

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.2.153

# 균질화 기법을 이용한 딴플 튜브형 인터쿨러의 유한요소해석 및 검증

이현민\* · 허성찬\* · 송우진\*\* · 구태완\*\*\* · 강범수\*\*\* · 김 정†  
(2008년 10월 31일 접수, 2009년 1월 6일 수정, 2009년 1월 16일 심사완료)

## Finite Element Analysis and Validation for Dimpled Tube Type Intercooler Using Homogenization Method

Hyun-Min Lee, Seong-Chan Heo, Woo-Jin Song, Tae-Wan Ku, Beom-Soo Kang and Jeong Kim

**Key Words:** Homogenization Method(균질화 기법), Equivalent Material Property(등가 재료 물성치), Dimpled Tube Type Intercooler(딴플 튜브형 인터쿨러), FEA(유한 요소 해석)

### Abstract

Three-dimensional finite-element methods(FEM) have been used to analyze the thermal stress of an exhaust gas recirculation(EGR) cooler due to thermal and pressure load. Since efficiency and capability of the heat exchanger are mainly dependent on net heat transferring area of the EGR cooler system, the tube inside the system has a numerous dimples on the surface. Thus for finite element analysis, firstly the dimple-typed tube is modeled as a plain element without the dimple, and then the equivalent thermal conductivities and elastic modulus are calculated. This work describes the numerical homogenization procedure of the dimple-typed tube and verifies the equivalent material properties by comparison of a single unit and the actual full model. Finally, the homogenization scheme presented in this study can be efficiently applied to finite element analyses for the thermal stress and deformation behavior of the EGR cooler system with the dimple-typed tube.

### 1. 서론

현재 자동차에 널리 사용되고 있는 디젤 엔진은 가솔린 엔진에 비해 소음과 진동이 심한 단점에도 불구하고 높은 연비와 중량당 출력지수, 내구성, 신뢰성 및 경제성의 우수함으로 고출력 고효율이 요구되는 SUV(sports utility vehicle), 중소

형 승용차 등의 엔진으로 폭 넓게 이용되고 있다. 동일한 엔진 회전수에서 엔진의 출력 및 연비를 향상시키기 위해서는 엔진 연소실에 공급되는 흡기공기(induction air)를 압축하여 흡기의 밀도를 증가 시켜야 한다. 하지만 흡기 공기를 압축하기 위한 압축기를 지난 후에 흡기공기의 고온화로 출력 저하의 문제점이 발생한다. 이를 해결하기 위해 전세계적으로 인터쿨러(intercooler)에 의한 흡기공기의 냉각으로 밀도를 높여 엔진의

† 책임저자, 회원, 부산대학교 항공우주공학과  
E-mail : greatkj@pusan.ac.kr  
TEL : (051)510-2477 FAX : (051)512-4491  
\* 부산대학교 대학원 항공우주공학과  
\*\* 부산대학교 산학협력단  
\*\*\* 부산대학교 항공우주공학과



Fig. 1 Dimpled tube

출력을 더욱 증가시키고 있다.<sup>(4)</sup>

기존의 인터쿨러는 열교환 효율이 낮고 체적 대비 전열 면적인 집적도가 낮아 전체적인 체적이 커지고 설치 공간의 제약이 따랐다. 이러한 문제점을 해결하고자 Fig. 1과 같이 딥플 형상을 가지는 사각 튜브를 고안하여 집적도를 향상시킴으로써 열교환 효율을 높이고 엔진의 공간 배치 및 장착이 용이하도록 설계하였다.

인터쿨러는 넓은 폭의 온도 차가 반복적으로 가해지는 시스템이다. 이러한 큰 온도차이는 인터쿨러의 구조적 안정성을 고려하여야 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, 딥플 튜브형 인터쿨러(dimpled tube type intercooler)는 수많은 딥플 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(equivalent material property)를 구해 딥플이 없는 튜브가 딥플을 가지는 효과를 내도록 균질화 된 튜브를 모델링 하였다. 그리고 균질화 기법(homogenization method)을 통해 얻은 구조 해석 결과와 실제 모델의 구조 해석 결과를 비교 분석하여 균질화 기법의 신뢰성과 타당성을 규명하고 그 이점을 보이하고자 한다.

## 2. 모델링 및 딥플 튜브의 균질화

### 2.1 3차원 형상 모델링

해석의 편의성과 해석 시간을 줄이기 위해 딥플 튜브형 인터쿨러의 1/4 부분 모델의 3차원 형상을 Fig. 2와 같이 CATIA V5 R16을 이용해 모델링을 하였다.

그리고, 해당 모델에 대한 유한요소해석을 위해 Fig. 3과 같이 ANSYS V10.0로 변환(import)하여, 균질화 모델과 실제 모델을 각각 모델링 하였다. 인터쿨러는 Fig. 4에서 보는 것과 같이 딥플 사각 튜브(dimpled rectangular tube)와 딥플 튜

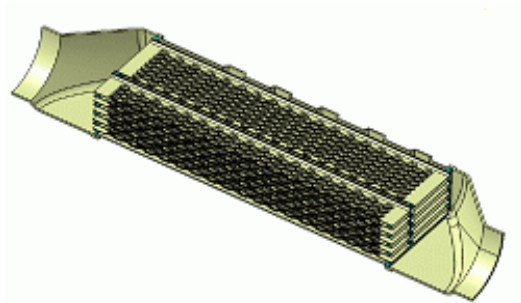
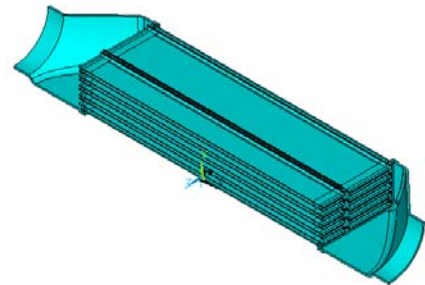
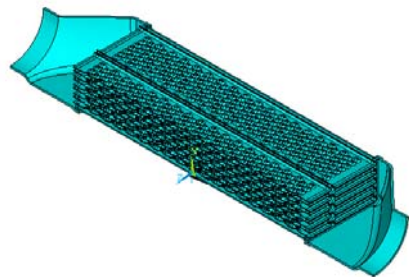


Fig. 2 3-dimensional modeling for dimpled tube type intercooler using CATIA V5 R16



(a)



(b)

Fig. 3 3-dimensional analytic model; (a) homogeneous model, (b) original model

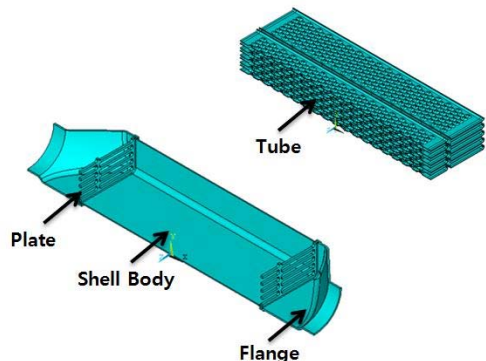
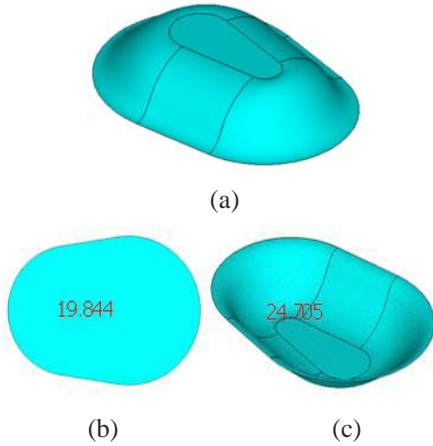
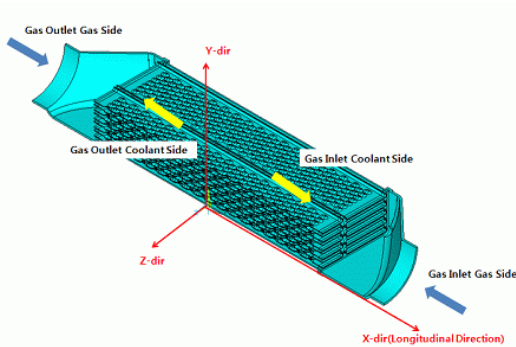


Fig. 4 Components of dimpled tube type intercooler



**Fig. 5** Geometric configurations and comparison of thermal surface area; (a) geometric configuration, (b) thermal surface area without dimple, (c) thermal surface area with dimple

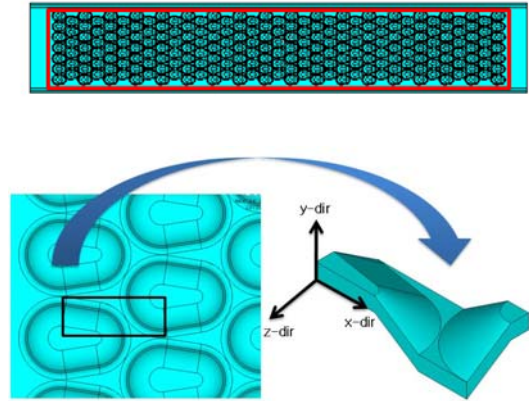


**Fig. 6** Coordinate of dimpled tube type intercooler

브를 고정시키기 위한 두개의 고정판(fix plate), 딴플 튜브를 감싸는 셸 바디(shell body), 배기가스가 인터쿨러 내로 유입 또는 배출되는 두개의 양단 플렌지(flange)로 구성되어있다. 또한, 딴플의 기하학적 형상과 딴플이 존재하는 경우와 그렇지 않은 경우의 전열 면적의 차이를 Fig. 5에 나타내었다. 딴플 형상으로 인해 딴플이 없는 경우보다 약 24.5%의 전열 면적 증가를 확인할 수 있다. 길이 방향(x-dir), 높이 방향(y-dir), 폭 방향(z-dir)과 본 연구에서의 결과 도시용 방향은 Fig. 6과 같다.

### 2.2 딴플 튜브의 균질화 영역과 단위형상 결정

본 모델에서는 딴플 형상으로 인해 모델링의 어려움, 해석시간의 증가, 고사양의 하드웨어를 필요로 하는 등의 문제점이 발생한다. 따라서 딴플을 가지는 부분을 Fig. 7과 같이 균질화 영역으



**Fig. 7** Unit shape for homogenization of dimpled tube

로 결정하였다. 또한, 딴플이 없는 튜브가 딴플의 효과를 내도록 Fig. 7과 같이 대칭성을 가지는 단위형상을 결정하고 적절한 경계조건을 부가하여 유한요소해석을 통해 등가 재료 물성치를 구해야 한다. 단위 형상은 등방성(isotropy)이 아닌 이방성(anisotropy)으로 x, y, z 축 각각에 대해 등가 재료 물성치를 구해야 한다.<sup>(2)</sup>

### 2.3 등가 탄성계수 도출

길이 방향(x-dir)에 대한 등가 탄성계수(equivalent Young's modulus)를 구하기 위해 딴플이 있는 단위형상의 경계 조건과 구한 등가 물성치를 딴플이 없는 단위형상에 적용하였을 때 서로 같아야 함을 Fig. 8에 나타내었다. 아랫면과 오른쪽면에 대칭 경계조건을 부가하고, 왼쪽 면은  $\epsilon_x$ 가 0.01이 되도록 일정한 변위  $\delta$ 를 부가한다. 그리고 오른쪽면에서의 면적  $A_x$ , 반력  $F_x$ 와 변위  $\delta_y, \delta_z$ 를 구한다. 딴플이 없는 평판에 작용하는 응력을  $\sigma_{x,eff}$ 라고 하고 이때의 변형률을  $\epsilon_{x,eff}$ 라고 하면, 등가 탄성계수  $E_{x,eff}$ 와 등가 프아송비  $\nu_{xy,eff}, \nu_{xz,eff}$ 는 아래의 식 (1) ~ (3)을 통해 구할 수 있다.<sup>(3)</sup> Fig. 9는 등가 탄성계수를 구하기 위한 유한요소해석 결과를 나타내고 있다.

폭 방향(z-dir)에 대한 등가 탄성계수 역시 윗면에  $\epsilon_z$ 가 0.01이 되도록 일정한 변위  $\delta$ 의 경계조건을 부가하고, 아랫면의 면적  $A_z$ , 반력  $F_z$ 와 변위  $\delta_x, \delta_y$ 를 계산하면 식 (4) ~ (6)와 같이 쉽게 구할 수 있다. 높이 방향(y-dir)에 대한 등가 탄성계수는 형상의 복잡함으로 인해 유한요소 해석을 통해 구하기가 어렵다. 따라서 높이 방향의 등가

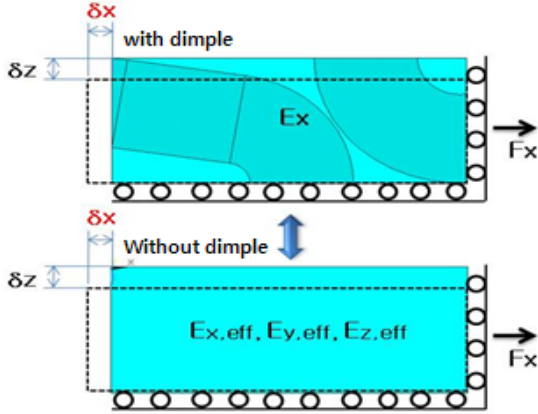


Fig. 8 Boundary condition for equivalent Young's modulus

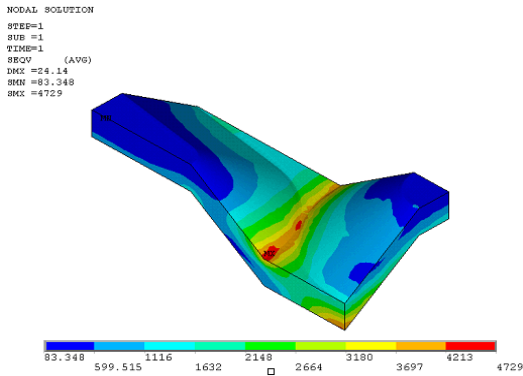


Fig. 9 Von-Mises stress distribution by FE analysis for equivalent Young's modulus [unit:MPa]

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

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

$$\nu_{xy,eff} = -\frac{\epsilon_{y,eff}}{\epsilon_{x,eff}} = -\frac{\delta_y}{y} \times \frac{1}{\epsilon_{x,eff}} \quad (3)$$

$$E_{z,eff} = \frac{\sigma_{z,eff}}{\epsilon_{z,eff}} = \frac{F_z/A_z}{\epsilon_{z,eff}} \quad (4)$$

$$\nu_{zx,eff} = -\frac{\epsilon_{x,eff}}{\epsilon_{z,eff}} = -\frac{\delta_x}{x} \times \frac{1}{\epsilon_{z,eff}} \quad (5)$$

$$\nu_{zy,eff} = -\frac{\epsilon_{y,eff}}{\epsilon_{z,eff}} = -\frac{\delta_y}{y} \times \frac{1}{\epsilon_{z,eff}} \quad (6)$$

탄성계수는 시행 착오법으로 구한다.<sup>(4)</sup>

2.4 등가 전단계수 도출

등가 전단계수(equivalent shear modulus)를 구하

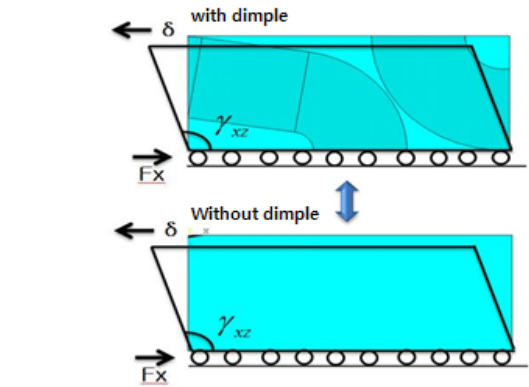


Fig. 10 Boundary condition for equivalent shear modulus

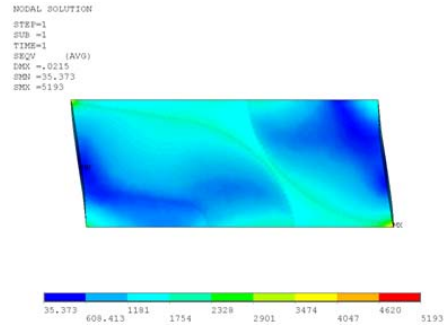


Fig. 11 Von-Mises stress distribution by FE analysis for equivalent shear modulus [unit:MPa]

기 위해 딤플이 있는 단위 형상의 경계 조건과 구한 등가 물성치를 딤플이 없는 단위 형상에 적용하였을 때 서로 같아야 함을 Fig. 10에 나타내었다. 아랫면은 구속 경계조건을 부가하고, 윗면을  $\gamma_{xz}$ 가 0.01이 되도록 왼쪽으로 일정한 변위  $\delta$ 를 부가한다. 그리고 아랫면에서의 면적  $A_z$ 와 x 방향의 반력  $F_x$ 를 구한다. 딤플이 없는 평판에 작용하는 응력을  $\tau_{xz,eff}$ 라 하고 이때의 변형률을  $\gamma_{xz,eff}$ 이라고 하면,  $G_{xz,eff}$ 는 식 (7)과 같이 구할 수 있다. Fig. 11은 등가 전단계수를 구하기 위한 유한요소해석 결과를 나타내고 있다. 나머지  $G_{xy,eff}$ ,  $G_{yz,eff}$  역시 위와 같은 방법으로 각각 x-y, y-z축을 기준으로 아랫면은 구속 경계조건을 부가하고, 윗면을  $\gamma$ 가 0.01이 되도록 일정한 변위  $\delta$ 를 부가하여 아랫면에서의 면적과 반력을 구하면 G값을 구할 수 있다.<sup>(5)</sup>

$$G_{xz,eff} = \frac{\tau_{xz,eff}}{\gamma_{xz,eff}} = \frac{F_x/A_z}{\gamma_{xz,eff}} \quad (7)$$



2.5 등가 열전도도 도출

길이방향(x-dir)에 대한 등가 열전도도(equivalent conductivity)를 구하기 위해 딥플이 있는 단위 형상의 경계 조건을 Fig. 12와 같이 나타내었다. 윗면과 아랫면은 단열 시키고 오른쪽 면은 일정한 온도로 고정시킨다. 그리고 왼쪽 면에 열류(heat flux)를 부가하면 오른쪽 면과 왼쪽 면의 온도 차이를 알 수 있으므로 푸리에 법칙(Fourier's law)을 이용해 식 (8)과 같이 등가 열전도도를 구할 수 있다.<sup>(6)</sup> Fig. 13은 유한요소해석 결과를 나타내고 있다.

$$\ddot{q}_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (8)$$

폭 방향(z-dir)과 높이 방향(y-dir)의 등가 열전도도 역시 위와 같은 방법으로 단위 형상에 대해 경계 조건을 부가하여 구할 수 있다. 이상에서 구한 등가 재료 물성치와 실제 물성치를 Table 1에 정리 하여 나타내었다.

3. 균질화 기법을 이용한 인터쿨러의 유한요소해석과 검증

3.1 열전달 해석결과와 검증

균질화 기법으로 구한 등가 재료 물성치를 이용하여 열-구조 연성 해석에 앞서 인터쿨러의 온

Table 1 Equivalent material property and original value

Equivalent Material Property					
$E_x$	104,783	$G_{xy}$	99,870	$k_x$	0.0148
$E_y$	200,000	$G_{xz}$	46,291	$k_y$	0.0054
$E_z$	71,589	$G_{yz}$	110,661	$k_z$	0.0136
$\nu_{xy}$	0.277	$\nu_{xz}$	0.112	$\nu_{yz}$	0.29
$\nu_{yx}$	0.29	$\nu_{zx}$	0.077	$\nu_{zy}$	0.0598
Original Value(SUS 304)					
$E$	200,000	$\nu$	0.29		
$k$	0.0162	$\sigma_Y$	215MPa		
Unit	E,G : MPa, k : W/mm·K				

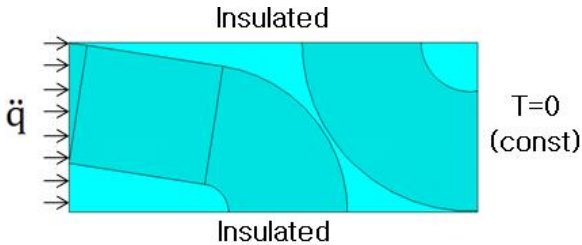


Fig. 12 Boundary condition for equivalent conductivity

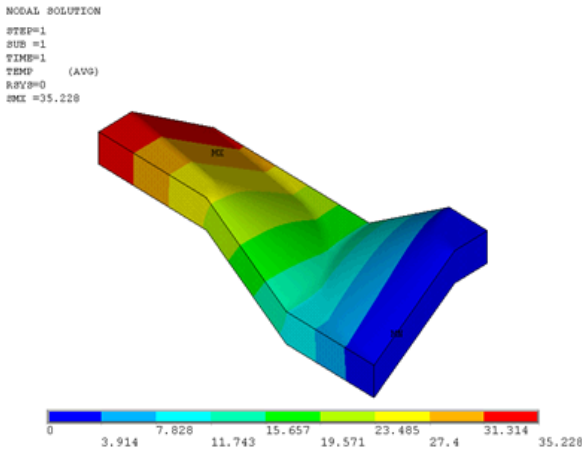
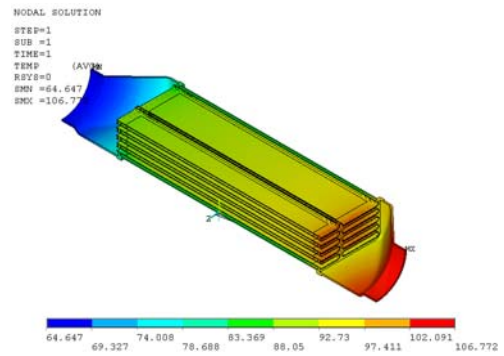
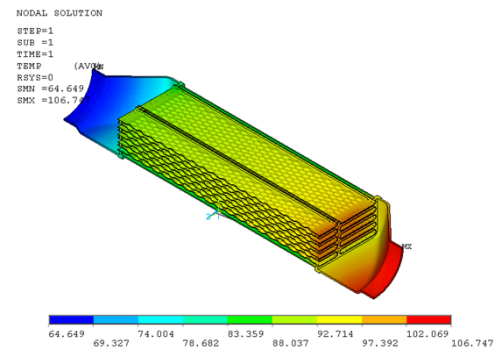


Fig. 13 Temperature distribution by FE analysis for equivalent conductivity [unit: °C]

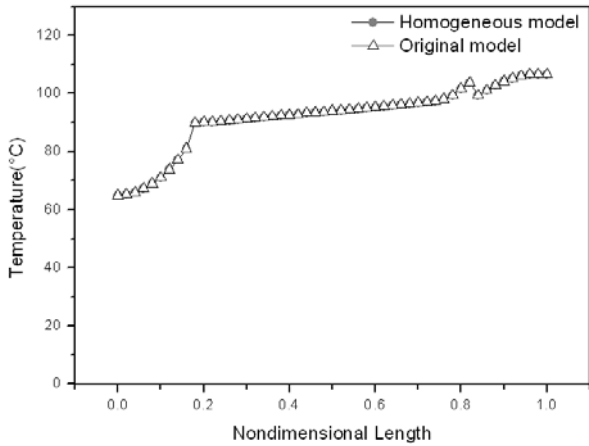


(a)



(b)

Fig. 14 Comparison of heat transfer analysis result [unit: °C]; (a) homogeneous model, (b) original model



**Fig. 15** Comparison of temperature distribution between homogeneous and original models

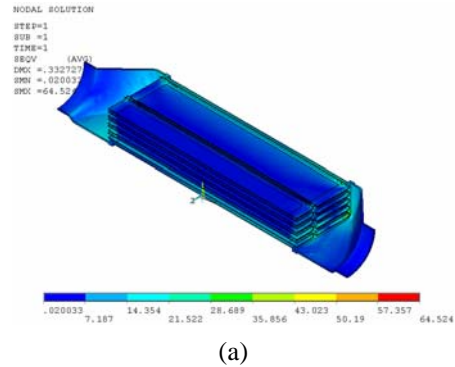
도분포를 도출하기 위해 열전달 해석을 수행하였다. 온도하중 조건은 튜브 입구 측으로 200°C의 가스가 유입되어 튜브를 통과하여 흐르는 동안 90°C의 냉각수로 인해 냉각되어 약 90°C의 가스가 배출된다.

딴플을 제거한 균질화 인터쿨러의 열전달 해석 결과와 실제 모델의 열전달 해석결과를 Fig. 14에 각각 나타내었다. Fig. 15는 두 모델의 길이방향에 대한 온도 분포를 나타내고 있다. 해석결과와 그래프를 통해 균질화 기법을 이용한 모델과 실제 모델의 해석결과가 일치 한다는 것을 확인할 수 있다. 최대온도가 입구 측에서 발생하며, 입구에서 출구 쪽으로 선형적으로 온도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이상에서 볼 수 있는 해석 결과를 통해 등가 열전도도를 통한 딴플 튜브의 균질화가 잘 이루어진 것을 확인할 수 있다.

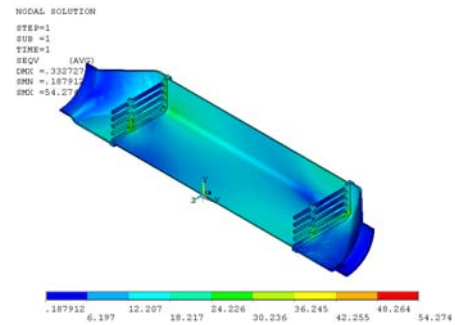
3.2 열-구조 연성해석 및 검증

열전달 해석을 통하여 얻은 각 절점에서의 온도를 이용하여 열-구조 연성해석을 통해 열팽창에 의한 열응력 해석을 수행하였다. 인터쿨러는 SUS304 소재로 항복응력(yield stress)은 215MPa이다.

균질화 기법이 적용된 딴플이 없는 모델의 열응력 해석 결과를 Fig. 16에 나타내었다. 그리고 딴플을 가지는 실제 모델에 대한 열응력 해석 결과는 Fig. 17과 같다. Fig. 18은 두 모델의 길이방향에 대한 응력 분포를 나타내고 있다. 그래프를 통해 볼 수 있듯이 열응력 해석 결과 역시 균질화 기법을 이용한 열응력 분포와 실제 모델의 열

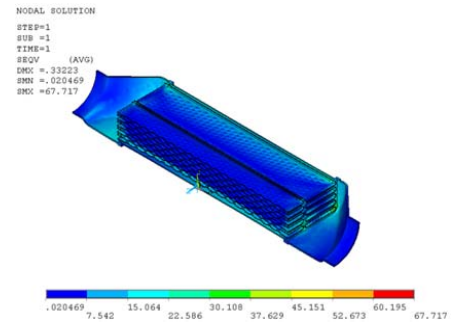


(a)

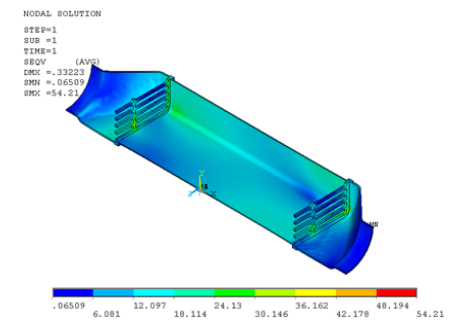


(b)

**Fig. 16** Heat-structure coupled analysis result in case of applying homogeneous model [unit:MPa]; (a) total model, (b) pipe part(without tube)

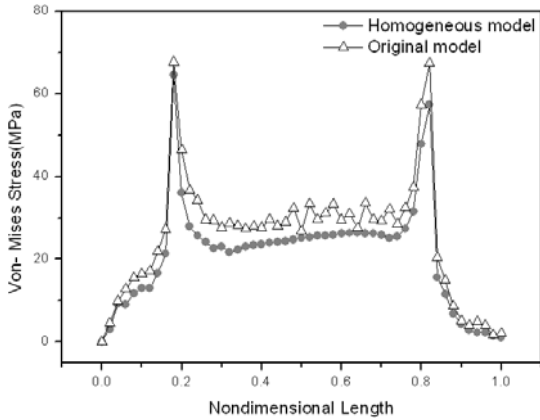


(a)



(b)

**Fig. 17** Heat-structure coupled analysis result in case of original model [unit:MPa]; (a) total model, (b) pipe part(without tube)



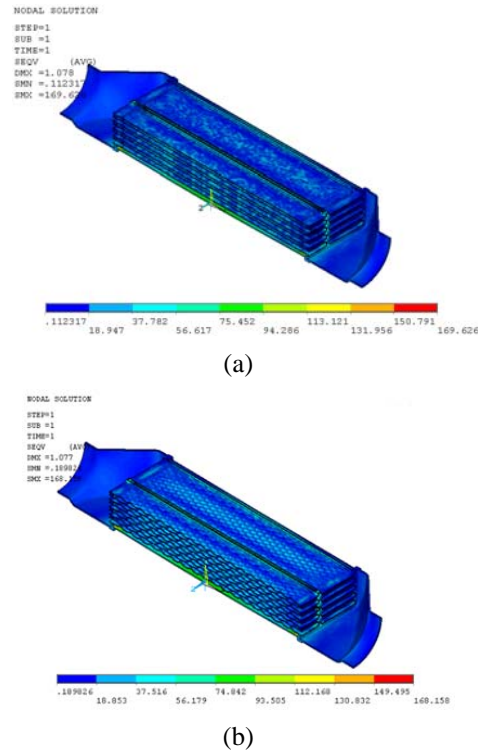
**Fig. 18** Comparison of Von-Mises stress distribution by heat-structure coupled analysis between homogeneous and original models

응력 분포가 유사한 것을 볼 수 있다. 튜브와 고정판 사이에서 최대 응력이 발생하는 것을 확인할 수 있고, 최대 응력이 균질화 모델에서 64MPa, 실질 모델에서 67MPa로 3MPa 차이가 나는 것을 제외 하고는 Fig. 16, Fig. 17의 파이프에서의 해석 결과를 통해 인터쿨러의 고정판, 셀바디, 플렌지 등 대부분의 영역의 열응력 분포가 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 최대 응력에서의 3MPa의 차이는 오차값이 4.5% 이내로 무시할 수 있는 수준이다. 최대 변위는 두 모델 모두 0.332mm로 거의 같은 값을 가진다. 이상에서 볼 수 있는 해석 결과를 통해 등가 재료 물성치의 타당성과 신뢰성을 확인할 수 있다.

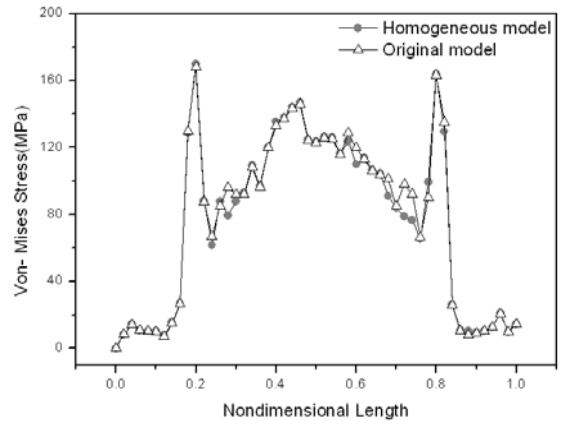
3.3 유동압력하중에 의한 구조해석과 검증

가스 측과 냉각수 측의 유동에 의한 압력 차로 인터쿨러의 외벽에 하중으로 작용하게 된다. 따라서 유동 가스(2bar)와 냉각수(1bar) 측의 유동압력하중에 의한 구조해석을 수행하였다.

균질화 기법을 이용한 유동압력하중에 의한 구조해석 결과와, 실제 모델의 유동압력하중에 의한 구조해석 결과를 Fig. 19에 각각 나타내었다. Fig. 20은 두 모델의 길이방향에 대한 응력 분포를 나타내고 있다. 보는 것과 같이 균질화 모델의 해석 결과와 실질 모델의 해석 결과역시 유사한 응력 분포를 나타내고 있다. 최대응력은 셀바디와 고정판사이에서 균질화 모델은 169.6MPa, 실제 모델은 168.2MPa로 오차값 1% 이내로 같은 값을 가진다. 최대 변위는 1.078mm로 같은 값을



**Fig. 19** Comparison of structural analysis result [unit: MPa]; (a) homogeneous model, (b) original model



**Fig. 20** Comparison of Von-Mises stress distribution by flow pressure analysis between homogeneous and original models

가진다. 이상의 결과를 통해 균질화 기법을 이용한 유동압력하중에 의한 구조 해석의 타당성과 신뢰성을 확인할 수 있다.

3.4 균질화 기법의 효과

Table 2에서 볼 수 있듯이 균질화 기법을 통해,

**Table 2** Comparison of analysis information for between homogeneous model and original model

		Homogeneous model	original model
No. of element	Total	471,495	987,656
	Tube	350,878	867,136
No. of node	Total	157,758	328,130
	Tube	118,515	288,864
Computational time[min]		16	97
Memory allocation[MB]		1,952	4,716
System specification		CPU : Core 2 Duo 2.2GHz Memory[RAM] : 2GB	

실제 모델 대비하여 요소수는 균질화 기법이 적용된 튜브에서 약 60% 줄일 수 있었고 해석시간은 약 86% 줄일 수 있었다. 해석시간은 열전달 해석 결과를 불러와서 경계조건을 부여하고 해석을 완료한 시간이다. 해석 시스템의 사양이 우수함에도 불구하고 실제 모델은 균질화 모델과 비교하여 많은 시간이 소요된 것을 확인 할 수 있다. 또한 메모리 할당 또한 실제 보다 약 59% 줄임으로써 하드웨어의 한계를 극복 할 수 있다.

실제 모델링을 하고 후처리 과정을 거치는 데에는 이보다 더 많은 노력과 시간이 필요하다. 하지만 균질화 기법을 이용하면, 위의 결과에서 볼 수 있듯이 상당히 많은 시간을 줄일 수 있고, 모델링과 후처리 과정을 간소화 시킬 수 있을 뿐만 아니라 하드웨어 시스템의 사양에 따른 한계도 줄일 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 균질화 기법을 이용한 덩플 튜브형 인터쿨러의 유한요소 해석의 신뢰성과 타당성을 규명 하였다. 덩플형 인터쿨러는 덩플의 복잡한 형상으로 인해 모델링과 요소생성의 어려움, 요소수의 증가로 해석시간의 증가와 고사양의 하드웨어를 요구하는 등 많은 문제점을 가졌다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 등가 재료 물성치를 구해 덩플이 없는 튜브가 덩플을 가지

는 효과를 내도록 덩플형 튜브를 사각 튜브로의 단순화를 통해 요소수를 감소시켜 위의 문제를 해결 하였다. 또한, 균질화 기법으로 얻은 해석 결과 값과 실제 모델의 결과 값의 비교 분석을 통해 균질화 기법의 타당성과 신뢰성을 규명 할 수 있었다.

균질화 기법은 복잡한 형상으로 발생하는 문제점을 효과적이고, 간단한 방법으로 해결할 수 있는 이점이 있다. 단위 형상을 통한 등가 재료 물성치의 계산으로 모델링과 해석 시간, 하드웨어적인 한계를 극복하면서 실제 모델과 유사한 결과 값을 얻을 수 있다. 실제로 등가 물성치를 이용한 균질화 기법을 통해, 실제 모델보다 요소의 크기를 줄였음에도 불구하고 튜브에서 실제 모델 대비하여 요소수는 약 60%, 해석시간은 86% 단축시킬 수 있었다.

본 연구 결과로부터 도출된 인터쿨러의 덩플 튜브에 대한 균질화 기법은 동일한 형상을 가지면서 반복적으로 배열되어 있는 웨도우 마스크 및 다양한 곡면으로 구성되어있는 부품 및 구조물에 대한 구조 해석적 응용에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)의 지원으로 수행된 연구 결과입니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) KIM, S.H., 1992, "Development of the Turbo-Intercooled Engine," *The Korean Society of Automotive Engineers 1992 Conference Abstract Series*, pp. 13~21.
- (2) Kim, J., Park, S.K. and Kang, B.S. 2002, "Analysis of Microphonic Phenomenon for Shadow Mask in Flat TV by FEM," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 19, No. 11, pp. 89~95.
- (3) Ugural, A.C. and Fenster, S.K., 2002, *Advanced Strength and Applied Elasticity(4th ed)*, New York,



PRENTICE HALL.

- (4) Chang, Y.C., Kim, J. and Kang, B.S., 2000, "Development of ANSYS Module for Thermal Deformation Analysis of Flat TV Shadow Mask," *2000 Taesung ANSYS User's Conference*, pp. 389~398.
- (5) Kim, J., Park, S.K. and Kang, B.S., 2002,

"Thermal Deformation Analysis of Shadow Mask in a Flat TV and Prediction of Electron Beam Landing Shift by FEM," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 26, No. 11, pp. 2297~2304.

- (6) Incropera, F.P. and Dewitt, D.P., 2003, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer(5th ed)*, New Jersey, JOHN WILEY & SONS.