

# 저주파수 순음에 대한 within- 및 cross-channel gap detectin thresholds를 이용한 auditory temporal processing 특성 연구

## Analysis of auditory temporal processing in within- and cross-channel gap detection thresholds for low-frequency pure tones

구성민,<sup>1†</sup> 임덕환<sup>2</sup>

(Sungmin Koo<sup>1†</sup> and Dukhwan Lim<sup>2</sup>)

<sup>1</sup>나우히어링 청각언어센터, <sup>2</sup>한림대학교 언어청각학부, 청각언어연구소

(Received November 15, 2021; accepted December 28, 2021)

**초 록:** 본 연구는 저주파수 순음(264 Hz, 373 Hz, 528 Hz)을 이용하여 Within-/Cross-Channel Gap Detection Thresholds(WC/CC GDTs)를 통해서 피치인식 및 시간적 청각정보처리능력 특성을 알아보기 위해 실험연구를 실시하였다. 정상청력을 갖는 청년층 40명과 장년층 20명을 대상으로 WC/CC GDTs를 측정·비교분석하였다. WC GDTs 결과는 두 그룹 모두 평균적으로 2 ms ~ 4 ms를 갖으며, 통계적으로 유의미한 차이를 보이지 않았다. CC GDTs는 WC GDTs에 비해 두 그룹 모두 크게 증가하였으며, 특히 장년층의 결과가 청년층 결과에 비해 모두 8배 ~ 10배 증가하여 통계적으로 유의미한 차이를 보였다. CC GDTs는 선/후행음의 주파수의 차이가 커질수록 모두 증가하는 경향이 나타났으며, 청년층은 증가폭이 일정한 반면 장년층은 증가폭이 둔화되는 경향을 보였다. 또한, 이러한 자료는 기존 음악적 자극에 대한 GDT와는 다른 경향을 나타내었다. 연구 결과는 GDT가 피치인식 메커니즘에 영향을 미칠 수 있으며 청각 신경계의 비선형 반응에 대한 심리음향적 근거자료로 활용될 수 있을 것이다.

**핵심용어:** 피치인식, 시간적 청각정보처리, within-channel Gap Detection Threshold (GDT), Cross-channel GDT

**ABSTRACT:** This study was conducted to examine the characteristics of pitch perception and temporal resolution through Within-/Cross-Channel Gap Detection Thresholds (WC/CC GDTs) using low-frequency pure tones (such as 264 Hz, 373 Hz and 528 Hz related to C4, C4#, and C5 musical tones). 40 young people and 20 elderly people with normal hearing participated in this study. The results of WC GDTs were approximately 2 ms ~ 4 ms threshold values regardless of frequencies in two groups. There was no statistically significant difference in WC GDTs between groups. In both groups, CC GDTs were larger than WC GDTs, and as the frequency difference increased, the CC GDTs also increased. In particular, in the comparison between groups of CC GDTs, the results of the elderly group were 8 times ~ 10 times larger than that of the young group, and there was a statistically significant difference between the groups. These data also showed a different trend of GDTs in comparison with the previous data obtained from musical stimuli. This study suggests that GDTs may influence pitch perception mechanisms and can be used as psychoacoustic evidence for nonlinear responses of auditory nervous system.

**Keywords:** Pitch perception, Auditory temporal processing, Within-channel Gap Detection Threshold (GDT), Cross-channel GDT

**PACS numbers:** 43.66.Hg, 43.66.Mk, 43.66.Sr, 43.66.Lj

†Corresponding author: Sungmin Koo (koo0614@naver.com)

Nawoohearing hearing-speech center & MD plaza building 406, Dolma-ro 52, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do 13630, Republic of Korea

(Tel: 82-31-716-9991, Fax: 82-303-3446-9991)



Copyright©2022 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## I. 서 론

청신경 신호처리 분석 수준의 발달은 청각기관의 비선형적 반응을 심리음향학적으로 살펴볼 수 있도록 여러 발전에 기여해 왔다. 이러한 흐름 속에 청각기관의 시간적 정보처리에 대한 청각학적 연구의 중요성이 강조되고 있다.

시간적 청각정보처리에는 청각기관이 소리의 시간적 특성을 인지할 수 있도록 처리하는 청각적 능력 중의 하나이다. 이러한 능력을 측정할 수 있는 방법으로 temporal -masking, -ordering, -sequencing, -integration, -summation, -resolution 또는 -discrimination 등 그 종류가 다양하다. 이 중에서 시간적 해상도는 정해진 시간 내에서 시간축상구조의 변화를 탐지하는 능력을 의미하며, 이를 측정할 수 있는 방법으로 modulation detection gap, gap discrimination, Gap Detection Threshold (GDT) 등이 대표적이다.<sup>[1]</sup>

GDT란 두 개의 연속된 자극음 사이에 연결되지 않은 시간적 간극(temporal gap)을 탐지하는 역치를 뜻한다. 심리음향적 측정방법으로 자극음 제시 조건에 따라 두 가지 방식으로 나눌 수 있는데, 선행음과 후행음이 동일한 주파수의 배열로 측정하는 방식인 within-channel(WC) GDT 방법과 서로 다른 주파수 배열로 측정하는 cross-channel(CC) GDT 방법이다. 이 두 가지 GDT 측정 방식은 말초에서 중추 청각기관까지 신경과학적 처리영역이 다르다고 알려져 있고, 이러한 이유에서 중추청각처리장애를 선별하고 진단하는 효율적인 평가도구로 추천되고 있다.<sup>[2,3]</sup>

시간적 청각정보처리능력을 측정하는 GDT 연구는 노화와 청각기관의 손상과의 관계, 말소리 인식, 언어발달, 읽기능력, 범주적 인지 등과의 연관성에 대해서 꾸준히 진행되어 왔다.<sup>[4-8]</sup> 말소리를 청지각적으로 판단하는 데 있어 여러 매개변수들에 따라 달리 지각하게 되지만, 특히 성대의 기본주파수는 청자가 화자의 목소리 피치를 인식하는데 중요한 요소로 작용한다.<sup>[9]</sup> 음악도 마찬가지로 악기들의 음색은 악기의 특징적인 기본주파수와 그에 대한 배음들의 스펙트럼특성이 달라 그 고유한 특징을 갖는다. 악기 연주에서 빠른 음계의 변화 또는 피치인식에는 소리의 주기성이 관여하게 되며, 이에 상응하

는 음향적변수가 기본주파수이다.

선행 연구에서 자극음간의 물리적인 주파수 차이가 크더라도 피치클래스가 유사하면 그 영향이 GDT에 반영되어 순음과 다를 수 있고 시간적 청각정보처리에서 음악 자극을 독특하게 처리하는 청각기관의 비선형적 반응이 작용한다고 제안한 바 있다.<sup>[10]</sup> 이러한 이유에서 음악모드와 관련된 저주파수 순음에 대한 피치인식 및 시간적 해상도 특성을 살펴보고자 본 연구를 진행하였다.

따라서 본 논문은 음악의 기본음계 C4, C4#, C5의 피치를 결정짓는 기본주파수인 저주파수 순음 264 Hz, 373 Hz( $264 \times 2^{1/2}$  octave), 528 Hz( $264 \times 2^1$  octave)를 활용하여 청각적으로 정상청력을 가진 청년층과 장년층에 대한 WC GDTs와 CC GDTs 결과를 비교분석하였다.

## II. 실험 방법

실험에 사용한 저주파수 순음 264 Hz, 373 Hz, 528 Hz는 sampling rate 44.1 kHz, duration 500 ms, rise-fall time 0.5 ms로 하여 간극부분에서 위상관계를 일정하게 유지하여 전산 합성하였다.

Fig. 1과 같이 within-/cross-channel GDT 자극음을 각각 구성하고, gap duration은 0 ms ~ 20 ms사이는 2 ms, 20 ms ~ 50 ms사이는 5 ms, 50 ms ~ 100 ms는 10 ms 간격마다 자극 세트들을 CD로 제작하였다. 실험은 첫 번째 기준자극(1st marker)과 두 번째 비교자극

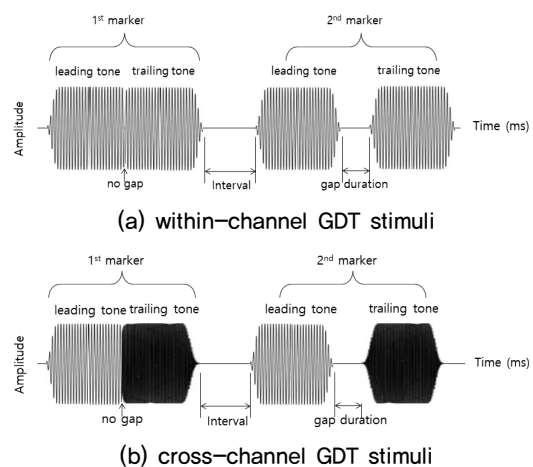


Fig. 1. Examples of GDT 2I/2AFC stimulus sound set.

(2nd marker)의 동일여부를 반응하도록 adaptive 2I/2AFC(two-interval/two-alternative forced-choice, 2-down and 1-up) 방법으로 실시하여 75% 이상 반응하는 지점을 GDT로 결정하였다. 실험은 GSI 61 청력검사기와 CD플레이어를 연결하였고, 대상자는 방음부스에서 TDH 39P-Headphone을 착용하고 60 dB HL에서 좌우측 귀 각각 실시하였다.

모든 실험 과정은 한림대학교 생명윤리위원회의 승인을 받아 진행하였다. 실험대상자는 사전에 청각학적 검사(PTA\_pure tone average = 20 dB HL이하, WRS\_word recognition score 90% 이상)를 실시 후 정상청력의 청년 40명(남20명, 여20명, 평균연령 22.8 ± 2.7세)과 기준 연령대의 표준역치 조정을 고려하여 정상청력의 장년 20명(남5명, 여15명, 평균연령 61.4 ± 2.1세)을 선별하여 실시하였다.

### III. 실험 결과

#### 3.1 청년층 결과

Fig. 2 청년층 WC GDTs 결과는 다음과 같다.

- (1) 좌/우측 귀에 대한 GDTs는 통계적으로 유의미한 차이를 보이지 않았다( $p > 0.01$ )
- (2) 주파수에 따른 GDTs는 평균 2 ms ~ 3 ms 범위에서 일정하게 나타났으며, 주파수별 GDTs는 통계적으로 유의미한 차이를 보이지 않았다( $p > 0.01$ ).

Fig. 3 청년층 CC GDTs결과는 다음과 같다.

- (1) GDTs는 선/후행 주파수가 각 1/2 octave, 1 octave 차이에 따라 증가하는 경향으로 나타났으며 (fixed-leading: 평균 2.2 ms ~ 2.3 ms, 1/2 octave: 평균 5.7 ms ~ 6.0 ms, 1 octave: 평균 7.3 ms ~ 7.8 ms), 통계적으로 유의미한 차이를 보였다(ANOVA,  $p < 0.01$ ).

#### 3.2 장년층 결과

Fig. 4 장년층 WC GDTs결과는 다음과 같다.

- (1) 장년층의 좌/우측 귀에 대한 WC/CC GDTs는 통계적으로 유의미한 차이를 보이지 않았다( $p > 0.01$ )
- (2) WC GDTs는 각 주파수별 자극 set 간 주파수가

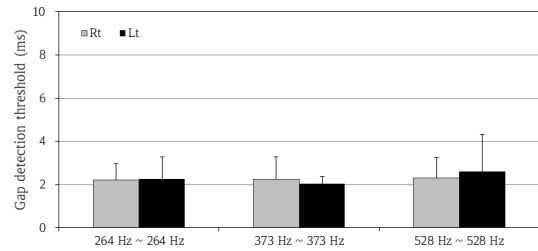


Fig. 2. Mean WC GDTs and standard deviation of both ears in the young group.

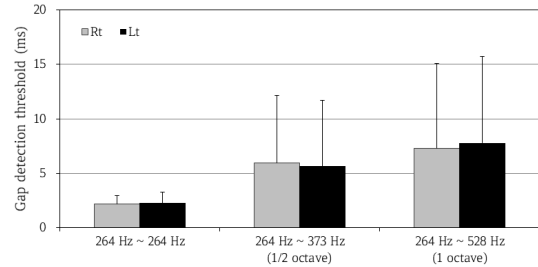


Fig. 3. Mean CC GDTs and standard deviation of both ears in the young group.

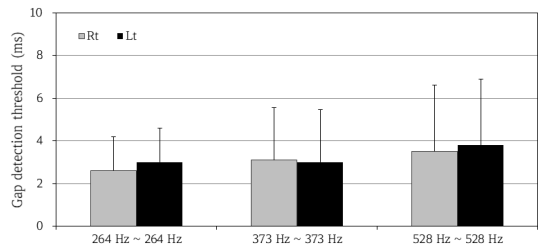


Fig. 4. Mean WC GDTs and standard deviation of both ears in the elderly group.

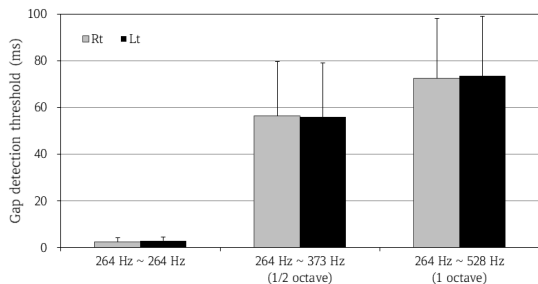


Fig. 5. Mean CC GDTs and standard deviation of both ears in the elderly group.

커질수록 GDTs도 평균 2.5 ms ~ 3.8 ms로 약간 증가하는 경향을 나타내지만, 통계적으로 유의미한 차이를 보이지 않았다( $p > 0.01$ ).

Fig. 5 장년층 CC GDTs결과는 다음과 같다.

- (1) 선/후행 주파수가 차이가 증가함에 따라 GDTs 결과값(fixed-leading: 평균 2.6 ms ~ 3.0 ms, 1/2 octave: 평균 56.0 ms ~ 56.5 ms, 1 octave: 평균 72.7 ms ~ 73.6 ms)은 급격하게 증가하는 추세를 나타냈으며, 통계적으로 유의미한 차이를 보였다(ANOVA,  $p < 0.001$ ).

### 3.3 집단 간 결과비교

- (1) 집단 간 WC GDTs는 통계적인 차이를 보이지 않으며, 평균적으로 2 ms ~ 4 ms의 안정적인 값을 나타냈다.
- (2) 두 집단 모두 WC GDTs는 주파수가 증가할수록 일정한 값을 갖는 경향을 보였다.
- (3) 두 집단 모두 CC GDTs가 WC GDTs보다 모두 크게 증가하였으며, 특히 장년층 CC GDTs는 청년층의 결과보다 약 8배 ~ 10배 증가하는 것으로 나타났다.
- (4) 선/후행 주파수 차이가 커질수록 CC GDTs는 두 집단 모두 증가하는 경향을 나타냈지만, 청년층의 경우 증가폭이 일정하게 나타난 반면, 장년층의 경우 증가폭이 둔화되는 경향을 보였다.

## IV. 고 찰

본 연구의 두 집단 모두에서 나타난 WC GDTs와 CC GDTs의 결과 차이는 청각정보처리의 첫 번째 단계에서 각각 분리된 청각필터(auditory filter)에 의해 처리된다는 것을 뒷받침하며, WC/CC GDTs가 서로 다른 처리방식으로 인식된다는 것을 뜻한다. WC GDTs는 선/후행음 상의 간극에서 발생하는 동일 청각처리경로에서의 소리크기 변화에 대한 인식 효과가 반영되기 때문에 중추청각기관의 시간적 해상도 특성만을 살펴보기에 다소 제한적이라는 의견이다. 반면 CC GDTs의 경우 두 개 또는 그 이상의 청각필터 경로의 자극-반응 사건의 통합 또는/과 비교를 통해 인식될 수 있기 때문에 중추청각기관의 관여가 되는 메커니즘이라 할 수 있다.<sup>[11,12]</sup>

두 집단의 WC GDTs 값은 평균 2 ms ~ 4 ms로 일정하고 변동 폭이 작은 값을 나타내어 기존의 여러 연

구 결과들과 동일하게 민감한 특성을 보였다. 그러나 일부 음악적 자극음이나 협대역소음을 이용한 WC GDTs 연구 결과값인 4 ms ~ 15 ms와는 큰 차이를 보였다. 특히 음악적 자극음을 이용한 Reference [10]연구에서 자극음의 피치가 증가할 수록 WC GDTs(C4 = 10 ms ~ 12 ms, C4# = 13 ms ~ 14 ms, C5 = 16 ms ~ 18 ms)가 증가하는 경향을 보인 것과는 다르다. 이는 음악적 자극음의 배음 구조에서 포함되어 있는 고주파수영역의 영향인 것으로 사료되며, 본 연구의 WC GDTs는 순음과 음악적 자극음의 시간적 청각정보처리과정을 설명함과 동시에 이러한 차이를 이해하기 위한 청각기관의 비선형성의 심리음향적 근거 자료로 활용될 수 있다는 점에서 그 의의를 얻을 수 있다.

CC GDTs에서 선/후행음 주파수 차이가 클수록 GDTs가 증가하는 경향을 보였는데 이는 음악적 자극음을 사용하지 않은 기존 연구들과 마찬가지로 유사한 특성을 보였다. 그리고 청년층과 장년층의 집단 간 평균값 차이가 8배 ~ 10배 정도로 뚜렷한데, 이는 장년층의 청력에 대한 연령보정 효과를 일부 반영한다 하더라도 두 집단 사이에는 연령(노화)이 가장 큰 요인으로 작용한 것으로 사료된다. 또한 CC GDTs 선/후행 주파수 차이가 커질수록 청년층보다 장년층의 증가폭이 크고 일정 값에 수렴하는 형태를 보이는 것은 이전 연구들에서 제기하는 CC GDTs가 WC GDTs보다 노화에 따른 청각중추영역의 시간적 청각정보처리능력을 반영한다는 것에 상응한다고 보인다.

Reference [10]의 ‘피치 클래스가 유사하면 그 영향이 GDTs에 반영되어 순음과 다를 수 있고 시간적 청각정보처리에서 음악 자극을 독특하게 처리하는 청각기관의 비선형적 반응이 작용한다’고 제안한 대로 본 연구 결과에서도 볼 수 있듯이 음악적 자극음과 다른 경향이 나타났으며, 이는 음악적 자극음과 순음의 시간적 해상도에 따른 피치기전이 다를 수 있음을 입증한다. 현재까지 음악적 자극음에 대한 장년층의 연구결과가 보고된 바는 없지만 일부 연구에서 언어음과 비언어음을 이용한 Reference [13]의 CC GDTs 결과의 경향을 비교분석해 보았을 때, 음악적 자극음에 대한 장년층의 결과도 청년층과 유사한

경향을 보일 것으로 예측된다. 이 또한 장년층에서도 음악적 자극음과 순음의 시간적 해상도에 따른 피치기전이 다를 수 있음을 시사한다. 더구나 본 연구에서 사용된 저주파수 순음은 연령대에 공통적으로 잔존될 수 있는 대역임을 감안하면 모든 연령에서 시간적 청각정보처리능력을 측정하는데 의미 있는 청각평가도구로 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 이러한 심리음향적 자료들은 소리의 피치인식 메커니즘에서 GDT의 영향이 있을 수 있으며, 이에 관한 새로운 모델을 제안하는데 필요한 정보 및 심리음향적 근거자료로서 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

## V. 결 론

본 연구 결과는 WC/CC GDTs 메커니즘을 밝히는데 심리음향적 근거자료로서 유용하다고 할 수 있다. 또한 저주파수 순음을 이용한 CC GDTs는 노화의 영향을 상대적으로 덜 받는 잔존청력대역으로서 순음청력검사나 어음청각검사에서 잘 나타나지 않는 노인성 난청의 시간적 청각정보처리능력을 평가하는 도구로 활용될 수 있을 것이다. 마지막으로 음악적 자극음과 순음의 시간적 해상도에 따른 피치기전이 다를 수 있음을 시사하며, 추가적인 연구를 통해 피치인식의 기전을 해석하고 모델링하는데 기본 자료가 될 수 있을 것이다.

피치인식은 ‘달팽이관의 구조적인 음조체계에 의한 place code와 단일 청신경의 phase-locking discharge에 의한 temporal code의 상대적인 기여도에 따라 달라진다.’<sup>14)</sup>는 논쟁이 있어왔고, 이러한 청각기관의 비선형성반응을 살펴보기 위해서는 본 연구와 같은 심리음향적 실험 연구들이 지속적으로 진행되기를 기대한다.

## 감사의 글

본 연구는 일부 ARICS의 지원을 받아 진행되었습니다.

## References

1. B. Moore, *An Introduction to the Psychology of Hearing, 5th Ed* (Academy Press, San Diego, 2003), Chap. 5.
2. ASHA Task Force on Central Auditory Processing Consensus Development, “Central auditory processing: Current status of research and implications for clinical practice,” *AJA*, **5**, 41-54 (1996).
3. J. Jerger and F. Musiek, “Report on the consensus conference on the diagnosis of auditory processing disorders in school-aged children,” *J. Am. Acad. Audiol.* **11**, 467-474 (2000).
4. H. F. Schuknecht, M. R. Gacek, “Cochlear pathology in presbycusis,” *Ann. Otol Rhinol Laryngol.* **102**, 1-16 (1993).
5. B. A. Schneider, M. K. Pichora-Fuller, and M. D & Lamb, “Gap detection and the precedence effect in young and old adults,” *J. Acoust. Soc. Am.* **95**, 980-991 (1994).
6. K. B. Snell and D. R. Frisina, “Relationship among age-related differences in gap detection and word recognition,” *J. Acoust. Soc. Am.* **107**, 1615-1626 (2000).
7. M. J. Hautus, G. J. Setchelm, K. E. Walidi, and I. J. Kirk, “Age-related improvements in auditory temporal resolution in reading-impaired children,” *Dyslexia*, **9**, 37-45 (2003).
8. S. Elangovan and A. Stuart, “Natural boundaries in gap detection are related to categorical perception of stop consonants,” *Ear Hear*, **29**, 761-774 (2008).
9. S. H. Kim and D. H. Ko, “Fundamental frequencies in Korean elderly speakers” (in Korean), *KSSS*, **15**, 95-102 (2008).
10. S. M. Hong, *Effects of musical tones on gap detection thresholds in normal adults* (in Korean), (Master’s degree, Hallym University, 2009).
11. N. A. Smith, L. J. Trainor, and D. I. Shore, “The development of temporal resolution: between-channel gap detection in infants and adults,” *J. Speech Lang Hear Res.* **49**, 1104-13 (2006).
12. H. Antje and S. Bruce, “Age-related changes in within- and between-channel gap detection using sinusoidal stimuli,” *J. Acoust. Soc. Am.* **119**, 2316-2326 (2006).
13. M. K. Pichora-Fulla and B. A. Schneider, “Effect of age on detection of gaps in speech and nonspeech markers varying in duration and spectral symmetry,” *J. Acoust. Soc. Am.* **119**, 1143-1155 (2006).
14. B. C. J. Moore, *Cochlear Hearing Loss: Physiological, Psychological and Technical Issues, 2nd Ed* (WILEY, Chichester, 2007), Chap. 5-6.

## 저자 약력

---

▶ 구 성 민 (Sungmin Koo)



2006년: 한림대 청각학 석사  
2010년: 한림대 청각학 박사  
2014년~현재: 나우히어링 청각언어센터  
대표

▶ 임 덕 환 (Dukhwan Lim)



2004년 ~ 현재: 한림대학교 언어청각학  
부 교수