

Sound xR Image

공간 렌더러의 출력 게인 검증

Speaker ID 배정과 공간 제어 변수에 관한 실험 결과보고

Taebin Yoo | 2026-09-26 | Revision 2.0

초록

본 연구는 Sound xR Image 운용 중 관측한 번호 배정에 따른 출력 변화, Object Z 무반응, Size의 낮은 감도 및 예상과 다른 경계 처리를 전기적 게인 측정으로 검토했다. 정상 구간의 역거리 가중치와 전력 정규화 후보는 내부 위치 12조건에서 최대 0.0046 dB 잔차를 보였고, Precision 5단계는 정규화 전 거리 두 배당 8-12 dB 계수와 일치했다. 수정한 Size 결합 후보는 최근 XY ON 13조건과 OFF 4조건의 기록값을 각각 최대 0.0046 및 0.0051 dB로 설명했다. 반면 같은 물리 배치의 Speaker ID 재배정은 분포를 바꾸었고, 새 5스피커 배치의 고정 선분 사전 예측은 실패했다. Object Z 스위치의 무반응은 확인했으나 모드 기록 누락으로 해석 범위를 제한했다. Distance Attenuation은 공통 레벨로 분리되지만 전역 기준거리 하나로 설명되지 않았다. 본 보고서는 측정 사실, 반례와 사후 적합을 구분하여 구현 가능한 코어와 미확정 선택 규칙을 제시한다.

주요어 Sound xR Image · 공간 음향 · 블랙박스 측정 · DBAP · 시스템 식별

1 연구 배경과 검증 질문

본 연구는 Sound xR Image의 공간 렌더링 설정이 실제 채널별 출력에 어떻게 반영되는지 확인하기 위해 수행했다. 연구자가 운용 과정에서 문제로 인식한 현상은 네 가지였다. 첫째, 같은 물리적 스피커 위치를 유지해도 Speaker ID에 좌표를 배정하는 순서에 따라 분포가 달라졌다. 둘째, Object Z를 움직여도 출력 변화가 나타나지 않았다. 셋째, Width와 Height의 상위 구간에서 변화가 작아 보였다. 넷째, 배열 안팎의 특정 위치에서 예상한 거리 분포와 다른 출력 집중 및 감쇠가 관측되었다.

이에 좌표만으로 출력이 결정되는지, Z와 Size가 어떤 거리 변환을 만드는지, 경계 처리와 Distance Attenuation을 분리할 수 있는지를 검증했다. 목적은 Max/MSP에서 재현 가능한 범위의 계산 모델을 얻는 것이다. 비공개 내부 구현이나 제품 전반의 결함을 확정하는 연구로 범위를 확장하지 않는다.

2 실험 방법과 자료 처리

DME7 기반 테스트베드에서 Smaart 전달함수 측정을 이용해 렌더러의 전기적 출력 게인을 기록했다. 스피커 좌표와 번호 배정, Object 좌표, XY 모드, Width, Height, Precision 및 Distance Attenuation을 변경하며 조건별 출력 dB를 experiment.xlsx의 Sheet1에 저장했다. 이 자료는 실내 음향 응답이나 청취 평가가 아니라 정적 채널 게인 비교다. 신호 경로의 위상·지연에 대한 서술은 보조 관찰이며, 정적 표로 검증된 결과에 포함하지 않는다.

1차 근거는 워크북의 수치와 설정 기록이다. 두 DOCX와 두 RTF는 문제 제기 및 가설 수정의 이력을 확인하는 데 사용했다. 초기 문서의 강한 결론보다 후속 반례와 설정이 명시된 측정을 우선했다. 좌표 8.66은 기록 그대로 사용하고, 빈 셀은 대칭값으로 보충하지 않으며 x를 0 또는 음의 무한대로 치환하지 않았다. 초기 X·XY·Width 블록의 누락된 Precision은 Moderate로 가정한 비교임을 명시한다.

오차는 실측 게인에서 후보식의 예측 게인을 뺀 잔차로 계산했다. n은 유한하게 기록된 채널 값의 수다. 같은 설정의 반복 캡처와 대칭 채널은 독립적인 실험 배치 수가 아니다. 0.01 dB 기록 간격은 장비 정확도나 신뢰

구간을 뜻하지 않는다. 펌웨어 버전, 반복 측정 분산 및 전체 신호 경로 교정 기록이 충분하지 않으므로 잔차를 측정 불확도로 해석하지 않는다.

$$e_j = L_j^{\text{meas}} - L_j^{\text{model}}, \quad E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_j^2} \quad (1)$$

3 기준 모델과 Precision 검증

기준 후보는 거리 기반 진폭 패닝(DBAP)의 역거리 가중치와 전력 정규화다. D는 선택된 계산 위치에서 각 스피커까지의 유효 거리, a는 거리 지수, g는 정규화된 진폭 계인이다. 식 (2)는 거리가 양수인 조건에 적용한다. 스피커와 Object가 정확히 일치하는 경우의 내부 처리나 출력 하한은 이 식만으로 확정하지 않는다.

삼각형 좌표 (-5,0), (5,0), (0,8.66)의 내부 X 7조건과 XY 5조건은 최대 0.0046 dB 이내에서 설명된다. 중심 부근 (0,2.89)의 기록은 -4.78, -4.78, -4.76 dB로, 등거리 3출력의 이론값 -4.7712 dB에 가깝다. 정확히 등거리인 좌표로 바꿔 계산하지는 않았다.

Precision 5단계에는 b=8,9,10,11,12 dB의 계수를 순서대로 적용했다. 이는 정규화 이전 가중치가 거리가 두 배일 때 감소하는 양이며, 최종 출력의 거리 기울기나 Distance Attenuation 설정값과 다르다. 5조건 15 출력에서 최대 잔차는 0.0048 dB다. 이 결과는 후보 코어를 지지하지만 모든 위치 처리까지 검증하지 않는다.

$$w_i = D_i^{-a}, \quad g_i = \frac{w_i}{\sqrt{\sum_{k=1}^N w_k^2}}, \quad L_i = 20 \log_{10} g_i \quad (2)$$

$$a = \frac{b}{20 \log_{10} 2}, \quad b \in \{8, 9, 10, 11, 12\} \quad (3)$$

표 1 기준식의 재계산 잔차

조건 / Sheet1	기록 수	출력 n	RMS dB	최대 dB
X · B2:D8	7	21	0.0031	0.0046
XY · B20:D24	5	15	0.0032	0.0045
Precision · B95:D99	5	15	0.0030	0.0048
Width · B46:D54	9	27	0.0029	0.0052

4 Size의 낮은 감도와 결합 효과

처음에는 Width와 Height가 약 10을 넘으면 거의 작동하지 않는 것으로 보였다. 그러나 평면 삼각형의 Sp2는 Width 0→10에서 -0.30→-3.09 dB, 10→100에서도 -3.09→-4.75 dB로 변했다. 50→100의 변화는 -0.08 dB였다. 따라서 일정 값에서 꺼지는 현상보다는 해당 배치에서 감도가 점차 낮아지는 것으로 해석한다. 반대로 3D 배치에서 Height를 0으로 고정하면 Width=100에도 Sp1≈-3.03, Sp3≈-26.51 dB여서 Width 증가가 항상 균등 분포를 만들지는 않는다.

후속 실험은 Width와 Height의 단순 독립 합성을 반박했다. 최근 블록은 스피커 (-5,0,0), (5,0,0), (0,5,10), (0,5,-10), Object=(0,2,0), Moderate, DA=0이다. XY ON에서는 식 (4), XY OFF에서는 식 (5)와 (6)을 적용했다. r는 XY 평면 거리이며 z는 스피커 높이이다. XY OFF 식은 Object Z=0에서 검토한 후보로, 임의의 Object Z로 일반화하지 않는다.

XY ON 13조건의 기록된 52값에서 최대 간차는 0.0046 dB, XY OFF 4조건의 기록된 Sp1·Sp3 8값에서는 0.0051 dB였다. XY OFF의 빈 Sp2·Sp4 셀은 비교에서 제외했다. 과거의 모든 양의 Size 최소 1 가정은 W=0, H=0.5에서 반례를 보였다. 수정식은 작은 Size와 축 사이 결합을 반영하지만 이 비교는 모델 구성에 사용한 데이터에 대한 적합도이며 독립적인 전 범위 검증은 아니다. 원자료: A293:O306.

$$W_e = \max(W, \min(H, 1)), \quad D_i^2 = r_{xy,i}^2 + W_e^2 \quad (\text{XY ON}) \quad (4)$$

$$u = \min(\max(W, H), 1), \quad W_e = \max(W, u), \quad H_e = \max(H, u) \quad (5)$$

$$D_i^2 = r_{xy,i}^2 + W_e^2 + \left(z_i \frac{W_e}{H_e}\right)^2 \quad (W + H > 0) \quad (6)$$

$$D_i^2 = r_{xy,i}^2 + z_i^2 \quad (W = H = 0, \text{XY OFF}) \quad (7)$$

5 Object Z 무반응의 관측 범위

Object Z를 -2부터 +2까지 0.5 간격으로 바꾼 9조건에서 네 출력은 모두 -5.48, -5.48, -6.63, -6.63 dB로 같았다. 스피커는 (-5,0,0), (5,0,0), (0,5,5), (0,5,-5), Object XY=(0,2), W=H=0이다. 이 결과는 기록된 Z 스위치에서의 무반응을 직접 보여준다. 다만 해당 블록에는 XY 모드, DA 및 Precision이 명시되지 않아 모든 XY OFF 상태에서 Object Z를 무시한다고 결론 내릴 수 없다.

최신 Z=±10 배치의 Object Z=0 비교에서는 XY ON의 Sp1/Sp3가 -12.03/-3.59 dB, XY OFF는 -3.47/-13.02 dB였다. 이 비교는 모드와 스피커 높이가 반영됨을 보여주지만 Object Z의 처리를 분리 검증하지 않는다. 큰 Z 이동 및 화면상 이동에 관한 서술은 보조 관찰로 남긴다. 원자료: A82:F91, A293:O294.

6 Speaker ID 재배정과 반복성

같은 물리 좌표를 유지하며 번호 배정만 바꾼 실험이 좌표만의 모델을 검증하는 핵심 대조다. 6스피커에서는 A=(-5,-2), B=(5,-2), C=(-5,2), D=(5,2), E=(0,5), F=(0,8)을 사용했다. Object=(0,6)에서 ABCDEF의 Sp1은 -29.37 dB, ABCDEF에서는 -32.81 dB였다. 같은 좌표를 계속 담당하는 채널에서도 값이 바뀌므로 출력 채널 이름의 순열만으로 설명할 수 없다.

ABCEDF→ABCDEF→ABCEDF→ABCDEF의 왕복에서 각 배정의 출력은 0.01 dB 기록 자리까지 복귀했다. Object=(0,6)과 (1,6)의 두 위치, 두 배정, 두 방문으로 총 8캡처이며 고유 설정은 4개다. (1,6)에서는 두 배정이 모두 원래 위치 DBAP와 약 0.012 dB 이내에서 맞았다. 따라서 특정 번호 순서를 항상 정상 또는 비정상으로 분류할 수 없다. 원자료: A319:S323.

새로운 비대칭 5스피커 대조에서는 N의 Sp3=(-2,4), Sp4=(3,6)을 T에서 서로 바꿨다. 나머지는 Sp1=(-4,-3), Sp2=(5,-1), Sp5=(0,1), Object=(1,3)이며 XY ON, Moderate, DA=0, W=H=0이다. 좌표를 바꾸지 않은 Sp2가 +0.66 dB, Sp5가 +0.43 dB 변했다. 물리 위치 (-2,4)의 출력은 -5.82→-6.99 dB로 변했다. 원래 위치 DBAP의 최대 잔차는 N 1.1728 dB, T 0.0128 dB였다.

표 2 새 5스피커 배정 대조 실험 dB · A358:Q359

배정	Sp1	Sp2	Sp3	Sp4	Sp5
N	-20.03	-16.04	-5.82	-8.85	-2.41
T	-20.04	-15.38	-8.89	-6.99	-1.98

7 투영 후보와 실패한 사전 예측

일부 출력은 Object를 특정 선분에 직교투영한 뒤, 그 점에서 전체 스피커까지의 거리로 DBAP를 계산하면 설명된다. 식 (8)의 A와 B는 후보 선분의 끝점이고 clip은 0부터 1까지 제한하는 연산이다. 두 끝점의 스피커만 출력시키는 모델과는 다르다. 문제는 투영 연산 자체보다 어떤 조건에서 어느 선분을 선택하는가에 있다.

5스피커 N/T 측정 전 고정된 Sp2-Sp3 투영 후보는 N에서 최대 9.2876 dB, T에서 8.6677 dB의 오차로 실패했다. 측정 후 N에 Sp1-Sp4 투영을 적용하면 P=(0.792308,3.161538)에서 최대 0.0064 dB로 맞지만, 이는 사후 설명이다. 이를 사전 예측 성공으로 바꾸어 보고하지 않는다. T에도 동일한 물리 선분이 존재하지만 T는 원래 Object 위치와 맞으므로 선분의 존재만으로 분기 규칙을 결정할 수 없다.

6스피커 ABCEDF의 X=-0.1, 0, +0.1 및 Y=6은 같은 Sp5-Sp6 선분 후보로 최대 0.0145 dB 이내에서 설명된다. 따라서 X=0 한 점에서만 생기는 현상이라는 설명은 부족하다. 불규칙 사각형에서는 내부 Object=(0,1)도 내부 선분 투영과 맞아 전역 convex hull 최근접점만으로 전체 결과를 설명할 수 없다. 이들 선분은 분석 중 선택했으며, 번호 의존 mesh나 topology의 실제 구현은 미확정이다. 원자료: A334:H341, A347:F351, A358:Q359.

$$t = \text{clip}_{[0,1]} \left(\frac{(O-A) \cdot (B-A)}{\|B-A\|^2} \right), \quad P = A + t(B-A) \quad (8)$$

8 Distance Attenuation의 공통 감쇠

동일 위치의 DA=0을 기준으로 -3과 -6의 출력을 빼서 위치 분포와 공통 감쇠를 구분했다. 최근 블록은 삼각형 배치, XY ON, Moderate, W=H=0이다. 4위치에서 세 DA 설정, 2위치에서 두 설정을 측정해 총 16출력 벡터를 기록했다. DA=-6의 채널별 변화량은 각 위치에서 약 0.01 dB 이내로 공통적이었고, -3 짝이 있는 네 위치에서는 -6의 dB 감쇠가 반올림 범위에서 약 두 배였다.

식 (9)는 이 공통 성분의 후보식이다. DA는 설정값이며 d와 R은 선택한 거리 정의와 유효 기준거리다. (7,0)의 유한 출력 변화는 -2.45 dB, (0,-2)는 약 -2.44 dB였으나, 경계까지의 유클리드 거리가 역시 약 2인 (5,4)는 -3.29 dB였다. 따라서 같은 거리와 전역 R=6으로 모든 방향을 설명할 수 없다.

짜 측정과 유클리드 경계 거리 가정으로 역산하면 꼭짓점 방향 $R \approx 6.12$, 아래쪽 $R \approx 6.13$, 사선 $R \approx 4.33$ 이다. 이전 $R \approx 5$ 해석은 $DA=0$ 짜이 없는 초기 사선 자료의 가정에 의존했으므로 최신 짜 비교를 우선한다. R 은 이 모델 아래 얻은 유효 적합값이며 내부 상수로 확인된 값이 아니다. 다른 거리 metric과 방향 의존 R 은 현재 구분되지 않는다. 원자료: A309:U315.

$$\Delta L = D A \log_2 \left(1 + \frac{d}{R} \right), \quad G_i = g_i 10^{\Delta L/20} \quad (9)$$

9 논의와 모델의 적용 한계

검증 결과는 거리 가중치와 전력 정규화라는 코어, Size에 따른 유효 거리, 번호 배정과 위치에 따른 계산 위치 선택, DA의 공통 레벨이라는 구조로 정리할 수 있다. 이 가운데 정상 구간의 코어와 시험한 Size 조합은 작은 잔차를 보였지만 계산 위치 선택은 일반 규칙으로 복원되지 않았다. 특히 사후에 가장 잘 맞는 선분을 고르는 방식은 새로운 배치의 출력을 예측하는 알고리즘이 아니다.

게인 분포만으로 내부 위치가 유일하게 식별되지 않는 경우도 있다. 스피커들이 원점 중심의 같은 원 위에 있으면 특정 두 위치의 거리들이 공통 배율 관계가 될 수 있고, 전력 정규화는 그 배율을 제거한다. 따라서 위치 역산값 하나나 낮은 잔차만으로 내부 좌표 또는 mesh를 확정해서는 안 된다.

초기 자료에는 설정 누락과 같은 설정으로 적힌 상충 기록도 있어 전체 기록을 하나의 정확도 수치로 합산하지 않았다. 향후 검증은 모드와 버전을 명시한 Object Z 대조, 사전에 고정된 선분 선택 규칙의 새 배치 검증, DA의 거리와 기준척도 분리에 집중해야 한다. 이미 수행한 배정 왕복이나 ± 0.1 이동을 미수행 실험으로 다시 제시하지 않는다.

10 결론

본 연구는 운용 중 제기한 네 가지 문제를 출력 게인 측정으로 검토했다. 정상 구간에서는 DBAP 후보와 Precision 계수가 원시 기록을 재현했고, Size의 낮은 감도는 고정 임계값이 아니라 배치 및 Width-Height 결합에 의존했다. Object Z 무반응은 기록된 스위치에서 확인되었으나 모드 누락으로 일반화가 제한되었다. Speaker ID 재배정은 동일한 물리 배치에서 재현 가능한 분포 변화를 만들었고, 고정 번호쌍 투영의 사전 예측은 실패했다. DA는 시험한 위치에서 공통 레벨로 분리되었지만 기준거리의 전역 상수 해석은 지지되지 않았다.

성과는 제품 전체의 완전한 복제가 아니라, 구현 가능한 코어와 아직 설명되지 않는 선택 규칙의 경계를 수치로 제시한 데 있다. Max/MSP 구현에는 검증된 조건을 명시하고, 미확정 위치 처리와 DA metric을 독립된 후보 모듈로 남기는 것이 이 결과에 부합한다.

자료와 재현성

[1] experiment.xlsx, Sheet1, 제공된 366행 $\times$ 45열 워크북. 표 1과 최신 Size·번호 배정 비교는 원시 수치에서 재계산했다. 원본의 x와 빈 셀을 보존한 실험 데이터 미리보기를 함께 제공한다.

[2] AFC_Image_기술검증_리포트.docx. 초기 문제 제기, 정상 출력 모델 및 과거 실험 정리.

[3] Sound_xR_Image_기술검토_및_질의_상세개정판.docx. 후속 반례, 번호 왕복, 새 5스피커 예측과 수정된 해석.

[4] testing result.rtf. 초기 후보식과 Width-Height 결합 및 DA 해석 변경 과정. [5] final result.rtf. 최근 조건의 계산 비교와 후속 해석. 두 파일은 분석 이력이며 독립 실측 자료로 추가 집계하지 않았다.

본 결과보고서는 위 제공 자료를 바탕으로 재작성한 연구 기록이며 동료 심사 논문이나 제조사 공식 사양이 아니다. 보고서 개정일은 측정일을 의미하지 않는다. 수식, 표와 본문은 한·영 웹 미리보기 및 PDF에 동일한 원고에서 반영한다.