

유리창 도청방지 장치의 성능평가

Performance Estimation of a Window Shaker

김석현[†], 김희동* · 허욱**

Seockhyun Kim, Heedong Kim, Wook Heo

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

ABSTRACT

Eavesdropping prevention performance is evaluated on a commercial window shaker, which is used to prevent a glass window from eavesdropping. Speech transmission index (STI) is introduced in order to estimate quantitatively the speech intelligibility of the sound detected on the glass window. Objective test by IEC standard using modulation transfer function (MTF) is performed to determine STI. Using Maximum Length Sequency (MLS) signal as a sound source, MTF is measured by accelerometers and laser doppler vibrometer. STI under different level of disturbing wave are compared to confirm the disturbing effect on the speech intelligibility.

1. 서론

유리창은 실내의 음성 정보를 실외로 가장 잘 전달하는 경로로, 도청의 주요 대상이다. 본 연구에서는 실내 음성에 의한 유리창의 진동을 음으로 재생시킬 때, 음성정보의 인식 수준을 정량적으로 평가하고, 유리창 교란기(Window shaker)로 음성에 의한 진동을 교란시킬 때 음성정보가 어느 정도 손상되는지를 정량적으로 평가한다. 국산화 개발된 도청 방지용 교란기를 대상으로 어느 정도의 도청 방지 효과를 낼 수 있는지를 검증하고 성능 개선을 위한 정보를 얻는 것이 본 연구의 목적이다. 외국의 경우, 레이저 모니터링을 이용한 도청 장비가^(1,2) 공공연하게 거래되고 있으나, 그 성격상 학술적 연구 결과는 잘 공개되지 않는다. 국내에서는 그 불법성 때문에 도청 장비의 성능은 베일에 가려져 있다. 또

한 도청방지 장치가 개발되어 국가기관 및 민간 업체에 이미 보급된 상태이나⁽³⁾, 도청 가능성이나 도청 방지 장치의 성능에 대한 객관화된 검증이 이루어지지 않고 있는 실정이다. 본 연구는 도청음의 명료도를 객관적으로 정량화시켜 평가한 1단계 연구의⁽⁴⁾ 후속 연구로 수행되었다. 도청 방지성능의 평가에 관련하여, 음성인식 수준을 객관적으로 평가하기 위하여 음성 전달계의 MTF (Modulation Transfer Function)을⁽⁵⁾ 구한 후, 전달음의 명료도를 STI (Speech Transmission Index)로⁽⁶⁾ 정량화시킨다. STI는 음성 전송경로를 통하여 전달된 음성의 정보가 얼마나 정확하게 인식되는가를 표시하는 지수로, IEC 기준으로 사용되고 있다.⁽⁷⁾ 음성 정보 인식의 정량화 관련 연구로, 건축물의 실내 음장 해석이나⁽⁸⁾, 승용차와 같은 밀폐된 공간의 음 명료도 분석⁽⁹⁾ 및 전송 장치의 전달 특성 해석⁽¹⁰⁾ 등이 보고된 바가 있으며, 최근 음향계와 연성된 유리창 도청음 인식의 정량적 평가가 보고된 바 있다⁽⁴⁾. 그러나 도청 방지용 유리창 교란기가 오래전부터 사용됨에도 불구하고, 음성 인식도에 미치는 효과를 정량화시켜 평가한 연구는 찾기 힘들다. 본 연구에서는 MTF-STI를 사용하여 국산화 개발된 유리창

† 책임저자: 정회원, 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

E-mail: seock@kangwon.ac.kr

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

* 한국외국어대학교 정보통신공학과

** 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과

교란기의 도청 방지 성능을 검증하고 문제점을 확인하여 유사시 실내 정보의 탐지에 필요한 데이터를 제공하고자 한다.

2. 음성명료도 분석방법

음성 정보의 인식 수준을 평가하는 직접 주관적 평가 방법⁽¹¹⁾은 평가자가 직접 인식하는 결과를 얻을 수 있는 장점이 있으나, 잘 훈련된 다수의 화자 및 청취자를 필요로 하는 점과, 시간과 경비가 많이 소요되는 제약이 있다. 이를 대신하는 객관적 평가 방법으로, Houtgast와 Steeneken은 시간 영역상의 교란과 비선형 왜곡까지를 고려하여 음성정보의 인식 정도를 음성 명료도(speech intelligibility)로 표시하는 방법을 제시하였다⁽⁶⁾. 이 방법은 말소리의 음압 변화를 고려한 14개의 변조 주파수(1/3옥타브 대역 중심)를 사용하여 음성 전달계의 MTF를 구하고, 그 변화로부터 음성정보의 손상도를 평가하게 된다. MTF를 사용하여 전달계의 대역별 SNR(Signal to Noise Ratio)을 구한 후, 125 Hz~8000 Hz의 7개의 옥타브 대역에 대하여 주파수가 중 합산 및 정규화 과정을 거쳐 STI를 산출한다. 이 방법은 네덜란드어⁽⁶⁾ 및 영어를⁽¹²⁾ 대상으로 직접 평가 결과와의 상관성이 매우 높은 것이 입증되었다. 음성 전달계의 MTF는 다음과 같이 정의된다⁽⁷⁾.

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

여기서 m_i, m_o 는 Fig. 1의 음성전달계의 입출력 신호의 변조계수 (Modulation Index) 이다.

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

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

여기서, \bar{I}_i, \bar{I}_o 는 입출력 신호의 평균인텐시티, F_m 은 변조주파수를 의미한다.

Schroeder 모델을 사용하면⁽¹³⁾, MTF는 다음과 같이 잔향 지배향과 잡음 지배향으로 결정된다.

$$m(F_o, F_m) = \frac{\left| \int_{-\infty}^{+\infty} h^2(t, F_o) e^{-j2\pi F_m t} dt \right|}{\int_{-\infty}^{+\infty} h^2(t, F_o) dt} \cdot \frac{1}{1 + 10^{-\frac{S/B(F_o)}{10}}} \quad (4)$$

여기서, $h(t, F_o)$: 음성전달계의 충격응답함수

S/B : 암소음에 대한 신호음 응답비

F_o : 125Hz~8000Hz 7개 옥타브대역 중심주파수

F_m : 변조주파수로(0.63Hz~12.5Hz 범위에서 1/3

옥타브 대역 14개의 중심 주파수)

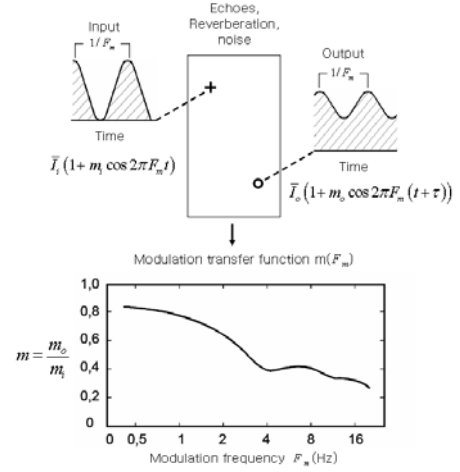


Fig.1 Modulation transfer function.

실험적으로 구한 총 98개의 MTF로부터, 전달계의 대역별 SNR은 다음과 같이 구할 수 있다.

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

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

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

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

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

3. 실험방법

Fig. 2는 실험용 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 두께의 단층 일반 유리를 사용하였다. Fig.2의 9개 지점에서 유리창 외면의 가속도 및 속도를 측정하였다. 상용 S/W인 dBBAI32 (01dB-Stell사)를 사용하여 MTF를 측정하고 STI를 결정하였다⁽¹⁴⁾. MTF를 측정하기 위한 음원으로 임펄스 신호보다 재현성과 SNR에서 유리한 MLS⁽¹⁵⁾ 신호음을 사용하였다. 이 방법에서는 ±1의 펄스로 구성된 일정 길이의 랜덤 백색 잡음을 주기

적으로 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.

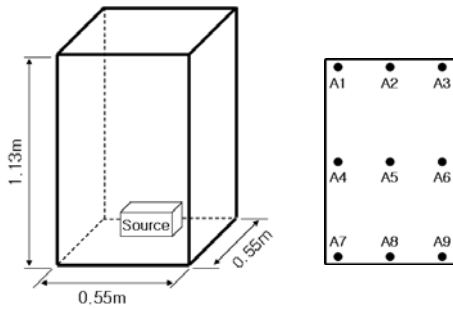
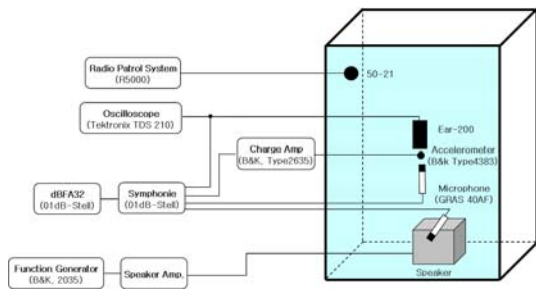


Fig.2 Dimensions of box-glass window system.



a) Experimental set-up



b) Photo of experiment

Fig.3 Experimental set-up.

Table 1 Experimental devices

| Devices | Models |
|-------------------------------------|---|
| 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 |
| Radio patrol system | R5000 |
| Window shaker | TRN-33 |

실험에 사용한 도청방지 장치는 한국통신보안(주)에서 개발한 Radio patrol system R5000(한국통신보안)과, 스피커 소자형 교란기 TRN-33을 사용하였다. Fig. 4는 도청방지를 보인다.



Fig.4 Radio patrol system and window shaker.

4. 도청 방지성능 평가결과

먼저, 교란기를 사용하지 않은 상태에서 MLS 신호음으로 실내 음압 68dB(A)의 대화음 수준을 유지할 때의 음성명료도를 검토한다. Fig.5는 박스내의 음향의 STI, 유리창 가속도신호의 STI(9개 지점 평균치), 그리고 유리창 속도신호(A5지점)의 STI를 비교한다. 우측에 표기된 STI의 구간별 음성명료도 등급은 IEC60268-16⁽⁷⁾에 따르는데, 'Excellent'는 명료하게 음성 정보를 인식할 수 있음을, 'Good'은 내용 인식에 아무 문제없는 정도를, 그리고 'Poor' 이하는 음성 정보를 인식하기 어려운 상태를 의미한다. 실내 음향의 STI가 거의 1에 가까운 것은 암소

음이 없고 오디오시스템의 음성전달에 문제가 없음을 의미한다. 가속도음은 레이저 속도음보다 다소 높은 0.9이상의 STI를 보이며 유리창 위치에 따른 차이는 거의 없는 것으로 확인되었다.

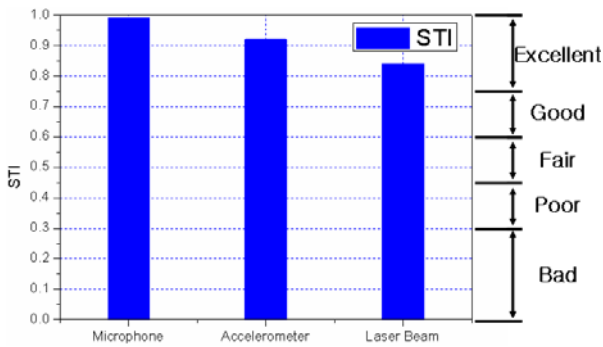
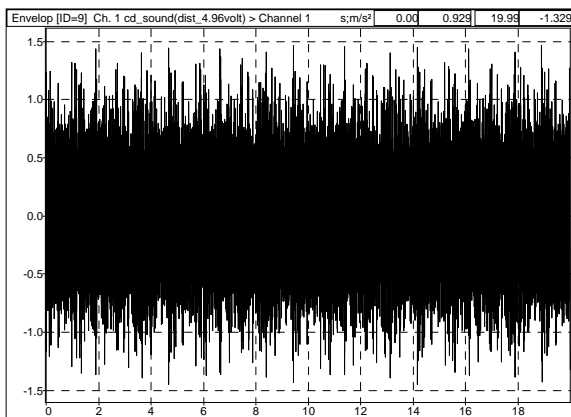
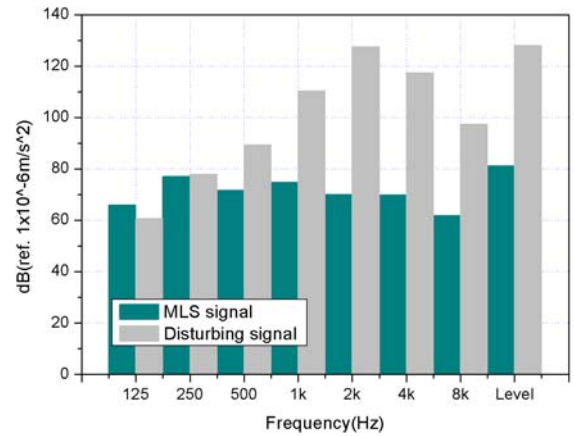


Fig.5 Comparison of STI.

유리창 A1지점에 교란용 스피커소자를 부착하고 교란파를 발생시킬 때의 STI 변화를 검토하였다. R5000의 난수발생 기능을 사용하여 스피커소자에 Fig. 6 a)와 같은 랜덤노이즈를 발생시켜 신호음에 의한 유리창 진동을 교란시켰다. b)는 교란파와 음성의 스펙트럼을 비교한 결과이다. 교란기 출력범위 내에서 교란파는 말소리에 사용되는 주파수 전대역을 매스킹시킬 수 있다.



a) Disturbing wave



b) vibration spectrum

Fig. 6 MLS signal and disturbing wave.

본 연구의 핵심 사항은 음성정보의 인식이 불가능한 상태를 만들기 위한 교란파의 수준이 어느 정도이고, 본 교란기의 출력 범위 내에서 교란이 가능한지를 검증하는 것이다. 그런데 교란효과는 음성신호의 크기에도 관계된다. 먼저, 정상 대화음 수준을 고려하여 실내 68dB(A)의 MLS 신호음 하에서 도청지점(Fig.2의 A5지점으로 설정)의 진동레벨을 측정된 결과, 84dB ($10^{-6}m/s^2$ 기준) 수준이었다. 다음에는 신호음을 주지 않은 상태에서 교란파만의 진동 레벨을 측정하였다. 교란파에 의한 진동레벨이 64dB로부터 10dB씩 단계적으로 발생하는 교란기의 출력을 결정한 후, 각 단계에서 신호음과 교란파의 합성음을 대상으로 교란 효과를 검토하였다. 그 결과를 Fig.7에 보인다. 84dB에서 STI 0.66은 MLS 신호음에 의한 유리창 진동과 교란파 진동레벨이 대등한 상태에서 음성정보의 인식이 가능함을 의미한다. 교란되지 않은 상태에서 STI는 0.9이상으로 음성정보는 명료하게 인식된다. 교란파 레벨이 증가하면서 음성명료도는 감소되어 교란파 레벨이 신호음에 의한 진동레벨보다 높아지면서 음성명료도는 급격히 저감함을 알 수 있다. 교란파의 레벨(104dB)이 신호음에 의한 진동(84dB)보다 20dB 이상 높을 때 STI는 0.2 아래로 인식 불가능한 수준이 된다. 이러한 결과는 직접 청취로도 확인할 수 있었다. Fig. 7에서 사용된 교란기의 최대 교란파 레벨은 128dB 정도로 나타났다.

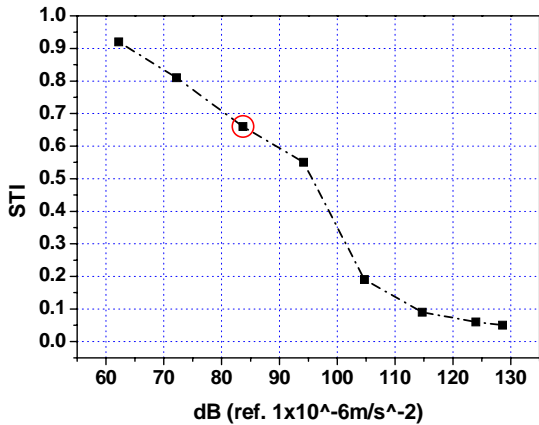


Fig.7 STI vs. vibration level of disturbing wave.

위치에 따른 교란효과를 보기 위하여 Fig. 8에 114dB로 교란시의 위치별 STI의 차이를 표시한다. 교란기가 장착된 위치 A1에서 가장 낮은 STI를 보이나, 위치에 따른 차이는 크지 않다. 이는 사용된 소형 교란기로 유리창 전체의 교란이 가능함을 의미한다.

Fig.9는 신호음에 의한 진동과 신호음과 대등한 교란파(84dB), 그리고 104dB 교란파의 스펙트럼을 비교한 결과이다. 본 연구모델의 교란파는 2000Hz 대역을 정점으로 교란효과가 높은 것을 알 수 있다. 그러나 신호음과 대등한 진동레벨을 보이는 교란파의 주파수특성을 고려할 때, 사용된 교란기는 2000Hz 대역에서는 교란효과가 높으나, 다른 주파수대역에서는 신호음에 대한 교란효과가 떨어진다. 이러한 특성은 Fig. 10의 대역레벨 비교에서 확인된다. 교란파의 주파수 분포는 교란효과와 밀접한 관계가 있을 것으로 예상된다. 추후 대역별로 레벨을 조절하면서 교란효과를 분석하여 교란파의 주파수가중 방안을 검토할 필요가 있다.

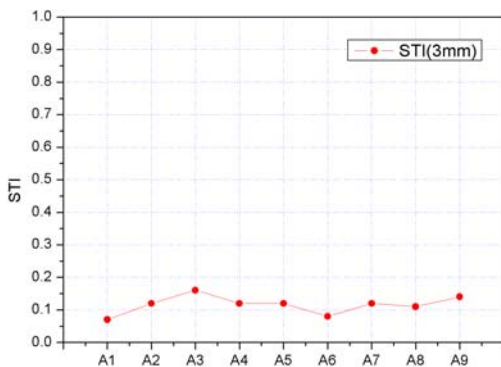


Fig.8 STI under 114dB-disturbance.

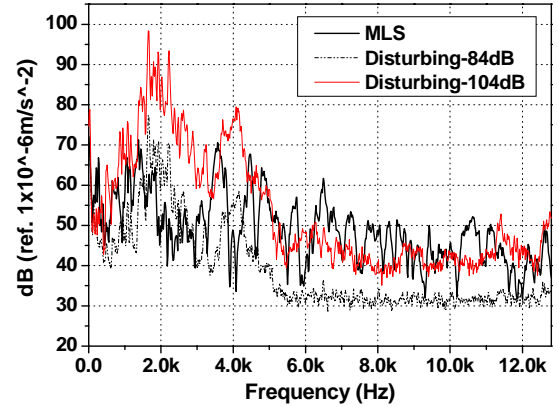


Fig.9 Vibration spectrum under disturbance.

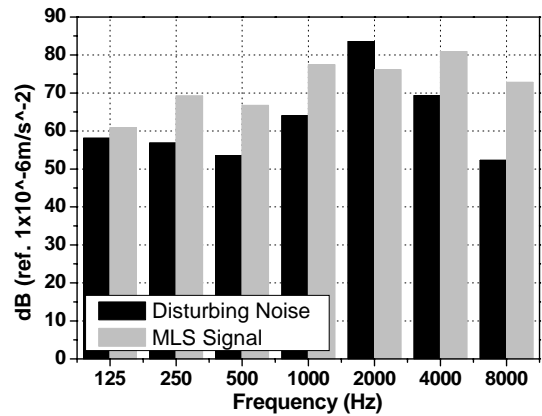


Fig. 10 Octave band levels of MLS signal and 84dB-disturbing wave.

5. 결론 및 토론

MLS 신호음에 의한 유리창 진동음을 도청방지 장치로 교란시킬 때, 교란파가 음성명료도에 미치는 효과를 분석하였다. 교란파의 레벨이 신호음에 의한 진동에 비해서 낮은 경우, 교란되더라도 음성인식이 가능한 수준이었다. 교란파 레벨이 신호음에 비해 높아지면서 교란효과는 급격히 증가하여 신호음 진동보다 20dB 이상 높아지면 인식 불가능한 상태가 되었다. 교란 효과는 유리창의 위치에 따라서는 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 본 연구에서 사용된 교란기 모델은 2kHz 대역에 교란 효과가 편중된 상태이다. 앞으로 교란파의 대역별 레벨과 교란효과의 관계를 검토하여, 최적 교란 효과를 내는 주파수 특성을 구할 필요가 있다.

후기

본 연구 수행에 관련하여 한국통신보안(주)의 협조에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) G-com technology : www.gcomtech.com
- (2) ALARM.de : www.alarm.de
- (3) 안교승, 2002, “서울에는 비밀이 없다. : 지금은 도청중”, 도서출판 그린.
- (4) 김석현, 김희동, 김윤희, 2007, “MTF-STI를 이용한 유리창 도청음의 명료도 분석”, 한국음향학회지, 제 26권 1호, pp.8~15.
- (5) T. Houtgast and H. J. M. Steeneken, 1973 “The Modulation Transfer Function in Room Acoustics as a Predictor of Speech Intelligibility”, *Acoustica* Vol.28, pp.66~73.
- (6) 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.
- (7) IEC, 2003, "Sound System Equipment -Part16: Objective Rating of Speech Intelligibility by Speech Transmission Index" IEC 60268-16, 3rd edition.
- (8) K.M.Li and P.M.Lam, 2005, "Prediction of Reverberation Time and Speech Transmission Index in Long Enclosures", *Journal of Acoustical Society of America*. Vol.117(6), pp.3716~3726.
- (9) 이정규, 김정태, 2000, “흡음재 처리를 통한 차실내부 음의 명료도 향상에 관한 연구”, 한국소음진동공학회 논문집, 제10권 2호, pp.240~246.
- (10) 장대영, 강성훈, 심동연, 김천덕, 1994, “음성전송 지수를 이용한 확성전화기의 명료도 평가 방법”, 한국음향학회지, 제 13권 5호, pp.32~39.
- (11) ANSI, 1989, “Method for Measuring the Intelligibility of Speech Over Communication Systems”, ANSI S3.2-1989.
- (12) 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.
- (13) M.R. Schroeder, 1981, "Modulation Transfer Functions: Definition and Measurement", *Acustica* vol.49, pp.179~182.
- (14) www.01dB-stell.com, Intelligibility Criteria : Measurement Method. dBbATI32 Application Note , MVI Technologies Group.
- (15) Douglas D.Rife, 1989, “Transfer -Function Measurement with Maximum-Length Sequences”, *J. Audio Eng. Soc.* Vol 37, pp.419~444.