

강제 대류를 통한 열소산 구조물의 위상최적화

윤길호[†]

Topological Optimization of Heat Dissipating Structure with Forced Convection

Gil Ho Yoon

Key Words : Fluid-heat Interaction (유체-열 연성), Topology Optimization (위상최적화)

Abstract

This paper presents a new development for topology optimization of heat-dissipating structure with forced convection. To cool down electric devices or machines, two types of convection models have been widely used: Natural convection model with a large Archimedes number and Forced convection with a small Archimedes number. Nowadays, many engineering application areas such as electrochemical conversion device or fuel cell devices adopt the forced convection to transfer generated heat. Therefore, to our knowledge, it becomes an important issue to design flow channels inside which generated heat transfer. Thus, this paper studies optimal topological designs considering fluid-heat interaction. To consider the effect of the advection in the heat transfer problem, the incompressible Navier-stokes equation is solved. This paper numerically studies the coupling phenomena and presents optimal channel design considering forced convection.

1. 서론

이 논문에서는 유체-열이 연성이 되어 있는 시스템의 연성해석(Coupled analysis)과 이를 이용한 채널(Channel)의 위상최적화(Topology Optimization)에 대해서 연구한다.

전세계적으로 석유자원의 고갈로 인한 에너지 문제를 해결하기 위한 연구가 이루어지고 있다. 우리나라 학계와 산업계에서도 이 부분에 대한 관심이 커지고 있으며 특히 전기화학반응(Electrochemical)을 이용한 에너지 발생장치 연구가 활발하게 진행되고 있다. 대표적인 전기화학반응을 이용한 장치로 연료전지(Fuel cell)등을 예로 들 수 있다⁽¹⁾.

전기화학반응을 물리적으로 정확하고 타당하게 수치해석을 하기 위해선 유체와 열 연성 해석뿐만 아니라 화학반응으로 인한 밀도(Density)와

전도성 (Conductivity)등이 비선형적으로 변하는 것을 반영하는 것이 필수적이다. 또한, 발생하는 열과 부산물을 효과적으로 제어하는 기술 또한 필요하다. 이에 이 논문에서는 전기화학반응을 해석하기 위한 초기 연구 단계인 비압축 유체(Incompressible fluid)와 유체의 흐름 때문에 열이 소산되는 시스템을 해석하고 위상을 설계하는 효과적인 방법을 연구한다.

비압축성 유체와 열이 연성되어 있는 시스템은 압축성 유체와 열이 연성되어 있는 시스템과 비교하여 한 방향의 연성이 되어 있다는 특별한 수학적 성질이 있다. 이는 아르키메데스 수(Archimedes number)를 사용하여 구분할 수 있는데 비압축성 유체에선 아르키메데스 수가 0 인 시스템을 나타낸다. 즉, 온도의 변화에 의한 밀도의 변화를 비압축성 유체에선 고려하지 않음으로 나비에-스톡스 방정식을 풀 후 이 유체의 이동에 의한 열의 소산만을 고려해주면 된다. 이로 인한 열의 소산을 강제 대류(Forced Convection)이라고 한다. 이에 반해서 온도의 변화에 의한 밀도의 차이로 이루어지는 열에너지

[†] 회원, 경북대학교, 기계공학부

E-mail : ghy@knu.ac.kr

TEL : (053) 950-6570

소산현상은 자연대류 (Natural Convection) 현상이다.

2. Fluid-heat coupling analysis and design

유체와 열전달이 연성되어 있는 시스템을 풀기 위해서 나비에-스톡스 방정식(Navier-Stokes equation) 과 포아송 방정식(Poisson's equation) 을 풀게 된다. 특히, 포아송 방정식에 유체의 속도 텀이 들어가게 되는 것을 알 수 있다. 이 시스템은 유체와 구조물의 연성 시스템과 비교해서 한 방향으로만 연성이 되어 있는 아주 간단한 다물리계 시스템이고 많은 상용소프트웨어에서 지원하고 있는 시스템이다. 식 (1)은 유체부분을 풀기 위한 방정식이고, 식 (2)는 유체의 움직임으로 인한 열전달을 표현하고 있다⁽²⁾.

$$\rho_f (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = \nabla \cdot \mathbf{T}_f - \underbrace{\alpha \mathbf{v}}_{\text{Friction force}}, -\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = (\rho C_p \mathbf{v}) \cdot \nabla T \quad (2)$$

여기서 ρ_f 와 \mathbf{v} 는 유체의 밀도와 속도이다. 유체의 스트레스는 \mathbf{T}_f 이고 α 는 투수율(Permeability) 계수이다. 열전달 방정식에서 열전도율은 k 이고 비열은 C_p 로 나타나 있다. 그리고, 재료가 유체에서 고체로 서로 바뀔 때 따라 변화하는 밀도는 ρ 로 표현하였다.

위상최적화를 위해서 위의 식들의 물성치들을 다음과 같이 보간을 수행하였다. 보간 방법으로는 SIMP 방법을 사용하였다⁽²⁾.

Table 1. Interpolations of physical parameters.

설계변수	k	α	C_p	ρ
Solid ($\gamma=1$)	k_s	∞	C_s	ρ_s
Fluid ($\gamma=0$)	k_f	$\mathbf{0}$	C_f	ρ_f

이 연구에서 이 보간에 대해서 특이하게 사용한 사실은 유체방정식에만 밀도 부분을 보간하지 않는 것이다⁽¹⁾. 유체 방정식에서 보간하지 않는 것은 저항 힘을 조절하여 고체부분을 모델링하기 때문이다.

3. 수치예제

개발된 이론을 검증하기 위하여 다음 그림과 같이 설계영역의 아래 부분에 발생하는 열원이 가해지는 영역을 고려하였다. 그리고, 최적의 공기의 흐름을 설계하여 높아지는 온도를 낮춰주는 채널(Channel)을 설계한 결과를 보여주고 있다.

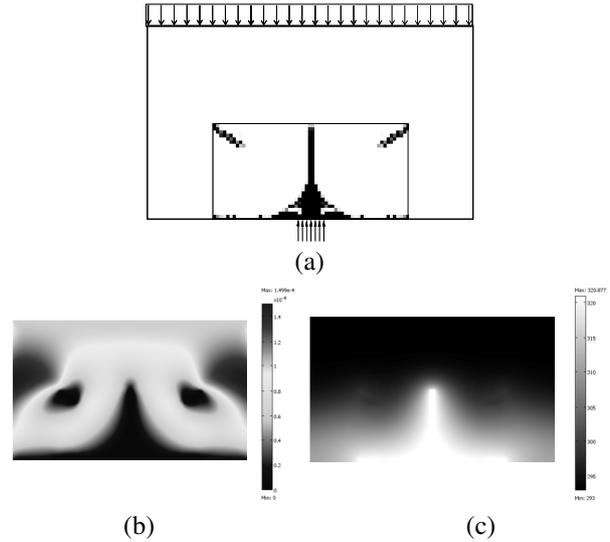


Fig 1. An optimization problem considering the fluid-thermal interaction. (a) A problem definition (Air and Copper) and a result, (b) fluid velocity, and (c) temperature distribution.

4. 결론

이 연구에서는 유체와 열전달이 연성되어 있는 시스템의 해석 코드를 개발하였고 이를 이용하여 위상최적화를 수행하였다. 향후 연구주제로 화학반응을 고려한 해석을 연구한 후 이를 이용하여 연료전지(Fuel cell)등의 채널 최적화를 할 수 있으리라 예상된다.

참고문헌

- (1) B.Sunden.M.fAGHRII, 박한웅.황영진.정건용 역, 2008, "연료전지에서의 수송현상"
- (2) Gil Ho Yoon, 2008, " Topological layout design of heat dissipating structures considering force convection ," in preparation