신경망 학습을 이용한 한국어 음성 합성기용 에너지 컨투어 제어

Energy contour control for Korean TTS using a NN learning

이 정 철*, 한 민 수**, 성 굉 모***
(Jung Chul Lee*, Min Soo Hahn**, Koeng Mo Sung***)

요 약

문장의 에너지 컨투어는 합성음의 자연성을 결정짓는 주요 운율 파라미터 중 하나이다. 본 연구에서는 한국어 음성합성기의 합성음 생성에서 자연성 향상을 목적으로 한 문장의 에너지 컨투어 제어를 위한 방법을 제안한다. 제안된 모델은 음절을 기본단위로 하며 다층 신경망을 이용하여 어절내 각 음절의 피크값을 추정한다. 그리고 신경망 입력에 문장내 어절의 기능과 관련된 간접적인 파라미터를 수용함으로써 문장단위의 에너지 컨투어 생성을 가능하게 하였다. 본 추정기의 예측오차는 학습문장에 대해 10% 이내로서 높은 신뢰도를 보인다. 또한 신경망을 이용함으로써 단어사전 없이 단어의 에너지 컨투어 추정을 가능하게 하였으며, TTS에의 활용 가능성을 보였다 .

ABSTRACT

Energy contour in a sentence is one of major factors which affect the naturalness of synthetic speech. In this paper, we propose a method to control the energy contour for the enhancement in the naturalness of Korean synthetic speech. Our algorithm adopts syllable as a basic unit and predicts the peak amplitude for each syllable in a word using a neural network. We utilize indirect linguistic features as well as acoustic features of phonemes as input data to the NN to accommodate the grammatical effects of words in a sentence. The simulation results show that predction error is less than 10% and our algorithm is very effective to analysis/synthesis the energy contour of a sentence, and generates a fairly good declarative contour for TTS.

I. 서 론

음성합성의 목적은 컴퓨터가 사용자인 인간에게 다양한 형태의 정보를 음성으로 제공하는데 있다. 합성기를 이용하여 무제한의 텍스트 즉, 의학서적, 법률서적, 백과사전, 신문, 전공 논문 등을 사용자에게 낭독해주는 고품질의 음성합성 서비스를 제공하기 위해서는 합성음의 명료도와 자연성이 높아야 한다. 이에 기존의 한국어 음성합성기의 자연성 구현시의 문제점을 살펴보고 자연성 개선을 위해서 운율제어 파라미터인 음소의 지속시간, 억양, 에너지 중 음의 세기와 관련된 에너지 컨투어 생성 방법을 제안하고자 한다.

텍스트에서 띄어쓰기, 구두점 등을 이용하여 독자에 정확히 의미를 전달하고자 하는 것과 마찬가지로 발화에서도 운율을 이용하는데 운율의 표현수단은 끊어읽기, 음소 지속시간의 장단, 소리의 고저 (억양), 소리의 세기 (에너지 컨투어) 의 4가지 형태이다. 이중 끊어읽기, 음소의 지속시간, 억양에 대해서는 많은 연구가 진행되어 발화에 대한 분석 및 합성에 응용되고 있다 [1-2]. 에너지 컨투어와 관련된 연구는 음성언어에서 강조와 소리 세기의 상관도 분석 수준[3,4]으로 시작되었다. 그러나 이후 음성합성과 관련된 연구에서 합성음의 자연성, 명료도에 미치는 영향이 상대적으로 큰 다른 운율 표현수단의 분석에 연구가 집중되어 에너지 컨투어에 대한 연구는 미미한 실정이다. 또 Turk는 지속시간과 세기의 변화에 대한 청취자의 반응 실험을 통하여 소리의 세기보다는 지속시간이 음성신호의 돋들림에 더 큰 영향을 미친다는 결과를 얻었다 [5]. 그러나 이는 돋들림 요인분석 수준의 연구결과로서 소리의 세기가 자연성에 미치는 영향은 무시되고 있다. Kuniszyk-Jozkowiak는 유창성 정도에 따른 음성신호의 에너지 패턴의 분석을 통하여 음성의 유창성, 자연

* 한국전자통신연구원
** 한국정보통신대학원대학교 통신공학부
*** 서울대학교 전기공학부
접수일자 : 1998년 4월 9일

성 판정에 에너지 컨투어가 유효한 파라미터가 될 수 있음을 보이고 있다 [6]. 그리고 운율경계에서의 에너지 변화를 조음현상과 관련하여 분석할 필요성이 대두되었다 [7]. 최근 Hanson은 문장의 에너지 컨투어를 결정짓는 주요 음소인 모음들의 진폭을 제어하기 위해 문장단위 적용 규칙을 작성하고 합성기에 응용, 합성음의 자연성 향상을 시도하였다 [8]. 그러나 아직 자연성 향상을 위한 에너지 컨투어에 대한 음성,언어학적 분석이 부족한 실정이다.

일반적으로 발성자가 자신의 의사를 표현하고자 할 때 먼저 의미구조를 형성하고, 이를 전달하기에 적합한 단어들을 선택한다. 그리고 단어들의 연결이 자연스러운 구문구조를 구성한 뒤, 조음기관을 이용하여 음절단위로 발성하며 이 때 조음기관의 물리적 제약을 받게 된다. 물론 이 과정이 반드시 순차적으로 일어나는 것은 아니다. 즉 언어학습을 통해 숙지된 의사표현과 발성자의 표현 습관 등은 반사적으로 흔히 나타나며, 특히 대화체와 같은 경우는 의미구조를 계속 생성하며 발화하는 것이 일반적이다. 그러나 이 경우라 할지라도 그 발화가 자연스럽다면 이미 상기 과정이 충분히 사전 학습된 결과라 볼 수 있다. 그러므로 에너지 컨투어는 문장의 의미구조, 구문구조, 단어선택, 조음결합 현상, 화자의 의도, 발화속도 등이 복합적으로 작용한 결과라고 할 수 있다. 이를 세부적으로 살펴보면 다음과 같다.

- 일반적으로 사람이 문장을 발성할 때 정확한 의미전달을 위해서 의미전달에 핵심이 되는 중심어를 강하게 발성하여 강조한다.
- 전체 문장의 발성에서는 발성기관의 물리적 제약에 의해서 후반부로 갈수록 에너지가 낮아진다.
- 발성 중 의미적 경계가 뚜렷한 곳에서 숨쉬기가 일어난다. 그 다음 발성의 에너지 컨투어는 문장의 시작부분과 같은 형태로 reset 된다.
- 한번의 날숨 (breath group)으로 발성하기 어려운 긴 발화에서는 짧은 숨쉬기가 breath group 내의 가장 깊은 경계에서 일어나며 이 때는 reset보다는 에너지의 연속성이 유지되는 방향으로 표현된다.
- 억양표현의 기본단위인 구의 에너지 컨투어는 구문구조에 의한 영향을 가장 크게 받는다.
- 단어 내의 에너지 컨투어는 음운환경과 사회적 관습(주로 표준어)에 의해 기본이 결정되지만 동일 구 안에서의 단어간 결합관계에 의해 변화된다.

현재 합성기에서 많이 사용되고 있는 diphone, demi-syllable, triphone 등과 같은 합성 단위들은 단음절 혹은 다음절 단위로 단독 발성된 음성데이타로서 조음결합을 고려하여 작성된 것이다. 그러므로 에너지 컨투어 제어없이 이들 합성단위를 단순히 연결하여 합성음을 생성하면 음절의 경계를 기준으로 상승과 하강의 규칙적인 패턴이 반복되고 전체 문장에 대하여 적합한 에너지 컨투어를 구현하기는 불가능하다. 따라서 비록 지속시간, 억양을 적절히 제어하여도 음절단위의 균일한 에너지 패턴의 반복에 의해 합성음의 자연성은 낮아지게 된다.

본 연구에서는 의미구조, 화자의 의도, 발화속도와 같은 언어 외적인 요인은 배제하고 구문구조, 단어, 조음결합 현상 등의 요인 만이 문장의 에너지 컨투어 생성에 기여하는 것으로 한정한다. 이 경우 에너지 컨투어의 패턴이 규칙성을 가지며 이는 신경망 학습방법을 이용하여 학습 가능함을 알 수 있다[9-12]. 그러므로 이들 요인을 기준으로 하여 문장의 에너지 컨투어 생성 모델을 작성하고, 다층신경망을 이용하여 자연 음성을 대상으로 학습한 뒤 음성합성기에 그 결과를 응용하여 합성음의 자연성을 개선하고자 한다.

II. 음성시료 및 에너지 컨투어 분석

본 연구에 사용된 음성시료는 남성 전문 아나운서 1인이 텍스트 문장셋을 문장단위로 낭독한 음성데이타로 구성된다. 이를 DAT recorder에 녹음한 뒤, 16bit, 16kHz 로 표본화하고, ESPS tool을 이용하여 수작업으로 음소단위의 분절/표기를 하였다. 전체 문장 수는156 문장으로 2,186개의 단어, 6,632개의 음절로 구성되어 있다.

그림 1은 음절 에너지로 표현된 156문장의 에너지 컨투어를 나타낸다. 에너지값의 표현은 음절을 기본 단위로 하며 음절의 에너지값은 음절 내 최대 피크값을 의미하며 단어의 에너지값은 단어 내 음절 에너지값들의 평균값을 의미한다. 가로축은 문장 내 음절의 위치를 의미하며 전체 음절수로 정규화 되어 있다. 세로축은 각 음절의 에너지값을 나타낸다. 그림 1에서 알 수 있듯이 에너지는 점감하는 패턴을 보이고 있으며 문장 내에서 reset 현상을 발견할 수 있다. 또 에너지 변화의 폭이 문장의 시작부에서는 10,000 정도이고 후반부에서는 변화폭이 5,000 미만으로 감소함을 알 수 있다.

그림 2-그림 3은 단어 내 음절수와 음절의 위치에 따른

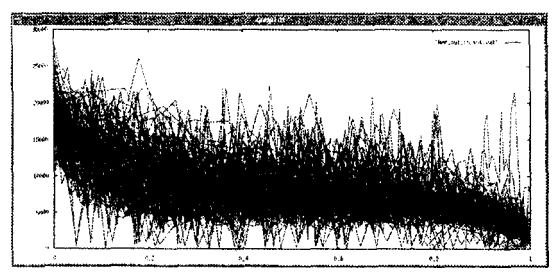

그림1. 음절 에너지로 표현된 156문장의 에너지 컨투어

음절에너지 패턴들에 대한 특성 예를 보이고 있다. 가로축은 단어 내 음절의 수에 따라 정규화된 음절의 위치이며 세로축은 각 음절의 에너지값에 단어의 평균 에너지값을 뺀 값이다. 단어 내 음절수와 단어의 에너지 컨투어 패턴간의 상관도는 그림에서 보는 바와 같이 낮음을 알 수 있

다. 즉 단어의 에너지 컨투어는 단어 내 음절수에 의해 결정되는 것이 아니라 단어의 문법적 기능, 단어 내 음운구조, 사회언어적 관습, 문장 내 단어의 위치 등의 요인이 복합적으로 작용한 결과이다.

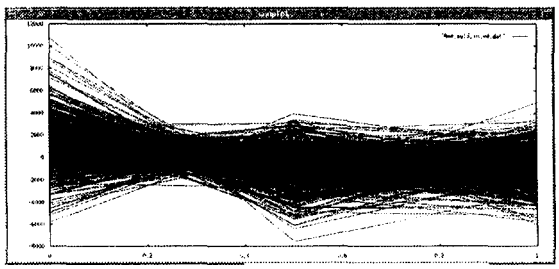

그림 2. 3음절 단어의 음절 에너지 컨투어

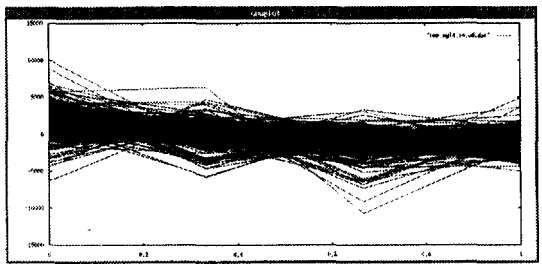

그림 3. 4음절 단어의 음절 에너지 컨투어

이들 요인들과 에너지 컨투어와의 상관도 조사를 위해 먼저 breath 그룹 내 단어위치와 단어 에너지의 상관계수를 구한 결과를 그림 4에 보였다. Breath 그룹의 경계점은 단어간 쉼구간 길이가 문턱치 Pth 이상되는 점으로 정하였다. 그림에서 가로축은 Pth를, 세로축은 breath 그룹 내 단어의 위치와 에너지값 사이의 상관계수 rap를 의미한다. 상관계수 rap는 식 (1)에 의해 구하였다.

$$r_{ap}=\frac{E\{(A-\eta_a)(P-\eta_p)\}}{\sqrt{E\{(A-\eta_a)^2\}E\{(P-\eta_p)^2\}}} \quad (1)$$

여기서 A는 단어의 에너지값, η_a는 단어의 평균 에너지값, P는 breath 그룹 내 단어의 위치, η_p는 breath 그룹 내 단어수의 평균을 의미한다. 그림 4에서 알 수 있듯이 P_{th}를 400msec로 잡을 때 break 그룹 내 단어의 위치와 에너지값의 상관도가 가장 높음을 알 수 있으며 그룹 내 단어의 위치가 후반부로 갈수록 단어의 에너지가 감소함을 알 수 있다. P_{th} 값이 작아지거나 커짐에 따라 상관계수값이 작아지는 것은 breath 그룹 경계점 설정 오류에 기인한 것으로 breath 그룹과 에너지 컨투어간의 높은 상관성을 입증한다.

구문구조 혹은 단어의 문법적 기능에 대한 정보의 직접적 표현으로는 단어에 대한 품사정보, 격구조, 구정보, 절정보 등이 있다. 이러한 정보들이 실제 발성에서는 억양, 지속시간, 끊어읽기, 세기의 운율이라는 형태로 표현되어지며 이들 운율정보 간의 상관도는 매우 높다. 그러므로 에너지 컨투어와 문법적 기능과의 관계에 대한 분석에서 끊어읽기와 억양에 대한 정보를 간접적인 분석 파라미터로 사용할 수 있다. 특히 TTS는 구문구조 분석 결과를 이용하여 끊어읽기 위치 및 길이를 추정하고 억양 컨투어를 생성하므로 이 결과를 이용하여 에너지 컨투어 생성 규칙을 작성하고 적용하는 것이 효율적이다.

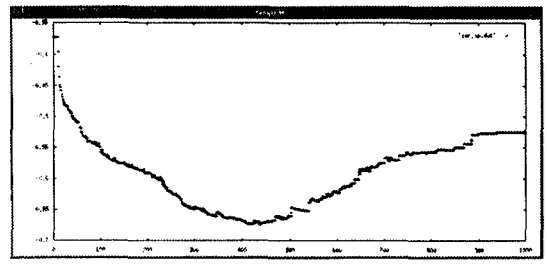

그림 4. Breath 그룹내 단어의 위치와 단어 에너지값과의 상관계수

먼저 끊어읽기와 단어 에너지값사이의 관련성을 살펴본다. 그림 5은 선행 끊어읽기 길이와 이에 뒤따르는 단어의 에너지 분포도를 보이고 있다. 그림에서 가로축은 선행되는 끊어읽기의 길이를, 세로축은 뒤따르는 단어의 평균 에너지값을 나타낸다. 문장에서 첫 단어에는 고정값 1sec의 끊어읽기가 선행되는 것으로 가정하였다. 선행 끊어읽기의 길이가 증가함에 따라 뒤따르는 단어의 에너지값이 커지는 경향을 볼 수 있다. 그러나 단어의 문장 내 위치를 고려하지 않고 단어의 절대적 에너지값의 분포를 살펴본 것이므로 주어진 끊어읽기 길이에 대한 단어의 에너지값의 변화가 매우 크다. 선행 끊어읽기 길이와 이에 뒤따르는 단어의 에너지의 상관계수는 0.7 이었다.

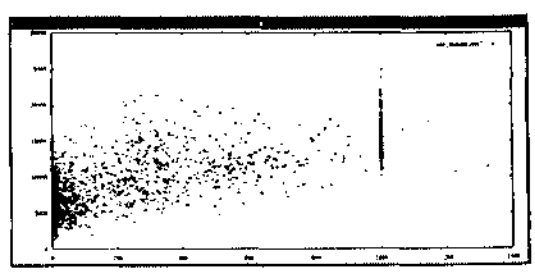

그림 5. 선행 끊어읽기 길이와 이에 뒤따르는 단어의 에너지의 분포도

그림 6은 단어 간에 내재하는 끊어읽기 길이와 단어 간 에너지값 차이의 분포를 나타낸 것으로서 선행 끊어읽기가 후행 단어의 에너지값 변화에 미치는 영향을 그림 5보다 분명하게 보이고 있다. 즉 단어 간에 내재하는 끊어읽기 길이가 증가함과 비례하여 후행 단어의 에너지가 선행하는 단어의 에너지값보다 커짐을 알 수 있다.

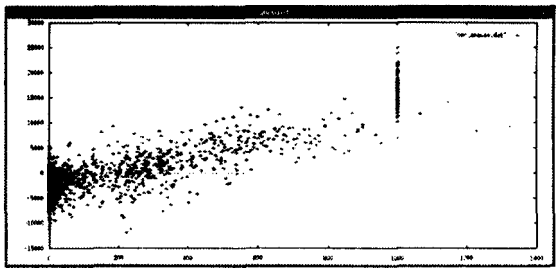

그림 6. 단어간 휴지구간 길이에 대한 단어간 에너지 차이 분포도

그림 7은 단어의 평균 피치값에 대한 단어의 에너지 분포를 나타낸 것으로 단어의 평균 피치값 증가에 비례하여 단어의 에너지값도 증가하는 경향을 보인다. 80Hz 미만의 경우는 대부분이 구,절, 문장의 끝부분으로 피치도 하강하고 에너지도 낮게 나타난다. 그러나 단어의 피치값이 80Hz 이상되는 영역에서는 단어 에너지의 분산이 커지는 것을 볼 수 있다. 이 데이타로부터 구,절,문장의 시작과 중간에서는 문장구조, 단어 위치, 단어의 기능 등의 요인이 피치값 변화보다 에너지의 변화에 더 큰 영향을 준다고 추론할 수 있다. 그 결과 단어의 피치값 만으로 단어의 에너지값을 추정하기에는 무리가 있음을 알 수 있다. 단어의 평균 피치값에 대한 단어의 에너지 상관계수는 0.7 이었다.

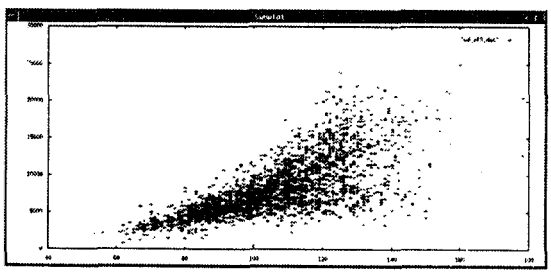

그림 7. 단어의 평균 피치값에 대한 단어의 에너지 분포도

그림 8은 인접 단어 간 피치값 차이에 대한 에너지 차이 분포를 보인 것으로 단어 간의 피치값이 증가함에 비례하여 단어 간의 에너지 차이도 증가하는 경향을 보이지만 변화의 폭이 크게 나타났다. 즉 인접 단어 간 피치값 차만으로 단어의 에너지값을 추정하는 것은 부적절함을 알 수 있다.

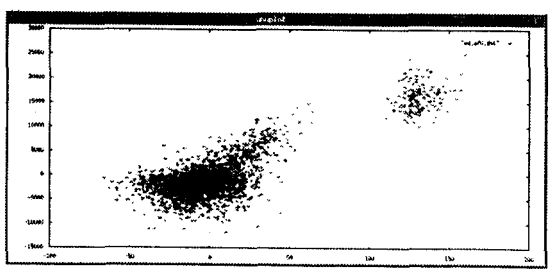

그림 8. 인접 단어간 피치값 차이에 대한 인접 단어간 에너지 차이의 분포도

이상의 분석 결과, 단어의 에너지 컨투어는 문장구조, 문장 내 단어의 위치, 단어의 문법적 기능, 단어 내 음운구조 등의 요인이 복합적으로 작용한 결과이며 문장구조, 단어의 문법적 기능에 따른 변화 요인은 인접 단어의 피치값, 인접 단어 사이에 내재하는 끊어읽기 길이와 같은 간접적인 요인으로 대체하여 사용 가능함을 알 수 있다.

III. 에너지 컨투어 모델링

문장의 에너지 컨투어는 아래의 과정으로 생성한다.

- 에너지 컨투어 생성은 음절을 기본단위로 한다.
- 단어 내 음절의 에너지값을 추정한다.
- 음절 내 에너지 컨투어는 합성단위 DB의 에너지 컨투어를 유지하되 음절의 최대 peak값을 문장의 에너지 컨투어에 맞춘다.
- 음절 간 경계에서 에너지 컨투어를 평활화한다.

단어 내 음절의 에너지값 예측을 위해 그림 9에서와 같이 다층 구조의 신경망을 이용하여 단어 내 음절의 에너지값를 학습시켰다. 단어 내 음절 에너지값의 추정에 사용되는 입력 파라미터에는 문장 내 단어의 위치, 단어를 구성하는 음소열의 자질, 음절 내 음소들 간의 조음결합, 단어의 문법기능이 있으며 출력은 해당 음절의 에너지값이다. 음소의 자질은 조음위치, 조음방법에 따라 분류한다. 조음위치로는 순음, 치음, 치조음, 구개음, 전설모음, 중설모음, 후설모음, 열린 모음, 닫힌 모음 등으로 분류하고, 조음방법으로는 유,무성, 파열음, 파찰음, 마찰음, 비음, 유음 등으로 분류한다. 음절 내 음소들 간 조음결합 특성은 음절별 평균 에너지값으로 한다. 단어의 문법기능과 관련된 파라미터는 대상 단어와 앞.뒤 단어의 평균피치값들, 대상 단어의 앞.뒤에 위치하는 끊어읽기 길이로 표현되는 간접 파라미터를 사용한다.

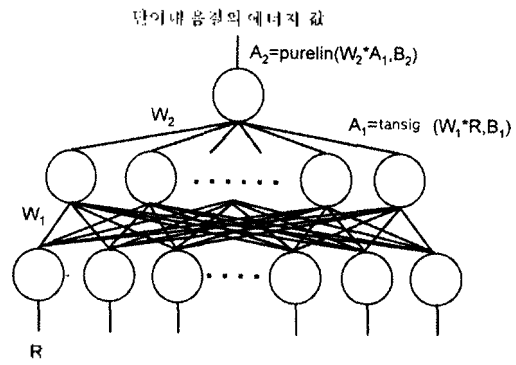

그림 9. 단어내 음절의 에너지값 예측을 위한 신경망 구조

IV. 실험 및 결과

음성시료 156문장을 이용하여 단어 내 음절의 에너지값

을 다층신경망으로 학습한 뒤 예측 성능을 평가하였다. 학습율은 10에서 0.00001 까지 변화하면서 실험한 결과 학습율이 충분히 작지 않으면 학습이 실패함을 발견하였다. 따라서 두 계층 모두 학습율을 0.0001로 하였다. 신경망을 이용하여 단어 내 음절의 에너지값을 예측한 결과를 그림 10과 표 1에 보였다. 그림 13에서 가로축은 음절의 에너지 목표치이고 세로축은 추정된 음절의 에너지값을 의미한다. 실험결과 문장 내 음절의 에너지값 추정이 성공적임을 알 수 있다. 이는 우리가 제안한 알고리즘이 단순하면서도 문맥에 따른 단어간의 상호작용을 수용하는데 매우 효율적임을 의미한다.

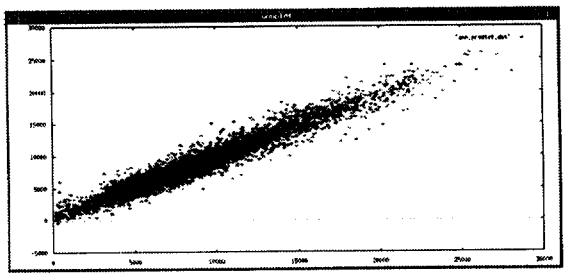

그림 10. 음절의 에너지 목표치와 신경망을 이용한 예측결과

표 1. 16bit(+32,767)으로 표본화된 음성신호에서 단어 내 음절 수별 예측 에너지 오차의 표준편차

단어내 음절수	예측오차의 표준편차
1	1400
2	1200
3	1100
4	900
5	700
6	300
7	700
8	200
9	1800

그림 11 ~ 그림 13에서 3개의 문장에 대한 원음과 합성음 파형을 나타내었다. 합성음에는 에너지 제어를 하지 않고 합성단위의 에너지 컨투어를 그대로 사용하는 경우와 본 논문에서 제안한 에너지 컨투어 제어 알고리즘을 적용하여 합성음을 생성한 경우의 2가지를 비교한 것으로서, 시간축 상에서 정렬은 되지 않았다. 그림에서 알 수 있듯이 에너지 제어를 하지 않은 합성음은 음절단위의 에너지 경계가 뚜렷하고, 문장내의 에너지 컨투어가 평탄하여 실제 문장에서 나타나는 운율경계내의 에너지 패턴과는 거리가 멀다. 그러나 본 모델을 적용한 합성음 문장의 에너지 컨투어는 실제 음성의 에너지 컨투어를 잘 모사함을 알 수 있다.

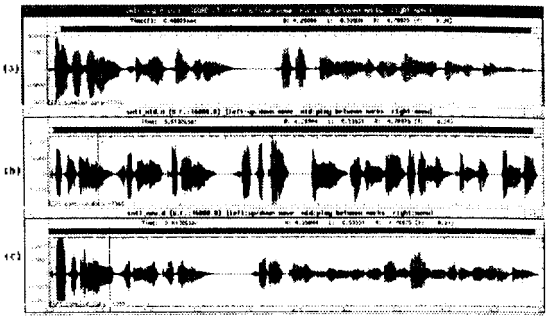

그림 11. 문장1. /고조되는 지구의 파괴는 저 밖에 있는 누군가에 의한 것이 아니다./에 대한 (a)원음, (b)에너지 컨투어 제어를 하지 않은 합성음, (c) 제안된 알고리즘으로 에너지 컨투어를 제어한 합성음

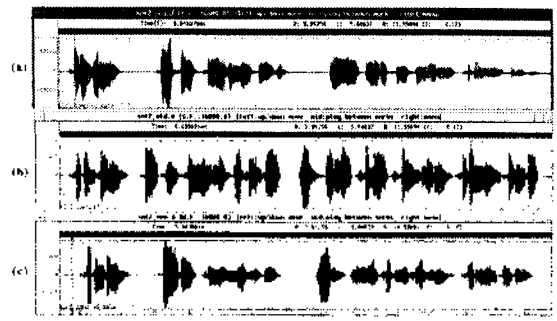

그림 12. 문장2. /주전자는 부엌에 중요한 요소이고 매일 여러 차례 사용하는 주방용품이다./에 대한 (a)원음, (b)에너지 컨투어 제어를 하지 않은 합성음, (c) 제안된 알고리즘으로 에너지 컨투어를 제어한 합성음

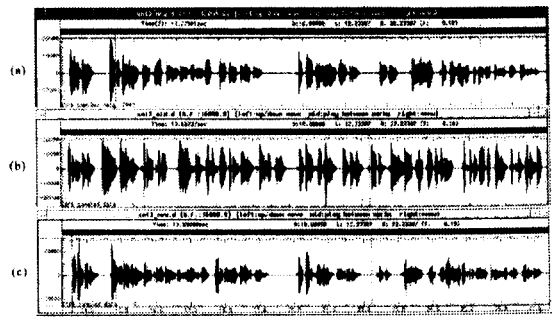

그림 13. 문장3. /어린이들은 빨리 달리는 자동차와 관련된 모험과 드릴감을 좋아하지만 길가에서 노는 아이들은 종종 정말로 진짜 위험이 도사리고 있다는 것을 모른다./에 대한 (a)원음, (b)에너지 컨투어 제어를 하지 않은 합성음, (c) 제안된 알고리즘으로 에너지 컨투어를 제어한 합성음

V. 결 론

본 논문에서는 한국어 문장 에너지 컨투어 생성 모델과 예측 알고리즘을 제안하였다. 이 모델을 이용하여 문장의 에너지 패턴을 선형적으로 분석할 수 있었으며 그 특성을 이용하여 에너지 컨투어를 보다 자연스럽게 생성할 수 있는 토대를 마련하였다.

음절 에너지값의 예측에 음소의 음운특성과 음절의 대표적 에너지값 및 문장 내 단어의 위치정보, 인접 단어들의 피치값, 단어의 앞.뒤 끊어읽기 길이를 이용한 신경망학습을 적용하였다. 제안된 알고리즘은 문장구조, 음운구조를 수용할 수 있는 특성을 보였으며 추정된 에너지 값의 추정오차는 실제값의 10% 이내로서 상당히 높은 신뢰도를 얻을 수 있었다. 그 결과 단어사전을 구성하지 않고도 단어의 에너지 컨투어 추정을 가능하게 하였으며, 에너지 제어를 이용한 한국어 TTS의 자연성 개선을 이룰 수 있었다.

참 고 문 헌

1. D.Hirst, "Structures and Categories in Prosodic Representation," in Prosody: Models and Measurements, Springer-Verlag, pp.93-109, 1983.
2. D.Hirst, "Prediction of prosody: An overview," in Talking Machines:Theories, Models, and Designs, North-Holland, pp.199-204, 1992.
3. D.B. Fry, "Duration and intensity as physical correlates of linguistic stress," J. Acoust. Soc. Am. 35, pp.765-769, 1955.
4. S. Tanaka, W.J. Gould, "Relationships between vocal intensity and noninvasively obtained aerodynamic parameters in normal subjects," J. Acoust. Soc. Am. 73, pp.1316-1321, 1983.
5. A.E. Turk, J.R. Sawusch, "The processing of duration and intensity cues to prominence," J. Acoust. Soc. Am. 99, pp.3782-3790, 1996.
6. W. Kuniszyk-Jozkowiak, "A comparison of speech envelopes of stutterers and nonstutterers," J. Acoust. Soc. Am. 100, pp.1105-1110, 1996.
7. C. Fougeron, P.A. Keating, "Articulatory strengthening at edges of prosodic domains," J. Acoust. Soc. Am. 101, pp.3728-3740, 1997.
8. H.M. Hanson, "Vowel Amplitude variation during sentence production," in Proc. ICASSP'97, vol.3, pp.1627-1630, 1997.
9. J.C. Lee, and Koeng-mo Sung, "Improvement of synthesised speech intonation with stylisation and neural network learning," in Electronics Letters Vol. 33. No. 19, pp.1600-1601, 1997
10. J.C.Lee, S.H.Kim, Minsoo Hahn, "Intonation Processing for TTS Using Stylization and Neural Network Learning Method," in Proc. *ICSLP* '96, pp. 1377-1380, 1996.
11. S.H.Kim and J.C.Lee, "Korean Text-to-Speech System Using TD-PSOLA," in Proc. SST94, pp.587-592, 1994.
12. H. Oh, Y.J. Lee, "A modified error function to improve the error back-propagation algorithm for multilayer perceptrons," ETRI J., vol.17, pp.11-22, 1995.

▲이 정 철 (Jung-Chul Lee)
1984년 2월:서울대학교 전자공학과(학사)
1988년 2월:서울대학교 전자공학과(석사)
1990년 3월~현재:서울대학교 전자공학과 박사과정
1985년 9월~현재:한국전자통신연구원 선임연구원

▲한 민 수 (Min-Soo Hahn)
한국음향학회지 제16권 3E호 참조

▲성 굉 모 (Koeng-Mo Sung)
한국음향학회지 제16권 3호 참조