

演奏者를 爲한 舞台空間의 最適化

An Optimum Stage-Enclosure Configuration for Performers

* 이 병 호 (Byung Ho Lee)

** 이 회 원 (Hee Won Lee)

ABSTRACT

An optimization technique is adapted to determine the stage enclosure configuration preferred by performers.

The merit function which quantifies the ease of ensemble among the performers is derived from a set of qualitative conditions recommended by researchers of hall acoustics.

The ray path tracing technique based on the modified method of images is used to analyze acoustical characteristics at any locations of performers in stage enclosure. The gradient search technique is employed to find the geometric parameters which maximize the merit function.

As an example, optimum stage enclosure configuration of the trio cham-

ber music is obtained using the computer program developed. The developed technique can be used in the design of concert hall stage and also in forming a special enclosure with movable reflecting surfaces.

1. 新 論

音樂堂을 設計 建築함에 있어 演奏者들이 그들의 演奏力量을 最大限 發揮할 수 있게 하고 그 演奏音이 聽衆에게 生々하게 傳達될 수 있도록, 音響學的 配慮를 해야 한다는 것이 중요한 과제이다. 前者를 演奏與件의 造成이라 하고, 後者를 聽音與件의 造成이라 부른다. 지금까지 音響學者들의 많은 研究가 聽音與件的 向上에 比重을 두고 행하여 졌고, 그에 따른 많은 發展을 가져왔다.⁽¹⁻⁴⁾

最近에 R. S. Shankland⁵⁾는 演奏音의 均一한 擴散과 適切한 反響을 통한 演奏者들

* 正會員 韓國科學技術院 教授

** 正會員 韓國科學技術院 機械工學科

의 相互調和를 얻기 위하여는, 舞臺空間의 設計가 중요함을 強調하였다. 또한 音樂堂은 交響樂 뿐만 아니라, 室內樂 Opera 등, 여러 형태의 演奏가 행하여 지므로, 각각의 演奏形態에 알맞는 演奏與件을 形成하기 위해, 可變의 stage enclosure를 設置하는 방법이 많이 이용되고 있다.

본 연구에서는 이러한 stage enclosure의 形狀을 결정짓는데에 最適化技法의 導入을 試圖하였다. 最適化의 방법으로 몇명의 音響學者들이 실험을 통해 제시한 心理音響學的 推薦條件에 대한 滿足度를 定量的인 數値로 表示하는 函數를 구성하고, 이를 目的函數로 하여, 그 값을 最大化하는 stage enclosure의 形狀을 결정하였다. 또 幾何音響學的의 한 방법인 修正된 影相技法을 사용하여, 音響空間에서의 音壓과 反響時間등을 豫測하였고, 그에 따라 目的函數를 계산하였다. 目的函數의 最大值를 갖는 search 方法으로는 gradient vector를 近似計算하여, 最大點을 찾아 나가는 gradient search technique을 사용하였다. 最適化過程을 電算化한 program이 개발되었고, 그 실제 응용으로서 室內樂 三重奏에 적합한 stage enclosure의 形狀을 구해 보았다.

II. 目的函數의 構成

最近에 몇몇 音響學者들은 心理音響學的의 實驗을 통해, 演奏者들의 相互調和를 돕기 위한 몇가지 音響學的의 조건을 제시하였는데,⁶⁾ 이는 다음 몇가지 사항으로 요약된다.

① 直接音 도달이후 벽면이나 천정면 등을 통한 反射音波가 到達할때 까지의 時間간격이 17ms ~ 30ms 사이의 값을 갖는 것이 相互調和를 이루는데 效果的이다.

② 500 Hz ~ 2 KHz 사이의 高音領域이 演奏者들의 相互調和에 重要한 周波數 領域이다.

③ 두명 이상의 演奏者로부터 演奏音이 동시에 들려오는 경우, 各演奏音 사이의 音壓 level의 차이가 4 dB 이내 이어야, masking 현상이 防止되고, 音의 均衡이 유지된다.

④ 演奏者들의 相互調和에 적절한 地域 反響時間의 最適値가 存在하며, 演奏形態에 따라 그 값은 달라진다.

위와같은 推薦事項들을 定量的인 數値로 표시하는 函數들을 作成하였고, 이들의 總合으로 目的函數를 構成하였다.

A. 評價函數 C_1

이 함수는 推薦事項 ①을 定量的인 函數로 표시한 것이다. 直接音 到達以後, 80ms 이내에 들어오는 모든 反射音波를 대상으로 하여, 17ms ~ 30ms의 제한 시간내에 있을 때, 최대값 1.0을 갖게하고 이 범위를 벗어남에 따라 그 값이 비례적으로 감소하게 한 뒤, 이들의 평균값으로 C_1 값을 정하였다. 즉,

$$C_{1i} = 1.0 \quad \text{for } 17\text{ms} < \text{TDG}_i < 30\text{ms}$$

$$C_{1i} = 1.0 - \frac{\text{TDG}_i - 30}{50}$$

$$\text{for } 30\text{ms} < \text{TDG}_i < 80\text{ms} \quad (1)$$

$$C_{1i} = \frac{\text{TDG}_i}{17} \quad \text{for } 0\text{ms} < \text{TDG}_i < 17\text{ms}$$

그리하여 평가함수 C_1 은

$$C_1 = \left(\sum_{i=1}^{\text{NIT}} C_{1i} \right) / \text{NIT} \quad (2)$$

으로 定한다.

여기서 TDG_i : i 번째 반사음의 직접음에 대한 지연시간

NIT : 80ms 이내에 들어오는 모든 반사음의 갯수이다.

B. 評價函數 C_2

이 함수는, 17ms ~ 30ms의 제한시간내에 들어오는 反射音波의 密度로 표시한다. 즉,

$$C_2 = \text{NOPT} / \text{NIT} \quad (3)$$

여기서 NOPT : 制限時間 内に 들어오는 反射音의 个数이다.

C. 評價函數 C_3

이 함수는 추천사항 ③을 數値化한 函數이다. 서로다른 演奏音의 音壓 level 차이가 3dB 以内일때, 최대값 1.0 을 갖도록 정해진 함수이다. 즉,

$$C_3 = 1.0 \quad \text{for } ADV \leq 1.5$$

$$C_3 = 1.0 - \frac{ADV - 1.5}{10} \quad (4)$$

여기서 ADV는 各 演奏音들의 音壓 level 에 대한 平均偏差이다.

D. 評價函數 C_4

이 함수는, 舞臺에서의 地域反響時間이 演奏에 적합한 값을 가질수록, 그 함수값이 1.0 에 가까와 지도록 구성된 함수이다. 演奏形態에 따라, 適合한 反響時間이 다르므로, 이를 RT_{opt} 라 하면 C_4 는 다음과 같이 표시된다.

$$C_4 = 1 - \{ (RT - RT_{opt}) / T_A \}$$

for $RT \geq RT_{opt}$

$$C_4 = 1 + \{ (RT - RT_{opt}) / T_B \}$$

for $RT \leq RT_{opt}$

여기서 RT = 舞臺에서의 地域反響時間
 $T_A, T_B = C_4$ 가 0 의 값을 갖는 방향시간을 결정하는 상수이다.

E. 目的函數 U_i

最適化를 위한 目的函數는 앞에서 설명한 各 評價函數들의 總合으로 表示하였다. 즉 i 번째 演奏者 位置에서의 評價函數의 總合을 U_i 라 하면,

$$U_i = \sum_{j=1}^4 k_j C_j \quad (6)$$

여기서 k_j 는 가중치(weighting factor)를 나타낸다. 따라서 目的函數는 各 演奏者位置

에서의 U_i 를 合한 값으로 표시한다. 즉,

$$U_i = \left(\sum_{i=1}^{NPREF} U_i \right) - \Delta U \quad (7)$$

여기서

NPREF : 演奏者의 數

ΔU : U_i 의 最大值와 最小值의 差異

III. 音響空間의 解析方法

Stage enclosure 내의 音壓分布나 反響時間등을 예측하기 위한 해석方法으로서는, 波動理論에 의한 方法과 幾何音響學에 의한 方法이 있는데, 波動理論에 의한 方法은 音壓分布를 解析하는데 많은 計算量이 必要하므로, 이러한 문제에는 적합하지 않다. 따라서 各 演奏者를 點音源으로 假定하고, 또 音波가 直進한다는 假定에서 출발하는 幾何音響學的 解析方法을 導入한다. 音波가 直進한다는 假定은, 波長이 對象空間에 비해 짧은 경우, 즉 높은 周波數 領域에서만 成立하지만, 演奏者들의 演奏與件에 영향을 주는 音域이 500Hz 이상 的高音領域이므로, 幾何音響學的 解析方法의 妥當性을 뒷받침 해준다.

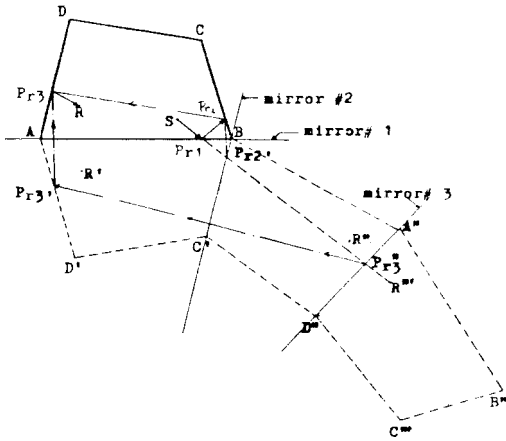
A. 音波經路의 追跡方法

幾何音響學的 解析方法에서는, 音源으로부터 受信位置까지 到達하는 音波經路들을 찾아내야 하는데, 이 音波經路들을 찾기 위해 修正된 影像技法을 使用한다.

이 方法은 D. E. Bexa⁷⁾ 가 音響空間의 最適設計를 위해 使用한 方法으로, 이제까지의 影像音源方法을 改善한 것이다.

그림(1)에서 보면 R'' 은 受信點 R 의 壁面에 대한 3次影像點이며, Pr_3'', Pr_2', Pr_1 등은 各 反射點 : Pr_3, Pr_2, Pr_1 에 대한 影像點들이다. 즉 이 方法에서는 實際 反射點의 影像點인 Pr_3'', Pr_2', Pr_1 등의 座標를 먼저

구한뒤 이를 원래 위치로 影像還元시켜, 실제 音波經路(S → Pr₁ → Pr₂ → Pr₃)를 求하게 된다.



→ real path
 - - - mirror back procedure

- R''' : image point of R (3rd order)
- Pr₂' : intersection of line S-R''' with mirror # 2
- Pr₃' : intersection of line S-R''' with mirror # 3
- Pr₁, Pr₂, Pr₃ : reflection points

그림(1) 수정된 영상기법

B. 音壓分布의 計算

修正된 影像技法을 使用하여 音波經路들이 구해지면 受信點에서의 音壓은 다음과 같이 計算된다. 먼저 한개의 音波經路에 대한 音壓 level 은, 點音源에서 球面波(spherical wave)가 傳播하는 것으로 가정하여, 다음 식으로 구할수 있다.

$$P_{rms} = \frac{A}{\sqrt{2} \gamma} \tag{8}$$

여기서 $A = \sqrt{Q \rho_0 C} / 2 \pi$

Q = 音源의 에너지 (Watt)

ρ_0 = 媒질(공기)의 밀도 (kg/m³)

C = 媒질속에서의 音速 (m/sec)

反射面에서의 吸音效果를 考慮하면 受信點에서의 音壓은

$$P'_{rms} = (1 - \alpha)^{1/2} \cdot P_{rms} \tag{9}$$

여기서 α 는 反射面의 吸音係數이다.

따라서 受信位置에서의 音壓은 各 音波經路와 周波數 band 別 音壓의 總合으로 表示되므로,

$$P_{rms}^2 = \sum_{i=1}^{NPATH} \sum_{j=1}^{NBAND} (P'_{rms})^2_{ij} \tag{10}$$

여기서 P_{rms*t*} : 수신점에서의 音壓

NPATH : 音파 경로 의 數

NBAND : 주파수 BAND 的 數

C. 反響時間의 計算

各 音波經路로부터 音響空間의 平均 自由 行路(mean free path)가 계산됨으로, Eyring의 공식을 使用하여 反響時間을 계산한다. 즉,

$$RT = MFP \times 6 / C \times \log \left(\frac{1}{1 - \bar{\alpha}} \right) \tag{11}$$

여기서 MFP : 平均自由行路 (m)

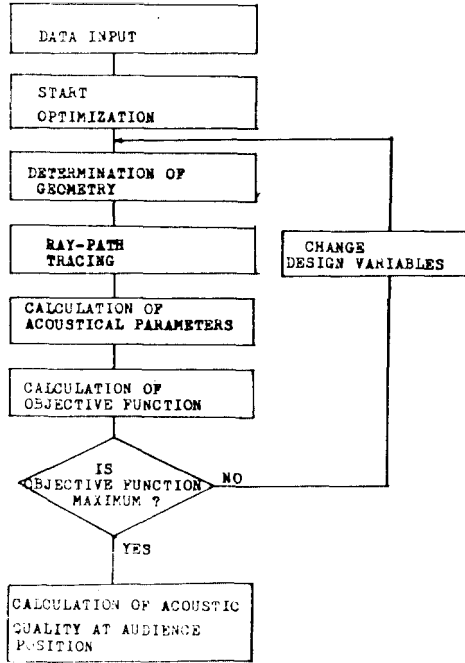
C : 音速 (m/sec)

$\bar{\alpha}$: 壁面의 平均吸音係數

IV. Computer program 的 開發

目的 函數의 最大値는 gradient search technique 을 使用하여 구한다. 이 방법은 gradient 방향을 ($\Delta y / \Delta x_1$)로 近似計算하여, 函數의 增加 方向으로 設計變數값의 最 適値를 찾아나가는 方法이다. 이 문제에서는 構成된 目的 函數의 設計變數에 대한 微分이, 特定한 函數形態로 表示되지 않으므로, 이 方法이 使用되었다. 앞서 설명한 音波經路의 追跡, 目的 函數의 計算, search technique 을 綜合하여, 全體的인 最 適化 program 을 開發하였고, 그 概略的인 과정도(flow chart)가

그림(2)와 같다. 과정도의 마지막 부분은 최적형상이 구해지고 난후, 聽衆席에서의 音壓 level 과 反響時間을 豫測하는 부분이다. 이는 舞臺위에서의 stage enclosure 의 形狀이 變化함에 따라, 聽衆席에서의 聽音條件이 어떻게 變化되는가를 豫測하기 위하여 포함되었다.



그림(2) 最適設計 program 의 概略的인 과정도

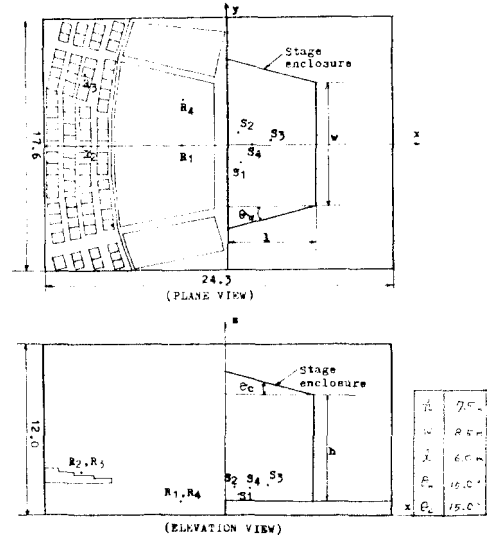
V. 室内樂 三重奏에의 適用

開發된 computer program 에 대한 實際 計算으로서, 그림(3) 과 같은 音樂堂에서 室内樂 3重奏(Piano, Violin, Horn)가 演奏되는 狀況을 假定하여, stage enclosure 의 最適形狀을 찾아보았다. 對象 音樂堂의 形狀은 17.6×24.3×12.0 m³의 直六面體 形態로 設定하였고, 各 演奏者의 位置 및 選定 聽衆席의 位置는 表(1)과 (2)에 表示되어 있다. 各 演奏樂器는 Piano 80dB, Violin 68dB Horn 78dB 의 white noise source 로 가

정하였고, 設計變數로는 그림(3)에서와 같이 stage enclosure 의 높이(h), 폭(w), 길이(ℓ), 壁面角도(θ_w), 天井面 角도(θ_c)를 택하였다. 이들 設計變數를 vector \vec{X} 로 表示하면, 表식과 같이 表示할 수 있다.

$$\vec{X} = (h, w, \ell, \theta_w, \theta_c) \quad (2)$$

또 各중치 k_i는 임의로 선정할 수 없으므로 모두 1.0 으로 가정하였다.



그림(3) 對象 音樂堂의 形狀 및 設計變數의 表示

구분/위치	X 좌표	Y 좌표	Z 좌표	비 고
S1	1.0	-1.1	0.5	호른(Horn)
S2	0.7	0.9	1.0	바이올린(Violin)
S3	3.0	0.4	1.2	피아노(piano)
S4	1.57	0.07	0.9	S1, S2, S3의 중심좌표

표(1) 各 演奏者의 位置 (단위 : m)

구분/위치	X좌표	Y좌표	Z좌표
R1	- 3.1	0.0	1.0
R2	-10.0	0.0	3.0
R3	-10.0	4.9	3.0
R4	- 3.1	3.1	1.0

표(2) 選定된 客席의 位置 (단위 : m)

A. 計算結果

計算을 수행한 결과, 初期值를 달리함에 따라 결정되는 最適設計變數들의 값이 달라짐을 알 수 있었다. 이는 目的函數가 地域的 最大值(local maximum point)를 많이 갖고 있기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 初期值를 여러번 바꾸어 가면서 最適設計變數들을 찾은뒤, 그들 중에서 目的函數값이 最大인 設計變數를 最適形狀으로 定하였으며, 그 결과는 표(3)에 表示 하였다. 또 壁面角度와 天井面角度는 初期值와 最適值사이에서 별로 變化가 없는데, 이는 이들 變數들이 目的函數값에 영향을 주지 못한다는 사실을 말해준다. 그러나 聽衆席에서의 聽音與件을 豫測한 결과 이들 變數가 聽音與件에 많은 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 따라서 壁面角度와 天井面角度는 最適化 結果에 관계없이 聽衆席에서의 與件을 고려하여 결정 하였다. 위와같이 결정된 設計變數들의 最適值는

$X = (7.5, 8.5, 6.1, 15, 15)$ 이다.

	초 기 치					목적함수
	h	w	l	θ_w	θ_c	
1	12.0	17.6	11.5	0	0	7.72
2	7.0	7.0	5.0	10	10	7.88
3	3.0	4.0	4.0	10	10	7.04
4	8.0	9.0	8.5	15	15	8.0
	최 적 치					목적함수
	h	w	l	θ_w	θ_c	
1	8.8	11.5	4.2	1.0	1.0	7.72
2	7.0	7.0	5.5	10	10	7.88
3	6.8	6.0	4.6	10.2	10.9	7.04
4	7.5	8.5	6.1	15	15	8.0

표(3) 初期值에 대한 最適值의 變化

即 stage enclosure의 形狀은

높이 $h=7.5m$, 폭 $w=8.5m$, 길이 $l=6.1m$ 벽면각도 $\theta_w=15^\circ$, 천정각도 $\theta_c=15^\circ$ 이다.

B. 計算結果의 考察

最適化 結果를 考察하기 위해, 最適形狀의 stage enclosure와 舞臺全體 크기의 stage enclosure 즉 stage enclosure를 따로設置하지 않고 舞臺全體를 그대로 stage enclosure로 쓸 경우의 세부적인 사항을 비교하였다. 표(4)와 표(5)에서 보면 目的函數값이 3.16과 8.0으로 많은 차이를 나타남을 알 수 있다. 그러나 C_3 값의 變化가 없는 것으로 보아 stage enclosure의 形狀變化로는 두 演奏音사이의 音壓 level 차이를 調整할 수 없다는 사실을 알 수 있다. 따라서 두 演奏音사이의 masking 現象을 막기 위해, 演奏者들의 位置選定 및 壁面의 吸音率調整이 중요하게 고려되어야 할 것이다. 또 그림(4)에서 보면 두 경우의 地域反響時間의 差異를 알 수 있다. 이는 stage enclosure의 形狀變化가 反響時間에 影響을 주며, 演奏形態에 따라 適切한 反響時間을 갖도록 enclosure를 調整할 수 있음을 보여준다. 그림(5)에서는 두 경우의 反射波構成圖(texture plot)을 비교하였다. 그림에서 보면 最適形狀의 enclosure가 있는 경우 17ms~30ms 사이의 制限領域에 들

연주자의 위치	목적 함수의 값(세부 사항)				
	C1	C2	C3	C4	합계
S1	0.34	0	1.0	0.06	1.40
S2	0.35	0	0.61	0.07	1.03
S3	0.38	0	0.64	0.09	1.10
			전체 목적 함수 값		3.16

표(4) 目的 函數의 值(인크로우저가 없는 경우) (높이: 11.9m, 폭: 17.6m, 길이: 11.5m, 벽면각: 0° , 천정각: 0°)

어오는 反射波의 數가 增加됨을 알 수 있다.

結論으로 stage enclosure의 形狀變化로 말미암아 各 反射波의 構成 및 反響時間을

調整하여 演奏形態에 맞는 演奏與件을 조성해 줄수 있음을 알 수 있다.

VI. 結 論

1. Stage enclosure 의 形狀變化에 따라, 舞臺에서의 反射音遲延時間과 地域反響時間등을 調整變化시킬수 있으므로, 演奏形態에 알맞는 stage enclosure 의 形狀을 결정짓는 것이 可能하다.

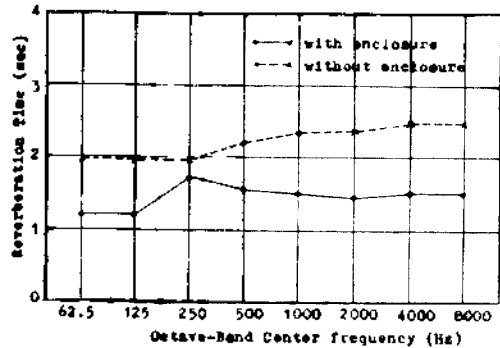
2. Stage enclosure 의 天井面角度와 壁面角度의 變化는 演奏與件보다 聽衆席에서의 聽音與件 變化에 더큰 影響을 준다.

3. 서로 다른 演奏者 사이의 音壓 level 차이는, stage enclosure 의 形狀變化만으로는 調整할 수 없으므로, 演奏者들의 位置選定 및 壁面의 吸音率에 대한 考慮가 必要하다.

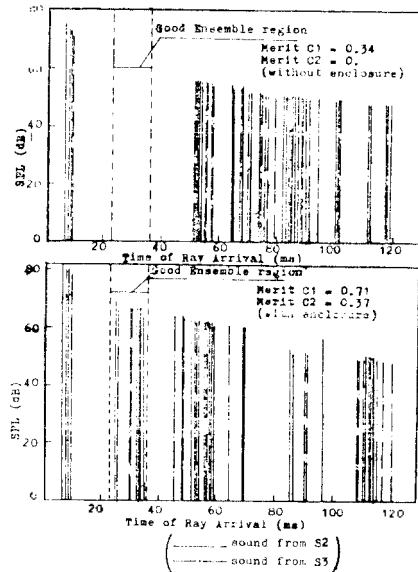
4. 反響時間이 너무 짧을 音樂堂에서는 stage enclosure 를 설치함으로써 反響時間이 더 減少할 憂慮가 있으므로 留意하여야 한다.

5. 使用된 目的函數의 地域의인 最大值가 여러개 存在하므로, 設計變數의 初期值를 달리하여 여러번 最適值를 計算한후, 最終的인 形狀을 決定하여야 한다.

6. 開發된 方法이 좀더 現實的인 問題에 接近하기 위해서는 最適化에 適合하도록, 目的函數를 修正하는 問題와, 壁面의 吸音率에 대한 考慮 方法, 또 現在 考慮된 地域反響時間이나 反射音 遲延時間 以外の 演奏與件에 影響을 주는 音響學的 要素에 대한 研究등이 더 遂行되어야 할 것이다.



그림(4) 地域反響時間의 比較(受信位置 : S₁)



그림(5) 反射패턴의 比較(受信位置 : S₁)

연주자의 위치	목적 함수의 값(세부 사항)				
	C1	C2	C3	C4	합계
S1	0.71	0.37	1.0	0.94	3.02
S2	0.70	0.38	0.61	0.94	2.63
S3	0.76	0.41	0.64	0.93	2.74
	전체 목적 함수 값				8.0

표(5) 목적 함수의 값(인크로우저가 있는 경우) (높이 : 7.5m, 폭 : 8.5m, 길이 : 6.1m, 벽면각 : 15°, 천정각 : 15°)

참 고 문 헌

1. W.C. Sabine, "Some Collected Papers on Acoustics," Harvard U.P., Cambridge, MA., 1922. 1st -Ed., p. 418.
2. L.L. Beranek, "Music, Acoustics, and Architecture," Wiley, New York,

- 1962.
3. M. R. Schroeder, D. Gottlob, and K. F. Siebrasse, "Comparative study of European Concert halls : correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 56, No. 4, October, 1974, p. 1195-1201.
 4. M. Barron, "The subjective effects of first reflections in concert halls : The need for lateral reflections," *J. Sound Vib.*, Vol. 15, No. 4, p. 164-192.
 5. R. S. Shankland, "Acoustical design for performers," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 65, No. 1, Jan., 1979, p. 140-144.
 6. A. H. Marshall, D. Gottlob, and H. Alrutz, "Acoustical conditions preferred for ensemble," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 64, No. 5, Nov., 1978, p. 1437-1442.
 7. D. E. Baxa, "A strategy for the optimum design of acoustic space," Thesis, Univ of Wisconsin Madison, 1976.