因子分析과 多次元尺度를 이용한 스피이커의 音質評價

(The Assessment of Sound Quality of Loudspeaker System by Using Factor Analysis and Multi-Dimensional Scaling)

* 황 영 수 (Hwang, Young-Soo)
** 김 영 일 (Kim, Young-Il)
*** 차 일 환 (Cha, Il-Whan)

Abstract

The objective data and subjective data correlated in order to rate sound quality of loudspeaker system and these data were analyzed by the Factor Analysis and Multi-Dimensional Scaling.

The dimensions yielded Factor Analysis were interpreted as "Contrast", "Metallic", "Rich", "Present" and their relation to physical variables were explored by studying the positions of loudspeaker systems in the respective dimension.

When the subjective similarity degree of loudspeaker systems was compared with the objective similarity degree of loudspeaker systems by Multi-Dimensional Scaling, the similarity degree of sound pressure response in the listening room closely coincided with the subjective similarity degree regardless of sound source.

This result implies the necessity of measurements taken not only in an anechoic room but also in a listening room in order to rate sound quality of loudspeaker systems.

要 約

스피이커시스템의 音質評價를 위해, 物理量과 心理量을 연관시켜, 인자 分析과 多次元尺度法으로 해석하였다.

因子分析으로 생긴 次元을 각각 대조성, 금속성, 풍량감, 임장감 등으로 해석하였으며 이 次元들과 물리적 변수들과의 관계는 각 次元 內에 스피이커시스템의 위치로서 설명하였다.

*, ** 연세대학교 전자공학과 대학원
*** 연세대학교 전자공학과 교수

스피이커시스템의 주관적 類似度와 객관적 類似度의 값을 多次元尺度法으로 비교한 결과, 室內音壓周波數特性의 類似度 값이 주관적 類似度의 값과, 音源에 관계없이 가장 잘 일치되었다. 이 결과는 스피이커시스템의 音質을 評價하기 위해서는 無響室뿐만 아만 아니라, 聽取室 內에서도 스피이커시스템의 측정이 필요하다는 것을 의미한다.

1. 序 論

音質評價의 硏究는 音響機器 및 建築音響의 분야에서 널리 실시되어 왔다.

1960년에 吉田[1]의 立體音의 效果에 관한 연구가 因子分析을 이용한 후, 1958년에 Torgerson[2] 에 의해 metric-multidimensional scaling가 완성되어진 이래 이 方法들을 이용한 音質評價方法이 연구되어지고 있다.

音響再生系 中에서 가장 音質의 差가 두드러진 스피이커 시스템에 관해서, 여러 物理特性들이 音質에 끼치는 영향을 연구하였지만, 이러한 特性들이 어느 정도 音質에 영향을 끼치고 있는가에 대해서는 확실한 해답을 얻을 수가 없었다. 측정된 物理特性 中 音質에 영향력이 큰 物理特性을 찾아내는 것은, 보다 좋은 音質의 스피이커 시스템의 設計, 設計效率의 향상이라는 점에서 상당히 요구되는 課題이다.

본 연구에서는 5종류의 스피이커 시스템에 대한 音質評價에 因子分析을 이용하였고, 音質의 類似와 物理特性의 類似와의 對應을 多次元尺度構成法으로 檢討하여, 音質에 영향력이 큰 物理特性을 찾아내고자 한다.

2. 因子分析과 多次元尺度

2.1. 因子分析[7]

因子 分析 方法 中, Principal - Factor Method의 基本 model 은 다음과 같다.

$$Z_{ji} = \sum_{p=1}^{m} a_{jp} F_{pi} \qquad (1)$$

$$(i=1,2,3,\cdots\cdots,N;\ j=1\ 2,3,\cdots\cdots,N)$$

여기서 Z_{ji} 는 i번째 개인의 j번째 변수, a_{jp} 는 共通因子 P에 대한 j번째 factor loading 값, F_{pi} 는 i번째 개인에 대한 共通因子 P의 값이다.

(1)식의 分散을 구해, 이 값의 기여도에 따라 因子의 數를 줄여 나간다.

각 factor loading 값 a_{jp} 는, 固有벡터의 길이가 1이라는 조건에서, 固有벡터와 이 벡터에 해당하는 固有値의 이중근을 곱하여서 얻어질 수 있다.

또, 각 변수들로 共通 因子를 서술하는 factor score는 다음과 같다.

$$Z = A\,f \qquad (2)$$

여기서, Z는 m×1의 변수 행렬, A는 n×m의 共通 因子 係數 행렬, f는 m×1의 共通 因子 행렬이다.

(2)식의 양변에 A의 transpose값을 곱한 후 f의 값을 구하면, 이 값이 factor score 값이 된다. 이 factor score는 factor loading 값으로 해석된 共通因子를 이용하여, 각 변수들의 해석을 가능하게 한다.

2. 多次元尺度法[9]

多次元尺度法은 對象 사이의 (非) 類似性의 程度를 나타낸 測度가 주어졌을때, 對象을 多次元空間內에 點으로 표시하고, 點 사이의 거리가 측정한 (非) 類似性과 가장 잘 일치하게 點의 위치를 정하는 方法이다.

(非) 類似性을 거리로 나타내기 위해서는 i, j 2點 사이(2對象 사이의 거리)의 거리가 다음의 3가지 성질을 만족시키는 函數 d로 정의되어야 한다.

$d_{ij} \geq 0$ 이거나 $d_{ij} = 0 \leftrightarrow i = j$ (最小性)

$d_{ij} = d_{ji}$ (對稱性)

$d_{ij} + d_{ik} \geq d_{ik}$ (三角不等式)

多次元尺度에는 여러 종류가 있지만, 본 연구에서는 最小二乘解를 이용한 ADDSCAL을 사용하였다.

3. 實驗 및 結果考察

3. 1. 實驗

(가) 사용 스피이커 시스템

〈표 1〉 사용 스피이커 시스템의 크기 (enclosure)

Speaker No.	Way	Width (Cm)	Hight (Cm)	Depth (Cm)
A	2	30.2	58.4	28
B	2	30.5	59	26
C	2	20.5	32	19
D	4	37.9	65	31.7
E	4	50	80.2	33.8

(나) 音 源

(1) 音色表現語 판단

① BEN HUR 中 전차들의 행진

① Beethoven SYMPHONY No.4

低音部가 많이 포함된 ①번 곡에, 250Hz에서 ±10dB를 변화시켜서 base의 영향을 알아보고, 모든 부분의 音이 포함된 ②번 곡에, 4000Hz에 ±10dB를 변화시켜서 treble의 영향을 알아보았다.

녹음 시간은 10초, 3초, 10초, 3초, 10초 간격으로 하였다.

(2) 유사 판단

① Beethoven SYMPHONY No.4

② A Mid Summer Night's Dream 12곡

①, ②번 곡을 7초, 1초, 7초 간격으로 녹음하였다.

(다) 音의 聽取條件

실험장치는 그림 1과 같다.

각 스피이커에서 나온 音이 聽取者 위치에서 같은 음압 레벨을 갖게 하기 위해서 Attenuator을 사용하였다.

聽取室은 (2.8 × 3.5 × 2.2 m)의 크기로, 일반 가정집이다.

5개의 스피이커시스템 前面에는 聽取者들이 스피이커시스템의 外形을 알아보지 못하게 커텐을 쳤다.

聽取者는 男子 9명, 女子 9명으로 하였으

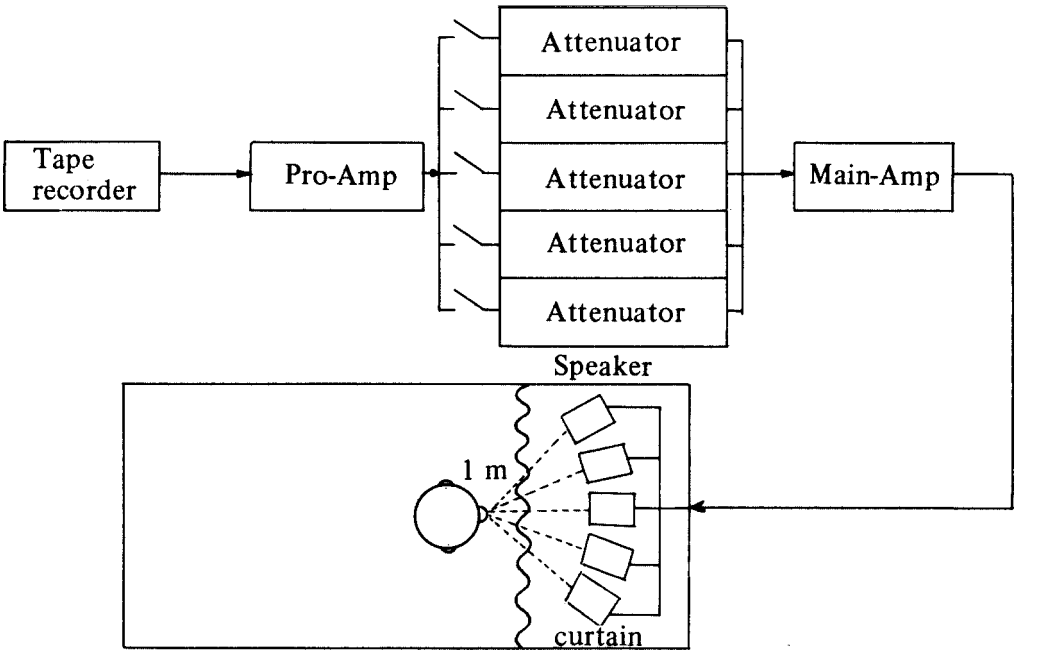


그림 1. 聽取心理實驗

며, 實驗은 1회에 1名씩 聽取하였다.

스피이커시스템의 物理特性은 표준 연구소의 無響室(4.5 × 4.5 × 7 *m*)에서 측정하였다. 室內音壓周波數特性은 聽取子의 위치에 마이크로폰을 놓고, 聽取 音壓 레벨과 같게 하여 측정하였다.

(나) 데이터 처리

(1) 音色表現語 판단

한 스피이커시스템에 같은 곡을 3번 반복하여 聽取子에게 들려준다. 이 사이에 聽取子는, 이 스피이커시스템의 音質에 해당되는 점수를 24개 음색표현어 각각에 대하여 10점 만점으로 평가한다. 모든 聽取者들의 평가값의 평균값을, 행은 音源× system, 열은 음색표현어로 된 행렬에 代入한다.

SPSS를 이용하여 이 행렬을 因子分析한다.

(2) 유사 판단

한 스피이커시스템을 통해 7초간 음악을 들려준 후, 1초 간격으로 다른 4 스피이커시스템 中 한 스피이커시스템을 통해 같은 곡을 7초간 들려주어, 7점 만점으로 평가하게 한다.

物理特性의 類似度는 (3)식에서 구한다.

$$X_{lm} = \left[\sum_{i=1}^{n} (x_{li} - x_{mi} + \mu)^2 / n \right]^{1/2} \quad (3)$$

여기서, μ는 $(\sum_{i=1}^{n} x_{li} - \sum_{i=1}^{n} x_{mi})/n$, x_{li}는 l 스피이커시스템의 sample 값, x_{mi}는 m 스피이커시스템의 sample 값, x_{lm}은 l 스피이커시스템과 m 스피이커시스템 사이의 非類似度

(3)식에서 구한 非類似度를 多次元尺度法으로 分析한 후, 각각의 音源에 대한 심리 평가값과 물리 평가값을 비교하기 위하여 procrustes 변환을 하였다.

표 2. 24개 음색표현어에 대한 varimax roated factor loadings

형 용 사	Factors			
	1	2	3	4
박력이 있다 (impactful)	0.40033	0.35602	-0.63455	-0.2313
풍부하다(rich)	0.06311	-0.16308	-0.96769	-0.08103
임장감이 있다.(present)	0.17256	0.34291	-0.38315	-0.82162
확산감이 있다(wide dispersed)	0.30565	0.23862	-0.65635	-0.50506
분리가 좋다(distinct)	0.85971	-0.00937	-0.03297	-0.30713
대조가 좋다(high contrast)	0.89554	-0.17534	-0.37502	0.06622
밝 다(bright)	0.89546	-0.34933	-0.1569	-0.02182
부드럽다(mellow)	0.25321	-0.91235	0.09756	0.15673
아름답다(beautiful)	0.35519	-0.89076	-0.0846	0.1054
맑 다(clear)	0.8224	-0.52976	-0.05798	-0.06375
우아하다(delicate)	0.19197	-0.88728	0.00569	0.03626
자연스럽다(natural)	-0.03356	-0.50459	-0.06264	0.06163
박력이 없다(dull)	-0.30347	-0.36043	0.71077	0.27041
빈약하다(skinny)	-0.24481	0.25796	0.87595	0.18817
임장감이 부족하다(non present)	-0.24367	-0.11951	0.40607	0.86084
확산감이 부족하다(poorly dispersed)	-0.20118	-0.1904	0.80455	0.41998
분리가 나쁘다(vague)	-0.76688	-0.0475	0.17231	0.53724
대조가 나쁘다(low contrast)	-0.86917	0.1887	0.35429	0.14929
어둡다(melancholie)	-0.87676	0.35585	0.1118	0.22398
금속성이다(metallic)	-0.24972	0.9514	-0.02877	-0.0845
불쾌하다(ugly)	-0.19888	0.92339	0.01409	-0.18881
탁하다(muddy)	-0.85693	0.43301	0.1035	0.06989
거칠다(harsh)	-0.26171	0.88842	-0.0557	-0.07452
부자연스럽다(unnatural)	0.13345	0.48671	-0.11091	-0.18046

표 3。 각 스피이커시스템에 대한 factor score

	Factor			
	1	2	3	4
P_1	B 0.7394924	C 1.7221443	C 1.4280869	Ab^+ 2.6495005
	C 0.1076363	B 1.0910552	Ab^- 1.0905673	C 1.1411881
	Ab^- -0.1581671	A 1.0640696	D 0.4966147	D -0.6737799
	A 0.3026	Ab^- 0.9068941	B 0.3112665	E -0.7203415
	E 1.0056094	D 0.4441499	Ab^+ -0.0761549	A -0.7522894
	D 1.4129956	E 0.3571612	E -1.1228788	Ab^- -0.9252395
	Ab^+ -2.0097471	Ab^+ -0.5595014	A -1.2966514	B -1.0070965
P_2	At^+ 1.9659177	At^+ 0.5764343	C 1.0615952	A 1.06116
	A 1.0934951	B -0.2331601	A 0.954518	At^- 0.5732835
	C 0.8465728	C -0.4793846	D 0.8085069	At^+ 0.1062755
	B 0.7537612	At^- -0.998455	At^+ -0.051985	C -0.3046195
	At^- 0.17376	E -1.1906751	B -1.0114973	D -0.3967839
	E 0.3069308	D -1.2559267	At^- -1.2531301	E -0.4641144
	D 0.6841544	A -1.6522976	E -1.3606596	B -1.1366626

3. 2. 結果考察

因子 1에서 因子 4까지의 factor loading 값이 표2에 나타나 있다.

因子 4까지의 分散合은 92%가 된다. 因子 1은 대조가 좋다, 밝다, 분리가 좋다, 맑다 등이 0.8이상의 값을 갖고 있는 것에 비해, 어둡다, 대조가 나쁘다, 탁하다, 분리가 나쁘다 등의 값은 -0.8이하의 값을 나타내고 있다. 그러므로 因子 1은 대조와 분리가 좋고, 맑고, 밝다는 인상을 주는 因子로 해석된다.

因子 2는 금속성이다, 불쾌하다, 거칠다 등의 음색표현어가 0.8이상의 값을, 부드럽다, 아름답다, 우아하다 등의 음색표현어가 -0.8이하의 값을 나타낸 것으로, 이 因子는 금속성의 불쾌한 느낌을 받는 것으로 해석된다.

因子 3은 빈약하다, 확산감이 부족하다, 박력이 없다 등의 0.7이상의 값을 나타내고 있고, 풍부하다, 확산감이 있다, 박력이 있다 등의 음색표현어가 -0.6이하의 값을 나타내고 있어서, 박력, 확산감의 因子로 해석된다.

因子 4는 임장감이 부족하다, 분리가 나쁘다 등의 음색표현어가 각각 0.86, 0.54의 값

을 나타내고, 임장감이 있다, 확산감이 있다 등이 각각 −0.82, −0.51의 값을 나타내고 있어, 임장감의 因子로 해석된다.

표 3에 factor score를 각 音源마다 크기 순으로 배열하였다.

因子 1의 factor score는 크게, 音源의 特性으로 해석할 수 있다.

音源 p_1은 低音部가 많이 포함된 곡인 반면에, 音源 p_2는 全音이 고루 있는 교향곡으로, 밝고 맑은 차원의 因子 1의 factor score가 p_1 (0.7～2.009)보다 p_2 (1.965～−0.68)가 일반적으로 큰 값을 나타내고 있다. Ab^+는 base 부분의 증가때문에, 분리도가 좋지 못하다는 점과 D는 音源에 관계없이 대조와 분리도가 나쁘다는 것을 알 수 있다. 또, treble의 증가가 밝고 맑다는 인상을 느끼게 하고 있다.

因子 2에서 각 音源을 비교해 보면, p_1보다 p_2가 부드럽고 우아한 느낌을 주고 있다는 것을 알 수 있고, 音源 각각에 대해 分析해 보면, C, At^+가 가장 큰 값을 나타내고 있다. 또, Ab^+보다는 Ab^-가 더 날카롭고, 금속성의 느낌을 받는 것으로 나타내고 있다. 즉, base의 크기가 적을수록, treble의 크기가 증가할수록 금속성의 느낌을 받는다는 것을 알 수 있다.

因子 3에서는 音源에 따라 큰 차이가 없고, C가 音源에 관계없이 가장 큰 값으로, 즉 빈약하고, 확산감이 부족한 것으로 나타나고 있다. 그리고 Ab^+가 Ab^-보다, At^-가 At^+보다 확산감을 더 느끼게 하고 있다.

因子 4에서는 音源에 관계없이 B가 임장감을 가장 잘 느끼게 하는 것으로 나타났으며, base의 크기가 큰 것에 대해 그렇게 좋은 반응을 나타내고 있지 않다.

각 개인의 facror score와 개인의 값을 평균한 factor score의 상관 계수를 유의성 Test한 결과, 0.01 수준에서는 51.1%, 0.1 수준에서는 68.9%, 0.25 수준에서는 77.8%의 값이 된다. 이 값은 한번의 聽取實驗 결과에 의한 것으로서는 만족스럽다고 할 수 있다. 이것으로 因子分析에서, factor loading 값은 개인에 따라 상당히 차이가 있지만, 실제로 스피이커시스템 특성을 나타내는 factor score는 개인들의 평균값을 취한 것에 대해 큰 차이가 나지 않는다는 것을 알 수 있다.

그림 2는 유사 판단에 의해 구한 데이터를 多次元尺度를 이용한 후, procrustes 변환시킨 것이다.

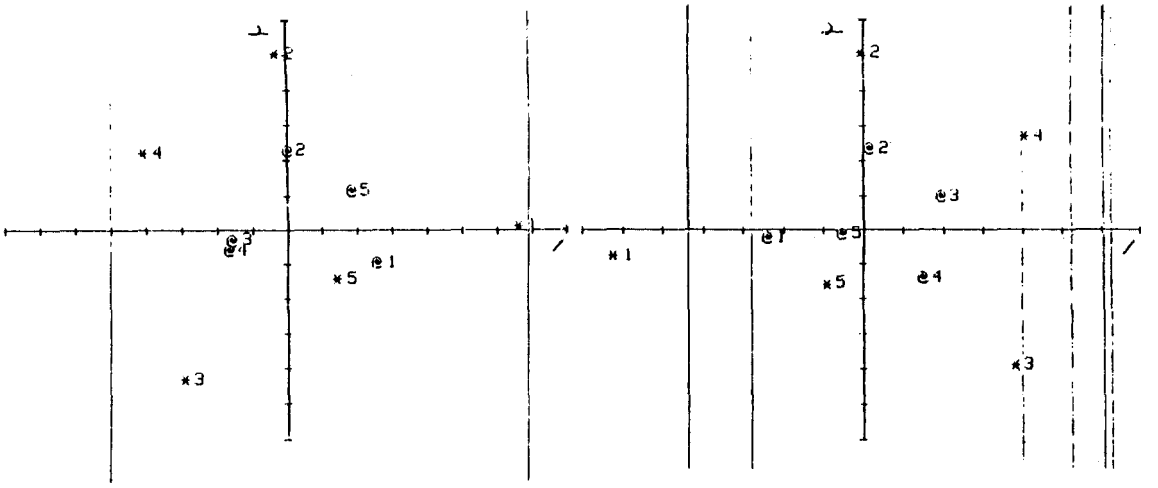
각 物理量과 心理量의 일치도를 구한 결과 音源①에서 0°, 30°, 60°音壓周波數特性은 0.45, 0.44, 0.49, 2차, 3차高調波歪曲特性은 0.39, 0.24, 室內音壓周波數特性은 0.75이고 音壓②에서는 각각 0.42, 0.43, 0.48, 0.52, 0.67이다.

그림 2에서 1축과 2축은 각각 因子1과 因子2를 나타낸다.

4. 結 論

因子分析을 사용한 실험의 결과는 스피이커시스템의 音質評價에 있어서 형용사 판단에 대한 因子分析方法의 유용성을 나타낸다. 이 方法은 factor score를 이용하여 보다 상세하게 스피이커시스템의 音質特性을 알아낼 수 있다.

스피이커시스템의 音質에 영향력이 큰 物理特性을 찾아내기 위해서 物理 特性의 類似度와 音質의 類似度와의 對應을 多次元尺度構成法으로 검토한 결과, 室內音壓周波數特性의 類似와 音質의 類似가 가장 잘 대응된다는 것



(0.75, 0.67)이 확인되었다. 이 결과는 실제 音을 듣는 聽取室 內의 특성 측정이 중요하다는 것을 나타낸다.

본 연구에서는 귀납적인 방법에 따라 音質과의 相關이 높은 특성으로 室內音 壓周波數特性을 찾아냈지만, 실내에서 여러 물리 특성을 변화시켜 연역적인 방법으로 音質과의 관계를 보다 자세히 규명하는 것이 바람직하다. 또 형용사 판단이 아닌 다른 방법으로 데이터를 구하여 因子分析을 이용하는 것도 가능하다.

본 연구에서 사용한 方法을 이용하여 스피커시스템의 음질 뿐만 아니라, 헤드폰의 평가, 보청기의 측정, Music Hall의 평가 등에 사용될 수 있다.

참고 문헌

1. H. Eisler, "Measurement of Perceived Acoustic Quality of Sound —Reproducing Systems by means of Factor Analysis", J·A·S·A, Vol. 39, No.3, 484-492 (1966)
2. A. Gabrielsson and H.Sjögren,"Perceived sound quality of sound — reproducing systems", J·A·S·A; Vol.65, No.4, 1019-1033 (1979)
3. W.S. Torgerson, "Methods of Scaling", John Wiley and Sons, Ic, (1958). New York
4. 村光 , " スピーカの 音質と 物理特性の 關係 ", 日本音響學會誌 33卷 103 (1977)
5. 樋渡 二, "人間情報工學, コロナ社, 9-29, (1979). 東京
6. 中島平太郎, "スピーカー", 日本放送出版協會, (1980). 東京
7. H.H. Harman, "Modern Factor

Analysis", University of Chicago Press, (1976). Chicago

8. 高根芳雄, " 多次元尺度法 ", 東京大學出版會, (1980), 東京

9. J.B. Kruskal and M.Wish, " Multidimensional scaling" A Sage University paper, (1981). London

10. 차일환, " 음향공학개론 ", 한신문화사, (1976), 서울

11. 吉田, "立體音の 效果尺 關する 硏究", 日本音響會誌 16卷 249(1960)