

표준중량충격원을 이용한 건축물의 바닥 충격음 차단성능 측정불확도 평가

Evaluation of uncertainty in measurement of floor impact sound insulation of buildings using standard heavy impact source

이용봉,¹ 권혁제,² 김창환,² 조만희,² 김항,³ 정성수^{4†}

(Yong-Bong Lee,¹ Hyok-Je Kwon,² Chang-Whan Kim,² Man-Hee Cho,² Hang Kim,³ and SungSoo Jung^{4†})

¹이프로, ²(주)삼우에이엔씨, ³한국조선해양기자재연구원, ⁴한국표준과학연구원

(Received February 8, 2023; accepted March 7, 2023)

초 록: 본 논문은 표준 중량충격원을 이용한 건축물의 바닥충격음 차단성능을 측정하는 경우 측정불확도를 평가하는 방법을 다루었다. 반복 측정의 영향 이외에도 측정 위치의 영향, 가진 위치의 영향, 음압측정에 사용된 장비의 영향 및 충격원의 영향 등을 고려하였다. 평균 최대 바닥충격음 레벨 측정의 수학적 모델을 제시하고 요인별 불확도 평가 방법을 제안하였으며, 제안한 방법을 실제 측정 결과에 적용하여 평균 최대 바닥충격음 레벨 및 측정불확도를 평가하였다.

핵심용어: 중량충격원, 바닥충격음, 평균 최대 바닥충격음 레벨, 측정불확도, 에너지 평균

ABSTRACT: In this paper, a method for evaluating the measurement uncertainty is proposed when measuring of floor impact sound insulation of buildings using standard heavy impact source. In addition to the effect of repeated measurements, several other factors such as measurement location, impact location, equipment used for sound pressure measurement, and heavy impact source, were considered. A mathematical model for the average maximum impact sound level and the uncertainty evaluation method for each factor were proposed. The present proposed method was applied to measurement results to evaluate the average maximum impact sound pressure level and the measurement uncertainty.

Keywords: Heavy impact source, Impact sound insulation of floor, Average maximum impact sound pressure level, Measurement uncertainty, Energy average

PACS numbers: 43.55.Mc, 43.55.Br

1. 서 론

바닥충격음에 의한 층간소음관련 민원은 아직도 가장 민감한 사안으로 2022년 8월 4일부터는 공동주택 완공 후 현장에서 바닥의 성능을 평가하는 사후 확인제도가 시행 중에 있다. 특히 중량충격원에 의한 충격음이 주요 관심의 대상으로 그동안 KS F 2810-2^[1]에 기초하여 측정하였으며 이들 결과를 기

반으로 공동주택의 바닥충격음 차단 성능 단일지수 평가^[2] 및 바닥충격음 차단구조 성능 인정 등급 판정을 위한 기초 자료로 사용되었다.

최근에는 국제표준과의 연계성 및 좀 더 실생활의 중량충격음과 유사한 고무공 충격원을 사용한 측정 방법인 KS F ISO 16283-2^[3]가 적용되고 있다. 건설 업계에서는 사후확인제도 시행에 따라 좋은 등급을 확보하기 위한 기술개발에 힘쓰고 있으며, 바닥충격음

†Corresponding author: SungSoo Jung (jss@kriss.re.kr)

Acoustics, Ultrasound, Vibration Metrology Group, Korea Research Institute of Standards and Science, 267 Gajeong-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon 34113, Republic of Korea

(Tel: 82-42-868-5307, Fax: 82-42-868-5643)



Copyright©2023 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

평가를 수행하는 전문기관 역시 정밀 측정을 위한 노력을 하고 있다. 특히 측정기관들 간의 측정결과에 대한 신뢰성 확보를 위해서는 측정에 따른 불확도 평가는 필수적이라고 할 수 있다.

불확도 모델에 대한 개념은 Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement(GUM)^[4]에 잘 설명되어 있으나 실제 각각의 경우에 적용하는 것은 쉽지 않기 때문에 아직도 불확도 모델이 없는 경우도 있다. 따라서 기존에는 ISO와 같은 국제표준에서도 불확도 모델을 정립하기 이전에는 오차라는 표현으로 반복성과 재현성 이들 2가지 요인들에 대해 포괄적 개념으로 다루었지만 지금은 GUM의 지침에 의한 정확한 불확도 모델이 개발되고 있다.

Go와 Lee^[5]는 비록 완전하지는 않지만 측정 장비에 초점을 두고 GUM에 기본적인 중량바닥충격음에 대한 불확도 모델을 제안한 것은 의미가 있다. Yoo *et al.*^[6]은 좀 더 개선된 불확도 모델을 제시하였는데 음원실의 가진 위치별 산술평균에 따른 불확도를 가진 위치마다 구한 최대음압레벨을 반복 측정한 불확도로 해석하였다. 하지만 이 모델은 수음실이 실제 상황처럼 비확산음장인 경우에는 수정이 필요하다.

현재 국토교통부의 공동주택 바닥충격음 차단성능 사후 확인제도의 일환으로 중량바닥충격음의 경우는 KSF ISO 16283-2를 적용하고 있다. 하지만 측정에 따른 불확도 모델이 제시되어 있지 않아 혼란이 예상된다. 이에 본 연구에서는 KSF ISO 16283-2 적용시 측정 불확도 모델을 제시하고자 한다. 수음실의 충격음 측정 위치의 영향, 음원실의 충격 가진 위치의 영향, 충격원 영향, 장비 분해능 영향 등의 불확도 요인들을 고려하였다.

II. 수학적 모델

Fig. 1과 같이 공동주택에서 층간 소음을 측정하는 경우, 음원실에서 복수의 위치(1, 2, ..., j , ..., m)에서 중량 충격원으로 가진하고, 수음실의 여러 위치(1, 2, ..., i , ..., n)에서 최대 바닥 충격음 레벨을 반복 측정(1, 2, ..., a , ..., r) 하게 된다. 현재 대부분의 경우는 중앙 지점을 포함하여 음원실과 수음실의 5개 지점에서 조합에 대해 반복측정을 수행하고 있다.

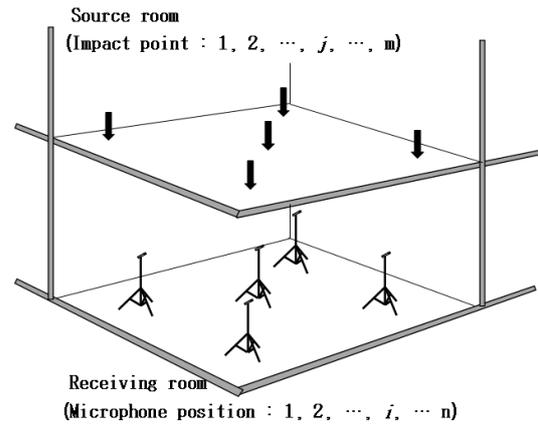


Fig. 1. Field measurement diagram of floor impact insulation in buildings.

KSF ISO 16283-2에 의한 각 측정 주파수 대역에서 가진점마다 모든 측정점에서 반복 측정된 최대 음압레벨의 에너지 평균값인 평균 최대 바닥충격음 레벨($L_{i,Fmax}$)의 수학적 모델은 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{i,Fmax} = 10 \log \left\{ \frac{1}{p} \sum_{l=1}^p 10^{\frac{L_{i,Fmax,l}}{10}} \right\}, \quad (1)$$

여기서 p 는 가진점의 위치(m), 수음점의 위치(n) 및 반복측정회수(r)를 포함하는 인자이며, l 은 가진점의 i , 수음점의 j , 반복측정의 o 를 포함하는 인자이다.

반복 측정의 영향, 장비 교정의 영향, 장비 측정 분해능 영향 및 충격원 영향을 고려하고 배경소음이 포함된 음압 레벨은 Eq. (2)로 나타낼 수 있으며, 충격원 가진에 의하여 발생하는 충격력을 입력으로 하고 이로 인하여 발생하는 바닥 충격음 레벨을 출력으로 하는 시스템이 선형적이라고 가정한다.

$$L_{sbl} = L_{sbM,l} + \delta L_{sbc} + \delta L_{sbr} + \delta L_p, \quad (2)$$

여기서,

- $L_{sbM,l}$: 배경 소음이 포함된 음압레벨 반복측정량
- δL_{sbc} : 배경 소음이 포함된 음압레벨 측정 장비 교정 결과 보정량
- δL_{sbr} : 배경 소음이 포함된 음압레벨 측정 장비 분해능 보정량

δL_F : 충격원 특성 보정량

배경 소음레벨은 Eq. (3)으로 표현할 수 있다.

$$L_{b,l} = L_{bM,l} + \delta L_{bC} + \delta L_{bR}, \quad (3)$$

여기서,

$L_{bM,l}$ 배경 소음 레벨 반복측정량

δL_{bC} 배경 소음 레벨 측정 장비 교정 보정량

δL_{bR} 배경 소음 레벨 측정 장비 분해능 보정량

그러면 배경소음 레벨을 보정한 소음레벨은 Eq. (4)로 표현된다.

$$L_{i,Fmax,l} = 10 \log \left(10^{\frac{L_{sb,l}}{10}} - 10^{\frac{L_{b,l}}{10}} \right). \quad (4)$$

Eq. (4)는 다시 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$10^{\frac{L_{i,Fmax,l}}{10}} = 10^{\frac{L_{sb,l}}{10}} - 10^{\frac{L_{b,l}}{10}}. \quad (5)$$

Eq. (5)를 Eq. (1)에 대입하면 Eq. (6)을 얻는다.

$$L_{i,Fmax} = 10 \log \left\{ \frac{1}{p} \sum_{l=1}^p \left(10^{\frac{L_{sb,l}}{10}} - 10^{\frac{L_{b,l}}{10}} \right) \right\}. \quad (6)$$

Eqs. (2)와(3)을 Eq. (6)에 대입하여 정리하면 Eq. (7)로 표현된다.

$$L_{i,Fmax} = 10 \log \left\{ \frac{1}{p} \sum_{l=1}^p \left(10^{\frac{L_{sbM,l}}{10}} - 10^{\frac{L_{bM,l}}{10}} \right) \right\} + \delta L_{sbC} + \delta L_{sbR} + \delta L_F - \delta L_{bC} - \delta L_{bR} \quad (7)$$

Eq. (7)의 첫 번째 항을 Eq. (8)처럼 치환하면 Eq. (8)은 최대 바닥충격음 레벨 반복 측정값을 에너지 평균한 값을 나타내는 평균 최대 바닥충격음 레벨이다.

$$L_{i,FmaxM} \equiv 10 \log \left\{ \frac{1}{p} \sum_{l=1}^p \left(10^{\frac{L_{sbM,l}}{10}} - 10^{\frac{L_{bM,l}}{10}} \right) \right\}. \quad (8)$$

Eq. (8)을 Eq. (7)에 대입하면 Eq. (9)를 얻을 수 있으며 이 식을 평균 최대 바닥충격음 레벨 측정의 수학적 모델로 사용한다.

$$L_{i,Fmax} = L_{i,FmaxM} + \delta L_{sbC} + \delta L_{sbR} + \delta L_F - \delta L_{bC} - \delta L_{bR}. \quad (9)$$

Eq. (8)에서 소괄호 내의 값을 다음과 같이 치환한다.

$$10^{\frac{L_{i,FmaxM,l}}{10}} \equiv 10^{\frac{L_{sbM,l}}{10}} - 10^{\frac{L_{bM,l}}{10}}. \quad (10)$$

Eq. (10)을 Eq. (8)에 대입하면 최종적으로 평균 최대 바닥충격음 레벨을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{i,FmaxM} \equiv 10 \log \left(\frac{1}{p} \sum_{l=1}^p 10^{\frac{L_{i,FmaxM,l}}{10}} \right). \quad (11)$$

III. 요인별 불확도 평가 방법

3.1 평균 최대 바닥충격음 레벨, $u(L_{i,FmaxM})$

Eq. (11)로부터 최대 바닥충격음 레벨을 반복측정하고 표준편차를 구하여 반복 측정 불확도로 사용한다. 감도계수는 다음과 같다.

$$c_{L_{i,FmaxM,l}} \equiv \frac{\partial L_{i,FmaxM}}{\partial L_{i,FmaxM,l}} = \frac{10^{\frac{L_{i,FmaxM,l}}{10}}}{\sum_{l=1}^p 10^{\frac{L_{i,FmaxM,l}}{10}}}. \quad (12)$$

$L_{i,FmaxM,1}, L_{i,FmaxM,2}, \dots, L_{i,FmaxM,p}$ 는 서로 상관관계가 없으므로, Eq. (11)에 불확도 전파법칙을 적용하고 분산을 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u^2(L_{i,FmaxM}) = \sigma^2(L_{i,FmaxM}) = \sum_{l=1}^p c_{L_{i,FmaxM,l}}^2 \sigma^2(L_{i,FmaxM,l}). \quad (13)$$

$L_{i,FmaxM,1}, L_{i,FmaxM,2}, \dots, L_{i,FmaxM,p}$ 가 모평균과 모분산이 동일한 모집단으로부터의 확률표본이라고

가정하면 Eq. (12)의 모분산을 다음과 같이 표본 분산으로부터 근사할 수 있다.

$$\sigma^2(L_{i,\text{FmaxM},l}) \approx \frac{\sum_{l=1}^p (L_{i,\text{FmaxM}} - L_{i,\text{FmaxM},l})^2}{p-1}. \quad (14)$$

Eq. (14)를 Eq. (13)에 대입하면 다음과 같다.

$$u^2(L_{i,\text{FmaxM}}) \approx \sum_{l=1}^p c_{L_{i,\text{FmaxM},l}}^2 \times \frac{\sum_{l=1}^p (L_{i,\text{FmaxM}} - L_{i,\text{FmaxM},l})^2}{p-1}. \quad (15)$$

Eq. (12)를 Eq. (15)에 대입하면 다음과 같다.

$$u^2(L_{i,\text{FmaxM}}) = \frac{\sum_{l=1}^p \left(10^{\frac{L_{i,\text{FmaxM},l}}{10}}\right)^2}{\left(\sum_{l=1}^p 10^{\frac{L_{i,\text{FmaxM},l}}{10}}\right)^2} \times \frac{\sum_{l=1}^p (L_{i,\text{FmaxM}} - L_{i,\text{FmaxM},l})^2}{p-1}. \quad (16)$$

Eq. (16)은 음원실 충격원 가진 위치에 따른 불확도, 수음실 측정 위치에 따른 불확도 그리고 반복 측정에 의한 불확도 평가에 사용할 수 있다.

3.2 음압레벨 측정 장비 교정, $u(\delta L_{\text{sbc}})$, $u(\delta L_{\text{bc}})$

장비의 교정성적서로부터 보정값과 측정불확도 정보를 활용한다. 보정값은 배경소음이 포함된 음압레벨 및 배경소음 레벨 측정데이터에 반영해 주도록 한다. 교정성적서에 주어진 측정불확도를 표준불확도로 환산하여 적용한다.

3.3 음압레벨 측정 장비 분해능, $u(\delta L_{\text{sbr}})$, $u(\delta L_{\text{br}})$

측정시 설정한 장비의 분해능 정보로부터 직사각형 분포를 적용하고, 표준불확도를 산출한다.

3.4 충격원 영향, $u(\delta L_{\text{F}})$

충격원 교정성적서로부터 보정값과 측정불확도가 주어진 경우 그 값들을 사용하면 된다. 하지만 불확도가 주어지지 않는 경우는 충격원에 대한 허용된 편차를 활용하여 표준불확도를 결정할 수 있다. 본 논문에서는 후자에 따라 평가하였다.

IV. $L_{i,\text{Fmax}}$ 의 측정불확도 결정 방법

4.1 합성표준불확도 평가식, $u_c(L_{i,\text{Fmax}})$

평균 최대 바닥충격음 레벨의 수학적 모델식 Eq. (9)에 불확도 전파법칙을 적용한다. Eq. (9) 우변 각항들 사이에 상관관계가 없으므로 합성표준불확도는 다음과 같이 표현된다.

$$u_c^2(L_{i,\text{Fmax}}) = c_{L_{i,\text{FmaxM}}}^2 u^2(L_{i,\text{FmaxM}}) + c_{\delta L_{\text{sbc}}}^2 u^2(\delta L_{\text{sbc}}) + c_{\delta L_{\text{sbr}}}^2 u^2(\delta L_{\text{sbr}}) + c_{\delta L_{\text{F}}}^2 u^2(\delta L_{\text{F}}) + c_{\delta L_{\text{bc}}}^2 u^2(\delta L_{\text{bc}}) + c_{\delta L_{\text{br}}}^2 u^2(\delta L_{\text{br}}). \quad (17)$$

Eq. (17) 우변의 계수들은 Eq. (9)의 각항을 편미분하여 결정하며 감도계수라 부른다.

$$c_{L_{i,\text{FmaxM}}} = c_{\delta L_{\text{sbc}}} = c_{\delta L_{\text{sbr}}} = c_{\delta L_{\text{bc}}} = c_{\delta L_{\text{F}}} = 1. \quad (18)$$

$$c_{\delta L_{\text{bc}}} = c_{\delta L_{\text{br}}} = -1. \quad (19)$$

Eq. (17) 우변 각항을 구성하는 감도계수와 표준불확도의 곱을 기여량으로 정의하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_X(L_{i,\text{Fmax}}) = c_X \times u(X). \quad (20)$$

Eq. (20)을 Eq. (17)에 대입하면 합성표준불확도를 기여량의 함수로 표현할 수도 있다.

Eqs. (18)과 (19)를 Eq. (17)에 대입하면 다음과 같다.

$$u_c^2(L_{i,\text{Fmax}}) = u^2(L_{i,\text{FmaxM}}) + u^2(\delta L_{\text{sbc}}) + u^2(\delta L_{\text{sbr}}) + u^2(\delta L_{\text{F}}) + u^2(\delta L_{\text{bc}}) + u^2(\delta L_{\text{br}}). \quad (21)$$

Eq. (21)의 양변에 제곱근을 취하여 합성표준불확도를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_c(L_{i,Fmax}) = \frac{\sqrt{u^2(L_{i,FmaxM}) + u^2(\delta L_{stC}) + u^2(\delta L_{stR}) + u^2(\delta L_F) + u^2(\delta L_{tC}) + u^2(\delta L_{tR})}}{\quad} \quad (22)$$

4.2 유효자유도의 결정, ν_{eff}

요인별 표준불확도, 요인별 자유도 그리고 합성표준불확도를 다음 식에 대입하여 유효자유도를 결정한다.

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(L_{i,Fmax})}{\sum_{i=1}^6 \frac{u_i^4}{\nu_i}} \quad (23)$$

4.3 포함인자의 결정, k

측정불확도를 구하기 위하여 합성표준불확도에 곱하는 수치로 확률분포와 유효자유도로부터 결정한다.

4.4 측정불확도의 결정, U

합성표준불확도에 포함인자를 곱하여 결정한다.

V. 바닥 충격음레벨 평가에

다음은 현장에서 고무공 충격원으로 가진하고 수음실에서 측정된 중량바닥충격음 시험 중 주파수 200 Hz에서의 최대 바닥충격음 레벨($L_{i,Fmax}$)의 측정불확도를 평가한 예로 다른 주파수에 대해서도 같은 방법으로 적용하면 된다. 실측한 값은 주파수별로 최소 125개의 많은 자료이기 때문에 계산 과정마다 모두 제시하기 어려운 점을 고려하여 여기서는 최종 결과만을 가지고 설명하도록 한다.

5.1 평균 최대 바닥충격음 레벨($L_{i,FmaxM}$)

음원실 중앙을 포함하여 5개의 위치에서 중량 충격원을 사용하여 가진하였다. 음원실 각각의 가진 위치에서 가진을 실시할 때마다 수음실 중앙을 포함

하여 5개의 위치에서 최대음압레벨을 각각 5회 반복 측정하였다. 이러한 정보를 바탕으로 평균 최대 바닥충격음 레벨에 대한 추정값, 표준불확도, 확률분포, 감도계수, 기여량 및 유효자유도를 다음과 같이 결정한다.

1) 평균 최대 바닥충격음 레벨의 추정값으로 전체 측정값을 Eq. (11)에 대입하여 결정한 에너지 평균값을 사용한다.

$$L_{i,FmaxM} = 10 \log \left(\frac{1}{p} \sum_{l=1}^p 10^{\frac{L_{i,FmaxM,l}}{10}} \right) = 43.08 \text{ [dB]}$$

2) 평균 최대 바닥충격음 레벨의 표준불확도, $u(L_{i,FmaxM})$ 는 수음실 측정 위치별 측정 음압레벨, 음원실 가진 위치별 측정 음압레벨 그리고 반복측정 음압레벨을 Eq. (18) 또는 Eq. (19)에 대입하여 결정한다. 이때 수음실 측정 위치의 영향, 충격원 가진 위치의 영향 그리고 반복 측정 영향이 서로 독립적이라고 가정하였다.

(1) 수음실 측정 위치에 따른 불확도

Eq. (16)을 적용하여 평가한 결과는 다음과 같다.

$$u_{MP}(L_{i,FmaxM}) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(10^{\frac{L_{i,FmaxM,i}}{10}} \right)^2}}{\sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{i,FmaxM,i}}{10}}} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_{i,FmaxM} - L_{i,FmaxM,i})^2}{n-1}} = 0.79 \text{ [dB]}$$

(2) 충격원 가진 위치에 따른 불확도

Eq. (16)을 적용하여 평가한 결과는 다음과 같다.

$$u_{IP}(L_{i,FmaxM}) = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^m \left(10^{\frac{L_{i,FmaxM,j}}{10}} \right)^2}}{\sum_{j=1}^m 10^{\frac{L_{i,FmaxM,j}}{10}}} \times \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (L_{i,FmaxM} - L_{i,FmaxM,j})^2}{m-1}} = 0.66 \text{ [dB]}$$

(3) 반복 측정 불확도

Eq. (16)을 적용하여 평가한 결과는 다음과 같다.

$$u(L_{i,\text{FmaxM}}) = \frac{\sqrt{\sum_{o=1}^r \left(10^{\frac{L_{i,\text{FmaxM},o}}{10}}\right)^2}}{\sum_{o=1}^r 10^{\frac{L_{i,\text{FmaxM},o}}{10}}} \times \sqrt{\frac{\sum_{o=1}^r (L_{i,\text{FmaxM}} - L_{i,\text{FmaxM},o})^2}{r-1}} = 0.04 \text{ [dB]}$$

이상의 성분을 합성하여 평균 최대 바닥충격음 레벨의 표준불확도를 결정한다.

$$u(L_{i,\text{FmaxM}}) = \sqrt{0.79^2 + 0.66^2 + 0.04^2} = 1.03 \text{ [dB]}$$

3) 확률분포는 t -분포를 적용한다.

4) 감도계수는 Eq. (18)로부터 1을 적용한다.

5) Eq. (20)을 사용하여 기여량을 구하면 1.03 dB이 된다.

6) Eq. (23)을 사용하여 유효자유도는 구하면 다음과 같다.

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{1.03LSUP4}{\frac{0.79LSUP4}{4} + \frac{0.66LSUP4}{4} + \frac{0.04LSUP4}{4}} = 7.7$$

5.2 음압레벨 측정 장비 교정($\delta L_{\text{sbC}}, \delta L_{\text{bc}}$)

음압레벨 측정장치의 교정성적서에 주어진 값을 사용한다. 보정값은 시험데이터에 적용한다. 측정 불확도는 0.2 dB로 주어졌다. 이러한 정보를 바탕으로 평균 최대 바닥충격음 레벨에 대한 추정값, 표준 불확도, 확률분포, 감도계수, 기여량 및 유효자유도를 다음과 같이 결정한다.

1) 보정값의 추정값으로 각각 0을 적용한다.

2) 장비 교정에 따른 표준불확도 $u(\delta L_{\text{sbC}})$ 및 $u(\delta L_{\text{bc}})$

는 성적서에 주어진 측정불확도를 포함인자로 나누어 결정한다.

$$u(\delta L_{\text{sbC}}) = u(\delta L_{\text{bc}}) = \frac{0.2}{2} = 0.1 \text{ [dB]}$$

3) 확률분포는 각각 직사각형분포를 적용한다.

4) 감도계수는 Eqs. (18)과 (19)로부터 각각 다음값을 사용한다.

$$c_{\delta L_{\text{sbC}}} = 1, c_{\delta L_{\text{bc}}} = -1$$

5) Eq. (20)을 적용하여 기여량을 구하면 각각, 0.1 dB 및 -0.1 dB를 얻는다.

6) 성적서로부터 약 95 % 신뢰수준에서 포함인자 가 2로 주어졌으므로 자유도는 무한대가 된다.

5.3 음압레벨 측정 장비 분해능($\delta L_{\text{sbR}}, \delta L_{\text{bR}}$)

측정시 설정한 장비의 분해능은 0.1 dB이다. 이러한 정보를 바탕으로 평균 최대 바닥충격음 레벨에 대한 추정값, 표준불확도, 확률분포, 감도계수, 기여량 및 유효자유도를 다음과 같이 결정한다.

1) 분해능의 추정값은 각각 0이 된다.

2) 분해능의 표준불확도 $u(\delta L_{\text{sbR}})$ 및 $u(\delta L_{\text{bR}})$ $u(\delta L_{\text{sbC}})$ 는 주어진 분해능을 $2\sqrt{3}$ 으로 나누어 결정하면 각각 0.03 dB가 된다.

3) 확률분포는 직사각형분포를 적용한다.

4) 감도계수는 Eqs. (18)과 (19)로부터 다음값을 사용한다.

$$c_{\delta L_{\text{sbR}}} = 1, c_{\delta L_{\text{bR}}} = -1$$

5) Eq. (20)을 적용하여 기여량을 구하면 각각, 0.03 dB 및 -0.03 dB를 얻는다.

Table 1. Uncertainty budget at 200 Hz.

Uncertainty component	Estimation value [dB]	Standard uncertainty [dB]	Probability distribution	Sensitivity coefficient	Contributed amount [dB]	Degree of freedom
$L_{i,FmaxM}$	43.08	1.03	t	1	1.03	7.7
δL_{sbC}	0.00	0.10	Normal	1	0.10	∞
δL_{sbR}	0.00	0.03	Rectangular	1	0.03	∞
δL_F	0.00	1.04	Rectangular	1	1.04	∞
δL_{bC}	0.00	0.10	Normal	-1	-0.10	∞
δL_{bR}	0.00	0.03	Rectangular	-1	-0.03	∞
$L_{i,Fmax}$	43.08		t		1.47	32.0

6) 주어진 분해능이 직사각형 분포를 하므로 자유도로 무한대를 적용한다.

5.4 충격원 특성(δL_F)

충격원의 성적서로부터 충격력에 대한 조건과 확인한 결과 규격에서 제시하는 허용편차 이내로 만족됨을 확인하였다. 하지만 불확도가 명시되어 있지 않아 허용편차를 활용하여 표준불확도를 결정하도록 한다.

KS F ISO 16283-2의 부속서 표 A.1의 주파수별 허용편차 정보로부터 선형 보간 방법으로 200 Hz에서의 허용편차를 결정한다. 125 Hz일 때 허용편차가 ± 1.5 dB, 250 Hz일 때 ± 2 dB로 주어진다. 이 값들을 사용하여 선형 보간 방법으로 200 Hz에서의 허용편차를 구하면 1.8 dB를 얻을 수 있다.

1) 충격원 허용편차의 추정값은 0이 된다.

2) 충격원 허용편차의 표준불확도, $u(\delta L_F)$ 는 허용편차 1.8 dB를 $\sqrt{3}$ 으로 나누어 결정할 수 있고 1.04 dB를 얻는다.

3) 확률분포는 직사각형분포를 적용한다.

4) 감도계수는 Eq. (18)로부터 1을 사용한다.

5) Eq. (20)을 적용하여 기여량을 구하면 1.04 dB를 얻는다.

6) 주어진 분해능이 직사각형 분포를 하므로 자유도로 무한대를 적용한다.

5.5 합성표준불확도 평가, $u_c(L_{i,Fmax})$

위에서 구한 감도계수 및 표준불확도를 Eq. (20) 또는 Eq. (22)에 대입하면 합성표준불확도는 다음과 같다.

$$u_c(L_{i,Fmax}) = \sqrt{1.03^2 + 0.1^2 + 0.03^2 + 1.04^2 + (-0.1)^2 + (-0.03)^2} = 1.47 \text{ [dB]}$$

5.6 유효자유도의 결정, ν_{eff}

요인별 표준불확도, 요인별 자유도 그리고 합성표준불확도를 Eq. (23)에 대입하면 유효자유도는 다음과 같다.

$$\nu_{eff} = \frac{1.47^4}{\frac{1.03^4}{7.7} + \frac{0.1^4}{\infty} + \frac{0.03^4}{\infty} + \frac{1.04^4}{\infty} + \dots} = 32$$

5.7 포함인자의 결정, k

t -분포표로부터 95% 신뢰수준 및 자유도 32일 때의 t 값은 2.04이다.

5.8 측정불확도의 결정, U

합성표준불확도에 포함인자를 곱하면 측정불확도는 다음과 같다.

$$U = 1.47 \times 2.04 = 3.0 \text{ [dB]}$$

5.9 결과 보고

200 Hz에서 측정한 최대 바닥충격음 레벨은 (43.1 ± 3.0) dB이다.

불확도 총괄표는 Table 1과 같다.

VI. 결 론

최대 바닥충격음 레벨에 대한 측정불확도 평가를 위한 수학적 모델을 제시하였다. 수음실 측정위치의 영향, 음원실 가진위치의 영향, 장비 교정, 장비 분해능 및 충격원 특성 등의 요인에 대한 불확도 평가 방법을 제시하고 실제 측정한 결과를 사용하여 산출하였다. 예로서, 주파수 200 Hz에서 최대 바닥충격음 레벨에 대한 측정불확도를 평가한 결과 전체 측정불확도 중에서 수음실 측정 위치에 의한 불확도 29.2%, 음원실 가진 위치에 의한 불확도 19.9%, 반복측정에 의한 불확도 0.07%, 충격원 특성에 의한 불확도 49.9% 그리고 장비의 교정에 기인하는 불확도가 1% 정도로 평가되었다. 가장 기여량이 큰 충격원에 대한 불확도는 교정기관에서 정밀 측정을 통해 불확도 제시하면 상당부분 줄어들 것으로 기대된다. 반복측정에 의한 불확도는 다른 인자들에 비해 미미한 수준이었다. 하지만 수음위치별 특성과 가진위치별 특성에 의한 불확도는 크게 기여하기 때문에 저감할 수 있는 방법을 모색해야만 할 것으로 사료된다.

측정에 있어 불확도는 단순히 부수적으로 결정되는 양이 아니라 실제 규제와 같은 제도적인 정책에 있어서는 절대적을 고려해야 되는 양이기 때문에 중요하다. 이러한 점에서 본 연구는 중량바닥충격음 측정방법을 적용함에 있어 기본적인 모델로 그리고 차후 KS F ISO 16283-2의 개정 시 크게 기여할 것으로 기대된다.

References

1. KS F 2810-2:2012, *Field Measurements of Floor Impact Sound Insulation of Buildings-Part 2: Method Using Standard Heavy Impact Sources*, 2012.
2. KS F 2863-2:2017, *Rating of Floor Impact Sound Insulation for Impact Source in Buildings and of Building Elements - Part 2: Floor Impact Sound Insulation Against Standard Heavy Impact Source*, 2017.
3. KS F ISO 16283-2:2015, *Acoustics-Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 2: Impact sound insulation*, 2015.
4. ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM:1995)*, 2008.

5. J. C. Go and J. I. Lee, "A study on estimation of uncertainty in measurement of heavy impact sound insulation of floors," *Proc. AIK Annual Conf.* 729-732 (2006).
6. S. Y. Yoo, Y. H. Kim, M. H. Sim, and J. Y. Jeon, "Measurement uncertainty in heavy-weight floor impact sounds," *Proc. KSNVE Annual Spring Conf.* 816-819 (2008).
7. EA-4/02 M:2022, *Evaluation of Uncertainty of Measurement in Calibration*, 2022.

저자 약력

▶ 이 용 봉 (Yong-Bong Lee)



1982년 2월 : 인하대학교 기계공학과 학사
 1987년 2월 : KAIST 기계공학과 석사
 2008년 2월 : KAIST 기계공학과 박사
 1987년 3월 : 한국중합기계(주) 부설연구소
 1990년 3월 : 한국표준과학연구원
 2021년 2월 ~ 현재 : (주)삼우에이엔씨
 2021년 4월 ~ 현재 : 이프로 대표

▶ 권 혁 제 (Hyuk-Je Kwon)



2003년 3월 : 청주대학교 환경공학과 학사
 2009년 2월 : 인하대학교 기계공학과 석사
 2008년 12월 : 국립환경과학원 소음진동실
 2012년 6월 : NVH코리아 연구소
 2014년 12월 : 차트코코리아 연구소
 2017년 2월 : 두원공조 연구소
 2021년 1월 : 한국방진방음 기술연구실
 2022년 5월 ~ 현재 : (주)삼우에이엔씨 과장

▶ 김 창 환 (Chang-Wan Kim)



1986년 2월 : 서울대학교 농공학과
 1989년 2월 : KAIST 토목공학과 석사
 2007년 2월 : 충북대 구조시스템공학과 박사
 1989년 ~ 2018년 : (주)대우건설
 2019년 4월 ~ 현재 : (주)삼우에이엔씨 연구 소장

▶ 조 만 희 (Man-Hee Cho)



1995년 2월 : 연세대학교 환경공학과
 2009년 2월 : 시립대학교 환경공학과
 2023년 현재 : (주)삼우에이엔씨 대표이사

▶ 김 항 (Hang Kim)



2003년 2월: 조선대학교 건축공학과 학사
2005년 2월: 전남대학교 건축공학과 석사
2014년 8월: 전남대학교 건축공학과 박사
2007년 10월 ~ 현재: 한국조선해양기자재연구원 센터장

▶ 정 성 수 (SungSoo Jung)



1985년 2월: 한국외국어대학교 물리학과 학사
1987년 2월: 한국외국어대학교 물리학과 석사
1995년 2월: 한국외국어대학교 물리학과 박사
1996년 10월 ~ 현재: 한국표준과학연구원 책임연구원