

해양플랜트의 방화대책 및 설계기술 소개 §

구명준*† · 최재웅* · 윤호병*

* 삼성중공업(주) 조선해양연구소 의장기술연구센터

Introduction of Fire Protection Technology and Its Design Method of Offshore Facilities

Myeong Jun Koo*†, Jae Woong Choi* and Ho Byung Yoon*

* Marine System Technology Center, Marine Research Institute, Samsung Heavy Industries Co. Ltd.

(Received May 13, 2013 ; Revised May 31, 2013 ; Accepted May 31, 2013)

Key Words: Quantitative Risk Assessment(정량적 위험성평가), Active Fire Protection(능동방화대책), Passive Fire Protection(수동방화대책), Extinguishing System(소화시스템), Detection System(탐지시스템), Emergency Shutdown System(비상차단시스템), Blowdown System(블로우다운시스템), Intumescent Epoxy Coating(에폭시 특수도료), Cellulosic Fire(셀룰로오스 화재), Hydrocarbon Fire(탄화수소성 화재)

초록: 해양플랜트의 설계는 위험요인을 정량적 위험성평가를 통해 계량화하여 그 결과를 설계에 반영하는 것이 일반화되어 있다. 대표적인 위험요소인 화재 위험에 대해서도 이는 마찬가지다. 계량화된 화재 위험에 대해 작업자들이 탈출하는 동안 안전설비의 기능을 유지하고 발생한 화재가 더 크게 전이(escalation)되는 것을 방지하는 것이 방화대책의 궁극적인 목적이다. 본 논문에서는 대표적인 방화대책인 능동방화대책과 수동방화대책의 적용사례를 살펴보고 수동방화대책의 설계기법들을 소개한다. 수동방화대책은 효과적인 방화기법이지만 초기 투자비가 많이 소요되고 운용과 유지보수에 애로사항이 크다. 따라서, 최근 들어 발주자들은 수동방화대책을 최적화하도록 해양플랜트 설계자에게 요청하는 추세이다.

Abstract: The dimensioning accidental loads have been selected through suitable quantitative risk assessment and generally utilized important factors for offshore facility design. The fire hazard can be quantified with dimensioning fire loads. The main purposes of fire protection are to maintain the functionality of safety systems within evacuation period and to prevent the escalation from initial fire to uncontrolled catastrophic fire. This paper introduces the applications and the design methods of active and passive fire protections as representative measures of fire protection of offshore facilities. The passive fire protection requires the high initial installation cost and much difficulty on the operation of facilities and their maintenance. The oil major clients have asked the design contractors of offshore facilities to optimize the amount of passive fire protection with relevant engineering technology recently.

1. 서론

1.1 해양플랜트의 추세

유가의 상승에 따라, 석유개발은 육상에서 해상으로 확대되어 왔다. 또한, 해상에서는 천해에서 심해로, 더 많이 비용이 소요되는 필드(field)로 옮겨가는 추세이다. 이러한 흐름에 따라, 해양플랜트의 석유 생산 설비는 기능은 더 우수해지고 가격은 상승하게 되었으며 또한, 고도의 안전설비를 요구하고 있다.

해양플랜트 설계에서 안전설계는 매우 중시되어 왔다. 안전설계가 강조되기 시작한 것은 큰 인명사고를 낸 두 개의 큰 사건과 관련이 있다. 하나는 노르웨이에서 1980년 3월에 발생한 Alexander L. Kielland의 난파 사건이다. 이 사고로 인해 123 명이 차가운 바다에서 저체온증으로 사망하였다. 또 다른 한 사

§ 이 논문은 대한기계학회 플랜트부문 2013년도 춘계학술강연회(2013. 6. 4.-5., 한국수자원공사 교육원) 발표논문임.

† Corresponding Author, mj43.koo@samsung.com

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

건은 영국에서 1988년 6월에 발생한 Piper Alpha 사건이다. 이 사고는 작업 중 강한 폭발과 화재가 발생하였으며 166명이 사망하였다. 대부분의 사망자는 헬리콥터를 기다리다가 대기실에서 질식으로 사망하였다. 이런 큰 사건들 후, 해당 국가에서는 해양플랜트의 안전관련 감독기관을 창설하고 법규를 강화해 왔다.⁽¹⁾

1.2 화재와 안전대책

화재는 해양플랜트 사고 중 가장 큰 위험요소 중 하나이다. 따라서, 영국의 HSE(Health and Safety Executive)와 노르웨이의 PSA(Petroleum Safety Authority)는 엄격한 방화대책의 수립과 작업자들의 교육을 요구하고 있다.

해양플랜트는 설계 단계에서 화재 위험에 대한 안전대책을 요구한다. 그리고, 이러한 설계는 단순히 안전수단과 소화시스템을 구비하는 수준에서 끝나는 것이 아니다. 해당 해양플랜트의 화재 사고로 인한 위험 가능성을 해석, 운전조건 그리고 설비물량 등을 기준으로 판단하고 어느 정도 단계까지 안전성을 확보할 것인지 판단하는 ALARP(As Low As Reasonably Practicable) 활동을 수행한다. 그러한 후에, 정량적 위험성평가를 통해 계량화된 화재 시나리오를 선정하고 이에 부합하는 방화대책을 수립한다.^(2~4)

2. 방화대책

2.1 방화대책의 목적

해양플랜트에서 방화의 목적은 먼저 작업자들이 정해진 안전설비를 통해 피난할 수 있도록 해당 안전설비의 기능을 대피시간 동안 확보하는 것이다. 아울러, 화재가 발생하여 생산설비의 가연성 물질로 화재가 전이되어 제어할 수 없는 큰 재난을 초래하는 것을 방지하기 위함이다. 따라서 방화대책은 화재가 발생하더라도 적절한 억제성을 확보하는데 주안점을 두고 있다. 그리고, 화재가 발생하기 전에 가연성 물질의 누출을 확인하고 점화원인을 차단하여 화재로 발전하는 것을 미연에 방지하는 활동도 중요하다.^(2,3,5)

2.2 방화대책의 종류

방화대책은 필수적인 세 가지 종류로 구분될 수 있다. 그것은 능동방화대책, 수동방화대책 그리고 작업자 교육이다. 작업자 교육을 제외한 두 가지는 설계 단계에서 심도 있게 평가되므로 더 자세히 논해보겠다.

2.2.1 능동방화대책

능동방화대책은 수동방화대책과 대비되는 개념으로, 화재를 진압하거나 경감시키는데 어느 정도의 행위가 필요한 방법이다. 능동방화대책은 더 세분하게 소화시스템(extinguishing system), 탐지시스템(detection system) 그리고 휴대용 장비(portable equipment) 등으로 구분될 수 있다.

해양플랜트에서 주로 사용되는 소화시스템을 소개해 본다. 펌프시스템(fire water pump system)은 화재시에, 사용될 소화수를 공급하는 장비이다. 사용되는 소화수는 해수 및 경수가 모두 운용된다. 해수가 소화수로 사용되면 사용 후 기계장비에 악영향을 줄 수 있다. 그러나 경수를 사용한다면 해상이라는 조건 때문에 소화 목적의 경수의 양을 확보하는 데에 제한이 있다. 소화 주관(fire main)은 비상시, 소화수가 이동하는 통로 배관이며 평상시에 배관에 소화수가 존재해서 바로 살수가 가능한 습식시스템과 반대인 건식시스템이 있다. 살수시스템(water deluge system)은 소화 주관의 소화수를 별도의 처리 없이 살포하는 시스템이다. 주로, 많은 가연성 물질을 저장한 설비 주위에 설치된다. 포말소화시스템(foam system)은 소화수와 더불어 포말을 섞어 연소면에 거품으로 피복하여 산소를 차단하는 질식작용과 수분의 냉각작용의 효과를 같이 이용한다. 스프링클러시스템(sprinkler system)은 분기관 선단에 스프링클러 헤드를 설치하여 소화하는 장비로써 주로 경수를 사용하는 경우가 많다. 물분무미립자시스템(water mist system)은 소화수를 작은 입자화하여 소화하는 장비이다. 냉각효과와 질식효과를 이용해 소화를 하는데 주로, 화재로 인한 열을 경감시키거나 화재가 발달하는 것을 억제한다. 소화모니터(fire monitor) 및 소화호스(fire hose)는 가장 일반적인 소화장비이다. 이외에도 이산화탄소나 산소의 양이 적은 중성가스를 활용한 가스

시스템(gaseous system)도 많이 사용된다. 가스시스템은 소화 작용으로 기계 설비에 피해가 없이 유용하지만 질식효과로 인체에 치명적일 수 있어 단점이 있다. 그리고 헬리콥터 갑판에는 DIFFS(Deck Integrated Fire Fighting System)가 활용되기도 하는데, 이것은 갑판에 노즐이 설치되어 화재 시에 상향으로 소화수를 분무한다. 소화효과는 좋지만 유지보수에 어려움이 있다.

소화시스템의 소화수 용량은 각 소화시스템에 대해서 해양플랜트가 설치되는 국가의 규정에 명시되어 있다. 참고할 규정이 없을 경우에는, 선급(class)에서 제안하는 용량을 따르는 것이 관례이다. 약간의 차이는 있지만 일반적으로 살수시스템, 스프링클러시스템 그리고 소화모니터는 화재구역에 대해 단위 면적당과 단위 분당 10 리터 이상이 공급되어야 한다. 그러나 시추작업 구역 또는 유정(well)과 직접적으로 접촉하는 구역은 단위 면적당과 단위 분당 20 리터 이상을 공급하도록 요구하고 있다. 또한, 소화펌프의 용량은 소화수가 가장 많이 소요되는 화재구역과 그와 인접한 화재구역에 동시에 소화수를 공급할 수 있는 용량이어야 한다.^(3,6)

탐지시스템은 화재로 인한 열을 감지하는 화재감지시스템(fire detection system)과 가연성 기체를 탐지하는 가스감지시스템(gas detection system)이 있다. 감지시스템은 비상차단시스템(emergency shutdown system), 블



Fig. 1 Water deluge system on working



Fig. 2 Water monitor system on working



Fig. 3 DIFFS test

로우다운시스템(blowdown system), 소화시스템(fire fighting system) 등의 안전장치를 시동하게 된다.

휴대용 방화장비는 초기 작은 화재를 진화하는 소화기 외 방화피복, 휴대용 산소마스크 등 여러 개인용 방화장구를 일컫는다. 해양플랜트에 이러한 장비들이 적재에 배치되어야 한다.

2.2.2 수동방화대책

수동방화대책은 내화성 또는 단열성이 있는 재료로 격벽이나 갑판 등에 시공되어 화재를 격리시키거나 화재의 전파를 지연시키는 역할을 한다. 구조물 또는 장비에 설치될 경우에는 계량화 된 유효한 화재 시나리오(dimensioning fire load)에서 구조적 건전성과 단열성능을 유지하도록 적절한 화재 억제력을 확보해 준다. 가연성 유체를 저장한 압력용기는 화재에 노출되면, 유입되는 열로 인해, 증발된 유체로 내부압력이 폭발적으로 상승한다. 수동방화대책은 감압장치(depressurization system) 또는, 블로우다운장치(blowdown system)가 작동되기 전까지 압력용기의 내부압력이 설계허용치보다 상승하지 못하도록 열의 유입을 차단해 준다.

수동방화대책은 단열성이 있는 재료를 보호하고자 하는 구조물 또는 장비에 시공함으로써 적용된다. 사용되는 재료로는 시멘트, 섬유성 단열재, 복합재료, GRP(Glass fiber Reinforced Plastic), GRE(Glass fiber Reinforced Epoxy), 에폭시 특수도료(intumescent epoxy coating) 등이 널리 사용된다.

시멘트계 재료는 내구성이 우수하고 비용이 저렴하며 시공 및 유지보수가 간편하여 육상플랜트에서 많이 사용된다. 그러나 중량이 무거운 치명적인 약점이 있어 해양플랜트에는 활용빈도가 거의 없다. 섬유성 단열재는 심미성이 있고 시공이 간편하며 가볍고 부착면에 별도의 사전처리가 필요 없어 건물 등에 많이 사용된다. 해양플랜트에서도 거주구에 널리 활용된다. 그러나 석유생산설비에는 거의 사용되지 않는다. 해양플랜트 설비는 탄화수소성(hydrocarbon) 가연물을 주로 저장하고 있는데 이 가연물을 연료로 하는 화재는 화염의 최고온도가 약 1200℃까지 상승한다. 그러나 섬유성 단열재는 최고온도가 850℃까지 상승하는 셀룰로오스 화재(cellulosic fire)에 적합하여 탄화수소성 화재(hydrocarbon fire)에 노출되었을 때, 탄화되어 그 기능을 제대로 발휘하지 못한다. 복합재료는 특수한 목적에 맞게 제작할 수 있으므로 장점이 있다. 해양플랜트에서도 부분적으로 사용된다. 그러나 동일한 단열성능 대비 무겁고 부착 시에 별도의 표면처리가 요구되며 시공성이 불편하여 적용분야가 제한적이다. GRP 와 GRE 도 부분적으로 사용이 된다. 성능이 우수하고 부식 및 침식에 강하지만 단점은 가격이 비싸고 시공이 용이하지 못하다.

앞에서 언급된 많은 재료들이 특유의 장점이 있음에도 불구하고 해양플랜트가 가지는 특수한 조건 때문에 넓게 활용될 수 없었다. 해양플랜트는 해상에 설치되기 때문에 하부구조(substructure)에 따라 탑재하중이 제한된다. 탑재하중은 해양플랜트의 구조적 안정성과 해양에서의 운동 및 거동에 관련되기 때문에 가장 중요한 제약 조건이다. 또한, 해수와 해풍에 계속적으로 노출되므로 부식과 침식에 강한 재료가 적합하다. 아울러, 자재의 공급과 운송이 용이하지 않으므로 유지보수가 간편해야 한다. 현재까지, 이러한 조건에 가장 부합된 재료는 에폭시 특수도료이다.

에폭시 특수도료가 작은 중량으로도 뛰어난 내화 및 단열성능을 나타내는 것은 화재에 노출되었을 때 보이는 이 재료 특유의 화학작용과 관련이 있다. 이 재료가 화재에 노출되어 온도가 상승하면, 고형물이 높은 점성을 가지는 액체로 상변화 한다. 그와 동시에, 낮은 전도성의 불활성가스가 흡열반응의 결과물로 생성된다. 이 가스는 폴리머 사슬 사이에서 나타나는 가교반응(cross linking reaction)으로 점성액체 안



Fig. 4 Cementitious material for passive fire protection

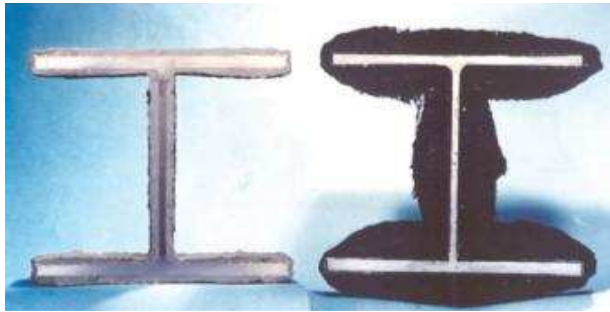


Fig. 5 Intumescent epoxy coating attached to beam before and after a fire (left: before a fire, right: after a fire)

에 갇히게 된다. 이러한 결과로 낮은 밀도와 높은 단열성의 탄소질 물질이 형성되어 최고 기준 두께의 8 배까지 팽창한다. 이러한 탄소질 물질은 숯과 같은 역할을 하여, 화재에 의한 높은 열을 흡수하며 자신은 혼소된다. 에폭시 특수도료는 외부에서 내부로 이와 같은 순차적인 화학반응을 거치면서 자신은 소모되면서 내부의 구조물로 열이 전달되는 것을 일정 시간 차단한다. 따라서, 시공되는 도료의 두께는 화재의 시나리오와 지속시간에 밀접한 관련이 있다.

3. 수동방화대책의 최적설계

3.1 최적 설계의 필요성

앞에서 논의되었듯, 에폭시 특수도료는 현존하는 가장 우수한 해양플랜트의 수동방화대책으로 평가 받고 있다. 그럼에도 불구하고, 이러한 수동방화대책의 적용은 설계와 생산 그리고 운용 측면에서 여러 가지 어려운 점을 내포하고 있다. 설계 측면에서는 수동방화대책의 적용으로 구조물의 검사가 불가능해지고 이로 인해, 더 까다로운 피로평가를 요구 받게 된다. 이것은 다시, 구조물 생산 비용을 상승시킨다. 생산 측면에서는 수동방화대책의 시공이 여러 가지 공정으로 나누어져 검사 및 시공이 까다로워 생산 공기에 지대한 영향을 준다. 아울러, 시공 측면에서 어렵고 유해한 작업이 많아 숙련되고 검증 받은 작업자들이 필요하다. 운용 면에서는 수동방화대책이 작업 중에 부분적 손상 가능성이 크며 이 때마다 까다로운 유지보수 작업을 수행해야 되는 어려움이 있다. 또한, 부식에 비교적 강하다 하지만 그래도 육상보다는 잦은 부식에 의한 손상으로 유지보수를 요구하고 있다.

최근까지 수동방화대책의 설계는 관행적인 규정에 의해 수행하다 보니, 각각의 해양플랜트의 생산 및 공정으로 인한 다양하고 구체적인 화재 위험성을 고려하지 못했다. 따라서, 보수적으로 방화 물량이 선정되는 경우가 많았다. 그러나 수동방화대책의 적용에 따른 여러 어려움으로 인해 요즘에 들어서는 구체적인 화재 시나리오의 선정과 이에 따른 최적화된 방화물량을 요구하는 사례가 많아졌다. 아울러, 개정된 관련 규정에서도 별도의 화재 및 구조평가를 통한 최적 설계를 권장하는 단계에 이르렀다.^(3,7)

3.2 화재구조 연성평가

해양플랜트의 주요 구조물의 수동방화대책의 최적설계는 화재구조 연성평가에 의해 기존까지 개별적으로 수행하던 화재해석 결과와 구조응답해석 결과를 연계시키는 것이 핵심이다. 이와 같은 기술이 확보되지 않으면, 화재해석 결과를 부분적으로 적용하지 못하게 되며 이는 방화물량의 증대를 초래한다. 아울러, 구조응답해석의 결과도 일괄적으로 제안되는 요소구조체의 변형률을 적용하지 않고 구조적인 중복성을 고려하는 전체적인 전복 정도로 평가해야 한다.

이러한 기술로, 현재까지 가장 널리 활용되는 것은 상용코드 KFX(Kameleon FireEx)⁽⁸⁾를 활용한 화재해석, 상용코드 FAHTS(Fire And Heat Transfer Simulations)⁽⁹⁾를 이용한 열전달해석 그리고 상용코드 USFOS(Ultimate Strength For Offshore Structures)⁽¹⁰⁾를 이용한 구조응답해석의 조합이다.⁽¹¹⁾ 화재해석의 결과로 공간 상의 비정상 온도 변화가 계산된다. 이 결과는 구조물의 비정상 온도 상승률을 계산하는 입력자료로 활용된다. 그리고 구조물의 온도 상승에 따른 구조 물성의 경감효과를 고려하여 주어진 하중 조건에서 구조물의 비정상 응답 결과를 계산한다. 전체적인 구조응답해석의 결과를 숙련된 엔지니어가 검토하고 방화물량이 필요한 요소구조물을 선정하여 최종적인 수동방화대책의 방화물량이 산정된다.

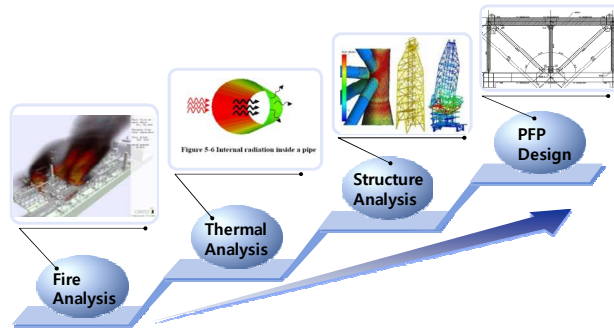


Fig. 6 Process of designing passive fire protection for structural members using the combination of commercial analytical software codes

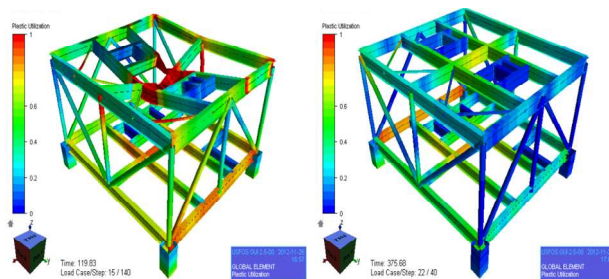


Fig. 7 Utilization ratio of structural members on both of protected and unprotected cases

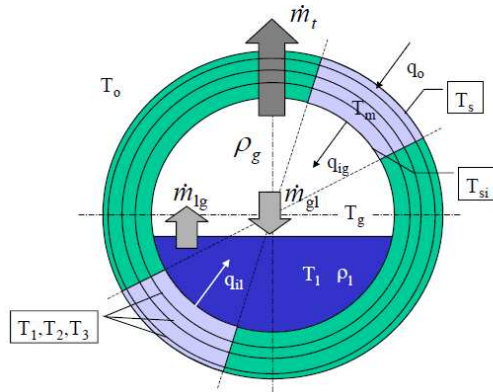


Fig. 8 Sketch of a pressurized system exposed to a fire

Fig. 7 은 USFOS 를 활용한 FPSO(Floating Production, Storage and Offloading) 모듈의 구조응답 결과이다. 왼쪽 그림은 수동방화대책 적용 전, 구조물이 붕괴되는 형상을 나타내며 오른쪽 그림은 수동방화대책 적용 후, 구조물의 건전성이 확보되는 것을 보여준다. 각각의 그림은 구조물에 소성영역 대비 작용하는 하중의 비율(Utilization ratio)이 나타나 있다. 왼쪽 그림에서 소성영역의 구조물부터 크게 파손이 일어남이 확인 가능하다. 그러나 모든 소성영역 하에 구조물이 파손되는 거동을 보이지는 않는다. 이것은 구조물의 중복성과 관련되어 있다.

3.3 화재유체구조 연성평가

해양플랜트의 공정시스템은 유정에서 채취한 석유를 일차적으로 분리 또는 추출하여 저장탱크로 이송하는 시스템이다. 이 시스템은 여러 장비와 배관으로 구성된다. 화재로 인해 공정이 비정상적으로 정지되면 각 공정시스템은 비상차단(emergency shutdown) 된다. 이 때, 장비와 배관에는 가연성 물질이 다량 잔존하게 되어 이러한 장비가 화재에 의해, 대량의 열이 유입되는 경우는 화재해석, 구조응답해석과 함께 유체의 상변화 해석이 필수적이다.

Fig. 8 은 화재에 노출되었을 때 일반적인 공정 장비의 개략도를 보여준다. 화재로 인해 열이 유입되면 장비 저단의 액체 부분과 기체 부분은 서로 다른 변화를 보이게 된다. 액체 부분은 상변화로 기화가 되

고 기체 부분은 상변화 없이 열유입에 따라 온도가 상승하며 이로 인해, 밀도가 낮아져 압력이 상승한다. 이러한 변화로 내부압력에 의한 힘이 장비의 허용응력을 초과하게 되면 장비가 폭발하게 된다. 또한, 제트화재(jet fire)에 노출되는 경우, 높은 열유입량으로 장비 자체가 부분적으로 손상될 수도 있다. 장비의 내부 압력에 의한 구조물의 손상이 블로우다운(blowdown) 시스템과 연계하여 계산되어야만 최적화된 공정장비의 방화물량을 산정하거나 블로우다운 용량을 조절할 수 있다. 이러한 일련의 해석평가가 가능한 상용코드로서 Petrell 사의 VessFire 가 유명하다.⁽¹²⁾

Fig. 9 는 실제로 4 인치 배관에 VessFire 를 통해 구조응답해석을 수행한 결과이다. 종방향응력(longitudinal stress)은 배관과 내부 가연물의 하중에 의한 구조물의 인장응력이다. 이에 종방향으로 배관 내부의 압력에 의한 응력이 더해진다. 계산응력(calculated stress)은 배관 내부에서 증가된 압력에 의해 발생한 응력을 나타낸다. 극한응력(ultimate stress)과 계산응력이 교차된 것은 종방향응력과 관계없이 구조물이 파손됨을 의미한다. 그래서 이 때, 종방향응력은 0 이 된다. **Fig. 9** 에 의하면 2.9 초 부근에서 최고종방향응력이 요구되는 종방향응력을 초과하여 배관이 파손되는 시점임을 예측할 수 있다. 이를 위한, 보완책으로 블로우다운 용량을 조정하거나 수동방화대책을 시공하여 열유입량을 지연시킴으로써 요구되는 응력조건을 만족시켜야 할 것이다.

3.4 선형탄성 평가

앞에서 언급된 화재구조 또는 화재유체구조 평가법은 비선형 탄성-소성 평가법으로 비교적 정확한 평가를 수행할 수 있다. 그러나 경계조건이 명확해야 하고 계산적인 비용이 크게 발생한다. 주요 구조물 외에도 해양플랜트에는 이차구조물, 장비 또는 배관 지지물 등 많은 부가 구조물이 사용된다. 이 때마다, 앞서 언급된 해석법을 통해 평가할 수는 없다. 그래서 간편하게 사용될 수 있는 평가법이 선형탄성 계산법이다. 이 방법은 개개의 구조물을 단독으로 평가하고 구조적인 중복성을 고려하지 못하며 소성 영역 자체를 구조물의 파손으로 간주하기 때문에 앞서 언급된 접근법보다는 보수적인 결과를 초래한다. 따라서 방화물량이 크지 않거나 화재 시나리오가 심대한 영향을 미치지 않을 경우에 자주 활용된다.

선형탄성 평가법은 먼저 화재 시나리오가 없는 조건에서 구조물의 하중조건을 파악한다. 이러한 계산은 해양플랜트 설계에서 수행하는 일반적인 구조해석법이다. 계산을 통해, 구조물에 소성영역 대비 작용하는 하중의 비율(utilization ratio, UR)을 계산한다. API(American Petroleum Institute) 코드⁽¹³⁾와 EN(European Standard)⁽¹⁴⁾에는 UR 에 따른 허용임계온도(critical temperature)가 도표화되어 있다. 다음은 결정된 화재 시나리오에 따른 구조물의 열전달해석을 수행한다. 이 때, 구조물이 허용임계온도(critical temperature)까지 상승하는 시간을 계산하는데, 이 시간을 구조물이 최소파손시간(minimum steel failure time)이라 한다. 이와 관련된 계산법은 John Spouse⁽¹⁵⁾의 저서에 잘 나타나 있다.

Fig. 10 은 실제 적용되는 계산차트의 예시이다. 먼저 구조부재의 형태에 따른 파손 거동을 파악하고 화재 시나리오에 따른 허용임계온도를 계산했다. 이러한 결과를 바탕으로 최고파손시간을 계산하여 화재 시나리오와 비교함으로써 파손 가능성을 평가하는 순서이다.

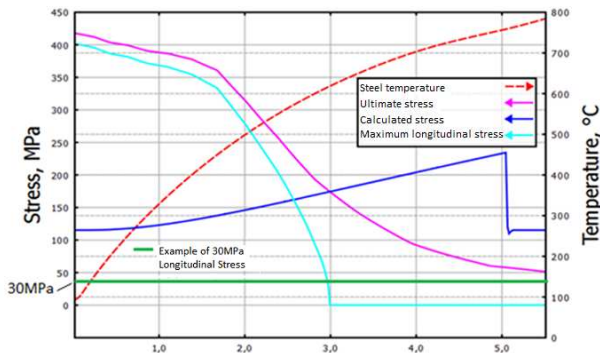
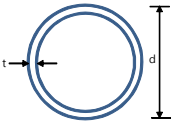


Fig. 9 Stress curves of a 30Mpa longitudinal stress on a pipe exposed to a fire

Lay-out and Details for Cross Section			
d	=	355	mm
t	=	16	mm
ρ	=	7850	kg/m ³
M/S	=	125.6	kg/m ²
Class	=	1	t'rho (for tubular section)
d/t	=	22.2	



Class 1	33.0	d/t ≤ 50e2
Class 2	46.2	d/t ≤ 70e2
Class 3	59.4	d/t ≤ 90e2

Fire Load Details	
q	= 150 kW/m ² (incident heat flux)
t	= 10 minutes (duration of heat flux)

Critical temperature	
UR	= 0.2 (utilization ratio)
Tf	= 725 °C (critical temperature = 39.19*ln[1/(0.9674*UR^3.833)-1]+482)

Minimum Steel Failure Time	
Ta	= 10 °C (ambient temperature)
K	= 0.32 (exposure factor)
qo	= 15 kW/m ² (output heat flux)
Cp	= 0.46 kJ/kg°C (specific heat capacity of steel member)
tf	= 20.9 minutes (Minimum Steel Failure Time = (Tf-Ta)/(qK-qo)*Cp*M/S)

Integrity of Steel Member	
Global integrity at DAL fire	→ OK!

Fig. 10 Calculation sheet of checking structural integrity for individual member using linear elastic approach

3. 결론

본 논문에서는 대표적인 방화대책인 능동방화대책과 수동방화대책의 적용사례를 살펴보았다. 능동방화대책의 설계기법은 주로 규정에 의거하므로 간단하게 논하였다. 수동방화대책은 설계기법을 더 자세히 소개하였다. 여기에서 언급된 대표적인 설계기법 외에도 다양한 방법이 활용되고 있으며 최근에도 관련 기술이 발전되고 있는 추세이다. 수동방화대책은 효과적인 방화기법이지만 초기 투자비가 많이 소요되고 해양플랜트의 운용 상 여러 제약을 줄 수 있으며 특히, 유지보수에 어려움이 크다. 수동방화대책을 최적화함으로써, 계량화된 화재 위험에 안전성을 확보하면서 설계와 생산의 효율을 추구하는 것이 현재 해양플랜트 설계업체에 발주자가 요구하는 중요한 경쟁력이다.

참고문헌

- (1) Vinnem, J. E., 2007, *Offshore Risk Assessment: Principles, Modeling and Applications of QRA Studies*, Springer, London, pp. 77~118.
- (2) Petroleum Safety Authority Regulation, 2013, *Regulation Relating to Design and Outfittings of Facilities in the Petroleum Activities*, Petroleum Safety Authority, Stavanger, pp. 7~15.
- (3) Norwegian Standard, 2008, *NORSOK S-001: Technical Safety*, Standards Norway, Oslo, pp. 11~61.
- (4) DNV Offshore Standard, 2005, *DNV-OS-A101: Safety Principles and Arrangements*, Det Norske Veritas, Oslo, pp. 11~14.
- (5) DNV Offshore Standard, 2005, *DNV-OS-D301: Fire Protection*, Det Norske Veritas, Oslo, pp. 15~30.
- (6) International Standard, 1999, *ISO 13702: Petroleum and Natural Gas Industries – Control and Mitigation of Fires and Explosions on Offshore Production Installations – Requirements and Guidelines*, International Organization for Standardization, Geneva, pp. 9~38.
- (7) Health and Safety Executive Regulation, 2005, *A Guide to the Offshore Installations (Safety Case)*, Health and Safety Executive, London, pp. 33~46.
- (8) Vembe, B. E., Kleiveland, R. N., Grimsmo, B., Lilleheie, N. I., Rian, K. E., Olsen, R., Lakså, B., Nilsen, V., Vembe, J. E. and Evanger, T., 2010, *Kameleon FireEx KFX® 2010 User Manual*, ComputIT, Trondheim.

- (9) FAHTS Manual, 2005, *FAHTS User's Manual*, USFOS Reality Engineering, Bergen.
- (10) USFOS Manual, 2011, *USFOS User's Manual Release 8-6*, USFOS Reality Engineering, Bergen.
- (11) Amdahl, J., Holmås, T. and Skallerud, B., 2003 "Ultimate Strength of Structural Members with Attachments during Accidental Fires," *Int. Conf. Response of Structures to Extreme Loading*, Toronto; Canada, 2003-08-03/06
- (12) VESSFIRE Manual, 2007, *VessFire version 1.2: User Manual and Frequently Asked Questions*, Petrell AS, Trondheim.
- (13) API Recommended Practice 2A-LRFD, 2003, *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Load and Resistance Factor Design*, American Petroleum Institute, Washington, pp. 37~40.
- (14) European Standard, 2005, *Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design*, European Committee for Standardization, Brussels, pp. 27~42.
- (15) Spouse, J., 1999, *A Guide to Quantitative Risk Assessment for Offshore Installations*, Center for Marine and Petroleum Technology, London, pp. 412~417.