

주거 공간에서 고령자 청력손실을 고려한 소음 및 잔향에 따른 음성 전송 성능의 주관적 평가

Effect of noise and reverberation on subjective measure of speech transmission performance for elderly person with hearing loss in residential space

오양기,¹ 류종관,^{2†} 송한솔²

(Yang Ki Oh,¹ Jong-Kwan Ryu,^{2†} and Han-Sol Song²)

¹목포대학교 건축학과, ²전남대학교 건축학부

(Received July 17, 2018; revised August 23, 2018; accepted September 20, 2018)

초 록: 본 논문은 주거공간에서 고령자 청력손실을 고려한 소음 및 잔향에 따른 음성 전송 성능을 청취실험을 통해 평가하였다. 주거환경 소음으로 바닥충격음, 교통소음, 공기전달음과 배수소음을 대상으로 하였으며, 공동주택의 잔향환경을 모사하기 위해 실내음향 컴퓨터시뮬레이션을 실시하여 충격응답을 추출하였다. 청취실험 음원은 고령자 청력손실(65세 남성)을 반영하기 위해 소음 및 단어 음원의 고주파대역의 음압레벨을 저감시킨 음원(고령자 음원)과 정상청력을 반영한 원음(청년 음원)을 대상으로 하였다. 청취실험은 각각 3개의 소음레벨(L_{Aeq} 30, 40, 50 dB)과 잔향시간(0.5, 1.0, 1.5 s)을 갖는 음환경 조건에서 제시된 단어(L_{Aeq} 55 dB)의 음성요해도(speech intelligibility)와 듣기 어려운 정도(listening difficulty)를 평가하는 것으로 하였다. 청취실험 결과, 음성레벨이 55 dB(L_{Aeq})일 때 잔향시간 1.0 s 이하 조건에서 충격소음(점핑음) 50 dB($L_{i,Fmax,AW}$)와 정상소음(도로, 음악, 배수 소음) 40 dB(L_{Aeq}) 이하의 소음레벨에서는 고령자 및 청년 음원 모두 90 % 이상의 음성요해도와 30 % 이하의 듣기 어려운 정도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 고령자 청력손실을 반영한 고령자 음원의 경우 청년 음원 보다 음성요해도는 0 % ~ 5 % 낮았고 듣기 어려운 정도는 2 % ~ 10 % 높은 것으로 나타났다.

핵심용어: 주거공간, 음성 전송 성능, 고령자, 청력손실

ABSTRACT: This study investigated the effect of noise and reverberation on subjective measure of speech transmission performance for elderly person with hearing loss in residential space through listening test. Floor impact, road traffic, airborne, and drainage noise were employed as the residential noise, and several impulse responses were obtained through room acoustical computer simulation for an apartment building. Sound sources for the listening test consisted of residential noises and speech sounds for both the young (the original sound) and the aged (the sound filtered out by filters with frequency responses of hearing loss of 65 years elderly person). In the listening test, subjects evaluated speech intelligibility and listening difficulty for the presented word (L_{Aeq} 55 dB) at three noise levels (L_{Aeq} 30, 40, 50 dB) and three reverberation times (0.5, 1.0, 1.5 s). Results showed that the residential space with noise level lower than equal to 50 dB ($L_{i,Fmax,AW}$) for jumping noise and 40 dB (L_{Aeq}) for road traffic, airborne, and drainage noise had speech intelligibility of 90 % and over and listening difficulty of 30 % and below. Speech intelligibility and listening difficulty for the aged sound source was shown to be 0 % ~ 5 % lower and 2 % ~ 20 % higher than those for the young sound source, respectively.

Keywords: Residential space, Speech transmission performance, Elderly person, Hearing loss

PACS numbers: 43.55.Hy, 43.71.Lz, 43.72.Dv

†Corresponding author: Jong-Kwan Ryu (jkryu@jnu.ac.kr)
School of Architecture, Chonnam National University, 77 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju 61186, Republic of Korea
(Tel: 82-62-530-1631, Fax: 82-62-530-1639)

I. 서론

교실, 교통 및 공공시설 등과 같은 건축공간에서의 음성 전송 성능(speech transmission performance)은 공간이 요구하는 중요한 기능 중의 하나이다. 공간에서 음성 전송 성능을 물리적으로 평가하기 위한 신호대 잡음비율(Signal to Noise Ratio, S/N비), D_{50} , U_{50} , STI 등과 같은 다양한 평가지수에 대한 연구가 수행되어 왔으며, 이와 같은 물리적 평가지수 값들은 상호 상관성이 높은 것으로 밝혀졌다.^[1] 이와 더불어, 공간에서의 음성 전송 성능을 주관적으로 평가하기 위한 평가방법 또한 제안이 되었는데,^[2-6] Morimoto *et al.*^[6]에 의해 제안된 ‘듣기 어려운 정도(listening difficulty)’는 높은 음성 전송 성능을 갖는 공간조건에서 기존의 평가 방법인 음성 요해도(speech intelligibility)보다 더 정확하고 민감하게 공간의 음성 전송 성능을 평가할 수 있는 것으로 나타났다.

한편, 공간의 음성 전송 성능에 대한 주관적 평가 값은 S/N비와 잔향시간에 의해 크게 영향을 받는 것으로 알려졌다.^[1,7] Bradley의 연구^[1]에 의하면, 최적의 음성 전송 성능을 확보하기 위해서는 0.5s 잔향시간을 갖는 조건에서 S/N비가 15 dB 이상이 되어야 한다고 제안하였다. 이러한 음성 전송 성능의 주관적 평가 값에 대한 S/N비와 잔향시간의 영향에 대한 연구는 정상 청력자 뿐만 아니라 고령 등에 따른 청력 손실 갖는 이상 청력자를 대상으로 연구가 진행되었다.^[8-11] 기존 연구^[8-11]에 의하면 다양한 소음 및 잔향 환경에서 청력손실을 갖는 이상 청력자의 음성요해도 또는 듣기 어려운 정도는 정상 청력자와 약 5%~20%의 차이를 갖는 것으로 나타났다.

이와 같이, 주로 2kHz 이상 대역에서 발생하는 고령에 의한 청력손실^[12]은 교통시설 등과 같은 공간 뿐만 아니라 주거 공간에서도 고령자의 음성 청취 능력에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 그러나 기존 연구들은 주택 내부가 아닌 교실 및 교통시설과 같은 외부 공공공간을 감안하여 연구가 진행되어, 실제 발생 소음이 아닌 인공적 소음을 소음원으로 하고 음성과 소음 제시레벨이 주거 공간에서 발생하는 범위를 벗어나고 있다. 실제 주거공간에서는 이웃세대로부터의 바닥충격음, 공기전달음, 설비소음과

외부로부터의 교통소음에 의해 신경쓰임이 발생하며, 특히 청력손실을 갖는 고령자의 경우 소음으로 인한 음성청취의 어려움으로 인해 의사 소통에 큰 장애가 될 수 있을 것으로 판단된다. 이와 관련하여 최근 고령자 청력손실을 고려한 주거공간의 차음성능 기준의 필요성이 제기되었으나,^[13] 고령자를 위한 차음성능 기준 설정에 기반이 되는 보다 구체적인 실험적 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 주거공간에서 발생하는 실제 소음원을 대상으로 고령자 청력손실을 고려하여 소음레벨과 잔향시간에 따른 음성 요해도와 듣기 어려운 정도를 평가하였다.

II. 청취실험 방법

2.1 음원(단어 및 소음)

청취실험용 단어의 경우 한국어능력시험(TOPIK)의 음원에서 2~4음절로 된 60개의 단어(남성음원: 29개, 여성음원: 31개)를 무작위로 추출한 후 해당 단어의 친숙도 평가를 실시하였다. 20대 청년 10명을 대상으로 7점 어휘척도를 이용해 실시한 단어의 친숙도 평가 결과 60개의 단어는 모두 4점 이상의 친숙도(평균 5.2점)를 갖는 것으로 나타났다.

청취실험에 사용된 주거환경소음은 충격성(impulsive) 음원으로 바닥충격음(어린이 점핑음)과 정상(stationary) 음원으로 교통소음(도로 소음), 공기전달음(음악), 배수소음을 활용하였다. 바닥충격음, 공기전달음, 배수소음의 경우 실제 공동주택의 윗집 또는 옆집에서 발생하는 소음을 녹음하였다. 교통소음의 경우, 왕복 6차선 도로(시속 60 km/h, 대형차 비율 15%) 끝단으로부터 10m 이격된 지점에서 녹음된 음원을 공동주택 외피의 차음성능($R'w$ 30 dB)의 주파수별 차음성능만큼 필터링 한 음원을 사용하였다. Fig. 1은 청감실험에 사용된 소음원의 주파수 특성을 나타내고 있다. 또한 잔향환경을 모사하기 위한 실내에서의 충격응답 확보를 위해 공동주택(면적: 84 m²)을 대상으로 실내음향 컴퓨터시뮬레이션을 소프트웨어(Odeon ver.10.1)를 활용하여 수행하였으며, 실제 측정치와 비교를 통해 잔향시간의 주파수특성을 실제측정치와 일치시킨 후 거실위치에서

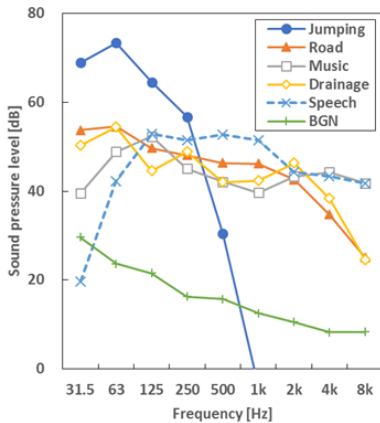


Fig. 1. Sound pressure level with respect to frequency of the residential noise, speech source and BGN (Back Ground Noise) in experiment room: L_{max} (at 50 dB in L_{iAFmax}) for jumping, L_{eq} (at 50 dBA) for the other noises, and L_{eq} (at 55 dBA) for speech sound.

의 충격응답을 추출하였다. 이후, 실내 마감재의 흡음률 조절을 통해 최종적으로 각각의 잔향시간(0.5s, 1.0s, 1.5s)를 갖는 3개의 충격응답을 추출하였다. 청취실험에서 다양한 잔향환경을 재현하기 위해 소음원과 단어를 각각의 충격응답과 콘볼루션(convolution) 작업을 실시하였다.

고령자의 청력손실을 반영하기 위해 65세의 청력손실에 해당되는 값만큼 단어와 소음 음원에서 각 주파수대역별로 필터링 작업을 실시하였다. 65세의 주파수대역별 청력손실 값은 ISO 7029^[12]에 제시된 남성의 연령에 따른 청력손실 계산식에 의해 산출되었다. 계산결과 65세 남성의 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz 대역의 청력손실은 각각 4 dB, 10 dB, 20 dB, 33 dB HL(Hearing Level)에 해당되었고, 각 주파수대역의 청력손실만큼 원음에서 필터링(filter out)하여 음원을 제작하였다. 상기음원은 고령자 청력손실을 반영한 음원으로 이하 ‘고령자(the aged) 음원’이라 하고 필터링을 하지 않은 원음을 이하 ‘청년(the young) 음원’으로 기술하였다.

2.2 실험절차

청취실험은 각각 3개의 소음레벨과 잔향시간을 갖는 환경에서 제시되는 단어에 대한 음성요해도(speech intelligibility)와 듣기 어려운 정도(listening difficulty)를 평가하는 것으로 진행되었다. 소음원과

Table 1. Experimental design: L_{Aeq} level of residential noise and reverberation time for each session.

		0.5 s (reverberation time)		
		L_{Aeq} [dB]*		
Session-1	Young	30	40	50
Session-2	Aged	30	40	50
		40 dB (L_{Aeq})*		
		Reverberation time [s]		
Session-3	Young	0.5	1.0	1.5
Session-4	Aged	0.5	1.0	1.5

단어는 동시에 피험자에게 제시되었으며, 10 s 길이의 소음원이 제시되는 동안 하나의 단어가 제시되었고 단어의 길이는 단어의 음절수와 잔향시간에 따라 1s~2s의 길이로 제시되었다. 충격소음인 점핑음의 경우 약 1.2s~1.5s의 길이를 갖는 단발충격음이 6개 포함된 음원이 제시되었다. 피험자는 단어가 제시된 후 제시된 단어의 받아쓰기와 아래의 카테고리를 이용하여 듣기 어려운 정도^[6]를 판단하였다.

1. 전혀 어렵지 않다. (Not difficult)
2. 조금 어렵다. (A little difficult)
3. 제법 어렵다. (Fairly difficult)
4. 매우 어렵다. (Extremely difficult)

실험은 제시된 단어 음원의 음압레벨은 미국 환경보호국^[14]에서 조사된 주거공간 내부에서의 음성레벨 평균치인 55 dB(L_{Aeq})로 하였으며, Table 1과 같이 총 4개의 세션으로 진행되었다. 1개의 세션은 3개의 소음원 제시레벨(30, 40, 50 dB L_{Aeq}) 또는 잔향시간(0.5, 1.0, 1.5 s)를 갖는 3개 세트 구성되었다. 소음원의 제시레벨은 점핑음의 경우 역A레벨($L_{iFmax,AW}$), 나머지 음원은 L_{Aeq} 기준으로 하였다. 세션1과 2, 세션 3과 4는 각각 청년과 고령자 음원으로 구분된다. 각각의 세트는 4개의 소음원으로 구성되며 소음원 종류 별로 5개의 단어를 사용하였다. 따라서, 1개의 세트에는 20개의 단어(4 소음원 × 5개 단어)를 사용하였고 1개의 세션에는 총 60개의 단어(3세트 × 20개 단어)가 활용되었다. 총 60개의 단어는 앞서 평가한 친숙도 점수를 고려하여 각 세트 및 소음원별로 균등히 배분하였다. 세션1에 사용된 60개의 단어는 세션

2-4에도 동일하게 사용되었고 단어의 반복 또는 학습효과를 최소화하고자 각 세트의 제시 순서를 무작위로 하였다.

2.3 피험자 및 장비

청취실험에 참여한 피험자는 정상청력을 갖는 20대 10명을 대상으로 하였다. 실험은 외부소음과 잔향시간을 최소화한 청감실험실에서 진행되었으며, 음원은 헤드폰(Sennheiser HD 600)과 150 Hz 이하 저주파음 재생을 위한 우퍼(Dynaudio BM14SII) 스피커에서 동시에 제시되었다. 피험자는 우퍼스피커에서 1 m 떨어진 지점에서 헤드폰을 착용한 상태에서 실험을 진행하였으며, 실험 전 헤드 & 토르소를 이용하여 재생음이 Fig. 1과 같은 음원의 특성(제시레벨, 주파수 특성)을 갖도록 최종 조정하였다.

III. 청취실험 결과

3.1 소음 제시레벨(S/N비)

Fig. 2는 4종류의 주거환경소음 전체에 대하여 잔향시간이 0.5 s일 경우 소음제시레벨과 S/N(Speech signal to Noise)비에 따른 청년과 고령자 음원의 음성요해도와 듣기 어려운 정도를 나타내고 있다. 음성

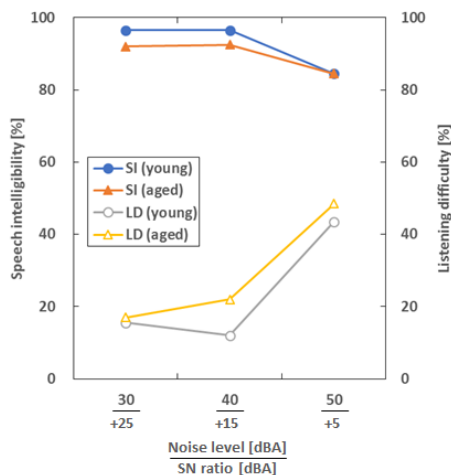


Fig. 2. Speech intelligibility and listening difficulty for the young and the aged sound sources as a function of noise level and speech signal to noise ratio at 0.5 s reverberation time for all noise types; SI and LD indicate speech intelligibility and listening difficulty, respectively.

요해도는 하나의 제시레벨(세트) 당 제시된 단어의 받아쓰기 결과 중 정답 개수의 비율로 하였다. 또한 듣기 어려운 정도는 각 세트당 제시된 단어의 응답 중 카테고리 2 (조금 어렵다) ~ 4 (매우 어렵다)로 반응한 개수의 비율로 계산⁶⁾하였다.

Fig. 2에서 먼저 음성요해도의 결과를 살펴보면 청년음원의 경우 S/N비 +5 dB ~ +25 dB 범위에서 85% ~ 97%의 음성요해도 값을 나타냈다. 또한 S/N비 +15 dB와 +25 dB 음원의 음성요해도 값은 동일하였으며 S/N비가 +5 dB일 때 85%로 가장 낮은 값을 나타냈다. 고령자 음원의 경우도 전체 85% ~ 93%의 음성요해도 값을 나타내었고 S/N비 +15 dB와 +25 dB 음원의 음성요해도 값은 1% 차이로 미미한 차이를 나타냈으며 S/N비가 +5 dB일 때 85%로 가장 낮은 값을 나타냈다. 전체 음성요해도 값을 살펴보았을 때 고령자 음원이 청년음원보다 0% ~ 5% 낮은 음성요해도 값을 나타냈으며, S/N비가 +5 dB일 때는 음원간 차이는 없는 것으로 나타났다.

듣기 어려운 정도의 경우, Fig. 2에서와 같이 청년음원은 S/N비 +5 dB ~ +25 dB 범위에서 12% ~ 44%의 듣기 어려운 정도를 나타냈다. 또한 S/N비 +15 dB와 +25 dB 음원의 듣기 어려운 정도는 4%로 차이는 미미하였으며, S/N비가 +5 dB일 때 44%로 가장 높은 값을 나타냈다. 고령자 음원의 경우도 전체 17% ~ 49%의 듣기 어려운 정도 값을 나타내었고 S/N비가 감소함에 따라 듣기 어려운 정도가 증가하였다. S/N비가 +25 dB에서 +15 dB로 감소할 때 듣기 어려운 정도가 5% 증가하였고 S/N비가 +15 dB에서 +5 dB로 감소할 때는 27%가 증가하여 가장 높은 값인 49%인 것으로 나타났다. 전체 듣기 어려운 정도를 살펴보았을 때 고령자음원이 청년음원보다 2% ~ 10% 높은 듣기 어려운 정도 값을 나타냈다.

3.2 잔향시간

Fig. 3은 4종류의 주거환경소음 전체에 대하여 소음음압레벨이 40 dBA일 경우 잔향시간에 따른 청년과 고령자 음원의 음성요해도와 듣기 어려운 정도를 나타내고 있다. 음성요해도와 듣기 어려운 정도의 계산은 앞절에서 언급한 방법과 동일하게 하였다.

먼저 음성요해도의 결과를 살펴보면 청년음원의

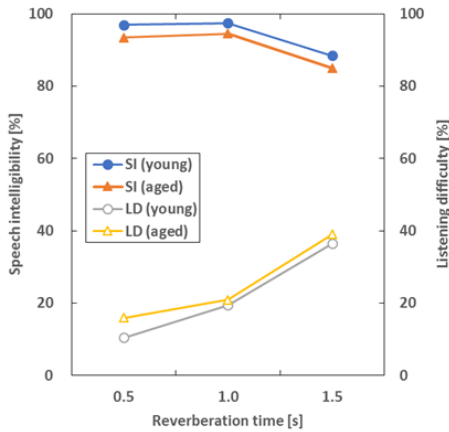


Fig. 3. Speech intelligibility and listening difficulty for the young and the aged sound sources as a function of reverberation time at 40 dBA noise level for all noise types; SI and LD indicate speech intelligibility and listening difficulty, respectively.

경우 잔향시간 0.5s~1.5s 범위에서 89%~98%의 음성요해도 값을 나타냈다. 또한 잔향시간 0.5s와 1.0s 음원의 음성요해도 값의 차이는 미미하였으며 잔향시간이 1.5s일 때 89%로 가장 낮은 값을 나타냈다. 고령자 음원의 경우도 전체 85%~95%의 음성요해도 값을 나타냈으며 청년음원보다 3%~4% 낮은 음성요해도 값을 나타냈다. 잔향시간이 0.5s와 1.0s 음원의 음성요해도 값의 차이는 미미하였으며 S/N비가 +5dB일 때 85%로 가장 낮은 값을 나타냈다.

듣기 어려운 정도의 경우 Fig. 3에서와 같이 청년음원의 경우 잔향시간 0.5s~1.5s 범위에서 11%~37%의 듣기 어려운 정도를 나타냈다. 또한 잔향시간이 증가함에 따라 듣기 어려운 정도가 증가하였으며, 잔향시간이 0.5s에서 1.0s로 증가할 때보다 1.0s에서 1.5s로 증가할 때 듣기 어려운 정도의 증가량이 크게 나타나 1.5s 음원에서 37%의 가장 높은 듣기 어려운 정도를 나타내었다. 고령자 음원의 경우도 전체 16%~39%의 듣기 어려운 정도 값을 나타내어 청년음원보다 2%~6% 높은 듣기 어려운 정도 값을 나타냈다. 또한 청년음원과 동일하게 잔향시간이 증가함에 따라 듣기 어려운 정도도 증가하였으며 잔향시간이 0.5s에서 1.0s로 증가할 때 보다 1.0s에서 1.5s로 증가할 때 듣기 어려운 정도의 증가량이 크게 나타나 1.5s 음원에서 39%의 가장 높은 듣기 어려운 정도를 나타내었다.

3.3 소음 종류

Fig. 4는 청년음원과 고령자음원 전체를 대상으로 소음 제시레벨 및 S/N비와 잔향시간에 따른 소음 종류(충격소음, 정상소음)별 음성 요해도와 듣기 어려운 정도를 나타내고 있다. Fig. 4의 음성요해도와 듣기 어려운 정도의 값은 충격(impulsive)소음의 경우 점핑음을, 정상(stationary)소음의 경우 도로, 음악, 배수소음을 대상으로 하였다.

먼저 Fig. 4(a)에서와 같이 소음 제시레벨 및 S/N비에 따른 결과를 살펴보면, S/N비 +5dB~+25dB 구간에서 충격소음의 음성명료도는 94%~97%로 정상소음의 값(82%~94%)보다 3%~12% 높은 값을 나

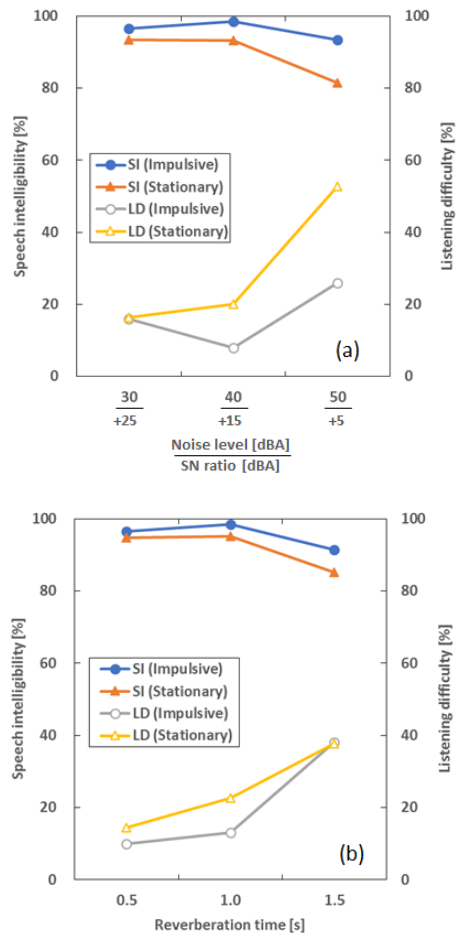


Fig. 4. Speech intelligibility and listening difficulty for impulsive sound (jumping) and stationary sound (road, music, drainage) as a function of (a) noise level and S/N ratio and (b) reverberation time ; SI and LD indicate speech intelligibility and listening difficulty, respectively.

타냈다. 듣기 어려운 정도는 충격소음이 8%~26%로 정상소음의 값(16%~53%)과 같거나 낮은 값을 나타냈다. 또한 음성요해도와 듣기 어려운 정도 모두 S/N비가 변화할 때 정상소음보다 충격소음의 변화량이 작은 것으로 나타났다. 특히, S/N비가 +15 dB에서 +5 dB로 감소할 때 두 종류의 소음종류 간 변화량의 차이가 큰 것으로 나타났다.

잔향시간에 따른 소음종류 별 차이를 살펴보면 Fig. 4(b)에서와 같이 잔향시간 0.5 s ~ 1.5 s 구간에서 충격소음의 음성요해도는 92%~99%로 정상소음의 값(85%~95%)보다 2%~6% 높은 값을 나타냈다. 듣기 어려운 정도는 충격소음이 10%~38%로 정상소음의 값(14%~38%)과 같거나 낮은 값을 나타냈다. 또한 음성요해도와 듣기 어려운 정도 모두 잔향시간이 변화할 때 정상소음보다 충격소음의 변화량이 다소 작은 것으로 나타났다.

VI. 토 의

4.1 주거공간에서의 청취능력을 확보하기 위한 S/N비 및 잔향시간

주거공간에서 발생하는 소음과 음성의 음압레벨비(S/N비)에 따른 음성요해도와 듣기 어려운 정도를 S/N비 +5 dB ~ +25 dB 범위에서 조사한 결과, S/N비가 +5 dB일 경우 가장 낮은 음성요해도와 가장 높은 듣기 어려운 정도를 나타내었다. 또한 S/N비 +15 dB와 +25 dB 음원간의 음성요해도와 듣기 어려운 정도 각각의 차이는 미미한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 인공소음을 대상으로 한 기존 연구^[16]의 결과와 유사한 것으로 나타났다. 따라서 Fig. 2와 Fig. 4(a)에서와 같이 주거공간에서 음성의 음압레벨이 55 dB (L_{Aeq})일 경우 충격소음인 바닥충격음(점핑음)은 50 dB ($L_{i,Fmax,AW}$) 이하, 정상소음인 도로, 음악, 배수 소음은 40 dB (L_{Aeq}) 이하의 소음레벨이 확보된다면 고령자 및 청년 음원 모두 90% 이상의 음성요해도와 30% 이하의 듣기 어려운 정도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 주거공간의 잔향시간에 따른 음성요해도와 듣기 어려운 정도를 잔향시간 0.5 s ~ 1.5 s 범위에서

조사한 결과, 잔향시간이 1.5 s일 경우 가장 낮은 음성요해도와 가장 높은 듣기 어려운 정도를 나타내었다. 또한 잔향시간 0.5 s와 1.0 s 음원간의 음성요해도와 듣기 어려운 정도 각각의 차이는 1.0 s와 1.5 s 음원간 차이보다 작은 것으로 나타났다. 따라서, Fig. 2와 Fig. 4(b)에서와 같이 주거공간에서 음성의 음압레벨이 55 dB (L_{Aeq})이고 배경소음이 40 dB (L_{Aeq})일 때 1.0 s 이하의 잔향시간이 확보된다면 고령자 및 청년 음원과 충격 및 정상소음 모두 90% 이상의 음성요해도와 30% 이하의 듣기 어려운 정도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

상기 제안된 소음레벨과 잔향시간에 따른 90% 이상의 음성요해도와 30% 이하의 듣기 어려운 정도의 일반적인 성능수준을 살펴볼 필요가 있다. 우선 음성요해도와 관련하여 기존 문헌^[17]의 AI(Articulation Index)와 단어 정답율(음성요해도)과의 관계를 참고하여 제안된 음성요해도의 성능기준 (매우우수: 90% 이상, 우수: 75% 이상, 보통: 42% 이상, 불량: 41% 이하)에 의하면, 본 연구에서 90% 이상의 음성요해도의 주관적 평가 값은 매우 우수한 성능으로 평가될 수 있다. 한편, 일본 건축학회^[18]에서는 건축공간의 음성전송 성능을 듣기 어려운 정도 기준으로 등급화하였다. 제안된 음성전송 성능 등급화(1등급: 2% 이하, 2등급: 16% 이하, 3등급: 30% 이하, 4등급: 50% 이하)는 건축물에서 회화, 강의 등 음성전달 형태별로 권장 등급을 제시하였으나, 주거 공간과 같이 특정 공간에 따른 성능 등급은 제시되지 않은 상황이다. 본 연구에서 제안된 30% 이하의 듣기 어려운 정도는 일본 등급기준에 의하면 3등급으로 평가될 수 있다.

4.2 주거환경 소음 종류에 따른 음성요해도

소음종류 별(충격소음, 정상소음) S/N비 및 잔향시간에 따른 음성요해도와 듣기 어려운 정도를 조사한 결과, Fig. 4에서와 같이 전체적으로 충격소음이 정상소음보다 높은 음성요해도와 낮은 듣기 어려운 정도를 나타내었다. 이러한 결과는 음성이 제시되었을 때 충격소음에 의한 마스킹 효과가 정상소음보다 작았기 때문이며, 이는 소음종류간 음에너지, 주파수 특성과 시간특성 차이로 그 원인을 유추할 수 있다.

본 연구에서는 충격소음(점핑)의 경우 국내에서 중량충격음 평가 시 이용하는 단일평가지수(역A레벨, $L_{i,Fmax,AW}$)기준으로 하여 소음제시레벨을 설정하였으며, 이를 정상소음(도로, 음악, 배수소음)의 평가 지수인 L_{Aeq} 로 산정하였을 때 충격소음이 정상소음보다 5 dB 낮은 레벨이었다. 또한 본 연구에 활용된 소음원의 주파수특성을 살펴보았을 때, Fig. 1과 같이 충격소음은 저주파 대역에서는 높은 음에너지를 갖고 있으나 음성 청취능력을 결정하는 중요 주파수 대역인 1 kHz 이상 대역에서는 정상소음 보다 매우 작은 음에너지를 갖고 있다. 또한 시간특성을 살펴 보았을 때, 본 연구에서는 약 1.2s~1.5s의 길이를 갖는 단발충격소음이 6개 포함된 음원을 활용하였는데 제시된 음성(1s~2s 길이)과 겹쳐지는 구간은 최초 단발 충격음 제시 구간이 되며, 이 구간에서도 충격음 특성에 따라 음에너지가 급속히 감쇠되게 된다. 따라서, 매우 짧은 시간에만 충격음이 음성을 마스킹하게 된다. 결론적으로, 충격소음이 낮은 L_{Aeq} 레벨, 1 kHz 이상 대역에서의 낮은 음에너지와 짧은 마스킹 시간으로 인해 충격소음이 정상소음보다 높은 음성요해도와 낮은 듣기 어려운 정도를 나타낸 것으로 판단된다.

4.3 고령자 청력손실의 영향

본 연구에서는 고령자의 청력손실에 따른 음성요해도와 듣기 어려운 정도를 조사하기 위해 65세 남성의 청력손실 만큼 고주파대역의 음에너지를 저감 시킴 음원(고령자 음원)을 이용하여 청년음원과 비교 분석하였다. 실험결과, Figs. 2와 3에서와 같이 음성과 주거환경소음의 S/N비에 따른 결과를 살펴 보았을 때, 고령자 음원이 청년 음원보다 음성요해도는 0%~5% 낮았으며 듣기 어려운 정도는 2%~10% 정도 높은 것으로 나타났다. 또한 주거공간의 잔향 시간에 따른 결과에서는 고령자 음원이 청년 음원보다 음성요해도는 3%~4% 낮았으며 듣기 어려운 정도는 2%~6% 정도 높은 것으로 나타났다. 상기, 청년 음원과 고령자 음원의 음성요해도와 듣기 어려운 정도의 차이는 앞서 미국 ANSI^[17]와 일본 건축학회 음성전송 성능 등급^[18]을 고려하였을 때 동일 성능 등급으로 평가가 되는 비교적 작은 차이라고 볼 수

있다. 또한 이러한 본 연구에서의 고령자 음원과 청년음원의 차이 값은 기존 연구 결과^[8-11]에 나타난 5%~20%의 차이 보다 작은 것으로 나타났다. 기존 연구와 본 연구에서의 결과 차이는 피험자, 청력손실 값, 소음종류, S/N비 조절 방법, 소음 제시레벨, 제시 단어의 언어 등의 차이에 의한 것으로 판단된다. 기존 연구는 청력손실 뿐만 아니라 인지능력이 감소하는 실제 고령자를 대상으로 실험을 진행하였으며, 피험자의 청력손실도 본 연구에서 활용된 값보다 큰 값을 나타내었다. 또한 기존 연구에서는 주거공간에서 실제 발생된 주거환경소음이 아니라 대부분 인공적인 소음인 Hoth noise^[15,16]를 이용하였고, S/N비 제어는 소음의 제시레벨을 고정하고 음성의 제시레벨을 조절함으로써 실험이 진행되었다. 또한 본 연구에 사용된 한국어 단어의 언어적 특성에 의해 영어와 일본어를 활용한 기존 연구와 다른 결과가 도출되었을 수도 있다는 점을 고려해 볼 수 있다. 따라서 향후 고령자 청력손실을 고려한 음성요해도 연구에는 피험자, 소음종류, 소음 및 음성의 제시레벨, 언어 및 단어의 특성 등 다양한 영향요소를 검토하여 진행하여야 할 것이다.

4.4 음성 요해도와 듣기 어려운 정도와의 관계

본 연구에서는 주거공간에서의 음성 청취 능력을 평가할 수 있는 지표인 음성요해도와 듣기 어려운 정도를 이용하였다. Fig. 5는 본 연구에서 다양한 소

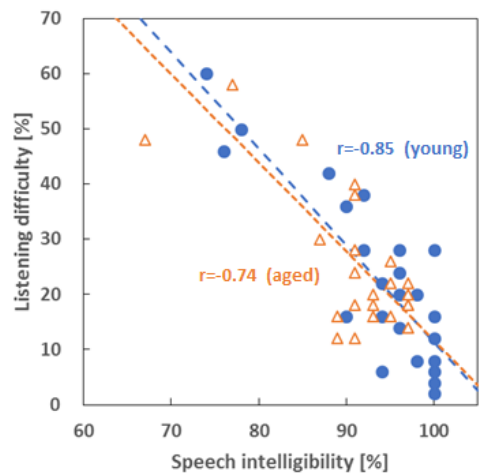


Fig. 5. Relationship between speech intelligibility and listening difficulty for young and aged sound sources.

음 및 잔향환경에서 조사된 음성요해도와 듣기 어려운 정도의 관계를 나타내고 있다. Fig. 5의 데이터는 청년 및 고령자 음원별로 주거환경 소음 4종류에 대한 모든 S/N비 +5 dB ~ +25 dB와 잔향시간 0.5 s ~ 1.5 s 음원의 결과를 나타내고 있다. Fig. 5에서와 같이 음성요해도와 듣기 어려운 정도의 관계는 음의 상관성을 갖는 것으로 나타났고, 고령자 음원의 상관계수가 -0.74로 청년 음원의 값(-0.85)보다 낮은 것으로 나타났다. 이러한 본 연구의 음성요해도와 듣기 어려운 정도의 관계는 기존 연구¹⁶⁾와 유사한 결과로 나타나 주거환경소음을 대상으로 주거공간에서의 음성 청취능력을 평가할 때 음성요해도와 더불어 듣기 어려운 정도라는 평가지표도 활용 가능할 것으로 판단된다. 또한 Fig. 5에서와 같이 동일한 공간음향조건에서 듣기 어려운 정도의 평가 범위는 약 50 %로서 음성요해도의 값(약 30 %)보다 넓다. 특히, S/N비가 높은 영역에서 음성요해도의 값은 95 % 이상으로 변동이 작으나 듣기 어려운 정도는 넓은 평가 범위를 보여주고 있어 듣기 어려운 정도가 공간의 음성 전송 성능 평가에 보다 높은 변별력을 갖는 것으로 판단된다.

V. 결 론

본 연구에서는 주거공간에서 고령자를 고려한 소음 및 잔향에 따른 음성요해도 및 듣기 어려운 정도를 청취실험을 통해 조사하였다. 청취실험 결과, 음성레벨이 55 dB (L_{Acq})일 때 잔향시간 1.0 s 이하 조건에서 충격소음(점핑음) 50 dB ($L_{i,Fmax,AW}$)와 정상소음(도로, 음악, 배수 소음) 40 dB (L_{Acq}) 이하의 소음레벨에서는 고령자 및 청년 음원 모두 90 % 이상의 음성요해도와 30 % 이하의 듣기 어려운 정도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

음성레벨과 주거환경소음에 대한 S/N비 +5 dB ~ +25 dB와 잔향시간 0.5 s ~ 1.5 s 조건에서 고령자 음원이 청년 음원보다 음성요해도는 0 % ~ 5 % 낮았으며 듣기 어려운 정도는 2 % ~ 10 % 정도 높은 것으로 나타났다. 이 결과는 기존 연구결과 대비 다소 작은 값으로 나타났는데, 향후 고령자 청력손실을 고려한 음성요해도 연구에는 피험자, 소음종류, 소음 및 음

성의 제시레벨, 언어 및 단어의 특성 등 다양한 영향요소를 검토하여 진행하여야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2016R1D1A1B-03932172).

References

1. J. S. Bradley, "On the combined effects of signal-to-noise ratio and room acoustics on speech intelligibility," *J. Acoust. Soc. Am.* **106**, 1820-1828, (1999).
2. G. Fairbanks, "Test of phonetic differentiation: The Rhyme Test," *J. Acoust. Soc. Am.* **30**, 596-600. (1958).
3. D. N. Kalikow, K. N. Stevens, and L. L. Elliott, "Development of a test of speech intelligibility in noise using sentence materials with controlled word predictability," *J. Acoust. Soc. Am.* **61**, 1337-1351 (1977).
4. R. Plomp and M. Mimpen, "Speech-reception threshold for sentences as a function of age and noise level," *J. Acoust. Soc. Am.* **66**, 1333-1342 (1979).
5. M. H. Han, T. G. Lee, Y. K. Oh, and S.W. Kim, "A study on the method of assessing spatial speech transmission quality as an indicator of room acoustics," *J. Acoust. Soc. Kr.* **10**, 5-11 (1991).
6. M. Morimoto, H. Sato, and M. Kobayashi, "Listening difficulty as a subjective measure for evaluation of speech transmission performance in public spaces," *J. Acoust. Soc. Am.* **116**, 1607-1613 (2004).
7. J. S. Bradley, "Speech intelligibility studies in classrooms," *J. Acoust. Soc. Am.* **80**, 846-854 (1986).
8. H. Sato, K. Kuarakata, and T. Mizunami, "Accessible speech messages for the elderly in rooms," *Proc. WESPAC 2006* (2006).
9. W. Yang and M. Hodgson, "Auralization study of optimum reverberation times for speech intelligibility for normal and hearing-impaired listeners in classrooms with diffuse sound fields," *J. Acoust. Soc. Am.* **120**, 801-807 (2006).
10. H. Sato, H. Sato, and M. Morimoto, "Effects of aging on word intelligibility and listening difficulty in various reverberant fields," *J. Acoust. Soc. Am.* **121**, 2915-2922 (2007).
11. H. Sato, H. Sato, M. Morimoto, and R. Ota, "Acceptable range of speech level for both young and

- aged listeners in reverberant and quiet sound fields,” J. Acoust. Soc. Am. **122**, 1616-1623 (2007).
12. ISO 7029:2017 Acoustics - Statistical distribution of hearing thresholds related to age and gender (2017).
 13. J. K. Ryu and Y. K. Oh, “A need for a Korea building code on the acoustic design for hearing impaired seniors,” J. KIAEBS, **9**, 139-144 (2015).
 14. EPA Report, “Speech levels in various noise environments” (1977).
 15. ITU-T P.800 : Methods for subjective determination of transmission quality (1996).
 16. D. F. Hoth, “Room noise spectra at subscribers’ telephone locations,” J. Acoust. Soc. Am. **12**, 99-504 (1941).
 17. American National Standard Institute, *Methods for the Calculation of the Articulation Index*, ANSI S3.5, 1969.
 18. Architectural institute of Japan environmental standard (AIJES), *Standards for evaluation of speech transmission performance in built environment* (Architectural Institute of Japan, 2011). Chap. 3.

저자 약력

▶ 오 양 기 (Yang Ki Oh)



1984년 2월: 서울대학교 건축학과 공학사
 1986년 2월: 서울대학교 건축학과 공학석사
 1990년 2월: 서울대학교 건축학과 공학박사
 1991년 3월~현재: 목포대학교 건축학과 교수

▶ 류 종 관 (Jong-Kwan Ryu)



2000년 2월: 성균관대학교 건축공학과 학사
 2003년 2월: 한양대학교 건축공학과 석사
 2007년 2월: 한양대학교 건축공학과 박사
 2010년 8월: Post-doctoral course in AIST, Japan
 2011년 5월: 한양대학교 건축공학과 연구조교수
 2015년 8월: 포스코건설 R&D center 책임연구원
 2015년 9월~현재: 전남대학교 건축학부 교수

▶ 송 한 솔 (Han-Sol Song)



2015년 2월: 강릉원주대 토목공학과 학사
 2018년 9월~현재: 전남대학교 건축공학과 석사과정