

## 교란파가 유리창 진동음의 음성명료도에 미치는 영향

### The Effect of the Disturbing Wave on the Speech Intelligibility of the Eavesdropping Sound of a Window Glass

김 석 현† · 김 희 동\* · 허 옥\*\*

Seockhyun Kim, Hee-dong Kim and Wook Heo

(2007년 7월 23일 접수 ; 2007년 8월 16일 심사완료)

**Key Words** : Speech Intelligibility(음성 명료도), Modulation Transfer Function(변조전송함수), Speech Transmission Index(음성전송지수), Eavesdropping(도청), Disturbing Wave(교란파), Window Shaker(유리창 교란기)

#### ABSTRACT

The speech sound is detected by the vibration measurement of the window glass. In this study, we investigate the effect of the disturbing waves by background noise and window shaker excitation on the speech intelligibility of the detected sound. Based upon Modulation Transfer Function(MTF), speech intelligibility of the sound is objectively estimated by Speech Transmission Index(STI). As the level of the disturbing wave varies, variation of the speech intelligibility is examined. Experimental result reveals how STI is influenced by the level and frequency characteristics of the disturbing wave. By using a customized window shaker for disturbing sound, we evaluate the efficiency and the frequency characteristics of the anti-eavesdropping system. The purpose of the study is to provide useful information to prevent the eavesdropping through the window glass.

#### 1. 서 론

유리창은 실내의 음성 정보를 실외로 가장 잘 전달하는 경로로, 도청의 주요 대상이다. 이 연구에서는 실내 음성에 의한 유리창의 진동음이 외부의 교란파로 교란될 때, 음성정보가 어느 정도 손상되는지를 정량적으로 평가한다. 외국의 경우, 레이저 모니터링을 이용한 유리창 진동음의 도청 장비가 공공연하게 거래되고 있으며, 국내에서도 도청 방지용 유리창 교란기(window shaker)가 개발되어 국가기관 및 민간 업체에 보급된 상태이나, 아직까지 그 성능에 대한 객관적 검증이 미흡한 실정이다. 이 연

구는 유리창 도청음의 명료도를 객관적으로 평가한 선행 연구와<sup>(1)</sup>, 회의실 유리창 진동음에 대한 도청 가능성 평가 연구의<sup>(2)</sup> 후속 연구로 수행되었다. 유리창 진동음의 도청 여부 및 도청방지 성능을 평가하기 위해서는 음성정보의 인식 수준을 객관적으로 정량화시키는 것이 필요하다.

이를 위하여 이 연구에서는 음성전달계의 변조전송함수(modulation transfer function, 이하 MTF)<sup>(3)</sup>로부터 결정되는 음성전달지수(speech transmission index, 이하 STI)<sup>(4)</sup>를 사용한다. STI는 음성 전송경로를 통하여 전달된 음성의 정보가 얼마나 정확하게 인식되는가를 표시하는 지수로, IEC 기준으로 사용되고 있다<sup>(5)</sup>. 교란 효과를 보기 위하여 이 연구에서는 두 가지 유형의 교란파를 고려한다. 즉, 실외의 배경소음에 의한 교란파와, 유리창에 부착된 교란기에 의한 교란파가 유리창 진동음에 포함된 음성정보

† 교신저자 : 정희원 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

E-mail : seock@kangwon.ac.kr

Tel : (033) 252-2505, Fax : (033) 257-4190

\* 한국외국어대학교 정보통신공학과

\*\* 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과

의 인식 수준을 어느 정도 저하시키는지를 검토한다. 이로부터 배경소음의 레벨에 따라 음성정보가 어느 정도 손상되는가를 평가함과 동시에, 도청 방지를 위한 유리창 교란기의 성능 조건을 파악하고자 한다. 교란에 국산 도청 방지기의 교란 신호를 사용함으로써, 국산 도청방지용 제품의 성능을 검증하는 것도 연구 목적의 하나이다.

## 2. 음성명료도 분석방법

유리창 진동음으로부터 실내 음성 정보의 인식 수준을 정량적으로 평가하기 위하여, Houtgast와 Steeneken<sup>(3,4)</sup> 제시한 MTF 방법을 사용하였다. 이 방법은 시간 영역상의 교란과 비선형 왜곡까지 고려하여 음성정보의 인식 정도를 STI로 표시한다. 이 방법은 네덜란드어<sup>(4)</sup> 및 영어를<sup>(6)</sup> 대상으로 직접 평가 결과와의 상관성이 매우 높은 것이 입증되어 IEC의 기준으로 사용되고 있다. 음성전송지수를 구하기 위하여, 말소리의 음압 변화를 고려한 14개의 변조 주파수(1/3옥타브 대역 중심)에 대하여 음성 전달계의 MTF를 구하고, 대역별 MTF의 변화를 가지고 음성정보의 손상도를 평가한다. MTF를 구하기 위한 음원으로, 임펄스 신호보다 재현성과 SNR에서 유리한 maximum length sequence(MLS)<sup>(7)</sup>를 사용하였다. 이 방법에서는  $\pm 1$ 의 펄스로 구성된 일정 길이의 랜덤 백색 잡음을 주기적으로 입력시키고 출력 응답을 측정한다. 입출력 사이의 교차상관함수(cross correlation function)를 이용하여 충격응답을 구하게 되므로 압소음 영향을 최소화시킬 수 있다. 또한, 신호내의 많은 펄스를 사용하며, 주기적 응답을 동기화시켜 평균함으로써 SNR을 크게 증가시키는 장점이 있다. 측정된 MTF로부터 전달계의 대역별 신호대 잡음비(signal to noise ratio)를 구한 후, 125 Hz ~ 8,000 Hz의 7개의 옥타브 대역에 대하여 주파수가 증합산 및 정규화 과정을 거쳐 STI를 산출하였다. STI를 결정하는 상세한 과정은 선행 연구<sup>(1,2)</sup>에서 충분히 기술한 바 있다.

## 3. 실험방법

실험을 위하여 Fig. 1과 같이 한 면이 유리이고, 1.5 cm 두께의 압축판에 5 cm 두께 흡음재가 내장

된 직방형 상자를 제작하였다. A1~A9은 유리창 위의 진동 측정 지점을 표시한다. 측정에는 3 mm 및 5 mm 두께의 단층 일반 유리가 사용되었으며, 9개 지점의 유리창 외면의 진동을 측정하였다. Fig. 2는 반무향실 내에서 수행된 실험의 장치 구성도 및 실

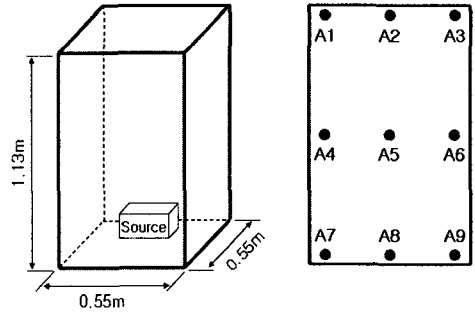
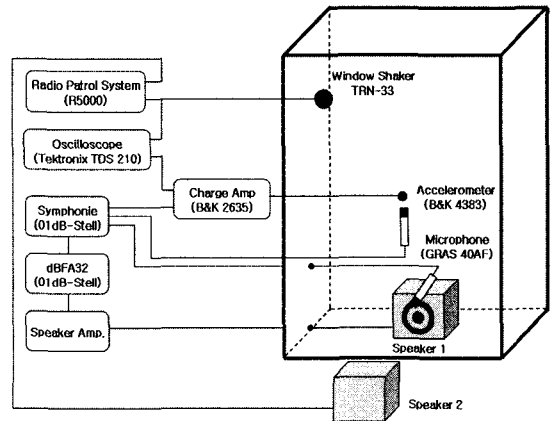


Fig. 1 Dimensions of box-glass window



(a) Experimental set-up



(b) Photo of experiment

Fig. 2 Experimental set-up

험 장면을 보이고, Table 1은 측정 및 분석기기의 제원이다. MTF와 STI의 반복적인 측정을 위해서 상용 S/W인 dBbATI32 (01dB-Stell)를 사용하였으며<sup>(8)</sup>, 교란과 효과를 파악하기 위한 실험은 다음의 세 단계로 진행하였다.

(1) 교란되지 않은 음성정보의 인식 수준을 평가하기 위하여, 실내 스피커 1로 MLS 신호를 발생시키고, 유리창 진동음의 STI를 구하였다. 측정에는 가속도계 및 레이저도플러 속도센서를 사용하였다.

(2) 위의 상태에서 실외 배경소음에 의한 교란과 진동음의 음성명료도에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 실외 스피커 2를 사용하여 배경소음을 발생시키고 STI를 관찰하였다. 이 단계부터는 레이저 속

도 신호음보다 음성명료도가 더 높은 가속도 신호음을 사용하였다.

(3) (1)의 상태에서 A1지점에 교란기를 부착하고 유리창에 교란진동을 발생시켰다. 교란과의 레벨 변화에 따른 각 지점의 STI 변화를 검토하였다.

교란용 도청방지 장치는 한국통신보안(주)의 Radio Patrol System R5000과<sup>(9)</sup>, 스피커 소자형 교란기 TRN-33을 사용하였다. Fig. 3은 도청방지를 보인다.

#### 4. 교란효과 분석결과

##### 4.1 유리창 진동음의 명료도

먼저, 교란이 전혀 없는 상태에서 유리창 진동음의 음성명료도를 구하였다. MLS신호음으로 실내 음압을 68 dB(A)의 정상 대화음 수준으로 발생시킬 때의 음성명료도를 Fig. 4에 보인다. 우측에 표기된 STI의 구간별 음성명료도 등급은 IEC60268-16<sup>(5)</sup>에 따른다. 'Excellent'는 명료하게 음성 정보를 인식할 수 있음을, 'Good'은 내용 인식에 아무 문제없는 정도를, 그리고 'Bad'는 음성 정보를 인식하기 어려운 상태를 의미한다. A5지점에서 유리창의 가속도신호는 레이저 속도신호보다 다소 높은 0.9이상의 STI를 보였다. 선행연구에서 유리창의 위치에 따른 STI의 차이는 거의 없는 것으로 밝혀진 바 있다.

##### 4.2 배경소음의 교란 효과

Fig. 2(a)의 스피커 2로 유리창 1.5 m 앞에서 국산 도청방지기의 교란신호를 발생시킴으로써, 신호음에 의한 유리창 진동을 교란시켰다. 교란신호로 완전 불규칙신호(true random noise)를 사용하였으며, Fig. 5(a)와 (b)는 5 mm 두께 유리창의 A5 지점에서 발생된 교란과의 파형과 주파수 스펙트럼을 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	dBbATI32(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 Primus360
Radio patrol system	R5000
Window shaker	TRN-33 ( $\phi=22$ mm, 3 gram)

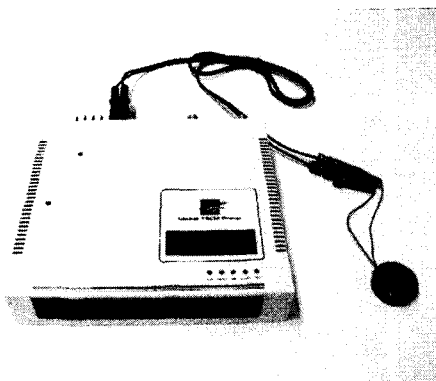


Fig. 3 Radio patrol system and window shaker

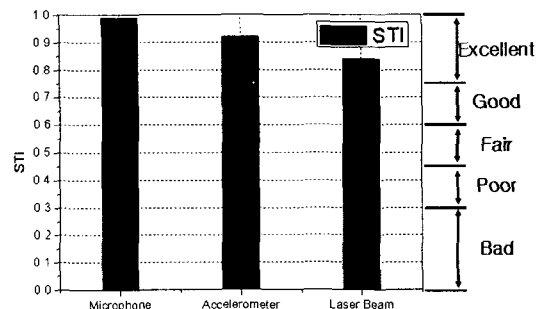
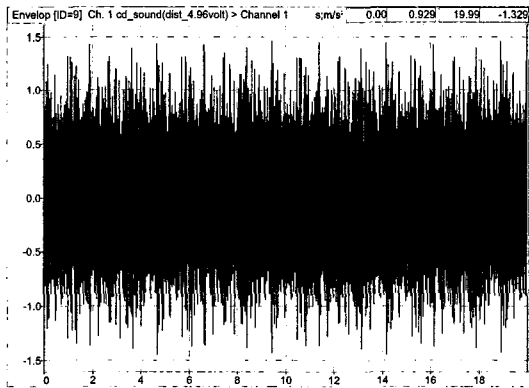


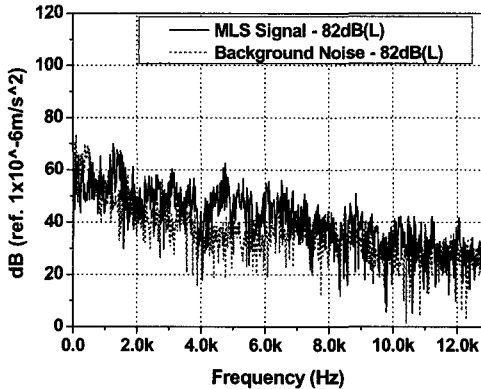
Fig. 4 Comparison of STI

(b)에서 검은 선으로 표시된 MLS 신호음에 의한 진동 스펙트럼과 회색 선으로 표시된 교란과 진동 스펙트럼은 비슷한 주파수 분포를 보이므로, 교란과는 음성 신호의 교란용으로 적합한 것으로 보인다. 다음으로, MLS 신호와 배경소음이 유리창에 어느 정도의 진동을 발생시키는가를 비교해 보았다. Fig. 6 (a)는 MLS 신호음의 음압 변화에 따른 A5지점의 유리창 진동레벨이고, (b)는 배경소음의 음압 레벨에 따라 발생하는 유리창의 교란과 레벨이다. 음압은 유리창중앙으로부터 10cm의 동일한 거리에 있는 실내/외 지점의 측정치이다. 그림에서 MLS 신호음에 의한 진동이 배경소음에 의한 진동보다 약간 크게 발생하나, 그 차이는 매우 작다. 즉, 실내/외 음압 가간에 의하여 발생하는 유리창의 진동 레벨은 대등하다. 또한, 3mm 두께 유리창의 진동이 5mm 보다 약간 크게 발생하는 것은 예상되는 결과이다.

다음에는 음성정보를 인식 불가능하게 만드는 배



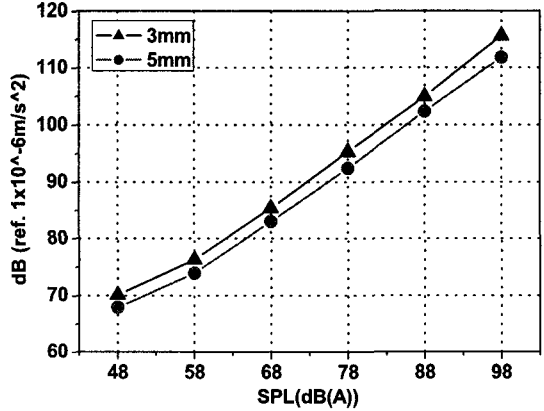
(a) Disturbing wave



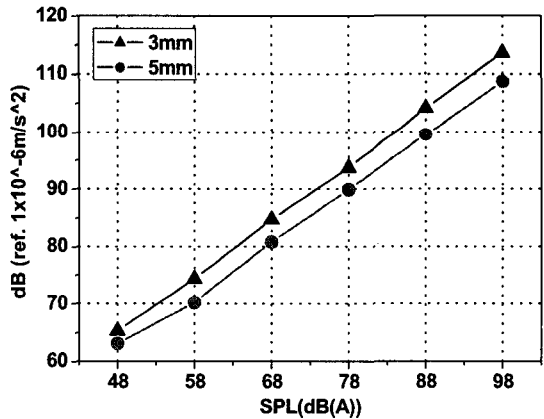
(b) Vibration spectrum

Fig. 5 MLS signal and disturbing wave

경소음의 크기가 어느 정도인지를 검토하였다. 배경소음이 없는 경우, 정상 대화음 수준인 68 dB(A)의 실내 MLS 음압 하에서의 STI는 0.9 이상 나왔다.



(a) Vibration level vs. MLS pressure level



(b) Vibration level vs. background noise level

Fig. 6 Vibration level vs. sound pressure level

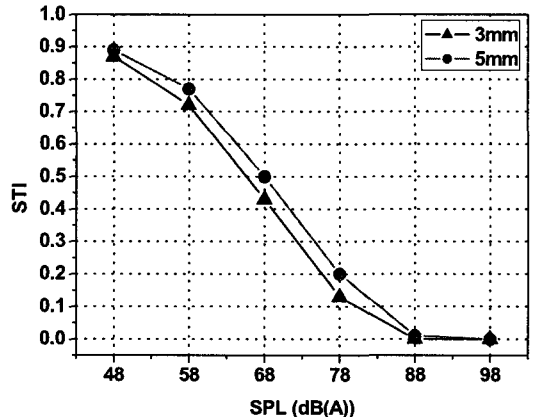


Fig. 7 STI vs. background noise level

이 상태에서 배경소음의 레벨을 증가시키면서 STI의 변화를 구한 결과를 Fig. 7에 보인다. 배경소음의 레벨이 실내 음압레벨과 대등한 68 dB(A)에서 STI는 0.4~0.5인데, 이는 부분적으로 인식 가능한 상태이다. 이 상태에서 MLS에 의한 유리창 진동과 배경소음에 의한 진동은 비슷한 레벨을 보인다.

배경소음이 신호음보다 10 dB 이상 높아지면 STI는 0.2 아래로 떨어져 음성정보의 인식이 어려운 상태가 된다. 이는 교란과 MLS 신호음을 전체 주파수대역에서 잘 매스킹 시키는 경우의 결과이다. 또한, 3 mm 유리창이 낮은 STI를 보이는 것은 배경소음의 교란효과가 3 mm에서 약간 더 크게 발생됨을 의미한다.

### 4.3 교란기의 교란 효과

여기서는 유리창 교란 장치를 사용하여 유리창을 교란시킬 때, 음성정보의 인식을 불가능하게 하는 교란파의 크기를 확인하고, 연구 대상 제품의 출력 범위 내에서 교란이 충분한지를 검토하고자 한다. Fig. 6(a)에서 정상 대화음 수준인 68 dB(A) MLS 신호음 하에서의 유리창 진동은, 3 mm 두께 유리창의 경우 84 dB(L), 5 mm 유리창에서는 82 dB(L) 정도였다. Fig. 8은 교란기로 이와 동일한 레벨(84 dB(L))의 교란 진동을 발생시켜 두 스펙트럼을 비교한 결과이다. Fig. 5의 배경소음에 의한 교란에서와는 달리, 교란기에 의한 교란파는 2,000 Hz 대역 외에는 충분히 매스킹 시키지 못하고 있다. 교란파의 (A5 지점) 크기를 변화시키면서 구한 음성명료도를 Fig. 9에서 검토한다. 교란파 레벨 84 dB에서 STI는

0.65 정도로 나온다. 이는 신호음에 의한 진동과 교란파 레벨이 대등한 상태에서도 음성 정보를 충분히 인식할 수 있음을 의미한다. 즉, 배경소음에 의한 교란시에 비해 교란 효과가 훨씬 떨어진다. 교란파 레벨이 신호음에 의한 진동보다 30 dB 이상 커져야 STI는 0.2 아래로 떨어져 음성정보의 인식이 어렵게 된다.

위치에 따른 교란효과를 보기 위하여 Fig. 10에 124 dB로 교란시의 위치별 STI의 차이를 표시한다. 교란기가 장착된 위치(A1)에서 가장 낮은 STI를 보이나, 위치에 따른 차이는 크지 않다.

흥미로운 사실은 전술한 배경소음의 교란효과보다 교란기의 교란효과가 현저히 떨어진다는 점이다. 배경소음에 의한 교란과는 신호음에 의한 진동 보다 10 dB 높으면 STI는 0.2 정도 나왔으나, 교란기의 교란과는 30 dB 이상 높아야 비슷한 교란효과를 기

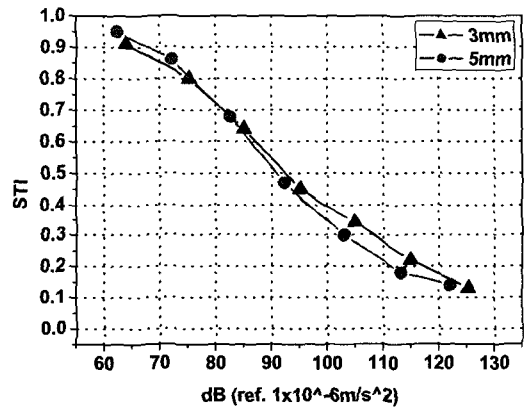


Fig. 9 STI vs. disturbing wave level

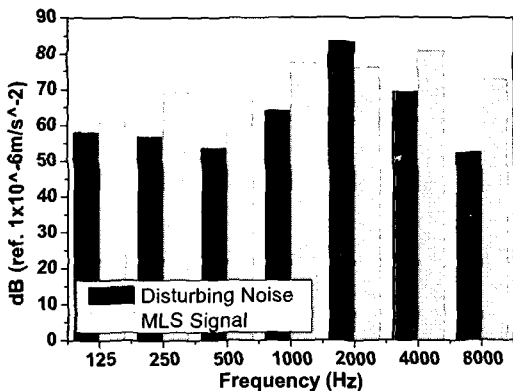


Fig. 8 Octave band levels of MLS signal and 84 dB-disturbing wave

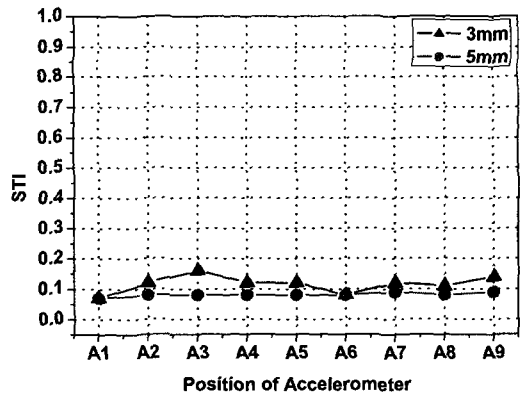


Fig. 10 STI vs. measurement position under 124 dB(L) disturbing wave

대할 수 있다. 동일한 교란 신호를 사용하였음에도 이와 같이 현저한 차이가 발생하는 것은 Fig. 5와 Fig. 8에서 비교되듯이, 두 가지 방식으로 발생하는 교란파의 주파수 특성이 전혀 다른데 기인한다.

#### 4.4 유리창 교란기의 성능 분석

교란기에 의한 교란파의 주파수특성을 검토하기 위하여, 5 mm 두께 유리창을 대상으로 A5 지점의 진동스펙트럼을 검토하였다. Fig. 11은 82 dB(L)의 MLS 신호음에 의한 진동과 교란기에 의한 교란파, 그리고 102 dB(L)의 교란파의 주파수 스펙트럼을 비교한 결과이다. 앞에서 배경소음에 의한 교란파는 MLS 신호음에 의한 진동과 비슷한 주파수 분포를 가졌다. 그러나 Fig. 11에서 교란기에 의한 교란파는 2 kHz와 4 kHz 대역 성분이 집중적으로 나타나고, 다른 대역에서는 레벨이 많이 떨어진다. 특히 음성에 많이 사용되는 2 kHz 아래 대역에서는 신호음을 매스킹 시키지 못하고 있는 것이 교란 효율을 저하시키는 주 요인이다. Fig. 11에서 교란파 레벨이 102 dB(L)로, 신호음 진동보다 20 dB 정도 높으면 대부분의 주파수 대역을 충분히 매스킹 시키게 된다. 결과적으로 교란파의 총 레벨을 높임으로써 교란효과를 기대할 수 있으나, 이보다는 음성에서 많이 사용하는 주파수 대역을 충분히 매스킹 시키는 것이 보다 중요하다. 교란이 2 kHz 대역에 집중되는 원인으로, 교란용 스피커 특성이나 유리창 전달 특성을 생각할 수 있다. 유리창의 전달특성 측면을 확인하기 위하여 거리에 따른 교란파의 차이를 검토하였다. Fig. 12를 보면 교란지점(A1), 유리창 중앙(A5), 교란기로부터 가장 먼 지점(A9)의 교란파의 주파수 분포 및 레벨이 대동소이하다. 이는 교란파의 전달과정에서 레벨이나 주파수 특성의 변화는 거의 없음을 의미하며, 따라서 2 kHz와 4 kHz 대역에 교란이 집중되는 것은 교란용 스피커의 특성임을 의미한다. 결론적으로 연구대상 도청방지에서 공급하는 교란 신호 자체는 MLS 신호음에 의한 진동을 잘 매스킹 시키나, 교란용 스피커의 성능 한계 때문에 교란 효율이 떨어진다. 또한, 요구되는 교란기의 조건은 도청 대상 유리창의 크기나 두께에 따라 다를 수 있으므로, 추후 다양한 구조의 두꺼운 대형 유리창에 대한 검토가 필요하다. 궁극적으로 스피커의 주파수특성을 개선시켜 매스킹 효율을 높일 것인

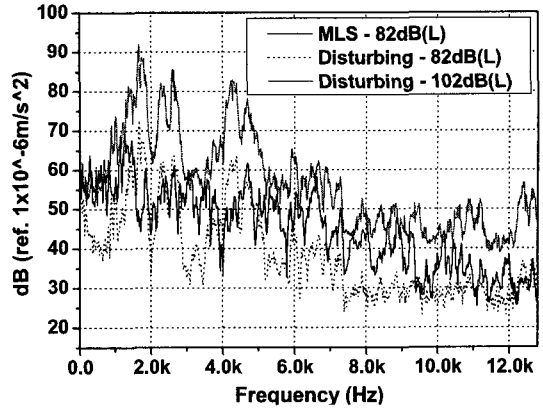


Fig. 11 Vibration spectrum of disturbing wave (measurement at A5)

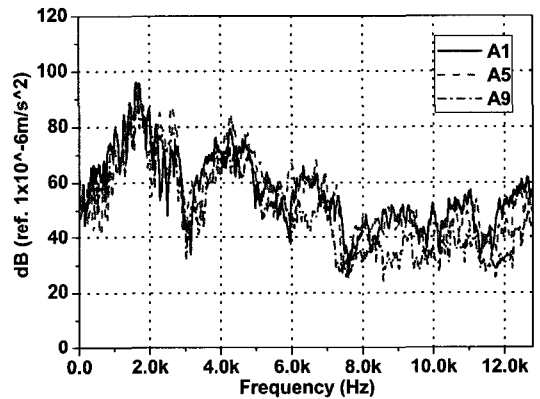


Fig. 12 Vibration spectrum of disturbing wave

가, 교란기의 출력을 높여 해결할 것인가는 기술적인 측면과 비용을 종합적으로 고려할 필요가 있을 것이다.

## 5. 결 론

MLS 신호음에 의한 유리창 진동음을 교란파로 교란시킬 때, 음성명료도에 미치는 효과를 분석한 결과는 다음과 같다.

(1) 배경소음에 의한 교란파가 MLS 신호를 전체 주파수대역에서 충분히 매스킹 시킨다면, 그 레벨이 신호음에 의한 진동과 대등할 때, STI는 0.4~0.5 정도로 부분적으로 인식 가능한 수준이었다. 배경소음이 실내 신호음보다 10 dB 이상 높아지면 음성정보의 인식이 어려운 상태가 되었다.

(2) 국산 유리창 교란기로 교란시킬 때, 교란파

레벨이 신호음에 의한 진동과 대등할 때, STI는 0.6 이상으로 음성정보의 인식이 충분히 가능한 수준이었고, 신호음 진동보다 30 dB 이상 높아지면 인식이 어려운 상태가 되었다. 교란기로부터의 거리에 따른 교란효과의 차이는 거의 없었다.

(3) 이와 같이, 교란기에 의한 교란 효과가 배경 소음에 의한 교란효과보다 떨어지는 원인은 유리창에 부착하는 교란용 스피커의 주파수 특성 때문인 것으로 확인되었다. 즉, 교란 신호가 전 주파수대역에서 MLS 신호음을 매스킹 시켜도, 스피커로 가진 할 때 음성에서 많이 사용하는 2 kHz 아래를 매스킹 시키지 못하였다. 연구 모델의 경우, 교란과 레벨을 신호음에 의한 진동보다 30 dB 정도 더 높임으로써 충분한 교란이 가능하나, 교란기의 효율 제고를 위해서 주파수 특성의 개선작업이 필요하다.

### 후 기

이 연구는 2007 건설교통 기술연구 개발사업의 한국철도기술연구원 위탁과제인 “틸팅열차 차음재의 차음성능 향상 기술개발”의 연구비 지원 하에 수행되었으며, 실험에 협조한 한국통신보안(주)에 감사드린다.

### 참 고 문 헌

(1) 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.

(2) Kim, Y. H., Kim, H. D. and Kim, Y. H., 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.

(3) 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.

(4) 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.

(5) IEC, 2003, “Sound System Equipment - Part 16 : Objective Rating of Speech Intelligibility by Speech Transmission Index”, IEC 60268-16, 3rd edition.

(6) 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.

(7) Rife, D. D., 1989, “Transfer-function Measurement with Maximum-length Sequences”, *J. Audio Eng. Soc.* 37, pp. 419~444.

(8) <http://www.01dB-stell.com>, Intelligibility Criteria : Measurement Method. dBATI32 Application Note , MVI Technologies Group.

(9) <http://www.tscm.co.kr>, Korea TSCM.