

FPSO 소각탑의 복사열전달 및 열응력 해석에 관한 연구

이장현*, 신종계**, 노인식***

Analysis of Radiative Heat Transfer and Thermal Stress in Flaring System of FPSO

Jang Hyun Lee*, Jong Gye Shin** and In Sik Nho***

요 약

본 연구는 부유식 해양구조물(FPSO) 소각탑 구조물에 발생하는 온도 분포 및 열응력 해석 기법을 개발하는 것을 목표로 한다. 이를 위하여 소각열에 의하여 소각탑에 발생하는 온도분포를 구하는 과정을 이론화하고 온도분포 해석을 위한 과정을 제시하였다. 그리고 온도 분포가 발생시키는 열응력 해석을 위한 기본 과정을 제시하고 예를 보였다. 온도 분포 해석을 위하여 소각열에 의한 복사열전달 현상에 의한 열전달량, 설계 환경에 의한 대류 열전달량 해석 과정을 정립하였다. 정립된 과정을 근거로 온도 해석을 위한 해석 기법을 개발하였다.

또한 열응력 해석을 위한 해석 과정을 정립하고 그 과정을 근거로 열응력 해석 기법을 개발하였다. 본 연구의 결과는 부유식 해양구조물의 소각탑 열응력 해석 및 설계 과정에 활용될 수 있을 것이다.

※Keywords: FPSO(부유식 해양구조물), 복사열전달(Radiative Heat Transfer)
열응력(Thermal Stress)

Abstract

The flaring system of FPSO burns out the byproduct natural gas. The thermal loading due to radiative heat of flaring gas leads to undesirable thermal-stresses on itself. Nowadays it needs to understand the amount of thermal loading of flaring system since the requirement for the safety of the flaring system. However, few studies have been performed on the thermal environment and radiative heat flux on the FPSO flaring system.

접수일자: 2001년 10월 23일, 승인일자: 2001년 12월 10일

*정회원, 서울대학교 공학연구소 연구원 (jhlsk@gong.snu.ac.kr)

**정회원, 서울대학교 조선해양공학과 해양시스템공학연구소 부교수 (jgshin@snu.ac.kr)

***정회원, 충남대학교 선박해양공학과 부교수 (isnho@cnu.ac.kr)

Present study suggests a procedure to model the thermal environment and a FEA process to analyze the temperature distribution and thermal stresses of FPSO flaring system.

In order to get the temperature distribution, the radiative heat conditions and convective heat conditions are included in the heat transfer analysis. By making the use of temperature obtained through heat transfer analysis, the thermal stress analyses are performed. The results of the present study can be used to design the flaring system and determine the heat shield in the flaring system

1. 서언

1.1. 연구의 필요성 및 배경

석유시추를 위한 부유식 해양구조물(FPSO)은 소각탑 설비를 갖추고 있으며, 가스 소각에 의한 소각열이 발생한다. 현재까지 소각탑의 구조 설계 시에는 소각열에 의한 복사열유속(radiative heat flux)과 열응력을 무시하고 설계하였으나 근래에 들어 소각열에 의한 복사열 및 열응력 해석에 대한 요구가 발생하고 있다. 본 연구는 이러한 소각탑의 소각열에 의한 온도 분포 및 열응력 해석을 수행함으로써 소각탑의 온도 환경 및 열응력 수준을 파악하고자 한다. 이를 위하여 소각열에 의한 복사 열유속을 해석하며, 고온의 가동 조건에 따라 발생하는 소각탑 구조의 열응력 해석함으로써 소각열 및 열응력을 고려한 소각탑 구조물의 설계 기법 확립에 기여하고자 한다.

1.2. 소각탑 열응력 해석 기본 과정

부유식 해양 구조물 소각탑의 온도분포는 소각 화염으로부터 전해지는 복사열전달, 주변 공기에 의한 대류 열전달, 관내 천연가스의 흐름에 의한 대류 열전달에 의하여 결정된다. 소각탑 구조물에 분포하는 온도 분포는 구조물에 열응력을 발생시킨다. 따라서 열응력 해석을 위해서는 우선 온도 분포를 구하고 구해진 온도분포가 발생시키는 열응력을 구하는 과정이 필요하다. 본 연구는 부유식 해양구조물 소각탑에 열응력을 발생시키는 열원인 화염(flame)에 의한 복사열전달 및 주변 공

기에 의한 대류 열전달, 관내 가스에 의한 대류 열전달현상의 특성을 파악하였다. 또한 파악된 모델을 이용하여 소각탑의 온도 분포를 구하기 위한 이론적 과정을 기술하고 이론적 근거를 토대로 그 해석하여 결과를 설계 과정에 활용할 수 있도록 시도하였다. 열응력 해석을 위하여 3차원 보 요소 (beam element)를 이용한 열응력 해석모델을 제시하고 유한요소법[1]을 이용하여 열응력 해석 예를 보임으로써 열응력 수준을 파악하였으며, 또한 응력 집중 현상을 이해하기 위하여 셸 요소 (shell element)를 이용하여 소각탑 열응력 해석을 위한 가능성 및 적용성을 검토하였다.

2. 열전달 및 열응력 해석 정식화

2.1. 열전달 현상 및 기본 방정식

열전달 현상은 일반적으로 전도(conduction), 대류(convection), 복사(radiation)의 세 가지 현상으로 구별된다. 열전도는 온도차가 존재하는 매질 내에서 열에너지의 확산현상이며, Fourier 법칙에 의하여 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$q'' = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1)$$

이때, q'' 는 열유속(heat flux), k 는 열전도율(heat conductivity), $\partial T / \partial n$ 는 온도 구배를 나타낸다. 내부에 열에너지 생성이 일어나는 계

[1]해석을 위하여 상용 유한요소해석 코드인 ANSYS를 이용하였다.

(system)를 가정하고 열에너지 보존법칙에 의하여 다음과 같은 열에너지 확산 지배방정식을 얻는다.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\dot{q}=\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

여기서 \dot{q} 는 단위 부피의 열발생율, ρ 는 밀도, C_p 는 정압 비열 (specific heat), (x, y, z) 는 직교 좌표계, t 는 시각을 의미한다. 그리고 열전달의 경계조건은 아래와 같은 조건들로 정리된다.

온도조건 $T = T_s$ (3)

열유속 조건 $-k\frac{\partial T}{\partial n} = q_s''$ (4)

단열조건 $k\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ (5)

대류 조건 $-k\frac{\partial T}{\partial n} = h(T_\infty - T_s)$ (6)

h 는 대류 열전달 계수이다. $\partial/\partial n$ 는 경계면에 직교 방향으로 미분을 뜻한다. T_∞ 는 주변 유체의 온도를 뜻한다. 주변 유체가 속도 u_∞ 와 온도 T_∞ 를 가지며 면적 A_s 을 가진 임의의 표면에 흐르며, 표면의 온도가 균일 온도 T_s 라고 가정하면 대류 열전달에 의한 열유속은 다음과 같이 표현된다.

$$q_s'' = h(T_s - T_\infty) \quad (7)$$

2.1.1. 복사 열전달

이상적인 표면에서 복사되는 최대 열유속은 Stefan-Boltzman 법칙으로 주어진다. 그러나 실제 표면은 그 물질의 특성에 따라 이상적인 복사 열유속보다 적은 값을 가지며 $q_s'' = \epsilon\sigma T_s^4$ 이 된다. σ 는 Stefan-Boltzman 상수를 나타내며, ϵ (방사율)는 표면의 복사 능력을 나타낸다. 방사율은 표면의 거칠기, 물리적 특성 등에 따라 다르며 파장, 방향에 따라 다른 값이다. 일반적으로

파장의 영향, 방향의 영향을 무시한 gray, diffuse surface로 가정하는 것이 현실적으로 타당한 것으로 알려져 있다.

형상 계수 (Form factor)

형상 계수는 하나의 복사면에서 방출된 복사에너지 중에서 다른 표면에 의해 차단되는 복사에너지의 비율을 의미한다.

형상 계수는 면의 재료 특성값과는 무관하고 두면 사이의 기하학적 형상에만 관계하는 값이다. 형상 계수(F_{ij})는 식(8)과 같이 정의된다(Fig. 1)(이승복 1997).

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi r_{ij}^2} dA_i dA_j \quad (8)$$

Diffuse 및 Gray surface의 복사열전달

복사면 i 의 복사열 전달량은 다음과 같이 복사열전달에 대한 연립 방정식을 얻는다(Holman 1990).

$$q_i'' = J_i - G_i = \frac{\epsilon_i}{1 - \epsilon_i} (\sigma T_i^4 - J_i) \\ J_i = \epsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \epsilon_i) \sum_{k=1}^n J_k F_{ik}, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

식(9)는 $2n$ 개의 연립방정식으로 표현되며 n 개의 열유속 또는 온도가 주어지므로 각 면에서 온도 또는 열유속을 구할 수 있다. 따라서 특정 복사면 i 는 나머지 다른 면과 복사열전달을 하게 되므로 복사계의 모든 면을 동시에 연성하여 풀어야만 한다(Fig.2).

여기서,

q_i (Heat flow rate): 단위시간당 열에너지변화
 J (Radiosity): 단위시간당 단위 표면적에서 방출되는 복사에너지

G (Irradiation): 단위시간당 단위 표면적에 입사하는 복사에너지

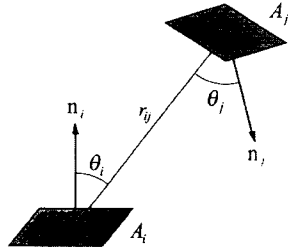


Fig.1 Form factor

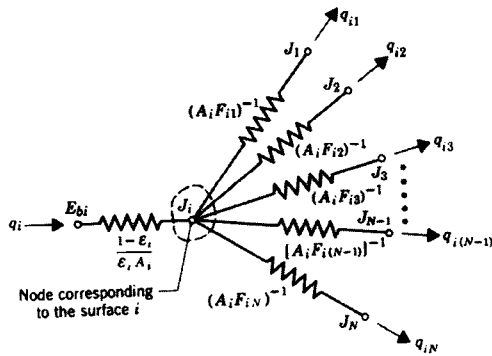


Fig.2 Network diagram of radiative heat exchanges between surface-i and the other surfaces (Incropera/Dewitt 1990)

2.1.2. 온도해석을 위한유한요소 정식화

열전도 방정식과 경계조건은 다음과 같은 절점 온도 행렬(T_e)에 대한 유한요소 행렬식을 얻는다 (Bathe 1982, 신종계 등 1998).

$$C \dot{T}_e + (K^b + K^c) T_e = Q_e^f + Q_e^c + Q_e^s \quad (10)$$

여기서 C , K^b , 그리고 K^c 는 각각 비열, 전도율, 대류 표면 전도율로부터 유도되는 강성 행렬이고, Q_e^f , Q_e^c , 그리고 Q_e^s 는 열속, 대류 하중, 열에너지 생성율에 의한 하중 벡터이다.

2.2. 열응력 발생의 개요 및 해석 과정

변형체 내부의 온도가 변화하면 변형체는 온도

변화와 열팽창률에 비례하는 열변형율이 발생한다. 그러나 외부의 구속이 전혀 없는 상태에서 변형체 전체에 동일한 온도변화가 발생하면 열응력은 발생하지 않는다(Johns 1965). 재료 특성값(탄성 계수, Poisson 비, 열팽창 계수)은 온도에 따라 변화하는 온도의 함수이다. 열탄성 변형의 구성방정식은 다음과 같은 행렬식으로 표현된다.

$$\sigma = D(\epsilon - \epsilon^th) \quad (11)$$

여기서, σ 는 응력, D 는 탄성 재료 상수 행렬, ϵ 은 전변형율, 그리고 ϵ^th 는 열 변형율을 뜻한다. 변형체에 주어진 하중은 온도변화, 절점력, 그리고 표면력이라고 가정하고 가상 일의 원리를 이용하면 열탄성 변형 해석을 위한 유한요소행렬식이 얻어진다 (Bathe 1982, 신종계 등 1998).

$$K u = F^th + F^pr + F^nd \quad (12)$$

여기서 K 는 강성 행렬, u 는 절점의 변위 벡터, F^th 는 열 하중 벡터, F^pr 는 표면 하중벡터, 그리고 F^nd 절점력 벡터이다.

3. 소각탑의 온도 분포 해석

3.1. 이차원 복사 열유속 해석

소각탑 구조물은 3차원 열전달 시스템이다. 또한 복사열전달의 관점에서 보면 모든 복사계가 밀폐되지 않고 주변 공기에 의하여 개방된 개방형 시스템(open radiation system)이다. 본 장에서는 3차원 복사 시스템을 2차원 모델로 근사시킴으로써 소각 화염에 의해 소각탑에 작용하는 복사열 유속을 구하고 이를 기존(NAO Inc.의 계산)의 결과와 비교하여 그 특성을 파악하고자 한다. 간략화 된 해석을 위하여 소각탑 구조를 작업 공간, 갑판, 소각탑의 관 구조, 그리고 화염이라는 4개의 복사체로 나눌 수 있으며 주변대기의 효과는 개방 부분으로 이해할 수 있다. 개방된 부분을 공간절점을 이용하여 모델링 하였다. Fig.3은 복사 해석을 위해서 2차원으로 모델링된 형상을

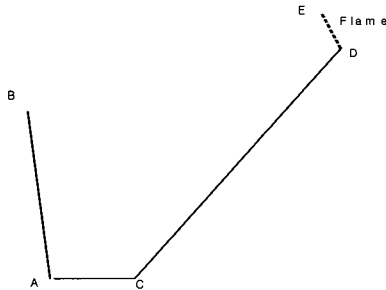


Fig.3 Simplified 2-D model

보이고 있다.

작업 공간은 AB로, DECK 는 AC, 소각탑은 CD로, 화염은 DE로 가정하였다.

복사열 유속 해석 모델

개방형 복사시스템에서의 열유속을 이용하여 소각탑의 복사열전달 해석과정은 아래와 같다. 각 점의 좌표는 아래와 같이 가정하였다. 이 좌표는 현대 중공업의 FPSO P-XXX 구조의 대략적인 치수를 참고로 한 것이다. 그러나 화염의 길이 및 각도는 연소 조건 및 주변 공기의 속도에 따라 다르므로 대략적인 값으로 가정하였다.

Point	A	B	C	D	E
X	0.0	0.0	10.0	60.0	52.4
Y	0.0	30.5	0.0	49.2	55.3

방사율과 각 부위의 온도(는 다음과 같은 조건으로 가정하였다.

Line	AB	BC	CD	DE
Emissivity	0.70	0.70	0.70	0.15
온도 (°C)	30	30	50	700

작업공간에서 열유속

Fig.4는 작업 공간에서 열유속 값을 나타낸 것이다. 현재 연구 결과와 NAO Inc.의 결과를 비교하였을 때 약 50% 정도의 오차를 보이고 있다. 그러

나, 본 연구의 결과는 작업 공간의 3차원 형상을 정확하게 모델링하지 않는 대신 직선 요소로 가정함으로써 오차가 발생하였고, 또한 작업 공간 구조물이 가지는 열 방사율 값을 금속 표면의 상태 등을 고려하지 않고 일반적인 연강의 값으로 가정하였기 때문에 가정된 방사율로부터 기인한 오차가 중첩되어 오차가 커졌을 것으로 보인다. 또한 이 오차는 소각 화염의 열 방사율, 온도, 길이, 그리고 형상을 정확하게 고려하지 않고 대략적인 값을 이용하였으므로, 이후에 위에서 제시한 값들을 좀 더 세밀하게 산정하면 정확도가 높아질 것으로 보인다.

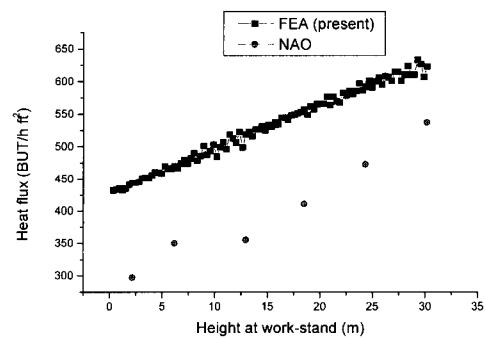


Fig.4 Radiative heat flux at work-stand

소각탑의 열유속

Fig.5와 Fig.6은 소각탑 구조물의 열복사에 의한 열 유속을 나타내고 있다. 높이가 높아지면서 화염에 가까운 부분에서는 매우 큰 오차(수 백%)를 보이고 있다. 화염과 가까운 부분을 제외하고 소각탑의 중간지점까지 온도만을 검토한 결과는 큰 오차를 보이고 있지는 않다. 소각탑 구조물의 정확한 열 방사율, 기하학적 형상, 소각 화염의 온도 및 형상, 그리고 화염의 열 방사율이 정확하게 추정되지 않고 일반적으로 알려진 값을 사용함으로써 오차가 발생한 것이다.

2차원 모델을 이용한 복사 해석을 수행한 결과로부터 2차원 모델만으로는 복사 열전달 환경을 정확하게 모델링하는 것에는 어려움이 있음을 확인하였다. 특히 화염의 형상 및 위치가 변화와, 방

사율의 변화에 매우 민감하게 열유속이 달라짐을 확인할 수 있었다. 따라서 3차원 형상을 고려한 해석이 필요함을 알 수 있었고 정확한 복사열전달 특성값을 산정해야 함을 확인하였다.

복사 열전달은 온도가 다른 복사면 사이에 일어나며 상대위치에 따라 그 값이 달라진다. 또한 3차원 복사 열전달은 복사면 전체 사이의 복사 열유속을 구해야 하므로 많은 계산 시간을 요구한다. 따라서 본 절에서는 소각탑과 유사한 형상을 가진 복사면을 이용하여 복사열전달의 특징을 검토하였다.

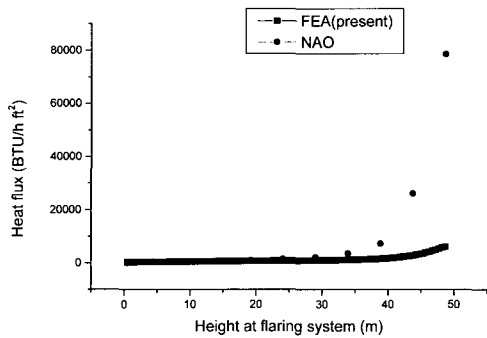


Fig.5 Radiative heat flux on the flaring system

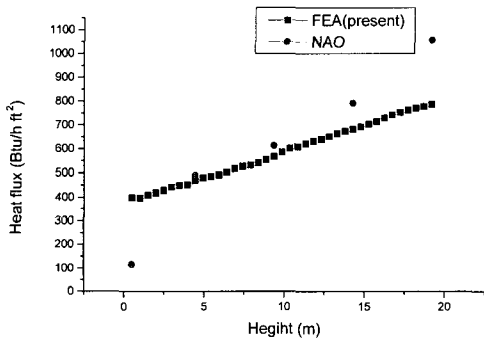


Fig.6 Radiative heat flux on the flaring system (height 20m)

Surrounded by ambient air with $T=293K$

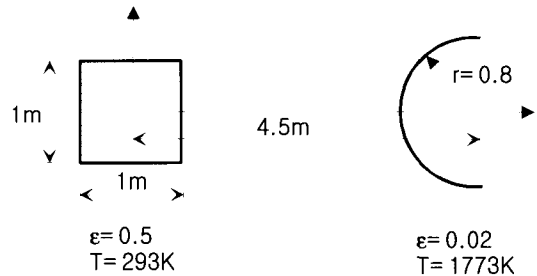


Fig.7 Schematic shape of radiative system

[예제] 그림(Fig.7)과 같이 폭과 길이가 1m이고 높이 5m인 직육면체와 직육면체의 중심으로부터 4.5m 떨어진 곳에 반지름 0.8m, 높이 2m인 반원이 마주보고 있는 복사계를 가정하였다.

각각의 방사율과 표면온도는 Fig.7과 같이 가정하였으며, 복사면은 각각 연강으로 이루어졌다고 가정하였다. 두 복사체는 충분히 넓은 주변 공기에 의해 둘러싸여 있고 공기에 의한 산란 및 투과는 두 복사체 간의 복사열 전달에 영향을 무시하고 주변 공기를 이상적인 진공 물체로 가정하였다.

(예제 해석 과정 및 결과)

열복사는 온도가 다른 복사면 사이에 열교환이 일어나는 현상이다. 따라서 관심을 갖는 영역 내의 모든 복사체 간에 연성된 현상이다. 소각탑 구조물의 경우 각 지점마다 온도가 다르기 때문에 온도차에 의한 복사열 교환이 반드시 일어난다. 따라서 정확한 해석을 위해서는 소각탑 구조물 각 부분간의 복사열 교환을 고려하여 계산하는 것이 필요하다. 그러나 실제로 원하는 정밀도의 복사열을 구하기 위해서는 수백 또는 수천시간에 가까운 계산시간을 필요로 한다.

따라서 소각탑 구조물 부재 사이의 복사열전달을 무시하여, 소각탑 구조물 사이의 복사열전달 해석을 수행하지 않고 화염과 구조물 사이의 복사열전달만을 수행할 수 있다면 효과적인 것이다.

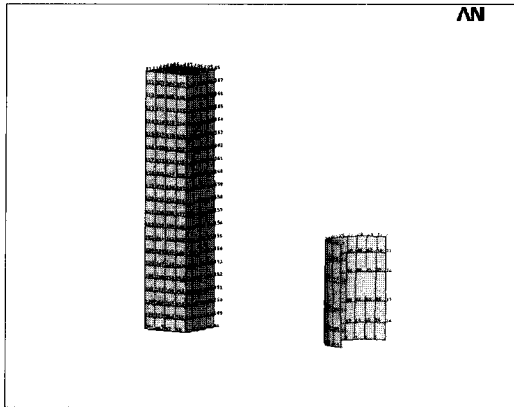


Fig.8 Finite element model

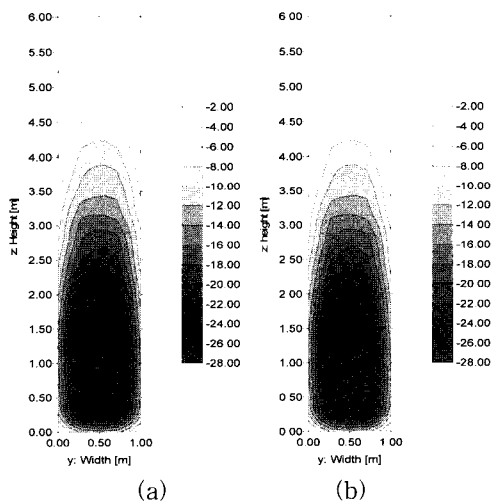


Fig.9 Distribution of heat flow rate(a) Height 0~6 m(b) Height 0~3m and 3~6m

이를 위하여 우선 앞 절에서 보인 구조물의 높이를 0~6m, 0~3m, 3~6m 인 경우에 대하여 복사 열전달량을 구하였다(Fig.8).

우선 높이 0~6m 인 구조물에 대한 복사열 전달량을 구하여 다음의 Fig.9(a)에 heat flow rate를 도시하였다. 그리고 0~3m, 3~6m 인 경우에 대하여 복사 열전달량을 구하여 그 결과를 Fig.9(b)에 동시에 도시하였다.

세 결과를 비교하면 각각 전체 구조에 대해 수행한 결과와 분리하여 계산한 결과가 일치함을 확인할 수 있다. 따라서 3차원 복사 해석은 소각탑

구조물의 각 복사면과 화염간의 복사열전달 해석이 현실적으로 가능함을 알 수 있다.

3.3. 대류 및 복사 열전달을 고려한 소각탑 온도분포 해석

본 장에서는 앞 장에서 제시한 기본 해석 과정을 이용하여 소각탑 구조물의 온도분포 해석을 수행하였다. 소각탑 구조물의 온도 해석과정은 크게 두 단계로 나눈다.

(1) 복사 열유속을 구하고 복사 열유속값을 이용한다.

(2) 복사에 의한 열유속 값과 주변 공기에 의한 열 유속 값 및 관내 가스에 의한 열대류 현상을 고려하여 파이프의 온도 분포를 구한다.

그 과정을 Fig.10에 표현하였다.

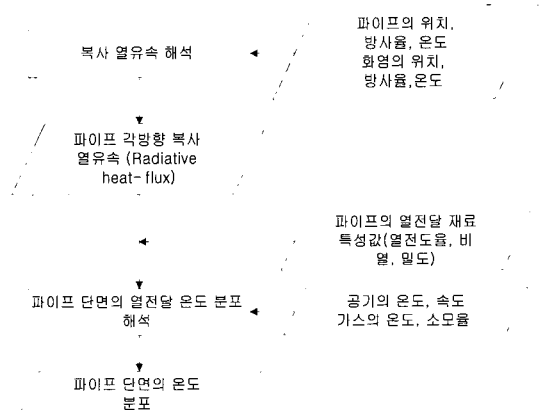


Fig.10 Flow chart for temperature analysis

3.3.1 복사 열유속

복사열전달에 필요한 자료는 크게 복사체의 기하학적 형상과 복사에 관련된 재료 특성값이다. 복사 해석의 결과는 복사열전달에 의한 복사열유속 값이다. 이 복사열유속은 열전도 현상에서 경계조건으로 모델링 된다.

화염의 복사 특성 계산

화염은 고온의 기체 상태인 복사체로 가정할 수 있다. 그러나 기체와 열전달 표면사이의 복사열교

환은 단순한 복사 표면 사이의 열복사에 비해 매우 복잡하다. 이러한 기체 복사의 간단한 계산을 위하여 Hottel의 방법(Turns 1996, Kuo 1986)과 같이 경험적이고 실험적인 방법이 공학적이고 실용적인 범위 내에서 넓게 사용되고 있다. 화염의 방사율은 0.08을 사용하였다.

화염의 온도

본 연구에서는 에너지 보존 법칙에 의한 화염의 간략한 온도계산법을 이용하여 화염의 온도를 약 2200K로 가정하였다(Siegel/Howell 1992).

3.3.2. 열전도 해석에 의한 온도 분포

열전도 해석은 복사해석에서 구한 열유속과 주변 공기에 의한 열유속 및 관내 가스에 의한 열대류계수를 경계조건으로 열전도 방정식의 해를 구하여 파이프 단면에서의 온도 분포를 구하는 과정이다. 구해진 온도 분포는 열응력 해석의 하중으로 모델링 된다.

주변 공기에 의한 대류효과 모델링

실린더 형상의 주변공기에 의한 대류 효과는 Churchill & Bernstein 이 제안한 식을 사용하였다(Bejan 1995).

$$\bar{Nu}_D = 0.3 + \frac{0.62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + (0.4/Pr)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282,000}\right)^{5/8}\right]^{4/5}$$

여기서, $Re_D \cdot Pr > 0.2$ 인 조건을 만족해야한다. 그리고 Reynolds number, Prandtl number는 평균온도($T_f = (T_s + T_\infty)/2$)에서 구한 값이다. T_s 와 T_∞ 는 각각 실린더 표면의 온도 및 주변 유체의 온도이다. 각각 공기의 점성계수, Prandtl 수, 그리고 열전도 계수는 온도 의존성을 고려하였다(Incropera/Dewitt 1990).

관내 가스의 흐름에 의한 열대류

관내에는 온도를 가진 메탄, 프로판 등의 천연 가스가 흐르므로 관의 벽면과 열대류에 의한 열전달현상이 생긴다. 관내대류 계수 산정을 위하여

Dittus/Boelter (1930), Sieder/Tate(1936), Petukhov 등(1970)이 Nusselt 수의 관계식을 제안하였다. 그러나, 이들의 식은 Reynolds 수의 적용 범위가 제한적인 단점이 있다. 이를 보완하여 Gnielinski (1976)은 아래와 같은 관계식을 제안하였다(Bejane, 1995).

$$Nu_D = \frac{hD}{k} = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)}$$

마찰이 작은 관내에서 마찰계수 f 는 다음과 같이 주어진다.

$$f = (0.79 \ln Re_D - 1.64)^{-2}$$

관계식은 $0.5 < Pr < 2000$, $2300 < Re_D < 5 \times 10^6$ 의 범위에서 적용할 수 있다. 이때의 물성치는 관내 유체의 평균온도 T_m 에서 계산된다.

3.3.3. 복사 및 대류 조건을 고려한 온도 분포 해석 예

다음의 예제(Fig.11)는 복사열유속 계산하고 그 결과와 대류 효과를 고려하여 소각탑의 온도분포를 해석한 예이다.

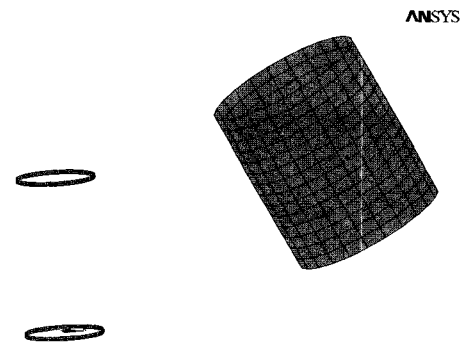


Fig.11 Finite element model for radiation analysis

복사 해석 시 파이프의 상단과 하단을 제외한 부분은 해석하지 않았다. 파이프의 길이가 짧을

경우 복사열전달은 상단과 하단에서 거의 선형적으로 분포한다고 가정한다.

Flame의 복사 조건

- 시작점 좌표: (4.0, 0.0, 1.0)
- 끝점의 좌표: (3.0, 0.0, 3.0)
- 화염의 길이: 2.236 m
- 화염의 직경: 2.0 m
- 방사율: 0.08
- 표면온도: 2200 [Celsius]

Pipe의 복사 조건

- 시작점 좌표: (0.0, 0.0, 0.0)
- 끝점의 좌표: (0.0, 0.0, 2.0)
- 파이프의 길이: 2.0 m
- 파이프의 직경: 1.0 m
- 파이프의 두께: 10 mm
- 방사율: 0.7 (steel)

복사열유속

Fig.12는 파이프의 시작점과 끝점에서 복사열 유속(q_{rad})을 보인 것이다. 길이가 2m인 파이프의 시작점과 끝점에서 각 방향에 따른 복사열유속 값을 보이고 있으며 형상계수의 영향이 반영되어 있음을 확인할 수 있다.

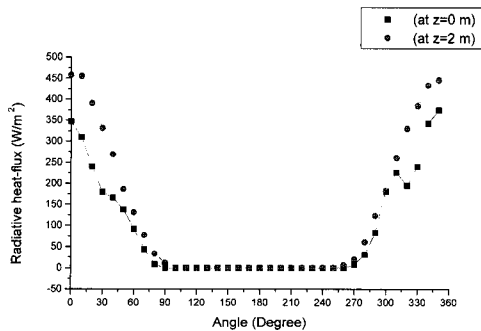


Fig.12 Radiative heat flux along the angular direction

열전도/대류 해석

앞 절에서 구한 복사열유속과 주변 공기 및 관내 가스의 대류를 고려하여 관의 단면에서 온도 분포를 구하였다. 다음은 해석에 사용된 주변 공기와 관내 가스의 대류 조건이다.

- Wind: 11.176 m/sec, 25°C
- Gas: 20 m/sec, 35°C

Fig.13은 최고 온도 점에서 시간에 따른 온도 변화를 나타낸 것이다. 약 20 여분 정도가 지나면 정상 상태(steady state)의 온도 분포를 보이고 있다. Fig.14는 두께 방향의 온도분포 예를 보인 것이다. 두께 방향으로 온도차는 0.35°C 이므로 두께 방향의 온도 변화는 무시할 만큼 작다는 것을 확인할 수 있다.

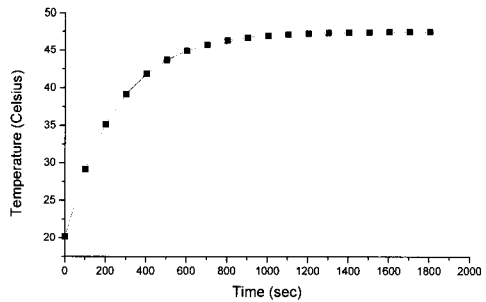


Fig.13 History of temperature on a point of the pipe

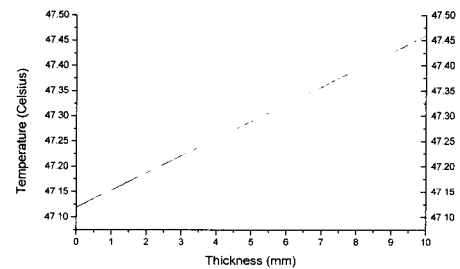


Fig.14 Temperature distribution along the thickness direction

다음의 Fig.15은 각 방향에서 표면의 온도 분포를 보이고 있다. 0°~90°,270°~360° 인 구간에서는 온도가 높게 나오고 있으면 나머지 구간에서는 상대적으로 낮은 값을 보이고 있다.

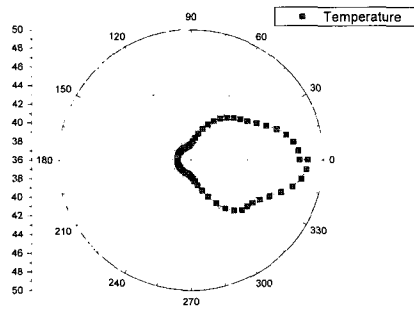


Fig.15 Temperature distribution in angular direction (bottom part of the pipe)

4. 소각탑의 열응력 해석

열전달 해석에서 구한 온도분포는 열하중으로 작용한다. 본 연구에서는 온도분포 해석의 결과를 이용하여 열응력을 구하였다. 열 응력해석을 위하여 보 요소를 이용하였으며, 셀 요소를 이용한 해석과정과 문제점을 설명한다.

4.1. 보 요소를 이용한 소각탑 열응력 해석

보 요소인 파이프 요소를 사용하여 유한요소 모델을 생성하였으며, 총 466개의 요소와 총 407개의 절점으로 구성되었다. 화염에 의해 가열된 파이프의 온도가 원주방향으로 일정하다고 가정하였으며, 온도는 NAO에서 제시한 온도분포 중 차폐벽이 없는 경우의 온도를 이용하였다. 자중을 고려하였으며, 소각탑 하부를 고정하는 경계 조건을 사용하였다. 변형 형상 및 등가응력과 항복응력의 비를 Fig.16과 Fig.17에 보였다. 최상층 파이프에서 항복응력과 응력의 최대값 0.45를 얻을 수 있었다. Mises의 등가 응력을 사용하였다.

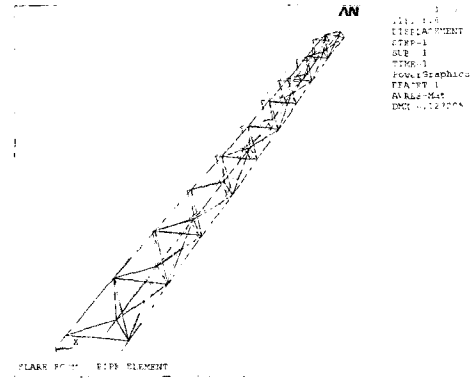


Fig.16 Deformed shape

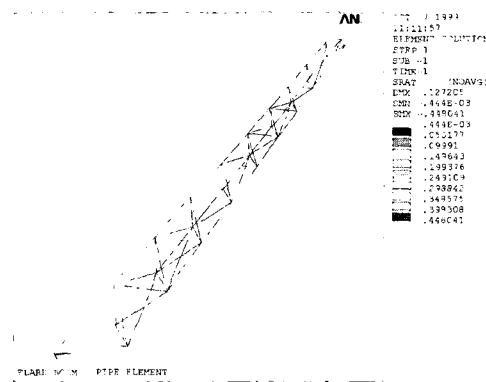


Fig.17 Safety factor

4.2. 셀 요소를 이용한 열응력 해석

셀 요소를 사용하여 유한요소 모델을 생성하였으며, Fig.18과 같은 형상을 모델링한 후 Fig.19과 같이 연결부위 등에서 요소가 생성될 수 있도록 하였다. 그러나, 많은 연결부위와 파이프의 개수 때문에 전체 소각탑을 이루는 요소의 개수가 약 60,000개가 되어 실용적으로 짧은 시간 내에 해석이 힘들게 되었다. 그러므로 보 요소를 이용한 해석 결과를 이용하여, 연결부의 응력집중 등의 영향을 고려하는 방법이 필요하다.

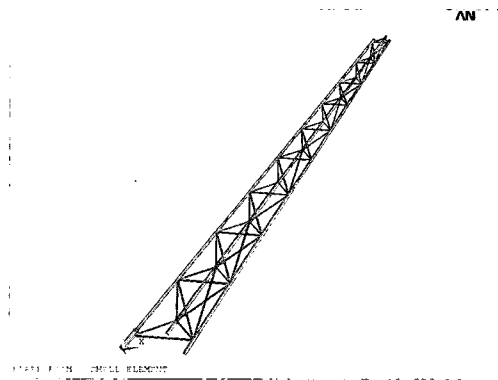


Fig.18 Shape of whole structure modeled by solid model

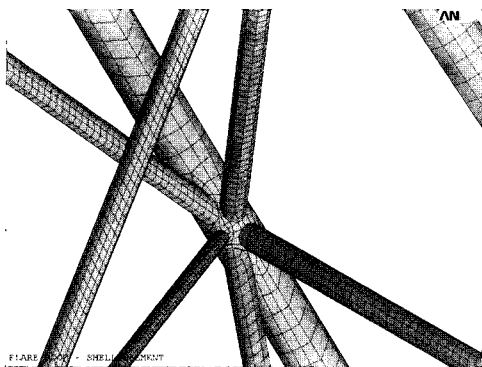


Fig.19 Detailed shape of joint and finite elements

5. 결론

본 연구는 부유식 해양구조물 소각탑에 열응력을 발생시키는 열원인 화염에 의한 복사열전달 및 주변 공기에 의한 대류 열전달, 관내 가스에 의한 대류 열전달현상의 특성을 파악하였다. 또한 파악된 모델을 이용하여 소각탑의 온도 분포를 구하기 위한 이론적 과정을 기술하고 이론적 근거를 토대로 실제 설계에 적용이 가능한 해석 절차를 검토하여 해석 결과를 설계 과정에 활용할 수 있도록 하고자 한다. 또한 불균일한 온도 분포에 의한 열응력 발생과정을 해석을 시도하였다. 온도 분포 해석을 위하여 열전달 이론을 기술함과 동시에 3차원 복사열전달 모델을 유한요소법을 통하여 구

현하고 복사 열전달 현상을 해석할 수 있는 과정을 마련하였다. 복사 열전달 현상 및 대류 현상을 고려한 열전도 해석 모델을 정립하였다. 열응력 해석을 위하여 3차원 보 요소를 이용한 열응력 해석모델을 정립하고 유한요소법을 이용하여 열응력 해석 예를 보임으로써 열응력 수준을 파악하였으며, 또한 응력 집중 현상을 이해하기 위하여 셀 요소를 이용하여 소각탑 열응력 해석을 위한가능성 및 적용성을 검토하였다.

본 연구의 결과를 근거로 하여 다양한 해석 예를 통하여 정립한 이론 및 해석 과정의 유용성 검증을 수행해야 하며, 다양한 해석 예를 거친 후 해석 과정의 안정성 및 신뢰성을 향상시키도록 할 것이다. 특히, 온도 분포와 가장 밀접한 관련을 가지는 열원의 모델링에 대한 과정을 엄밀화 하고 다양한 검증을 거친다면 부유식 해상 구조물의 소각탑 설계의 과정에 활용될 수 있을 것으로 판단 된다.

후 기

* 본 연구는 서울대학교 해양시스템공학연구소와 현대중공업 주식회사의 '99년도 산학협동 공동 연구로서 수행된 과제입니다.

참 고 문 헌

- 신중계, 이용신, 조성욱 1998 "Logan의 유한요소법 첫걸음," 시그마 프레스, pp. 451-482.
- 이승복 1997 "Hemi-cuve Algorithm을 이용한 복사 열해석 및 복잡한 형상 설계에의 응용", 서울대학교 석사학위논문
- Bathe, K. J. 1982 "Finite Element Procedures in Engineering Analysis," Prentice-Hall, Inc., pp. 301-418.
- Bejan, A. 1995 "Convection Heat Transfer," John Wiley & Sons, Inc., 2nd Ed., pp. 350-354.
- Dittus, F. W., and Boelter, L. M. K. 1930 "Publications on Engineering", University of

California, Berkley, Vol. 2, p.443.

•Gnielinski , V. 1976 "New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow, " Int. Chem. Eng., Vol. 16, pp. 359-368.

•Holman, J. P. 1990 "Heat Transfer," McGraw-Hill, Inc.

•Incropera, F. P., and Dewitt, D. P. 1990 "Introduction to Heat Transfer." John Wiley & Sons, Inc., 2nd Ed.

•Johns, D. J. 1965 "Thermal stress analyses," 1st ed., Pergamon Press, New York

•Kuo, K. K., 1986 "Principles of Combustion," John Wiley & Sons, Inc.

•Petukhov, B.S., in T.F. Irvine and J. P. Hartnett, Eds. 1970 "Advances in Heat Transfer," Vol.6, Academic Press, New York

•Sieder, E. N. and Tate, G. E. 1936 "Heat transfer and pressure drop in turbulent pipe and channel flow,"Int. Chem. Eng., vol. 28, pp.1429-1436.

•Siegal, Robert, and Howell, J. R. 1992 "Thermal Radiation Heat Transfer," 3rd ed., Hemisphere Publishing Co., New York

•Turns, S. R. 1996 "An Introduction to Combustion -Concepts and Applications," McGraw-Hill, Inc.