

# 사고하중을 받는 해양구조물의 구조 안전성 평가

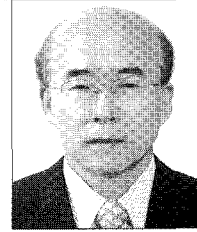
## Evaluation for Structural Safety of Offshore Structures under Accidental Loads



김규성\*



윤기영\*\*



장영식\*\*\*

\*현대중공업 선박해양연구소 해양산업연구실 선임연구원  
\*\*현대중공업 해양사업본부 해양구조기본설계부 부장  
\*\*\*현대중공업 선박해양연구소 연구위원

### 1. 서론

해양 유전/가스전 개발산업의 역사는 1947년 미국 멕시코만에서의 최초의 철제(Steel) 고정식 설비(Fixed platforms)를 시작으로 심해에서의 부유식 설비(Floating units)까지 약 반세기의 역사를 가지고 있다. 구조설계 관점에서, 이러한 해양설비는 육상의 다른 구조물과 유사하게 초기에는 주로 가동하중(Functional loads ; dead or live loads, etc.)과 환경하중(Environmental loads ; wave, current, wind, earthquake, etc.)을 고려하여 설계되었으나, 점차 예기치 못한 여러 사고하중(Accidental loads; explosion, fire, collision, dropped objects, etc)에 노출되었고, 이러한 하중 하에서의 구조 안전성에 대한 관심 또한 증가하게 되었다.

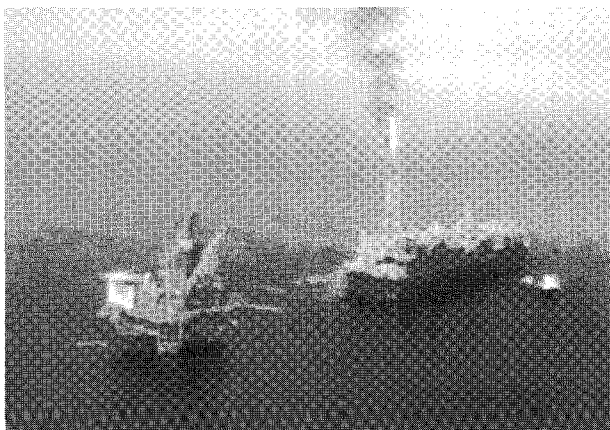


Fig. 1 가동 중인 FPSO

당사에서는 그 동안 약 160여 건의 해양설비공사를 수행해 왔으며, 구조 안전성 확보를 위해 발주처의 제반 요구사항을 만족하도록 관련 설계/해석을 수행하였다. 본 기사에서는 이들 중 최근 심해 개발에 따라 건조가 증가하고 있는 FPSO(Floating Production, Storage and Offloading Units, Fig. 1 참조)를 예로 들어 폭발, 화재, 충돌, 낙하 등 사고하중과 관련된 구조 안전성 평가에 대해, 하중 시나리오, 설계하중, 구조강도해석법, 설계기준, 설계에 미치는 영향 등에 대해 정리하였다. 단, 본 기사에서 언급한 설계하중이나 평가기준은 개별 공사와 그 발주처에 따라 구체적인 적용은 상이할 수 있으므로 주의를 요한다.

참고로 파도나 바람과 같은 외부환경의 극한 상태에 대해서는 일반 상선과 같이 안정성(Stability) 평가와 구조강도 평가를, 일반 해상상태에 대해서는 피로강도 평가를 통해 안전성을 확인하고 있으며, 이들에 대해서는 본 기사에서 다루지 않는다.

## 2. 사고하중과 FPSO 안전도 (Accidental Loads and Safety of FPSO)

FPSO와 같은 부유식 설비를 이용한 심해 유전개발에는 원유/가스의 공정처리, 생산 및 거주를 위한 상부 공정모듈(Topside process modules)과 저장, 하역 등을 위한 하부 부유체(Hull floating structures)로 구성된 FPSO 뿐만 아니라, 해저 생산시스템(Subsea production System) 및 선적 터미널(Offshore loading terminal)과 연계하여 운용된다. 부유체는 해저면과 계류(Mooring) 장비에 의해 연결되어 위치유지를 하며, 해저 생산시스템과 FPSO는 UFR(Umbilical, Flow line and Riser)에 의해 연결되어 원유 운송, 모니터링, 유지/보수를 하게 된다.

원유 생산의 주요 공정은 불순물과 혼합된 고압의 원유와 가스를 감압하여 기름, 가스, 물을 분리하고 하역하거나, 물과 가스를 처리/가압하여 유전에 집어넣는(Injection) 것이다. 또한 육상으로부터 물자, 작업자, 생산/유지보수를 위한 케미컬(Chemicals) 등을 수송하기 위해 보급선(Supply boats), 탱커(Methanol tankers and Off-take tankers), 헬리콥터 등을 운용한다.

위의 가동 설비 및 가동 특성상 FPSO는 다음과 같은 다양한 위험요소(Hazards)에 노출되어 있다.

- Hydrocarbon events: 공정모듈이나 라이저(Riser)에서의 가스/기름의 누출(Leaks)로 인한 화재/폭발.
- Non-hydrocarbon events: 선박의 충돌이나 중량물의 낙하 등.
- External environmental events: 파도나 바람 등 외부환경에 의한 사고
- Structural events: 터빈, 컴프레서의 파손이나 헬리콥터의 추락 등 충격에 의한 구조 손상
- Transportation accidents: 물자와 작업자 등의 수송 중에 수반되는 사고

위의 위험 요소로 인해 구조물에 미치는 하중 들 중에서 특히 폭발, 화재, 충돌, 낙하 등을 사고하중으로 별도로 분류하며, 예기치 못한 상황에서의 사고로 인한 하중으로서 그 세기나 발생 빈도를 명확히 산정하기 힘들다. 따라서, 위와 같은 사고하중에 대해서는 인적, 물적 손상 정도(Consequence) 및 발생 빈도(Frequency)를 정량적으로 파악하여(QRA; Quantitative Risk Assessment), 발주처가 요구한 위험도 수준(Risk level)을 만족하는지 확인함으로써 그 안전성(Safety)을 확보하게 된다.<sup>1)</sup> 만약 만족하지 않을 경우,

위험도를 줄일 수 있는 방안(Mitigation measures)을 강구하고 이에 대한 경제성을 평가하는 과정을 만족할 때까지 반복하게 된다.

구조설계 및 강도평가는 한계상태기반설계(Li-limit state based design) 중 사고한계상태(ALS; Accidental limit state) 설계기법에 따라 평가하게 된다.<sup>2)</sup> 현재 일반적으로 받아들여지는 설계사고하중(Design accidental loads)의 수준은  $10^{-4}$ /year의 초과발생확률(Frequency of exceedance)을 가지는 하중으로 정의되며, 위험도 평가 등을 통해 선정된 하중 시나리오에 대해 소성변형을 허용하되, 주요 SCE(Safety Critical Elements)의 기능을 유지하고, 구조물이 완전붕괴(Total collapse)되지 않을 조건을 만족하도록 설계하게 된다. 따라서, 구조해석법으로는 초기설계단계에서의 단순이론해석(Simplified analytical method; simple formulae, industrial codes or standards, etc.) 등과 더불어, 하중의 동적 효과, 구조재료의 비선형 소성거동 및 점진붕괴(Progressive collapse) 거동 등을 고려할 수 있는 동적비선형 유한요소해석(Dynamic nonlinear finite element analysis)이 추천된다.

## 3. 가스 폭발 (Gas Explosion)

FPSO에서의 가스 폭발은 누출사고로 형성된 가스 구름(가연성 가스와 산소의 혼합)이 인화요인(Ignition resources)에 의해 연소하면서 발열반응과 함께 압력이 급격히 팽창하는 현상으로 정의되며, 다음 3가지 종류로 나뉠 수 있다.

- 외부폭발(External explosion): 일정 수준의 환기가 가능한 공정모듈이나 갑판과 같이 개방된 장소에서 벨브나 플랜지 등에서의 가스 누출로 인해 발생.
- 터널폭발(Tunnel explosion): 라이저에서 누출된 가스가 선체갑판과 모듈 주갑판 사이에 누적되어 발생.
- 내부폭발(Internal explosion): 공정모듈의 압력용기(Pressure vessels), 배관(Piping), 각종 룸(Rooms) 또는 선체의 화물창과 같이 밀폐된 공간에서 발생.

FPSO의 폭발해석은 상부 모듈의 구조부재, 방화/방폭벽(Fire/Blast wall), 선체 갑판, 거주구 외벽, 배관, 주요 장비 및 그 지지 구조에 대해 주로 수행하며 응력, 좌굴, 변위, 가속도 측면에서 구조적 안전도를 평가한다.

### 3.1 폭발 시나리오 및 폭발하중

폭발 시나리오의 작성은 HAZOP(Hazard and Operability) 등과 같은 위험성 분석(Risk analysis)을 통해 이루어지며,

폭발이 발생할 가능성이 있는 공정 단위(Process segments)의 구분 및 그 안의 가스/기름의 종류(Inventory)와 부피, 누출 속도 및 방향, 바람의 속도 및 세기, 발화 요인의 종류 및 위치를 고려하게 된다.

작성된 폭발 시나리오에 따른 폭발하중의 계산은 일반적으로 아래의 방법으로 구할 수 있다.<sup>3)</sup>

- 경험론적 모델(Empirical models): 실험 자료와의 상관관계에 근거한 방법으로서, 설계 초기 단계에서 근사적인 최대하중을 구하는데 주로 사용.
- 현상학적 모델(Phenomenological models): 실험 자료와 더불어 물리적 현상에 근거하여 경험론적 모델을 좀더 확장시키고 정확도를 높인 방법으로서, 계산시간이 많이 소요되는 수치해석적 방법에 앞서 적용하는 경향이 있음.
- 수치해석적 모델(Numerical models); 폭발 시의 유체 동역학적 현상을 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 이용하여 직접 계산하는 방법으로서, 시간이 가장 많이 소요되지만 가장 정확도가 높고 다양한 폭발 시나리오의 모사가 가능.

근래 해양 구조물에 대한 폭발하중해석의 대부분은 CFD에 의해 수행되며, 폭발해석의 전 단계로서 누출된 가연성 가스 구름의 크기 및 위치를 계산하기 위해 환기해석(Ventilation analysis)과 가스 확산해석(Dispersion analysis)도

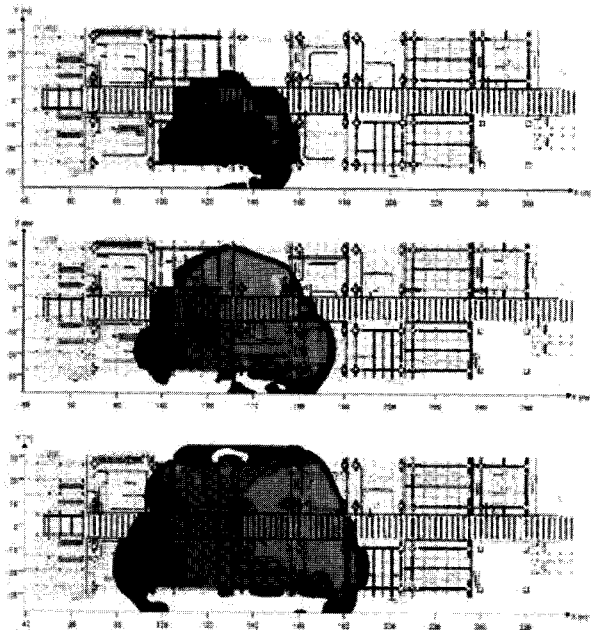


Fig. 2 폭발하중에 의한 FPSO Topside에서의 Overpressure 분포 (예)

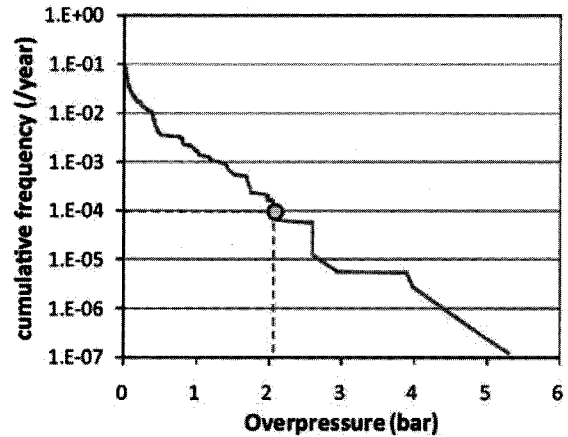


Fig. 3 Overpressure exceedance curve (예)

수행하게 된다. 폭발하중의 크기에는 위에 언급된 누출 가스의 종류, 가스 구름의 크기와 위치, 발화원의 위치 등과 더불어 설비의 밀집도(Congestion), 밀폐도(Confinement)도 크게 영향을 미치므로, 장비, 배관 등을 해석 모델에 포함하여 이를 정확히 구현하여야 한다. Fig. 2에 CFD를 이용한 폭발해석의 예를 나타내었다.

위와 같이 각 시나리오별로 계산된 폭발하중과 더불어(결과분석; Consequence analysis), 바람, 누출 및 발화에 대한 발생확률을 고려하여 각 시나리오별 발생확률을 계산함으로써(빈도분석; Frequency analysis), 이들을 고려한 정량적 위험도 평가가 가능하게 되며, 이를 통해 구조 안정성을 평가해야 할 주요 시나리오(Critical scenario)를 결정하게 된다.

설계폭발하중(Design explosion load)의 결정은 주로 Fig. 3와 같이 폭발 과압(Overpressure)이나 충격량(Impulse)을 연간 초과발생확률로 표현한 Exceedance curve를 작성하여 구할 수 있다.

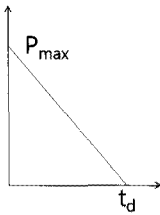
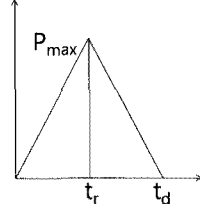
### 3.2 폭발강도 해석법

폭발하중은 최대압력(Peak load,  $P_{max}$ ), 지속시간(Duration,  $t_d$ ), 증가시간(Rise time,  $t_r$ )의 동적 하중 특성치로 표현되며 (Table 1 참조), 구조물에 하중이 전달되는 방식에 따라 아래와 같이 구분된다.

- Overpressure: 연소 가스의 팽창으로 인한 급격한 국부 압력 증가. 방폭벽, 갑판 등에 작용.
- Dynamic pressure(Drag load): 폭발 가스의 유동(Blast wave)에 의한 하중. 배관과 같은 작고 긴 물체에 작용.

폭발 하중에 의한 구조응답 양상은 폭발 지속시간( $t_d$ )과 구조물의 고유진동주기(T)의 비에 따라 Impulsive, Dynamic,

Table 1 폭발하중에 의한 구조응답 분류<sup>3),4)</sup>

	Impulsive $t_d/T < 0.3$	Dynamic $0.3 < t_d/T < 3.0$	Quasi-static $t_d/T > 3.0$
Peak load	Preserving the exact peak value is not critical.	Preserving peak value - the response is sensitive to increase or decreases in peak load for a smooth pressure pulse.	
Duration	Preserving the exact load duration is not critical.	Preserve load duration since in this range it is close to the natural period of the structure. Even slight changes may affect response.	Not important if response is elastic, but is critical when response is plastic.
Impulse	Accurate representation of impulse is critical.	Accurate representation of impulse is important.	Accurate representation of impulse is not important.
Rise time	Preserving rise time is not important.	Preserving rise time is important; ignoring it can significantly affect response.	
Idealized pressure time history	 <p>General shape of idealized load is a right-angle triangle.</p>	 <p>General shape of idealized load is a triangle.</p>	
Analysis method	Energy method	SDOF, NLFEA	Static, Energy method

Quasi-static으로 나눌 수 있으며, 이의 분류 및 각 특성치의 상대적인 중요도를 Table 1에 정리하였다.

동적거동의 구조강도를 평가하는 방법은 SDOF법(Single Degree of Freedom Method)과 비선형유한요소해석법(NLFEA; Nonlinear Finite Element Analysis)으로 크게 나눌 수 있다.

### 3.2.1 SDOF법

SDOF법은 국부부재에 대한 동적응답을 등가의 1자유도 계 질량과 강성으로 치환하여(Fig. 4 참조) 평가한다. 비교적 간단한 계산으로 합리적인 결과를 구할 수 있으며, 탄성과 소성영역에 대하여 모두 적용 가능하다.<sup>5),6)</sup> 따라서 개념 설계 또는 초기설계 단계에서 많이 활용하고 있다.

동적 설계압력은 DLF(Dynamic Load Factor)를 도입하여 등가의 정적설계압력으로 치환함으로써 정적해석으로 평

가할 수도 있으며, 만약 탄성한도를 벗어나 과도한 소성응답을 보일 경우, 최대처짐과 탄성한계처짐의 비(Ductility Ratio)로부터 소성효과를 고려한다.

### 3.2.2 비선형 유한요소해석법 (NLFEA)

복잡한 구조물이 재료의 탄성영역 범위를 벗어나 소성영역에서 거동하는 경우 보다 정확한 구조응답과 강도 평가를 위하여 NLFEA으로 수행하는 것이 요구된다.

이 방법은 구조응답을 시간영역에서 구현하는 것으로 SDOF법보다 과정이 복잡하고 시간이 많이 소요되는 단점이 있지만, 구조물이 복잡하거나 신뢰도가 높은 결과를 구할 때 유용하다. 단, 해석 결과의 정확도는 해석자의 경험이나, 요소 크기, 요소의 종류, 경계조건, 프로그램 사용에 대한 이해 등에 따라 크게 달라질 수 있다.

고차 요소의 사용 및 작은 크기의 많은 요소의 사용으로 인한 해석 대상 모델의 세밀한 표현은 소성역의 개시나 전개 및 파손 모드, 변형 형상 등을 좀더 명확히 표현할 수 있어 해의 정도를 높일 수 있으나 해석의 비용을 증가시킨다. 기존 해석 결과나 사용자의 경험 및 이론해석, 요소 민감감성에 대한 선행해석 등에 의거하여 적절한 요소의 종류 및 크기의 검증이 선행되어야 한다.

NLFEA에서 해석 결과에 영향을 미치는 또 하나의 인자는 파손 여부의 판단 기준으로서 주로 파손 변형률(Failure strain)이 사용된다. 파손 변형률은 해석 대상의 에너지 흡

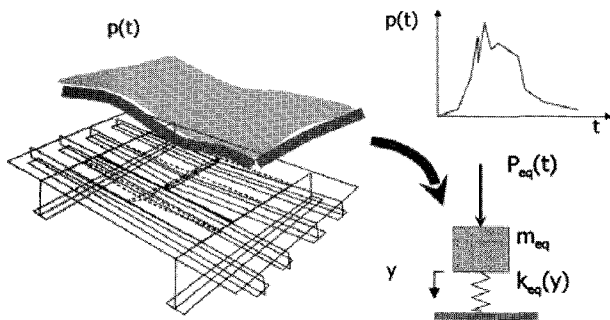


Fig. 4 SDOF Method

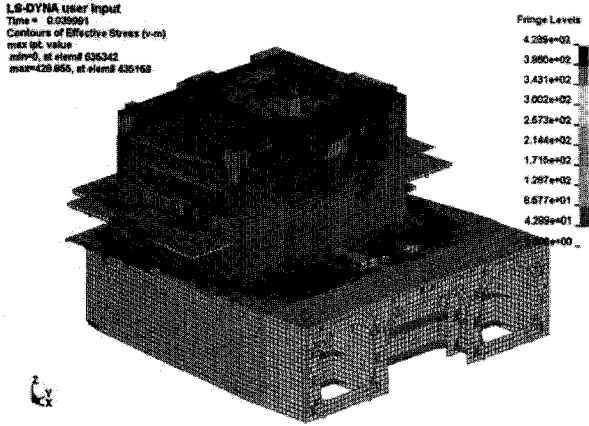


Fig. 5 폭발하중에 의한 FPSO 거주구 외벽의 응력 분포 (예)

수 성능에 직접 관여되고, 위에 기술된 요소의 크기와도 연관성을 가지며, 재료의 응력-변형률 관계에 의해 결정된다.

해석 대상의 소성 거동 및 파괴 모드에 영향을 미치는 재료 모델의 선정 시에는 실제 재료시험을 통한 응력-변형률 선도를 이용하거나, 완전탄소성 모델 등 적절히 이상화된 모델을 사용한다.<sup>6)</sup> 재료 모델에서 추가적으로 고려할 수 있는 인자는 재료의 경화 효과(Hardening effect) 및 변형률 속도 효과(Strain rate effect)이다.

Fig. 5는 FPSO 거주구의 전면 외벽에 폭발하중이 작용하였을 때의 거동을 비선형유한요소해석으로 평가한 예이다.

### 3.3 안전도 평가기준 및 영향

폭발 사고에 대한 주요 성능기준(Performance standards) 또는 안전허용기준(Safety acceptance criteria)은, 사고 후 적어도 하나의 대피로(Escape route) 또는 주변의 임시 대피소(TR; Temporary Refuge)가 이용 가능하여야 하고, 안전구역으로 대피할 때까지의 시간이 확보되어야 한다. 주요 SCE들은 그 기능을 유지하고 있어야 하며, 구조 부재의 소성 변형은 허용하나 구조물이 완전히 붕괴하지는 않아야 한다. 또한, 방폭벽의 경우 폭발 이후의 화재에도 견딜 수 있어야 한다.

폭발에 의한 구조적 안전성을 유지하기 위한 방안은 직접적으로 폭발하중을 낮추거나, 취약한 구조 부재의 추가 보강안을 마련하는 것이다. 이 중에서 폭발하중을 낮추는 방안들은 대부분 설계 초기 단계에서나 적용이 용이하다. 즉, 밀폐도나 밀집도를 낮추고 환기성을 높여 가스 구름의 크기를 줄이기 위한 공정설비 배치(Process layout)의 최적화나 구조 부재, 방화/방폭벽의 크기/위치 변경은 상세설계 단계에서는 매우 힘들다. 구조 부재의 추가 보강 또한 종종 주변 구조와의 간섭 등으로 인해 변경안의 형상이나 배치에 제약

을 받는다. 즉, 정확한 폭발하중이 산정되는 시기는 밀집도나 밀폐도를 정확히 모사할 수 있는 상세설계 단계이지만, 폭발하중을 고려한 주요 구조부재의 설계는 초기 설계 단계에서 미리 이루어져야 한다. 그러므로, FPSO의 폭발하중해석은 가급적 설계 초기 단계에 폭발하중에 대한 구조강도평가와 병행하여 수행함으로써, 추후 설계 변경에 따른 영향을 최소화해야 하며, 이 단계에서의 해석 및 평가는 경험적/현상학적 모델과 함께 SDOF법을 사용하는 것이 적절하다.

## 4. 화재 (Fire)

화재에 대한 전반적인 설계/해석 절차는 폭발과 유사하므로 화재 사고에 대해서는 폭발과 다른 점만 간단히 기술한다.

FPSO에서의 화재는 폭발과 달리, 가스/기름의 누출 즉시(가연성 구름이 형성되기 전에) 발화하는 경우에 발생하며, 대표적으로 아래의 두 종류로 나뉜다.

- Jet fire: 고압의 가스가 방향성을 갖고(Momentum) 지속적으로 분출될 때 발생.
- Pool fire: 누출된 기름이 갑판 위에 웅덩이를 형성하여 연소될 때 발생.

화재 해석의 대상은 폭발과 동일하며, 대상 구조물의 온도 증가 및 그에 따른 강성/강도 저하와 열유속/열변형의 발생을 고려하여 구조강도를 평가하게 된다. 강도허용조건을 만족하지 못할 경우 PFP(Passive Fire Protection materials) 등의 보강 방안을 고려할 수 있다(Fig. 6 참조).

### 4.1 화재 시나리오 및 화재하중

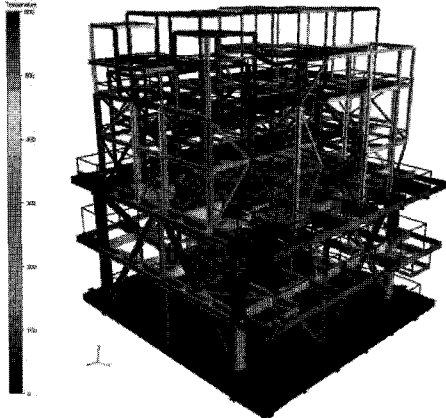
화재 시나리오는 폭발과 동일하게 가스/기름의 유출에 기인하므로 폭발 시나리오의 작성 절차와 유사하며, 최종 작성된 시나리오는 화재의 종류(Jet fire or Pool fire), 발생 위치 및 화염 형상(Engulfed fire or Non-engulfed fire), 밀폐도(Open fire or Confined fire)에 따라 분류된다.

작성된 폭발 시나리오에 따른 화재하중의 계산 역시 폭발의 경우와 동일하게 경험론적 모델이나 현상학적 모델, 수치해석적 모델이 존재하며, 최근에는 폭발해석의 경우와 같이 CFD에 의한 수치해석 계산이 많이 수행되고 있다.

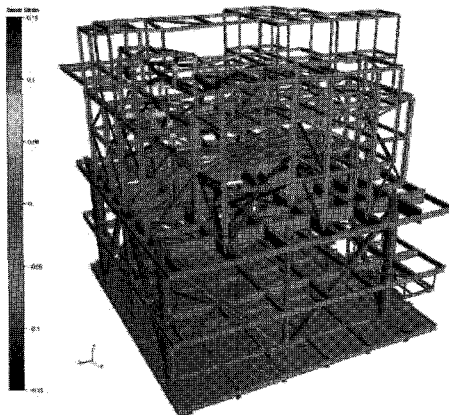
화재하중해석으로부터 얻어진 화재하중은 열원으로부터 방출되는 열량의 세기를 나타내는 열유속(Heat Flux)으로 표현되며, 빈도해석 결과와 결합하여 초과확률곡선을 작성함으로써, 설계화재하중(Design fire load)를 결정하게 된다.

## 4.2 화재하중 해석법

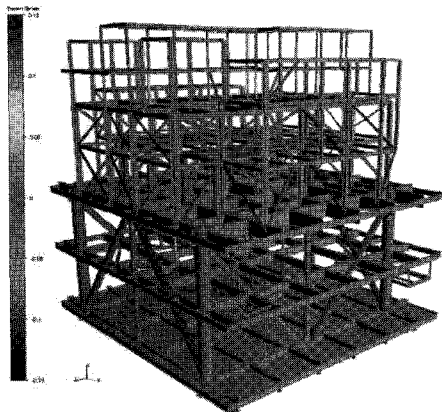
화재하중에 의한 구조 응답은 열전달해석을 통해 강구조물의 온도 분포를 구함으로써 시작된다. 즉, 강도평가 시에 온도 상승에 따른 구조 재료의 강성 및 강도 저하와 온도 변화에 따른 열응력 또는 열변형의 발생을 고려하여야 한다.



(a) 화재하중에 의한 온도 분포



(b) 화재하중에 의한 소성변형률 분포



(c) PFP 처리 후 소성변형률 분포

Fig 6 화재하중에 의한 공정모듈의 거동 및 PFP의 적용 예

## 4.3 안전도 평가기준 및 영향

화재 사고에 대한 주요 안전허용기준은 폭발 사고에 대한 기준과 동일하게 구조적 안전성을 유지할 수 있는 시간 또는 작업인원이 대피할 수 있는 시간의 확보가 가장 중요한 평가 항목일 될 것이며 화재해석 결과는 PFP의 최적 배치 설계에도 유용히 쓰인다.

## 5. 선박 충돌(Collision)

FPSO는 설치 해역 주위를 통과하거나 물자/작업자의 수송을 위해 접근하는 선박과의 충돌에 대해 위험성 평가를 실시하여 충돌 시나리오를 선정하고, 이에 요구되는 안전성이 확보되도록 설계하여야 한다. 즉, FPSO에 정기적으로 접근하는 보급선이나 탱커와의 충돌로 인한 구조적 손상이나 원유 유출의 방지를 위해 충분한 강도를 유지하도록 구조적 배치가 이루어져야 하며, 필요한 경우 선체 외부에 설치되는 각종 부가장치(Moorings, Risers, Caissons 등) 주위에는 프로텍터(Protective Structures)가 설치된다.

이러한 구조적 개선을 위해서는 충돌 시의 충돌 성능(에너지 흡수능력) 평가 및 충돌 후의 잔류강도의 확보를 위해 충돌손상 상태에 대한 구조강도 평가가 이루어져야 한다.

### 5.1 충돌 시나리오 및 충돌 에너지

충돌 시나리오의 작성은 발생 가능한 충돌 사고 중에서 설계에 고려할 충돌사고의 분류 및 그 결과와 발생 확률을 정의하는 것으로서, 과거 충돌사고의 통계자료 및 위험성 분석을 통해 결정한다.<sup>7)</sup> 이로부터 잠재적인 선박 충돌 위험의 정량적인 측정과 분류 및 위험 감소를 위한 대응 방안의 결정이 가능하다.

FPSO에 대한 선박 충돌의 유형은 충돌 선박의 종류(보급선, 탱커) 및 충돌 시 엔진의 동력전달 유무(Powered or Drifting)로 구분할 수 있다.

각각의 충돌 유형에 의한 충돌사고 결과(Consequences of collisions)는 충돌 선박의 충돌 에너지 및 충돌 속도에 의해 결정된다. 충돌 에너지는 충돌 직전의 운동에너지이며, 충돌 속도는 동력전달 유무와 더불어 속도 제어의 유무(On arrival or Maneuvering)에 따라 달라진다. 충돌 에너지(E)는 아래와 같이 산정된다.

$$E = \frac{1}{2}(M_s + dM_s) \cdot V^2$$

$$= \frac{1}{2}(M_s + C_a \cdot M_s) \cdot V^2$$

(Joules)

여기서,  $M_s$ 는 충돌 선박의 배수량(kg),  $dM_s$ 는 부가질량이다. 부가질량계수  $C_d$ 의 값은 일반적으로 충돌 선박의 선측 충돌(Sideway collision)시에 0.4, 선수/선미 충돌(Bow/Stern collision)시에 0.1을 적용한다.  $V$ 는 속도(m/sec)이다.

상기의 충돌 시나리오들에 대해 충돌 빈도분석이 이루어지면, 각각의 시나리오가 미치는 인명 피해, 환경 영향, 구조적 손상 등의 심각도에 따른 서열화(Ranking accidental events), 분류 및 비교를 통한 충돌 위험도 평가가 가능하다. 그리고 FPSO의 구조 안정성에 심각한 영향을 주는 주요 시나리오(Critical events)를 결정하고, 이에 대해 구조 안정성 평가를 실시한다.

충돌 에너지 및 충돌 속도와 더불어 충돌 시나리오의 결정에 영향을 미치는 인자로는 충돌 각도, 충돌 위치, 화물 적재 조건, 흘수, 충돌 선박의 선수 형상 등이 있다.

주요 시나리오에 대해 정해지는 설계 충격하중(Design impact energy)은 수행 공사에 따라 달라질 수 있으며, 일반적인 규정(Codes, Standards 등)에서는 선체나 방호물에 요구되는 충돌 성능 및 충돌 위치에 따라 최소한의 충격 에너지 수준만을 제시하고 있다.<sup>8),9)</sup>

## 5.2 충돌 역학 및 해석법

충돌에 대한 역학적 해석은 전통적으로 외부거동해석(External mechanics)과 내부거동해석(Internal mechanics)으로 구분되어 수행되어 왔다.<sup>10)</sup> 외부거동해석을 통해 충돌 시 운동에너지 손실량을 얻게 되고, 이를 내부거동해석을 통해 얻어진 흡수에너지량과 비교하여 충돌 성능을 판단하게 된다.

최근에는 비선형 유한요소해석을 통해 두 거동을 동시에 다루는 연성해석(Coupled external and internal mechanics)이 이루어지고 있다.

### 5.2.1 외부거동해석 (External Mechanics)

외부거동해석은 충격력과 유체력이 작용하는 선체를 강체로 두고 충돌체와 피충돌체간의 전체 운동을 다루게 된다. 유체동력학적 힘으로는 관성력과 복원력, 점성항력, 파랑 하중, 슬로싱(Sloshing) 등이 고려될 수 있는데, 일반적으로 관성력의 영향이 가장 크며, 단순해석(Simplified method)에서는 일정한 부가질량을 포함하여 표현된다.

### 5.2.2 내부거동해석 (Internal Mechanics)

충돌 시 선체 주요 부재의 거동은 매우 복잡하여 대변형과 함께 소성 거동을 수반한다. 내부거동해석은 이러한 선체의 구조적 손상 응답을 계산하게 되며, 단순공식(Simple formulae), 단순이론해석(Simplified analytical method), 단순유

한요소해석(Simplified FEM), 비선형유한요소해석(Non-linear FEM) 등의 방법으로 수행할 수 있다.

단순공식에 의한 해석은 경험적 자료와 이론 해석을 바탕으로 선체의 손상량과 에너지 흡수와의 관계에 의해 전체적인 충돌 성능을 평가하는 것으로서 설계 초기 단계에서 에너지 흡수 능력을 계산하는데 유용하다.

단순이론해석은 전체적인 에너지 흡수 성능과 더불어 개별적인 구조 부재의 손상 거동을 이론적 공식에 의해 표현하며, 모델링과 해석의 정도를 동시에 고려할 때 가장 적합한 해석법이다. 수식화로 표현되는 개별적 구조 부재의 손상 모드로는 Membrane Stretching, Crushing, Cutting or Tearing, Folding, Rupture and Fracture 등이 있으며, 일반적으로 횡하중에 의한 Membrane Force가 에너지 흡수에 가장 큰 기여를 한다.

단순유한요소해석은 이론적 모델과 FEM 기법을 결합하여 충돌 성능을 해석하며, 상대적으로 큰 요소를 사용하여 모델을 간략화한다.

비선형유한요소해석은 최근 가장 많이 사용되는 기법으로, 모델링 및 해석 시간은 가장 많이 소요되나 실제 충돌 거동을 가장 정확히 표현할 수 있으며 주로 외연적 기법의 상용 수치해석 프로그램을 사용한다. 이에 대한 자세한 설명은 3.2.2절을 참조바란다. Fig. 7은 비선형 유한요소해석에 의한 보급선과 프로텍터의 충돌 시 변형률의 예를 보여 주고 있다.

## 5.3 안전도 평가기준 및 영향

충돌 성능의 평가는 충돌 해석 결과로부터 구한 FPSO의 충격 에너지 흡수량, 구조 손상량(손상 범위), 선체의 잔류

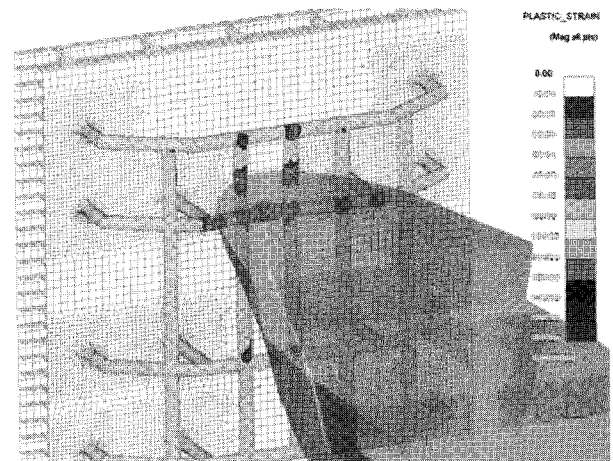


Fig. 7 비선형 유한요소해석에 의한 보급선과 프로텍터의 충돌 시 소성변형률(예)

강도 등으로 평가될 수 있다. 즉, 선체의 손상으로 인한 위험 화물의 유출 확률을 최소화하여야 하고, 충돌 후에도 더 이상의 손상의 진전없이 일정 수준의 정상 작업이 가능하도록 선체 강도 및 기능성을 유지하여야 한다.

구체적으로 실제 FPSO 공사의 강도 평가 기준의 한 예를 들면, 선체 외판 및 프로텍터는 일부 소성 변형에 의한 에너지 흡수는 허용되지만, 선체 외판 및 화물창의 파손은 허용되지 않는다. 프로텍터에 의해 보호되는 부가물은 충돌 후에도 프로텍터와 일정 거리를 유지하여야 하며, 프로텍터와 연결되는 선체 외판 및 내부 보강 부위의 파손을 방지하여 충돌 후 손상된 프로텍터만 교체가 가능하도록 하여야 한다.

충돌에 의한 구조적 안전성을 유지하기 위한 방안은 주로 설계 초기 단계에서 이루어진다. 즉, 충분한 충돌 안전성을 확보하기 위한 선체 이중격벽과 충돌격벽의 채택 및 그 깊이의 결정, 주요 구조 부재의 배치, 재질의 선택, 프로텍터 구조의 배치 및 형상의 결정 등이 대부분 기본 설계 단계에서 결정된다. 충돌 해석에 의해 성능이 만족되지 못할 경우에는 충돌 부위의 추가적인 보강 및 프로텍터 구조의 형상 변경 등이 이루어져야 하나, 이는 종종 주변 구조와의 간섭 등으로 인해 변경안의 형상이나 배치에 제약을 받는다. 그러므로 FPSO의 충돌해석은 가급적 설계 초기 단계에 구조해석과 병행하여 수행함으로써, 추후 설계 변경에 따른 영향을 최소화해야 하며, 이 단계에서의 충돌 해석은 단순공식 또는 단순이론해석법이 적절하다.

## 6. 낙하와 선회 충돌 (Dropped or Swung Object)

전반적인 평가과정은 5장의 충돌과 유사하므로 여기서는 간단히 언급하고자 한다. 단, 낙하와 선회에 의한 충돌은 크레인 등 운반수단으로 물체를 옮길 때 발생하므로 운반수단의 배치와 운반물 취급방법(Material handling philosophy)을 복합적으로 고려하여야 한다.

### 6.1 낙하/선회 시나리오, 충돌 에너지, 충돌 해석법

낙하와 선회에 의한 충돌은 LDA(Laydown Area) 부근에 설치된 주 크레인을 이용하여 컨테이너나 장비 등을 보급선에서 LDA로 운반할 때나, LDA에서 창고로 운반할 때, 그리고 헬리콥터 착륙장에서 LDA로 운반할 때 주로 발생한다. 또한, 호이스트, 트롤리, 모노레일, 지게차 등을 이용하여 소형 화물을 운반하거나 플레어 타워(Flare tower) 등

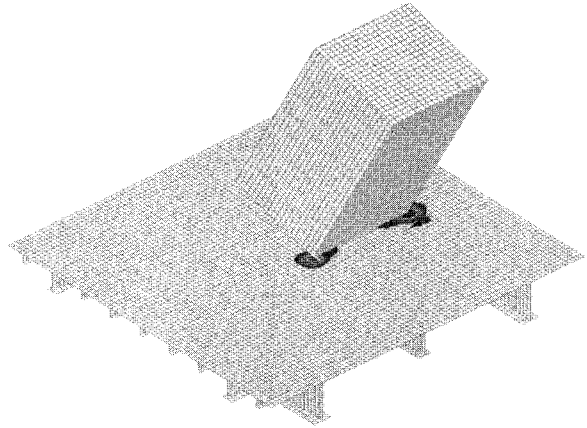


Fig. 8 비선형 유한요소해석에 의한 컨테이너의 낙하 충돌 시 소성변형률(예)

의 수리 중에도 발생한다.

낙하충돌에너지는 크레인에서 떨어는 물체의 자유낙하시 위치에너지로 계산하는데, 통상적인 설계 충돌에너지는 240~600kJ정도이다.

선회충돌이 발생할 수 있는 경우는 크레인으로 인양 후 회전이동 할 경우나, 물체를 수직으로 올리고 내릴 때 물체가 바람에 의해 좌우로 흔들리는 경우이다. 크레인의 회전 속도 및 바람의 속도를 고려하여 회전충돌에너지를 계산하며, 통상적인 설계 충돌에너지는 25~45kJ정도이다.

설계 충돌 에너지에 대해 비선형 구조해석을 수행하며 이에 대한 과정은 충돌 해석과 비슷하다. Fig. 8은 컨테이너가 LDA에 충돌하는 상황에 대한 해석 결과의 예이다.

### 5.2 안전도 평가 기준 및 영향

낙하와 선회 충돌에 의해 영향을 받는 LDA, 거주구 외판, 갑판 등이 붕괴 또는 관통되어서는 안 되며, 구조물의 변형으로 배관이나 케이블이 파단 되거나 중요 시스템의 가동이 멈추어서도 안 된다.

충돌 에너지가 적으므로 설계에 미치는 영향은 미미하다. 그러나 거주구의 경우는 주로 박판으로 구성되어 있으므로 설계 초기에 해석을 통한 강도 확인이 필요하다. 또한 선회충돌은 발생빈도가 높으므로 필요 시 크레인에 충돌 방지를 위한 센서류를 설치하여 빈도를 감소시킨다.

## 6. 결 론

폭발, 화재, 충돌, 낙하 등에 의한 사고는 설비 전체의 안전과 직결되므로 구조안전성 평가가 필수적이며 당사는 이에 대한 기술을 확보하고 관련 공사 수행에 적용하고 있다. 그



러나, 설계하중이나 안전도 평가의 구체적인 적용기준은 공사나 발주처에 따라 상당한 차이가 있으며, 공사 초기 이에 대한 잘못된 대응은 공사를 어렵게 할 가능성이 있다. 따라서, 설계하중 및 안전허용기준의 근거가 되는 위험도평가를 포함한 안전설계개념(Safety concept)의 전반적인 이해도를 높여 능동적인 대처가 필요하다.

### 참 고 문 헌

1. ISO 17776, "Petroleum and natural gas industries - Offshore production installations - Guidelines on tools and techniques for hazard identification and risk assessment", 2000.
2. ISO 19900, "Petroleum and natural gas industries - General requirements for offshore structures", 2002.
3. Oil & Gas UK, "Fire and Explosion Guidelines", Issue 1, 2007.
4. FABIG, "Interim Guidance Notes for the Design and Protection of Topside Structures against Explosion and Fire", the Steel Construction Institute, 1992.
5. John M. Biggs, "Introduction to Structural Dynamics", McGraw-Hill Book Company, 1982.
6. NORSOK Standard N-004, "Design of Steel Structures", Rev.2, Norwegian Technology Standards Institution, 2004.
7. ISSC Committee V.1, "Collision and Grounding", 16<sup>th</sup> International Ship and Offshore Structures Congress, 2006.
8. HSE OTO 053, "Collision Resistance of Ship-shaped Structures to Side Impact", Health & Safety Executive, 2000.
9. NORSOK Standard N-003, "Action and Action Effects", Rev.1, Norwegian Technology Standards Institution, 1999.
10. ISSC Committee V.3, "Collision and Grounding", 15<sup>th</sup> International Ship and Offshore Structures Congress, 2003. 