

화재시 구조강도에 대한 신뢰성 평가방법의 정립

박창규

전주비전대학교 조선해양과

Establishment of Fire Reliability Assessment Method for Structural Strength

Chang-Kyu Park

Dept. of Ship & Ocean, VISION University, College of Jeonju

요약 본 논문에서는 해상 구조물들의 화재시 안전성 평가에 대한 연구의 일환으로써 기본적인 구조강도 부재들의 화재시 거동 및 파괴확률을 구해 보았다. 화재에서의 안전성 평가는 부재의 Fire resistance와 화염에 의한 열하중인 Fire severity를 비교하여 이루어질 수 있다고 가정하였다. Fire severity는 육상 건축물에 대한 화재안전 규정인 Eurocode 1의 표준화염 온도 변화 곡선과 부재로의 열전달 방정식을 사용하여 부재의 최대온도를 구하게 되며, Fire resistance는 단순 부재의 경우, 간략식과 코드의 활용으로 해결할 수 있지만, FPSO와 해상 구조물의 복잡성을 고려하여 상용 구조해석 프로그램의 활용을 통하여 탄소성해석 및 대변형등을 고려한 보다 실용적인 부재의 구조강도를 해석하여 주어진 파괴모드에 대한 한계 온도를 구하여 최대온도와 비교하였다. 더불어, Fire resistance 측면에서의 두 접근방식의 비교를 통해서 두 방식의 등가적 성향을 확인하였다. 여기서 Strength, Serviceability, Stability의 세 가지 측면에서 First Hinge, Large Deflection, Buckling의 세 가지 파괴모드를 상정하고 각각에 대한 파괴여부를 확인하였고, 이렇게 구해지는 Fire severity와 Fire resistance의 식에 AFOSM 방법을 적용하여 최종적으로 부재의 파괴확률을 구하는 방식을 통해, 단순 부재인 Beam 및 Plate 예제에 적용하여 구조물의 화재시 거동 및 각 파괴모드에 대한 파괴여부를 구하였다.

Abstract This paper describes the behavior and failure probability of the basic structural members in a fire for the fire safety assessment of offshore structures. A fire safety assessment can be accomplished by comparing the fire resistance of the members with the fire severity of the heat load due to fire. The fire severity is represented as the maximum temperature of the members using the Eurocode 1 standard fire curve and heat transfer equation. On the other hand, the fire resistance is the limiting temperature calculated by a simplified formula in the case of simple structural members. Considering the complexity of FPSOs and offshore structures, a general-purpose structural analysis program should be used and the limiting temperature obtained by analyzing the structural strength of the member through an elasto-plastic analysis with large deflection, and compared with the maximum temperature. Also, the equality of these two methods of evaluating the fire resistance was confirmed by comparing them. Following three criteria, the strength, serviceability and stability, three failure modes, namely the first failure of a hinge, large deflection and buckling, were chosen. The failure temperature was verified for each failure mode. using the AFOSM method in the equation of the fire severity and fire resistance, thereby giving the failure probability of the member. By applying these processes to the example of a beam and plate, the behavior of the structure and failure (temperature?) of each failure mode can be determined.

Keywords : AFOSM method, Failure Probability, Fire Safety Assessment, Fire Severity, Fire Resistance

1. 서론

기 위한 FPSO(Floating Production Storage and Offloading)나 자켓(Jacket) 구조물 등의 해양플랜트 관

석유 및 천연가스의 수요의 증가에 따라, 이를 채취하

*Corresponding Author : Chang-Kyu Park(VISION University, College of Jeonju)

Tel: +82-63-220-4095 email: ckpark@jvision.ac.kr

Received September 1, 2017

Revised September 22, 2017

Accepted October 13, 2017

Published October 31, 2017

런 해양 구조물들 또한 점차 증가하고 있는 추세이다. 이에 따라, 빈번한 해상사고가 발생하게 되고 특히, H&SE의 조사보고서[1]에 의하면 해상사고 중,

유류의 누출에 의한 사고가 48%, 화재나 폭발에 의한 사고가 8%를 차지하고 있고, 점점 증대되고 있는 해양 구조물에서 화재 및 폭발의 위험요소 및 원인을 파악하고 그에 따른 파괴 및 붕괴요소의 원인을 파악하고 그에 따른 파괴 및 붕괴요소의 원인을 예방하는 것이 무엇보다도 시급하다고 판단된다. 화재에 의한 구조물의 안전성에 관한 연구는, 주로 육상 건축 분야에서 활발하게 이루어지고 있으며, 건축물에 대한 화재안전설계 규정으로는 ISO 834[2], ASTM E119 [3], Eurocode 1 [4] 등이 현재 실제 건축물에 대하여 적용되고 있다. 그러므로 이러한 규정들을 기반으로 하여 화재 시 보(Beam) 및 판(Plate) 구조물 등에 적용하여 해양구조물에 대한 기초 연구 자료로 활용하고자 한다.

2. 화재안정성 평가

구조물에 화재가 발생했을 경우, 그에 대한 구조 안전성 평가를 위해서는, 신뢰성 이론의 기본 개념인 요구 및 능력(Demand & Capability) 방법에 입각하여 화재 시 구조강도 안전 평가 극한상태 방정식을 유도하였고, 화재의 심각한 정도(Fire Severity)와 구조물이 화재에 견디는 정도(Fire Resistance)를 화재 시 구조물의 안전성을 평가하는데 필수적인 요소로 가정하였다[5]. Fire Severity를 구하기 위해서는 먼저 구조물에 가해지는 열 하중이 어떤 양상을 보이는지 알아야 한다. 이를 위해 ISO 834, ASTM E119, Eurocode 1 등의 표준에서 정의된 표준화재(Standard Fire)를 참조하여 열 하중을 구하고, 이렇게 얻어진 열 하중을 활용하고 부재로의 열전달 방정식을 통해 부재의 온도변화 곡선을 얻어내는 것이 Fire Severity의 주요한 과정이다. 본 연구에서는 화재로 인한 부재의 파괴여부 판정을 목적으로 하고 있으므로, 안정성 평가(Safety Assessment) 과정에서 Fire

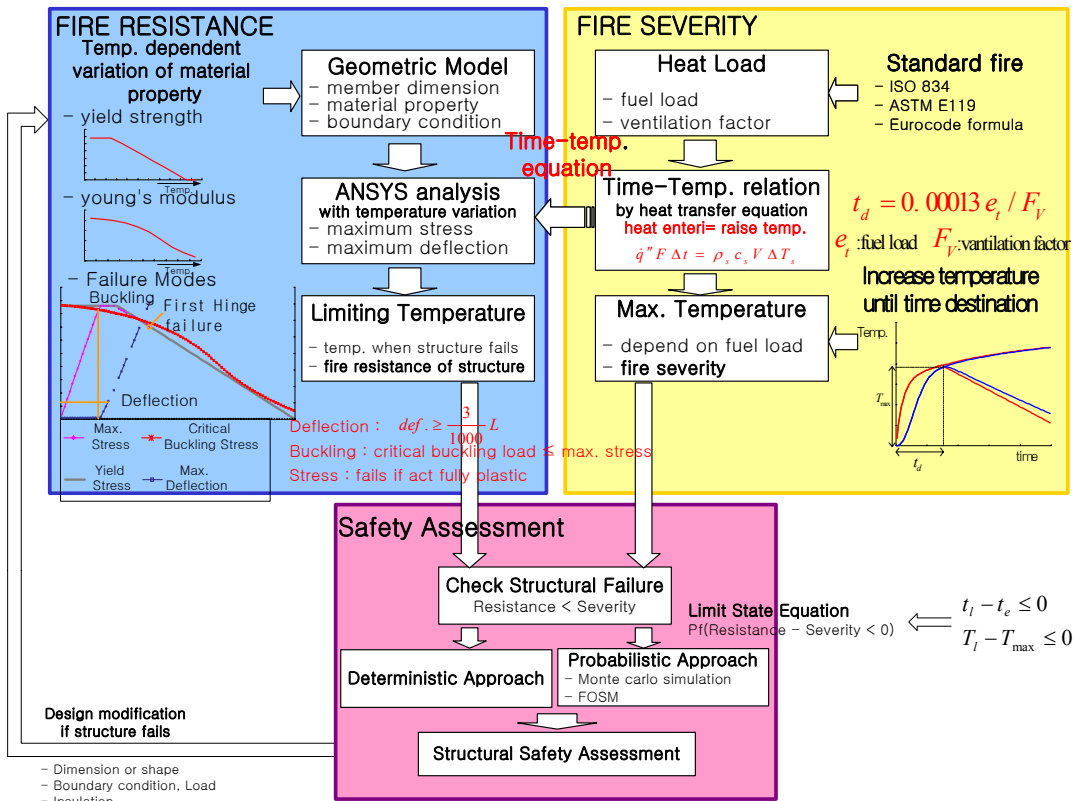


Fig. 1. Overview of fire safety assessment

Resistance와의 비교를 위해 온도변화 곡선에서 구해진 부재의 최대온도가 Fire Severity 값이 된다. 다음으로 Fire Resistance를 구하기 위해서는 먼저 구조물의 형상을 모델링 한 후 온도에 따른 재료의 물성치, 경계조건 등을 결정하여, 이들을 바탕으로 구조물을 해석한 후, 온도에 따른 최대 응력과 최대 변위 등의 부재의 거동 양식을 파악토록 하였다. 이러한 방식으로 구해진 파괴 모드 온도가 Fire Resistance의 지표인 한계 온도가 된다. Fire Resistance와 Fire Severity를 서로 비교하면 구조물의 파괴여부를 알 수 있게 되는데, Fire Resistance가 Fire Severity 보다 작을 경우 구조물이 파괴된다는 조건식을 결정론적(Deterministic) 또는 확률론적(Probabilistic) 방법으로 평가하여 구조적 화재 안전성 여부의 평가가 수행된다. 참고로 파괴를 정의하는 방식에는 일반적으로 온도, 온도에 도달하는 데 소요되는 시간, 파괴에 해당하는 구조적 양식 등 3 가지 기준이 존재할 수 있으며, 본 연구에서는 모든 기준을 온도 관점에서 기술하였다.

2.1 Fire Severity

2.1.1 Standard Fire

화재 실험을 통하여 Fire Resistance를 측정할 때 사용되는 시간과 온도의 상관관계를 ‘Standard Fire’ 라고 한다[Fig. 2]. 각 국가별로 이에 대한 표준을 정하고 있지만 이러한 대부분의 표준은 ASTM E119와 ISO 834의 표준을 근거로 하여 정의된다.

2.1.2 Parametric Fire

화재 발생장소의 연료가 한정되어 있는 경우, 연료가 모두 소모되면 공간 내의 가스 온도는 내려가게 된다. 연료의 공급이 무한대로 공급되는 이상적인 상태가 Standard Fire라 한다면, 실질적인 화염의 온도와 시간관계를 표현하는 Parametric Fire가 이후 모든 과정에 기준의 역할을 담당한다. 이는 e_t (fuel load), F_v (ventilation factor), $t^* = \Gamma t$ (fictitious time) 등에 의해 결정된다. Fig. 3은 2 가지 타입(Buchanan, EC1)의 Parametric Fire의 시간-온도 상관관계를 나타내었다.

2.1.3 열전달 방정식

화재가 발생한 상황에서, 부재 주변의 공기가 모두 균

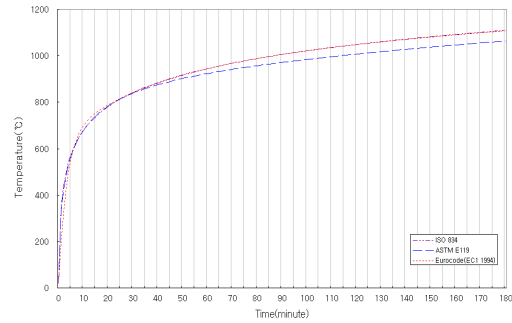


Fig. 2. General shape of standard fire

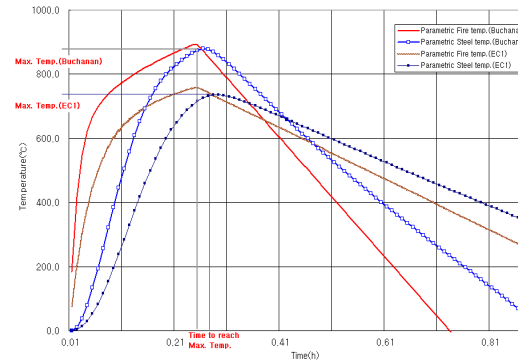


Fig. 3. Several parametric fire

일한 온도 $T_f(K)$ 이고, 부재 전체의 온도가 균일하게 $T_s(K)$ 라 하고, 전도 및 대류에 의해 부재가 받는 에너지는 $h_c(T_f - T_s)F \cdot \Delta t$, 복사에 의해 부재가 받는 에너지는 $\sigma\epsilon(T_f^4 - T_s^4)F \cdot \Delta t$ 가 되며, 마지막으로 흡수된 총 에너지량은 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\dot{q}'' F \cdot \Delta t = \{h_c(T_f - T_s) + \sigma\epsilon(T_f^4 - T_s^4)\} F \cdot \Delta t \quad (1)$$

여기서, \dot{q}'' 는 단위표면 당 열전달량(W/m^2), F 는 부재의 표면적(m^2)이고, h_c 는 대류에 의한 열전달 계수(W/m^2K), σ 는 Stefan-Boltzman 상수($56.7 \times 10^{-12} k W/m^2 K^4$), ϵ 은 resultant emissivity를 의미한다. 흡수된 에너지와 부재의 온도를 올리기 위한 에너지는 같아야 하므로 $\dot{q}'' F \cdot \Delta t = \rho_s c_s V \cdot \Delta T_s$ 가 성립되어야 한다. 여기서, ρ_s 는 부재의 밀도(kg/m^3), c_s

는 부재의 비열(J/kgK), V 는 부재의 체적(m^3)이며, 부재의 온도 상승은 다음 식(2)와 같이 표현된다.

$$\Delta T_s = \frac{F}{V} \frac{1}{\rho_s c_s} \{h_c (T_f - T_s) + \sigma \epsilon (T_f^4 - T_s^4)\} \Delta t \quad (2)$$

여기서, 온도에 따른 비열의 변화를 반영해야 하는 C_s 는, Eurocode 3에 의해 온도에 따른 강(Steel)의 비열값을 반영하여 다음 식(3)과 같이 표현된다.

$$C_s (J/kgK) = 425 + 0.773 T_s - 1.69 \times 10^{-3} T_s^2 + 2.22 \times 10^{-6} T_s^3 \quad (3)$$

, $20^\circ\text{C} \leq T_s < 600^\circ\text{C}$
 = $666 + 13002/(738 - T_s)$, $600^\circ\text{C} \leq T_s < 735^\circ\text{C}$
 = $545 + 17820/(T_s - 731)$, $735^\circ\text{C} \leq T_s < 900^\circ\text{C}$
 = 650 , $900^\circ\text{C} \leq T_s < 1200^\circ\text{C}$

Table 1은 부재의 온도 변화량을 추정하는 과정에서 부재가 화재로부터 영향을 받게 되어 최대의 상승 온도 (T_s)_{max}을 구하는 과정과 상온에서 출발하여 ΔT_s 값을 누적하여 최대값을 구하는 과정을 나타내었다.

2.2 Fire Resistance

상용프로그램인 ANSYS를 사용한 구조해석 과정을 통해, 실제로 온도에 따른 구조응답을 얻어서 파괴에 이르는 한계 온도(Limiting Temperature)를 구하는 과정으로, 온도에 따른 허용 응력의 감소와 Young's modulus의 변화를 구해야 한다.

본 연구에서는 Young's modulus의 변화는 NZS 3404[6]의 규정을 참고하여 다음과 같은 관계가 있다고 가정하였다.

$$k_{E,T} = 1.0 + T_s / [2000 \ln(T_s / 1100)] \quad , 0^\circ\text{C} < T_s \leq 600^\circ\text{C}$$

$$= 690(1 - T_s / 1000) / (T_s - 53.5) \quad , 600^\circ\text{C} < T_s \leq 1000 \quad (4)$$

여기서, $k_{E,T} = E_T / E_{20^\circ\text{C}}$, E_T : 부재의 온도

$T_s = T$ 일 때의 Young's modulus

$E_{20^\circ\text{C}}$: 온도 20°C 일 때의 Young's modulus

한편, 부재의 허용응력의 경우 NZS 3404의 규정에 따라 다음과 같이 정하였다.

$k_{y,T} = (905 - T_s) / 690$ for structural steel

$k_{y,T} = (720 - T_s) / 470$ for reinforcing steel

$k_{y,T} = (700 - T_s) / 550$ for prestressing steel

단, $0 \leq k_{y,T} \leq 1.0$

여기서, $k_{y,T} = \sigma_{y,T} / \sigma_{y,20}$, $\sigma_{y,20}$ 는 20°C 에서의 Yield strength, $\sigma_{y,T}$ 는 부재의 온도 $T_s = T(^\circ\text{C})$ 일 때의 항복 강도(Yield strength)이다[7][Fig. 4].

한편, 각 온도에 따른 Stress-Strain 관계를 조사해 보면 Fig. 5와 같으며 이와 같이 모든 Stress-strain curve를 공식화하기가 번거로우므로 각 온도에서의 관계를 모두 Perfect Plastic 관계로 근사하여 사용하였다. 온도의 상승에 따라서 부재의 응력은 Perfect Plastic 관계로 근사하여 사용하였다. 온도의 상승에 따라서 부재의 응력은 Perfect Plastic 가정에 의해 허용응력 이상으로 증가하지 못하게 되므로 Fig. 4의 허용응력 감소 선을 따라 하강하게 된다. 어느 순간에 이르러서는 부재가 First Hinge점에 도달하게 되는데 이를 응력에 의한 파괴로 규정하였다.

Table 1. Calculation of member temperature

Time	Steel temperature T_s	Fire temperature T_f	Temperature Difference $T_f - T_s$	Change in steel temperature ΔT_s
$t_1 = \Delta t$	Initial steel temperature T_{s0}	Standard fire at $t = \Delta t / 2$	$T_f - T_{s0}$	Calculated from Heat transfer Equation : ΔT_{s0}
$t_2 = t_1 + \Delta t$	$T_{s1} = T_{s0} + \Delta T_{s0}$	at $t = t_1 + \Delta t / 2$	$T_f - T_{s1}$	ΔT_{s1}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

본 연구에서는 Strength의 기준이 되는 응력 이외에도 구조물의 Serviceability[8]에 영향을 주는 변위와 구조 안정성(Structural Stability)에 직접적인 영향을 주는 좌굴을 포함하여 3-S의 파괴모드를 고려하였다. Fig. 6은 3가지 파괴모드를 모두 고려한 해석과정을 나타내었다.

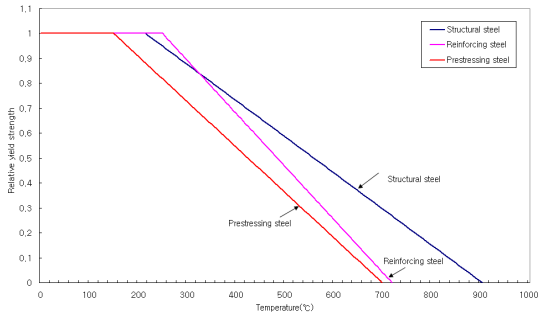


Fig. 4. Reduction in yield strength with temperature

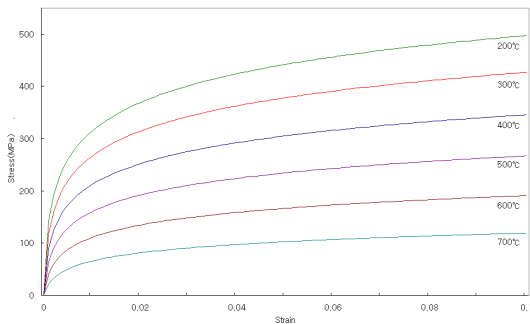


Fig. 5. Stress-strain curves for steel at elevated temperature

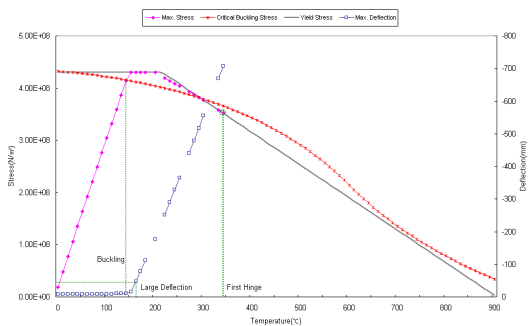


Fig. 6. Failure mode of element - first hinge, large deflection, buckling

2.3 한계상태 방정식의 구성

만일 부재가 견딜 수 있는 온도 T_{lim} 보다 화재에 의해 부재가 도달하는 최고 온도 T_{max} 가 크다면, 이 부재는 파괴될 것이다. 따라서 한계상태식은 다음과 같이 나타내 진다[9].

$$P_f = P(R - S \leq 0) = P(T_{lim} - T_{max} \leq 0) \quad (5)$$

부재의 온도변화 곡선에서 얻어지는 최대온도 T_{max} 와 경험식 혹은 해석 모듈에 의해 구해진 한계온도 T_{lim} 을 대입하여 최종 파괴에 대한 판정을 하게 된다.

2.4 일계이차모멘트법(AFOSM: Advanced First-Order Second-Moment Method)[10]

Hasofer와 Lind[11]에 의해 제안된 개선된 일계이차모멘트법(AFOSM : Advanced First-Order Second-Moment method)은 기본적으로 MPFP(Most Probable Failure Point)를 찾는 과정은 다음 식 (6)과 같은 전형적인 최적화 과정으로 MPFP를 적당한 수렴범위 안에서 반복하여 갱신하는 방법을 사용하게 된다[12].

$$\begin{aligned} \text{minimize } \beta &= \sqrt{u^T u} \\ \text{subjected to } g(u) &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

3. 해석 예

본 연구에 적용된 해석 예는 열응력이 작용될 수 있도록 양단을 종 방향으로 구속시켰으며, 대 변형과 Perfect Plastic 가정을 통한 탄소성 해석을 수행하였다. 또한 신뢰성 해석을 위해서 다음과 같은 확률변수를 설정하였다.

Fuel Load는 연소될 연료의 양으로, 단위면적당 가연성 소재의 양을 MJ/m^2 단위로 나타내었다. 또한 Ventilation factor는 공간에서 외부로의 공기의 순환에 의한 화재 온도의 영향을 나타내는 지표이다. Thermal inertia는 동일한 열원에 대하여 공간 온도가 얼마나 빨리 올라가는가의 지표이며, 이상의 세 확률변수는 화재

에 의한 온도변화, 즉 Fire Severity와 관계된 변수이다. 한편, 평판 형상비와 보부재의 길이는 각각 구조부재의 구조강도, 즉 Fire Resistance와 관계된 변수이고, 나머지 네 변수는 재료가 가지는 고유의 물성치이다. 제시된 모든 확률변수는 표준정규분포의 성향을 가진다고 가정하였으며 각각의 변동 범위는 Table. 2에 나타내었다.

Table 2. Random Variables used at the examples

Probabilistic variable	Mean value	Covariance
Fuel Load(e_f)	330.0	-10% - 10%
Ventilation(F_v)	0.04517	-10% - 10%
Plate Aspect Ratio(a/b)	1($a = 1m$)	-1% - 1%
Beam 길이(l)	0.92	-1% - 1%
Thermal inertia(θ)	1,160	-10% - 10%
Steel density(δ)	7,850	-0.5% - 0.5%
Specific heat(h)	600	-5% - 5%
Young's modulus(E)	2.058e11	-10% - 10%
Yield stress(σ_Y)	3.15×e ⁸	-10% - 10%

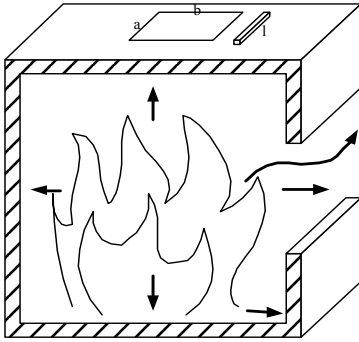


Fig. 7. Modeling of room fire

Fig. 7은 이상적인 공간에서 화재가 발생하였을 때 공간을 구성하는 기본적인 부재인 보와 평판의 거동을 알아보기 위한 모델이다. 평판 구조물은 상부의 구조물에 의해 $100kN/m^2$ 의 압력을 받고 있고, 보 구조물은 $6876.64N/m$ 의 압력을 받고 있는 것으로 가정하며 두 부재 모두 단순지지(Simple Support)의 경계조건을 가지며, 평판의 경우 4 면 모두 단순지지 경계조건을 가진다고 가정하였고[13], 한계 상태 방정식은 다음과 같이 구성된다.

$$P_f = P(T_{lim}(a/b, l, E, \sigma_Y, h) - T_{max}(e_f, F_v, \theta, \delta) \leq 0) \quad (7)$$

T_{max} 의 경우 계산비용이 비교적 적게 소요되는 과정이므로 근사 방안을 고려하지 않았지만, T_{lim} 의 경우, Implicit한 함수이고 계산비용이 소비되는 과정이므로 MPP를 구하는 과정에서 RSM(Response Surface Method)을 사용하였고, 2차 근사식은 다음 식(8)과 같다.

$$T_{lim}^{approx.} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 \quad (8)$$

beam case: $i = 4, x_1 = l, x_2 = E, x_3 = \sigma_Y, x_4 = h$

plate case: $i = 4, x_1 = a/b, x_2 = E, x_3 = \sigma_Y, x_4 = h$

계수를 구하기 위한 표본점 선정법은 Bucher-Bourgund법[14]을 사용하며, 위 식으로 구성된 간단한 형태의 연립방정식을 구성하여 미정계수를 구하였다.

3.1 Beam Example

Fig. 8에 나타낸 보 예제의 경우, 두 가지 파괴모드(Strength, Serviceability)로 한정된 한계상태 방정식을 구성하였으며 변위의 경우, 최대변위값이 $5 \cdot 10^{-3}m$ 를 넘어가는 경우를 파괴로 규정하였다.

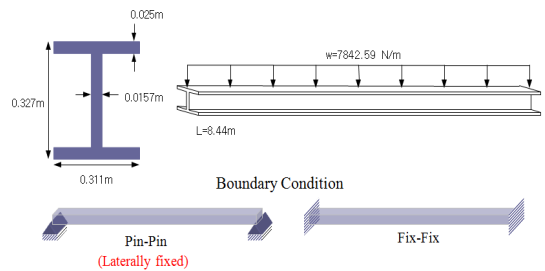


Fig. 8. Geometric & Boundary conditions for beam example

Fig. 9는 모든 확률변수가 평균값을 가질 때 온도 변화에 따른 응력과 변위의 변화추이를 나타내었다. 상온에서의 정적하중으로 인한 응력은 $(2.94 \times 10^5 N/m^2)$ 이었으며 온도가 상승하면서 허용응력이 급속하게 증가하다가 대략 $250^\circ C$ 를 넘어가면서 감소하는 경향을 나타내었으며, 이에 따라 평균치에서의 한계 온도(limiting

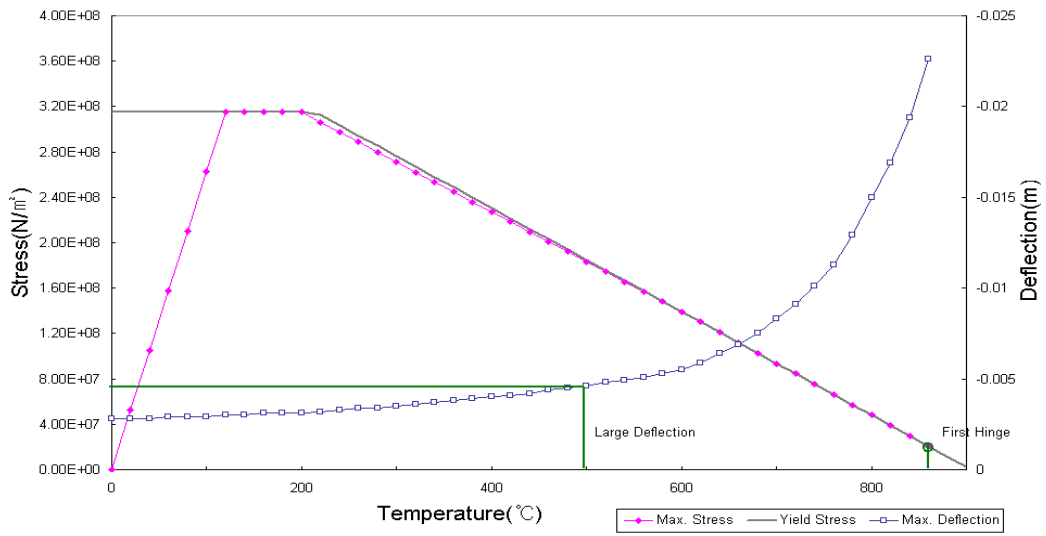


Fig. 9. Stress and Deflection of beam

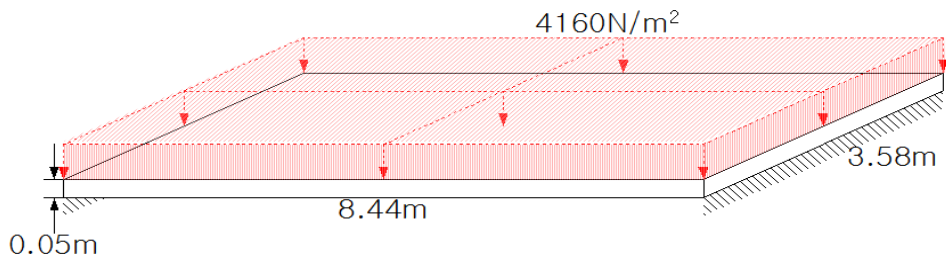


Fig. 10. Plate model and boundary condition

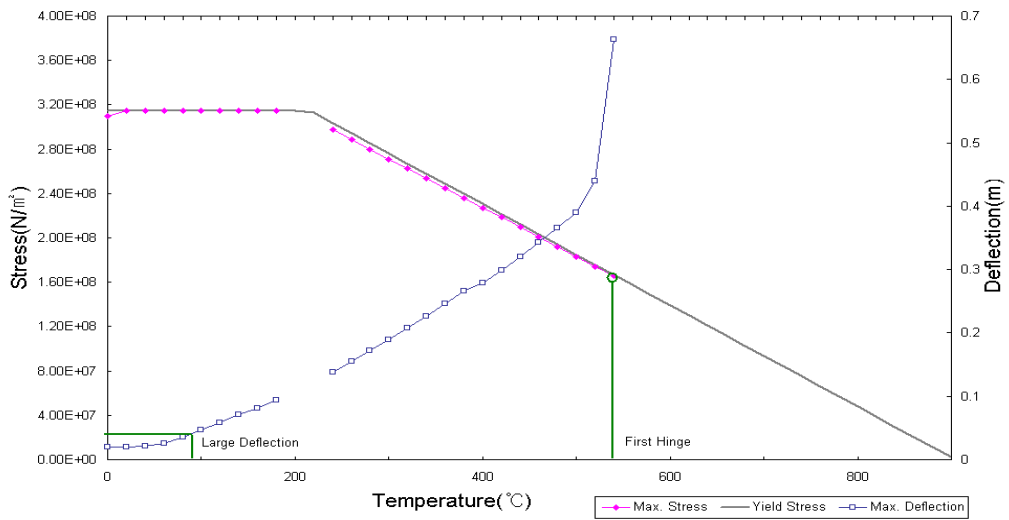


Fig. 11. Stress and Deflection of plate

Temperature)이다. 파괴 변위의 경우, 해당 문제와 모델링 혹은 규정에 따라 변할 수 있는 값이다. 이와 같은 과정과 설정으로 AFOSM[9]을 이용하여 파괴확률을 구해보았다. 본 예제의 경우, ANSYS상용 해석 프로그램과 연동하여서 평균 25.4초의 계산비용이 소모되었으며, 총 12번의 함수 호출을 통해서 파괴확률을 구하였다. 위와 같은 조건하에서는 보 부재가 파괴될 확률은 $P_f = 1.55 \times 10^{-1} (\beta = 1.0151)$ 로 나타났다.

3.2 Plate Example

평판의 경우도 First Hinge에 해당하는 온도를 Limiting Temperature로 삼았으며, 최대 변위가 ($3 \cdot 10^{-1}m$)일 때를 Serviceability의 한계로 삼았다. 계산비용은 함수 호출에 32초가 소비되었으며 총14번의 함수 호출이 발생되었다. 평판의 경우 상온에서의 정적 하중이 크게 작용하였으며 온도의 상승과 동시에 바로 허용 응력에 도달하였으며, 250℃ 근처에서 허용응력의 변화가 반영된다.

위와 같은 조건하에서의 평판 부재가 파괴될 확률은 $P_f = 4.5793 \times 10^{-7} (\beta = 4.91)$ 로 나타났다.

4. 결론

본 연구는 전통적으로 건축분야에서 사용되는 화재안전성 평가방법을 해양플랜트 구조물에 적용하기 위한 기초단계로 활용하기 위해, 기본 부재의 안전성 평가방법을 정립하여, 파괴확률을 계산하였고, 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 화재가 구조물에 미치는 영향을 정확하게 반영시키기 위해서는 해당 온도가 구조 재료 성질(비열, Young's modulus, Yield Stress 등)에 미치는 영향을 파악해야 하고, 대 변형 및 응력-변형율의 비선형성을 포함한 탄소성 해석 등의 고려가 필수적임으로 이를 비교적 정확하게 반영시킬 수 있는 상용 구조해석 프로그램[8]과의 연동을 고려해야 했다.
2. Strength, Serviceability, Stability의 3-S의 관점에서 3 가지 파괴모드에 대한 구조 안전성 평가를 수행하였다. 구조적 안전성의 평가는 각 파괴모드에서 가장 우선시 발생하는 파괴를 구조물의 파괴기준으로 삼았다.

3. 파괴기준을 확률론적인 기준으로 판단하기 위해 화재가 구조부재에 영향을 줄 수 있는 다양한 확률변수를 산정하고 이들이 구조물 파괴에 미치는 영향과 해당 조건에서의 화재에 의한 파괴확률을 산출하였고, 보 및 평판부재의 파괴확률은 각각 $P_f = 1.55 \times 10^{-1} (\beta = 1.0151)$, $P_f = 4.5793 \times 10^{-7} (\beta = 4.91)$ 로 나타났다.

References

- [1] Martin Muncer, "Analysis of accident statistics for floating monohull and fixed installation", Health and Safety Executive Research Report, 2003.
- [2] ISO 834, Fire-resistance Tests: Elements of Building Construction, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1999.
- [3] ASTM E119, Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [4] Eurocode 1, Basis of Design and Actions on Structures, EUROCODES, 1992.
- [5] Andrew H. Buchanan, "Structural Design for Fire Safety", John Wiley & Sons, 2001.
- [6] SNZ, Steel Structures Standard: Part 1 and 2, including 2007 amendment, Standards New Zealand, Wellington, 1997.
- [7] Silwood Park, "Methodologies and Available Tools for the Design/Analysis of Steel Components at Elevated Temperatures", Health and Safety Executive, 2002.
- [8] Feasey, R. and Buchanan, A.H., "Post-flashover fires for structural design", Fire Safety Journal, vol. 37, no. 1, pp. 83-105, 2002.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(01\)00026-1](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(01)00026-1)
- [9] John Kee Sing Wong, "Reliability of Structural Fire Design", School of Engineering, University of Canterbury, 1999.
- [10] Lee, Jae-Ohk; Rho, Jun-Bumn, "A Study on the Design Sea-state Determination Using the IFOSM Method", Journal of the Society of Naval Architects of Korea ,vol. 47, no. 3, pp.447-453, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.3744/SNAK.2010.47.3.447>
- [11] A. M. Hasofer, N.C. Lind, "Exact and invariant second-moment code format", J. of the Engineering Mechanics Division, ASCE, vol. 100, no 1, pp.111-121, 1974.
- [12] Y. S. Yang, Y. S. Suh, J. O. Lee, "Structural Reliability Engineering", Seoul National University Press, 1999.
- [13] Jenny Seputro, "Effect of Support Conditions on Steel Beams Exposed of Fire", Department of Civil Engineering, University of Canterbury, 2001.
- [14] Tae-Jun Cho, Lee-Hyeon Kim, and Hyo-Nam Cho, "Development of Deterioration Prediction Model and

Reliability Model for the Cyclic Freeze-Thaw of Concrete Structures”, Journal of the Korea Concrete Institute, vol. 20, no. 1, pp. 13-22, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.4334/JKCI.2008.20.1.013>

박 창 규(Chang-Kyu Park)

[정회원]



- 2007년 8월 : 서울대학교 조선해양공학과(공학박사)
- 2007년 9월 ~ 2008년 8월 : 서울대학교 해양시스템공학연구소 선임연구원
- 2008년 11월 ~ 2009년 2월 : LG전자 선임연구원
- 2009년 3월 ~ 현재 : 전주비전대학교 조선해양과 교수

<관심분야>

구조설계, 다분야통합최적설계(MDO), CAD/CAE