

디젤 매연여과기 (DPF) 내에서의 음향전파 Sound Propagation through the Diesel Particulate Filter (DPF)

최 원 용† · 이 정 권* ·
Won-Yong Choi, Jeong-Guan Ih

Key Words: Diesel Particulate Filter (디젤 매연여과기), Transmission Loss (전달손실), Porous Capillary Tube (다공질 모세관), Pressure Loss Coefficient (압력손실계수)

ABSTRACT

Diesel particulate filter (DPF) is comprised of a number of capillary tubes enclosed by porous ceramic walls, shaped like a plugged duct. Hot gas flows through the DPF along with the exhaust noise from Diesel engine. Based on previous works on the sound propagation through DPF, in this study, losses at entrance, exit, and ceramic walls are considered and the gradients in temperature and flow velocity are considered. Transfer matrix at entrance, monolith, and exit parts are obtained by employing the segmental approach in analyzing the sound propagation through DPF. The predicted transmission loss agrees very well with the empirical one, which is measured by the improved method with correction terms.

1. 서 론

디젤 엔진의 배기가스는 많은 입자상 물질 (PM)을 포함하고 있으므로, 디젤 자동차의 대중화를 위해서는 날로 강화되는 환경기준을 만족시킬 수 있는 획기적인 입자상 물질 저감 기술이 필요하다. 따라서 입자상 물질의 저감을 위한 많은 기술들이 개발, 사용되고 있는데, 그 중 디젤 엔진의 배기계에 장착되는 디젤 매연여과기 (Diesel particulate filter, DPF)가 필수적인 것으로 인식되고 있다. DPF 는 입구와 출구가 교대로 막힌 형태의 (plugged-flow type) 수 천 개의 모세관으로 이루어져 있고, 이들 벽면에서 일어나는 벽면투과 현상 (wall flow effect)에 의해 입자상 물질은 포집되고 여과된다.

본 논문에서는 실제 작동조건인 DPF 에서 음향전파특성을 예측하는 모델을 제시한다. 모세관 내 경계층에서 점성과 열전달의 효과 및 DPF 내부의 온도구배와 속도구배를 고려한다. Allam 과 Åbom 의 선행연구 [1,2]에서는 예측을 위해 유동비저항에 대한 실험 값이 필요했고 DPF 축 방향의 온도구배와 속도구배는 무시되었다. 본 논문에서는 다공질 모세관의 음향특성을 예측하는데 필요한 실험값을 사용하지 않기 위해, DPF 의 입구와 출구를 모델링 하는데 압력손실계수를 사용한다. 온도구배와 속도구배의 영향을 고려하기 위해 DPF 의 모노리스 (monolith)를 다수의 구획으로 나누는 구획모델을 사용한다. 입구, 출구, 모노리스

영역을 모델링 하면 DPF 의 전달행렬이 결정된다. 구해진 4 단자 정수 (four-pole parameters)를 이용하여 DPF 의 전달손실 (TL)을 예측한다. 예측된 전달손실을 선행연구 [1,2] 및 측정된 실험값과 비교한다. 전달손실 측정 시 발생하는 오차를 최소화 하기 위해 보정 항을 추가한 개선된 실험 방식을 제시하고, 제시된 방법으로부터 실험오차가 크게 감소함을 볼 수 있었다. 그리고 나서 두 종류 상용 DPF 를 대상으로 실제 작동조건에 맞춰 실험관련 인자들을 바꿔가며 전달손실을 예측한다.

2. 해석이론

DPF 의 음향전파특성을 예측하는 전달행렬을 구하기 위해, Fig.1 과 같이 DPF 를 입구 (i), 출구 (o), 모노리스 영역 (m) 으로 나눈다. 그러므로 DPF 의 전체 전달행렬은 다음과 같이 표현된다:

$$T_{DPF} = T_i T_m T_o \quad (1)$$

입구와 출구 영역

입구와 출구영역의 갑작스런 팽창과 확대 형상으로, Fig.1 과 같은 재순환 유동이 발생되고, 따라서 유동에 의한 압력손실이 발생된다. 이 경우 압력손실은 다음과 같이 표현된다:

$$\Delta P = 1/2 \rho K U^2 \quad (2)$$

여기서 K 는 압력손실계수, U 는 평균유속을 나타낸다.

식 (2)를 미분하고 유량기준으로 정리하면, 음향저항 (acoustic resistance)이 표현된다. 그러면 입구와 출구영역에서의 전달행렬은 다음과 같이 표현된다:

† 현재 현대자동차㈜ 근무
E-mail : cwyo@hyundai-motor.com
Tel : (02) 2182-2317, Fax : (02) 3464-3441

* 한국과학기술원 기계공학과

$$T_i = \begin{pmatrix} 1 & \rho K_i U/S \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, T_o = \begin{pmatrix} 1 & \rho K_o U/S \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3a,b)$$

여기서 S 는 DPF 단면적을 나타낸다.

DPF 의 입구영역과 출구영역이 Fig.2a,b 처럼 모델링 되기 때문에, Idelchik [3]으로부터 K_i 와 K_o 는 다음과 같이 표현된다:

$$K_i = \left[0.5(1-S_r)^{0.75} + \tau(1-S_r)^{1.375} + (1-S_r)^2 + f \frac{l}{d_h} \right] \frac{1}{S_r^2}, \quad (4)$$

$$K_o = \left[1 + 0.5(1-S_r)^{0.75} + \tau(1-S_r)^{1.375} + f \frac{l}{d_h} \right] \frac{1}{S_r^2}, \quad (5)$$

여기서 S_r 은 전체면적에서 열린 면적, τ 는 보정계수, f 는 마찰계수, l 은 플러그 길이, 그리고 d_h 는 수력직경을 나타낸다.

모노리스 영역

모세관에서 음파는 가진되는 주파수에 해당하는 파장의 길이가 다루고자 하는 주파수 범위 내에서 단면의 직경보다 크기 때문에 평면파로 가정한다. 또한 매질은 균일하다고 가정하며 유속은 일정하다고 가정한다. 축 방향 온도구배, 압력구배 및 모세관 채널 내 대류 열교환과 촉매로 인한 화학반응은 무시한다. 복소음향 전파상수를 구하기 위해 운동량 방정식, 연속방정식, 에너지방정식, 상태방정식을 Darcy 의 법칙 [2,4]로 표현되는 인접 채널 사이의 관계로부터 연립한다. 이 경우 음압은 다음과 같이 표현된다:

$$p_i = A_i \exp(j(\omega t - \Gamma_i x)), \quad (6)$$

여기서 Γ_i 는 복소음향 전파상수를 나타내고 i 는 채널 번호를 나타낸다.

음압과 유속 그리고 온도를 연립된 지배방정식에 대입하고 정리하면 모노리스의 전달행렬 (T : 4x4 행렬형태)이 구해진다 [5].

이상의 방법에서 축 방향 속도구배와 온도구배는 무시하였다. 그러나 실제 DPF 내부에서는 축 방향으로 속도구배와 온도구배가 존재하며, 따라서 이를 고려하기 위해 모노리스를 다수의 구획으로 나누는 구획모델을 제시하였다. Fig.3 은 구획모델의 개념을 보여준다. 다수의 구획으로 인해 각각 구획에서 변화하는 속도 및 온도가 결정될 수 있다. 따라서 속도 및 온도구배를 고려하는 수정된 전달행렬 (T' : 4x4 행렬 형태)는 다음과 같이 표현된다

$$T' = T_1 T_2 T_3 \dots T_{n-2} T_{n-1}, \quad (7)$$

여기서 T_k 는 k 번째 구획의 전달행렬을 나타낸다 ($k=1, 2, 3, \dots, n-1$).

경계조건을 적용하면 모노리스의 전달행렬 (T_m : 2x2 행렬 형태)가 결정된다. 앞에서 구한 T_i , T_m , T_o 로부터 DPF 전체의 전달행렬 (T_{DPF} : 2x2 행렬

형태)이 결정된다. 전달행렬이 결정되면 이로부터 전달손실을 구할 수 있다. 이론에 대한 좀더 구체적인 방법 및 정보는 참고문헌 [5]에 나타나있다.

3. 전달손실 측정

Fig.4 는 전달손실을 측정하는 실험장치 구성을 보여준다. 사용된 관은 지름 0.14 m 의 원형 알루미늄 관이고, 관의 직경에 의한 평면파의 한계주파수는 1400 Hz 이다. 음압 가진을 위해 DPF 상단 1.2 m 지점에 주파수 범위 50 Hz ~ 5.5 kHz 의 스피커를 설치하였고, sine sweep 신호를 사용하였다. 유동은 상온에서 마하수 0.01 의 압축공기를 사용하였다. 전파하는 음파가 관의 끝 단에서 반사되는 경우 신호 대 잡음비가 감소하게 되는데 따라서 이를 방지하기 위해 무반사 종단 (anechoic termination)을 설치하였다. 실험 표본으로 입자상 물질이 축적되지 않은 지름과 길이가 5.66 x 6 inch 인 Corning 사와 NGK 사의 DPF 를 사용하였다 (Corning: Cordierite type, EX80 100/17, NGK: SiC type, 200/17). 전달손실 측정을 위해 반사계수를 사용하는 방법 [6]과 4 단자 정수를 사용하는 방법 [7]이 사용되었다. 측정오차 영향을 줄이기 위해 3 마이크로폰 방법이 사용되었다 [8]. 구체적인 실험장치 및 방법은 참고문헌 [5]에 나타나있다.

Fig.5a 는 측정된 전달손실을 나타낸다. 측정 시 반사계수에 대한 뒤 덕트의 영향으로 인해, 반사계수를 이용하여 전달손실을 구하는 방법에는 실험오차가 발생한다. 이러한 실험오차 제거하기 위해 개선된 방법을 제시한다. Fig.6 을 참조하면 실험오차를 포함하는 전달손실 (TL) 과 오차를 포함하지 않는 전달손실 (TL')은 다음과 같이 표현된다:

$$TL = 20 \log_{10} \left| \frac{p_f'}{p_b'} \right| = 20 \log_{10} \left| \frac{1}{T_0} \right|, \\ TL' = 20 \log_{10} \left| \frac{p_f''}{p_b''} \right| = 20 \log_{10} \left| \frac{1}{T_1} \right|, \quad (8a,b)$$

여기서 T_0 은 DPF 자체의 투과계수를 나타낸다. T_1 은 뒤 덕트 길이의 영향으로 인해 왜곡된 반사계수의 영향을 받은 DPF 의 투과계수이므로, 따라서 TL' 이 참고문헌 [6]을 이용하여 측정한 전달손실이다.

전달손실 TL 을 구하려면 측정 마이크로폰의 위치는 DPF 의 바로 전면과 후면이어야 한다. 그러나 TL' 에서 측정점은 3 번과 4 번 마이크로폰의 위치이다. 따라서 측정점을 바꾸기 위해 거리 차 (l_s)을 고려해야 한다. 그러므로 반사계수 R_u , R_d 는 다음과 같이 표현된다:

$$R_u = \frac{p_f'^- \exp(-jkl_s)}{p_f'^+ \exp(jkl_s)} = R_0 \exp(-2jkl_s),$$

$$R_d = \frac{p_b'^- \exp(jkl_s)}{p_b'^+ \exp(-jkl_s)}. \quad (9a,b)$$

한편 $p_b'^+$ 은 다음과 같이 표현된다:

$$p_b'^+ = T_0 p_f'^+ + R_0 p_b'^-. \quad (10)$$

(9a,b)와 (10)을 사용하면 다음의 관계를 얻을 수 있다:

$$\frac{p_b'^+}{p_f'^+} = \frac{T_0}{1 - R_u R_d} = T_1. \quad (11)$$

그러므로 측정오차의 영향은 다음 관계식에 의해 최소화된다:

$$TL = TL' - 20 \log_{10} |1 - R_u R_d|. \quad (12)$$

Fig.5b는 개선된 결과를 보여준다. Fig.5a와 비교하면 실험오차가 크게 줄었음을 알 수 있다.

반사파가 존재하는 경우 보다 자세한 반사계수를 이용한 개선된 전달손실 측정 방법 및 4 단자 정수를 이용한 측정 방법에 대한 정보는 참고문헌 [9]에 나타나 있다.

4. 실험결과 및 결론

예측한 전달손실과 측정된 전달손실을 Fig.7에서 비교하였다. 구획개수는 개수와 전달손실에 대한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 5개로 하였다. 전달손실 측정 실험에서 고온의 온도구배를 고려할 수 없었기 때문에, 전달손실 예측에서도 온도구배는 무시하고 속도구배만 고려하였다. 작은 유속 ($M=0.01$)으로 인해 속도구배를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 차이는 0.1 dB로 속도구배가 전달손실에 미치는 영향은 무시할 수 있었다. 측정된 전달손실 결과를 바탕으로 본 논문에서 제안된 방법으로 예측한 전달손실이 측정값과 평균 0.3 dB 차이로 매우 잘 맞는다는 것을 알 수 있다. 선행연구와 비교해 보아도 예측결과가 더욱 개선되었음을 알 수 있다.

상온에서 전달손실 예측치와 실험치의 비교를 통해 제시된 모델의 타당성을 검증한 후, 속도구배 및 온도구배의 관련 인자들을 바꿔가면서 실제 DPF 작동조건에서의 전달손실을 예측하였다. Fig.8a에서 속도구배를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우, 유속이 증가함에 따라 전달손실의 차이는 증가하고 있음을 알 수 있다. 유속 10 m/s 이하에서는 속도구배를 고려한 경우와 안 한 경우의 차이는 0.1 dB 이하로 속도구배의 영향은 무시할 수 있었다. Fig.8b에서 온도구배를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 전달손실의 차이는 평균 0.1 dB로 온도차는 전달손실과 관련 없음을 알 수 있다.

Fig.9에서 속도와 온도구배를 동시에 고려한 경우 전달손실 차이는 유속이 증가함에 따라 증가하고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 비록 그 기여도는 작을 지라도, 속도구배가 온도구배보다 전달손실 변화에 더 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

본 논문에서 제시된 모델은 실제 디젤엔진 배기시스템의 음향특성을 분석하는 모듈 내 DPF의 음향특성을 예측하는 소프트웨어로서 효과적으로 사용될 수 있을 것이라 사료된다.

후기

본 연구는 BK21 project의 일부 후원을 받았습니다.

참고문헌

- [1] S. Allam and M. Åbom, "On acoustic modeling and testing of diesel particulate filters," Proceedings of Inter-Noise 2002, paper N 250 (2002).
- [2] S. Allam and M. Åbom, "On transmission of sound in diesel particulate filters," Proceedings of the 10th International Congress on Sound and Vibration, 3187-3194 (2003).
- [3] I. E. Idelchik, *Handbook of Hydraulic Resistance*, Chaps. 2, 3, 8, 11, CRC Press, Boca Raton (1994).
- [4] M. Masoudi, A. Heidel, and P. M. Then, "Predicting pressure drop of wall-flow diesel particulate filters - Theory and experiment," SAE Tech. paper 2000-01-0184 (2000).
- [5] 최원용, *디젤 매연여과기 내의 음향전파 해석에 관한 연구*, M.S. Thesis, KAIST (2005)
- [6] J. Y. Chung and D. A. Blaser, "Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory," J. Acoust. Soc. Am. **68**, 907-913 (1980).
- [7] M. L. Munjal and A. G. Doige, "Theory of a two source location method for direct experimental evaluation of the four-pole parameters of an aeroacoustic element," J. Sound Vib. **141**, 323-333 (1990).
- [8] S.-H. Jang and J.-G. Ih, "On the multiple microphone method for measuring in-duct acoustic properties in the presence of mean flow," J. Acoust. Soc. Am. **103**, 1520-1526 (1998).
- [9] 이성현, 이정권, 최원용, "반사파가 존재하는 음향장에서의 소음기의 음향성능 측정", 춘계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회, 625-628 (2005).

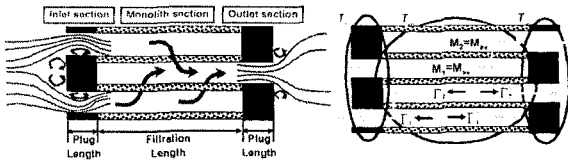


Fig.1 DPF 단면 모델.

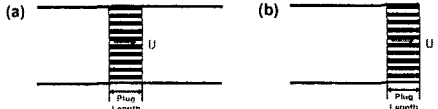


Fig.2 DPF의 압력손실 모델. (a) 입구 모델, (b) 출구 모델.

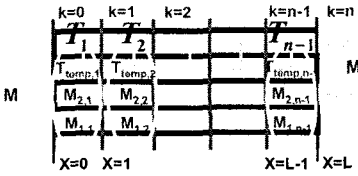


Fig.3 구획모델의 개념.

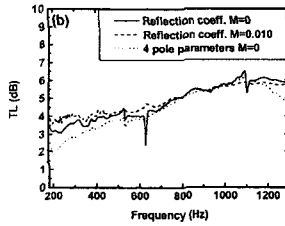
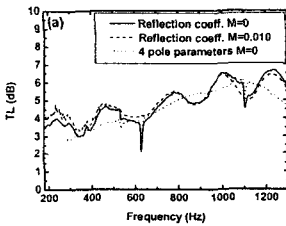


Fig.5 전달손실 측정결과 (Corning DPF). (a) 측정한 초기 전달손실, (b) 제시된 개선된 실험방법을 적용한 후 측정한 전달손실.

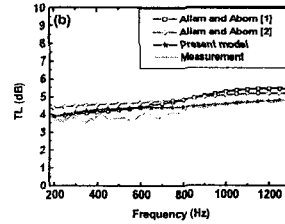
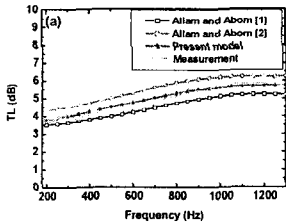


Fig.7 전달손실 예측치와 측정치 비교 ($T_0=293$ K). (a) Corning DPF, (b) NGK DPF.

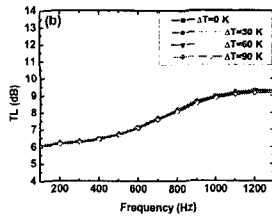
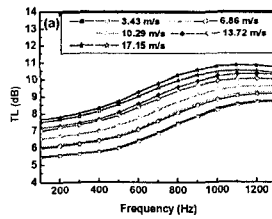


Fig.8 예측한 전달손실 (Corning DPF, $T_0=600$ K). (a) 다양한 속도구배에 대한 전달손실, (b) 다양한 온도구배에 대한 전달손실. 실선과 점선은 각각 구배가 있는 경우와 없는 경우를 나타낸다.

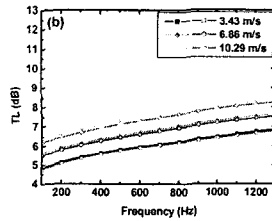
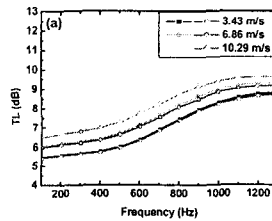


Fig.9 속도구배와 온도구배를 동시에 변화시킨 경우 예측한 전달손실 ($T_0=600$ K, $\Delta T=30$ K). (a) Corning DPF, (b) NGK DPF. 실선과 점선은 각각 구배가 있는 경우와 없는 경우를 나타낸다.

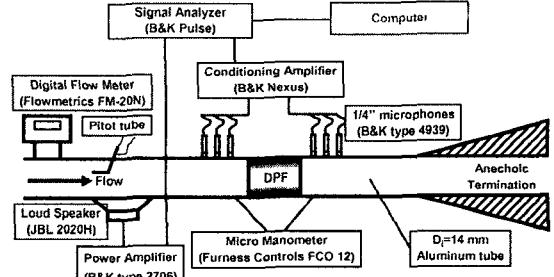


Fig.4 전달손실 측정 실험장치의 구성도.

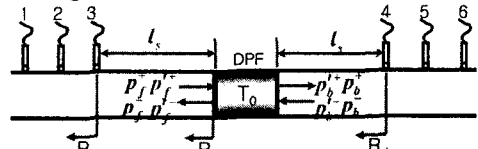


Fig.6 개선된 반사계수를 이용한 전달손실 측정방법의 개념도.