

# 소음 및 엔진룸 냉각개선을 위한 건설기계테일파이프의 형상설계 Shape Design of Construction Equipment Tailpipe for Noise Reduction and Engine Room Cooling

김성재\*·양지혜\*·김낙인\*·김주식\*

Seong-Jae Kim, Jihae Yang, Nag-In Kim and Jou-Sik Kim

**Key Words** : Construction Equipment(건설기계), Tailpipe(테일파이프), Interior Noise(운전자소음), CFD(전산유동해석).

## ABSTRACT

The interior noise reduction of construction equipment is concerned for improving the driver comfort in this study. From the baseline test, the exhaust noise gives a big contribution to the interior noise of construction equipment. And the detail noise contribution analysis of the exhaust system, the tail pipe, which is for ventilation an engine room hot air to outside, amplify the exhaust noise around operating engine RPM associated with tail pipe structural and cavity resonances. To remove the noise amplifying effects, the tail pipe has to be shorted its length. Even the noise can be attenuated the ventilation flux when using the redesigned tail pipe is reduced than the original one. Thus, a shape change of the tail pipe is additionally needed for increasing the ventilation flux and attenuating the exhaust noise using CFD technique. The CFD results of the tail pipe give a meaning full information what obstructs the ventilation flex in the current design and how changes the tail pipe.

## 1. 서 론

안락성과 환경친화는 오늘날 모든 제품에 적용되는 기초설계 개념으로서, 건설기계에서 운전자 소음은 작업자 보호 및 작업피로 저감 측면에서 제품설계단계부터 매우 중요한 제어대상이 된다. 그 결과, 최근 제품의 설계경향은 과거 기능경쟁 위주에서 운전자의 안전성 및 안락성을 통한 작업 효율 증가측면으로 초점이 맞추어지고 있다. 이러한 경향은 건설기계를 선택하는 소비자의 기호를 적절히 대변해 주는 것으로서, 서구유럽을 중심으로 좀 더 인간 편의적이고 안락한 차량을 선호하는 경향에 대응하는 차량생산자의 의도이다. 당사도 이러한 세계적 추세와 당사 제품을 구입하는 고객에게 보다 쾌적한 작업환경을 부여해 주기 위해 당사에서 판매되는 모든 차량의 소음 및 진동을 저감시키고자 하는 연구 개발이 끊임 없이 수행되고 있다.

주로 도시 및 대형 토목 공사장에서 사용하는 건설기계중 소형은 도심지 작업 환경을 위해 까다로운 소음 및 협소공간작업, 공로주행이동시의 안전법규를 만족하기 위한 소형의 저소음장비방향으로 기술발전을 해오고 있으며, 중대형급 건설기계는 석산, 해상골재, 레미콘, 아스콘, 광산작업장에서 기본소재의 채취 및 이동, 덤프트럭 상차 적재 작업등을 통해 기초 소재생산을 위한 중요한 생산설비로서 자리매김하고 있다. 최근 적극적인 수출

개척을 위해 보다 환경 및 운전자관점의 차량기술 개발이 필요하였으며, 건설기계에 대한 관련규제는 구미, 일본을 중심으로 배기가스 및 소음 환경규제가 본격적으로 강제 적용<sup>1)</sup>되면서 이에 대응한 기술 개발 경쟁이 가속화 되고 있다. 특히, 건설기계와 같은 대형장비의 경우 이러한 환경규제를 만족하여 수출 가능한 형태로 차량을 제조해야 하지만, 실제 장비를 구입하는 고객입장에서는 일일 장시간 작업으로 인한 운전자 피로도 최소화 기술과 운전자의 쾌적성, 편의성, 정숙성 및 안전성 등을 고려한 최상의 운전자 작업환경을 제공하는 장비를 선호하고 있다.

건설기계의 경우 대 용량의 디젤엔진을 사용하며, 유압 및 강제순환 냉각시스템을 가져야 하는 특성으로 승용차와 달리 상대적으로 많은 소음발생요인을 가지고 있다. 그 결과 최근 개발되는 건설기계는 운전자 쾌적성을 고려하는 캐빈설계가 중요한 설계 관점으로 인식되어 각종 소음 원으로부터 발생하는 소음이 운전자에게 전달되지 않도록 캐빈의 흡/차음 설계에 주안점을 가지고 있다. 하지만, 과대하게 발생하는 소음은 충분한 흡/차음 설계를 가지는 캐빈이라도 소음 고유의 특성으로 운전자에게 전달되는 소음의 완전한 차단은 거의 불가능하거나 비효율적인 캐빈설계가 될 수 있다.

본 연구는 당사에서 개발되어 국내외에 판매되는 건설기계가 경쟁사 차량에 비해 운전자소음이 상대적으로 높아 소음저감이 요청되었으며, 운전자 소음 저감 과정 중 소음에 큰 영향을 미치는 배기소음 저감에 관한 사항으로 배기소음에 큰 영향을 미치는 테일 파이프의 개선설계 과정을 소개하고자 한다.

\* (주)대우종합기계

E-mail : ksj1972@dhittd.co.kr

Tel : (032) 760-1481, Fax : (032) 760-1964

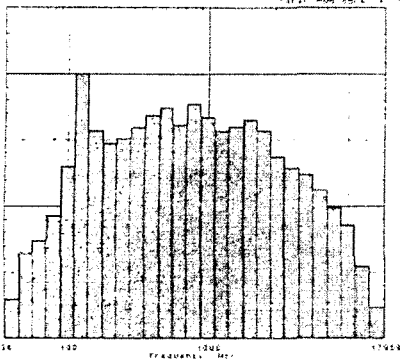


Fig. 1. 1/3 Octave noise at operator position

## 2. 운전자 소음 분석 및 저감

### 2.1 Baseline test

Fig. 1 은 소음개선 대상차량의 운전자 소음측정 결과다. 전체소음 수준은 약 75dBA 정도이며 주파수 분석결과 125Hz 대역의 소음이 타 주파수 대역에 비해 상당히 높은 소음 값을 보이고 있어, 전체 소음을 지배하는 주요한 원인으로 예측되었다. 소음분석결과 이 소음 원은 6 기통 엔진 최대 RPM 의 폭발 3 배수 성분임을 알 수 있어, 엔진에 관계된 소음임을 알 수 있다. 또한, 소음저감을 검토하는 현 차량에 대한 평가결과 운전석 내부 흡/차음 특성과 흡/배기계 부분이 전체 소음을 지배하고 있어 125Hz 대의 소음은 흡/배기에 관련된 소음임을 알 수 있었다. 흡기계와 배기계가 차지하는 영향을 평가하기 위해 제거 법을 통해 기여 분석을 수행한 결과 Fig. 2 와 같이 최대 RPM 의 소음성분이 크게 감소됨을 알 수 있어 운전자 소음에 기여도가 높았던 주 소음 원은 엔진 배기 계에 의한 영향임을 알 수 있었다.

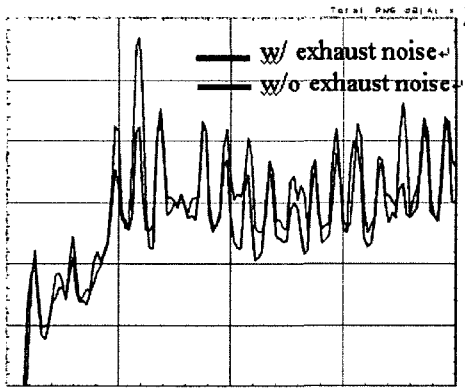


Fig. 2 Narrow band driver noise w/ and w/o exhaust noise

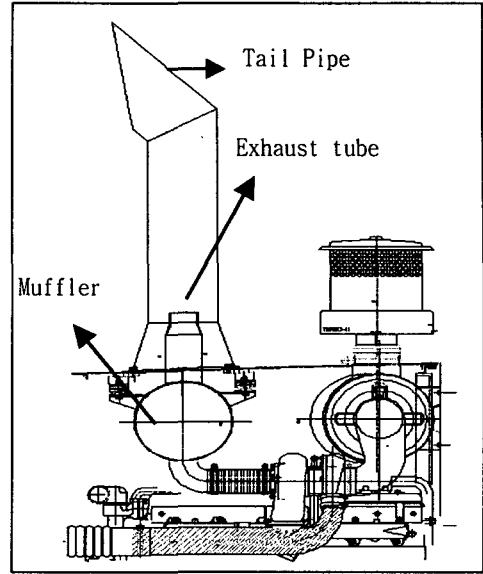


Fig. 3 Detail layout drawing of exhaust system

### 2.2 배기계 소음 개선

Fig. 3 과 같이 배기계 소음은 엔진의 배기계에 서 발생된 소음이 엔진과 연결된 배기머플러를 통해 배기튜브에서 방사되며, 방사된 소음 및 배기가스는 테일파이프를 거쳐 외부로 전달된다. 그러므로 테일파이프의 사용용도는 엔진에서 분출된 배기가스의 힘을 이용해 엔진룸의 뜨거운 공기를 외부로 배출 시키는 역할을 한다. 그 결과, 배기 소음은 엔진, 배기머플러 및 테일파이프에 소음 특성에 의해서 지배를 받는다.

Fig. 1 에서와 같이 운전자 소음을 낮추기 위해서는 배기소음을 낮추는 것이 필수적이다. 그러므로, Fig. 1 과 같이 과도한 배기소음을 발생시키는 영향을 알아보기 위해 배기계 각 부품에 대한 소음기여 특성에 영향을 미치는 배기 머플러와 테일파이프에 대한 소음특성을 분석하였다. 각각의 기여 특성을 확인하기 위해 테일파이프를 제거한 후 운전자 소음을 측정된 결과 배기소음에 관계되는 주파수의 소음이 상당히 낮아짐을 확인 하여, 테일파이프가 배기소음에 미치는 영향이 큼을 알 수 있어 테일파이프에 대한 소음특성을 검토 하였다. 테일파이프는 단순한 배기파이프로서 소음과 관계되는 요소는 구조기인소음 및 공명에 의한 소음 특성으로 분류할 수 있다.

구조기인 소음특성을 분석하기 위해 테일파이프에 모달 해석<sup>2)</sup> 결과 현 사용제품은 125Hz 에서 반지름 방향으로 축소 및 확대가 되는 모드형태를 가지는 구조공진이 있어 엔진 최대 RPM 근처의 배기가진 소음에 의해서 구조기인 소음이 발

생 가능성이 있었다.

식 1 은 파이프가 가지는 공명주파수 계산 식이다.

$$f_n = \frac{v}{4 \times l} \quad (1)$$

여기서,

$v$  = 음속(340m/sec<sup>2</sup>)

$l$  = Tail pipe length

$f_n$  = Frequency of cavity resonance

식 1 을 사용해서 해석결과 현 제품은 약 121Hz 에서 공명주파수가 있어, 배기소음은 최대 RPM 근처에서 증폭될 가능성을 가지고 있었다. 따라서 테일파이프 공명주파수 개선에 따른 소음 효과를 살펴보기 위해 테일파이프 길이변경을 통한 소음 기여특성을 살펴보았다.

식 1 을 이용 테일 파이프 길이 변경에 따른 공명주파수 계산결과 다음과 같았다.

- Tail pipe (original length) = 121Hz
- Tail pipe (100mm cut out) = 142Hz
- Tail pipe (150mm cut out) = 154Hz

또한, 소음해석 전문 SW<sup>3)</sup>를 이용하여 3 차원 소음분석 결과 Fig. 4 와 같이 125Hz, 140Hz 및 150Hz 정도로 공명주파수가 약간 차이가 발생하였으며 이는 입 출구의 형상에 따른 요인으로 판단 된다. 따라서 상기 결과에 따라 테일파이프 길이를 150mm 낮춘 제품을 제작하여 실제적으로 소음개선 효과를 확인 하였다.

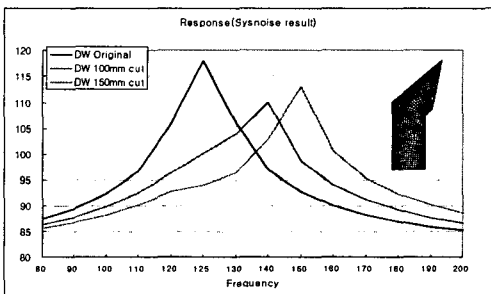


Fig. 4 Noise response along with tail pipe length

Table 1 은 테일파이프 설계 변경 후 소음평가 결과이다. 실험결과 1/3 octave 에서는 약 4.1dBA 이며, 그에 따른 O/A 레벨 값은 1.1dBA 의 감소 효과를 나타내고 있다. 이 실험결과를 통해 알 수 있는 사항은 현 차량의 운전석 소음의 기여에서 테일파이프가 자체의 구조공진 및 공명에 의한 소

음 증폭효과가 매우 큼을 알 수 있다.

Table 1. Noise level for initial and modified tail pipe (unit: dBA)

Tail pipe	125Hz (1/3 Octave)	Overall level
Initial design	70.5	73.1
Modified design	66.4	72.0
Difference	-4.1	-1.1

상기 시험 결과를 토대로 tail pipe 에 관련된 최적 형상 변경은 전산 해석을 통한 문제 접근이 필요한 사항으로써 유동 해석을 통한 최적 설계를 도출해야 한다.

### 3. 테일파이프 공기배출 특성검토

#### 3.1 테일파이프 유동해석

테일파이프를 설치한 가장 중요한 목적은 전술한 같이 엔진에서 배출되는 배기가스의 힘을 이용해 엔진룸 내의 뜨거운 공기를 외부로 배출하는 것이다. 이러한 목적으로 장착된 테일파이프가 배기소음을 증폭 시키었으며, 이를 낮출 수 있는 방안으로 설계 개선이 되었으므로 본래의 목적인 엔진룸 공기배출 특성을 CFD<sup>4)</sup>를 이용하여 검토하였다. 공기배출 목표는 소음을 저감 시킨 후의 최소한의 테일파이프 유동 특성은 초기설계당시보다 최소한 동일 유량의 엔진룸 공기를 외부로 배출하는 특성을 가져야 한다.

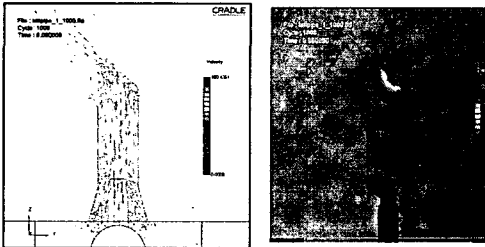
테일 파이프를 통해 엔진 룸의 배기 유량을 구하는데 있어서 테일파이프 형상 영향만을 평가하고, 보다 빠른 결과를 얻기 위하여 테일파이프가 포함된 엔진 룸의 복잡한 형상과 경계조건을 적용하지 않고 테일파이프 단일 부품만을 고려하여 상대적인 유동특성만을 검토할 수 있는 유동해석을 수행하였다. 테일파이프에 의한 배기소음 확대를 저감키 위한 테일파이프 높이를 100mm 및 150mm 낮추었을 때 유동의 흐름 변화를 알아보기 위한 해석을 수행하였으며 Table 2 는 각각의 상태에서 엔진룸 공기배출 특성을 평가한 것이다.

평가 결과 소음저감을 위해 테일 파이프 높이를 낮춘 제품의 엔진룸 공기 배출 특성이 테일파이프 길이 저감에 따라 급격히 저감 되는 것을 알 수 있다. 그러므로 개선 설계 제품이 초기제품보다 소음저감이 가능한 형상 일지라도 본래의 목적인 엔진룸 공기 배출특성이 저감되면 실제 적용할

수 없어 이를 개선할 수 있는 방안을 검토해야 한다.

Table 2. Comparison of fluid flux along with tail pipe length

model	Fluid flux(%)
original	100.0
-100mm	96.34
-150mm	70.82



(a) Velocity profile (b) Pressure distribution

Fig. 5 Velocity and pressure profile for the initial tail pipe.

### 3.2 테일파이프 유동특성 분석

구조공진 및 공동주파수는 테일 파이프 형상보다는 길이에 민감한 특성을 가지고 있으므로 소음 저감특성을 유지하며, 공기유동특성을 증가시키기 위해서는 유동해석 결과를 분석하여 최대한 많은 공기유동이 가능한 형상설계를 검토해야 한다. Fig. 5는 초기설계제품의 유동속도 및 압력분포 특성이다. 해석결과 배출가스의 공기 유동 에너지는 테일파이프 출구 하부의 역류와 출구 근처 상부의 고압에 의해서 튜브 중간지점에서의 와류가 발생하여 전체 유동량을 저해하는 요소가 된다. 또한, 테일 파이프 길이를 낮출수록 출구의 꺾어지는 부분에서 압력집중이 심해지고 이로 인한 유동에너지 손실을 증가하여 엔진룸 공기배출을 저해한다. 그러므로, 엔진룸 공기 배출 특성을 증가시키기 위해서는 이러한 유동 저해 요소를 최소화시킬 수 있도록 테일 파이프의 입출 구 형상을 최적화 시킨 모델설계가 중요하다.

### 3.3 공기유동개선 설계

공기유동 에너지 손실을 최소화 하기 위해 테일파이프 유동과 관계되는 다음과 같은 형상 변화요인에 대한 기여분석을 한 후 최종적으로 각각의 형상 최적화를 수행하였다.

- 가) 테일파이프 출구의 꺾어지는 각도의 변화
- 나) 엔진 배기튜브의 높이에 따른 유동의 흐름
- 다) 출구의 단면적과 출구의 곡률 변화

라) 출구 부분의 곡률의 경사도를 높인 경우.

상기와 같은 변화요인에 따른 테일파이프의 유동 해석 결과를 종합해 볼 때, 엔진 룸의 공기 배출량을 증가시키기 위해서는 어느 하나의 요인을 변경시키는 것이 아닌 형상을 결정하는 전체의 요소를 종합적으로 고려하여 변경해야 함을 알 수 있었다. 형상 변화는 외부 대기의 역류를 막고 테일파이프 내의 와류를 줄일 수 있는 방향으로 변경되어야 한다. 또한 테일파이프가 꺾어지는 부분에서의 압력의 집중으로 인한 유동 에너지의 손실을 막아야 한다. 최종적인 형상변경 설계에 따른 엔진룸 배출공기 특성은 Table 2에서 150mm 높이를 낮추는 모델이 초기에 비해서 상대적으로 29.2% 낮은 배출공기 특성을 가지는 반면 형상 튜닝을 통해 초기모델에 비해 약 34% 유량이 증가된 형상을 얻을 수 있었다.

## 4. 결론

건설기계 운전자의 쾌적한 작업환경을 위해 캐빈 내 운전자소음 평가를 한 결과, 엔진의 배기소음이 전체소음에 미치는 영향이 가장 높음을 알 수 있었다. 이 배기 소음은 엔진룸 공기배출을 위한 테일파이프의 배기소음 증폭 특성에 의한 현상으로 이를 개선하기 위해 테일파이프 높이를 낮추는 설계변경 결과 운전자 위치 전체소음을 약 1.1.dBA 낮출 수 있었다. 하지만, 설계변경으로 테일파이프 본래의 목적인 엔진룸 공기 배출 특성이 낮아져, 이를 보상할 수 있는 추가적인 연구가 필요하였다. 전산유체해석 방법을 이용하여 유동분석을 수행한 후 유동에 영향을 줄 수 있는 형상요소를 분석한 후 소음에 영향을 미치지 않는 형상설계를 수행하여 최종적인 형상은 엔진룸 공기 배출을 초기설계보다 34%증가한 테일파이프 형상을 얻을 수 있었다.

## 참고 문헌

- (1) Guidance for the application of the European Parliament and Council Directive 2000/14.
- (2) I-DEAS user's manual.
- (3) SYSNOISE Release Notes, User's Manual/Appendices (Revision 5.6).
- (4) SC/Tetra V5 User's Guide Solver Reference Edition.