

유동소음을 고려한 건설장비용 머플러의 저소음화 연구

A Study on the Noise Reduction of Construction Equipment's Muffler with the High Velocity Flow

김형택† · 주원호* · 배종국*

Hyung-Taek Kim, Won-Ho Joo and Jong-Gug Bae

Key Words : Construction equipment(건설장비), Muffler(머플러), Flow Noise(유동소음), Insertion Loss(삽입손실)

ABSTRACT

The exhaust system, including a muffler, is one of the major sources to generate the radiated noise of construction equipment. The muffler is generally known that it reduces the exhaust noise level, but it sometimes increases the noise level because of the flow effect inside a muffler. So, it is required to consider the flow effect inside a muffler to reduce the exhaust noise level of construction equipment. In this paper, an experimental method to consider a quantitative flow effect inside a muffler was set up through a series of tests. Finally, the experimental result was verified through the flow noise analysis using CFD analysis result. These results make it possible to understand the dynamic characteristics of the flow noise and to design the low noise muffler for the construction equipment.

1. 서 론

경제 발전과 더불어 삶의 질 향상의 측면에서 환경 소음에 대한 관심이 높아짐에 따라 건설장비에 대해서도 작업에 필요한 기능적인 면뿐만 아니라 저소음, 저진동 등의 친환경성이 고객 선택의 중요한 기준이 되고 있다. 그러므로 건설장비의 품질 향상을 위하여 저소음화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

그 중에서도 엔진 배기소음은 건설장비의 소음원 별 기여도 분석 결과 외부 방사 소음 및 캐빈 내부 소음에 기여도가 높은 주요 소음원 중 하나이다. 따라서 건설장비의 품질 향상 및 경쟁력 확보를 위하여 엔진 배기 소음과 관련된 머플러(muffler)의 저소음화 연구가 필요하다.

일반적인 머플러의 이론에 따르면 유동(flow)이 음속의 0.1~0.2 배 정도까지는 머플러의 성능에 크게 영향을 미치지 않는다고 알려져 있다. 그러나 엔진 배기 시스템에 실제 유동이 흐르는 경우, 머플러의 구조 및 크기에 따라 소음이 저감되기도 하지만, 유동이 머플러 내부에 부딪혀 2차적으로 발생하는 유동소음(flow noise)으로 인해 오히려 소음이 커지기도 한다.

그러므로 본 논문에서는 저소음형 머플러의 개발을 목적으로, 머플러 내부에서 발생하는 유동소음의 정량적인 파악을 위해 유동이 있는 경우와 없는 경우의 머플러의 삽입손실 계측으로부터 유동 효과를 산출해낼 수 있는 시험 조건을 정립하였으며, 머플러 내부의 유동해석을 통하여 이로 인해 발생하는 유동소음을 해석적으로 구하여 시험 결과와 비교, 검증하였다. 본 연구를 통해 시험과 해석을 통하여 머플러의 유동소음 특성을 파악하고, 이를 토대로 저소음형 머플러 설계를 할 수 있는 기반을 마련하였다.

2. 머플러 시험 장치 구성

유동을 고려한 건설장비용 머플러의 성능 시험을 위하여 Figure 1 과 같이 시험장치를 구성하였다. 시험장치는 공기음 가진을 위한 스피커, 유동 발생을 위한 압축공기 호스, 그리고 시험용 머플러로 구성되어 있다. 또한 머플러의 입구단과 출구단의 총 3 지점에서 음압을 계측할 수 있도록 하였다. 압축 공기의 경우, 디젤 엔진의 배기가스에 의한 유동 효과를 반영하기 위해서 최대 40m/s 이상의 유동이 발생할 수 있도록 시험장치를 구성하였다. 또한 머플러 앞 단에 소음기를 장착하여 압축공기의 소음을 최대한으로 감소시킴으로써, 시험의 정확성을 높이고자 하였다.

† 현대중공업 선박해양연구소 진동소음연구실
E-mail : htkim7@hhi.co.kr
Tel : (052) 202-5557, Fax : (052) 202-5495

* 현대중공업 선박해양연구소 진동소음연구실

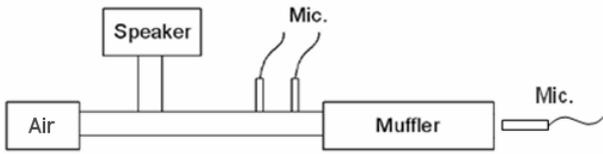


Figure 1 머플러 시험 장치 개념도

또한, 압축공기 호스를 밸브로 연결하여, 유동의 속도 및 압력을 변경시킬 수 있도록 구성함으로써 다양한 유동 조건에서의 머플러의 특성 파악이 가능하도록 하였다.

머플러의 삽입손실(insertion loss, IL) 또는 전달손실(transmission loss, TL)을 측정하는 경우, 머플러 뒤에 무반사관을 설치하고, 출구단을 통과한 관에서의 음압을 측정하는 것이 일반적이지만, 본 연구에서는 해석과의 검증을 목적으로 함으로, 머플러 끝단에서 30cm 떨어진 곳에서의 음압을 자유음장형(free field type) 마이크로폰으로 측정하여 이를 삽입손실 계산에 이용하였다. 그러므로 일반적인 방법으로 구한 머플러의 삽입손실과는 다른 경향을 가질 수 있다.

머플러 내부에서 발생하는 유동 효과의 정량적인 파악을 위한 측정은 다음과 같은 과정으로 이루어졌다. 우선 머플러의 음향학적 성능 파악을 위하여 스피커로 백색음(white noise) 가진을 통해 각 위치에서의 음압을 머플러 설치 전, 후에 대해 각각 측정하여 삽입손실을 계산하였다. 이를 통해 유동의 효과가 배제된 머플러의 음향학적 성능을 파악하였다.

또한 머플러 내부에서의 유동의 효과를 파악하기 위해 실차와 거의 유사한 조건으로 압축 공기를 흐르게 하여 전과 동일한 방법으로 머플러 설치 전, 후의 음압 측정을 통하여 삽입손실을 계산하였다. 이 때, 머플러 입력단으로 들어가는 유동의 조건은 실제 건설장비에 머플러가 장착되었을 때의 조건과 동일하게 속도는 35.5m/s 이며, 압력은 6.62kPa 으로 조정하여 실험을 수행하였다.

3. 머플러 유동 효과 파악 시험

위에서 기술한 바와 같이 구성된 건설장비용 머플러에 대하여 유동이 없는 경우와 유동이 흐르는 경우에 각각 삽입손실을 측정하여 머플러의 성능을 평가하였다. 시험에 사용된 유동은 압축 공기로서, 유동이 가지고 있는 소음이 매우 크므로, 단순히 유동이 있는 경우의 삽입손실은 그 값이

유동의 효과라고 판단할 수 없다. 그러므로, 유동이 있는 경우와 없는 경우로 나누어 각각에 대한 삽입손실을 계산하여 각 경우의 삽입손실의 차이로써 순수한 유동의 효과를 산출해내는 방법을 강구하게 되었다. 시험에 사용된 대상 머플러는 내부에 3 개의 격벽이 설치되어 있으며, 내부의 관에는 천공이 뚫려 있는 형태로써, 외부 형상은 Figure 2 과 같다.



Figure 2 시험에 사용된 머플러 형상

3.1 유동이 없는 경우 삽입손실 측정

유동이 없는 경우, 머플러의 삽입손실 측정을 위하여 스피커를 이용하여 백색음을 가진 상태에서 머플러의 설치 전, 후에 머플러의 출구단에서의 음압을 측정하여 음압의 차이를 삽입손실로써 계산하였으며, 결과는 Figure 3 에 나타내었다.

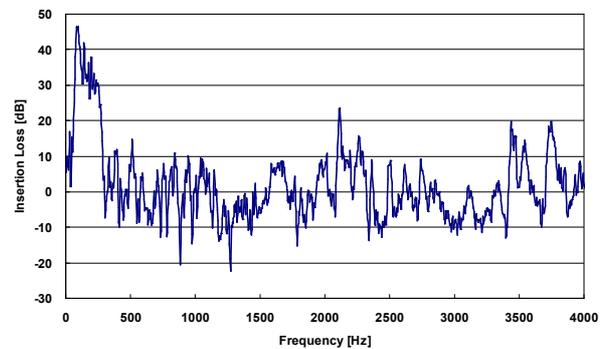


Figure 3 유동이 없는 경우의 삽입손실

결과를 보면, 500Hz 이하의 저주파수 대역에서 전반적으로 소음 저감 성능이 우수하며, 고주파수 대역은 저주파수 대역에 비해 삽입손실이 작은 것을 알 수 있다. 일반적인 삽입손실의 계산과는 달리 출구단에서 자유음장형 마이크로폰을 써서 측정한 값이므로, 배경소음(background noise) 등의 영향이 있음을 고려해야 한다.

3.2 유동이 있는 경우 삽입손실 계측

3.1 절의 유동이 배제된 경우의 삽입손실 계측과 같은 방법으로 유동이 있는 경우에 대하여 머플러의 삽입손실 계측을 위하여 압축 공기를 관을 따라 흐르게 한 후, 머플러의 설치 전, 후에 머플러의 출구단에서의 음압을 계측하였다. 계측 결과를 이용하여 계산한 유동이 있는 경우의 삽입손실은 Figure 4에 나타내었다.

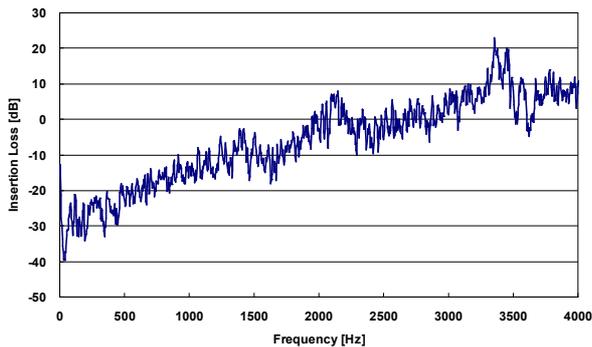


Figure 4 유동이 있는 경우의 삽입손실

건설장비 실차 조건과 같은 35.5m/s, 6.62kPa의 유동이 흐를 때, 위의 결과에서 알 수 있듯이, 2kHz 이하에서는 오히려 음압이 증가한다. 이는 머플러 내부의 격벽에 유동이 부딪히면서 소음이 증가하고 있음을 나타낸다. 즉, 일반적인 머플러 이론이 음속의 0.1 배~0.2 배의 유동 조건에서는 유동이 영향이 없다고 알려져 있으나, 이와 같이 실제 조건에서는 유동의 영향이 존재함을 알 수 있다. 그러므로, 저소음 머플러의 개발을 위해서 이와 같은 유동의 영향을 정량적으로 파악하는 일이 중요하다.

3.3 유동 효과의 정량적인 파악

3.1 절과 3.2 절에서 머플러의 설치 전, 후의 출구단에서의 음압의 차이를 유동이 있는 경우와 없는 경우에 각각 계측하여 이를 삽입손실로써 계산하였다. 위의 두 결과를 이용하여, 다음과 같이 유동에 의해 발생된 효과를 계산하였다.

$$\text{Flow Noise} = (-IL_{\text{flow}}) - (-IL_{\text{speaker}}) \quad (1)$$

여기서, IL_{flow} 는 유동이 있는 경우의 삽입손실이므로, $-IL_{\text{flow}}$ 는 유동에 의한 소음의 증가량을 나타낸다. 마찬가지로, IL_{speaker} 는 유동이 배제된 경우의 삽입손실이므로, $-IL_{\text{speaker}}$ 는 유동이 없는

경우에 머플러에 의한 소음 증가량을 나타낸다고 할 수 있다. 그러므로, 유동에 의한 소음 증가량에서 머플러가 가지고 있는 고유의 특성으로 소음이 증가되는 양을 뺄으로써, 머플러 내부에서 유동에 의해 2 차적으로 발생하는 유동소음을 정량적으로 계산할 수 있으며, 이와 같은 방법으로 계산한 유동소음의 값을 Figure 5에 나타내었다.

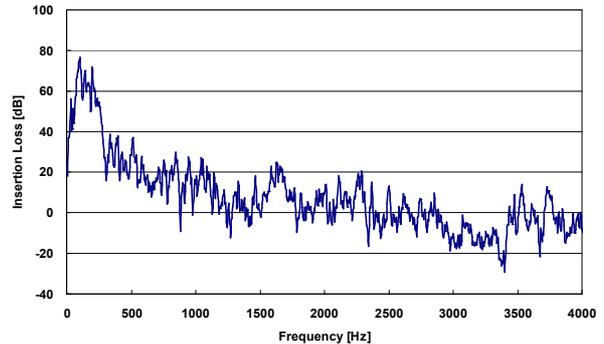


Figure 5 실험적으로 구한 유동소음

결과에서 확인할 수 있듯이, 유동이 흐를 때, 시험에 사용된 머플러 내부에서 2 차적으로 발생하는 유동소음은 주로 500Hz 이하의 저주파수 대역의 성분을 갖는다. 또한 최대 60dB 이상의 큰 값을 가지므로, 유동소음의 저감을 위한 방안을 강구하는 것이 필요하다고 판단된다.

4. 머플러 유동소음 해석

위에서 정립한 머플러의 유동 효과 파악 시험의 타당성을 검증하기 위하여 대상 머플러에 대해 유동소음 해석을 수행하였다. 기존에는 머플러의 유동소음 특성을 해석적으로는 구하지 못하고, 단품 테스트에 의존해왔다. 그러나 해석 결과와 시험 결과가 일치한다면, 머플러의 유동소음 특성을 해석적으로 예측하여 이를 설계에 반영할 수 있게 되므로, 기존에 비해 효율이 크게 증대될 것이기 때문이다.

4.1 유동소음 해석 모델

머플러의 유동소음 해석을 하기 위해서는 그에 앞서 내부 유동해석이 필요하다. 그러므로 유동해석을 위한 모델링을 수행하였으며, 모델의 형상은 Figure 6에 나타내었다. 시험 조건과 동일한 조건으로 머플러 입구단에 35.5m/s의 속도 경계 조건을 부과하여 해석을 수행하였으며, 해석에 사

용된 요소의 수는 약 500 만개, 절점의 수는 약 113 만개이다.

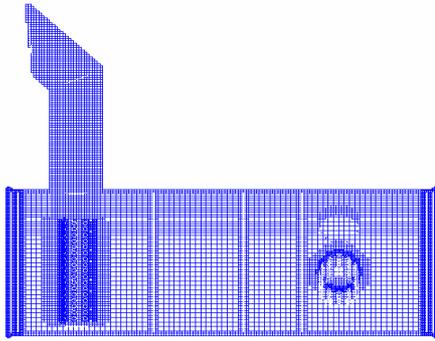


Figure 6 내부 유동해석을 위한 머플러 모델

4.2 유동소음 해석 결과

위와 같은 머플러 해석 모델에 대하여 먼저, 정상상태(steady state)의 해석을 수행하였으며, 상용프로그램인 SC/TETRA 를 이용하였다. 100 사이클(cycle)에 대한 정상해석 결과가 비정상상태(unsteady state) 해석의 초기 조건으로 부과되었다. 0.0001 초 간격으로 비정상 해석을 수행하였으며, 500 사이클(0.5 초)에 대한 해석을 수행하였다. 해석 결과 머플러 내부의 유동 양상을 Figure 7 에 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이, 내부의 유동은 각 격벽의 구멍을 통과하여 다음 격벽에서 부딪히는 것을 확인할 수 있으며, 이에 의한 소음이 내부에서 발생한다고 판단할 수 있다.

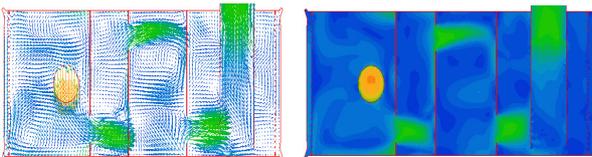


Figure 7 머플러 내부 유동해석 결과

위와 같은 유동해석 결과 얻어진 내부 압력 분포로부터 방사된 소음을 계산하기 위해 상용 프로그램인 FlowNoise 를 이용하여 계산하였으며, 머플러 출구단에서 30cm 떨어진 곳에서 계산한 음압의 분포를 Figure 8 에 시험을 통해 구한 유동소음 결과와 함께 나타내었다. 해석 결과와 동일한 비교를 위하여 시험 결과를 25Hz 간격으로 나타내었다.

위의 3 장에서 실험으로 계산한 유동의 효과와 해석으로 구한 유동소음의 양상이 비교적 일치하는 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다. 해석 및 시험 결과에서 공통적으로 500Hz 이하의 저주파수 대역에서 유동소음의 영향이 가장 큰 것을 확

인할 수 있다.

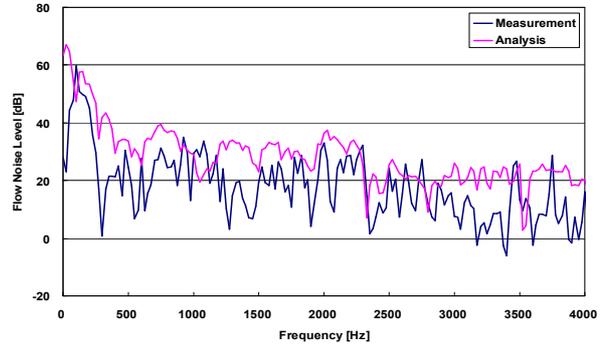


Figure 8 유동소음 시험 결과와 해석 결과 비교

지금까지의 머플러에 대한 일련의 해석 과정을 통해 3 장에서 정립한 시험 기법이 머플러 내부의 유동의 영향을 정량적으로 파악할 수 있음이 검증되었다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 건설장비 방사소음의 저감을 위하여, 주요 소음원 중 하나인 배기 소음과 관련된 머플러 유동소음 파악을 목표로, 압축 공기를 이용하여 머플러에 유동이 흐를 때의 삽입손실과 스피커를 이용하여 유동이 흐르지 않을 때의 삽입손실의 차이를 이용하여 유동의 효과를 정량적으로 파악할 수 있는 실험적 기법을 마련하였다. 또한, 머플러에 대한 유동소음 해석을 통해 실험적 기법이 머플러 내부의 유동 특성을 파악하는데 타당함을 검증하였다.

그러므로 지금까지의 연구를 통하여 머플러의 유동소음 특성을 파악하고, 이를 토대로 유동소음을 고려한 저소음형 머플러 설계를 할 수 있는 기반을 마련하였다고 판단된다.

참고문헌

- (1) M.L. Munjal, 1987, Acoustics of Ducts and Mufflers, John Wiley & Sons, Inc., New York
- (2) Software Cradle Co., Ltd., SC/TETRA Version 6. User's Guide
- (3) Leo, L. B. and Eric, E. U., 1992, Noise and Vibration Control Engineering, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (4) 이정권, 1994~1995, “배기소음기의 음향해석 및 설계 I~III” 오토저널, Vol.16~17