

# 연속성 충격소음의 인지에 관여하는 영향인자

## Factors affecting recognition of successive impulsive noise

이재원, 신성환<sup>†</sup>

(Jae-Won Lee and Sung-Hwan Shin<sup>†</sup>)

국민대학교 자동차공학과

(Received January 28, 2016; revised February 25, 2016; accepted March 21, 2016)

**초 록:** 자동차나 가전제품에서 발생하는 소음의 대부분은 연속성 충격소음을 동반한다. 인간 청각은 반복적 충격소음에 대하여 그 반복 주기에 따라 독립된 충격음의 집합 또는 이어진 음으로 느낄 수 있다. 본 연구에서는 연속성 충격소음의 인지에 관여하는 영향인자를 파악하고, 연속성 충격소음을 표현하기에 가장 적합한 음질분석 방법을 찾고자 하였다. 이를 위하여 연속성 충격신호를 설계하고, 연속성 충격소음이 충격음 특성을 나타내는 조건을 탐색하는 청음평가를 수행하였다. 그리고 이러한 청음평가 결과를 라우드니스, 변동강도, 러프니스 방법으로 분석하고 비교하였다. 결과적으로 연속성 충격소음은 50 Hz보다 낮은 반복주기를 가질 때부터 충격음 특성을 나타내는 것으로 확인되었다. 음질인자 중 변동강도와 러프니스 값은 연속성 충격소음의 진폭변조특성에 크게 의존하기 때문에 연속성 충격소음을 표현하는데 어려움이 있다. 반면에 라우드니스 값은 연속성 충격소음의 진폭변조특성에 의존하지 않으며, 라우드니스 변화 역치로서 평가인자 개발에 효용성이 있을 것으로 판단된다.

**핵심어:** 충격음, 라우드니스, 변동강도, 러프니스

**ABSTRACT:** Most of noises from cars or home appliances accompany successive impulsive noise due to repeated operation. A human auditory system is able to perceive the successive impulsive noise as either a set of independent noise or amplitude modulated noise according to its occurrence period. This study is to identify main influence factors on understanding of impulsive characteristics and find most appropriate sound quality metrics to express the successive impulsive noise. To do this, the successive impulsive noises were designed and utilized to perform a listening test for identifying conditions where successive impulsive noise can be recognized to have impulsive characteristics. These results were analyzed with sound quality metrics such as loudness, fluctuation strength, and roughness in order to compare the subjective results with the objective results. Consequently, the results revealed that the successive impulsive noise exhibits impulsive characteristics when its occurrence frequency is less than 50 Hz. It was also observed that roughness and fluctuation strength results are not applicable to express the successive impulsive noise because they heavily depend on the amplitude modulation characteristics. On the other hand, loudness results are considered to be useful as an evaluation factor of the successive impulsive noise through the use of loudness limen because it does not depend on the amplitude modulation characteristics.

**Keywords:** Impulse noise, Loudness, Fluctuation strength, Roughness

**PACS numbers:** 43.50.Pn, 43.66.Cb

### 1. 서 론

자동차나 가전기기 소음을 제어할 때의 우선적 목표는 음압레벨을 최소화하는 것이다. 최근에는 제품

에 대한 소비자의 질적 요구가 증대됨에 따라서 제품과 소비자 간의 친밀도를 향상시키려는 노력이 이루어지고 있다. 자동차나 가전기기과 같은 제품들의 대부분은 반복적으로 운전하기 때문에 소음이 단발에 그치지 않고 연속적으로 일어나게 된다. 예를 들어 디젤엔진의 경우 연소, 분사, 압축의 기계적 구동

<sup>†</sup>Corresponding author: Sung-Hwan Shin (soulshin@kookmin.ac.kr)  
Department of Automotive Engineering, Kookmin University, 77 Jeongneung-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02707, Republic of Korea  
(Tel: 82-2-910-5743, Fax: 82-2-910-4839)

을 거치는 과정에서 연속적인 충격음을 발생한다. 또 다른 예로서 차량용 톤 시그널 릴레이나 프린터, 복사기에서도 연속적인 충격소음이 발생한다. 이러한 제품들의 음질향상을 위해서 연속성 충격소음을 구성하는 하나의 단일 충격음 이벤트를 제어한다면 제품의 이미지 제고에 기여할 수 있다. 그러나 인간 청각계가 이러한 연속성 충격소음을 인지할 때, 충격소음의 반복주기에 따라서 완전히 독립된 이벤트들의 집합이나 이어진 음으로 느낄 수 있다. 여러 조건의 반복주기를 가진 연속성 충격소음이 이어진 음으로 볼 것인지, 아니면 충격소음으로 볼 것인지에 대한 판단은 연구자 혹은 당사자 개인의 느낌으로 결정되기 때문에 기준이 모호해지는 문제가 발생할 수 있다. 아직까지 라우드니스, 샤프니스, 변동강도, 러프니스와 같은 객관적 음질인자를 통한 연속성 충격소음의 특성화는 명확히 되어있지 않다. 다만 몇 가지 상용프로그램에서 인간 청각특성을 고려한 청각모델을 충격소음에 대한 계산 방법으로서 제공하고 있고,<sup>[1]</sup> 충격음이 과도적인 성질을 갖는다는 점에 착안하여 평가를 위해 첨도나 파고율과 같이 시간에 의존한 객관화 인자를 선택한다.<sup>[2]</sup> 하지만 이와 같은 방법들이 뚜렷한 장점을 보이고 있지 않다.<sup>[3]</sup> 이러한 문제를 극복하기 위하여 주관적 청음평가를 수행하여 인지에 미치는 영향인자를 파악하고, 연속성 충격소음의 특징을 잘 표현할 수 있는 객관적 음질인자의 확인 필요성을 인지하였다.

충격소음을 인지하는데 관여하는 요소는 매우 광범위하여 모든 요소를 고려하고 결론 내리기에는 많은 시간과 노력이 필요로 한다. 본 연구에서는 연속성 충격소음 음질평가에 대한 기초 연구로서, 연속성 충격소음을 구성하는 단일 충격음의 지속시간, 레벨, 시간간격을 인지에 관여하는 영향요소로 가정하였다. 이를 바탕으로 주관적 청음평가를 수행하여 각 변수의 영향정도를 파악하고, 청음평가를 통해 얻어진 결과를 객관적 음질분석 결과와 비교하여 연속성 충격소음의 특징을 잘 표현하는 음질인자를 파악하고자 한다.

## II. 주관적 청음평가

연속성 충격소음의 인지에 관여하는 영향인자를 확인하기 위하여 주관적 청음평가를 수행하였다. 본 연구에서는 레벨에 대한 척도로서 충격소음의 최고레벨이 아닌 실효치(Root Mean Square, RMS) 레벨을 사용한다. 청음 실험은 가청주파수 20Hz ~ 18kHz 범위에서 22 dBA(38 dB)의 배경소음을 갖는 방음실에서 진행되었으며, USB(Universal Serial Bus)방식의 음재생시스템(HEAD acoustics, PEQ-V)과 귀덮개형 개방형 헤드폰(Senheiser, HD-650)을 통하여 소리를 재생하였다. 청음자들은 예비실험을 몇 차례 진행하여 익숙도를 높이고 본 실험을 진행하였다. 실험에 참여한 청음자의 총 인원은 11명이다.

### 2.1 선행 실험

연속성 충격소음을 제작하기에 앞서 충격음이라고 느껴지는 기준을 명확히 하기 위한 선행실험을 수행하였다. 본 실험 단계에서는 청음자가 소음에 대하여 충격음이라고 느끼는 최대 지속시간을 확인하고자 하였다. 대상 소음으로서 넓은 주파수 스펙트럼을 갖는 백색잡음을 사용하였다(Fig. 1). 백색잡음의 레벨은 A/B청감보정 곡선을 고려하여 40, 70 dB로 선택되었다. 청음자는 주어진 레벨의 백색잡음 지속시간을 1 ms단위로 직접 조절하면서 충격음으로 느껴지는 최대 지속시간을 기록한다. 한편, 최대 지속시간은 1s를 넘지 못하도록 제한하였다.<sup>[4]</sup> 본 실험

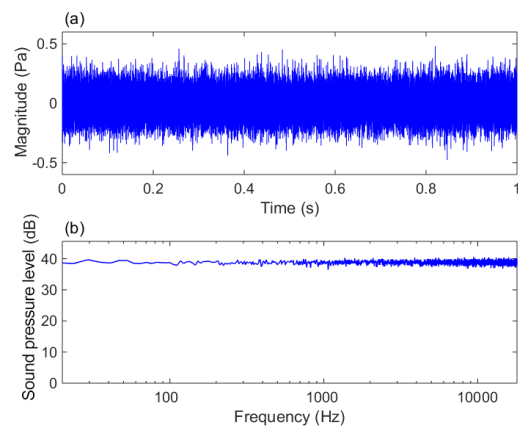


Fig. 1. (a) An example of the white noise used for the preliminary experiment (b) its sound pressure level.

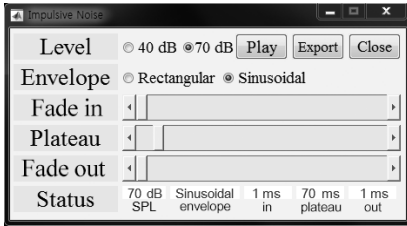


Fig. 2. The user interface of the test program for the preliminary experiment.

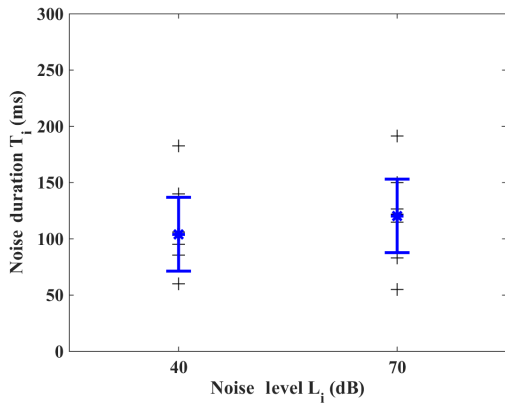


Fig. 3. Maximum duration of white noise for which it is felt impulsive noise according to the noise level.

험을 위하여 MATLAB을 이용한 청음실험 프로그램을 제작하였다(Fig. 2).

충격음이라고 느껴지는 최대 지속시간  $T_i$ 를 Fig. 3에서 95 %신뢰구간으로 나타내었다. 결과에서, 모든 청음자는 200 ms 이하의 지속시간을 갖는 백색잡음에 대하여 충격음이라고 판단하였다. 또한, 40 dB과 70 dB일 때의 결과를 95 %신뢰구간에서 T검정하였을 때 0.5의 유의확률(p-value)을 갖는 것 따라서 통계적으로 차이를 나타내지 않음을 확인하였다. 이에 근거하여 백색잡음의 레벨 차이가 충격음으로 느껴지는 최대길이 결정에 영향을 주지 못한다고 결론 내릴 수 있다.

### 2.2 연속성 충격소음의 인지실험

연속성 충격소음을 인지할 때 관여하는 영향인자를 확인하기 위하여 연속성 충격소음을 구성하는 단일 충격음을 5가지 지속시간(2.5, 5, 12.5, 25, 37.5, 75 ms)과 2가지 레벨(40, 70 dB)을 갖는 백색잡음으로 제작하였다(Fig. 4). 이때의 지속시간은 선행실험에서 충격음이라고 느껴진 최대 지속시간보다 낮은 범위

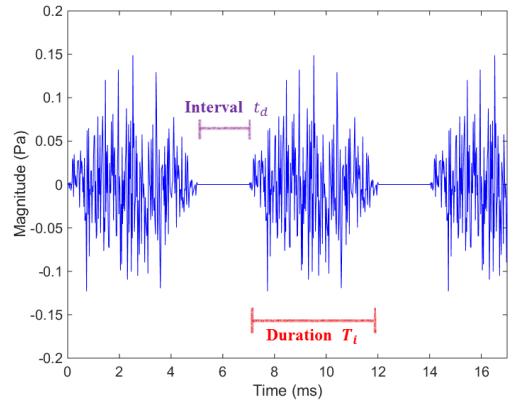


Fig. 4. Successive impulsive signal used for the recognition experiment.

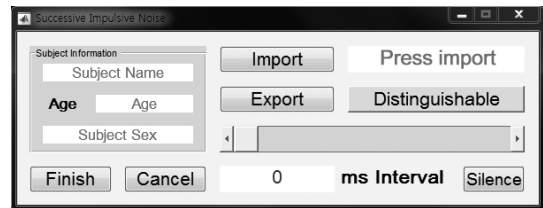


Fig. 5. The user interface of the test program for the experiment of recognizing successive impulsive noise.

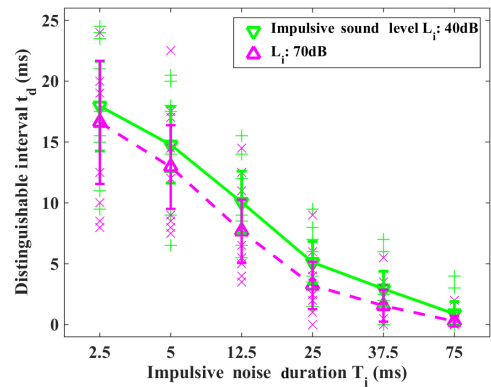


Fig. 6. Interval between two impulsive signals recognizing as independent one according to impulse signal duration.

에서 세분화하였다. 본 실험을 위하여 MATLAB을 이용한 청음실험 프로그램을 Fig. 5와 같이 제작하였다.

Fig. 6에는 연속성 충격소음이 충격음 특성을 나타내는 단일 충격음 간 시간간격  $t_d$ 를 단일 충격음의 지속시간  $T_i$ 에 대하여 95 %신뢰구간으로 나타낸 것이다. 여기서 충격음 특성이란, 연속성 충격소음이 이어진 음 또는 진폭변조음이 아닌, 완전히 독립된 충격음들의 집합으로서 인지되는 현상을 말한다.

Fig. 6에서 보이는 바와 같이 연속성 충격소음을 구성하는 단일 충격음의 지속시간이 늘어남에 따라 충격음 특성을 갖는 충격음 간 시간간격이 줄어들 수 있다. 이러한 결과의 원인은 알려진 두 가지 사실로서 설명할 수 있다. 인간 청각계는 소리 자극을 받아들이기 위하여 충분한 시간이 필요하고,<sup>[5]</sup> 앞선 소리에 의해 차폐된 다음 소리를 잘 듣지 못한다.<sup>[6]</sup> 두 지각현상을 종합하여 Fig. 7에 인간청각곡선을 모사하였다. Fig. 7에 모사한 바와 같이 단일 충격음의 지속시간이 길어질수록 본래 충격음의 최고레벨만큼 도달하기 수월해진다. 따라서 긴 단일충격음 지속시간에서 보다 높고 가파른 포스트마스킹 곡선이 형성된다.<sup>[7]</sup> 이 경우, Fig. 6처럼 레벨 변화 감지를 위한 단일충격음 간 시간간격이 비교적 짧게 요구된다.

연속성 충격소음을 구성하는 단일충격음의 레벨  $L_i$ 가 40 dB일 때와 70 dB일 때의 결과는 평균값에서 다소 차이를 보이지만 넓은 영역의 신뢰구간을 공유한다. 두 결과를 95%신뢰구간에서 T검정한 결과 값이 Table 1에 표시되어 있다. 두 결과가 통계적으로 차이를 나타내지 않는 것을 근거로, 단일 충격음의 레벨 변화가 연속성 충격소음의 충격음 특성에 영향 주지 않는다는 것을 확인하였다.

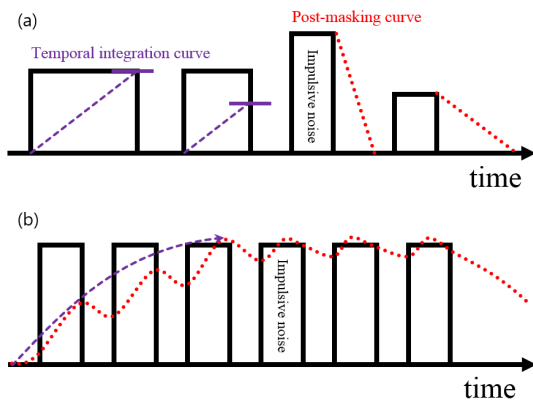


Fig. 7. Schematic drawing of loudness perception: (a) temporal integration and post-masking curve, (b) perceived loudness in successive impulsive noise.

Table 1. T-test results for the results of listening evaluation compared 40 dB with 70 dB.

Duration ( $T_i$ )	2.5 ms	5 ms	12.5 ms	25 ms	37.5 ms	75 ms
P-value	0.68	0.45	0.22	0.17	0.18	0.29

Fig. 6에서  $T_i$ 와 그에 해당하는  $t_d$ 의 평균값을 더했을 때  $T_i + t_d \approx 20$  ms가 되는 구간이 존재한다. 이러한 현상은  $T_i$ 가 20 ms를 넘어서기 전까지 나타난다. 미루어 보면 연속성 충격소음이 충격음 특성을 나타낼 때 관여하는 인자는  $T_i$ 와  $t_d$ 이나 두 인자는 독립적이지 않고, 둘의 합인  $T_i + t_d$ 로서 주요하게 관여한다. 결론적으로 연속성 충격소음은  $T_i + t_d \approx 20$  ms 인 즉, 50 Hz보다 낮은 반복주기를 갖게 될 때부터 충격음 특성을 보이는 것으로 확인하였다.

### III. 객관적 음질분석

#### 3.1 변동강도, 러프니스 분석

주관적 청음평가 결과에서 연속성 충격소음의 인지에 관여하는 영향인자를 확인하였다. 이어서 본 단계에서는 객관적 음질분석 결과가 앞서 도출한 주관적 결과와 얼마나 일치하고, 연속성 충격소음을 표현하기에 적합한지 여부를 확인하고자 한다. Table 2는 Fig. 6에서 보인  $t_d$ 의 평균값으로 연속성 충격신호를 제작하여 러프니스, 변동강도 분석법으로 계산한 결과이다. 신호는 10 s의 길이를 갖도록 제작되었으며, 40 dB와 70 dB일 때의  $t_d$ 가 같은 이유는 앞서 T검정을 통해 레벨에 따른 결과의 차이가 없음을 확인하였기 때문이다.

Table 2에서  $T_i + t_d$ 가 큰 값을 가질수록 변동강도가 증가하고 러프니스는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 단일 충격음의 존재가 사라지더라도 일정 시

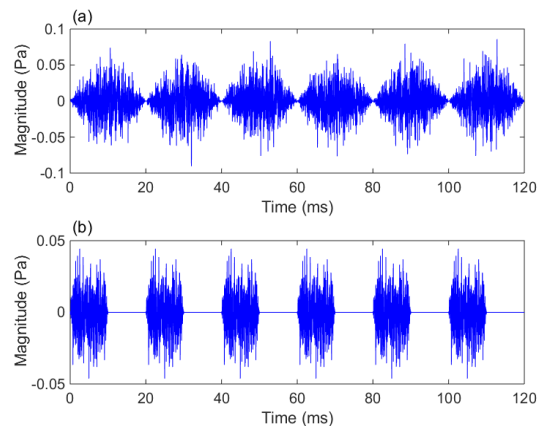


Fig. 8. Impulsive signal used to compare: (a) modulated signal (b) successive impulsive signal.

Table 2. Roughness ( $R$ ) and fluctuation strength ( $FL$ ) of impulsive noise.

$T_i$ (ms)	$t_d$ (ms)	$T_i + t_d$ (ms)	$R$ (asper)		$FL$ (vacil)	
			40 dB	70 dB	40 dB	70 dB
2.5	17	19.5	3.97	9.12	0.04	0.21
5	14	19	3.73	7.74	0.11	0.21
12.5	9	21.5	1.06	2.64	0.10	0.21
25	5	30	0.22	0.63	0.16	0.25
37.5	2	39.5	0.08	0.24	0.22	0.33
75	1	76	0.05	0.17	0.39	0.43

Table 3. Loudness ( $N$ ), roughness ( $R$ ) and fluctuation strength ( $FL$ ) of successive impulsive signal (SIS) and amplitude modulated signal (AM) with 100 % depth for various occurrence or modulation frequency ( $f_m$ ) (peak level at 70 dB).

SQ metrics		$N$ (sone)		$R$ (asper)		$FL$ (vacil)	
Waveform		SIS	AM	SIS	AM	SIS	AM
$f_m$	33 Hz	6.5	8.0	3.5	0.5	0.0	0.0
	50 Hz	7.6	8.9	2.1	0.4	0.0	0.0
	66 Hz	8.4	8.6	1.0	0.3	0.0	0.0

간에 걸쳐 잔향을 느끼는 인간 청각계의 특징을 고려한다면,  $T_i + t_d$ 는 연속성 충격소음의 진폭변조주기로 여겨질 수 있다. Table 2의 변동강도와 러프니스 값은 전체적으로 연속성 충격소음의 진폭변조주기인 즉,  $T_i + t_d$ 의 증감에 의존하는 결과 값을 보인다.

연속성 충격소음에 대한 변동강도와 러프니스 계산의 특징을 더 자세히 확인하기 위하여 Fig. 8과 같이 연속성 충격신호와 진폭변조신호를 제작하고, 변동강도와 러프니스를 계산하였다(Table 3). 이때의  $f_m$ 은 변동주파수로서 연속성 충격소음의 경우에는  $1/(T_i + t_d)$ 에 해당하는 값이다. 앞선 주관적 청음평가 결과에서 연속성 충격소음의 충격음 특성 경계가 50 Hz인 것을 논의하였다. 이에 따르면 50 Hz보다 빠르게 반복하는 연속성 충격소음은 이어진 음에 가깝게 느껴지게 된다. 이러한 경우 연속성 충격소음의 거칠기가 줄어들고 러프니스는 감소하여야 한다. Table 3에서 변조주파수  $f_m$ 이 50 Hz에서 66 Hz로 증가할 때 러프니스 계산 값 또한 감소하고 있으므로 주관적 청음평가 결과와 일치한다. 반면에 50 Hz보다 느리게 반복하는 연속성 충격소음은 완전히 독립된 충격음들의 집합으로 느껴지게 된다. 이 경우 역

시, 충격음 간 명료도가 증가하여 거칠기가 줄어들고 러프니스는 감소하여야 한다. 그러나 Table 3에서 변조주파수  $f_m$ 이 33 Hz로 감소할 때 러프니스 계산 값은 증가하고, 주관적 청음평가 결과와 일치하지 않는다. 변동강도의 경우  $f_m$ 이 32 Hz를 넘어서는 영역에서 이미 0에 수렴하여 적용가능하지 못한 값을 나타낸다. 결론적으로 변동강도와 러프니스 분석법은 연속성 충격소음이 가진 진폭변조특성에 크게 의존한다. 따라서 변동강도와 러프니스 분석법을 통한 연속성 충격소음의 표현에는 어려움이 있다.

### 3.2 라우드니스 분석

Table 4는 Fig. 6에서 보인  $t_d$ 의 평균값으로 10 s 길이의 연속성 충격신호를 제작하여 전체신호의 라우드니스와 라우드니스 변조 폭을 표시한 것이다. 라우드니스 변조 폭  $\Delta N$ 은 다음과 같은 수식을 따른다:

$$\Delta N = \frac{N_{\max} - N_{\min}}{N_{\max} + N_{\min}} \times 100(\%). \quad (1)$$

전체신호의 라우드니스는 전체신호에서 차지하는 단일 충격음의 비율이 높아질수록 증가하는 경향을 보인다.

Table 4에서  $\Delta N$ 은 비슷한 진폭변조주기(19.5, 19, 21.5 ms)를 갖는 실험에 대하여 일관되지 못한 값을 가진다. 또한 충격음으로 느껴지는 연속성 충격소음의  $\Delta N$ 은 70% 이하에서 나타나는 경향이 있으나 특징적인 수치로 집결되지 않는다. 따라서 라우드니스 변조 폭은 진폭변조의 특성 중 그 주기에 의존하지 않는 것으로 확인된다. 따라서 연속성 충격

Table 4. Loudness and loudness depth of impulsive noise ( $N$ : loudness,  $\Delta N$ : loudness depth).

$T_i$ (ms)	$t_d$ (ms)	$T_i + t_d$ (ms)	$N$ (sone)		$\Delta N$ (%)	
			40 dB	70 dB	40 dB	70 dB
2.5	17	19.5	0.59	7.84	63	42
5	14	19	0.90	11.18	53	33
12.5	9	21.5	1.51	15.44	39	25
25	5	30	1.98	19.17	20	13
37.5	2	39.5	2.17	20.55	12	7
75	1	76	2.18	20.57	10	6

소음을 라우드니스로 표현하기 위해, 라우드니스 계산에 적용된 청각필터를 개선하고 라우드니스 변화의 역치를 활용하여 연속성 충격소음을 표현하는 것이 보다 효용성이 있을 것으로 판단된다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 주관적 청음평가를 통하여 연속성 충격소음의 주요 영향인자를 파악하고, 연속성 충격소음에 대한 라우드니스, 변동강도, 리프니스 분석의 장단을 파악하였다. 주관적 청음평가의 결과에서 연속성 충격소음은 50Hz이하로 반복될 때부터 충격음 특성을 나타내는 것을 확인하였다. 향후 연속성 충격소음에 대한 연구는 50Hz의 반복주기를 경계로 그 이상과 이하로 영역을 나누어 구분할 필요가 있다. 연속성 충격소음의 인지에는 단일 충격음의 지속시간과 충격음 간 시간간격이 영향인자임을 확인하였는데, 이 두 요소는 독립적으로 영향을 주기보다도 합인 충격 주기로서 영향 주는 것을 확인하였다. 예컨대, 연속성 충격소음을 이루는 단일 충격음의 지속시간이 늘어날수록 짧은 충격음 간 시간간격에서 충격음 특성이 나타난다. 이러한 청음평가 결과를 바탕으로 객관적 음질분석 결과와 비교해 보았을 때 변동강도와 리프니스 분석결과는 연속성 충격소음이 가진 진폭변조특성에 크게 의존하는 경향을 보였다. 반면에 라우드니스 분석은 진폭변조주기에 의존하지 않으며 라우드니스 변화 역치로서 연속성 충격소음 평가인자 개발에 효용성이 있을 것으로 확인되었다.

#### 감사의 글

본 연구는 교육부 BK21+ 특화 전문인재 양성사업 및 원자력기술개발사업의 지원을 받아 진행되었습니다.

#### References

1. HEAD acoustics, "Datasheet of artemis suite advanced psycho-acoustics module" (Code 5016) (2015).

2. M. P. Norton and D. G. Karczub, *Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers*, 2nd Ed. (Cambridge University Press, Cambridge, 2003), pp. 493-512.  
 3. S. H. Shin, "Preliminary study on quantification of successive impulse noise considering auditory characteristics" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr. Suppl.*2(s) **32**, 14 (2013).  
 4. ISO-2204, *Acoustics - Guide to International Standards on the measurement of airborne acoustical noise and evaluation of its effects on human beings* (1979).  
 5. D. Poeppel, "The analysis of speech in different temporal integration windows: cerebral lateralization as 'asymmetric sampling in time'," *Speech Communication* **41**, 245-255 (2003).  
 6. H. Fastl and E. Zwicker, *Psychoacoustics - Facts and Models*, 3rd Ed. (Springer-Verlag, Berlin, 2006), pp. 61-110.  
 7. K. H. Lee, *Post-masking effect of the impulsive sounds* (in Korean), (Master's thesis, KAIST, 2011).

#### 저자 약력

▶ 이 재 원 (Jae-Won Lee)



2014년 2월: 국민대학교 나노전자물리학과 학사  
 2014년 3월~ 현재: 국민대학교 보안스마트 전기자동차공학과 석사과정  
 <관심분야> 음질평가, 소음진동제어

▶ 신 성 환 (Sung-Hwan Shin)



1997년 2월: KAIST 기계공학과 학사  
 1999년 2월: KAIST 기계공학과 석사  
 2004년 8월: KAIST 기계공학과 박사  
 2004년 9월~2005년 8월: KAIST 기계기술 연구소 BK21 연수연구원  
 2005년 9월~2008년 12월: 일본 Seikei University Post Doc.  
 2008년 12월~2013년 1월: 한국원자력연구원 선임연구원  
 2013년 3월~ 현재: 국민대학교 자동차공학과 부교수  
 <관심분야> 소음진동제어, 음질평가 및 설계, 패턴인식, 기계건전성 예측