

## 다목적 야외경기장의 음향특성에 관한 연구

### -서울월드컵 경기장을 중심으로-

김정중\*, 손장열\*, 김용국\*\*

## A Study on the Properties of Acoustic in Multi-purpose out-door Stadium

### - a case study of seoul world cup stadium -

#### ABSTRACT

recently out-door stadium have been built not only for athletic sports but also various events and huge concerts .and 50 % of the roof of multi-purpose stadium have been covered by dome and the tendency of this kind of building type gradually increase. in spite of this kind of building tendency, the appearance of acoustic obstacle is serious and have little solution of this problem in acoustic-prevent building field. The purpose of this study is for analysis of acoustic Properties ( SPL, RT60, RASTI) and answering of characteristics of echo through acoustic computer simulation in Seoul world cup stadium in the first instance.

#### 1 장. 서 론

##### 1. 음향설계 연구의 목적 및 배경

최근의 야외경기장의 설계는 운동경기뿐만 아니라 각종 이벤트 및 대형콘서트를 수용하는 다목적경기장으로 건설되어지고 있다. 예전에는 개방형야외경기장의 건립이 주를 이루었으나 최근에는 경기장의 50%이상이 천장으로 덮이는 야외경기장의 건립이 증가하는 추세로 변화되고 있어 이에 따르는 음향장애 문제가 심각한 실정으로 음향장애 개선에 따르는 흡음재의 선정, 시공에 관한 건축음향설계의 중요성은 점점 비중을 더해가고 있다.

그러나 몇몇의 경기장을 제외하고는 음향설계가 무계획적으로 이루어지고 있으며, 또한 구조에 맞는 흡음재료의 시공도 미흡한 실정이다. 현재 건설되고있는 2002월드컵 대회의 개막식과 준결승전 등이 열리는 7만 관중을 수용하는 서울월드컵경기장은 국제적인 규모의 웅장한 건축물로서 축구경기 뿐만 아니라 각종 이벤트행사를 수반하는 다목적 행사장으로 활용이 예상되기 때문에 이에 적합한 공간으로 시공되어야 할 것이다.

본 연구는 서울월드컵경기장을 중심으로 건축음향설계에 관한 이론을 고찰함과 동시에 건축설계 도면과 전기음향설계 도면을 중심으로 음향학적인 측면에서 음향설계 1안,2안,3안을 제시하고 이에 대하여 중요 음향인자들을 서울시설계기준과 비교 평가, 분석하고 사용목

- \* 한양대학교 환경대학원 석사과정
- \*\* 한양대학교 건축공학부 교수
- \*\*\* 환경음향연구소 소장

적에 적합한 잔향시간, 명료도 및 고른 음압 분포를 얻기 위한 건축물의 흡음구조 등을 검토하여 건축음향 설계재원에 반영하고 이를 검증하기 위한 이론적인 음향분석과 Computer Simulation 분석을 시행하여 보완방법을 연구하는데 그 목적이 있다.

## 2 연구의 범위와 진행

본 건축음향 음향설계연구 범위는 서울월드컵경기장의 천장면이 테프론막을 시설하기 위한 구조로 설계되어 있기 때문에 외국 경기장 등에서 사용된 다양한 흡음 재료의 설치가 가능하여 다음 3가지의 음향설계 방안에 대한 음향인자들의 이론 해석과 Computer Simulation에 의한 음향 설계해석을 시행하였다.

설계 1 안 : 천장면 33,304m<sup>2</sup>를 단일막으로 시공

설계 2 안 : 천장면 33,304m<sup>2</sup> 전체를 단일막+흡음내막으로 시공

설계 3 안 : 천장면의 막구조 33,304m<sup>2</sup>을 단일막으로 시공하고 10,329m<sup>2</sup>를 삼각트러스 양면 1.5m를 흡음재료를 시공하는 안

본 연구 흐름도는 다음과 같다.

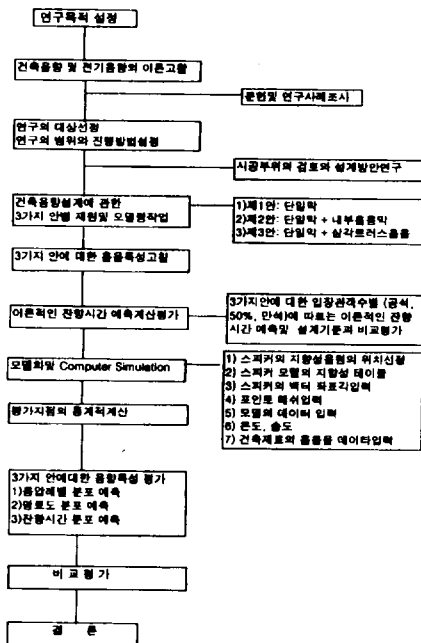


Fig 1. study flow-chart

## 3. 경기장음향설비 설계기준 및 시공지침

### 1) 설계지침(음향성능기준)

① 실 및 용도별로 적절한 음향조건이 갖추어지도록 필요한 차음·흡음 방진조치를 하여야 한다.

② 경기장은 적절한 음향조건이 갖춰지는 구조 및 마감재료를 선택하여야 한다

### 2) 음향설비의 설계목적

① 잔향시간 : 3초이내(500Hz 기준)

② 명료도 : 0.5이상

③ 음압레벨 : 90dB 이상

### 3) 건축설계 목표잔향시간(설계지침 기준)

음향설계에서 잔향시간과 에코 및 명료도 문제는 중요한 음향요소로서 잔향시간이 길게되면 청중이 안내방송을 잘 알아 들을 수 없고 echo 현상으로 인한 명료도 저하 현상등이 발생한다.

따라서, 잔향시간은 그 경기장의 사용목적에 적합한 것이어야 하며, 이를 최적잔향시간이라하며 서울시에서는 이와 같은 설계목표 잔향시간을 설계지침과 특기시방서에서 건축음향의 평균잔향치를 3초 이내로 규정하고 있다.

## II 장. 건축음향 설계연구 방안

### 1. 시공부위 검토와 설계연구방안

#### 1) 시공부위 검토

○ 서울월드컵경기장과 같은 반 개방형 건축물에서 건축음향 설계 목적은

① 잔향시간 조절

② 유효한 반사음 조절과 에코(echo) 제거

③ 환경 소음의 감쇠 등을 들 수 있다.

○ 서울월드컵경기장의 음향설계를 진행하기 위하여서는 건축물 재원의 부위별 구성재료 흡음력에 의한 잔향시간 조정이 무엇보다 중요하다. 따라서 음향 공간 내부의 부위별 재료를 살펴보면 천장과 객석 그리고 경기장으로 크게 구분할 수 있으며 객석 의자와 바닥은 마감재료 변경이 불가능하고, 천장 및 벽 등은 흡음력을 조절할 수 있는 가변 흡음력 부분으로 부가흡음 설계 방법이 가능하여 이부분에 대한 흡음재료의 형식과 선택방안이 가장 유리하다고 판단된다.

○ 사용되는 흡음재료는 판상형, 다공질형, 공명형, 천공판형 등으로 구분되며, 흡음특성은 재료의 구조에 따라 많은 영향을 받기 때문에 재료의 선정은 물론 시공에 신중을 기하여야 한다.

2) 설계연구방안 검토

○ 경기장의 천장면이 천장막구조를 시설하기 위한 구조로 설계되었기 때문에 외국경기장과 같이 타공판형 흡음재료를 시공할 수 없어 음향설계 1,2,3안을 중심으로 재원을 산출하고 음향학적인 측면에서 음향설계 인자들을 분석하여 서울시의 설계조건과 비교평가 하고자 한다.

2. 설계 재원

아래(표 2-1)은 서울월드컵경기장 음향설계 1,2,3안의 부위별 시공 재료와 면적 등 일반재원을 나타낸 것이다.

(표 2-1)음향설계 제 1,2,3안의 건축음향설계재원

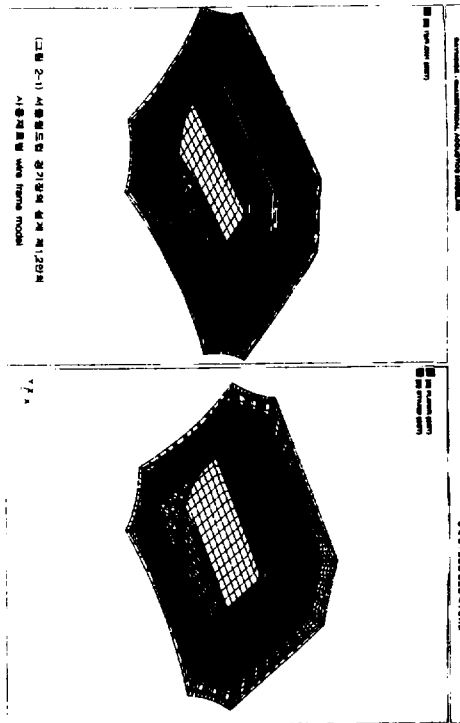
| 구분                      | 재료종류                | 벽체                            | 천정       | 바닥  | 재료별 면적(M <sup>2</sup> ) | 비고    |
|-------------------------|---------------------|-------------------------------|----------|---|-------------------------|-------|
| 1.경기장 Grass             |                     |                               |          | 7,140.0 (경기장)<br>4,964.7                    | 12,104.7                |       |
| 2.관람석 Plastic           |                     | 8,294.9(1'3)<br>10,660.3(5'6) |          | 3,528.4(1층)<br>10,379.0(3층)<br>16,717.4(6층) | 49,570.0                |       |
| 3.통로 Concrete           |                     |                               |          | 1,566.6(1층)<br>1,267.8(3층)<br>1,360.2(6층)   | 4,224.6                 |       |
| 4.벽체                    |                     | 1,497.8(1'3)<br>660.0(5'6)    |          |   | 2,157.8                 |       |
| 5.지붕                    | 단일막                 |                               | 33,304.7 |   | 33,304.7                | 설계 1안 |
|                         | 단일막 + 흡음내막          |                               | 33,304.7 |   | 33,304.7                | 설계 2안 |
|                         | 단일막 + 실리카겔(Si) 흡음체리 |                               | 33,304.7 |   | 33,304.7                | 설계 3안 |
|                         | 알루미늄 물딩 판유리 (10mm)  |                               | 12,614.7 |   | 12,614.7                |       |
|                         |                     |                               | 7,365.2  |   | 7,365.2                 |       |
| 6.지붕OPEN부분              |                     |                               | 16,214.4 |   | 16,214.4                |       |
| 7.벽체OPEN부분              |                     | 3,675.2                       |          |   | 3,675.2                 |       |
| 실면적(S)합계 M <sup>2</sup> |                     | 24,778.2                      | 84,066   | 46,954.1                                    | 155,797.3               |       |

3. 흡음재료의 음향특성

1) 설계 제1안의 단일막 구조와 설계2안의 흡음내막 구조의 음향 특성

흡음내막 물성은 Fiber Glass Fabric의 직조 재료로서 입사하는 음파는 작은 알맹이의 다공을 전파하여 재료 내부에 스며들어 공기와 마찰, 진동될 때 음Energy가 감소되며 또한 작은 알맹이의 직조 세사가 음파에 의하여 진동을 하게 되어 흡음을 동반한다. 따라서 흡음을 좌우하는 요인에는 ① 재료의 밀도와 두께, ② 재료 중의 작은 알맹이의 통기성, ③ 재료 배후의 공기 층에 따라 흡음률이 변화한다.

따라서 Computer Simulation을 진행하면서 제조 회사들의 제품을 검토한 결과, 회사에 따라 막 재료의 밀도와 재료의 시공구조 (외막+공기층+Fabrasorb 흡음내막), 재질에 따라 차이는 있으나 지붕막으로 채택된



BirdAir사의 흡음률 DATA는 아래(표 2-2)와 같다.

(표 2-2)설계제 1,2안의 막재료의 흡음률DATA

| 주파수<br>물 성 | 125  | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 | 비고       |
|------------|------|------|------|------|------|------|----------|
| 단일막        | 0.37 | 0.22 | 0.17 | 0.15 | 0.09 | 0.06 | 설계<br>1안 |
| 단일막+내부흡음막  | 0.65 | 0.71 | 0.82 | 0.85 | 0.75 | 0.62 | 설계<br>2안 |

\* 감음계수(Noise Reduction Coefficient) NRC값은

$$NRC = (a_{250} + a_{500} + a_{1000} + a_{2000}) / 4$$

$$= 0.71 + 0.82 + 0.85 + 0.75 / 4 = 0.78$$

## 2) 설계 제3안의 트러스에 사용되는

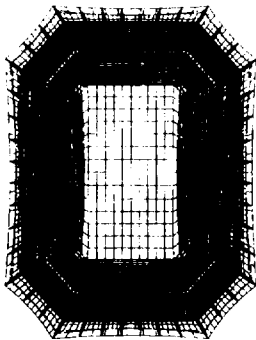
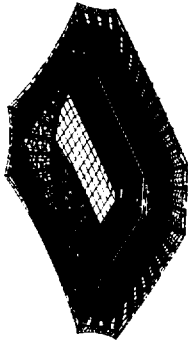
### 현수 흡음체의 음향 특성

현수 흡음체(매달이 흡음체)는 경량화가 요구되는 실내 체육관 등에서 널리 사용되는 흡음체로서 천장면과 바닥면 사이에서 발생하는 long pass echo를 방지하기 위하여 천장 면에 흡음체를 매달아 반사음을 흡음시켜 잔향시간을 최소화하는 방법이며 흡음률 DATA는 다음 (표3-3)과 같으며 설치 상세도는 (그림 2-3~5)와 같다.

(표3-3) 설계 3안의 트러스 흡음체의 흡음률 DATA

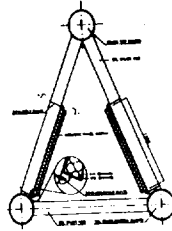
| 주파수<br>물 성 | 125  | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 | 비 고  |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 트러스흡음체     | 0.93 | 0.75 | 0.91 | 0.93 | 0.85 | 0.65 | 설계3안 |

서울월드컵경기장  
사용외막의 트러스구조

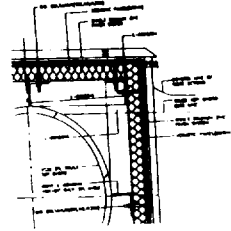


외막 트러스 구조  
사용외막의 트러스구조

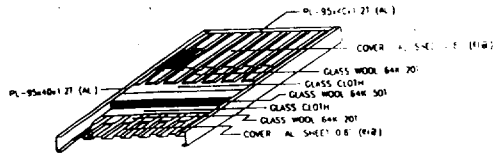
외막 트러스 구조  
사용외막의 트러스구조



(그림 2-3) Radial Truss Panel의 설치상세도



(그림 2-4) Ring Truss Panel의 설치상세도



(그림 2-5) Truss panel의 입체상세도

따라서, 서울월드컵경기장의 천장 외막은 트러스구조를 중심으로 135° 정도의 경사각을 이루면서 시공되므로 하단 부위가 천장막에서 반사되는 반사음의 초점 부위가 되므로 이 부분에 미관등을 고려한 현수 흡음체를 제작 시공하여 외막의 넓은 면적을 현수 흡음체의 면적으로 흡음하는 결과와 같은 효과를 기대할 수 있다.

### 3) 재원별 흡음률 DATA의 적용

다음표(2-4)는 설계 1,2,3안의 건축음향 재료의 흡음률 DATA를 나타낸 것이다.

(표 2-4) 설계 1,2,3안의 건축음향 재원별

흡음률 DATA

| 주파수(Hz)<br>재 료 명         | 125  | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Concrete Painted         | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.03 |
| Plastic 의자               | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.04 | 0.04 | 0.03 |
| Plastic 의자에<br>관객이 있는 경우 | 0.10 | 0.19 | 0.32 | 0.38 | 0.38 | 0.36 |
| Grass 2" 잔디              | 0.34 | 0.55 | 0.60 | 0.42 | 0.55 | 0.56 |
| SheerFill II 단일막         | 0.37 | 0.22 | 0.17 | 0.15 | 0.09 | 0.06 |
| Fabrasorb<br>흡음내막        | 0.65 | 0.71 | 0.82 | 0.85 | 0.75 | 0.62 |
| Glass판<br>(대 판 유리)       | 0.18 | 0.06 | 0.04 | 0.03 | 0.02 | 0.02 |
| AL. 쉬트(물딩)               | 0.29 | 0.26 | 0.13 | 0.08 | 0.07 | 0.16 |
| 트라스하부<br>흡음재             | 0.93 | 0.75 | 0.91 | 0.93 | 0.85 | 0.65 |

### III 장. 음향이론 계산과 Computer Simulation

서울월드컵경기장의 음향 환경을 분석하기 위하여 건축음향과 전기음향 및 육의 경기장의 음향설계에 관한 전반적인 이론을 고찰하고 서울시의 설계 시방에서 정한 설계 기준과 설계1안, 2안, 3안에 대하여 음향학적인 측면에서 이론 계산 음향인자 값들과 Computer

Simulation값들을 비교, 검토하여 평가하고 이에 대한 결과를 제시하고자 한다.

### 1. 잔향시간 평가

#### 1) Eyring-Knudsen식에 의한 잔향시간

계산 예측 평가

Eyring의 잔향식은 실내 음장이 확산 음장이라는 가정과 실내공간의 흡음재료가 균등 분포인 경우 이론과 실측치가 잘 일치한다.

따라서 서울월드컵경기장을 실내음장과 같은 Model로 가상하면 천장면과 벽체 상층 open부위가 막혀있는 가상 공간이 된다는 가정하에서 Eyring식이 적용된다. 따라서 천장면의 막구조를 재원에서의 설계연구 1안, 2안, 3안으로 변화시키고 객석의 입장객수를 공석시(0%), 50%입장시, 만석시(100%)를 계산하면 아래(표 3-1)과 같다.

(표3-1) 설계1,2,3안의 입장객수별 잔향시간

DATA (Eyring-Knudsen식)

| 구 분         | 설계1안 | 설계2안 | 설계3안 |
|-------------|------|------|------|
| 공 석 시(0%)   | 6.76 | 3.70 | 5.61 |
| 50%입장시      | 5.38 | 3.05 | 4.58 |
| 만 석 시(100%) | 4.25 | 2.62 | 3.82 |

#### 2) 잔향시간 Computer Simulation 예측 평가

Eyring의 잔향식은 실내음장이 하나의 공간으로 확산 음장이란 가정과 실내표면의 흡음재료가 균등하게 분포 되어야한다는 조건을 만족시켜야 실측치와 계산치가 일치한다. 그러나 서울월드컵경기장과 같이 반 개방형 Stadium에서는 위 조건을 만족시킬 수 없기 때문에 Schroeder의 이론 해석에 의한 Impulse Response의 2승 적분법의 잔향시간 계산 예측을 수행할 수 있는 Raynoise Software의 Triangular Beam Method를 활용하여 잔향시간을 구하고 음향인자들을 Simulation하여 서울시설계지침과 특기시방의 설계목표 잔향시간 값과 비교, 검토, 평가하고자 한다

따라서 잔향시간 및 SPL과 명료도 등의 음향인자를 Computer Simulation을 예측하기 위하여는 다음의 Raynoise Software에서 필요로 하는 설계 DATA의 입력이 필요하다.

#### ① 서울월드컵경기장의 3D WIRE FRAME

MODELING ( 17800개)

② CLUSTER SPEAKER의 설치위치

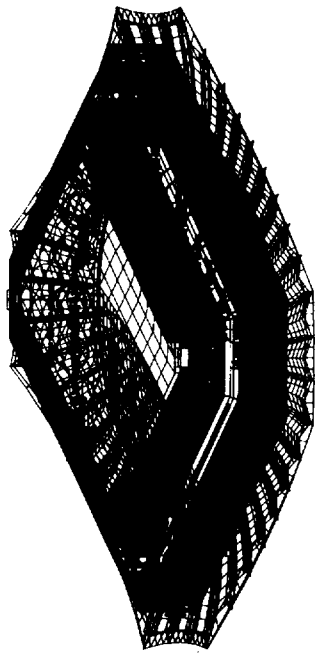
( 100개의 Source)

POWER LEVEL-125dB

Speaker 지향각 객석용 - H 60° V 45°

Field용 - H 60° V 40°

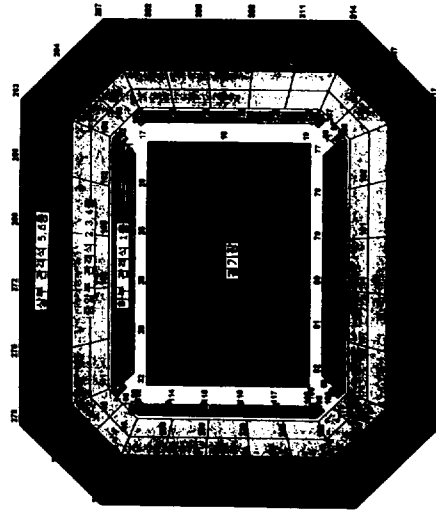
- ③ Speaker의 지향성 DATA
- ④ 잔향시간의 예측, 비교 지점 선정
- ⑤ 건축의 내부 재료의 흡음률은 DATA 참조
- ⑥ 기상조건 온도-20°C  
습도-50%(서울시의 실제조건)
- ⑦ 필드포인트(평가지점) 400개소



[그림 3-1] 서울월드컵경기장의 스피커 배치면도

3) Computer Simulation 평가

축구 경기장의 관중은 30%입장시와 50%입장시 관중석에 균등하게 착석하는 것이 아니라 선호하는 선수와 지역연고 때문에 부위별로 부분 밀집 분포된다. 그러나 Computer Simulation 결과치는 63,000여석의 좌석 중 기준 평가 지점에 대한 500Hz를 기준으로한 평균 잔향시간 분포 평가치이다.



[그림 3-2] 평가지점에 대한 객석위치별 평면도

① 음향설계 제1안 : 천장면 33,304㎡를 단일막으로 시공

| 구 분         | 관객석 1층      | 관객석 2,3,4층  | 관객석 5,6층    |
|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 공 석 시(0%)   | 5.29        | 5.79        | 6.17        |
| 50% 입장      | 4.42        | 4.90        | 5.12        |
| 만 석 시(100%) | <b>3.63</b> | <b>4.28</b> | <b>4.37</b> |

② 음향설계 제2안 : 천장면 33,304㎡ 전체를 단일막 + 흡음내막으로 시공

| 구 분         | 관객석 1층      | 관객석 2,3,4층  | 관객석 5,6층    |
|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 공 석 시(0%)   | 3.54        | 4.51        | 3.78        |
| 50% 입장      | 2.89        | 3.70        | 3.11        |
| 만 석 시(100%) | <b>2.74</b> | <b>3.02</b> | <b>2.93</b> |

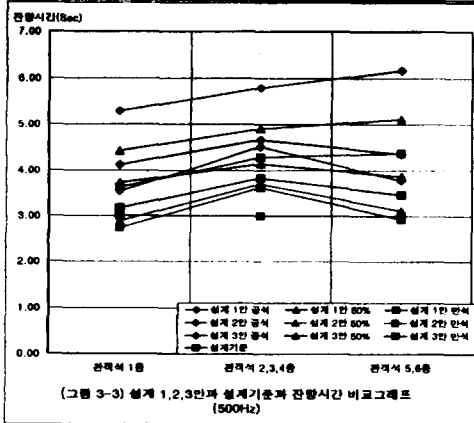
③ 음향설계 제3안 : 천장면의 막구조 33,304m<sup>2</sup>을  
단일막으로 시공하고 10,329m<sup>2</sup>를  
삼각트러스 흡음판넬로 시공하는 안

| 구 분                | 관객석 1층      | 관객석 2,3,4층  | 관객석 5,6층    |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|
| 공 석 시(0%)          | 4.12        | 4.66        | 4.35        |
| 50% 입장             | 3.73        | 4.14        | 3.87        |
| <b>안 석 시(100%)</b> | <b>3.17</b> | <b>3.83</b> | <b>3.46</b> |

상기와 같이, 잔향시간을 Raynoise Computer Simulation 결과를 비교하면 아래 (표 3-2)와 (그림 3-3)과 같이 예측된다.

(표3-2) 설계 1,2,3 안과 설계기준과 관객석각 비교표 (500Hz)

|      | 관객석 1층 | 관객석 2,3,4층 | 관객석 5,6층 |
|------|--------|------------|----------|
| 공석   | 6.23   | 5.79       | 6.17     |
| 50%  | 4.42   | 4.90       | 5.12     |
| 안석   | 3.83   | 4.28       | 4.37     |
| 공석   | 3.64   | 4.51       | 3.78     |
| 50%  | 2.89   | 3.70       | 3.11     |
| 안석   | 2.74   | 3.82       | 2.82     |
| 공석   | 4.12   | 4.00       | 4.36     |
| 50%  | 3.73   | 4.14       | 3.87     |
| 안석   | 3.17   | 3.83       | 3.46     |
| 설계기준 | 3.00   | 3.00       | 3.00     |



## 2. 명료도 예측

명료도는 음향공간 내에서 Speech 음의 전달상태나 이해도를 나타내는 척도로 주로 잔향(Reverberation), 음의 간섭(Interference) 및 환경소음(Background Noise) 등에 직접적으로 관계가 있다. 명료도의 대표적 척도로서 RASTI를 많이 사용한다.

따라서 Raynoise Software를 사용하여 서울월드컵경기장의 음향설계 1, 2, 3 안에 대한 명료도는 다음(표3-3)과 같이 예측된다.

(표3-3) 설계 제1,2,3안에 대한 RASTI 예측

| 설계 제1안    | 공석시(평균) | 0.25      | 서울시<br>기준에 미달 |
|-----------|---------|-----------|---------------|
|           | 만석시(평균) | 0.38      |               |
| 설계 제2안    | 공석시(평균) | 0.38~0.5  | 서울시<br>기준에 적합 |
|           | 만석시(평균) | 0.5~0.6   |               |
| 설계 제3안    | 공석시(평균) | 0.30~0.40 | 서울시<br>기준에 근접 |
|           | 만석시(평균) | 0.38~0.55 |               |
| 서울시<br>기준 | 0.5이상   |           |               |

## 3. 관객석의 음압 Level 예측

서울월드컵경기장과 같은 대형 Stadium의 음압 LEVEL은 음원으로 부터 도달하는 직접음과 천장과 벽면 등으로부터 반사되어 관객석에 도달하는 반사음 성분으로 구분되며 Speaker 자원과 경기장 표면적의 자원 DATA 및 온·습도를 입력시켜 관객석의 SPL값을 구하면 100dB ±10dB 정도로 판독되어 서울시 설계지침과 특기시방의 조건을 만족하는 것으로 다음(표 3-4)와 같이 예측된다.

(표 3-4) 설계 제 1,2,3안에 대한 음압레벨 예측

| 설계 제1안    | 공석시    | 95~105dB | 서울시 기준에<br>적합 |
|-----------|--------|----------|---------------|
|           | 만석시    | 92~102dB |               |
| 설계 제2안    | 공석시    | 95~102dB | 서울시 기준에<br>적합 |
|           | 만석시    | 92~100dB |               |
| 설계 제3안    | 공석시    | 95~102dB | 서울시 기준에<br>적합 |
|           | 만석시    | 92~100dB |               |
| 서울시<br>기준 | 90dB이상 |          |               |

## IV. 장. 결. 론

서울월드컵경기장의 건축설계 도면과 전기음향 설계도면을 중심으로 음향환경에 대한 중요 음향인자들의 이론계산 해석과 Computer Simulation 결과치를 서울시설계지침, 특기시방 및 기준과 비교 검토한 결과를 다음과 같이 평가한다.

## 1. 잔향시간 평가

설계 제1,2,3안에 대하여 Raynoise Software의 잔향시간 Computer Simulation 값을 500Hz기준으로 종합하면 부위에 따라 차이는 있으나 공석시 와 100% 만석시를 비교하면 다음(표4-1)과 같이 평가된다.

(표 4-1) 설계 제1,2,3안에 대한 잔향시간 평가

| 구 분     | 공 석 시 | 만 석 시 | 비 고 |
|---------|-------|-------|-----|
| 설계1안    | 6.17초 | 4.37초 | 부적합 |
| 설계2안    | 3.78초 | 2.93초 | 적 합 |
| 설계3안    | 4.66초 | 3.83초 | 근 접 |
| 서울시설계기준 | 3초    |       |     |

따라서, 만석이 된다 하여도 설계2안으로 시공시는 객석의 중앙부에서 0.62초를 초과하고, 설계3안으로 시공한다 하여도 중앙부에서 0.83초, 상부에서 0.46초를 초과하는 것으로 평가되고 있어, 경기장 음향설비로서의 기능을 다하기 위하여는 최소한 설계 2안이나 3안으로 시공되어야 할 것으로 사료된다. 그러나, 관객석의 관중은 모든 경기에 만석이 되는 것은 아니며 50%가 입장한다 하여도 지역 연고와 선호하는 선수의 응원석에 관중이 편중됨으로 이론적인 평균 잔향시간과 체감하는 잔향감은 다르게 느껴질 것으로 잔향시간이 최소화되는 건설방안이 요망된다.

## 2. 음의 명료도 평가

명료도 손실(ALcons)은 음원에서 어느 정도의 일정 거리( $D_0$ )까지는 거리와 함께 증가하나  $D_0$ 이상에서는 잔향시간으로 결정되는 일정한 값에 수렴하게 된다. 따라서, 경기장 재원과 설계2안과 3안의 잔향시간, Speaker와 관객석 거리등의 조건을 대입하여 Computer Simulation 결과 설계2안(0.5~0.6)이 가장 최적이나 3안(0.38~0.55)도 만석시에는 서울시 기준에 근접하게 된다.

## 3. 경기장 음압레벨 분포 평가

서울월드컵경기장과 같은 반 개방형 경기장에서는 실내 음장과는 달리 음원으로부터 23m~53m 정도 떨어진 거리에 관객석이 위치함으로 객석의 음압레벨은 Speaker System의 음원으로부터 직접 들을 수 있는 직접음 성분과 천장 면과 벽체, 관객석 등에서 수 차례 반사되어 관객석에 도달하는 반사음 성분으로 구분되거나 합성 음압레벨 값은 90dB~100dB로 균등하게 분포되는 것으로 판독되어 서울시 설계조건을 충족시키는 것으로 평가된다.

## 참 고 문 헌

- Beranek, Leo.: Concert and Opera Halls, How They Sound. Acoustical Society of America, Woodbury NY, 1996.
- Burroughs, Courtney.: Classnotes for Room Acoustics, ACS597E. The Pennsylvania state University, University Park, PA., Unpublished, Fall Semester, 1997.
- Egan, M. David.: Architectural Acoustics McGraw Hill, NY, NY, 1988 Everest, F. Alton Master Handbook of Acoustics McGraw-Hill, NY, NY, 1994
- E. M. David : Concepts in Architectural Acoustics, McGraw Hill, New York, 1972.
- V.D Knudsen and C. M. Harris : Architectural Acoustics, John Wiley & Sons, New York, 1932.
- H. Kuttruff : Room Acoustics, Applied Science Publishers, London, 1973.
- S. I. Thomason : "On the Absorption Coefficient" , Acustica, Vol.44, 1960.
- Leo L. Beranek: "Audience and Chair Absorption in Large Halls", J. A. S.A., Vol.47, No.2, 1969.
- W. B. Joice : "Sabines Reverberation time and Ergodic Auditoriums", J. A. S. A., Vol.58, No.3, 1975.
- S. V. Szokolay : Environmental Science Handbook for Architects and Builders, the Construction Press, 1979.
- Don and Carolyn Davis : Sound System Engineering, Howard W. Sams
- F. Alton Everest : The Master Handbook of Acoustics
- Raynoise Rev 3.0 Theoretical Manual " Building Acoustics & Industrial Noise Simulation
- 松井昌幸 : "オーディトリ움의 音響設計" , 材料と設計 , Vol.4, No.3, 1958.
- 船越義房 : "多目的 ホールの音響設計概要" , 建築設備, Vol.23, No.26, 1972.
- 木村翔 , 關口克明 : "홀의音響設計" , 建築設備, Vol.23, No.26, 1972.
- 前川純一 : 建築音響, 共立出版株式會社, 1978.
- 子安勝 : 吸音材料, 日本音響材料協會, 1976.
- 內藤三良 : "吸音材·遮音材의 種類と特徴" , 衛生工學, Vol.49, No.10, 1975.
- Terujc Yamamoto : "室內音響設計의 理論と實際", 建築音響, Vol.4, No.20, 1975.