 나타내었다. 위의 그림에서와 같이 트로틀링 시간과 장력이 변화함에 따라 산소의 농도는 거의 변

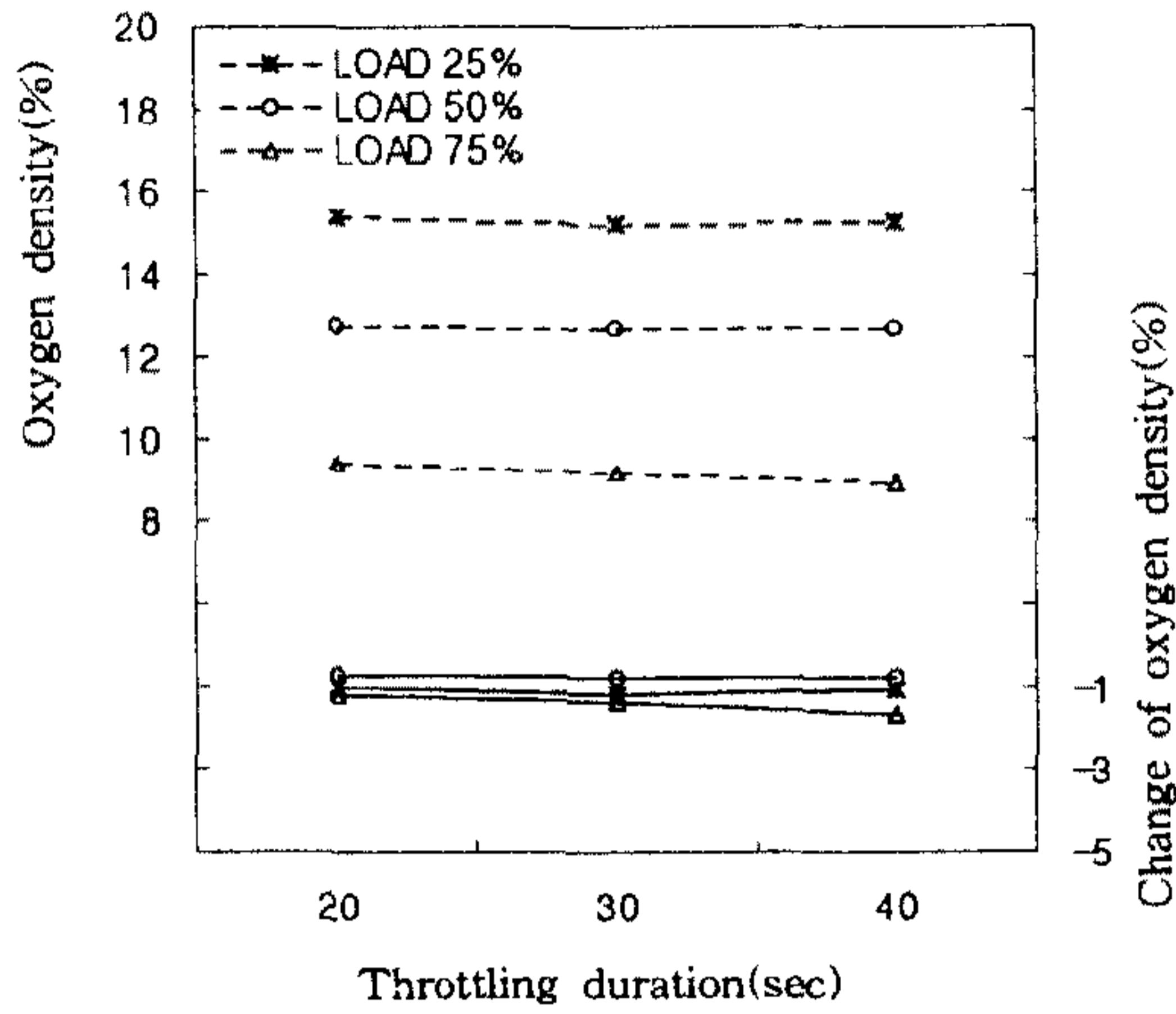


Fig.11 Oxygen density and Change of oxygen density as a function of throttling duration at 2,500rpm and valve spring tension 1.8kg/cm²

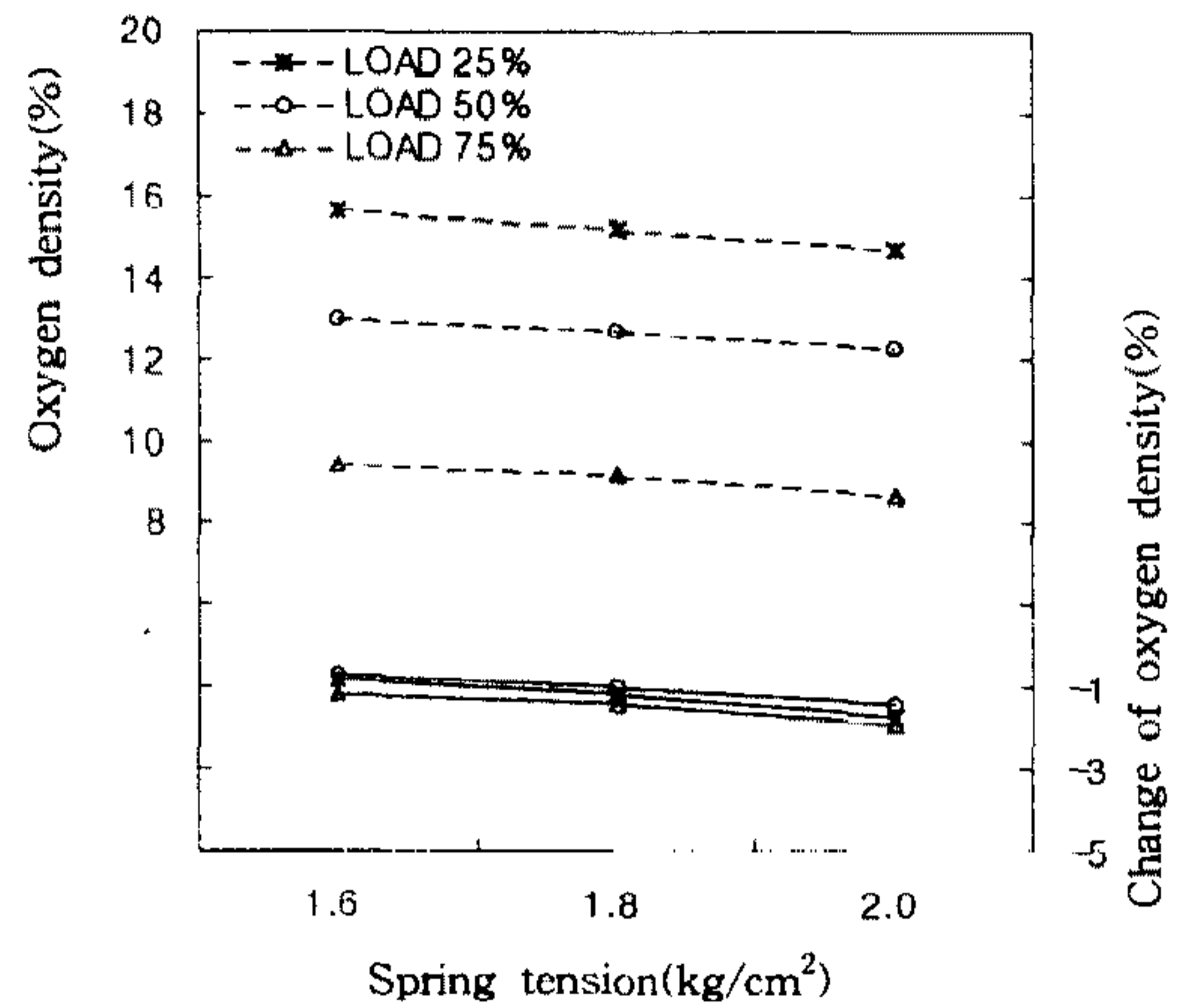


Fig.12 Oxygen density and Change of oxygen density as a function of spring tension at 2,500rpm and 30 second of throttling time

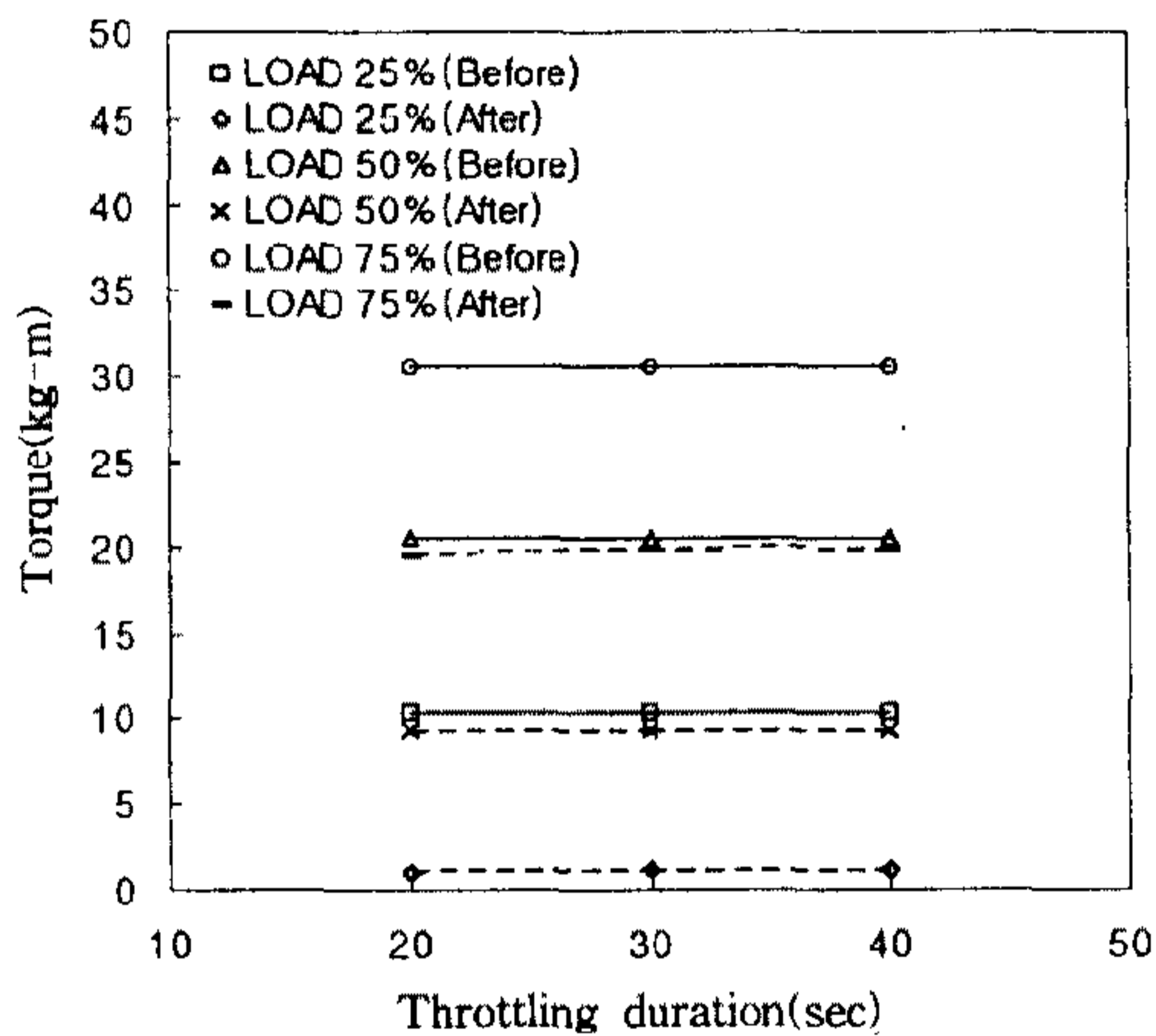


Fig.13 Torque as a function of throttling duration at 2,500rpm and valve spring tension 1.8kg/cm²

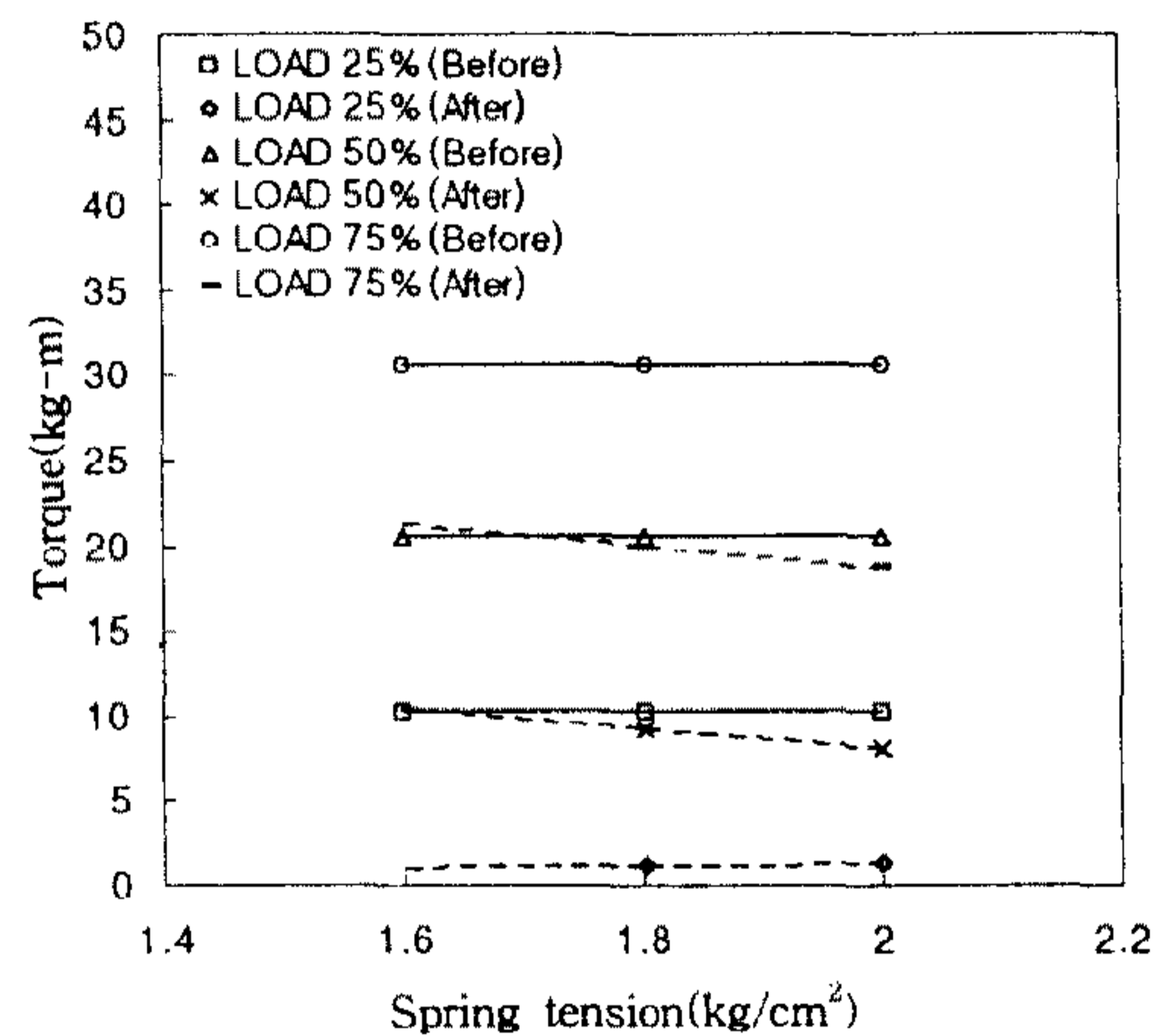


Fig.14 Torque as a function of spring tension at 2,500rpm and 30 second of throttling time

화가 없음을 알 수 있다. 그리고 트로틀링을 걸기 전과 후의 변화는 최고 약 2% 정도이고, 최저 산소 농도가 약 9%로, 여과된 입자상물질이 충분히 연소하기 위한 산소 농도가 5% 정도임을 감안할 때, 트로틀링 시간과 장력에 상관없이 재생에 필요한 산소량은 충분함을 알 수 있다.

Fig.13과 Fig.14는 2,500rpm, 트로틀링 시간과 밸브스프링 장력에 따른 기관출력 변화를 기관

부하별로 나타내었다. 그림에서 실선은 트로틀링 전의 기관출력이며, 점선은 트로틀링 후의 기관출력을 나타내었다. 그림에서와 같이 트로틀링 시간과 장력에 따른 기관출력 변화는 거의 없는 것으로 나타났으나, 트로틀링을 걸기 전에 비해 기관출력은 최고 36% 정도의 감소를 나타내고 있지만, 실제 트로틀링은 고부하, 고속구간에서 일어나며, 전체 운행시간의 1~2%를 차지하므로 실차

운행에는 커다란 영향을 주지 않는다.

으로 수행되었습니다.

4. 결 론

본 실험에서는 매연여과장치의 필터 내의 입자상물질을 원활히 재생시키기 위해서 자연재생방식인 세륨첨가제방식과 강제재생방식인 트로틀링방식에 의하여 재생이 가능한 온도 범위를 파악하고자 하였다. 이를 위하여 축적된 매연을 재생시킬 때 중요한 인자인 트로틀링 시간과 트로틀링 밸브장력의 변화에 따른 필터입구온도와 필터내의 산소량, 토크의 영향을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 필터의 배압은 기관부하를 증가시킴에 따라 배압 증가율은 69%인데 비해 기관회전속도 증가에 의한 최고 배압 상승율이 330%로, 배압은 기관의 부하에 의한 영향보다 기관회전수에 의한 영향을 더 많이 받는다.
- 2) 밸브스프링 장력 1.8kg/cm^2 에서의 온도 상승폭은 트로틀링 시간에 관계없이 1,500rpm, 75% 부하 이상에서 트로틀링에 의하여 첨가제에 의한 최적 재생 온도인 350°C 이상의 온도를 확보하였으며, 또한 밸브스프링 장력 2.0kg/cm^2 에서는 2,500rpm, 25% 부하 이상의 구간에서 최적 재생 온도가 얻어진 것으로 생각된다.
- 3) 트로틀링에 의한 배출 산소량과 기관출력의 감소는 최고 2%, 36%이지만 트로틀링 시간과 트로틀링 밸브 장력에 대해서는 거의 변화가 없다.
- 4) 위의 결론에서 볼 때 밸브스프링장력과 트로틀링 시간에 따른 변화량이 적으므로 불필요한 배기부하를 줄이는 한도에서 최적 재생온도가 확보되는 밸브스프링 장력 1.8kg/cm^2 과 트로틀링 시간 20초가 최적 조건이라고 생각되어진다.

후 기

본 연구는 1997년도 한국과학재단 지정 계명대학교 저공해자동차부품기술개발센터의 연구기금

참 고 문 헌

1. Ajay K. Gantawar, Cornelius N. Opris, and John H. Johnson, "A Study of Regeneration Characteristics of Silicon Carbide and Cordierite Diesel Particulate Filters Using a Copper Fuel Additive", SAE No. 970187, 1997.
2. K. Pattas, Z. Samaras, and A. Roumbos "Regeneration of DPF at Low Temperatures with the Use of a Cerium Based Fuel Additive", SAE No. 960135, 1996.
3. Lemaire, J. and Khair M., "Effect of Cerium Fuel Additive on the Emissions Characteristics of a Heavy-Duty Diesel Engine", SAE No. 942067, 1994.
4. Cooper, B. J. and Thoss, J. E., "Role of NO in Diesel Particulate Emission Control", SAE No. 890404, 1989.
5. 박동선, 김재업, 이만복, 김용서, "디젤기관으로부터 배출되는 입자상물질의 제거장치 개발에 관한 기초연구-버너방식", 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, 1995.
6. 강인호, 조재명, 한영출, "디젤기관의 필터트랩에서 비너형식과 스토틀링 형식의 열재생 해석에 관한 연구", 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, 1993.
7. Caceres, J. I. and Yannis, A. L., "An Aerodynamically Regenerated Diesel Particulate Trap Coupled to an Electric Soot Incinerator with Dual Wall Flow Filters", SAE No. 950371, 1995.
8. Paul Kojetin, Frank Janezich, Lisa, and Dan Tuma, "Production Experience of a Ceramic Wall Flow Electric Regeneration Diesel Particulate Trap", SAE No. 93129, 1993.
9. Rao, V. S. et al., "Advanced Techniques for Thermal and Catalytic Diesel Particu-

- late Trap Regeneration”, SAE No. 850014, 1985.
10. Hardenberg, H. O. and Daudel, H. L., “Particulate Trap Regeneration Induced by Means of Oxidizing Agents Injected Into the Exhaust Gas”, SAE No. 870016, 1986.
 11. Johnson, J, H. et al., “A study of the Regeneration Process in Diesel Particulate Traps Using a Copper Fuel Additive”, SAE No. 960136, 1996.