

가스히터 보수주기 결정을 위한 히터내부 열전달 매체액 결빙 현상 가시화에 관한 연구

이 정 환 · 하 종 만 · 성 원 모

한국가스공사 연구개발원, *한양대학교 지구환경시스템공학부
(2001년 5월 3일 접수, 2001년 7월 22일 채택)

A Study on the Visualization of Ice-formation Phenomena of Bath Water to Decide Maintenance Period of Gas Heater

J. H. Lee, J. M. Ha, W. M. Sung*

LNG Technology Research Center, R & D Division, Korea Gas Corporation
*Dept. of Geoenvironmental System Engineering, Hanyang University
(Received 3 May 2001 ; Accepted 22 July 2001)

요 약

본 연구는 한국가스공사에서 운영중인 천연가스 공급관리소의 가스히터를 대상으로 겨울철 히터 가동 중단시, 가스히터 내부의 열전달 매체액 (Bath Water)이 빙점에 도달하는 시간을 계산하여 보수주기에 대한 결정 및 동파 취약 부위에 대한 영향을 판단하기 위해 가스히터의 체적을 고려한 비선형 3차원 전산모사를 수행하였다. 이용된 시뮬레이터는 미국 FLUENT사의 FLUENT V 5.0으로서 열유체 유동해석 범용 Code이다. 본 문제는 열전도에 관한 문제로 에너지 방정식을 푸는 방식으로 진행되지만 가스히터의 체적을 고려한 3차원 계산을 수행하기 위해 현장의 가스히터 형상 및 축적을 거의 유사하게 모델링하였고 표면에서 공기에 의한 대류 (Convection)문제와 단열재 사이의 전달 (Conduction)문제, 히터내부 액체의 자연대류 (Natural Convection) 그리고 배관을 통한 열손실의 문제를 고려한 복합적인 열전달 현상을 분석하였다.

Abstract - This study was carried out for the purpose of determination of maintenance period and investigation of weak point due to freeze when the gas heater of KOGAS valve station is not operated in winter season. 3-dimensional non-linear numerical simulation was conducted in order to predict the time and location which bath water in heater reaches to ice point. FLUENT V 5.0, commercial code, is used for thermal fluid flow analysis. We thought this was problem of heat conduction solving the energy equation and modeled gas heater by using the real geometry and scale for performing the 3-dimensional simulation. It was analyzed complex heat transfer phenomena considering convection due to air on surface, conduction in insulation material, natural convection of liquid in heater and heat loss through the pipe.

Key words : Natural gas, Gas heater, Valve station, Ice-formation, Conduction, Convection, Heat flux, Numerical simulation, Unsteady-state

1. 서 론

결빙은 냉동시스템 분야, 결정성장, 식품의 냉동건조, 이식 장기의 보존을 위한 의료분야, 극점 빙산의 발달과 쇠퇴를 연구하는 지구물리학 분야 등 다양한 분야에서 나타나는 매우 중요한 현상으로 이에 대한 연구가 최근까지 상당히 많이 이루어져 오고 있다. 특히 결빙과정은 파이프내의 물의 결빙, 화학공정라인에서의 편석, 열교환기내 액체급속의 응고 등 공학의 여러 분야에서 쉽게 접할 수 있는 현상이며 어떤 시스템 내부에 결빙이 수반되면 시스템에 상당한 손상 및 경제적 손실을 가져올 수 있다. 따라서, 최근에 이러한 결빙문제가 설비 유지보수 및 안전과 관련되어 상당한 관심을 끌고 있다. 본 연구에서 다루고자 하는 가스 히터 내부의 열전달 매체액의 결빙 현상도 이러한 관점에서 겨울철 보수를 위해 히터가동 중단시 외기온도에 의해 내부에 결빙현상이 발생될 때 가장 취약한 부위를 확인하고 그 시간을 계산하여 겨울철 보수주기 결정을 위한 판단 근거로 활용코자 각각의 열전달 모드[1]를 고려하여 그 현상을 이해하고자 하였다.

천연가스 생산지로부터 고압(70 kgf/cm²)으로 공급된 천연가스를 공급관리소에서 저압(8~25 kgf/cm²)으로 감압할 때 Joule-Thomson 효과에 의해 1kgf/cm²당 0.56 °C정도 온도가 하락하게 된다. 즉 60 kgf/cm²에서 8 kgf/cm²로 감압시 약 26°C의 온도가 하락하며 감압전 천연가스 온도가 20 °C라 했을 때 -6 °C가 되기 때문에 감압용 정압기 등 운전설비에 손상을 줄 수 있다. 따라서 이와 같은 문제를 방지하기 위해 압력강하에 의한 하락온도를 감압전에 가스히터를 통해 보상해주게 된다. 가스히터는 노통연관식 보일러의 형태를 가지며 화염과 배기가스가 통과하는 관에서 열매체액(bath water)으로, 열매체액에서 천연가스가 통과하는 관으로 열전달이 이루어지고, 이렇게 가열된 천연가스는 정압기를 통과하면서 압력과 온도가 떨어져 공급온도를 0~5°C로 일정하게 유지하도록 되어있다. 열전도 문제는 활동적인 입자에서 그렇지 않은 입자로 에너지가 전달되는 현상으로 볼 수 있으며 외기온도에 의한 가스히터 내부로의 열전달 문제도 보온재와 물의 입자가 갖고 있는 에너지의 이동으로 볼 수 있다. 물론 고체와 액체간의 에너지 이동에는 차이가 있고 보온재의 재질이 어떠한가에 의해 열전달되는 속도가 결정된다[2].

본 연구에서는 겨울철 가스히터 가동 중단시, 외기온도에 따른 히터내부의 열전달 매체액이 빙점에 도달하는 시간을 추정하여 보수주기에 대한 결정 및 동파 취약 부위에 대한 영향을 판단하고자 실제 현장에서 운영되고 있는 가스히터를 선택해 실험으로 수행하기 어려운 결빙현상을 SIMPLE 알고리즘[3]과 FVM (Finite Volume Method)이 도입된 유체유동해석 코드인 FLUENT를 사용하여 계산을 수행하였다. 적용대상은 독일 Rick사에서 제작한 가스히터를 대상으로 삼았으며, 3차원 형상 작업시, 물리적으로 오차를 수용할 수 있는 부분의 형상은 전산모사 수행이 용이하도록 단순화하였으며 히터의 가동이 중단되고 가스의 차단이 이루어진 상태로 가정하여 비정상상태(Unsteady-state)해석을 수행하였다.

2. 기본이론 및 수행방법

2.1 문제설정 및 기본 방정식

가스히터 내부의 열전달 매체액의 현상은 Fig. 1과 같이 각각의 열전달 모드별로 적용하여 해석해야하는 복합적인 해석 대상으로 기본이론 및 수행방법은 다음과 같다.

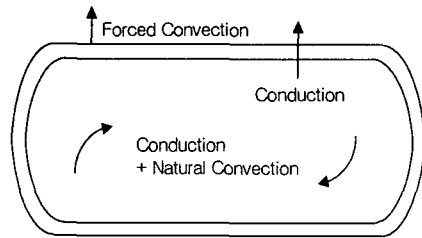


Fig. 1. Flow Diagram for Heat Transfer Phenomena.

2.1.1. 외부공기에 의한 강제 대류 (Forced Convection)

대류에 의한 히터외부의 열전달 영향 및 대류 열전달 계수(Convection Heat Transfer Coefficient)는 실험에 의해 정확히 규명된 자료가 없는 실정이다. 일반적으로 건물의 표면과 공기사이의 대류 열전달률의 값에 대하여는 실험적으로 제시된 바 있는데 본 연구에서는 이에 대한 자료를 이용하여 바람에 노출된 표면일때의 대류 열전달 계수를 설정하였다. 히터 외부의 풍속은 5m/s로 가정했으며, 대류 열전달 계수는 다음의 방정식에

의거하여 계산된다.

$$h_c = 5.8 + 4.1 \cdot v \quad (1)$$

2.1.2. 단열재 사이의 열전도 (Conduction)

보온재인 Mineral Wool의 온도분포는 전체를 어느 특정온도로 정할 수 없으므로 가스히터 전체중 보온재부분을 정상상태로 해석하여 보온재의 온도분포를 계산한 후 그 값을 초기조건으로 이용하여 정확성을 높였다. 일반적으로 보온재에 대한 시험은 70℃에서 수행되므로 상온(15℃)에서의 열전도도(κ)값을 얻기 위해 식 (2)의 KS F-2803 열전도도 대 온도 경험식을 이용하였다.

$$\kappa (W/m \cdot ^\circ K) = 0.0337 + 0.000151 \times Temp. (^\circ C) \quad (2)$$

열전달 현상 해석에서 중요한 요소는 보온재의 물성치이며 특히 열전도도는 결과에 심각한 영향을 미친다. 따라서 보다 정확한 값을 얻기 위해 금강 고려화학(주)에서 생산되어 납품되고 있는 암면(보온판 1호 : Mineral Wool)의 물성치를 입수하여 계산에 적용하였으며, 이때 이용된 물성치 및 조건은 Table 1에 명시하였다.

Table 1. Physical Properties of Insulation and Bath Water.

	밀도 (kg/m ³)	비열 (J/kg · °K)	열전도도 (W/m · °K)
보온재 (Mineral Wool)	100	837.36	0.035965
열전달 매체액 (City Water)	998.2	4182	0.6

기준온도 : 288 °K (15℃)

2.1.3. 배관에 의한 열손실

히터 내부에는 공급가스 배관과 연료가스 배관이 있으며 외부공기와 맞닿는 입·출구 부분이 단열시공이 되어있긴 하지만 이를 통해 지속적으로 열이 빠져나가는 열손실이 있게 된다. 이를 계산하기 위해 먼저 히터 외부로 빠져나가는 열유속(Heat Flux)을 계산하고 배관의 표면에서의 열전달률(Heat transfer rate)과 연계하면 각각의 가스배관을 통한 열손실을 구할 수 있다. 식 (3)은 정상상태(Steady State)시의 열유속을 계산하는 열전도 방정식(Conduction Equation)이다[4].

$$q'' = - \frac{T_2 - T_1}{\frac{L_1}{\kappa_1} + \frac{L_2}{\kappa_2}} \quad (3)$$

가스배관을 통한 열손실은 식 (3)을 이용하여 히터외부로 빠져나가는 열유속을 구하고 식 (4)와 같이 가스배관의 외부와 통한 단면적(A_{pos})을 곱하면 열전달률을 구할 수 있다. 식 (4)와 (5)는 같은 값이므로 서로 연계하면 가스배관을 통한 열유속 (q''_{ps})을 구할 수 있다.

$$q_{pos} = - \frac{T_2 - T_1}{\frac{L_1}{\kappa_1} + \frac{L_2}{\kappa_2}} \times A_{pos} \quad (4)$$

$$q_{ps} = q''_{ps} \times A_{ps} \quad (5)$$

2.1.4. 히터 내부 유체의 전도 (Conduction)와 자연대류 (Natural Convection)

히터내부의 열전달 매체액인 물은 내부의 열전도현상 (Conduction)이 지배적이지만 자연적인 대류현상이 발생한다. 이는 밀도차이에 의한 부력이 발생하여 온도가 낮은 물은 아래쪽으로, 온도가 높은 물은 위쪽으로 향하는 성질로 인한 자연적인 대류순환이다[5,6].

2.2 모델형상 및 격자계

전산모사를 수행키 위해 작성한 가스히터의 형상(Geometry)은 격자생성 및 히터용량에 중요한 영향을 미치므로 정확한 크기로 형상화하는 것이 필요하며 Fig. 2는 가스히터의 표면 격자 (Surface Mesh) 및 전체 형상을 나타낸다. 표면격자로는 삼각형 격자(Triangular Mesh), 내부공간격자로는 삼각뿔 격자 (Tetrahedral Mesh)가 이용되었으며 보온재에 해당되는 부분은 가스히터 전체 크기 및 형상을 고려해 표면으로부터 수직방향으로 얇은 판 형태로 성장하는 프리즘 격자 (Prism Mesh)가 이용되었다.

2.3. 경계조건 및 초기조건

겨울철 가스히터의 운전방식은 히터내부의 온도가 30℃가 되면 히터가 작동하여 온도를 높여가고 80℃가 되면 다시 정지하는 방식으로 내부온도에 의한 자동제어방식으로 운전되고 있다. 그러나 30℃에서 작동해야 할 히터가 어떤 문제에 의해 작동하지 않을 경우 내부 열전달 매체액의 결빙으로 인해 히터에 치명적 결

함의 발생할 수 있으므로 이러한 상황이 생겼을 경우로 시나리오를 설정하였다. 여기서 열전달 속도에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 보온재 재질의 열전도도와 외기온도이며, 특히 외기온도에 따라 히터 내부의 열전달 형태는 달라질 것이므로 열전달 현상을 검증할 수 있는 경우의 수는 여러 가지일 것이다. 그러나 본 연구에서는 통상의 겨울철 외기온도와 좀더 극한 상황의 외기온도로 크게 2가지 경우로 나누어 비정상상태 해석을 수행하였다.

가스공급 배관 및 연료가스 배관의 열손실은 가스히터 외부로 빠져나가는 열전달률 (Heat Transfer Rate)로 부터 계산된 열유속 경계조건을 주었고, 히터외부의 풍속은 통상의 겨울철 풍속인 5 m/s로 가정하고 히터가 재작동하는 온도인 30°C를 히터내부의 초기온도로 설정하였다. 가스히터의 전반적인 개략도를 Fig. 3에 나타내었으며 적용된 경계조건 및 초기조건을 Table 2, 3에 나타내었다.

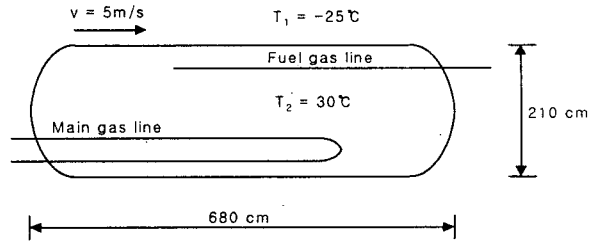


Fig. 3. Schematic Diagram of Gas Heater.

Table 2. Boundary Condition in System

경계조건 \ Case	Case 1	Case 2
Wind Speed	5m/s	5m/s
Temperature	-25°C	-15°C
Insulation	Mineral Wool	Mineral Wool
Insulation Thickness	80 mm	80 mm
Out Side Cover	Aluminium	Aluminium
Cover Thickness	1 mm	1 mm
Heater Body Material	Steel	Steel
Heater Body Thickness	1 cm	1 cm
Bath Water Type	City Water	City Water
Heat Flux of External Wall	-24.7191 W/m ²	-20.2247 W/m ²
Heat Flux of Main Gas Line	-0.8461 W/m ²	-0.6923 W/m ²
Heat Flux of Fuel Gas Line	-0.5547 W/m ²	-0.4538 W/m ²

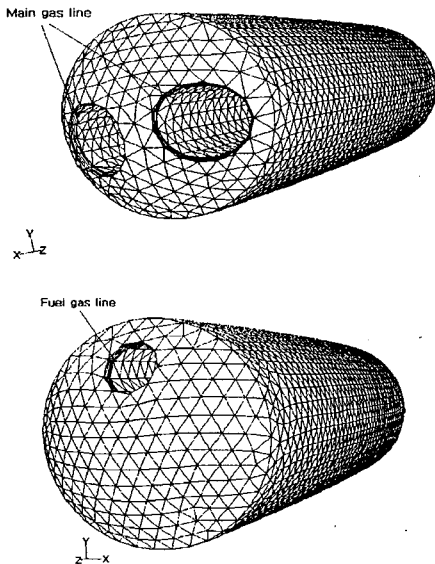


Fig. 2. External Surface Mesh and Geometry of Gas Heater.

Table 3. Initial Condition in System

초기조건 \ Case	Case 1	Case 2
히터내부온도	T(x, 0) = 30°C	T(x, 0) = 30°C

3. 결과 및 해석

3.1. 전산모사 결과

3.1.1. Case 1

두 개의 Case에 대한 전산모사를 수행하여 빙점에 도달하는 시간을 알아본 결과, 먼저 외기온도가 -25°C 인 Case 1은 885,600초 (10일+6시간)로 나타났으며, 시간의 경과에 따른 온도 분포도를 다음의 그림으로 도시하였다.

Fig. 4는 생성된 격자형상과 각 부분에서의 온도분포를 통합해 전체 온도 변화를 나타낸다. Fig. 5는 가스히터를 길이방향의 횡단면으로 절단하여 온도분포를 나타낸 그림이며, Fig. 6은 히터 상단부 중심 외벽에서 5mm 떨어진 지점의 위치별 온도곡선을 나타낸다. Fig. 7, 8, 9는 길이방향으로 종단면을 3부분으로 나누어 나타낸 온도분포도이다.

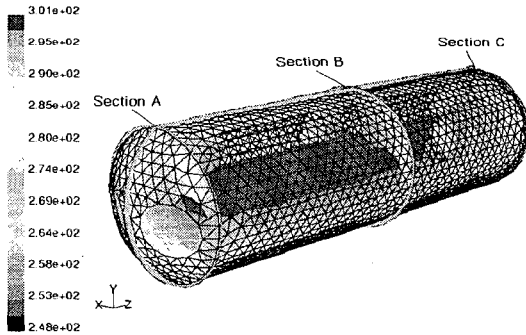


Fig. 4. Total Temperature Profile.

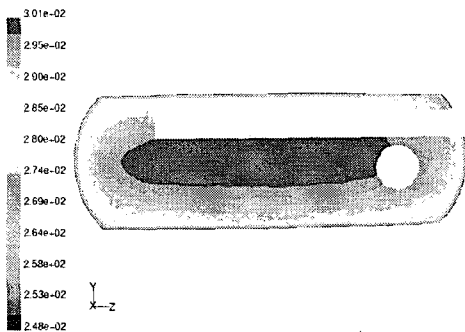


Fig. 5. Temperature Profile for Transverse Section.

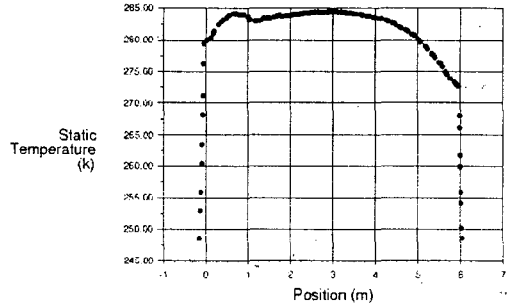


Fig. 6. Temperature Curve by Position.

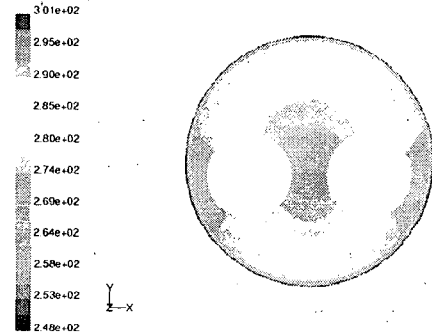


Fig. 7. Temperature Profile for Vertical Section (Section A).

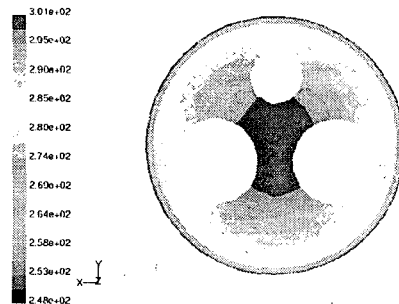


Fig. 8. Temperature Profile for Vertical.

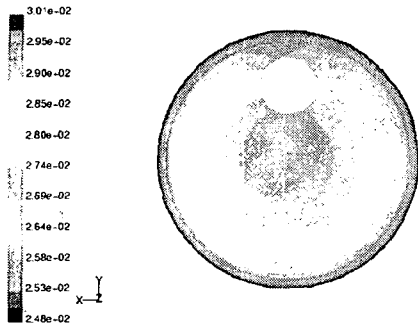


Fig. 9. Temperature Profile for Vertical Section(Section B) Section (Section C).

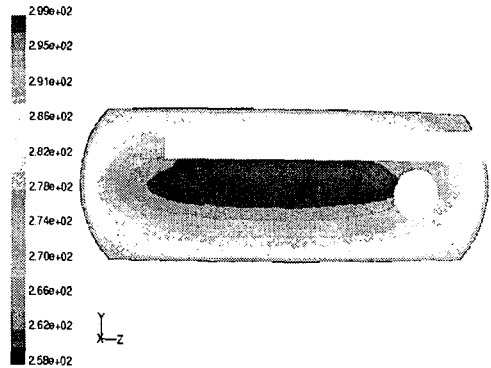


Fig. 11. Temperature Profile for Transverse Section.

3.1.2. Case 2

외기온도가 -15°C 인 Case 2의 경우, 빙점에 도달하는 시간은 1,274,400초 (14일+18시간)로 나타났으며, 시간의 경과에 따른 온도분포도를 다음의 그림으로 도시하였다.

Fig. 10은 Fig. 4와 마찬가지로, 생성된 격자형상과 각 부분에서의 온도분포를 통합해 전체 온도 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 11은 가스 히터를 길이방향의 횡단면으로 절단하여 온도분포를 나타낸 그림이며, Fig. 12는 히터 상단부 중심 외벽에서 5mm 떨어진 지점의 위치별 온도곡선을 나타낸다. Fig. 13, 14, 15는 길이방향으로 종단면을 3부분으로 나누어 계산한 온도분포도이다.

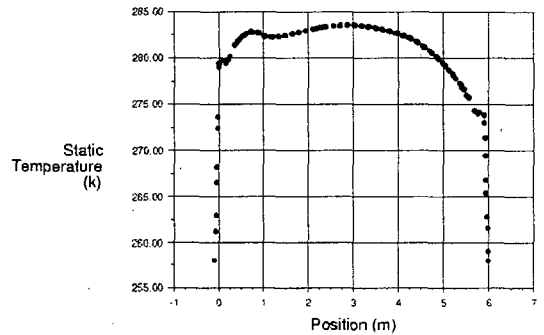


Fig. 12. Temperature Curve by Position.

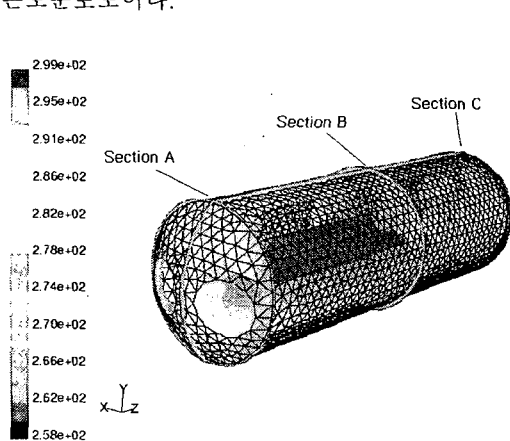


Fig. 10. Total Temperature Profile.

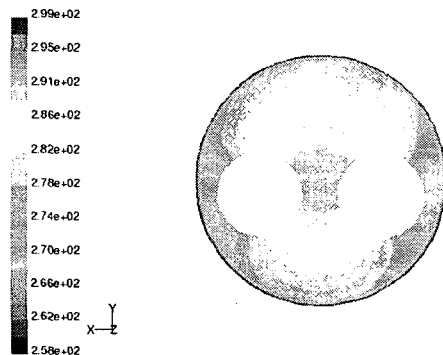


Fig. 13. Temperature Profile for Vertical Section (Section A).

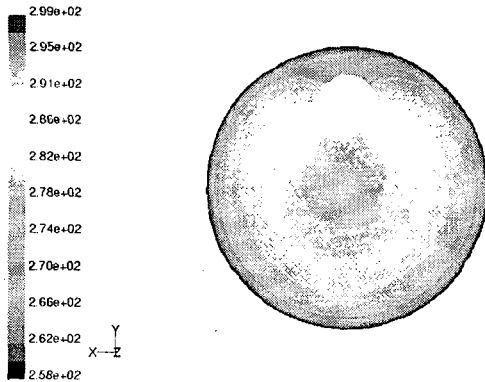


Fig. 14. Temperature Profile for Vertical.

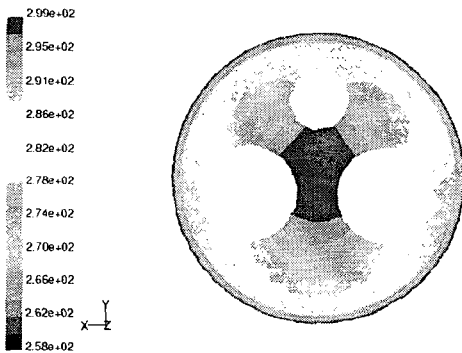


Fig. 15. Temperature Profile for Vertical Section (Section B) Section (Section C).

3.2. 결과 해석

본 연구의 목적은 겨울철 가스히터의 가동 중단시, 열전달 매체액이 빙점에 도달하는 시간을 계산하여 보수주기에 대한 결정 및 동과 취약 부위에 대한 영향을 판단하고자 하는 것이다. 열전달 속도에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 재질의 열전도도와 외기온도이며, 외기온도에 따른 히터 내부의 열전달 매체액이 빙점에 도달하는 시간을 비교하였다.

Fig. 5와 11의 결과를 보면 오른쪽 상단부 연료가스 배관과 외부가 접하는 부분이 가장 취약하다는 것을 알 수 있다. 이는 열손실이 지속적으로 발생하는 연료가스 배관이 상층부에 위치하고 있어서 상대적으로 히터 외부에 가장 근접해 있기 때문이다. 또한 전체적으로

볼 때 히터의 모서리 부분이 가장 먼저 온도가 낮아지는 것을 알 수 있으며, 이는 주어지는 일정량 (단위 체적)의 열매체액에 대해 열손실이 일어나는 면적이 다른 부위보다 커서 상대적으로 열손실이 많이 일어나기 때문이다.

계산 결과 외기온도가 -25°C 인 Case1의 경우 빙점에 도달하는 시간은 885,600초 (10일 6시간)이며, Case2의 경우는 1,274,400초 (14일+18시간)로 나타났다. 여기서 Case 1의 경우, 겨울철 기온중 가장 극한 상황이며, 통상 기준선택시 가장 극한 상황의 시나리오를 선택하는 것이 일반적이다.

4. 결론

본 연구에서는 독일 Rick사에서 제작된 가스히터를 대상으로 겨울철 히터 가동 중단시, 열전달 매체액이 빙점에 도달하는 과정에 대해 비정상상태 해석을 수행하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 외기온도가 -25°C 이고 내부온도가 30°C 인 경우, 빙점에 도달하는 시간은 885,600초 (10일+6시간)으로 나타났다.
- (2) 외기온도가 -15°C 이고 내부온도가 30°C 인 경우, 빙점에 도달하는 시간은 1,274,400초 (14일+18시간)으로 나타났다.
- (3) 계산 결과를 통해, 동과 취약부위는 연료가스 배관 상단부와 히터의 모서리 부분인 것으로 확인되었다.
- (4) 드레인 배관이나 각종 계장설비의 설치로 인한 국소부위의 단열성능의 저하를 고려하면 실제 결과와 차이를 보일 수 있으나, 전체적인 온도분포의 경향에 대해서는 그 오차가 그리 크지 않으므로 본 연구에서는 국소부위의 영향은 고려하지 않았다.
- (5) 모든 결과를 종합하여 판단할 때, 겨울철 가스히터 (독, Rick사 제작)의 가동이 30°C 에서 중단되더라도 일주일정도는 결빙현상이 생기지 않을 것으로 판단된다. 그러나 이것은 실험에 의한 검증이 이루어지지 않은 전산모사만의 결과임을 주지할 필요가 있으며, 현장의 여러 경험과 전산모사의 결과를 조합하여 보수주기를 결정하는 것이 가장 최선으로 사료된다.

사용기호

- h_c : Convection Heat Transfer Coefficient
 U : Wind Speed (m/s)
 T : Temperature (°K)
 κ : Thermal Conductivity (W/m-°K)
 L : 두 도체사이의 간격 (m)
 q : Heat Transfer Rate
 q'' : Heat Flux
 q''_{ps} : Heat Flux of Gas Line
 A_{pos} : 가스배관의 외부와 통한 단면적
 A_{ps} : 가스배관의 겉 표면적

참고문헌

1. Incropera, F.P., De Witt, D.P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 1990, John Wiley & Sons
2. H. S. Carslaw, J. C. Jaeger, "Conduction of Heat in Solids", 1986, Clarendon Press · Oxford
3. Patankar, S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", 1980, Hemisphere Publishing Corporation
4. Frank W. Schmidt, Robert E. Henderson, Carl H. Wolgemuth, "Introduction to Thermal Sciences" 2nd ed., 1984, John Wiley and Sons, Inc.
5. J. N. Reddy, A. Satake, " A Comparison of a Penalty Finite Element Model with the Stream Function-Vorticity Model of Natural Convection in Enclosure", J. Heat Transfer, Vol. 102, pp. 659~666, 1980
6. G. de Vahl Davis, "Natural Convection of Air in a Square Cavity : A Bench Mark Numerical Solution", Int. Num. Methods in Fluid, Vol. 3, pp. 249~264, 1983
7. Bird, R.B., Stewart, W.E., Lightfoot, E.N., "Transport Phenomena", 1960, John Wiley & Sons