

# 자동차 잡음 및 오디오 출력신호가 존재하는 자동차 실내 환경에서의 강인한 음성인식

박철호(LG전자), 배재철(경북대), 배건성(경북대)

## <차 례>

- |                     |                                    |
|---------------------|------------------------------------|
| 1. 서론               | 3.2 인식실험 결과                        |
| 2. 차량환경을 위한 음성인터페이스 | 3.3 음성인터페이스의 후처리 기법에<br>따른 인식결과 비교 |
| 3. 실험 및 검토          | 4. 결론                              |
| 3.1 인식실험 환경 및 조건    |                                    |

## <Abstract>

### Robust Speech Recognition in the Car Interior Environment having Car Noise and Audio Output

Chul Ho Park, Jae-Chul Bae, Keun Sung Bae

In this paper, we carried out recognition experiments for noisy speech having various levels of car noise and output of an audio system using the speech interface. The speech interface consists of three parts: pre-processing, acoustic echo canceller, post-processing. First, a high pass filter is employed as a pre-processing part to remove some engine noises. Then, an echo canceller implemented by using an FIR-type filter with an NLMS adaptive algorithm is used to remove the music or speech coming from the audio system in a car. As a last part, the MMSE-STSA based speech enhancement method is applied to the output of the echo canceller to remove the residual noise further. For recognition experiments, we generated test signals by adding music to the car noisy speech from Aurora 2 database. The HTK-based continuous HMM system is constructed for a recognition system. Experimental results show that the proposed speech interface is very promising for robust speech recognition in a noisy car environment.

\* Keywords: Speech interface, Speech recognition, Echo canceller, MMSE-STSA, HMM.

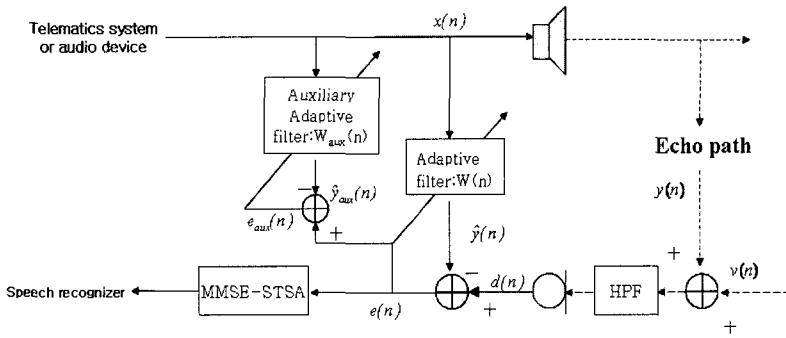
## 1. 서 론

최근 텔레매틱스 시스템이 실용화되면서 운전자는 차량 내에서의 다양한 서비스를 이용하게 된다. 그러나 대부분 운전 중에 서비스가 이용되는데, 운전자의 눈과 손이 정보기기의 인터페이스에 사용될 경우 운전 위험성이 커진다. 따라서 운전자의 안전과 편리를 위해 음성인식 기술을 이용한 HMI(Human Machine Interface) 기술이 차량 내 정보기기에 적용되면서 차량환경에서의 강인한 음성인식 기술의 중요성이 크게 증가하였다.

차량환경에서 음성인식 시스템의 문제점은 운행 중 차량 실내에서 발생하는 잡음으로 인한 음성인식 성능의 저하이다. 최근 차량환경에서 잡음에 강인한 음성인식을 위한 잡음제거 기술 그리고 강인한 특징 추출에 관한 많은 연구가 진행되었으며 그 결과 인식성능이 상당히 향상되었다[1][2][3]. 그러나 실제 차량환경에서는 엔진 잡음, 타이어에서 발생하는 마찰 잡음 등과 같은 정상 잡음(stationary noise)뿐만 아니라 차량 내의 정보기기로부터 출력되는 음악, 뉴스 등과 같은 비정상(non-stationary) 잡음이 존재한다. 차량 실내 환경에서의 텔레매틱스 시스템을 위한 음성인터페이스로 음성인식을 사용하고자 할 때는 특히 이러한 잡음을 제거해야 한다. 이를 위해서는 적응필터 또는 음성개선 기법이 단독으로 사용되는 것보다 적응필터를 통해 오디오 출력신호의 반향신호와 같은 비정상 잡음을 제거하고, 음성개선 기법으로 정상 잡음을 제거해줌으로써 음성인터페이스의 인식성능을 향상시킬 수 있다[4].

본 논문에서는 오디오 출력신호를 비롯한 자동차 잡음이 존재하는 차량 실내 환경을 고려하여, 반향제거와 음성개선 기능을 갖는 음성인터페이스를 이용한 잡음음성의 인식실험을 수행하였다. 음성인터페이스의 마이크로 입력되는 오디오 시스템의 출력신호를 제거하기 위한 반향제거기는 동시통화 겸출을 위한 보조필터를 갖고, NLMS(Normalized Least Mean Square)[5][6] 적응 알고리듬을 사용하는 FIR(Finite Impulse Response) 필터로 구현하였으며, 잔여 잡음을 제거하기 위한 후처리 과정으로 MMSE-STSA(Minimum Mean Square Error Short-Time Spectral Amplitude)[7] 기반의 음성개선 기법을 사용하였다. 이 때, 저주파 영역에서 대체로 큰 전력을 갖는 자동차 잡음의 영향을 줄이기 위해서 음성인터페이스의 전처리 과정에서 고대역 필터를 사용하였다. 본 논문에서 적용한 각 기법에 따른 자동차 실내 환경에서의 음성인식 성능을 비교하기 위하여 AURORA2 DB의 자동차 잡음 음성에 오디오 출력신호에 의한 반향신호를 생성하여 더한 실험 데이터를 이용하였으며, AURORA2-HTK 인식시스템을 사용하였다. 또한, 후처리 과정으로 MMSE-STSA 기법 외의 대표적인 음성개선 기법인 스펙트럼 차감법[8], Wiener 필터링[9]을 사용한 경우와 잡음음성의 인식성능을 비교하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 반향제거기와 음성개선 기법 그리고



&lt;그림 1&gt; 음성인터페이스 구조

고대역 필터로 구성된 음성인터페이스에 대해 설명한다. 3장에서는 실험환경과 음성인터페이스에 대한 인식실험 결과들을 제시하고 분석한다. 그리고 마지막으로 4장에서 결론을 맺는다.

## 2. 차량환경을 위한 음성인터페이스

<그림 1>은 자동차 잡음과 오디오 출력신호가 존재하는 차량 실내 환경을 고려한 음성인터페이스의 구조를 보인 것이다. 음성인터페이스의 마이크로 입력되는 오디오 시스템의 출력신호를 제거하기 위해 반향제거기를 사용한다. 반향제거기는 적응필터를 사용하고 안정성을 위해 FIR 필터로 구현된다. 적응필터의 적응 알고리듬은 LMS(Least Mean Square), NLMS, BNLMNS(Block NLMS), LS(Least Square), RLS(Recursive LS) 등이 있지만 일반적으로 구조가 간단하고 안정한 NLMS 알고리듬이 많이 사용된다[5][6]. 적응필터는 오디오 시스템으로부터 직접 얻어지는 출력신호를 참조신호로 사용하여 자동차 실내 환경을 거쳐 마이크로 입력되는 반향신호를 제거하게 되는데, 마이크 입력신호에서 추정된 반향신호를 빼준 오차신호가 최소가 되도록 적응필터의 텁 계수를 갱신한다. 마이크로 반향신호뿐만 아니라 운전자의 음성신호가 입력될 경우 적응필터는 반향신호를 제대로 추정하지 못하고 발산하게 되는데, 이를 방지하기 위하여 동시통화(DT: Double-Talk) 구간을 검출하여 이 구간에서는 적응필터 계수의 갱신을 멈춰야 한다. 본 논문에서는 보조 적응필터를 사용하여 DT 검출 성능을 향상시키고, 배경잡음의 크기에 따른 적응필터 갱신 구간을 설정해줌으로써 적응필터의 안정성을 향상시키고자 하였다[10]. 실험에 사용된 주 적응필터의 차수는 256차, 보조필터의 차수는 128차로 하였다. 반향제거기를 통해 반향음이 제거된 신호는 잔여잡음을 가지게 되는데, 이는 음성인식 성능을 저하시킨다. 따라서 잔여잡음 제거를 위해 음성개선 기법들 중에서 우수한

성능을 갖는 MMSE-STSA 추정치 기반의 음성개선 기법을 후처리 과정으로 적용하였다.

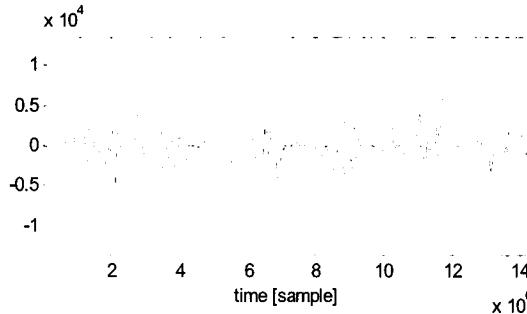
MMSE-STSA 기반의 음성개선 기법은 음성과 잡음의 스펙트럼이 통계적으로 서로 독립적인 가우시안(Gaussian) 분포를 갖는다는 가정 하에, 각 스펙트럼 빈(bin)에 대해 추정된 신호 및 잡음 전력을 이용하여 이득함수를 구하여 곱해줌으로써 잡음성분을 줄여준다. 따라서 이득함수의 추정 정확도에 따라 음성개선 성능이 달라지게 되는데, 이득함수는 사전 신호대잡음비(*a priori SNR*)와 사후 신호대잡음비(*a posteriori SNR*)의 함수로 주어지기 때문에 정확한 사전 신호대잡음비와 사후 신호대잡음비를 구할 필요가 있다. 사전 신호대잡음비와 사후 신호대잡음비를 구하기 위해서는 각 스펙트럼 빈에 대한 음성신호 및 잡음신호의 전력을 추정해야 하는데, 각 프레임마다 문턱치 기반의 VAD(Voice Activity Detection)를 사용하여 음성의 존재 유무를 결정하고 묵음 구간에서만 잡음전력을 추정하는 방법을 hard-decision 방법이라고 하고 이 방법을 적용하였다[7].

잡음환경에서의 반향제거기는 반향 이외의 엔진잡음과 같은 자동차 잡음으로 인해 반향제거 성능이 저하될 수 있으며 오차신호는 잔여 반향신호를 많이 포함한다. 여기에 후처리 과정인 음성개선 기법을 적용하면 음성신호의 왜곡을 발생시켜 음성인식 성능을 저하시킨다. 따라서 엔진잡음 등의 자동차 잡음을 억압할 수 있는 음성인터페이스 전처리 과정을 적용함으로써 반향제거기의 성능을 향상시키고자 하였다. 본 논문에서 사용한 자동차 잡음은 AURORA2 DB의 자동차 잡음으로 저주파 영역인 1 kHz 이하에 많이 분포되어 있었고, 특히 약 200 Hz 아래에서 더 많이 존재함을 확인할 수 있었다. 따라서 300 Hz 미만에서는 상대적으로 적은 에너지를 갖는 음성신호의 특성을 고려하여 차단주파수 250 Hz를 갖는 고대역 필터를 음성인터페이스의 전처리 과정으로 사용하여 자동차 잡음의 영향을 감소시킨다. 고대역 필터는 20차의 FIR 필터를 사용하였다.

### 3. 실험 및 검토

#### 3.1 인식실험 환경 및 조건

본 실험에서 잡음음성은 ETSI(European Telecommunications Standards Institute) STQ-AURORA DSR Working Group에서 제공하는 AURORA2 DB의 테스트 집합 A를 사용한다. AURORA2 DB에는 다양한 잡음종류에 대해 여러 SNR 레벨에 따른 잡음음성이 포함되어있기 때문에 객관적으로 평가하기에 적합하다. 테스트 집합 A는 20 dB부터 -5 dB까지 6가지 잡음 레벨을 갖는 다양한 잡음(subway, bubble, car, exhibition) 음성으로 구성되며, 이 중 자동차 잡음음성에 대해서만 인식실험을 수



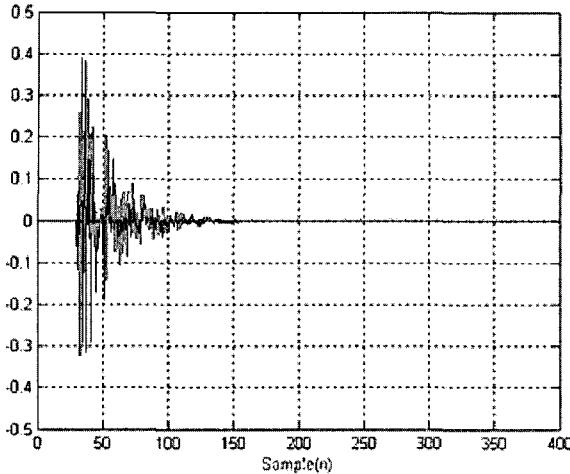
&lt;그림 2&gt; 오디오 출력신호 예(참조신호)

행하였다. 기본 음성인식기로는 AURORA2-HTK를 사용하였으며, 이는 CUED-HTK 음성인식시스템[11]의 단어모델과 훈련절차를 따른 것으로 AURORA2 DB에 적합하도록 구성된 것이다. 단어모델은 one, two, three, four, five, six, seven, eight, nine, zero, oh의 11개로 정의되어 있고, 각 단어모델은 3개의 mixture, 16개의 state를 갖는 CHMM(Continuous Hidden Markov Model)으로 구성된다. 인식시스템에는 11개의 단어모델 외에 2개의 묵음 모델이 포함되어 있는데, 각각 3개 state와 1개 state CHMM으로 구성되어 있다. 특징파라미터는 23차 필터뱅크를 이용한 12차 MFCC 와 1차 로그에너지, 그리고 각각의 delta 및 acceleration 성분을 포함한 총 39차로 구성된다. 분석 프레임의 크기는 25 ms이며, 10 ms씩 이동시키면서 특징파라미터를 추출하였다. 그리고 성능평가를 위한 평균인식률로 단어정확률을 사용하였다.

반향신호를 생성하기 위한 배경음악은 8 kHz 샘플링레이트, 16 bits로 양자화된 총 샘플수 14,312,466개인 1,789초 분량의 한국음악을 사용하였다. 음악과 음악 사이에는 묵음구간이 존재하는데, <그림 2>는 오디오 출력신호의 예를 보인 것으로 반향제거기의 참조신호가 된다. 참조신호에 룸(room) 임펄스 응답을 적용하여 자동차 실내 환경을 고려한 반향신호를 생성한 후 AURORA2 DB의 자동차 잡음 음성에 반향신호를 섞어 마이크입력 신호를 만든다. 이때 잡음음성은 정규화 과정을 거친 신호이다. 스피커에서 출력되어 반향경로를 거친 후 마이크로 입력되는 반향신호는 식 (1)과 같은 수학적 모델[12]을 이용하여 실제 차량 내부에서 측정된 임펄스 응답과 유사하도록 <그림 3>과 같이 모델링한 후 참조신호와의 컨벌루션을 통해 생성하였다.

$$h(n) = \text{rand}(n) \cdot \frac{K}{(-1.04)^n} \quad (1)$$

여기서  $K=0.5$  이고  $\text{rand}(n)$ 은 균일 확률 변수(uniform random variable)이다. 생



&lt;그림 3&gt; 반향경로의 툴 임펄스 응답

성된 임펄스 응답은 50 ms에 해당하는 응답 파형을 가지며 시간이 지남에 따라 지수 함수적으로 감소하는 특징을 갖는다.

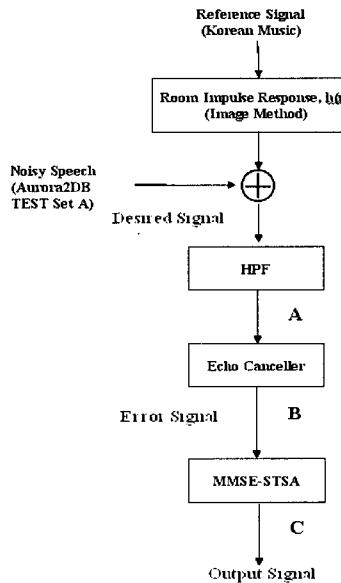
본 실험에서는 잡음음성에 반향신호를 섞을 때, 전체 정규화 된 1,001개의 잡음음성에 대해 반향신호를 더했으며 잡음음성의 묵음구간이 포함된다. 반향신호의 크기는 식 (2)와 같이 NSER(Noisy Signal-to-Echo Ratio)로 정의하였다.

$$NSER[dB] = 10 \cdot \log_{10} \frac{\sum_{n=0}^{M-1} x^2(n)}{\sum_{n=0}^{M-1} y^2(n)} \quad (2)$$

여기서  $M$ 은 신호의 길이,  $x(n)$ 은 잡음음성,  $y(n)$ 은 반향신호를 나타낸다. 본 논문에서 MMSE-STSA 기법에서 신호전력 및 잡음전력 추정에 사용되는 파라미터 값은 0.9와 0.4로 각각 설정하였다[13].

### 3.2 인식실험 결과

<표 1>에서 <표 3>은 <그림 4>의 과정에 따라 실험해서 얻은 인식결과를 나타낸 것이다. 그림 4의 전처리 과정을 갖는 음성인터페이스 실험 A의 자동차 잡음이 억압된 마이크입력신호, 실험 B의 오차신호, 실험 C의 출력신호에 대한 전체 평균 인식률은 각각 28.00%, 54.81%, 68.81%를 보여준다. <그림 4>에서 고대역 필터를 제거하고 실험해서 얻은 인식결과는 각 단에서 평균인식률이 각각 24.26%,



&lt;그림 4&gt; 실험에서의 음성인터페이스 블록도

51.14%, 67.80%를 나타내었다. 이는 잡음이 심한 환경에서는 반향제거기의 성능이 저하되어 잔여반향 신호가 잡음음성에 많이 포함됨으로써 인식성능이 저하되기 때문이라고 생각된다. 따라서 고대역 필터를 사용해 자동차 잡음을 미리 억압함으로써 다소 향상된 인식성을 얻을 수 있었다. <표 1>에서 실험 A의 반향신호가 제거되기 전의 마이크 입력신호에 대한 인식률은 전체적으로 50% 미만으로 낮은 결과가 나왔다. 반향제거기를 통해 반향신호가 제거된 실험 B의 오차신호에 대한 인식결과는 <표 2>에서와 같이 입력 SNR이 15 dB 이상에서 약 80%이상의 인식률을 보인다. 하지만 10 dB 이하의 잡음이 심한 환경에서는 인식률이 상당히 저하되었으며, MMSE-STSA 음성개선 기법을 후처리 과정으로 적용한 실험 C의 출력신호에 대한 인식결과는 10 dB에서 NSER -3 dB, 0 dB, 3 dB에 대해 각각 81.42%, 83.00%, 84.19%로 인식률이 개선되었다. 5 dB인 경우에도 마찬가지로 60.75%, 61.02%, 61.17%로 개선되었다. 하지만 입력 SNR 0 dB인 경우에는 20% 이하의 인식률을 보이며, MMSE-STSA 음성개선 기법을 적용함으로써 깨끗한 음성과 입력 SNR이 높은 20 dB의 경우에서 인식률이 다소 저하됨을 볼 수 있다.

<그림 5>는 음성인터페이스 각 단계의 출력신호 예를 보여준다. <그림 5>(a)는 반향음을 포함하는 자동차 잡음이 억압된 음성신호이고 <그림 5>(b)는 반향제거기에 의해 반향음이 제거된 신호를 보여주며 <그림 5>(c)는 MMSE-STSA 후처리 과정 후의 음성인터페이스 출력신호를 보여준다.

&lt;표 1&gt; 실험 데이터 A에 대한 인식결과 (%)

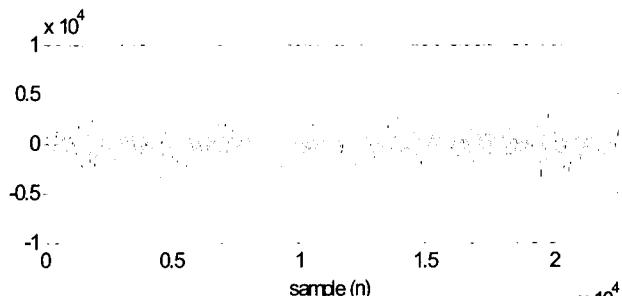
SNR \ NSER	-3 dB	0 dB	3 dB	Average
Clean	33.79	40.65	49.21	41.22
20 dB	34.80	42.32	51.12	42.75
15 dB	33.02	39.73	47.69	40.15
10 dB	24.93	30.09	36.24	30.42
5 dB	13.42	16.13	19.98	16.51
0 dB	9.57	10.08	10.86	10.17
-5 dB	7.72	7.81	8.02	7.85
Average	23.15	27.67	33.18	28.00

&lt;표 2&gt; 실험 데이터 B에 대한 인식결과 (%)

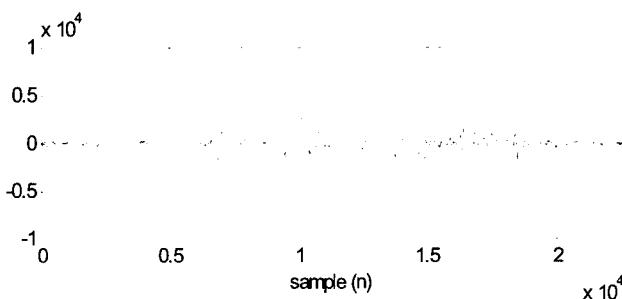
SNR \ NSER	-3 dB	0 dB	3 dB	Average
Clean	93.59	94.78	96.57	94.98
20 dB	92.31	93.56	94.45	93.44
15 dB	84.79	86.13	86.58	85.83
10 dB	57.74	58.43	57.92	58.03
5 dB	26.57	26.84	26.48	26.63
0 dB	9.69	9.90	10.71	10.10
-5 dB	7.75	8.08	8.98	8.27
Average	54.22	54.97	55.23	54.81

&lt;표 3&gt; 실험 데이터 C에 대한 인식결과 (%)

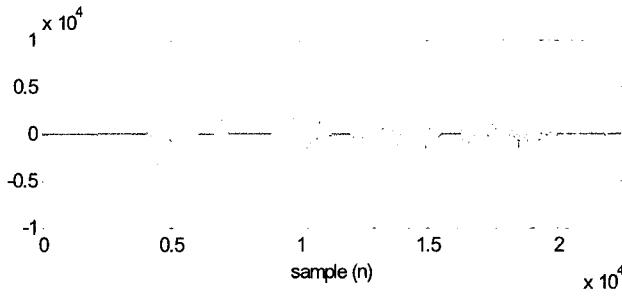
SNR \ NSER	-3 dB	0 dB	3 dB	Average
Clean	88.99	91.92	94.99	91.97
20 dB	91.08	92.72	94.07	92.62
15 dB	89.80	90.93	91.86	90.86
10 dB	81.42	83.00	84.19	82.87
5 dB	60.75	61.02	61.17	60.98
0 dB	13.93	16.94	19.21	16.69
-5 dB	7.66	8.26	8.53	8.15
Average	67.40	68.92	70.10	68.81



(a) 반향음을 포함한 음성신호



(b) 반향음이 제거된 음성신호



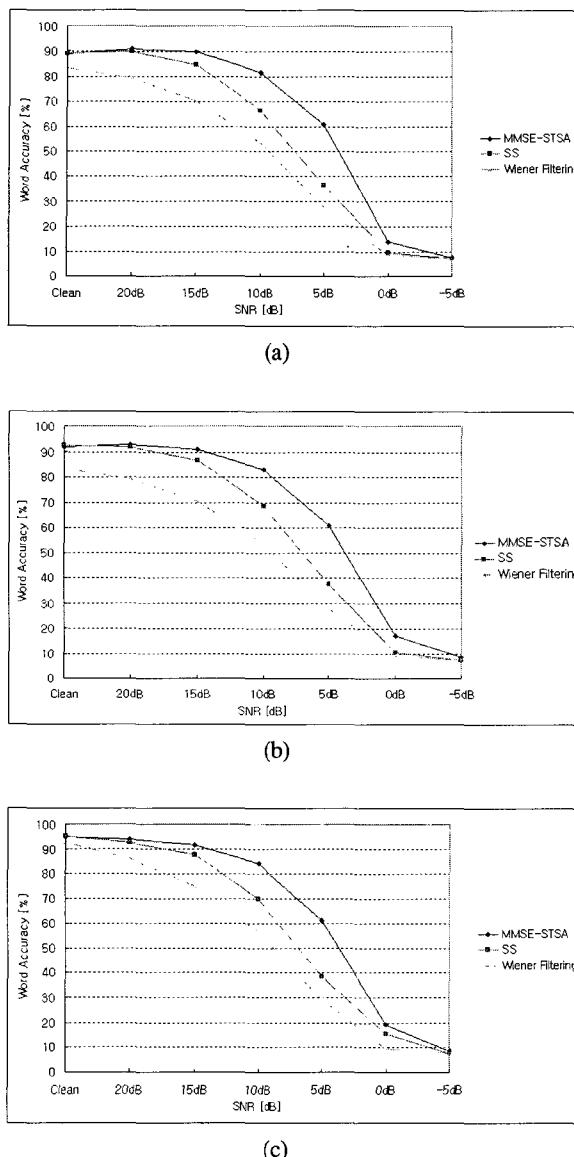
(c) 반향음 제거 후 MMSE-STSA 적용한 음성신호

<그림 5> 음성인터페이스 각 단의 출력 신호

### 3.3 음성인터페이스의 후처리 기법에 따른 인식결과 비교

본 절에서는 고대역 필터, 반향제거기, 후처리 과정을 가지는 음성인터페이스에 대해 후처리 과정으로 스펙트럼 차감법[8], Wiener 필터링[9]을 적용하여 MMSE-STSA 기법을 적용한 결과와 비교하였다.

<그림 6>은 NSER -3 dB, 0 dB, 3 dB에서의 MMSE-STSA 음성개선 기법과 스



&lt;그림 6&gt; 음성인터페이스의 후처리 기법에 따른 인식결과 비교

(a) NSER -3 dB (b) NSER 0 dB (c) NSER 3 dB

스펙트럼 차감법 및 Wiener 필터링을 후처리 과정으로 적용한 경우에 각 SNR에 따른 인식결과이다. <그림 6> (a)의 NSER -3 dB에서 MMSE-STSA 기법이 스펙트럼 차감법보다 1.28%에서 24.33%, Wiener 필터링보다 5.31%에서 33.13%까지 인식률이 높게 나왔다. <그림 6> (b)의 NSER 0 dB에서 MMSE-STSA 기법이 스펙트럼 차감법보다 0.86%에서 23.47%, Wiener 필터링보다 1.10%에서 33.40%까지 인식률이

높게 나왔으며, <그림 6> (c)의 NSER 3 dB에서는 스펙트럼 차감법보다 3.73%에서 22.70%, Wiener 필터링보다 9.82%에서 31.91%까지 인식률이 높게 나왔다. MMSE-STSA 개선기법이 SS, Wiener 필터링보다는 인식률이 전반적으로 높게 나왔으며 스펙트럼 차감법보다 평균 NSER -3 dB, 0 dB, 3 dB에서 각각 10.09%, 9.94%, 9.22%, Wiener 필터링보다는 19.56%, 21.08%, 18.77%로 높은 인식률을 보였다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 전처리 과정의 고대역 필터, 반향제거기, 후처리 과정의 MMSE-STSA 음성개선 기법을 적용한 음성인터페이스를 이용하여 자동차 실내 환경에서의 음성인식 성능을 향상시켰다. 향후 더 나은 인식성능을 위해 반향제거기의 반향제거 성능을 향상시키는 연구가 지속되어야 하며, 음성개선 기법을 적용함으로써 SNR이 높은 20 dB 이상에서 인식률이 다소 감소되는 문제점도 개선되어야 한다. 또한 실제 자동차 환경은 자동차 속도, 주변 환경이 수시로 변하므로 이러한 환경에 대처할 수 있는 방법에 대한 연구가 계속 진행되어야겠다.

#### 참 고 문 헌

- [1] I. Lecomte, M. Lever, J. Boudy, A. Tassy, "Car noise processing for speech input", *Proc. ICASSP*, pp. 512-515, 1989.
- [2] C. Mokbel, G. Chollet, "Automatic word recognition in cars", *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, Vol. 3, No. 5, pp. 346-356, 1995.
- [3] N. Iwahashi, H. Pao, H. Honda, K. Minamino, M. Omote, "Stochastic features for noise robust speech recognition", *Proc. ICASSP*, pp. 633-636, 1998.
- [4] M. Shozakai, S. Nakamura, K. Shikano, "Robust speech recognition in car environments", *Proc. ICASSP*, pp. 269-272, 1998.
- [5] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1986.
- [6]. P. Heitkamper, "An adaptation control for acoustic echo cancellers", *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 4, No. 6, pp. 170-172, 1997.
- [7] Y. Ephraim, D. Malah, "Speech enhancement using a minimum mean square error short-time spectral amplitude estimator", *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. 32, No. 6, pp. 1109-1121, 1984.
- [8] S. Boll, "Suppression of acoustic noise in speech using spectral subtraction", *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. 27, No. 2, pp. 113-120, 1979.
- [9] R. J. McAulay, M. L. Malpass, "Speech enhancement using a soft-decision noise suppression

- filter”, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. 28, No. 2, pp. 137-145, 1980.
- [10] S. H. Kim, H. S. Kwon, K. S. Bae, “Applying an auxiliary filter in the adaptive echo canceller for performance improvement of double-talk detection”, *Proc. IEEE 10th DSP & 2nd SPE Workshop*, pp. 207-210, 2002.
- [11] S. Young, D. Kershaw, J. Odell, D. Ollason, P. Woodland, *The HTK Book version 3.0*, 2000.
- [12] W. Hsu, F. Chui, D. A. Hodges, “An acoustic echo canceller”, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 24, No. 6, pp. 1639-1643, 1989.
- [13] C. H. Park, K. S. Bae, “Performance analysis of noisy speech recognition depending on parameters for noise and signal power estimation in MMSE-STSA based speech enhancement”, *Malsori*, Vol. 57, pp. 149-160, 2006.

접수일자: 2007년 5월 10일

게재결정: 2007년 6월 21일

▶ 박철호(Chul-Ho Park)

주소: 서울시 금천구 시흥 1동 998-10 하이네스트 608호

소속: LG 전자 단말연구소 개발 2실 6그룹

전화: 02) 2033-6317

FAX: 02) 2033-6200

E-mail: pchulho@lge.com

▶ 배재철(Jae-Chul Bae)

주소: 702-701 대구광역시 북구 산격동 1370번지 경북대학교

소속: 경북대학교 전자전기공학부

전화: 053) 940-8627

FAX: 053) 940-8827

E-mail: whitejch@mir.knu.ac.kr

▶ 배건성(Keun-Sung Bae) : 교신저자

주소: 702-701 대구광역시 북구 산격동 1370번지 경북대학교

소속: 경북대학교 전자전기공학부

전화: 053) 950-5527

FAX: 053) 940-8827

E-mail: ksbae@ee.knu.ac.kr