

## 해양플랜트 시나리오 기반 화재·폭발 설계하중산정 기법

서정관, 김봉주, 하연철 (부산대학교)

### 1. 서론

최근 중국과 같은 개발도상국의 경제성장에 따른 석유에너지 사용 증가로 세계 원유시장이 지속적으로 고유가를 유지하고 있는 실정이다. 그러나 비교적 자원개발이 용이한 육상과 대륙붕 자원은 거의 고갈상태에 이르고 있다. 따라서 경제성이 낮았던 심해자원 개발용 해양플랜트 설비가 증가하는 추세이다. 해양플랜트 설비는 크게 다양한 수심과 형태에 따라서 고정식 구조물, 중력식 구조물, 반잠수 구조물에서 부유식 구조물로 분류될 수 있다. 특히 FPSO를 포함한 부유식구조물은 설계 목적 상 원유의 생산, 분리, 저장, 하역과 그에 수반된 다양한 작업 대부분이 상부구조물 (Topsides)에서 이루어지며, 육상설비와는 다르게 공정설비가 제한된 공간에서 설치되므로 이를 고려한 설계와 운영이 필요하다.

이러한 해양플랜트 설비는 제한된 공간에 공정설비 설치 및 운영이 되므로 발생하는 사고의 70% 이상이 탄화수소 폭발과 화재들이며 가장 심각한 위험요소이다 (그림 1). 이러한 사고들은 인간의 안전, 주위 환경 그리고 구조물의 안전에 심각한 결과를 가져다준다. 이러한 위험에 노출되어 있는 해양구조물을 설계, 설치 및 운영하는 것은 심해자원개발에 관련한 해양산업이 직면하고 있는 중요한 과제이다.

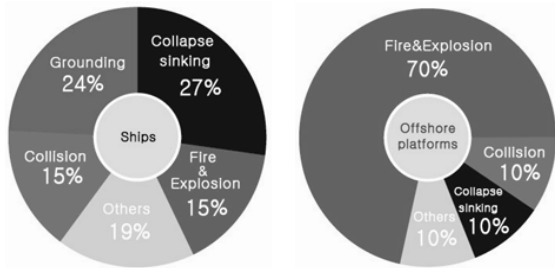


그림 1 Hazard of Ships and Offshore Platforms

1988년 북해에서 발생한 Piper Alpha 사고 이후 국제적으로 그림 2와 같이 1990년부터 폭발화재사고에 대한 국제공동연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 노력에도 불구하고 2010년 4월 20일 멕시코만 사고가 발생했고 11명의 사상자, 17명의 부상자, 27억\$의 환경 손해를 발생시켰다. 해양플랜트 산업 및 국가적 사회적으로 이러한 대형사고를 경험하였다.

이러한 결과로 사고조사 및 안전시스템등 예방을 위한 다양한 잠재적인 위험요소의 제거등의 첨단 설계기술을 적용한 설비 시스템 설계법이 요구되고 있는 실정이다 (Paik and Thayamballi, 2007).

특히 해양플랜트 상부구조물은 가스 확산, 화재, 폭발 사고가 항시 노출되기 때문에 이러한 폭발과 화재의 발생 빈도 (Frequency)와 피해규모 (Consequence)를 정량적으로 계산할 수 있는 위험도 평가 기법을 기반으로 설비의 안전시스템 (Safety system) 설계가 필요하다.

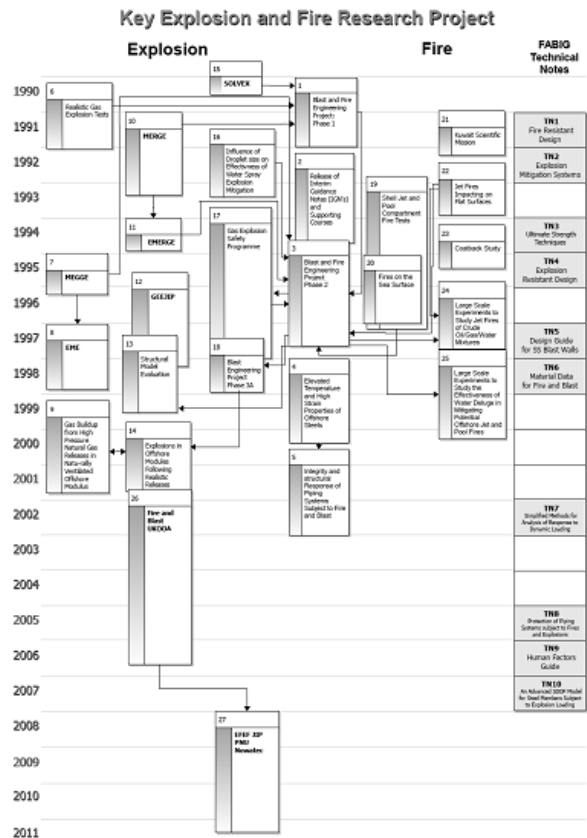


그림 2 Key Explosion and Fire Research Project

최근에 Paik and Czujko (2011A, 2011B)는 해양 구조물 설치 시 탄화수소 폭발과 화재 위험도 평가기법에 대하여 국제공동연구를 수행하였다. 기존의 다양한 정성적, 정량적 해양플랜트 위험도 평가기법을 분석하였고, 해양사고에 대한 확

론리적, 실험적, 수치적 등의 정량적 평가 기법과 모델링 기술을 광범위하게 설명하였다. 특히, 공정설비가 탑재된 FPSO를 대상으로 폭발 및 화재의 위험도평가 및 관리를 위한 시나리오 기반 정량적 폭발·화재하중 산정 기법 및 절차를 제안하였다(Paik and Czujko; 2011C, Paik et al.; 2011).

본 논문에서는 최근 부산대학교 선박해양플랜트기술연구원 에서 국제공동연구를 통하여 제안된 해양구조물 설비 화재와 가스 폭발에 대한 정량적인 위험도평가와 관리를 위한 절차와 시나리오 기반 화재·폭발 하중 산정기법을 소개하고자 한다. 소개된 기법 및 절차는 확률론적 및 시나리오기반 폭발하중 및 화재 하중을 통한 정량적인 화재 폭발의 위험도제어 지침으로 플랫폼의 레이아웃, 위치, 가스 감지기의 개수, 발화 물질의 처리 등 해양플랜트 및 육상 설비 등 고위험군 설계엔지니어링 기술로 효과적으로 활용 될 수 있다.

## 2. 화재·폭발 설계하중

### 2.1 화재 설계하중

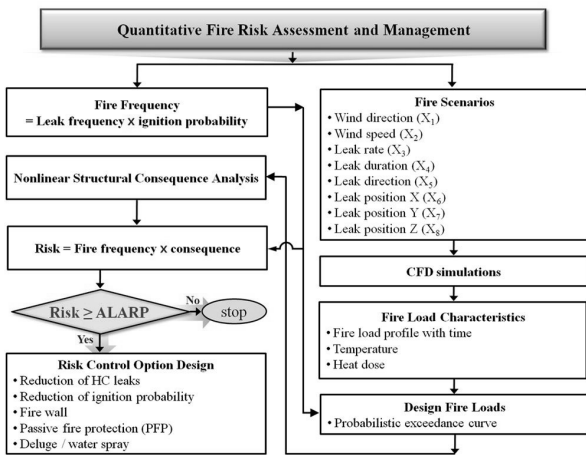


그림 3 EFEF JIP Procedure for the Fire Risk Assessment and Management

일반적으로 해양플랜트 설비의 설계단계에서부터 폭발사고 설계하중 산정 등 관련 기술은 많은 연구가 진행되었지만 화재사고에 대한 시나리오기반 혹은 확률론적 기법을 적용한 하중산정 및 위험도평가 기술은 아직 부족한 실정이다. 공정설비가 탑재된 FPSO에 대하여 화재하중산정법은 그림 3에서 보이는 바와 같이 국제산학협력공동연구(EFEF JIP)에서 정량적인 위험도 평가 및 관리와 시나리오기반 화재하중 산정기법 이(Paik and Czujko; 2011C, Paik et al.; 2011) 최근에 제안되었다. 신뢰할 수 있는 화재 시나리오의 선정은 환경, 누출, 점

화에 관련한 랜덤 변수 구성과 시나리오 샘플링 기술을 통하여 발생 가능한 모든 화재사고 시나리오로 구성하는 것이다.

선정된 확률기반 시나리오는 CFD 시뮬레이션을 수행하여 화재하중 특성(Temperature, time)을 대상 설비 전체 혹은 모듈에 상세히 구할 수 있다. CFD 시뮬레이션의 정확도는 CFD 모델링 방법에 상당한 영향을 미치고 이러한 모델링 방법에 대해 별도의 실험을 통하여 검증하는 것이 필수적이다.

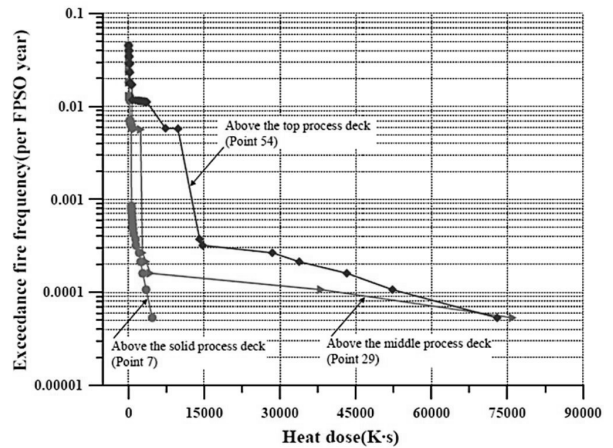
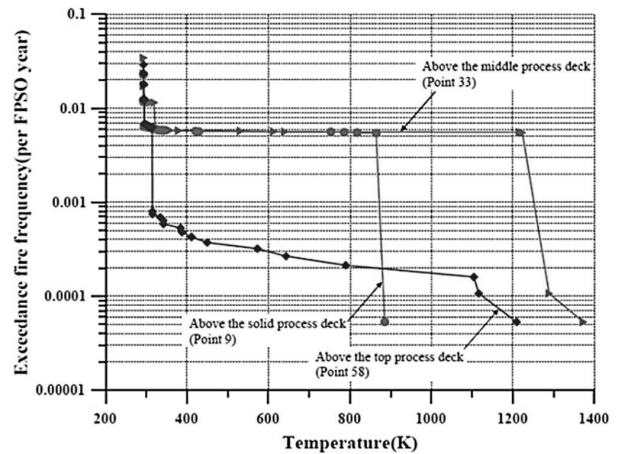


그림 4 Definition of design values of fire loads

해양플랜트 설비의 위험도 (Risk)는 화재빈도수 (Fire frequency) 와 피해규모 (Consequences)의 곱으로 정의된다. 그리고 빈도수 (Frequency)는 누출빈도 (Leak frequency)와 점화확률 (Ignition probability)의 곱으로 계산된다. 화재사고에 대한 화재하중 혹은 피해규모는 Temperature, Heat rate, Heat amount(dose)등으로 정의될 수 있다.

다음은 이러한 EFEF JIP 정량적인 화재위험도 평가 관리의 절차에서 설계하중을 산정하기 위한 방법으로 다음과 같은 순서로 진행할 수 있다.

- 1단계: 선정된 시나리오에 대한 최대 온도 (Maximum Temperature)에 대한 각각 시나리오별 화재에 대한 빈도수 (Frequency)를 계산.
- 2단계: 1단계에서 만들어진 계산결과에 따라 온도 (Temperature)에 따른 시나리오를 최대 온도 순서로 재배치. 누적 화재빈도수 (Cumulative fire Frequency) 계산.
- 3단계: 2단계에서 만들어진 표를 가지고, 온도 (Temperature)와 관련한 초과빈도 (Exceedance frequency)를 계산.
- 4단계: 초과곡선 (Exceedance Curve)을 사용하여 Exceedance Fire Frequency의 허용할 수 있는 수준 (e.g.,  $10^{-4}$ )에서의 최대 온도에 관한 설계하중을 산정 (그림 4 참조).

같은 방법으로 다양한 화재 물리량에 대하여 구할 수 있고, 특히 그림 4는 열량 (Heat dose)에 대하여 표현한 것이다.

계산된 위험수준이 허용할 수 있는 위험수준을 넘어선다면, 그 시스템은 신뢰성 있는 장비로 교체 및 레이아웃 수정 등을 통한 재설계가 이루어져야 한다. 또한 안전시스템 (Fire wall, PFP, Deluge/water spray 등)을 활용하여 위험수준을 제어할 수 있는 설계가 적용되어야 할 것이다.

또한, CFD 시뮬레이션의 경우에, 화재에 대한 비선형 구조 해석에 적용된 모델링 기술을 검증하는 것은 매우 중요하다. 가능하다면 Full scale의 시험 장치에서 얻어진 구조의 붕괴 모드와 화재하중 (Fire Loads)의 실험적인 실증 데이터베이스의 구축이 이러한 시나리오기반 및 수치해석 기반 위험도평가 및 관리에 매우 중요한 설계 자료가 될 것이다.

## 2.2 폭발 설계하중

탄화수소는 점화를 통해 공기 (Oxidiser)와 결합하여 폭발할 수 있다. 즉, 온도가 발화온도로 상승 할 때, 탄화수소 분자는 공기 (Oxidiser)와 자연적으로 반응하여 연소가 이루어진다. 이러한 탄화수소의 폭발은 강한 충격하중으로 해양플랜트 설비의 주요 구조부재 및 공정관련 장비에 심각한 영향을 미칠 수 있으므로 초기 설계단계에서부터 폭발하중을 산정하여 구조설계 및 안전시스템 설계에 중요한 설계하중으로 반영하고 있다.

Paik and Czujko (2011C)는 해양플랜트 설치에 대한 폭발 위험도 평가 및 관리 절차를 EFEF JIP 에 제시하였다 (그림 5 참조). 동일한 방법으로 화재 위험 평가 관리에 적용하여 신뢰

성을 가진 일련의 폭발 시나리오에 대하여 환경, 누출, 점화 등에 관련한 랜덤변수 선정과 샘플링 기법으로 초기 가스확산 시나리오를 산정하였다 .

가스관련 절차와 가스 확산 분석에 연관한 폭발하중의 묘사 및 분석은 각각의 폭발 시나리오에 대한 가스구름의 특징을 수치적인 방법 (CFD) 및 실험적인 방법을 통하여 정밀하게 비교 분석 및 검증하는 것이 필요하다.

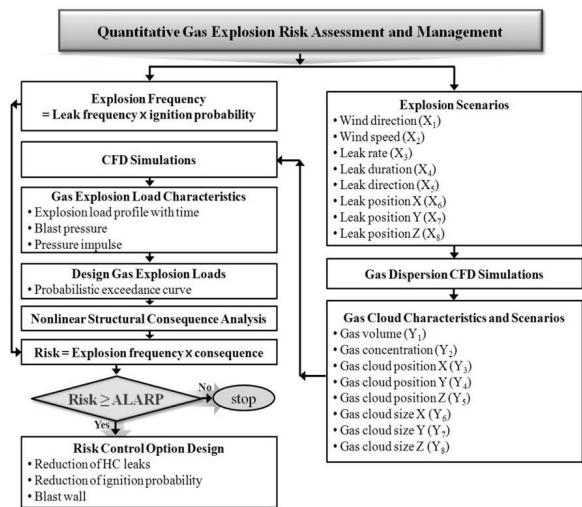


그림 5 EFEF JIP procedure for the explosion risk assessment and management

CFD해석을 통한 가스확산에 대한 시나리오 결과는 다시 가스구름(Gas Cloud) 특성에 대하여 폭발해석을 위한 시나리오가 선정이 되어야한다. 가스확산 해석의 결과에 근거하여, 시간과 공간에 따른 폭발하중을 선정하기 위한 CFD 시뮬레이션에서는 폭발하중의 주요한 변수인 가스양 (Gas Volume), 혼합비 (Gas Concentration), 위치 (Gas Cloud Position) 및 크기 (Gas Cloud Size) 등에 관련 변수가 폭발해석을 위한 랜덤변수로 정의되고, 이를 다시 시나리오 샘플링 기법을 통하여 최종 폭발사고 시나리오로 작성할 수 있다.

폭발위험도의 계산은 폭발의 빈도 (Frequency)와 관련결과 (Consequence)의 정의가 필요하다. 빈도는 제품의 누출 빈도와 점화확률로 정의 된다. 과압 (Over Pressure), 충격압력 (Overpressure Impulse) 등의 설계폭발하중은 그림 6과 같이 확률초과곡선 (Probabilistic Exceedance Curve)을 통하여 표현될 수 있다.

산정된 설계폭발하중은 비선형 구조해석을 통해 피해규모 및 구조손상을 정의 할 수 있다. 불확실성이 존재하고 비선형성이 강한 폭발, 구조 파괴 및 붕괴는 가능한 실제크기의 구

조물에 대하여 폭발하중의 실험적 데이터베이스와 파괴 모드 및 붕괴 패턴에 대한 충분한 검증된 결과를 가지고 설계에 적용되어야 할 것이다. 만약 계산된 위험도가 허용된 위험도에 비하여 상당히 클 경우, 시스템의 재설계 또는 Blast Wall과 같은 제어 가능한 옵션으로 위험도를 낮출 수 있다.

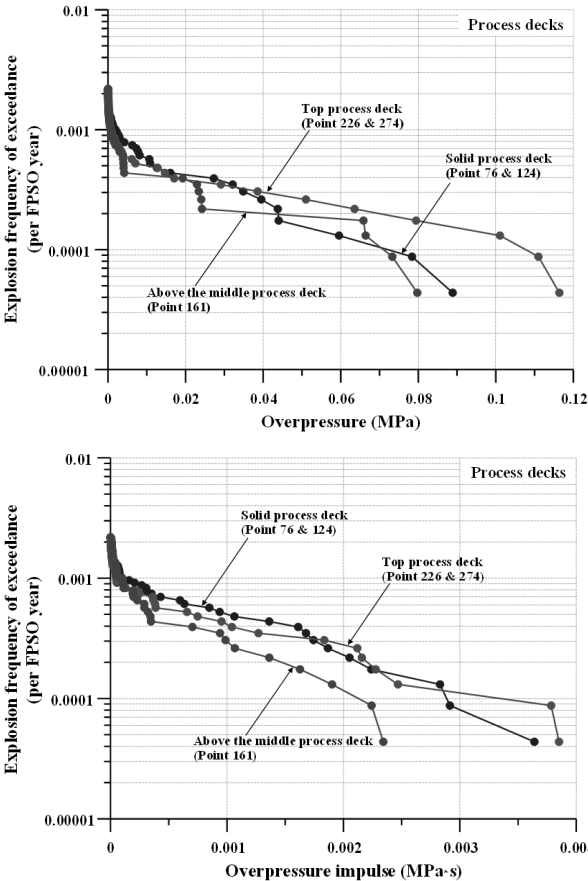


그림 6 Definition of design values of explosion loads acting on decks

NORSOK Z-013 (2010)에서 사고하중에 대한 결정은 가장 심각한 사고하중에 대하여 정의되며 이는 기능적, 시스템적인 저항능력이 요구된 기간 동안의 위험도가 허용기준에 충족되어야 한다. 사고하중결정(DAL)은 일반적으로 연간 발생 할 수 있는 하중의 확률 (10E-4/year)로 설정한다.

설계폭발하중은 과거에 발생된 사건을 바탕으로 비관적인 위치와 시간에 발생된 최대범위의 가스구름과 화학 성분량을 통하여 가정하였다. 이러한 방법으로 적용된 최고 압력은 구조물에 최적설계하중으로 적용하기에는 적절하지 않을 수 있으므로 모든 발생 가능한 확률을 고려한 설계하중이 실용적일 것이다.

### 2.3 위험도 기반 구조설계

잠재적인 사고에 대하여 설계자는 피해를 최소화시키는 구조설계를 해야 한다. 사고로 인해서 구조 부재의 손실 또는 손상에 따른 피해규모를 최소화하는 설계방법이나 사고에 대해서 이러한 부재들이 충분한 강도를 만족 시킬 수 있는 설계법으로 나눌 수 있다. 첫번째 경우는 일부 부분구조의 붕괴 및 손상으로 유도하여 전체구조물의 붕괴를 최소한으로 설계하는 것이다. 두 번째 경우는 전체 구조물의 붕괴나 손상을 일으킬 수 있는 중요한 부재들은 선별하여 충분한 사고하중에 견딜 수 있도록 설계하는 방법이다.

$$P_{F_{SYS}}(i) = \sum_{j,k} P[F_{SYS}|D] \cdot P[D|A_{jk}^{(i)}] \cdot P[A_{jk}^{(i)}]$$

$P[A_{jk}^{(i)}]$  is determined by risk analysis while the other probabilities are determined by structural reliability analysis  
 $P[F_{SYS}|D]$  is determined by due consideration of relevant action and their correlation with the hazard causing the damage

그림 7 The Probability of System Loss due to Accidental Action

현재 다양한 국제적인 기관들은 실용적이고 정밀한 폭발과 화재에 대하여 구조 설계기법을 개발하고 있다. 특히, 널리 알려진 NORSOK N-003(2007)과 N-004(2004)와 같은 기준은 폭발과 화재 하중에 대한 계산 과정에서 구할 수 있는 비교적 간단한 기법을 제안하고 적용하고 있다. 가장 바람직한 위험도 기반 설계는 사고의 시간 흐름에 따라 전후관계 및 연관관계를 명확하게 파악하고 이에 따른 점진적인 붕괴거동이 전체 손실로 이어지는 연관성을 포함하여야 할 것이다 (Moan, 2007). 그러나 실제 설계단계에서 이러한 복잡하고 연관성을 고려한 설계는 어려운 문제이기 때문에 단순화가 필요하다. 따라서 일반적인 구조설계에서는 사고하중에 구조손상 후 연관된 하중에 대해서 지속적으로 피해가 확산되는 것을 피하는 사고한계상태 (ALS) 구조설계기법을 사용하고 있다.

사고 하중에 의한 시스템 손상의 확률은 그림7과 같이 표현할 수 있다. 사고 하중으로 인해 구조의 손상량에 관련한 계산이 필요하다. 일반적으로 비선형 구조해석에서 영구 변형, 파단 등과 관련한 정량적인 값은 구조의 손상정도를 평가하고 있다. 또한 이외의 변동하중, 환경하중 및 불확실성이 고려되

는 위험요소는 ULS와 FLS 설계 기준을 활용할 수 있다. 해양 구조물에 대한 현재 ULS 요구 사항 중 구성 요소의 연간 파괴 확률은  $10^3-10^5$  수준으로 적용하고 있다. 피로파괴는 적절한 피로 수명과 견고성 (ALS 기준)뿐만 아니라 검사 및 수리를 고려하여 반영 되어져야 한다 (Moan, 2009).

### 3. 결론 및 고찰

탄화수소 폭발과 화재는 석유와 천연 가스를 처리하는 환경에서 운영, 해양구조물 설치에 대한 가장 심각한 위험요소로 여겨진다. 통계적으로 해양사고들의 증가량은 인명과 환경에 대하여 안전의 중요성은 해양산업과 사회적으로 경각심을 가져다주었고 이러한 사고위험요소를 효과적으로 대응할 수 있는 첨단 설계기법 및 기준 개발이 강화되고 있다.

해양플랜트설비의 설계를 위한 화재 및 폭발하중을 결정하기 위해서는 다양한 불확실성 및 비선형성이 존재하고 있음을 인식하여야 한다. 이를 해결하기 위해 최근 전산 유체역학 (CFD) 모델이 실제 해양구조물 개발 사업의 다양한 분야에 사용되어지고 있으나 수치해석 모델은 해양구조물 Topsides의 정밀한 묘사 (가스 흐름, 난기류 및 연소 과정)를 구현하는 방향성을 해결하고 있다. 그러나 CFD 수치해석모델을 사용한 화재 폭발 시뮬레이션은 정확성과 복잡한 폭발시나리오를 처리 할 수 있는 장점을 가지고 있으나 CFD 모델링 방법에 상당한 영향을 미치고 이러한 모델링 방법에 대해 별도의 시물 크기의 실험을 통하여 검증하는 것이 필수적일 것이다

본 논문에서 소개된 시나리오 기반, 전산수치해석 기반 폭발 및 화재 설계하중산정기법은 관련 산업 분야에 다양한 방법으로 광범위하게 활용 될 것으로 사료된다.

### 참고 문헌

- Moan, T. (2007). Development of Accidental collapse Limit State Criteria for Offshore Structures, Special Workshop on Risk Acceptance and Risk Communication, March 26-27, 2007, Stanford University.
- Moan, T. (2009). Development of accidental collapse limit state criteria for offshore structures, Structural Safety Elsevier, 2009.
- NORSOK N-004 (2004). Design of Steel Structures, Rev 2, October 2004
- NORSOK N-003 (2007); Actions and action effects.

- NORSOK Z-013 (2010). Risk and emergency preparedness assessment, Ed. 3, October 2010.
- Paik, J. K., Czujko, J. (2011A). Assessment of hydrocarbon explosion and fire risks in offshore installations: recent advances and future trends, The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering, Vol. 4, No. 3, August 2011, 167-179.
- Paik, J. K., Czujko, J. (2011B). Assessment of hydrocarbon explosion and fire risk in offshore installations: recent advances and future trends, OMAE2011-49445, Rotterdam, The Netherlands, June 19-24, 2011.
- Paik, J., Czujko, J. (2011C). Explosion and Fire Engineering of FPSO (EFEF JIP), Definition of Design Fire Loads, FABIG Newsletter Issue 58.
- 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, 2011, pp. 73-96.
- Paik, J.K., Thayamballi, A.K. (2007). Ship-shaped offshore installations: design, building, and operation, Cambridge University Press, Cambridge, UK.



서정관

- 1975년생
- 2007년 부산대학교 조선해양공학과 박사 졸업
- 현재 : 부산대학교 선박해양플랜트기술연구원 조교수
- 관심분야 : 선박 및 해양플랜트 위험도평가관리, Subsea 시스템 신뢰성 기반 설계
- 연락처 : 051-510-2415
- E-mail : seojk@pusan.ac.kr



김봉주

- 1972년생
- 2003년 부산대학교 조선해양공학과 박사 졸업
- 현재 : 부산대학교 선박해양플랜트기술연구원 부교수
- 관심분야 : 한계상태구조설계, 비선형구조역학, 위험도기반 설계
- 연락처 : 051-510-2338
- E-mail : bonjour@pusan.ac.kr



하연철

- 1972년생
- 2007년 창원대학교 전자공학과 박사 졸업
- 현재 : 부산대학교 선박해양플랜트기술연구원 조교수
- 관심분야 : 해양플랜트 IT융합, 제어시스템, 폭발화재 계측시스템 설계
- 연락처 : 051-510-3281
- E-mail : ycha@pusan.ac.kr