

# 과부하 굴삭기 소음의 불쾌감 표현인자

## Sound quality metrics to express the discomfort of overload excavator noise during operation

심상덕,<sup>1</sup> 송오섭<sup>†</sup>

(Sangdeok Sim<sup>1</sup> and Ohseop Song<sup>1†</sup>)

<sup>1</sup>충남대학교 기계공학과

(Received February 22, 2018; revised March 20, 2018; accepted May 30, 2018)

**초 록:** 본 연구의 목적은 선형 다중회귀분석을 통해 과부하 굴삭기 소음의 불쾌감을 표현할 수 있는 음질인자를 찾고 이를 이용하여 객관적인 평가를 위한 음질인덱스를 개발하고자 하였다. 이를 위해 소음특성이 다른 굴삭기 6모델을 선별하여 과부하 조건의 운전실 소음을 녹음하고 쌍대비교법과 크기평가법에 의한 청음평가를 수행하였다. 그리고 일관성이 낮은 청음평가 결과는 군집분석을 통해 선호도 성향이 다른 2 그룹으로 분류하고 회귀분석을 실시하여 어떤 음질인자가 불쾌감(낮은 선호도)에 유의한 영향을 주는 인자인지를 고찰하였다. 그 결과 불쾌감을 표현하는 음질인자는 10 Bark까지 부분 라우드니스 인자( $PN_{10Bark}$ )에 따라 불쾌감을 느끼는 성향을 가진 청음 평가자 그룹과 엔진 소음( $dB_{EG}$ )과 유압시스템 소음의 차이( $dB_1$ )로 표현된 인자에 따라 불쾌감을 느끼는 성향을 가진 청음 평가자 그룹으로 구성되어 있음을 확인하였다. 그리고 쌍대비교법의 선호도 순위와 성향 분석결과를 이용하고 크기평가법과의 상관분석을 통해 신뢰도가 낮은 평가자의 결과는 제외하여 보다 신뢰성 높은 크기평가법의 청음평가 결과를 얻었다.

**핵심용어:** 청음평가, 음질인자, 라우드니스, 부분 라우드니스, 샤프니스, 러프니스, 변동강도

**ABSTRACT:** In this paper, we tried to find out sound quality metrics to express discomfort of overload excavator noise and to develop sound quality indexes through multiple regression analysis by using them. For this purpose, the interior noise of cabin under overload condition was recorded for six excavator models with different noise properties and Jury test was carried out by PCM (Paired Comparison Method) and MEM (Magnitude Estimation Method). Jury test result with low consistency was classified into two groups with different preference tendencies by cluster analysis and multiple regression analysis was conducted in order to find out which sound quality metrics have significant effects on discomfort (low preference). As a result, we figured out that the sound quality metrics to express the discomfort were the partial loudness (=  $PN_{10Bark}$ ) between 0 and 10 Bark in case of group1 and the difference between engine noise (=  $dB_{EG}$ ) and hydraulic system noise ( $dB_1$ ) in case of group2. Using the results of preference ranking and tendency analysis of PCM followed by the correlation analysis between PCM and MEM, the more reliable results were adopted by excluding the data with low consistency obtained from Jury test via MEM.

**Keywords:** Jury test, Sound quality metric, Loudness, Partial loudness, Sharpness, Roughness, Fluctuation strength

**PACS numbers:** 43.50.Ba, 43.66.Cb

### 1. 서 론

최근 엔진 기술의 발전으로 저소음 엔진을 적용한 굴삭기의 운전실 소음은 엔진소음의 기여도가 낮아

상대적으로 다른 부품의 소음 기여도가 크게 된다. 따라서 엔진소음에 익숙한 운전자들은 저소음 엔진 적용으로 엔진소음은 줄고 그 동안 들리지 않던 특정 소음이 들릴 경우, 불만을 호소하기도 한다. 특히, 메인 릴리프 밸브의 설정 압력을 초과하는 과부하 작업 조건에서 발생하는 소음은 운전자에게 상당한

<sup>†</sup>Corresponding author: Ohseop Song (songos@cnu.ac.kr)  
Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Republic of Korea  
(Tel: 82-42-821-5650, Fax: 82-42-822-5642)

불쾌감을 준다. 이러한 불쾌감을 주는 소음에 대한 주관적인 느낌을 객관화하는 방법은 주관평가 결과와 소음데이터로부터 추출한 음질인자와의 상관성 분석 방법인 산점도, 선형 회귀분석, 다중 회귀분석, 비선형 회귀분석, 인공 신경망 알고리즘 등을 이용해 주관평가에 영향을 주는 음질인자를 확인 할 수 있다.<sup>[1]</sup> 그러므로 음질인자는 인간의 주관적 평가를 대신하여 표현할 수 있어야 하지만 다양한 소음에 대해 기존의 심리음향학의 음질인자만으로 표현하기 어려운 경우가 있다. 이러한 경우, 평가 대상 소음을 표현 할 수 있는 음질인자를 추출하는 것이 필요하다.<sup>[2]</sup> 따라서 본 연구의 목적은 회귀분석을 통해 과부하 굴삭기 소음에 대해 운전자의 불쾌감을 표현 할 수 있는 음질인자를 찾고 이를 이용하여 객관적인 평가를 위한 음질인덱스를 개발하고자 하였다. 이를 위해 소음특성이 다른 굴삭기 6모델을 선별하여 과부하 조건의 운전실 소음을 녹음하고 쌍대비교법과 크기평가법에 의한 청음평가를 수행하였다. 그리고 일관성이 낮은 청음평가 결과는 군집분석을 통해 선호도 성향이 다른 2 그룹으로 나누어 평가하였으며 심리음향학의 음질인자만으로 회귀분석이 불가능하여 새로운 음질인자를 추출하여 독립변수로 사용함으로써 선호도 성향이 다른 2 그룹에 대한 과부하 굴삭기 소음의 불쾌감(낮은 선호도)에 유의한 영향을 주는 음질인자를 얻었다. 이러한 음질인자의 물리적 의미 분석을 통해 2 선호도 그룹의 청음자의 선호도 성향을 파악하였고 쌍대비교법과 크기평가법을 함께 평가함으로써 보다 신뢰성 있는 청음평가 결과를 얻을 수 있었다.

## II. 굴삭기 주요 소음

굴삭기 실내 소음의 기여도가 높은 주요 소음은 엔진소음, 냉각 팬 소음, 흡배기 소음, 유압시스템 소음 등이 있다. 특히 과부하 작업 중 가장 크게 부각되는 소음은 엔진소음과 유압시스템 소음이다. Fig. 1은 엔진과 유압시스템을 나타내었다. 유압시스템은 메인 펌프, 메인 컨트롤 밸브(Main Control Valve, MCV), 액추에이터, 오일탱크 그리고 각종 밸브와 유압호스로 구성된다.

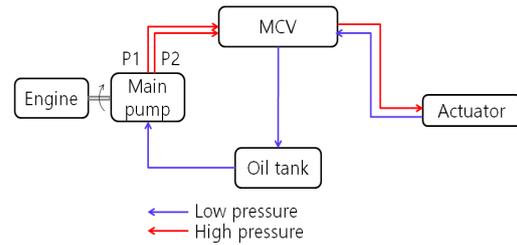


Fig. 1. Engine and hydraulic system of excavator.

엔진과 직접 연결되어 구동되는 메인펌프에서 토출된 고압의 작동유는 메인 컨트롤 밸브로 보내지며 메인 컨트롤 밸브에 공급된 고압 작동유는 운전자의 조작에 의해 각종 작업장치인 붐, 암, 버킷 등으로 보내지고 작업 장치를 구동시키게 된다. 액추에이터에서 나온 저압 작동유는 다시 메인 컨트롤 밸브를 지나 탱크로 복귀하게 된다. 이러한 굴삭기 유압시스템은 유압에너지를 기계적인 에너지로 변환시켜주는 시스템이다. 이러한 에너지 변환과정을 거치면서 최종 작업장치가 작동하게 되는데 에너지의 분배와 전달과정에서 메인펌프가 작동하면서 발생하는 압력맥동에 의한 강한 소음·진동은 과부하 압력의 작용으로 메인릴리프 밸브가 작동할 때 가장 커져 유압호스나 각종 밸브를 지나면서 구조물을 통해 증폭되어 차량 운전실까지 전달되고 운전자에게 상당한 불쾌감을 준다.

## III. 음질평가 방법

### 3.1 쌍대비교법(Paired Comparison Method)

쌍대비교법은 2개의 주어진 자극을 동시에 비교하여 선호 순서에 대한 응답을 구하는 척도 구성법을 말한다. 사람들은 자극의 절대적인 크기를 판단할 때는 상당히 부정확하기 때문에 이러한 단점을 보완 할 수 있는 쌍대비교법은 단순히 2개의 주어진 자극에 대해서만 비교하기 때문에 응답자에게는 가장 쉬운 방법이다. 쌍대비교법을 통해 응답자는 더 선호하는 자극을 선택한다. 가장 간단한 방법으로 가능한 모든 자극의 쌍들을 제시한다.  $t$ 개의 자극의 경우, 전체  $t(t-1)/2$ 쌍이 된다. 각 응답자에 대해 전체 평가행렬은 응답자가 평가행렬의 다른 자극보다 그 자극을 선택한 회수로 각 자극에 대한 선호 점수를

산출한다. 선호 점수는 자극들에 대한 가장 간단한 척도 값이다. 이 점수는 행렬을 만들어서 행 자극에 대해 열 자극이 선호될 때 그 셀에는 1을 입력하고 그렇지 않으면 0을 입력함으로써 쉽게 계산될 수 있다. 이때는 열의 합이 선호점수가 된다. 쌍대비교법은 비교 결과간의 모순이 존재할 수 있다. 한 명의 응답자가 한 번의 평가에서 하나 이상의 순환적 선호관계가 발생되면 모순이 존재하게 된다. 예를 들어 자극  $i, j, k$  중에서 3가지 선택은  $k > j > i > k$ 와 같은 선호 순서를 야기 시킬 수 있다. 6개의 자극의 경우 하나 이상의 순환적 선호관계가 없는 경우에는 0에서 5까지의 6개의 정수가 존재하게 된다.<sup>[3]</sup>

### 3.2 크기평가법(Magnitude Estimation Method)

현재 가장 널리 사용되는 스케일링 방법 중 하나로 Richardson과 Ross(1930)에 의해 처음으로 사용된 후에 Stevens(1953)에 의해 정립된 것이 크기평가법이다.<sup>[4]</sup> 크기평가법에서 평가자는 다양한 자극에 대한 지각의 크기를 수치적인 평가치를 부여한다. Stevens는 초기에 밝기, 라우드니스, 다른 감각 등을 연구하기 위해 크기평가를 사용하여 많은 실험을 수행하였다. Stevens는 크기평가법의 주요한 2가지 방법을 제시했다. 그 하나는 평가자에게 표준자극이 주어지면 평가자는 표준자극에 평가 점수를 주고 연속된 시험에서 평가자는 그 값에 비례하여 다른 자극에 의해 생성된 감각에 점수를 할당한다. 또한 평가자는 특정 감각 차원에서, 한 감각이 다른 감각보다 몇 배나 많은지를 판단하는 판단을 하도록 지시를 받는다. 다른 하나는 실험자가 정의한 값을 갖는 표준자극은 생략되는 대신에 다양한 자극이 평가자에게 무작위로 제시되며 평가자는 자극들의 크기에 비례하여 자극의 느낌에 숫자를 할당하는 방법이다.

## IV. 소음측정 및 청음평가

굴삭기 6모델(A1~F1)을 선별한 후, 엔진은 최고 회전 모드로 설정하고 작업 장치는 암 오프립(arm in) 상태로 고정하였다. 측정 시간은 Table 1.과 같이 컨트롤 레버(RCV lever)가 중립상태인, 아이들 모드에

Table 1. Measurement condition and time in cabin.

Operation condition of excavator	Time (s)
Idle mode of engine maximum rpm	0 ~ 1.25
Arm relief mode when RCV lever was pulled to its limit	1.25 ~ 5.0

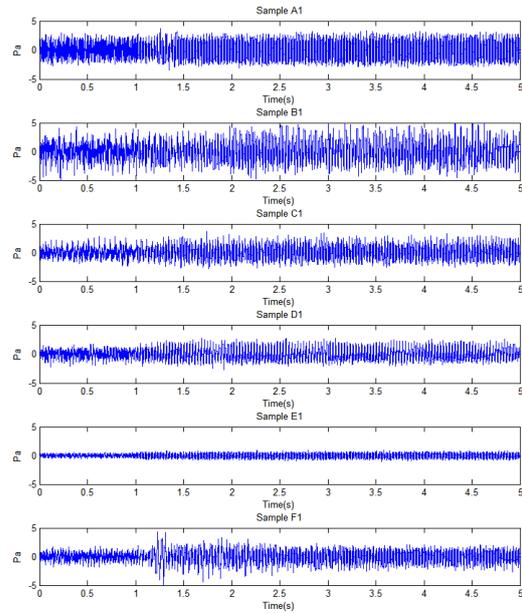


Fig. 2. Time signals of noise measured in cabin.



Fig. 3. Jury test in semi anechoic room.

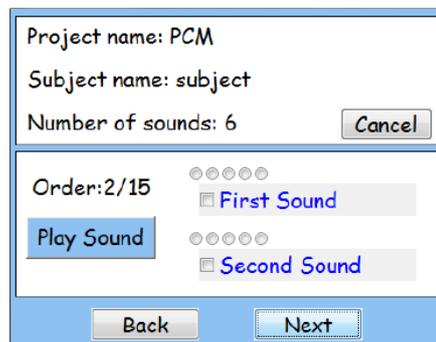


Fig. 4. Program for Jury test by PCM.<sup>[5]</sup>

서 1.25 s 그리고 컨트롤 레버를 완전히 뒤로 당긴 상태인, 암 릴리프 모드(arm relief mode)에서 3.75 s동안의 소음을 측정하였다.

측정 장비는 헤드에쿠스틱(HEAD acoustics)사의 SQuadriga II 분석 시스템의 마이크로폰이 장착된 헤드셋을 착용한 후, 운전실에 앉아 운전실 소음을 녹음하였다. 측정된 운전실 소음의 음압 시간 데이터는 Fig. 2에 나타내었다.

청음평가는 굴삭기 운전 경험을 가진 굴삭기 소음에 친숙한 30대 7명, 40대 7명, 50대 12명의 남자(총 26명)로 구성된 엔지니어를 대상으로 쌍대비교법과 크기평가법에 의해 Fig. 3과 같이 암소음의 영향이 없는 반무향실에서 수행되었다. 청음평가를 위해 젠하이저(Sennheiser)의 HD650 헤드셋으로 구성된 헤드에쿠스틱사의 음원 재생 장비인 PEQ-V를 사용하여 음을 재생하였다.

쌍대비교법에 의한 평가는 Fig. 4와 같이 두개의 음원을 동시에 제시하였으며 6개의 음의 조합인 15쌍의 음에 대해 더 선호하는 음을 선택하도록 하였다.

크기평가법에 의한 평가는 Fig. 5와 같이 9점 척도 스케일을 사용하였다. 그리고 방법은 Fig. 6과 같이 기준사운드를 가장 위에 제시하고 다음으로 6개의 음에 대해 차례로 평가하도록 하였다. 평가자는 가장 위의 기준사운드에 점수를 부여하고 그 점수를 기준으로 다른 음에도 상대적인 점수를 부여하도록

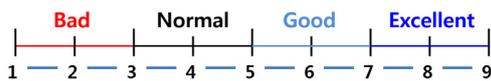


Fig. 5. Scaling method for Jury test.

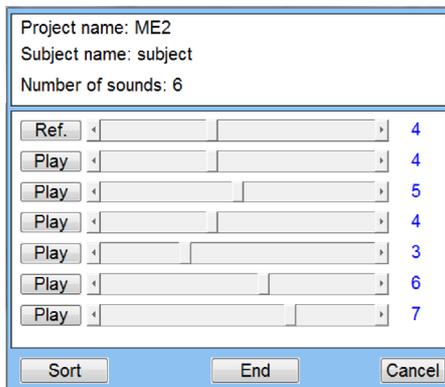


Fig. 6. Program for Jury test by MEM.<sup>[5]</sup>

하였다. 또한 제시한 6개의 음 중에 기준사운드가 포함되어 있어 처음과 유사한 점수를 부여하지 않은 평가자의 평가 결과는 신뢰성이 부족하므로 결과에서 제외 하였다.

## V. 주관적 음질평가

### 5.1 PCM에 의한 청음평가 결과

PCM 평가에서 평가의 적합성 여부를 판단하기 위하여 각 청음자의 평가 행렬을 확인하여 하나 이상의 순환적 선호관계를 갖는 청음자의 평가 결과는 신뢰할 수 없으므로 통계분석에서 제외하였다. 다음은 평가자 개개인의 응답의 결과를 합하여 전체 평가자의 선호도의 순위를 확인하였다. 그리고 군집 분석을 통해 청음평가 결과를 유사성이 높은 그룹으로 분류하였다. 군집분석을 통해 나누어진 각 그룹의 선호도 순위는 MEM에 의한 청음평가 결과와 비교하여 MEM에 의한 평가를 검증하는 기준으로 활용하고자 하였다. 즉 PCM을 통해 얻은 선호도 순위

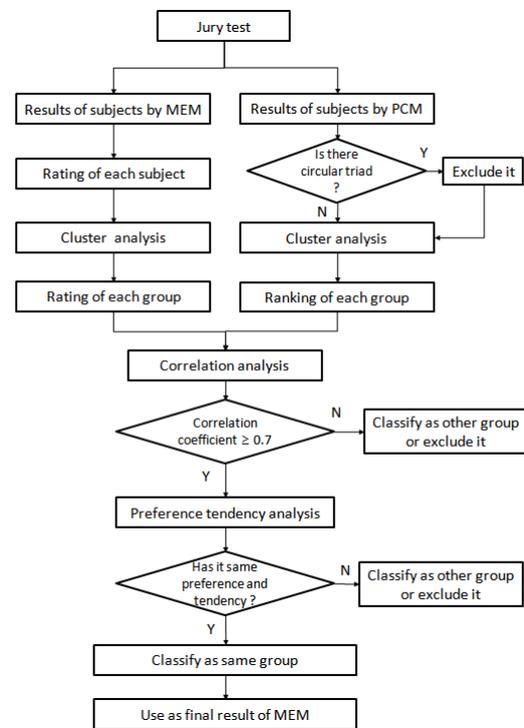


Fig. 7. Procedure to analysis a group having same preference and tendency using results of MEM and PCM.

는 MEM의 선호도 크기의 순서와 일치해야 올바른 청음평가를 한 것으로 판단하였다. 또한 MEM에 의한 선호도 점수의 크기와 PCM의 선호도 순위의 경향이 일치하는지 확인하였다. 만약 PCM의 선호도 순위와 일치하지 않는 MEM에 의한 평가자의 결과는 관심부족이나 일관성 부족으로 통계분석에서 제외하였다. PCM에 의한 청음평가 결과를 얻기 위한 분석 절차는 Fig. 7과 같다.

PCM에 의한 청음평가 결과는 Table 2에 나타내었다. 청음평가에 참여한 총 26명의 평가자 중에 8명의 응답에서 모순된 순환적 선호관계가 발생하였고 모순된 순환적 선호관계가 발생하지 않은 18명에 대한 전체 선호도 순서는 Table 2와 같이 A1 > F1 > D1 = E1 > B1 > C1 순으로 나타났다. 여기서 평가 행렬에서 각 행의 합은 다른 음에 비해 해당 음을 더 선호하여 선택한 총 개수를 나타낸다.

18명의 PCM 평가자들은 C1 음에 대해서는 일관성을 갖는 평가를 한 반면 다른 음, 특히 E1 음과 F1 음에 대해서는 일관성이 떨어진 평가를 하여 군집분석을 통해 유사성이 높은 그룹으로 분류하였다. 그 결과 Fig. 8과 같이 크게 2개의 그룹으로 분류되었다.

Table 2. Summation of preference of 18subjects.

	A1	B1	C1	D1	E1	F1	Sum	Ranking
A1	0	18	18	11	14	11	72	1
B1	0	0	18	4	4	3	29	5
C1	0	0	0	0	0	0	0	6
D1	7	14	18	0	7	8	54	3
E1	4	14	18	11	0	7	54	3
F1	7	15	18	10	11	0	61	2

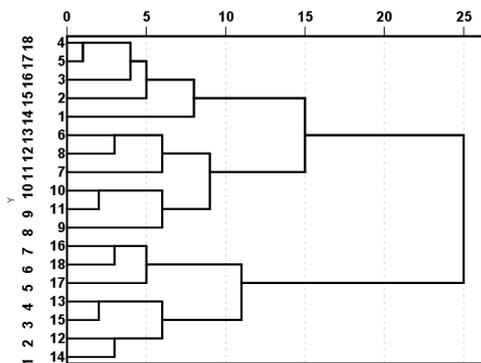


Fig. 8. Cluster analysis result.

Table 3은 A1 음을 가장 선호하는 그룹1에 대한 결과이며 Table 4는 E1 음을 가장 선호하는 그룹2에 대한 PCM 결과를 나타낸다. Fig. 9에서 그룹1과 그룹2의 선호도 순위의 평균값을 비교하였다. 선호도 분석 전의 D1, E1, F1 음의 평균 선호도 순위에는 차이가 없었지만 선호도 분석 후에는 현저한 선호도 차이를 보였다.

그룹 1의 선호도는 A1 > F1 > D1 > E1 > B1 > C1 순으로 나타났고 그룹 2는 E1 > D1 > A1 > F1 > B1 > C1 순으로 나타났다. 여기서 주목할 점은 그룹 1에 속하는 평가자는 A1 음과 F1 음을 상당히 선호하며 그룹 2에 속하는 평가자는 그룹 1에 속하는 평가자와 비교하여 E1 음을 더 선호하고 F1 음을 더 비 선호하는 것으로 나타났다. 일관성 있게 C1 음을 가장 비 선호하였

Table 3. Preference ranking of group1 of 11subjects.

	A1	B1	C1	D1	E1	F1	Sum	Ranking
A1	0	11	11	8	11	7	48	1
B1	0	0	11	4	4	1	20	5
C1	0	0	0	0	0	0	0	6
D1	3	7	11	0	7	3	31	3
E1	0	7	11	4	0	0	22	4
F1	4	10	11	8	11	0	44	2

Table 4. Preference ranking of group2 of 7subjects.

	A1	B1	C1	D1	E1	F1	Sum	Ranking
A1	0	7	7	3	3	4	24	3
B1	0	0	7	0	0	2	9	5
C1	0	0	0	0	0	0	0	6
D1	4	7	7	0	0	5	23	2
E1	4	7	7	7	0	7	32	1
F1	3	5	7	2	0	0	17	4

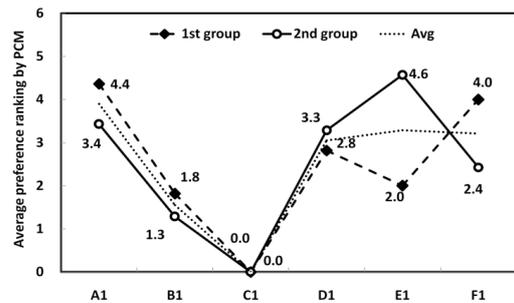


Fig. 9. Average preference ranking by PCM.

다. 만약 선호도 분석을 하지 않고 전체 평가자의 평균값을 이용하여 음질인덱스를 도출한다면 E1, F1 음에 대한 변별력은 떨어지고 평가자의 성향을 반영한 평가를 하기 어렵다는 것을 확인할 수 있다.

### 5.2 MEM에 의한 청음평가 결과

MEM에 의한 청음평가 결과는 회귀분석에서 종속변수로 사용되며 최종 얻고자 하는 예측모델의 회귀방정식은 청음평가 결과와 잘 일치하는 예측값을 얻는 것이 목적이므로 청음평가를 통해 얻은 결과가 얼마나 신뢰성 있게 평가되고 분석되는지가 음질 예측모델을 개발하는 데 있어서 가장 중요하다고 할 수 있다. 군집분석으로 MEM에 의한 청음평가 결과를 PCM과 동일한 2개의 선호도 그룹으로 분류하였다. 분류 시에 PCM의 선호도 순위와 상관분석을 확인하여 낮은 상관계수를 갖는 4명의 청음자의 결과는 신뢰성이 떨어지므로 결과에서 제외하였다.

Figs. 10과 11에서 MEM과 PCM 결과를 비교하여 나타내었다. 그룹 1은 MEM에 의한 청음평가의 크기와 PCM에 의한 청음평가의 순위는  $A1 > F1 > D1 > E1 > B1 > C1$  으로 잘 일치하였다. 그러나 그룹 2의 PCM

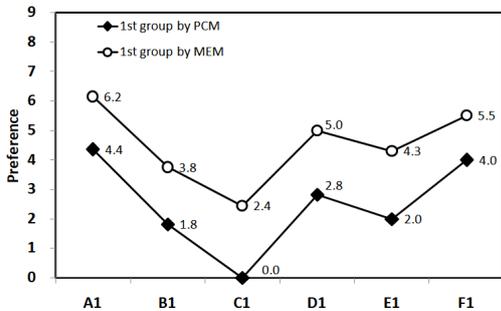


Fig. 10. Rank by PCM and score by MEM (group1).

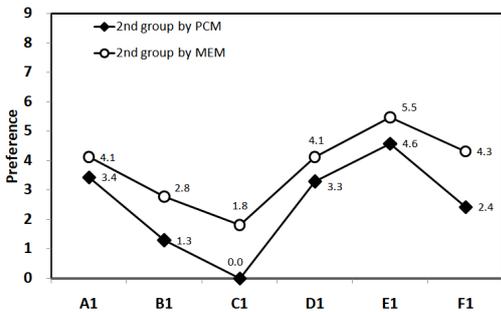


Fig. 11. Rank by PCM and score by MEM (group2).

순위는  $E1 > A1 \approx D1 > F1 > B1 > C1$  이며 MEM의 크기는  $E1 > F1 > A1 = D1 > B1 > C1$  순으로 MEM 평가에서는 F1의 선호도가 높게 나왔으나 전반적인 경향은 PCM의 결과와 잘 일치하였다. 최종 음질예측모델 구축을 위해 MEM에 의한 청음평가 결과를 사용하였다.

## VI. 객관적 음질인자 분석

청음평가에 사용한 6개의 음원으로부터 추출한 음질인자를 Table 5에 표현하였다. 추출한 음질인자는 크게 3가지로 구분된다. 첫째는 전체 음압레벨과 특정 주파수에서의 음압레벨이며 둘째는 심리음향학에서 사용하는 음질인자이며 셋째는 Critical band rate에서의 비라우드니스 값에서 부분적으로 추출한 음질인자로 엔진 1차 폭발 주파수 성분과 유압시스템 소음의 1차, 2차, 3차 압력 맥동 주파수에서의 부분 라우드니스이다.

Table 5. Sound quality metrics.

Class	Metrics	Remark
SPL (Sound Pressure Level) (dB)	dB	Linear SPL
	dB(A)	A-weighted SPL
	dB <sub>EG</sub>	Peak level corresponding to first engine firing frequency
	dB <sub>1</sub>	Single SPL corresponding to first hydraulic pulsation frequency
Psycho-acoustic	N	Total loudness
	N <sub>relief</sub>	Total loudness during relief condition
	S	Sharpness
	R	Roughness
	FL	Fluctuation strength
Partial loudness (sone)	PN <sub>EG</sub>	Partial loudness between 0 and 3.0 in Bark band
	PN <sub>1</sub>	Partial loudness related to first hydraulic frequency between Z <sub>1</sub> and Z <sub>1+1.0</sub>
	PN <sub>2</sub>	Partial loudness related to first hydraulic frequency between Z <sub>2</sub> and Z <sub>2+1.0</sub>
	PN <sub>3</sub>	Avg. loudness between third hydraulic frequency Z <sub>3</sub> and Z <sub>3+1.0</sub>
	PN <sub>10Bark</sub>	Avg. loudness between 0 to 10 Bark
Peak loudness (sone)	N <sub>EG</sub>	Single loudness corresponding to first engine firing frequency
	N <sub>1</sub>	Single loudness corresponding to first hydraulic pulsation frequency

### 6.1 심리음향학의 음질인자

Table 5에서는 심리음향학에서 정의하는 음질인자인 라우드니스, 샤프니스, 러프니스, 변동강도를 나타내었다.<sup>6)</sup> 특별히  $N_{relief}$ 는 최대 부하 운전조건 즉, 메인 릴리프 밸브가 열린 상태의 시간 3.75 s 동안에 측정된 전체 라우드니스를 나타낸다.

### 6.2 부분 라우드니스(Partial Loudness)

Fig. 12는 과부하 운전 조건에서 발생하는 굴삭기 실내소음의 비라우드니스를 나타낸다. 여기서 부분 라우드니스를 추출하여 음질인자로 사용하였다.  $PN_1, PN_2, PN_3$ 은 유압시스템 소음의 1차, 2차, 3차 맥동 주파수를 Bark band에서  $Z_1, Z_2, Z_3$ 라고 정의하고 여기에 1.0Bark을 더한 범위까지의 비라우드니스 값들의 평균값으로 Eq. (1)과 같이 정의하였다.

$$PN_i = \frac{1}{n} \sum_{z_i}^{z_i+1.0} N'(sone). \quad (1)$$

- $PN_i$ : 평균 부분 라우드니스 ( $i=1, 2, 3$ ) (sone/Bark)
- $N'_i$ : 비라우드니스(specific loudness) (sone/Bark)
- $z_i$ : 유압시스템 소음의  $i$ 차 맥동주파수( $i=1, 2, 3$ )에 해당하는 Bark 주파수(Bark)
- $n$ :  $z_i$ 에서  $z_i + 1.0$  사이의 데이터 개수

마찬가지로,  $PN_{10Bark}$ 은 엔진 소음, 팬 소음, 유압시스템 소음을 포함하는 0에서 10 Bark (1270 Hz)까지의 평균 비라우드니스 값으로 정의하였다. 그리고 0에서 3 Bark (300 Hz)까지는 엔진소음을 포함하는 영

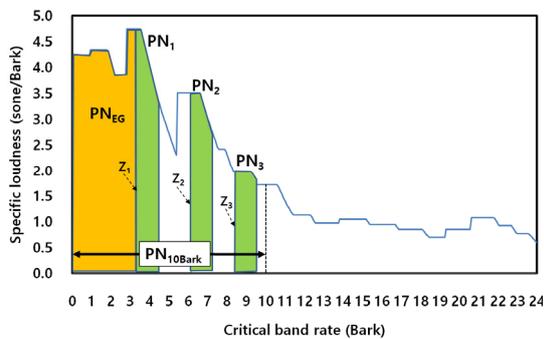


Fig. 12 The specific loudness of E1 model.

역으로  $PN_{EG}$ 라고 다음 Eqs. (2)와(3)과 같이 정의하였다.

$$PN_{10Bark} = \frac{1}{n} \sum_0^{10} N'(sone). \quad (2)$$

$$PN_{EG} = \frac{1}{n} \sum_0^3 N'(sone). \quad (3)$$

$n$ : 0~10Bark [Eq. (3)은 3Bark] 사이의 데이터 개수

### 6.3 단일 음압레벨 및 라우드니스

유압시스템 소음의 1차 맥동주파수의 음압레벨 값과 라우드니스 값을 각각  $dB_1$ 와  $N_1$ 로 표현하였다. 그리고 엔진 1차 폭발 성분의 피크 음압레벨과 피크 라우드니스 값을 각각  $dB_{EG}$ 와  $N_{EG}$ 로 표현하였다.

## VII. 회귀분석

크기평가법에 의한 청음평가 결과를 종속변수로 사용하고 분석한 모든 음질인자를 독립변수로 하여 SPSS의 단계적 선택 방법을 이용하여 다중 회귀분석을 수행하였다. 그 결과 종속변수에 영향을 주는 변수로 그룹 1의 경우, 엔진 1차 피크 레벨( $dB_{EG}$ )과 유압시스템 1차 피크레벨( $dB_1$ )과의 차이를 나타내는 변수가 최종 독립변수로 선정되었다. 그룹 2의 경우, 10Bark까지의 부분 라우드니스 값을 변수로 하는  $PN_{10Bark}$ 이 최종 독립 변수로 선정되었다. Table 6은 회귀분석을 통해 최종 선정된 독립변수와 두 그룹의 청음평가 결과를 나타낸다.

$$SQ_{group1} = 0.118 \times (dB_{EG} - dB_1) + 3.739. \quad (4)$$

Table 6. Sound quality metrics and MEM results.

Sounds	Sound quality metrics		Results by MEM	
	$dB_{EG} - dB_1$	$N_{10Bark}$	Group1	Group2
A1	17.25	33.50	6.15	4.12
B1	7.05	39.06	3.75	2.77
C1	-7.55	44.56	2.44	1.81
D1	6.45	32.01	5.00	4.12
E1	-1.15	19.53	4.30	5.46
F1	18.00	29.50	5.51	4.31

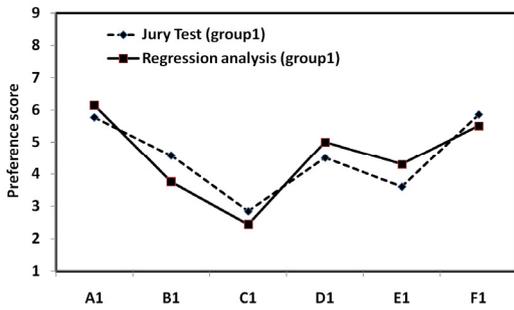


Fig. 13. Rank by PCM and rating by MEM (group1).

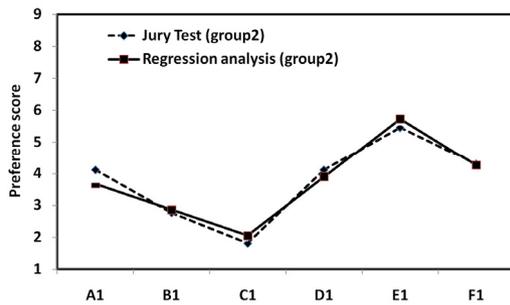


Fig. 14. Rank by PCM and rating by MEM (group2).

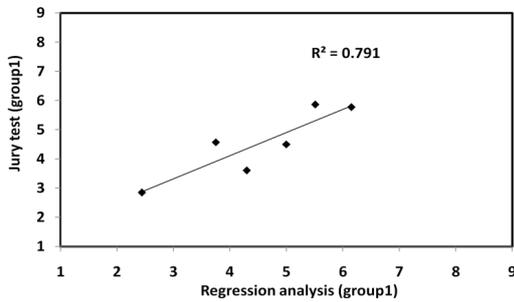


Fig. 15. Correlation between regression analysis and Jury test.

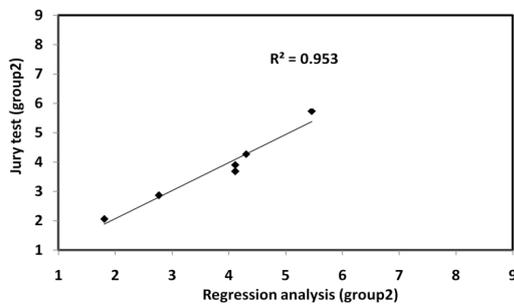


Fig. 16. Correlation between regression analysis and Jury test.

$$SQ_{group2} = -0.147 \times PN_{10Bark} + 8.606. \quad (5)$$

그룹 1의 경우, Eq. (4)에서 보듯이 엔진소음의 피크레벨과 유압시스템의 피크 값의 차이로 청음평가를 표현할 수 있음을 알 수 있다. 즉 유압시스템의 1차 피크 값이 커지면 청음평가 선호도 점수가 낮아진다. 따라서 유압시스템 소음이 클수록 불쾌감을 느끼는 성향을 가진 그룹임을 알 수 있다. 그룹 2의 경우, Eq. (5)에서 보듯이 10 Bark까지의 전체 라우드니스 값이 커지면 상당히 불쾌함을 느끼는 그룹임을 알 수 있다. 즉 중·저음역의 엔진소음, 팬 소음, 유압시스템 소음을 포함한 전체 라우드니스 크기가 커지는 경우 불쾌감을 느끼는 평가자 그룹임을 알 수 있다.

Figs. 13과 14는 청음평가와 회귀모형에 의한 예측 결과를 비교하였으며 회귀모형이 청음평가 결과를 잘 예측하고 있다. Figs. 15와 16에서 회귀분석과 청음평가는 높은 상관관계를 가짐을 알 수 있다.

### VIII. 결 론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) PCM과 MEM에 의한 청음평가를 함께 진행하면 PCM에 의한 전체 평가자의 선호도 순위를 이용하여 MEM에 의한 개별 평가자의 평가결과와의 상관성 분석을 통해 상관성이 낮은 MEM 평가자의 결과는 평가에 관심부족하거나 이해도가 낮은 평가자임을 알 수 있고 최종 청음평가 결과에서 제외할 수 있는 장점이 있음을 확인하였다.
- 2) 일관성이 낮은 청음평가 결과는 평균값을 사용하지 않고 군집분석을 통해 선호도 성향이 다른 두 그룹으로 분류한 후, 회귀분석을 통해 선정된 각 인자를 통해 각 그룹의 선호도 성향을 파악할 수 있었고 평가자의 성향을 반영한 음질 인덱스를 얻을 수 있었다.
- 3) 과부하 굴삭기 소음에 대해 심리음향학 음질인자만으로는 회귀분석 조건을 만족시키는 음질인자를 얻지 못하여 새로운 음질인자를 추출하여 독립변수로 투입하여 회귀분석이 가능한 음질인자를 추출할 수 있었다.

- 4) 청음평가와 회귀분석을 통해 과부하 굴삭기 소음의 불쾌감(낮은 선호도)을 표현하는 인자는 10 Bark까지 부분 라우드니스( $PN_{10Bark}$ )에 따라 불쾌감을 느끼는 그룹과 엔진소음의 크기와 유압시스템 소음의 차이( $dB_{EG} - dB_I$ )에 따라 불쾌감을 느끼는 성향의 평가자로 구분됨을 확인하였다.

## References

1. N. Otto, S. Amman, C. Eaton, and S. Lake, "Guidelines for jury evaluations of automotive sounds," J. Sound and Vibration, **35**, 24-47 (2001).
2. S. H. Shin and T. Hashimoto, "Sound quality improvement of car interior noise through the change of order spectrum" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **32**, 329-334 (2013).
3. T. C. Brown and G. L. Peterson, "An enquiry into the method of paired comparison: reliability, scaling, and thurstone's law of comparative Judgment," U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Gen Tech. Rep., 2009.
4. J. Wixted and H. Pashler, *Stevens' Handbook of Experimental Psychology, Third edition, Volume 4 : Methodology in Experimental Psychology* (John Wiley & Sons Inc., New York, 1998), pp. 166.
5. S. H. Shin, *Sound quality evaluation of non-stationary noise and its application to vehicle booming noise*, (Ph. D. thesis, KAIST, 2004).
6. E. Zwicker and H. Fastle, *Psychoacoustic Facts and Models* (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1990), pp. 203-261.

## 저자 약력

### ▶ 심 상 덕 (Sangdeok Sim)



1993년 2월: 경남대 기계공학과 공학사  
2005년 2월: 충남대 기계공학과 공학석사  
2010년 3월 ~ 현재: 충남대 기계공학과 박사과정

### ▶ 송 오 섭 (Ohseop Song)



1978년 2월: 서울대 기계설계학과 공학사  
1986년 2월: 뉴저지공대 공학석사  
1990년 2월: 버지니아 공대 공학박사  
1994년 3월 ~ 현재: 충남대학교 기계공학  
과 교수