

## 음성합성시스템을 위한 음색제어규칙 연구\*

A Study on Voice Color Control Rules  
for Speech Synthesis System

김진영·엄기완\*\*

(Jin-Young Kim · Ki-Wan Eom\*\*)

## ABSTRACT

When listening the various speech synthesis systems developed and being used in our country, we find that though the quality of these systems has improved, they lack naturalness. Moreover, since the voice color of these systems are limited to only one recorded speech DB, it is necessary to record another speech DB to create different voice colors. 'Voice Color' is an abstract concept that characterizes voice personality. So speech synthesis systems need a voice color control function to create various voices. The aim of this study is to examine several factors of voice color control rules for the text-to-speech system which makes natural and various voice types for the sounding of synthetic speech. In order to find such rules from natural speech, glottal source parameters and frequency characteristics of the vocal tract for several voice colors have been studied. In this paper voice colors were catalogued as: deep, sonorous, thick, soft, harsh, high tone, shrill, and weak. For the voice source model, the LF-model was used and for the frequency characteristics of vocal tract, the formant frequencies, bandwidths, and amplitudes were used. These acoustic parameters were tested through multiple regression analysis to achieve the general relation between these parameters and voice colors.

**Keywords:** voice color, speech synthesis, vocal tract, voice personality,

## 1. 서론

음성을 이용한 인간-기계 인터페이스 기술은 컴퓨터 및 디지털 신호처리 기술의 발전과 함께 급속한 발전을 거듭해 왔다. 한편 멀티미디어의 사회가 도래함에 따라서 주목을 받고 있는 정보서비스 중의 하나는, 문자정보를 음성으로 변환해 주는 음성합성 기술이라 할 수 있다. 지금까지 이 분야에 대한 지속적인 연구에 의해 어느 정도 양질의 소리를 가질 수 있었다. 그러나 현재 음성합성기술에서 합성음의 소리는 음성 DB를 녹음한 사람의 음색(voice color)만을 지니

\* 이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

\*\* 전남대학교 전자공학과

게 되므로 다른 음색을 가지는 합성음을 만들기 위해서는 음성 DB를 다시 녹음해야 하는 등 많은 시간과 비용이 따르게 된다.<sup>[1]</sup> 따라서 멀티미디어 시대에 상응하는 다양한 음색을 낼 수 있는 음성합성기를 보유하기 위해서는 음색제어에 관한 연구가 필요하다 하겠다.

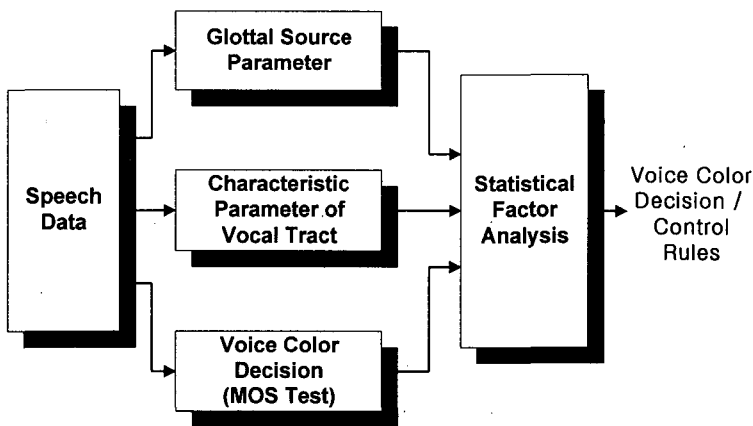
위와 같이 다양한 음색을 합성할 수 있는 합성기의 제작에 대한 기초연구로서 본 논문에서는 음성의 음색과 음원(voice source)신호와의 관련성, 그리고 성도(vocal tract)의 주파수 특성과의 관련성을 조사하여 객관적이고 물리적인 음향신호의 특징과 그 음이 제공될 때 인간이 느끼는 주관적이고 심리적인 결과 사이의 연결규칙을 규명함으로써 인간의 음색을 판단하고, 또 이들의 음색을 제어할 수 있는 규칙을 찾는데 목적을 둔다.

먼저 본 연구에서는 음색을 9가지로 구분하였으며, 42명의 남성화자로부터 녹음된 음성DB를 음악작공자들에 의한 청취실험을 통해 각각의 음색에 대해 그 정도를 평가하도록 하였다. 분석은 녹음된 DB에서 모음 ‘아’만을 선택하였다.

성도의 주파수 특성은 음성의 성문단합 구간에서 구한 4개의 포먼트 주파수와 대역폭 그리고 크기성분들을 조사하였으며, 음원신호의 특성을 조사하기 위해서 LF(Liljencrants Fant)모델을 사용하여 음색에 따른 모델의 파라미터 값들을 조사하였다.

그리고 이들 음향학적 파라미터들과 음색과의 일반적인 관계를 구하기 위해 다중회귀 분석을 수행하여 음색 판단 및 제어 규칙을 유도하였다. 다음 그림 1은 이 연구과정에 대한 기본적인 블록도를 나타낸다.

그림 1. 음색 판단/제어규칙 연구 방법



## 2. 실험방법

### 2.1. 음성DB 수집 및 음색판단 청취실험

기존의 음색연구에 관한 몇몇 논문들을 보면, 녹음된 시료문장으로 청취실험을 통해 음색을 결정하고, 그 화자가 발성한 연속된 모음(sustained vowels)을 가지고 분석하였다. 그러나 이와

같은 방법은 화자가 시료문장을 발성할 때와 분석을 위한 연속된 모음을 발성할 때 그 화자의 음색이 바뀌는 경우가 많으므로 정확한 결과를 얻기 힘들다. 청취실험시 음색판단용 시료문장과 분석용 데이터를 들려주었을 때, 청취자들은 이 현상을 정확히 인지하였다. 그리고 음성신호의 위상왜곡을 피하기 위해서, 녹음은 FM 시스템을 사용하거나 직접 샘플링 되어야하며, 콘텐츠서 마이크론을 사용하여야한다.<sup>[2]</sup>

그러므로 본 연구에서는 음색판단에 사용될 데이터와 분석에 사용될 데이터사이에서 음색이 바뀌는 현상을 방지하기 위해, 아래 문장을 만들어 42명의 남성화자가 2회씩 자연스럽게 발성하도록 하였다. 이렇게 수집된 음성데이터를 청취테스트에도 직접 사용하였으며, 녹음된 음성데이터에서 모음 ‘아<sub>1</sub>’~‘아<sub>4</sub>’만을 선택하여 음향학변수를 추출하는데 사용하였다.

녹음문장 : “아<sub>1</sub>가 아<sub>2</sub>사라야 아<sub>3</sub>도 아<sub>4</sub>산다”

음성신호의 녹음은 화자입술의 전방 약 20cm에서 콘텐츠서 마이크론(AKG C535EB)을 사용하였고, 음성신호와 함께 성문이 닫힌 구간과 pitch 정보를 찾기 위해 Laryngograph(또는 EGG) 신호를 2채널로 동시에 녹음하였다. 그리고 모든 신호는 표본화율(sampling rate), 11.025kHz, 16 bits로 직접 A/D 변환되었다.

위와 같이 수집된 음성데이터의 음색에 대한 정도를 결정하기 위해 20명의 음악 전공자들에 의한 MOS(Mean Opinion Score)테스트를 실시하여 아래와 같이 분류된 각각의 음색에 대해 1~5까지의 값으로 그 정도를 평가하도록 하였다. 그리고 각 화자에 대한 개별음색에 대한 점수는 청취자들이 평가한 값중에 빈도가 가장 많은 점수를 사용하였다.(음색의 분류중 일부는 논문 [3]을 참고하였다.)

표 5. 음색의 분류

음색	구체적 표현
굵다	저음으로 소리의 울림이 크다.
낭랑하다	맑고 명확하다.
탁하다	어둡고 무겁다.
부드럽다	안정되고 편안하다.
거칠다	매끄럽지 않고 켄켄하다.
톤이높다	음이 높다.
허스키하다	목소리가 쉬고 맑지 않다.
날카롭다	신경을 거스릴 만큼 음이 높고 매우 가늘다.
기어들어가는듯 하다	소리가 입안에서 울려 의미가 잘 전달 되지 않는다.

## 2.2. 음성분석

### 2.2.1. 성문단합 구간 검출

음성신호로부터 안정된 선형예측계수들을 구하기 위해서는 성문이 닫힌 구간(glottal closed region)에 해당하는 음성데이터들을 선택하여 분석을 해야한다. 성문이 닫힌구간을 찾는 방법에는 음성신호만을 이용하는 방법이 있으나 보다 정확한 결과를 얻기 위해 Laryngograph(이후 Lx로 나타냄) 신호를 이용하였다.

Lx는 성대의 진동을 관측하기 위해 고안된 장치로 성대의 열리고 닫힘을 임피던스 변화로 바꾸어 전기신호로 나타낸 것으로서, 이 출력 파형은 음성의 기본주파수의 역에 해당되는, 성대의 진동운동 주기를 측정하는데 매우 적합한 장치중의 하나다.

일반적으로, Lx 신호의 미분 파형에서 양의 최대피크부분은 성문이 닫히는 지점(Glottal Closing Instant-GCI), 그리고 음의 최대피크부분은 성문이 열리는 지점(Glottal Opening Instant-GOI)을 나타낸다.<sup>[4]</sup>

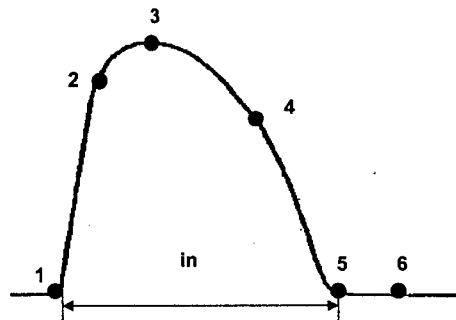
그러나 녹음과정에서 음성신호가 Lx신호보다 약간의 시간 지연이 발생하게 되므로 이를 보정하기 위해, GCI 지점이 음성신호의 최소점과 일치하도록 해주었다.

다음 그림 2는 성문의 움직임에 따른 Lx 신호의 변화를 나타내고, 그림 3은 음성신호 파형과, 동시에 녹음된 Lx 신호 파형 그리고 그의 미분 파형을 나타내었다.

그림 2. 성문의 움직임에 따른 Lx 파형

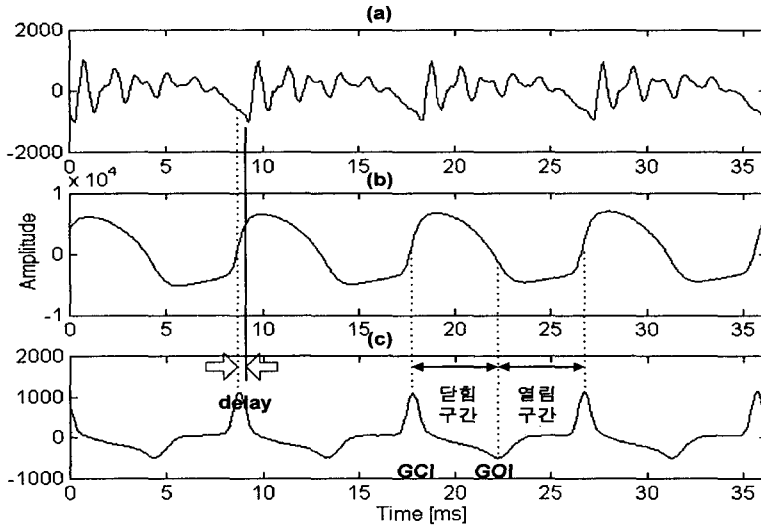


(a) Vocal fold closure sequence.



(b) Laryngograph waveform.

그림 3. (a) 음성파형, (b) Lx 신호 파형, (c) Lx 신호의 미분 파형



### 2.2.2 성도의 특성파라메타 추출

각각의 음색에 대한 성도의 특성을 조사하기 위해, 성문이 닫힌구간에서 공분산방법을 이용, 프리엠퍼시스 팩터 0.98로 10차 선형예측 분석을 하여 얻어진 선형예측계수들로부터, 4개의 포만트 주파수( $F_1, F_2, F_3, F_4$ )와 대역폭( $B_1, B_2, B_3, B_4$ ) 그리고 크기성분( $A_1, A_2, A_3, A_4$ )들을 구하였다. 이들 포만트 성분들을 구하는 방법에는 Root Solving 방법과 Peak Picking 방법이 있으며, 본 논문에서는 Peak Picking 방법을 사용하였다.<sup>[5]-[6]</sup>

각각의 개별음색과 성도의 주파수 특성과 관계를 조사하기 위해 사용한 파라메터들은 다음과 같다.

표 6. 음색판단 및 제어규칙 연구에 사용된 성도특성변수

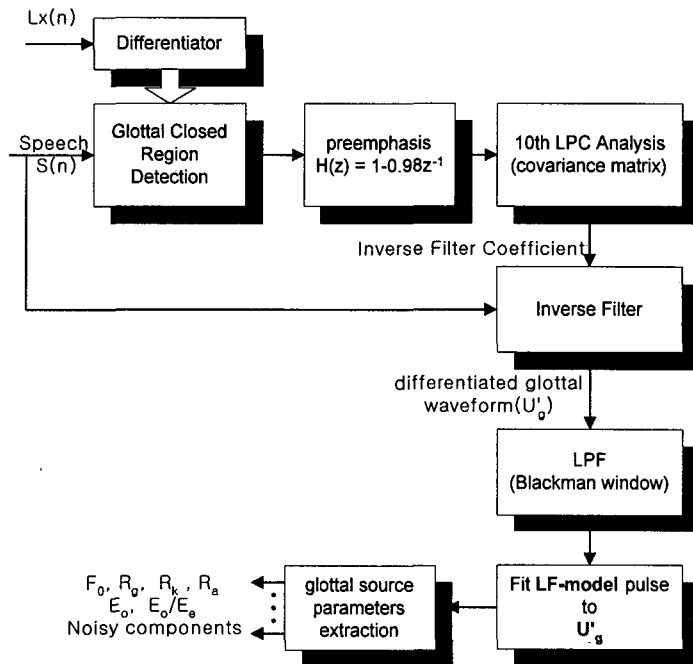
	성도특성 변수
포만트 주파수	$F_1, F_2, F_3, F_4$
포만트 크기비	$A_2/A_1, A_3/A_1, A_4/A_1$
Q 인자	$B_1/F_1, B_2/F_2, B_3/F_3, B_4/F_4$

### 2.2.3 음원모델의 변수 추출

음원모델 변수를 추출하는 과정은 다음 2단계로 나뉜다. 첫 번째 단계에서는 역 필터링 (inverse filtering)방법에 의해 성문과 신호를 구하고, 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 얻어진 성문과 신호를 간략화된 음원모델로 모델링한다. 다음 그림 4는 위 과정의 블록도를 나타낸 것이다.

성문과 추정에 사용한 역 필터링 방법은 각각의 음성피치 구간내의, 성문이 닫힌 구간에서 공분산방법을 이용, 프리엠퍼시스 팩터 0.98로 10차 선형예측분석을 수행하여 성도의 전달함수를 추정하고 이로부터 구한 역 필터(inverse filter)로 프리엠퍼시스를 하지 않은 음성신호에 필터링을 함으로써 미분된 성문과 신호를 얻을 수 있다.<sup>[7]</sup>

그림 4. 음원모델변수 추출 과정



역 필터링된 신호 즉, 미분성문과 신호는 종종 고주파 잡음을 포함하고 있으므로 이러한 잡음성분을 제거 해야한다. 본 논문에서는 크기가 17포인트인 Blackman 창함수와 미분된 성문과 신호간의 콘볼루션(convolution)을 행하여 잡음성분을 제거하였다.<sup>[8]</sup>

분석과정에서 전체 음성신호중 각 피치구간마다 구간 분석을 하게 되므로 추정된 성문과 신호에 DC성분이 존재하게 된다.<sup>[9]</sup> 음원모델 변수는 시간변수이므로 이러한 DC성분은 음원모델 변수의 부정확한 값을 나타낼 수 있다.

추정된 성문과 신호를  $U'_g$ 라 했을 때 이 신호의 DC성분을 제거하는 방법은 다음과 같다.  $U'_g$ 의 DC성분은 주파수 스펙트럼 상에서 0번째에서 임펄스 형태로 나타나므로, 임펄스의 크기 값을 총 주파수 스펙트럼의 갯수로 나누어 준 값이 DC값이 된다.

역 필터링 방법에 의해 구한 성문과 신호 즉 음원은 복잡한 성문밀 특성과 성도의 모델 오차를 포함하고 있으므로, 추정된 음원신호로부터 음원의 특성을 분석, 표현하기가 어렵다. 따라서 성문과의 특성을 간략화 시킨 모델을 세우고, 제한된 범위 내에서의 모델 변수들을 이용해서

음원의 특성을 제어하게 된다. 이러한 음원모델로는 Fant, Fujisaki, LF(Liljencrants-Fant)모델 등이 있으며, 본 논문에서는 LF모델을 사용하였다.<sup>[10]-[11]</sup>

LF-모델 펄스와 그 파라미터들을 그림 5에 나타내었으며, 여기에서 이 펄스의 함수는 다음 두 부분으로 정의된다.

- 성문 열림구간 :

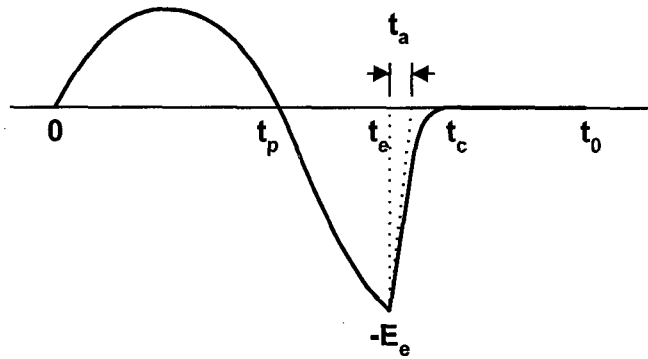
$$E(t) = E_0 e^{\alpha t} \sin \omega_g t, \quad 0 \leq t \leq t_e \quad (2)$$

$$\omega_g = \frac{\pi}{t_p}$$

- 성문 닫힘구간 :

$$E(t) = \frac{-E_e}{\epsilon t_a} (e^{-\epsilon(t-t_e)} - e^{-\epsilon(t_c-t_e)}), \quad t_e \leq t \leq t_c \quad (3)$$

그림 5. LF-모델의 파형과 그 변수

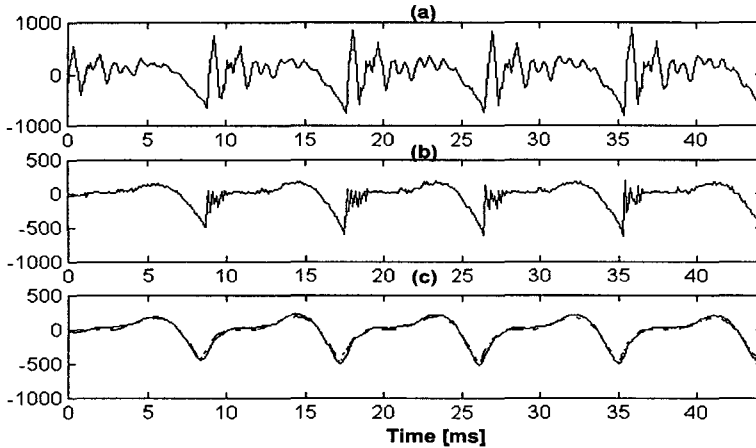


LF-모델의 변수들중  $t_e$ ,  $E_e$ 는 추정된 음원신호에서 직접 구할 수 있으나, 나머지 변수들에 대해서는 다음과 같은 방법을 사용하였다.

먼저 성문 닫힘구간에서 추정된 음원신호와 LF-모델 펄스와의 특이치분해(singular value decomposition)방법에 의해서  $t_a$ ,  $t_c$ 를 구하였으며, 성문 열림구간에서는 로그 domain에서 두 신호의 차의 제곱의 합(Total squared error)을 최소화하는 LF-모델의 변수들을 구하였다.

다음 그림 6에는 음성신호 파형과 이로부터 구한 음원추정 신호 그리고 위의 방법으로 구한 LF-모델 펄스를 나타내었다.

그림 6. (a) 음성신호 파형, (b) 추정된 음원 파형  
 (c) 추정된 음원신호의 Low-pass filter된 파형과 그의 LF-모델 펄스 파형



음원변수와 각각의 개별 음색과의 연관성을 조사하기 위해 사용한 음원변수들은 다음 표 3에 정리하였다. 아래 표에서, 특히 *Noisy components* 변수는 LF-모델로 모델링된 음원신호와 역 필터링 방법에 의해 구한 추정된 음원신호(Low-pass filter되기 이전 신호)간의 차에 대한 에너지를 나타내는 변수이다.

표 7. 음색판단 및 제어규칙 연구에 사용된 음원모델변수

Parameter	Description
$F_0$	$1/t_0$
$R_g$	$t_0/2t_p$
$R_k$	$t_0/t_p - 1$
$R_a$	$t_a/t_0$
$E_0$	Maximum positive LF-model pulse
$E_0 / E_e$	The ratio of $E_0$ to maximum negative LF-model pulse
<i>Noisy components</i>	The energy of the difference between LF-model pulse and $U'_g$ for $(0 \leq t \leq t_0)$

### 3. 음색판단 및 제어규칙 모델링

#### 3.1. 음색간의 상호상관관계

표 4의 상관관계를 보면 음색 상호간에 적지 않은 상관특성을 나타냄을 알 수 있다. 그러므



로 음색을 조절하는데 있어서 어느 특정 음색만을 제어하기는 힘들다. 또한 본 연구에서 사용한 음색의 분류가 보편적이라고만 볼 수 없으므로, 앞으로 음색판단을 하는 청취자들의 입장에서 그 의미를 정확히 파악할 수 있는, 음색분류에 대한 연구도 필요하리라 생각된다.

표 8. 음색간의 상관관계

	굵다	낭랑하다	탁하다	부드럽다	거칠다	톤이 높다	허스키하다	날카롭다	기어들어가는
굵다	1.00	-0.12	0.11	0.11	-0.20	-0.66	-0.19	-0.58	-0.11
낭랑하다		1.00	-0.47	0.08	-0.21	0.06	-0.39	0.16	-0.50
탁하다			1.00	-0.28	0.52	0.03	0.55	0.10	0.55
부드럽다				1.00	-0.50	-0.13	-0.28	-0.42	-0.11
거칠다					1.00	0.28	0.57	0.49	0.41
톤이 높다						1.00	0.18	0.70	-0.09
허스키하다							1.00	0.27	0.42
날카롭다								1.00	0.02
기어들어가는									1.00

### 3.2. 음색판단 규칙 및 해석

다중회귀분석으로, 여러 개의 독립변수들로부터 하나의 종속변수를 예측할 수 있다. 본 논문에서는 음색판단 규칙의 모델을 구하기 위해 음향학변수들을 독립변수로, 그리고 각각의 음색을 종속변수로 하는 다중선형회귀분석(multiple linear regression analysis)을 하였다.<sup>[12]-[13]</sup>

그리고 회귀분석결과에서 회귀계수들간의 직접적인 비교를 통해 독립변수들이 종속변수에 미치는 영향의 정도를 알기 쉽게 하기 위해서 표준화된 독립변수(standardized variable)를 사용하였다.

독립변수들을 표준화시키는 방법은 표 5에 보인, 42명분에 대한 각 변수들의 평균과 표준편차를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{x}_{kl} = \frac{x_{kl} - m_k}{\sigma_k}, \quad k : \text{변수}(1 \sim 18), \quad l : \text{화자}(1 \sim 42) \quad (4)$$

표 9. 42명 화자에 대한 각 변수들의 평균, 표준편차

변수( $x$ )	평균( $m$ )	표준편차( $\sigma$ )	변수( $x$ )	평균( $m$ )	표준편차( $\sigma$ )
F <sub>0</sub>	117.677	14.234	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub>	-0.738	1.747
F <sub>1</sub>	712.884	44.694	A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub>	-5.255	2.321
F <sub>2</sub>	1223.266	60.101	A <sub>4</sub> /A <sub>1</sub>	-6.801	2.357
F <sub>3</sub>	2637.571	161.634	R <sub>g</sub>	1.095	0.099
F <sub>4</sub>	3734.059	144.357	R <sub>k</sub>	0.329	0.055
B <sub>1</sub> /F <sub>1</sub>	0.1529	0.067	R <sub>a</sub>	0.075	0.016
B <sub>2</sub> /F <sub>2</sub>	0.1202	0.039	E <sub>0</sub>	181.884	146.008
B <sub>3</sub> /F <sub>3</sub>	0.061	0.019	E <sub>0</sub> /E <sub>e</sub>	0.170	0.025
B <sub>4</sub> /F <sub>4</sub>	0.059	0.014	Noisy components	27614	36494

표준화된 음향학변수들과 MOS테스트 결과 값으로 음색판단 규칙식을 유도하기 위한 다중선형회귀분석을 수행하였으며, 독립변수(음향학변수)의 수를 줄이기 위해, 독립변수 중 가장 유의하지 않는 변수를 하나씩 줄여나가는 backward방법을 사용하여 각 개별음색(중속변수)마다 10개의 독립변수를 사용하였다. 선택된 10개의 독립변수들은 표 6과 같다.

표 10. 음색판단 규칙식에 사용된 음향학변수

음색( $d_1 \sim d_9$ )	음향학변수( 독립변수 $x$ )
굵다	F <sub>0</sub> , F <sub>1</sub> , F <sub>2</sub> , F <sub>3</sub> , B <sub>1</sub> /F <sub>1</sub> , B <sub>3</sub> /F <sub>3</sub> , A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> , A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub> , A <sub>4</sub> /A <sub>1</sub> , R <sub>k</sub>
낭랑하다	F <sub>2</sub> , F <sub>4</sub> , B <sub>1</sub> /F <sub>1</sub> , B <sub>2</sub> /F <sub>2</sub> , B <sub>4</sub> /F <sub>4</sub> , A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub> , A <sub>4</sub> /A <sub>1</sub> , R <sub>a</sub> , E <sub>0</sub> , E <sub>0</sub> /E <sub>e</sub>
탁하다	F <sub>0</sub> , F <sub>2</sub> , F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , B <sub>1</sub> /F <sub>1</sub> , B <sub>2</sub> /F <sub>2</sub> , A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub> , A <sub>4</sub> /A <sub>1</sub> , R <sub>a</sub> , Noisy components
부드럽다	F <sub>0</sub> , F <sub>3</sub> , B <sub>1</sub> /F <sub>1</sub> , B <sub>2</sub> /F <sub>2</sub> , B <sub>4</sub> /F <sub>4</sub> , A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> , A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub> , A <sub>4</sub> /A <sub>1</sub> , R <sub>k</sub> , R <sub>a</sub>
거칠다	F <sub>0</sub> , F <sub>3</sub> , B <sub>1</sub> /F <sub>1</sub> , B <sub>2</sub> /F <sub>2</sub> , A <sub>4</sub> /A <sub>1</sub> , R <sub>g</sub> , R <sub>a</sub> , E <sub>0</sub> , E <sub>0</sub> /E <sub>e</sub> , Noisy components
톤이높다	F <sub>0</sub> , F <sub>1</sub> , F <sub>2</sub> , F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , B <sub>3</sub> /F <sub>3</sub> , B <sub>4</sub> /F <sub>4</sub> , A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> , R <sub>a</sub> , E <sub>0</sub> /E <sub>e</sub>
허스키하다	F <sub>0</sub> , F <sub>2</sub> , F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , B <sub>3</sub> /F <sub>3</sub> , B <sub>4</sub> /F <sub>4</sub> , A <sub>4</sub> /A <sub>1</sub> , R <sub>g</sub> , R <sub>a</sub> , Noisy components
날카롭다	F <sub>0</sub> , F <sub>1</sub> , F <sub>2</sub> , B <sub>1</sub> /F <sub>1</sub> , B <sub>3</sub> /F <sub>3</sub> , B <sub>4</sub> /F <sub>4</sub> , A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> , A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub> , A <sub>4</sub> /A <sub>1</sub> , R <sub>g</sub>
기어들어가는	F <sub>0</sub> , F <sub>4</sub> , B <sub>1</sub> /F <sub>1</sub> , B <sub>2</sub> /F <sub>2</sub> , B <sub>3</sub> /F <sub>3</sub> , A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub> , R <sub>g</sub> , R <sub>a</sub> , E <sub>0</sub> , E <sub>0</sub> /E <sub>e</sub>

그리고 표 7-A와 7-B에서는 다중회귀분석으로 구한 음색판단 규칙식에서 각각의 독립변수들에 해당하는 회귀계수들을 나타낸다. 그러므로 각각의 개별음색의 정도를 나타내는 회귀식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_i = \alpha_0 + \sum_{j=1}^{18} \alpha_{ij} \tilde{x}_j \quad (5)$$

위 식에서  $d_i$ 는 각각의 음색에 대한 정도를 나타내며,  $\alpha_0$ 는 회귀분석모델의 기울기를 의미한다. 본 연구에서는 표준화된 독립변수들을 사용했으므로, 분석에 사용된 DB의 각 음색에 대한 평균을 의미한다. 즉 실험에 참여한 화자들의 '굵다'에 대한 평균 MOS점수는 2.05임을 나타낸다. 그리고 위 음색판단 규칙식은 사용된 변수들이 음향학변수이므로, 각각 음향학변수들의 물리적인 변동에 따른 음색의 변화를 관찰하는데 용이하다.

표 11-A. 음색판단 규칙식에서 각 독립변수들의 회귀계수

음색( $d_i$ )	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_7$	$\alpha_8$	$\alpha_9$
굵다	2.05	-0.56	-0.10	-0.23	-0.22	0	-0.19	0	-0.15	0
낭랑하다	2.11	0	0	0.21	0	-0.28	0.18	-0.30	0	-0.18
탁하다	1.99	0.41	0	-0.24	-0.12	0.24	-0.53	0.45	0	0
부드럽다	1.67	-0.13	0	0	0.63	0	1.54	-0.61	0	-0.39
거칠다	1.94	0.44	0	0	-0.14	0	-1.00	0.37	0	0
톤이높다	2.46	0.59	0.23	0.19	0.22	-0.16	0	0	-0.15	-0.09
허스키하다	1.38	0.51	0	-0.18	-0.02	0.18	0	0	-0.02	-0.02
날카롭다	1.83	0.67	0.11	0.24	0	0	-0.43	0	0.48	0.48
기어들어가는	1.68	0.21	0	0	0	0.47	-0.29	0.51	0	0

표 7-B. 음색판단 규칙식에서 각 독립변수들의 회귀계수

음색( $d_j$ )	$\alpha_{10}$	$\alpha_{11}$	$\alpha_{12}$	$\alpha_{13}$	$\alpha_{14}$	$\alpha_{15}$	$\alpha_{16}$	$\alpha_{17}$	$\alpha_{18}$
굵다	0.05	-0.11	0.37	0	0.20	0	0	0	0
낭랑하다	0	0.51	-0.29	0	0	0.47	0.17	-0.69	0
탁하다	0	-0.48	0.55	0	0	-0.37	0	0	0.18
부드럽다	-0.47	0.27	-0.80	0	0.49	0.50	0	0	0
거칠다	0	0	0.46	0.24	0	-0.37	-0.51	0.25	0.39
톤이높다	0.18	0	0	0	0	0.33	0	0.39	0
허스키하다	0	0	-0.16	0.10	0	-0.33	0	0	0.17
날카롭다	0.28	0.84	-0.64	0.20	0	0	0	0	0
기어들어 가는	0	-0.46	0	0.13	0	-0.44	-0.27	0.46	0

표 8. 음색판단 회귀식에 대한 통계량 및 F 분포

음 색	다중상관계수	결정계수	F 비	P-값
굵다	0.79	0.61	5.00	0.000
낭랑하다	0.66	0.44	2.44	0.028
탁하다	0.63	0.39	1.99	0.069
부드럽다	0.77	0.59	4.39	0.001
거칠다	0.71	0.51	3.21	0.006
톤이높다	0.88	0.78	11.01	0.000
허스키하다	0.67	0.44	2.48	0.026
날카롭다	0.89	0.80	12.46	0.000
기어들어가는	0.69	0.47	2.78	0.014

음색중 그 의미가 거의 상반되는 ‘낭랑하다-탁하다’, ‘부드럽다-거칠다’의 음색판단 규칙에 따르면, 표 9에서 볼 수 있듯이 독립변수가 일치하는 경우에 있어서는 그 증감이 반대가 되므로 유도한 규칙식이 어느 정도 타당성을 가짐을 알 수 있다.(괄호 안의 수치는 두 음색간의 상관 정도를 나타낸다.)

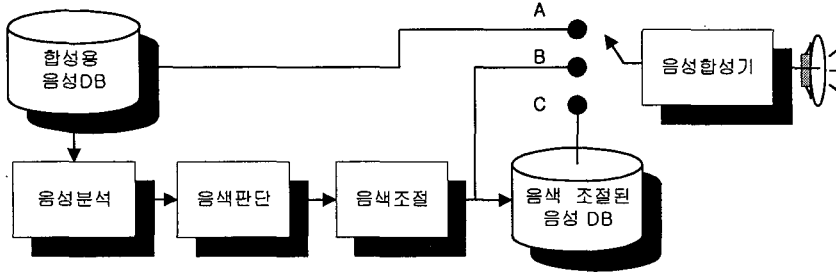
표 9. 음색판단 규칙해석(독립변수들중 포맷트 성분)

	F <sub>0</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	B <sub>1</sub> /F <sub>1</sub>	B <sub>2</sub> /F <sub>2</sub>	B <sub>4</sub> /F <sub>4</sub>	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub>	A <sub>4</sub> /A <sub>1</sub>
낭랑하다 (-0.47)			↑		↓	↑	↓	↓		↑	↓
탁하다	↑		↓	↓	↑	↓	↑			↓	↑
부드럽다 (-0.50)	↓			↑		↑	↓	↓	↓	↑	↓
거칠다	↑			↓		↓	↑				↑

3.3. 음색제어 규칙모델

음성합성시스템의 구성도를 나타내는 그림 7에서, A의 경우는 현재 일반적인 시스템의 형태이다. 이러한 시스템에서 합성음은 녹음한 사람의 음색만을 지니게 되어 다른 음색으로 합성하기 위해서는 음성DB를 다시 만들어야하므로 많은 시간과 비용이 따른다. 그러나 음색판단 및 음색제어에 관한 연구는 이와 같은 문제들을 해결할 수 있으리라 기대된다. B의 경우와 같이 음색을 조절하여, 실시간으로 음성을 합성하거나, C의 경우처럼 기존의 음성합성용 DB를 음색판단 및 제어 규칙을 사용하여, 새로운 음색을 가진 음성DB를 만들고 이를 합성시스템에 사용할 수 있다.

그림 7. 음성합성시스템 구성도



위에서 구한 음색판단 규칙식은 음색을 제어하기 위한 규칙식으로 사용할 수 있으나, 표 10에서 볼 수 있듯이, 변수들간의 선형관계특성으로 인해 음향학변수들을 독립적으로 조절하여, 음색을 제어하는 것은 어렵게된다. 그러므로 본 논문에서는 변수들을 독립적으로 조절이 가능한 음색제어 모델을 구하기 위해, 먼저 각 변수들간의 상호상관특성을 제거하기 위한 Cholesky factorization 방법을 사용하였다.<sup>[14]</sup>

표 10. 음향학변수들 사이의 상관관계(지면관계로 그 일부를 보임.)

&	F <sub>0</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	B <sub>1</sub> /F <sub>1</sub>	B <sub>2</sub> /F <sub>2</sub>	B <sub>3</sub> /F <sub>3</sub>	B <sub>4</sub> /F <sub>4</sub>	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub>	A <sub>4</sub> /A <sub>1</sub>
F <sub>0</sub>	1.00	0.25	0.32	0.07	0.09	-0.21	-0.28	-0.12	-0.02	0.24	-0.02	-0.10
F <sub>1</sub>		1.00	0.38	0.09	-0.21	0.20	0.14	0.25	0.19	0.31	0.21	0.18
F <sub>2</sub>			1.00	0.28	0.31	0.18	-0.04	-0.06	0.20	0.29	0.39	0.38
F <sub>3</sub>				1.00	0.55	-0.17	-0.12	-0.55	0.28	-0.18	0.28	0.16
F <sub>4</sub>					1.00	-0.09	-0.16	-0.56	-0.16	-0.08	0.22	0.27
B <sub>1</sub> /F <sub>1</sub>						1.00	0.74	0.36	0.17	0.48	0.69	0.71
B <sub>2</sub> /F <sub>2</sub>							1.00	0.27	0.21	-0.13	0.54	0.46
B <sub>3</sub> /F <sub>3</sub>								1.00	0.09	0.28	-0.24	0.02
B <sub>4</sub> /F <sub>4</sub>									1.00	0.07	0.28	-0.17
A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub>										1.00	0.39	0.42
A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub>											1.00	0.76
A <sub>4</sub> /A <sub>1</sub>												1.00

변수들간의 선형성을 제거하는 방법은 다음과 같다.

식 4에서 구한 표준화된 음향학변수들 값인 18×42 행렬  $\bar{X}$ 에 대해서,  $\bar{X}$ 의 상관행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$R = \hat{X} \hat{X}^T \tag{6}$$

C와  $\hat{X}$ 의 행렬 곱을  $\hat{X}$ 이라 하면,

$$C\hat{X} = \hat{X} \tag{7}$$

위의 행렬의 상관행렬이 아래 식과 같이 정규행렬(identity matrix)이 되도록 하는 C를 구한다.

$$\hat{X} \hat{X}^T = C\hat{X} \hat{X}^T C^T = CRC^T = I \tag{8}$$

$$R = C^{-1}(C^T)^{-1} = C^{-1}(C^{-1})^T \tag{9}$$

R 행렬을 Cholesky factorization하면 다음식을 구할 수 있으므로

$$R = LL^T \tag{10}$$

$$C = L^{-1} \tag{11}$$

결국 구하고자 하는 행렬 C는  $L^{-1}$ 가 된다.

이와 같이 상호상관특성이 제거된 42명의 음향학변수들값( $\hat{X}$ )과 MOS테스트 결과 값으로 음색제어 규칙식을 유도하기 위한 다중선형회귀분석을 수행하였으며, 여기에 사용된 독립변수들은 다음 표 11과 같다.(단, 표준화된 음향학변수들에 행렬 C가 곱해진 변수들로 표 6에 보인 변수들과는 다른 의미를 가진다.)

표 11. 음색제어 규칙식에 사용된 음향학변수

음색( $d_1 \sim d_9$ )	음향학변수( 독립변수 $x$ )
굵다	$F_0, F_2, F_3, B_4/F_4, A_3/A_1, R_k, R_a, E_0, E_0/E_e, \text{Noisy components}$
낭랑하다	$F_1, F_2, F_3, F_4, B_2/F_2, A_2/A_1, A_3/A_1, A_4/A_1, R_a, E_0/E_e$
탁하다	$F_0, F_2, F_3, B_2/F_2, B_4/F_4, A_2/A_1, A_3/A_1, R_k, E_0, E_0/E_e$
부드럽다	$F_2, F_3, B_1/F_1, B_2/F_2, A_3/A_1, A_4/A_1, R_k, R_a, E_0, \text{Noisy components}$
거칠다	$F_0, F_2, F_3, B_1/F_1, B_2/F_2, B_3/F_3, B_4/F_4, A_2/A_1, R_k, E_0$
톤이높다	$F_0, F_2, F_3, F_4, A_2/A_1, A_3/A_1, A_4/A_1, R_k, E_0, E_0/E_e$
허스키하다	$F_0, F_2, F_3, B_1/F_1, B_2/F_2, B_3/F_3, A_2/A_1, A_4/A_1, E_0, \text{Noisy components}$
날카롭다	$F_0, F_2, B_2/F_2, B_4/F_4, A_2/A_1, R_k, R_a, E_0, E_0/E_e, \text{Noisy components}$
기어들어가는	$F_0, F_4, B_2/F_2, B_3/F_3, A_2/A_1, A_3/A_1, A_4/A_1, E_0, E_0/E_e, \text{Noisy components}$

그리고 표 12-A와 12-B에서는 다중회귀식에서 각각의 독립변수들에 해당하는 회귀계수들을 나타낸다. 각각의 개별음색의 정도를 나타내는 회귀식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^{18} \beta_{ij} \hat{x}_j \quad (12)$$

위 식에서  $d_i$ 는 각각의 음색에 대한 정도를 나타내며, 이 값은 변수  $\hat{x}_j$ 를 독립적으로 조절 하여, 그 조정이 가능하게 된다. 그리고 표 13에 위의 음색제어 규칙식에 대한 통계량을 나타내었다.

표 12-A. 음색제어 규칙식에서 각 독립변수들의 계수값

음색( $d_i$ )	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$	$\beta_6$	$\beta_7$	$\beta_8$	$\beta_9$
굵다	2.05	-0.31	0	-0.24	-0.16	0	0	0	0	-0.17
낭랑하다	2.11	0	-0.12	0.14	0.14	-0.18	0	-0.14	0	0
탁하다	1.99	0.21	0	-0.10	-0.10	0	0	0.09	0	-0.16
부드럽다	1.68	0	0	-0.13	0.33	0	0.37	0.20	0	0
거칠다	1.94	0.22	0	0.10	-0.12	0	-0.27	-0.19	-0.11	-0.15
톤이높다	2.46	0.29	0	0.29	0.21	-0.19	0	0	0	0
허스키하다	1.38	0.33	0	-0.09	-0.12	0	-0.09	-0.09	-0.17	0
날카롭다	1.83	0.39	0	0.32	0	0	-0.22	-0.22	0	-0.21
기어들어가는	1.68	0.13	0	0	0	0.27	0.11	0.11	-0.08	

표 12-B. 음색제어 규칙식에서 각 독립변수들의 계수값

음색( $d_i$ )	$\beta_{10}$	$\beta_{11}$	$\beta_{12}$	$\beta_{13}$	$\beta_{14}$	$\beta_{15}$	$\beta_{16}$	$\beta_{17}$	$\beta_{18}$
굵다	0	-0.16	0	0	0.35	-0.33	0.30	-0.24	-0.28
낭랑하다	0.18	0.14	0.09	0	0	0.15	0	-0.32	0
탁하다	-0.28	-0.27	0	0	-0.10	0	-0.08	0.10	0
부드럽다	0	0.27	0.12	0	0.32	-0.09	0.15	0	-0.14
거칠다	-0.16	0	0	0	-0.16	0	-0.40	0	0
톤이높다	0.23	0.17	0.29	0	-0.28	0	-0.48	0.31	0
허스키하다	-0.08	0	-0.10	0	0	0	-0.26	0	0.12
날카롭다	0.39	0	0	0	-0.13	0.22	-0.60	0.19	0.16
기어들어가는	-0.26	-0.06	-0.07	0	0	0	-0.09	0.28	-0.06

표 13. 음색제어 규칙식에 대한 통계량 및 F 분포

음 색	다중상관계수	결정계수	F 비	P-값
굵다	0.77	0.59	4.46	.000
낭랑하다	0.70	0.49	2.94	.010
탁하다	0.63	0.40	2.01	.060
부드럽다	0.77	0.59	4.51	.001
거칠다	0.72	0.51	3.26	.005
톤이높다	0.84	0.71	7.73	.000
허스키하다	0.75	0.57	4.04	.001
날카롭다	0.88	0.78	10.68	.000
기어들어가는	0.69	0.48	2.88	.012

음색제어 모델(식 12)에서, 음색의 정도를 나타내는  $d_i$ 를  $\Delta d_i$ 만큼 증가시키고자 할 때, 독립변수  $\hat{x}_j$ 는 어느 정도( $\Delta \hat{x}_j$ )로 조절해야 하는지 알아보면,

$$\begin{aligned} d_i + \Delta d_i &= \beta_{i0} + \sum_{j=1}^{18} \beta_{ij} (\hat{x}_j + \Delta \hat{x}_j) \\ &= \beta_{i0} + \sum_{j=1}^{18} \beta_{ij} \hat{x}_j + \sum_{j=1}^{18} \beta_{ij} \Delta \hat{x}_j \end{aligned} \quad (13)$$

그러므로 음색정도의 증감에 따른 독립변수의 변화량은 다음과 같다.

$$\Delta d_i = \sum_{j=1}^{18} \beta_{ij} \Delta \hat{x}_j \quad (14)$$

위 식을 행렬식으로 나타내면,

$$\Delta \mathbf{d} = \mathbf{B} \Delta \hat{\mathbf{X}} \quad (15)$$

여기서, 9가지의 음색중 M개의 음색을 변화시키고자 한다면,  $\Delta \mathbf{d}$ 는  $M \times 1$ ,  $\mathbf{B}$ 는  $M \times 18$ , 그리고  $\Delta \hat{\mathbf{X}}$ 는  $18 \times 1$  행렬이 된다. 이것은 미지수가 18개, 방정식이 M개인 경우로 그 해가 무수히 많으나 *minimum variance* 추정이론에 따라 optimum문제를 다음과 같이 정하면,

$$\begin{aligned} &\text{minimize } (\|\Delta \hat{\mathbf{X}}\|^2 = \Delta \hat{\mathbf{X}}^T \mathbf{Q} \Delta \hat{\mathbf{X}}) \\ &\text{subject to } \Delta \mathbf{d} = \mathbf{B} \Delta \hat{\mathbf{X}} \end{aligned}$$

위의 문제를 *Lagrange multiplier*를 사용하여 구한 해는 다음과 같다.<sup>[15]</sup>(부록 참조)



$$\widehat{\Delta X} = Q^{-1}B^T(BQ^{-1}B^T)^{-1}\Delta d \quad (16)$$

$$\widehat{\Delta X} = C^{-1}\widehat{\Delta X} \quad (17)$$

$$\Delta X = (C^{-1}\widehat{\Delta X}) \otimes \sigma \quad (18)$$

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \vdots \\ \sigma_{18} \end{bmatrix}, \quad \otimes : \text{Kronecker product}$$

여기서, 가중행렬  $Q$ 는  $18 \times 18$ 인 정규행렬(identity matrix)이고, 만약  $(C^{-1})^T C^{-1}$ 인 경우에는

$$\text{minimize } \|\widehat{\Delta X}\|^2$$

subject to  $\Delta d = B\widehat{\Delta X}$ ,의 optimum문제에 대한 해가된다.

위 결과를 바탕으로 음색중 '낭랑하다'에 대해서 +2 만큼 증가시킬 때 각 음향학변수들 값의 변화량을 다음 표 14에 나타내었으며, 괄호 안의 수치는 표 5에서 보인 각 음향학변수들의 표준편차( $\sigma_x$ )에 대한 배수이다.

표 14. 각 음향학 변수들의 증가량( $\Delta x$ )

$F_0$	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$B_1/F_1$	$B_2/F_2$	$B_3/F_3$	$B_4/F_4$
0	-29.8	37.8	48.5	-74.3	-0.0031	-0.034	-0.018	0.005
(0.00)	(-0.67)	(0.63)	(0.30)	(-0.51)	(-0.05)	(-0.89)	(-0.96)	(0.36)
$A_2/A_1$	$A_3/A_1$	$A_4/A_1$	$R_g$	$R_k$	$R_a$	$E_0$	$E_0/E_e$	Noisy components
2.347	1.46	3.43	-0.008	0.010	0.011	-154	-0.06	-50466
(1.34)	(0.63)	(1.46)	(-0.09)	(0.18)	(0.67)	(-1.06)	(-2.49)	(-1.38)

그러므로, 임의의 화자에 대해 음향변수들의 값에 위의 변화량만큼 더해 줌으로 화자의 '낭랑하다' 지수를 +2 만큼 증가시키는 결과를 얻을 수 있으며, 다음 실험을 통해 같은 결과를 얻을 수 있었다.

위 식 16에 의한 증가분( $\widehat{\Delta x}$ )을 임의의 화자의 값에 더해주고, 이 더해진 값으로 식 12(음색제어가 가능한 음색판단식)에 의해 '낭랑하다'의 점수를 예측하였다. 그리고, 식 17에 의한 증가분( $\widehat{\Delta x}$ )을 더해주고, 이를 식 5의 음색판단식에 의해 결과를 예측하였으며, 그 결과는 다음 표 15와 같다.

표 15. '낭랑하다' 음색을 +2 증가시킨 후의 음색예측

화자	MOS 결과	예측치 (식 5에 의한)	음색조절된 후의 예측치	예측치 (식 16에 의한)	음색조절된 후의 예측치
A	2	1.76	3.97	2.00	4.00
B	1	1.10	3.33	0.95	2.95

## 4. 결 론

지금까지 본 논문에서는 인간의 음색을 판단하고 또한 음색의 조절이 가능한 음색제어 규칙식을 유도하기 위해, 음성의 음향학적 파라미터들과 개별 음색과의 관련 특성을 조사하였다. 이들 변수들은 다중회귀분석을 통하여, 음색의 정도를 판단할 수 있는 음색판단 규칙식과, 음향학 파라미터들을 독립적으로 조절하여, 음색을 제어할 수 있는 규칙식을 유도하였다. 이러한 연구의 결과는 합성시스템에서 다양한 음색을 합성할 수 있는 기반기술로 사용되어질 수 있을 뿐만 아니라, 음성합성 분야에서 원 음성의 음색을 변화시키지 않고 피치를 조절할 수 있으며, 또한 음성인식 분야에서는 각각 개인마다 독특한 음색을 가지고 있으므로 화자인식에 적용할 수 있으리라 기대된다. 그리고, 향후 포맷트합성 실험과 기존의 음성합성시스템에 본 논문에서 유도한 음색판단 및 음색제어규칙을 적용하여, 청취실험을 통해 실질적인 검증을 하고자한다.

## 부 록

방정식이 M개, 미지수가 N개인 경우 *minimum variance* 추정이론에 따라 optimum 문제를 다음과 같이 정하면,

$$\text{minimize } (\|\widehat{\Delta X}\|^2 = \widehat{\Delta X}^T Q \widehat{\Delta X})$$

subject to  $\Delta d = B \widehat{\Delta X}$ , 의 해를 *Lagrange multiplier*를 사용하여 구하면 다음과 같다.

$$L(\lambda) = \widehat{\Delta x}^T Q \widehat{\Delta x} + \lambda^T (B \widehat{\Delta x} - \Delta d) \quad (A1)$$

$\widehat{\Delta X} \in R^{N \times 1}$ ,  $\lambda^T \in R^{M \times 1}$ ,  $B \in R^{M \times N}$ , 임의의 가중행렬  $Q \in R^{N \times N}$

위 경우  $Q$ 는 정규행렬(identity matrix)이다.

$$\frac{dL}{d\lambda} = B \widehat{\Delta X} - \Delta d = 0 \quad (A2)$$

$$\frac{dL}{d\widehat{\Delta X}} = 2Q \widehat{\Delta X} + B^T \lambda = 0 \quad (A3)$$

$$\widehat{\Delta X} = -\frac{1}{2} Q^{-1} B^T \lambda$$

식 A3을 식 A2에 대입하면,

$$-\frac{1}{2} B Q^{-1} B^T \lambda = \Delta d \quad (A4)$$

그러므로,

$$\lambda = -2(BQ^{-1}B^T)^{-1} \Delta d \quad (A5)$$

구한  $\lambda$ 를 식 A3에 대입하면, 결국 구하고자 하는  $\widehat{\Delta X}$ 는 다음과 같다.

$$\widehat{\Delta X} = Q^{-1}B^T(BQ^{-1}B^T)^{-1} \Delta d \quad (A6)$$

그리고 식 A6에서  $Q = (C^{-1})^T C^{-1}$ 인 경우는,

minimize  $\|\widehat{\Delta X}\|^2$

subject to  $\Delta d = B\widehat{\Delta X}$ , 인 optimum문제에 대한 해가된다.

### 참 고 문 헌

- [1] N. Iwahashi, Y. Sagisaka. 1995. "Speech spectrum conversion based on speaker interpolation and multi-functional representation with weighting by radial basis function networks." *Speech Communication* 16, 139-151.
- [2] D. G. Childers & Wong, C. F. 1994. "Measuring and modeling vocal source-tract interaction." *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 41, 663-671.
- [3] 최철민 · 전범기 · 성평모. 1996. "주관적 음색평가와 주파수 특성과의 관련성을 이용한 음색 판단." 제13회 음성통신 및 신호처리 워크샵, 223-226.
- [4] D. G. Childers & C. K. Lee. 1991. "Vocal quality factors: Analysis, synthesis, and perception." *J. Acoust. Soc. Am.* 90, 2394-2410.
- [5] L. R. Rabiner & R. W. Schafer. 1978. *Digital Processing of Speech Signals*. Prentice-Hall, Inc.
- [6] J. D. Markel & A. H. Gray. 1976. *Linear Prediction of Speech*. Springer-Verlag.
- [7] P. Alku. 1995. "Effects of bandwidth on glottal airflow waveforms estimated by inverse filtering." *J. Acoust. Soc. Am.* 98, 763-767.
- [8] Helmer Strik. 1996. "Comments on "Effects of bandwidth on glottal airflow waveforms estimated by inverse filtering"[J. Acoust. Soc. Am. 98, 763-767 (1995)]." *J. Acoust. Soc. Am.* 100, 1246-1249.
- [9] D. G. Childers & Chieteuk Ahn. 1995. "Modeling the glottal volume-velocity waveform for three voice types." *J. Acoust. Soc. Am.* 97, 505-519.
- [10] G. Fant, J. Liljencrants and Q. Lin. 1985. "A Four Parameter Model of Glottal Flow." *STL-QPSR*, 1-13.
- [11] G. Fant et al. 1989. "Voice source rules for text-to-speech synthesis." *Proc. ICASSP* 89(1), 223-226.
- [12] 오창수 · 유지성. 1995. *현대통계학*. 박영사.
- [13] 염준근. 1992. *선형회귀분석*. 자유아카데미.
- [14] Roger A. Horn & Charles A. Johnson. 1992. *Matrix Analysis*. Cambridge University Press.
- [15] David G. Luenberger. 1968. *Optimization by Vector Space Methods*. John Wiley & Sons, Inc.

접수일자: '97. 9. 28.  
게재결정: '97. 11. 5.

▲ 김진영

광주광역시 북구 용봉동 300  
전남대학교 전자공학과(우: 500-757)  
Tel : (062) 520-6398 (O) Fax : (062) 514-6472  
e-mail : kimjin@dsp.chonnam.ac.kr

▲ 엄기완

광주광역시 북구 용봉동 300  
전남대학교 전자공학과(우: 500-757)  
Tel : (062) 514-6472 (O) Fax : (062) 514-6472  
e-mail : eom@dsp.chonnam.ac.kr