

# 하부틈새 크기에 따른 도어의 음향감쇠계수 분석

## Sound Reduction Index of Interior Door by Aperture Sizes at Door's Bottom

김 명 준\*

Myung-Jun Kim

(2010년 7월 29일 접수 ; 2010년 8월 23일 심사완료)

**Key Words** : Sound Reduction Index(음향감쇠계수), Door(도어), Aperture(틈새), Sound Insulation(차음), Transmission Coefficient(투과율)

### ABSTRACT

The Sound reduction indices(SRIs) of interior door with 13 different size apertures are measured in acoustic chamber. Also, as a theoretical approach, the SRIs are estimated using Gomperts' theory. In this study, the aperture of interior door is focused on the lower part of door leaf which is well known as a main cause to deteriorate the sound insulation performance of door. The results show that the SRI of door strongly depends on the aperture width and the dip in the measured sound reduction index curve by the resonance effect within aperture is observed at high-frequency. On the whole, the values calculated by theory are in good agreement with the measured values including the position of resonance dip. The average difference between the measured and the calculated values is 0.9 dB for 13 doors with different size aperture in terms of the weighted SRI.

### 1. 서 론

도어는 기능적으로 출입을 위해 개폐가 요구되어 지는 건축부재로서, 이로 인해 그 주변에 틈새나 작은 개구를 갖게 되는 경우가 많아 차음성능 측면에서 매우 취약한 부위로 인식되고 있다. 특히 최근 주거용 건물에서 거실과 침실사이에 설치되는 침실도어는 일체화된 바닥마감재의 적용, 노약자 및 장애자를 배려한 배리어프리(barrier-free) 설계 등으로 하부 문틀이 없는 도어가 주류를 이루게 되었다. 따라서 바닥마감재와 도어 하부 사이는 필연적으로 직방형 틈새(rectangular aperture or slit-shaped aperture)가 형성되어 실간 차음성능을 크게 저해시키는 요인이

되고 있다.

주거용 건물의 38개 침실 도어를 대상으로 조사한 연구결과<sup>(1)</sup>에 따르면, 도어의 하부틈새 폭은 평균 6.4 mm였으며, 최소폭은 3.2 mm, 최고폭은 12.8 mm로 도어를 설치하는 작업자의 시공정도(施工精度)에 따라 틈새 폭은 매우 큰 차이를 보이는 것으로 파악되었다. 합리적인 도어 설계를 유도하고 최소한의 실간 차음성능을 확보하기 위해서는 틈새를 통한 음향투과 특성의 규명과 하부틈새 폭에 대한 설계 및 설치 기준의 마련이 무엇보다 필요하다고 판단된다.

이 연구는 이를 위한 기초연구의 하나로써 하부 틈새 조건에 따른 세대내 도어의 차음성능 특성을 평가·분석하는데 목적을 두고 수행되었다. 실제 도어에서 예상되는 총 13개의 틈새 폭 및 깊이 조건을 설정하고, 음향실험실에서 각 조건별 음향감쇠계수(sound reduction index)를 측정·고찰하였다. 아

\* 교신저자; 정희원, 서울시립대학교 건축학부  
E-mail : mjunkim@uos.ac.kr  
Tel : (02)2210-5639, Fax : (02)2248-0382

올려 좁은 틈새를 갖는 부재의 음향투과 해석모델을 토대로 각 13개 조건별 음향감쇠계수를 파악하였다. 해석결과는 실제 측정결과와 비교하였으며, 틈새를 갖는 도어 등 건물부재의 차음성능 예측에의 적용성을 제시하였다.

## 2. 틈새를 통한 음향투과 이론 및 실험개요

### 2.1 틈새를 통한 음향투과

틈새의 폭이 음파의 파장 보다 매우 작은 경우, 틈새를 통한 음향투과손실은 전달과정에서 주파수에 의존하여 복잡한 양상을 나타낸다. 틈새를 통한 음향투과 해석모델은 Gomperts<sup>(2)</sup>, Wilson과 Soroka<sup>(3)</sup>, Sauter와 Soroka<sup>(4)</sup>, Mechel<sup>(5)</sup> 등에 의해 다루어졌으며, 음파는 대부분 원형(circular aperture) 혹은 직방형 틈새(slit-shaped aperture) 내부를 평면파 형태로 투과하는 것으로 가정하였다. 이 연구에서는 식 (1)과 같이 Gomperts<sup>(2)</sup>에 의해 제안되었고 Gomperts와 Kihlman<sup>(6)</sup>에 의해 보다 단순화 되어진 직방형 틈새를 통한 음향투과율( $\tau_{slit}$ ) 이론식을 이용하였다.

여기서,  $K=kw$ 로서  $k$ 는 파수(wavenumber),  $w$ 는 틈새의 폭을 나타낸다.  $L=d/w$ 로서 틈새의 깊이( $d$ )와 폭( $w$ )의 비율을 의미한다.  $m$ 과  $n$ 은 각각 입사음장의 종류와 틈새 위치에 따라 결정되는 계수이다. 확산음장일 경우  $m=8$ , 수직입사의 경우  $m=4$ 가 적용되며, 틈새가 음이 통과하는 부재 중간에 있을 경우  $n=1$ , 틈새가 모서리(edge)에 있는 경우  $n=1/2$ 이 사용된다.  $e$ 는 개구단 보정(end correction)을 나타내며, 식 (2)와 같이 표현된다.

$$e = \frac{1}{\pi} \left( \ln \frac{8}{K} - 0.57722 \right) \quad (2)$$

틈새를 포함한 부재 전체의 음향감쇠계수( $R_{tot}$ )는 부재와 틈새 각각의 투과손실과 투과면적을 토대로 식 (3)에 의해 산정할 수 있다.

$$R_{tot} = 10 \log \left( \frac{S_{stru} + S_{slit}}{S_{stru} \cdot \tau_{stru} + S_{slit} \cdot \tau_{slit}} \right) \quad (3)$$

여기서,  $\tau_{stru}$ 는 부재의 음향투과율,  $S_{stru}$ 와  $S_{slit}$ 은 각각 부재와 틈새를 통한 투과면적을 나타낸다.

Gomperts의 해석모델은 Hongisto<sup>(7)</sup>, Kang<sup>(8)</sup>, Kim<sup>(9)</sup> 등에 의해 각각 틈새를 갖는 도어, 선실 간막이벽체, 경량콘크리트패널 부재를 대상으로 적용성이 검토되었다. Kang<sup>(8)</sup> 등은 해석치와 실측치의 차이는 대체로 3 dB 정도인 것으로 제시하였으며, Kim<sup>(9)</sup> 등은 각기 다른 크기의 18개 틈새를 대상으로 분석한 가중음향감쇠계수 해석치와 실측치의 차이는 최고 2 dB(평균오차 0.7 dB) 이내에서 일치하는 것으로 제시하였다. 실측치와의 비교검증은 이루어지지 않았으나, Han<sup>(10)</sup> 등은 에어컨 실외기 소음 저감방안 검토시 틈새를 갖는 실외기 캐비닛의 음향투과손실 계산에 식 (1)을 활용하였다.

### 2.2 실험개요

틈새조건에 따른 음향감쇠계수 측정을 위해 실제 공동주택에 공급되고 있는 대표적인 침실 도어를 기본 부재로 사용하였다. 도어는 875 mm(폭)×2,215 mm(높이)×35 mm(두께)로 제작되었으며, 두께 26 mm의 목재 심재(설치간격: 337 mm×204 mm) 양면에 각기 두께 4.5 mm 중밀도섬유판(medium density fiber-board, 이하 MDF)으로 구성되었다. 도어는 경기도 용인에 위치하고 있는 H건설 기술연구소 내 두 잔향실 사이에 문틀 및 채움벽과 함께 설치하였으며, 실험조건에 맞는 틈새를 제작할 수 있도록 도어 하부에는 폭 20 mm의 기본틈새를 두었다. 문틀은 여러 장의 MDF를 접합하여 폭 45 mm, 깊이 210 mm로 제작되었으며, 도어 하부를 제외한 도어 상부 및 도어 좌·우측부에 설치하였다. 채움벽은 총 두께 200 mm로서 1B 벽돌쌓기 양면에 시멘트 미장으로 이루어졌다. 문틀과 채움벽 각각의 음향투과손실 평가를 위한 실험은 별도로 이루어지지 않았으나, 차음이론(질량법칙) 등에 기초하여 음향투과손실 정도를 감안할 때 문틀 및 채움벽을 통한 투과음에너지는 틈새 및 도어를 통한 투과음에너지에 비해 극히 작아 전체 음향투과손실에 미치는 영향은 미미할 것으로 판단된다.

$$\tau_{slit} = \frac{mK \cos^2(K\bar{e})}{2n^2 \left( \frac{[\sin^2 K(L+2e)]}{\cos^2(K\bar{e})} + \frac{K^2}{2n^2} [1 + \cos K(L+2e) \cos KL] \right)} \quad (1)$$

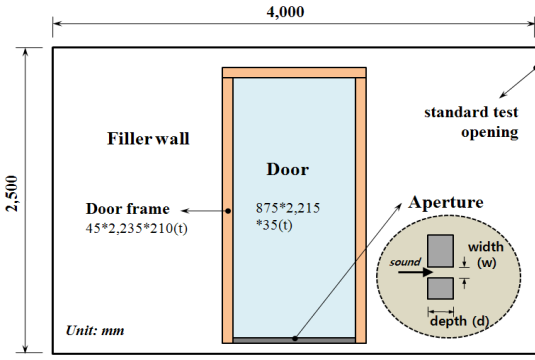


Fig. 1 Elevation of the test opening between reverberation chambers

Table 1 Aperture conditions for measurement

Width(w)	Depth(d)	Width(w)	Depth(d)
2 mm	35 mm	4 mm	50 mm
4 mm	35 mm	4 mm	70 mm
6 mm	35 mm	10 mm	50 mm
8 mm	35 mm	10 mm	70 mm
10 mm	35 mm	15 mm	50 mm
15 mm	35 mm	15 mm	70 mm
17 mm	35 mm	-	-

도어, 틈새, 문틀, 채움벽 등 각 부재의 설치 입면도는 Fig.1과 같다.

틈새 조건은 Table 1에서와 같이 총 13가지를 설정하였다. 틈새 폭(width)은 선행연구<sup>(1)</sup>에서 조사된 결과를 토대로 실제 침실도어에서 예상되는 2~17 mm까지의 7가지를, 틈새 깊이(depth)는 기본 도어 두께 35 mm 이외에 50 mm, 70 mm를 추가하였고 틈새 깊이의 영향을 검토하기 위해 6가지 조건을 설정하였다.

Table 1의 각 틈새조건은 도어하부에 설치한 폭 20 mm 기본틈새에 여러 장의 고밀도 아크릴판(두께 2~5 mm, 폭 50~70 mm, 길이 875 mm)을 접합하여 해당 틈새가 만들어질 수 있도록 제작하였다. 틈새 제작시 버니어캘리퍼스(vernier calipers), 필러게이지(feeler gauge)를 이용하여 틈새조건이 정밀하게 제작될 수 있도록 계속·확인하였다. 도어 하부 틈새를 제외하고, 도어와 문틀이 만나는 주변부는 이를 통한 누음(漏音)의 영향이 없도록 음원 및 수음측 양면에서 각각 두 겹으로 테이핑 처리하였다. 실험대상 틈새조건별 음향감쇠계수는 기본적으로 한국산업 규격 KS F 2808<sup>(11)</sup>에 의거하여 측정되었다.

Fig. 2는 실험부재 및 틈새가 설치된 잔향실 모습과 틈새 조건을 확인하기 위해 버니어캘리퍼스로 측정하는 장면을 나타낸다.



Fig. 2 Reverberation chamber and measurement of the thickness of acrylic plates to set the aperture

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 음향감쇠계수 측정결과

Fig. 3은 하부틈새 폭에 따른 음향감쇠계수 측정 결과로, 하부틈새가 전혀 없도록 기밀 처리한 경우(seal)와 틈새 폭(w) 2 mm, 6 mm, 10 mm, 15 mm인 경우에 대해 대표적으로 나타내었다. 틈새 깊이(d)는 모두 도어의 두께에 상당하는 35 mm이다.

틈새가 전혀 없는 도어 자체의 음향감쇠계수는 대체로 고주파수영역으로 갈수록 증가하는 일반적인 부재의 차음특성을 보이고 있으며, 틈새가 있는 경우 틈새 폭이 클수록 음향감쇠계수가 저하하는 양상을 보이고 있다. 폭 2 mm 정도의 아주 조그만 틈새라도 틈새가 없는 경우와 비교할 때 음향감쇠계수가 급격하게 저하되고 있음을 관찰할 수 있다. 또한 틈새에 의한 음향감쇠계수의 저하는 특히 고주파수영역에서 두드러지는 것으로 파악되었다.

음향감쇠계수 측정 곡선에서와 같이 틈새를 따라 음이 투과하는 과정에서 음향투과가 급격하게 일어나는 영역이 관찰되었다. 이러한 공진주파수( $f_{res}$ , resonance frequencies)는 대체로 평면파(plane wave)가 수직으로 입사한다고 가정하면 틈새 깊이(d)와 식(2)에서 나타낸 개구단 보정(e)의 합이 음파의 반파장의 정수배와 일치할 때 발생된다. Fig. 3의 측정결과에서와 같이 이 실험조건인 경우 일차 공진주파수(the lowest resonance frequency)는 대개 1/3옥타브밴드 중심주파수로 3,000~4,000 Hz에서

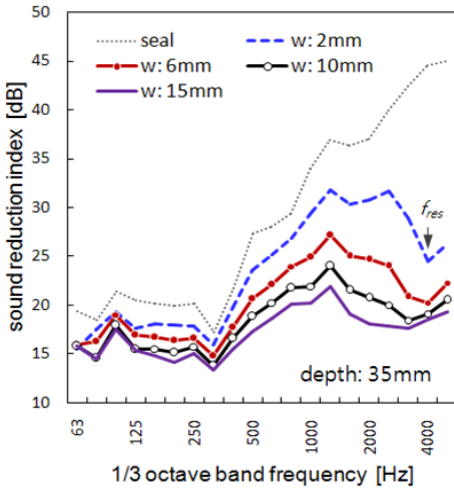


Fig. 3 Sound reduction index according to the aperture widths (aperture depth : 35 mm)

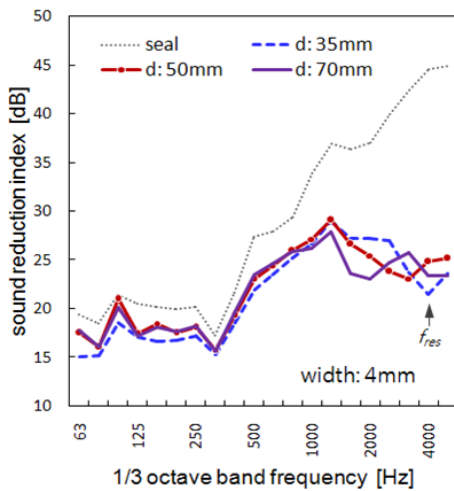


Fig. 4 Sound reduction index according to the aperture depths (aperture width : 4 mm)

발생되었으며, 틈새 폭이 작을수록 저하량의 깊이(dip)가 깊고 뚜렷하게 나타났다.

Fig. 4는 틈새 폭은 4 mm로 일정하며 틈새 깊이가 각각 35 mm, 50 mm, 70 mm인 틈새조건에서의 음향감쇠계수 측정결과 예를 대표적으로 나타낸 것이다. Fig. 3에서와 같이 음향감쇠계수는 틈새 폭에 따라 크게 변화하고 있는 반면, 틈새 깊이에 따른 음향감쇠계수의 변화는 크지 않음을 알 수 있다. 특히 1,250 Hz 이하의 주파수영역에서는 세 조건의 음향감쇠계수가 모두 유사한 경향을 보이고 있으며, 그 이상의 고주파수영역에서는 틈새로 인해 생성되는 공진영역에 따라 음향감쇠계수가 약간 변화하는 정도로 나타났다. 공진주파수는 틈새 깊이 35 mm, 50 mm, 70 mm에 대해 각기 1/3옥타브밴드 중심주파수로 4,000 Hz, 3,150 Hz, 2,000 Hz에서 나타났으며, 음이 투과하는 틈새의 깊이가 깊어질수록 낮은 주파수영역으로 이동하는 것으로 파악되었다.

틈새 조건에 따른 차음성능을 단일수치로 비교하기 위해 KS F 2862<sup>(12)</sup>에 따라 가중음향감쇠계수( $R_w$ , weighted sound reduction index)를 산정하였으며, 산정결과는 Table 2에 나타내었다. 틈새가 없는 경우(seal)  $R_w$ 는 30 dB로 평가되었으며, 2 mm의 작은 틈새 폭을 갖는 경우  $R_w$ 는 이 보다 3 dB 저하된 27 dB로 평가되는 등 틈새 폭이 증가에 따라 차음성능도 저하됨을 확인할 수 있었다. 그러나 이 연구에서 다룬 범위(35 mm ~ 70 mm) 내에서, 틈새 깊이에 따른  $R_w$ 는 1 dB 이내였으며, 대체로 틈새 깊이가 깊수록  $R_w$ 가 증가하는 경향을 나타내고 있으나 그 영향은 크지 않은 것으로 평가되었다.

도어 하부틈새 조건에 따른 측정결과를 정리하면 음향감쇠계수는 틈새 깊이 보다는 틈새 폭에 크게

Table 2 Weighted sound reduction index(SRI) for different apertures

Width×depth (mm)	Weighted SRI $R_w$ (dB)	Width×depth (mm)	Weighted SRI $R_w$ (dB)
2 × 35	27	4 × 50	24
4 × 35	25	4 × 70	24
6 × 35	23	10 × 50	21
8 × 35	21	10 × 70	21
10 × 35	20	15 × 50	19
15 × 35	19	15 × 70	20
17 × 35	18	0 × 0(seal)	30

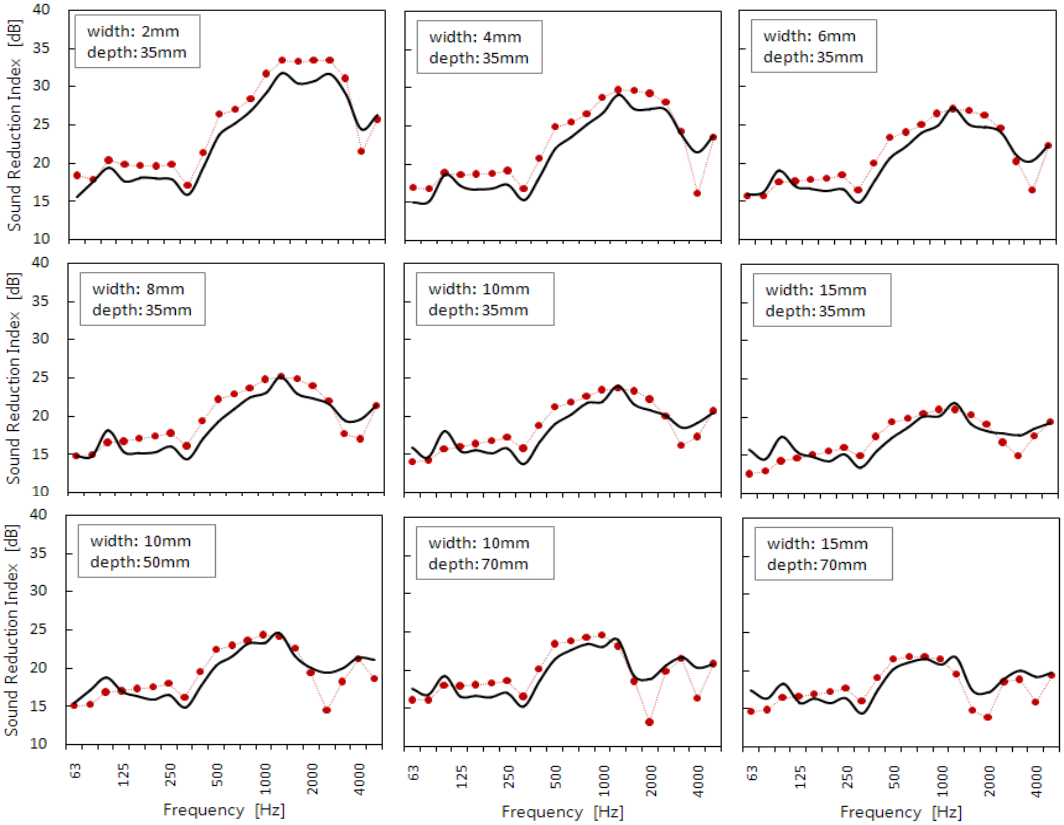


Fig. 6 Sound reduction index of the measured and the calculated results for apertures ; — the measured value, - • - the calculated value

영향을 받고 있다. 또한 하부틈새를 갖는 도어의 차음 성능 특성으로서는 음의 투과가 활발해지는 공진주파수영역을 가지며, 실제 현장에서 설치되고 있는 도어의 하부틈새 규격을 감안하면 공진주파수는 대체로 2,000~4,000 Hz 부근에서 발생되어 이로 인한 추가적인 음향적 결함이 나타나는 것으로 분석되었다.

### 3.2 음향투과손실 해석 및 비교

Fig. 5는 식 (1)을 토대로 산정한 틈새의 음향감쇠계수의 예를 나타낸 것이다. Gomperts와 Kihlman의 제안<sup>(6)</sup>에 따라  $m$ 과  $n$ 은 각각 8과 1을 적용하였다. Fig. 5에서와 같이 틈새 폭 2 mm와 8 mm인 경우의 음향감쇠계수를 비교하면 1차 및 2차 공진주파수영역을 제외하고 전반적으로 틈새 폭이 작은 2 mm의 경우가 높은 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 또한 일반적으로 개구부를 포함한 부재의 종합투과손실 산정시 주파수와 관계없이 개구부의 음향투과율을

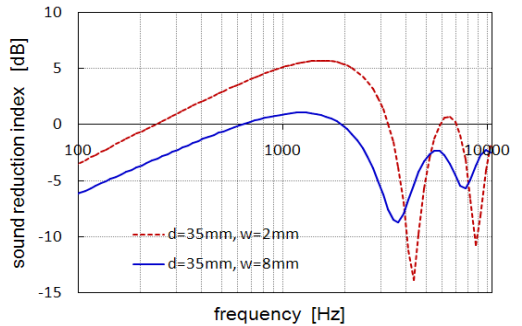


Fig. 5 Example of the calculated sound reduction index only through an aperture

‘1’ (음향감쇠계수: ‘0’)로 설정하여 적용하는 사례가 많으나, Fig. 5에서와 같이 작은 개구부 또는 틈새의 경우 음향감쇠계수는 주파수 의존성을 가지고 있기 때문에 이를 감안하여 적용되어야 할 것으로 판단된다. Gomperts와 Kihlman<sup>(6)</sup>은  $1.5 < K < \infty$

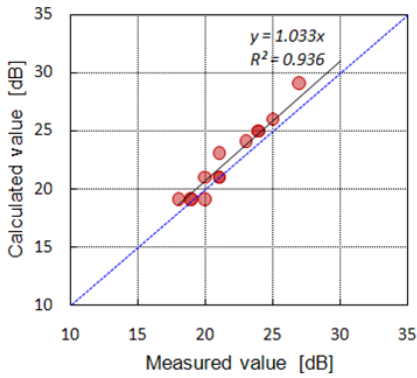


Fig. 7 Comparison of the weighted sound reduction index between calculated and measured values

( $K = kw$ ,  $k$ : 파수,  $w$ : 틈새 폭) 범위에서는 음향투과율을 ‘1’로 사용할 수 있다고 언급하였다. 따라서 건축음향에서 다루는 주파수영역을 고려하면, 도어의 경우 하부 틈새 폭이 20 mm 이하인 경우에는 틈새를 통한 음향투과율은 식 (1)을 적용하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

Fig. 6은 대표적인 틈새조건에 대해 음향감쇠계수 해석결과를 측정결과와 비교하여 나타낸 것이다. 실험에서 설정한 것과 동일한 틈새조건에 대해 식 (1)과 식 (3)을 이용하여 틈새를 포함한 도어의 음향감쇠계수( $R_{tot}$ )를 해석하였다.  $\tau_{stru}$ 는 틈새가 없는 조건에서 측정된 도어의 음향감쇠계수로부터 얻어졌다. Fig. 6에서와 같이 일부 주파수영역을 제외하면, 대체로 해석치는 실측치보다 음향감쇠계수가 약간 높게 평가되는 경향을 보이고 있으나, 전반적으로 실측치와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 측정 곡선의 고주파수영역에서 음향감쇠계수가 저하되는 결함부는 해석치의 공진(resonance)영역과 대부분 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 다만, 공진주파수에서 해석치는 실측치보다 음향감쇠계수 저하의 정도(dip)가 보다 깊고 뚜렷하게 나타나고 있는데, 이는 틈새에서의 공기점성(air viscosity)에 의한 댐핑(damping)의 영향이 해석이론에는 반영되고 있지 않기 때문<sup>(13)</sup>인 것으로 판단된다.

Fig. 7은 13개 틈새조건에 대한 해석치( $y$ )와 실측치( $x$ )를 차음성능 단일수치 평가량인 가중음향감쇠계수,  $R_w$ , 로 비교하여 나타낸 것이다. 해석치와 실측치는 대체로 우수한 일대일 대응관계 ( $y = 1.033x$ ,  $R^2 = 0.936$ )를 갖는 것으로 평가되었다. 또한  $R_w$ 는

해석치가 실측치에 비해 최고 2 dB 이내의 범위에서 약간 높게 평가되는 경향을 보였으며, 13개 틈새에 대한  $R_w$  평균오차는 0.9 dB인 것으로 분석되었다. 이는 경량콘크리트패널 부재에 18종의 틈새조건을 적용하여 검토한 선행연구<sup>(9)</sup>와 유사한 결과로서, 틈새를 갖는 도어의 차음성능 예측시 Gomperts의 해석모델은 신뢰성 있는 도구로서 활용이 가능하다고 판단된다.

#### 4. 결 론

실험 및 이론해석을 통해 틈새조건에 따른 도어의 차음성능 특성을 분석한 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 하부틈새를 갖는 도어의 음향감쇠계수는 틈새 깊이( $d$ ) 보다는 틈새 폭( $w$ )에 크게 영향을 받는 것으로 평가되었다. 또한 2,000 ~ 4,000 Hz 부근에서 틈새에 의한 공진(resonance)으로 인해 추가적인 음향결함을 갖는 것으로 분석되었다.

(2) 틈새를 통한 음향투과는 주파수 의존성을 갖기 때문에, 종합투과손실 산정시 틈새의 음향투과율을 모든 주파수에 대해 ‘1’로 적용하는 것은 바람직하지 않다. 건축음향에서 다루는 주파수영역을 고려하면, 도어의 경우 하부 틈새 폭이 20 mm 이하인 조건에서는 보다 세밀한 검토를 위해 주파수별로 음향투과율을 고려하는 것이 바람직하다고 판단된다.

(3) Gomperts 해석모델을 이용하여 틈새를 갖는 도어의 음향감쇠계수를 해석한 결과, 공진주파수영역을 제외한 대부분의 주파수영역에서 해석치가 실측치보다 약간 크게 평가되는 경향을 보이고 있으나 전반적으로는 잘 일치하는 것으로 평가되었다. 또한 13개 틈새 조건에 대해 가중음향감쇠계수의 평균오차는 0.9 dB (최고 2 dB 이내)로 평가되어, 틈새를 갖는 부재의 차음성능 예측시 유용한 해석모델로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 후 기

이 논문은 2009년도 서울시립대학교 연구년교수 연구비에 의하여 연구되었음.

## 참 고 문 헌

- (1) An, J. H., Kim, M. J., Cho, C. G. and Lee, M. J., 2008, "Effect on the Sound Insulation Performance of Flush Doors by Aperture Conditions between Door and Doorsill," 15th International Congress on Sound and Vibration(ICSV15), Daejeon, pp. 2635~2642.
- (2) Gomperts, M. C., 1964, "The Sound Insulation of Circular and Slit-shaped Apertures," *Acustica*, Vol. 14, pp. 1~16.
- (3) Wilson, G. P. and Soroka, W. W., 1965, "Approximation to the Diffraction of Sound by a Circular Aperture in a Rigid Wall of Finite Thickness," *Journal of Acoustic Society America*, Vol. 37, pp. 286~297.
- (4) Sauter, A. and Soroka, W. W., 1970, "Sound Transmission through Rectangular Slots of Finite Depth between Reverberant Rooms," *Journal of Acoustic Society America*, Vol. 47, pp. 5~11.
- (5) Mechel, F. P., 1986, "The Acoustic Sealing of Holes and Slits in Walls," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 111, pp. 297~336.
- (6) Gomperts, M. C. and Kihlman, T., 1967, "The Sound Transmission Loss of Circular and Slit-shaped Apertures in Walls," *Acustica*, Vol. 18, pp. 144~150.
- (7) Hongisto, V., Keränen, J. and Lindgren, M., 2000, "Sound Insulation of Doors -Part 2: Comparison between Measurement Results and Predictions," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 230, pp. 149~170.
- (8) Kang, H. J., Kim, J. S., Kim, H. S. and Kim, S. R., 2001, "Influence of Sound Leaks on in situ Sound Insulation Performance," *Noise Control Engineering Journal*, Vol. 49, No. 3, pp. 113~119.
- (9) Kim, M. J. and An, J. H., 2009, "Effect of Slit-shaped Apertures on Sound Insulation Performance of Building Elements," *Noise Control Engineering Journal*, Vol. 57, No. 5, pp. 515~523.
- (10) Han, H. S., Jung, W. S. and Mo, J. Y., 2008, "Evaluation for the Capability of the Sound Insulation and Experimental Analysis for the Improvement of Sound Insertion Loss of the Air Conditioner-cabinet Considering the Thickness and Aperture of Partition," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 18, No. 2, pp. 263~271.
- (11) KS F 2808, 2001, "Laboratory Measurements of Airborne Sound Insulation of Building Elements," (ISO 140-3 : 1995).
- (12) KS F 2862, 2002, "Rating of Airborne Sound Insulation in Buildings and of Building Elements," (ISO 717-1 : 1996).
- (13) Hopkins, C., 2007, *Sound Insulation*, Elsevier Ltd., Chapter 4.