

폭발하중을 받는 보강판 구조물의 간이 해석법에 대한 실용성 검토

김을년^{1,†}·하심식²
현대중공업 선박연구소¹
현대중공업 해양플랜트사업부²

A Review on Practical Use of Simple Analysis Method based on SDOF Model for the Stiffened Plate Structures subjected to Blast Loads

Ul-Nyeon Kim^{1,†}·Simsik Ha²
Hyundai Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.¹
Offshore & Industrial Plant Engineering Business Unit, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.²

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The offshore installation units may be subjected to various accidental loads such as collision from supply vessels, impact from dropped objects, blast load from gas explosion and thermal load from fire. This paper deals with the design and strength evaluation method of the stiffened plate structures in response to a blast load caused by a gas explosion accident. It is a comprehensive review of various items used in actual project such as the size and type of the explosive loads, general design procedure/concept and analysis method. The structural analyses using simple analysis methods based on SDOF model and nonlinear finite element analysis are applied to the particular FPSO project. Also validation studies on the design guidance given by simple analysis method based on SDOF model have also considered several items such as backpressure effects, material behavior and duration time of the overpressure. A good correlation between the prediction made by simple analysis method based on SDOF model and nonlinear finite element analysis can be generally obtained up to the elastic limit.

Keywords : Blast accident(폭발 사고), SDOF(1자유도), Simple analysis method(간이 해석법), Nonlinear finite element analysis(비선형 유한요소 해석)

1. 서론

본 논문은 보강판 구조물이 가스 폭발사고로 충격하중을 받을 때 이에 대응한 설계와 강도 평가에 관한 것으로, 조선소에서 초기 설계에 사용하는 간이 해석법의 적용성에 대한 유효성 평가를 수행하였으며 비선형 동적 비선형 유한요소해석 결과와 비교하여 분석하였다.

해양구조물에 있어 가스폭발은 생산, 정제, 저장과정에서 누출된 기름이 가연성 가스와 산소가 혼합된 가스 구름이 인화 요인에 의하여 연소하면서 발열 반응과 함께 압력이 급격히 팽창하는 현상을 말한다. 폭발해석은 상부모듈의 구조부재, 방화/방폭 격벽, 선체 상갑판, 거주구(living quarter) 외벽, 배관, 주요장비

및 그 지지구조에 주로 수행하며 항복강도, 좌굴강도, 최대 변위, 파손 변형률, 구조물 붕괴 등의 측면에서 구조물 안전도를 평가한다.

폭발 충격하중을 받는 구조물에 대한 연구로, Kim et. al (2011)은 파형형상의 방폭벽구조에 대하여 비선형 유한요소 해석을 수행하여 기존 시험결과와 비교하였으며 파형단면 형상을 변경하는 연구를 통하여 충격응답특성 설계 인자 영향을 분석하였다. 또한 Kim et. al (2014)는 파형 방폭벽에 대하여 중앙부에 보강판을 부착하여 좌굴이 발생하는 것을 방지하거나 충격흡수를 통하여 좌굴 발생을 지연시키는 연구를 비선형 유한요소법을 사용하여 수행하였다.

폭발에 의한 구조적 안전성을 유지하기 위한 방안은 직접적으

로 폭발하중을 낮추거나 취약한 구조부재의 추가 보강안을 마련하는 것이다. 폭발하중을 낮추는 것은 대부분 설계 초기 단계에서 용이하다. 즉, 밀폐도나 밀집도를 낮추고 통풍성을 높여 가연성 가스구름의 크기를 줄이기 위한 공정설비 배치의 최적화나 구조부재, 방화/방폭벽의 크기와 위치 변경은 상세설계 단계에서 매우 힘들다. 구조부재의 추가 보강 또한 주변 구조와의 간섭 등으로 인하여 변경 안의 형상이나 배치에 제약을 받는다. 즉, 정확한 폭발하중이 산정되는 시기는 밀집도나 밀폐도를 정확히 묘사할 수 있는 상세설계 단계이지만, 폭발하중을 고려한 주요 구조부재의 설계는 미리 이루어져야 한다.

조선소에서 겪는 어려움으로, 기본설계 단계에서 폭발하중에 의한 영향을 설계에 반영하기 위하여 동적 비선형 해석을 수행하려면 소요되는 비용과 시간 문제로 이론적 설계식 또는 간이 해석법에 의한 설계의 필요성이 제기되고 있다.

따라서 폭발해석은 가급적 설계 초기단계에서 구조강도 평가와 병행하여 수행함으로써 추후 설계변경에 따른 영향을 최소화해야 하며 이 단계에서의 해석 및 평가는 경험적/현상학적 해석 모델과 함께 SDOF(Single Degree of Freedom) 모델에 기반한 간이 해석법을 사용하는 것이 바람직하다는 것으로 알려져 있다.

복잡한 해양 구조물에 간이 해석법을 적용하려면 먼저 유효성에 대한 검증이 필요하며 실제 해양구조물의 설계에 있어 사용하고 있는 폭발 하중이 다른 설계 하중에 의한 설계 결과에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 사전 검토도 필요하다.

본 연구에서는 간이 해석법을 도입하여 설계 인자들의 영향을 조사하고 그 결과를 동적 비선형 유한요소 해석 결과와 비교/검토하였다.

2. 설계 고려 사항

2.1 폭발하중에 대응한 구조 설계 요구사항

상갑판에 설치된 구조물의 지지구조, 거주구의 격벽 등의 근처는 폭발하중으로부터 인명과 장비 등을 보호하기 위하여 일반적으로 다음과 같은 사항들을 고려한 설계를 수행하고 있다.

- 소성변형의 효과가 허용기준을 만족하지 못하면 구조물에서의 응력은 폭발 저항과 연계된 동적 항복을 넘지 말아야 한다. 통상, 동적 항복강도는 정적 항복강도의 10%를 넘지 않게 선정하고 있다.
- 구조물의 변형은 장비를 안전하게 운용할 수 있는 임계치를 넘지 말아야 하고 좌굴강도 또는 최종강도에 도달하지 않아야 한다.
- 화재 등의 사고시 사용하는 임시 대피처, 대피로, 구명정으로의 이동처로 제공되는 곳의 어떤 부분도 붕괴가 되지 않아야 한다.
- 화재/폭발 강화격벽과 이를 지지하는 구조는 폭발사고에서 안전을 유지할 수 있어야 한다.
- 폭발사고 시 탄성 해석 결과가 허용응력을 만족하지 못하면 탄-소성 비선형 해석으로 구조강도가 안전한 수준이다라는 것을 보여야 한다.

2.2 폭발 시나리오

폭발 시나리오의 작성은 HAZOP(hazard and operability) 등의 위험도 분석을 통해 이루어지며 폭발이 발생할 가능성이 있는 공정 단위의 영역 정의 및 그 안의 가스/기름의 종류와 부피, 누출 속도 및 방향, 풍속, 발화 요인의 종류 및 위치를 고려하여야 한다.

폭발하중의 계산은 폭발시의 유체 동역학적 현상을 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 이용하여 수치해석으로 직접 계산하는 방법이 시간은 많이 소요되지만 가장 정확도가 높고 다양한 폭발 시나리오의 묘사도 가능하다. 일반적으로 설계 초기 단계에서는 과거 사고 경험이나 시험자료에 근거한 경험론적 방법 또는 현상학적 방법이 많이 이용된다.

2.3 설계 폭발하중 형태

FPSO와 같은 부유식 해양구조물에 있어 폭발은 일반적으로 3가지 종류로 크게 나눈다.

- 외부폭발(external explosion): Fig. 1의 거주구역(Living Quarter, LQ) 전면부 또는 갑판(deck) 상부와 같이 밀폐되지 않아 환기가 가능한 개방된 장소에 설치된 공정모듈의 밸브 또는 파이프 플랜지의 연결부에서 가스가 누출되어 폭발하는 것을 말한다.
- 터널폭발(tunnel explosion): 누출된 가스가 선체갑판과 모듈 상갑판 사이에 누적되어 발생하는 것을 말한다.
- 내부폭발(internal explosion): 압력용기 또는 대피소의 내부, 화물창(tank)과 같이 밀폐된 공간에서 발생하는 폭발을 말한다.

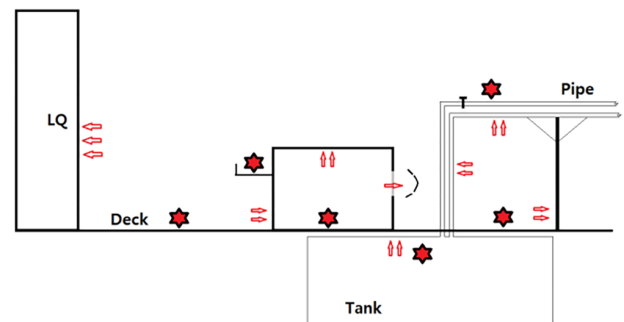


Fig. 1 Blast scheme on the offshore unit

폭발하중은 최대압력(peak pressure, P_{max}), 지속시간(duration time, t_d), 증가시간(rising time, t_r)의 동적하중 특성치로 표현되고 폭발하중에 의한 구조물의 응답은 폭발지속 시간과 구조물의 고유 진동주기(T)의 비에 따라 충격(impulsive), 동적(dynamic), 준정적(quasi-static)으로 나눌 수 있다.

폭발하중은 일반적으로 시간에 따라 복잡한 변화를 보이며 다양한 주파수의 진동이 수반된다. 폭발압력과 시간과의 관계는 구조물 응답 해석에서 실제 모습을 이상화하여 구현한다. 실용적

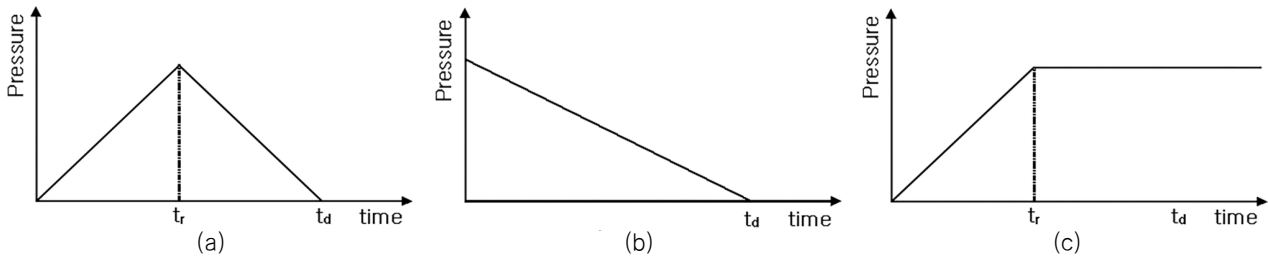


Fig. 2 Typical responses of one degree elastic systems

측면에서 구조물에 폭발압력이 전달되는 방식을 시간영역에서 이상화하여 나타내며 다음과 같이 나눌 수 있다.

- 과압(overpressure) : Fig. 2(a)와 같이 연소가스의 팽창으로 인한 급격한 국부압력 증가와 함께 과압지속 시간이 한정되어 있어 급격하게 줄어드는 형태로 격벽, 갑판, 거주구벽 등에 작용하는 형태로 이등변 삼각형(isosceles triangle) 있으며 Fig. 2(c)는 과압의 지속시간이 무한대인 경우로 밀폐된 좁은 공간에서 폭발 사고 발생 시 지속적으로 압력이 유지되는 경우이다.
- 항력(drag load) : Fig. 2(b)와 같이 폭발가스의 유동(blast wave)에 의한 하중으로 배관과 같은 작고 긴 물체에 작용할 때 하중은 직각 삼각형(right angled triangle) 형태이다.

이 많이 걸리지만 물리현상을 잘 표현하며 보다 정확한 값을 준다. 근래에는 폭발하중을 대부분 CFD 방법으로 계산하며, 하중 계산의 전 단계로 가스의 누적 정도를 파악하기 위해 통풍해석(ventilation analysis)과 분산해석(dispersion analysis)을 수행하게 된다. 이들 해석 수행 시 구조부재뿐만 아니라, 장비, 배관 등을 해석 모델에 포함하여 설비의 밀집도를 정확히 구현하여야 한다.

통상적으로, 생산모듈이나 선체갑판의 경우 최대압력은 1 barg 전후, 지속시간은 0.1~0.3초 정도이며 설계 환경하중(Environmental loads)을 동시에 적용 하지는 않는다.

폭발하중은 주로 탄화수소 가스(hydrocarbon gas)를 주로 다루며 과압과 지속시간이 주요 요소이다. Table 1은 DNVGL (2019b)에서 설치 위치에 따른 폭발 압력을 나타낸 것이다.

2.4 설계 폭발하중 크기

폭발하중은 경험식, 현상학적 방법(phenomena-logical model), CFD 방법으로 구할 수 있다. 경험식은 폭발실험 자료를 기초로 가스를 등가의 TNT(trinitrotoluene)로 치환하여 적용하며 설계 초기 근사적인 최대압력을 구하는데 사용한다. 현상학적 방법은 경험식보다 물리적 현상을 잘 나타내며, 합리적인 근사값을 주는 것으로 알려져 있다. 따라서, 계산 시간이 많이 소요되는 CFD 해석에 앞서 적용하는 경향이 있다.

CFD방법은 폭발과정을 지배하는 미분방정식을 수치해석으로 푸는 것이다. 시간과 공간영역에서 해석을 수행하므로 계산 시간

3. 구조 강도 평가

3.1 해석 수행 방법

해양구조물에 대한 폭발해석은 생산모듈, 격벽, 선체갑판, 거주구 외벽, 주요 장비 등을 대상으로 수행하며 응력, 좌굴, 변위, 가속도 측면에서 구조적 안전도를 평가한다.

강도평가를 위한 구조해석은 다음 3 가지 과정으로 수행한다.

- 선별검사(screening analysis) : 보수적 관점으로 초기 구조 부재의 치수를 결정할 때 수행한다.
- 강도수준 해석(Strength Level Analysis, SLA) : 폭발하중

Table 1 Design overpressure and duration time for the offshore installation (DNVGL, 2019b)

Offshore installation	Area	Over-pressure (barg)	Duration (s)
Drilling rig	- Drill floor with cladded walls	0.12	0.2
Drilling rig	- Shale shaker room with strong walls, medium sized	2	0.3
Mono-hull FPSO	- Process area, small	0.3	0.2
Mono-hull FPSO	- Process area, medium sized with no walls or roof	1	0.2
Mono-hull FPSO, large	- Process area, large with no walls or roof	2	0.2
Mono-hull FPSO	- Turret in hull, STL/STL room with access hatch	4	1
Production platform, semi-sub	- Process area, large with no or light walls, 3 storeys, grated mezzanine and upper decks	2	0.2
Production platform, fixed	- Process area, medium sized, solid upper and lower decks, 3 storeys, 1 or 2 sides open	1.5	0.2
Integrated Prod/Drilling	- Process area and drilling module each medium sized on partly solid decks, 3storeys, 3 sides open	1.5	0.2
Integrated Prod/Drilling	- X-mas tree/wellhead area, medium sized with grated floors	1	0.2

발생빈도는 높으나 낮은 중요도 이벤트의 경우로, 탄성한계 내에서 보다 작은 폭발 하중으로 항복강도로 평가함. 이를 만족하지 못하는 경우 연성수준 해석을 수행한다.

- 연성수준 해석(Ductility Level Analysis, DLA) : 폭발하중 발생빈도는 낮으나 그 중요도가 높은 이벤트의 경우로, 보다 큰 하중으로 점진적 소성붕괴를 고려한 극한해석을 수행하여 파단 변형률로 강도를 평가한다. 주로 임시 대피소, 대피로 루트, 소집 장소(muster area)에 대하여 해석을 수행하며 강도를 만족하지 못하는 경우, 폭발하중을 완화하는 조치나 구조적 보강을 수행한다.

Fig. 3은 API (2012)에서 제시하는 폭발하중에 대응한 선별검사, 강도수준 해석, 연성수준 해석에 대한 구조강도 평가의 절차를 나타낸 것이다.

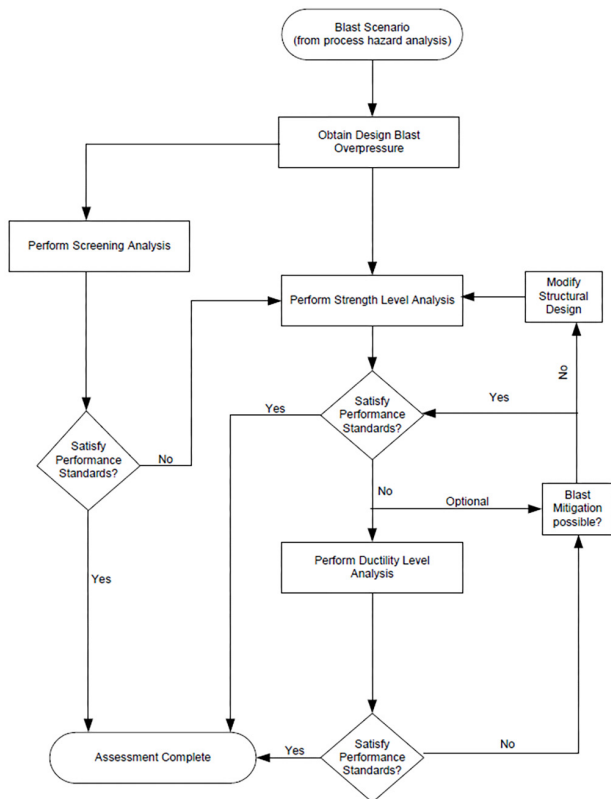


Fig. 3 Process of structural assessment against blast (API, 2012)

3.2 구조 강도 평가법

폭발하중에 의한 구조 부재의 손상 평가는 시험과 비선형 유한요소해석, 간이 해석법 등으로 수행할 수 있다.

본 연구에서는 간이 해석법으로 사용할 수 있는 간이 해석법과 비선형 유한요소 해석법(Non-Linear Finite Element Analysis Method, NLFEA)에 대하여 소개한다.

간이 해석법

간이 해석법은 국부부재에 대한 동적응답을 등가의 1자유도계

질량과 강성으로 모델링하여 (Fig. 4 참조) 평가한다. 이 방법은 비교적 간단한 수계산으로 합리적인 결과를 구할 수 있으며 탄성과 소성영역에 대하여 모두 적용 가능하다 (Biggs, 1982; Norsok Standard 2004). 따라서 개념설계 또는 초기설계 단계 그리고 간단한 구조물에 대한 강도평가를 수행할 때 많이 활용하고 있다.

만약 탄성한도를 벗어나 과도한 소성응답을 보일 경우, 최대 처짐과 탄성한계 처짐의 비(ductility ratio)로부터 파손여부를 평가할 수 있다.

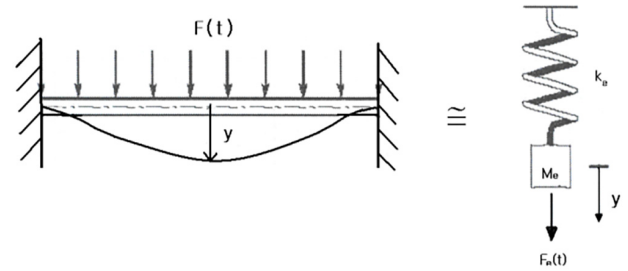


Fig. 4 Single degree of freedom approximation for simple beam

동적 설계압력($P_{dynamic}$)은 DAF(Dynamic Amplification Factor)를 도입하여 정적 설계압력(P_{static})과의 곱으로 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$P_{dynamic} = DAF \times P_{static} \quad (1)$$

DAF를 사용함으로써 단순히 정적 해석 또는 계산을 수행하고 폭발과 같은 동적 하중에 의한 구조물의 처짐과 응력을 구할 수 있다. 감쇠(damping)가 없고 탄성 시스템 내에서 Biggs (1982)가 제시한 DAF는 폭발압력과 하중이력이 Fig. 2(a)와 같은 경우에는 식 (2)와 같다.

$$DAF = 1 - \cos \omega t + \frac{\sin \omega t}{\omega t_d} - \frac{t}{t_d} \text{ for } t \leq t_d \quad (2)$$

$$= \frac{1}{\omega t_d} [\sin \omega t - \sin \omega(t - t_d)] - \cos \omega t \text{ for } t > t_d$$

Fig. 2(b)에 대한 DAF는 식 (3)과 같다.

$$DAF = \frac{2}{t_d} \left[t - \frac{\sin \omega t}{\omega} \right] \text{ for } 0 \leq t \leq \frac{1}{2} t_d \quad (3)$$

$$= \frac{2}{t_d} \left\{ t_d - t + \frac{1}{\omega} \left[2 \sin \omega \left(t - \frac{t_d}{2} \right) - \sin \omega t \right] \right\}$$

$$\text{for } \frac{1}{2} t_d \leq t \leq t_d$$

$$= \frac{2}{\omega t_d} \left\{ 2 \sin \omega \left(t - \frac{t_d}{2} \right) - \sin \omega t - \sin \omega(t - t_d) \right\}$$

$$\text{for } t \geq t_d$$

Fig. 2(c)에 대한 DAF는 식 (4)와 같다.

$$DAF = \frac{1}{t_r} \left[t - \frac{\sin \omega t}{\omega} \right] \text{ for } t \leq t_r$$

$$= 1 + \frac{1}{\omega t_r} \{ \sin \omega(t - t_r) - \sin \omega t \} \text{ for } t > t_r \quad (4)$$

여기서, ω 는 고유 진동수(natural frequency)이다.
 식 (2)~(4)로부터 Fig. 5과 같은 시간영역에서의 DAF 곡선을 구할 수 있다 (Sabatino et. al, 2018; Biggs, 1982). 3가지 형태의 폭발에 대하여 구조물의 고유 진동주기(T)와 폭발압의 지속시간(t_d) 비를 알면 손쉽게 DAF를 구할 수 있다. 따라서 통상 조선소에서 사용하는 보강판의 고유 주파수가 10Hz 내외 임으로 폭발압의 지속시간이 50~200ms 범위일 때 이등변 삼각형 형태 (Fig. 2(a))의 과압이 작용하는 경우 최대 DAF는 1.5이고 직각삼각형 형태의 항력 (Fig. 2(b))과 과압의 지속시간이 무한대인 경우 (Fig. 2(c))는 최대값이 1.8값을 넘지 않는다.

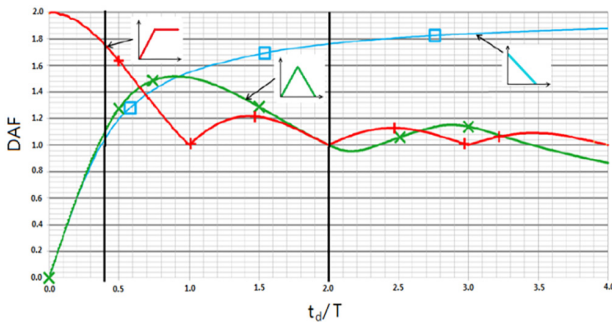


Fig. 5 Dynamic Amplification Factor (Sabatino et. al, 2018; Biggs, 1982)

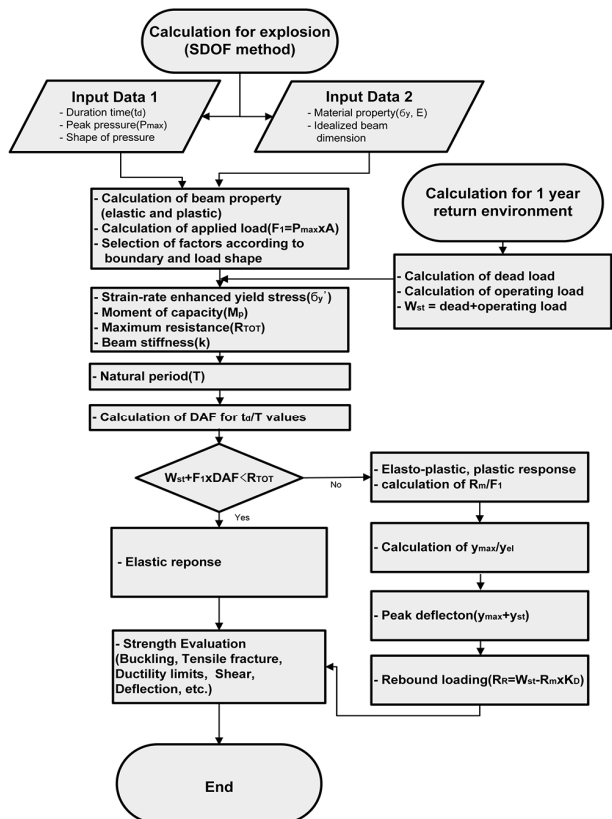


Fig. 6 Flow chart for blast analysis using by SDOF

Fig. 6은 FABIG (1996)에서 제시한 간이 해석법에 의한 폭발 해석 순서도를 나타낸 것으로 구조 응답 해석은 다음의 단계로 수행한다.

- 폭발하중의 크기(P_{max})와 형상, 지속시간(t_d), 발생시간(t_r) 등을 결정하고 보강판(stiffened panel)을 보(beam)로의 이상화하고 재료적 특성치인 인장강도(σ_u), 항복응력(σ_y), 영계수(E) 등을 입력한다.
- 보에 작용하는 전체하중(F_1)을 계산하고 양단 구속조건과 재료의 응력-변형을 곡선($\sigma - \epsilon$ curve)을 결정한다.
- 필요에 따라 폭발하중 외에 환경하중과 지중 등을 설계하중에 포함시킨다.
- 탄성 또는 소성 굽힘모멘트와 구조물의 저항 능력(resistance capacity)을 계산한다.
- 구조물의 스프링 상수(k)와 구조물의 고유주기(T)을 계산한다.
- Fig. 5 또는 식 (2)~(4)로 폭발하중 지속시간과 고유주기의 비로부터 DAF를 구한다.
- 정적/동적 외력하중과 구조물의 저항 능력을 비교하여 탄성 또는 소성강도 평가를 할 것인지 결정한다.
- 처짐, 항복, 좌굴, 전단/인장/압축 파괴 등의 기준으로 구조물의 강도를 평가한다.

비선형 유한요소해석법 (NLFEA법)

비선형 유한요소해석은 기하학적 형상을 잘 묘사하고 재료의 동적 비선형성을 구현할 수 있으며 구조응답을 시간영역에서 구할 수 있어 구조물이 복잡할 경우에도 신뢰도가 높은 결과를 준다. 상용 소프트웨어로는 LSTC (2012)의 LS-DYNA, Simulia (2014)의 ABAQUS 등이 있으며 간이 해석법보다 과정이 복잡하고 시간이 많이 소요되는 단점이 있으나 전산환경의 급속한 발달로 해양구조물의 설계에 보편화되고 있다.

해석 대상 모델의 세밀한 표현이 가능하여 소성역의 개시나 전개 및 파손 모드, 변형 형상, 잔류강도, 구조물의 붕괴에 대한 안전계수 등을 좀더 명확히 표현할 수 있어 해의 정확도를 높일 수 있다. NLFEA법은 상세설계 단계 또는 간이 해석법의 보완 설계도로 사용하고 있다.

3.3 안전도 평가기준

폭발사고에 대한 주요 성능기준 또는 안전 허용 기준은 사고 후 적어도 하나의 대피로 또는 임시대피소가 이용 가능하여야 하고 안전 구역으로 대피할 때까지의 시간이 확보되어야 한다. 폭발사고 발생 시 주요 안전 시설들은 그 기능을 유지하고 있어야 하며 구조부재의 소성변형은 허용하나 구조물의 완전 붕괴는 일어나지 않아야 한다.

폭발에 의한 구조적 안전성을 유지하기 위한 방안은 직접적으로 폭발하중을 낮추거나 취약한 구조부재의 추가 보강안을 마련하는 것이다. 이 중에서 폭발하중을 낮추는 방안들은 대부분 설계 초기 단계에서나 적용이 용이하다. 일반적으로 폭발해석에서는 구조부재가 붕

과하지 않으면 국부적 영구 변형을 허용한다. 강도평가는 변형도, 좌굴강도, 용접부의 전단에 대한 저항 등을 기준으로 수행한다.

BV (2019)는 해석 결과물로서 등가의 TNT양, 하중이력, 유한 요소 모델과 경계조건, 구조 응답, 설비의 작동이 가능한 최대압력 등의 제출을 요구하고 있다. 이에 따르면 탄소성 해석에 의한 변형을 평가기준은 식 (5)와 같다.

$$\epsilon_M \leq 0.8\epsilon_{ult} \quad (5)$$

여기서, ϵ_M 은 구조해석에서 나타난 요소의 최대 변형률(maximum element strain)이고 ϵ_{ult} 는 파단 변형률(material rupture strain)이다.

DNVGL (2019a)과 API (2012)에서는 각각 연성비(ductility Ratio)로 유사한 강도평가 기준을 제시하고 있다. 여기서 연성비는 충격하중으로 발생한 실제의 최대 처짐과 탄성한계에서의 처짐 비이다. Table 2는 DNVGL (2019a)에서 제시하는 연성비에 의한 파손 판단 기준 값을 나타낸 것이다.

Table 2 Ductility ratio limit for beams with no axial restraint (DNVGL, 2019a)

Boundary conditions	Load	Cross-section type		
		Type I	Type II	Type III
Cantilevered	Concentrated	6	4	2
	Distributed	7	5	2
Pinned	Concentrated	6	4	2
	Distributed	12	8	3
Fixed	Concentrated	6	4	2
	Distributed	4	3	2

where,

Type I : cross sections that can form a plastic hinge with the rotation capacity required for plastic analysis

Type II : cross sections that can develop their plastic moment resistance, but have limited rotation capacity

Type III : cross sections where the calculated stress in the extreme compression fibre of the steel member can reach its yield strength, but local buckling is liable to prevent development of the plastic moment resistance

3.4 폭발압력에 대응한 기존설계 결과 검토

FPSO와 같은 해양구조물의 구조부재는 100년 주기의 파랑하중을 고려하여 최종 한계상태(Ultimate Limit State, ULS) 설계를 수행한다. 만약 이들 부재들이 사고 한계상태(Accidental Limit State, ALS) 설계의 일종인 폭발에 의한 안전도 평가기준을 만족하지 못하면 구조부재의 치수 재선정이 필요하고, 상황에 따라서는 방폭 격벽을 추가적 설치하거나, 보다 강화된 폭발감지 장치 등을 설치하여야 한다.

기존 현대중공업에서 수행한 6개의 공사들에 대하여 폭발해석

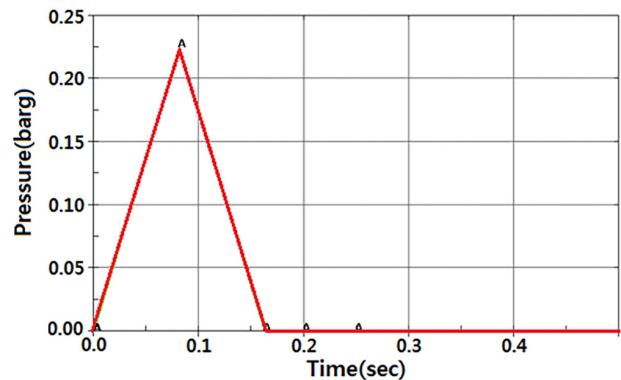
결과를 조사한 결과, 사고 한계상태인 폭발해석이 최종 한계상태 설계로 결정한 부재 치수에 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 이에 대한 원인 규명을 위하여 이론적 연구와 함께 비선형 유한요소해석을 병행한 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

Kim & Kim (2019)에 따르면 연강과 고탄복강의 변형률 에너지 밀도는 차이가 거의 없다. 따라서 DNVGL (2019a)에서 제시하는 손상 변형률(failure strain)을 기준으로 DLA의 강도 평가를 하는 경우, 고탄복강의 사용은 구조물의 강도 증가에 효과가 거의 없다고 사료된다. 그러나 처짐에 대한 제한치가 있는 경우, 연강이 상대적으로 큰 처짐이 발생할 수 있어 불리할 것으로 예상된다.

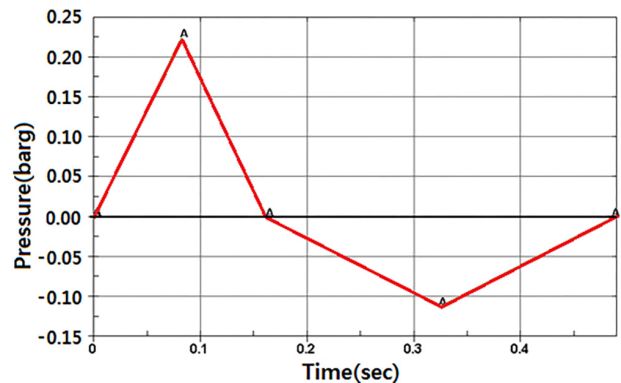
4. 간이 해석법의 적용성 검토

4.1 Backpressure 효과 검토

SDOF방법은 배압(backpressure)을 고려하지 않고 수행하고 있어 실제공사에서 적용시, 배압의 영향을 조사하고자 Fig. 7의 충격하중 시간이력에 대하여 Fig. 8에 나타낸 대상 거주구 전면 벽에 대하여 LS-DYNA 상용 소프트웨어를 이용하여 폭발하중을 작용하며 비선형 유한요소 해석을 수행하였다.



(a) w/o backpressure



(b) w/ backpressure

Fig. 7 Overpressure shape considering backpressure

거주구의 전면벽에 과압 0.225 barg를 지속시간 162ms 주었

을 때와 동일 조건에서 추가로 배압 -0.113 barg를 324ms동안 주었을 때에 대하여 검토하였다.

Fig. 9는 거주구 전면 벽에 폭발하중을 작용시킨 면적과 1년 주기 환경하중에 기인한 선각 굽힘 모멘트를 작용하기 위하여 강체 보조소(rigid beam element)인 RBE2를 사용한 것을 나타낸 것이다.

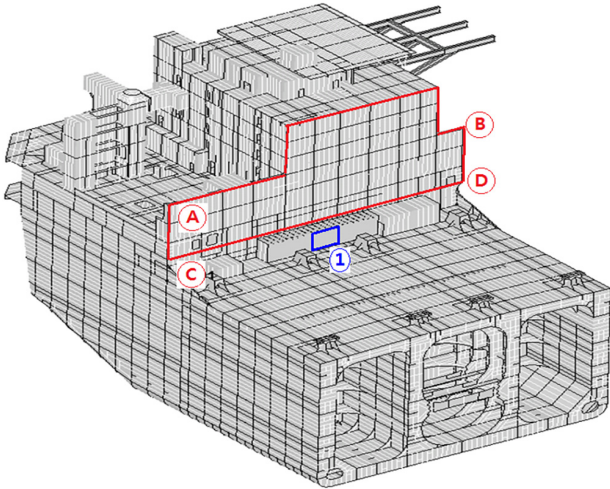
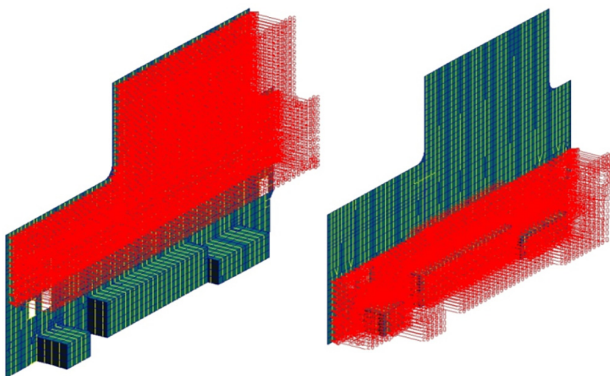
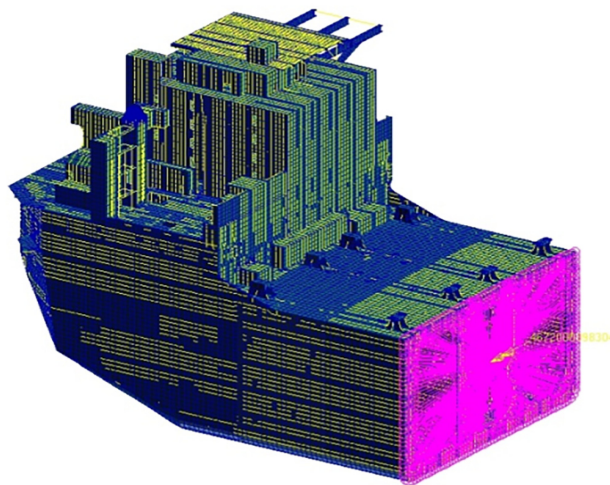


Fig. 8 FEA model considering the backpressure effects



(a) blast pressure of front wall



(b) hull girder bending moment due to 1-year return period environment

Fig. 9 Loading and boundary condition

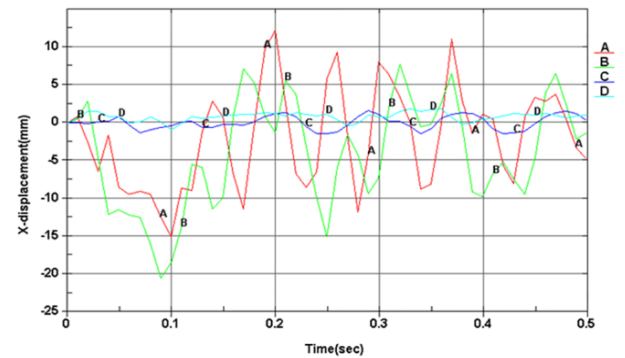
Table 3은 NLFEA에서 고려한 판과 보강재의 치수와 재료 특성치 그리고 폭발하중의 크기를 나타낸 것이다.

Fig. 10은 판요소로 모델링한 3차원 구조해석 모델에 대하여 NLFEA로 나타난 Fig. 8의 각 지점(A, B, C, D)에서의 변위를 나타낸 것이다. 각 지점에서의 처짐이 배압의 유무에 관계없이 거의 유사한 패턴으로 나타나는 것을 알 수 있다.

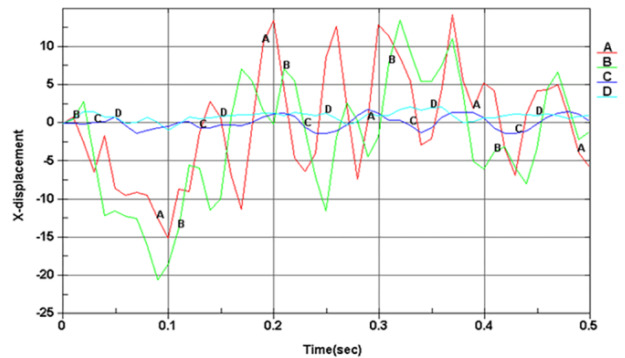
Table 4는 해석결과 나타난 최대 변위를 요약한 것으로 배압에 의한 처짐 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.

Table 3 NLFEA data for backpressure effects

Dimension and Material Property	Frame space(mm)	4500
	Longi. space(mm)	900
	Plate thickness(mm)	12
	Stiffeners(mm)	150x90x12(UA)
	Yield stress(MPa)	235
Loading	Peak pressure, P_{max} (barg)	0.225
	Back pressure, P_{back} (barg)	-0.113
	Duration time, t_d (sec)	0.162 or 0.486



(a) w/o backpressure



(b) w/ backpressure

Fig. 10 Comparison of displacement in time domain

Table 4 Comparison of backpressure effects

Backpressure	Max. displacement		Min. displacement	
	Disp. (mm)	Time (sec)	Disp. (mm)	Time (sec)
w/o	+20.5*	0.09	-12.3	0.2
w/	+20.5	0.09	-14.3	0.2

*): + : If displacement is in the same direction as the explosion pressure, it is expressed as a positive value.

4.2 NLFEA와 간이 해석 결과 비교 예

4.1절의 Fig. 8의 ①영역의 LQ front wall에 대하여 FEA해석과 간이 해석법에 의한 결과를 비교한 것이다. Table 5에 나타낸 바와 같이 FEA에 의한 동적거동 값과 정적해석 결과는 거의 동일한 결과를 나타낸다. 또한 SDOF법은 양단지지 지지조건과 고정조건의 평균값이 동적 과도 응답해석 결과와 5% 이내의 차이로 잘 일치하였다.

Table 5 Comparison of the FEA and SDOF under overpressure 2barg (unit : mm)

Analysis types		FEA			SDOF	
		Static		Dynamic transient	Fixed ends	Simple ends
		Linear	Non-linear			
Duration time	90ms	12.08	12.10	11.12	3.56	18.69
	180ms	12.08	12.10	10.36	3.55	18.17

또한 폭발압 지속시간의 변화에 따른 응력과 변위값을 Table 6에 비교하였다. 지속시간을 줄이면 약간의 증감이 나타나지만 그 차이는 크지 않다.

Table 6 Comparison of static and dynamic transient FEA analysis according to the change of duration time under overpressure 2barg

Analysis types	Static		Dynamic transient			
	Linear	Non-linear	Duration time(ms)			
			180	90	40	30
Stress (MPa)	46.11	46.20	53.85	55.50	53.38	59.00
Displacement (mm)	12.08	12.10	10.36	11.12	9.89	12.05

4.3 충격하중 크기와 간이 해석과 NLFEA의 결과 비교

Table 7은 충격하중의 크기를 SLA와 DLA 수준에서 SDOF와 NLFEA 결과를 비교하기 위하여 모델의 치수와 재료 물성치, 경계조건 그리고 충격하중 값 등을 나타낸 것이다. 폭발하중 형태는 삼각형파로 구조물이 탄성과 소성영역에서 변형과 응답을 계산하기 위해 4 가지 크기의 하중을 고려하였다.

유한요소해석을 이용하여 경계조건의 유효성을 검토하기 위하여 고유치 해석(eigenvalue analysis)을 수행하였다. Table 8에 나타낸 바와 같이 이론적인 결과와 유한요소해석에 의한 고유주파수 값은 서로 유사한 값을 나타내었다. 실제 경계조건인 Real의 경우, 일반 보강재로 지지한 경우, 단순지지 조건에 근접함을 알 수 있다. 그러나 격벽 또는 웨브에 의해 지지되는 구조는 고정지지 조건에 보다 근접한 값을 나타내었다.

Table 7 NLFEA data for peak pressure effects

Dimension and material property	Frame space(mm)	5,000			
	Longi. space(mm)	900			
	Plate thickness(mm)	12			
	Stiffeners(mm)	200x8+150x12(T)			
	Yield stress(MPa)	315			
Boundary condition		Fixed ends			
Loading	Peak pressure, P_{max} (barg)	0.8	3.3	3.8	4.8
	Duration time, t_d (sec) Impulse rise time, t_r (sec)	$t_d = 0.12, t_r = 0.06$			

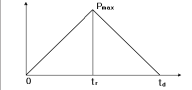


Table 8 Comparison of natural frequency under different boundaries

Boundary	Natural frequency(Hz)		
	Theory	FEA	
		Beam model	Plate model
Fixed	68.18	64.6	64.5
Simple support	30.30	30.2	30.3
Real	-	48.1 for strong support 28.8 for soft support	-

Biggs (1982)에 의한 이론을 사용한 간이 해석법의 정확도를 검증하기 위하여 비선형 유한요소 해석결과와 비교하였다. Fig. 11은 지속시간의 2배 동안의 시간영역에서 동적 거동을 나타낸 것이다. 이에 따르면 탄성거동(elastic behavior)을 보이는 SLA에서는 NLFEA법과 간이 해석법은 충분히 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나 탄소성 거동 또는 소성거동을 보이는 DLA조건에서는 간이 해석법이 NLFEA보다 작은 변위 값을 보임으로 이에 대한 보완이 필요하다. 그러나 해양구조물의 초기 설계 시 SLA에서 사용하기에는 충분한 정확도를 갖는 것으로 사료된다.

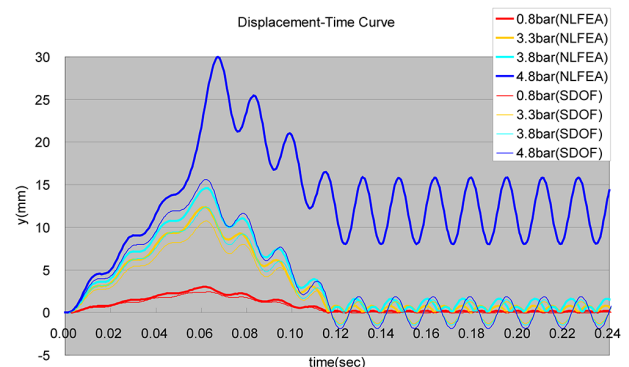


Fig. 11 Comparison of the NLFEA and SDOF

Table 9는 SDOF와 NLFEA 해석으로부터 나타난 변위값을 비교한 것이다. 단, (*)의 값인 수계산은 Fig. 13의 이론으로 식 (6)을 사용하여 계산한 이론적 값이다. 간이 해석법에 의한 결과는 구조물이 소성을 일으킨 후에도 비선형성을 고려하기 어려워 최

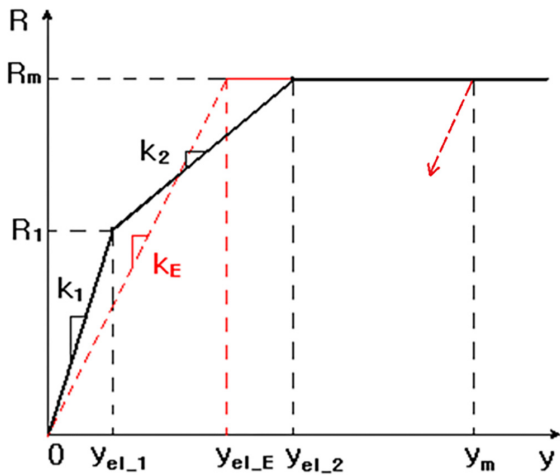
대압력의 크기와 거의 비례하는 수준으로 변형량의 변화가 예측되었으나 NLFEA 결과는 소성변형을 동반한 대변형의 효과를 고려할 수 있어 처짐량이 급격히 증가하는 결과를 나타낸 것으로 추정된다.

Fig. 12는 강도(R)-변위(y)사이의 관계로 강성(k)를 나타낸 것으로 구조물의 소성거동을 수식화하기 위하여 실용적으로 나타낸 것이다. 균일분포하중을 받는 양단고정의 보에 처짐이 3단계로 된다. 첫번째는 구조물이 탄성상태이고 두번째는 지지점에서 소성힌지가 발생하여 탄-소성상태, 마지막 단계는 완전소성상태이다.

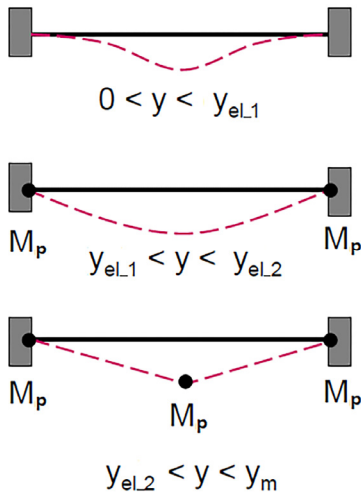
$$y_{el_1} = \frac{F_1}{k_1} \quad \text{for fully plastic condition} \quad (6)$$

$$y_{el_2} = \frac{F - R_1}{k_2} + y_{el_1} \quad \text{for elasto-plastic condition}$$

$$y_{el} = \frac{F}{k_E} \quad \text{for elastic condition}$$



(a) displacement-resistance curves



(b) displacement and collapse mechanism

Fig. 12 Effective bi-linear resistance function

Table 9 Comparison of the Simple method and NLFEA results according to increasing of overpressure

	Displacement(mm)			
	Elastic	Elasto-plastic		Plastic
Impact	0.8barg	3.3barg	3.8barg	4.8barg
Simple method	2.41 (2.44)*	10.74 (12.57)	12.37 (14.48)	15.63 (17.68)
NLFEA	3.00 (2.44)	12.40 (11.40)	14.60 (19.02)	29.90 (34.25)

*() : Hand calculation results obtained from Eq. (6)

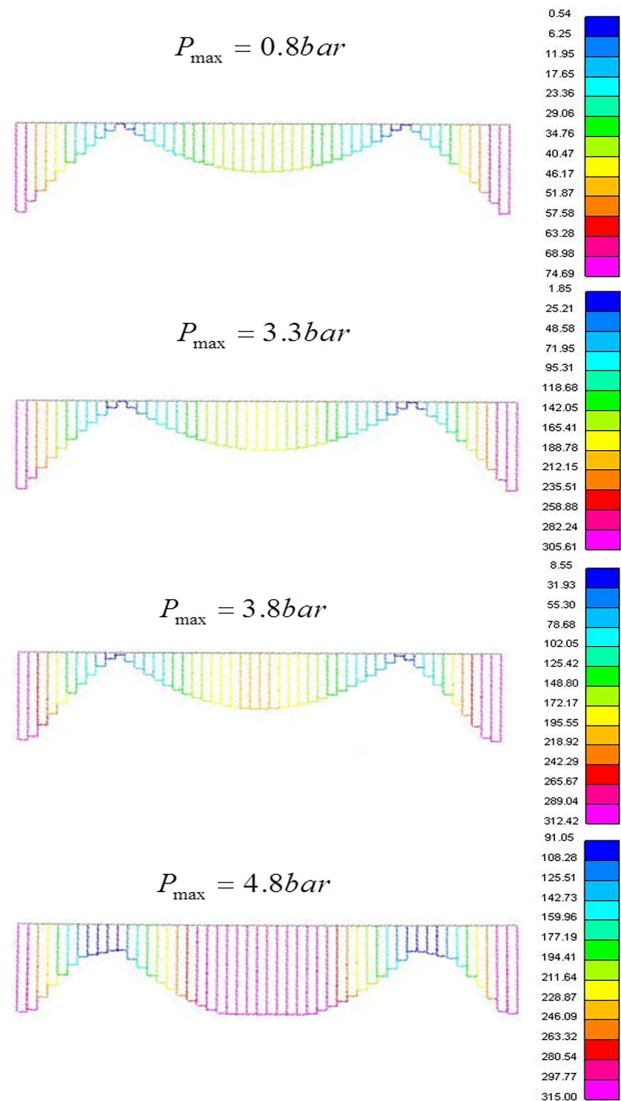


Fig. 13 Axial stress distribution for each loading condition (MPa)

Fig.13은 NLFEA에 의한 각 하중조건에서 양단고정보의 축응력을 나타낸 것이다. 이에 따르면 0.8 barg와 3.3barg에서는 탄성영역으로 나타났다. 3.8barg가 작용할 경우, 탄소성영역이 공존하며 양쪽 끝단에서는 소성힌지(plastic hinge)가 발생하였음을 알 수 있다. 또한 4.8barg가 작용할 경우, 양쪽 끝단과 중앙부에서 항복응력을 초과한 소성힌지가 발생하여 붕괴가 될 수 있다는 것을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 초기 설계에 필요한 간이 해석법을 적용하고 그 결과를 유한요소해석과 비교하였다. 또한 폭발 압력의 지속시간 변화와 폭발압력의 크기에 따른 재료의 거동에 대하여 해석을 수행하고 비교하였다.

이를 바탕으로 다음과 같은 결론을 내었다.

- 기존 현대중공업에서 수행한 공사들에 대하여 사고관계상태의 폭발해석 결과는 최종관계상태로 설계한 부재 치수에 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 즉, 폭발 설계하중은 최종 관계 설계하중보다 훨씬 크지만 이의 강도 평가 기준이 완전 소성설계로 되어 있어 나타나는 현상으로 추정 된다.
- 스크린 해석과 간이 해석법으로 SLA를 수행하고 이를 만족하지 못할 경우에만 NLFEA를 이용한 DLA를 수행하면 설계에 소요되는 시간과 비용을 절감할 수 있을 것이다.
- 연강과 고탄복강의 에너지 흡수율은 차이가 거의 없다. 따라서 DNVGL (2019a)에서 제시하는 손상 변형률(failure strain)을 기준으로 DLA 강도 평가를 하는 경우, 고탄복강의 사용은 구조물의 강도 증가에 효과가 거의 없다고 사료된다. 그러나 처짐에 대한 제한치가 있는 경우, 연강이 상대적으로 큰 처짐이 발생할 수 있어 불리할 것으로 예상된다.
- 배압에 의한 효과를 분석하기 위하여 해양구조물의 거주구 전면벽에 NLFEA를 적용하여 해석을 수행하였으며 그 결과로 나타난 처짐은 배압 적용 유무에 크게 영향을 받지 않은 것으로 나타났다.
- 또한 간이 해석법의 적용성을 검토하기 위하여 폭발압력의 크기와 지속시간 등을 변화시키면서 NLFEA와 비교하였다. 이에 따르면 간이 해석법은 비교적 NLFEA와 잘 일치하고 있으나 소성변형이 발생하는 큰 폭발압력일 경우 차이를 나타내었다.
- Biggs (1982)의 간이 해석법은 보강 판구조를 1차원 보구조로 생각하여 계산함으로써 판의 폭방향의 강성을 고려하지 않아 실제 보강판 구조보다 크게 안전측에서 평가하는 경향이 나타난다. 따라서 2차원 보강판 구조에 대한 처짐이론을 적용하여 판의 폭방향 면내강성을 고려하여 계산하는 추가 연구 수행이 필요하다고 사료된다.
- 또한 폭발에 의하여 얇은 판부재의 찢어짐, 보강재의 굽힘에 의한 붕괴, 연결부의 손상, 보강판의 붕괴, 구조물 전체의 붕괴를 각 붕괴형태별 구조부재 손상 기준을 설립하고 하중에 대응한 구조물 응답을 탄성, 탄성-소성, 소성상태로 나누어 수행하는 방법 등 추가적인 이론적 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

- American Petroleum Institute(API), 2012. *Recommended Practice for the Design of Offshore Facilities against Fire and Blast Loading*. API-RP-2FB, USA, Washington:API.
- Biggs, John M., 1982. *Introduction to structural dynamics*. McGraw-Hill Book Company.

- Bureau Veritas(BV), 2019. *Rules for the classification of offshore units, Rule Note NR 445.B2 DT R05E, Pt. B, Ch.3, Sec 9*.
- DNVGL, 2019a. *Structural design against accidental loads, recommended practice, DNVGL-RP-C204*. [Online] (Update September 2019) Available at : <http://www.dnvgl.com/> [Accessed November 2019].
- DNVGL, 2019b. *Safety principles and arrangements, offshore standard, DNVGL-OS-A101*. [Online] (Update July 2019) Available at : <http://www.dnvgl.com/> [Accessed November 2019].
- Fire and Blast Information Group(FABIG), 1996. *Technical note and worked examples to supplement the interim guidance notes for the design and protection of topside structures against explosion and fire, explosion resistant design of offshore structures-technical note 4*. United Kingdom Berkshire:FABIG.
- Kim, B.J., et al., 2011. A parametric study on explosion impact response factors characteristics of offshore installation's corrugated blast wall. *Journal of Korean Society of Ocean Engineering*, 26(3), pp.46-54.
- Kim, S.J. et al., 2014. Dynamic structural response characteristics of stiffened blast wall under explosion loads. *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, 51(5), pp.380-387.
- Kim, U.N. & Kim, H.B., 2019. A study on the design concept and simplified analysis method in dropped object accidents by lifting crane. *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, 56(3), pp.261-262.
- LSTC, 2012. *LS-DYNA Keyword User's Manual Version 971 R6.1.0*, Livermore Software Technology Corp., USA.
- NORSOK Standard, 2004. *Design of steel structures, Rev.2, Standard N-004*, Norway Lysaker:Standards Norway.
- Sabatino Ditali, Fulvio Ragno, Roberto Fiore, Jumriani, 2018. Simplified criteria for the application of blast loads from accidental explosions in plant design. *Journal of Chemical Engineering Transactions*, AIDIC, 67, pp.187-192.
- Simulia, 2014. *ABAQUS ver. 6.14, Analysis User's Manual*, HTML Vol. 1,2,3, *Hibbitt Karlsson and Sorensen Inc.*

