

## 유동 소음을 고려한 저소음 머플러 설계 프로그램 개발

### Development of the Low Noise Design Program for Construction Equipment's Muffler under 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(유동 소음), Insertion Loss(삽입손실)

#### ABSTRACT

The exhaust system, including a muffler, is one of the major sources to generate the radiated noise of construction equipment. In general, the muffler is applied to construction equipment in order to reduce the exhaust noise. Sometimes, however, the higher exhaust noise can be experienced due to the flow effect inside a muffler. So, it is required to consider the flow effect to reduce the exhaust noise level of construction equipment. In this paper, various tests were performed to calculate the flow noise effect inside a muffler. Through a series of tests with respect to a variety of design parameters, a new design program for low noise muffler was developed and applied to reduce the exhaust noise of the construction equipments. These results make it possible to understand the dynamic characteristics of the flow noise and to design the low noise muffler for the construction equipments.

#### 1. 서 론

경제 발전과 더불어 환경 소음 등과 같은 삶의 질에 대한 기대치가 높아짐에 따라 건설장비에서도 저소음, 저진동 등의 친환경성이 건설장비 품질의 중요한 기준이 되고 있다. 따라서 건설장비의 품질 향상을 위하여 저소음화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중에서도 엔진 배기 소음은 건설장비의 소음원 별 기여도 분석 결과에 의하면 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. 그러

나 엔진 배기 시스템에 실제 유동이 흐르는 경우, 머플러의 구조 및 크기에 따라 소음이 저감되기도 하지만, 유동이 머플러 내부에 부딪혀 2차적으로 발생하는 유동 소음(flow noise)으로 인해 오히려 소음이 커지기도 한다. 따라서 유동 소음은 머플러 설계 시 고려해야 할 중요한 인자 중 하나이다.

본 논문에서는 저소음형 머플러의 개발을 목적으로 머플러 내부에서 발생하는 유동 소음을 정량적으로 평가하기 위한 시험을 수행하였다. 내부 유동의 효과에 영향을 미치는 다양한 인자에 대한 실험 결과를 이용하여 머플러 내부의 유동해석 기법을 정립하였으며 이를 이용한 해석 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램을 통해 머플러 개선안을 도출하였으며, 실차 적용 시험을 통해 캐빈 소음 및 외부 소음 저감 효과가 크게 나타나는 것을 확인하였다.

이를 통해, 내부의 유동 효과를 고려하여 저소음 머플러를 설계할 수 있는 기반을 마련하였다.

† 현대중공업 선박해양연구소 진동소음연구실

E-mail : htkim7@hhi.co.kr

Tel : (052) 202-9097, Fax : (052) 202-5495

· 현대중공업 선박해양연구소 진동소음연구실

\*\* 현대중공업 선박해양연구소

## 2. 머플러 유동 효과 파악 시험

### 2.1 유동 소음 연구의 필요성

건설장비의 머플러 내부에 실제 유동이 흐르는 경우, 머플러의 구조 및 크기에 따라 소음이 저감되기도 하나, 유동 소음으로 인해 오히려 소음이 커지기도 한다. 이는 내부의 유동 효과에 의한 것으로, 이를 검증하기 위하여 유동이 존재하지 않는 경우와 유동이 존재하는 경우의 머플러 입력단과 출구단에서의 음압을 계측하여 Figure 1 과 Figure 2 에 비교하여 나타내었다.

결과에서 확인할 수 있듯이, 머플러 내부에 고속으로 흐르는 유동이 존재하는 경우에 유동에 의해 소음이 오히려 증가하는 경향이 나타난다. 이와 같이 유동의 영향이 크게 나타나기 때문에, 머플러의 소음 저감 특성을 예측하기 위해서는 내부 유동의 영향을 반드시 고려해야 한다.

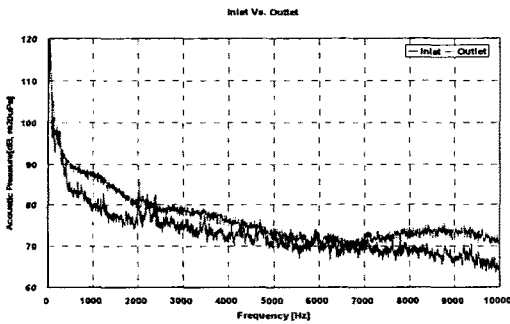


Figure 1 유동이 존재하는 경우의 입·출력단 음압

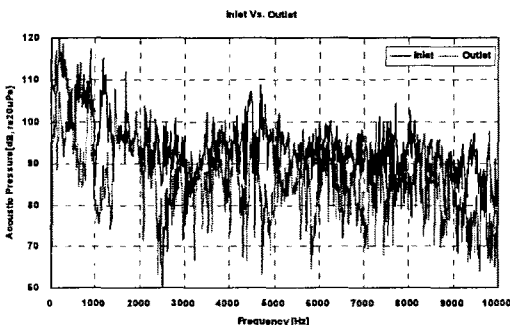


Figure 2 유동이 존재하지 않을 때 입·출력단 음압

### 2.2 유동 효과 파악을 위한 시험

유동 효과를 제외한 머플러의 소음 성능은 이론적으로 정립이 되어 사용되고 있으나, 유동의 효과를 고려하는 방법은 이론적으로 정립하기 어렵다. 따라서, 유동의 효과를 시험적으로 파악하기

위하여 다음과 같이 시험 장치를 구성하여 시험을 수행하였다.

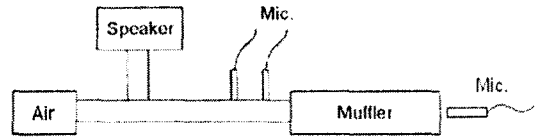


Figure 3 머플러 시험 장치 개념도

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.

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

건설장비용 머플러의 유동 소음 특성에 영향을 미치는 인자는 크게 머플러 내부의 부피 및 천공률, 내부 격벽의 수, 출구단 테일파이프의 각도 등으로 나눌 수 있으며, 이러한 인자의 변경에 따라 유동 소음을 정량적으로 파악하였다.

머플러 내부에서 발생하는 유동 효과의 정량적인 파악을 위한 계측은 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 계측하여 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 계측을 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.

## 2.2 머플러 내부 유동 효과의 정량적 파악

머플러 내부에 유동이 존재하는 경우 머플러의 유동 효과는 식 (1)을 이용하여 정량적으로 파악할 수 있다. [1]

$$\text{유동 소음} = (-IL_{\text{유동}}) - (-IL_{\text{스피커}}) \quad (1)$$

여기서,  $-IL_{\text{유동}}$ 은 유동이 있는 경우의 삽입손실이므로,  $-IL_{\text{스피커}}$ 은 유동에 의한 소음의 증가량을 나타낸다. 마찬가지로,  $-IL_{\text{스피커}}$ 는 유동이 배제된 경우의 삽입손실이므로,  $-IL_{\text{스피커}}$ 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 뺌으로써, 머플러 내부에서 유동에 의해 2 차적으로 발생하는 유동 소음을 정량적으로 계산할 수 있다.

## 2.3 내부 인자 별 유동 소음 보간식 도출

2.2 절에서 언급한 방법을 이용하면 머플러의 내부에 유동이 흐를 때, 이로 인해 발생하는 유동 소음을 정량적으로 계산할 수 있다.

그러나 건설장비용 머플러는 형태나 내부 구조가 모델 별로 다양하기 때문에, 여러 가지 인자에 의해 발현되는 유동 소음을 종합적으로 고려해야만 임의의 모델에 대한 해석이 가능하다. 따라서 각 인자 별로 유동 효과 파악을 위한 시험을 수행하여, 이로부터 인자 별 유동 소음을 해석하기 위한 보간식을 도출하였다.

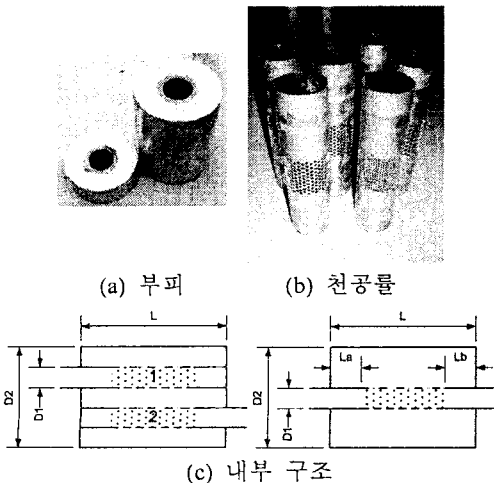


Figure 4 내부 인자 별 시험 대상 머플러 모형

먼저, 다양한 인자에 대한 시험을 수행하였다. 인자 별 특성을 파악하기 위하여 건설장비용 실제 모델이 아닌 단순화된 머플러 모형을 이용하였으며, 다양한 부피, 천공률, 내부 구조를 갖는 시험 대상 머플러 모형을 Figure 4 에 나타내었다.

위와 같은 시험 대상에 대해 유동 속도를 0~40m/s 까지 변화시키면서 머플러의 소음 저감 특성을 삽입 손실로써 계측하였으며, 내부 인자 별로 보간식을 도출하였다. Figure 5, Figure 6 에는 특정 모델(관통형 천공관, 직경 4mm)에 대한 125Hz, 200Hz 대역에서의 보간 결과를 나타내었다.

머플러의 내부 인자 별, 주파수 대역 별로 유동 속도에 따른 보간식을 도출한 결과, 인자 별, 유동 속도 별, 주파수 대역 별로 유동의 효과가 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 따라서 각 주파수 대역 별로 유동 소음에 영향을 미치는 인자 파악이 가능해졌다. 또한, 이를 통해 주파수 대역 별로 유동 소음을 저감하여 저소음 머플러를 설계할 수 있는 근본적인 기반을 마련하였다.

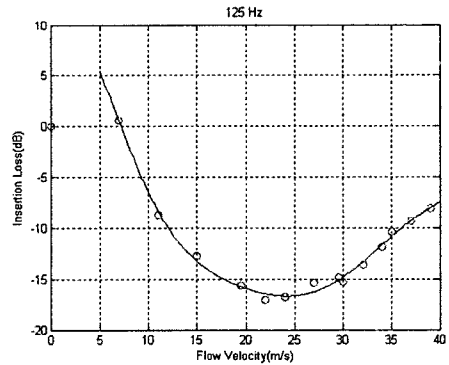


Figure 5 유동 속도 별 유동 소음 보간식(125Hz)

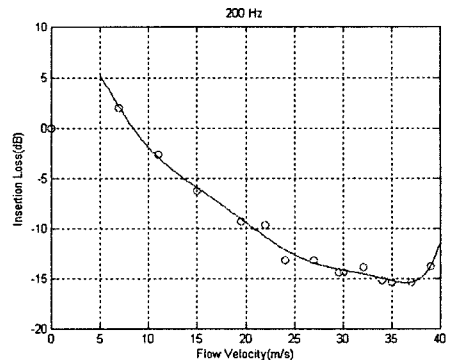


Figure 5 유동 속도 별 유동 소음 보간식(200Hz)

### 3. 머플러 출구 소음 해석

#### 3.1 출구 소음 해석 기법 정립

머플러 내부에 유동이 존재하는 경우 머플러의 출구 소음은 각각 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 즉, 30~40m/s 의 배기가스 유동과 엔진 배기 소음이 머플러 입력단으로 들어가면, 머플러의 소음 저감 성능에 의하여 엔진 배기소음이 저감된다. 그러나 엔진 배기소음과 함께 유입된 배기가스 유동이 머플러 내부 구조와의 상호 작용을 통해 2차적으로 유동 소음이 발생하게 되고, 저감된 배기 소음과 내부에서 생성된 유동 소음이 출구로 나오게 된다.

$$\begin{aligned} \text{출구소음} &= \text{유동이 없는 경우 출구소음} \\ &+ \text{유동 소음} \end{aligned} \quad (2)$$

이 때, 유동이 없는 경우의 출구 소음은 기존에 정립되어 있는 전달행렬법과 시험 결과를 병행하여 이용하였다. 주파수 대역 별로 전달행렬법과 시험이 각각 장, 단점이 있기 때문이다. 즉, 저주파수 대역은 스피커 가진의 어려움 등 정확한 시험 결과를 도출할 수 없으므로 전달행렬법을 이용하였다. 또한, 고주파수 대역은 평면파 가정이 성립하기 어려워 전달행렬법을 사용할 수 없으므로, 시험 결과를 이용하였다.

식 (2)의 유동 소음은 2.2 절에 언급한 방법을 이용하여 유동 효과에 영향을 미치는 다양한 인자에 따른 시험을 통해 구하였다.

이와 같은 방법으로 유동이 존재하는 경우의 출구 소음을 계산하여 머플러 내부의 유동 효과를 고려한 소음 해석 기법을 정립하였다.

#### 3.2 해석 기법 검증

위와 같이 머플러의 유동 소음 해석 기법 검증을 위하여 실제 건설장비용 머플러를 대상으로 예측과 해석을 동시에 수행하였다. 검증의 대상이 된 머플러는 Figure 7 에 나타낸 바와 같이 중형굴삭기용 실제 머플러이며, Figure 1 의 시험 장치를 이용한 예측과 3.1 절에서 정립된 기법을 이용한 해석 결과를 비교하여 Figure 8 에 나타내었다.

결과에서 확인할 수 있듯이, 일부 주파수 대역을 제외하고는 해석 결과와 예측 결과가 거의 유사한 경향을 나타낸다. 불확실성이 매우 높은 유동이라는 변수를 고려하는 해석 기법임을 감안하-

면, 해석 결과의 정확도가 매우 높다고 판단된다. 따라서, 위의 절차에 따라 정립한 유동 소음 해석 기법이 타당성과 신뢰성을 갖는 것을 확인하였다.

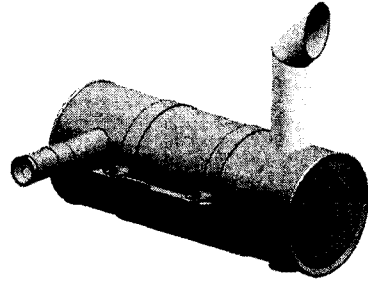


Figure 7 검증 대상이 된 머플러 모델

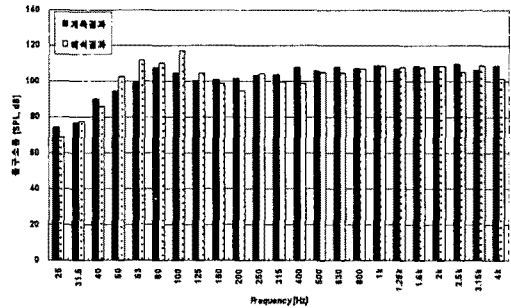


Figure 8 예측 결과와 해석 결과 비교

### 4. 저소음 머플러 설계 프로그램 개발

#### 4.1 프로그램 GUI 및 Flow Chart

앞에서 설명한 해석 기법을 이용하여 설계 단계에서 사용 가능한 저소음 머플러 설계 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램은 Figure 9 와 같은 GUI 로 구성되어 있으며, 해석 절차는 Figure 10 과 같다. 먼저 머플러 모델링 단계에서는 해석 대상인 머플러의 기본 제원 및 내부의 파라미터를 입력하면, 해석이 시작된다.

모델 및 구조에 따라 전달 행렬을 구성하고, 유동 특성 파악 시험을 통해 구축되어 있는 보간식 데이터베이스를 이용하여 유동 소음을 계산한다. 전달 행렬을 구성하고 유동 소음을 계산하면, 3.1 절의 식(2)를 이용하여 최종적인 출구 소음을 계산하게 된다.

이러한 일련의 과정을 거쳐 해석 대상 머플러의 소음 저감 성능을 계산하게 되며, 기준에 만족하는 소음 저감 성능을 갖는 머플러를 최종적으로 설계하게 된다.

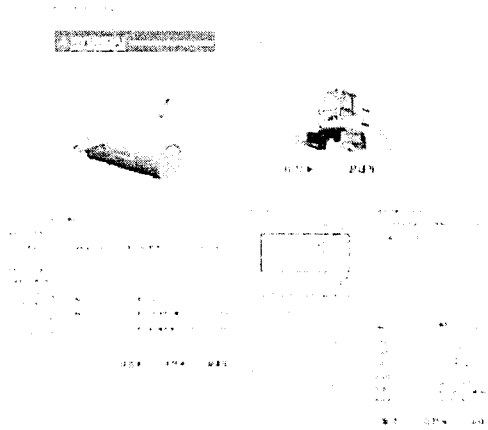


Figure 9 개발된 프로그램의 GUI

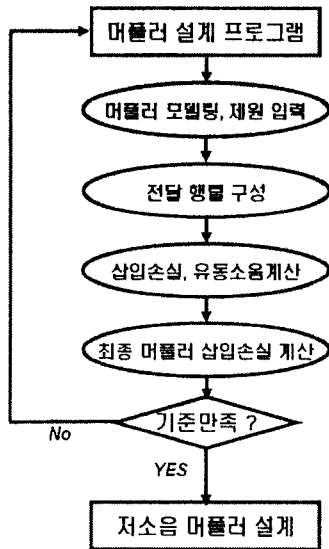


Figure 10 개발된 프로그램의 Flow Chart

#### 4.2 프로그램의 적용 및 개선안 도출

개발된 프로그램을 이용하여 실제 건설장비용 머플러의 개선안을 도출하였으며, 이를 설계에 반영하여 효과를 검증하였다.

저주파수 대역의 머플러 소음 저감 성능을 향상시키기 위하여 시험 결과로부터 가장 민감한 설계 인자를 파악하고, 이 설계 인자를 변경하여 개선안을 도출하였다. 이러한 방법으로 도출된 개선안에 대한 해석 결과를 기존 모델의 해석 결과와 함께 비교하여 다음과 같이 나타내었다.

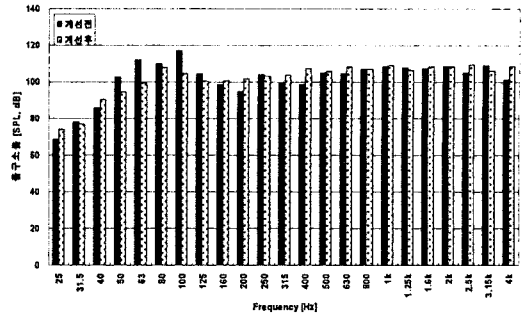


Figure 11 기존 모델과 개선안에 대한 해석 결과

Figure 11의 개선안에 대한 해석 결과에서 확인할 수 있듯이, 관심 영역인 저주파수 대역에서 최대 10dB 이상 저감 효과가 있을 것으로 판단된다. 이를 검증하기 위하여 개선안을 제작하여 시험장치에서 검증 시험을 수행하였으며, 결과는 Figure 12에 나타내었다.

계측 결과가 해석 결과와 거의 일치하는 경향을 나타내고 있다. 특히 목표했던 저주파수 대역의 소음 저감 성능이 목표 주파수와 거의 동일한 주파수 대역에서 저감 효과가 크게 나타나는 것을 확인하였다.

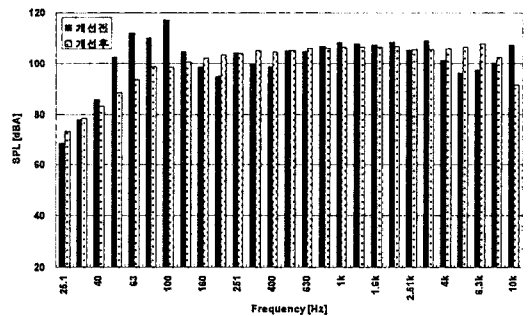


Figure 12 개선 전·후 시험 결과 비교

개선안을 실제 건설장비에 적용하여 실제의 효과를 검증해 보았다. Figure 13는 개선 전과 후의 캐빈 소음 계측 결과이다. 실제 장비에는 머플러 외에도 다양한 소음원이 존재하기 때문에 해석 결과와 동일한 결과를 기대할 수는 없다. 또한 머플러가 주 소음원이 아닌 경우에는 소음 저감 효과가 나타나지 않을 수도 있다. 그러나 프로그램을 통해 도출된 개선안을 실제 장비에 적용하여 캐빈 소음 1.0dB, 전체 음향 파워 0.5dB 효과를 확인하였다.

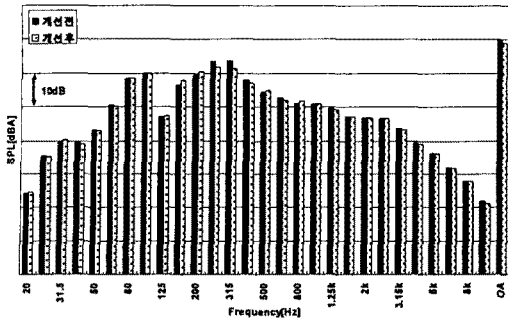


Figure 13 개선 전·후 캐빈 소음 계측 결과

## 5. 결 론

본 논문에서는 저소음형 머플러의 설계를 위한 프로그램 개발을 목적으로 머플러 내부에서 발생하는 유동 소음을 정량적으로 평가하기 위한 시험을 수행하였고, 유동 효과에 영향을 미치는 내부 부피, 내부 구조, 천공률 등의 인자에 대해 인자별 유동 특성을 파악하였다.

이를 바탕으로 인자별 유동 소음 보간식을 도출하였으며, 각 인자별 효과를 종합적으로 고려하여 머플러의 소음 저감 성능을 예측할 수 있는 해석 기법을 정립하고 이를 실제 모델에 대한 계측 결과와 비교, 검증하였다.

이러한 해석 기법을 이용하여 머플러 내부의 유동 소음 효과를 고려하는 머플러 설계 프로그램을 개발하였으며, 이를 실차에 적용하여 프로그램의 정확도를 검증하였다. 개발된 프로그램을 통해 머플러 개선안을 도출하였으며, 시험 장치를 통한 검증 시험 및 실차 적용 시험을 통해 캐빈 소음 및 외부 소음 저감 효과가 크게 나타나는 것을 확인하였다.

이를 통해, 설계 단계에서 복잡한 머플러 내부의 유동 효과를 종합적으로 고려하여 저소음 머플러를 설계할 수 있는 기반을 마련하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김형택, 2007, “유동 소음을 고려한 건설장비용 머플러의 저소음화 연구”. 한국소음진동공학회 2007 년 추계 학술대회
- [2] M.L. Munjal, 1987, Acoustics of Ducts and Mufflers, John Wiley & Sons, Inc., New York
- [3] 이정권, 1994~1995, “배기소음기의 음향해석 및 설계 I-III” 오토저널, Vol.16~17
- [4] Software Cradle Co., Ltd., SC/TETRA Version 6. User's Guide