

ACF의 시간적 요소에 의한 강의실 요해도 평가

김 정 미* 전 진 용**

*한양대학교 건축공학과 대학원 **한양대학교 건축공학과 조교수

Evaluating Speech Intelligibility of Lecture Rooms Using Temporal Factors in Autocorrelation Function(ACF)

Kim Jeong Mi Jeon Jin Yong

Graduate School of Achitectural Acoustics, Hanyang University, Haengdangdong,
Sungdong-ku, Seoul 133-791, Korea

*kjme00@hanmail.net **jyjeon@hanyang.ac.kr

요 약

강의실의 언어 요해도에 관한 연구는 그 평가방법과 지표에 대한 주제로 꾸준히 이루어져 왔다. 기존의 지표들에서는 전체 음에너지에 대한 초기음에너지의 비율로 계산하거나(C80, D50) 주파수 대역별 음에너지의 감쇠율(RASTI)을 구하여 명료도를 평가하였다. 본 연구에서는 Autocorrelation Function (ACF)의 시간적 요소를 통해 강의실의 언어 요해도를 평가하였다. 먼저 시퀀레이션 대상 강의실에서 무향실 음원이 제시되었을 때 12개 수음점에서 음향특성을 측정·분석하였으며 청감실험과 ACF 분석을 통해 강의실 요해도와의 상관관계를 규명하였다.

1. 서 론

언어와 음악이 명료도에 대한 연구들은 초기음과 후기음의 에너지의 감소비율에 대한 관점에서 이뤄져 왔다. 기존의 연구들을 통해 명료도에 영향을 미치는 건축 음향적인 요소로서는 강연자와 청취자 사이의 거리와 잔향 시간, 그리고 주변 소음레벨과 음성레벨의 비율(S/N ratio)로서 정리되었다. 명료도는 잔향과 반비례하는 경향을 보이므로 명료도를 높이기 위해 잔향을 줄이는 방법이 적용되었으나 신호도 실험결과와 일치하지 않는 경향성을 보여왔다. 본 연구에서는 시간에 따른 신호의 ACF에서 파생되는 시간적 요소인 t_e (effective

duration) 와 1차 반사음의 도달 시간에 의해 명료도를 표현하는 실험적인 방법을 제시하고자 한다

2. 연구의 배경

(1) 음에너지비율 의한 음향지표

음에너지의 비율로서 평가하는 방법이 주유를 이루었다. 즉 초기의 음에너지는 직접음의 인식을 보장하나 일정 시간이 지난 후에 도달하는 후기 반사음들은 오히려 요해도를 감소시킨다는 개념에서 초기음 에너지 비율(Early-to-late energy ratio)을 정량적으로 규명하였다. 하스(Haas)는 초기음 에너지 비율에 대한 선구적인 연구자로서 초기음 에너지가 음성의 요해도(Intelligibility)와 음악의 명료도(Clarify)의 인식에 주효함을 말하였다.⁽¹⁾ 이후 음성의 요해도를 초기음 에너지 비율로서 정량화하는 개념으로 전체의 음에너지에 대하여 초기 0.05초까지의 음에너지 비율로서 Thiele는 D(Deutlichkeit)를 제안하였으며, 음악의 명료도는 0.08초까지 음에너지와 전체 음에너지와의 비율이 제안되었다.

$$D = \int_0^{0.05} p^2(t) dt / \int_0^{\infty} p^2(t) dt$$

$$C = 10 \log [\int_0^{0.08} p^2(t) dt / \int_{0.08}^{\infty} p^2(t) dt]$$

또한 Burger에 의해 초기음에너지비율에 음성신호의 크기와 배경소음 레벨의 S/N비 개념을 추가한 유효음에너지 비율이 제안되기도 하였다. 음성전달지수(STI)는

가청주파수와 변조주파수의 두 가지 변수에 의해 구해지는 S/N비이다. STI의 98개의 측정값을 5개로 단순화한 RASTI는 현재 ISO의 표준화된 규격으로 인정되고 있다. 또한 주파수 영역에서 음성레벨과 소음레벨의 분석을 통해 음성전달성능을 예측하는 명료도 지수(Articulation Index) 측정 방법이 연구되어 왔다.

(2) Autocorrelation function(ACF)⁽²⁾

인간의 두뇌 청감 시스템(human auditory brain system)을 기반으로 한 ACF는 $\phi(0)$, τ_1 , τ_i , ϕ_i 의 4개의 시간적 요소를 갖는다. 어떤 시간에서의 신호값과 다른 시간에서의 값과의 상관성을 나타내는 것으로서 power density 스펙트럼에 대한 함수로 ACF를 표시하면 다음과 같이 정의된다.

$$\phi_p(\tau) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} p'(t)p'(t+\tau)dt$$

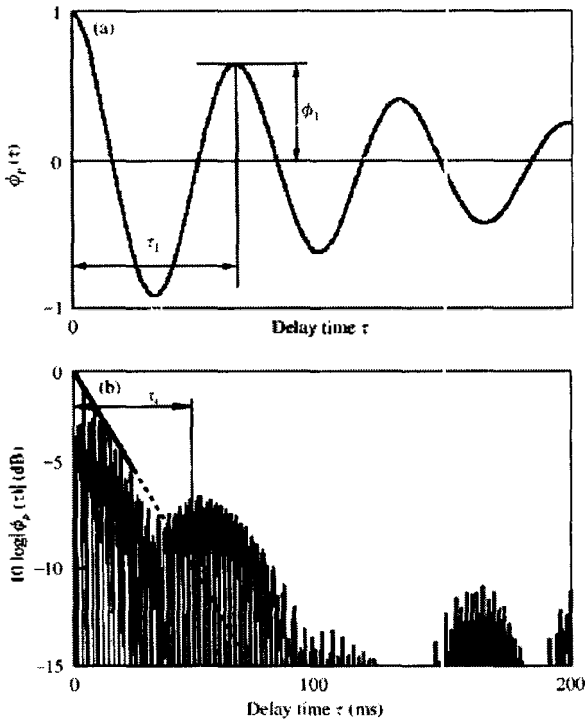


그림 1. ACF 요소들의 개념도

ACF에서 파생되는 4개의 시간적 요소의 정의는 다음과 같다.

- ① $\phi(0)$ 는 귀에 도달하는 음의 에너지를 대표한다

$$\phi(0) = [\phi_H(0)\phi_R(0)]^{1/2}$$

$\phi_H(0)$ 와 $\phi_R(0)$ 는 $\tau=0$ 일 때 왼쪽과 오른쪽 귀에 도달하는 초기에너지이다.

- ② 그림 1과 같이 최대치(peak)와 지연시간(delay)이 표시되는 웨이브 구조(fine structure)에서 볼 때 첫 번째 피크까지의 지연시간과 피크의 진폭을 각각 τ_1 과 ϕ_1 이라고 한다. n 번째 피크에 대한 지연시간과 진폭은 τ_n 과 ϕ_n 이다.

- ③ ACF의 진폭에 대한 유효길이를 τ_e 라고 하며 초기음압이 10dB감소하는 시간을 뜻하며 이것은 잔향에 대한 정보를 제공한다.

3. 청감실험

3. 1. 경로차에 대한 청감실험

6명(23-28세의 대학생 남녀)의 피험자를 대상으로 강의실에서 세가지 경로차에 대한 청감 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 음원(white-noise)는 Sound edit program을 이용하여 발생시켰으며, 실험 방법으로는 150ms의 white-noise를 기준 음원으로 하고, 비교음원을 140ms에서 200ms까지 각각 2ms, 5ms, 10ms 간격으로 하였다. 음원은 150ms을 기준음으로 할때 pair comparison 방법으로 제시하였다⁽⁴⁾(그림 2 참조). 기준 음원이 제시된 1초(ISI, Interstimulus Interval) 후에 비교음을 제시하였으며, 뒤에 제시되는 음이 더 작게 들리면 0, 더 길게 판단되면 1로 표기하도록 하여 결과의 평균으로 정답률을 표시하였다(그림 3).

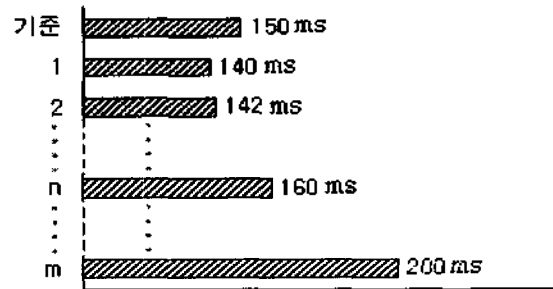


그림 2. white-noise의 길이판단 실험 설계

실험 결과 그림 3에서와 같이 10ms의 반사음의 경로 차이에는 모든 피험자들이 그 차이를 분명히 구별할 수 있었다. $155 \pm 1ms$ 영역에서 0.75의 정답률을 보이는데 이를 통해 약 5ms가 길이차이를 인지할 수 있는 최소값으로 볼 수 있다. 따라서 건축실내음향에서 공간감을 대표하는 파라메타인 ITDG (Initial Time Delay Gap)의 최소 청감치(JND or Minimum Perceivable Difference)는 5ms인 것으로 나타났다.

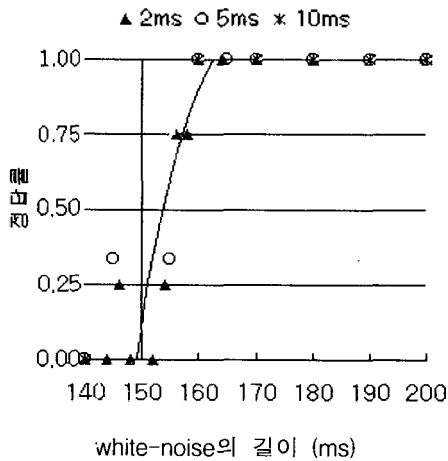


그림 3. white-noise의 길이 판단과 점답률

3.2 명료성 선호도에 대한 청감실험과 ACF

앞의 실험결과에 근거하여 본 실험에서 수음자 사이의 1차 반사음의 경로차가 5ms 과 그 이상이 되도록 수음점을 정하였다(그림 4 참조). 시뮬레이션을 위한 강의실(12m×15m×3m)은 측면에 흡음률 0.01의 반사재를 사용하였고 천정은 흡음률 0.5의 흡음재를 사용하였으며 후벽과 바닥에도 흡음재를 사용하여 반사음의 영향을 측면이외의 반사음의 영향을 최소화하였다. 이 공간의 잔향은 0.76초(RT_{300})로 나타났다. 음원과 수음점 사이의 거리와 측면을 통한 직접음 및 1차 반사음의 도달시간을 표 1에 나타내었다. Aural-ization을 위해 음향 simulation program인 ODEON 3.1을 사용하였으며 Speech 음원은 9초길이의 무향실음원⁽⁵⁾을 사용하였다.

명료도에 대한 주관적 판단을 위해 각 수음점의 임펄스 특성에 convolution 된 각각의 음원을 제시하여 피험자에게 강의를 듣기에 '명료하지 않다' 와 '명료하다' '를 rating scale을 이용하여 평가하도록 하였다. 각 음원에 대하여 ACF의 시간적 지표를 산출하였다.

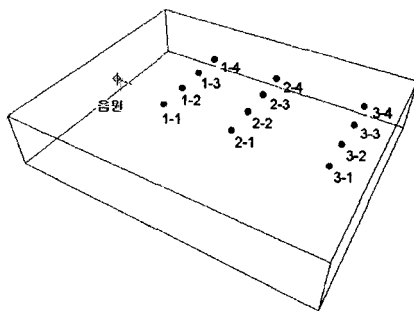


그림 4. 음원과 수음점의 위치

표 1. 각 수음점까지의 거리(s) 및 직접음(t_0)과 측면반사음 도달거리(t_1)

위치	S(m)	t_0 (ms)	t_1 (ms)	위치	S(m)	t_0 (ms)	t_1 (ms)
1-1	3.1	12.4	36	2-3	7.81	11.1	32
1-2	3.5	10.7	31	2-4	8.68	9.9	29
1-3	4.6	9.1	27	3-1	12	17.0	49
1-4	6.0	7.6	22	3-2	12.1	15.8	46
2-1	7.0	13.9	41	3-3	12.5	14.8	43
2-2	7.2	12.5	36	3-4	13.1	13.9	40

4. 분석 및 결과

τ_0 값은 주로 음원의 특성을 나타내주며, 특별히 음원과 음장에 대한 주관적인 평가의 차이를 나타내 주는 중요한 지표가 된다⁽⁶⁾.

본 실험에서 지정한 위치에서 수음한 음원의 τ_0 값은 공간에 대한 정보를 포함하고 있다. 이를 위해 각 수음점의 τ_0 값에서 음원의 τ_0 값을 제거하였으며, 첫 번째 반사음의 시간(표 1)과의 비율(t_1/τ_0)로서 각 지점의 음향특성을 나타내었다. 그림 5는 (t_1/τ_0)에 따른 피험자들의 선호도 평가 청감실험 결과를 평균한 것이다.

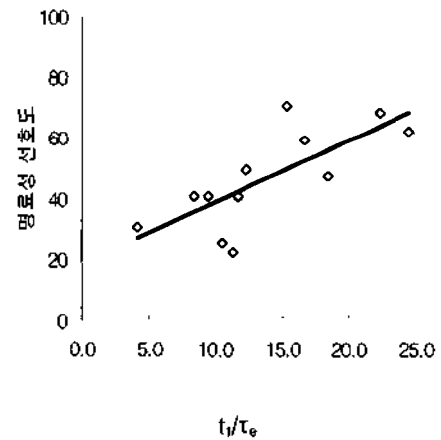


그림 5. t_1/τ_0 와 명료도 선호도와와의 관계

표 2에서와 같이 각 사람들의 판단치는 5%미만의 유의도에서 t_1/τ_0 값과 0.7-0.8의 높은 상관관계를 갖는 것으로 나타났다. 표 3은 각 좌석별 위치에 따른 선호도와 ACF값 그리고 다른 음향지표들의 결과값을 비교한 것이다.

표 2. t_l/t_e 값과 피험자의 선호도간의 상관관계

	t_l/t_e	HJ	CY	JK	HU	HK	HH
t_l/t_e							
HJ	0.19 0.55						
CY	0.76 0.00**	0.54 0.07					
JK	0.51 0.09	0.40 0.19	0.55 0.07				
HU	0.84 0.00**	0.48 0.11	0.94 0.00**	0.58 0.05			
HK	0.71 0.01*	0.29 0.36	0.74 0.01*	0.59 0.04	0.76 0.00**		
HH	0.78 0.00**	0.58 0.05	0.94 0.00**	0.7 0.01*	0.94 0.00**	0.88 0.00**	

* 유의도 0.05수준 ◦ 상(2-tailed)
** 유의도 0.01수준 ◦ 상(2-tailed)

표 3. 좌석별 명료성 선호도와 음향파라메타 값

좌석 위치	선호도	t_l/t_e	ITDG	$\phi(0)$	C80	D50	Ts	RASTI
1-1	41.0	11.7	27	56.1	6.1	0.73	53	0.71
1-2	41.0	9.5	21	55.8	5.7	0.7	58	0.74
1-3	40.8	8.4	14	55.3	4.7	0.66	71	0.68
1-4	30.6	4.2	5	55.3	3.3	0.59	93	0.71
2-1	22.6	11.3	21	53.7	4.2	0.58	76	0.71
2-2	25.4	10.6	15	53.7	4.1	0.58	80	0.74
2-3	47.2	18.4	9	53.6	4	0.59	80	0.73
2-4	49.4	12.3	4	53.9	2.8	0.56	90	0.75
3-1	59.4	16.7	14	53	3.5	0.6	83	0.67
3-2	62.2	24.4	11	52.9	3.2	0.59	87	0.68
3-3	70.4	15.4	7	53.1	2.8	0.57	91	0.67
3-4	68.2	22.3	2	53.2	2.3	0.54	100	0.68

표 4. Spearman's rho 상관계수

	선호도	t_l/t_e	ITDG	$\phi(0)$	C80	D50	Ts	RASTI
선호도	1							
t_l/t_e	0.77 0.00	1						
ITDG	-0.6 0.06	-0.4 0.26	1					
$\phi(0)$	-0.6 0.03	-0.8 0.00	0.4 0.2	1				
C80	-0.7 0.02	-0.6 0.06	0.91 0.00	0.66 0.02	1			
D50	-0.3 0.34	-0.4 0.26	0.69 0.01	0.47 0.12	0.81 0.00	1		
Ts	0.53 0.08	0.37 0.23	-0.9 0.00	-0.6 0.06	-0.9 0.00	-0.7 0.01	1	
RASTI	-0.5 0.09	-0.4 0.26	0.15 0.65	0.57 0.06	0.29 0.37	-0 0.95	-0.3 0.35	1

표 4에서 표 3의 결과치들에 대한 Spearman의 순위상관관계를 나타내었다. 표 4에서와 같이 명료성의 선호도와 가장 높은 상관관계를 갖는 지표는 t_l/t_e 임을 알 수 있다. 반면 ITDG는 C80과는 높은 상관관계를 가지나 선호도와는 유의한 수준에서 상관관계가 나타나지 않았다. 영향을 주지는 않는 것으로 나타났다($p>0.5$).

5. 결론

강의실의 요해도에 대한 측면반사음을 고려할 때 반사음의 도달 지연 시간차이가 인지 되는 최소치는 5ms이다. 또한 강의실 명료도에 대하여 가장 영향이 큰 지표는 t_l/t_e 로 밝혀졌으며 이는 청감자의 선호도와 선형적인 관계를 갖는다.

6. 참고문헌

1. Haas, H., The Influence of a Single Echo on the Audibility of Speech, J. Aud. Soc. 20 pp. 146-159. 1972.
2. Ando, Y. Architectural acoustics, blending sound sources, sound fields, and listeners. AIP Press Springer Verlag, New York.
3. Ando, Y. Orthogonal Factors Describing Primary and Spatial Sensations of the Sound Field in a Concert Hall, ICA 2001
4. K. Safuddin, H. Sakai, Y. Ando, Duratio Sensatin of the Simulated Environmental Noise in Relation to its Auto-correlation Function, Journal of Sound and Vibration, 2001
5. 강성훈, 음향시스템 이론과 실제, 1999
6. M. Sakurai, H. Sakai, Y. Ando, A Computational Software for Noise Measurement and Toward Its Identification, Journal of Sound and Vibration, 2001