

# 해양플랜트 폭발사고 위험도 평가/관리를 위한 실증시험기법에 관한 연구

김봉주·하연철·서정관<sup>†</sup>  
부산대학교 선박해양플랜트기술연구원

## A Research on the Verification Test Procedure for Quantitative Explosion Risk Assessment and Management of Offshore Installations

Bong Ju Kim·Yeon Chul Ha·Jung Kwan Seo<sup>†</sup>  
The Korea Ship and Offshore Research Institute, Pusan National University

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 structural design of offshore installations against explosions has been required to protect vital areas (e.g. control room, worker's area etc.) and minimize the damage from explosion accidents. Because the explosion accident will not only result in significant casualties and economic losses, but also cause serious pollution and damage to surrounding environment and coastal marine ecosystems. Over the past two decades, an incredible efforts was made to develop reliable methods to reduce and manage the explosion risk. Among the methods Quantitative Risk Assessment and Management (QRA&M) is the one of cutting-edge technologies. The explosion risk can be quantitatively assessed by the product of explosion frequency based on probability calculation and consequence analyzed using computer simulations, namely Computational Fluid Dynamics (CFD) and Finite Element Analysis (FEA). However to obtain reliable consequence analysis results by CFD and FEA, uncertainties associate with modeling and simulation are needed to be identified and validated by comparison with experimental data. Therefore, large-scaled explosion test procedure is developed in this study. And developed test procedure can be helpful to obtain precious test data for the validation of consequence analysis using computer simulations, and subsequently allow better assessment and management of explosion risks.

**Keywords** : Offshore installation(해양플랜트 설비), Quantitative risk assessment and management(QRA&M, 정량적 위험도 평가 관리), Large-scaled explosion test(대규모 폭발 시험), Explosion test procedure(폭발 실증시험 절차서)

## 1. 서론

해저에 매장된 원유, 가스 등을 탐사, 시추, 생산하는 해양플랜트 설비에서 발생할 수 있는 각종 사고는 인명, 재산, 환경에 심각한 피해를 초래한다. 그 중에서 다양한 공정설비가 밀집되어 설치, 운영되고 있는 상부구조(topsides)에서 발생하는 가연성물질의 누출 및 폭발화재 사고는 매우 심각한 위험요소로 인식되고 있다. 이러한 해양플랜트 폭발화재 사고에 대한 안전설계기법은 1988년 북해에서 발생한 Piper Alpha 사고를 계기로 Fig. 1에서 요약한 바와 같이 다양한 국제공동연구 등의 노력을 통하여 사고 발생 빈도(frequency)와 피해규모(consequence)를 정량적으로

평가하는 정량적 위험도평가(Quantitative Risk Assessment, QRA) 기준의 설계기법으로 발전되었다 (Paik & Czujko, 2011).

Fig. 2는 해양플랜트 폭발사고에 대한 정량적 위험도평가와 관리 절차의 예를 보여주고 있다 (Paik et al., 2011). 폭발사고에 대한 정량적 위험도평가를 위해서는 폭발사고의 발생 빈도와 피해규모를 정량적으로 산출해야한다. 현재 해양플랜트 산업에서 적용하고 있는 정량적 위험도평가 방법에서는 폭발사고의 발생 빈도를 가연성 물질의 누출빈도(leak fequency)와 점화확률(ignition probabillisty)의 동시 확률로 정량화하고 피해규모는 전산유체역학(CFD)과 유한요소해석(FEA) 기법을 활용하여 정량적 피해규모를 산출하고 있다.

그러나 전산유체역학 및 유한요소해석 기법의 적용은 실제 폭

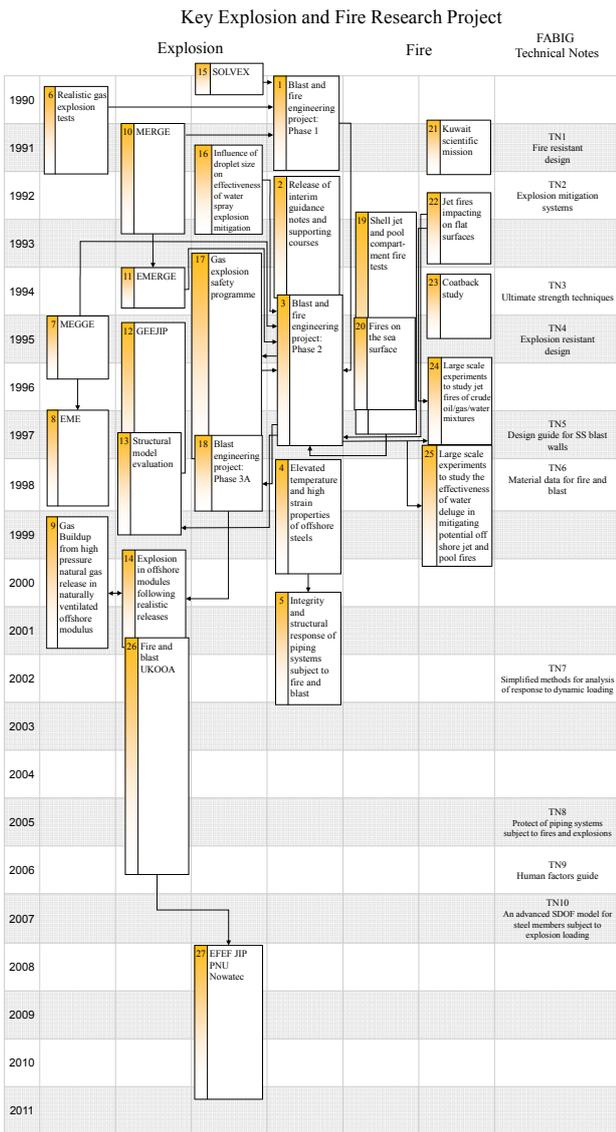


Fig. 1 Key international research projects on explosion and fire safety of offshore installations (Paik & Czujko, 2011)

발사사고의 복잡한 거동을 해석할 수 있는 최선의 방법이지만 모델링 및 해석결과의 불확실성에 대한 검증이 필요하다 (Paik et al., 2014). Fig. 3의 해양플랜트 폭발사고에 대한 정량적 위험도평가와 관리 절차를 보면 아래의 각 단계에서 전산유체역학 및 유한요소해석 기법이 적용되고 있다.

- (1) 가스 확산 시나리오(dispersion scenarios) 선정 이후 가스 구름의 특성을 파악하기 위해 수행되는 CFD 해석
  - (2) 폭발 시나리오(explosion scenarios) 선정 이후 폭발하중의 특성을 파악하기 위해 수행되는 CFD 해석
  - (3) 선정된 폭발하중에 대한 피해규모를 정량화하기 위해 수행되는 비선형 유한요소해석
- 본 연구는 상기 (2)에서 언급된 폭발하중의 특성을 파악하기 위해 수행되는 CFD해석에 대한 모델링 및 해석결과의 불확실성 검증을 위한 실증시험에 관한 연구로서 실증시험을 위해 필요한

시험설비의 구성과 신뢰성 있는 실증시험 결과를 얻기 위한 시험 절차 및 시험기법 개발에 그 목적이 있다 (Bea & Paik, 2018).

폭발하중 특성에 관한 실험적 연구는 과거 선행연구자에 의해 상당수 수행되었으나 실험 결과나 해석 모델에 대한 정보가 부족하거나 제한되어 있어서 상기의 불확실성 검증을 위한 자료로 활용되기 어렵다 (Al-Hassan & Johnson 1998; Selby & Burgan, 1998; Bauwens et al., 2010; Gexcon, 2017). 이러한 이유로 본 연구를 수행하게 되었다.

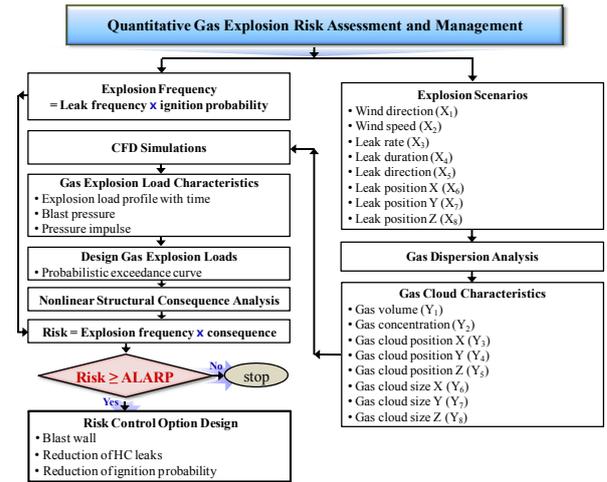


Fig. 2 Quantitative risk assessment and management procedure for gas explosions (Paik et al., 2011)

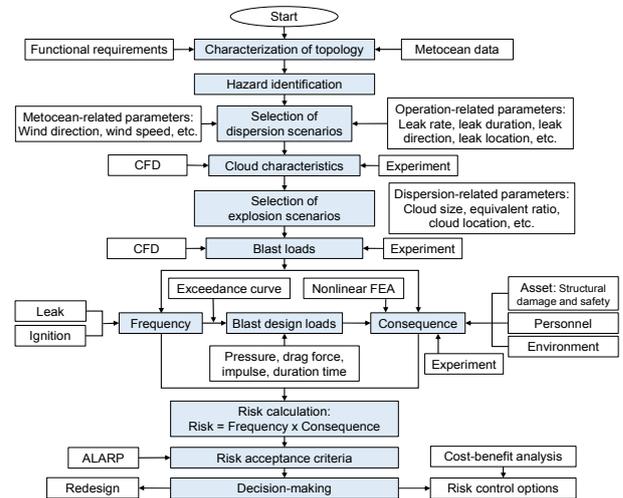


Fig. 3 A new procedure for quantitative explosion risk assessment and management procedure (Paik et al., 2014)

## 2. 실증시험설비

### 2.1 실증시험설비의 구성

해양플랜트 폭발사고 위험도 평가/관리를 위한 실증시험설비

의 구성은 야외시험장, 폭발시험모형, 가스공급설비, 제어실로 구성되어 있다.

야외시험장은 250×180 m 면적의 야외 시험공간으로 그 중앙 부에 27×22 m의 철근 콘크리트 기초가 있어 해양플랜트 상부구조 형상의 폭발시험모형을 설치할 수 있다. 폭발시험모형은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 현재 해양플랜트 산업현장에서 설계/제작되고 있는 구조형태로 제작되었으며 전체 크기가 길이 20 m, 폭 15 m, 높이 10 m로써 총 3개의 갑판(deck) 구조와 이를 지지하는 원형파이프 부재들로 구성되어 있다. 3개의 갑판 중 가운데 Mezzanine Deck는 Grating 구조로 그리고 상하의 Upper Deck와 Process Deck는 강판구조로 되어 있다.

Process Deck와 Mezzanine Deck에는 실증시험 대상 해양플랜트 모듈의 기하학적 형상이 제작/설치된다. 본 연구에서는 LNG FPSO의 상부구조 중 Fractionation 모듈의 초기 공정설계를 바탕으로 실제 크기의 80%에 해당하는 실제 크기와 유사한 생산설비의 기하학적 형상이 제작/설치되었다.



Fig. 4 A Hypothetical topside model for gas explosion tests



Fig. 5 Gas supply facilities

가스공급설비는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 가스저장설비, 기화설비, 가스제어패널, 가스농도조절장치와 블로어(blower)로 구성되어 있으며 제어실에 설치된 PC에서 폭발시험을 위한 가스농도를 설정하면 가스농도조절장치가 가스제어패널에 설치된 가스밸브를 제어하여 블로어를 통해 설정된 가스농도를 공급하도록 구성되어 있다. 제어실은 폭발시험의 영향을 받지 않는 별도의 공간에 PC 기반의 폭발시험 제어 및 모니터링과 데이터 취득을 할 수 있도록 구성되어 있다.

## 2.2 실증시험설비의 주요 제어변수 및 실증시험 셋업

실증시험을 위한 주요 제어변수는 Fig. 2와 3에서 보여주고 있는 바와 같이 선정된 폭발 시나리오의 주요변수인 가스구름에 대한 특성(gas cloud characteristics)이 된다. 즉, 가스 확산 해석결과를 바탕으로 도출된 가스구름의 위치, 크기 그리고 농도가 실증시험을 위한 주요 제어변수가 된다.

폭발하중의 특성을 파악하기 위해 수행되는 CFD 해석에서 가스구름은 일반적으로 가스구름의 위치와 크기를 고려하여 균일한 가스 농도를 갖는 직육면체 모양의 등가 가스구름 형태로 모델링되므로 본 연구에서는 균일한 가스 농도를 갖는 직육면체 형태의 가스구름을 구현할 수 있도록 Fig. 6과 같이 직육면체 프레임에 약 0.1 mm의 얇은 비닐막을 사용하여 밀폐된 직육면체 공간에 균일한 농도의 가스구름을 만들 수 있도록 지그(이하, 가스구름지그라 함)를 제작하였다. 선정된 폭발 시나리오의 가스구름 크기와 위치에 맞게 가스구름지그를 제작하여 설치하면 가스 농도만이 제어변수로 남게 되므로 가스농도조절장치와 블로어를 제어/모니터링하여 실증시험을 수행할 수 있다.

가스구름지그 주변에는 폭발하중의 특성을 계측할 수 있도록 Fig. 6과 같이 압력 센서를 고정 치구와 함께 폭발시험모형의 주요설비에 해당하는 형상 구조물 또는 원형파이프 지지부재에 설치할 수 있도록 준비를 하였으며 가스구름지그 내부에는 전기 스파크를 발생시켜 가스구름을 폭발시킬 점화원과 내부 가스농도를 측정할 수 있는 가스 농도계를 추가로 설치하였다.



Fig. 6 A test jig for the modeling of gas clouds and installations of pressure sensors

### 3. 폭발 실증시험 절차 및 절차 검증

#### 3.1 실증시험 절차

Fig. 7은 본 연구에서 개발 정립된 해양플랜트 폭발사고 위험도 평가/관리를 위한 실증시험 절차를 도식적으로 보여주고 있다. 총 3회의 안전점검(check safety)단계와 가스농도 확인(check gas concentration)단계, 폭발을 위한 점화(ignition)단계 그리고 점화 실패 등으로 폭발이 발생하지 않았을 경우 시험을 중단하는 비상정지단계(emergency stop)단계로 나누어져 있다.

가스 농도 확인단계에서는 2장에서 전술한 바와 같이 Fig. 6의 가스구름지그 내부의 가스농도를 폭발 시나리오의 가스농도와 일치시키는 단계이다. PC기반의 제어시스템과 가스농도조절 장치를 활용하여 작업자가 PC에서 설정한 가스농도와 가스구름 지그 내부의 가스농도가 일치하도록 가스제어패널에 설치된 전자식 밸브를 제어하여 블로어를 통해 가스를 주입한다.

이 단계에서 사용되는 각종 센서, 전자식 밸브, 모터 등은 작동 중 전기 스파크가 발생하거나 이상이 발생하면 안전사고로 이어질 위험이 있으므로 반드시 방폭인증 제품 및 신뢰성이 높은 제품의 사용이 필요하며 작동 전 정상상태 확인이 필수적이다. 가스 농도 확인단계 이전의 안전점검단계에서는 이러한 각종 센서, 전자식 밸브, 모터 등의 주요부분과 가스공급설비 전반의 정상작동 여부를 확인하는 단계이다. 더불어 작업자의 개인 보호장비 착용과 폭발시험모형 내부 및 주변에 폭발로 인해 비산할 수 있는 물체(작업공구, 잡자재 등)가 없는지 확인하는 등 안전을 위한 세심한 안전점검이 반드시 필요하다.

폭발을 위한 점화단계는 가스구름지그 내부에 설치된 전기 스파크 발생장치를 이용하여 가스구름을 폭발시키는 단계이다. 제어실 내부에서 작업자가 점화 스위치를 눌러 작동시키며 PC기반 제어시스템과 연계되어 고압의 전기 스파크가 발생 유지되는 시간(0.2~0.7초)을 설정할 수 있다. 점화 스위치는 데이터 취득 장치(Data Acquisition System, DAQ System)와 연계되어 스파크가 발생하는 시점을 기준으로 전후 몇 초간 데이터를 수집해서 저장할지를 설정할 수도 있다.

이 단계 이전의 안전점검에서는 점화 스위치를 누르기 전 시험장 주변에 위험요인이 없는지 작업자가 확인하는 단계이며 주위에 폭발시험 시작을 알려 안전사고를 방지하도록 해야 한다. 그러나 점화 단계와 그 이후 사용되는 전기 스파크 발생장치와 데이터 수집을 위한 센서 및 연결 케이블의 정상작동 여부 및 안전점검은 가스 농도 확인단계 이전의 안전점검단계에서 세심하게 확인되어져 있어야 함을 유념하여야 한다.

점화단계에서 폭발이 정상적으로 발생하지 않았을 경우, 즉 비상정지단계는 더욱 각별한 주의가 필요하다. 비상정지단계 이후 안전점검단계에서는 폭발 시험이 중단된 폭발시험모형 내부에 가스를 안전하게 제거하고 작업자가 후속 작업을 안전하게 진행할 수 있도록 조치하는 단계이다. 수동으로 1~2회 정도 재차 점화 단계를 진행하여 폭발이 발생하지 않으면 가스구름지그 내

부의 가스를 사전에 준비한 질소가스를 주입하여 폭발하한계(Lower Explosion Limit, LEL) 농도 이하로 충분히 낮추어 블로어 배관에 설치된 배출 밸브를 통해 배출하여야 한다. 가스를 배출한 이후 폭발시험모형 및 주변에 배출된 가스가 충분히 제거된 이후 필요한 작업을 진행하여야 한다. 가스감지기 등을 활용하여 폭발시험모형 내부에 잔류 가스의 유무를 확인하는 등의 안전사고 방지가 필요하다. 이는 정상적으로 폭발이 발생하고 시험을 마친 이후에도 확인해야 하는 안전점검사항이다.

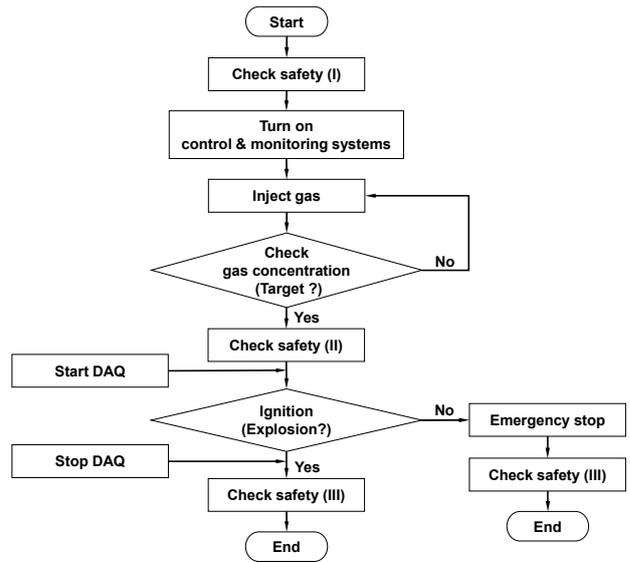


Fig. 7 Large-scaled gas explosion test procedure for QRA&M of offshore installations

#### 3.2 실증시험 절차 검증

본 연구에서 개발 정립된 해양플랜트 폭발사고 위험도 평가/관리를 위한 실증시험 절차를 검증하기 위해 폭발 실증시험을 진행하였다. 실증시험에는 액화석유가스(LPG)를 사용하였으며 구성 성분은 Table 1과 같다. 가스구름지그는 가로, 세로, 높이가 각각 4 m, 4 m, 3 m이고 Fig. 8과 같이 Process Deck에 설치하였으며 Deck 상부 1.4 m 지점의 정중앙에 점화원을 위치시켰다.

그리고 가스구름지그 내부에는 더미 파이프를 층층이 쌓을 수 있도록 하여 가스구름 주변의 구조밀집도(structural congestion) 변화에 따른 가스폭발 압력의 변화를 관찰할 수 있도록 하였다. 이러한 방법은 MERGE 프로젝트에서 실험적 연구를 수행한 바가 있고 (Mercx, 1994), 구조밀집도 등가모델을 활용한 폭발하중 예측을 위한 CFD 해석에도 활용되고 있다 (Hansen et al., 2010). 본 연구에서는 가스구름 주변의 구조밀집도 변화에 따른 폭발 압력 변화를 관찰할 수 있도록 Table 2와 같이 더미 파이프의 개수에 따라 총 5개의 시나리오를 선정하였다. Fig. 9은 Case V의 모습으로 12개의 파이프를 4층을 쌓은 모습을 보여주고 있다. 사용한 파이프의 직경은 모두 216 mm이다.

Fig. 10은 폭발하중을 측정하기 위해 설치된 압력 센서들의 위치를 보여주고 있다. 가스구름 주변에 큰 폭발압력이 예상되는

위치를 선정하였으며 Process Deck의 높이 방향으로 4개의 수평면 상에 폭발시험모형의 주요설비에 해당하는 형상 구조물에 설치하였다. 설치된 압력 센서의 주요사항은 최대측정범위는 3.4 bar, 응답속도는 1.0 ms 이하, 허용오차는  $\pm 0.25\%$ 로 모두 동일하며 30개의 독립된 데이터 취득 장치의 채널(최대 1 Ms 샘플링)에 연결하였다.

실증시험은 개발된 절차에 따라 진행되었으며 작업자가 어려움 없이 안전하게 실험을 모두 마칠 수가 있었다. 실제 실증시험에서는 적외선 카메라방식의 가스감지기를 활용하여 가스밸브 및 가스구름지그의 밀폐용 비닐막에서 가스 누출이 없는지 그리고 폭발 후 잔류 가스의 유무를 확인하였다. 가스구름지그 내부의 가스농도는 5개의 시나리오 모두 3.45%가 되도록 설정하였으며 블로어의 가동시간을 10분으로 설정하여 내부 순환이 충분히 되어 균일한 가스농도가 되도록 하였다. 사용된 가스농도 센서는 블로어 내부에 한 개(20% 농도까지 측정), 그리고 가스구름지그 내부에 한 개(5% 농도까지 측정), 총 두 개의 검교정된 센서를 사용하였다.

Fig. 11은 실증시험에서 얻은 대표적인 폭발하중 특성을 보여주고 있다. MP1과 MP12위치에 설치된 압력 센서의 측정결과를 살펴보면 구조밀집도(structural congestion)가 증가할수록 폭발로 인해 발생하는 최대 압력(peak pressure)이 증가하고 최대 압력에 도달하였다가 감소하는 시간이 짧아짐을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 실증시험에서 측정된 최대 압력을 위치별로 보여주고 있다. Fig. 11에서 확인한 바와 같이 구조밀집도가 높은 시나리오에서 높은 최대 압력이 측정되었으며 Case I과 Case II의 경우는 최대 압력 증가가 미비하나 Case V의 경우는 Case IV에 비해 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 더미 파이프의 개수가 증가할수록 점화위치와의 거리가 가까워져서 이로 인한 상호작용의 영향으로 보여지며 추후 별도의 논문에서 CFD 해석 기법 등을 활용하여 검증할 예정이다 (Bauwens et al., 2010; Pefersen & Middha, 2012).

Table 1 Chemical composition of the propane gas used in the present study

Propane	Ethane	Butane	Total olefins	Methane	Total
98.19%	0.98%	0.79%	0.03%	0.01%	100%

Table 2 Explosion scenarios by varying the number of pipes in the test jig for the modeling of gas clouds

Case no.	Number of pipes	Remark
I	0	-
II	12	12 pipes x 1 row
III	24	12 pipes x 2 rows
IV	36	12 pipes x 3 rows
V	48	12 pipes x 4 rows

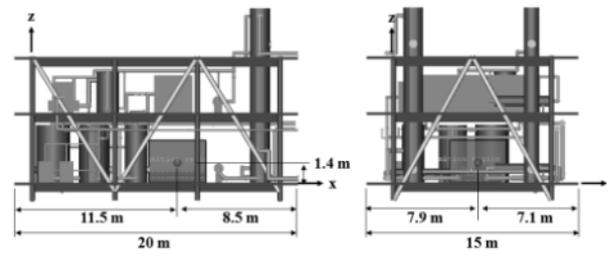


Fig. 8 Location of the ignition point and the gas cloud



Fig. 9 Layout of the dummy pipes with 12 pipes x 4 rows (Case V)

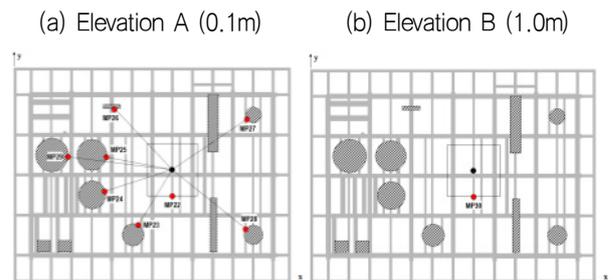
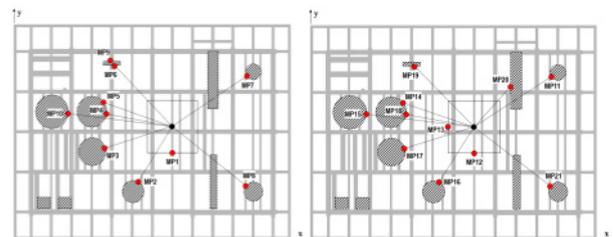
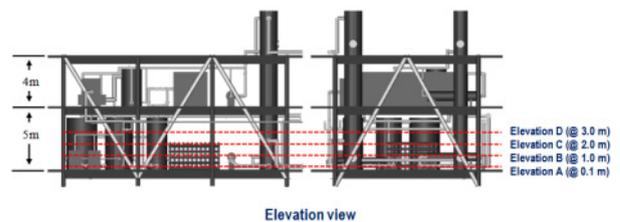


Fig. 10 The selected locations for pressure sensors

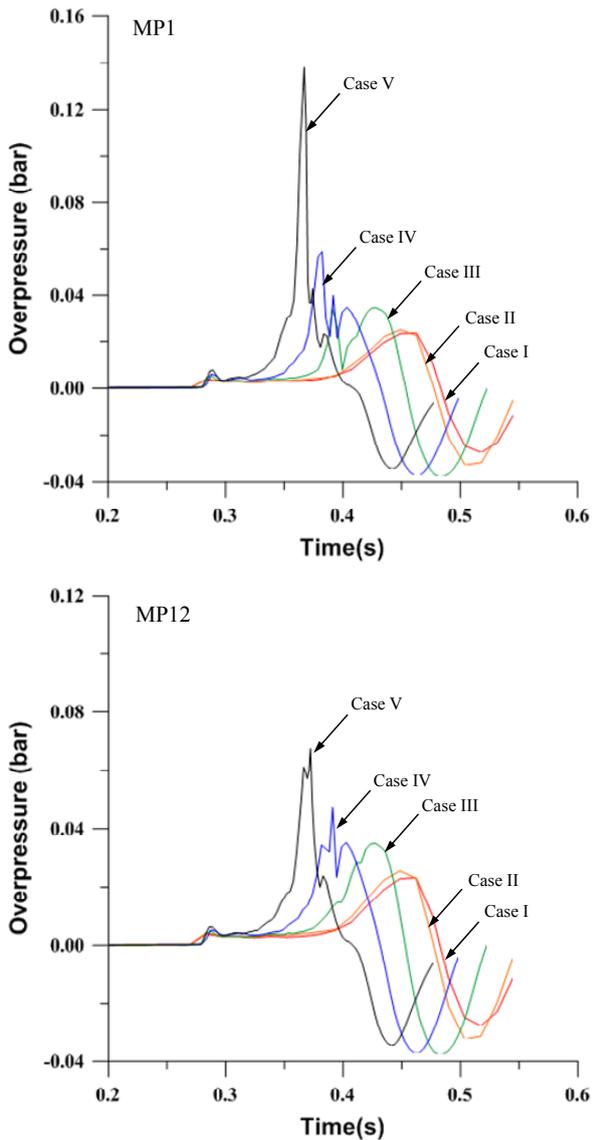


Fig. 11 Overpressure-time history at the pressure sensor location MP1 and MP12

### 4. 결론

본 연구에서는 해양플랜트 폭발사고 위험도 평가/관리를 위한 실증시험기법에 관한 연구로써 실증시험을 위해 필요한 시험설비의 구성과 신뢰성 있는 실증시험 결과를 얻기 위한 시험절차를 개발하였다. 특히 폭발 실증시험에서 발생할 수 있는 각종 안전사고를 방지하기 위해 점검해야 할 안전점검 사항들을 도출하였으며 이를 반영한 시험절차를 확립하였다.

개발된 시험절차의 적용성 검증을 위해 20×15×10 m 크기의 대형 폭발시험모형을 사용하여 4×4×3 m 크기의 가스구름 내부에 구조밀집도의 영향을 고려한 총 5개의 시나리오에 대한 폭발 실증시험을 수행하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

가스구름 내부의 구조밀집도가 증가할수록 폭발로 인해 발생하는 최대 압력이 증가하고 최대 압력에 도달하였다가 감소하는 시간이 짧아짐을 실증시험에서 확인 할 수 있었다.

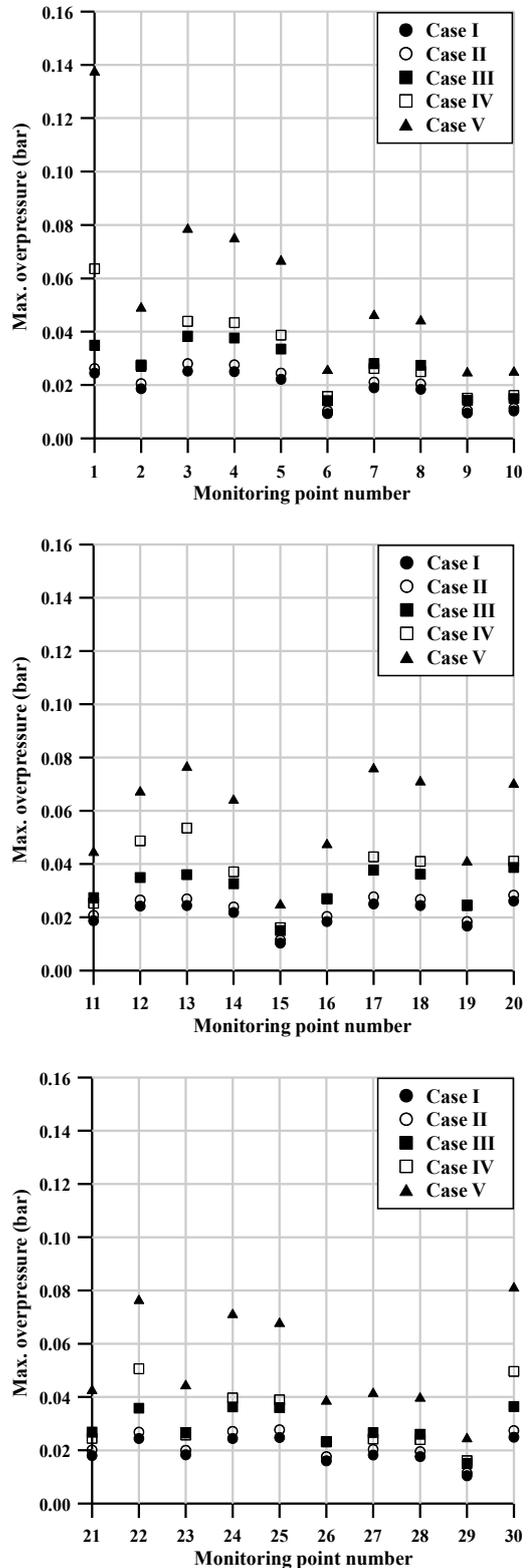


Fig. 12 Maximum overpressure (Peak pressure) measurements

가스구름 내부의 구조밀집도와 최대 폭발압력은 정비례 관계로 증가하지 않고 조건에 따라 급격하게 증가함을 실증시험에서 확인 할 수 있었다.

가스구름 내부의 구조밀집도와 점화원의 위치에 따른 폭발 하중특성에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

개발된 시험절차는 폭발하중의 특성을 파악하기 위해 수행되는 CFD해석에 대한 모델링 및 해석결과의 불확실성 검증에 활용될 수 있는 실증시험 DB 구축에 유용하게 활용될수 있을 것이라 판단된다.

## 후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음

## References

- Al-Hassan T. & Johnson D.M., 1998. *Gas explosions in large scale offshore module geometries: overpressures, mitigation and repeatability*. The International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering: Lisbon, Portugal.
- Bae, M.H. & Paik, J.K., 2018. Effects of structural congestion and surrounding obstacles on the overpressure loads in explosions: experiment and CFD simulations. *Ships and Offshore Structures*, 13(2), pp.165–180.
- Bauwens C.R., Chaffee J. & Dorofeev S., 2010. Effect of ignition location, vent size, and obstacles on vented explosion overpressures in propane-air mixture. *Composites Science and Technology*, 182, pp.1915–1932.
- Gexcon AS, 2017. *CFD Validation*. (Updated 13, 10, 2017), Available at: URL: <http://www.gexcon.com/flacs-software/article/cfd-validation> [Accessed 01 December 2017]
- Hansen, O.R., Hinze P., Engel D. & Davis S., 2010. Using computational fluid dynamics (CFD) for blast wave predictions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23, pp. 885–906
- Mercx, W.P.M., 1994. *Modelling and experimental research into gas explosions*. Overall report of the MERGE project, CEC contract: STEP-CT-0111 (SSMA). Belgium: European Commission.
- Paik, J.K. & Czujko, J., 2011. Explosion and fire engineering of FPSO (EFEF JIP), Definition of design fire loads. *FABIG Newsletter*, 58, pp. 15–28.
- Paik, J.K., Czujko, J., Kim, B.J., Seo, J.K., Ryu, H.S., Ha, Y.C., Janiszewski, P. & Musial, B., 2011. Quantitative assessment of hydrocarbon explosion and fire risks in offshore installations. *Marine Structures*, 24, pp. 73–96.
- Paik, J.K., Czujko, J., Kim, S.J., Lee, J.C., Kim, B.J., Seo, J.K. & Ha, Y.C., 2014. *A new procedure for the nonlinear structural response analysis of offshore installations in explosions*. Proceedings of Society of Naval Architects and Marine Engineers Maritime Convention, TX, USA, 22–24 October 2014.
- Pefersen, H.H. & Middha, P., 2012. Modelling of vented gas explosions in the CFD tool FLACS. *Transactions of Chemical Engineering*, 26, pp.357–362.
- Selby, C. & Burgan, B., 1998. *Blast and fire engineering for topside structures, phase 2, final summary report*. Steel Construction Institute Publication No. 253. UK: Steel Construction Institute.

