

특집

고부가가치 선박 소음

부유식 원유 생산·저장 · 하역 선박의 소음 예측 및 제어

주원호*, 이태경

(현대중공업 선박해양연구소 진동소음연구실)

1. 머리말

최근 고유가 시대를 맞이하여 심해 유전 개발이 증가하고 있으며, 이에 따라 개발 및 운송에 필요한 다양한 기능을 갖는 고부가가치 해양구조물의 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 심해 유전 개발에 사용되는 구조물은 일정한 해역에 장기간 계류하여 바람, 조류 및 파도와 같은 환경하중을 받아야 하기 때문에 기존의 고정식 구조물을 이용할 경우에는 여러 가지 경제적, 기술적 문제점에 직면하게 된다. 따라서, 이러한 문제점들을 극복하기 위한 많은 연구를 통해 부유식 원유 생산·저장·하역선박(floating, production, storage and offloading; FPSO), 반잠수식 시추선, 텐션 레그 플랫폼, 드릴쉽 등과 같은 다양한 구조물들이 고안되었으며, 이 중 FPSO는 여러 가지 경제적인 이점으로 인하여 최근 심해 유전 개발에 널리 사용되고 있다.

FPSO는 그림 1에 보인 개략도에서 알 수 있듯이 일반 초대형 유조선과 유사한 구조를 갖고 있으나 장기간 한곳에서 운항하지 않고 작업을 하기 때문에 주기관과 프로펠러 등의 추진장치가 없으며, 선체 상부에는 원유 생산과 정제에 필요한 여러 가지 설비가 설치되어 있다. 따라서 일반

상선에 비해 많은 인원이 장기간 거주하게 됨에 따라 작업시의 청력손상, 경고음 미감지로 인한 위험, 의사 소통의 어려움, 휴식 및 수면의 방해 등을 유발할 수 있는 소음으로부터 승무원을 보호하기 위해 거주구(living quarter)의 소음 허용기준, 작업구역(working area)에서의 소음노출한계, 거주구역 내에서의 승무원의 사생활 보호를 위한 소음차폐지수 등을 비롯하여 쾌적한 휴식 공간을 확보하기 위한 공실 공간의 잔향시간까지도 규제하고 있으며, 그 정도는 일반 선박 보다는 상당히 엄격하다. 예를 들면, 거주구역의 경우 의사소통과 휴식이 중요시 되는 사무실과 선실의 경우에는 약 15 dB(A)이상의 소음 차이가 있으며, 상시작업구역에서의 소음노출한계도 12시간을 기준으로 등가소음레벨 83~85 dB(A)를 적

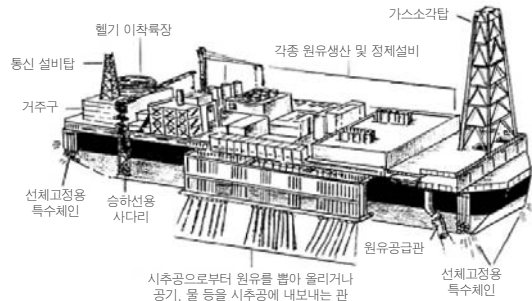


그림 1 FPSO의 개략도

* E-mail : whjoo@hhi.co.kr / (052) 230-7402

표 1 FPSO 소음 기준

구역	소음 기준 (dBA)
선실	45
식당	55
휴게소, 체육관	55
거주구 내 복도	60
주방	70
세탁실	70
조종실	55
제어실	50
사무실	50
화장실	60

용하고 있으며, 승무원의 사생활 보호를 위한 소음차폐지수는 일반상선의 경우보다 약 10 dB 정도 높을 뿐만 아니라 측로손실이 많이 발생하는 실선에서 계측 하도록 규정하고 있다. 표 1에는 FPSO의 관련 소음 허용치를 보여준다.

상기에 기술한 바와 같이 고부가가치선인 FPSO는 상당히 엄격한 소음 규제 만족을 요구받기 때문에 성공적으로 건조하여 선주에게 인도하기 위해서는 초기설계단계부터 기준에 축적되어 있는 음향 시험 및 시운전 계측 결과를 바탕으로 한 상세소음해석을 수행하여 각 구역별 소음수준을 예측하고, 허용치와의 비교를 통하여 초과하는 구역에 대해서는 적절한 제어수단을 강구한다. 또한 그 결과들은 음향 시험 및 시운전 계측을 통해 최종 검증되는 절차로 관리되고 있다. 이 글에서는 FPSO의 소음 예측 및 제어를 위해 수행되고 있는 절차에 대해 간략히 소개하고자 한다.

2. FPSO 소음 해석 절차

FPSO의 소음 해석은 일반 상선과는 달리 선체 상부에 원유의 생산과 정제에 필요한 여러 가지 설비들이 설치되어 있기 때문에 이들 설비 가동

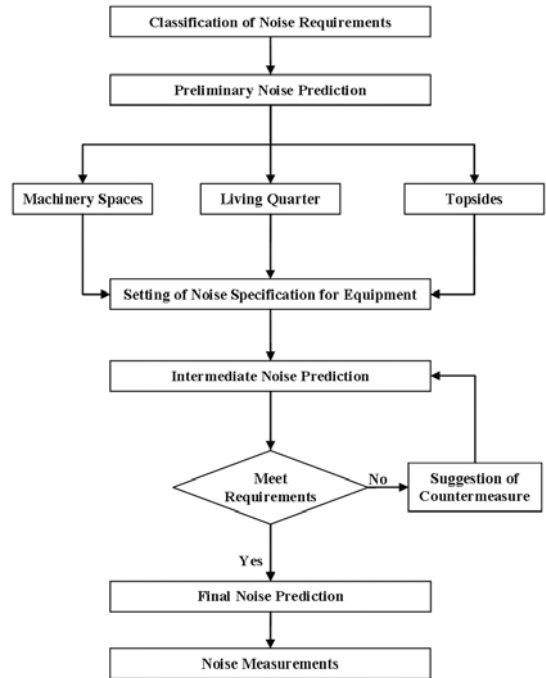


그림 2 FPSO 소음 해석 절차

시에 발생하는 소음이 해당 작업 구역 및 인접 거주 구역에 많은 영향을 미치므로 선체 상부의 설비들로부터 발생하는 소음을 반드시 고려하여야 한다.

따라서 FPSO 소음해석에서는 일반 상선의 소음해석에서 고려하는 거주구와 기관실에서 실내 소음뿐만 아니라 선체 상부 원유 생산 및 정제 설비 가동에 따른 옥외소음도 고려하여 구역 자체 소음뿐만 아니라 각 구역 간에 전달되는 소음도 고려하여 해석을 수행한다. 최근에는 FPSO 가동에 따른 선체의 수중방사소음이 해양 생물에 미치는 영향까지도 평가해 달라는 경우도 있다. FPSO 소음 해석의 절차는 그림 2와 같다.

3. 거주구 소음 해석

FPSO의 거주구 소음 해석은 그림 3과 같이 기관실과 선실 내에 위치한 각종 기계 설비에 의해

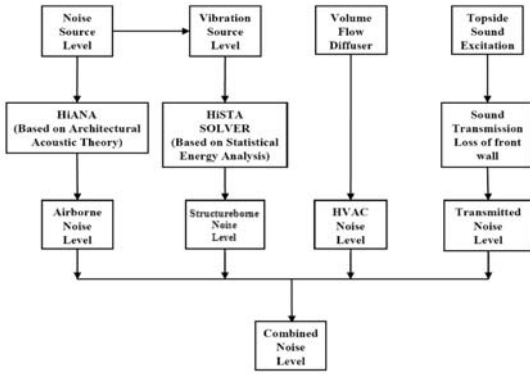


그림 3 거주구 소음 해석 절차

서 발생하는 공기음(airborne noise)과 고체음(structure-borne noise), 공기 조화 장치인 HVAC 소음 그리고 선체 상부(topside)에 위치한 소음원 으로부터 선실로 투과되는 소음 등을 모두 고려 해야 한다.

기관실과 선실 내 주요 소음원에 의한 공기음 과 고체음 전달은 소음원 주위의 정확한 음향특 성 평가와 에너지 전달 경로 별로 해석이 가능하 도록 하기 위해서 공기음은 건축음향학 이론을 바탕으로, 고체음의 경우는 통계적 에너지법 (SEA)을 이용하여 해석을 수행한다. HVAC 소음 은 구동 송풍기 소음과 디퓨저에서의 유동을 고 려하여 계산된 음향파위레벨이 HVAC 공급 업체 에서 제공되면 이를 이용하여 각 선실로 방사되 는 소음 수준을 계산한다. 마지막으로 선체 상부 전달 소음의 경우는 거주구 전면에서 예측된 옥 외소음 해석 결과와 외벽의 차음 성능을 이용하 여 선실로 전달되는 소음을 예측한다.

이러한 소음 예측의 정확도를 보장받기 위해서 는 소음원의 정확한 추정뿐만 아니라 선실 내장 재의 흡음, 차음 및 방사소음 특성과 실선 설치에 따른 음향성능 저감 효과, 그리고 복잡한 소음 전 달경로를 갖는 선실 격벽, 천장 및 바닥 구조 별 공기음 및 고체음 전달 경로를 정확히 파악하고, 최적의 제어수단 적용에 따라 정량화된 자료를

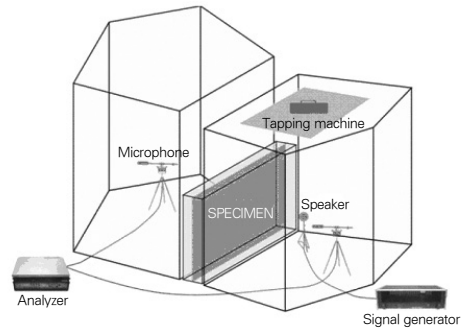


그림 4 잔향실

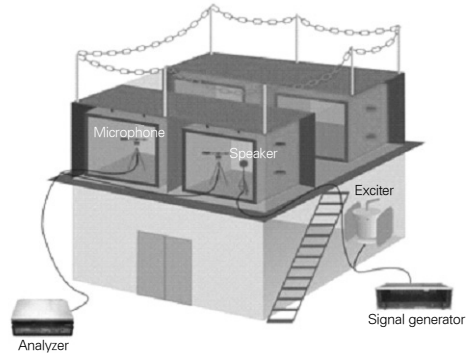


그림 5 거주구 모형

확보하는 것이 무엇보다 중요하다. 이를 위하여 당사에서는 그림 4와 5에 보인 바와 같이 대/소 잔향실과 거주구 모형(mock-up)을 이용하여 수 행한 다양한 음향시험으로부터 확보된 많은 음 향자료들을 체계적으로 데이터베이스화하여 확 보하고 있다.

3.1 공기음 해석

선실 공기음은 건축음향학 이론을 이용하여 해 석하며 선실 형상, 선실 내장재의 흡음 성능, 선 실구조별 차음 성능 및 측로손실 효과 등을 고려 하고 있다. 공기 소음원은 장비업체에서 제공하 는 음향파위레벨을 이용하며 자료 부재 시는 유 사 실적선 계측 데이터를 참고하거나 구동 장비 종류, 출력, 구동 RPM 등의 주요 장비 제원을 경 험식에 입력하여 추정한다.

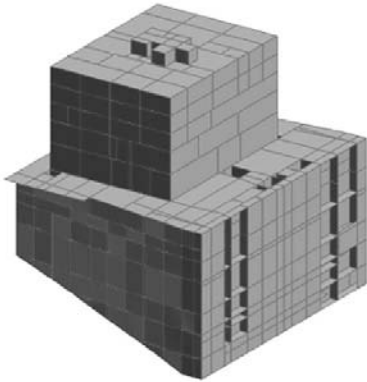


그림 6 SEA 모델

3.2 고체음 해석

고체음은 기관실에 위치한 디젤 발전기, 유압 펌프 등의 장비에서 발생한 진동이 거주구로 전달되어 선실로 방사되는 소음으로서 SEA법을 이용하여 계산한다. 그림 6은 고체음 해석을 위한 FPSO 거주구 SEA 모델을 보여준다.

모든 요소의 생성은 기본적으로 실제 선박의 형상을 잘 표현할 수 있도록 하였으며 통계적 에너지 해석법에서 요구하는 충분한 모드수를 갖도록 생성하였다. 고체 소음원은 장비업체에서 제공하는 장비 가속도수준을 이용하며 자료 부재 시는 유사 실적선 계측 데이터 또는 경험식을 이용하여 추정한다.

3.3 HVAC 소음 해석

공기조화장치인 HVAC에 의한 선실의 소음은 송풍기에서 발생하는 소음, 덕트 내 공기흐름의 불균일성에서 기인하는 난류소음 그리고 덕트 내부의 소음이 경계면을 투과하여 덕트 경로 내에 위치하는 격실의 소음원으로 작용하여 발생한다. 일반적으로 HVAC에 의한 소음은 송풍기에서 발생하는 파워로부터 덕트를 통과하면서 생기는 손실을 추정하여 계산하나 HVAC 시스템을 공급하는 업체에서 각 선실 천장에 부착된 디퓨저에서의 음향출력수준을 제공하면 HVAC에 의한 소음

해석을 따로 수행하지 않고 제공받은 값을 사용하여 식 (1)로부터 각 선실의 소음을 계산한다.

$$SPL = PWL - 10 \log R + 6 \quad (1)$$

여기서, SPL 은 음압수준, PWL 은 음향출력수준, R 은 실상수이다.

3.4 선체 상부 전달 소음

선체 상부에서 전달된 소음이 주로 거주구 외벽을 통하여 선실로 전달된다고 가정하면 선실 내의 소음을 식 (2)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$SPL = SPL_s - TL - 10 \log \frac{A}{R} \quad (2)$$

여기서, SPL 은 선실 소음수준, SPL_s 은 거주구 외부의 소음수준, TL 은 공통경계면의 투과손실, A 는 공통경계면의 면적, R 은 실상수이다.

식 (2)를 보면 선실에 미치는 소음은 공통경계면의 투과손실의 크기에 지배적인 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 따라서 대상선에는 거주구 외벽의 차음성능을 키우기 위한 많은 조치가 취해지며 일반적으로 높은 차음 성능을 가지는 내장패널과 흡음재, 공기층 그리고 강벽 등으로 이루어진 복합 다층 구조로 구성되어 있다.

3.5 소음 차폐

FPSO의 경우 사생활 보호 등의 이유로 구역들 간의 소음 차폐 기준이 일반상선보다 엄격하게 주어 지기 때문에 설계 시 이 기준을 만족시킬 수 있도록 선실 구조를 설계하는 것이 요구된다. 표 2는 FPSO의 소음차폐지수 기준을 나타낸다.

소음차폐지수는 잔향실에서 계측한 차음성능 시험값이 아닌 실선 탑재 시의 값인 경우가 대부분이므로, 실선의 경우 그림 7과 같은 측로손실 경로가 존재함으로 인해서 잔향실에서 계측된 차음 성능이 약 6~10 dB 정도 낮아지기 때문에

표 2 소음 차폐 지수 기준

구역	소음 차폐 지수 (dB)
선실 - 선실	40
선실 - 복도	35
선실 - 공실	55
선실 - 계단	40

표 3 최대 허용 잔향 시간

구역	최대 허용 잔향 시간(초)
휴게실	0.5
식당	0.6

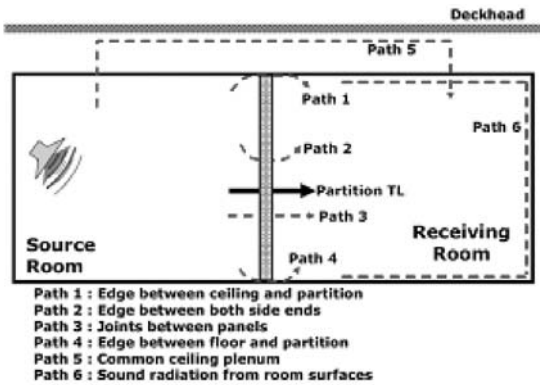


그림 7 측로 손실 경로

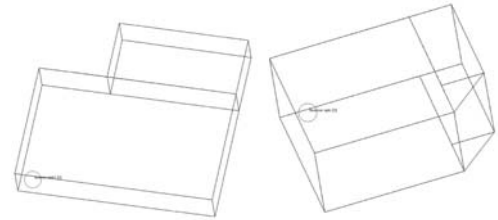


그림 8 잔향 시간 해석 모델

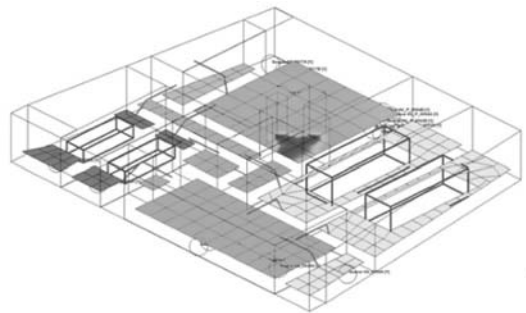


그림 9 기관실 소음 해석 모델

세심한 주의가 필요하다.

이에 잔향실과 거주구 모형을 이용하여 실선 설치 효과까지 고려된 선실구조별 차음성능 자료를 확보하여 FPSO 선실 구조의 차음성능을 평가하고 차폐지수를 만족하는 최적 선실 구조를 도출하고 있다.

3.6 잔향 시간

일반 선박과 달리 FPSO는 음질 관리 측면에서 식당을 비롯한 공실을 대상으로 최대 허용 잔향 시간 기준이 있으며 이 기준을 만족하도록 공실의 인테리어 설계가 이루어져야 한다. 표 3은 FPSO의 잔향 시간의 일반적인 기준을 나타낸다.

이를 위해 음선추적기법을 이용하여 실내공간의 소음분포를 예측할 수 있는 LMS RAYNOISE를 이용하여 선실의 잔향 시간을 예측하고 있으며 그림 8은 잔향 시간 해석을 위한 해석 모델을 보여준다.

4. 기관실 소음 해석

FPSO 기관실의 경우 선박과 같은 대형 엔진은 설치되지 않지만 전력 공급을 위한 여러 대의 디젤 발전기가 기관실 내에 설치되어 있으며 대용량 유압 펌프, 컴프레서, 송풍기 등의 소음원이 또한 존재한다. 이와 같이 많은 종류의 소음원을 고려하여 소음원실에서의 작업자에 대한 소음 노출한계 만족 여부를 정확히 평가하고 대책을 수립하기 위하여 LMS RAYNOISE를 이용하여 소음원실의 소음 분포 파악을 위한 해석을 별도로 수행한다.

그림 9는 FPSO 기관실 소음 해석을 위한 해석 모델의 예시를 보여준다.

5. 선체 상부 소음 해석

5.1 옥외 소음 해석

옥외 소음 해석은 LMS RAYNOISE를 이용하여 선체 상부의 각종 소음원과 건물들이 포함되도록 모델을 구성하여 해석을 수행한다. 적용된 공기 소음원 수준은 음향 출력 수준을 이용하나 음향 출력 수준을 알 수 없을 경우에는 소음원 주위를 둘러싸는 가상 면적을 고려하여 음향 출력 수준을 추정한다. 해석 결과에 중요한 영향을 미치는 흡음률과 투과 손실은 음향시험설비와 실선 시험으로부터 얻은 자료를 이용하여 추정한다.

그림 10은 FPSO 상부 옥외 소음 해석 결과를 보여준다.

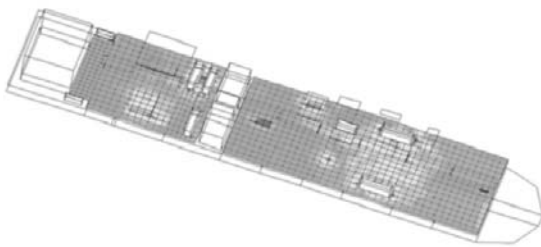


그림 10 상부 소음 해석 결과

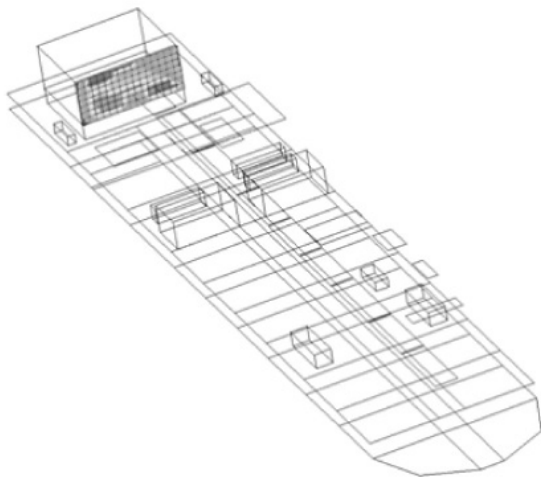


그림 11 거주구 앞 1m 예상 소음 수준

5.2 거주구 소음 기여도 파악

FPSO의 경우 상부 장비에서 발생하는 소음이 거주구로 전달되어 선실의 소음 문제를 발생시킬 수 있다. 이를 방지하기 위해서는 상부로부터 선실로 전달되는 소음을 계산하여야 한다.

이를 위해서 먼저 상부 장비들의 소음에 의한 거주구 외벽 위치에서의 소음 수준을 그림 11과 같이 예측하여야 하며 여기에 거주구 외벽의 차음 성능을 같이 고려하여 최종적으로 선실로 전달되는 소음을 식 (2)를 이용하여 계산한다.

FPSO의 경우, 외벽 1m 앞에서 85 dB(A) 이하로 상부 소음이 전달 되도록 설계하는 것이 일반적이다.

6. FPSO 소음 제어 및 예측

6.1 소음 제어

FPSO 소음 제어 방법은 장비 자체의 소음 수준을 제어하는 방법과 소음 전달 경로인 선실 구조 즉, 격벽, 천장 및 바닥 구조의 차음 및 방사소음 성능을 향상시키는 방법으로 구분된다.

기관실 내에 위치한 디젤 발전기, 유압 펌프 유닛 등의 주요 장비는 자체 소음 수준이 1m 떨어진 위치에서 100~110 dB(A) 정도로 매우 높기 때문에 초기 설계 단계부터 그림 12와 같이 이중 마운팅 구조를 갖는 음향상자를 설치하여 해당 소음원실뿐만 아니라 인접 선실로의 공기음 및 고체음 전달을 미연에 방지하는 것이 무엇보다 중요하다.

또한 주요 장비실 옆에 인접하여 워크샵이 위치하는 경우가 있는데 이때 장비실에서 전달되는 소음이 문제를 일으킬 수 있으며, 주요 장비와 인접한 수음실의 격벽 구조는 차음 성능을 충분히 확보하도록 설계하여야 한다.

거주구내의 선실과 사무실에서 소음수준은 소음원에 대한 적합한 소음 제어 수단 강구로 인

하여 HVAC 소음 이외에는 크게 소음 문제를 발생시키는 경우는 없으나 기관실과 상부와 인접한 선실에서는 소음문제가 발생하여 엄청난 추가 개선 비용 발생 뿐만 아니라 건조 후에는 개선 조차도 불가능한 경우가 발생할 수 있으므로 초기 설계단계부터 면밀한 주의가 요구된다. 이러한 경우에는 주로 바닥에 구속 점탄성층 구조 또는 복합 다층 뜬 바닥 구조를 설치하거나 거주구 전면 격벽 구조의 차음성능을 경제적으로 증가시키는 방안을 도출하여 설계단계에서 미연에 문제를 해결할 필요가 있다.

또한 선실 내 소음 차폐 측면에서는 특히 'Cabin to Corridor' 의 35 dB 기준을 만족시키기 위한 도어 구조 설계가 중요하다. 도어의 경우 환기구가 없어야 하며, 도어와 격벽 패널 사이에 라이닝이 필수적으로 설치되어야 35 dB 수준을 만족시킬 수 있다. 또한 'Cabin to Public Space' 55 dB 기준을 FPSO 실선에서 만족시키기 위해서는 잔향실 계측값으로 차음성능 60 dB 이상이 되어야 하므로 해당 격벽 및 바닥 구조가 충분한 차음성능을 지닐 수 있도록 설계하여야 한다. 잔향 시간 기준과 관련하여서 최대 허용 잔향 시간 기준을 만족시키기 위해서는 공실 바닥에 카펫트를 시공하고 격벽과 천장 구조에 흡음 처리가 된 패널을 사용하여 흡음률을 증가시킬 필요가 있다.

상부 소음 제어 측면에서는 장비에서 옥외로 직접 방사되는 소음이기 때문에 소음원의 제어

가 무엇보다도 중요하다. 일반적으로 FPSO 상부 옥외 소음 기준이 85 dB(A)이므로 상부 장비는 소음 수준이 82 dB(A)이하를 만족하도록 설계할 필요가 있으며 이를 초과할 경우에는 장비 자체의 소음 저감 뿐만 아니라 음향상자 설치 등도 고려되어야 한다.

6.2 FPSO 실선 소음 계측

FPSO 건조 후에 소음 기준의 만족 유무를 검증하기 위해서 관심 구획의 소음 수준, 차음성능 및 잔향시간 등을 계측하여 관련 기준과의 만족 여부를 평가한다.

(1) 차음성능 계측

선실과 선실, 선실과 복도, 선실과 공실의 소음 차폐지수 만족 여부를 검증하기 위해 그림 13과 같이 건조 후 안벽에서 차음성능을 계측한다.

소음원실에 공기음 가진을 위한 스피커를 위치시키며 소음원실과 수음실에 회전붐(rotating boom) 마이크폰을 위치시켜서 공간 평균된 음압 레벨을 계측하여 식 (3)으로 차음성능을 평가하게 된다.

$$TL = SPL_1 - SPL_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad (3)$$

여기서 SPL_1 은 소음원실의 음압 레벨, SPL_2 은 수음실의 음압레벨, S 는 공통경계면 면적, A 는 공



그림 12 음향 상자

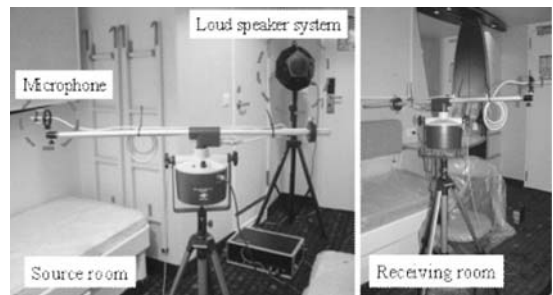


그림 13 차음 성능 시험



그림 14 잔향 시간 시험

통경계면의 흡음력을 의미한다.

(2) 잔향 시간 계측

공실을 대상으로 잔향 시간 계측이 수행되며 계측 전경은 그림 14와 같다.

계측 시 스피커는 구석에 위치시켜서 공기음 가진이 잘 되도록 하며 여러 지점에 스피커 및 마이크로폰을 위치시키고 각 계측값을 평균하여 최종 잔향 시간을 평가하게 된다.

이론적으로 잔향 시간은 소음원 및 계측 위치와는 무관하게 해당 방의 형상과 흡음 특성에 의해 결정되는 값이지만 실제 계측 시에는 스피커 위치와 계측 위치에 따라 약간씩 차이가 나며 여러 번 계측/평균하여 오차를 최소화하는게 필요하다.

(3) 소음 계측

FPSO의 경우 선박과 달리 상부에 위치한 원유 생산 설비에서 발생한 소음이 거주구로 전달되기 때문에 거주구내 선실에서의 소음 계측 시 기관실 내 장비들을 구동시키는 것 외에 상부 원유 생산 설비들에서 발생하여 전달되는 소음을 고려하는 것이 필요하다.

실제 상부 장비들을 구동시키고 소음 수준을 계측하기 위해서는 많은 시간과 비용이 발생하기 때문에 상부 전달 소음을 모사하여 거주구 선실에서의 소음수준을 계측하는 것이 필요하다. 이를 위해 거주구 전면부에 전달된 상부 소음 수준을 모사할 수 있는 스피커를 위치시키고 전달되는 소음을 발생시켜 계측을 수행할 수도 있다.



그림 15 상부 소음 가진

그림 15는 시험 전경을 보여주며 점선원이 스피커이다.

7. 맺음말

고부가가치 부유식 원유 생산 저장 하역 설비(FPSO)는 경제적 이점으로 인하여 심해 유전 개발에 널리 이용되고 있으나 일반상선에 비해 많은 인원이 장기간 거주하게 됨에 따라 쾌적한 작업 구역과 안락한 선실 공간을 확보하기 위하여 일반상선보다 다양한 분야에서 매우 엄격하게 소음 규제를 하고 있다.

이 글에서는 이상과 같이 엄격한 소음 규제를 만족하는 저소음 고품질의 FPSO를 건조하기 위해서 필수적으로 요구되는 저소음 설계 과정 즉, 초기설계단계부터 기준에 축적되어 있는 음향 시험 및 시운전 계측 결과를 바탕으로 각 구역별 소음 수준 예측, 허용치 초과하는 구역에 대한 적절한 제어수단 강구, 시운전 계측을 통한 최종 검증 과정 등을 살펴보았으며, 이러한 과정을 통해 효율적으로 FPSO 소음을 제어하기 위해서는 무엇보다도 초기 설계 단계에서 정확한 소음 수준을 예측하고 제어 수단을 효과적으로 구현할 수 있는 시스템의 구축이 중요함을 알 수 있었다. 