

일체형 세라믹 열교환기의 전산 열응력 해석에 관한 연구

팽진기^{*†}, 김기철^{**}, 윤영환

^{*}경상대학교 항공기계공학과, ^{**}창원대학교 대학원, 창원대학교 기계공학과

A Study on Numerical Analysis of Thermal Stress for an Monolith Ceramic Heat Exchanger

Jin Gi Paeng^{*†}, Ki Chul Kim^{**}, Young Hwan Yoon

^{*}*School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea*

^{**}*Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Changwon National University, Changwon 641-773, Korea*

Department of Mechanical Engineering, Changwon National University, Changwon 641-773, Korea

(Received July 9, 2009; revision received October 5, 2009)

ABSTRACT: The thermal stresses of a ceramic heat exchanger were analyzed numerically since the ceramic material is good in heat resistance but weak in the thermal stress. The analysis of thermal stress was conducted in the ceramic core with two boundary conditions depending on bolt jointing. The thermal stresses were computed by applying temperature and pressure distributions obtained from the numerical results of conjugate heat transfer to ANSYS WORKRBENCH. When number of bolt joining halls was reduced from 8×2 to 4×2 , the maximum principal stresses decrease by 47.6~50.5% and increase in safety factors by 2.18~2.5 for ultimate tensile strength. Thus, it can be said that bolt joining halls should be minimized in ceramic heat exchanger to be efficient in reducing thermal stress. In addition, the width of particular gas flow passages were revised from 52 mm to 42 mm to reduce maximum thermal stresses since certain passages experienced high thermal stresses. From the revision, safety factors were increased by 13.8~14.1% for the boundary condition of 4×2 bolt joining halls. Therefore, it is suggested that thermal stress can be reduced by changing local geometry of a ceramic heat exchanger.

Key words: SOFC(고체산화물 연료전지), Recuperator(폐열회수기), Cross-flow(직교류유동), Thermal stress(열응력), Safety factor(안전계수), FSI(연성해석)

1. 서 론

세계 에너지 수요는 산업발전과 인구증가에 따라 계속 증가하는 추세이며 현재 주요 에너지원인 화석연료의 고갈과 환경오염으로 인한 지구 온난화의 부작용으로 친환경적이고 안정적인 에너지

공급을 위해 대체 에너지 및 연료전지의 중요성이 강조되고 있다. 연료전지 중 고체산화물 연료전지(SOFC-solid oxide fuel cell)는 천연가스, 석탄가스를 연료로 사용하여 온도가 600~1,000℃에서 작동하며, 60%에 이르는 높은 전기변환 효율을 가지고 있다. 또한 고온의 폐열을 회수하는 열 복합발전이 현재 세계적으로 많은 연구가 진행되고 있다. Fig. 1은 가스터빈/연료전지 혼합발전 시스템의 개념도를 나타낸 것이다. 동 그림에서 HRU는 고온의 열을 회수하는 열교환기이다.

[†] Corresponding author

Tel.: +82 55-751 6574; fax: +82 55-759 6536

E-mail address: paengjg@gnu.ac.kr

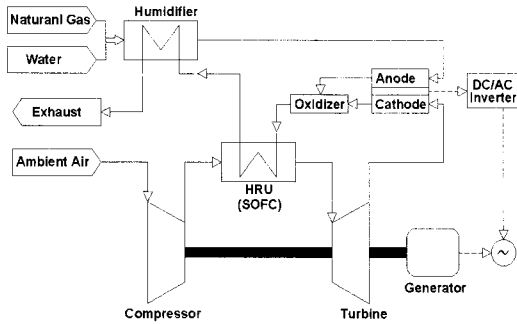


Fig. 1 Schematic of SOFC/GT hybrid power generating system.

대부분의 일반 열교환기는 대개 150 °C 이하의 온도에서 작동되고 있다. 그러나 고체산화물 연료 전지의 열 회수장치와 같이 고온부는 세라믹 열교환기가 담당하고 저온부는 내열합금강 열교환기가 담당하는 하이브리드 형태의 폐열회수기가 관심의 대상이 되고 있으며, 그 예가 Fig. 2와 같이 3 pass의 폐열 회수기(1 ceramic core 및 2 metallic core)이다. 이들 중 세라믹 폐열회수기(ceramic recuperator)는 약 800 °C 이상의 고온 폐열 가스에 대해서 고가의 내열합금을 쓰는 금속 폐열회수기(metallic recuperator)에 비해 경제성이 높고, 사용 수명이 3배 정도 높은 것으로 알려져 있다. 그러나 세라믹 열교환기는 고온특성에는 강하나 열 충격에는 취약한 단점을 가지고 있어 내구성과 신뢰성에 문제가 있다.

배열회수기 성능향상은 전체 시스템의 성능을 향상시키므로 다음과 같은 많은 연구가 진행되어 왔다. Bourisa et al.⁽¹⁾은 높은 열전달 효율을 얻기 위하여 튜브 다발의 열교환기를 수정 시도하였다. 세계의 서로 다른 단면 사이에서 튜브의 최적모형에 대응하는 Recuperator의 효율을 시뮬레이션과 비교하여 결정하였다. Tsuzuki et al.⁽²⁾은 FLUENT Code를 적용하여 출력된 순환 열교환기의 3D 열 및 수력 시뮬레이션을 수행하였다. Yang et al.⁽³⁾은 SiC와 MAS 세라믹 코어 재질의 50 W 고효율 세라믹 열교환기 내부 열과 압력을 예측하기 위하여 STAR-CD로 수치계산을 수행하였다. Park et al.⁽⁴⁾은 고효율 세라믹 열교환기 설계를 위한 이론 해석 및 CFD시뮬레이션에 관한 연구를 수행하였다. 대부분의 문헌들은 튜브 관군형태이거나 열교환기의 유동장만을 수치계산하여 열교환기의 전 열성능을 파악하였다. 그러나 Paeng and Yoon⁽⁵⁾은

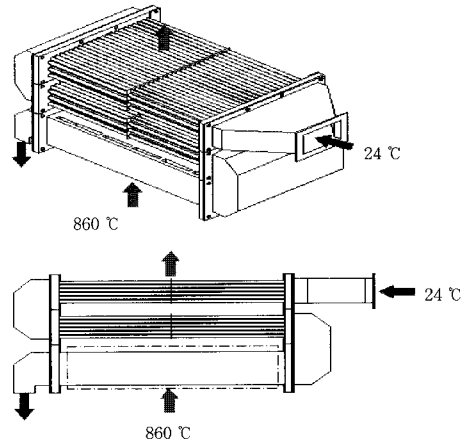


Fig. 2 Schematic drawing of SOFC/GT hybrid recuperator.

고온가스, 세라믹 코어, 저온공기에 이르는 conjugate heat transfer 수치계산법을 사용하여 사각형 유로에서 유동이 직 교류 형태인 세라믹 열교환기의 전체 열전달에 대해 수치계산하여 구한 값과 여러 연구자들이 만든 상관관계식으로 계산한 이론값과 비교하여 상관관계식들의 정밀성과 적용성을 비교하였다.

따라서 본 내용은 고온의 가스와 저온의 공기가 직교 유동 형태인 세라믹 열교환기에 대한 Paeng and Yoon⁽⁵⁾의 연구에서 CFD 상용 프로그램으로 수치계산하여 구한 온도 및 압력분포를 하중조건으로 열응력 해석을 수행하는 연성해석(Thermal FSI : thermal-fluid-structure interaction) 방식을 이용하여 유동의 온도분포에 따른 열응력 및 열변형이 세라믹 열교환기의 안전성에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

2. 세라믹 코어의 설계

본 연구에 사용된 세라믹 배열회수기는 단순 사각 핀 형태의 열교환기로 일반적으로 Fig. 3과 같이 고온의 유체(배기가스 m_{gas})와 저온의 유체(공기 m_{air})가 세라믹 코아에 의해 혼합되지 않고 직 교류 방식으로 열 교환 한다.

본 연구의 해석 대상인 세라믹 열교환기의 세부 치수는 Fig. 4와 같으며 동 그림에서 붉은 일점쇄선은 수치해석 영역으로 중심선을 중심으로 양쪽이 상사이므로 그 절반만 계산하였다. 전체

특성을 이용해서 열응력해석을 수행하게 된다.

즉 CFD 계산에 의한 고체표면 온도분포가 열응력 계산의 입력 조건이 되어야 하는데 그 한 예로서 가스 측 입구온도 850 °C 및 공기 측 입구온도 560 °C의 조건에서 CFX에 의해 conjugate heat transfer 수치해석으로 구한 온도분포가 Fig. 6의 (a)에 나타나 있고, 동 온도분포를 ANSYS WORKBENCH에 입력하여 열응력 계산을 위한 경계조건으로 사용한 온도분포가 (b)에 나타나 있다. 동 그림들에서 온도분포에 대한 해석 결과가 거의 동일하게 나옴을 알 수 있다.

3.1 유한요소 모델

열응력 해석을 위한 유한요소 모델은 Fig 7과 같다. 앞서 CFX로 계산한 모델에서 관심영역 내의 유체 영역만을 제외한 유한요소 모델로서 모델링에는 8-node 3-D solid element를 사용하였으며, 476,640개의 요소(element)와 823,004개의 절점(node)으로 구성되어 있다.

3.2 구속조건

열응력 해석을 위한 변위구속조건은 Fig. 8과 같이 수치해석 영역인 세라믹 열교환기의 절반에 대하여 공기통로 입구 및 출구 support head 부에서 총 (4×2)개의 접합 홀(볼트 체결)에 선 구속(붉은 색) 조건만 설정한 것이 그림 (a)에 표시되어 있으며(이하 구속조건 (1)로 표기), (a)의 구속조건과 동일하나 공기통로 입구 및 출구 support head 부에서 총 (2×2)개의 접합 홀에 선 구속 조건을 설정한 것이 그림 (b)이며(이하 구속조건 (2)로 표기)로서 (a)와 (b) 각 구속조건들에 대한 그

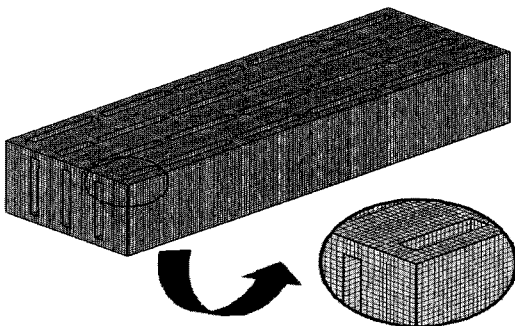
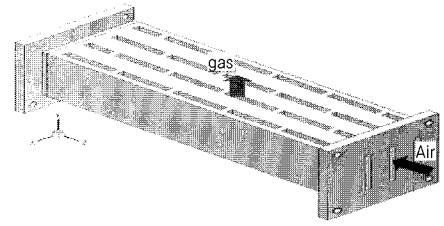
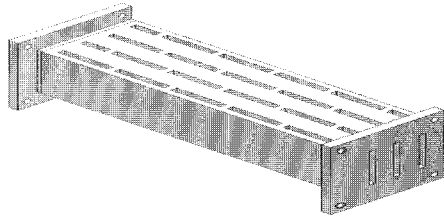


Fig. 7 FEM model of ceramic heat exchanger.



(a) fix condition(1)



(b) fix condition(2)

Fig. 8 Boundary conditions of ceramic heat exchanger.

차이를 보고자 한다. 또한 위의 두 가지 모두 가스통로 방향으로의 구속이 없으며, 세라믹 코어 대칭면은 대칭(symmetry) 조건을 주었다.

3.3 재료 특성치

열응력 수치계산에 사용된 세라믹 코어 재료의 기계적 특성치 및 열역학적 특성치는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Properties of Silicon Carbide

		Structural	
		Young's modulus	410 [GPa]
		Poisson's ratio	0.14
		Thermal expansion coefficient	4.1 [1/°C]×10 ⁻⁶
Silicon Carbide (SiC)	Compressive yield strength	4600 [MPa]	
	Compressive ultimate strength	4600 [MPa]	
	Thermal		
	Thermal conductivity	77.5 [W/m°C]	
		Specific heat	670 [J/kg°C]

4. 수치계산결과

세라믹 열교환기의 재료로 사용되는 SiC와 같은 취성 재료의 경우, 인장강도에 비해 압축강도가 훨씬 높고 취성이 강하므로, 정적상태의 하중이 작용 할 경우 최대 주응력으로 안전성을 평가한다.^(3, 8, 9, 10) 따라서 본 논문에서는 단순 정적하중 하에서 재료의 파탄에 영향을 미치는 최대 주응력 분포를 나타내었다. 본 절에서는 공기 측 입구온도 변화에서 앞서 설명한 구속조건을 적용하여 이에 따라 세라믹 코아의 열응력 및 변형량을 살펴보고자 한다.

세라믹 열교환기의 전열특성은 각 유체의 입구 유량이 0.001983 [kg/s]로 동일하게 흐를 때 공기 측 입구온도는 460, 510, 560, 610 및 660 ℃이고, 가스 측 입구온도는 각각에 대해 850 ℃로 일정하게 유지한 경우를 조사 하였다. 이러한 입구 온도 변화에 대해 수치계산하여 구한 온도 및 압력을 하중조건으로 세라믹 코아의 열응력 및 변형량을 살펴보고자 한다.

그 한 예로서 Fig. 9에 세라믹 열교환기의 공기 측 입구 온도변화가 660 ℃일 때 구속조건(1)일 때 관심영역 내의 세라믹 코아에 대한 열응력 해석

결과 중 전체 변형량과 최대 주응력을 등고선으로 나타낸 것이다. 여기서 (a)는 세라믹 코아의 온도 변화에 따라 전체 변형량을 나타낸 것이며 (b)는 세라믹 열교환기의 공기 측 온도변화에 따라 최대 주응력의 크기를 나타낸 것이다. 본 그림에서 보면 구속조건이 있는 공기 측 입구와 출구의 볼트 체결부에서 변형량이 크게 나타나고 있다. Fig. 10은 Fig. 9와 같은 조건에서 앞서 설명한 구속조건(2)를 적용하여 관심영역 내의 세라믹 코아에 대한 열응력 해석결과 중 전체 변형량과 최대 주응력을 등고선으로 나타낸 그림이다. 이는 볼트 체결이 (4×2)인 구속조건(1) 보다 볼트 체결수(2×2)가 적은 구소조건(2)의 경우 최대 주응력의 크기가 대략 절반 정도로 줄었음을 볼 수 있으며 다음 Fig. 12에 구체적으로 도시하였다.

Fig. 11은 공기 측 입구온도 변화에 따라서 구속조건(1)과 구속조건(2)을 적용하여 세라믹 열교환기의 열응력 해석결과 중 전체 변형량을 그래프로 비교한 것이다. 동 그림에서 입구 온도가 높을수록 변형량이 증가하는 경향이며, 구속조건(2)가 구속조건(1)보다 4.6~7.8% 전체 변형량이 증가함을 보여주고 있어 볼트 체결수가 변형량에는 크게 영향을 미치지 않는다.

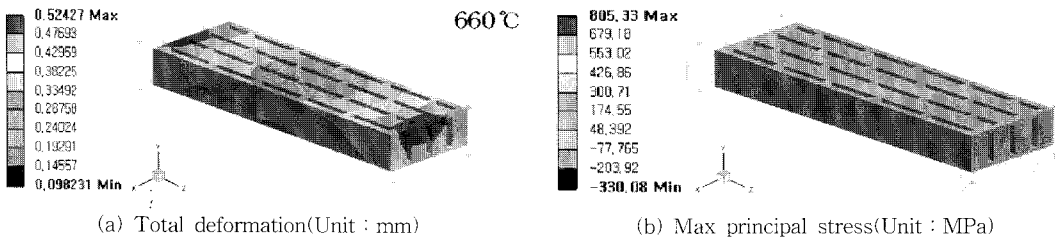


Fig. 9 Total deformation and max principal stress with fix condition(1) according to air inlet temperature.

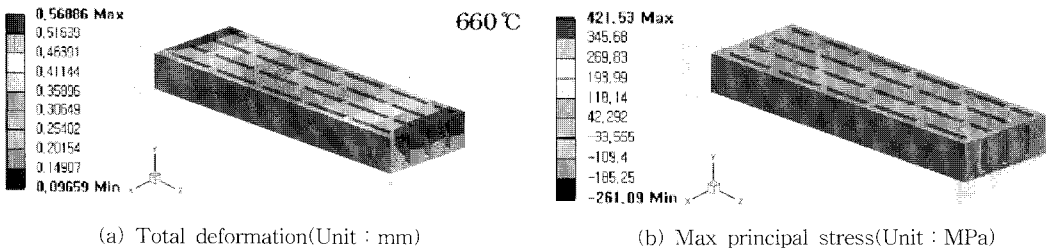


Fig. 10 Total deformation and max principal stress with fix condition(2) according to air inlet temperature.

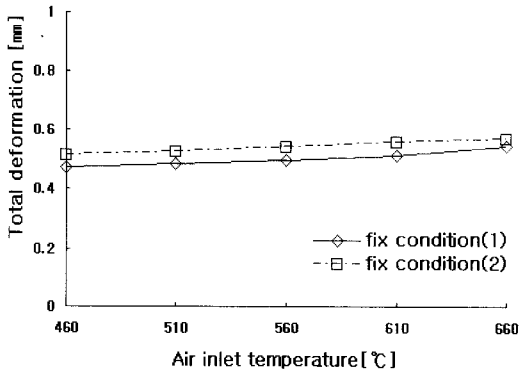


Fig. 11 Comparison of total deformation between fix condition(1) and fix condition(2) according to air inlet temperature.

Fig. 12는 공기 측 입구온도 변화에 따라서 구속조건(1)과 구속조건(2)을 적용하여 세라믹 열교환기의 열응력 해석결과 중 최대 주응력을 그래프로 비교한 것이다. 동 그림에서 공기 측 입구온도가 높을수록 최대 주응력은 완만하게 증가하는 경향이며, 볼트 체결수가 적은 구속조건(2)가 볼트 체결수가 많은 구속조건(1)보다 47.6~50.5% 감소함을 나타내고 있다. 따라서 가능한 한 볼트 체결수를 줄이는 것이 열응력을 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 13은 공기 측 입구온도 변화에 따라서 구속조건(1) 및 구속조건(2)을 적용하여 세라믹 열교환기의 열응력 해석결과 중 최대 주응력을 이용하여 안전율을 산출하여 비교하였다. 본 연구에 사용된 SiC와 같은 취성재료의 경우 Table 1에서

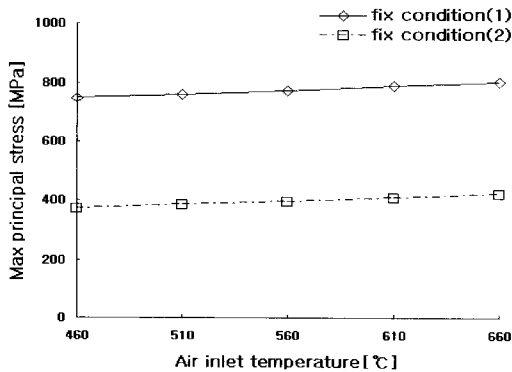


Fig. 12 Comparison of max principal stress between fix condition(1) and fix condition(2) according to air inlet temperature.

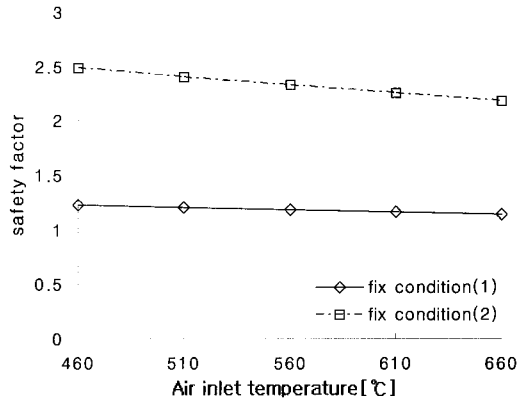


Fig. 13 Comparison of safety factor between fix condition(1) and fix condition(2) according to air inlet temperature.

나타낸 것과 같이 압축 극한강도(4600 MPa)에 대한 정보는 알 수 있으나, 취성재료에서 파괴를 유발 시키는 인장에 대한 정보가 없는 관계로 압축 극한 강도의 1/5배 가정하여 인장 극한강도(920 MPa)에 대한 안전율을 산출하였다. 동 그림은 구속조건(1)과 (2)에서 공기 측 입구 온도가 높을수록 안전율이 감소하는 경향이며, 구속조건(2)가 구속조건(1)보다 47.6~50.5% 증가함을 나타내고 있다. 즉 구속이 적을수록 안전율이 크게 증가함을 보인다.

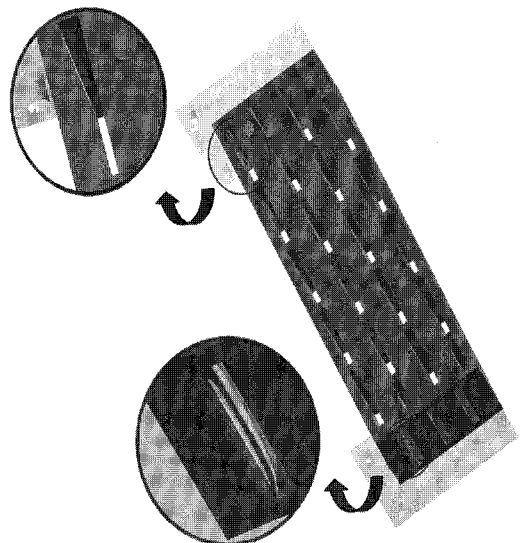


Fig. 14 Local stress concentration in ceramic heat exchanger.

세라믹 열교환기에서 구속조건(2)인 경우 각 부위의 주 응력의 크기를 확인한 결과 Fig. 14에서 처럼 세라믹 코어의 support head 부에 접하는 공기 측 유로 면과 가스 측 유로 면에서 국부적으로 응력집중이 발생함을 알 수 있었다. 이러한 국부적인 응력집중 구간을 완화 시켜 세라믹 코어의 구조적 안전성을 도모하기 위해 2개의 가스 측 유로의 폭을 52 mm에서 42 mm로 감소하여 수정하여 공기 측과 가스 측에서 발생하는 국부적 응력집중 완화를 위해 수정한 세라믹 열교환기의 모형이 Fig. 15에 나타내었다.

Fig. 16은 세라믹 열교환기의 공기 측 입구 온도 변화에 따라서 기존 세라믹 열교환기 모형과 2개의 가스 측 유로의 폭을 52 mm에서 42 mm로 수정한 세라믹 열교환기 모형에 대해 구속조건(2)를 적용한 세라믹 코어의 열응력 해석결과 중 최대 주응력을 비교한 것이다. 동 그림에서 입구 온가 높을수록 최대 주응력은 증가하는 경향이며, 2개의 가스 측 유로의 폭을 52 mm에서 42 mm로 수정한 모델이 기존 모델 보다 최대 주응력이 13.8~14.1% 감소함을 나타내고 있다. Fig. 17은 Fig. 16과 같은 조건에서 기존 세라믹 열교환기 모형과 2개의 가스 측 유로의 폭을 52 mm에서 42 mm로 수정한 세라믹 열교환기 모형에 대한 안전율을 산출하여 비교하였다. 동 그림에서 입구 온도에 따라서 안전율은 감소하는 경향이며, 가스 측 유로의 폭을 52 mm에서 42 mm로 수정한 세라믹 열교환기 모형이 기존 세라믹 열교환기 모형보다 13.8~14.1% 안전율이 증가함을 보여주고 있다. 따라서 앞서 세라믹 열교환기에 대한 열응력 해석결과들을 종합해 볼 때 세라믹 열교환기 설계에서 국부적 설계 변경으로 세라믹 열교환기의 구조적 안전

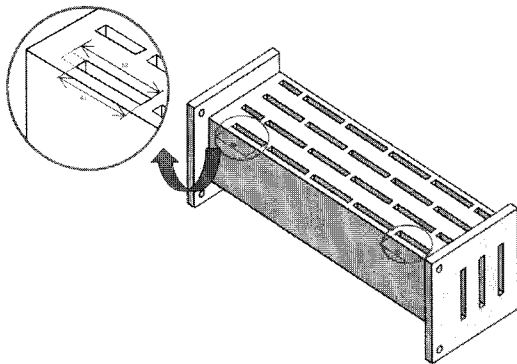


Fig. 15 Modification of ceramic heat exchanger.

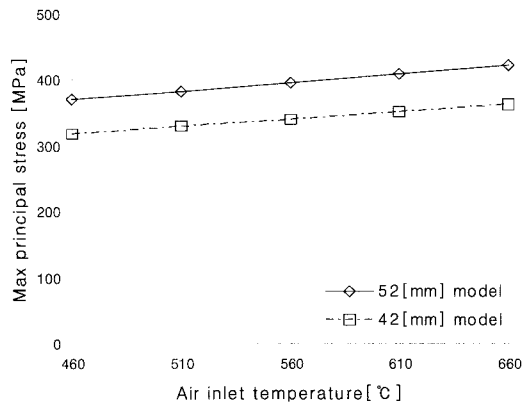


Fig. 16 Comparison of max principal stress between 52[mm] and 42[mm] ceramic core according to air inlet temperature.

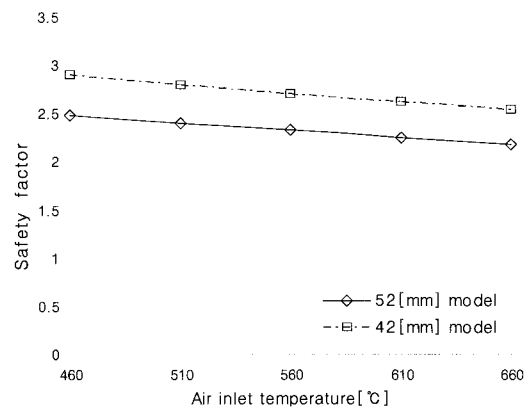


Fig. 17 Comparison of safety factor between 52 [mm] and 42 [mm] ceramic core according to air inlet temperature.

정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

열응력 해석의 선행연구로 CFD 상용 프로그램을 사용하여 세라믹 열교환기에 대한 conjugate heat transfer 수치해석으로 구한 온도 및 압력분포를 하중조건으로 열응력 해석을 수행하는 연성해석 방식을 이용하여 세라믹 코아에 대한 안전성을 검토하고자 하였다. 세라믹 열교환기에서 공기 측 입구온도를 460, 510, 560, 610 및 660 °C로 변화하였고, 첫 번째 구속조건은 수치해석 영역인 열교환기 절반에 대해 공기통로 입구 및 출구 support

head 부에서 총 (4×2)개의 접합 홀(볼트 체결)에 선 구속조건만 설정한 구속조건(1)이고, 두 번째 구속조건은 공기통로 입구 및 출구 support head 부에서 총 (2×2)개의 접합 홀에 선 구속조건을 설정한 구속조건(2)이다. 이러한 구속조건들을 적용하여 공기 측 입구온도에 변화에 대해 세라믹 코어의 열응력 및 변형에 대한 그 차이를 살펴보고자 한다.

(1) 세라믹 열교환기에 구속조건(1) 및 구속조건(2) 적용하여 열응력 해석결과를 상호 비교하였을 때 체결 볼트 수가 적은 구속조건(2)가 체결 볼트 수가 많은 구속조건(1)보다 전체 변형량은 4.6~7.8% 증가하였고, 최대 주응력은 47.6~50.5% 감소하였다. 또한 압축 극한 강도의 1/5배로 가정한 인장 극한강도(920 MPa)에 대한 안전율은 구속조건(2)가 구속조건(1)보다 안전율 47.6~50.5%로 증가하였다. 따라서 세라믹 열교환기의 header에 볼트 체결을 최소화하는 것이 열응력 감소에 유효함을 나타내었다.

(2) 기존 세라믹 열교환기에 대해 응력집중 구간을 완화하여 세라믹 열교환기의 안정성을 도모하고자 응력집중이 심한 2개의 가스 측 유로의 폭을 52 mm에서 42 mm로 수정하여 열응력 해석을 수행하였으며, 그 결과 구속조건(2)에서 기존 모델에 비해 최대 주응력이 13.8~14.1% 감소하였으며, 안전율은 13.8~14.1% 증가함을 알 수 있었다. 따라서 세라믹 열교환기의 국부적인 형상의 변경으로 열응력이 감소함을 제시하였다.

후 기

이 논문은 2008년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- Bourisa, D., Konstantinidis, E., Balabanib, S., Castigliab, D. and Bergeles, G., 2005, Design of a Novel Intensified Heat Exchanger for Reduced Fouling Rates, *Inter. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, No. 18, pp. 318-3822.
- Tsuzuki, N., Katoa, Y. and Ishiduka, T., 2007, High Performance Printed Circuit Heat Exchanger, *Applied Thermal Eng*, Vol. 27, No. 10, pp. 1702-1707.
- Yang, C. H., Yu, M. T., Heng, C. and Chen, C. H., 2008, Performance Simulation and Thermal Stress Analysis of Ceramic Recuperators Formed by SiC and MAS, *Numerical Heat Transfer Part-A*, Vol. 53, pp. 709-725.
- Park, K. S., Choi, C. G., Nam, J. H., Shin, D. H., Jung, T. Y., Park, S. H. and Kim, C. S., 2008, A Study on Theory Analysis and CFD Simulation for Design of High Efficiency Ceramic Exchanger, *The Korean Society for Energy Engineering*, pp. 179-186.
- Paeng, J. G. and Yoon, Y. H., 2009, A Theoretical Analysis and CFD Simulation on the Ceramic Heat Exchange, *SAREK*, Vol. 21, No. 5, pp. 282-290.
- Lee, W. S., Jung, G. C. and Choi, Y. S., 2007, ADINA/FSI Analysis of Petrochemical Plant Column Mixer, *KSNVE*, Vol. 17, No. 13, pp. 213-219.
- Choi, B. L., 2007, Thermal Fatigue Life Prediction of Engine Exhaust Manifold, *Transaction of KSAE*, Vol. 15, No. 1, pp. 139-145.
- Park, Y. H., Woo, C. S., Kim, K. S. and Kim, Y. Y., 1994, The Heat transfer and thermal stress analysis on the ceramic core of the box-type Recuperator, *The Korean Society of Mechanical Engineers*, pp. 217-276.
- Kim, H. K., Lee, Y. I. and Joe, S. M., 2006, FEM Analysis on Temperature Distribution and Thermal Stress of a Brake Drum for Large Commercial Vehicle, *The Korean Society of Safety*, Vol. 21, No. 6, pp. 7-12.
- Nieh, T. G., Lesuer, D. R. and Syn, C. K., 1995, Tensile and Fatigue Properties of A 25 VOL% Sic Particulate Reinforced 6090 Al Composite at 300 °C, *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 32, No. 5, pp. 707-712.