

한국 단음절어의 주파수중요기능 연구

한림국제대학원대학교 청각학과¹ · 한림대학교 자연과학대학 언어청각학부²

이 경 원¹ · 김 진 속²

ABSTRACT

The Study of Frequency Importance Function of the Korean Monosyllabic Words

Kyoung Won Lee¹ and Jin Sook Kim²

¹Department of Audiology, Hallym University of Graduate Studies, Seoul, Korea

²Division of Speech Pathology & Audiology, College of Natural Science, Hallym University, Chuncheon, Korea

Speech intelligibility index (SII) can be utilized for predicting speech recognition abilities of the hearing impaired based on the pure tone thresholds. For calculation of SII, frequency importance function (FIF) has to be produced considering the language characteristics. The purpose of this study was to derive FIF at 1/3 and 1 octave frequency bands using recently developed Korean standard monosyllabic word lists for adults (KS-MWL-A). KS-MWL-A speech materials were presented to normal hearing 17 adults, age ranging from 19 to 25, after filtering with 7 high pass filters (HPFs) and low pass filters (LPFs) combined with Korean speech shaped noise. The cut-off frequencies (COFs) of the LPF were 224, 447, 891, 1413, 2239, 3548, 5623 Hz and the HPF were 447, 891, 1413, 2239, 3548, 5623 Hz. Signal-to-noise ratios (SNRs) were -10 to +8 dB by 2 dB steps. Relative speech intelligibility index (R-SII) were derived by word recognition scores (WRSs) as a function of COFs at each SNR. Finally, FIFs were calculated by cumulative curves as function of frequencies. Regression equation of R-SII and WRS as a function of SII showed cubic function as $y = 41.77x^3 - 159.01x^2 + 208.31x - 4.08$ ($R^2 = 0.992, p < .000$). As Korean R-SII increased 0.0 to 0.5, WRS increased rapidly comparing to English R-SII. Maximum FIFs of KS-MWL-A showed 0.2190 at 800 Hz by 1/3 octave band frequency and 0.4507 at 1,000 Hz by 1 octave band frequency. Crossover frequencies of KS-MWL-A showed 1,518-1,941 Hz and increased as SNR increased. All the results were different from English monosyllabic words. The results of this study can be utilized for calculating hearing aid fitting formula, for determining aims, and effective process of auditory training. However, further study should be performed using various speech materials such as Korean sentence and short passages and etc.

KEY WORDS : Articulation index, Cut-off frequency, Frequency importance function, Monosyllabic word, Speech intelligibility index.

INTRODUCTION

주파수중요기능(Frequency Importance Function, FIF)은 언어를 인지하기 위한 공헌도를 1/3 또는 1 옥타브 주파수대역(octave frequency band) 별로 0에서 1까지의 숫자 또는 백분율로 나타낸 것으로 어음명료지수(Speech

Intelligibility Index, SII)의 산출에 있어서 청력역치와 더불어 중요한 요소이다. 초기의 FIF 관련 연구는 다양한 전기음향적인 조건에서 어음 신호가 전화 등의 통신기기를 통하여 어떻게 전달되는지를 예측하기 위한 것으로 미국의 Bell Telephone Laboratories에서 개발하였으며(French & Steinberg, 1947; Fletcher & Galt, 1950), 미국국가 표준기구(American National Standard Institute, ANSI)는 1969년에 FIF를 미국의 국가표준으로 제정하였다(ANSI S3.5, 1969). 이후 ANSI는 1997년에 FIF와 관련된 용어인 'Articulation index'를 'Speech intelligibility index'라는 용어로 개정하여 현재까지 사용하고 있다(ANSI S3.5, 1997; ANSI S3.5, 2007). SII의 용도는 난청인의 청력 역치에 따른 어음이해능력을 예측하거나 보

논문접수일: 2012년 04월 27일

논문수정일: 2012년 06월 10일

게재확정일: 2012년 06월 11일

교신저자: 김진속, 200-702 강원도 춘천시 한림대학길 1
한림대학교 자연과학대학 언어청각학부

전화: (033) 248-4950, 전송: (033) 248-2213

E-mail: jskim@hallym.ac.kr

청기 착용 전후의 어음인지능력, 즉 보청기의 수행능력평가(Hou & Thornton, 1994; Pavlovic, 1994; Amlani et al., 2002), 혹은 난청인의 보청기적합에 이용하거나 보청기적합공식의 산출에도 유용하게 사용할 수 있다(Byrne & Dillon, 1986; Souza et al., 2000; Byrne et al., 2001).

SII를 산출하기 위해서는 FIF와 대역가청기능(Band Audibility Function, BAF)과 정보전달도(proficiency, P) 등의 요소가 필요하다(Studebaker & Sherbecoe, 1991; ANSI S3.5, 2007). 여기에서 FIF는 언어를 이해하기 위한 공현도의 가중치를 1/3 또는 1 옥타브 주파수대역 별로 '0'에서 '1'까지의 지수 또는 백분율로 표시하지만, 실제로 SII를 계산하기 위해서는 지수를 30으로 나눈 값을 사용한다. BAF는 청력의 정도에 따라 어음역동범위를 얼마나 들을 수 있는지를 나타내는 것으로 영어의 경우 어음역동범위를 30 dB로 정하는데(Pavlovic & Studebaker, 1984; Byrne et al., 1994), 정상 청력의 경우는 어음역동범위를 모두 들을 수 있는 것으로 간주하여 BAF는 30으로 결정한다(Amlani et al., 2002). 그리고 정보전달도 P 는 어음신호가 청자에게 얼마나 정확하게 전달되는가를 의미한다. SII를 계산하는 방법은 FIF와 BAF를 곱한 값의 총 합에 P 를 곱하여 구할 수 있는데, 여러 연구(Pavlovic & Studebaker, 1984; Pavlovic et al., 1986; Studebaker et al., 1987)에서는 SII를 아래의 [식 1]로 표현하였다.

$$SII = (P) \int_0^{\infty} I(f) W(f) df \quad [\text{식 1}]$$

여기에서 I 는 FIF, W 는 BAF를 의미한다. 그리고 P 는 정보전달도를 나타내며, 그 값은 일반적으로 '1'로 간주한다(Studebaker & Sherbecoe, 1991; Amlani et al., 2002). 이에 따라 ANSI에서 제시한 SII의 계산식은 [식 2]와 같이 표현하였다(ANSI, 1997, 2007).

$$SII = \sum_{i=1}^n I_i A_i \quad [\text{식 2}]$$

상기의 식에서 A 는 각각 주파수 대역별 청력과 FIF를 의미한다. SII의 값은 '0'에서 '1' 사이의 숫자로 나타나며, 어음을 전혀 인지할 수 없을 경우는 '0', 어음의 인지력이 최대일 경우는 '1'로 나타난다.

SII를 구성하는 요소 중 FIF와 BAF는 모두 어음과 관계가 있지만, 특히 FIF가 특정 국가 언어의 어음스펙트럼 특성을 잘 반영한다. FIF는 다양한 어음신호를 여러 개의

절단주파수(Cut-Off Frequency, COF)에서 저역통과여과기(Low Pass Filter, LPF)와 고역통과여과기(High Pass Filter, HPF)로 여과한 다음 차폐잡음을 사용하여 -8 dB에서 +10 dB 사이의 다양한 신호대잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)로 변환한 다음, 건청인에게 들려주어 단어인지를 구하고 통계적인 처리과정을 거쳐서 산출한다(Studebaker & Sherbecoe, 1991; Studebaker et al., 1993). FIF를 구할 때의 어음신호는 초기에는 자음-모음-자음으로 구성된 무의미 단음절어를 주로 이용하였다(French & Steinberg, 1947). 그리고 이후에는 어음청각검사 도구인 다양한 단어인지도 검사용 단음절어, 이야기체의 짧은 문장 또는 연속적인 짧은 대화음 등을 어음신호로 사용하고 있다. 그리고 ANSI S3.5(2007)에서는 FIF를 나타낼 때 명시해야 할 주파수대역을 21개의 임계주파수대역(critical frequency band), 18개의 1/3 옥타브 주파수대역, 6개의 1 옥타브 주파수대역, 17개의 동등공헌임계대역(equally-contributing critical band) 등으로 명시하고 있다. FIF를 구할 때의 COF는 임계대역을 기준으로 사용하기도 하지만 1/3 옥타브 주파수대역을 응용하거나 임의의 다양한 주파수를 사용기도 한다(Studebaker & Sherbecoe, 1991; Studebaker et al., 1993; Wong et al., 2007). SNR을 조절하기 위해서 사용하는 잡음은 대부분 백색잡음을 이용하여 해당 국가 언어의 장기평균어음스펙트럼(long-term-average speech spectrum)과 비슷하게 제작한 어음잡음(Speech Noise, SN)을 사용하며, 많은 주파수에서 상대어음명료지수(Relative Speech Intelligibility Index, R-SII)를 산출하기 위해서 SNR은 -10 dB 전후에서 +8 dB 전후의 SNR까지 1 또는 2-dB 단계로 조절한다. 이때 신호음의 강도는 보통 대화음 크기 정도로 제시하지만 각 연구마다 차이가 있다. 그리고 FIF를 구할 때 차폐잡음과 어음신호는 같은 방향에서 건청인의 한쪽 귀에 제시하여 구한다(ANSI S3.5, 2007).

FIF에 대한 국외의 주요 연구를 살펴보면, 영어의 경우 Fletcher & Galt(1950)는 전화의 사용과 관련한 연구에서 무의미 단음절은 1,000 Hz의 주파수가 가장 중요하다고 하였다. 그러나 Studebaker & Sherbecoe(1991)의 연구에서는 Central Institute for the Deaf (CID) W-22 단어목록으로 1/3 옥타브 주파수대역과 비슷한 20개의 COF와 -10 dB에서 +8 dB SNR까지 2-dB 간격으로 10개의 SNR을 이용했을 때 FIF는 2,000 Hz 부근에서 0.0938로 가장 높게 나타났으며, Studebaker et al.(1993)의 연구에서는 Northwestern University Auditory Test Number 6 (NU6) 단어목록으로 8개의 COF와 -8 dB에

서 +6 dB까지 2dB 간격으로 8개의 SNR을 이용했을 때 최대 FIF는 2,000 Hz 부근에서 0.1171로 CID W-22 단어목록에 비해서 약간 높게 보고하였다. CID W-22와 NU6 단어목록의 FIF 형태를 비교하면 저주파수에서는 CID W-22가, 고주파수에서는 NU6 단어목록의 FIF가 더 높게 나타났다. 또한 Eisenberg et al.(1998)은 Hearing In Noise Test (HINT)에서 사용하는 문장으로 7개의 COF와 -9 dB에서 +6 dB의 SNR에서 FIF를 구했을 때 1660-3150 Hz 사이의 주파수가 중요하다고 보고하였다. ANSI S3.5(2007)에서는 CID W-22, NU6 단어목록 외에도 두 개의 단어 중 하나를 택하는 검사도구인 Diagnostic Rhyme Test (DRT), 읽기 쉽고 짧은 이야기 (short passages of easy reading material), 소음 내에서 단음절어를 제시하는 Speech Perception In Noise (SPIN)에 대하여 FIF를 명시하고 있는데, 읽기 쉽고 짧은 이야기의 FIF는 500 Hz에서 0.0944로 가장 높고, 2,500 Hz에서 0.0820로 두 번째로 높아서 전체적으로 'M'자의 형태를 나타낸다. 그리고 SPIN은 1,600 Hz와 2,500 Hz에서 각각 0.1075와 0.1026로 가장 높은 FIF로 명시하여서 영어를 인지하기 위해서는 500 Hz를 포함하여 2,000-2,500 Hz의 주파수대역이 가장 중요함을 알 수 있다.

FIF의 연구는 주로 영어를 사용하는 미국을 중심으로 이루어졌으며, 이외의 언어에 대한 연구로는 덴마크어, 스웨덴어, 중국어 등을 들 수 있다. 이를 살펴보면 Keidser(1994)는 200개의 덴마크 단음절어로 구성된 Dantale 단어목록으로 -24 dB에서 -3 dB의 SNR을 이용하여 R-SII를 구하였는데, 기울기는 CID W-22 단어목록에 비해서 가파르게 나타나 차이를 보였다고 보고하였으며, Magnusson(1996)은 스웨덴어의 문장목록 Hagermann's Sentences (HS)와 단음절어목록 Swedish Phonemically Balanced Word in Noise (SPBN)을 비교하였는데, HS와 SPBN 간의 R-SII의 기울기에는 차이가 없었으나 CID W-22, Dantale 단어목록에 비해서 높게 나타났다고 보고하였다. 그러나 Dantale, HS, SPBN의 연구에서는 R-SII에 따라 단어인지도가 어떻게 변화하는가에 대해서는 설명하고 있으나 FIF는 별도로 보고하지는 않았다. 동양권에서는 Wong et al.(2007)의 연구에서 중국의 광둥어(Cantonese)를 LPF에서 11개, HPF에서 6개의 COF와 -4 dB에서 +8 dB까지 2 dB 간격으로 8개의 SNR을 이용하여 FIF를 구하였는데, 2,000 Hz 부근 주파수대역의 FIF가 가장 높게 나타나서 500 Hz에서 최대, 2,500 Hz에서 두 번째 높은 FIF를 보이는 영어의 이야기체 문장과 차이가 있다고 보

고하였다. 결과적으로 영어권 이외의 대부분의 연구에서는 해당 국가의 FIF가 영어와 비교하여 서로 다르게 나타났다고 보고하였다.

FIF 또는 SII와 관련한 한국의 연구를 살펴보면, 인공과 우의 착용효과를 평가하기 위하여 조음 지수를 이용한 연구(김수진, 2001), 청각장애 아동의 어음인식을 예측하기 위하여 조음 지수를 적용한 연구(김유경 외, 2002) 등이 있었으나 두 연구 모두 한국어의 FIF를 구하기보다는 영어의 FIF와 BAF를 적용하여 SII에 따른 어음인지를 예측하는 연구였다. 그리고 FIF와 유사한 연구로는 박진희(2000)의 연구에서 COF를 이용하여 단어인지를 구한 연구가 있었지만 청력 손실 형태에 따른 단어인지를 예측하는 것이 목표였다. 또한 황성은 외(2011)의 연구에서는 단음절어 및 문장을 LPF와 HPF의 COF에 따른 단어인지도 및 문장인지를 구하여 보고 하였지만 본격적인 한국어의 SII 산출과는 거리가 있었다. 그리고 SII의 산출 시 필요한 또 하나의 요소인 BAF에 대해서는 von Hapsburg & Bahng(2006), 이경원 외(2008, 2010)의 연구 등의 연구에서 장기평균어음스펙트럼을 보고 하였지만 한국어의 어음역동범위를 결정하는데 있어서 확실한 결론을 내리지 못하고 있다.

각국의 언어는 서로 다른 스펙트럼을 가지고 있다. 이경원 외(2008)는 한국어의 장기평균어음스펙트럼 그리고 이경원 & 김진숙(2009)은 한국과 서양인의 차이를 신체, 심리음향 및 언어의 특성 등에 대해서 비교하였는데 한국어는 장기평균어음스펙트럼에 있어서 영어와 차이가 있었다고 보고하였다. 또한 단음절어표를 개발한 김진숙 외(2008)의 연구에서 한국의 새로운 단음절어는 초성, 중성, 종성에 있어서 자음과 모음의 출현빈도가 영어의 CID W-22, NU6 단어목록과 차이가 있다고 보고하였으며, 한국표준 학령전기용 단음절어표를 연구한 신현욱 & 김진숙(2009)의 연구에서는 심리음향기능곡선의 기울기가 영어의 단음절어와 차이가 있음을 보고하여 한국 단음절어는 영어와 비교했을 때 언어의 평균적인 강도 및 스펙트럼 등에 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서 한국 난청인의 청력 손실의 종류, 정도 및 형태에 따른 어음이해능력의 예측, 보청기 착용 전후의 보청기수행능력의 측정, 보청기적합 및 보청기적합공식의 산출 등을 효과적으로 수행하기 위해서는 언어의 주파수대역 별 공헌도를 잘 나타내는 FIF 및 BAF 등에 대한 연구가 필요하다.

이에 본 연구에서는 한국어와 관련한 SII를 산출하기 위한 기초 자료를 마련하기 위하여 김진숙 외(2008)가 개발한 한국산업규격(2009)의 단음절어(KS-MWL-A)를 한

국어의 장기평균어음스펙트럼과 비슷한 SN을 이용한 다양한 SNR에서 LPF와 HPF의 COF에 의한 단어인지도를 구하여 1/3 그리고 1 옥타브 주파수대역 별 FIF를 구하는 것을 목적으로 하였다. 이러한 자료는 보청기 및 보청기적합 소프트웨어를 모두 수입하여 사용하는 한국에서 난청인의 청력손실의 종류, 정도 및 형태에 따른 어음이해능력의 예측, 보청기 착용 전후의 보청기수행능력의 측정, 보청기적합, 그리고 보청기적합공식의 산출 등에 적용할 수 있을 것이다.

MATERIALS AND METHODS

1. 연구대상자

본 연구에 참여한 대상자는 육안으로 관찰했을 때 정상적인 외이도 및 고막의 형태를 보이고, 고막운동도검사(tympanometry)에서 A형을 나타내며, 순음청력역치가 3,000 Hz를 포함하여 125-8,000 Hz의 모든 옥타브 주파수에서 15 dB HL 이하인 건청인을 대상으로 하였다. 참여한 대상자 수는 총 17명(남 2, 여 15)으로 나이는 19-25세(평균: 19.7세, 표준편차: 3.4세)의 성인으로 대학교 또는 대학원의 재학생이었다. 모든 참여자들은 연구 절차에 대한 설명을 듣고 자의적으로 참여 동의를 작성하였다.

2. 연구 장비 및 재료

본 연구의 실험은 한림대학교와 한림국제대학원대학교 청력검사실의 방음실에서 실시하였다. 고막운동도 검사는 Interacoustic 사의 AT235h, 순음청력역치 및 단어인지도 검사는 Grason & Stadler 사의 GSI 61 그리고 헤드폰은 TDH-39를 사용하였다. 신호음은 남성 화자에 의해 녹음한 KS-MWL-A CD 음원을 다양한 COF에서 LPF와 HPF로 여과한 다음 다양한 SNR로 변환하여 사용하였다. SN의 제작, 단음절어의 COF에 의한 LPF 및 HPF의 여과, SNR의 조절은 Adobe Audition version 3.0을 사용하였다. 그리고 신호음은 노트북(Samsung Sens, P55)에 저장한 후 청력검사와 연결하여 피검자에게 제시하였다.

3. 신호음의 제작

단음절어 CD 음원의 광대역 주파수는 112-11,000 Hz로 조절하였으며, LPF 및 HPF의 COF는 1/3 옥타브 주파수를 변형하여 사용하였다. 예비실험에서의 COF는 LPF가 224, 447, 891, 1,413, 2,239, 3,548, 5,623 Hz,

HPF는 447, 891, 1,413, 2,239, 3,548, 5,623 Hz로 설정하였다. 그러나 LPF에서 224 Hz의 COF는 모든 피검자의 단어인지도가 0%로 나타나서 본 실험에서는 제외하였다. 신호음의 여과는 Adobe Audition version 3.0 소프트웨어에서 'Scientific filter'의 'Chebychev1 filter'를 사용하여 단음절어를 COF에 따라 LPF와 HPF로 여과하였으며, SN의 진폭을 다양하게 조절한 후 신호음과 혼합하여 SNR을 조절하였다.

SNR은 처음 4명의 피검자를 대상으로 -6 dB에서 +8 dB SNR까지 2 dB 간격으로 8개의 SNR로 조절하여 제시하였다. 그러나 가장 낮은 -6 dB SNR에서도 0%에 가까운 낮은 단어인지도가 나타나지 않아서 0.25 이하의 낮은 R-SII를 산출하기가 어려웠다. 이에 따라 이후의 실험에서는 -8 dB 및 -10 dB의 SNR을 추가하여 피검자에게 제시하였으며, 여과 시 사용한 표본화 주파수 및 비트는 각각 44,110 Hz와 16비트였다. 본 연구에서 사용한 SN은 백색잡음을 1/3 옥타브 주파수대역으로 조절하여 한국어음의 스펙트럼과 비슷하게 제작하였다. 그리고 제시한 신호음 중 -6 dB에서 +8 dB의 SNR에서는 LPF의 224, 447, 891 Hz와 HPF의 2,239, 3,548, 5,623 Hz의 COF 그리고 -8과 -10 dB SNR에서는 모든 COF에서 SN 내에 어음신호가 있음을 피검자에게 알리기 위해서 단음절어의 500 msec 앞에 250 msec 길이의 1,000 Hz, 상대 진폭 -24.04 dB의 단서신호를 삽입하였다. 신호음의 저장 시 모든 파일의 맨 앞에 1,000 Hz의 보정음을 10 초 간 삽입하여 청력검사의 보정을 실시할 수 있도록 하였으며, 각 단음절어 간의 간격은 평균 2.5초였다.

4. 연구절차

1,000 Hz의 보정음을 사용하여 청력검사를 보정한 후 다양한 COF에서 LPF 및 HPF로 여과하여 SNR을 조절한 단음절어를 노트북과 연결한 후 청력검사를 통하여 제시하였다. 신호음의 강도는 광대역 주파수에서 45 dB HL로 SNR 및 COF에 따라 무작위로 제시하였다. 신호를 제시하는 귀는 청력이 다를 경우는 좋은 쪽, 청력이 같을 경우는 주로 전화를 사용하는 쪽이었다. 신호음의 제시는 대상자의 피로도, 학습효과 등을 감안하여 SNR을 -10, -6, -2, +2, +6 그리고 -8, -4, 0, +4, +8 dB의 두 개 그룹의 SNR로 구분한 후 피검자 당 1개 단음절어 목록을 한 개 그룹의 SNR에 대해서 받아 쓰게한 후 단어인지를 구하였다.

5. 상대어음명료지수의 산출

FIF를 구하기 위하여 우선 10개의 SNR에서 COF에 따

른 단어인지도의 그래프를 부드럽게(smoothing) 표현한 다음 +8 dB SNR 곡선의 누적분포 개념을 이용하여 R-SII를 구하였으며, 다음 단계로 R-SII를 구할 때 사용한 각 SNR에서의 주파수를 이용하여 R-SII에 대한 단어인지도의 누적분포 곡선을 그린 다음 회귀식을 이용하여 1/3 그리고 1 옥타브밴드 주파수 별로 FIF를 구하였다. 그리고 교차주파수(Crossover Frequency, CF)는 891-2,231 Hz의 COF에서 LPF와 HPF의 단어인지도를 선으로 연결한 다음 선형회귀식을 이용하여 구하였으며, 절차는 다음과 같다.

1) Smoothing data

10개의 각 SNR에서 COF에 따른 단어인지도를 그래프로 나타낸 다음 French & Steinberg(1947), Studebaker et al.(1993)의 연구에서 사용한 방법으로 선을 부드럽게 만들었다. 선을 부드럽게 하는 방법을 요약하면 첫째, 서로 다른 SNR일 경우 LPF와 HPF의 단어인지도 곡선이 다른 SNR과 서로 만나지 않게 하였으며, 둘째, 각각의 SNR에서 LPF와 HPF의 낮은 단어인지도 곡선은 같은 점에서 끝나도록 하며, 셋째, SNR이 증가하면 단어인지도 또한 증가하도록 하였으며, 넷째, 모든 SNR에서 LPF와 HPF의 COF에 따른 단어인지도 곡선은 한 개의 교차주파수를 갖게 하였다.

2) 교차주파수의 산출

각 SNR에서 COF에 따른 LPF와 HPF의 단어인지도 변화에 의한 CF는 891-2,239 Hz 사이의 LPF와 HPF 각각의 단어인지도 변화를 선형 회귀식으로 구한 뒤 이원일차연립방정식을 이용하여 구하였다.

3) 상대어음명료지수의 산출

각 SNR에서 COF에 따른 단어인지도 곡선을 부드럽게 만든 후 R-SII를 구하였으며 구체적인 방법은 첫째, Fig. 1의 +8 dB SNR에서 가장 높은 단어인지도를 최대 R-SII인 '1'로 정한다. 둘째, LPF 및 HPF의 선이 만나는 교차점을 0.5 R-SII로 정하고, 0.5 R-SII의 단어인지도에서 출발하는 선이 만나는 교차점을 0.5 R-SII의 절반인 0.25 R-SII로 정한다. 셋째, 0.25 R-SII의 교차점을 기준으로 수평선을 그렸을 때 가장 좋은 SNR인 +8 dB에서 LPF와 HPF의 선이 만나는 점에서 각각 수직선을 위로 향하게 하였을 때 만나는 점을 0.75 R-SII로 정하며, 이때 LPF와 HPF의 단어인지도가 다를 경우는 양쪽의 점수의 평균을 사용하였다. 위와 같은 방법을 반복하여 10개의 SNR과 LPF와 HPF의 13개 COF에서 13개의 R-SII를 구했다. 산출한 점수는 통계프로그램에서 회귀분석의 곡선추정을 통하여

R-SII에 따른 단어인지도, 즉 R-SII의 회귀식을 구하였다.

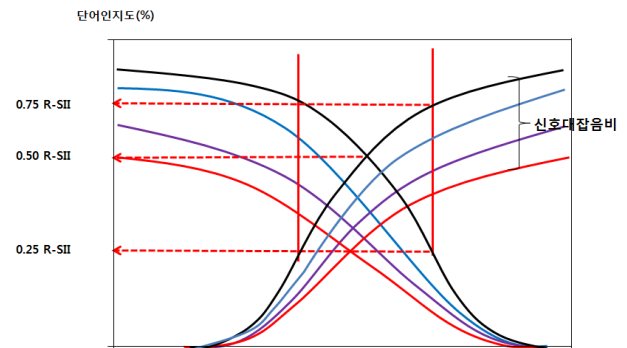


Figure 1. 상대어음명료지수(R-SII)를 구하는 방법의 예

6. 주파수중요기능의 산출

+ 8 dB SNR에서 R-SII를 구할 때 사용한 높은 쪽과 낮은 쪽 2개의 주파수에 대한 단어인지도를 회귀식으로 나타낸 다음 해당 R-SII에 대한 단어인지도 값을 회귀식에 대입하여 주파수를 구하였다. 같은 방법으로 13개 R-SII에 대하여 주파수에 따른 단어인지도를 누적분포 그래프로 나타낸 다음 각 주파수 간의 회귀식을 구하고 이를 통하여 1/3 그리고 1 옥타브 주파수대역에 해당하는 주파수 별 FIF의 가중치를 백분율로 구하였다.

7. 통계분석

R-SII는 회귀분석의 곡선추정, 누적분포 및 CF는 선형 회귀분석을 이용하여 구하였으며, 사용한 통계프로그램은 윈도우즈용 SPSS version 17.0이었다.

RESULTS

1. COF와 SNR에 따른 단어인지도

광대역 주파수에 의한 단어인지도의 변화는 +8 dB SNR에서 89.0%로 가장 높게 나타났으며, SNR이 감소할수록 단어인지도가 감소하여 -10 dB의 SNR에서 20.3%로 가장 낮은 단어인지도를 나타냈다. 그리고 다양한 SNR에서 COF에 따른 단어인지도의 변화에서는 LPF의 경우 224 Hz의 COF에서 모든 단어인지도가 0%, HPF의 경우 5,623 Hz의 COF에서 0-2.2%로 가장 낮은 단어인지도를 나타냈다. 본 연구에서 COF와 SNR에 따른 단어인지도는 전체적으로 같은 COF에서는 SNR이 낮을수록 그리고 같은 SNR에서는 COF에 따른 통과 주파수대역이 좁을수록 단어인지도가 감소하는 형태를 나타냈다.

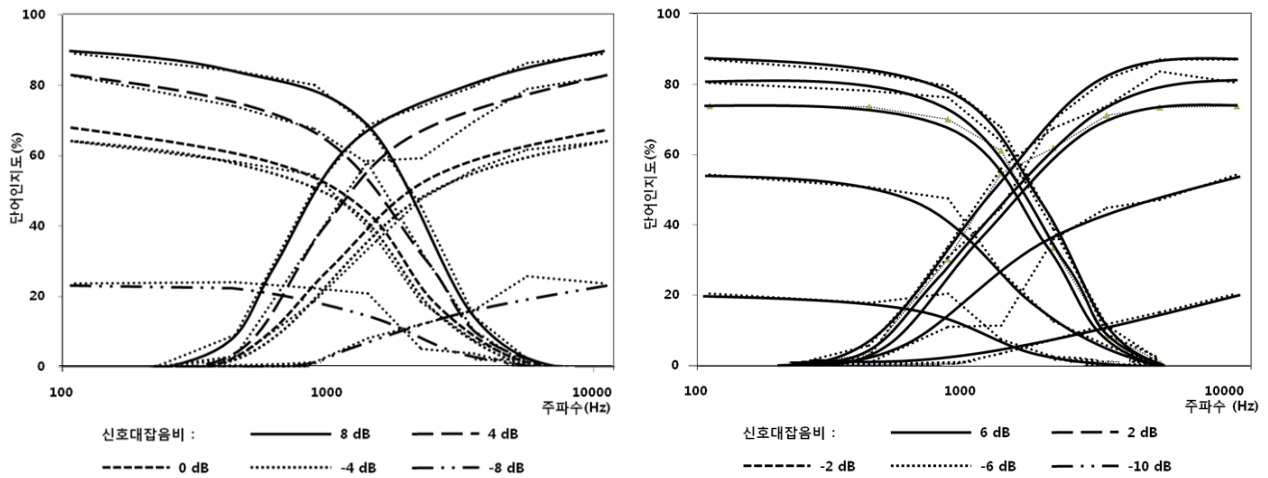


Figure 2. 각각의 신호대잡음비(SNR)에서 절단주파수(COF)에 따른 단어인지도의 smoothing data

2. Smoothing data

다양한 SNR에서 LPF와 HPF의 COF에 따른 단어인지를 부드럽게 표현한 데이터는 +8, +4, 0, -4, -8 dB 그리고 +6, +2, -2, -6, -10 dB의 SNR로 분리하여 Fig. 2에 나타내었다.

3. 교차주파수

Fig. 2에서 SNR에 따른 교차주파수는 -8 dB SNR에서 1,941 Hz로 가장 높았으며, SNR이 가장 좋은 +8 dB SNR에서 1,518 Hz로 가장 낮게 나타났다. 전체적으로 SNR이 감소할수록 CF는 증가하는 형태를 나타냈다.

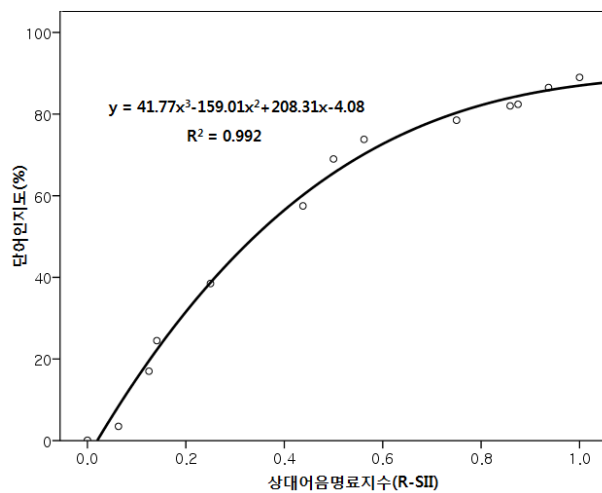


Figure 3. 한국 단음절어(KS-MWL-A)의 상대어음명료지수(R-SII)

4. 상대어음명료지수

R-SII는 분석방법에서 설명한대로 각 SNR에서 LPF와

HPF의 COF에 따른 단어인지를 이용하여 R-SII를 산출하였다. R-SII에 따른 단어인지도는 Fig. 3과 같으며, 최대 점수는 1.0 R-SII에서 89%, 최소 점수는 0.0 R-SII에서 0%, 그리고 0.5 R-SII는 69.0%로 나타났다. R-SII의 형태를 살펴보면 0.6 R-SII까지는 단어인지도가 급격하게 증가하다가 그 이후는 완만하게 증가하였다. 이때 대한 회귀식에 대한 R^2 값은 0.992 ($p < .000$)로 높은 편이었다.

5. 누적분포곡선

각 주파수 별 가중치는 10개 SNR과 LPF와 HPF의 COF에 따른 단어인지도 곡선에서 R-SII를 구할 때 사용한 주파수에 따른 단어인지를 이용하여 구하였다. Fig. 4는 각 주파수 별 누적분포곡선을 표현한 것으로 단어인지도는 630 Hz까지는 완만하게 상승하다가 1,600 Hz까지는 급격하게 상승한 후 그 이후에는 다시 완만하게 상승하는 형태를 나타냈다. 누적분포곡선의 기울기는 800 Hz 내외에서 가장 가파르게 나타났다.

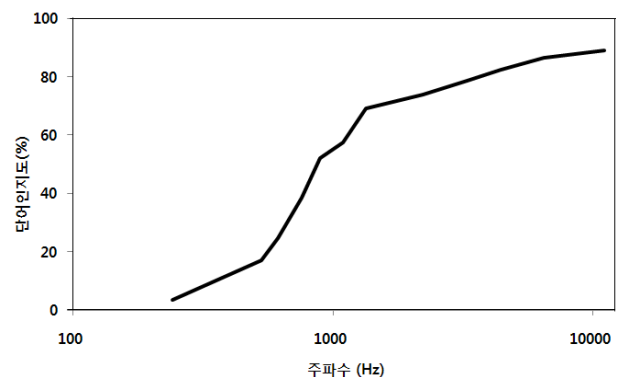


Figure 4. 주파수에 따른 단어인지도의 누적분포

6. 주파수중요기능

Fig. 2를 이용하여 구한 Fig. 4의 누적분포곡선을 이용하여 1/3 그리고 1 옥타브 주파수대역 별 가중치를 '0'에서 '1' 사이의 지수로 구하였다. 1/3 그리고 1 옥타브 주파수대역 별 가중치, 즉 한국 단음절어의 FIF는 각각 Table 1와 Table 2에 나타내었다. 한국 단음절어의 1/3 옥타브 주파수대역 별 FIF는 800 Hz에서 0.2190로 가장 높게 나타났으며, 그 다음은 1,000 Hz와 1,250 Hz에서 각각 0.1419와 0.1115이었다. FIF의 전체적인 형태는 112 Hz에서 630 Hz까지는 완만하게 상승하다가 630 Hz와 800 Hz 사이에서 급격히 상승하여 800 Hz에서 최대 FIF를 보인 뒤 1,600 Hz까지 급격하게 하강하였다. 그리고 2,000 Hz 이상의 주파수에서는 점수가 거의 변화하지 않는 형태를 나타냈다.

Table 1. 한국 단음절어(KS-MML-A)의 1/3 옥타브 주파수대역 별 주파수중요기능(FIF)의 수치

Frequency (Hz)	FIF	Frequency (Hz)	FIF
160	0.0147	1250	0.1116
200	0.0123	1600	0.0639
250	0.0173	2000	0.0251
315	0.0345	2600	0.0332
400	0.0451	3150	0.0282
500	0.0531	4000	0.0355
630	0.0896	5000	0.0279
800	0.2190	6300	0.0296
1000	0.1420	8000	0.0173

Table 2. 한국 단음절어(KS-MML-A)의 1 옥타브 주파수대역 별 주파수중요기능(FIF)의 수치

Frequency (Hz)	FIF	Frequency (Hz)	FIF
250	0.0443	2000	0.2005
500	0.1328	4000	0.0969
1000	0.4507	8000	0.0748

그리고 1 옥타브 주파수대역 별 FIF는 1,000 Hz에서 0.4507로 가장 높게 나타났으며, 그 다음은 2,000 Hz와 500 Hz에서 각각 0.2005와 0.1327이었다. 1 옥타브 주파수대역 별 FIF의 전체적인 형태는 112 Hz에서 1,000 Hz 급격하게 증가하여 1,000 Hz에서 최대 FIF를 나타낸 뒤 8,000 Hz까지 급격하게 하강하였다.

DISCUSSIONS

본 연구에서는 -10 dB에서 +8 dB 까지 10개의 SNR에서 LPF의 COF인 224, 447, 1,413, 2,239, 3,548,

5,623 Hz, HPF의 COF인 447, 1,413, 2,239, 3,548, 5,623 Hz에 따른 한국 단음절어의 단어인지도를 건청인을 통하여 구한 후 주파수대역 별 FIF를 구하고자 하였다. 어음신호의 여과 시 광대역 주파수는 112-11,000 Hz이었으며, SNR의 조절 시 차폐잡음은 한국어의 장기평균어음스펙트럼과 비슷한 SN를 사용하였다.

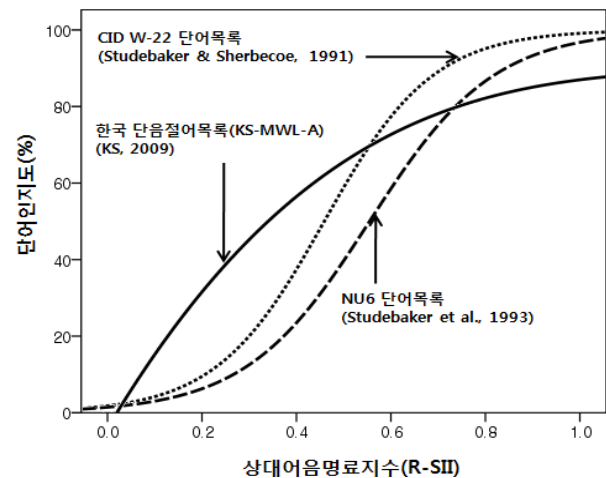


Figure 5. 한국 단음절어(KS-MML-A)와 CID W-22 및 NU6 단어 목록의 상대어음명료지수(R-SII)의 비교

R-SII를 구할 때 각 SNR에서 COF에 따른 단어인지도를 그대로 이용하기 보다는 COF에 따른 점수를 부드럽게 만들어서 사용하는데 Studebaker (1985), Studebaker et al. (1993) 등의 연구에서는 상기의 방법이 R-SII의 산출에 효과적임을 증명하였으며, 본 연구에서도 같은 방법을 사용하였다. R-SII는 한국 단음절어의 경우 3차함수($R^2 = 0.992$, $p < .000$)의 형태로 나타나서 CID W-22 및 NU6 단음절어 목록과 차이를 나타냈는데, Fig. 5에서 R-SII가 0.5 이하에서는 한국어, 그 이상에서는 영어의 단어인지도가 더 높게 나타났다.

또한 한국 단음절어의 FIF는 1/3 그리고 1 옥타브 주파수대역으로 나타냈을 때 CID W-22 및 NU6 단음절어 목록과 비교했을 때 차이가 있었다. Fig. 6의 (A)에서 한국 단음절어의 FIF를 1/3 옥타브 주파수대역을 기준으로 영어의 CID W-22와 NU6 목록과 비교했을 때, 630 Hz까지는 비슷하게 상승했으나 800-1,250 Hz의 범위에서는 한국어가 더 높게 나타났다. 그리고 1,600 Hz 이상에서는 한국어의 FIF가 CID W-22와 NU6 단어목록과 비교했을 때 더 낮게 나타나 차이를 보였으며, 영어의 경우 최대 FIF를 나타낸 주파수는 CID W-22와 NU6 단어목록 모두 2,000 Hz 부근이었다. 그리고 Fig. 6의 (B)에서 한국 단음절어의 FIF를 1 옥타브 주파수대역을 기준으로 영어

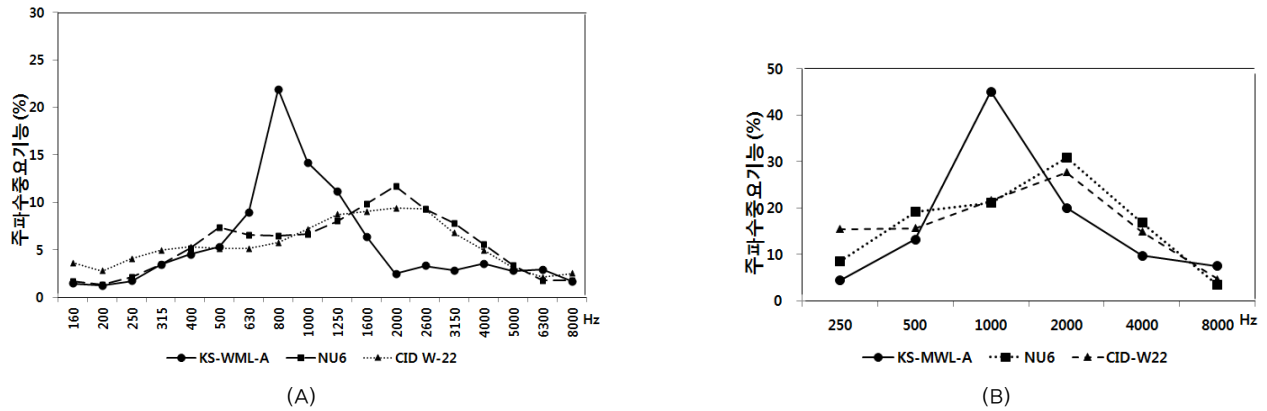


Figure 6. 한국 단음절어(KS-MWL-A)와 영어의 CID W-22 및 NU6 단어목록의 1/3 옥타브 주파수대역 별 주파수중요기능(FIF) 비교. (A) : 1/3 옥타브밴드, (B) : 1/2 옥타브밴드

와 비교했을 때, 최대의 FIF는 한국 단음절어가 1,000 Hz, CID W-22와 NU6 단어목록은 모두 2,000 Hz 부근으로 차이를 나타냈다.

한국 단음절어의 FIF가 영어에 비해서 낮게 나타난 이유를 살펴보면 영어의 경우 NU6 목록에서의 단음절은 ‘crash’, ‘smoke’, ‘juice’ 등과 같이 ‘자음-모음-자음’의 일정한 형태로 나타난다. 그리고 초성에서 주로 고주파수 성분의 자음이 나타나거나 자음이 겹치는 경우가 많고, 모음은 이중모음으로 나타나는 경우가 있으며, 종성의 경우는 한국어에 비해서 훨씬 다양한 형태로 나타난다. 그러나 한국 단음절어의 경우 음절의 구성이 ‘점’, ‘소’, ‘연’, ‘오’ 등과 같이 ‘자음+모음+자음’, ‘자음+모음’, ‘모음+자음’, ‘모음’ 등과 같이 음절의 구성이 다양하다. 그리고 초성에 자음이 없는 경우도 있으며, 종성의 경우는 철종성 법칙에 의해서 발음하는 자음의 종류가 7개로 제한이 되어있다. 김진숙 외(2008)의 보고에 의하면 KS-MWL-A에서 나타나는 목표빈도수는 초성이 모음으로 시작하는 경우가 16%, 종성이 없는 경우가 40%라고 보고하였다. 이를 종합해 보면 한국 단음절어표의 자음은 영어의 CID W-22와 NU6 목록에 비해서 적게 나타나며, 이로 인해 한국 단음절어의 최대 FIF를 나타내는 주파수가 영어에 비해서 낮은 것으로 생각한다.

Wong et al.(2007)의 연구에서는 광동어 중에서 대화체 문장의 FIF를 연구하였는데 1/3 옥타브 주파수대역 별 공헌도가 영어의 이야기체 문장과 비교했을 때 최대 FIF에서 차이가 있음을 보고하였다. 특히 315-630 Hz 범위에서는 영어가, 800-2,000 Hz에서는 광동어의 FIF가 더 높으며, 2,600 Hz 이상에서는 양국의 언어가 비슷한 FIF를 가지고 있어서 광동어 문장의 FIF는 오히려 영어의 문장 보다는 단음절어와 비슷하게 나타났다고 보고하였다.

von Hapsburg & Bahng(2006), 이경원 외(2008), 이경원 외(2010) 등의 연구에서는 한국어, 영어 및 중국어의 장기평균어음스펙트럼에는 큰 차이가 없다고 보고하였다. 그러나 이들의 연구에서는 저주파수와 고주파수의 진폭의 차이, 즉 어음역동범위가 아닌 각 주파수에서 분포하는 어음의 상대적인 음압을 비교하였으며, 이로 인해 표준편차가 큰 어음의 분포 때문에 통계적인 차이가 발생하지 않았던 것으로 생각한다.

CF는 Table 3과 같이 CID W-22 단어목록의 경우는 -10 dB에서 +8 dB SNR 범위에서 1,211-1,407 Hz, NU6 단어목록의 경우는 -8 dB에서 +6 dB SNR 범위에서 1,387-1,579 Hz로 나타났으나 SNR에 따른 CF의 연관성은 나타나지 않았다. 그러나 한국어 단음절어의 경우는 -10 dB에서 +8 dB SNR에서의 CF가 1518-1941 Hz로 나타났으며, 대체적으로 SNR이 나빠질수록 CF가 증가하는 특성을 나타냈다. 이는 차폐잡음을 사용하지 않고 COF에 따른 단어인지도를 연구한 황성은 외(2011)의 보고와 일치성을 나타냈다. 한국 단음절어의 CF가 영어와 차이를 보인 것은 한국 단음절어표의 특징을 보고한 김진숙 외(2008) 그리고 장기평균어음스펙트럼의 특성을 보고한 von Hapsburg & Bahng(2006), 이경원 외(2008)의 연구에서 지적하였듯이 잡음과 비슷한 스펙트럼을 가지고 있는 자음의 분포 및 에너지가 영어에 비해서 적은 것이 주요 원인으로 생각한다. 그리고 이러한 한국어의 특성은 FIF의 값이 저주파수에서 높게 나타나는 원인이 될 수 있다는 것을 간접적으로 시사하는 것으로 생각할 수 있다.

Table 3. 한국 단음절어(KS-MML-A)와 CID W-22, NU6 단어목록의 신호대잡음비(SNR)에 따른 교차주파수(CF)의 비교

	신호대잡음비 (dB)									
	+8	+6	+4	+2	0	-2	-4	-6	-8	-10
본 연구	1518	1750	1547	1650	1604	1634	1602	1726	1941	1869
CID W-22	1306	1251	1226	1309	1275	1351	1211	1407	1353	1259
NU6	-	1461	1418	1387	1425	1402	1446	1481	1579	-

교차주파수(CF) : Hz

SII를 계산하기 위해서는 FIF 외에도 청력적인 요소인 BAF가 필요하다. BAF는 장기평균어음스펙트럼에 근거한 어음역동범위를 기준으로 하는데 일반적으로 영어에서는 30 dB를 사용하였다(Dunn & White, 1940; Byrne et al., 1994). 또한 중국어 문장의 SII 연구에서도 어음역동범위를 30 dB로 가정하고 계산하였지만 실제로 Wong et al.(2007)의 연구에서는 광동어의 어음역동범위를 40-45 dB가 될 것으로 예상하였다. 따라서 SII를 임상적으로 적용하기 위해서는 어음역동범위 또한 연구가 되어야 할 것으로 생각한다.

최근의 경우 청력에 따른 단어인지도의 예측, 보청기의 적합, 청능재활 등에 있어서 SII의 활용은 활발하지 않은 편이다. 그 이유는 청력역치에 따라 추측한 SII의 값이 감각신경성 난청인의 역동범위(dynaminc range), 청력손실의 형태 등과의 차이로 인해서 실제 난청인의 단어인지도와 차이가 있기 때문으로 풀이할 수 있다. 그렇다 하더라도 한 국가의 언어에 대한 FIF의 연구는 서로 다른 언어의 특성을 밝히거나 보청기의 적합에 있어서 특정 주파수 대역의 이득을 결정하는데 있어서 중요한 요인이 될 수 있어 FIF의 연구는 의의가 있다.

본 연구에서는 애초에 한국 단음절어와 문장의 FIF를 동시에 구하고자 하였다. 그러나 문장의 경우 0점에 가까운 낮은 단어인지도를 구하기 위한 적절한 SNR 및 COF를 설정하기가 매우 어려워 본 연구에서는 문장에 대한 FIF를 구하지 않았다. 따라서 향후 문장 등에 대한 FIF의 산출 시 본 연구에서 사용한 COF 및 SNR이 참고가 될 수 있을 것이다. 또한 본 연구에서는 한국어의 장기평균어음스펙트럼과 비슷하게 SN을 제작하여 사용하였으나, 향후 다화자잡음(multi-talker babble noise) 등을 이용한 FIF의 연구도 고려할 수 있다.

CONCLUSIONS

본 연구에서는 한국어의 장기평균어음스펙트럼과 비슷한 SN을 이용하여 -10 dB에서 +8 dB까지 2-dB 간격

의 10개 SNR에서 LPF와 HPF의 COF에 따른 단어인지도를 건청인을 대상으로 구한 뒤, 이를 통하여 R-SII 및 한국 단음절어(KS-MWL-A)의 FIF를 구하고자 하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. CF는 +8 dB SNR의 1,517 Hz로 가장 낮았고, -8 dB SNR에서 1,941 Hz로 가장 높았으며, 대체적으로 SNR이 낮아질수록 CF는 상승하는 추세를 나타냈다. 그리고 한국 단음절어의 CF는 CID W-22, NU6 등 영어 단음절어의 CF인 1,200-1,500 Hz에 비해서 높게 나타났다.
2. 한국 단음절어 R-SII 곡선추정의 형태는 3차함수로 나타나 CID W-22, NU6 등 영어 단음절어 목록과 차이가 있었다. 그리고 R-SII는 0.5 이하에서는 한국어, 그 이상에서는 영어의 단어인지도가 더 높게 나타났으며, R-SII의 3차함수 식은 아래와 같다.

$$y = 41.77x^3 - 159.01x^2 + 208.31x - 4.08 \quad (R^2 = .992, p < .000)$$

3. 한국 단음절어의 FIF는 1/3 옥타브밴드 주파수에서는 800 Hz에서 0.2190, 1 옥타브밴드 주파수에서는 1,000 Hz에서 0.4506로 최대치를 나타냈다. 그리고 한국 단음절어의 FIF는 2,000 Hz에서 최대치를 나타낸 CID W-22 및 NU6 등 영어의 단어목록과 차이가 있었다.

본 연구에서는 한국 단음절어의 R-SII 및 FIF에 대해서 알아보았다. 그러나 FIF를 청력손실에 따른 단어인지도의 예측, 보청기의 적합 등에 효과적으로 활용하기 위해서는 단음절어뿐만 아니라 실생활에서 사용하는 문장 또는 짧은 이야기체를 이용한 FIF의 산출 또한 필요하다. 또한 한국어의 SII를 효과적으로 활용하기 위해서는 한국어의 어음역동범위에 대한 연구가 추가적으로 이루어져야 하며, 나아가 SII와 청력에 따른 단어인지도와의 관계를 임상적으로 충분히 검증해야 할 것이다.

중심단어 : 단음절어, 어음명료지수, 조음지수, 절단주파수, 주파수중요기능.

REFERENCES

- 김수진 (2001). 인공와우의 효과를 평가하기 위한 조음지수의 사용 : 아동. *언어치료연구*, 10(1), 119-135.
- 김유경, 박희정, 이영숙, & 석동일 (2002). 청각장애 아동의 어음 인식 예측을 위한 조음지수 적용에 관한 연구. *언어치료연구*

11(2), 219-233.

김진숙, 임덕환, 홍하나, 신현옥, 이기도, 홍빛나 외 (2008). 한국표준 일반용 단음절어표 개발. *청능재활*, 4(2), 126-140.

박진희 (2000). 고주파수 청력손실이 어음이해에 미치는 영향. 한림대학교 사회복지대학원 재활학과 석사학위 논문. 서울.

신현옥 & 김진숙 (2009). 한국표준 학령전기용 단음절어표(Korean Standard Monosyllabic Word Lists for Preschoolers, KS-MWL-P)의 심리음향기능곡선 연구. *한국음향학회지*, 28(6), 534-541.

이경원, 김민정, 박정혜, 정해준, 천성미, 이수향 외 (2010). 한국어와 중국어의 장기평균어음스펙트럼 비교. 광주: 제 13차 한국청언어재활학회 학술대회.

이경원 & 김진숙 (2009). 보청기적합공식과 한국의 연구 고찰. *청능재활*, 5(1), 6-12.

이경원, 이재희, & 이정학 (2008). 한국어음을 이용한 다화자잡음의 개발 시간. *청능재활*, 4(1), 24-27.

한국산업규격(KS I ISO 8253-3)(2009). 어음청각검음향학-청력검사 방법- 제 3부. 서울: 어음청각검사.

황성은, 장현숙, 이지연, & 김유경 (2011). 주파수 여파에 따른 단어 및 문장인지도. *청능재활*, 7(1), 74-83.

ANSI. (1969). Methods for calculation of the Articulation Index (ANSI 3.5-1969). New York.

ANSI. (1997). Methods for calculation of the speech intelligibility index (ANSI 3.5-1997). New York.

ANSI. (2007). Methods for calculation of the speech intelligibility index (ANSI 3.5-2007). New York.

Amlani, A. M., Punch, J. L., & Ching, T. Y. C. (2002). Methods and application of the articulation index in hearing aid selection and fitting. *Trends in Amplification*, 6(3), 81-128.

Byrne, D. & Dillon, H. (1986). The national acoustic laboratories' (NAL) new procedure for selecting the gain and frequency response of a hearing aid. *Ear and Hearing*, 7(4), 257-265.

Byrne, D., Dillon, H., Tran, K., Arlinger, S., Wilbraham, K., Cox, R. et al. (1994). An international comparison of long-term average speech spectra. *Journal of the Acoustical Society of America*, 96(4), 2108-2120.

Byrne, D., Dillon, H., Ching, T., Katsch, R., & Keidser, G. (2001). NAL-NL1 procedure for fitting non-linear hearing aids: Characteristic and comparisons with other procedures. *Journal of the Acoustical Society of America*, 12, 37-51.

Dunn, H. K. & White, S. D. (1940). Statistical measurement on conversational speech. *Journal of the Acoustical Society of America*, 11, 278-288.

Eisenberg, L. S., Dirks, D. D., Takayanagi, S., & Martinez, A. S. (1998). Subjective judgement of clarity and intelligibility for filtered stimuli with equivalent speech intelligibility index predictions. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 41(2), 327-339.

Fletcher, H. & Galt, R. H. (1950). The perception of speech and its

relation to telephony. *Journal of the Acoustical Society of America*, 22(2), 89-151.

French, N. R. & Steinberg, J. C. (1947). Factors governing the intelligibility of speech sounds. *Journal of the Acoustical Society of America*, 19(1), 90-119.

Hou, Z. & Thornton, A. R. (1994). A model to evaluate and maximize hearing aid performance by integrating the articulation index across listening conditions. *Ear and Hearing*, 15(1), 105-112.

Keidser, G. (1994). Articulation index transfer functions for 'Dantale' (200 monosyllabic words), *Scandinavian Audiology*, 23(1), 75-77.

Magnusson, L. (1996). Speech intelligibility index transfer functions and speech spectra for two Swedish speech recognition test, *Scandinavian Audiology*, 25(1), 59-67.

Pavlovic, C. V. (1994). Band importance functions for audiological applications. *Ear and Hearing*, 15, 100-104.

Pavlovic, C. V. & Studebaker, G. A. (1984). An evaluation of some assumption underlying the articulation index. *Journal of the Acoustical Society of America*, 75(5), 1606-1612.

Pavlovic, C. V., Studebaker, G. A., & Sherbecoe, R. L. (1986). An articulation index based procedure for predicting the speech recognition performance of hearing-impaired individuals. *Journal of the Acoustical Society of America*, 80(1), 50-57.

Souza, P. E., Yueh, B., Sarubbi, M., & Loovis, C. F. (2000). Fitting hearing aids with the articulation index: impact on hearing aid effectiveness. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 37(4), 473-481.

Studebaker, G. A. (1985). A "rationalized" arcsine transform. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 28, 455-462.

Studebaker, G. A., Pavlovic, C. V., & Sherbecoe, R. L. (1987). A frequency importance function for continuous discourse. *Journal of the Acoustical Society of America*, 81(4), 1130-1138.

Studebaker, G. A. & Sherbecoe, R. L. (1991). Frequency-importance functions for recoded CID W-22 word lists. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 34, 427-438.

Studebaker, G. A., Sherbecoe, R. L., & Gilmore, C. (1993). Frequency-importance and transfer functions for the Auditec of St. Louis recordings of the NU-6 word test. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 36, 799-807.

von Hapsburg, D. & Bahng, J. (2006). Acceptance of background noise levels in bilingual (Korean-English) listeners. *Journal of the American Academy of Audiology*, 17, 649-658.

Wong, L. L. N., Ho, A. H. S., Chua, E. W. W., & Soli, S. D. (2007). Development of the Cantonese speech intelligibility index. *Journal of the Acoustical Society of America*, 121(4), 1130-1138.