

회의실 유리창 진동음의 음성 명료도 분석

Speech Intelligibility Analysis on the Vibration Sound of the Glass Window of a Conference Room

김 석 현† · 김 희 동* · 김 윤 호**

Seockhyun Kim, Heedong Kim and Yoonho Kim

(2007년 2월 28일 접수 ; 2007년 3월 26일 심사완료)

Key Words : Vibration Sound of a Glass Window(유리창 진동음), Speech Intelligibility(음성 명료도), Modulation Transfer Function(변조전송함수), Speech Transmission Index(음성전송지수), Eavesdropping(도청)

ABSTRACT

The purpose of the study is to obtain acoustical information to prevent eavesdropping of the glass window. Speech intelligibility was investigated on the vibration sound detected from the glass window of a conference room. Objective test using speech transmission index(STI) was performed to estimate quantitatively the speech intelligibility. STI was determined based on the modulation transfer function(MTF) of the room-glass window system. Using Maximum Length Sequency (MLS) signal as a sound source, impulse responses of the glass window and MTF were determined by signals from accelerometers and laser doppler vibrometer. Finally, speech intelligibility of the interior sound and window vibration were compared under different sound pressure levels and amplifier gains to confirm the effect of measurement condition on the speech intelligibility.

1. 서 론

근래 불법 도청이 사회적으로 주목을 끌고 있는 가운데, 그 방지 대책 마련에 많은 관심이 모아지고 있다. 특히 실내 음성의 전달 경로 중에서도 유리창은 음향에너지를 가장 잘 투과시키므로 도청의 주요 대상이 된다. 유리창 진동음의 탐지에는 마이크로폰, 가속도계를 사용할 수 있으며, 레이저 빔을 이용한 원격 모니터링도 가능하다. 특히 원격 레이저 빔의 이용은 원거리에서 대화 정보를 입수할 수 있는 점과, 도청 여부를 점검하는 보안검색 단계에서도 그 존재 여부를 알 수 없는 점 때문에 문제의 심각성이

크다⁽¹⁾. 그러나 역으로 이러한 음 탐지 기술은 군 작전이나 대테러 작전에서는 정보를 취득하는 효과적인 방법으로 사용될 수도 있다⁽²⁾. 이러한 음의 탐지 및 평가 기법은 그 성격상 연구결과가 잘 공개되지 않는다. 음성 명료도에 관한 연구는 주로 실내 공간만을 대상으로 수행되어 왔다. 긴 실내공간의 잔향 시간 및 음성 명료도의 예측모델에 관한 연구와⁽³⁾, 흡음재 처리에 따른 승용차 차실의 음 명료도를 AI를 사용하여 분석한 연구가⁽⁴⁾ 수행된 바 있다. 음성 전송과 관련하여 확성전화기의 전송성능과 실내 음장 영향을 함께 고려한 음성 명료도 평가⁽⁵⁾가 수행된 바 있으며, 최근 직방형상자-유리창 모형을 대상으로 유리창 도청음의 명료도 분석이⁽⁶⁾ 보고된 바가 있다. 이 연구에서는 실제 회의실 내에서 음성신호를 발생시킬 때 탐지되는 유리창의 진동으로부터 실내의 음성 정보를 얼마나 인식할 수 있는가를 검토한다. 음성 정보

† 교신저자; 정회원, 강원대학교 기계메카트로닉스공학부
E-mail : seock@kangwon.ac.kr

Tel : (033) 252-2595, Fax : (033) 257-4190

* 한국외국어대학교 정보통신공학과

** 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과

의 인식 수준인 음성명료도를 객관적으로 정량화시키기 위하여, IEC 60268-16⁽⁷⁾에서 규정한 음성전송지수(STI: speech transmission index)를 사용한다.

실내 음원과 유리창 진동음 사이의 전달특성인 MTF(modulation transfer function)⁽⁸⁾에 근거하여 STI를 결정한다. 회의실-유리창계의 MTF를 실험적으로 구하기 위하여, 음성 신호 대신에 MLS(maximum length sequence)⁽⁹⁾ 신호음을 음원으로 사용한다. MLS 신호음과 마이크로폰으로 측정된 실내 음향신호로부터 실내 공간의 STI를 구하고, 가속도계와 레이저빔 센서로 측정된 유리창 진동 신호로부터 진동음의 STI를 결정한다. 음원 음압과 증폭기 이득에 따른 실내 음향과 유리창 진동음의 음성명료도를 비교 분석한다. 이 연구의 주요 내용은 실제 회의실 환경에서 유리창을 통하여 측정된 실내 음성 정보의 인식 정도를 정량화시켜 평가하는 것이며, 이 과정에서 측정 조건 및 실내외 음향 환경이 음성명료도에 미치는 영향을 파악하여 도청 방지 환경의 조성과 도청 방지 장치의 설계에 유용한 정보를 주고자 하는 것이 이 연구의 목적이다.

2. 음성 명료도의 객관적 분석방법

음성전송시스템의 전달성능을 평가하는 데는 계획된 언어 자료를 사용하여 청취자를 대상으로 직접

주관적으로 평가하는 방법이 있다⁽¹⁰⁾. 이 방법은 직접성이란 장점이 있으나, 잘 훈련된 다수의 화자 및 청취자를 필요로 하는 점과, 많은 시간과 경비가 소요되는 문제가 있다. 주관적 평가법을 대신하는 객관적 평가법에서는 음성과 유사한 변조특성을 갖는 신호음이 전달되는 과정에서 발생하는 변조특성의 변화로부터 음성정보의 손실 정도, 즉 인식 수준을 평가한다. 객관적 평가를 위하여 Houtgast와 Steeneken⁽¹¹⁾은 AI법⁽¹²⁾의 개선 모델로, 시간 영역상의 교란과 비선형 왜곡까지를 고려하여 명료도를 정량화시키는 방법을 제시하였다. 이 방법은 네덜란드어⁽¹¹⁾ 및 영어를⁽¹³⁾ 대상으로 직접 평가 결과와의 상관성이 매우 높다는 것이 입증되었으며, 현재 IEC 국제기준으로⁽⁷⁾ 사용되고 있다.

이 방법에서는 Fig. 1의 음성전달계를 대상으로 다음의 입출력 변조신호의 관계를 고려한다.

$$s(t) = \bar{I}_i(1 + m_i \cos 2\pi F_m t) \quad (1)$$

$$r(t) = \bar{I}_o(1 + m_o \cos 2\pi F_m(t + \tau)) \quad (2)$$

여기서, \bar{I}_i , \bar{I}_o 는 입출력 신호의 평균 인텐시티, F_m 은 변조주파수를, m_i , m_o 는 변조계수(modulation index)를 의미한다.

MTF는 다음과 같이 정의되며, 음성전달계를 통한 변조신호의 크기 변화를 표시한다.

$$m(F_m) = \frac{m_o}{m_i} \quad (3)$$

MTF가 낮아지면 음성전달계를 통하여 음성명료도가 저하되어 음성의 인식이 어려워진다.

Schroeder⁽¹⁴⁾에 의하면, MTF는 다음과 같이 잔향 지배향과 잡음 지배향으로 구성된다.

$$m(F_o, F_m) = \frac{\left| \int_{-\infty}^{+\infty} h^2(t, F_o) e^{-2\alpha F_m t} dt \right|}{\int_{-\infty}^{+\infty} h^2(t, F_o) dt} \cdot \frac{1}{1 + 10 \frac{S/B(F_o)}{10}} \quad (4)$$

여기서, $h(t, F_o)$: 음성전달계의 충격응답함수

S/B: 압소음에 대한 신호음 응답비

F_o : 125 Hz~8,000 Hz 7개 옥타브 대역 중심주파수

F_m : 변조주파수(0.63 Hz~12.5 Hz 범위에서 1/3

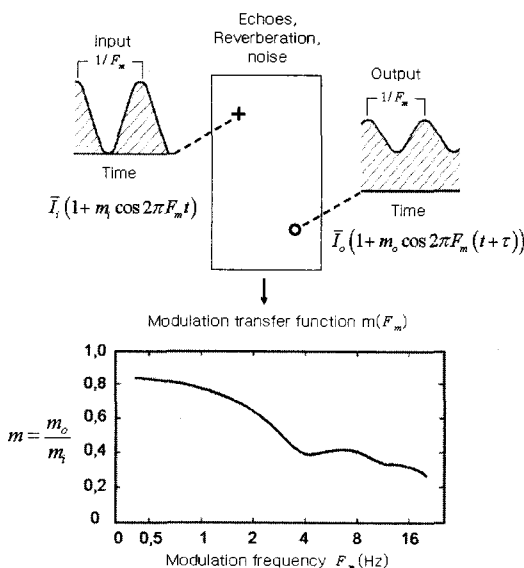


Fig. 1 Modulation transfer function

옥타브 대역 14개의 중심 주파수)

총 98개의 MTF을 구하면, 잡음 및 잔향을 고려한 전달계의 SNR은 다음과 같이 구할 수 있다⁽¹¹⁾.

$$(S/B)_{ap}(F_o, F_m) = 10 \log_{10} \left(\frac{m(F_o, F_m)}{1 - m(F_o, F_m)} \right) \quad (5)$$

옥타브 대역별로 14개의 변조 주파수에 대한 산술평균치 $(\overline{S/B})_{ap}(F_o)$ 를 구한 후, 7개 옥타브 대역별로 가중치 W_{F_o} 를 부여하여 전달계의 총 SNR을 구하면 다음과 같다.

$$(\overline{S/B})_{ap} = \sum_{F_o} W_{F_o} (\overline{S/B})_{ap}(F_o) \quad (6)$$

여기서, 옥타브 대역별 가중치는 Houtgast와 Steeneken⁽¹¹⁾이 제시한 다음 값을 사용하였다.

$$\begin{aligned} W_{125} &= 0.129, & W_{250} &= 0.143, & W_{500} &= 0.114, \\ W_{1000} &= 0.114, & W_{2000} &= 0.186, & W_{4000} &= 0.171, \\ & & & & W_{8000} &= 0.143 \end{aligned}$$

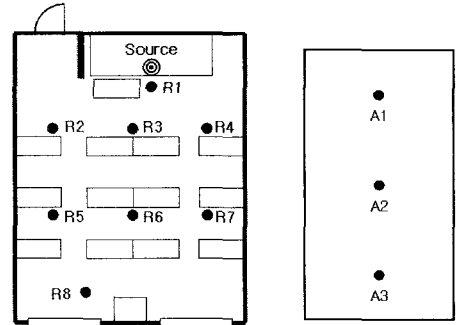
최종적으로 0~1의 범위를 갖도록 정규화시킴으로써 STI를 다음과 같이 결정한다.

$$STI = \frac{(\overline{S/B})_{ap} + 15}{30} \quad (7)$$

3. 실험방법

일반 강의동 건물 3층에 위치한 7m×9m×2.65m 크기의 회의실은, 바닥은 카펫 처리되었고 유리창을 제외한 측면은 합판과 천으로, 천정은 석고보드로 내장 처리된 상태이다. Fig. 2는 회의실 내 음원과 마이크론 및 유리창의 진동 측정 위치를 표시한다. 유리창은 크기 630 mm×1240 mm, 두께는 3 mm 유리 - 6 mm 공기층 - 3 mm 유리의 회의실용 2중 유리창이다. 음원은 Fig. 2에서와 같이 회의실 앞 중앙 약간 우측에 위치하며, R1~R8의 8개 지점 1m 높이에서 음향을, 유리창 위 A1~A3의 3개 지점에서 진동을 측정하였다.

Table 1은 측정 및 분석에 사용된 실험 기기를 표시한다. 비접촉 센서로는 Polytec사의 PDV-100 레이저 도플러 속도센서를 사용하였고, 음원 발생과



Window Glass

(a) Conference room (b) Glass window

Fig. 2 Conference room and glass window for intelligibility analysis

Table 1 Experimental devices

Devices	Models
Laser doppler vibrometer	Polytec PDV-100
Data aquisition and signal analyzer	Symphonie(01dB-Stell) B&K 2035
Room acoustics S/W	dBBAi32(01dB-Stell)
Sound level meter	SIP95(01dB-Stell)
Microphone	GRAS 40AF
Microphone calibrator	B&K 4231
Accelerometer calibrator	B&K 4294
Accelerometer and charge amplifier	B&K 4383, B&K 2635
Audio system	Amplifier : YAMAHA RX-V550 Speaker : Infinity Primus 360

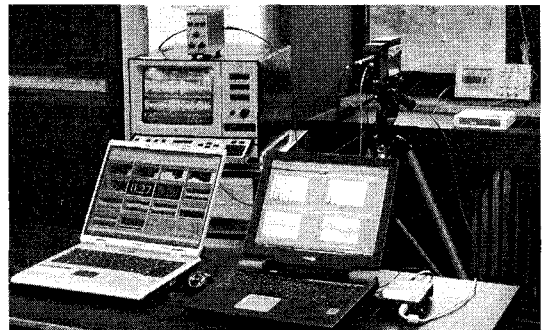


Fig. 3 Photo of experimental set up

음향 및 진동 신호의 취득, 임펄스응답 및 잔향시간의 결정, 그리고 MTF 및 STI의 반복 측정을 위하여 상용 S/W인 dBBA132 (01dB-Stell사)⁽¹⁵⁾를 사용하였다. 가속도계로는 Fig. 2(b)의 3개 지점의 진동을 유리창 내/외측면상에서 동시에 측정하였다. 레이저 진동 센서는 3층에 위치한 회의실 여건상 실내 A2 지점 1m 앞에 설치하여 유리창 내면의 속도를 측정하였고, 내/외측면상에서 동시에 측정된 가속도 신호와 비교하였다. Fig. 3은 측정 장면을 보인다.

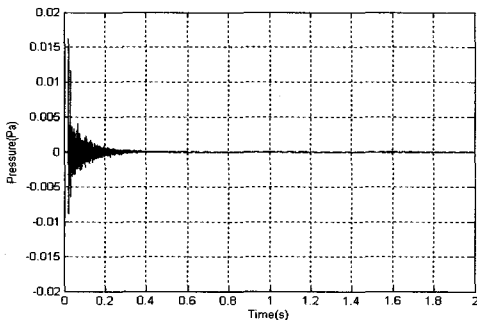
4. 측정 및 명료도 분석 결과

먼저 실내 음향특성을 파악하기 위하여 MLS 음원 하에 R1~R8 지점 음향의 임펄스응답을 구하였다. Schroeder⁽¹⁶⁾의 방법에 따라, 임펄스응답을 대상으로 대역 통과 및 역시간 적분(reverse time integration)을 수행하여 대역별 잔향시간을 결정하였다. MLS 음원은 ±1의 펄스가 주기적으로 구성된 랜덤 백색 잡음이다. 입출력 사이의 교차상관함수(cross correlation function)를 이용하여 임펄스응답을 구하게 되므로 압소음 영향을 최소화 시키고,

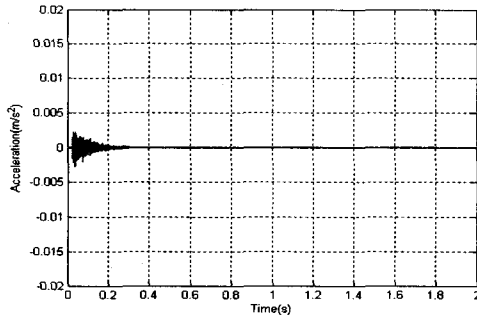
여러 펄스응답을 주기적으로 동기화시켜 평균함으로써, SNR을 향상시키는 장점이 있다. Fig. 4는 유리창 부근 R8 지점의 음향 임펄스응답과, 유리창 하부의 가속도 임펄스응답을 보인다. Fig. 5는 회의실내 8개 지점에서 측정된 옥타브 대역별 잔향시간이다. 잔향시간은 실내 공간의 음성명료도에 영향을 미치는 중요한 인자로, 잔향시간이 길어지면 음성명료도는 저하되는 것으로 알려져 있으며^(3,5), 음원으로 사용되는 MLS신호음의 길이 조건에도 관계된다.

신호음과 압소음(압진동)의 상대적인 관계는 음성명료도에 큰 영향을 미친다. Fig. 6은 MLS 신호음 유무시 실내 음압 및 유리창 진동의 레벨을 보인다. 그림은 비교적 조용한 오후에 창문을 완전히 닫은 상태에서 측정된 결과이다. 레이저 도플러 속도센서의 감도는 최대치인 50 V/ms⁻¹를 사용하였고, 가속도계용 전치증폭기의 이득은 316 mV/ms⁻²로 하였다. 신호음(R1에서 78 dB(A) 정도)을 발생시킬 때 R8 지점의 음압은 68 dB(A) 정도였다. 신호음이 없는 상태에서 실외 압소음에 의한 실내 음압 레벨은 30 dB(A) 아래였으며, 창밖은 40 dB 이상이였다. IEC 기준에 따르면, 신호음과 압소음이 15 dB 이상 차이 나는 경우 압소음이 명료도에 주는 효과는 무시된다. Fig. 6(b)의 가속도 진동레벨(10⁻⁶ m/s² 기준)에서는 신호음 발생시의 유리창 진동과 압소음에 의한 진동의 차이가 실내음에서 보다 훨씬 작다. 500 Hz 아래 저주파수 대역으로 가면 거의 대등한 수준이 된다. 이는 유리창 진동음의 명료도 분석시, 조용한 환경에서도 식(4)의 우변 두 번째 항이 반영되어야 함을 의미한다.

Fig. 7은 음성전달계를 오디오시스템과 회의실로 국한 시킬 때의 음성 명료도 분석 결과이다. 매 2.6 초 길이의 신호를 16회 평균한 STI값을 구하였다.



(a) Acoustic pressure at R8



(b) Acceleration at A3

Fig. 4 Impulse responses

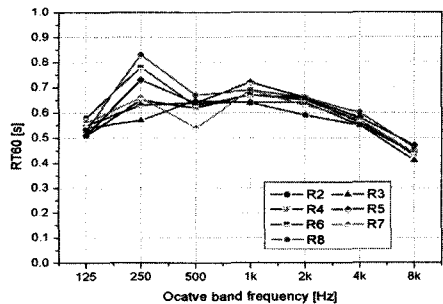
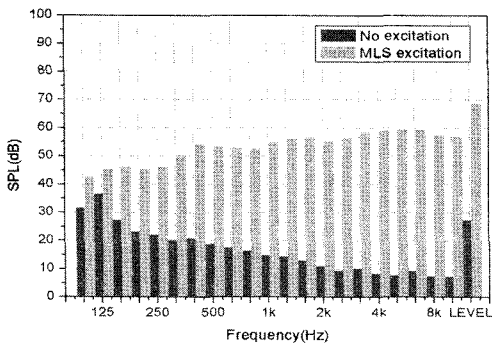


Fig. 5 Reverberation time

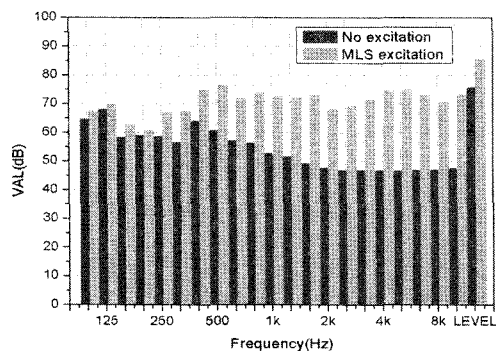
Fig. 7에 표시된 STI의 구간별 음성명료도 등급은 IEC60268-16⁽⁷⁾에 따르는데, 'Excellent'는 명료하게 음성 정보를 파악할 수 있음을 의미하고, 'Good'은 내용 파악에 아무 문제없는 정도를, 그리고 'Poor' 이하는 음성 정보를 파악하기 어려운 상태를 의미한다. Fig. 7에서 스피커 바로 앞 R1 지점의 STI 값이 1에 가까운 것은 오디오시스템의 음성정보 전달 성능에 문제가 없음을 의미한다. 유리창 부근(R8)의 음압 레벨은 음원(R1)에서보다 10 dB 정도 낮게 나왔다.

예상대로 음원에 가까운 지점에서 높은 명료도를 보이고 음원에서 먼 유리창 부근에서 가장 낮은 명료도를 보인다. 그러나 실내 모든 위치에서 명료도가 0.7 이상인 것은 회의실 내 모든 위치에서 음성 정보를 파악하는 데에 별 문제가 없음을 의미한다.

Fig. 8은 동일한 측정조건하에서, 유리창 3개 지점(Fig. 2의 A1~A3)의 내/외측면상에서 측정된 가속도 신호와, 내측면상 A2 지점의 레이저 속도 신호의 STI를 보인다. 세 지점의 위치별 차이가 거의 없는



(a) Acoustic pressure at R8



(b) Acceleration at A3

Fig. 6 Spectrum of MLS, background noise and background vibration

점과, 공기층을 포함하는 이중 유리창임에도 불구하고 내/외측면상의 차이가 거의 없는 점이 흥미롭다. 가속도 신호의 명료도는 0.65 정도로, Fig. 7의 유리창 부근(R8지점) 음성 명료도가 0.71 정도임을 감안할 때, 예상보다 높은 명료도를 보이며, 음성 정보를 파악하는데 별 어려움이 없는 수준이다. 이 결과는 암소음이 신호음에 비해서 현저히 작음에 기인하며, 암소음 레벨에 따라 달라질 것으로 예상된다. 레이저 속도 신호는 가속도 신호에 비하여 STI 값이 조금 떨어지는데, 이 결과는 진동음을 직접 청취하여 평가하였을 때에도 확인되었다.

가속도계는 접촉 면적의 증가적 가속도를 접촉제를 통하여 탐지하고, 가속도계의 질량효과도 있을 수 있다. 레이저 빔은 한 점의 속도를 질량효과 없이 직접 측정함에도 불구하고 가속도 신호에서 음성 정보를 파악하기가 더 용이한 점은 흥미롭다. 여기에는 두 센서 및 증폭기의 성능이 영향을 미칠 수 있으나, 가속도 센서의 고주파수 감지 특성이 속도 센서 보다 우월한 점이 작용하는 것으로 보인다. 이를 확인하기 위하여 두 센서의 동시적 응답 신호의 스펙트럼을 Fig. 9에서 비교한다. 예상대로 레이저 진동계의 속도 신호는 가속도 신호에 비해서 고주파수로 가면서 상대적으로 낮은 파워를 보인다. 이러한

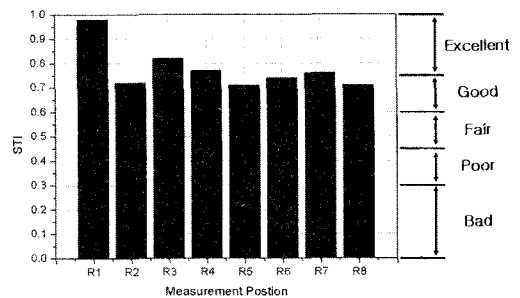


Fig. 7 STI in the conference room

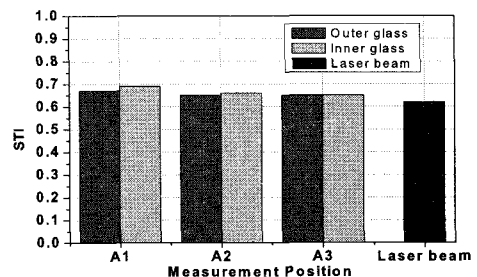


Fig. 8 STI and measurement positions

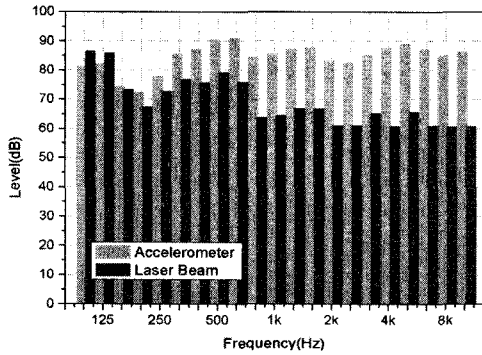


Fig. 9 Spectrum of acceleration and velocity

주파수 특성은 고주파수 성분의 에너지를 크게 발생시키는 마찰음이나 파열음 등의 무성음 음소(phoneme)의⁽¹⁷⁾ 측정에 불리하므로 명료도 저하를 초래할 수 있으며, 원격 레이저빔 탐지시 명료도 개선을 위해서 주파수 가중 처리의 필요성을 시사한다.

증폭기 이득이 명료도에 영향을 미치는가를 확인하기 위하여, 가속도 증폭기의 이득을 316, 100, 31.6, 10, 3.16, 1 mV/ms⁻²으로 변화시키면서 STI 값을 구하였다. Fig. 10은 음원(R1) 음압 60 dB(A) 및 80 dB(A) 하에서 증폭기의 이득에 따른 A2 지점 가속도 신호의 STI를 보인다. 증폭기 이득이 어느 수준 이상이 되면 음성명료도에 큰 변화가 없으나, 이득이 너무 낮아지면 명료도를 크게 저하시키는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 두 음압 하에서 비슷하다.

실내 음원의 음압 레벨 역시 명료도에 영향을 미치는 중요한 요소가 될 것으로 예상된다. 속삭이는 대화음보다 큰 말소리의 도청이 용이함은 쉽게 예상할 수 있다. Fig. 11은 음원 음압을 30 dB(A)~90 dB(A) 범위에서 10 dB 간격으로 증가시키면서, 유리창 부근(R8) 음향 및 유리창 진동(A3)의 STI를 구한 결과이다. 감소음 효과를 보기 위해서 전술한 실험에서보다 다소 높은 50 dB(A)~55 dB(A) 정도의 실외 감소음 하에서 측정하였다. 감소음에 의한 유리창 내/외의 음압 레벨은 15 dB 차이가 났다. Fig. 11에서 실내음의 음성명료도(microphone 표시)는 음원음압 50 dB(A) 이상에서 0.65이상의 매우 양호한 상태를 보인다. 이 범위에서는 신호음에 의한 음압이 실외에서 들어온 감소음보다 높다.

또한, 그림에서 보통의 대화 음압 레벨(R1: 60 dB(A)) 이상에서는 음압이 증가하여도 명료도가 크게 증가하지는 않는다. 음원 음압이 50 dB(A) 아래

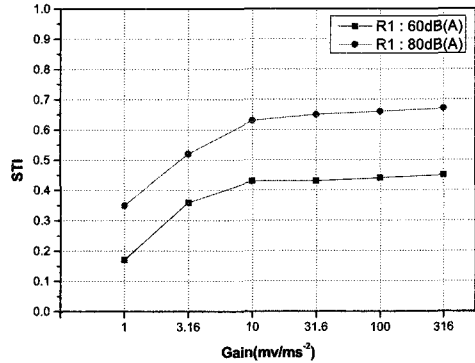


Fig. 10 STI vs. amplifier gain(accelerometer: A2)

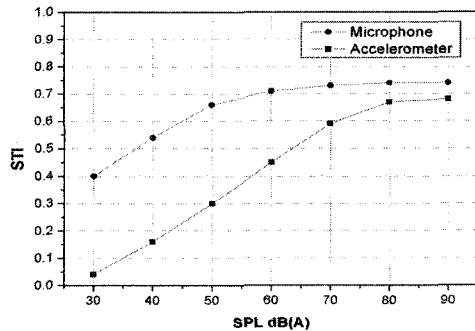


Fig. 11 STI vs. sound source SPL (microphone: R8, accelerometer: A3)

로 떨어지면 감소음이 더 커지면서 실내음의 명료도가 감소된다. 유리창 진동음의 경우, 음원 음압 감소에 따라 STI는 훨씬 빨리 저하된다. 60 dB(A) 아래에서는 STI가 0.45(Fig. 7의 'Poor' 등급) 아래로 떨어져 음성정보의 파악이 어려운 상태가 된다. 이 경우 유리창 안쪽 음압은 50 dB(A) 정도가 되므로, 유리창 바깥의 실외 감소음 레벨이 더 커지는 상태가 된다. 그 결과 실외의 감소음에 의한 진동이 커지면서 STI가 급격히 떨어지는 것으로 보인다. 그러나 감소음의 크기가 수시로 변하는 측정 여건과 감소음의 주파수 특성의 영향 때문에, 감소음 효과를 상세하게 규명하는 데는 한계가 있다. 추후 제어 가능한 감소음을 사용한 후속 연구가 필요하다.

5. 결론 및 토론

MTF에 기초한 STI를 사용하여 회의실 유리창 진동음의 음성명료도를 분석한 결과, 다음의 결론을 얻었다.

(1) 신호음에 의한 유리창 안쪽의 음압레벨이 실외 압소음 레벨보다 높은 경우, 회의실내의 음성명료도는 0.7이상으로 음성정보를 명료하게 인식하는 수준이었다. 이 경우, 유리창 진동음의 명료도는 0.6 정도로, 음성 정보를 충분히 인식할 수 있는 수준이었다. 그러나 신호음에 비하여 압소음 레벨이 더 커지면 유리창 진동음의 명료도가 급격히 저하되었다.

(2) 2중 유리창임에도 유리창 측정점 위치나, 내/외측면상의 명료도 차이는 거의 없었다. 증폭기 이득이 어느 수준 이상에서는 이득을 증가시켜도 명료도에 큰 변화는 없었다.

(3) 고주파수 대역의 반영이 유리한 가속도음이 속도음에 비하여 명료도가 약간 높게 나왔다.

후 기

이 연구는 2006학년도 한국의국어대학교 교내학술연구비의 지원에 의하여 수행되었습니다. 또한, 한국통신보안(주)의 협조에도 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Ahn, K. S., 2002, "No Secret in Seoul : Wiretapping Now", Green Press.
 (2) Kim, H. M., 1997, "A Study of Laser Bounce Listening for Counter Terror Troops", Military Institute of Science, M.S. Thesis.
 (3) Li, K. M. and Lam, P.M., 2005, "Prediction of Reverberation Time and Speech Transmission Index in Long Enclosures", Journal of Acoustical Society of America. Vol. 117, No. 6, pp. 3716~3726.
 (4) Lee, C. K., Kim, J. T., 2000, "Effect of Surface Treatment on Articulation Index for Vehicles", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 10, No. 2, pp. 240~246.
 (5) Jang, D., Kang, S., Sim, D. and Kim, C., 1994, "A Study on the Speech Transmission Index Method for Estimating Articulation of Loudspeaking Telephony", Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol. 13, No. 5, pp. 32~39.
 (6) Kim, S. H., Kim, H. D. and Kim, Y. H., 2007, "Intelligibility Analysis of the Eavesdropping Sound of

Glass Windows Using MTF-STI", Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol. 26, No. 1, pp. 8~15.

(7) IEC, 2003, "Sound System Equipment -Part16 : Objective Rating of Speech Intelligibility by Speech Transmission Index" IEC 60268-16, 3rd edition.

(8) Houtgast, T. and Steeneken, H. J. M., 1973, "The Modulation Transfer Function in Room Acoustics as a Predictor of Speech Intelligibility", Acoustica, Vol. 28, pp. 66~73.

(9) Douglas, D. R., 1989, "Transfer-function Measurement with Maximum-length Sequences", J. Audio Eng. Soc. Vol. 37, pp. 419~444.

(10) ANSI, 1989, "Method for Measuring the Intelligibility of Speech over Communication Systems", ANSI S3.2-1989.

(11) Steeneken, H. J. M and Houtgast, T., 1980, "A Physical Method for Measuring Speech Transmission Quality", Journal of Acoustical Society of America. Vol. 67, pp. 318~326.

(12) French, N. R. and Steinberg, J. C., 1947, "Factors Governing the Intelligibility of Speech Sounds", Journal of Acoustical. Society of America, Vol. 19, pp. 90~119.

(13) Anderson, B.W., and Kalb, J.T., 1987, "English Verification of the STI Method for Estimating Speech Intelligibility of a Communications Channel", Journal of Acoustical Society of America. Vol. 81, No. 6, pp. 1982~1985.

(14) Schroeder, M. R., 1981, "Modulation Transfer Functions: Definition and Measurement", Acoustica, Vol. 49, pp. 179~182.

(15) <http://www.01dB-stell.com>, Intelligibility Criteria : Measurement Method. dBBA132 Application Note , MVI Technologies Group.

(16) Schroeder, M. R., 1965, "New Method of Measuring Reverberation Time", Journal of Acoustical Society of America, Vol. 37, pp. 409~412.

(17) Steeneken, H. J. M., Houtgast, T., 1999, "Mutual Dependence of the Octave-band Weights in Predicting Speech Intelligibility", Speech Communication, Vol. 28, pp. 109~123.