

설계자를 위한 해석입문

제5회: 열과 구조의 연성해석

발행인 _ 민승재 _ 한양대학교 기계공학부/자동차공학과 _ seungjae@hanyang.ac.kr

일반적으로 구조물은 주변의 온도나 발열, 냉각 등에 의한 열부하를 받게 되면 팽창하거나 수축하게 된다. 구조물이 주위의 다른 구조물에 구속되어 있거나 열팽창계수가 다른 부재들이 결합된 경우 그 팽창 혹은 수축이 제한되어 스트레인이 발생한다. 특히 현저한 온도변화를 동반하는 구조물의 경우 열이 강도에

미치는 영향을 무시할 수 없다. 예를 들면 열부하에 의한 금속피로가 원인이 되어 원자력발전소의 부품에 균열이 발생하여 중대한 사고를 일으킨다. 이러한 열부하가 작용하는 구조물에서는 열응력이 설계에 미치는 영향을 항상 파악해야 한다.

우선 온도변화가 구조에 미치는 영향을 이해하기 위

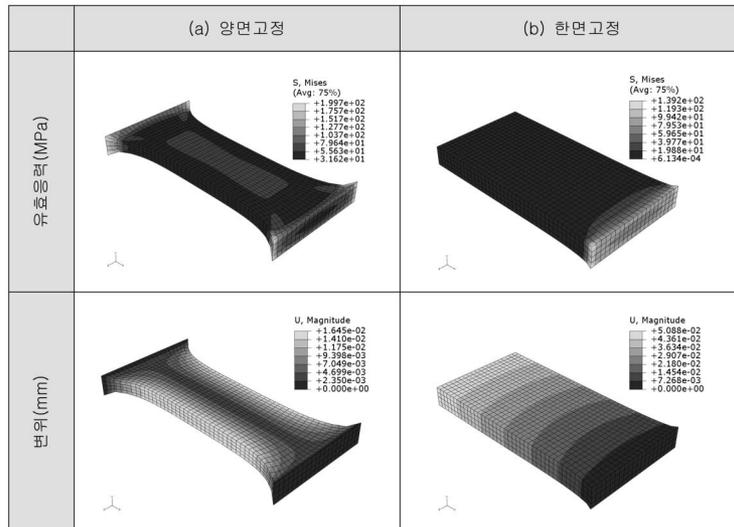


그림 1. 평판 온도를 강하시킨 열응력해석 (40°C → 20°C)

하여 평판모델(탄성계수: 210 GPa, 포아송비: 0.3, 열 팽창계수: 12E-06을 예로 열응력해석 결과를 살펴보자. 평판의 길이방향 측면 모두를 완전고정한 경우와 한쪽 면만을 완전고정한 경우를 설정하여 구속조건의 영향을 비교한다. 또한 온도조건으로는 초기온도 20°C에서 40°C까지 상승시킨 경우와 온도분포를 초기온도 40°C에서 20°C까지 강하시킨 경우 두가지를 고려한다. 그림 1(a)는 양쪽을, (b)는 한쪽만을 고정된 평판에서 온도를 40°C에서 20°C로 내린 경우의 유효응력¹과 변위를 나타내고 있다. 계산결과를 비교해 보면 (a)의 경우가 (b)보다 큰 인장응력이 발생하는 영역이 많은 것을 알 수 있다. 즉 동일한 온도 강하가 작용해도 그림 1(a)는 변형을 구속조건으로 억제하고 있으므로 큰 응력이 발생하게 된다. 그림 2는 반대로 평판의 온도를 20°C에서 40°C로 상승시킨 경우로 팽창해야 할 평판을 크기가 변하지 않도록 압축하게 된다. 그림 2에서도 (a)의 경우가 (b)보다도 구속하는 면적이 넓기 때문에 평판전체에 보다 큰 압축응력이 발생하는

것을 알 수 있다.

열응력해석이라고 어렵게 생각할 필요는 없다. 일반적으로 구조해석을 수행하기 전에 해석대상물체의 온도분포를 계산하는 과정을 추가하면 된다. 우선 대상 설계구조물의 온도분포를 계산하고 그 온도분포의 변화로부터 각 부분의 압축 또는 수축량을 계산하여 열응력을 구한다. 초기의 온도분포와 변화 후의 온도분포를 부여하면 열 출입에 따른 변형률을 알 수 있다. 이것이 ‘약연성’이라고 하는 해석과정으로 온도변화에 따른 구조물의 변형이 온도분포에 큰 영향을 미치지 않는 경우에 적용할 수 있다.² 유체계산 등을 수반하

¹ Von Mises 응력. 3가지 주응력 성분으로부터 계산되는 값. 구조물의 항복여부를 판정하는데 사용한다.

² 예를 들면 복잡한 형상의 구조물 주위를 열유체가 흐르는 경우, 열변형에 의해 열 흐름이 변하고 그로 인해 구조물에 작용하는 열의 영향이 변화할 수 있다. 이런 경우에는 약연성을 적용할 수 없다.

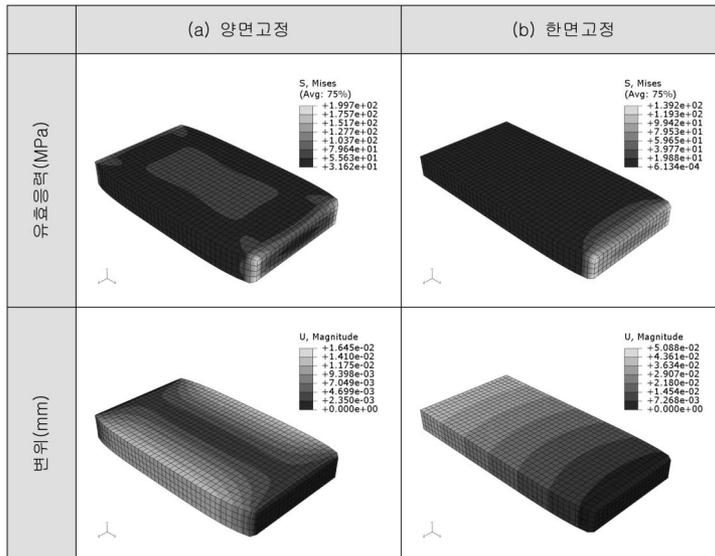


그림 2. 평판 온도를 상승시킨 열응력해석 (20°C → 40°C)

표 1. 대표적인 열경계조건

열유속	조건을 설정한 표면에서 일정한 열유속이 유입되거나 유출된다.
열전달율	조건을 설정한 표면의 온도와 외부온도 차에 의해 유입 혹은 유출되는 열유속이 결정된다.
일정온도	조건을 설정한 표면의 온도를 지정한다. 지정한 온도가 되도록 유입 혹은 유출되는 열유속이 결정된다.
단 열	외부와 열의 교환이 일체 없는 상태

지 않는 경우에는 이 방법으로 문제없이 해석할 수 있고 비교적 설정이 용이하므로 많은 소프트웨어에서 채택하고 있다. 열변형에 의해 열의 흐름이 크게 변하는 경우에는 ‘강연성’이라고 하는 방법을 사용하는 것이 바람직하지만 여기서는 광범위하게 사용되는 약연성에 의한 방법으로 설명하고자 한다.³ 열해석과 구조해석을 약연성시키는 경우의 해석과정은 구조해석만 수행하는 경우와 비교하여 그림 3과 같다. ①, ②, ⑤, ⑦,

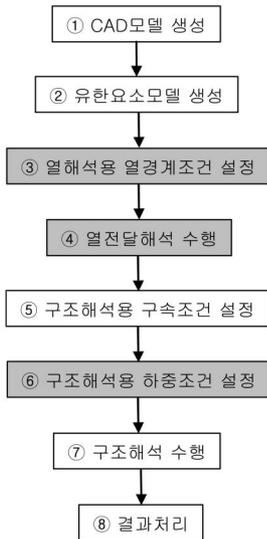


그림 3. 약연성에 의한 열응력해석 순서

⑧은 지금까지 설명한 구조해석 과정과 동일하고 추가된 부분은 ③과 ④이며, 다른 것은 온도분포의 계산 결과를 읽어 들이는 과정이 포함된 ⑥이다. 그 중에서 계산결과를 크게 좌우하는 것이 ③열경계조건 설정이다.

열경계조건이란 해석대상물체의 표면과 외부와의 열교환조건으로 표 1과 같이 열유속, 열전달율, 일정온도, 단열 중 하나로 설정한다.⁴ ‘열유속’은 단위면적당 이동하는 열량의 크기를 지정하는 것으로 해석대상물체의 온도와 상관없이 항상 일정한 열유속이 표면과 외부로 출입한다. 단위시간당 발생열량을 알고 있는 발열체 등에 접한 상태를 생각하면 이해하기 쉽다. ‘열전달율’은 해석대상물체의 표면온도와 외부온도 차에 의해 출입하는 열유속이 변하는 경우에 적용한다. 이때 열유속 q 는 $q = \alpha A(T - T_{\infty})$ 로 정의된다. T 는 평판의 표면온도, T_{∞} 는 평판의 외부온도, A 는 면적, α 는 열전달율이다. 예를 들어 표면의 초기온도보다 외부온도가 낮은 경우 q 는 열부하가 되어 외부로 열이 유출되는 것을 의미한다. α 값을 적절히 설정함으로써 여러가지 외부상태에 놓인 해석대상물체의 온도분포를 계산할 수 있다.⁵ ‘일정온도’는 표면을 임의온도로 고정하는 조건으로 표면이 항상 일정온도가 되도록 열

³ 강연성인 경우 온도분포의 변화와 열변형을 동시에 계산하므로 계산시간이 오래 걸린다.

⁴ 열전달율은 어떤 면에 있어서 단위면적당 열의 전달도를 나타내는 것으로 표면의 거칠기나 접촉하는 고체/유체의 상태에 따라 변화한다. 한편 열전도율은 고체에서 열의 전달도를 나타내는 재료물성.

⁵ 주변이 유체인 경우, α 는 유체의 물성이나 흐름의 상황(층류/난류)에 따라 변한다. α 의 계산방법에 있어서는 유체역학이나 열전달 등의 전공서적을 참고. 또한 해석대상물체의 주위에 다른 구조물이 존재하면 엄밀히 말해서 물체간의 열복사도 고려해야 한다. 그러나 주위 구조물도 동일한 온도라면 복사열은 거의 무시할 수 있다. 열전달율을 설정하는 경우에도 대류조건만 고려해도 문제는 없다.

유속이 출입하는 것을 의미한다. 마지막으로 ‘단열’은 외부와 열의 출입이 없는 상태로 일반적으로 유한요소법에 의한 열전도계산에 있어서 열경계조건을 특별히 지정하지 않으면 자동적으로 단열조건이 설정되는 경우가 많다. 따라서 의도하여 단열조건을 설정한 면이외는 해당 조건에 대한 설정을 잊지 않도록 주의할 필요가 있다.⁶

열전도계산의 경우 해석대상물체의 표면에는 반드시 위에 언급한 4가지 열경계조건 중에서 어느 것을 설정한다. 이때 주의할 점은 해석계 전체의 열 평형이다. 정상상태에서는 입열 또는 발열하는 면이나 영역이 있으면 반드시 그와 동일한 열이 유출되는 면이나 영역이 있으므로 해석대상물에 유입되는 총열량과 유출되는 총열량은 같게 된다. 예를 들면 그림 4(a)와 같은 열경계조건을 살펴보자. 윗면에 2.0 kW/m^2 의 열유속이 유입되고 아래면과 측면 한쪽면으로 1.0 kW/m^2 의 열유속이 유출되고 다른 측면은 단열조건이므로 열의 출입이 없다. 이 경우 윗면으로부터 유입되는 열량(열유속과 단면의 곱)이 측면 및 아래면으로부터 유출되는 총열량보다 많다. 따라서 평판의 온도는 계속 상승하여 정상상태에 도달하지 못하고 계산이 수렴하지 못하게 된다. 또한 그림 4(b)의 경우 초기온도가 주위 온도와 동일하게 설정되었으므로 온도분포를 계산하는 의미가 없다.⁷ 이러한 오류를 없애기 위하여 초기의 온도조건과 열경계조건을 설정할 때 어떤 면으로부터 열이 들어오고 어느 면으로 열이 나가는 지 정상상태의 온도분포는 어떻게 될지를 예상해 보자. 그

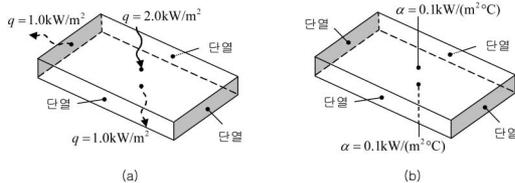


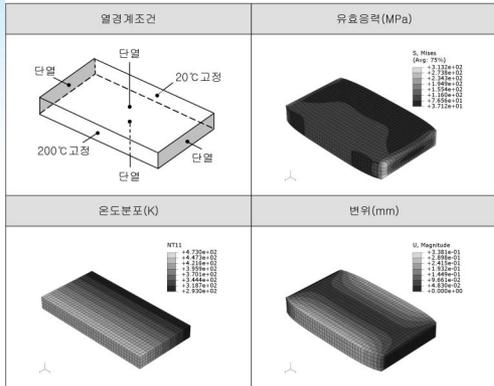
그림 4. 문제가 있는 경계조건의 설정 예

렇게 하면 그림 4(a)와 같은 오류에는 빠지지 않는다. 또한 일정온도 조건도 사용에 주의가 필요한데 외부의 조건과 무관하게 열유속이 조정되는 그다지 현실적이지 않은 상태이기 때문이다. 정상적인 온도분포를 파악하는 경우나 표면온도가 명확한 경우 등을 제외하면 사용하지 않는 편이 무난하다.⁸ 그림 1, 2와 동일한 형상의 평판모델로 4가지 열경계조건 중 2가지 또는 3가지 조건을 사용하여 해석한 그림 5의 해석결과를 살펴보자. 모든 경우 구조해석의 구속조건은 길이 방향의 양단면을 완전고정하고 초기온도는 20°C 로 하였다. 그림 5(a)는 길이방향과 평행한 두 측면을 200°C 와 20°C 로 고정하고 다른 면은 모두 단열면으로 설정하였다. 이 경우 평판의 폭방향(윗면과 아랫면의 단변방향)으로 동일한 온도구배가 발생한다. 변위량을 살펴보면 200°C 로 설정한 면 근방이 크게 팽창하고 응력은 고정면의 네 귀퉁이에 집중된 것을 알 수 있다. 그림 5(b), (c)는 구속한 한쪽면을 40°C 로 고정하고 윗면과 아래면에 열유속 또는 열전달율을 설정하고 다른 면은 모두 단열로 설정하였다. (b)는 강제적으로 윗면과 아래면으로부터 열을 유출하게 되어 길이방향으로 온도구배가 발생한다. (c)는 윗면과 아래면에 열전달율을 지정했지만 온도고정면이 주위 온도보다 높기 때문에 열이 길이방향으로 전달되고 윗면과 아래

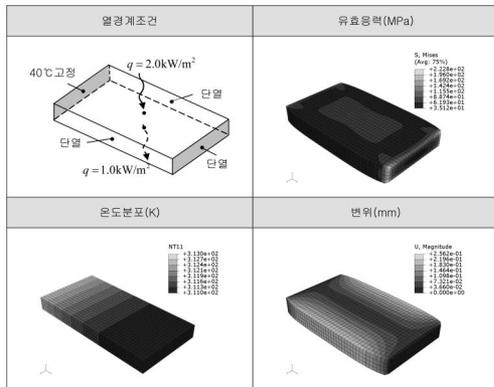
⁶ ‘단열’을 제외하면 각각 시간적으로 일정한 정상조건과 시간적으로 그 양이 변화하는 비정상조건이 있으나 여기서는 간소화를 위해 정상조건에서의 해석을 중심으로 설명한다.

⁷ 단, 비정상조건에서 시간경과를 추가하여 온도가 상승 또는 하강하는 것을 파악하고자 한다면 충분히 의미가 있는 해석일 수 있다.

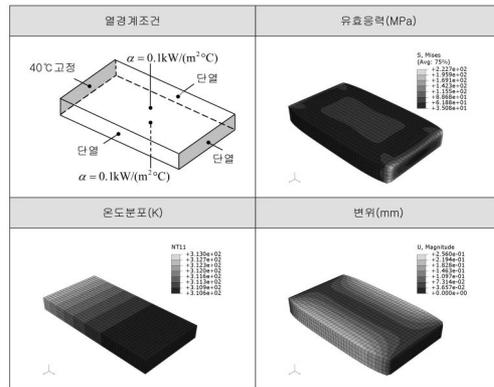
⁸ 예를 들면 주기적으로 열부하를 받게 되는 구조물에 있어서 어느 시점의 온도분포를 정상상태로 가정하여 구한다고 하자. 특히 열전달율이 작고 또한 열유동 변화주기가 짧은 경우 현실 구조물에서는 표면온도의 적은 상승이 열유속의 큰 변화를 가져와 결국 설정했던 온도에 도달하지 못하는 경우가 있다. 이러한 경우에도 일정온도 조건은 바람직하지 않다.



(a)



(b)



(c)

그림 5. 다양한 열경계조건을 설정하여 계산한 예

면으로부터 열이 방출된다. 따라서 (b)와 (c)에서 설정한 경계조건은 서로 다르지만 열이동의 정성적 경향은 비슷하므로 온도분포나 변위량, 열응력 등도 거의 동일하다. 또한 온도분포의 결과로부터 알 수 있듯이 단열면 근처에는 단열면과 직교하는 방향으로 온도구배가 발생하기 어렵다는 사실도 기억해 두는게 바람직하다.⁹ 열경계조건으로부터 온도분포를 예측할 때 도움이 된다.



본 기사는 한양대학교 기계공학부/자동차공학과 민승재 편집위원이 NIKKEI MONOZUKURI 2006년 5월호 연재기사에서 발췌하였으며, 출판사인 Nikkei Business Publications, Inc.의 연락처는 다음과 같다.

Fax: 81-3-5210-8122

URL: <http://techon.nikkeibp.co.jp/Monozukuri>

⁹ 특히 이 모델은 마주보고 있는 양면이 단열면이므로 길이방향으로만 온도구배가 발생한다.