

# 建築音響模型實驗의 相似法則의 理論에 관한 研究

— A Study on the Theory of Simulation Rule for Scale Model  
Experiment in Architectural Acoustics —

김 천 수\*, 신 영 무\*, 박 병 전\*\*

(\*전북산업대 건축공학과, \*\*전북대)

## 요 약

본 논문은 模型實驗법에 관한 것으로 室內音響과 遮音에 있어서 건축음향분야의 모형실험의 意義와 動向 및 음향모형실험에서 실내용향의 物理的인 對應關係인 가장 基本的인 相似則과 遮音의 相似則에 관하여 理論的으로 고찰하였다.

## ABSTRACT

This study aims to find the theoretical consideration of the basic similarity rule between scale model experiment and real building as a results :

1. In the case of room acoustics :  $f_m = n \cdot f_r$      $T_m = T_r/n$      $\alpha_m(f_m) = \alpha_r(f_r)$
2. That of sound insulation :  $TL_m(f_m) = TL_r(f_r)$

## I. 序 論

이 모형실험에 의한 방법은 1930년대 부터이나 1950년대 후반에 많이 이용했으며 홀의 設計에 널리 쓰이기 시작한 것은 근래 35년 정도라 본다.<sup>1)</sup>

유럽에서는 이 모형실험으로 유명한 큰 홀설계에서 성공을 거두었고 그 예로서 左右非對稱인 특이한 形態를 갖는 슈트르갈트의 콘서트홀 “레다할레”나 베를린의 “필 하모니”는 音響뿐만 아니라 건축적으로 주목을 받았으며 이는 계획초 부터 Cremer 연구실의 音響模型實驗으로 室의 形狀, 에코타임패턴의 檢討에 의해 행해진 결과이며 시드니의 오페라 하우스

도 Cremer와 Jordan의 共同 模型實驗에 의해 실형의 검토가 행해졌다.<sup>2)</sup>

模型實驗의 경우에 가장 중요한 것으로서 實物과 模型에서의 現象이 物理的으로 等價이어야 하며 定量的인 互換關係를 갖는 相似法則이 성립해야 한다. 홀의 音響設計나 室內音場의 解析方法도 模型實驗으로 행해지고, 實驗技術의 開發이 계속되고 있으며 최근에는 遮音이나 團體音의 문제, 騒音傳播등에 대한 實用的인 解析, 豫測方法으로서 모형실험이 외국에서 행해지고 또한 實用되고 있기에 본 연구에서는 室內音響, 遮音에 대해 相似則에 관하여 理論的으로 考察코자 한다.

II. 音響模型實驗의 基本的相似則

模型實驗의 목적은 模型에서 實物으로의 現象을 推定하는 것이므로 實物과 模型간의 物理的 現象은 共通의 支配方程式이 성립해야 한다.<sup>3)</sup> 따라서 觀測 對象의 現象에 관계되는 모든 物理量이 實物과 模型에서 一定한 관계인 相似則이 성립해야 하며 이 경우 Buckingham의  $\pi$  定理에 의한 次元解析이 잘 이용된다.<sup>4)</sup>

음향현상에 관계되는 量으로서 8가지의 物理量을 선정하고 길이(L), 질량(m), 시간(T)의 3가지 기본 물리량에 의해 次元베트릭스에 의해 메트릭스의 랭크는 3이므로 Buckingham의 정리에서 다음의 5가지의 無次元的( $\pi$  number)이 구해진다.

$$\pi_1 = T \cdot f \tag{2.1}$$

$$\pi_2 = p \cdot K^{-1} \tag{2.2}$$

$$\pi_3 = u \cdot (K/\rho)^{-1/2} = u \cdot c^{-1} \tag{2.3}$$

$$\pi_4 = f \cdot L \cdot (k/\rho)^{-1/2} = f \cdot L \cdot c^{-1} \tag{2.4}$$

$$\pi_5 = c^{-5} \cdot f^2 \cdot \rho^{-1} \cdot P \tag{2.5}$$

f: 周波數     $\rho$ : 空氣의 密度    K: 空氣의 體積彈性率  
 p: 音壓    u: 粒子速度    P: 音響 파워

즉 相似則이 성립하기 위해서는 無次元量이 實物과 模型간에 일치해야 한다. 공기중의 模型실험에서는 K,  $\rho$ 와 C는 實物과 같다. 여기서 基本相似比로서 모형의 幾何學的 縮尺을 1/n, 철자 r, m을 각각 實物과 모형이라 하고 위 관계를 정리하면 다음과 같다.

$$f_m = n \cdot f_r \tag{2.6}$$

$$T_m = T_r/n \tag{2.7}$$

$$p_m = p_r \tag{2.8}$$

$$u_m = u_r \tag{2.9}$$

$$P_m = P_r/n^2 \tag{2.10}$$

즉 1/n縮尺의 모형실험에서는 (2.6), (2.7)식에서 實物에 대한 實驗周波數는 n배 시간은 1/n의 관계가 성립한다. 또 音響 파워에 대해서도 相似關係를 성립시키는 경우에는 (2.10)식에서 模型音源의 파워는 實物의  $1/n^2(-20 \log ndB)$ 로 해야한다. 실제에는 絶對的인 音壓레벨을 문제로 하는 경우에는 任意의 파워 레벨의 音源으로 실험하고 그 結果를 위 관계에서 補正하면 된다.

III. 室内音響에 관한 模型實驗

모형실험에 대한 연구는 音響學 그것의 歷史와 함께 실내음향의 분야로 개발이 진행되어 왔다. 최근의 단계에서는 음의 波動性을 무시한 빛과 같은 幾何學的 검토나 室의 斷面型을 물탱크에 넣어 水面波를 관찰하는 ripple tank method에 의한 定性的인 실험이 이루어 졌지만 3次元模型에서 실제로 音波를 이용한 본격적인 실험으로는 1934년 spandöck에 의한 홀의 音源에 관한 實驗이 최초였다.<sup>5)</sup>

최근 相似則에 관한 기초적 연구와 境界條件으로서 建築材料의 音響特性 혹은 공기의 音響吸收등의 시뮬레이션이나 기기의 개발로 實物에의 音響現象은 거의 충분히 시뮬레이트가 가능한 단계에 이르렀다.

또한 音響波動理論에 따라 數值解析이나 有限要素法, 境界條件의 응용도 시도되고 있다. 이 방법은 장차 개발가능성은 있으나 室境界의 形象이나 音響特性, 周波數범위등에서 큰 제약이 있으므로 현 단계에서는 실용적인 豫測, 解析方法이라고 할 수 없다. 따라서 현상을 물리적으로 시뮬레이트하는 모형실험법이 가장 유효하고 특히 홀의 音響設計등에서 室内音響效果 까지를 예측하는 경우에는 정밀한 모형실험이 유효하다고 본다.

3.1 內裝材料의 吸音特性 시뮬레이션

실내음향의 모형실험에 있어서 相似則을 만족하기 위해서는 內裝材料의 吸音特性的 實物과 모형에서 같게 할 필요가 있다.

(1) 境界條件에 관한 相似則<sup>6)</sup>

경계조건에 관한 상사칙으로는 波動的으로 (2.8), (2.9)식에서 材料表面의 노말임피던스 Z는

$$Z_m(f_m) = Z_r(f_r) \tag{3.1}$$

의 관계가 성립할 필요가 있다. 또한 에너지적인 개념으로 吸音率  $\alpha$ 에 관하여 상사조건

$$\alpha_m(f_m) = \alpha_r(f_r) \quad (3.2)$$

이 성립하면 된다.

### 3.2 空氣의 音響吸收시뮬레이션

音波가 대기중을 傳播하는 경우 音響吸收에 의해 그 세기는 減衰한다. 따라서 精밀한 음향모형실험에서는 이를 고려할 필요가 있다. 이 공기의 음향흡수 시뮬레이션 방법에 대해서는 여러 溫度, 濕度 조건에서 음향흡수로 인한 減衰係數를 측정한다. 그리 ANSI에서는 공기의 音響吸收係數 計算방법에 관한 규격(ANSI SI. 26-1978)과 최근에 이 計算방법을 개정한 ISO규격인 ISO/DIS 9613/1(1989)가 제안되고 있다.

#### 3.2.1 空氣의 音響吸收

음파가 대기중을 전파할 때 공기의 음향흡수로 감쇠한다. 이 흡의 세기(I)의 감쇠는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$I = I_0 e^{-mx} \quad (3.3)$$

$m$ : 흡의 세기감쇠율( $m^{-1}$ )  $x$ : 거리(m)

이들 ISO/DIS 9613/1에 의하면  $m$ 는 다음식으로 나타내도록 하였다.

$$m = m_{ce} + m_{rot} + m_{vib, 0} + m_{vib, N} \quad (3.4)$$

위 식에서  $m_{ce}$ : 空氣의 粘性과 熱傳導에 기인하는 吸收(古典吸收)에 의한 감쇠

$m_{rot}$ : 空氣의 回轉緩和現象에 기인하는 分子吸收에 의한 감쇠

$m_{vib, 0}$ ,  $m_{vib, N}$ : 水蒸氣와 共存에서 생기는  $O_2$ 분자,  $N_2$ 분자의 振動緩和現象에 기인하는 分子吸收에 의한 감쇠

(3.4)식은 각각 다음식으로 주어진다.

$$m_{ce} = m_{ce} + m_{rot} \quad (3.5)$$

$$= 3.68 * 10^{-11} * (P_s/P_{s0})^{-1} * (T/T_0)^{-1/2} * f^2$$

$$m_{vib, 0} = 0.122 X_0 (T/T_0)^{-3/2} \frac{\exp(-2239.1/T)}{f_{r, N} + f^2/f_{r, N}} f^2 \quad (3.6)$$

$$m_{vib, N} = 0.273 X_N (T/T_0)^{-5/2} \frac{\exp(-3352/T)}{f_{r, N} + f^2/f_{r, N}} f^2 \quad (3.7)$$

$$f_{r, 0} = (P_s/P_{s0}) (24 + 4.04 * 10^4 h * 0.02 + h/0.391 + h) \quad (3.8)$$

$$f_{r, N} = (P_s/P_{s0}) (T/T_0)^{-1/2} * [9 + 280 \exp\{-4.17 [(T/T_0)^{-1/3} - 1]\}] \quad (3.9)$$

$$h = h_r * 10^5 (P_s/P_{s0})^{-1}$$

$$G = 10.79586(1 - T_{01}/T) - 5.02808$$

$$\log(T/T_{01}) + 1.50474 * 10^{-4}$$

$$[1 - 10^{-8.29692(T/T_{01}-1)}] + 4.2873 * 10^{-4}$$

$$[-1 + 10^{-4.76955(1 - T_{01}/T)}] - 2.2195983 \quad (3.10)$$

단,  $P_s$ : 氣壓(KPa)

$P_{s0}$ : 基準의 氣壓(101.325KPa)

$X_0$ :  $O_2$ 濃度(공기에서 0.209)

$X_N$ :  $N_2$ 濃度(공기에서 0.781)

$f_{r, 0}$ :  $O_2$ 分子의 緩和周波數(Hz)

$f_{r, N}$ :  $N_2$ 分子의 緩和周波數(Hz)

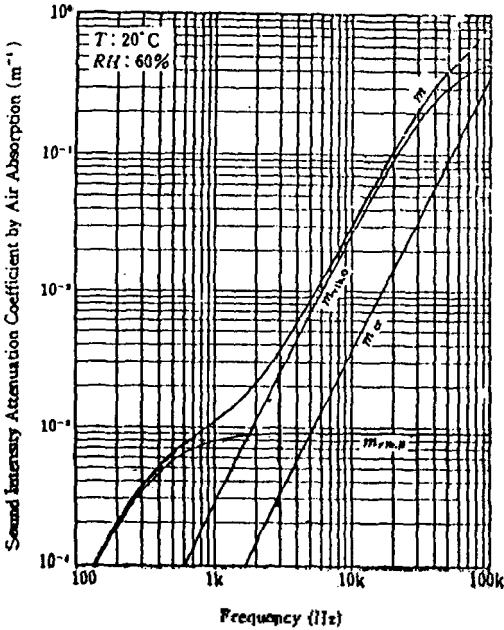
$T$ : 絕對溫度(K)  $T_0$ : 基準溫度(293.15K)

$T_{01}$ : 물의 三重點(273.16K)

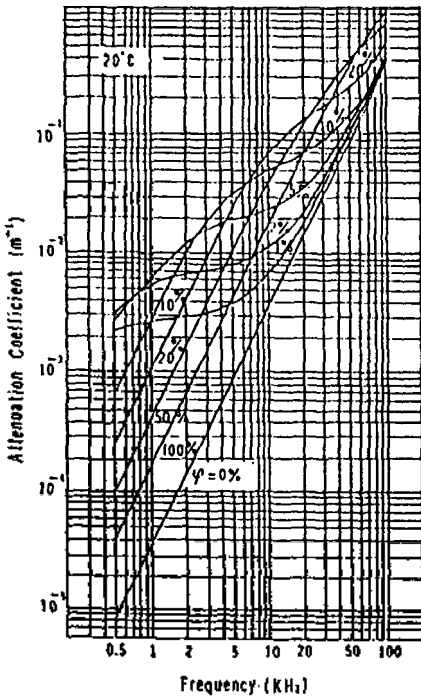
$h$ : 水蒸氣의 露濃度(%)  $h_r$ : 相對濕度(%)

위의 계산을 溫度 20℃, 相對濕度 60%의 공기중에서 감쇠계수를 나타낸 것이 그림1이다. 여기서  $m_{ce}$ 은 周波數, 氣溫, 氣壓에 의존하나 濕도와는 관계없다. 한편  $m_{vib, 0}$ ,  $m_{vib, N}$ 은 周波數, 氣溫, 氣壓에 영향이 있으며 수 KHz이하에서는  $m_{vib, N}$ 에 그 이상의 高周波數帶域에서는  $m_{vib, 0}$ 에 支配되고 또한 濕도에 크게 의존한다. 또한 濕도에 의한 影響의 경우로서 空氣를 媒質로 한 모형음향재료의 吸音率 또는 模型建物の 殘響時間을 구하는 경우 습도에 의한 감쇠는 실물, 모형 모두 고주파수역에서 잔향시간에 관계가 되며 그 관계식은  $f$ (Hz)에서 다음과 같다.

$$T(f) = \frac{K}{\frac{-S}{V} \log_e(1 - \bar{\alpha}(f)) + 4m(f)} \quad (3.11)$$



[그림 1] 空氣의 음響吸收에 의한 음의 세기 減衰率



[그림 2] 空氣의 相對濕度에 의한 減衰率

$T(f)$ : 殘響時間(sec)       $V$ : 室容積( $m^3$ )  
 $S$ : 室表面積( $m^2$ )       $\bar{\alpha}(f)$ : 壁面平均吸音率  
 $m(f)$ : 空氣의 減衰係數( $m^{-1}$ )       $K$ : 定數

실의 치수  $1/n$ 의 모형실에 대해서는  $nf(\text{Hz})$ 에서 殘響 시간이 다음과 같다.

$$T(nf) = \frac{K}{-n \frac{S}{V} \log_e(1 - \bar{\alpha}(nf)) + 4m(nf)} \quad (3.12)$$

실물과 모형에서  $\bar{\alpha}(f) = \bar{\alpha}(nf)$ 이므로  $n \cdot m(f) = m(nf)$  또는  $4m(f)$ 와  $4m(nf)$ 가 (3.11)과 (3.12)식의 우변분모의 제1항과 비교하여 무시할 수 있는 경우는 (3.12)식은 다음과 같이 된다.

$$T(nf) = T(f)/n \quad (3.13)$$

이 감쇠계수  $m$ 에 대해서는 비교적 실험값과 일치하는 Sivian<sup>7)</sup>의 다음식으로 검토하면

$$m(f) = (33 + 0.2t)f^2 * 10^{-12} + \frac{Mf}{2\pi f/k + k/2\pi f} \quad (3.14)$$

$t$ : 溫度( $^{\circ}C$ )       $f$ : 周波數(Hz)  
 $M: 1.25 * 10^{-5}(\text{sec} \cdot m^{-1})$        $k: 1.92h^{1.3} * 10^5(\text{sec}^{-1})$   
 $h: 2.31 * 10^{-2}\phi$        $\phi$ : 相對濕度(%)

$t = 20^{\circ}C$ 와 相對濕度, 周波數를 변화 시킬때의 減衰係數  $m(f)$ 의 값을 그림2에 나타내었다.<sup>8)</sup>

周波數는 縮尺比  $n$ 에 의해 정해지므로 濕度의 변화로서 결정되며 模型實驗의 濕度調整에 따른다. 이 조정은  $n$ 가 적은 경우는 模型의 크기에, 큰 경우는 再生用 音響機器의 上限周波數에 제한을 가하므로  $n$ 는 10의 전후가 된다.

#### IV. 遮音에 관한 模型實驗

音響模型實驗은 주로 室內音響分野에서 개발되어 응용되어 왔으나 建物등에 遮音性能의 豫測, 遮音構造의 개발을 위한 검토등에도 유효하다고 본다.

##### 4.1 基本相似則

遮音의 模型실험에서 相似條件은 벽체와 音響透過損失(TL)에 관한 다음의 관계가 기본이 된다.

(r, m은 각각 實物, 模型)

$$\cdot TL_m(f_m) = TL_r(f_r) \quad (4.1)$$

여기서 單層壁과 中空二重壁에 대해 縮尺模型에 의한 이론적 고찰을 한다.

#### 4.1.1 單層壁의 音響透過損失

재료의 음향투과손실은 質量則에 의해 지배되고 다음식으로 나타낸다.

$$TL_0 = 20 \log f \cdot M - 43 \text{ (dB)} \quad (4.2)$$

$$TL = TL_0 - 10 \log(0.23 TL_0) \text{ (dB)} \quad (4.3)$$

TL<sub>0</sub> : 垂直入射透過損失      f : 周波數

TL : 亂入射透過損失      M : 面密度

이 質量則만을 고려하여 모형에서 TL의 사물레이션을 생각하면 (4.2)에서 f · M의 값을 實物과 模型에서 같게하면 된다. 즉

$$f_m M_m = f_r M_r \quad (4.4)$$

한편 축척 1/n의 모형실험에서는

$$f_m = n \cdot f_r \quad (4.5)$$

의 관계가 필요하므로 (4.4), (4.5)식으로 다음의 관계를 구할 수 있다.

$$M_m = M_r/n \quad (4.6)$$

즉 模型材料로서는 시물레이트해야할 실물재료의 1/n의 面密度를 갖는 것을 취하면 된다.

다음 遮音特性에 중요한 코인시던스 효과에 대해서도 相似化를 고려하면 다음식으로 나타내는 코인시던스 周波數에 대해서도 (4.6)식의 관계가 성립해야 한다.

$$f = \frac{c^2}{2\pi t \sin^2 \theta} \sqrt{12\rho/E} \quad (4.7)$$

t : 板두께      ρ : 板材의 密度      E : 板材의 영률

θ : 入射角度      c : 音速

또한 (4.6)식을 고쳐쓰면

$$\rho_m \cdot t_m = \rho_r \cdot t_r/n \quad (4.8)$$

이 되지만 (4.5), (4.8)식을 (4.7)식에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$(\rho \sqrt{\rho/E})_m = (\rho \sqrt{\rho/E})_r$$

즉 質量則뿐만 아니라 코인시던스 周波數에 대해서도 相似化를 고려할 경우는 (4.8)식의 조건을 만족하는 모형실험을 할 필요가 있다. 模型材料로서 實物과 같은 재료를 쓰는 경우는 두께를 1/n로 축척하므로서 위조건은 성립한다.

#### 4.2.2 中空二重壁의 音響透過損失

中空二重壁의 音響透過損失에 대해서는 2장의 板材料의 mass reactance만을 고려하면 다음식을 얻는다.

$$TL = 10 \log [1 + \omega^2 \{ M_1 M_2 \cos^2 \theta / 2(\rho c)^2 \omega \sin \phi - (M_1 + M_2) \cos \theta / 2\rho c \cdot \cos \phi \}^2 + \omega^2 \{ (M_1 - M_2) \cos \theta / 2\rho c \}^2 \sin^2 \phi ] \quad (4.9)$$

단, φ = ω/c · d cos θ      ω = 2πf

M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> : 2장판재료의 면밀도

d : 中空層의 두께

윗식에서 中空層의 두께도 실물의 1/n로 하고 M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>에 대해서도 (4.6)식을 만족하면 (4.1)식의 관계가 성립한다. 二重壁에서는 낮은 周波數域의 共振透過에 의한 音響透過損失의 저하가 중요하다. 이 共振透過가 생기는 周波數(f<sub>rnd</sub>)는 다음식으로 나타낸다.

$$f_{rnd} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{M_1 + M_2}{M_1 M_2} \frac{\rho c^2}{d \cos \theta}} \quad (4.10)$$

윗식에서 M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>와 中空層두께 d를 1/n로 축척하므로서 모형에서 f<sub>rnd</sub>는 실물에 대해 n배가 된다. 그리고 中空層內의 定在波에 의한 高音域에서 共振透過現象이 생기는 周波數에 대해서도 中空層을 1/n로 축척하므로서 相似關係가 성립한다.

### V. 結 論

建築音響分野에서 각종의 問題에 대해 先進外國에서는 컴퓨터에 의한 音場의 시뮬레이션이 이루어지고 있고 이 方法도 기대할 수 있지만 복잡한 室形, 境界條件, 音響特性의 取扱, 周波數範圍 등에서 많은 制約이 있어 現象을 物理的으로 시뮬레이트하는 模型實驗의 解析方法이 有用性이 있어 많이 행해지고 있다.

模型實驗의 경우 가장 重要한것은 實物과 模型간의 物理的 對應인 相似則의 다음의 관계가 基本이 된다.

(1) 室內音響에서

$$f_m = n \cdot f_r$$

$$T_m = T_r/n$$

$$\alpha_m(f_m) = \alpha_r(f_r)$$

(2) 空氣의 音響係數  $m_{cr}$ 는 주파수, 기온, 기압에 관계가 있으며 특히  $m_{vib, 0}$ ,  $m_{vib, N}$ 는 습도에도 크게 의존하며 고주파대역에서는  $m_{vib, 0}$ 가 지배적이다.

(3) 遮音의 模型實驗에서는 基本相似則으로서 音響透過損失(TL)에 대해서는

$$TL_m(f_m) = TL_r(f_r)의 관계가 있다.$$

앞으로 實物과 模型간의 物理的 對應關係의 明確性을 확립하고 그것을 實用化하기 위한 구체적인 實驗技術의 開發이 계속되어야 한다고 사료된다.

### 참 고 문 헌

1. 木村 翔: 실내음향における模型實驗의 效用と 限界, 日本音響學會誌 27卷 3號, 1971
2. 木村 翔: モデルを使った室内音響設計, 建築音響 NO. 14, 1968. 3
3. 江守一郎: 模型實驗의 理論と 應用(第2版), 技報堂出版, 1985
4. 本間仁, 春日屋伸昌: 次元解析, 最小2乗法と 實驗式, コロナ社, 1966
5. F.Spandök: Raumakustisch Modellversuche Annaler der Physik V, Vol.20, 1934
6. 橋秀樹, 石井聖光: 音響模型實驗의 ための 內裝材吸音特性의 シミュレーション, 日本音響學會誌, 28卷 4號, 1972
7. L. J. Sivian: High frequency absorption in air and other gases J.A.S.A, 19. 1947
8. 小西睦男: 模型室内音響實驗と 實物との 比較例, 日本音響學會誌, 26卷 3號 1971

9. 橋秀樹, 石井聖光: 音響模型實驗における相似則實驗手法, 日本音響學會誌 32卷 10號, 1976
10. 山本照二, 若栗尚: スケルモデルによる室内音響研究の實施上の問題点, NHK 技研月報, Vol.8, No.8, 1965
11. V.Ingard and R.H.Bolt: A free field method of measuring the absorption coefficient of acoustic material, J. Acoust. Soc. Am, 23(5), 1949
12. C.Zwicker and C.W.Kosten: Sound Absorption Materials, Elsevier Publishing Co. Inc, 1949
13. 橋秀樹, 石井聖光: 遮音に關する模型實驗, 音響技術, No.6, 1974. 4
14. 一方井孝治, 橋秀樹, 石井聖光: 透過損失測定に關する檢討, 日本音響學會講演論文集, 1983. 10

▲김 천 수

1953년 6월 25일생

1978년 2월: 전북대학교 공과대학 건축공학과 졸업(공학사)

1985년 3월~1988년 2월: 광주대학교 대학원 전자계산기공학과 박사과정 수료

1983년 1월~1993년 2월: 삼성전자 종합연구소 선임 연구원



1993년 3월~현재: 한림전문대학 전자통신과 전임강사  
※주관심분야: Digital Signal Processing(음성합성, 인식) Neural Network, ASIC

▲신 영 무: VOL.9 NO.2 1990

1991년 4월~현재: 전북산업대학교 건축공학과 교수

▲박 병 전: VOL.9 NO.2 1990