

열 및 압력 하중을 받는 소형 열 교환기에 대한 육면체요소와 사면체 요소의 사용에 따른 해석 결과 비교

*명만식¹, 유 봉², 김윤재²

¹ 고려대학교 기계공학과 대학원, ² 고려대학교 기계공학과

Comparison of stress results between brick element and tetrahedron element in mini heat exchanger subject to thermal and pressure loads

*Man-Sik Myung¹, Bong Yoo², Yun-Jae Kim²

¹ Graduated, Dept. of Mech. Eng., Korea Univ., ² Dept. of Mech. Eng., Korea Univ.

Key words : Mini-channel heat exchanger (소형 열교환기), Pressure and thermal analysis (압력 및 열 응력 해석), 3-dimensional FEM model (3 차원 유한요소 해석 모델)

1. 서론

21 세기 고유가에 대비하기 위해 세계 원자력선진국들은 에너지 지속성, 경제성, 안전성 및 신뢰성, 핵확산저항성 및 물리적 방호성을 설계목표로 제 4 세대 원자로 (Generation IV Reactor) 시스템 개발을 추진하고 있다. 또, 제 4 세대 원자로시스템의 초임계이산화탄소 (Supercritical Carbon Dioxide, S-CO₂) 브레이튼 사이클(Brayton Cycle)을 이용한 액체금속 고속로(Liquid Metal-Cooled Fast Reactor)의 선진 에너지전환시스템은 기존의 랭킨 사이클(Rankine Cycle)에 비해 효율을 크게 개선할 수 있다. 해양구조물에 사용되고 있는 소형열교환기(Mini-heat exchanger: MHE)는 원자력 산업에서 큰 관심을 갖고 있다. 이는 MHE 에 기존에 사용되고 있는 헬-튜브 형식의 열교환기에 비해 4~6 배 정도 작고 가볍기 때문에 경제적 향상에 도움을 준다. MHE 는 얇은 금속판에 화학적인 표면작업을 통해 미세한 수로를 만들고 금속판을 하나씩 교차하여 적층으로 쌓은 후 확산 결합하여 제조한다.

이 MHE 는 정상운전 상태의 경우 설계 변수들인 압력, 온도, 평균 열전달계수와 유량, 유량 영역, 열 유속, 열 등이 고온과 저온 채널(channel)에서의 입구와 출구에 적용하여 설계된다(1,2). MHE 의 미래형 제 4 세대 원자로시스템에 대한 적용 여부는 고온 고압의 운전조건에서의 재료문제, 구조적 건전성 문제 등에 달려 있다(3,4). 정상 상태와 과도 상태(transient conditions)동안 큰 온도차와 압력차에 대해서 MHE 의 작동여부가 관심의 대상이 되었다.

이 논문의 목적은 냉각각 원자로의 정상 운전상태일 때 S-CO₂ 브레이튼 사이클을 이용한 선진 에너지전환시스템의 MHE 에 대한 육면체 및 사면체 3 차원 유한요소 해석 모델 방법을 기술하고 열 해석과 응력 해석을 수행하여 그 결과는 ASME PV&P Section VIII 에서 허용하는 설계허용응력과 비교함으로써 MHE 의 구조적 건전성 평가를 위함이다.

2. 유한 요소 해석

MHE 는 431×351 model(저온과 고온 각각 431 개, 351 개)이며, 그 크기는 600×500 mm×560 mm³이다.

S-CO₂ Brayton cycle 이 이용된 MHE 의 압력에 대한 해석으로는 정상상태의 고온과 저온수로의 압력이 각각 7.463MPa 와 19.99MPa 이 작용하였을 경우를 고려 하였고, 열 하중에 의한 해석으로는 각수로의 입구와 출구의 온도 경계조건의 차이를 줌으로서 해석을 수행하였다. 열 하중에 사용된 고온채널과 저온채널의 입구와 출구온도는 각각 435.8℃와 186.8℃와 180.6℃와 402.1℃를 주었으며, 열 전달 계수는 0.548kW/m²K 와 0.629kW/m²K 를 주었다. Table 1 은 MHE 의 해석에 사용된 재료 물성을 보여준다.

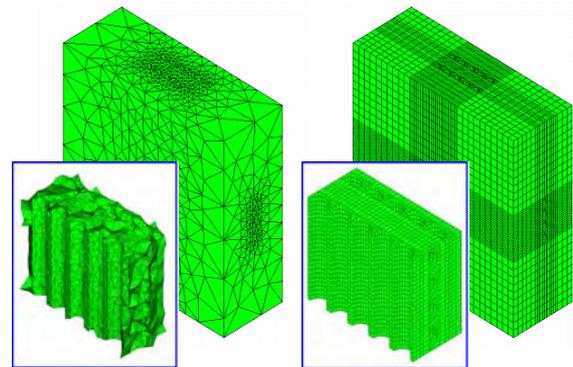
본 연구의 해석대상은 MHE 의 중간 부분을 선택한 5×4

model 로 MHE 의 채널의 간격(p)과 직경($D = 1 \text{ mm}$)의 관계가 $p/D=1.3$ 인 경우를 수행하였다.

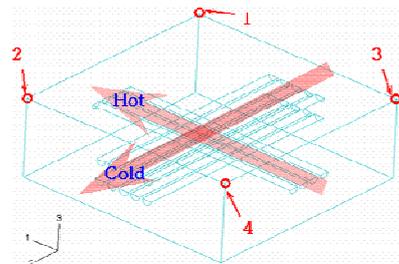
Table 1 Properties of SS316 (Stainless Steel 316)

Temp [°C]	Thermal conductivity [W/mm°C]×10 ⁵	Modulus of elasticity [GPa]	Thermal Expansion [mm/mm°C]×10 ⁶
21.1	14.93	195.13	15.30
93.3	16.12	190.30	16.74
178	17.47	184.44	18.00
301.7	19.37	175.34	19.17
426.7	21.10	166.17	19.98

모델형상은 Fig 1 에 또 경계조건은 Fig. 2 와 같다. MEH 의 유한요소해석에 사용된 프로그램은 상용 전산해석 프로그램인 ABAQUS Ver. 6.4 로, 해석에 사용된 요소는 Tetrahedron Element (10 절점)와 Brick Element (8 절점)를 사용하였다. Tetrahedron Element 와 Brick Element 의 경우, 절점의 수와 요소의 수는 각각 99912 개, 66894 개와 48849 개, 40160 개이다.



(a) Tetrahedron element (b) Brick element
Fig. 1 Finite element mesh for mini-heat exchanger

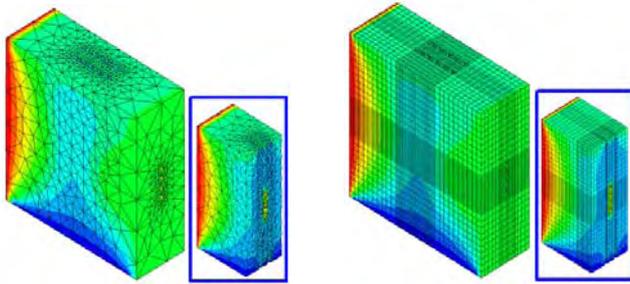


Nodes No.	X-Direction	Y-Direction	Z-Direction
1	Constrained	Constrained	Constrained
2	Constrained	Free	Constrained
3	Free	Constrained	Constrained
4	Free	Free	Constrained

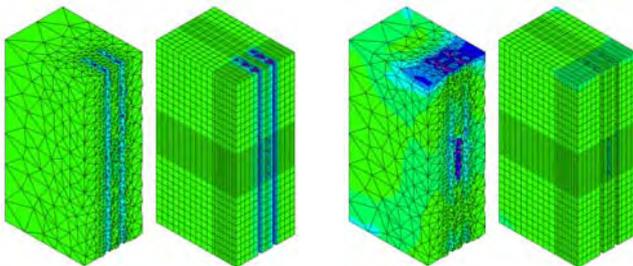
Fig. 2 Boundary condition of 5×4 reduced mini-heat exchanger

3. 해석 결과 및 토의

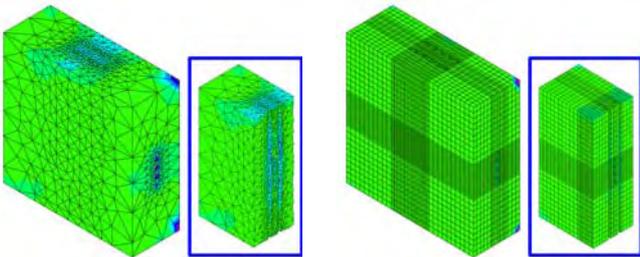
축소된 모델의 MHE의 열 해석과 응력 해석 및 동시 작용한 경우의 해석을 수행하여 요소 별 해석결과를 비교하였다.



(a) Tetrahedron element (b) Brick element
Fig. 3 Contour of thermal Analysis



(a) Stress by pressure load (b) Stress by thermal load
Fig. 4 Contour of stress analysis



(a) Tetrahedron element (b) Brick element
Fig. 5 Contour of combine stress analysis

Fig 3. 은 열해석의 결과로서 온도 변화의 최대 지점은 각 채널의 입 출구 부분에 나타남을 알 수 있다. 또한, 열 해석을 기반으로 한 열 응력해석의 결과는 Fig 5. 의 복합 하중의 분포와 동일 하였다.

Fig 4. 의 (a)는 압력하중만 가하였을 때의 응력 분포의 단면을 보여주고, (b)는 복합하중 상태의 응력분포 단면을 보여 주고 있다.

Table 2 Stress results of element type & load type

Element Type	Load Type	Maximum Stress [MPa]
Tetrahedron Element	Pressure	164.2
	Thermal	229.9
	Combine	271.5
Brick Element	Pressure	86.94
	Thermal	136.7
	Combine	162.8

Table 2 는 각 요소를 사용하였을 때의 하중 형태에 따른 최대 응력의 크기를 Von Mises 값으로 보여준다. 세 종류의 하중의 형태에 따른 각 응력의 크기가 사면체 요소를 사용하였을 때가 전부 더 큰 결과 값을 보여준다.

이 결과는 Fig 6 은 Tetrahedron element 가 Brick element

보다 더 큰 응력값을 나타내는 것을 채널의 길이를 따라 가며 보여주고 있는데, 이 결과는 Table2 의 결과와 연관하여 생각해 볼 수 있다.

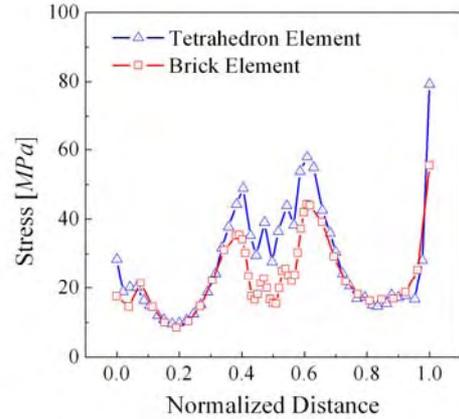


Fig. 6 Stress distribution along the hot channel

Table 2 에 나온 결과는 ASME PV&P Section VIII 에 나와 있는 SS316 의 설계기준과 비교하여 볼 때 복합하중시의 허용응력 값인 330MPa 보다 271.5MPa 와 162.8MPa 로 사용된 두 요소 다 허용응력을 만족한다.

4. 결론

본 논문은 납냉각 고속원자로의 S-CO₂ Brayton cycle 에 사용될 MHE 의 정상 상태 열 해석과 압력응력 해석을 통해 각 요소에 따른 다음의 결론을 얻었다.

- 각각의 압력하중과 열하중을 받을 때 본 논문에 사용된 육면체요소의 경우 사면체요소보다 최대응력을 줄일 수 있다.
- 압력하중과 열하중을 동시에 받을 때, 사면체요소의 경우가 육면체요소보다 최대응력이 크게 발생하지만, 두 요소의 최대응력은 허용응력보다 작음을 알 수 있다.

후기

이 연구는 과학 기술부 지원으로 수행하는 원자력 연구 개발 사업(원자력 기초 공동 연구소)과 BK21 의 일환으로 수행 되었습니다.

참고문헌

1. J.J.Sienicki and A.V.Moisseytsev, 2005, "SSTAR Lead-Cooled, Small Modular Fast Reactor for Deployment Sites-System Thermal Hydraulic Development", Proceeding of ICAPP
2. S.J Dewson and Xiuqing Li, 2005, "Selection Criterion for the High Temperature Reactor Intermediate Heat Exchanger", Proceeding of ICAPP
3. Bong Yoo, Young-Il Kim, Yun-Jae Kim, structural Integrity of Mini Heat Exchanger for Generation IV Reactors Subjected to Pressure Load, KNS, May 25-26, 2006, Korea.
4. Bong Yoo, R.F.Kulak, Yun-Jae Kim, Pressure and Thermal Stress Analysis, of Generation IV Reactor System, Mini-channel Heat Exchanger, 14th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-14), July 17-20, 2006, Miami, U.S.A