

회의실 유리창 진동음의 명료도 분석

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

김석현[†] · 김윤호* · 김희동**

Seockhyun Kim, Yoon-ho Kim, Hee-dong Kim

Key Words: Vibration Sound of Window Glass(유리창 진동음), Wiretapping(도청), Speech Intelligibility(음성 명료도), Modulation Transfer Function(변조전달함수), Speech Transmission Index(음성전달지수)

ABSTRACT

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

1. 서 론

최근 불법 도청이 사회적으로 주목을 끌고 있는 가운데, 방위 대책 마련에 민간 및 국가 차원의 노력이 경주되고 있다. 실내 대화 정보의 전달 경로 중에서도 유리창은 음향에너지를 가장 잘 투과시키므로 도청의 주 공략 대상이 된다. 유리창 진동음의 탐지는 가속도계와 같은 접촉식 센서나 레이저 빔을 이용한 비접촉 원격 모니터링 시스템을 사용하여 가능하다. 특히 원격 레이저 빔 이용 기술은 실내에 탐지 장치를 설치하지 않고 원격거리에서 유리창의 미세한 진동을 통하여 실내의 대화 정보를 입수할 수 있는 점과, 도청 여부를 점검하는 보안검색 단계에서도 그 존재 여부를 알 수 없는 점 때문에

문제의 심각성이 크다.⁽¹⁾ 그러나 이러한 도청 기술이 군 작전이나 대테러 작전에서는 상대측의 중요한 정보를 파악하는 효과적인 방법으로 사용될 수도 있다. 시간적, 공간적인 제약을 받는 위급한 상황에서 실내 대화음의 탐지는 작전 계획 수립에 활용 가치가 매우 크기 때문이다.⁽²⁾ 유리창 진동음의 탐지 기법은 성격상 연구 결과가 잘 공개되지 않는다. 관련 연구로 유리창 차음 문제와,⁽³⁾ 밀폐된 음향내의 음 명료도에 관한 연구가 수행된 바 있다.⁽⁴⁾ 음향 가진에 의한 관 진동 해석과 진동파의 측정, 신호처리, 그리고 대화음의 인식 정도를 평가하는 명료도 분석을 필요로 한다. 본 연구에서는 회의실 유리창의 진동으로부터 접촉 또는 비접촉 센서를 사용한 도청 가능성을 검토한다. 회의실과 유리창을 하나의 음 전달계로 보고, 음원과 유리창 진동음 사이의 전달특성을 MTF(Modulation Transfer Function)을⁽⁵⁾ 사용하여 구하고, 전달음의 명료도를 STI(Speech Transmission Index)로⁽⁶⁾ 정량화시켜 평가한다. 본 연구의 목적은 실내의 음성에 의하여 발생하는 유리창의 진동을 비접촉 혹은 접촉 방법을 통하여 센싱하여 다시 음성으로 변환하였을 때,

[†] 책임저자: 정회원, 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

E-mail: seock@kangwon.ac.kr

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

* 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과

** 한국외국어대학교 정보통신학과

음성의 인식 가능한 정도를 평가하는 데에 있다. 연구 결과는 실내음의 도청 방지 대책 수립에 사용되며, 유사시에는 실내 정보의 취득하는 목적으로도 활용될 수도 있다.

2. 명료도 분석 방법

음성전달경로의 전달 성능을 평가하는 데는 문장과 음절 등의 언어 자료를 사용하여 청취자를 대상으로 직접 주관적으로 평가하는 방법이 있다.⁽⁷⁾ 이 방법은 평가자가 인식하는 결과를 얻을 수 있는 직접성이란 장점이 있으나, 잘 훈련된 다수의 화자 및 청취자를 필요로 하는 점과, 시간과 경비가 많이 소요되고, 전달 경로상의 왜곡에 대한 정보가 빈약하다는 문제가 있다. 직접 주관적 평가법을 대신하는 객관적 평가법으로 French와 Steiberg⁽⁸⁾가 제안한 AI (Articulation Index)법이 있는데, 이 방법은 잡음이나 대역 제한과 같은 주파수 왜곡 영향의 설명에는 유효하나, 잔향이나 에코 등 시간 영역상의 왜곡이나 비선형 왜곡을 갖는 전달계에는 적용이 어렵다. 이에 대한 해결책으로 Houtgast 와 Steeneken⁽⁹⁾ 은 시간 영역상의 교란과 비선형 왜곡을 고려하여 명료도를 개관적으로 평가하는 방법을 제시하고, 주관적 평가법과의 좋은 상관성을 입증하였다. 이 방법은 화자로부터 청취자로 전달되는 음성의 MTF (Modulation Transfer Function)을⁽⁵⁾ 측정하여, 전달경로의 옥타브대역별 SNR(Signal to Noise Ratio)을 구하고, 이에 근거한 STI(Speech Transmission Index)로 명료도를 평가한다.⁽⁶⁾ 물리적 인자를 사용한 객관적 평가법의 정확성에 관해서 Nielsen은⁽¹⁰⁾ 직접 평가법과의 상관성에 문제점을 제기한 바 있다. 그러나 네덜란드어⁽⁹⁾ 및 영어를⁽¹¹⁾ 대상으로 직접 평가 결과와의 상관성이 매우 높다는 것이 입증되어 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 회의실과 유리창으로 구성된 음향-진동 연성계를 전달 경로로 전달된 유리창 진동음이 얼마나 명료한가를 STI를 사용하여 평가한다. MTF를 구하기 위한 음원으로는 임펄스 신호에 비해 재현성과 SNR에서 유리한 MLS(Maximum Length Sequence) 신호를⁽¹²⁾ 사용한다. 유리창의 진동을 출력으로 하여, 여러 지점에서 STI 값을 구하여 유리창 진동음으로부터 실내 음성의 인식도를 평가한다.

MTF를 구하기 위하여 Fig. 1에서와 같이 전달계의 입출력 변조신호를 다음과 같이 고려한다.

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

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

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.

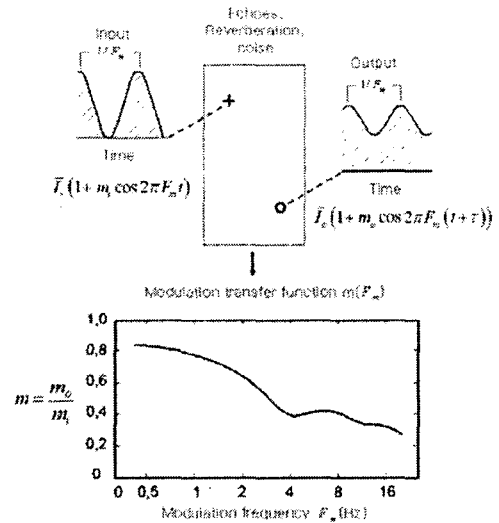


Fig.1 Modulation transfer function (from IEC60268-16).

음성 전달계의 MTF는 다음과 같이 정의된다.

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

Schroeder에 의하면⁽¹³⁾ MTF는 다음과 같이 실 잔향 지배향과 잡음 지배향으로 구분하여, 옥타브대역별로 각 변조 주파수에 대하여 측정할 수 있다.

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

여기서, $h(t, F_o)$ 은 음성 전달계의 충격응답함수, S/B는 암소음에 대한 신호음 응답의 비로 ± 15 dB 범위이다. F_o 는 대화음에 사용하는 125Hz ~ 8000Hz의 7개 옥타브 대역 중심주파수이고, F_m 은 변조주파수로 각 옥타브대역별로 0.63Hz ~ 12.5Hz 범위에서 1/3 옥타브 대역 14개의 중심 주파수를 사용한다.⁽⁶⁾ 총 98개의 MTF를 구하면, 잡음을 고려한 전달계의 SNR은 다음과 같이 구할 수 있다.⁽⁹⁾

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

다음에, 옥타브대역별로 14개의 변조주파수에 대한 평균치를 다음과 같이 구한다.

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

7개 옥타브 대역별로 가중치(W_{F_o})를 부여하여 전달 계의 SNR을 구하면 다음과 같다.

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

최종적으로 0 ~ 1의 범위를 갖도록 정규화 된 STI는 다음과 같다.

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

이와 같은 과정을 상용 S/W인 dBBA132(01dB-Stell사)를 사용하여 수행하였다.

3. 실험방법

Fig. 2는 7m×9m×2.65m의 회의실 내 음원 및 측정 위치를 표시한다. 유리창으로는 630mm × 1240mm, 두께 3mm-6mm 공기층-3mm의 일반 회의실용 2중 유리창을 사용하였다.

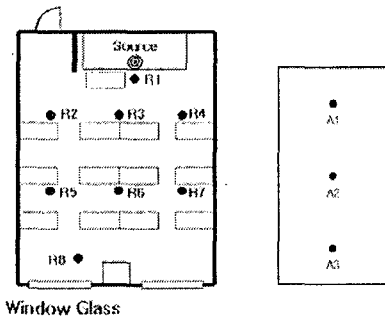


Fig. 2 Conference room and window glass for intelligibility analysis.

측정 및 분석에 사용된 실험 기기를 Table 1에 정리한다. Fig.3에서 보이는 바와 같이, 유리창 진동의 측정은 가속도계와 레이저 도플러 진동계(속도센서)를 동시에 사용하였다. 가속도계로 Fig.2의 세 지점의 가속도를 유리창 내/외면에서 측정하였고, 레이저 진동계로는 설치 여건상 A3 지점 유리창 내면의 속도를 측정하였다.

MLS 신호를 사용하여 Fig.4의 음향 응답 및 진동 응답을 구하고 회의실의 잔향시간을 측정하였다. 실내 암소음원은 제거하였고, 비교적 조용한 실외 환경 하에서 측정하였다. 신호음은 마이크로폰 위치

에서 68dB 정도의 정상 대화 레벨이 되도록 발생시켰다. Fig.5는 암소음 효과를 보기 위하여 신호음에 의한 음압과 진동을 신호음이 없는 상태에서와 비교한 결과이다. 실외 41dB(A), 실내 27dB(A)의 비교적 조용한 암소음 하에서 실험이 진행되었다. 신호음은 대부분의 주파수대역에서 암소음보다 15dB 이상 높았으나, 가속도 진동은 저주파수 대역에서 암소음에 의한 진동을 무시할 수 없어 식(4)의 우변 둘째항의 S/B 를 고려하였다. 가속도계용 전치증폭기의 이득은 316, 100, 31.6 mV/ms⁻²로 변화시키면서 명료도 차이를 보았고, 레이저 도플러 진동계는 최대 감도인 50V/ms⁻¹로 고정시켜 측정하였다. 매 2.6초 길이의 신호를 16회 측정하여 평균한 STI값을 구하였다. Fig. 6은 회의실의 주파수대역별 잔향 시간을 보인다.

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

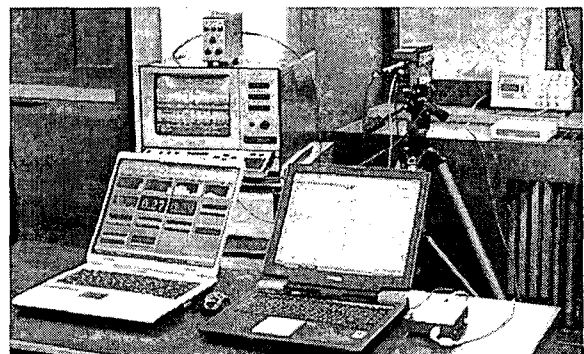
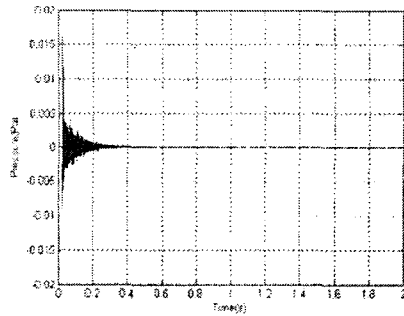
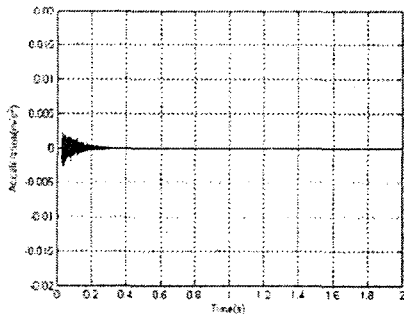


Fig. 3 Experimental set up.

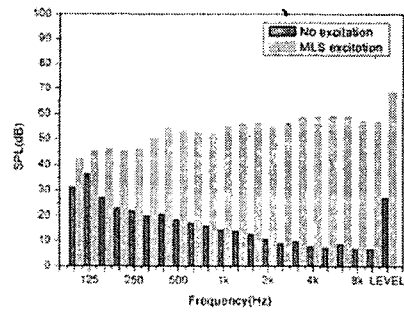


(a) Acoustic pressure at R8

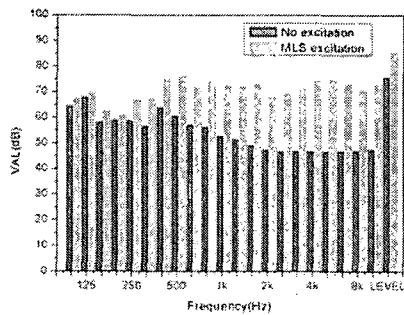


(b) Acceleration at A3

Fig. 4 Impulse responses.



(a) Acoustic pressure at R8



(b) Acceleration at A3

Fig. 5 Acoustic pressure and acceleration.

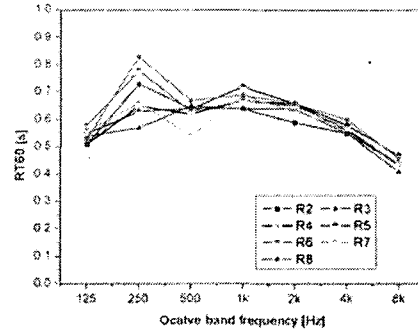


Fig. 6 Reverberation time.

4. 명료도 분석결과

우선, 전달계를 오디오시스템과 회의실로 국한 시킬 때의 명료도 분석 결과를 Fig.7에 보인다. 스피커 바로 앞에서의 STI 값은 예상대로 1에 가깝다. 실내 다른 7개 위치에서의 명료도는 0.7 이상으로 모든 위치에서 음성을 청취하는데 별 문제가 없는 것으로 나왔다. Fig.7에서 STI의 구간별 명료도 구분은 IEC60268-16⁽⁶⁾에 따른다.

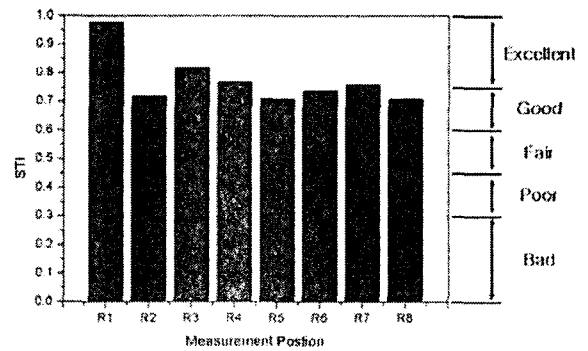


Fig.7 STI in the conference room.

음성의 전달경로에 유리창까지 포함 시킬 때의 가속도 신호(증폭기 이득 316mV/ms^2)의 명료도를 Fig.8에 보인다. 2중 유리창의 내/외면의 명료도 차이와 위치별 명료도는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 가속도 신호의 명료도를 Fig.7의 실내 음향 명료도와 비교할 때, 유리창 부근(R8)의 음향의 명료도에 조금 못 미치나, 음성 정보를 파악하는데 별 어려움이 없는 수준이다. 가속도 증폭기의 이득을 316, 100, 31.6mV/ms^2 으로 변화시킬 때의 STI 값은 거의 차이가 없는 것으로 나왔다. 속도 신호는 1m 거리에서 실내면 A3 지점에 레이저 빔을 맞추었다. Fig.9는 가속도 신호와 레이저 빔으로 측정된 속도 신호의 명료

도를 비교한 결과이다. 전술한 바와 같이 유리창 내/외면의 명료도에 별 차이가 없음을 감안할 때, 속도 신호의 명료도가 상대적으로 약간 떨어진다.

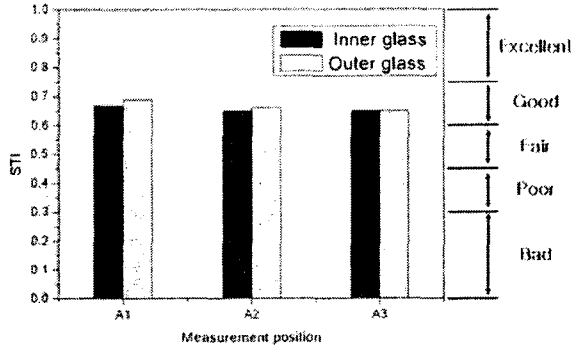


Fig.8 STI and measurement positions.

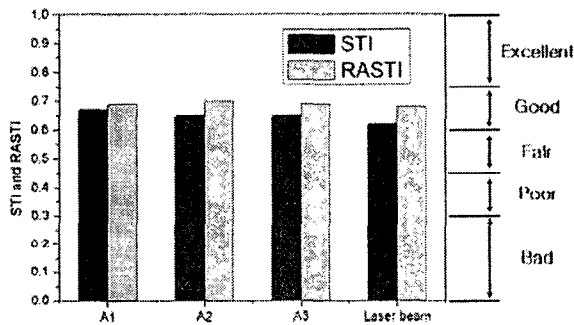


Fig.9 STI of acceleration and velocity signal.

가속도계는 접촉 면적의 증가적 가속도를 접촉제를 통하여 탐지하고, 레이저 빔은 한 점의 속도를 직접 측정함에도 불구하고 가속도계의 파형이 대화 정보를 더 잘 표현한다. 여기에는 두 센서 및 증폭기의 성능이 영향을 미칠 수 있으나, 가속도계의 고주파수 감지 특성이 유리한 점이 작용하는 것으로 보인다. 이를 확인하기 위하여 MLS 신호음에 대한 두 센서의 동시 응답 신호의 스펙트럼을 Fig. 10에서 비교한다. 예상대로 레이저 진동계의 속도 신호는 가속도 신호에 비해서 고주파수로 가면서 상대적으로 낮은 파워를 보인다. 이러한 주파수 특성은 마찰음이나 파열음 등의 무성음 음소(phoneme)의 재생에 불리하게 작용하므로 결과적으로 명료도 저하를 초래한다.⁽¹²⁾

이제까지 수행된 MLS 신호음 대신, 일반 대화음 하에서 유리창 진동음의 명료도를 주관적으로 평가해 보았다. 토론음을 음원으로 사용하였을 때의 가속도 및 속도 신호를 Fig.11에서 비교한다. 동일한 음성 하에서 동일 지점에서 측정하였음에도 파형은 차

이를 보인다. Fig. 12는 두 신호의 스펙트럼이다. 예상대로 속도 신호는 고주파수대역으로 가면서 파워가 많이 감소한다. 여건상 체계적인 직접 평가법을 수행하기는 어려웠으나, 속도 및 가속도 신호를 직접 스피커로 재생시켜 청취하였을 때, 가속도음이 더 명료하였으며, 두 신호음 모두로부터 대화 내용을 파악하는데 어려움이 없었다. 결론적으로 일반 실험용 레이저 진동 측정기로도 전술한 암소음 환경 하에서는 실내 대화 내용의 원격 탐지가 충분히 가능함을 확인할 수 있었다.

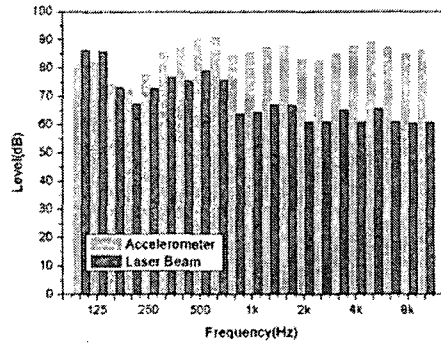
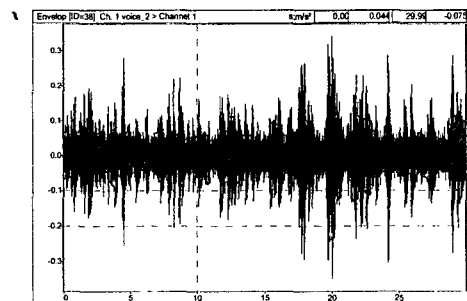
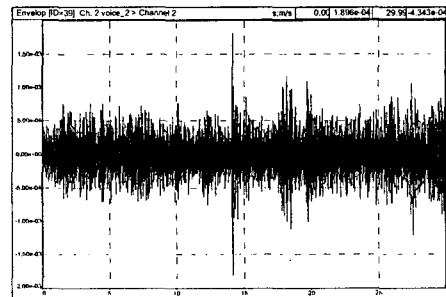


Fig. 10 Spectrum of acceleration and velocity.

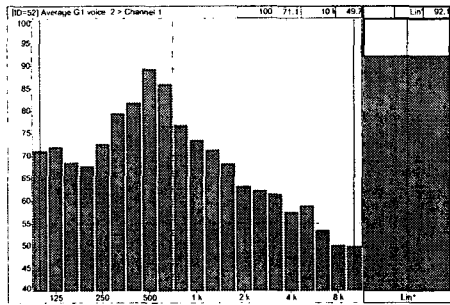


(a) Acceleration

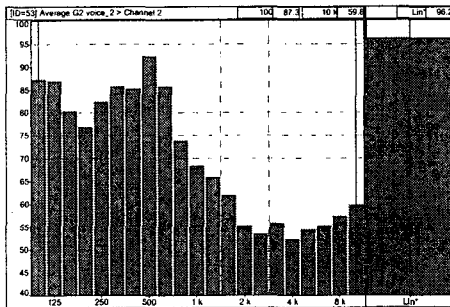


(b) Velocity

Fig. 11 Vibration waves of speech signal.



(a) Acceleration



(b) Velocity

Fig.12 Spectrum of the speech signal.

5. 결론 및 토론

MTF에 기초한 STI를 사용하여, 회의실 유리창 진동음의 명료도 분석을 수행한 결과, 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 회의실내의 명료도는 0.7이상, 유리창 진동음의 명료도는 0.6정도로, 충분히 인식 가능한 수준이었다.
- 2) 유리창 측정점 위치나, 내/외면 사이의 명료도 차이는 거의 없었다.
- 3) 가속도음이 속도음에 비하여 명료도가 약간 높게 나오며, 이는 대화음에 대한 주관적 평가로부터도 확인할 수 있었다.
- 4) 레이저빔을 사용하여 원격으로 유리창 진동음을 탐지하는 것이 충분히 가능하며, 추후 암소음 수준 효과 및 도청 방지 대책에 대한 연구가 필요하다.

후기

본 연구 수행에 관련하여 한국통신보안(주)의 협조에 감사드립니다.

참고문헌

(1) 안교승, 2002, "서울에는 비밀이 없다. : 지금은

도청중", 도서출판 그린.

(2) 김홍민, 1997, "대테러부대를 위한 레이저 도청에 관한 연구", 군사과학대학원 재료과학과, 석사논문.

(3) J.D.Quirt, 1983, "Sound Ttransmission Through Windows II. Double and Triple Glazing", Journal of Acoustical Society of America, Vol.74(2),pp.534-542

(4) 이정규, 김정태, 2000, "흡음재 처리를 통한 차실 내부 음의 명료도 향상에 관한 연구", 한국소음진동공학회 논문집, 제10권 2호, pp.240~246.

(5) 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.

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

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

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

(9) 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.

(10) A. S. Nielsen, 1987, "Comments on the Use of Physical Measures to Assess Speech Intelligibility, Journal of Acoustical Society of America Vol. 81, pp.1985~1987.

(11)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.

(12) Douglas D.Rife, 1989, "Transfer -Function Measurement with Maximum-Length Sequences", J. Audio Eng. Soc. Vol 37, pp.419~444.

(13) M.R. Schroeder, 1981, "Modulation Transfer Functions: Definition and Measurement", Acustica vol.49, pp.179~182.

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