

레이저센서를 이용한 유리창 도청 및 도청방지기의 성능 평가

Eavesdropping of the Glass Window Using a Laser Sensor and Performance Estimation of a Window Shaker

김석현[†] · 허욱* · 김희동**

Seockhyun Kim, Wook Heo, Heedong Kim

Key Words: Speech Intelligibility(음성 명료도), Modulation Transfer Function(변조전송함수), Speech Transmission Index(음성전송지수), Eavesdropping(도청방지), Window Shaker(유리창 교란기)

ABSTRACT

Possibility of the remote eavesdropping through window glass is investigated using a laser sensor. Various thicknesses and types of glass windows are excited by maximum length sequency (MLS) signal and the vibration sound is detected by a laser doppler vibrometer. Intelligibility of the detected sound is evaluated using the speech transmission index (STI), which is based on the modulation transfer function (MTF). In order to identify the disturbing effect, different level of disturbing wave is generated by an outside speaker and a window shaker attached on the glass window. On the different thickness of glass windows, decrease effect of the speech intelligibility is analysed.

1. 서론

본 연구에서는 실내 음성에 의한 유리창의 진동음으로 부터, 인식하는 음성정보의 명료도를 여러 두께의 유리창에 대하여 평가한다. 챔버내의 음성 음원으로 유리창을 가진하고, 레이저 도플러 진동계로 유리창의 진동을 탐지한다. 또한, 유리창 교란기(Window shaker)로 음성에 의한 진동을 교란시킬 때 음성정보가 어느 정도 손상되는지를 정량적으로 평가한다. 이러한 검토는 레이저를 이용한 원격 도청의 가능성과 그 방지 가능성을 파악하기 위하여 이루어진다. 외국의 경우, 레이저 모니터링을 이용한 도청 장비가^(1,2) 공개되고 있으나, 성격상 학술적 연구 결과는 잘 공개되지 않는다. 국내에서는 스피커 소자형 유리창 도청방지기가 개발되어 국가기관 및 민간 업체에 이미 보급된 상태이나⁽³⁾, 그 성

능에 대하여 객관화된 검증은 매우 미흡한 실정이다. 본 연구는 도청음의 명료도를 객관적으로 정량화시켜 평가한 선행 연구의⁽⁴⁻⁶⁾ 후속 연구로 수행되었다. 음성인식 수준을 객관적으로 평가하기 위해서는 음성 명료도 분석이 필요하다. 본 논문에서는 음성 전달계의 전달 특성을 Modulation Transfer Function (MTF)를⁽⁷⁾ 사용하여, Speech Transmission Index (STI)로⁽⁸⁾ 정량화시켜 표시한다. STI는 음성 전송경로를 통하여 전달된 음성의 정보가 얼마나 정확하게 인식되는가를 표시하는 지수로, IEC 기준으로 사용되고 있다.⁽⁹⁾ 본 연구에서는 여러 두께의 유리창을 대상으로 유리창 진동음으로부터 어느 정도의 실내 음성 정보를 인식할 수 있는지를 검토한다. 또한, 유리창 교란기의 도청 방지 성능을 검증하고 문제점을 확인하여 유사시 실내 정보의 탐지 또는 도청 방지에 필요한 정보를 얻고자 한다.

2. 음성명료도 분석방법

음성 정보의 인식 수준을 평가하는 객관적 평가 방법으로, Houtgast와 Steeneken은 시간 영역상의

† 책임저자: 정회원, 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

E-mail: seock@kangwon.ac.kr

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

* 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과

** 한국외국어대학교 정보통신공학과

교란과 비선형 왜곡까지를 고려하여 음성정보의 인식 정도를 음성 명료도(speech intelligibility)로 표시하는 방법을 제시하였다⁽⁸⁾. 이 방법은 말소리의 음압 변화를 고려한 14개의 변조 주파수(1/3옥타브 대역 중심)를 사용하여 음성 전달계의 MTF를 구하고, MTF의 변화치를 가지고 음성정보의 손상도를 평가한다. MTF를 사용하여 전달계의 대역별 SNR (Signal to Noise Ratio)을 구한 후, 125 Hz ~ 8000 Hz의 7개 옥타브 대역에 대하여 주파수 가중, 합산 및 정규화 과정을 거쳐 STI를 산출한다. 이 방법은 네덜란드어⁽⁸⁾ 및 영어를⁽¹⁰⁾ 대상으로 직접 평가 결과와의 상관성이 매우 높은 것이 입증되었다. 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⁽¹¹⁾ MTF는 다음과 같이 잔향과 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 암소음에 대한 신호음 응답의 비로 ± 15 dB 범위이다. F_o 는 125 Hz ~ 8000 Hz의 7개 옥타브 대역 중심주파수이고, 변조주파수 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.

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

식 (5)는 잔향, 에코, 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 고려하여, 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.

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

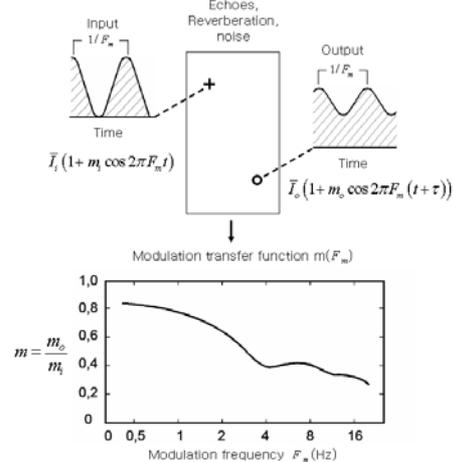


Fig.1 Modulation transfer function.

3. 실험방법

Fig. 2는 유리창 진동의 측정에 사용한 음향 상자의 치수와 전면 유리창 진동의 측정점을 표시한다. Fig.3은 실험장치도와 반무향실 내에서 수행된 실험 장면이고, Table 1에 측정 및 분석에 사용된 실험 기기를 정리한다. 성능평가에는 3mm, 5mm, 8mm, 10mm 두께의 단층 일반 유리와, 10mm의 강화유리 및 5mm 유리-6mm 공기층-5mm 유리의 2중 유리창을 사용하였다. Fig.2의 9개 지점에서 유리창 외면의 진동 속도를 측정하였다. 상용 S/W인 dBATI32 (01dB-Stell사)를 사용하여 MTF를 측정하고 STI를 결정하였다⁽¹²⁾. MTF를 측정하기 위한 음원으로 임펄스 신호보다 재현성과 SNR에서 유리한 MLS⁽¹³⁾ 신호음을 사용하였다. 이 방법에서는 ± 1 의 펄스로 구성된 일정 길이의 랜덤 백색 잡음을 주기적으로 입력시키고 출력 응답을 측정한다. 입출력 사이의 교차상관함수(Cross Correlation

Function)을 이용하여 충격응답을 구하게 되므로 암소음 영향을 최소화 시킬 수 있다. 또한, 신호내의 많은 펄스를 사용하며, 주기적 응답을 동기화시켜 평균함으로써 SNR을 크게 증가시키는 장점이 있다. 도청 방지효과를 보기 위한 교란실험에는 한국통신보안(주)에서 개발한 유리창 교란기(R5000/TRN-33)를 사용하였다.

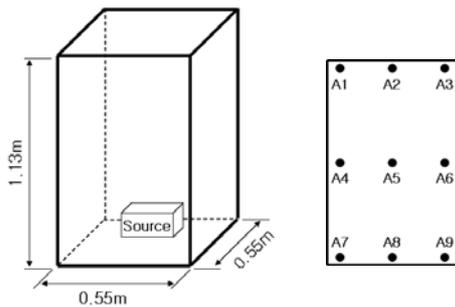


Fig.2 Dimensions of acoustic chamber and glass window.

Table 1 Experimental devices

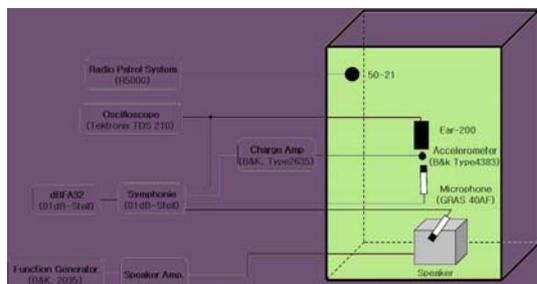
Devices	Models
Data acquisition and signal analyzer	Symphonie(01dB-Stell) B&K 2035
Room acoustics S/W	dBBA Ti32(01dB-Stell)
Sound level meter	SIP95(01dB-Stell)
Microphone	GRAS 40AF
Microphone calibrator	B&K 4231
Accelerometer calibrator	B&K 4294
Accelerometer and charge amplifier	B&K 4383, B&K 2635
Audio system	Amplifier : YAMAHA RX-V550 Speaker : Infinity Primus 360
Radio patrol system	R5000
Window shaker	TRN-33

4. 도청 가능성 평가

MLS 신호음으로 실내 68dB(A)의 대화음 음압 수준을 유지할 때의 음성명료도를 검토하였다. Fig.4는 박스내의 음향의 STI(A5지점 내부 10cm 지점), 5mm 두께 유리창의 가속도 및 속도 신호의 STI (9개 지점 평균치)를 비교한다. 우측에 표기된 STI의 구간별 음성명료도 등급은 IEC60268-16⁽⁷⁾에 따른다. 'Excellent'는 명료하게 음성 정보를 인식할 수 있음을, 'Good'은 어려움없이 내용을 인식할 수 있는 정도를, 그리고 'Poor' 이하는 음성 정보를 인식하기 어려운 상태를 의미한다. 실내 음향의 STI가 거의 1에 가까운 것은 배경 소음이 없고 오디오 시스템의 음성 정보 전달에 문제가 없음을 의미한다. 레이저 속도음은 가속도음 보다 약간 낮은 0.8 정도의 STI를 보이는데, 이는 명료도에 대한 주관적인 평가에서도 확인되었다.

68dB(A) MLS 신호음압 하에서 두께에 따른 유리창 진동음의 인식 수준을 Fig.5에서 비교한다. 흥미로운 점은 외부 잡음이 없는 경우, 진동음은 2중 유리창을 제외한 모든 두께의 유리창에서 거의 비슷한 STI를 보이는 점이다. 동일한 실내 음압 하에서 유리창 두께가 증가하면 진동레벨은 낮아지는 것을 감안할 때, 이러한 결과는 두께가 증가하더라도 신호의 레벨은 조금씩 감소하나 파형이 왜곡되는 정도는 비슷함을 의미한다.

측정 위치에 따른 진동음의 명료도 차이를 Fig. 6에서 비교한다. 중앙 지점이 약간 높으나 큰 차이는 없으며, 이러한 경향은 모든 유리창에서 비슷하게 나타났다.



a) Experimental set-up



b) Photo of experiment

Fig.3 Experimental set-up.

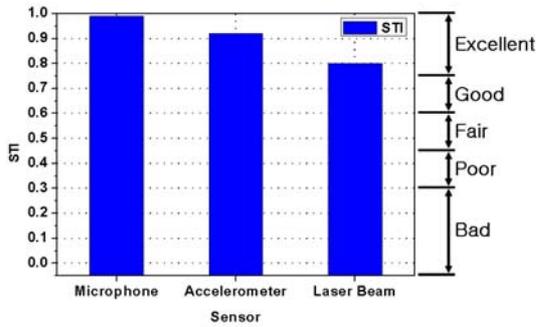


Fig.4 STI and sensors.

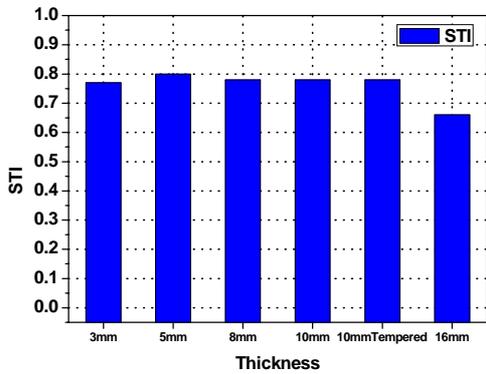


Fig. 5 STI vs. thickness of the glass.

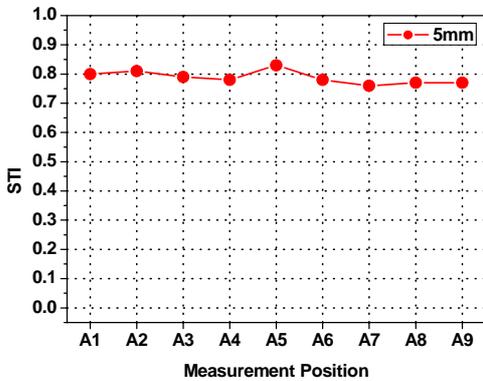
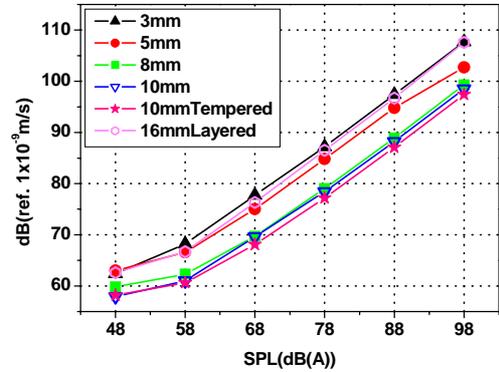


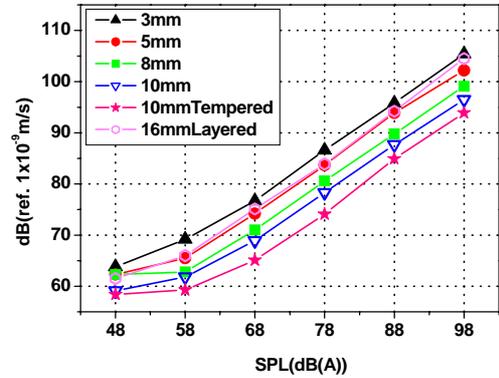
Fig. 6 STI and measurement position.

Fig.7은 챔버 내에서 MLS 신호음으로 가진할 때와 실외에서 배경 소음으로 각각 가진할 때, 음압레벨에 따른 유리창의 진동 레벨을 보인다. 음압레벨은 유리창으로부터 실내 10cm 거리에서 측정하였다. 예상대로 두께 증가에 따라 진동레벨은 감소한다. 실내에서 가진할 때와 실외에서 가진하였을 때의 진동레벨은 거의 대등한 수준이다. 열처리된 강화유리가 일반 유리에 비해 진동레벨이 약간 낮게 나왔다. 이러한 결과는 투과 손실에 대한 질량법칙을 고려하면 예상되는 결과이다. 그러나 2중 유리창의 경우 예상보다 훨씬 높은 진동레벨을 보이는 점은 흥

미롭다.



a) under MLS pressure



b) under background pressure

Fig.7 Vibration level under pressure excitation.

음성명료도는 유리창의 주파수응답 특성에 크게 영향을 받는다. 68dB(A)의 동일한 실내 음성 신호 하에서 단층 유리창과 2중 유리창의 진동스펙트럼을 Fig. 8에서 비교한다. 2kHz 아래에서 2중 유리창은 단층 유리창에 비해서 높은 레벨을 보이나, 그 이상에서는 현저히 낮은 레벨을 보인다. 결과적으로 2중 유리창의 경우, 저주파수 대역에서의 큰 응답에 의하여 총 진동레벨은 커지나, 고주파수 성분이 많이 감소하면서 파형이 왜곡되고 STI 값이 떨어지는 결과를 가져온다. 선행 연구에 의하면⁽⁴⁾, 증폭기의 이득치가 어느 정도 이상 되면, 더 이상 STI가 증가하지 않았다. 이는 파형의 왜곡에 비해서 레벨이 STI에 주는 영향이 작음을 의미하는 것으로, 2중 유리창의 STI 감소 효과를 설명한다.

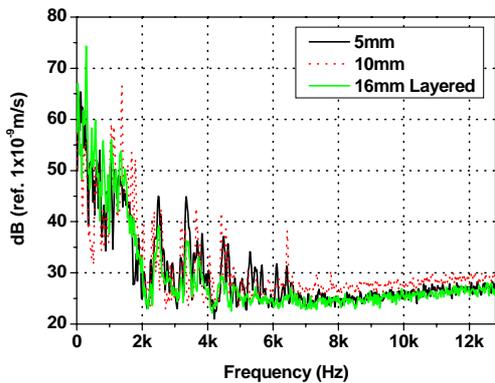


Fig.8 Vibration spectrum under 68dB(A) MLS signal (measurement at A5).

다음으로 외부의 소음이 음성 명료도에 미치는 영향을 검토하였다. Fig. 9는 실내의 68dB(A) MLS 신호음에 의한 진동을 실외 스피커의 배경 소음(랜덤 노이즈)으로 교란시킬 때의 STI를 구한 결과이다. 교란이 없을 때와 마찬가지로, 유리창의 두께에 따른 STI의 차이는 크지 않다. 다만 2중 유리창은 전술한 바와 같이 전반적으로 낮은 STI를 보인다. 이는 2중 유리창에서 파형의 왜곡이 상대적으로 크게 발생하는 데에 기인한다. 대부분의 유리창에서 실내음보다 10dB 이상 높은 78dB(A) 이상의 배경 소음 하에서는 STI가 0.2 아래로 떨어져 정보의 인식이 어렵게 된다.

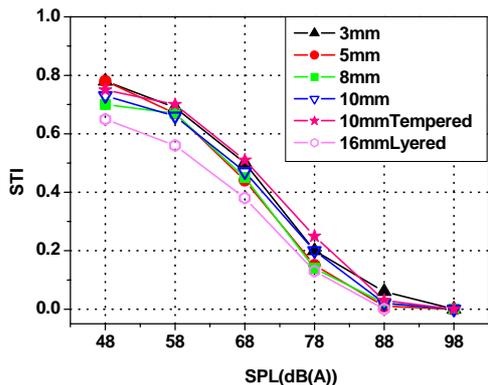
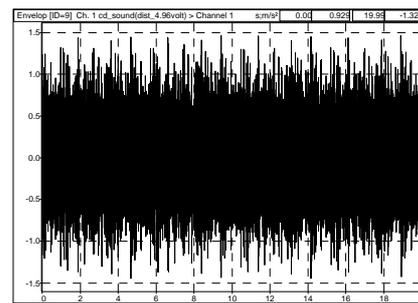


Fig.9 STI vs. background noise level.

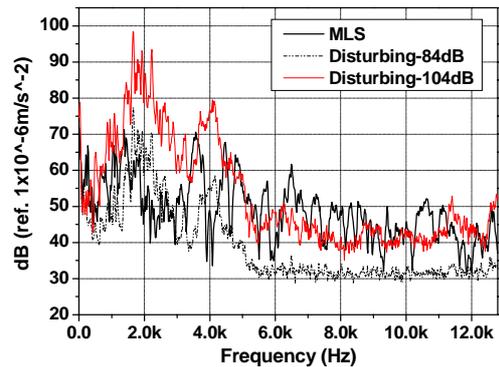
5. 도청 방지기 성능 평가

두 번째 교란 실험으로, 유리창 A1지점에 교란용 스피커 소자를 부착하고 교란파를 발생시킬 때의 STI 변화를 검토하였다. 스피커 소자에 Fig. 10 a)와 같은 랜덤 노이즈를 발생시켜 MLS 신호음에 의

한 유리창 진동을 교란시켰다. b)는 MLS 신호음에 의한 진동과, 교란파에 의한 진동의 스펙트럼을 비교한 결과이다. 진동레벨이 대등한 경우, 2kHz 이상 고주파수 대역에서는 매스킹이 어렵다. 교란파 진동을 20dB 이상 더 크게 올려야 4kHz까지 신호음의 진동을 완전히 매스킹 시킨다. 이러한 특성은 교란기의 주파수성능에 대한 보완 필요성을 제기한다.



a) Disturbing wave



b) vibration spectrum

Fig. 10 MLS signal and disturbing wave.

Fig.11은 68dB(A)의 MLS 신호음하에서 유리창 교란기를 작동시켜 진동음을 교란시킬 때의 STI 변화를 보인다. 68dB(A) 하에서 유리창의 진동레벨은 Fig. 7 a)에서와 같이 두께에 따라 70dB~80dB 정도였다. 횡축의 진동레벨은 교란기에 의하여 유리창 중앙지점에서 발생하는 교란파의 레벨을 표시한다. 교란파의 레벨이 증가하면서 명료도는 저하된다. 8mm 이상 두께의 경우, 교란파레벨이 신호음 진동레벨보다 10dB 이상 되면 STI가 0.2 이하로 떨어져 도청이 불가능한 상태가 된다. 그러나 5mm 이하 두께에서는 떨어지는 폭이 작아 부분적으로 내용이 인식되는 수준이 된다. Fig.9의 외부 배경소음에 의한 교란 효과와 비교해 보면, 비슷한 수준의 교란파를 교란기로 발생시키는 것이 교란효과가 작

다. 이러한 결과는 얇은 두께의 경우 확인하였으며, 유리창 두께에 따른 주파수응답 특성에 관련될 것으로 보이므로 이에 대한 검토가 더 필요하다.

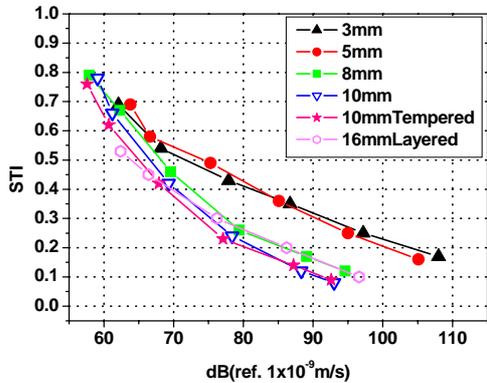


Fig.11 STI vs. disturbing wave level.

6. 결론 및 토론

레이저 센서에 의한 유리창 진동의 도청 가능성을 다양한 두께의 유리창을 대상으로 검토하였다. MLS 대체 음성신호로 가진할 때, 유리창 두께의 증가에 따라 진동레벨은 감소하였으나, 정보의 인식 정도에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 다만, 2중 유리창의 경우 음성명료도 저하효과가 컸다. 모든 유리창에서 측정 위치에 따른 음성명료도의 차이는 거의 없었다. 교란기를 사용할 때, 음성 신호음의 진동보다 10dB~30dB 정도 상회하는 교란 진동을 주어야 음성인식이 불가능하게 되었다. 외부 스피커 보다는 교란기로 교란시킬 때가 교란효과가 상당히 낮았으며, 이는 2kHz 이상에서 교란기의 교란효과가 떨어지는 데에 기인하였다. 이러한 교란효과는 스피커-유리창 시스템의 주파수응답 특성에 밀접하게 연관된다. 따라서 교란레벨을 대폭 올리지 않으면서 교란효과를 높이기 위해서는 유리창 두께와 크기를 고려하여 교란기의 주파수응답 성능을 보강할 필요가 있다.

후기

본 연구 수행에 관련하여 한국통신보안(주)의 협조에 감사드린다.

참고문헌

(1) G-com technology : www.gcomtech.com
 (2) ALARM.de : www.alarm.de

(3) K.S. Ahn, 2002, "No Secret in Seoul : Wiretapping Now", Green Press.
 (4) S.H. Kim, H.D. Kim, Y.H. Kim,, 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.
 (5) S.H. Kim, H.D. Kim, Y.H. Kim,, 2007, "Speech Intelligibility Analysis on the Vibration Sound of the Glass Windows of a Conference Room", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.17, No.4, pp.363~369.
 (6) S.H. Kim, H.D. Kim, W. H대, 2007, "The effect of the disturbing wave on the speech intelligibility of the eavesdropping sound of a window glass", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.17, No.9, pp.888~894.
 (7) T. Houtgast and H. J. M. Steeneken, 1973 "The Modulation Transfer Function in Room Acoustics as a Predictor of Speech Intelligibility", Acustica Vol.28, pp.66~73.
 (8) H. J. M Steeneken and T. Houtgast, 1980, "A Physical Method for Measuring Speech Transmission Quality" Journal of Acoustical Society of America. Vol.67, pp.318~326.
 (9) IEC, 2003, "Sound System Equipment -Part16: Objective Rating of Speech Intelligibility by Speech Transmission Index" IEC 60268-16, 3rd edition.
 (10) B.W.Anderson, and J.T.Kalb, 1987,"English Verification of the STI Method for Estimating Speech Intelligibility of a Communications Channel", Journal of Acoustical. Society of America. Vol.81(6), pp.1982~1985.
 (11) M.R. Schroeder, 1981, "Modulation Transfer Functions: Definition and Measurement", Acustica vol.49, pp.179~182.
 (12) www.OldB-stell.com,Intelligibility Criteria : Measurement Method. dBATI32 Application Note , MVI Technologies Group.
 (13) Douglas D.Rife, 1989, "Transfer -Function Measurement with Maximum-Length Sequences", J. Audio Eng. Soc. Vol 37, pp.419~444.