

## 냉장고 소음 ACF 요소의 최소인지한계량 조사

Just noticeable difference of autocorrelation function (ACF) parameters of refrigerator noise

유 진<sup>†</sup> · 정충일<sup>\*</sup> · 전진용<sup>\*\*</sup> · 조문재<sup>\*\*\*</sup>

Jin You, Choong Il Jeong, Jin Yong Jeon, Moon Jae Cho

**Key Words** : 최소인지한계량 (Just noticeable difference), 음질 (Sound quality), ACF 요소 (Autocorrelation function parameters), 냉장고 소음 (Refrigerator noise)

### ABSTRACT

Just noticeable differences (jnds) of autocorrelation function (ACF) parameters -  $\Phi(0)$ ,  $\tau_1$  and  $\phi_1$  - of household refrigerator noise were investigated by psychoacoustical analyses.  $\Phi(0)$  of five refrigerators' noise was changed with equal ( $\pm$ ) interval level of 0.5-1.0 dB up to five intervals by manipulating sound pressure level of the noise.  $\tau_1$  and  $\phi_1$  were varied with equal ( $\pm$ ) interval of around 0.10 ms and 0.02, respectively. Pitch shifting and strengthen methods were applied for the  $\tau_1$  and  $\phi_1$  variations. As results of subjective evaluations, about 2.0 dB was shown as jnd of  $\Phi(0)$ . The values of 0.30 ms and 0.06 were found as jnds of  $\tau_1$  and  $\phi_1$ , respectively. The jnd results of each ACF parameter can be applied to explain substantial amount of sound quality (SQ) enhancement in the SQ prediction indices which were proposed in the authors' previous study [Sato et al. (2007) J. Acoust. Soc. Am.].

### 1. 서론

냉장고 소음의 음질 (Sound quality) 개선을 위해서는 소음의 물리적 특성과 주관적 반응을 고려한 심리음향학적 접근이 이루어져야 하며 [1], 실제 사용환경에 대한 고려가 필요하다 [2]. 냉장고 소음의 음질 규명을 위해서 주로 라우드니스 (loudness) 등의 Zwicker [3] 요소가 활용되고 있으며, 음질요소를 활용하여 주관적 반응을 설명하는 연구가 진행되고 있다.

Zwicker 요소의 경우 시간변동 특성이 강한 소음의 음질을 설명하기 어렵기 때문에 이전연구 [4]에서는 주거 환경을 고려한 냉장고 기동소음 및 종료음의 음질특성 규명을 위해 Autocorrelation function (ACF) 요소를 활용하였다. ACF 요소 중  $\Phi(0)$ ,  $\tau_1$  및  $\phi_1$ 이 시간변동 특성이 강한 냉장고 운전소음의 주요 음질요소로 도출되었으

며, 이들 음질요소를 활용하여 주관적 반응을 예측하는 음질 인덱스가 제안되었다.

그러나 음질 인덱스의 효과적인 활용을 위해 인지 가능한 음질 개선량 도출이 필요하며, 이를 위해 음질 인덱스를 구성하는 각 음질요소의 최소인지한계량 (Just noticeable difference, jnd) 조사연구가 요구된다. 이에 냉장고 소음을 활용한 Zwicker 음질요소의 jnd 연구가 진행되었으나 [5] ACF 요소의 jnd에 대한 고찰은 미흡하다.

Jnd 관련 연구는 심리음향분야에서 활발하며, 소리의 intensity, frequency 및 duration 차이 인지에 대한 연구 등으로 크게 나뉘고 있다. 대부분의 경우 순음 (pure tone) 등을 제시 자극으로 사용하여 실험을 진행하고 있으며 [6-9], ACF 요소와 같은 특정 음질요소에 대해 실제 기기 소음을 활용한 jnd 조사연구는 이루어지지 않고 있다.

Jnd 조사연구 방법론으로서 한계법 (method of limit), 조정법 (method of adjustment) 및 지속자극법 (method of constant stimuli) 등이 사용되고 있으며 [10], 한계법의 정확도를 개선한 simple up-down법과 피실험자의 예측에 의한 적용효과까지 개선한 transformed up-down법 등이 개발되어 적용되고 있다 [11]. 한계법의 경우 실험방법 및 분석법이 간단하여 적용이 쉬운 장점을 가지나 충분한 사전실험이 요구되는 단

<sup>†</sup> 한양대학교 건축환경공학과, 박사과정

E-mail : jinyou.willow@gmail.com

Tel : (02) 2220-1795, Fax : (02) 2220-4794

<sup>\*</sup> 한양대학교 건축환경공학과, 석사과정

<sup>\*\*</sup> 한양대학교 건축대학, 부교수

<sup>\*\*\*</sup> 한국표준과학연구원 표준보급부 산업지원팀

점이 있으며, transformed up-down법의 경우 결과의 bias를 줄일 수 있으나 그 절차가 복잡한 한계를 갖는다.

이에 본 연구에서는 한계법을 적용하여  $\Phi(0)$ ,  $\tau_1$  및  $\phi_1$ 의 jnd를 도출하였으며, 이를 통해 이전연구 결과의 설명력을 높이고자 한다.

### 2. ACF 요소

ACF는 이하 식과 같이 정의되며 임의의 신호  $p(t)$ 와 그 신호를 임의의 시간  $(\tau)$  만큼 지연시킨 신호  $p(t+\tau)$  사이의 상관관계를 설명하는 함수이다. 따라서 지연시간에 대해 초기 신호의 성분이 계속해서 지속되는 경우 ACF는 높은 상관관계를 나타내며, 초기의 성분이 거의 존재하지 않게 되는 경우에는 그 지연시간에 대하여 ACF가 낮은 상관관계를 나타낸다.

$$\Phi(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} p(t)p(t+\tau)dt$$

지연시간이 0일 때의 ACF를  $\Phi(0)$ 로 정의할 수 있는데 이것은 신호의 에너지 레벨을 나타내며, 라우드니스와 상관성이 높다. 그림 1과 같이 ACF 함수의 첫 번째 peak의 지연시간과 크기를 각  $\tau_1$ 과  $\phi_1$ 으로 정의하며, 주관적인 음고와 음고의 세기 (pitch strength)를 각각 설명한다. 또한 ACF envelope의 지속시간을  $\tau_e$ 로 정의하며, 이상의  $\Phi(0)$ ,  $\tau_1$ ,  $\phi_1$  및  $\tau_e$ 가 ACF 요소로서 활용되고 있다.

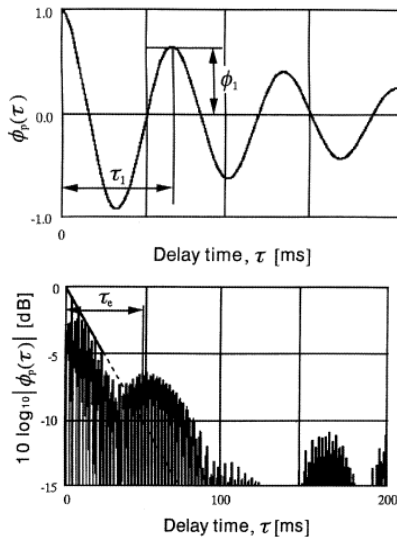


Fig. 1 Definition of  $\tau_1$ ,  $\phi_1$  and  $\tau_e$

기기소음의 음질 분석에 주로 활용되는 라우드니스, 샤프니스, 리프니스 및 변동강도 등의 Zwicker 음질요소의 경우 시간변화 특성이 강하지 않은 stationary 소음원 분

석에 적절한 반면 시간변화 특성이 강한 소음의 음질은 잘 설명하지 못하는 것으로 나타나고 있다. 시간에 따른 소음의 변동 특성은 ACF 요소가 잘 설명하는 것으로 알려져 있으며, 소리의 세기, 음고 (pitch) 및 음색 (timbre) 등의 심리음향지표와 상관도가 높은 것으로 조사되고 있어 연구 활용도가 높다.

### 3. 실험 음원

#### 3.1 음원 녹음 및 가청화

무향실에서 서로 다른 12종의 양문형 냉장고의 소음을 녹음하였다. 녹음 위치는 그림 2와 같이 냉장고로부터 전후좌우 각 1m 떨어진 위치에서 높이 1m 지점으로 선정하였으며, 1/2인치 마이크로폰 4개를 사용하여 동시 녹음하였다. 냉장고 기동으로부터 정상작동 및 종료와 휴지기에 이르기까지 냉장고 운전 사이클 소음 전체를 녹음하였으며, 이 중 정상작동 상태 음원을 실험에 활용하였다. 또한 네 지점의 측정값 중 가장 음압레벨이 높게 나타난 후면 1m 지점의 음원을 본 연구의 실험음원으로 선정하였다.

무향실 녹음 음원을 가청화하기 위해 그림 3과 같이 100m<sup>2</sup> 규모의 실제 주거환경에서 수음한 충격응답 (Impulse response)을 사용하였다. 충격응답은 주거환경 부엌의 냉장고 위치에 무지향성 스피커를 위치시킨 후 스피커로부터 약 7m 떨어진 거실위치에서 Head and Torso Simulator (HATS)를 사용하여 수음하였다[2].

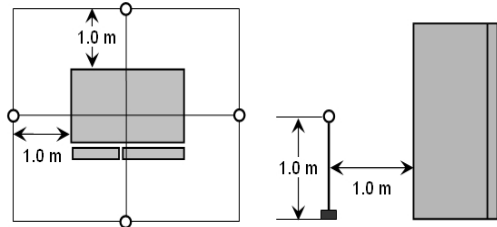


Fig. 2 Recording positions of refrigerator noise in an anechoic chamber, o: microphone.

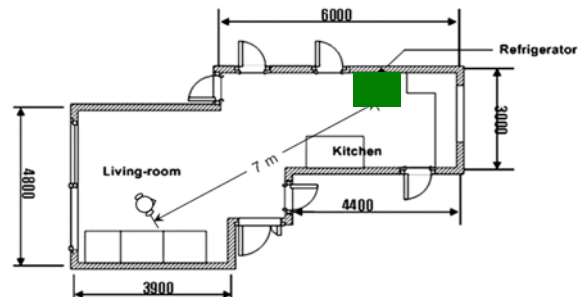


Fig. 3 Impulse response recording position in real living environment.

### 3.2 음원제작 및 분석결과

가청화한 12종의 냉장고 소음 중 특성이 다른 5종을 선정하여  $\Phi(0)$ 의 jnd 실험음원 작성에 활용하였다. 상용 사운드 에디팅 프로그램 (Adobe Audition 2.0)을 사용하여 각 실험음원이 약 0.5-1.0dB의 일정한 간격을 갖도록 전주파수 대역의 음압레벨을 조정하였다. 원본음원보다 큰  $\Phi(0)$  값을 갖는 변경음원 5개와 작은  $\Phi(0)$  값을 갖는 변경음원 5개를 합하여 각 냉장고 종류별 총 11개의 실험음원을 작성하였다.

$\tau_1$ 의 jnd 실험음원 제작을 위해  $\Phi(0)$  변경 시 사용한 동일 프로그램을 사용해 pitch shifting 방법을 적용하였고,  $\tau_1$  실험음원은 원본음원으로부터 약 0.10ms 간격을 갖도록 조정되었다.  $\phi_1$ 의 경우 강한 하모닉 성분 중 하나인 247Hz 대역의 tonal energy를 증감하여 원본음원으로부터 약 0.02의 간격을 갖도록 실험음원을 작성하였다.

Table 1 ACF analysis results of tau 1 experimental sounds

Sound	$\Delta\Phi(0)$ [dB]	$\Delta\tau_1$ [ms]	$\Delta\phi_1$	$\Delta\tau_e$ [ms]
1	-0.4	-1.0	0.04	-1.13
2	-0.3	-0.9	0.03	-0.92
3	-0.3	-0.8	0.03	-0.29
4	-0.2	-0.7	0.03	-0.34
5	-0.2	-0.6	0.01	-0.24
6	-0.2	-0.5	0.01	-0.03
7	-0.2	-0.4	0.01	0.51
8	-0.1	-0.3	0.01	0.09
9	-0.1	-0.2	0.01	0.20
10	-0.1	-0.1	0.01	-0.08
11	0.0	0.0	0.00	0.00
12	0.0	0.1	0.01	0.07
13	0.0	0.2	0.00	-0.02
14	0.1	0.3	0.01	0.15
15	0.1	0.4	0.00	-0.29
16	0.1	0.5	0.00	0.15
17	0.2	0.6	0.00	0.09
18	0.2	0.7	0.00	0.39
19	0.2	0.8	-0.01	-0.31
20	0.3	0.9	0.00	0.20
21	0.3	1.0	0.00	0.02

Table 2 ACF analysis results of phi 1 experimental sounds

Sound	$\Delta\Phi(0)$ [dB]	$\Delta\tau_1$ [ms]	$\Delta\phi_1$	$\Delta\tau_e$ [ms]
1	-0.73	-0.10	-0.12	20.2
2	-0.61	-0.06	-0.10	54.1
3	-0.46	-0.02	-0.08	103.4
4	-0.35	-0.01	-0.06	77.9
5	-0.25	-0.01	-0.04	35.3
6	-0.09	-0.01	-0.02	18.0
7	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.13	0.01	0.02	-17.0
9	0.25	0.01	0.04	-30.6
10	0.38	0.01	0.06	-51.8
11	0.55	0.01	0.08	-57.2
12	0.71	0.01	0.10	-50.2
13	0.87	0.01	0.12	5.02

$\tau_1$  및  $\phi_1$  실험음원의 ACF 분석결과는 표 1 및 2와 같으

며, 원본음원의 값을 기준으로 각 ACF 요소의 상대적인 분석값을 나타내었다. ACF 분석을 위해 Matlab program을 활용한 알고리즘이 적용되었다.  $\tau_1$  및  $\phi_1$  실험음원 사이의  $\Phi(0)$  차이는 인지하기 어려운 미미한 차이로 나타나  $\Phi(0)$ 에 의한 인지반응을 배제시킬 수 있을 것으로 판단되었다.

## 4. 주관적 평가

### 4.1 실험 설계

일정 간격으로 제작된  $\Phi(0)$ ,  $\tau_1$  및  $\phi_1$  변화음원에 대하여 각각 청감실험을 통한 주관적 평가가 이루어졌다.  $\Phi(0)$  jnd 실험의 경우 40명의 20대 정상청력자가 실험에 참여하였고,  $\tau_1$  및  $\phi_1$  jnd 실험의 경우 2-3명의 숙련된 피실험자가 여러 번 실험에 참여하는 방식으로 진행되었다.

각 음질요소 jnd에 대한 주관적 평가 시 원본음원과 음질이 변화된 실험음원을 하나의 쌍으로 피실험자에게 제시하였으며, 두 음원 중 더 큰 값을 갖는 음원을 선택하도록 하는 2-AFC (Alternative Forced Choice)법 [10]이 적용되었다. 제시음원의 크기는 실제 주거환경 거실위치에서 냉장고 소음의 레벨과 동일한 수준으로 설정하여 제시하였으며 청감실험 전용 챔버에서 헤드폰을 사용하였다.

### 4.2 실험 결과

각 음질요소 jnd에 대한 주관적 평가 결과는 그림 4와 같다. 쌍으로 제시된 원본음원과 음질요소의 값을 변화시킨 실험음원 사이의 음질요소 값의 차이가 그림 4의 X축에 나타나있으며, 그 차이를 청감적으로 인지한 반응비율이 Y축에 나타나있다. 전체 피실험자의 반응 중 75% 이상이 차이를 인지한 때의 음질요소의 값의 차이를 jnd로 설정하였다[11].

$\Phi(0)$ 의 경우 그림 4(a)와 같이 5종의 냉장고 음원(A-E)의 결과가 나타나있으며,  $\tau_1$  및  $\phi_1$ 의 jnd 결과는 그림 4(b) 및 4(c)와 같다.  $\Phi(0)$  실험결과, 약 2.0-2.5dB의 차이가 나는 실험음원 쌍에 대하여 75% 이상의 피실험자가 차이를 인지하기 시작하는 것으로 나타났다. 따라서  $\Phi(0)$ 의 jnd는 약 2.0dB로 설명할 수 있으며, 동일한 결과 도출 방식으로  $\tau_1$  및  $\phi_1$ 의 jnd는 각각 약 0.30ms 및 0.06에서 발생하는 것으로 나타났다.

따라서 냉장고 소음의 음질 개선을 사용자에게 인식시키기 위해서는  $\Phi(0)$ 의 경우 최소 2.0dB,  $\tau_1$ 의 경우 최소 0.3ms,  $\phi_1$ 의 경우 최소 0.06 이상 개선이 되어야만 할 것으로 사료된다. 본 ACF 요소의 jnd 결과를 활용하여 냉장고 소음 음질을 설명하는 음질 인덱스[4]에서 주요 ACF 요소의 개선 목표량 및 인지가능 SQ 개선량 도출이 가능할 것으로 판단된다.

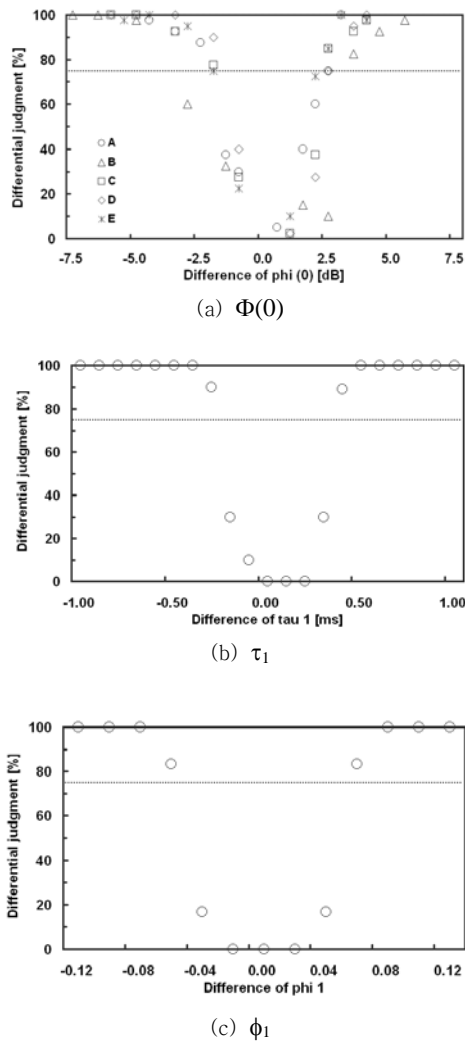


Fig. 4 Jnd results of ACF parameters

5. 결론 및 향후 진행방향

본 연구에서는 냉장고 정상상태 소음의 음질개선을 위해 주관적 반응에 영향을 미치는 주요 ACF 요소의 최소인지한계량을 조사하였다. 이전연구 결과로 도출된 주요 ACF 요소 중  $\Phi(0)$ 의 경우 약 2.0dB,  $\tau_1$ 의 경우 약 0.30ms,  $\phi_1$ 의 경우 약 0.06이 jnd 결과로 도출되었으며, 상기 결과를 적용하여 냉장고 소음의 음질개선을 위한 각 음질요소의 제어량을 보다 구체적으로 산출할 수 있을 것으로 사료된다.

본 jnd 연구결과를 활용하여 이전연구에서 제안하는 음질 인덱스의 심리음향학적 의미를 설명할 수 있으며, ACF 요소 개선량에 대한 실제적인 값을 설정할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구와 향후 연구 결과를 통해 기기소음 음질요소 jnd 도출 방법론이 정립될 수 있을 것으로 기대되며, Product Sound Quality 관련 연구 발

전에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

- (1) Gu J. H., Lee S. K., Kim J. R., Lee E. Y., 2004, "A study of development of sound quality index of a refrigerator based on human sensibility engineering", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 14 (11), pp.1195-1202.
- (2) Jeon J. Y., You J., Chang H. Y., 2007, "Sound radiation and sound quality characteristics of refrigerator noise in real living environments," Applied Acoustics, 68, pp.1118-1134.
- (3) Zwicker E., Fastl H., 1999, Psychoacoustics : Facts and Models, Springer.
- (4) Sato S., You J., Jeon J. Y., 2007, "Sound quality characteristics of refrigerator noise in real living environments with relation to psychoacoustical and autocorrelation function parameters", Journal of the Acoustical Society of America, 122 (1), pp.314-325.
- (5) You J., Jeon J. Y., 2007, "Just noticeable difference of sound quality metrics of refrigerator noise," Proceedings of 19th International Congress on Acoustics, Madrid, Spain.
- (6) Semal C., Demany L., 2006, "Individual differences in sensitivity to pitch direction," Journal of the Acoustical Society of America, 120(6), pp.3907-3915.
- (7) Bernstein J. G. W., Oxenham A. J., 2006, "The relationship between frequency selectivity and pitch discrimination: Effects of stimulus level," Journal of the Acoustical Society of America, 120(6), pp.3916-3928.
- (8) Eddins D. A., Bero E. M., 2007, "spectral modulation detection as a function of modulation frequency, carrier bandwidth, and carrier frequency region," Journal of the Acoustical Society of America, 121(1), pp.363-372.
- (9) Gockel H. E., Moore B. C. J., Carlyon R. P., Plack C. J., 2007, "Effect of duration on the frequency discrimination of individual partials in a complex tone and on the discrimination of fundamental frequency," Journal of the Acoustical Society of America, 121(1), pp.373-382.
- (10) Gelfand S. A., 1998, Hearing: An Introduction to Psychological and Physiological Acoustics, Marcel Dekker, Inc, New York.
- (11) Levitt H., 1971, "Transformed up-down methods in psychoacoustics," Journal of the Acoustical Society of America, 49(2), pp.467-477.