

# 稀釋터널을 사용한 디젤엔진 微粒子狀 排出物 測定에 關한 研究

An Experimental Study on Measurement of Diesel Particulate  
Emission Using Dilution Tunnels

蔡 載 宇\*, 金 熙 洙\*\*, 吳 信 奎\*\*  
J.O. Chae, H.S. Kim, S. K. Oh

## ABSTRACT

A Mini-Dilution Tunnel is described as a scaled down comparison of a Standard Tunnel.

This paper presents the result of experimental investigations on measuring the particulate emission of a diesel engine in a Mini and a Standard Dilution Tunnel.

The result offers a contribution to understanding about the influence of several parameters including dilution ratios, mixture temperatures, mixture conditions, filter temperatures, and flow conditions.

In the experiment either increasing the filter temperature and mixture temperature at a fixed dilution ratio or increasing the dilution ratio at a fixed filter temperature and mixture temperature resulted in a decrease in the total particulate mass.

These changes in total particulate mass were attributed to the changes in the soluble organic fraction of the particulate sample.

Also, mass differences between the Mini and the Standard Dilution Tunnel for the same engine conditions were within approximately 15% of each other.

	기 호 설 명	$A_m$ : 가스 채취 체적, $m^3$	
		$V$ : 체적 (volume)	
		[ ] : 농도	
$C_p$ : 미립자 농도 $mg/m^3$			첨 자
$DR$ : 희석비			
$M_m$ : 포집된 미립자의 질량, $mg$		$a$ : 대기	
$R_e$ : 레이놀즈수		$d$ : 터널	
$STD$ : Standard		$e$ : 배기가스	
$T_M$ : 터널內 혼합기체 온도, $^{\circ}C$			

\* 正會員, 仁荷大學校 機械工學科

\*\* 仁荷大學校 大學院 燃燒工學研究室

## 1. 서 론

최근 연료절감에 대한 인식이 증가되면서 소형 디젤엔진의 사용이 증가되고 있으며<sup>1)</sup> 이러한 증가에 의한 대기오염, 특히 미립자상 배출물에 의한 대기오염이 사회적 문제로 대두되고 있다.

자동차동 운송수단에 의해 배출되는 미립자의 약 20%가 디젤엔진에 의해 배출되고 있으며,<sup>2)</sup> 그 크기 또한 배출물의 약 90%가 1 $\mu$ m 이하이므로 대기중에 장기간 체류하여 인체에 해를 끼칠 수 있다.<sup>3)</sup> 이러한 이유로 미국EPA에서는 경량디젤 자동차의 미립자상 배출물을 규제해오고 있으며 더욱 엄격한 규제가 예상되고 있다.<sup>4,4)</sup>

미립자상 배출물은 실제로 엔진에서 배출되는 것과 대기중으로 확산 하면서 물리적, 화학적 변화에 의한 생성물로 나눌 수 있다.<sup>5)</sup> 배출후의 미립자의 변화는 배출입자의 크기가 다양하게 변화하는 것과<sup>6)</sup> HC와 황산화물의 응축에 의한 절대량의 변화가 있다.<sup>7,8,9,10)</sup>

그러므로 실제 대기중으로 확산되는 미립자의 양을 알기 위해서 배기가스가 대기중으로 확산될때의 가능한 변화를 모두 포괄하는 회석 터널법에 의해 포집의 어려움을 최소화 할 수 있다.

그러나 회석터널법은 배기가스를 다량의 공기와 유동중에 회석시켜야 하므로 장치가 거대하여 설치와 운전이 어려움을 갖고 있다.

본 연구에서는 이러한 기존의 회석 터널(이하 표준터널이라 칭함)을 소형 경량화 하기 위해 소형 경량화된 터널(이하 소형 터널이라 칭함)을 제작하여 회석비, filter 온도 및 혼합 온도에 따른 영향을 표준터널과 비교 분석하고자 한다.

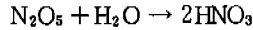
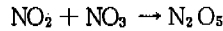
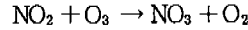
## 2. 이론적 고찰

연소시 생성되는 Soot, fly ash, dust를 primary 미립자라 말하며 secondary 미립자는 대기중에서 물리적, 화학적 반응에 의해 생성되는 미립자를 말한다.<sup>11)</sup>

secondary 미립자의 생성기구는



반응식에 의한 황산염 미립자 생성과 불완전 연소 생성물인 HC의 응축에 의한 미립자 생성 및 다음 반응식과 같은 질산염 미립자 생성기구조로 나뉘 볼 수 있다.



또는  $NO_2 + OH + M \rightarrow HNO_3 + M$

회석터널의 사용에 있어서 회석비의 증가는 미립자가 응집작용을 할 수 있는 기회를 감소시키며 유동의 난류강도를 증가시킴으로써 터널의 가스 채취 단면에서 혼합가스 온도를 균일하게 한다.<sup>12)</sup>

공기와 배기가스의 회석비 DR은

$$V_d = V_a + V_e$$

$$V_d \cdot [CO_2]_d = [CO_2]_e \cdot V_e + [CO_2]_a \cdot V_a$$

또는

$$V_d \cdot [NO_x]_d = [NO_x]_e \cdot V_e$$

$$DR = V_d / V_e \text{에서}$$

$$DR = \frac{[CO_2]_e - [CO_2]_a}{[CO_2]_d - [CO_2]_a} \dots\dots\dots (1)$$

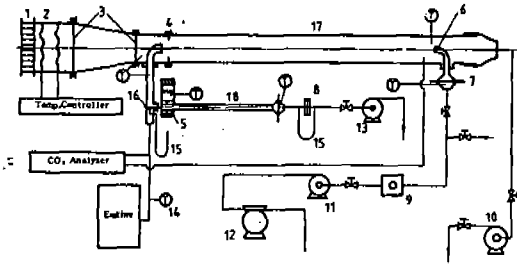
$$= \frac{[NO_x]_e}{[NO_x]_d} \dots\dots\dots (2)^{13)}$$

로 결정 할 수 있다. 단 여기서 첨자 a, d, e는 각각 대기, 터널, 배기가스를 말한다.

## 3. 실험장치

실험장치는 Fig.1에서 보는 바와 같이 단기통 수냉식 디젤엔진, 엔진에 동시에 연결된 표준터널(STD Dilution Tunnel), 소형 터널(Mini Dilution Tunnel)과 CO<sub>2</sub>농도 측정장치, 온도조절 및 측정장치, 유동의 유량 및 유속 측정장치로 구성되어 있다.

각각의 터널은 회석용 공기 준비계, 유동을 발달시키는 터널, 배기가스의 터널내 분출계,



- |                                    |                    |
|------------------------------------|--------------------|
| 1. Air Filter                      | 10. Blower         |
| 2. Heater                          | 11. Suction Pump   |
| 3. Mixing Mesh                     | 12. Gas Meter      |
| 4. Orifice                         | 13. Vacuum Pump    |
| 5. Mixing Blade                    | 14. Thermometer    |
| 6. Particulate Sam-<br>pling Probe | 15. Manometer      |
| 7. Filter Holder                   | 16. Sampling Probe |
| 8. Orifice                         | 17. STD Tunnel     |
| 9. Flow Meter                      | 18. Mini Tunnel    |

Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

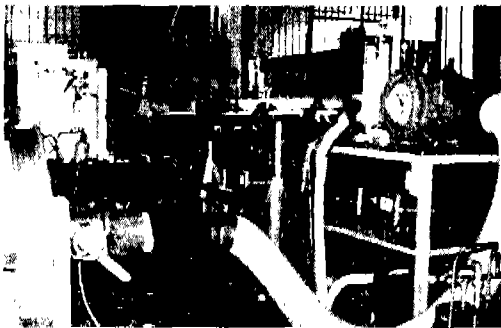


Photo.1 Photograph of Experimental Apparatus

(A: Mini-tunnel)  
(B: STD tunnel)

isokinetic sampling을 위한 probe계, 공기와 엔진배기가스 혼합장치로 구성되어 있다.

본 실험에 사용한 표준터널은 미국 EPA의 희석터널법에 대한 규정에 준하여 제작하였다. 배기가스의 터널내 분출방법은 Co-current Mixing Orifice 방법을 사용하였다.

소형터널에서는 probe를 사용, 배기가스를 추출하여 터널내에서 희석용 공기 준비제로부터의 희석용 공기와 혼합되면서 유동이 발달된 다음, 터널내 유동량 전체가 filter를 통

과하도록 하였다.

미립자를 채취하는데는 특별히 isokinetic sampling이 필요하나 엔진에서 배출되는 미립자의 크기는 90%가  $1\mu\text{m}$  이하이므로 non-isokinetic sampling에 의한 미립자 농도 측정오차를 무시할 수 있다.<sup>14),15)</sup> Photo.1은 실험장치의 사진이다. Fig.2는 본 실험에 사용한 배기가스 채취 probe의 상세도이며 probe의 내부유동과 외부유동의 정압차를 측정하여 isokinetic sampling을 이룰 수 있다.

희석터널은 터널내경 ID = 45.2 mm, 터널총합길이 L = 1.3 m이며 내면이 매끄러운 stainless steel 304 pipe를 사용하였다.

filter holder는 Fig.3에서 나타낸 바와 같이 filter의 온도를 조절할 수 있도록 filter holder 외부에 heater를 설치하였으며, heater에 공급하는 전원의 전압을 조절하여 filter 중심부의 온도가 40°C에서 60°C까지 유지할 수 있도록 했다.

공기 청정 filter는 가로 27 cm, 세로 10 cm, 두께 3 cm의 glass fiber를 사용했으며 0.5 kw

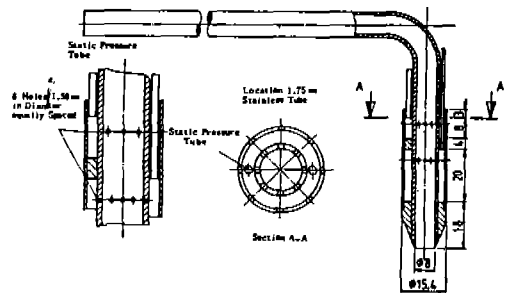


Fig. 2 Gas Sampling Probe

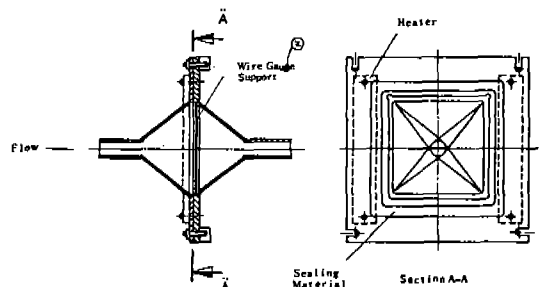


Fig. 3 Filter Paper Holder

의 전열선을 공기준비계에 설치하였다. Fig. 4에서 나타난 혼합부는 서로 상반되는 선회를 일으키는 2개의 익렬과 터널의 길이 방향으로 뚫린 6개의 orifice를 통하여 공기 유동의 난류강도를 높힌 다음 배기가스와 접촉 혼합이 용이하도록 하였다.

#### 4. 실험방법

회석비는 (1)식에 의해 결정하였으며 Fig. 5는 CO<sub>2</sub> 농도 측정장치 개략도로써 채집된 가스를 미립자 제거, 습기제거 후 Gas chromatograph (Model GC-7A series 일본 Shimadzu Corp.)로 측정하는 것을 나타내고 있다. Gas chromatograph는 건 배기가스 기준으로 측정되므로 습배기가스중 CO<sub>2</sub> 농도는 다음식에 의해 환산할 수 있다.

$$[CO_2]_e = [CO_2]_{e-dry} \times \frac{1}{1 + [H_2O]_e}$$

여기서 [H<sub>2</sub>O]<sub>e</sub>는 배기가스중 수분의 몰분율이다.

미립자 농도 측정은 두 터널이 동일한 혼합 온도, 회석비가 되도록 한 후 동시에 두 터널

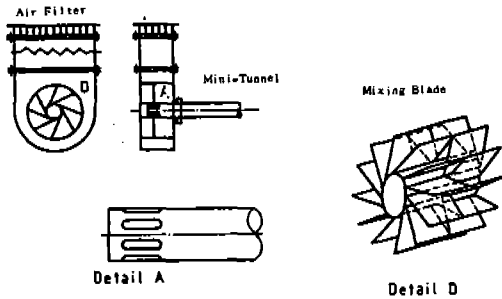


Fig. 4 Mixing Device for Mini-Tunnel

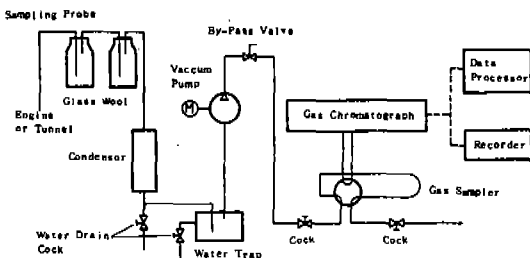


Fig. 5 Gas Sampling System

에서 측정했다.

표준터널에서는 가스 채취 단면의 중심부 유속을 피토티관으로 측정하여 probe 로의 가스 유입속도가 터널 중심부 유동속도와 같도록 조절하기 위해 유량계를 사용하였다. 소형터널에서는 터널의 상류에 부착된 미립자가 포집농도에 미치는 영향을 제거하기 위해 약 20분간 10 m/s 이상의 속도로 유동을 흘려 보낸후 초집을 시작하였다.

filter는 0.3 μm 입자를 99% 포집하는 microglass fiber filter (U. K, Technical paper Division, Inc.) 100 × 100 mm (겉측부 90 × 90 mm)를 사용하였다. filter에 걸린 미립자 무게 및 채취한 가스의 체적과 회석비를 알면 엔진에서 배출되는 미립자의 농도를 알 수 있다. 배기가스의 미립자 농도는

$$C_p = \frac{M_m}{V_m} \cdot DR \cdot (273 + T_M / 293) \text{ mg / ml} \dots (3)$$

이며 filter에 포집된 미립자에 의해 filter 전후의 압력차가 증대하여 채취유량이 점차 감소하게 되는데 이는 계속적으로 계기를 보면서 압력차 증대를 보상할 수 있도록 밸브를 열어 주었다. 또한 filter holder에 부착된 미립자가 filter에 옮겨 붙는 일이 없도록 filter holder를 아세톤으로 닦아낸 뒤 사용하였다.

#### 5. 결과 및 고찰

Fig. 6은 터널의 가스채취 단면에서의 배기가스와 회석용 공기의 혼합정도를 도시한 것으로 표준터널과 소형터널 모두 tracer gas로 CO<sub>2</sub>를 사용하여 채취단면 각 지점의 CO<sub>2</sub> 농도를 중심부 CO<sub>2</sub> 농도와 비교한 것이며 두 터널 모두 충분한 혼합이 이루어 졌음을 알 수 있다.

Fig. 7은 R<sub>e</sub> = 8500에서 소형터널의 혼합능력을 나타낸다. mixing blade를 사용한 소형터널의 혼합능력은 mixing orifice를 사용한 표준터널 보다 다소 벌어진다.

Fig. 8은 표준터널과 소형터널을 동일한 회석비(DR=10~30) 및 터널내 온도(35~45

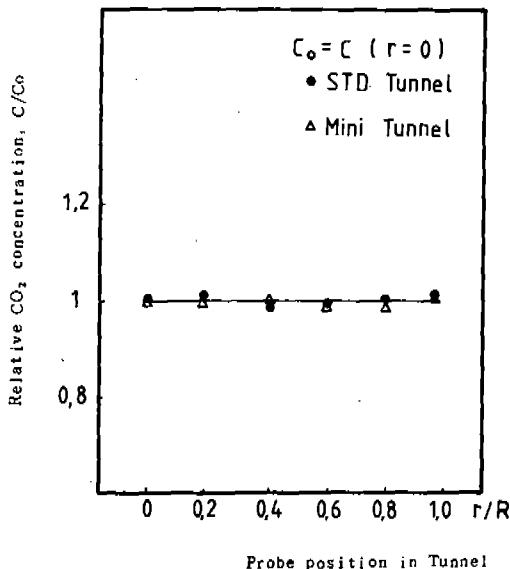


Fig. 6 CO<sub>2</sub> distribution in the Tunnel at sampling Section

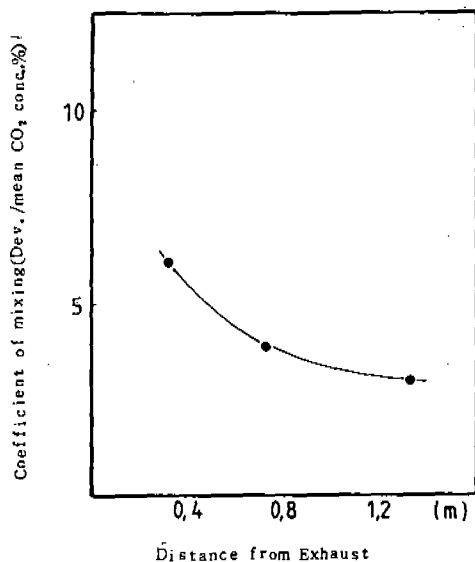


Fig. 7 Mixing coefficient as a function of the mixing distance for Mini-Tunnel.

°C) 조건하에서 미립자 농도를 비교한 것으로, 두개의 터널에서 측정된 미립자 농도는 거의 같은 값을 나타내고 있다.

Fig. 9는 터널내의 혼합가스의 온도를 일정하게 유지 했을 때 희석비 변화에 따른 농도

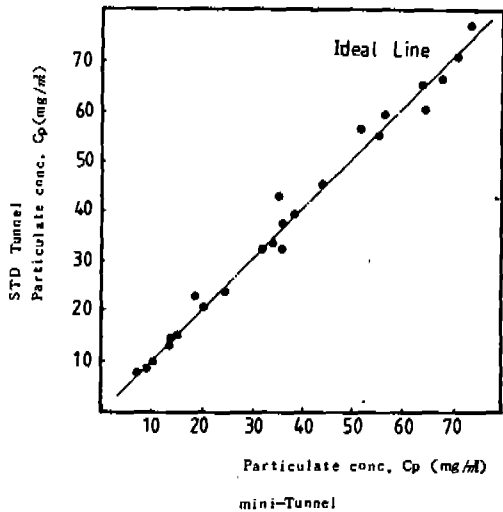


Fig. 8 Comparison of particulate concentrations of STD tunnel and Mini-Tunnel

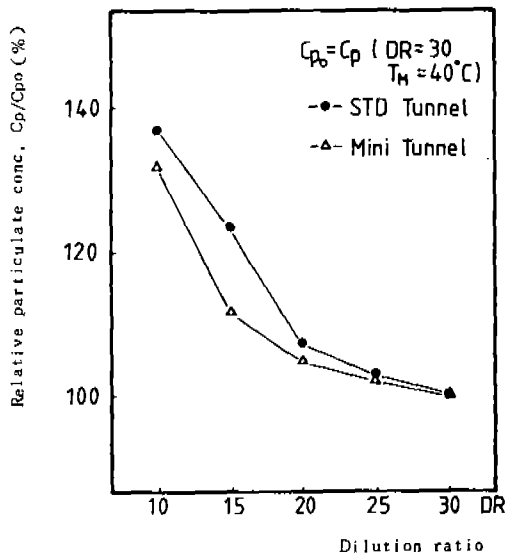


Fig. 9 Influence of dilution ratio on particulate concentration

의 변화를 나타내고 있다. 표준터널에서는 희석비 DR=30에서의 미립자농도를 기준(100%)으로 볼 때 희석비 DR=10에서 미립자 측정농도는 136%가 되었으며, 소형터널에서는 132%를 나타내었고 두 터널 모두 큰 희석비로 갈수록 농도변화가 줄어드는 경향이 있다. 희석비의 증가는 미립자의 응집작용이

일어날 가능성을 감소시키며 유기성 용매에 녹는 물질의 응축이 적어지므로 측정 미립자량을 감소시키게 된다.

Fig. 10은 각 희석비에서 표준터널과 소형터널의 동일 혼합온도에서의 미립자 농도비를 나타내며 희석비  $DR=10$ 에서는 거의 일치하였으나 희석비  $DR=20$ 까지는 표준터널이 그 이상에서는 소형터널이 다소 많이 포집된 경향을 나타내고 있다. 이는 터널내 혼합정도와 유동의 난류강도, 열평형, 가스채취의 isokinetic 정도가 복합적으로 연관된 결과라 여겨진다. 혼합방법만을 기준으로 하여 볼 때 소형터널의 초기 혼합능력이 표준터널 보다 다소 떨어지므로 표준터널에서 높은 미립자농도를 나타낼것이 예상된다. 그러나 적은 희석비에서, 표준터널은 터널내에서 혼합가스의 잔류시간이 길고 유동속도가 느리므로 미립자의 침전과 표면부착 가능성이 높아서 대등한 포집농도를 보였다.<sup>16)</sup> 또한 희석비의 증가는 상기(上記)한 영향이 감소하고 열평형에 따른 HC의 응축과 채취손실의 영향이 나타난다고 볼 수 있다.

Fig. 11과 Fig. 12에서 보는 바와 같이 표준

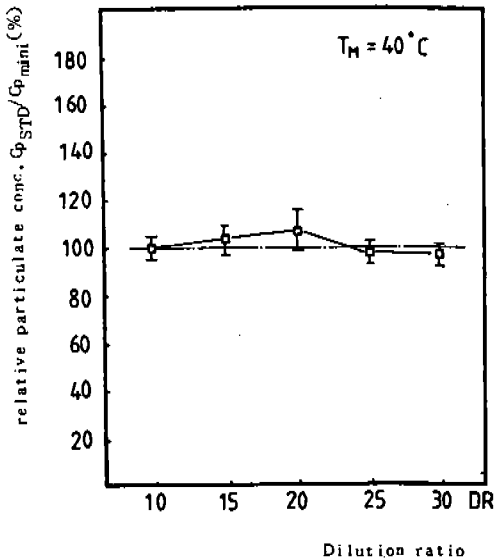


Fig. 10 Comparison of STD Tunnel and Mini-Tunnel particulate concentration at same dilution ratio

터널과 소형터널은 각각 35 °C, 40 °C, 45 °C의 혼합온도에서 희석비에 대한 영향은 서로 유사하다.

Fig. 13에서 소형터널의 희석비  $DR=20$ 에

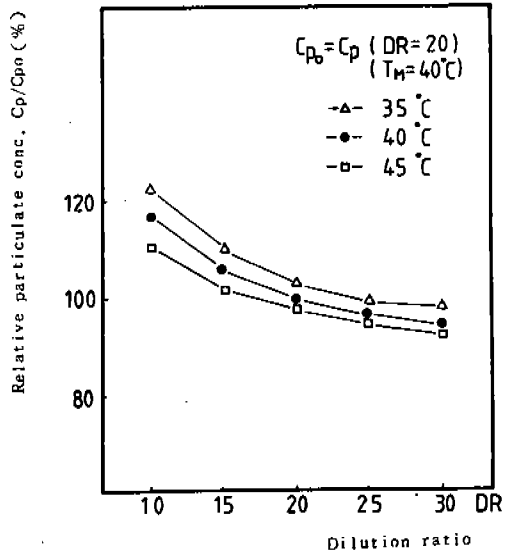


Fig. 11 Dependence of particulate concentration on dilution ratio for various mixture temperatures (mini-Tunnel)

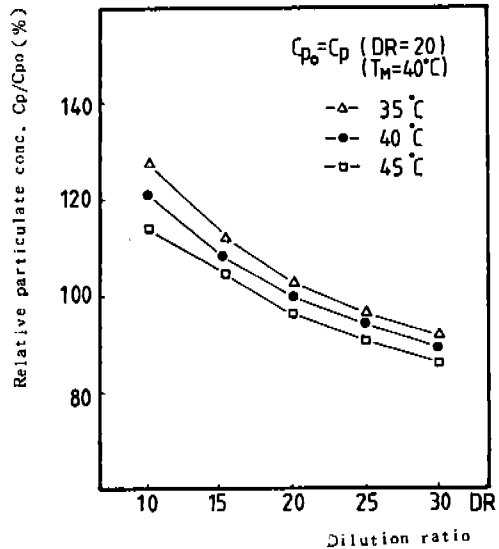


Fig. 12 Dependence of particulate concentration on dilution ratio for various mixture temperatures (STD Tunnel)

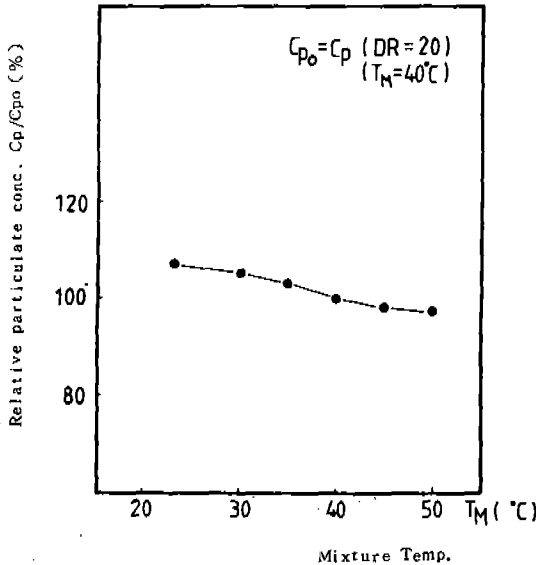


Fig. 13 Influence of mixture temperature on particulate concentration in Mini-Tunnel

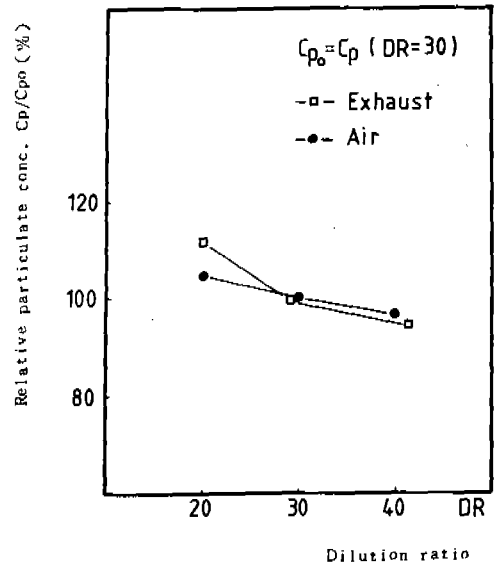


Fig. 15 Influence of dilution ratio on particulate concentration in Mini-Tunnel - Comparison of exhaust gas flow variation and air flow variation

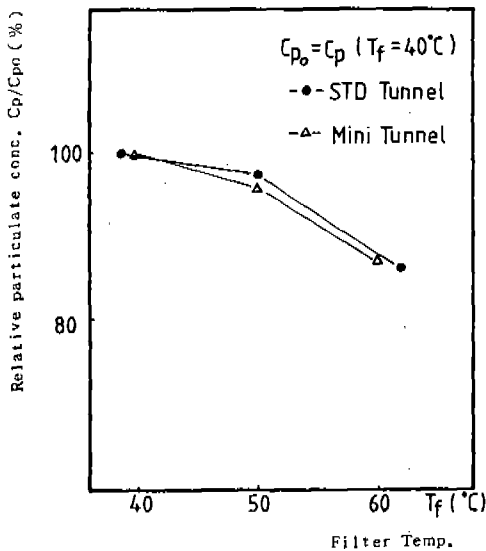


Fig. 14 Influence of mixture temperature on particulate concentration-Comparison of STD Tunnel and Mini-Tunnel

서의 혼합온도에 대한 영향은 혼합온도를 24 °C에서 50 °C까지 증가시켰을 때 약 10%의 농도 감소를 보였다. 이는 혼합온도가 높아지면 응축과 흡착에 의한 secondary 미립자의 증가

가 완화됨에 기인한다.

Fig. 14에서 터널내의 공기와 배기가스의 혼합온도를 일정하게 하고 filter 온도만을 변화시켰을 경우 filter 온도가 높을수록 미립자 농도는 줄어들며 표준터널과 소형터널에서 같은 경향을 보이고 있다. 이는 높은 filter 온도에서 HC 등이 응축되지 않고 가스상태로 filter를 빠져나가기 용이하며 filter에서의 흡착과 이탈과의 평형이 온도증가에 따라 이탈 쪽으로 이동하는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 15는 동일한 희석비를 배기가스의 유량을 변화(probe 크기변화, 내경 8 mm, 6.45 mm, 4 mm)시킨 것과 공기유량을 변화시킨 것을 비교한 것으로 배기가스의 유량을 변화시킨 것이 희석비에 따른 농도변화가 크게 나타난다. 이는 배기가스 유량 변화에 따라 터널내로 들어오는 배기가스의 온도 변화가 수반되는 것에 기인한다.

## 6. 결 론

본 연구는 미국EPA에서 공인한 표준터널과 소형 경량화한 소형터널의 디젤엔진의 미

립자상 배출물의 측정에 있어서 회석비, filter 온도, 혼합온도에 따른 영향을 비교 실험하여 얻은 결과를 검토하여 두 터널의 사용변수에 대한 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 두 터널의 동일혼합온도, 동일회석비에 있어서 측정된 미립자 농도비는 15% 오차 범위 내에 있고 회석비 25 이상에서는 두 터널 사이의 차는 없다.

2) mixture temperature가 낮을수록 포집량은 높아지며 따라서 채취 probe 위치에서의 온도는 50°C이하가 바람직하다.

3) 동일 혼합온도에서 회석비에 따른 표준 터널과 소형터널의 포집농도비는 10%이내의 변화를 가지며 회석비가 25 이상에서 두 터널 사이에 비교적 좋은 상관성이 얻어졌다.

4) filter 온도에 대한 영향은 두 터널에서 유사하며 filter 온도가 40°C에서 온도 10°C 증가에 따라 약 6% 감소하는 경향이 있으며 온도 50°C이상에서는 급격히 변화하므로 filter 온도는 50°C 이하가 바람직하다.

## REFERENCES

1. J. Scott MacDonald and Steven L. Plee, "Experiemtnal Measurements of the Independent Effects of Dilution Ratio and Filter Temperature on Diesel Exhaust Particulate Samples," SAE Paper 800185, 1980.
2. Larry E. Frisch, John H. Johnson and David G. Leddy, "Effect of Fuels and Dilution Ratio on Diesel Particulate Emissions," SAE Paper 790417, 1979.
3. Eric F. Funkenbusch, David G. Leddy and John H. Johnson, "The Characterization of the Soluble Organic Fraction of Diesel Particulate Matter," SAE Paper 790418, 1979.
4. G. Greeves and C.H. Twang, "Origins of Diesel Particulate Mass Emission," SAE Paper 810260, 1981.
5. William H. Lipkea and John H. Johnson, "The Physical and Chemical Charcter of Diesel Particulate Emission - Measurement Techniques and Fundamental Consideration," SAE Paper 780108, 1978.
6. Carl T. Vuk, Martin A. Jones and John H. Johnson, "The measurement and Analysis of the Physical Character of Diesel Particulate Emissions," SAE Paper 760131, 1976.
7. Earl L. Merryman and Arthur Levy, "Sulfur Trioxide Flame Chemistry - H<sub>2</sub>S and COS Flame," 13th Symposium (International) on Combustion, p. 427, The Combustion Institute, 1971.
8. N.J. Khatri, at el., "The Characterization of the Hydrocarbon and Sulfate Fraction of Diesel Particulate Matter," SAE Paper 780111, 1978.
9. James C. Clerc and John H. Johnson, "A Computer Heat Transfer and Hydrocarbon Adsorption Model for Prediction Diesel Particulate Emissions in Dilution Tunnels," SAE Paper 821218, 1982.
10. Stefan Reichel and Franz F. Pischinger, "Influence on Particulate in Diluted engine Exhaust Gas," SAE Paper 831333, 1983.
11. Paul F. Fennelly, "Primary and Secondary Particulates as Pollutants," J. of Air Poll. Control Assoc., Vol. 22, No. 7, July, 1975.
12. Kamram Habibi, "Characterization of Particulate Matter in Vehicle Exhaust," "Environmental Science and Technology," Vol. 7, No. 3, March, 1973.
13. Steven L. Plee and Scott MacDonald, "Some Mechanisms Affecting the Mass of Diesel Exhaust Particulate Collected Following a Dilution Process," SAE Paper 800186, 1980.



14. Arthur C. Stern, "Air Pollution," Part C, 3rd ed., Academic Press, New York, 1976.
15. Prof. J. Beer and Prof. M.W. Thring, "Industrial Flames, "Vol. 1, Measurement in flames, International Flame Research Foundation, 1972.
16. Kamram Habibi, "Characterization of Particulate Lead in vehicle Exhaust - Experimental Techniques, "Exviromental Science and Technology, Vol. 4, No. 3, March, 1970.