

표준더미 개발을 위한 착의량에 따른 인체의 흡음특성 기초연구

Preliminary study on absorption characteristic of a human body according to the amount of clothing worn for developing standard test dummy

김용희,¹ 이성찬^{2†}

(Yong-Hee Kim¹ and Sung-Chan Lee^{2†})

¹한국건설생활환경시험연구원 건축환경재료센터, ²영산대학교 건축플랜트학과
(Received February 21, 2017; revised March 16, 2017; accepted July 31, 2017)

초 록: 본 연구는 만석 객석의자 등의 흡음특성 시 활용될 수 있는 표준더미 개발을 위한 기초연구로서 착의량에 따른 인체의 흡음특성을 잔향실법 측정방법을 이용하여 평가하였다. 측정방법은 기존 연구(Conti *et al.*, 2004)에 따라 잔향실 중앙에 1인의 피험자가 서 있는 조건에서, 다양한 소재의 의복착용에 따른 주파수 대역별 흡음면적을 측정하였다. 측정 결과, 겉옷을 제외한 상하의를 착용하였을 때 전주파수대역 평균 흡음면적은 피험자에 따라 0.25 m² - 0.48 m²의 분포를 보였고, 외투 착용에 따라 0.38 m² - 0.98 m²의 분포를 보였다. 섬유소재에 따라 폴리에스터 류의 겉옷은 800 Hz - 1 kHz 대역에서 피크 특성을 보였고, 모나 면 소재의 겉옷은 고주파수 대역으로 갈수록 흡음면적이 높아지는 특성을 보였다. 착의량에 따른 흡음면적의 변화는 착용한 의복의 열저항(clo)과 체표면적당 무게로 구분하여 비교하였다.
핵심용어: 흡음성능, 인체흡음, 공연장 객석, 표준더미, 착의량

ABSTRACT: The purpose of this study is to evaluate the sound absorption characteristics of a human body according to the amount of clothing worn by using reverberation method measurement method for developing standard test dummy, which can be used for testing absorption of occupied audience chair. Test method was based on the previous study (Conti *et al.*, 2004), each experiment is conducted in the reverberation room and a subject wearing clothes is standing in that chamber. In this experiment, the sound absorption area of each frequency band according to the wearing of various material clothing was measured. As a result of measurements, the average sound absorption area of the whole frequency band was 0.25 m² - 0.48 m² in case of a subject not wearing outer clothes, and 0.38 m² - 0.98 m² in case of wearing of outerwear. Polyester tops by showing the maximum value, the highest characteristics in the 800 Hz to 1 kHz band among the rest of fiber materials. The outer jacket made of the wool and cotton materials show a higher absorption area as the frequency increases to the higher frequency band. The change of the sound absorption area according to the clothing amount was divided by the thermal resistance (clo) of the worn clothes and the weight per body surface area.

Keywords: Sound absorption performance, Human body absorption, Auditorium seat, Standard dummy, Amount of cloth

PACS numbers: 43.55.Ev, 43.55.Hy

†Corresponding author: Sung-Chan Lee (sclee@ysu.ac.kr)
Department of Architecture and Plant, Youngsan University, 288
Junam-ro, Yangsan, Gyeongnam 50510, Republic of Korea
(Tel: 82-55-380-9493, Fax: 82-55-380-9249)

I. 서 론

실내공간의 음향예측을 위해 마감재의 흡음특성을 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 그러나 면으로 모델링하기 힘든 인체의 특성 때문에 재실자의 흡음력은 일반적으로 고려하지 않고 있다. 공연공간의 경우에만 특수하게 만석의 의자 조건^[1]이나 연주자의 흡음력^[2]을 고려하고 있으며 따라서 공연장 좌석의 흡음률도 만석기준으로 산정되어야 한다. 그러나 만석이라고만 되어 있을 뿐 착의조건은 명시하지 않고 있다. 만석좌석의 흡음률은 착의량에 따라 편차가 크게 발생^[3]하나 착의량의 변화에 따른 흡음률의 변화에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 또한 만석시 좌석의 흡음률 측정을 위한 착의량에 대한 구체적인 정의도 되어 있지 않아 착의조건을 제시할 수 없는 실정이다.

인체의 흡음특성^[4]이나 착의량에 따른 흡음특성^[5]에 대한 연구는 1960년대부터 간헐적으로 시도되었으며 최근 1인에 의한 인체의 흡음 및 확산을 시도한 사례^[6]가 있으며 최근 Martellotta *et al.*^[3]은 성당의 신도 점유에 따른 흡음특성의 실험실 측정을 진행하면서, 하계 및 동계 착의량에 따른 비교와 더불어 Kath의 연구결과^[5]에 더해 의복의 열저항에 대한 주파수 대역 흡음율 변화를 비교한 바 있다.

그러나 기존 연구에서 의복 재질에 대한 영향은 고려되지 않았다. Choi and Bang^[7]은 면, 마 등의 섬유소재 및 배면 부직포 등의 섬유층 구성에 따른 흡음특성을 관내법^[8]을 이용하여 비교하였다. 그 결과, 소형시편으로 측정된 흡음특성은 섬유소재에 따라 큰 차이는 보이지 않았지만, 배면 섬유층 구성에 따라서는 고주파수 대역에서 3배 이상의 흡음율 차이도 관찰되었다. 실제 의복은 다양한 섬유소재를 이용하여 복잡한 다층구성을 보이기 때문에, 이에 따른 영향을 검토할 필요가 있다.

독립 흡음체에 대한 정확한 잔향실법 흡음특성을 도출하기 위해서는 측정표준^[9]에서 요구하는 최소 시험체 면적의 충족(적어도 3개 이상의 독립흡음체로, 각 흡음체당 2 m 이상 거리 유지)이 필요하지만, 본 연구에서는 기초연구로서 착의량 변화만의 영향을 평가하기 위해 1966년 Kath의 연구^[5]에서나, 최근

2004년 Conti *et al.*^[6]의 연구에서도 적용된 바 있는 피험자 1인에 대한 잔향실법 흡음성능을 측정하였다. 이 측정방법은 피험자 1인에 대한 음향특성을 잔향실에서 측정하는 것으로 특정 소재에 대한 일반화된 흡음특성을 대표하는 것은 어렵지만, 초기 단계의 접근방법으로 상대적인 비교에 적용될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 다양한 섬유소재의 의복 변화에 따라 실제 사람 1인의 주파수 대역별 흡음면적을 측정하여, 착의량에 따른 인체의 흡음특성을 상대적으로 평가하였다. 또한 실제 공연장 객석의 의자의 만석시 흡음성능을 측정할 때 겉옷의 유무를 비교하여 착의조건이 흡음성능에 미치는 영향을 고찰하였다.

II. 실험방법

2.1 잔향실법 흡음측정

착의량 측정은 KS F 2805의 표준에 적합한 잔향실에서 진행하였다. 잔향실은 벽두께 250 mm의 철근 콘크리트 구조로서, 대향벽이 없는 부정형 7면체로 구성되어 있었고, 총 면적 15 m²의 강화플라스틱 확산체가 천장에 설치되어 있었다. 잔향실의 용적은 209.7 m³이고, 표면적은 203.9 m²이다.

흡음면적을 측정하기 위해 무지향성 스피커(Falm, DO12)를 2지점에 설치하였고, 1/2인치 마이크로폰(G.R.A.S., 40AE) 6개를 이용하여, 총 12개의 감쇠곡선을 도출하여, 주파수 대역별 흡음면적을 산출하였다. 흡음특성은 1/3 옥타브 밴드의 100 Hz에서 5 kHz로 구분하여 분석하였고, 측정시의 환경조건으로 실내 온도는 17.5°C~18.7°C, 상대습도는 48.2% R.H.~55.5% R.H., 대기압은 997.0 hPa~999.7 hPa였다.

2.2 피험자 구성

실험은 기존 연구^[6]의 측정방법을 준용하여 Fig. 1과 같이 잔향실 중앙에 피험자 1인이 청력보호구를 착용하고 서 있는 상태에서 진행하였다. 피험자는 총 5인으로 남자 4인, 여자 1인으로 구성되어 있고, 피험자의 연령은 24세~47세, 신장은 163.2 cm~183.0 cm, 의복을 제외한 체중은 54.2 kg~79.7 kg의 범위로 분포하였다.

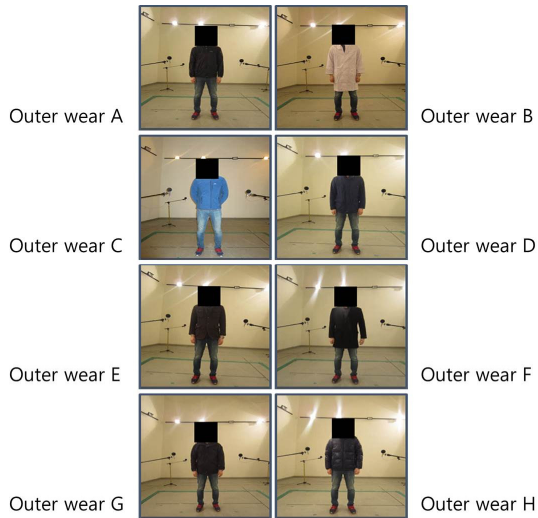


Fig. 1. Sound absorption test in the reverberation room.

2.3 의복

각 피험자는 실내활동 상황을 모사하기 위해 일상 생활에서 흔히 볼 수 있는 일반적인 내의 및 상하의, 양말 및 신발을 착용하였다. 하의는 청바지, 면바지, 기모바지를 착용하였고, 상의는 긴팔 셔츠를 착용하였다. 착의량 변화에 의한 영향을 살펴보기 위하여 Table 1과 같이 8종의 의복에 대하여 실험을 진행하였다.

2.4 착의량 계산

의복에 따른 착의량은 단열성과 관련된 열저항성능과 더불어 체표면적당 무게의 두 가지 측면에서 계산하였다. 열저항성능은 일반적인 착의량 계산표^[10]를

Table 1. List of outerwear used in the experiment.

Outer wear	Weight (g)	clo	upper	lining
A	439	0.22	Nylon 100 %	Nylon 90 % Polyurethane 10 %
B	460	0.27	Cotton 100 %	-
C	514	0.27	Wool 100 %	-
D	683	0.45	Polyester 70 % Nylon 30 %	Polyester 100 %
E	848	0.65	Wool 100 %	Polyester 100 %
F	1,062	0.80	Wool 90 % Cashmere 10 %	Polyester 100 %
G	1,066	0.50	Polyester 100 %	Wool 100 %
H	1,159	0.62	Polyester 100 %	Polyester 100 %

Table 2. The amount of wear and thermal resistance per subject surface area.

Subject	1	2	3	4	5	
Gender	Male	Female	Male	Male	Male	
Body surface area (BSA)	1.91	1.56	1.89	2.02	1.82	
clo value without outerwear	0.62	0.55	0.69	0.70	0.59	
Weight of clothing worn per BSA (g/m ²)	No outerwear	399	458	411	392	402
	Outerwear A	629	739	643	609	-
	Outerwear B	640	752	654	620	654
	Outerwear C	668	787	683	647	-
	Outerwear D	757	895	773	731	-
	Outerwear E	843	1,001	860	812	867
	Outerwear F	955	-	973	918	-
	Outerwear G	958	1,140	976	920	-
	Outerwear H	1,006	-	1,025	966	-

참고하여 피험자 및 겉옷 착의상태에 따라 개략적인 clo 단위로 계산하였다. 1 clo는 0.155 m²C/W의 열저항성능을 의미한다. 또한 피험자의 체표면적당 무게로 착의량을 계산하였다. 피험자의 체표면적(Body Surface Area, BSA)은 1916년 제안되어 현재까지 널리 이용되고 있는 Du Bois와 Du Bois^[11]의 예측식을 활용하였으며 Eq. (1)과 같이 계산하였다.

$$BSA = (W^{0.425} \times H^{0.725}) \times 0.007184 \text{ (m}^2\text{)}, \quad (1)$$

W: Weight (kg)

H: Height (cm)

각 피험자의 착의조건에 따른 착의량은 Table 2에 표시하였다. 계산 결과, 체표면적당 무게와 총의복 무게는 0.94의 유의한 상관계수를 보였으며, 체표면적당 무게와 clo값은 0.82의 상관계수를 보였다.

2.5 착의량에 따른 만석 객석의자 흡음률

실제 공연장에 적용되는 객석의자를 대상으로 만석시 피험자의 겉옷의 착용 유무에 따라 흡음성능에 어느정도 차이를 보일 수 있는지 알아보았다. 공연장에서 많이 사용되는 객석의자 20석을 4각 5열 배치로, 1m 간격으로 배치하였고, 동일한 의자와 피험자에 대해 겉옷을 입었을 때와 벗었을 때의 흡음특성을 측정하였다.

III. 실험결과 및 토의

3.1 겉옷 탈의시 각 피험자의 흡음특성

Fig. 2는 겉옷을 입지 않은 각 피험자의 주파수 대역별 흡음면적 측정결과를 나타낸다. 1 kHz 이상에서 0.4 이상으로 고주파 대역으로 올라갈수록 크게 나타났다. 피험자에 따른 범위는 1 kHz 이하에서 0.2 이내의 평탄한 범위를 보였지만, 1,250 Hz 이상에서 피험자간 편차가 크게 나타났다. 특히, 4 kHz와 5 kHz에서 최대-최소간 편차는 0.8 이상으로 나타났다. 이것은 기존 섬유소재 연구결과⁷⁾에서 일반적으로 나타나는 고주파수 대역의 흡음이 두드러지는 경향과 유사하다.

3.2 착의량 지표와 흡음의 상관관계

Table 3는 겉옷을 착용한 후 측정된 피험자 1인당 흡음면적에 대해 1/1 옥타브 밴드로 환산한 뒤 clo 단위의 착의량, 체표면적당 의복무게, 총 착의무게와의 상관계수를 나타냈다. 열저항으로 환산할 수 있는 clo 단위의 착의량의 경우, 250 Hz 이상에서 모두 유의한

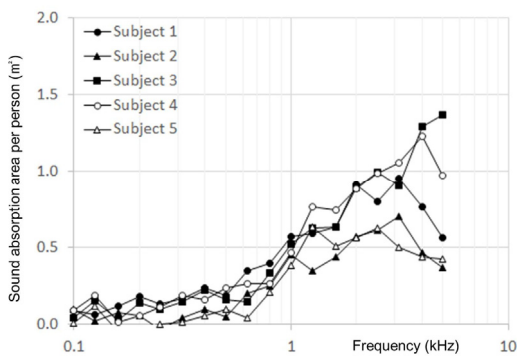


Fig. 2. Absorption area per person in one-third octave frequency.

관계를 나타냈고, 1 kHz와 2 kHz에서 0.7 이상의 높은 상관도를 보였다. 체표면적당 의복무게의 경우 250 Hz에서 2 kHz 대역에서 유의한 상관계수를 보였고, 500 Hz와 1 kHz에서 0.7 이상의 높은 상관도를 보였다. 한편, 총 착의무게는 전 주파수 대역에서 모두 유의한 상관계수를 보였다. 특히 250 Hz~1 kHz 대역에서 0.8 이상의 매우 높은 상관도를 보였다. 따라서, 착의량에 따른 흡음성능의 예측과 관련하여, 저중주파수 대역의 경우 총 착의무게를 고려하고, 고주파수 대역의 경우 clo 단위의 착의량을 고려할 수 있다고 사료된다.

Table 4와 Figs. 3과 4는 1/1 옥타브 밴드의 전체 측정결과에 대해 각각 단열성능으로서 clo 단위의 착의량과 총 착의무게에 따른 피험자 1인당 흡음면적의 산포도를 나타내었다. clo 단위의 착의량은 고주파수 대역으로 갈수록 선형회귀 분석의 기울기가 0.04에서 1.02로 증가하는 경향을 보였고, 총 착의무게는 2 kHz까지 기울기가 0.05에서 0.7로 증가하다가, 고주파수 대역에서는 0.45 내외로 머무는 것으로 나타났다.

Table 3. Correlation coefficient of one octave band absorption area among wear amount index (*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$).

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
clo	0.24	0.67**	0.66**	0.76**	0.72**	0.57**
Cloth weight per body surface area	0.27	0.66**	0.77**	0.70**	0.37*	0.12
Total cloth weight	0.35*	0.80**	0.84**	0.86**	0.60**	0.35*

Table 4. Regression analysis result for each frequency.

		Regression model	R ²
Amount of clothing (clo)	125 Hz	$y = 0.04x + 0.05$	0.06
	250 Hz	$y = 0.25x - 0.06$	0.45
	500 Hz	$y = 0.60x - 0.17$	0.44
	1 kHz	$y = 0.90x - 0.01$	0.58
	2 kHz	$y = 0.77x + 0.33$	0.51
	4 kHz	$y = 1.02x + 0.18$	0.33
Total weight of clothing (kg)	125 Hz	$y = 0.05x + 0.03$	0.12
	250 Hz	$y = 0.21x - 0.09$	0.63
	500 Hz	$y = 0.53x - 0.29$	0.71
	1 kHz	$y = 0.70x - 0.07$	0.75
	2 kHz	$y = 0.45x + 0.49$	0.36
	4 kHz	$y = 0.44x + 0.63$	0.12

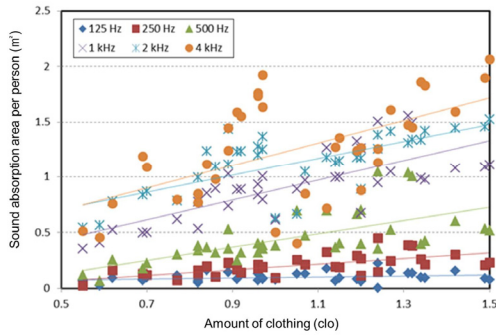


Fig. 3. The sound absorption area distribution of the 1/1 octave band according to the amount of clothing.

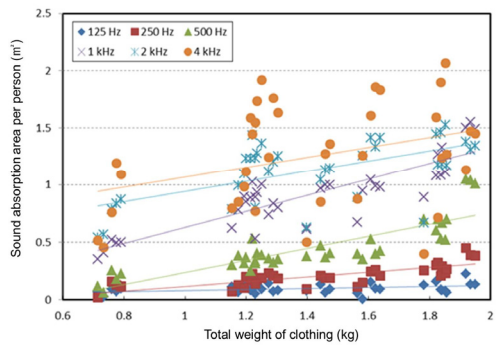


Fig. 4. The sound absorption area distribution of the 1/1 octave band according to the total weight of clothing.

3.3 겉옷 소재에 따른 흡음특성

Fig. 5는 겉옷 소재에 따른 흡음특성을 비교하기 위해 각 겉옷별로 피험자 개인의 흡음면적 측정결과를 평균하여 1/3 옥타브 밴드의 주파수 대역으로 표시하였다. 그 결과, 모직 소재의 겉옷의 경우 주파수 대역이 높아질수록 흡음면적도 커지는 경향을 보였고, 2 kHz 이상의 고주파 대역에서는 모직 소재의 겉옷이 가장 큰 흡음면적을 나타내는 것으로 나타났다. 나일론 소재나 면 소재의 경우, 모직 소재와 유사하지만 다소 낮은 흡음면적을 보였다.

한편 표면이 매끈한 폴리에스터 소재의 경우 겉옷의 무게가 증가할수록 1 kHz 내외의 중주파수 대역에서 크게 나타났으나, 1,600 Hz 이상의 고주파수 대역에서는 표면의 흡음력이 억제되어 오히려 clo값이 낮은 모직 소재의 겉옷보다도 흡음면적이 낮거나 비슷하게 나타났다. 겉옷을 입었을 경우, 입기 전이나 경량의 겉옷에 비해 주파수 대역별 흡음면적은 두 배 이상 차이날 수 있었다.

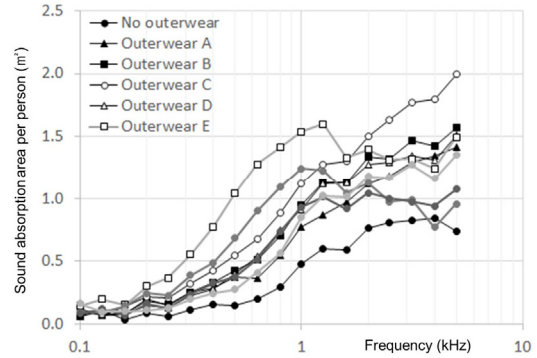


Fig. 5. Sound absorption area per subject according to outerwear type.

3.4 착의량에 따른 만석 객석의자 측정

앞서 측정된 겉옷의 소재에 따라 개인별 흡음면적의 차이만으로는 공연장 음향성능 예측시 활용하는 만석시 객석의 흡음성능 결과에 바로 적용할 수 없다. 따라서 Fig. 6과 같이 만석시 착의량에 따른 객석의자의 흡음성능을 측정하였다. 흡음계수의 도출은 격벽이 없는 상태에서 Barron의 기존 연구^[12]에 따라 0.5m 스트립의 부가 바닥면적을 고려하여 산출하였다. 측정결과 Fig. 7에서와 같이 공연장에 사용되는 객석의자의 만석시의 흡음계수는 외투 착의에 따라 주파수 대역별로 최대 0.2까지 차이가 날 수 있었다.



(a) Without outerwear



(b) With outerwear

Fig. 6. Absorption coefficient test of occupied seat with and without outerwear of subject in reverberation room.

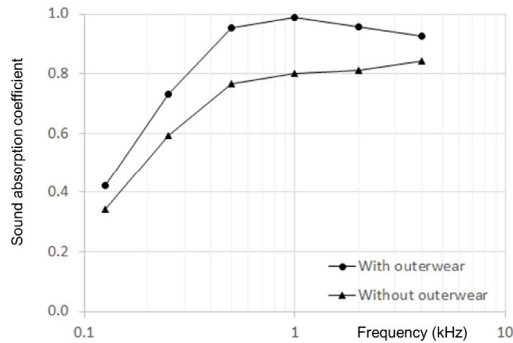


Fig. 7. Absorption coefficient test results of occupied seat with and without outerwear of subject.

연주자의 흡음특성으로 언급되는 BBC의 측정결과¹³⁾도 실험시의 착의조건은 언급되어 있지 않다. 따라서 만석시 객석의 흡음계수 측정시 요구되어지는 최대 착의량 조건에 대한 제시가 필요할 것으로 사료된다.

IV. 토의 및 결론

본 연구는 피험자 5인에 대해 다양한 소재의 겉옷 착용에 따른 진향실법 흡음면적 측정결과를 비교하였고, 그 결과, 겉옷의 소재와 무게에 따라 흡음면적이 두 배 이상 차이가 날 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 흡음계수가 전주파수 대역에서 동일하게 변화하지 않기 때문에 겉옷의 물리적 지표를 인용하여 외피와 내피에 반사재질이나 흡음재질이 어떻게 영향을 미치는지 주파수 대역별로 분석하였다. 실제 공연장 객석의자 만석의자 측정시 외투착의에 따라 0.2 이상 흡음계수 차이가 날 수 있으므로, 착의조건에 대한 명시는 반드시 필요하다 할 수 있다.

향후 본 연구결과를 바탕으로 독립흡음체 시험조건에 만족하는 추가 실험을 통해, 착의조건에 따른 일반화된 흡음변화 양상을 연구할 필요가 있으며, 이를 바탕으로 만석 객석의 흡음계수 평가를 위한 표준 착의량을 제시할 필요가 있다. 또한 보다 실제적인 실내 음장의 예측을 위해 재실재의 흡음특성에 대한 고려는 더 증가할 것이며 이에 따라, 공간의 특성에 따라 공연장에서의 관객, 교실에서의 학생 등 표준화된 착의조건을 규정하고, 나아가 계절에 따른 변인, 인체조건을 모사한 마네킹 등의 표준더미의 개발 등에 대해 연구할 필요가 있다.

감사의 글

실험에 참여해주신 피험자분들께 감사드리며 이 연구는 2016년 영산대학교 교내연구비의 지원을 받아 수행되었음.

References

1. L. L. Beranek, "Audience and seat absorption in large halls," *J. Acoust. Soc. Am.* **32**, 661-670 (1960).
2. H. S. Jang, Y. H. Kim, and J. Y. Jeon, "Absorption of orchestra platform measured for the acoustical design of concert halls," *Proc. ISRA*, 1-4 (2010).
3. F. Martellotta, M. D'alba, and S. D. Crociata, "Laboratory measurement of sound absorption of occupied pews and standing audiences," *Appl. Acoust.* **72**, 341-349 (2011).
4. E. Ackerman and F. Oda, "Acoustic absorption coefficients of human body surfaces," Pennsylvania State University, Tech. Rep., (MRL-TDR-62-36), 1964.
5. U. Kath, "The influence of clothes on the sound absorption of single persons," *Acta Acustica* **17**, 234-237 (1966).
6. S. G. Conti, P. Roux, D. A. Demer, and J. de Rosny, "Measurement of the scattering and absorption cross sections of the human body," *Appl. Phys. Lett.* **84**, 819-821 (2004).
7. I. R. Choi and H. K. Bang, "A study on the noise absorption of textiles for interiors (in Korean)," *Res. J. Costume* **20**, 475-484 (2012).
8. KS F 2814-2, *Acoustics-Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes -Part 2: Transfer-Function Method* (in Korean), 2002.
9. KS F 2805, *Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room* (in Korean), 2014.
10. ISO 9920, *Ergonomics of the Thermal Environment - Estimation of Thermal Insulation and Water Vapour Resistance of a Clothing Ensemble*, 2007.
11. D. Du Bois and E. F. Du Bois, "A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known," *Archives of Internal Medicine* **17**, 863-871 (1916).
12. M. Barron, *Auditorium Acoustics and Architectural Design* (Spon Press, London and New York, 2010), pp. 32-34.
13. H. D. Harwood, A. N. Burd, and N. F. Spring, "Acoustic scaling: An evaluation of the proving experiment," BBC Research Department Rep., No. 1972/3, 1972.

저자 약력

▶ 김 용 희 (Yong-Hee Kim)



2005년 2월: 한양대학교 건축공학부(이학사)
 2011년 2월: 한양대학교 건축환경공학과
 (공학박사, 석박사통합과정)
 2011년 11월: 일본 산업기술총합연구소
 2013년 12월 ~ 현재: (재)한국건설생활환경
 경시험연구원 선임연구원

▶ 이 성 찬 (Sung-Chan Lee)



2002년 2월: 한양대학교 물리학전공(이학사)
 건축공학 (공학사)
 2004년 2월: 한양대학교 건축공학과(공학
 석사)
 2016년 2월: 한양대학교 건축공학과(공학
 박사)
 2004년 10월: 한국라파즈석고보드
 2009년 9월: 대우건설 기술연구원
 2016년 3월 ~ 현재: 영산대학교 건축플랜트
 학과 조교수