

# 화자식별 시스템의 계산량 감소를 위한 화자 프루닝 방법

## A Speaker Pruning Method for Reducing Calculation Costs of Speaker Identification System

김민정\*, 오세진\*\*, 정호열\*, 정현열\*  
(Min-Jung Kim\*, Se-Jin Oh\*\*, Ho-Youl Jung\*, Hyun-Yeol Chung\*)

\*영남대학교 전자정보공학부, \*\*한국천문연구원 KVN사업본부그룹  
(접수일자: 2003년 5월 9일; 수정일자: 2003년 7월 25일; 채택일자: 2003년 7월 30일)

본 논문에서는 GMM (Gaussian Mixture Model)에 기반한 문맥독립 화자식별 시스템의 식별성능 향상과 실시간 처리를 위한 계산량 감소를 위하여 화자 프루닝 (Speaker Pruning) 방법을 제안한다. 기존의 화자식별 방법인 최대유사도 (Maximum Likelihood) 방법과 가중모델순위 (Weighting Model Rank) 방법, 수정된 가중모델순위 (Modified WMR) 방법 등은 입력 음성 전체와 모든 화자모델들과의 유사도를 프레임 단위로 계산하여 가장 큰 누적 유사도를 가지는 화자를 식별화자로 결정하는 방법으로써, 입력 프레임 및 등록 화자수가 늘어남에 따라 계산량 및 식별시간이 늘어나는 단점이 있었다. 이러한 단점을 해결하기 위하여, 제안방법은 입력음성 프레임의 일부분만을 이용하여 화자모델들과의 프레임 유사도를 계산한 후 계산된 유사도를 이용하여 등록화자의 상위 일부분의 화자만을 선택하고, 선택된 화자들에서만 유사도 계산을 수행함으로써 계산량 및 식별시간을 줄이는 방법이다. 또한, 화자 프루닝을 적용할 경우 화자수가 가변되더라도 수정된 가중모델 순위방법을 적용할 수 있어 식별성능을 높일 수 있다. 식별실험결과, 제안방법을 적용한 경우 기존의 최대 유사도 방법이나 가중모델순위 방법보다 최대 65%의 계산량 및 식별시간을 감소시킬 수 있었으며, 약 2%의 향상된 식별결과를 나타내어, 본 논문에서 제안한 방법의 유효성을 확인할 수 있었다.

**핵심용어:** 화자식별, 최대유사도, 수정된 가중모델순위, 최대 유사도, 화자 프루닝

**투고분야:** 음성처리 분야 (2.5)

In this paper, we propose a speaker pruning method for real-time processing and improving performance of speaker identification system based on GMM (Gaussian Mixture Model). Conventional speaker identification methods, such as ML (Maximum Likelihood), WMR (weighting Model Rank), and MWMR (Modified WMR) are that frame likelihoods are calculated using the whole frames of each input speech and all of the speaker models and then a speaker having the biggest accumulated likelihood is selected. However, in these methods, calculation cost and processing time become larger as the increase of the number of input frames and speakers. To solve this problem, in the proposed method, only a part of speaker models that have higher likelihood are selected using only a part of input frames, and identified speaker is decided from evaluating the selected speaker models. In this method, MWMR can be applied for improving the identification performance in speaker identification even the number of speakers is changed. In several experiments, the proposed method showed a reduction of 65% on calculation cost and an increase of 2% on identification rate than conventional methods. These results means that the proposed method can be applied effectively for a real-time processing and for improvement of performance in speaker identification.

**Keywords:** Speaker identification, Modified weighting model rank, Maximum likelihood, Speaker pruning

**ASK subject classification:** Speech signal processing (2.5)

## I. 서론

최근 정보통신 기술의 급격한 발전과 더불어 각 개인의 정보보호를 위한 인증 수단에 관한 연구가 집중하고 있다. 음성을 이용한 개인 확인은 카드, 키 등과 같은 인공적인 수단보다는 매우 편리할 뿐만 아니라 분실위험이나 도난위험이 전혀 없어 매우 안전하다. 또 음성을 이용한 화자식별은 손이나 다른 도구를 전혀 필요로 하지 않으므로 급속히 발전하는 정보화 시대의 각종 시스템 구현에 중요한 기술로서 각광받고 있다. 이를 위한 화자식별 시스템은 음성을 이용하여 고객의 요구를 만족시키는 여러 분야에서 중요한 역할을 할 것으로 기대된다. 예를 들어, 전화선 또는 인터넷을 이용한 은행간 송금, 잔고조회, 쇼핑, 음성메일, 개인정보조회, 예약, 컴퓨터의 원격접근, 극비장소에의 접근통제 등에 편리하게 이용될 수 있기 때문이다. 특히 이와 같은 요구에 따라 화자식별 기술이 인터넷을 이용한 각종 개인의 인증 방법에 이용되기 시작되었으며 법정 증빙도구로서도 이용되기 시작되고 있다 [1]. 화자식별 시스템은 발성의 종류에 따라 문맥중속 및 문맥독립 화자식별로 나눌 수 있는데, 문맥독립 화자식별의 경우 보안성이 높아 이에 관해 많은 연구가 진행 중이다 [1]. 문맥독립 화자식별 방법으로는 장시간 (Long-term) 통계에 기반한 방법 [2], VQ (Vector quantization)에 기반한 방법 [3], HMM (Hidden Markov Model)이나 GMM (Gaussian mixture model)에 기반한 방법 [4] 등이 있으며, 이러한 방법들 중 화자특성 변화의 표현과 화자식별 성능 면에서 좋은 결과를 나타내고 있는 GMM에 기반한 방법이 가장 유리한 것으로 알려져 있다 [5]. 한편, K-Markov에 의해 제안된 가중 모델 순위 (WMR: Weighting Model Rank) 방법은 GMM에 기반한 화자식별방법 중 기존의 최대 유사도 (ML: Maximum Likelihood) 방법에 비해 향상된 성능을 보였다 [6,7]. 하지만 이들 대부분의 연구들은 시스템의 식별성능 제고를 위한 연구 위주로 진행되어 왔으며, 이러한 화자 인식시스템이 실생활에 응용되기 위해서는 고정도의 화자식별성능과 함께 실시간 처리도 가능해야 한다. 화자인식에서 계산량을 줄여 처리시간을 줄이기 위한 방법으로는 계산에 사용되는 프레임수를 줄이는 방법 [8]을 고려할 수 있으나, 이 방법에서는 입력 프레임수가 감소함에 따라 식별성능이 저하하는 문제가 있다. 또한 비교 화자수를 줄이는 방법도 고려할 수 있을 것이다.

따라서 본 논문에서는 위와 같은 점을 고려하여 화자식

별 성능의 저하없이 전체적인 계산량을 감소시킬 수 있는 화자 프루닝 방법을 제안하고 실험을 통하여 그 성능을 평가하고자 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 화자식별방법에 대해 살펴보고, III장에서는 본 논문에서 제안하는 화자 프루닝 방법에 대해서 자세히 설명한다. IV장에서 식별실험을 실시한 후 그 결과를 고찰한 후, 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 수정된 가중모델순위 (MWMR: Modified Weighting Model Rank) 방법

가중모델 순위 (WMR: Weighting Model Rank) 방법 [6]은 식별화자를 결정하는 점수를 계산할 때 테스트 음성과 화자모델들과의 프레임 유사도를 그대로 사용하지 않고, 계산된 유사도들의 상대적 위치에 따라 정해진 가중치를 스코어 계산에 사용함으로써 화자들 간의 변별력을 제고하는 방법이다. 이 방법은 프레임 단위에서 화자모델들 사이의 변별력을 크게 할 수 있어 최대유사도 방법보다 식별성능을 향상시킬 수 있지만, 각 프레임의 유사도에 의한 변별력은 고려되지 않아 화자의 성도 특성을 잘 표현하지 못하는 프레임의 경우에도 유사도의 순위만 높다면 큰 가중치를 부여함으로써 결과적으로 화자의 변별력을 감소시킬 수 있는 단점이 있다. 즉,  $i$  프레임의 유사도 순위가  $i-1$  프레임의 유사도 순위와 상대적으로 동일한 위치를 차지할 경우  $i-1$  프레임과 동일한 가중치를 갖게 된다. 그러므로 전체 프레임에서 순위의 합계가 동일한 두 화자모델이 존재할 경우 동일한 가중치 합을 출력하는 단점이 있다.

이를 개선할 수 있는 한 방법으로 가중치를 결정하는데 있어서 프레임 유사도의 크기까지 고려할 경우 화자모델들 사이의 변별력을 좀 더 크게 할 수 있다. 즉, 프레임 단위 유사도의 상대적 위치에 따라 결정된 가중치와 프레임 단위 유사도를 곱한 값을 식별화자를 결정하는 스코어 계산에 이용한다. 이러한 방법을 수정된 가중모델순위 (MWMR: Modified WMR) 방법 [9,10]이라 한다.

MWMR 방법을 간략히 설명하면 다음과 같다.

첫 번째 단계에서는 각 테스트 벡터  $x_t$ ,  $t=1,2,\dots,T$ 에서 프레임 유사도  $p(x_t | \lambda_i)$ ,  $i=1,2,\dots,N$ 을 계산하고 이를 내림차순으로 정렬한다. 즉 가장 큰 유사도를 가지는 화자모델은 최상위에 위치시키고, 가장 낮은 유사도를 가지는 화자모델은 최하위에 위치시킨다.

두 번째 단계에서는 화자모델의 각 순위에 따라 가중치  $w(r)$ 을 결정한다. 이때, 가중치는 식 (1)과 같은 지수함수를 이용하는 방법이 사전실험에서 우수한 성능을 나타내었다[6,10].

$$w(r_\lambda) = \exp(\alpha - \beta r_\lambda), \quad r_\lambda = 1, \dots, N \quad (1)$$

여기서,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 순위의 확률밀도함수에 따라 결정되는 가중치 요소로서 화자수에 밀접한 관계가 있으므로, 화자수에 따라 새롭게 계산되어야 한다. 그리고 여기서  $w(1) \approx N$ 이 되도록 설정한다[6].

세 번째 단계에서는 각 모델  $\lambda_i$ 의 순위에 해당하는 가중치  $w(r_\lambda)$ 와 유사도  $p(x|\lambda_i)$ 의 곱을 이용하여 전체 스코어  $Sc(X|\lambda_i)$ 를 계산한다.

$$\log Sc(X|\lambda_i) = \sum_{r=1}^T p(x|\lambda_i) w(r_\lambda) \quad (2)$$

이거,  $w(r_\lambda)$ 와  $p(x|\lambda_i)$ 는 각각 시간  $t$ 에서 순위가  $r_\lambda$ 인 모델  $i$ 의 가중치와 프레임 유사도를 나타낸다.

이러한 MWMM 방법은 이전 연구[9,10]에서 WMM 방법보다 향상된 화자식별 성능을 나타내어 그 유효성을 확인할 수 있었다.

### III. 화자 프루닝 (Speaker Pruning)

일반적인 화자식별 방법에서는 식별대상의 화자수가 많을수록 계산량이 증가하며 이는 식별 시간의 증가를 가져오게 되어 실시간 화자식별시스템이 구현이 어렵게 된다. 계산량을 줄이기 위한 방법으로는 비교대상인 모든 입력 프레임의 수를 줄이는 방법이나 비교 화자수를 줄이는 방법을 고려할 수 있을 것이다. 입력 프레임수를 줄이는 방법으로는 대상화자의 특성이 충분히 포함된 입력 프레임만을 사용하는 방법[6]등이 제시되었으나, 이 경우, 화자의 특징이 포함된 데이터의 감소로 인한 식별 성능의 저하가 발생한다. 이를 해결하기 위해서는 전체적인 계산량을 감소시키기 위하여 비교대상화자의 수를 줄이는 방법을 고려할 수 있다. 한편, 고정도의 식별 성능을 위해서는 기존에 많이 이용되고 있는 ML 방법보다 향상된 식별 성능을 나타내는 WMM 방법[7]이나 MWMM 방법[9,10] 등의 적용을 고려할 수 있다. 하지만 WMM 방법이나 MWMM 방법의 경우, 대상화자수가 달라질 때

다 가중치 요소가 새롭게 계산되어야 하는 단점이 있으므로 이를 함께 고려하여 주어야만 한다. 따라서 본 논문에서는 높은 화자식별 성능을 유지하기 위하여 MWMM 방법을 적용하면서도 식별시간의 감소를 위하여 추가적인 가중치 요소의 계산없이 전체적인 계산량을 줄일 수 있는 방법을 제안한다. 제안한 방법은 화자선택단과 화자 식별단으로 구성되며, 각 단에서의 처리순서는 다음과 같다.

#### 화자선택단

1. 입력프레임의 일부와 전체 등록화자들과의 프레임 유사도 계산
2. 각 화자별 누적 프레임 유사도값의 크기에 따라 각 화자를 내림차순으로 정렬
3. 상위 화자들의 일부만을 화자식별단에서 사용하고 나머지 화자는 프루닝

#### 화자식별단

1. MWMM을 적용하여 선택된 상위 순위의 화자 모델들과 입력화자의 전 프레임을 이용하여 프레임유사도 계산
2. 각 화자별 누적 프레임 유사도를 구한 후 가장 큰 누적 프레임 유사도를 가지는 화자를 식별화자로 결정

그림 1에 화자 프루닝 방법을 적용한 화자식별시스템 구성도를 화자 선택단과 화자 식별단으로 구분하여 나타낸다. 화자식별단에서는 화자선택단에서 선택된 화자들 중에서 식별화자를 결정하므로 식별 성능의 저하없이 전체적인 계산량을 감소시킬 수 있다. 또, MWMM 방법을 적용하므로 비교대상 화자들을 사전에 설정된 가중치 요소에 맞는 화자 수까지 프루닝할 수 있어 화자식별 성능의 향상도 기대할 수 있다.

## IV. 실험 및 결과

### 4.1. 음성데이터 및 분석 조건

제안한 화자 프루닝 방법의 유효성을 확인하기 위하여 화자 식별실험을 실시한다. 실험에 사용된 데이터베이스는 DARPA TIMIT Acoustic Phonetic Continuous Speech Corpus[11]이다. TIMIT 데이터베이스는 630명의 남녀화자가 10문장씩 발성하여 총 6,300문장으로 구성되어 있다. 식별실험에서 학습 및 평가를 위한 화자 수는 630명으로 하고 평가를 위한 음성 데이터는 1문장 (1 SA)만을

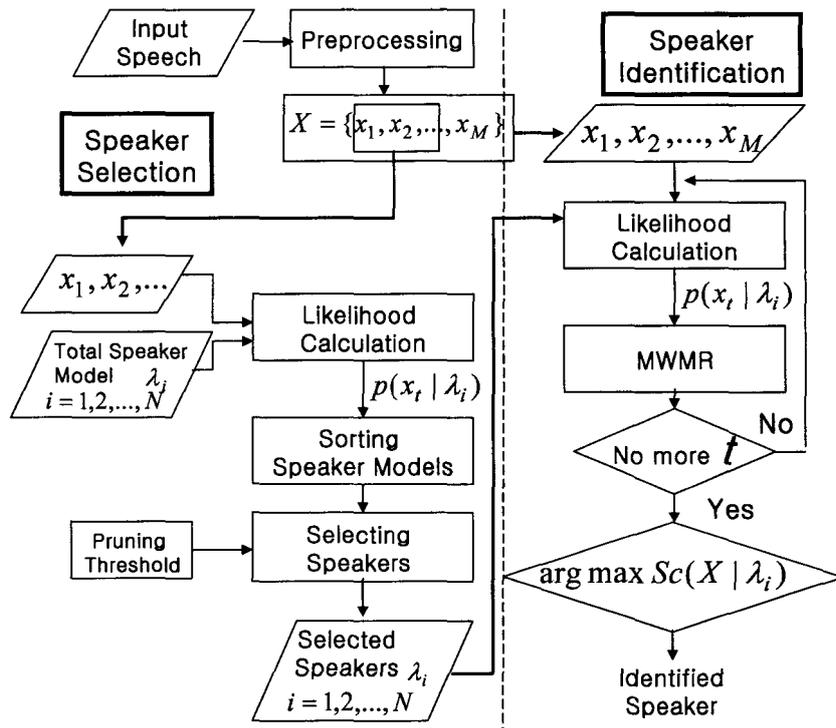


그림 1. 화자프루닝 방법을 적용한 화자식별 시스템  
 Fig. 1. Speaker identification system applied speaker pruning method.

이용한다. TIMIT 데이터베이스의 특성상 학습 프레임 수를 4,000 프레임 이상은 이용할 수 없으므로 화자모델 학습을 위한 음성 데이터는 각 화자마다 8문장만 (1 SA, 5 SX, 2 SI)을 이용한다. 일반적으로 화자식별을 위한 GMM의 혼합수는 4~8개를 이용하면 충분하다고 알려져 있으나 묵음구간을 위해 본 실험에서는 16개로 한다 [6,7]. 또, 10차의 캡스트럼 계수와 그 차분 성분 10차를 포함한 계 20차의 계수를 특징파라미터로 한다. 음성 특징 파라미터의 분석조건을 표 1에 나타낸다.

4.2. 실험결과

먼저 비교를 위한 기본 실험으로서 기존의 ML 방법을 이용하여 식별실험을 수행하였다. 실험결과 90.47%의 기본 식별결과를 얻었다. 표 2에 화자 프루닝을 적용한

경우, 입력프레임비와 화자 프루닝에 따른 사용 화자비의 계산량을 나타내었다. 표 2에서는 한 프레임과 한 화자 모델과의 계산량을 1로 정의하였다. 이 경우 발생시간을 고려하여 결정한 350 테스트 프레임을 이용하고 등록 화자를 630명으로 하였을 때 계산량은 220,500을 얻을 수 있었다. 또 표 2에서 음영으로 표시된 부분은 화자 프루닝을 적용하지 않았을 때의 계산량인 220,500보다 많은 경우이므로 이러한 경우에는 계산량 감소의 효과가 없다. 그러므로 이 경우들에서 화자프루닝을 적용하여 화자식별성능이 향상되는 것은 고려에서 제외되어야 한다.

화자 프루닝의 유효성을 확인하기 위하여 먼저 화자식별단에 ML 방법을 적용하여 화자식별실험을 수행하여 사용 화자의 비와 식별실험에 사용되는 입력 프레임의 비의 변화에 따른 식별결과를 표 3에 나타내었다.

표 3로부터 20%의 입력 프레임을 사용한 경우에는 20%의 화자를 이용 (80%의 화자를 프루닝)한 경우가 기존의 방법인 ML방법만을 사용한 경우와 동등한 90.47%의 식별률을 나타냄을 알 수 있다. 또 입력 프레임을 30% 이용한 경우에는 90%의 화자를 프루닝한 경우와 동등한 결과를 나타내고 있다. 이 경우 계산량은 88,200으로서 약 60% 감소함을 알 수 있다.

화자식별단에 MWMMR 방법을 적용하여 식별실험을 수

표 1. 전처리를 위한 분석조건  
 Table 1. Analysis condition for pre-processing.

Sampling Rate/Resolution	16 kHz/16 bits
Pre-emphasis coefficient	0.98
Hanning Windows	yes
Frame length	320 points
Frame Shift	160 points
Capstrum vector dimension	10

표 2. 입력 프레임 비와 사용 화자 비에 따른 계산량

Table 2. Computation amount according to used speaker and input frame rate.

Used speaker (%) \ Used frame (%)	5	10	20	30	40	50
10	33,075	44,100	66,150	88,200	110,250	132,300
20	55,125	66,150	88,200	110,250	132,300	154,350
30	77,175	88,200	110,250	132,300	154,350	176,400
40	99,225	110,250	132,300	154,350	176,400	198,450
50	121,275	132,300	154,350	176,400	198,450	220,500
60	143,325	154,350	176,400	198,450	220,500	242,550
70	165,375	176,400	198,450	220,500	242,550	264,600
80	187,425	198,450	220,500	242,550	264,600	286,650
90	209,475	220,500	242,550	264,600	286,650	308,700
100	231,525	242,550	264,600	286,650	308,700	330,750

표 3. ML 방법을 적용한 경우의 사용프레임비와 사용화자비에 따른 식별율 (%)

Table 3. Identification rates according to the used frame-ratio and used speaker-ratio in ML method.

Used speaker (%) \ Used frame (%)	10	20	30	40	50
10	85.55	88.88	90.00	90.15	90.31
20	90.00	90.47	90.47	90.47	90.47
30	90.47	90.47	90.47	90.47	90.47
40	90.47	90.47	90.47	90.47	90.47
50	90.47	90.47	90.47	90.47	90.47
60	90.47	90.47	90.47	90.47	90.47
70	90.47	90.47	90.47	90.47	90.47
80	90.47	90.47	90.47	90.47	90.47
90	90.47	90.47	90.47	90.47	90.47
100	90.47	90.47	90.47	90.47	90.47

향한 결과를 표 4에 나타내었다. MWMR 방법을 이용하기 위한 가중치 결정에 있어서는 Markov 등이 수행한 식별 결과와의 비교를 위하여 전체 화자수의 약 5%에 해당하는 35명을 대상으로 식 (1)을 이용하여 결정한 다음 전체 비교대상 화자 중 상위 35명을 제외한 나머지 화자들을 프루닝한다. 화자식별단에서는 이 가중치를 적용하여 전치 점수를 계산하였다.

표 4에 나타난 것과 같이 30%의 입력 프레임을 이용하고 상위 35명을 제외한 나머지 화자를 프루닝한 경우, 계산량은 77,175로써 기존의 MWMR 방법만을 이용하여 화자를 식별하는 경우에 비해 최대 65% 감소시킬 수 있으며, ML방법보다 약 2% 향상된 식별율을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

이상의 실험결과들에서 살펴본 바와 같이 제안한 화자 프루닝 방법이 화자식별에서 식별성능의 저하없이 계산

표 4. 화자식별단에 MWMR 방법을 적용한 경우의 식별율 (%)  
Table 4. Identification rates according to the used frame-ratio in MWMR method.

Used frame (%)	Identification rate (%)
10	80.15
20	88.88
30	92.06
40	91.90
50	92.06
60	91.90
70	92.06
80	91.90
90	92.06
100	91.90

량을 효율적으로 줄일 수 있으며 MWMR 방법을 적용하므로 식별성능도 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

## V. 결론

화자식별 방법으로서 현재까지 제안된 최대유사도 (Maximum Likelihood) 방법과 가중모델순위 (Weighting Model Rank) 방법, 수정된 가중모델순위 (Modified WMR) 방법 등은 입력 음성 전체와 모든 화자모델들과의 유사도를 프레임 단위로 계산하여 가장 큰 누적 유사도를 가지는 화자를 식별화자로 결정하는 방법으로써, 입력 프레임 및 등록 화자수가 늘어남에 따라 계산량 및 식별시간이 늘어나는 단점이 있었다. 이러한 단점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 실시간 화자식별시스템 구현을 위하여 높은 식별성능을 유지하면서도 계산량을 줄일 수 있는 화자 프루닝 방법을 제안하고 화자식별 실험을 통하여 그 유효성을 확인하였다.

제안방법은 입력음성 프레임의 일부분만을 이용하여 화자모델들과의 프레임 유사도를 계산한 후 계산된 유사도를 이용하여 등록화자의 상위 일부분의 화자만을 선택하고, 선택된 화자들에서만 유사도 계산을 수행함으로써 계산량 및 식별시간을 줄이는 방법이다. 또한 화자 프루닝시 화자수가 가변되더라도 수정된 가중모델 순위방법을 적용할 수 있는 새로운 화자 프루닝 방법을 적용하여 식별성능을 높일 수 있었다. TIMIT 데이터베이스를 이용한 식별실험결과, 제안방법을 적용한 경우 기존의 최대 유사도 방법이나 가중모델순위 방법보다 최대 65%의 계산량 및 식별시간을 감소시킬 수 있었으며, 약 2%의 향상된 식별결과를 나타내어, 본 논문에서 제안한 방법의 유효성을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구의 수행에 많은 도움을 주신 Toyohashi Univ의 NAKAGAWA 교수님께 감사드립니다.

## 참고 논문

1. 정현열, "음성을 이용한 화자인식 기술의 현황과 전망," 정보과학회지, 19 (7), 32-44, 2001.
2. S. Furui, F. Itakura, and S. Saito, "Talker recognition by longtime averaged speech spectrum," *Trans. IECE*, 55-A (1), 549-556, 1972.
3. A. E. Rosenberg and F. K. Soong, "Evaluation of a vector quantization talker recognition system in text independent and text dependent models," *Computer Speech and Language*, 2, 143-157, 1987.
4. D. A. Reynolds and R. C. Rose, "Robust text-independent speaker identification using Gaussian mixture speaker models," *IEEE Trans. on SAP*, 3 (1), 72-83, 1995.
5. S. Furui, *An overview of speaker recognition technology*, in Acoustic speech and speaker recognition (C.-H. Lee, F. K. Soong, and K. K. Paliwal, eds.), Ch. 2, 31-56, Kluwer Acad. Pub., 1996.
6. K. Markov and S. Nakagawa, "Text-independent speaker identification on TIMIT database," *Proc. Acoust. Soc. Jap.*, 83-84, 1995.
7. K. Markov and S. Nakagawa, "Frame level likelihood normalization for text-independent speaker identification using gaussian mixture models," *Proc. ICSLP '96*, 1764-1767, 1996.
8. L. Besacier and J. F. Bonastre, "Frame pruning for speaker recognition," *Proc. ICASSP'98*, 2, 765-768, 1998.
9. M.-J. Kim, S.-J. Oh, H.-Y. Jung, and H.-Y. Chung, "Frame selection, hybrid, modified weighting model rank method for robust text-independent speaker identification," *Journal of the Acoustical Society of Korea*, 21 (8), 735-743, 2002.
10. M.-J. Kim, S.-J. Oh, S.-Y. Suk, H.-Y. Jung, and H.-Y. Chung, "Modified weighting model rank method for improving the performance of real-time text-independent speaker recognition system," *Proc., Acous. Soc. Korea*, 107-110, 2002.
11. V. Zue, S. Seneff, and J. Glass, "Speech database development at MIT: TIMIT and beyond," *Speech Communication*, 9 (4), 351-356, 1990.

## 저자 약력

### ● 김민정 (Min-Jung Kim)

한국음향학회지 제21권 제8호 참조

### ● 오세진 (Se-Jin Oh)

한국음향학회지 제21권 제8호 참조

2002년 12월 ~ 현재: 한국천문연구원 KVN사업본부그룹 선임연구원

### ● 정호열 (Ho-Youl Jung)

한국음향학회지 제21권 제8호 참조

### ● 정현열 (Hyun-Yeol Chung)

한국음향학회지 제21권 제8호 참조