

Body Fitted Mesh와 Level Set Method를 이용한 동적 컴플라이언스 최소화 기법 연구

Dynamic Compliance Minimization using Body-fitted Mesh and Level-set Method

배 성 원[†] · 임 성 훈^{*} · 후루타 코조^{**} · 이주이 카즈히로^{*} · 니시와키 신지^{*}
 Seongwon Bae[†], Sunghoon Lim^{*}, Kozo Furuta^{**}, Kazuhiro Izui^{*} and Shinji Nishiwaki^{*}

(Received April 9, 2026 ; Revised April 28, 2026 ; Accepted May 6, 2026)

Key Words : Topology Optimization(위상최적화), Dynamic Compliance Minimization(동적 컴플라이언스 최소화), Body-fitted Mesh(바디 핏티드 메쉬), Level-set Method(레벨 세트법)

ABSTRACT

The dynamic compliance minimization technique based on the mode superposition method is often used to minimize the vibration of a product or part. However, this technique has the disadvantage of being more computationally expensive than static problems. The long calculation time of this technique is attributed to the increase in the number of modes required for superposition, the number of iterations to reduce gray-scaled elements, and the number of mesh required to form clear boundaries. In this study, the possibility of shortening the calculation time is examined using the level set method and the body fitting method.

기 호 설 명

F : 외력 행렬
 $\tilde{F}$: 증강 라그랑지안
 f : 외력항
 G^{i+1} : 라그랑주 승수
 K : 확산계수
 $\mathbf{K}$: 강성행렬
 $\mathbf{M}$: 질량 행렬
 $\mathbf{u}$: 변위
 $\mathbf{v}$: 테스트함수
 ρ : 밀도
 ϕ : Level set 함수
 ω : 각주파수
 μ 와 λ : Lamé 계수

1. 서 론

위상최적화 기법의 경우 기존 유한요소법만 사용하는 것과 달리 문제점이 아닌 최적해를 도출해 내는 기법으로 기업에 있어서 매력적인 기법이다. 특히, 소음 진동 저감 분야에서 숙련도 있는 직원을 만들기 위해서는 상당히 긴 교육 시간을 필요로 하고, 그 결과도 숙련도에 따라 들쭉날쭉한 문제가 있다. 반면, 위상 최적화 기법을 사용하는 경우, 문제를 정의하는 사람의 역량에 따라 결과가 달라지기는 하지만, 머플러와 같이 단일 용도의 목표를 가진 설계에 대해서는 단기간 내에 일정 이상의 결과를

[†] Corresponding Author ; Member, LG Electronics, Senior Researcher
 E-mail : seongwon.bae@lge.com
^{*} Kyoto University, Professor
^{**} Ritsumeikan University, Professor

[‡] Recommended by Editor Jae Hyuk Lim
 © The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

얻을 수 있다는 장점이 있어서 확대 일로에 있다⁽¹⁾.

그럼에도 불구하고, 확대가 더딘 이유는 여러가지가 있겠지만, 그 중 하나는 계산에 소요되는 시간이다. 공조기를 비롯한 여러 제조 분야에서 인버터 사용이 보편화되어 있으므로, 넓은 가진 주파수 영역에 대해서 주파수 응답 함수를 얻어야 하는 경우가 많다. 이 주파수 응답 함수를 얻기 위한 유한요소 기법으로 사전에 계산한 모드 벡터와 고유주파수를 활용하여 계산하는 모드중첩법(mode superposition method)이 많이 사용되며, 계산 시간이 단축되는 것으로 널리 알려져 있다. 또한, 주파수 응답을 최적화하기 위해 위상최적화 기법으로 가장 많이 사용되는 것은 Ma et al.이 처음 소개한 동적 컴플라이언스 최소화 기법이며, 이 동적 컴플라이언스 최소화 기법을 적용할 때에도 모드중첩법에 기반하여 사용하는 경우가 많다⁽²⁾.

이후, Olhoff et al.에 의해 동적 컴플라이언스 최소화하는 과정에서 고유주파수를 올리면서 최소화되는 것과 고유주파수를 낮추면서 최소화되는 두 가지 경향이 있음을 소개했다⁽³⁾. 고유주파수보다 조금 큰 주파수로 가진될 때에 고유주파수를 낮추면서 동적 컴플라이언스가 최소화되는 방향으로 해가 업데이트 되는데 이 때, 강성을 낮추기 위해 gray scale element가 증가하는 경향을 설명했다. 또한 증가된 gray scale element에 의해서 불필요한 저차 모드가 발생하고, 모드 중첩법의 해의 도출이 안정적이지 않음을 설명했다. gray scale element는 해의 안정성 외에도 도출된 형상의 경계가 불분명하여 실제 설계에 사용이 어려운 문제를 가지고 있다.

Yamada et al.은 정적인 문제와 고유 주파수 최적화 문제에 반응 확산 함수와 레벨 세트법(level set method)을 적용하고 gray scale element를 축소하며, 분명한 경계형상을 가지는 해를 도출해 보였다⁽⁴⁾. Kim et al.은 정적인 문제에 대하여 비교적 적은 요소와 반응 확산 함수를 이용하여 업데이트하고 adaptive mesh refinement법을 이용하여 부드러운 경계형상으로 마무리하는 기법을 소개하였다⁽⁵⁾. 그러나 AMR 방법은 요소의 수가 급격하게 증가하여 계산 시간이 길어지는 문제가 있다.

Body fitted mesh는 주로 경계가 변하는 유동 해석에서 많이 활용되는 방법으로 Choi et al.은 압축기 밸브 거동 연구에 사용하였다⁽⁶⁾. Li et al.은 정적인

하중과 유체의 유동을 고려한 위상최적화 문제에 body fitted mesh를 이용하여 적은 요소를 사용해서도 기존의 많은 요소를 사용한 모델과 유사하게 부드러운 경계 형상을 도출할 수 있음을 보였다⁽⁷⁾.

이 논문에서는 이 방법을 진동 문제에 적용하여 그 효과를 검토하고자 한다. 반응확산식과 레벨 세트법을 이용하여 적은 요소로 최적화한 후, body fitted mesh를 적용하여 부드러운 경계를 가지는 해를 도출하는 가능성을 분석하였고, 계산에 소요된 시간 비교를 통해 유용성을 분석한다.

2. 정식화(Formulation)

2.1 유한요소법을 이용한 주파수 응답 해석

이 연구의 목적은 body fitted mesh의 유용성을 검증하는 것이다. 감쇠 계수는 body fitted mesh로 인해 심각한 영향을 주고받는 인자가 아니므로 검증의 편의를 위해 이를 제외한 진동 방정식을 활용하였으며 weak form은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \rho \int_{\Omega} \mathbf{u} \mathbf{v} \, d\Omega + \int_{\Omega} 2\mu \mathbf{e}(\mathbf{u}) \cdot \mathbf{e}(\mathbf{v}) \, d\Omega + \int_{\Omega} \lambda \operatorname{div}(\mathbf{u}) \operatorname{div}(\mathbf{v}) \, d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} \, d\Omega \quad (1)$$

여기서, ρ , μ 그리고 λ 는 각각 등방성 물질의 밀도, Lamé 계수들이다. 또, $\mathbf{u}$, $\mathbf{v}$, 그리고 $\mathbf{f}$ 는 각각 변위, 테스트함수 그리고 외력항이다. 변형 텐서 ($\mathbf{e}$)는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\mathbf{e}(\mathbf{u}) = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) \quad (2)$$

식 (2)를 유한요소법에 필요한 행렬식으로 변형하면 식 (3)과 같다.

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (3)$$

여기서, $\mathbf{M}$, $\mathbf{K}$, 그리고 $\mathbf{F}$ 는 각각 질량, 강성 그리고 외력에 관한 행렬이다.

변위벡터($\mathbf{U}$)가 사인함수로 표현된다고 가정하고, 시간에 대한 도함수를 가진 각 주파수(angular frequency, ω)를 이용하여 표현한다. 또, 식을 보다 단순하게 축소하기 위해 동적 강성 텐서($\mathbf{K}_d$)를 정의하여 대입하면 식 (3)은 식 (4)와 같이 단락화할 수 있다.

$$(K - \omega^2 M) U(\omega) = K_d(\omega) U(\omega) = F(\omega) \quad (4)$$

모드중첩법의 경우, 변위(U)를 고유치(ω_i)와 고유 벡터(ξ_i), 그 기여도(c_i)를 이용하여 계산하며 그 식들은 식 (5)와 같다.

$$U(\omega) = \sum_{i=1}^N c_i(\omega) \xi_i \quad (5)$$

2.2 레벨 세트법

임의의 계산 도메인 $D \subset \mathbb{R}^2$ 에서 고체 도메인 Ω 이 있을 때, 레벨 세트 함수 ϕ 는 식 (6)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} 0 < \phi(x) &\leq 1, \text{ for } x \in \Omega \\ \phi(x) &= 0, \text{ for } x \in \partial\Omega \\ 0 > \phi(x) &\geq -1, \text{ for } x \in D \setminus \Omega \end{aligned} \quad (6)$$

2.3 물성의 내삽

식 (7)과 같은 특성함수를 정의한다.

$$\begin{aligned} \chi_\phi &= 1, \text{ if } \phi \geq 0 \\ \chi_\phi &= 0, \text{ if } \phi < 0 \end{aligned} \quad (7)$$

2.4 최적화 문제의 정식화

동적 컴플라이언스를 최소화하는 문제는 식 (8)과 같이 정식화 될 수 있다⁽²⁾.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } \Phi &= |U(\omega)^T F(\omega)| \\ \text{Subject to } \frac{\int_{\Omega} x_e d\Omega}{\int_{\Omega} d\Omega} &\leq V_f \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, V_f 는 공극률의 상한치이다.

목적함수와 제약조건을 이용하여 다시 라그랑지안 (Lagrangian)으로 표현하면 식 (9)와 같다.

$$\text{Minimize } \hat{F} = \Phi(x_e) + \gamma \left(\int_{\Omega} x_e d\Omega - V_f \int_{\Omega} d\Omega \right) \quad (9)$$

동적 컴플라이언스 문제의 민감도(sensitivity)는 식 (10)과 같이 알려져 있다⁽⁹⁾.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_e} L &= \frac{\partial}{\partial x_e} \int_{\Omega} (-j\omega^2 \rho u v d\Omega \\ &+ 2\mu e(u) \cdot e(v) + \lambda \text{div}(u) \text{div}(v)) d\Omega + \gamma \end{aligned} \quad (10)$$

2.5 증강 라그랑주 승수법

제약 문제를 비제약 최적화 문제로 변환하기 위해 식 (11)과 같은 증강 라그랑지안법이 사용된다^(5,7).

$$G(x_e) = \frac{\int_{\Omega} x_e d\Omega}{\int_{\Omega} d\Omega} - V_f = \frac{\int_{\Omega} x_e d\Omega}{|\Omega|} - V_f \leq 0 \quad (11)$$

증강 라그랑지안 $\tilde{F}$ 와 라그랑주 승수 G^{i+1} 는 식 (12)와 같이 정의된다.

$$\tilde{F} = \eta \Phi(x_e) + G^{i+1} \quad (12)$$

여기서, $\eta = \frac{|\Omega|}{\left\| \frac{dF}{dx_e} \right\|_{L^2(\Omega)}}$ 이며, 식 (13)의 양의 스칼라

q 와 r 은 비제약 조건을 위한 라그랑주 승수와 페널티 인자이다.

$$\begin{aligned} G^{i+1}(x_e) &= qG^i(x_e) + \frac{1}{2}rG^i(x_e)^2, \text{ if } G \geq -\frac{q}{r} \\ G^{i+1}(x_e) &= \frac{q^2}{r}, \text{ if } G < -\frac{q}{r} \end{aligned} \quad (13)$$

2.6 반응 확산 함수

반응 확산 함수(reaction diffusion equation)가 업데이트를 위해 사용된다. 레벨 세트 계산 중심의 1단계 계산과 body fitted mesh를 이용한 2단계에 동일하게 가상의 시간(t)을 사용한 반응 확산 방정식을 적용한다. 설계 영역(Ω)과 경계($\partial\Omega$)의 RDE는 식 (14), 식 (15)와 같이 정의된다:

$$\frac{\partial x_e}{\partial t} = x \nabla^2 x_e - \frac{\partial}{\partial x_e} \text{ for } x_e \in \Omega \quad (14)$$

$$\frac{x_e}{n} = 0 \text{ for } x_e \in \partial\Omega \quad (15)$$

여기서, x 는 확산계수이다.

2.7 최적화 프로세스

위상최적화 프로세스는 Fig. 1과 같다. 먼저 적은수의 요소를 이용하여 반응 확산 함수와 레벨 세트법을 적용해서 위상최적화를 진행한다. 업데이트를 통해 동적 플라이언스가 안정되었을 때, body fitted mesh를 이용하여 업데이트를 진행한다. 1단계에서는 한번 결정된 요소들

을 이용하여 업데이트한다면, 2단계에서는 1번 업데이트 할 때마다 요소들을 재생성하는 것이 차이점이다.

Body fitted mesh는 Mmg platform에서 제공하는 오픈소스를 이용하였으며 전체 프로그램도 오픈소스 프로그램인 FreeFEM++를 이용하여 작성되었다. Body fitted mesh는 레벨 차이가 정의되어있는 요소들을 경계에 따라 리메쉬하는 방법으로 생성 원리는 Dopagny et al.의 문서를 참고하기 바란다⁽⁸⁾.

3. 벤치마크 문제를 이용한 효과 분석

3.1 모델링

Fig. 2와 같이 가로 2 m, 세로 1 m의 외팔보를 대상으로 하여 해석을 진행한다. 소재는 구조용 철이며, 영률은 210 GPa, 밀도는 7850 kg/m^3 , 푸아송비는 0.3을 적용한다. 가진력은 10^4 N 이며 가진주파수는 1 Hz이다.

빠른 계산을 위해 총 858개의 요소를 사용하며, Fig. 3과 Fig. 4의 경우에 동일하게 적용된다. 해당 모

델의 고유주파수를 보면, 1차~5차 모드는 182.8 Hz, 667.4 Hz, 685.5 Hz, 1431.7 Hz 그리고 1810.0 Hz이다.

3.2 레벨 세트법 적용효과

반응 확산식을 단독으로 사용할 때와 반응 확산식에 레벨 세트법을 같이 사용할 때의 효과를 비교한다. 반응 확산식의 상수들을 동일하게 설정하고, 레벨 세트법의 적용 여부만을 차이로 두고 해석을 진행한다. 공동분률의 상한치는 0.5로 한다. 두 방법으로 도출된 해의 형상과 동적 컴플라이언스의 변화를 제시하면 Table 1과 같다.

모드중첩법에 활용된 모드의 수가 100개인 경우, 두가지 경우 모두 가진 점과 고정된 경계까지 연결되지 않은 해가 도출된다. 모드의 수가 증가되면서 해가 안정되고, 300개 이상의 모드가 적용되었을 때 해가 안정되게 도출되는 것을 Fig. 3과 Fig. 4에서 확인할 수 있다.

또한, 서로의 해의 모습을 통해 레벨 세트법이 반응확산식과 유사한 모습을 볼 수 있지만, 레벨 세트

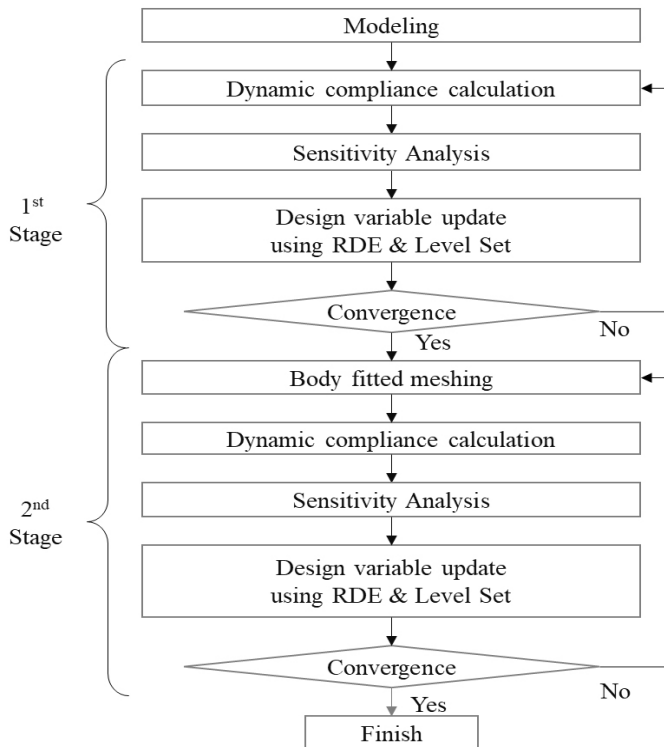


Fig. 1 Optimization process

법의 해가 상대적으로 사용된 부재의 밀도가 높고 그에 따라 상대적으로 컴플라이언스가 낮은 해를 얻을 수 있다. 따라서 두 기법사이에는 우열을 비교하는

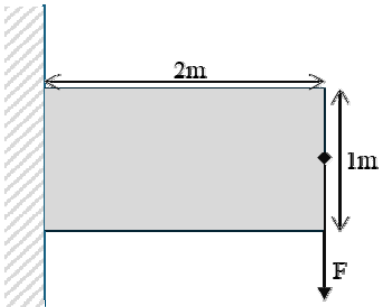


Fig. 2 Analysis model

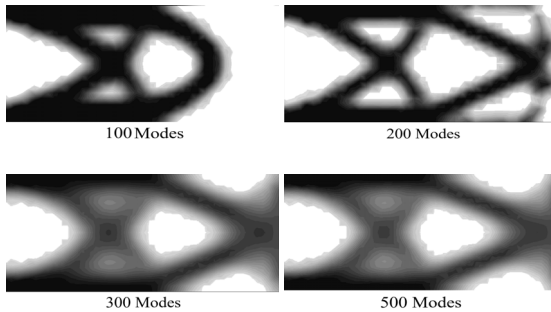


Fig. 3 Reaction-diffusion equation only

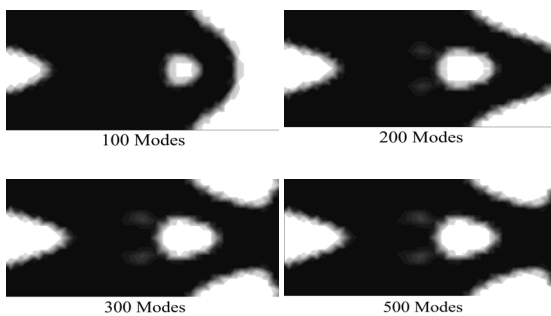


Fig. 4 With the level set method

것은 큰 의미가 없다. 다만 이 연구에서는 body fitted mesh를 적용하기 위해서 경계의 형상이 분명한 레벨 세트법을 선택한다. 경계선이 선명할 때에 body fitted mesh 적용 효과의 산포가 적을 것으로 판단했기 때문이다.

3.3 Body fitted mesh 적용 효과

(1) 형상 개선 효과

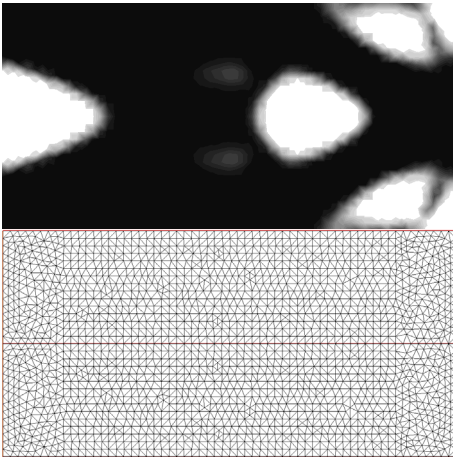
Body fitted mesh 적용 효과를 비교하기 위해, Fig. 4에서 안정적 결과가 도출된 500모드를 활용한 레벨 세트법을 활용한다. 레벨 세트법과 body fitted mesh를 적용한 경우와 레벨 세트법만 활용한 해들을 비교하도록 한다. 수렴 조건의 경우, 컴플라이언스나 컴플라이언스의 변화율 등으로 여러 조건으로 설정해보았으나, body fitted mesh 적용 효과가 과장되는 문제가 있어서 업데이트 회수를 동일하게 500회로 고정한다. Fig. 5의 경우 업데이트가 500회 이상 계속 진행되면 Fig. 6과 같은 형상으로 수렴되는데, 1000회 이상 업데이트가 소요된다. 4단원의 'L'자 모델에서는 일어나지 않는 현상으로 모델과 기법이 가지는 특수한 경우로 판단되며 항상 일어나는 현상은 아니어서 반영하지 않는다.

먼저, Fig. 6에서는 body fitted mesh 적용 유무에 따른 형상을 정성적으로 비교하였다. Fig. 6(a)와 같이 858개의 요소만 적용한 큰 경우, 그 경계가 요소의 형상을 따라 계단형으로 뽕족한 모습을 보이는 반면, Fig. 5(b)와 같이 858개의 요소를 이용하여 500회 업데이트하여 도출된 형상에 body fitted mesh를 적용하여 20회 업데이트한 경우, 요소수가 1737개로 늘어나는 동시에 경계선을 따라 요소가 배치되므로 상대적으로 부드러운 형상을 가지는 결과를 얻을 수 있다.

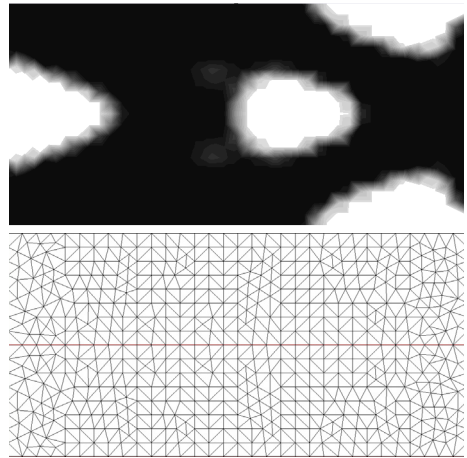
다음으로 Fig. 5에서는 body fitted mesh 모델을 적용하지 않고 요소의 수만을 늘린 결과를 제시한다. Fig. 5(a)의 결과와 Fig. 6(b)를 비교하면, Fig. 6(b)의 결과가 Fig. 5(a)보다는 경계의 울퉁불퉁한 면이 적다. Fig. 6(b)와 Fig. 5(b)를 비교하면 그림의 좌측부는 Fig. 6(b)가 좀 부드러운 곡선이고 우측부는 Fig. 5(b)와 비슷한 수준임을 알 수 있다. 각각의 계산 속도를

Table 1 Compliance according to the number of modes used in the mode superposition method

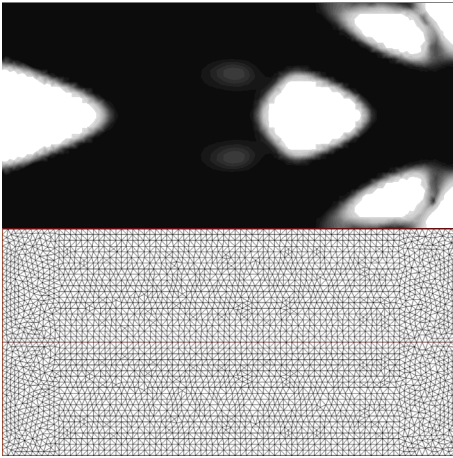
No. of mode	100	200	300	500
RDE	1.33×10^{-11}	1.92×10^{-11}	2.33×10^{-11}	2.58×10^{-11}
Level set	8.84×10^{-12}	9.87×10^{-12}	1.01×10^{-11}	1.00×10^{-11}



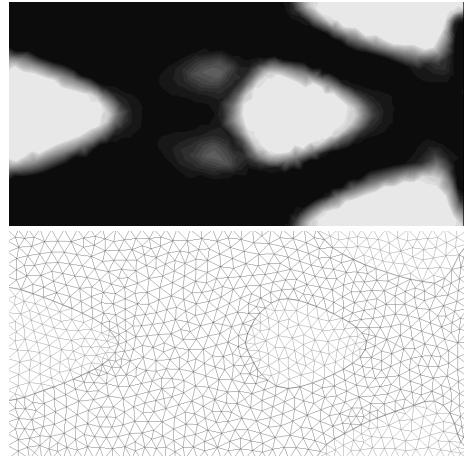
(a) 1934 element model and optimization result without body fitted mesh



(a) 858 element model and optimization result without body fitted mesh



(b) 3452 element model and optimization result without body fitted mesh



(b) Elements and optimization result after applying body fitted mesh (1737 elements)

Fig. 5 Result shapes with larger number of mesh

Fig. 6 Result shapes according to body fitted mesh application

정리하면 Table 2와 같다.

Body fitted mesh를 적용한 경우, 적용하지 않은 모델보다 5.9 % 계산 시간이 증가한다. 그러나 Fig. 5(b)와 수준이 같다고 가정하면 계산 시간이 84 % 감소하고, Fig. 5(a)와 비슷한 수준이라고 판단해도 68.2 % 정도 계산 시간이 축소됨을 알 수 있다.

Table 3에 공동분률과 컴플라이언스의 변화가 제시된다. Fig. 6의 결과들이 Fig. 5의 결과에 비해 공동분률이 작고 컴플라이언스는 크다. 3.3절 (1)에 기술한 바와 같이 iteration이 계속되면 Fig. 5의 결과들이 Fig. 6과 유사하게 바뀌게 되고 공동분률과 컴플라이언스 수치도 비슷하게 수렴한다.

(2) 사용 요소 증가에 따른 모드 밀도 증가

해들의 형상을 분석하다가 Fig. 3 ~ Fig. 6과 같이 최적 해의 형상이 일정하지 않은 것을 발견했고, 그 원인을 살피기 위해 모드 밀도의 변화를 Fig. 7과 같이 계산하였다. 요소 수가 증가할 경우, 적은 요소로는 도출되지 않는 추가적인 모드가 도출되어 계산 속도 및 해의 형상에 영향을 미친다. 특히, Fig. 3과 같이 일정한 양의 모드 수가 적용되지 않으면 가진점과 경계점이 연결되지 않는 해가 도출되는데, Fig. 8과 같이 요소수를 3452개를 적용한 경우에는 300개의 모드를 활용한 경우에도 가진점과 경계점이 연결되지 않았다.

Table 2 Comparison of computation time for cantilever model with body fitted mesh

Case	Level set No. of elements	Time (s × times)	BFM No. of elements	Time (s × times)	Total [s]
Fig. 5(a)	858	5.61×500	-	0	2805
Fig. 5(b)	858	5.61×500	1377	8.21×20	2969.2
Fig. 6(a)	1934	18.67×500	-	0	9335
Fig. 6(b)	3452	37.14×500	-	0	18570

Table 3 Comparison of compliance for cantilever model

Case	Volume	Compliance [J]
Fig. 5(a)	0.45	1.05×10^{-11}
Fig. 5(b)	0.45	9.57×10^{-12}
Fig. 6(a)	0.48	6.82×10^{-12}
Fig. 6(b)	0.48	5.12×10^{-12}

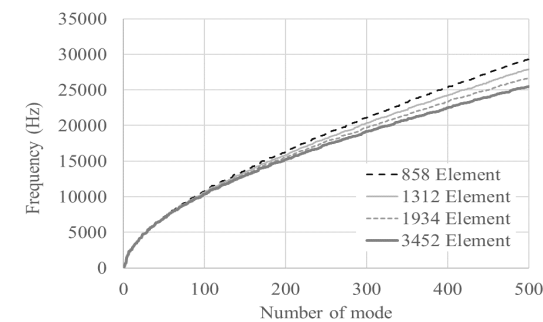


Fig. 7 Mode distribution with an increasing number of elements

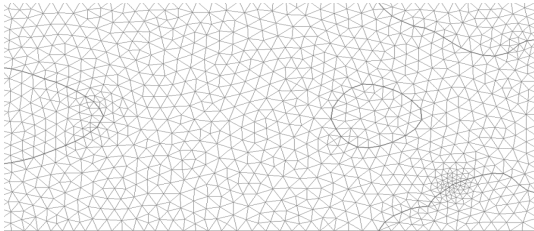


Fig. 9 Case of poor mesh quality with error

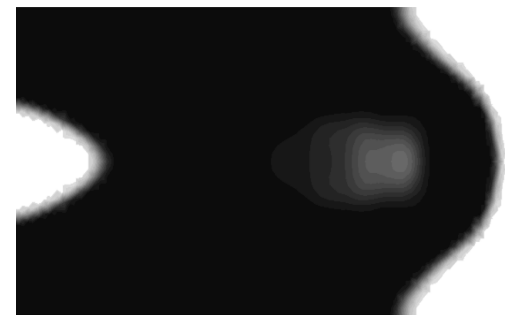


Fig. 8 Optimization result with 3452 elements and 300 modes

현재의 모델과 속도 향상을 목표로 보면 적은 요소 수와 body fitted mesh를 적용하는 경우가 더 유리하다고 말할 수 있으나, 계산 속도만이 아닌 해의 형상도 중요하므로 목적에 따라 적절한 요소의 개수를 선택

할 필요가 있다. 적절한 모델 선정에 대한 부분은 최적화 방향에 대한 Olhoff et al.의 Silva et al. 그리고 Bae et al. 논문을 비롯한 많은 논문에 소개되었으며 실제 문제에서는 더 복잡한 양상을 보이므로 이 논문에서는 주제에서 벗어날 수 있어 추가적인 논의는 생략한다^(3,9,10).

(3) 기타

Body fitted mesh를 적용하는 과정에서 body fitted mesh의 품질이 이전 레벨 세트법에 적용된 초기 메쉬 형상과 결과의 조합에 따라 영향을 받았다. 대부분의 경우 문제가 없었으나 완벽하지는 않았으며, Fig. 9와 같이 경계를 인식하는 과정에서 특정 위치에서 너무 작은 요소가 발생하거나 형상이 좋지 않을 때 singular error가 발생하거나 비대칭 해가 발생하는 경우가 가끔 있었다. 메쉬 형상의 적절한 제안을 두면 안정성이 높아질 것으로 보인다.

또한, body fitted mesh를 활용해서 해가 부드러운

형상을 가진다는 정량적이 기준이 필요하나 아직까지 관련 문헌을 찾지 못했다.

4. 추가 예시

4.1 모델링

3단원과 동일한 물성과 가진력 및 가진주파수를 적용하며, 그 형상을 달리한다. ‘L’자 모델을 대상으로 하며 그 형상은 Fig. 10과 같다.

4.2 Body Fitted Mesh 적용 효과

‘L’자 모델의 경우 모드를 150개만 사용해도 안정된 해를 얻을 수 있다. 사용된 요소의 수와 body fitted

mesh가 사용되었을 때의 요소 수, 계산 속도, 공극분률 및 컴플라이언스는 Table 4 및 Table 5와 같고, 그 모델과 해의 형상은 Fig. 10과 Fig. 11에 제시된다.

Fig. 11과 같이 1740개의 요소를 활용해서 업데이트를 하고 body fitted mesh를 적용하여 3808개의 요소를 사용한 모델이 사용되고, 대조 모델로는 body fitted mesh를 적용하지 않고 4640개의 요소를 사용한 모델과 7100개의 요소를 사용한 모델이 적용된다.

각각의 해의 형상을 정성적으로 비교해보면, 1740개의 요소로 업데이트하고 body fitted mesh를 적용한 모델의 해의 형상이 body fitted mesh없이 4640개의 요소를 사용한 모델보다는 경사면의 계단 형상이 덜 두드러지고, 7100개의 요소를 사용한 모델에 비해도 동등한 수준임을 알 수 있다.

다만, 3단원의 예제와 같이 모드합성법에 사용되는 모드의 특성이 변화하므로 최종적인 해의 형상이 동일하지 않은 특성을 보이나, 이전 모델보다는 차이가 적다.

계산 시간은 Table 4에서 body fitted mesh를 적용하면, 이를 적용하지 않고 큰 메쉬를 사용한 경우에 비해서 60 %와 74 %가 적고, 컴플라이언스와 공극밀도는 유사한 수준이다.

결론적으로 모델의 형상이 다른 경우에도 이전 예제와 같이 계산 시간을 절약할 수 있다.

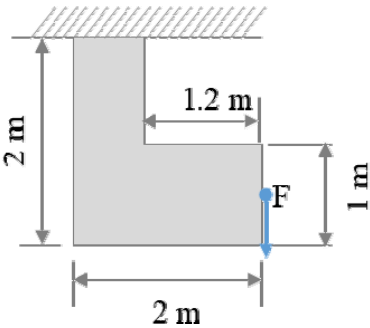


Fig. 10 L-shaped model

Table 4 Comparison of computation time for L shape model with body fitted mesh

Case	Level set No. of elements	Time (s × times)	BFM No. of elements	Time (s × times)	Total [s]
Fig. 11(a)	1740	3.29 × 500	0	0	1645
Fig. 11(b)	1740	3.29 × 500	3808	10.01 × 20	1845.2
Fig. 11(c)	4640	9.16 × 500	0	0	4580
Fig. 11(d)	7100	14.25 × 500	0	0	7125

Table 5 Comparison of compliance for L shape model

Case	Volume	Compliance [J]
Fig. 5(a)	0.65	2.35 × 10 ⁻¹¹
Fig. 5(b)	0.65	2.02 × 10 ⁻¹¹
Fig. 6(a)	0.65	2.19 × 10 ⁻¹²
Fig. 6(b)	0.65	2.15 × 10 ⁻¹²

5. 결 론

이 논문에서는 주요 유체분야에 많이 활용되는 *body fitted mesh*를 활용하여, 기존 모드 중첩법 기반의 동적 컴플라이언스 최소화 과정에서 나타나는 계단식 경계를 적은 수의 요소로 매끄러운 곡선 형상으로 개선하고, 이를 이용하여 연산 시간 단축 가능성을 검토하였다.

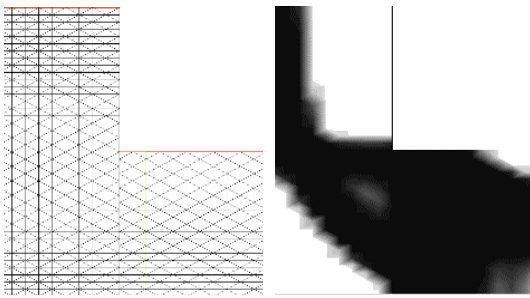
단순한 외팔보 모델과 'L'자 모델에서 적은 요소로 동적 컴플라이언스 최소화를 진행하고 적은 회수의 *body fitted mesh*를 적용하여, 이보다 3배~4배 많은 요소를 사용한 모델과 유사하게 부드러운 경계를 가지는 결과를 도출했으며 계산 시간이 60%~84% 정도 축소된 결과를 얻을 수 있었다.

이 논문에서는 해석 소요 시간 산출 근거가 정량적이지 않고 정성적으로 표현한 것과 사용 요소의 개수와 형상에 의해 모드의 밀도가 변하고 이는 해의 형상에 영향을 주게 되므로 유사하지만 조금씩 형상의 차이가 있는 해가 도출된다는 사실 그리고 *body fitted mesh*의 안정적인 활용 조건에 도출하지 못 한계도 확인했다.

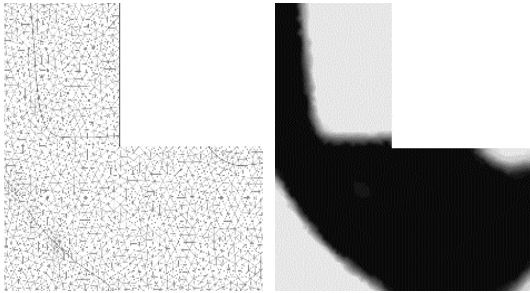
그러나 이 연구의 결과가 경제적인 만큼 향후 기업들의 자진동 저소음 최적화 설계에 가치있게 활용되었으면 한다.

References

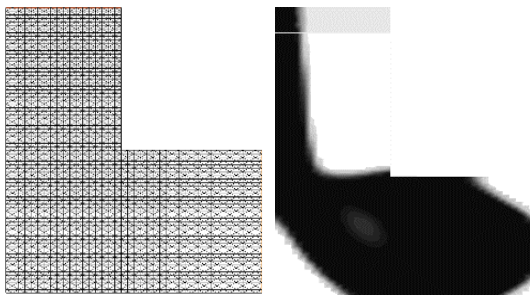
- (1) Lee, J. W. and Kim, Y. Y., 2007, Muffler Design using a Topology Optimization Method, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 1055~1059.
- (2) Ma, Z. D., Kikuchi, N. and Hagiwara, I., 1993, Structural Topology and Shape Optimization for a Frequency Response Problem, Computational Mechanics, Vol. 13, pp. 157~174.
- (3) Olhoff, N. and Du, J., 2016, Generalized Incremental Frequency Method for Topological Design of Continuum Structures for Minimum Dynamic Compliance Subject to Forced Vibration at a Prescribed Low or High Value of the Excitation Frequency, Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 54, pp. 1113~1141.
- (4) Yamada, T., Izui, K., Nishiwaki, S. and



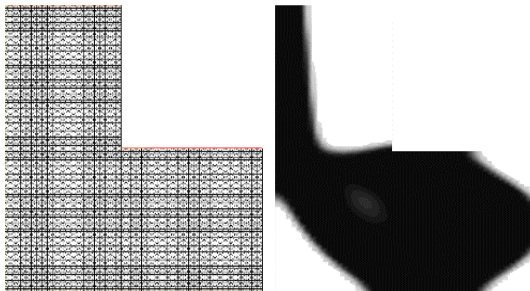
(a) 1740 element model and optimization result without body fitted mesh



(b) 3808 element model and optimization result with body fitted mesh application



(c) 4640 element model and optimization result without body fitted mesh



(d) 7100 element model and optimization result without body fitted mesh

Fig. 11 Result shapes with L-shaped model

Takezawa, A., 2010, A Topology Optimization Method Based on the Level Set Method Incorporating a Fictitious Interface Energy, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 199, No. 45~48, pp. 2876~2891.

(5) Kim, C., Jung, M., Yamada, T., Nishiwaki, S. and Yoo, J., 2020, FreeFEM++ Code for Reaction-diffusion Equation-based Topology Optimization: For High-Resolution Boundary Representation using Adaptive Mesh Refinement, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 62, pp. 439~455.

(6) Choi, Y., Lee, J., Jeong, W. and Kim, I., 2010, Dynamic Behavior of Valve System in Linear Compressor Based on Fluid-structure Interaction, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, pp. 1371~1377.

(7) Li, H., Kondoh, T., Jolivet, P., Furuta, K., Yamada, T. et al., 2022, Optimum Design and Thermal Modeling for 2D and 3D Natural Convection Problems

Incorporating Level Set-based Topology Optimization with Body-fitted Mesh, *Numerical Method in Engineering*, Vol. 123, No. 9, pp. 1954~1990.

(8) Dapogny, C., Dobrzynski, C. and Frey, P., 2014, Three-dimensional Adaptive Domain Remeshing, Implicit Domain Meshing, and Applications to Free and Moving Boundary Problems, *Journal of Computational Physics*, Vol. 262, pp. 358~378.

(9) Silva, O. M., Neves, M. M. and Lenzi, A., 2019, A Critical Analysis of using the Dynamic Compliance as Objective Function in Topology Optimization of One-material Structures Considering Steady-state Forced Vibration Problems, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 444, pp.1~20.

(10) Bae, S., Lim, S., Furuta, K., Izui, K. and Nishiwaki, S., 2026, Topology Optimization of Compressor Mounts for Minimizing Dynamic Compliance in a Wide Frequency Range, *Mechanical Engineering Journal*, Vol. 13, No. 2, 2500313.