

## 굴삭기 운전실 소음저감에 관한 연구

° 김 추 호\*, 최 두 원\*

( A Study on the Noise Reduction of Cabin in the Excavator )

( Choo-Ho Kim, Doo-Won Choi )

### 1. 서 론

일반적으로 건설장비의 운전자 소음은 자동차와는 달리 주행 시 소음에 관한 것은 크게 문제 되지 않는다. 다만 모든 작동부들이 유압력에 의해 구동되므로 유압 이음이 새롭게 대두되며, 엔진 사용조건 또한 자동차와는 상이하다. 그러나, 운전자가 느끼는 관점에서 운전실내에서 안락함의 요구는 점차로 강해지고 있을 뿐만아니라 소비자들의 직접적인 구매 의욕과 직결된다. 이에 본 연구에서는 굴삭기 운전실에서 문제시 되는 부밍(booming)소음에 대해 고찰하고, 구조 기인 소음( structure-Borne noise )에 초점을 둔 실험적 기법의 도입으로 주 소음원을 규명하고 주요 인자들에 대한 기여도 분석을 통해 운전실 소음 저감을 구현하였다.

### 2. 본 론

굴삭기 운전실 소음은 일반적으로 엔진, 트랜스 미션, 유압 펌프, 기어 이음 등이 운전실내의 페달, 유압 및 전장 관련 호스 등이 통과되는 틈새를 통해 운전자에게 직접 전달되는 공기 기인 소음(air-borne noise)과 엔진 진동이 마운트를 거쳐고 메인 프레임(main frame)을 통해 운전실로 전달되어 판넬등의 진동이 공기 입자를 가진하므로서 운전실 음향모드와 연성이 되어 부밍소음을 일으키는 구조기인 소음, 유압호스류 등에서 유동압력의 불균형으로 유발되는 공동음과 같은 유체 기인 소음(fluid-borne noise)으로 크게 분리될 수 있다<sup>(1,2)</sup>. 건설장비에서의 유체기인 소음은 자동차와는 달리 유압관련 기기들의 소음이 엔진 마운트를 안 거치고 운전실로 직접 전달될 수 있음을 암시한다.

그림 1은 엔진속도를 저속에서 고속까지 변화시키며 운전자의 우측 귀 위치에서 음압 수준(sound pressure level)을 측정 한 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 것처럼 엔진속도에 따른 음압 변동차가 최대 15 dBA 이상 되어 부밍소음

이 심각함을 알 수 있다. 특히, 굴삭기의 경우 작업시 사용하는 엔진속도 구간이 주로 고속이고, 잠시 휴식시 주로 사용하는 구간이 저속 아이들(Low Idle)임을 감안하면, 그림 1에서 1200 RPM이하와 1800 RPM 이상의 속도 구간에서의 정속성은 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다.

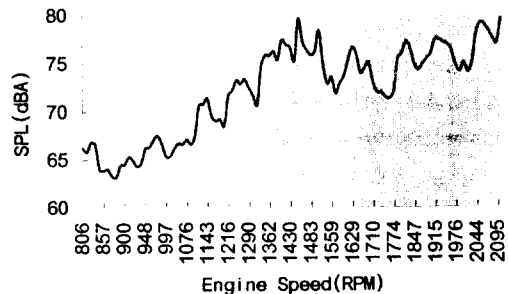


그림 1. 엔진속도에 따른 운전자 소음의 변동 추이

#### 2-1. 실험에 의한 운전실 음향모드 고찰

부밍소음이 문제시 되는 저주파구간의<sup>(3,4)</sup> 밀폐공간에서 강체벽면의 경계조건을 만족하는 Helmholtz 방정식은 다음과 같다<sup>(5)</sup>.

$$\nabla^2 \phi(X) + k_n^2 \phi_n(X) = 0 \quad \dots (1)$$

식 (1)에서  $\phi_n, k_n = \omega_n/c$ 는 각각 벽면의 경계조건과 Helmholtz 방정식을 만족하는 고유함수 및 고유치이며, c는 음속이다.

\* 대우중공업(주) 중기 연구개발실

밀폐공간의 각 변의 길이가 각각  $L_x, L_y, L_z$ 로 이루어진 직육면체의 경우 고유함수와 고유치는 다음과 같다.

$$\phi_n(X) = \sqrt{e_{n1}e_{n2}e_{n3}} \cos \frac{n_1\pi x}{L_x} \cos \frac{n_2\pi y}{L_y} \cos \frac{n_3\pi z}{L_z} \quad \dots(2)$$

$$\omega_n = c \sqrt{\left(\frac{n_1\pi}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_2\pi}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_3\pi}{L_z}\right)^2} \quad \dots(3)$$

여기서,  $e_{ni}$ 는 모우드 정규화에 따른 정수로서 만약  $n_i = 0$ 이면  $e_{ni} = 1$  이고,  $n_i > 0$  이면  $e_{ni} = 2$  이다.

우선, 식 (2), (3)으로 부터 일반적으로 유추해낼 수 있는 것은, 음향모드의 경우도 진동모드와 마찬가지로 음압분포가 쉽게 형성되는(주로 길이가 긴 방향) 모드부터 발생되며, 모서리 부위에서 항상 음압분포가 크게 나타난다는 것이다. 이는 운전실내의 모서리 부위에 가진원이 있을 때 음압의 전파가 잘되어 부밍 소음 유발 가능성이 큰 것을 암시하는 것이다. 따라서, 설계자의 입장에서는 운전실내의 모서리부위에 음향모드의 가진주파수내에서 진동을 유발할 수 있는 가진원을 두어서는 안될 것이다.

실차상태에서 운전실의 음향학적 모드를 실험적으로 고찰하기 위해 그림 2와 같은 형상의 운전실내에서 구석에 음압 가진원(B&K 4205)을 두고 운전자의 오른쪽 귀에서의 음압을 응답으로 하여 실시간 주파수 분석기, B&K 2144를 통해 주파수 응답곡선을 구하였으며, 그에 대한 결과를 그림.3에 나타내었다. 이상의 실험에 의해 구한 결과들을 표 1에 요약 정리하여 나타내었다.

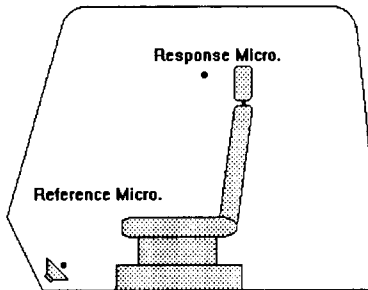


그림 2. 굴삭기 운전실에 대한 개략도 및 측정위치

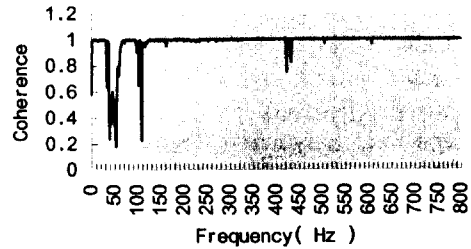
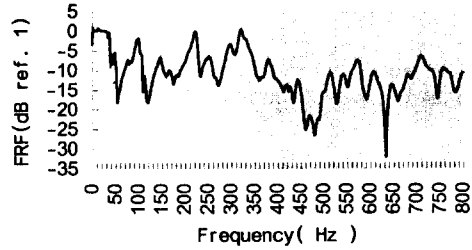


그림 3. 운전자 오른쪽 귀 위치에서 실험에 의한 주파수 응답곡선

표 1. 실험에 의한 운전실내의 음향모드

	고 유 치 ( Hz )
모 드 #1	99
모 드 #2	146
모 드 #3	165
모 드 #4	222
모 드 #5	251
모 드 #6	297
모 드 #7	321
모 드 #8	380

## 2-2 설계인자 및 영향도 평가를 위한 실험계획

굴삭기 운전실의 운전자 소음은 일단, 탑승자가 한명이므로 소음 저감을 위한 구체적인 목적은 운전자가 듣는 위치에서 음압을 최소화하는 것으로 일원화 될 수 있다. 따라서 본 실차 시험에서 모든 운전자 소음은 운전자의 우측 귀 부위에서 측정하였다.

아울러 운전자 소음을 저감하기 위해 구조기인에 의한

소음관점에서 운전자 소음에 영향이 크리라 예측되는 인자들에 대해 검토,확정하고 실험적 기법(일원 일시법)에 의해 각 인자에 대한 정량적인 기여도를 분석,평가 하였다.

먼저, 운전자 소음에 대한 주요 영향 인자로서 표 2와 같이 5가지 인자를 고려하였다. 물론 이에 대한 선정 근거는 밀폐 공간내의 음장이론(2-1절)을 근거로하고 실차 적용성을 감안하여 선택하였다. 단, 엔진 및 운전실 마운트의 경우 그 중요성을 고려하여 시뮬레이션을 통해,동적 특성을 사전 검토하고 마운트 선정에 대한 근거를 확보 하였다. 언급된 설계인자를 정리하면 다음과 같다.

표 2. 설계(제어)인자 및 그에 따른 수준

설계인자		( D1 ) CAB. MOUNTS	( D2 ) ENGINE MOUNTS	( D3 ) HEATER BOX	( D4 ) BACK WINDOW	( D5 ) RIGHT WINDOW
수준	수준1 (Lev.1)	DC 제품	DE 제품	제진재 미처리	댐 핑 적음	댐 핑 적음
	수준2 (Lev.2)	MC 제품	ME 제품	제진재 처리	댐 핑 많음	댐 핑 많음

표 2에서 고려된 모든인자(총 5개)들의 수준을 고려하여 가능한 모든 조합에 대해 실험을 하려면 총 32번을 실시하여야 한다( $2^5 = 32$ ). 그러나, 이 것은 경제적,시간적 손실이 너무크므로 본 연구에서는 각 인자들 성격상 한번 변경하면 원상하기가 힘들고, 인자들끼리의 상호간섭에 의한 영향이 적은 것들이기 때문에 시험의 효율성을 높일 수 있는 순서로 수행하였다. 그리고, 각 인자들에 대한 영향도를 정량적으로 산출하기 위해 아래와 같이 굴삭기 작업조건에 알맞게 엔진속도를 구간별로 나누어 분석을 실시하였다.

- 구간 - 1 : ~ 1200 RPM
- 구간 - 2 : 1200 ~ 1400 RPM
- 구간 - 3 : 1400 ~ 1600 RPM
- 구간 - 4 : 1600 ~ 1800 RPM
- 구간 - 5 : 1800 ~ RPM

여기서, 구간-1과 구간-5는 좀더 그 중요성을 부여할 수 있는데, 구간-1은 난기 운전 및 작업중 휴식시에 운전자에게 매우 중요한 영역이며, 구간-5는 대부분의 작업영역에

해당하므로 매우 중요하다.

또한 고려된 인자중 D1,D2,D3에 대해 운전실의 음향학적 모드와 진동 모드간의 연성도를 분석하였다.

### 3. 시험결과

우선 각 설계인자들의 기여도를 분석을 위한 시험초기 조건은 현 양산상태 즉, 각 설계인자들에 대해 수준1으로 조립되어 있는 상태에서 출발하였다. 그리고 각 인자의 기여도를 파악하기 위해 설계인자 중 D1, D2, ..., D5의 순으로 수준1에서 수준2로의 시험조건을 변경하며 시험을 실시하였다.

#### 3-1 설계(제어)인자들의 기여도 평가

설계인자들에 대한 구간별 영향도를 파악하기 위해 그림.1에 나타난 운전자 소음 중 주요 피크(peak)치에 해당하는 엔진 속도에서의 음압 변동크기(dB)를 정량적으로 산출하여, 구간별로 할당하였다.그리고 각각의 크기에 따라 가중치를 두어 표 3과 같이 나타내었다.

표 3에서 각 구간에 대한 인자의 영향도는 구간별로 계산된 음압 변동크기(dB)별로 다음과 같이 정의하여 환산된 것이다.

- $0 < |음압변동치| \leq 3 \text{ dB} : \blacktriangledown(-\Delta) 1\text{개}$
- $3 < |음압변동치| \leq 6 \text{ dB} : \blacktriangledown(-\Delta) 2\text{개}$
- ...
- $12 < |음압변동치| \leq 15 \text{ dB} : \blacktriangledown(-\Delta) 5\text{개}$
- $15 < |음압변동치| : \blacktriangledown(-\Delta) 6\text{개}$

단,  $\blacktriangledown$  : 음압의 감소를 의미함  
 $\Delta$  : 음압의 증가를 의미함

표 3에 나타난 결과를 살펴보면 운전자 소음에 대한 각 인자의 구간별 기여도를 한눈에 알 수 있다. 전반적으로 D2 인자를 제외하고는 대부분 양호하나, D3 인자의 기여도가 전 구간에 걸쳐 가장 큰 것을 알 수 있다. 아울러, D1 인자의 수준2 경우도 운전자 소음에 많은 기여를 할뿐만 아니라,그림 4에서 볼 수 있는 것처럼 엔진에서 발생하는 진동의 방진효과가 수준1보다 훨씬 우수함을 알 수 있다.

표 3. 설계인자들에 대한 구간별 기여도

시험 조합	(D1) <sub>2</sub>	(D1) <sub>2</sub>	(D1) <sub>2</sub>	(D1) <sub>2</sub>	(D1) <sub>2</sub>
	(D2) <sub>1</sub>	(D2) <sub>2</sub>	(D2) <sub>2</sub>	(D2) <sub>2</sub>	(D2) <sub>2</sub>
	(D3) <sub>1</sub>	(D3) <sub>1</sub>	(D3) <sub>2</sub>	(D3) <sub>2</sub>	(D3) <sub>2</sub>
	(D4) <sub>1</sub>	(D4) <sub>1</sub>	(D4) <sub>1</sub>	(D4) <sub>2</sub>	(D4) <sub>2</sub>
	(D5) <sub>1</sub>	(D5) <sub>1</sub>	(D5) <sub>1</sub>	(D5) <sub>1</sub>	(D5) <sub>2</sub>
	시험-1	시험-2	시험-3	시험-4	시험-5
구간-1	▼		▼▼▼▼		▼▼▼
구간-2	▼	▼▼	▼▼▼▼ ▼	△	△△
구간-3	▼▼▼▼▼ ▼	▼	▼▼▼▼ ▼	▼▼▼▼	▼▼
구간-4	▼▼	△△△△ △	▼▼▼▼ ▼▼	▼▼	▼▼
구간-5	▼▼▼▼	△△△△ △△	▼▼▼▼ ▼▼	▼▼▼▼	▼

<주> (Di)<sub>j</sub> : Di 설계인자의 수준j를 의미함

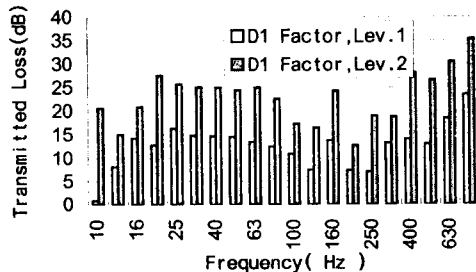


그림 4. 엔진 마운트에 대한 진동(가속도) 전달 손실

이제 각 인자에 대해 모두 수준1이 적용된 경우와 모두 수준2가 적용되었을 때에 대한 운전자 소음을 그림 5.에 나타내었다. 여기서 알 수 있는 것처럼 본 시험에서 고려된 여러 인자(D1, D2, D3, D4, D5)들을 실차에 적용할 경우 전 구간에 걸쳐 많은 소음 저감효과가 있음을 알 수 있으며 특히, 앞에서 언급된 굴삭기 작동 특성상 중요시되는 구간-1과 구간-5에서 3 dB(50%)이상의 저감효과를 얻을 수 있었다.

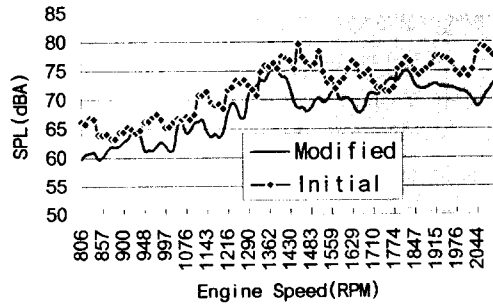
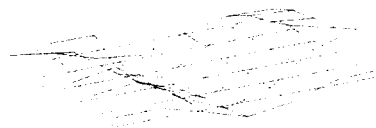


그림 5. 양산 및 최종안 적용시 엔진속도에 따른 운전자 소음의 분포

### 3-2 진동과 음향모드와의 연성해석

앞의 시험에서 고려된 시험인자중 D3(Heater Box), D4(Back Window), D5(Right Window) 인자에 대해 각각의 진동 모드와 음향 모드와의 연성 관계를 알아보기 위해, 모드 해석을 실시하였다. 그림 6은 D4인자에 대한 모드 해석 결과를 나타낸 것이다. 여기서 소음 모드#3,4와 진동 모드 #3,4가 연성이 되어 공명을 일으키고 있음을 알 수 있다. 또한 D3, D4인자에 대해서도 같은 방법으로 음향모드와의 연성관계를 조사하여 표 4에 나타내었다.



169 Hz

< 모드 #3의 모드형상 >



219 Hz

< 모드 #4의 모드형상 >

그림 6. D4(BACK WINDOW)인자에 대한 진동 모드

표 4. 진동 과 음향모드와의 연성관계

진동모드 ( Hz )	음향모드 ( Hz )			Mode #1	Mode #2	Mode #3	Mode #4	Mode #5	Mode #6	Mode #7
	인자	D3	D4	D5						
Mode #1	43	47	22							
Mode #2	95	121	52	D3						
Mode #3	110	169	68			D4				
Mode #4	126	182	84							
Mode #5	156	219	98	D5			D4			
Mode #6	170	237	120			D3				
Mode #7	189	256	153							
Mode #8	207	266	188							
Mode #9	234	314	212							
Mode #10	280	338	239							
Mode #11	302	350	255					D5		
Mode #12	320	390	287							D3

#### 4. 결론

본 연구에서는 굴삭기 운전실내의 부밍소음에 영향력 있는 인자들에 대한 정량적인 기여도 분석을 위해 실험적기법을 도입하여 운전자 소음 저감을 구현하였고, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 실험적 방법(일원 일시법)으로 운전자 소음에 영향력이 큰 인자들을 정량적으로 파악하고, 효율적으로 제어할 수 있는 설계 방안을 제시할 수 있었다.
- (2) 실험결과들을 주요 구간별로 기여도 분석표를 작성함으로써 실험인자들의 운전자소음에 대한 기여도를 쉽게 파악할 수 있었다.
- (3) 설계인자의 진동모드와 음향모드 간의 연성관계를 실험적으로 규명함으로써, 중요 인자의 영향 주파수대를 파악할 수 있었다.
- (4) 제안된 설계인자의 적용을 통하여 굴삭기 운전시 중요한 구간에서 3 dB이상의 높은 저감효과를 얻을 수 있었다.

#### 참고문헌

1. 이 정권, "자동차 실내소음에 대하여", 소음진동공학회지 제3권, 1993

2. Antony Barber MSc etc, "Handbook of Noise and Vibration Control", 6th, elsevier advanced technology

3. 성 명호의 2인, "Booming 소음 저감을 위한 구조-음향의 연성해석과 차체 구조 변경", 한국 소음진동 공학회 '94 추계학술대회 논문집, 1994

4. 김 태정의 2인, "구조-음향 연성 해석을 통한 모형 차실 모델의 소음 저감 기술연구", 한국 소음진동 공학회 '94 추계학술대회 논문집, 1994

5. 홍 석운의 3인 "앞머임/뒤머임 제어기를 이용한 밀폐공간 내 소음의 능동제어", 소음진동 공학회지 제4권, 1994

6. 이 장무, "차세대 자동차와 소음. 진동", 소음진동 공학회지 제3권, 1993

7. J. D. IRWIN, E. R. GRAF, "Industrial Noise and Vibration", prentice-hall