

딴플 튜브형 인터쿨러의 유한요소해석을 위한 균질화 기법 적용 Application to Homogenization Method for Finite Element Analysis of Dimpled Tube Type Intercooler

*이현민¹, 천주홍¹, 윤준석¹, 박종원¹, 김 정², #강범수²

*H. M. Lee¹, J. H. Chun¹, J. S. Youn¹, J. W. Park¹, J. Kim², #B. S. Kang(bskang@pusan.ac.kr)²
¹부산대학교 항공우주공학과 대학원, ²부산대학교 항공우주공학과

Key words : Homogenization Method, Effective Material Property, Dimpled Tube, FEA

1. 서론

인터쿨러는 넓은 폭의 온도 차가 반복적으로 가해지는 시스템이다. 이러한 큰 온도차이는 인터쿨러의 구조적 안정성을 고려하여 할 원인이 되며 인터쿨러의 구조적 손상은 배기가스 또는 냉각수의 유출로 인해 엔진과 주변 부품에 치명적인 영향을 미친다. 따라서 인터쿨러의 열-구조 연성 해석(thermal-structural coupled field analysis)과 유동압력하중에 의한 구조해석을 통해 인터쿨러의 안정성을 판단 할 필요가 있다. 하지만, 딴플 튜브 타입 인터쿨러(dimpled tube type intercooler)는 Fig. 1과 같이 수많은 딴플 형상으로 인해 모델링과 요소생성의 어려움뿐만 아니라 요소수의 증가로 해석시간이 길어지고 고사양의 하드웨어를 필요로 하는 등의 많은 문제점을 가진다. 본 연구에서는 이런 문제점을 해결하기 위해 등가 재료 물성치(effective material property)를 구해 딴플이 없는 튜브가 딴플을 가지는 효과를 가지도록 균질화 된 튜브를 모델링 하였다. 그리고 균질화 기법(homogenization method)을 통해 얻은 구조 해석 결과와 실제 모델의 해석 결과를 비교 분석하여 균질화 기법이 실제와 얼마나 유사한지를 규명하고 균질화 기법의 이점을 보이고자 한다.



Fig. 1 dimple type heat transfer tube

2. 딴플 튜브의 균질화

딴플이 없는 튜브 딴플의 효과를 내기 위해서는 Fig. 2와 같이 대칭성을 갖는 단위 형상을 결정하고, 적절한 경계조건을 이용하여 유한요소해석을 통해 등가 재료 물성치를 구할 수 있다. 등가 탄성계수를 구하기 위해 Fig. 3과 같이 아랫면과 오른쪽면에 대칭 경계조건을 부가하고, 왼쪽면은 ϵ_x 가 0.01이 되도록 일정한 변위 δ 를 준다. 그리고, 오른쪽 면에서의 면적 A_x 와 반력 F_x 를 구한다. 딴플이 없는 튜브에 작용하는 응력을 $\sigma_{x,eff}$ 이때의 변형률을 $\epsilon_{x,eff}$ 라고 하면, 등가 탄성계수 $E_{x,eff}$ 와 프아송비 $\nu_{xz,eff}, \nu_{xy,eff}$ 는 아래의 식(1) ~ (3)을 통해 구할 수 있다. 다른 방향에 대한 등가 탄성계수와 프아송비 역시 위의 방법으로 쉽게 구할 수 있다.

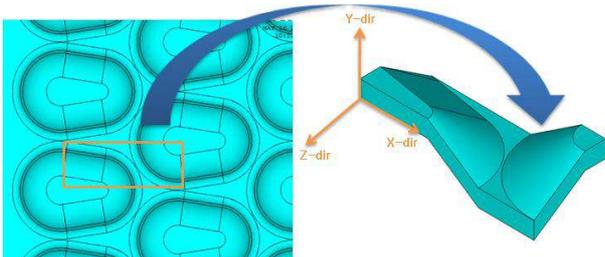


Fig. 2 unit geometry of dimpled tube

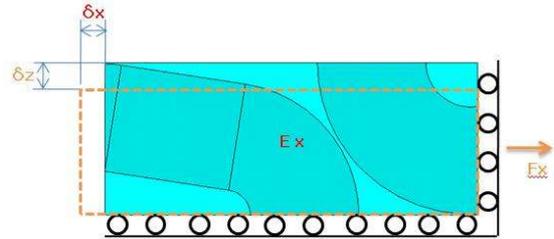


Fig. 3 boundary condition for effective Young's modulus

$$E_{x,eff} = \frac{\sigma_{x,eff}}{\epsilon_{x,eff}} = \frac{F_x/A_x}{\epsilon_{x,eff}} \quad (1)$$

$$\nu_{xz,eff} = -\frac{\epsilon_{z,eff}}{\epsilon_{x,eff}} = -\delta_z/z \times \frac{1}{\epsilon_{x,eff}} \quad (2)$$

$$\nu_{xz,eff} = -\frac{\epsilon_{z,eff}}{\epsilon_{x,eff}} = -\delta_z/z \times \frac{1}{\epsilon_{x,eff}} \quad (3)$$

등가 전단계수는 Fig. 4와 같이 아랫면에 구속 경계조건을 주고, 윗면은 γ_{xz} 가 0.01이 되도록 왼쪽으로 일정한 변위 δ 를 부가한다. 그리고 아랫면에서의 반력과 면적을 구하면 식(4)를 이용하여 G_{xz} 를 구할 수 있다. 다른 방향에서의 등가 전단계수 역시 위의 방법으로 계산되어 진다.

$$G_{xz,eff} = \frac{\tau_{xz,eff}}{\gamma_{xz,eff}} = \frac{F_x/A_x}{\gamma_{xz,eff}} \quad (4)$$

등가 열전도도는 Fig. 5와 같이 윗면과 아랫면은 단열 시키고 오른쪽면은 일정한 온도로 고정시킨다. 그리고, 왼쪽면에 열류(heat flux)를 부가하면, 오른쪽면과 왼쪽면의 온도차이를 알 수 있으므로, 푸리에 법칙을 이용해 식(5)와 같이 등가 열전도도를 구할 수 있다. 이상에서 구한 등가 재료 물성치와 실제 물성치를 Table 1에 정리 하여 나타내었다.

$$\dot{q} = -k \frac{dT}{dx} \quad (5)$$

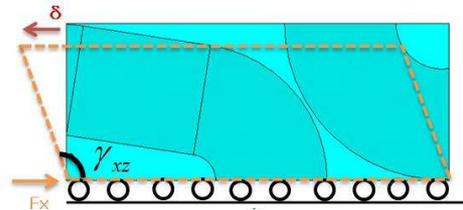


Fig. 4 boundary condition for effective shear modulus

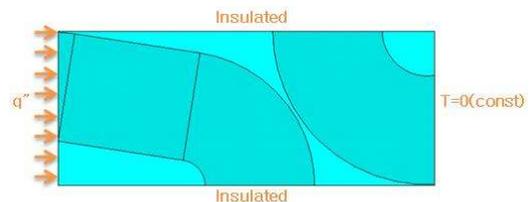


Fig. 5 boundary condition for effective conductivity

Table. 1 effective material property and original value

Effective Material Property					
E_x	104,783	G_{xy}	99,870	k_x	0.0148
E_z	200,000	G_{xz}	46,291	k_y	0.0054
E_z	71,589	G_{yz}	110,661	k_z	0.0136
ν_{xy}	0.277	ν_{xz}	0.112	ν_{yz}	0.29
ν_{yx}	0.29	ν_{zx}	0.077	ν_{zy}	0.0598
Original Value					
E	200,000		ν	0.29	
k	0.0162		σ_Y	215MPa	
Unit	$E, G : N/mm^2, k : W/mm \cdot K$				

3. 유한요소해석

균질화 기법으로 구한 등가 재료 물성치를 이용하여 열전달 해석과 열응력, 유동압력하중에 의한 구조해석을 수행하였다. 구조해석 프로그램은 ANSYS V10.0을 사용하였다. Fig. 6 ~ Fig. 8은 균질화 기법을 적용한 인터쿨러 모델과 균질화 전 실제 인터쿨러 모델을 이용한 열전달, 열응력, 유동압력 하중에 의한 해석 결과를 각각 나타내고 있다. 해석 결과로부터 균질화 모델과 균질화 전 모델의 온도 분포 및 응력분포가 유사한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6의 열전달 해석결과로 균질화 전 모델은 106.747°C, 균질화 모델은 106.772°C로 입구 플렌지의 끝단에서 최대 온도가 발생하여, 출구 쪽으로 갈수록 선형적으로 온도가 감소하는

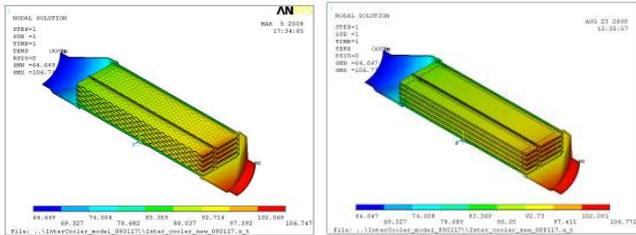


Fig. 6 comparison of heat transfer analysis result between realistic model(right) and homogeneous model(left)

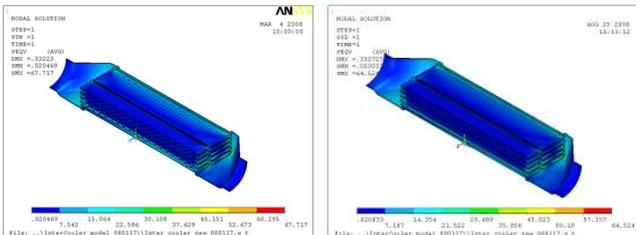


Fig. 7 comparison of heat-structure coupled analysis result between realistic model(right) and homogeneous model(left)

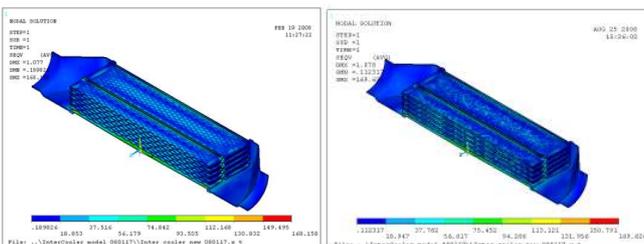


Fig. 8 comparison of pressure analysis result between realistic model(right) and homogeneous model(left)

것을 확인할 수 있다. 두 모델간의 온도분포는 1% 이내의 오차로 유사한 결과를 가진다. 해석 결과를 통해 등가 열전도도를 통한 덤플 튜브의 균질화가 잘 이루어진 것을 확인할 수 있다. 열전달 해석을 통하여 얻은 각 절점에서의 온도를 이용하여 열-구조 연성해석을 통해 열팽창에 의한 열응력 해석을 수행하였다. Fig. 7은 열응력 해석 결과로 두 모델간의 최대응력은 3MPa의 차이를 가지지만, 4.5%내의 오차값으로 유사한 결과값을 가진다. 균질화 기법을 이용한 유동압력하중에 의한 구조해석 결과와, 균질화 전 모델의 유동압력하중에 의한 구조해석 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 최대응력은 셸 바디와 고정판 사이에서 균질화 모델은 169.6MPa, 균질화 전 모델은 168.2MPa로 오차값 1% 이내로 같은 값을 가진다. 또한 응력 분포도 유사한 것을 확인할 수 있다. 지금까지의 균질화 모델과 균질화 전 모델간의 해석결과로부터 균질화 기법의 신뢰성과 타당성을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 균질화 기법을 이용한 덤플 튜브 타입 인터쿨러의 유한요소 해석의 신뢰성과 타당성을 규명 하였다. 균질화 기법은 복잡한 형상으로 인해 가지는 문제점을 가장 효과적이고, 간단한 방법으로 해결할 수 있는 이점이 있다. 단위 형상을 통한 등가 재료 물성치의 계산으로 모델링과 해석 시간, 하드웨어의 한계를 극복하면서 실제 모델과 같은 결과 값을 얻을 수 있다. 이러한 연구 결과로부터 균질화 기법이 복잡한 형상의 구조해석에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 2008년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단(R0A-2008-000-20017-0)의 지원과 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업(R15-2006-022-02002-0)의 지원으로 수행된 연구 결과입니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 김정, 박수길, 강범수, "유한요소법에 의한 평면 TV 새도우마스크의 열변형해석 및 전자빔 오차 예측", 대한기계학회논문집 A권, 26, 11, 2297~2304, 2002
2. 장유철, 김정, 강범수, "평판 TV 세도우 마스크 열변형 해석용 ANSYS 모듈 개발", 2000 Taesung ANSYS User's Conference, 389~398, 2000
3. 김정, 박수길, 강범수, "유한요소법에 의한 평판 TV 새도우마스크의 마이크로포닉 현상 해석", 한국정밀공학회지, 19, 11, 89~95, 2002
4. 김상호, "인터쿨러가 부착된 터보 엔진 개발", 한국자동차공학회 1992년 학술 강연 초록집(연료), 13~21, 1992
5. Ansel C. Ugural, Saul K. Fenster, "Advanced Strength and Applied Elasticity(4th ed), PRENTICE HALL, 2002
6. Frank P. Incropera, David P. Dewitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer(5th ed), JOINT WILEY & SONS, 2003