

# 천연가스 플랜트의 극저온용 열교환기 설계

## Design of Heat Exchanger for Ultra Low Temperature of Natural Gas

#조종래<sup>1</sup>, \*전우진<sup>2</sup>, 김창수<sup>3</sup>, 박승하<sup>3</sup>

#J. R. Cho(cjr@hhu.ac.kr)<sup>1</sup>, \*W. J. Jeon<sup>2</sup>, Ch. S. Kim<sup>3</sup>, S. H. Park<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 한국해양대학교 기계·정보공학부, <sup>2</sup> 한국해양대학교 대학원 기계공학과, <sup>3</sup> 동화엔텍(주)

Key words :LNG(액화천연가스), Heat exchanger(열교환기), Thermal stress(열응력)

### 1. 서론

세계적으로 LNG 소비가 늘어남에 따라 플랜트 개발이 치열해지고 있는 가운데, 플랜트 시장에 진입하기 위해서는 액화 및 운반에 필요한 핵심기술의 개발이 필수적이다.

LNG 플랜트의 핵심적인 기술인 천연가스 전처리, 액화기술 및 부품 등은 국내 자체 개발 사례가 없는 실정이며, 작동 환경이 고압 극저온이기 때문에 기술 개발의 시작단계에 있는 우리나라로서는 많은 실험과 연구가 필요하다.

본 논문에서는 천연가스 액화공정에 필수적인 열교환기를 개발하는 것을 목적으로, 본 제품을 설계 제작하기 전 축소모델의 열교환기를 설계하고 제작하는 과정에서 유한요소해석을 통하여 건전성을 평가하였다.

### 2. 열교환부 구조해석

#### 2.1 내부 압력에 대한 구조안전성 해석

우선적으로 생각해 볼 수 있는 문제는 저온 고압의 작동 환경에 따른 압력에 대한 구조 안전성이다. 고효율의 열전달을 위해 비교적 강성이 약한 알루미늄을 사용함으로써 이 부분의 설계를 더욱 어렵게 하고 있다.

유한 요소 해석의 특성상 전체 모델을 적용하여 해석 할 경우 많은 시간이 소모되므로 Fig.1의 전체 모델 중에서 모서리 부분을 추출하여 Fig.2 와 같이 모델링 한 후 대칭 경계조건을 부여하였다.

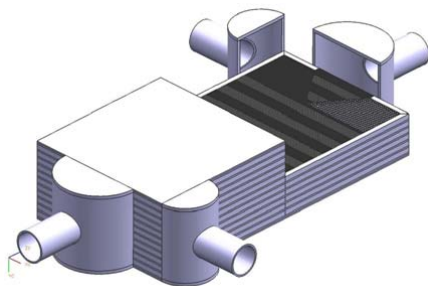


Fig.1 Schematic of full model

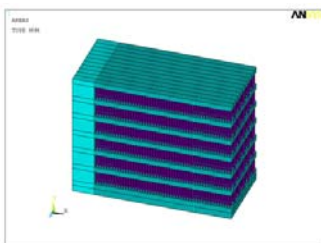


Fig.2 Part layer model

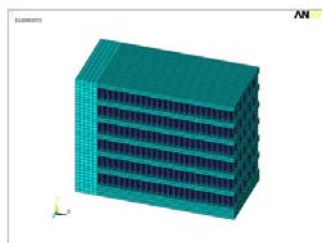


Fig.3 Finite element model

내부 압력조건은 Table.1과 같이 설계압력과 수압시험압력을 적용하였다.

Table.1 Application of pressure

Case	High pressure	Low pressure
Design	50bar	5bar
Hydro test	65bar	65bar

#### 2.2 온도 변화에 따른 열응력 해석

열교환기에 처음부터 저온의 가스가 다량 유입되면 급격한 온도 변화에 따른 응력을 이기지 못하고 파손되는 현상이 발생한다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 작동 전 서서히 냉각시키는 과정을 거치게 되는데, 이 과정에서 ISO규격상의 냉각 속도 제한과 해석 값이 일치하는지 검토해볼 필요가 있다.

가스 유입 과정에서 가장 큰 온도차가 발생하는 부분은 가장 바깥층인 부분을 고려하여 Fig.4와 같이 단일층만 모델링하고, 해석을 수행하였다.

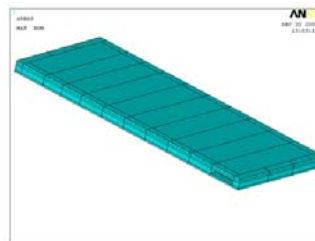


Fig.4 1st layer model

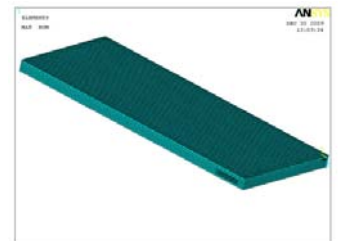


Fig.5 Finite element model

입구에서 -140℃의 질소가스를 소량씩 주입하여 출구로 배출되면서 열전달을 통해 서서히 전체 온도를 내리게 되는데 출구부의 온도가 20℃에서 -100℃가 될 때까지 이 과정을 지속하게 되며, 최종온도에 도달하는 시간을 조절하면서 해석을 수행하였다.

Table.2 Case of analysis

Cooling rate [°C/minute]	Process time [minute]
2	60
5	24
10	12
15	6

Al-3003-O의 극저온 상태에서의 물성치는 ASME 코드상의 수치에 비례하여 적용하였다.

Convection Heat transfer coefficient	Reference temperature	Fluid temperature	Coefficient of thermal expansion
100W/m <sup>2</sup> · K	20℃	-140℃	67 x 10 <sup>-6</sup> /℃

Table.3 Thermal property

### 3. 구조해석 결과

#### 3.1 내부 압력에 대한 해석 결과

Fig.6과 7은 각각 설계압력과 수압시험압력에 대한 결과이다. Plate와 side Bar가 brazing된 부분에서 최대응력이 발생 했으며, ASME 코드상의 허용기준을 만족하였다.

Table.4 Result of pressure analysis

Pressure	von Mises stress[MPa]	ASME Code limit [MPa]
Design	23.3	36(1.5Sa)
Hydro test	43.1	46.8(0.9Sy)

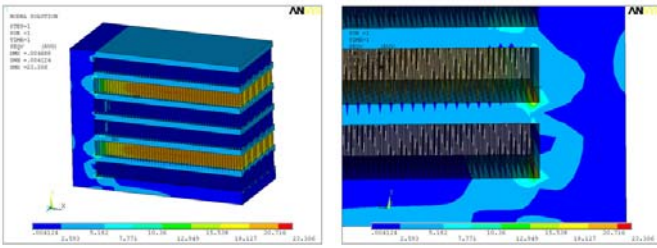


Fig.6 Distribution of von Mises stress - Design

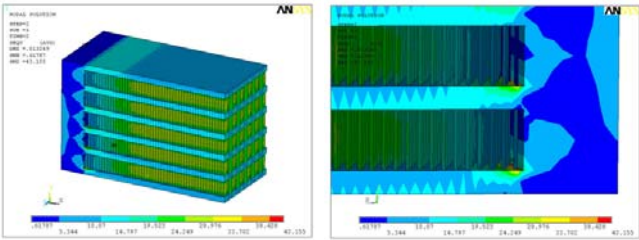


Fig.7 Distribution of von Mises stress - Hydro test

3.2 열응력 해석 결과

최대 응력이 발생하는 시간을 포함한 여섯개의 데이터를 추출하여 결과를 비교하였다.

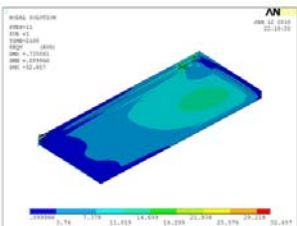


Fig.8 Max. von Mises stress of 2°C/minute

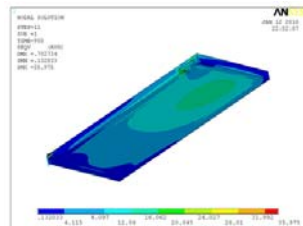


Fig.9 Max. von Mises stress of 5°C/minute

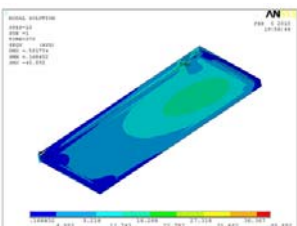


Fig.8 Max. von Mises stress of 10°C/minute

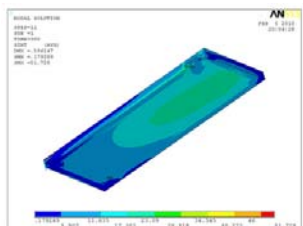


Fig.9 Max. von Mises stress of 15°C/minute

Table.5에서 보이는바와 같이 냉각시간이 빨라질수록 발생하는 최대응력도 함께 상승했으며, 5°C/minute의 속도 이상으로 냉각할 경우 ASME 코드상의 허용치를 초과하는 것으로 결과가 나타났다. ISO규격에서는 냉각 속도를 2°C/minute 이하로 할 것을 권장하고 있는데 위의 결과는 이를 만족하며 타당한 결과라고 할 수 있다.

Table. 5 Result of Thermal-Structural analysis

Cooling rate [°C/minute]	Time[s]	Max stress[MPa]	ASME Code limit [MPa]
2	2160	32.9	36(1.5Sa)
5	900	36	
10	520	40.9	
15	300	51.7	

Fig.10은 시간에 따른 응력변화를 나타내고 있다. 초기에 가스 주입이 시작되면 온도 차로 인하여 응력이 점차 증가하게 된다. 온도에 따른 변형차가 최대가 되었을 때, 최대 응력이

나타나게 되며, 이후로 점차 온도 평형을 이루면서 안정을 찾게 된다. 모두 동일하게 입구의 brazing부에서 최대 응력이 발생하였으며, 냉매 초기 주입량이 중요한 요인이라는 것을 알 수 있다.

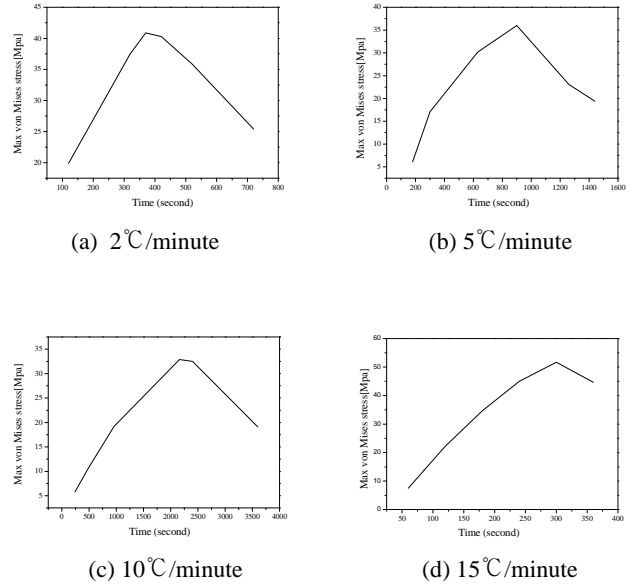


Fig.10 Stress history with cooling rate

4. 결론

LNG 플랜트에서 천연가스의 액화에 사용 될 편형 열교환기의 고압작동 환경에서의 건전성과 예냉 과정에서의 온도 변화에 대한 거동을 유한요소 해석을 통해 평가하였으며, 결과는 아래와 같다.

1. 설계압력 및 수압시험압력에 대한 von Mises 응력 평가 결과 ASME 코드의 허용기준을 만족하여 건전성을 확인하였다.
2. ISO 규격에서 권장하는 분당 2도씩 냉각하는 조건에 대해 von Mises 응력 평가결과 ASME 코드의 허용기준을 만족 하였다.

후기

본 연구는 국토해양부 가스플랜트 사업단의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, II Part D, 2007.
2. ISO 15547-2, Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Plate-type heat exchangers.
3. Introduction to Heat transfer, Frank P. Incropera., David p. DeWitt, 2005
- 4.Properties of aluminum alloys, J.Gilbert Kaufman,1999
5. ANSYS Finite element computer code & Manual