

화재 구조강도에 대한 신뢰성 평가방법의 정립

Formulation of Fire Reliability Assessment Method for Structural Strength

양 영 순*
Yang, Young-Soon

유 원 선**
Ruy, Won-Sun

이 상 업***
Lee, Sang-Yeop

ABSTRACT

This study describes the behavior and failure probability of basic structural member in case of fire for the research of safety assessment on offshore structure. Fire safety assessment can be done by comparing *fire resistance* of members with *fire severity* of heat load. For more practical applications, the commercial structural analysis program is linked with the in-house code and gets the limiting temperature by analyzing structural strength of member with elasto-plastic analysis and large deflection analysis. AFOSM method is utilized to obtain the failure probability against the fire. The examples of rather simple structures such as beams and plates are applied to explain and verify the procedure of fire safety assessment.

1. 서 론

석유 및 천연가스의 수요의 증가에 따라, 이를 채취하기 위한 FPSO나 자켓 구조물 등의 해상 구조물들 또한 점차 증가하고 있는 추세이다. 이에 따라, 빈번한 해상사고가 발생하게 되고 특히, H&SE의 조사보고서에 의하면 해상사고 중, 유류의 누출에 의한 사고가 48%, 화재나 폭발에 의한 사고가 8%를 차지하고 있다.¹⁾ 예를 들어, Piper-Alpha(1988)와 Petrobras(2001) 등의 대형 해양 구조물 폭발 사고에서도 볼 수 있었던, 해당 사고에 대하여 수많은 인명피해와 상당한 자산손실이 발생함을 확인할 수 있다. 따라서 점점 증대되고 있는 해양구조물에서 화재 및 폭발의 위험요소 및 원인을 파악하고 그에 따른 파괴 및 붕괴요소의 원인을 예방하는 것이 무엇보다도 필요하다. 화재에 의한 구조물의 안전성에 관한 연구는, 주로 육상 건축 분야에서 활발하게 이루어지고 있으며 본 연구에서도 이들을 활용하고 있다. 건축물에 대한 화재안전설계 규정으로는 ISO 834(ISO, 1975), ASTM E119(ASTM, 1988), BS 476 Parts 20~23(BSI, 1987), Eurocode 1(EC1, 1994) 등이 현재 실제 건축물에 대하여 적용되고 있다. 그러므로 이러한 규정들을 기반으로 하여 화재 시 보, 판 및 셸 구조물 등에 적용하여 해양구조물에 대한 기반 연구 자료로 활용코자 한다.

* 책임저자, 정회원 · 서울대학교 조선해양공학과 교수
(Tel) 02-880-7330, (Fax) 02-888-9298, (E-mail) ysyang@sis1.snu.ac.kr

** 서울대학교 조선해양공학과 연구원

*** 서울대학교 조선해양공학과 연구원

2. 화재 안전성 평가

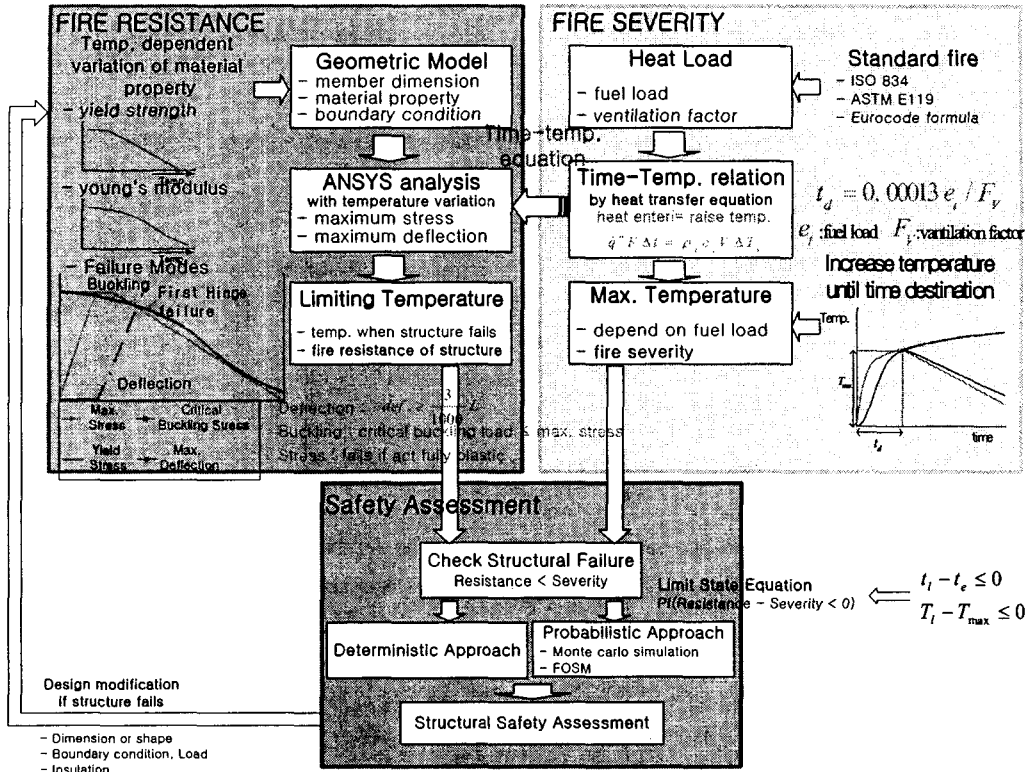


Figure 1 Overview of Fire Safety Assessment

구조물에 화재가 발생했을 경우, 그에 대한 구조 안전성 평가를 위해서는, 신뢰성 이론의 기본 개념인 Demand & Capability 방법에 입각하여 화재시 구조강도 안전 평가 극한상태 방정식을 유도하도록 하였다. 우선 화재의 심각한 정도(Fire Severity)와 구조물이 화재에 견디는 정도(Fire Resistance)를 화재시 구조물의 안전성을 평가하는데 필수적인 요소로 가정하였다.²⁾ Fire Severity를 구하기 위해서는 먼저 구조물에 가해지는 열하중이 어떤 양상을 보이는지 알아야 한다. 이를 위해 ISO 834, ASTM E119, Eurocode 1 등의 표준에서 정의된 Standard Fire를 참조하여 열하중을 구하고, 이렇게 얻어진 열하중을 활용하고 부재로의 열전달 방정식을 통해 부재의 온도변화 곡선을 얻어내는 것이 Fire Severity의 주요한 과정이다. 본 연구에서는 화재로 인한 부재의 파괴여부 판정을 목적으로 하고 있으므로, Safety Assessment 과정에서 Fire Resistance와의 비교를 위해 온도변화 곡선에서 구해낸 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 구해낸 파괴모드 온도가 Fire Resistance의 지표인 한계 온도가 된다. Fire Resistance와 Fire Severity를 서로 비교하면 구조물의 파괴여부를 알 수 있게 되는데, Fire Resistance가 Fire Severity보다 작을 경우 구조물이 파괴된다는 조건식을 Deterministic 또는 Probabilistic한 방법으로 평가하여 구조적 화재 안전성 여부의 평가가 수행된다. 참고로 파괴를 정의하는 방식에는 일반적으로 온도, 온도에 도달하는 데 소요되는 시간, 파괴에 해당하는 구조적 양식 등이 3 가지 기준이 존재할 수 있다. 본 연구에서는

모든 기준을 온도 관점에서 기술하고 있다.

2.1 Fire Severity

2.1.1 Standard Fire

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

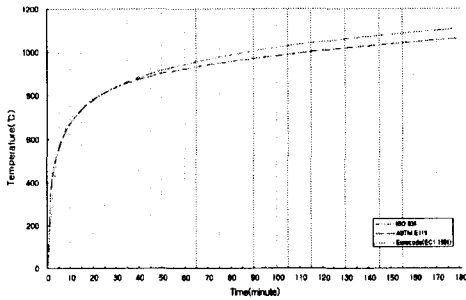


Figure 2 General Shape of Standard Fire

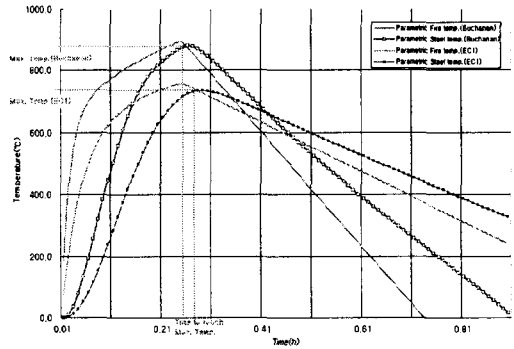


Figure 3 Several Parametric Fire

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. Figure 3은 2 가지 타입(Buchanan, EC1)의 Parametric Fire의 시간-온도 상관관계를 보여주고 있으며, 추가적으로 다음 절에 설명될 화재로 인한 부재의 온도 상승 추이를 설명하고 있다.

2.1.3 열전달 방정식

화재가 발생한 상황에서, 부재 주변의 공기가 모두 균일한 온도 T_f (K)이고, 부재 전체의 온도가 균일하게 T_s (K)라 하고, 전도 및 대류에 의해 부재가 받는 에너지는 $h_c(T_f - T_s)F \cdot \Delta t$, 복사 에 의해 부재가 받는 에너지는 $\sigma\epsilon(T_f^4 - T_s^4)F \cdot \Delta t$ 가 되며, 마지막으로 흡수된 총 에너지량은 다음과 같이 나타내 진다.

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

여기서, 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 ($56.7 \times 10^{-12} kW/m^2K^4$), ϵ 은 resultant emissivity를 의미한다. 흡수된 에너지와 부재의 온도를 올리기 위한 에너지는 같아야 하므로 $q''F \cdot \Delta t = \rho_s c_s V \cdot \Delta T_s$ 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)이다. 결국 부재의 온도 상승은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

열전달식을 통해 정확한 부재의 온도를 구하고자 한다면 온도에 따른 비열의 변화를 반영해야 한다. Eurocode 3에서는 온도에 따른 steel의 비열값을 다음과 같은 식에 의해 제시하고 있다.

$$\begin{aligned} c_s (J/kgK) &= 425 + 0.773 T_s - 1.69 \times 10^{-3} T_s^2 + 2.22 \times 10^{-6} T_s^3 \\ &\quad 20^\circ\text{C} \leq T_s < 600^\circ\text{C} \\ &= 666 + 13002 / (738 - T_s) \quad 600^\circ\text{C} \leq T_s < 735^\circ\text{C} \\ &= 545 + 17820 / (T_s - 731) \quad 735^\circ\text{C} \leq T_s < 900^\circ\text{C} \\ &= 650 \quad 900^\circ\text{C} \leq T_s < 1200^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Table 1은 본 식을 이용해서 부재의 온도 변화량을 추정하는 과정을 나타내고 있다.

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}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

2.2 Fire Resistance

2.1절에서는 화재를 통해 부재에 미치는 최대온도를 산출하고 있다. 반면, 2.2절에서는 구조해석 과정을 통해, 실제로 온도에 따른 구조응답을 얻어서 파괴에 이르는 한계 온도(Limiting Temperature)를 구하는 과정을 설명한다. 이를 위해서는 온도 변화에 따른 구조물의 물성치 거동을 파악하는 것이 중요한데, 특히 온도에 따른 허용 응력의 감소와 Young's modulus의 변화는 구조물의 변형, 파괴와 밀접한 관계를 가진다. 본 연구에서 Young's modulus의 변화는 NZS 3404의 규정을 참고하여 다음과 같은 관계가 있다고 가정하였다.

$$\begin{aligned} k_{E,T} &= 1.0 + T_s / [2000 \ln(T_s / 1100)] \\ &\quad 0^\circ\text{C} < T_s \leq 600^\circ\text{C} \\ &= 690 (1 - T_s / 1000) / (T_s - 53.5) \\ &\quad 600^\circ\text{C} < T_s \leq 1000^\circ\text{C} \end{aligned}$$

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 AS4100과 NZS 3404의 규정에 따라 다음과 같이 정하였다.

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

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

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

단, $0 \leq k_{y,T} \leq 1.0$

여기서, $k_{y,T} = \sigma_{y,T}/\sigma_y$, σ_y 는 20°C에서의 Yield strength, $\sigma_{y,T}$ 는 부재의 온도 $T_s = T(°C)$ 일 때의 Yield strength이다.³⁾ (Figure 4 참조)

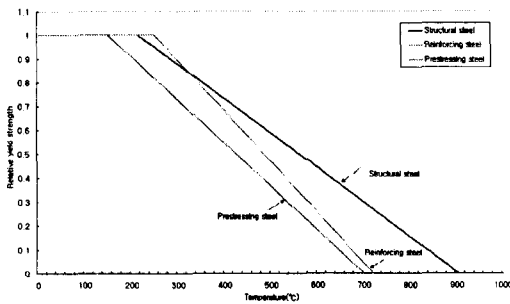


Figure 4. Reduction in yield strength with temperature

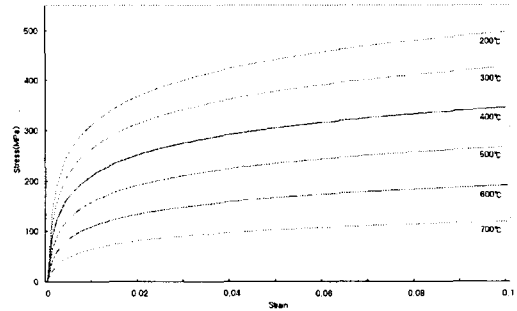


Figure 5. Stress-strain curves for steel at elevated temperature

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

본 연구에서는 Strength의 기준이 되는 용력 이외에도 구조물의 Serviceability⁴⁾에 영향을 주는 변위와 구조 Stability에 직접적인 영향을 주는 좌굴을 포함하여 3-S의 파괴모드를 고려하고 있다. Figure 6은 3가지 파괴모드를 모두 고려한 해석과정을 제시하고 있다.

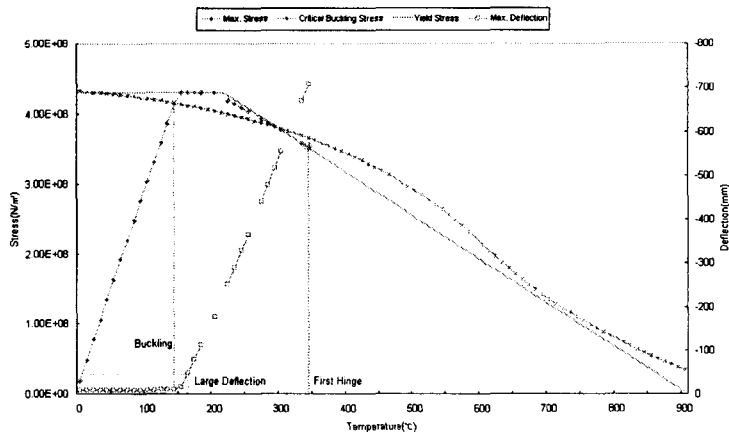


Figure 6. Failure mode of element - First Hinge, Large Deflection, Buckling

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.⁵⁾

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

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

3. 해석 예제

제시되는 모든 예는 열용력이 작용될 수 있도록 양단을 종방향으로 구속시켰으며, 대변형과 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 화재에 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 제시된다.

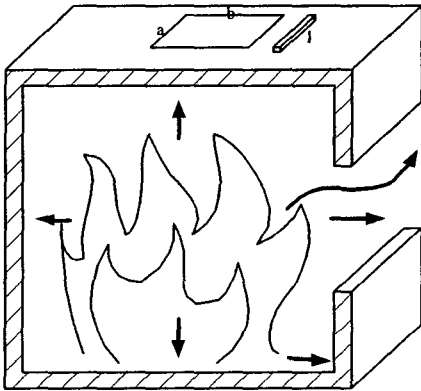


Figure 7. Modeling of room fire

Table 2. Random Variables used at the examples

확률변수	평균값	변동 범위
Fuel Load	330.0	-10% - 10%
Ventilation	0.04517	-10% - 10%
Plate Aspect Ratio	1 ($a = 1m$)	-1% - 1%
Beam 길이(l)	0.92	-1% - 1%
Thermal inertia	1160	-10% - 10%
Steel density	7850	-0.5% - 0.5%
Specific heat	600	-5% - 5%
Young's modulus	2.058e11	-10% - 10%
Yield stress	3.15e8	-10% - 10%

Figure 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 Simple Support의 경계조건을 가지며, 평판의 경우 4 면 모두 단순지지 경계조건을 가진다고 가정하였다.⁶⁾

3.1 Beam Example

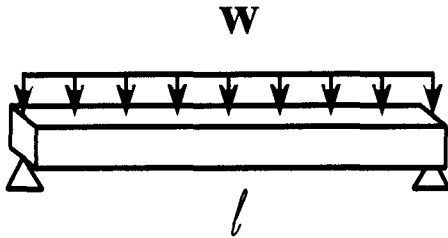


Figure 8. Beam model and boundary condition

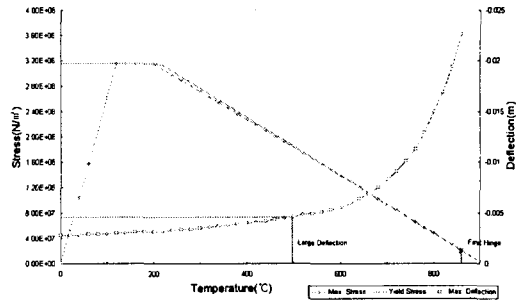


Figure 9. Stress and Deflection of beam

보 예제의 경우, 두 가지 파괴모드 (Strength, Serviceability)로 한정된 한계상태 방정식을 구성하였으며 변위의 경우, 최대의 그것이 $5 \cdot 10^{-3}m$ 를 넘어가는 경우를 파괴로 규정하였다. Figure 9는 모든 확률변수가 평균값을 가질 때 온도 변화에 따른 응력과 변위의 변화추이를 나타내고 있다. 상온에서의 정적하중으로 인한 응력은 ($2.94 \times 10^5 N/m^2$)이었으며 온도가 상승하면서 허용응력을 향해 급속하게 증가하게 되며 대략 250도를 넘어가면서 감소하게 되는 허용응력을 따라 최대 응력이 감소하게 된다. 참고로 Steel의 경우, 온도가 250까지는 온도에 따른 허용응력의 감소가 없다.(Figure 4참조) 이러한 경향으로 약 890도에서 모든 단면이 허용응력에 도달하게 되는 First Hinge점에 도달하게 되고, 이때의 온도가 확률변수 평균치에서의 한계 온도(limiting Temperature)라 지칭된다. 파괴 변위의 경우, 해당 문제와 모델링 혹은 규정에 따라 변할 수 있는 값이다. 이와 같은 가정과 설정으로 AFOSM⁷⁾을 이용하여 파괴확률을 구해보았다. 본 예제의 경우, 상용 해석 프로그램과 연동하여서 평균 25.4초의 계산비용이 소모되었으며, 총 12번의 함수 호출을 통해서 파괴확률을 구하였다. 위와 같은 조건하에서는 보 부재가 파괴될 확률은 $P_f = 1.55 \cdot 10^{-1}$ ($\beta = 1.0151$)로 나타났다.

3.2 Plate Example

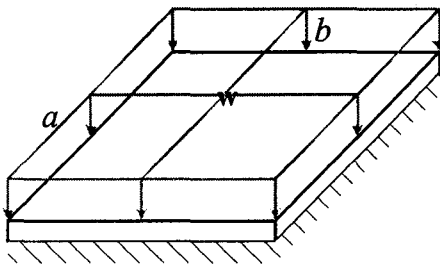


Figure 10. Plate model and boundary condition

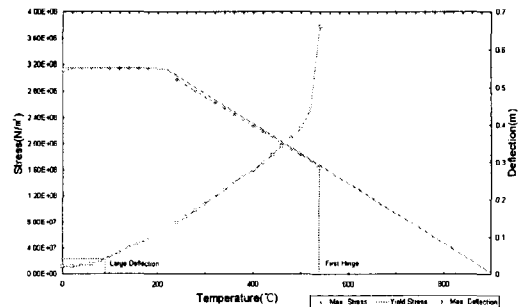


Figure 11. Stress and Deflection of plate

평판의 경우도 First Hinge에 해당하는 온도를 Limiting Temperature로 삼았으며, 최대 변위가 ($3 \cdot 10^{-1}m$)일 때를 Serviceability의 한계로 삼았다. 계산비용은 한번 함수 호출에 32초가 소비되었으며 총 14번의 함수 호출이 발생되었다. 평판의 경우 상온에서의 정적 하중이 크게 작용하였으며 온도의 상승과 동시에 바로 허용 응력에 도달하게 된다. 역시 250 근처에서 허용응력의 변화가 반영된다.

역시 AFOSM를 활용하여 파괴확률을 구해보았다. 위와 같은 조건하에서의 평균 부재가 파괴될 확률은 $P_f = 4.5793 * 10^{-7}$ ($\beta = 4.91$)로 나타났다.

4. 결론

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

첫째, 화재가 구조물에 미치는 영향을 정확하게 반영시키기 위해서는 해당 온도가 구조 재료 성질(비열, Young's modulus, Yield Stress 등)에 미치는 영향을 파악해야 하고, 대변형 및 응력-변형율의 비선형을 포함한 탄소성 해석 등의 고려가 필수적임으로 이를 비교적 정확하게 반영시킬 수 있는 상용 구조해석 프로그램⁸⁾과의 연동을 고려해야 했다.

둘째, Strength, Serviceability, Stability의 3-S의 관점에서 3 가지 파괴모드에 대한 구조 안전성 평가를 수행하였고, 이를 바탕으로 하여 주어진 상황에 대한 안전도를 구하여 재설계의 지표로 활용할 수 있었다. 구조적 안전성의 평가는 Strength 차원과 Stability 차원의 고려를 병행하였으며, 구조적인 재사용성이나 구조적인 형상적인 역할완수의 판단을 위해서 최대변위의 차원에서의 판단기준도 하나의 파괴모드로 산정하였다. 각 파괴모드에서 가장 우선시 발생하는 파괴를 구조물의 파괴기준으로 삼았다. 다만 제시된 예제에서는 좌굴에 관한 파괴모드는 생략되었다.

셋째, 지금까지 설명된 파괴기준을 확률론적인 기준으로 판단해 보기 위해서 화재가 구조부재에 영향을 줄 수 있는 다양한 확률변수를 산정하고 이들이 구조 파괴에 미치는 영향과 해당 조건에서의 화재에 의한 파괴확률을 산출하여, 일반적인 경우에도 그 유용성을 검토 하였다.

5. 후기

본 연구는 한국과학재단의 첨단조선공학 연구센터 와 삼성중공업의 지원과제에 의해 수행된 것으로, 관계자 여러분의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Martin Muncer(2003), "Analysis of accident statistics for floating monohull and fixed installation", Health and Safety Executive Research Report
2. Andrew H. Buchanan(2001), "Structural Design for Fire Safety", John Wiley & Sons
3. Silwood Park(1992), "Methodologies and Available Tools for the Design/Analysis of Steel Components at Elevated Temperatures", Health and Safety Executive
4. Feasey, R. and Buchanan, A.H.(2002), "Post-flashover fires for structural design", Fire Safety Journal, 37, 1
5. John Kee Sing Wong(1999), "Reliability of Structural Fire Design", School of Engineering, University of Canterbury
6. Jenny Seputro(2001), "Effect of Support Conditions on Steel Beams Exposed of Fire", Department of Civil Engineering, University of Canterbury
7. 양영순 외(1999), "구조 신뢰성 공학", 서울대학교 출판부
8. Swanson Analysis Systems(1994), "ANSYS User's Manual", Swanson Analysis Systems