

# MTF-STI를 이용한 유리창 도청음의 명료도 분석

## Intelligibility Analysis on the Eavesdropping Sound of Glass Windows Using MTF-STI

김 석 현\*, 김 회 동\*\*, 김 윤 호\*\*\*

(Seockhyun Kim\*, Hee-dong Kim\*\*, Yoon-ho Kim\*\*\*)

\*강원대학교 기계메카트로닉스공학부, \*\*한국외국어대학교 정보통신공학과,

\*\*\*강원대학교 기계메카트로닉스 대학원

(접수일자: 2006년 11월 7일; 수정일자: 2006년 12월 26일 채택일자: 2007년 1월 6일)

음향 공동-유리창 연성계를 대상으로 도청음의 음성 명료도를 검토한다. MLS신호를 음원으로 유리창의 가속도와 속도 응답을 가속도계와 레이저 도플러 진동계를 사용하여 측정한다. 변조전송함수 (MTF)를 사용하여 공동-유리창 진동계의 음성전달특성을 규명한다. 변조전송함수에 근거하여 음성전송지수 (STI)를 구하고, 유리창 진동음의 음성명료도를 평가한다. 가속도음과 속도음의 음성명료도를 비교하고, 최종적으로 대화음의 명료도를 주관적 평가로 확인한다.

**핵심용어:** 유리창 진동음, 도청, 음성 명료도, 변조전송함수, 음성전송지수

**투고분야:** 구조 음향 및 진동 분야 (11)

Speech intelligibility of the eavesdropping sound is investigated on a acoustic cavity - glass window coupled system. Using MLS (Maximum Length Sequency) signal as a sound source, acceleration and velocity responses of the glass window are measured by accelerometer and laser doppler vibrometer. MTF (Modulation Transfer Function) is used to identify the speech transmission characteristics of the cavity and window system. STI (Speech Transmission Index) based upon MTF is calculated and speech intelligibility of the vibration sound of the glass window is estimated. Speech intelligibilities by the acceleration signal and the velocity signal are compared. Finally, intelligibility of the conversation sound is confirmed by the subjective test.

**Key words:** Vibration sound of glass window, Eavesdropping, Speech intelligibility, Modulation transfer function, Speech transmission index

**ASK subject classification:** Structural Acoustics and Vibration (11)

### I. 서 론

본 연구에서는 실내 음성에 의한 유리창의 진동을 접촉 센서나 비접촉 레이저 센서를 사용하여 도청할 때의 음성 명료도를 검토한다. 실내 음성 정보의 전달 경로 중에서도 유리창은 음향에너지를 잘 투과시키므로 도청의 공략 대상이 된다. 유리창 진동음은 가속도계와 같은 접촉식 센서나 레이저 빔을 이용한 원격지 비접촉 방식으로 탐지될 수 있다. 특히 레이저 이용 기술은 원거리에서 유리창의 미세한 진동을 탐지하여 실내의 대화 정

보를 취득할 수 있는 점과, 도청 여부를 점검하는 보안 검색 단계에서도 그 존재 여부를 알 수 없는 장점이 있다. [1] 이러한 도청 기술이 군 작전이나 대테러 작전에서는 중요한 정보를 파악하는 효과적인 방법으로 사용될 수도 있다. [2] 본 연구에서는 실내 음성에 의한 유리창 진동의 도청음을 대상으로 그 명료도를 정량적인 방법을 통하여 평가한다. 외국의 경우, 도청 전용 레이저 모니터링 장비가 보급되고 [3, 4] 있음에도 불구하고, 장비의 성격상 학술적 연구 결과는 잘 공개되지 않는다. 국내에서는 도청방지 장치가 개발되어 국가기관 및 소요 업체에 보안용으로 이미 보급된 상태이나, 도청 가능성이나 도청 방지 장치의 성능에 대한 객관화된 검증은 이루어지지 않고 있는 실정이다. 본 연구는 도청음의 명료도를

책임저자: 김 석 현 (seock@kangwon.ac.kr)  
200-701 강원도 춘천시 효자2동 192-1, 강원대학교  
기계메카트로닉스공학부  
(전화: 033-250-6372; 팩스: 033-257-4190)

객관적으로 정량화시켜 평가하여 도청 방지 장치의 국산화에 필요한 기본 정보를 제공하기 위한 1단계 연구로 수행되었다. 음향 공동과 유리창을 하나의 음 전달계로 보고, 전달특성인 MTF (Modulation Transfer Function) 을 [5] 구한 후, 전달음의 명료도를 STI (Speech Transmission Index)로 [6] 정량화시켜 평가한다. 음성 명료도의 객관적 평가법은 전송경로를 통하여 전달된 음성의 정보가 얼마나 정확하게 인식되는가를 지수로 정량화시키며, IEC [6]나 ANSI [7]의 기준으로 채택되어 있다. 관련 연구로, 건축물의 실내 음장 해석이나 [8], 승용차와 같은 밀폐된 공간의 음 명료도 분석 [9] 및 전송 장치의 전달 특성 해석 [10] 등이 보고된 바 있으나, 음향계와 연성된 유리창 진동음에 적용한 사례는 아직 보고된 바 없다. 본 연구에서는 MTF-STI 기법을 사용하여 음성명료도에 영향을 미치는 인자들을 검토하고, 도청 방지 대책의 수립과 유사시 실내 정보의 취득 기술에 필요한 데이터를 확보하고자 한다.

## II. 명료도 분석 방법

### 2.1. 분석방법

음성의 명료도 평가는 건축음향 분야에서는 실내의 음향전달 성능을, 음성통신 분야에서는 전송음의 음질을 평가하는 목적으로 사용된다. 음성 전달 성능을 평가하는 데는 문장과 음절 등의 언어 자료를 사용하여 청취자를 대상으로 직접 주관적으로 평가하는 방법이 있다. [11] 이 방법은 평가자가 인식하는 결과를 얻을 수 있는 장점이 있으나, 잘 훈련된 다수의 화자 및 청취자를 필요로 하는 점과, 시간과 경비가 많이 소요되는 제약이 있다. 직접 주관적 평가법을 대신하는 객관적 평가법으로 French와 Steinberg [12]가 제안한 AI (Articulation Index)법이 있는데, 잡음이나 대역 제한과 같은 주파수 왜곡 영향의 설명에는 유효하나, 잔향이나 에코 등 시간 영역상의 왜곡이나 비선형 왜곡을 갖는 전달계에는 적용이 어렵다. 이에 대한 해결책으로 Houtgast와 Steeneken [13]은 시간 영역상의 교란과 비선형 왜곡을 고려하여 명료도를 객관적으로 평가하는 방법을 제시하고, 주관적 평가법과의 높은 상관성을 입증하였다.

이 방법은, 말소리에 사용하는 7개의 옥타브 주파수 대역을 대상으로, 말소리의 음압 변화를 반영하는 14개의 변조 주파수 (1/3옥타브 대역 중심)를 사용하여 화자

로부터 청취자까지의 음성 전달계의 MTF (Modulation Transfer Function)을 [5] 구한다. 7개의 옥타브 주파수 대역별 MTF로부터 전달계의 대역별 SNR (Signal to Noise Ratio)을 구한 후, 주파수기중 합산한 후 정규화시켜 구한 STI (Speech Transmission Index)로 명료도를 산출한다. 이 방법은 네덜란드어 [13] 및 영어를 [14] 대상으로 직접 평가 결과와의 상관성이 매우 높다는 것이 입증되었다. 비정상 잡음 (Non-stationary noise)하에서는 STI와 직접 평가 결과 사이의 상관성에 대한 논란이 있으나 [15], 정상 잡음 (Stationary noise)하에서는 ANSI의 SII (Speech Intelligibility Index)와 함께 객관적 평가 지수로 인정되고 있다. 최근에는 비정상 변동 잡음 (Fluctuating noise)하에서의 보정 방안 [16]이 보고된 바도 있다.

### 2.2. MTF-STI 이론

Fig. 1에 보이는 바와 같이 음성전달계를 통한 입출력 신호는 다음과 같이 표시된다.

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

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

여기서,  $\bar{I}_i$ ,  $\bar{I}_o$ 는 입출력 신호의 평균인텐시티,  $F_m$ 은 변조주파수를,  $m_i$ ,  $m_o$ 는 변조계수 (Modulation Index)이다. 음성 전달계의 MTF는 다음과 같이 정의된다.

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

Schroeder에 의하면 [17] MTF는 다음과 같이 잔향량과 잡음향으로 표시되며, 옥타브대역별로 각 변조 주파수에 대하여 측정이 가능하다.

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

$h(t, F_o)$ 은 음성 전달계의 충격응답함수, S/B는 압소음에 대한 신호음 응답의 비로  $\pm 15$ dB 범위이다.  $F_o$ 는 125 Hz~ 8000 Hz의 7개 옥타브 대역 중심주파수이고, 변조 주파수  $F_m$ 은 각 옥타브대역별로 0.63 Hz~12.5 Hz 범위에서 14개의 1/3 옥타브 대역 중심주파수를 사용한다.

측정을 통하여 구한 총 98개의 MTF로부터, 전달계의 대역별 SNR은 다음과 같이 구할 수 있다. [13]

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

식 (5)는 잔향, 예코, 비선형왜곡 및 잡음 효과를 포함한 전달계의 SNR을 의미하며, 대역별로 14개의 변조주파수에 대한 SNR의 평균치는 다음과 같이 구해진다.

$$(\overline{S/B})_{ap}(F_o) = \left( \frac{\sum_{F_m} (S/B)_{ap}(F_o, F_m)}{14} \right) \quad (6)$$

청각 매스킹 효과 등 (auditory masking and reception threshold)을 고려하고, 7개 옥타브 대역별로 가중치  $W_{F_o}$ 를 부여하여 전달계의 총합 SNR을 구하면 다음과 같다.

$$(\overline{S/B})_{ap} = \sum_{F_o} W_{F_o} (S/B)_{ap}(F_o) \quad (7)$$

최종적으로 SNR을 0 ~ 1의 범위를 갖도록 정규화 시킴으로써 STI 다음과 같이 구하게 된다.

$$STI = \frac{(\overline{S/B})_{ap} + 15}{30} \quad (8)$$

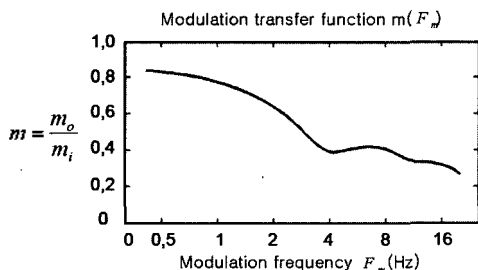
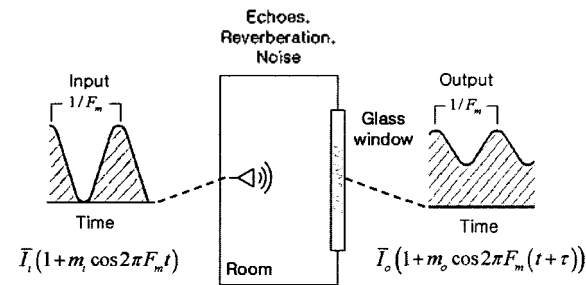


그림 1. 변조전송함수  
Fig. 1. Modulation transfer function.

### III. 실험 장치 및 실험 방법

Fig.2는 실험용 음향 상자의 치수와 전면 유리창의 측정 지점을 표시하고, Fig.3은 실험장면이다. 측정에는 3mm 및 5mm 두께의 일반 유리를 사용하였다.

Fig.3의 실험 장면에서 보이는 바와 같이, 유리창 진동의 측정은 가속도계와 레이저 도플러 진동계 (Polytec PDV-100, 속도센서)를 동시에 사용하였다. 측정 및 분석에 사용된 실험 기기를 Table 1에 정리한다. 가속도계로 Fig.2의 9개 지점에서 유리창 외면의 가속도를 측정하였고, 유리창 외면 1m 앞에서 레이저 빔으로 A5 지점 외면의 진동 속도를 측정하였다. 무향실내 압소음원은 제거하였다. 본 연구에서는 상용 S/W인 dBATI32 (01dB-Stell사)를 사용하여 MTF를 측정하고 STI를 결정하였다. MTF를 측정하기 위한 음원으로는 임펄스 신호보다 재현성과 SNR에서 유리한 MLS (Maximum Length Sequence)를 [18] 사용하였다. 이 방법에서는 ±1의 펄스로 구성된 일정 길이의 랜덤 백색 잡음을 주기적으로 입력시키고 출력 응답을 측정한다. 입력력 사이의 교차상관함수 (Cross Correlation Function)을 이

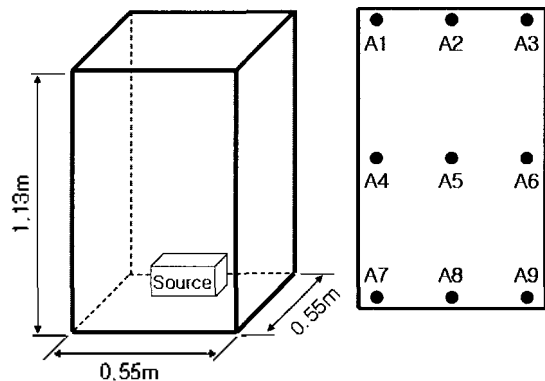


그림 2. 음향 공동과 유리창의 제원  
Fig. 2. Dimensions of the acoustic cavity and glass window.

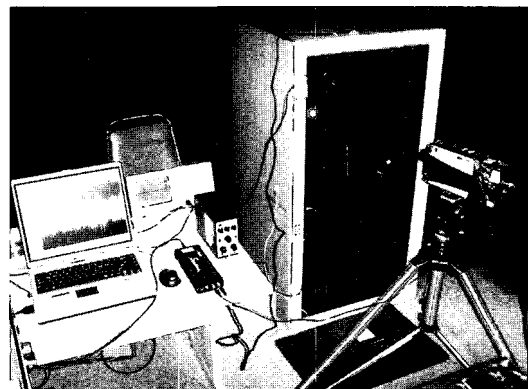


그림 3. 실험 사진  
Fig. 3. Photo of experiment.

표 1. 실험장치  
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	dBBA132(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

용하여 충격응답을 구하게 되므로 암소음 영향을 최소화시킬 수 있다. 또한, 신호내의 많은 펄스를 사용하며, 주기적 응답을 동기화시켜 평균함으로써 SNR을 크게 증가시키는 장점이 있다.

Fig.4는 신호음에 의한 음압과 진동을 신호음이 없는 상태와 비교한 결과로, 암소음은 무시 가능한 수준이므로 식 (4)의 우변 둘째 항은 무시할 수 있다. 상자내 신호음은 68dB (A)로 대화음 수준으로 하였다. 가속도계

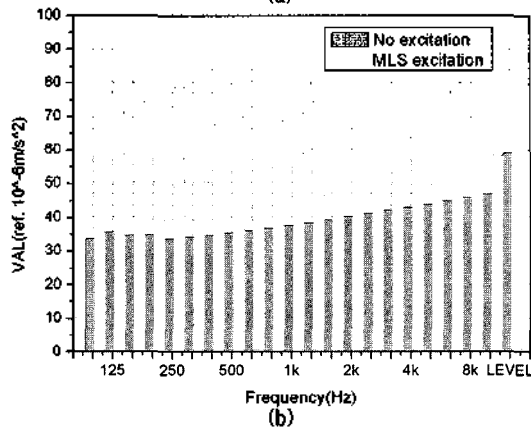
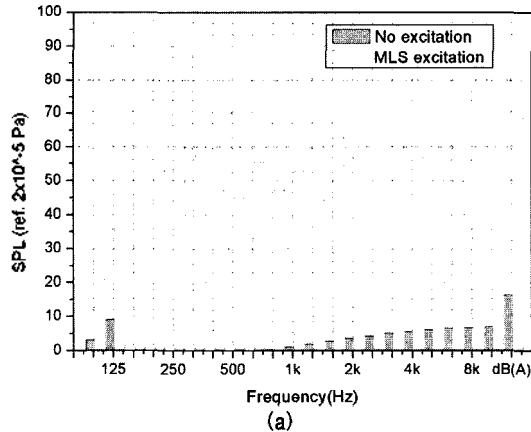


그림 4. 음압레벨과 가속도(3mm 유리).  
(a) 공동내 음압레벨 (b) A5위치의 가속도

Fig. 4. Acoustic pressure and acceleration(3mm glass)  
(a) Acoustic pressure in cavity, (b) Acceleration at A5.

용 전치증폭기의 이득을 변화시키면서 명료도 차이를 보았고, 레이저 도플러 진동계는 최대 감도인 50V/ms<sup>-1</sup>로 고정시켜 측정하였다. 흡음 처리한 상자 내 잔향시간은 전주파수대역에서 0.2초 미만이었다. 2.6초 주기의 MLS와 응답과의 교차상관함수를 6회 동기 평균하여 충격응답을 구한 후, MTF를 결정하였다.

### IV. 실험 결과

상자 내 음압을 마이크로폰으로 측정하고, 3mm 두께 유리창의 진동을 가속도계와 레이저 속도계로 측정한 경우의 명료도 분석 결과를 Fig.5에서 비교하였다.

Fig.5 우측에 표시된 STI의 구간별 청취 수준은 IEC60268-16 [6]에 따른 것으로, 상자내 음향에 대한 STI 값은 예상대로 1에 가깝다. 유리창 진동의 가속도 (9개 지점 평균치) STI는 0.9이상, 속도 신호 (A5 지점)의 STI는 0.8 이상으로, 예상보다 높은 명료도는 암소음이 완전히 배제된 결과로 보인다. 그러나 바닥을 타고 들어오는 저주파수의 미세한 암진동 때문에 측정 시점에 따라 STI에 약간의 편차가 발생하였다. 가속도 신호가

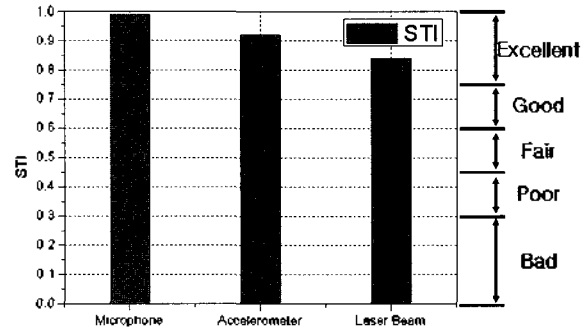


그림 5. STI비교(3mm 유리)  
Fig. 5. Comparison of STI(3mm glass).

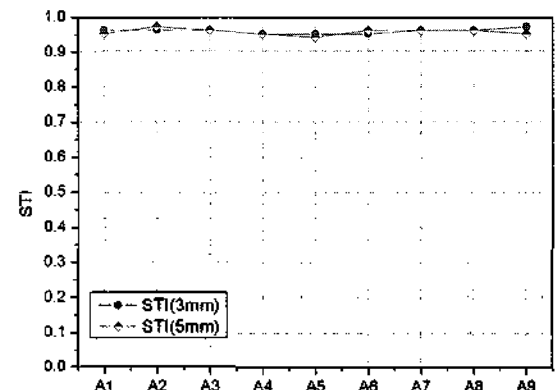


그림 6. STI와 측정위치  
Fig. 6. STI and measurement positions.

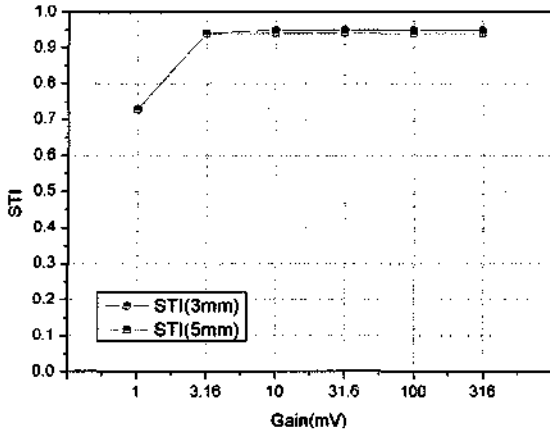


그림 7. STI 대비 앰프게인  
Fig. 7. STI vs. amplifier gain.

레이저 속도 신호에 비하여 STI가 약간 높았으며, 이 결과는 대화음을 대상으로 한 주관적 평가에서도 확인되었다.

Fig. 6에는 유리창의 9개 위치별 가속도 신호 STI를 표시하였으나, 유리창의 중앙, 가장자리 및 모서리 등, 위치에 따른 명료도는 유리창 두께에 상관없이 거의 차이가 없었다. 이러한 결과는 유리창 위치에 따른 음압 분포에 별 차이가 없는 실험 모델의 음장 특성에 기인하는 것으로 보인다.

Fig. 7은 가속도 증폭기 (B&K 2635)의 이득을 변화시킬 때의 STI 값을 보인다. STI 이론상, 증폭기의 이득이 전송경로의 SNR에 영향을 미치지 않는 범위에서 일정한 STI 값을 보이는 것은 예상대로이다. 그러나 Fig. 7의 측정 결과는 이득이 너무 낮아지면 측정계의 SNR에 영향을 줄 수도 있음을 보인다. Fig. 8은 신호음의 크기를 조정하면서 구한 STI를 보인다. MLS의 음압이 60dB (A) 이상에서는 거의 비슷한 크기의 STI를 보이나, 이보다 낮은 음압에서는 급격히 감소한다. 또한 5mm 두께 유리창에서 STI가 더 빨리 떨어지는 것은 유리창 두께에 따

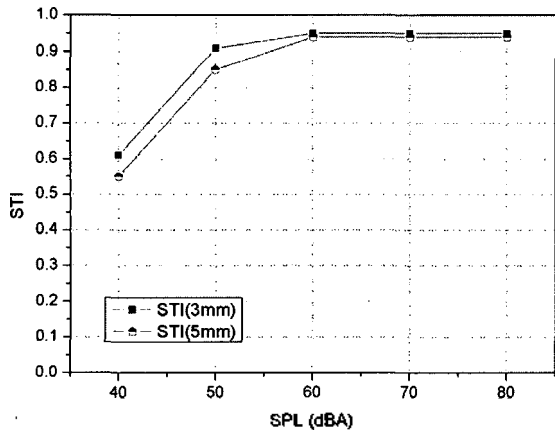


그림 8. STI 대비 실내 음압레벨  
Fig. 8. STI vs. interior pressure.

라 도청 가능한 최소 음압이 요구됨을 추측케 한다. 추후 유리창 두께 및 음압과 명료도와의 관계를 구체적으로 검토할 필요가 있다. 그러나 일정 수준의 음압 이상에서는 두께가 증가함에도 STI 값에 별 차이가 없다. 이는 두께별로 어느 수준 이상의 음압이 작용하면 도청음의 명료도는 더 이상 높아지지 않고 일정한 범위내에서 수렴됨을 의미한다.

이러한 유리창의 STI 특성에는 음향 가진과 유리창 진동 사이의 주파수응답 특성도 영향을 미칠 것으로 보인다. Fig. 9에서 두 유리창 모델의 음압 - 가속도 주파수응답을 비교한다. 주파수응답은 백색잡음 (White noise)으로 가진하여 구하였다. 2000Hz까지는 3mm 두께 유리창 (열은 회색)이 높은 주파수응답을 보이나, 2000Hz ~ 8000Hz 범위에서는 5mm 두께 유리창 (짙은 회색)이 상대적으로 높은 주파수응답을 보인다. 주파수 대역에 따른 진동 응답의 크기는 음파와 판재 굽힘파의 연성 조건에 크게 지배된다. 유리창과 같은 판재를 통하여 음이 투과될 때, 음파의 공기중 파장과 판재내의 굽힘파 파장이 같아지면 소리가 매우 잘 투과 되는 임계주파수 (critical frequency)가 다음과 같이 존재한다. [19]

$$f_c = \frac{c^2}{1.8c_L t} \tag{9}$$

여기서, c는 공기중 음파의 속도, c<sub>L</sub>은 판재내 종파속도이며, t는 판재의 두께이다. 이러한 주파수 대역에서는 음투과 손실 (Sound Transmission Loss)가 급격히 저하되고, 유리창의 진동이 커지게 되므로 도청이 잘 되는 결과를 초래한다. 3mm 및 5mm 유리창의 경우, 각각 4120Hz 및 2470Hz의 임계주파수를 갖는다. Fig. 9에서

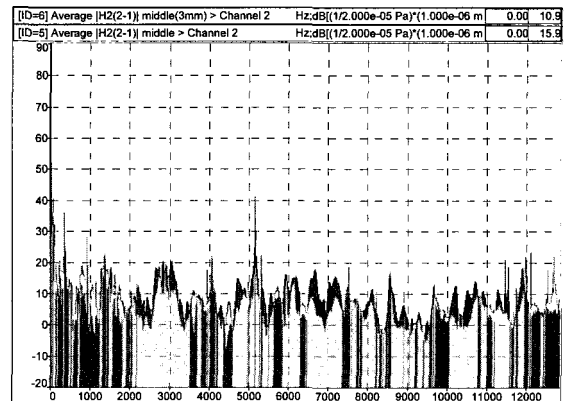
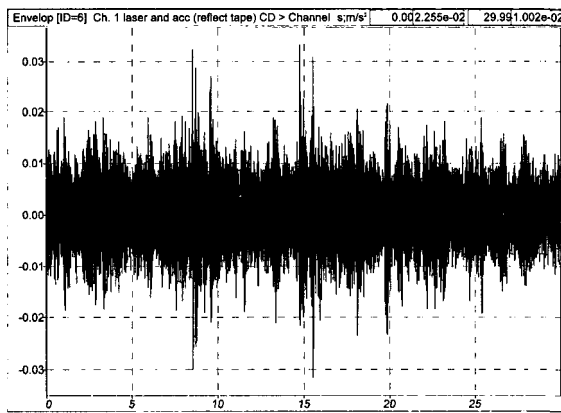


그림 9. 유리창문의 주파수응답첩수  
(밝은 회색 혹은 녹색-3mm, 짙은 회색 혹은 적색-5mm)  
Fig. 9. Frequency response of the glass windows  
(light gray or green-3mm, dark-gray or red-5mm).

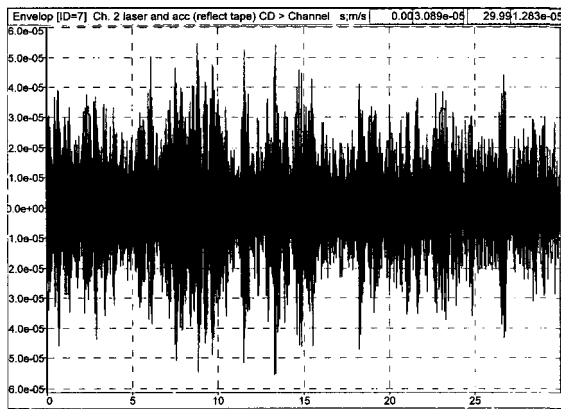
2200Hz~3500Hz 범위에서 두꺼운 5mm 유리창의 진동이 더 크게 나오는 것은 두께에 반비례하는 임계주파수 대역의 음투과 및 유리창 진동 특성을 보여준다. STI 계산 과정에서 주파수 대역별 SNR의 기중치가 다르게 적용되므로, 유리창의 주파수응답 특성은 자연스럽게 명료도 지수에 영향을 미칠 것이다. 추후 여러 가지 두께에 대한 이론 해석 및 실험을 통하여 주파수응답 특성이 명료도에 미치는 효과를 구체적으로 검토할 필요가 있다.

전술한 객관적 평가 결과를 확인하기 위하여 직접 대화음을 대상으로 주관적 평가를 수행하였다. 비용, 시간 및 기술적 한계로 충분한 데이터에 근거한 체계적인 직접 평가의 결과 분석은 어려웠다. 본 연구에서는 시사 토론회 음성을 음원으로 3mm, 5mm 두께 유리창의 가속도 및 속도 신호를 재생시켜 그 내용의 인식 가능성과 명료도를 확인하였다. 10명의 20대~40대 연령, 정상 청력을 갖는 대학 재학 이상 학력의 남성 청취자가 반 무향실내에서 가속도 및 속도 신호음의 인식 정도를 확인하였다. 30초 평균 실내 음압레벨 60dB (A) 이상에서 유리창 가속도 및 속도음은 3mm, 5mm 두께 모두 대화 내

음을 인식하는데 어려움이 없었다. 실내음을 70dB 이상으로 높이면 대화음의 명료도가 약간 높아졌다. 가속도음과 속도음 비교를 위하여 Fig. 10에 동일한 대화음 하에서의 동시 응답 신호 파형을 보인다. 동일한 음성에 대한 응답임에도 가속도와 속도 파형이 전혀 다르게 보이나, 음성 재생 시 청취자 모두 동일한 음성 정보를 인식하는데 어려움이 없었다. 또한, Fig. 5의 STI 비교에서와 같이, 레이저 속도 신호보다는 가속도 신호음의 명료도가 약간 좋은 것으로 평가 되었다. 두 센서는 측정하는 물리량이 다르다. 가속도계는 접착면상의 등가 가속도를 접착제를 통하여 탐지하고, 레이저 빔은 한 점의 속도를 직접 측정한다. 가속도 신호는 속도 신호에 비해 고주파수 성분이 크게 나오는데, 이러한 특성은 Fig. 11의 가속도 및 속도 신호의 스펙트럼에서 확인된다. 이러한 주파수 특성은 마찰음이나 파열음 등의 무성음 음소(phoneme)의 재생에 작용하여 명료도에 영향을 줄 수 있으며 [20], 별도의 음성화적인 고찰이 필요한 연구과제이다. 또한, 두 신호음의 명료도에서 센서 및 증폭기의 성능이 변수가 되나, 현실 여건 때문에 본 연구에서

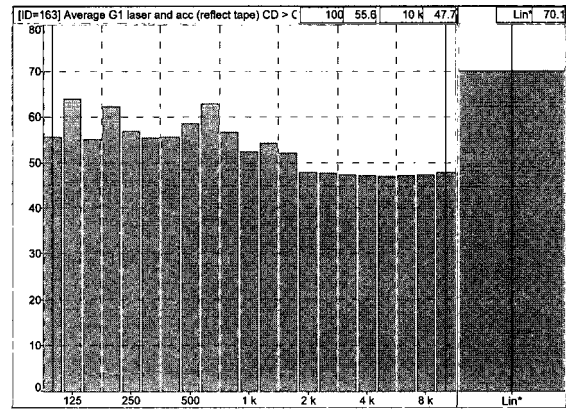


(a)

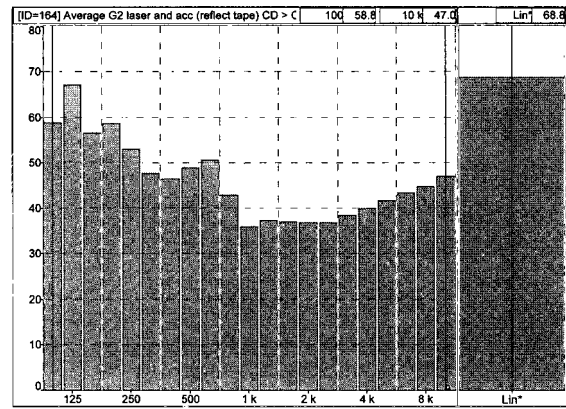


(b)

그림 10. 음성신호의 진동파 (a) 가속도 (b) 속도  
Fig. 10. Vibration waves of speech signal.  
(a) Acceleration, (b) Velocity.



(a)



(b)

그림 11. 음성신호의 스펙트럼 (a) 가속도 (b) 속도  
Fig. 11. Spectrum of the speech signal.  
(a) Acceleration, (b) Velocity.

는 일반적인 실험용 측정 장비를 사용하였다. 성능이 좋은 전용 도청 장비를 사용할 때, 명료도가 높아질 가능성이 있다.

일련의 실험 결과를 종합적으로 검토할 때, 압소음 효과를 배제시킨 상태에서는 정상 대화음 수준에서 가속도계 및 실험용 레이저 진동 센서로 측정된 유리창 진동음의 명료도가 매우 높게 나옴을 확인할 수 있었다.

### V. 결론 및 토론

MTF에 기초한 STI를 사용하여, 압소음을 배제시킨 환경에서 3mm 및 5mm 두께 유리창을 대상으로 도청음의 명료도를 평가한 결과, 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 60dB (A) 이상의 신호음 하에서 유리창 진동음의 STI는 0.9이상, 레이저 속도음은 0.8 이상으로 높은 명료도를 보였다. 육성에 대한 직접 평가에서도 가속도 및 속도 신호 모두 음성정보를 인식하는데 문제가 없었다.
- 2) 60dB (A) 이상 음압에서 두께에 따른 STI 차이는 거의 없었으나, 이보다 낮은 음압에서는 두 유리창 모두 급격한 STI 감소를 보였으며, 5mm 유리창의 STI가 더 많이 저하되었다. 상자내 음압의 분포 특성상 유리창의 측정점 위치에 따른 STI의 차이는 거의 나타나지 않았다.
- 3) 가속도음이 속도음에 비하여 STI 값이 약간 높게 나오며, 직접 청취시에도 명료도가 높은 것으로 확인되었다.
- 4) 결론적으로 압소음 배제된 정상 대화음 수준에서 유리창을 통한 실내 도청음의 명료도는 매우 높다. 향후 도청 가능한 음압의 크기와 유리창 두께 사이의 관계 규명과, 압소음 효과 및 교란파를 이용한 도청 방지 대책에 관한 연구가 필요하다.

### 참고 문헌

1. 안고송, 서울에는 바람이 없다 : 지금은 도청 중, (도서출판 그린, 2002).
2. 김홍민, "대테러부대를 위한 레이저 도청에 관한 연구", 군사과학대학원 석사학위논문, 1997.
3. G-com technology : www.gcomtech.com
4. ALARM.de : www.alarm.de

5. T.Houtgast and H.J.M.Steeneken, "The modulation transfer function in room acoustics as a predictor of speech intelligibility", *Acoustica*, 28, 66-73, 1973.
6. IEC, "Sound system equipment - Part16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index" IEC 60268-16, 3rd edition, 2003.
7. ANSI, "Methods for calculation of the speech intelligibility index", ANSI S3.5-1997.
8. J.S.Bradley, "Predictors of speech intelligibility in rooms", *Journal of Acoustical Society of America*, 80 (3), 837-845, 1986.
9. 이정규, 김정태, "흡음재 처리를 통한 차실내부 음의 명료도 향상에 관한 연구", *한국소음진동공학회 논문집*, 10 (2), 240-246, 2000.
10. 장대영, 강성훈, 심동연, 김천덕, "음성전송지수를 이용한 확성전파기 위 명료도 평가 방법" *한국음향학회지*, 13 (5), 32-39, 1994.
11. ANSI, "Method for measuring the intelligibility of speech over communication systems", ANSI S3.2-1989, 1989.
12. N.R.French, and J.C.Steinberg, "Factors governing the intelligibility of speech sounds", *Journal of Acoustical Society of America*, 19, 90-119, 1947.
13. H.J.M Steeneken and T. Houtgast, "A physical method for measuring speech transmission quality" *Journal of Acoustical Society of America*, 67, 318-326, 1980.
14. B.W.Anderson, and J.T.Kalb, "English verification of the STI method for estimating speech intelligibility of a communications channel", *Journal of Acoustical Society of America*, 81 (6), 1982-1985, 1987.
15. H. Onaga, Y. Furue and T. Ikeda, "The disagreement between speech transmission index (STI) and speech intelligibility", *Acoustical Science & Technology*, 22 (4), 265-272, 2001.
16. K.S.Rhebergen and N.J.Versfeld, "A speech intelligibility index-based approach to predict the reception threshold for sentences in fluctuating noise for normal hearing listeners", *Journal of Acoustical Society of America*, 117 (4), 2181-2192, 2005.
17. M.R. Schroeder, "Modulation transfer functions: definition and measurement", *Acoustica*, 49, 179-182, 1981.
18. Douglas D.Rife, "Transfer - function measurement with maximum-length sequences", *J. Audio Eng. Soc.* 37, 419-444, 1989.
19. L.S.Bell, *Industrial Noise Control*, (Marcel Dekker, Inc., 1982), Chap. 6, pp.206-209.
20. H.J.M. Steeneken, T. Houtgast, "Mutual dependence of the octave-band weights in predicting speech intelligibility", *Speech Communication*, 28, 109-123, 1999.

### 저자 약력

• 김 석 현 (Seockhyun Kim)



1980년: 서울대학교 (공학사-기계설계)  
 1982년: 서울대학교 (공학석사-기계설계)  
 1987년: 서울대학교 (공학박사-소음진동)  
 1988년~현재: 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수  
 \* 연구분야: 수송기계의 소음/진동, 풍력발전기 소음/진동, 발총의 진동/음향

• 김희동 (Hee-dong Kim)



1981년: 서울대학교 (공학사-전기)  
1983년: 한국과학기술원 (공학석사-통신)  
1987년: 한국과학기술원 (공학박사-통신)  
1997년~현재: 한국외국어대학교 정보통신공학과 교수  
\* 연구분야: 음성신호처리, 정보통신시스템

• 김윤호 (Yoon-ho Kim)



2005년: 강원대학교 (공학사-정밀기계)  
2005년~현재: 강원대학교 대학원  
기계메카트로닉스 석사과정