

층간소음을 확장음장 관점에서 본 진동체화식의 표상

(Representations of Vibration Embody Formula based on the Diffusion Field Paradigm about Interlayer Noise)

김황준*

(Hwang Jun Kim)

요약

일반적으로 층간소음은 자유음장의 관점에서 데시벨(A)로 측정하고 있다. 논문에서 우리는 확산음장의 관점에서 층간진동 가속도의 측정방법을 제안한다. 제안된 방법은 공동주택의 고유진동을 가속도로 측정하여 그 평균값 20mm/s^2 를 기수의 등비수열로 나타내면, 진도계감도와 유사하게 진동체화식으로 표상할 수 있다. 이 이론을 토대로 본고는 진원지의 층간진동가속도를 HCI시스템에서 최적의 사용자 경험(UX)할 수 있도록 수식을 제시하였다.

■ 중심어 : 층간진동가속도 ; 확산음장 ; 고유진동 ; 진동체화식

Abstract

Generally, interlayer noise is measured in decibels(A) in terms of free field. In the paper, we propose a measurement method of interlayer vibration acceleration from the viewpoint of diffusion field. The proposed method can represent a vibration embody formula similar to the sensitivity of earthquake intensity when the natural vibration of apartment house is measured by acceleration and the average value 20mm/s^2 is represented by an the geometric progression of radix. Based on this theory, this paper proposed a method to show the optimal user experience (UX) by applying the interlayer vibration acceleration of the epicenter to the system of human - computer interaction(HCI).

■ keywords : Interlayer Vibration Acceleration ; Diffuse Field ; Natural Vibration ; Vibration Embody Formula

I. 서론

일반적으로 공동주택의 구조는 무량관구조, 라멘구조, 벽식구조가 있다. 이 구조 중에서 층간소음의 분쟁은 주로 벽식구조에서 크게 발생한다. 한국에서 벽식 구조는 1980년대 분당, 일산 등 1기 신도시의 공동주택에 주로 적용하였다. 현 시점에서 공동주택의 구조적인 문제로 인한 층간소음을 개선하기 어려운 실정이다. 따라서 이웃 간의 분쟁을 해결하기 위해서는 주민자율조정방식으로 해결할 수 있는 정부차원의 많은 연구와 지원이 필요한 실정이다[1].

공동주택의 주거생활에서 층간소음은 주로 위층의 거주자가 발뒤꿈치로 바닥에 충격하면 진동 S(횡)파가 슬래브로 전달되어 아래층의 밀폐된 실내공간에서 소음 P(종)파로 나타나는 확산음장이다. 이 확산음장의 특성은 밀폐된 공간에서 음장의 세기가 모든 곳에서 같고, 어느 한 위치에서의 음은 모든 방향으

로부터 입사되어 감쇠가 거의 발생하지 않는다. 확산음장의 P(종)파와 세기는 4방향으로 센서를 간섭함에 따라 1방향으로 진행하는 자유음장에 비하여 1/4정도 적게 측정된다[2].

따라서 공기매질의 확산음장은 자유음장과 구별할 수 있게 측정하기에 센서기기의 물리적 한계가 있다. 이러한 한계를 해결하기 위해 진원지의 고체매질에서 진동가속도를 측정하게 되었고, 이를 표상하는 진동체화식을 연구하게 되었다.

II. 본론

1. 확산음장의 측정방법

현재 층간소음의 측정방법은 자유음장의 P(종)파를 마이크음향센서의 데시벨(A)단위로 측정하고 있다. 이 단위는 음의 3요소 중 세기만 측정하여 확산음장의 불쾌감을 나타내는데 물리적 한계가 있다. 이러한 한계를 나타내는 지표로서 한국 환경공

* 정회원, 서울시립대학교 일반대학원 토목공학과

이 논문은 2013년도 저자의 개발제안(No. S2100446)을 중소기업청의 지원과 한국산업기술평가관리원의 지원에 의해 수행된 연구임.

접수일자 : 2019년 03월 21일

게재확정일 : 2019년 04월 23일

수정일자 : 1차 2019년 04월 08일, 2차 2019년 04월 16일

교신저자 : 김황준, e-mail : sanariomi@gmail.com

단의 층간소음이웃사이센터에서 현장진단민원 접수하여 측정된 결과를 살펴보면, 표 1과 같이 법적기준 이하임에도 진단요청 민원인의 92.6%나 불쾌감을 느끼고 있는 조사결과에서 확인할 수 있다[3].

표 1. 층간소음의 현장진단결과 법적기준초과 현황

구분		계	기준이내	기준초과
누 계	건수	1,271	1,177	94
	비율(%)	100.0	92.6	7.4
'14년(6~12월)		81	64	17
'15년		159	144	15
'16년		203	198	5
'17년		409	383	26
'18년		419	388	31

국제표준화기구(ISO)에서 정한 측정방법으로 진동S(횡)파는 변위를 측정하여 진동속도, 진동가속도레벨, 진동가속도로 환산한다[2]. 이 규정에 따라 변위를 측정할 경우에 층간소음을 유발하는 슬래브의 진동은 마이크로미터(μm)의 미세단위로 측정해야 한다. 현실적으로 미세단위는 측정하기 쉽지 않고 오차교정도 어렵다. 이러한 문제점을 해결하고자 표 2와 같이 표본변위 0.0029mm를 환산표로 분석한 결과, 변별력이 가장 높은 35~50mm/s²인 진동가속도의 물리량을 측정방법으로 선택하였다.

표 2. 변위 0.0029mm에 대한 진동단위의 ISO환산

변위 (mm)	진동속도 (cm/s)	진동가속도레벨 (dB)	진동가속도 (mm/s ²)
0.0029	0.01	51	35
		52	40
		53	45
		54	50

이 연구에서 진동가속도를 측정하는 센서는 아날로그 타입의 MEMS IC 일명 g(gravity)센서를 적용했다. 이 센서의 특징은 초단위의 미세진동신호의 증폭이 가능하고, 단위시간에 대한 진동가속도 증감비로 수치화하는데 용이하며, 불규칙한 진동에 대한 아날로그 물리량을 디지털 FFT기준진동수정규화스펙트럼(이하 'FFT스펙트럼'이라 한다)으로 변환하기 쉽고 빠르다[4].

구체적 실험방법은 공동주택의 각층 슬래브에 진동가속도의 센서를 설치하여 지구환경으로부터 기인하는 고유진동가속도와 거주자의 활동으로부터 유발하는 층간진동가속도로 구분하여 측정했다. 이렇게 측정된 진동가속도의 데이터를 활용하여 거주자의 감도를 수식으로 나타내고자했다. 이 수식은 인간-컴퓨터 상호작용(HCI)으로 진동가속도의 유용성, 사용성, 감성이 충족되도록 진도계감도와 어느 정도 일치되게 최적의 사용자경험(UX)으로 시스템화하고자 했다[5].

2. 고유진동가속도의 유용성

먼저, 확산음장을 측정하기 위해 가장 완전한 물리량으로 기준치를 정해야 했다. 이 기준치를 정하기 위해 해발고가 낮은 인천지역의 공동주택을 선정하여 대기흐름이 고요한 정오시간대 2016년 4월 14일 11시 40분에서 12시 06분까지 26분간 초당 1개씩 813개(42번~855번)를 표 3과 같이 실시간으로 고유진동가속도를 측정하였다.

표 3. 공동주택의 고유진동가속도 측정

번호	측정시간	고유진동가속도(mm/s ²)
42	2016/04/14 12:06:00	16
43	2016/04/14 12:05:59	22
44	2016/04/14 12:05:58	19
45	2016/04/14 12:05:57	38
46	2016/04/14 12:05:56	27
47	2016/04/14 12:05:55	89
48	2016/04/14 12:05:54	21
49	2016/04/14 12:05:53	21
50	2016/04/14 12:05:52	20
.	.	.
.	.	.
182	2016/04/14 12:03:23	13
.	.	.
233	2016/04/14 12:02:32	28
.	.	.
256	2016/04/14 12:02:09	27
.	.	.
412	2016/04/14 11:58:38	28
.	.	.
416	2016/04/14 11:58:34	27
.	.	.
.	.	.
853	2016/04/14 11:40:02	19
854	2016/04/14 11:40:01	19
855	2016/04/14 11:40:00	19

이들 진동가속도를 FFT스펙트럼으로 나타내면, 813개 중에서 '1로 시작'되는 13 ~ 27 mm/s²는 고유진동으로 분류하였다. 그러나 표 3에서 412번 진동가속도 28 mm/s²이상부터는 대기흐름의 크기가 커서 층간진동처럼 기준진동수로 측정되므로 고유진동에서 제외하였다.

이 고유진동수에 해당하는 고유진동가속도 13 ~ 27 mm/s²를 FFT스펙트럼으로 나타내면, 다음 표본과 같이 최소치 13 mm/s²(그림 1), 중간치 20 mm/s²(그림 2), 최대치 27 mm/s²(그림 3)로 측정되었다.

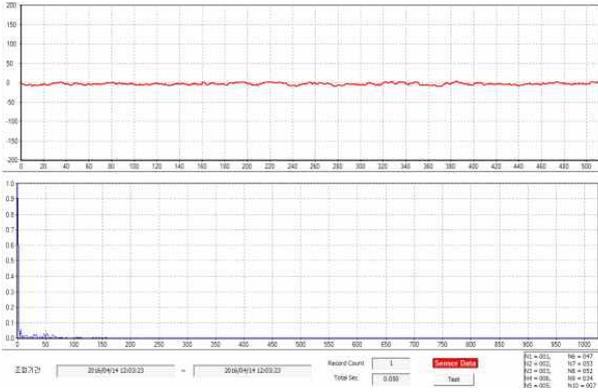


그림 1. 고유진동 최소 13 mm/s² 표본스펙트럼

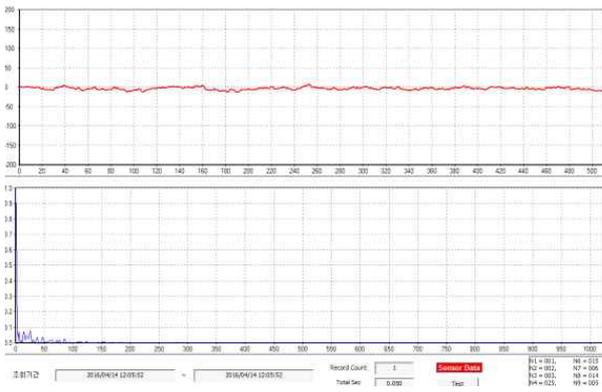


그림 2. 고유진동 중간 20 mm/s² 표본스펙트럼

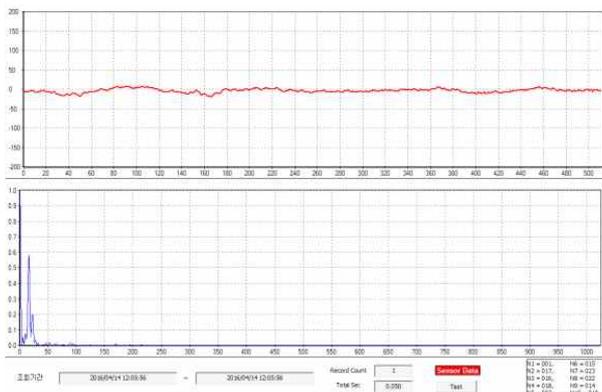


그림 3. 고유진동 최대 27 mm/s² 표본스펙트럼

상기 표본 스펙트럼은 고유진동에 대하여 1초당 기준으로 하여 진동가속도를 나타내는 위 그래프와 1초당 FFT스펙트럼으로 나타내는 아래그래프이다. 이 중에서 FFT스펙트럼을 확대

해서 그림 4와 같이 나타내면, 진동가속도는 '1로 시작'되는 스펙트럼과 '1 이하로 변동'되는 스펙트럼으로 분류할 수 있다.

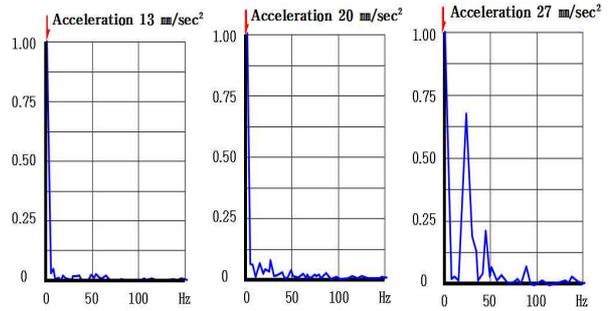


그림 4. 고유진동의 FFT스펙트럼

고유진동에서 '1로 시작'되는 FFT스펙트럼은 항상 일정하게 존재하는 지구공명의 확산음장의 물리량으로 추론하고 있다. 이 지구공명은 NASA[6], Schumann공명[7], Nickolaenko의 ELF 전리층 측정[8], Greifinger의 ELF 전리층 측정[9], Williams 등에 대한 전리층모델[10]에서 진동수가 측정되므로 고유진동은 항상 존재하고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 '1이하로 변동'되는 FFT스펙트럼은 대기흐름이 공동주택에 변화되게 작용하여 측정된 스펙트럼에서 확인할 수 있다.

상기 고유진동가속도를 '1로 시작'과 '1이하로 변동'을 정리하면, 표 4와 같이 지구공명에 의한 진동가속도 10 mm/s²와 대기흐름의 의한 측정가속도 3 ~ 17 mm/s²의 평균진동가속도 10 mm/s²를 합계하여 평균 진동가속도 20 mm/s²로 분석할 수 있다.

표 4. 고유진동의 측정가속도와 평균가속도

고유진동의 분류		측정가속도 (mm/s ²)	평균가속도 (mm/s ²)
스펙트럼 구분	진동인자 구분		
1로 시작(고정)	지구공명 추론	10	10
1이하로 변동	대기흐름 영향	3 ~ 17	10
합 계	고유진동	13 ~ 27	20

따라서 고유진동가속도 20mm/s²는 공동주택에서 확산음장을 분석하는 경험수치의 기준단위로서 유용성을 충족하고자 하는 시스템에 적용할 수 있었다.

3. 층간진동가속도의 사용성

사용성은 층간소음의 확산음장 P(중)파로 인하여 거주자의 불쾌감을 나타내는데 있어 S(횡)파의 고유진동가속도 20 mm/s²을 기준단위로 하여 층간진동가속도의 수식으로 표상하고자 했다. 이에 따라 고유진동가속도 20 mm/s²을 기수로 사용하여 등비수열로 나타내면, 표 5의 등비수열 및 그림 5의 그래프와 같이 진동가속도 20 ~ 10,240 mm/s²에 대한 진동지수 0 ~ 9를

도출할 수 있다.

표 5. 층간진동가속도의 등비수열

진동지수	층간진동가속도			
0	20	×	2 ⁰ (1)	= 20 mm/s ²
1	20	×	2 ¹ (2)	= 40 mm/s ²
2	20	×	2 ² (4)	= 80 mm/s ²
3	20	×	2 ³ (8)	= 160 mm/s ²
4	20	×	2 ⁴ (16)	= 320 mm/s ²
5	20	×	2 ⁵ (32)	= 640 mm/s ²
6	20	×	2 ⁶ (64)	= 1,280 mm/s ²
7	20	×	2 ⁷ (128)	= 2,560 mm/s ²
8	20	×	2 ⁸ (256)	= 5,120 mm/s ²
9	20	×	2 ⁹ (512)	= 10,240 mm/s ²

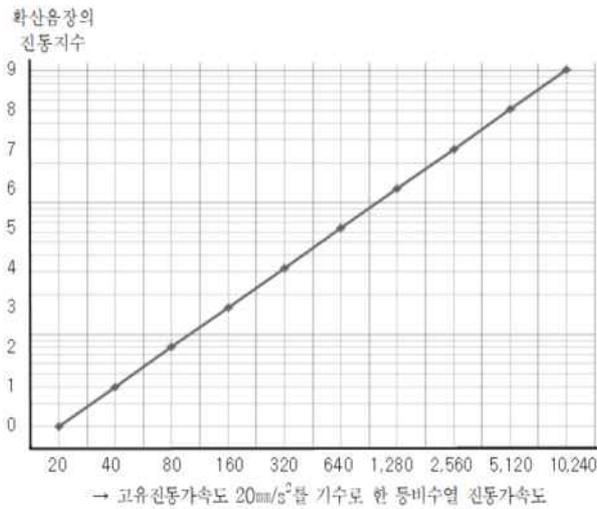


그림 5. 층간진동가속도의 그래프

따라서 공동주택에서 층간진동가속도의 사용성은 확산음장의 물리적 크기를 계산하는 방법에 있어 등비수열 대수함수($\ln 2^n$)의 수식으로 정리하면, 다음 식(1)과 같이 진동체화식(Ve : Vibration Embody Formula)으로 나타낼 수 있다.

$$Ve = \ln 2 \left(\frac{a^n}{a^0} \right) \quad (0 \leq Ve \leq 9) \quad (1)$$

여기서,

a^0 는 공동주택에서 고유진동의 평균가속도 20 mm/s²이다.

a^n 은 공동주택에서 층간소음의 확산음장을 유발하는 층간진동가속도로서 최대 10,240 mm/s²이다.

4. 층간진동가속도의 감성

공동주택의 층간진동가속도는 2016년 4월 14일 16:46:12부터 16:49:48까지 3분 37초에 걸쳐 실시간으로 측정하여 진동지수를 표 6과 같이 산출하였다.

표 6. 진동가속도의 실시간 측정 및 진동지수의 산출

번호	실시간 측정	층간진동가속도 (mm/s ²)	진동지수 (Ve)
1	2016/04/14 16:46:12	1,656	6.37
2	2016/04/14 16:46:20	2,070	6.69
3	2016/04/14 16:46:21	2,338	6.87
4	2016/04/14 16:46:24	2,710	7.08
5	2016/04/14 16:47:01	2,444	6.93
6	2016/04/14 16:47:03	4,037	7.66
7	2016/04/14 16:47:07	497	4.64
8	2016/04/14 16:47:09	191	3.26
9	2016/04/14 16:47:19	1,709	6.42
10	2016/04/14 16:47:21	297	3.89
11	2016/04/14 16:47:22	256	3.68
12	2016/04/14 16:47:24	430	4.43
13	2016/04/14 16:47:26	553	4.79
14	2016/04/14 16:47:27	218	3.45
15	2016/04/14 16:47:37	1,087	5.76
16	2016/04/14 16:47:38	839	5.39
17	2016/04/14 16:47:42	1,001	5.65
18	2016/04/14 16:48:38	265	3.73
19	2016/04/14 16:48:42	216	3.43
20	2016/04/14 16:48:45	512	4.68
21	2016/04/14 16:48:46	227	3.50
22	2016/04/14 16:48:48	187	3.22
23	2016/04/14 16:48:49	168	3.07
24	2016/04/14 16:48:51	212	3.41
25	2016/04/14 16:48:52	664	5.05
26	2016/04/14 16:48:54	3,900	7.61
27	2016/04/14 16:48:57	300	3.91
28	2016/04/14 16:48:59	381	4.25
29	2016/04/14 16:49:01	405	4.34
30	2016/04/14 16:49:02	1,829	6.51
31	2016/04/14 16:49:04	529	4.73
32	2016/04/14 16:49:05	201	3.33
33	2016/04/14 16:49:30	85	2.09
34	2016/04/14 16:49:45	461	4.53
35	2016/04/14 16:49:48	180	3.17

이 층간진동가속도의 데이터는 확산음장의 감도를 거주자가 느끼는 감성의 크기로 진동지수를 나타내고자 했다. 따라서 사람들이 느낄 수 있는 진도계감도의 미진에 해당하는 80 mm/s² 이상에 해당하는 층간진동가속도 85 ~ 4,037 mm/s² 를 35개 측정된 것이다. 이 시스템에서 측정된 스펙트럼은 다음 그림과 같이 최소표본 85 mm/s²(그림 6)과 최대표본 4,037 mm/s²(그림 7)으로 나타냈다.

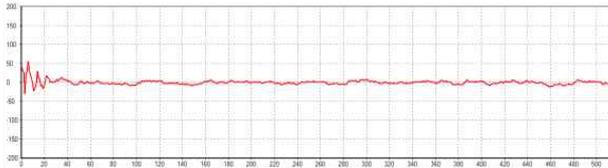


그림 6. 최소표본 85mm/sec²

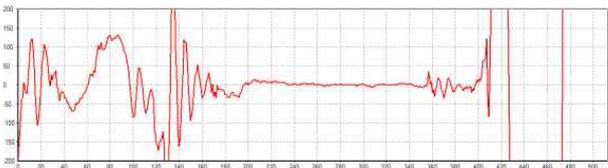


그림 7. 최대표본 4,037mm/sec²

상기 측정데이터에 대하여 층간진동가속도의 감성을 표상하기 위해서 표 7과 같이 진도계감도와 비교하면, 지표상으로도 최적의 사용자 경험을 예감할 수 있다.

표 7. 층간진동과 진도계감도

층간진동		진도계감도			
가속도	지수	감도	가속도	진도계감도의 경험	
20	0	0 무감	80이하	인체 느껴지지 않으나 지진계에 기록된다.	
40	1		I 미진	80~250	지진에 예민한 사람만이 느낄 정도이다.
80	2				
160	3	II 경진	250~800	많은 사람들이 느껴질 정도이며, 미닫이문의 움직임이 관찰된다.	
320	4				
640	5	III 약진	800~2,500	가옥이 흔들리고 미닫이문이 덜컹거린다.	
1,280	6				
2,560	7	IV 중진	2,500~8,000	가옥의 진동이 심하고 많은 사람들이 불안해하며 문밖으로 뛰어나올 정도이다.	
5,120	8				
10,240	9				

그러므로 공동주택에서 층간진동가속도에 대한 확산음장의 감성은 진동지수 5정도일 때 대부분 사람들이 층간소음을 느끼고, 통상 진동지수 7정도일 때 확산음장의 강한 불쾌감을 느낀다. 여기에 사용자 경험에 따라 인내한계를 시스템에 설정하면 개인의 취향에 따라 감성정도를 조절하여 표상할 수 있다.

5. 주민자율조정방식 테스트베드

테스트베드는 인천지역의 공동주택 408동을 선정하여 가구별로 IP를 표 8과 같이 부여하였다[4].

표 8. 공동주택 테스트베드 IP 부여

호수		호수		호수		호수	
TID	IP	TID	IP	TID	IP	TID	IP
1001		1002		1003		1004	
33	133	34	134	35	135	36	136
901		902		903		904	
29	129	30	130	31	131	32	132
801		802		803		804	
25	125	26	126	27	127	28	128
701		702		703(미설치)		704(미설치)	
21	121	22	122	23	123	24	124
601		602		603(미설치)		604	
17	117	18	118	19	119	20	120
501		502		503		504	
13	113	14	114	15	115	16	116
401		402		403(미설치)		404	
9	109	10	110	11	111	12	112
301(미설치)		302		303		304	
5	105	6	106	7	107	8	108
201(미설치)		408동 TID:1~36 IP:10.10.108.101~136				204(미설치)	
3	103					4	104
101						104	
1	101					2	102

그리고 층간진동가속도를 측정하여 층간소음의 세기를 분석하기 위해 2014년 4월 22일 ~ 25일 동안 평균데이터를 시스템으로 그림 8과 같이 수집하였다[4].



그림 8. 층간진동가속도의 평균데이터수집

그림 8의 데이터수집에서 가구별로는 903호에서 513mm/s²가 가장 높았고, 시간대별로는 20시에 289mm/s²가 가장 높게 분석되었다. 이 층간진동가속도의 데이터를 진동체화식에 적용하여 진도

계감도와 유사하게 진동지수로 나타내면, 가구별로 가장 높은 903호의 513mm/s²는 4.68로 표상할 수 있고, 시간대별로 가장 높은 20시의 289mm/s²는 3.85로 표상할 수 있다. 이렇게 데이터를 표상하여 각 건물특성과 거주자 취향에 맞게 인터페이스를 접하게 되면 먼저 해당 인터페이스의 이용 방법을 학습하게 되고 이를 통해 더 복잡한 인지 활동을 진행할 수 있다[11].

그러므로 진동체화식의 분석시스템이 널리 보급되면, 평상시에는 층간소음의 물리적 크기를 실시간 측정할 수 있어 주민들의 활동여건에 맞게 평시, 저녁, 수면 등 시간대별로 경보기준을 정하여 이웃 간의 분쟁을 주민자율조정방식으로 해결할 수 있다. 또한, 여러 공동주택들이 동시에 진동하는 지진 및 공사장 인공지진일 경우에는 내진성능에 맞춰 건물피해를 실시간 예측할 수 있으므로 국토교통부의 건설사업정보시스템에 연결하면 공간정보 GIS의 서비스를 고도화할 수 있다[12].

III. 결 론

본 논문에서는 공동주택의 층간소음을 확산음장의 관점에서 진동가속도의 유용성, 사용성, 감성으로 최적의 사용자 경험(UX)할 수 있도록 진동체화식(Ve)을 표상하였다.

이 진동체화식은 인지과학이 추구하는 정보처리, 표상처리, 계산과정 형식화, 동역학적 모델, 인지의 신경기초, 공학적 접근, 다양한 학문적 접근에 적용할 수 있도록 표상하였다[13].

본 연구의 결과물인 진동체화식은 HCI에서 추구하는 사용자 경험으로 진도계감도와 어느 정도 유사하게 인지될 수 있도록 진동지수를 제시하였다. 향후에는 진동의 가속도와 진동수를 융합하여 동일한 크기의 진동가속도일 경우에도 진동수의 크기에 따라 다르게 느끼게 되는 진동감쇠특성을 추가하여 표상할 수 있도록 보다 개선된 수식을 제시할 계획이다.

REFERENCES

[1] 한기정, “공동주택 층간소음 개선방안,” *한국건설법무학회논문지*, 건설법무 3권, 87-110쪽, 2017년

[2] 김재수, “소음진동학,” *서울: 세진사*, 75-77쪽, 2013년

[3] 한국환경공단 국가소음정보시스템, “층간소음이웃사이 센터 운영결과보고서(2018년),” http://www.noiseinfo.or.kr/about/data_view.jsp?boardNo=222&keyfield=whole&keyword=&pg=1(accessed February, 25, 2019).

[4] 이종원, “공동주택 층간소음을 유발하는 진동-진파를 예측하여 거주자 스스로 소음저감을 유도하는 단말기 및 분석관리 시스템 개발,” *주관기관 주식회사 LNSC 중소기업청 기술개발 최종보고서*, 2014년 5월

[5] 김진우, “HUMAN COMPUTER INTERACTION 개론 : UX Innovation을 위한 원리와 방법,” *안그래픽스*, 26-33쪽, 2017년

[6] Wilson, J., “Schumann Resonance NASA’s Goddard Space Flight Center,” https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/lightning-planets.html (accessed February, 21, 2019).

[7] Schumann, W. O., “Über die strahlungslosen Eigenschwingungen einer leitenden Kugel, die von einer Luftschicht und einer Ionosphärenhülle umgeben ist,” *Zeitschrift für Naturforschung A*, 7(2), Aus dem Elektrophysikalischen Institut der Technischen Hochschule München, pp. 149-154, 1952.

[8] Nickolaenko, A. P., “ELF radio wave propagation in a locally nonuniform Earth-ionosphere cavity,” *Radio Sci*, 29(5), American Geophysical Union, pp. 1187-1199, 1984.

[9] Greifinger, C. and Greifinger, P., “Approximate method for determining ELF eigenvalues in the Earth-ionosphere waveguide,” *Radio Sci*, 13(5), American Geophysical Union, pp. 831-837, 1978.

[10] Williams, E. R., Mushtak, V. C. and Nickolaenko, A. P., “Distinguishing ionospheric models using Schumann resonance spectra (DOI 10.1029/2005JD006944),” *Journal of Geophysical Research*, 111(D16107), American Geophysical Union, pp. 1-10, 2006.

[11] 황이관, 김형우, “Interface Assessment를 통한 액티브 시니어의 사용자 경험 분석,” *스마트미디어저널*, 제6권, 제4호, 79-87쪽, 2017년 12월

[12] 옥현, 김성진, “건설사업정보시스템의 고도화를 위한 공간정보(GIS) 적용방안에 관한 연구,” *스마트미디어저널*, 제4권, 제4호, 70-79쪽, 2015년 12월

[13] 이정모, 장병탁, “인지과학과 인지시스템,” *한국정보과학회지*, 제30권, 제12호, 9-18쪽, 2012년 12월

저 자 소 개



김 황준(정회원)

1991년 조선대학교 토목공학과 학사졸업.
2000년 서울시립대학교 토목공학과 석사졸업.
2012년 군산대학교 전자정보공학부 박사과정.
2018년 서울시립대학교 토목공학과 박사과정.

<주관심분야 : U-City서비스, 융합스마트미디어>