모노리틱 유체-구조 연성 해석을 이용한 컴플라이언트 미케니즘 위상 최적 설계

Compliant Mechanism Design using a New Monolithic Approach Considering Fluid-Structure Interaction Annual Conference

윤 길 호*
Yoon Gil Ho

요 약

이번 연구에서는 저속 비압축성 유체-구조 연성을 고려한 위상 최적화을 위해 새로운 모노리틱 해석을 개발한다. 이 새로운 해석 기법에서는 기존의 유체-구조 연성 시스템 해석 기법에서 유체와 구조 영역을 분리하고 연성 조건을 만족시키는 것과 다르게 하나의 일치된 해석 방정식을 유체 영역과 구조 영역에 동일하게 적용한다. 또한, 경계조건을 만족시키기 위하여 단일화 된 해석 방정식의 물성치를 바꾸어주는 새로운 방식을 제시하였다. 이 새로운 방법에서는 유체, 구조 영역을 분리하지 않고 Navier-Stoke′s 방정식과 선형 탄성식을 동시에 사용하였다. 또한, 유체-구조 영역이 연성 해석 중 변화하는 것을 반영하기 위하여 구조 변위를 이용하여 Deformation tensor를 계산하였고 이를 이용하여 변형 후에서의 Navier-Stoke 방정식의 미분을 계산하는 방법을 제안하였다. 그리고, 정상 상태 유체를 가정하고 속도에 비례하는 마찰 힘인 Darcy′s force 항을 Navier-Stoke 방정식에 넣고 이 마찰 힘의 크기를 변화시킴으로 해서 유체 방정식에서의 연성 경계 조건을 만족시켰다. 선형 탄성 방정식에서 Divergence이론을 이용해서 경계에서 작용하는 외력이 하는 일을 내부 시스템에 하는 일로 계산하였다. 개발된 모노리스 해석 방법을 이용하여 저속 비압축성 유체가 구조에 미치는 압축력을 계산하였고 이용하여 컴플라이언트 미케니즘을 설계하였다.

keywords : 위상 최적설계, 저속 유체-구조 연성 해석, 모노리스 해석

1. 서 론

저속 비압축성 유체와 구조가 연성이 되어 있는 시스템의 효율적인 해석과 이를 이용한 해석은 전통적으로 많이 연구되어 온 시스템이다. 해석 조건과 해의 정확성에 따라 많은 이론과 해석 기법이 개발되어 왔고 현재에는 많은 상용 소프트웨어에서도 간단하게 해석할 수 있는 함수와 방법을 지원하고 있다 (Yoon 2010). 일반적인 유체와 구조가 연결된 시스템을 해석하는 방법은 크게 순차 해석(Sequential analysis or staggered analysis method)을 이용한 해석기법이 주로 이루어져 왔다. 이 순차해석기법은 그림 1에서와 같이 유체와 구조물의 해석 공간을 분리한 후 나비에-스톡스 방정식(Navier-Stokes)과 선형 탄성방정식(Linear elasticity)으로 분리하고 각 도메인의 경계에 연성조건을 적용하여 해석하는 방법이다. 또한, 치수(Size) 및 형상

* 정회원 • 경북대학교 기계공학과 조교수 ghy@knu.ac.kr or gilho.yoon@gmail.comm

(Shape) 최적화와 결합하여 일반 기계, 건축 구조물 및 항공기 등의 문제점을 해결하고 성능을 향상 시키는 많은 연구가 이루지고 있다. 하지만, 기존에 개발되어 있는 해석 방법은 기본적으로 구조물과 유체 경계가 정의되어 있어야하기 때문에 위상최적화(Topology optimization)에 적용하는 데에는 해결하지 못한 많은 문제점이 있다.

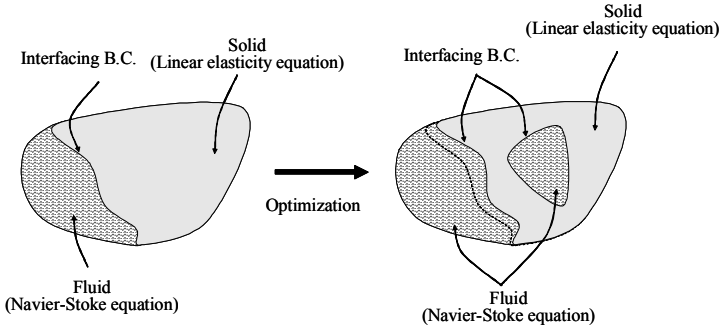

그림 1 기존의 유체-구조 연성 시스템의 해석 및 위상최적화

저속 비압축성 유체-구조 연성 시스템의 위상최적화를 위하여 본 연구자는 모노리스 해석이란 새로운 방법을 제안하였다(Yoon 2010). 이 논문에서는 이 새로운 방법을 확장하여 유체-구조 연성을 고려한 컴플라이언트 미케니즘을 설계한다 (Yoon 2011)..

2. 모노리스 유체-구조 연성 해석

새로운 모노리스 해석(Monolithic analysis)기법은 기존의 순차해석기법과는 다르게 해석 영역의 지배방정식을 구별하지 않는 것이다. 다시 말하자면 고체영역에서도 저속 비압축성 유체방정식이 존재하며 유체영역에서도 선형 탄성 방정식이 존재한다. 기존의 방법과 비교해서 이런 특성으로 해석적인 관점에서는 전혀 장점이 없다. 하지만, 기존의 방법과 비교하여 물성치를 변화하는 것으로 영역의 변화를 표현할 수 있기 때문에 구조최적화에서 장점이 있다(Yoon 2010). 경계조건을 만족시키기 위하여 나비에-스톡스 방정식에 다음과 같이 속도에 비례하는 마찰 힘을 첨가하고 선형 탄성 방정식에는 유체의 스트레스를 고려하여 방정식을 변형시킨다(Yoon 2010; Yoon 2011).

$$\rho(\boldsymbol{V}\cdot\nabla_{\boldsymbol{x}})\boldsymbol{V}=\nabla_{\boldsymbol{x}}\cdot\boldsymbol{T}_f-\alpha\boldsymbol{V},$$

$$-\nabla_{\boldsymbol{x}}\cdot\boldsymbol{V}=0 \tag{1}$$

여기서 유체의 밀도, 속도, 스트레스 텐서 및 속도에 비례하는 마찰력 계수는 각각 $\rho, \boldsymbol{V}, \boldsymbol{T}_f$, 와 α이다. 그리고, 유체와 구조가 연성이 된 후에의 미분항은 $\nabla_{\boldsymbol{x}}$이다. 그리고, 선형 탄성식은 아래와 같다.

$$\nabla_{\boldsymbol{x}}\boldsymbol{T}_{\boldsymbol{s}}=0,\ \boldsymbol{T}_{\boldsymbol{s}}=\boldsymbol{CS} \tag{2}$$

구조물의 스트레스 및 스트레인 텐스는 각각 $\boldsymbol{T}_{\boldsymbol{S}}$와 $\boldsymbol{S}$이다. 여기서 구조물의 그리고, 비압축성 정상 유체와 구조의 경계조건은 경계에서 아래와 같이 정의된다. 여기서 경계에서의 법선 벡트는 $\boldsymbol{n}$이다.

$$\boldsymbol{V}=0,\ \boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{T}_{\boldsymbol{s}}=\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{T}_{\boldsymbol{f}} \tag{3}$$

위의 조건을 이 연구에서 새롭게 제안하는 모노리스 해석 방법에서는 아래와 같이 Divergence 이론을 이용하여 경계적분을 영역적분으로 치완한다. 여기서 Ψ는 고체 영역에서만 1이고 다른 부분은 0인 값을 가지는 필터이다.

$$\int_{\Gamma_i} \delta \boldsymbol{u}^T(\boldsymbol{n}) \cdot \boldsymbol{T}_f = \int_{\Omega} \Psi \nabla_{\boldsymbol{x}} (\delta \boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{T}_f) d\Gamma \tag{4}$$

또한, 유체-구조 연성으로 인하여 영역이 바뀌고 이에 따른 미분의 정의가 바뀌는 것을 고려하기 위하여 Deformation tensor를 이용한다 (Yoon 2010). 위의 새로운 모노리스 해석 방법을 이용하고 탄성계수, 필터 Ψ, 마찰 힘의 계수를 각 요소에 정의되어 있는 밀도로 보간하고 일반적인 위상최적화 기법을 이용하여 위상최적화를 수행할 수있다 (Yoon 2010)..

3. 위상최적화 설계 예제

개발된 모노리스 해석 방법과 위상최적설계 이론을 이용하여 아래그림과 같이 왼쪽 경계에서 유체가 흐르고 위와 아래쪽으로 유체가 빠져나갈 때 이 때 발생하는 유체의 압력을 이용하여 오른쪽에 정의된 스프링을 최대한으로 오른쪽으로 구동시키는 구조물을 (b)와 같이 구했다(Yoon 2011).

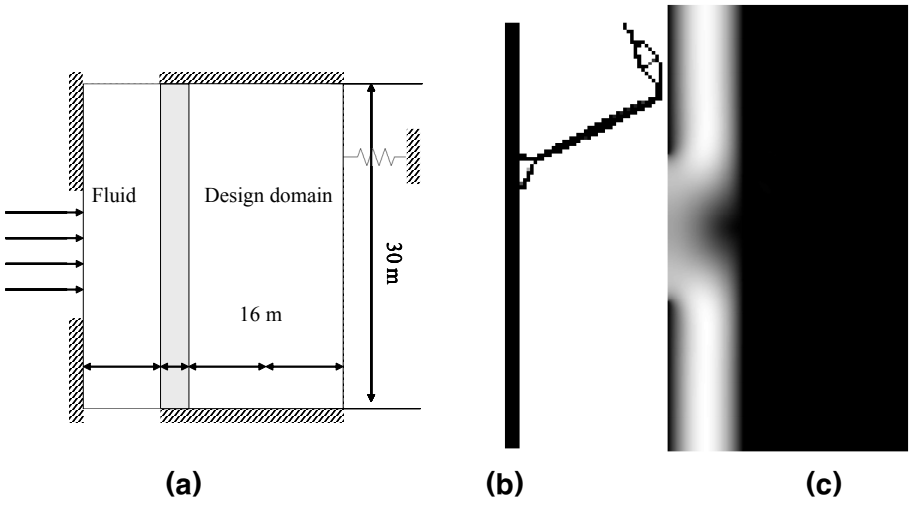

그림 2 유체-구조 연성을 고려한 컴플라이언트 위상최적화 예제 (a) 경계조건과 최적화 문제 정의, (b) 최적화된 구조물, (c) 유체 흐름

4. 결론

이 논문에서는 저속 비압축성 유체-구조 연성 해석을 위하여 새로운 모노리스 해석 방법을 제안하였다. 이 방법은 유체와 구조의 영역을 나누고 서로 다른 방정식을 대입하는 기존의 방법과는 다르게 일치된 하나의 방정식을 이용하고 물성치를 보간하는 방법으로 연성해석을 수행한다. 이 방법은 기존의 방법과 비교하여 해석적인 면에서는 해석시간이 늘어나는 등의 단점이 존재한다. 하지만, 이 새로운 방법을 이용하여 기존의 해석 방법으로는 풀이 어려운 위상최적화를 수행할 수 있었다.

참고문헌

Yoon, G.H. (2010) Topology optimization for stationary fluid.structure interaction problems using a new monolithic formulation, International journal for numerical methods in engineering, 82,pp.591~616.

Computers & Structures, 2(6), pp.893~895.

Yoon, G.H. (2011) A new FE formulation of the coupling interaction boundary conditions for stationary fluid and structure interaction simulation, in preparation.