



부유식 원유 생산·저장·하역 선박의 소음진동

주원호*, 김희원
(현대중공업 선박해양연구소)

1. 머리말

최근 고유가 시대를 맞이하여 심해 유전 개발이 증가하고 있으며, 이에 따라 개발 및 운송에 필요한 다양한 기능을 갖는 고부가가치 해양 구조물의 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 해상 유전 개발은 1940년대 후반부터 시작되었고 1970년대 이후 심해 유전 개발과 최초의 부유식 원유 생산·저장·하역선박(floating, production, storage and offloading: FPSO)이 건조되었다.

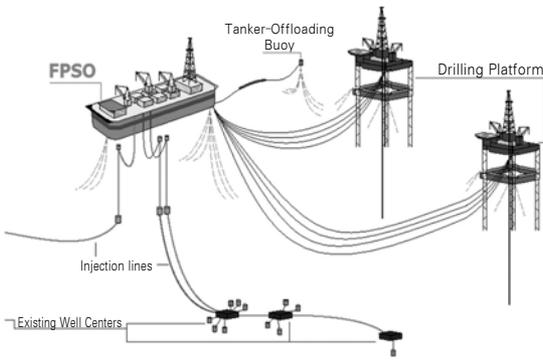
심해 유전 개발에 사용되는 구조물은 일정한 해역에 장기간 계류하여 바람, 조류 및 파도와 같은 환경하중을 받아야 하기 때문에 기존의 고정식 구조물을 이용할 경우에는 여러 가지 경제적, 기술적 문제점에 직면하게 된다. 따라서, 이러한 문제점들을 극복하기 위한 많은 연구를 통해 FPSO, 반잠수식 시추선, 텐션 레그 플랫폼(tension leg platform), 드릴십(drill ship) 등과 같은 다양한 해양 구조물들이 고안되었다.

특히 FPSO는 그림 1의 운영 개념도에서 알 수 있듯이 인근에 위치한 원유 시추 플랫폼 또는 심해 유정으로부터 이송되는 원유를 처리 및 저장하는 장치와 원유 운반선으로 하역하는 장치 그리고 해상 파이프라인으로 이송하는 장치가 갖추어진 해양 구조물이다. FPSO는 고정식 플랫폼

보다 설치가 용이하며 처리된 원유 하역시 파이프라인을 추가적으로 설치할 필요가 없다는 장점이 있어 심해 유전에서 널리 사용되고 있다. 세계 최대 FPSO는 필자가 소속된 조선사에서 건조된 Kizomba A FPSO이며 220만 배럴의 원유를 저장할 수 있고 현재 수심 1200 m의 서아프리카 해상에 설치되어있다.

FPSO는 그림 1에 보인 개략도와 해상 유전으로 이동중인 사진에서 알 수 있듯이 일반 초대형 유조선과 유사한 모습이지만 장기간 한곳에서 운항하지 않고 작업을 하기 때문에 주기관과 프로펠러 등의 추진장치가 없으며, 선체 상부인 topside에는 원유 생산과 정제에 필요한 여러 가지 설비가 설치되어 있다. 따라서 FPSO에 설치되는 기계장비의 원활한 운전과 성능을 보장할 수 있는 환경을 제공해야 하며, 일반상선에 비해 많은 인원이 장기간 거주하게 됨에 따라 거주공간의 안락성 측면에서의 국부진동뿐만 아니라 작업시의 청력손상, 경고음 미감지로 인한 위험, 의사소통의 어려움, 휴식 및 수면의 방해 등을 유발할 수 있는 소음으로부터 승무원을 보호하기 위해 거주구(living quarter)의 소음 허용 기준, 작업구역(working area)에서의 소음노출한계, 거주구역 내에서의 승무원의 사생활 보호를 위한 소음차폐지수(sound insulation index) 등을 비롯하여

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



(a) FPSO의 운영 개념도



(b) 현대중공업에서 건조한 FPSO의 모습

그림 1 FPSO

쾌적한 휴식공간을 확보하기 위한 공실 공간의 잔향시간까지도 규제하고 있고 일반 선박 보다 상당히 엄격하다.

상기에 기술한 바와 같이 고부가가치선인 FPSO는 상당히 엄격한 소음진동 규제 만족을 요구받기 때문에 성공적으로 건조하여 선주에게 인도하기 위해서는 초기설계단계부터 기존에 축적되어 있는 시험 및 계측 결과를 바탕으로 한 소음진동 해석을 수행하여 각 구역별 소음진동 수준을 예측하고, 허용치와의 비교를 통하여 초과하는 구역에 대해서는 적절한 제어수단을 강구한다. 이 글에서는 FPSO의 방진 방음 설계를 위해 FPSO의 소음진동 해석 기술에 대해 간략히 소개하고자 하며 해석의 절차를 그림 2에 도시하였다.

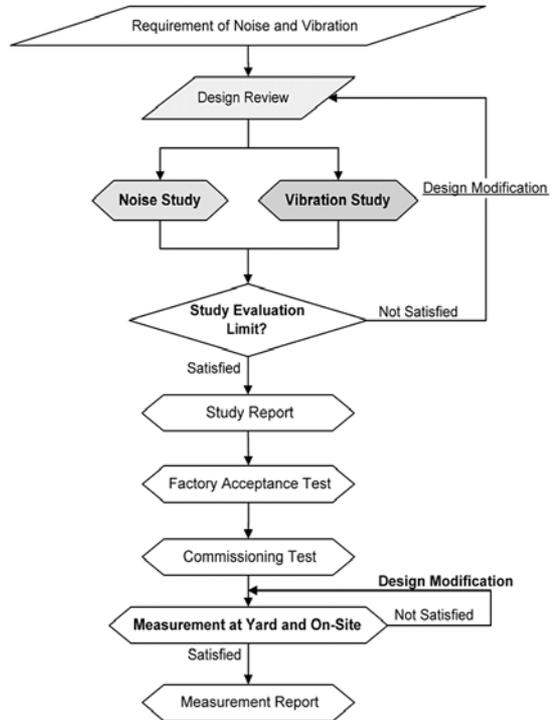


그림 2 FPSO의 소음진동 평가 절차

2. FPSO 진동 해석 절차

FPSO의 진동 해석은 거주구역, machinery space, 그리고 topsides module로 나누어 수행, 평가한다. FPSO에서 발생하는 진동은 대부분 국부 진동으로 특히 거주구역과 machinery space의 구역은 고체음의 전달을 최소화하기 위한 AVM (anti vibration mount) 설치 등 여러 방음대책으로 진동이 매우 낮은 수준으로 나타나고 있으며 안락한 거주성 확보를 위한 방진 설계를 목표로 한다. 반면 topsides module은 각종 기계장비의 구동으로 인한 구조물의 공진 회피 및 진동수준 저감으로 기계장비의 성능 보장 및 작업자의 진동 피폭 수준 저감을 목표로 하고 있다. FPSO의 진동 해석은 구조물과 진동 기진원인 장비의 선택과 모델링을 구축하고 장비의 기진력을 평가한다. 공진회피 검증을 위한 고유진동 해석 및 기진력을 이용한 강제진동 해석을 수행하여 진동

수준을 계산, 허용치와 비교한다. 이러한 진동 해석 절차를 그림 3에 도시하였다.

3. 진동 해석을 위한 기계장비의 선정

FPSO에는 수많은 기계장비들이 설치되는데, 모든 장비를 진동 해석에 고려하는 것은 비현실적이며 구조물의 안전성과 작업자의 거주환경 및 작업환경에 영향을 줄 수 있는 장비를 선정하여야 한다. 진동평가 시에 고려해야 되는 기계장비의 선정을 위해 여러 발주처에서는 내부적인 지침서를 보유하고 있으며 해외 전문 용역기관에서도 경험을 바탕으로 기계장비의 선정 기준을 보유하고 있다. 필자 소속의 조선사에서는 여러 발주처와 해외전문 용역기관에서 제시하는 선정 기준을 근거로 진동장비 선정 기준을 결정하였다. 진동 해석을 위한 대상 장비로 왕복동 기계장비와 인체 진동을 평가하는 주파수 이하로

운전되는 장비를 진동 해석에 고려한다. 그리고 AVM으로 지지되는 장비는 모두 해석 대상으로 고려하는데 기진력이 큰 주요 장비에서 발생하는 진동의 전달을 최소화하기 위해 AVM이 설치되기 때문에 진동 평가 시에 특별히 고려하게 된다. 강제 지지된 회전기 중에서도 출력이 크거나 장비의 무게가 큰 장비도 진동 해석의 대상으로 선정하게 된다.

4. 해석 모델링

4.1 기계장비의 모델링

진동 해석의 고려 대상으로 선정된 기계장비는 FPSO의 해석 모델에 포함하여야 하는데, 집중질량으로 고려하는 방법과 단순화된 모델을 구축하여 고려하는 방법으로 나눌 수 있다. 집중질량 치환의 방법은 장비의 진동 특성과 설계

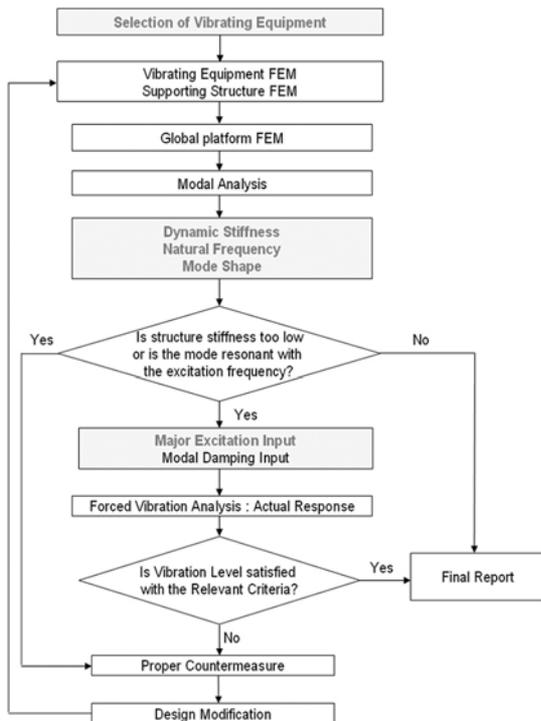


그림 3 FPSO 진동 해석과 평가 절차

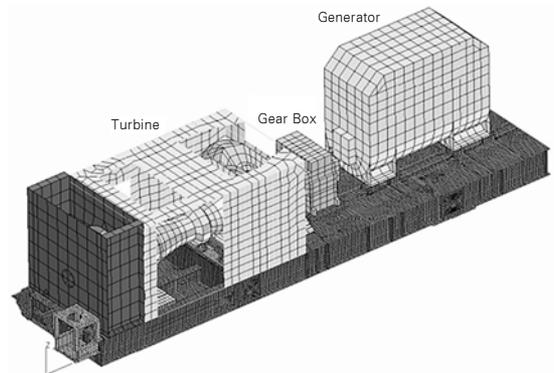


그림 4 터빈 발전기의 상세 유한요소 모델

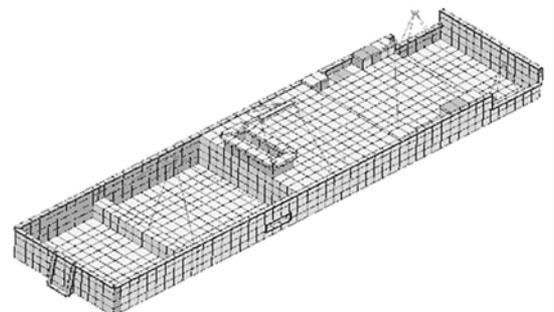


그림 5 터빈 발전기의 단순화 모델

자료가 확보되지 않은 경우에 장비의 무게만을 고려하여 모델링하는 것이며, 초기 해석 시에 장비를 누락시키기 보다는 집중질량의 치환과 같은 방법으로 우선 모델링하는 것이 바람직하다.

기계장비를 단순화 모델로 구축할 경우에는 장비의 진동 특성을 가지도록 단순화 모델을 수정하여야 한다. 그림 4에는 일반적인 터빈 발전기의 유한요소 모델을 나타내었고 그림 5에는 단순화된 해석 모델을 나타내었다.

4.2 FPSO 구조물의 모델링

진동 해석의 모델링 구축에 대해서 발주처 혹은 선급 등에서 규정한 지침은 없으며 각 기관에서 축적된 기술력을 바탕으로 한다. 일반적인 진동해석 모델링은 구조물의 형상과 국부적인 진동모드를 정확하게 묘사할 수 있도록 요소의 크기를 결정해야 한다. 그림 6에 FPSO topsides module의 진동 해석을 위해 구축한 모델의 모습을 나타내었다. 경계조건은 거주구와 기계실(machinery space)의 경우 자유상태로 처리하지만 선체와 연결되는 기계실 끝단은 단순지지조건을 부여한다. Topsides module의 경우 모듈의 지지조건을 고려하여 횡방향 변위를 구속하고 상하방향 변위를 풀어주는 경우도 있으나 일반적으로 pipe support 하단에 3방향의 병진 변위를 구속하여 해석을 수행한다.

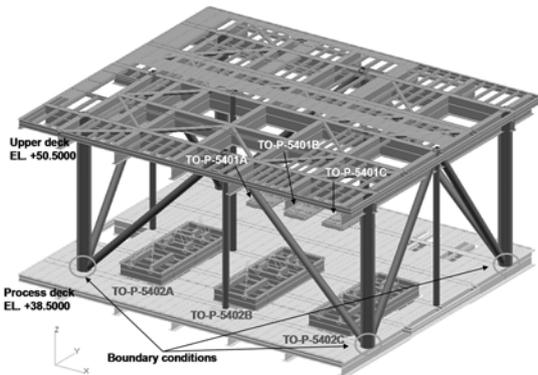


그림 6 FPSO topsides module의 진동 해석 모델

5. 진동 해석

5.1 고유진동 해석

고유진동 해석 수행의 주 목적은 기계장비로부터 발생하는 기진력과 공진 가능성을 확인하는 것이다. 공진영역은 발주처의 내부 기준으로 설정된 예가 많으며 전문 용역기관에서 설정한 공진영역과 서로 비슷한 수준이다. Platform deck의 진동모드를 그림 7에 나타내었으며 공진 여부는 그림 8에 나타난 동강성(dynamic stiffness)과 그림 9에 나타난 주파수 응답함수(FRF, frequency response function)로부터 판단할 수 있다. 공진영역에 진동 모드가 있는 경우 구조 보강 등의 방법으로 진동 모드를 공진영역 밖으로 이동시켜야 하며 구조 보강 등을 통하여 공진을 회피한 경우나 공진회피가 불가능한 경우에는 장비의 기진력을 고려한 강제진동 해석을 수행하여 진동수준을 평가하여야 한다. 또한 고유진동 해석을 수행하여 지지구조물의 강성을 평가하는데 일반적으로 장비가 설치되는 지점에서의 동강성을 계산하며, 최저 동강성은 발주처에서 제시하는 경우가 많고 이 또한 전문 용역기관의 수준과 비슷하다. 그리고 AVM으로 지지되는 장비가 설치된 구조물인 경우에는 AVM의 정상적인 작동을 보장하기 위해 AVM 강성의 20배 이상의 동강성이 확보되어야 한다. 동강성이 확보되

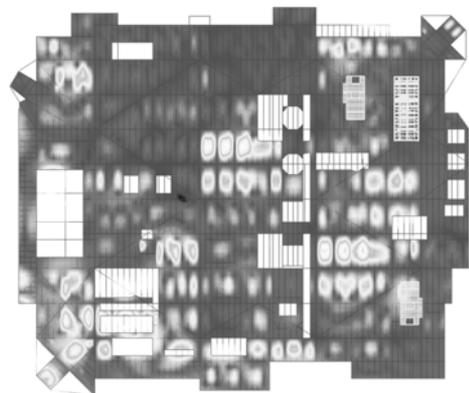


그림 7 Topside module deck의 진동모드

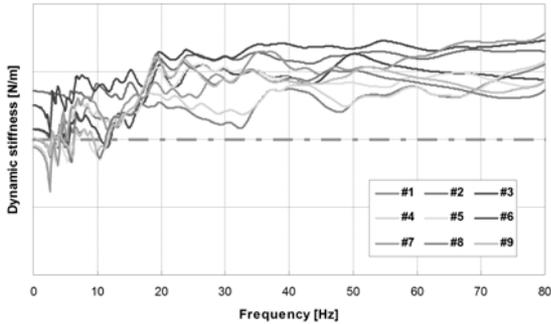


그림 8 동강성 계산 결과

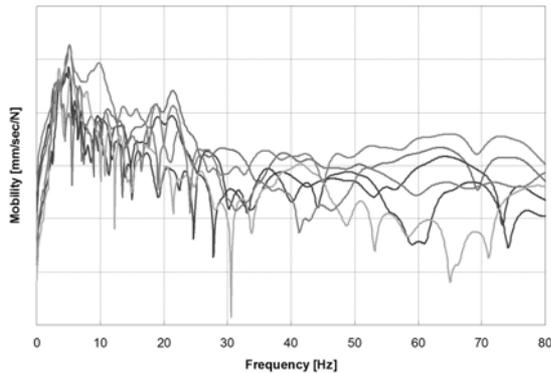


그림 9 주파수응답함수(FRF) 계산 결과

지 못한 경우에는 구조 보강을 해야 하며, 구조 보강 등의 방법으로 동강성을 확보되지 못할 경우에는 강제진동 해석을 수행하여 구조물의 진동수준을 평가하여야 한다.

5.2 강제진동 해석

기계장비로부터 발생하는 기진력을 평가하고 이를 고려하여 강제진동 해석을 수행한다. 일반적으로 장비의 기진력은 장비 제조업체로부터 입수하는 것이 가장 정확하며 확보가 불가능할 경우에는 진동계측 결과를 이용하여 기진력을 추정하거나 회전 기계의 경우 불평형력을 계산하여 사용한다. 감쇠는 발주처에서 규정하는 값을 사용하거나 해석 기관의 경험에 따른 값을 적용하고 있다.

강제진동 해석은 해석 기관에 따라 여러 기법

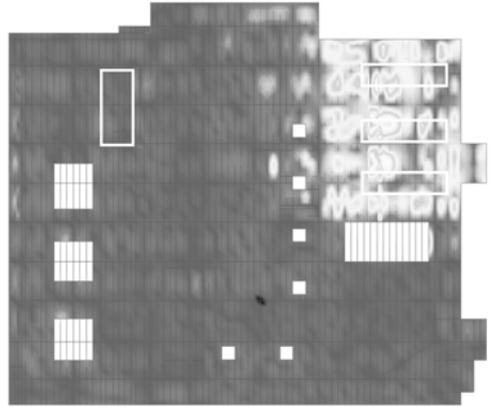


그림 10 Topsides module deck의 진동 수준 계산 결과

을 적용하고 있는데, 기진력의 크기를 증가시키거나 장비의 회전주파수가 아닌 주파수 응답해석을 통해 계산되는 공진영역에서 최대 진동응답이 발생하는 주파수에서 장비 회전주파수 기준의 기진력을 사용하는 보수적 평가 방법을 사용하는 경우도 있다. 강제진동 해석을 통한 진동 응답수준의 분포를 그림 10에 나타내었다.

6. FPSO 소음 해석 절차

FPSO의 소음 해석은 일반 상선과는 달리 선체 상부에 원유의 생산과 정제에 필요한 여러 가지 설비들이 설치되어 있기 때문에 이들 설비가 동시 발생하는 소음이 해당 작업 구역 및 인접 거주 구역에 많은 영향을 미치므로 선체 상부의 설비들로부터 발생하는 소음을 반드시 고려하여야 한다. 따라서 FPSO 소음 해석에서는 일반 상선의 소음해석에서 고려하는 거주구와 기관실에서 실내 소음뿐만 아니라 선체 상부 원유 생산 및 정제 설비 가동에 따른 옥외소음도 고려하여 구역 자체 소음과 각 구역 간의 전달되는 소음도 고려하여 해석을 수행하고 작업자 별로 소음 노출도를 평가한다. 최근에는 FPSO 가동에 따른 선체의 수중방사소음이 해양 생물에 미치는 영향 평가를 요구하는 경우도 있다. FPSO 소음 해석의 절차는 그림 11과 같다.

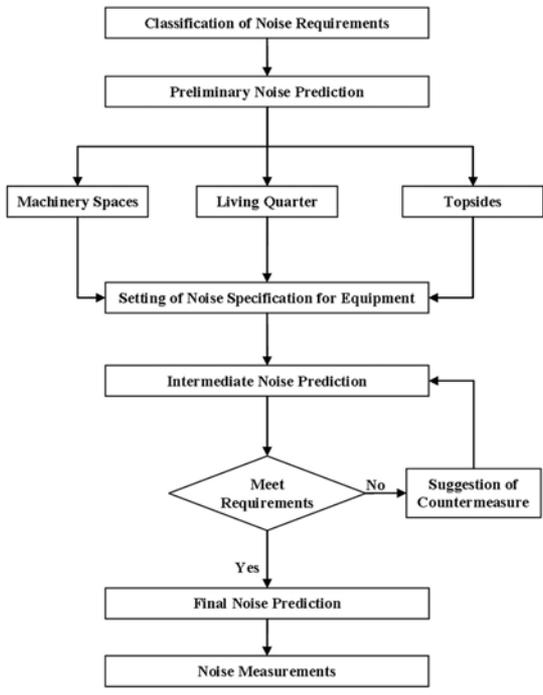


그림 11 FPSO 소음 해석 절차

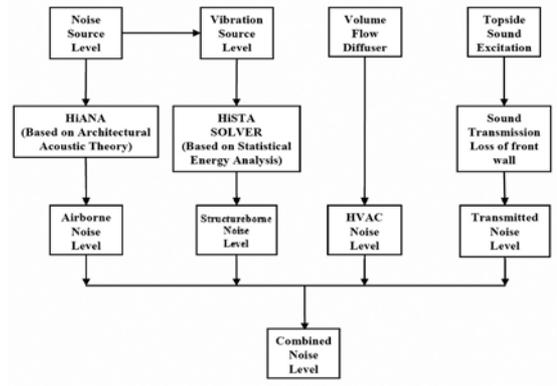


그림 12 거주구 소음 해석 절차

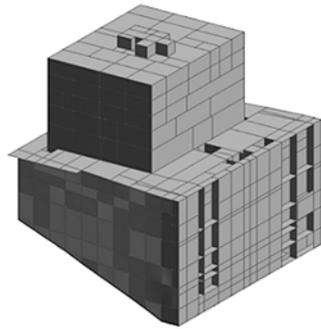


그림 13 FPSO 고체음 해석 모델

7. 거주구 소음 해석

FPSO의 거주구 소음 해석은 그림 12와 같이 기관실과 선실 내에 위치한 각종 기계 설비에 의해서 발생하는 공기음(airborne noise)과 고체음(structure-borne noise), 공기 조화 장치인 HVAC 소음 그리고 선체 상부에 위치한 소음원으로부터 선실로 투과되는 소음 등을 모두 고려해야 한다. 그리고 선실 간 또는 선실 및 공실 간의 차음 및 흡음 성능에 대한 기준을 만족하도록 설계되어야 한다.

7.1 공기음 해석

기관실 또는 선실 내 주요 소음원에 의해 선실로 전달되는 공기음은 건축음향 이론을 바탕으로 해석하며 선실 형상, 선실 내장재의 흡음 성능, 선실구조별 차음 성능 및 측로손실 효과 등을 고려하고 있다. 공기 소음원은 장비 제조자로부터 제공되는 음향파워레벨을 이용하며 자료 부

재 시는 유사 실적선 계측 데이터를 참고하거나 구동 장비 종류, 출력, 정격 회전수 등의 주요 장비 제원을 경험식에 입력하여 추정한다.

7.2 고체음 해석

고체음 해석은 통계적 에너지법(statistical energy analysis, SEA)을 이용하여 기관실에 위치한 디젤 발전기, 유압 펌프 등의 장비에서 발생한 진동이 거주구로 전달되어 선실로 방사되는 소음을 SEA법을 이용하여 계산된 구역별 진동값으로부터 최종적으로 선실 내장재의 음향특성을 고려하여 계산된다. 그림 13은 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 소음

원은 장비업체에서 제공하는 장비 가속도수준을 이용하며 자료 부재 시는 유사 실적선 계측 데이터 또는 경험식을 이용하여 추정한다.

7.3 HVAC 소음 해석

HVAC 소음은 구동 송풍기 소음원 수준과 디퓨저(diffuser)에서의 유동을 고려하여 계산된 음향 파워레벨이 HVAC 제작사에서 제공되면 각 선실로 방사되는 소음수준을 식 (1)을 이용하여 계산한다.

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

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

7.4 선체 상부 전달 소음

선체 상부 전달 소음은 거주구 전면에서 예측된 옥외소음 해석 결과와 외벽의 차음 성능과 선실 내부 흡음특성을 이용하여 선실 내부 소음을 예측한다. 선체 상부에서 전달된 소음이 주로 거주구 외벽을 통하여 선실로 전달된다고 가정하면 선실내의 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 는 거주구 외부의 소음수준, TL 은 공통경계면의 투과손실, A 는 공통경계면의 면적, R 은 실상수이다. 식 (2)로부터 선실 소음은 공통경계면의 투과손실 값에 지배적인 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 따라서 대상선에는 거주구 외벽의 차음성능을 향상시키기 위한 많은 조치가 취해지며 일반적으로 높은 차음 성능을 가지는 내장패널과 흡음재, 공기층 그리고 강벽 등으로 이루어진 다층 복합 구조로 구성되어 있다.

이러한 소음 예측의 정확도를 보장받기 위해서는 소음원의 정확한 추정뿐만 아니라 선실 내장재의 흡음, 차음 및 방사소음 특성과 실선 설치에

표 1 FPSO의 선실 소음차폐지수

Spaces	Sound insulation index (dB)
Cabin to cabin	40
Cabin to corridor	35
Cabin to public spaces	55
Cabin to staircase	40

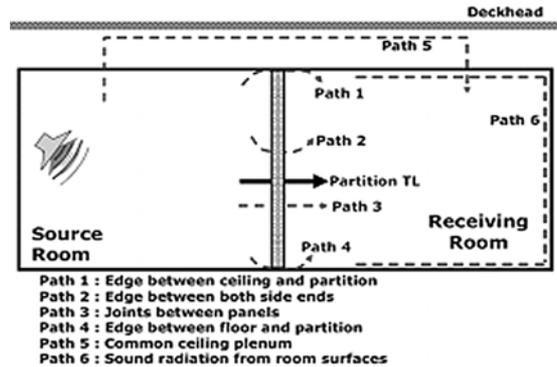


그림 14 선실 간 측로손실 경로

다른 음향성능 저감 효과, 그리고 복잡한 소음 전달경로를 갖는 선실 격벽, 천장 및 바닥 구조 별 공기음 및 고체음 전달 경로를 정확히 파악하고, 최적의 제어수단 적용에 따라 정량화된 자료를 확보하는 것이 무엇보다 중요하다. 이를 위하여 당사에서는 대/소 잔향실과 거주구 mock-up을 이용하여 수행한 다양한 음향시험으로부터 확보된 음향자료를 체계적으로 데이터베이스화하여 확보하고 있다.

7.5 소음 차폐 및 잔향시간 평가

FPSO의 경우 승무원의 정숙한 생활 조건 및 사생활 보호 등의 이유로 구역들 간의 소음 차폐 기준이 일반상선보다 엄격하게 주어지기 때문에 이러한 기준을 만족시킬 수 있도록 선실 구조를 설계하는 것이 요구된다. 표 1에 FPSO의 소음차폐지수 기준 예를 나타내었다. 소음차폐지수는 잔향실에서 계측한 차음성능 시험값보다는 실선 탑재 시의 값인 경우가 많으며, 실선의 경우 그림 14에 표시한 측로손실 경로(flanking path)에

표 2 FPSO 공실의 잔향시간 기준

Spaces	Max. allowable reverberation time (sec.)
Recreation room	0.5
Mess room	0.6

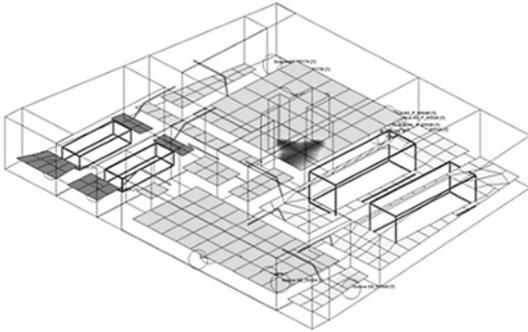


그림 15 FPSO 기관실 소음 해석 모델

의해 잔향실에서 계측된 차음 성능이 약 6~10 dB 정도 낮아지기 때문에 세심한 주의가 필요하다. 이에 잔향실과 거주구 mock-up을 이용하여 실선 설치 효과까지 고려된 선실 구조별 차음성능 자료를 확보하여 FPSO 선실 구조의 차음성능을 평가하고 차폐지수를 만족하는 최적 선실 구조를 도출하고 있다.

일반 선박과 달리 FPSO는 음질 관리 측면에서 식당을 비롯한 공실을 대상으로 최대 허용 잔향 시간 기준이 있으며 이 기준을 만족하도록 공실의 음향 설계가 이루어져야 한다. 표 2는 FPSO의 잔향 시간의 일반적인 기준을 나타낸다. 이를 위해 음선추적기법(ray tracing method)을 이용하여 실내공간의 소음분포를 예측할 수 있는 해석프로그램을 이용하여 선실의 잔향 시간을 예측하고 있다.

8. 기관실 소음 해석

FPSO 기관실의 경우 선박과 같은 대형 엔진은 설치되지 않지만 전력 공급을 위한 여러 대의 디

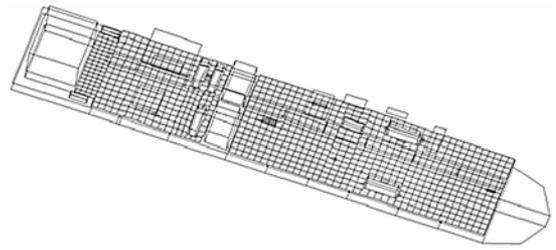


그림 16 FPSO topside 옥외 소음 해석 결과

젤 발전기와 대용량 유압 펌프, 컴프레서, 송풍기 등의 소음원이 또한 존재한다. 이와 같이 많은 종류의 소음원을 고려하여 소음원실에서의 작업자에 대한 소음노출한계 만족 여부를 정확히 평가하고 대책을 수립하기 위하여 음선추적기법을 이용하여 소음원실의 소음 분포 파악을 위한 해석을 별도로 수행한다. 그림 15는 FPSO 기관실 소음 해석을 위한 해석 모델의 예시를 보여준다.

9. 선체 상부 소음 해석

9.1 옥외 소음 해석

옥외 소음 해석은 음선추적기법을 이용하여 선체 상부의 각종 소음원과 건물들이 포함되도록 모델을 구성하여 해석을 수행한다. 적용된 공기 소음원 수준은 음향 출력 수준을 이용하며 이를 알 수 없을 경우에는 소음원 주위를 둘러싸는 가상 면적과 측정된 음압 정보를 이용하여 음향 출력 수준을 추정한다. 해석 결과에 중요한 영향을 미치는 흡음률과 투과 손실은 음향시험설비와 실선 시험으로부터 얻은 자료를 이용하여 추정한다. 그림 16은 FPSO topside 옥외 소음 해석 결과를 보여준다.

9.2 거주구 소음 기여도 파악

FPSO의 경우 topside 장비에서 발생하는 소음이 거주구로 전달되어 선실의 소음 문제를 발생시킬 수 있다. 이를 평가하기 위해 먼저 topside 장비들의 소음에 의한 거주구 외벽 위치에서의 소

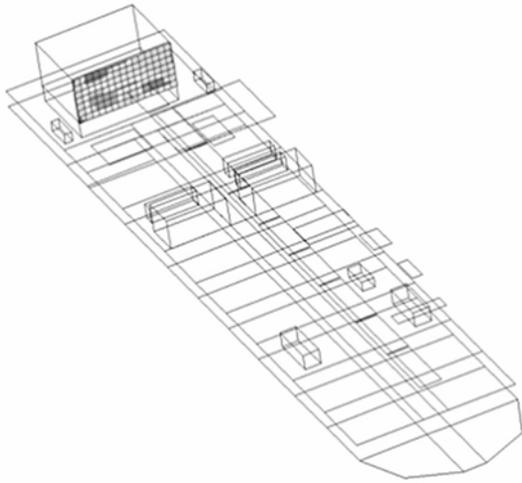


그림 17 Topside 장비에 의한 거주구 인접 소음 해석 결과

음 수준을 그림 17과 같이 예측하여야 하며 여기에 거주구 외벽의 차음 성능을 고려하여 최종적으로 선실로 전달되는 소음을 식 (2)를 이용하여 계산한다. FPSO의 경우, 외벽 1 m 앞에서 85 dB(A) 이하로 topside 소음이 전달되도록 설계하는 것이 일반적이다.

10. 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 일반 상선보다 다양한 분야에서 매우 엄격하게 소음 규제를 하고 있다.

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