

## 설계자를 위한 해석입문 - 제3회: 용도에 맞는 경계조건을 정하자

발행인 \_ 민승재 \_ 한양대학교 기계공학과 \_ seungjae@hanyang.ac.kr

일반적으로 설계자가 많이 수행하는 해석으로는 강도강성해석, 열해석, 고유값해석 등이 있다. 경계조건은 각각 설정에 따라서 관점이 다를 수 있으나 여기서는 설계자에게 가장 익숙하다고 생각되는 강도강성 해석을 예로 해석대상물에 설정한 경계조건이 해석결과인 응답에 미치는 영향에 대하여 살펴본다. 우선 여기서 경계조건은 무엇인가 생각해 보자. 경계조건을 설정하는 것은 단순히 말해서 해석하고자 하는 설계대상물이 어떠한 환경에 놓여 있는가를 판단하여 그 경우 작용해야 하는 외부적 요인을 정의하는 일이다. 예를 들어 구조물을 볼트로 체결할 것 인지 용접으로 고정할 것인지 아니면 끼워 넣음으로 지지할 것인지, 또한 어디에 어떤 힘을 작용시킬 것 인지 잡아 당길 것인지 밀어 넣을 건지 하는 상태를 정의하는 것이다. 해석대상물의 형상이나 물성은 동일하더라도 이러한 외부 상태가 다름에 따라서 해석대상물에 작용하는 실제 강도나 강성은 크게 달라진다.

일반적으로 구조해석의 경계조건에는 어느 곳에 얼마만큼의 힘을 부여하는가를 정의하는 “하중조건”과 설계대상물을 어떻게 지지하는가를 정의하는 “구속조건”이 있다. 하중조건은 실정된 하중부하의 크기 및 방향, 하중이 작용하는 위치를 입력하면 되므로 초보

자라도 비교적 이해하기 쉬운 반면, 구속조건 설정은 고민이 필요한 경우가 많다. 그렇다면 구속조건에는 어떤 종류가 있는지 알아보자. 현실적 상황과 대비하여 생각해 보면 대표적인 것으로 ①볼트고정 ②용접 ③리벳접합 ④접착 ⑤접촉 등이 있다. CAE S/W 사용에 익숙한 설계자라면 앞서 언급한 지지방법의 경우 어떠한 구속조건을 설정하면 좋을지 어렵지 않게 생각할 수 있으나 손쉽게 설정하면 생각하지 못한 함정에 빠질 지도 모른다. 구속조건 결정방법에 따라

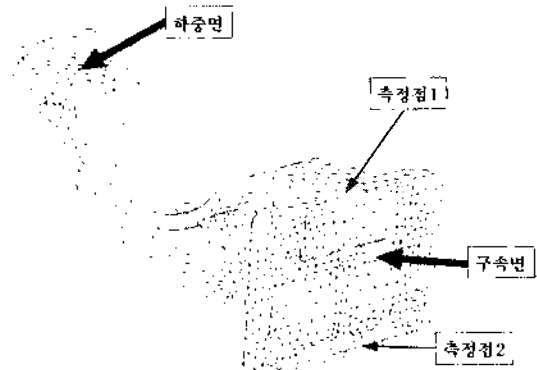


그림 1. 조인트 구조물 해석모델의 구속조건: 우측 평면을 고정하고 좌단 위에서 아래 방향으로 하중을 작용시켰다.

서 해석결과와 정확도가 좌우된다고 해도 과언이 아닙니다. 여기서는 제 2회의 매쉬생성에도 등장했던 후크 모양의 조인트 구조물의 해석모델을 사용하여 설명한다. 보통 이 조인트 구조물은 벽에 볼트로 고정하여 후크 윗면에 하중을 작용하여 이용한다. 해석모델에는 그림 1과 같이 볼트용 구멍이 이미 존재하고 이 상태를 경계조건으로 설정하고자 한다. 우선 고려할 사항은 조인트 구조물을 고정하는 벽면의 강성이다. 설계 대상물에만 신경쓰다보니 간과하는 경향이 있지만, 실제는 여기에도 경계조건을 설정하는 것 이상으로 중요한 포인트가 숨어 있다. 벽면의 강성에 따라서 조인트 구조물에 발생하는 응력이 완전히 달라지기 때문이다. 설계대상물의 강도, 강성을 정확히 해석하고자 한다면 상대측의 강성도 정확히 인식한 후에 해석해야 한다. 예를 들어 해석하기 이전에 벽이 부드러운 경우와 강체인 경우의 극단적인 예를 생각해 보자. 쉽게 상상할 수 있는 것은 벽이 부드러운 경우에는 조인트 구조물에 작용하는 하중에 따라서 구조물과 벽의 강성평형으로부터 변형의 부담이 벽이나 조인트 구조물 어느쪽으로 편중된다는 사실이다. 이에 반해 강체인 경우에는 조인트 구조물만이 부하를 받아 지탱하는 경향이 나타난다.

그러면 구체적으로 경계조건을 설정하여 해석한 결과를 기반으로 그 영향을 살펴보자. 여기서는 단순화를 위해 벽은 강체라고 가정하고 2가지의 구속조건을 설정한다. 조인트 구조물의 구속면 전체를 고정한 경우(전체고정모델)와 볼트강성을 무한대로 생각하고 볼트구멍 주위만을 고정한 경우(볼트모델)이다. 실제로는 조인트 구조물을 볼트로 벽에 고정하는 것이지만, 볼트의 체결 토오크가 충분하다고 생각할 수 있는 경우 해석을 간단히 마치고 위하여 구속면을 전체적으로 고정하는 방법을 자주 사용한다. 이것이 전체고정 모델로 이 방법은 볼트에 충분한 강도가 있다고 판단 되면 적용할 수 있는 경우가 많다. 여러가지 구속조건에 관하여 철과 알루미늄과 같이 강성이 다른 2종류

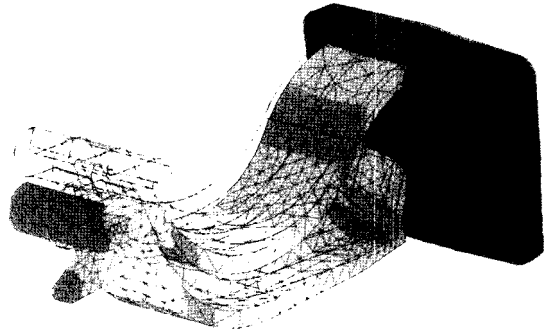


그림 2. 조인트 구조물의 해석결과 예

의 조인트 구조물을 대상으로 총 4가지 경우의 결과를 비교한다. 그림 2는 해석결과와 대표적 예이다. 여기서는 우선 볼트모델의 해석결과에 있어서 “측정점1에 벽 바깥쪽으로 발생하는 조인트 구조물의 간격”, “측정점2에 벽 안쪽으로 발생하는 조인트 구조물의 간격”에 주목해 보자. 철모델과 알루미늄모델 모두 하중 조건(변하중)은 동일한 값이나 그림3과 같이 강성이 작은 알루미늄은 철에 비해 큰 간격이 발생하였다. 경향은 동일하지만 대상물의 강성에 따라서 변형 정도는 크게 차이를 알 수 있다. 원래 벽면이 강체라면 측정점2의 변위는 0이 되어야 하지만 계산상 약간 벽 안쪽으로 변위가 발생한다. 이것은 구속면을 부분적으로 고정했기 때문이며 계산상으로는 벽이 존재하지 않는 것에 의해 발생한다. 따라서 그 경향은 해석대상물의 강성이 작을수록 현저하게 나타난다.

반대로 전면고정모델의 경우, 구속면은 완전히 움직이지 않으므로 계산상으로 측정점1, 2에는 벽 바깥쪽이나 안쪽으로 어떠한 간격도 발생하지 않는다. 그러나 실제로 고정된 상태를 상상하면 알 수 있듯이 본래는 구속점에 벽 바깥쪽으로 간격이 발생하기 마련이다. 즉, 볼트모델과 전체고정모델 어느쪽도 완전히 정확한 결과를 얻을 수는 없다. 따라서 보다 엄밀한 해를 구하려면 벽에 눌러 들어가는 영역에 대해서는 들어가지 않은 것과 같은 경계조건을 설정하고 벽과



그 사이에 간격이 발생 가능한 영역에는 상황에 적합한 조건을 설정하는 것이 바람직하다. 그렇다면 설계자가 사용하는 범위에서 전체고정모델 또는 볼트모델의 어느 조건으로 설정하는 것이 타당한 것인가. 어느 쪽을 선택할 것인지는 볼트의 개수, 실제 벽의 강성 등을 고려해야 하지만, 예를 들어 벽과 볼트의 강성이 크고 체결 토오크가 충분한 경우는 전면고정모델로 가정해도 문제는 없다. 한편 볼트의 개수가 적은 경우는 볼트모델로 가정하는 편이 좋다. 그러나 여기서 훨씬 중요한 것은 몇 가지 경계조건을 설정하여 계산함으로써 어느 정도 결과의 경향을 예상하여 실제 계산결과가 설정한 경계조건과 부합되는지 여부를 확인하는 것이다. 무턱대고 계산하는 것이 아니라 어느 정도 계산결과를 예상하여 경계조건을 설정해야 한다. 이러한 훈련을 하지 않으면 CAE를 설계에 도입했을 때 필요한 해석기술을 만족할 만큼 습득할 수 없다. 그때에는 CAE보다 오히려 설계지식이나 경험이 요구된다.

이번에는 벽면의 강성이 상당히 낮은 상태를 생각해 보자. 이 경우 하중을 작용하면 벽과 조인트 구조물이 동시에 변형하는 것을 가정한다. 다만 이때 벽면의 변형을 계산해야 하므로 벽면을 해석대상으로 모

델링한 후에 여러 개의 부품을 조합해서 해석하는 “조립해석”이 필요하다. 해석의 난이도로는 다소 높은 수준이지만, 현재 많은 CAE S/W에서 조립해석도 쉽게 수행할 수 있다. 벽면의 강성이 낮으면 낮을수록 조인트 구조물의 변형이 적은 것은 당연하다. 이것을 정확히 계산하는 것은 조립에 대한 접촉조건 설정에 주의가 필요하므로 전문가의 의견을 들어 해석을 진행하는 것이 현명하다. 다만 벽의 강성이 낮으므로 벽과의 관계만으로 언급하면 벽에 전면고정하는 경우나 볼트구멍 주변만 고정하는 경우나 결과에는 큰 차이가 없다. 이상 조인트 구조물을 예제로 볼트에 의한 고정을 고려한 경우의 구속조건에 관하여 기술하였다. 그러면 볼트집합 이외의 용접, 리벳트, 점착, 끼워 넣기 등의 설정은 어떻게 하면 좋은 것인가. 결론부터 말하자면 용접이나 점착은 전면고정으로 설정해도 좋다. 다만 용접의 경우는 전면고정의 조건으로 계산하고 후 처리에서 반력이 용접강도를 초과하는지 여부를 확인해야 한다. 어느 CAE S/W나 해석결과의 처리부분에 반력 표시가 있으므로 반드시 확인해 봐야 한다. 리벳트는 볼트모델의 조건으로 계산한 후, 역시 반력이 리벳트의 강도를 초과하지 않는 것을 확인해야 한다. 끼워 넣기의 경우는 복잡한 경우가 많으므로 CAE전문가에 의뢰하거나 전문가와 상담하면서 해석을 진행하는 편이 좋다. 앞서 언급한 반력 상태를 이해함으로써 설계시 설정한 부품의 하중부담의 비율 등도 간단히 출력할 수 있고 이러한 정보는 조립체를 설계하는데 중요하다. 부품을 설계할 때 설계자는 주목하고 있는 부분에 어느 정도의 하중이 작용하는가를 가정하거나 계산하여 설계하기 마련이다. 이 가정이 틀리면 그 부품을 포함한 제품이나 유닛에 작용하는 하중의 균형도 달라지게 된다. 반력의 상태를 볼 수 있다면 부품에 어느 정도의 하중이 작용하는지 알 수 있으므로 반드시 알아두는 것이 좋다.

다음으로 구속조건이 응력값에 미치는 영향에 대하여 설명한다. 해석결과로부터 최대응력값을 구해본 경

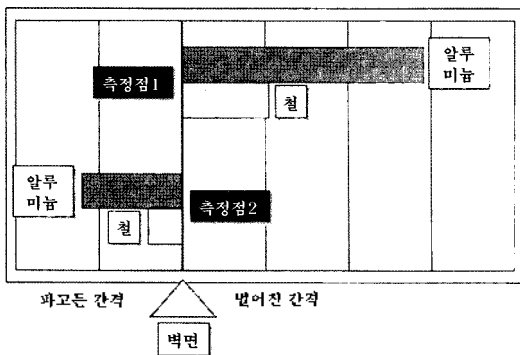


그림 3. 벽면과의 변위 차이: 조인트 구조물의 강성에 따라서 변형량의 차이가 발생한다. 벽을 강체로 가정했으므로 강성이 낮은 알루미늄의 변형량이 크다.

힘이 있는 설계자는 많을 것이다. 그렇다면 최대응력 값은 경계조건을 설정한 부분에 발생하기 쉬운 사실을 알고 있을 것이다. 기본적인 지식으로 응력은 강성이 급격하게 변하는 부분에 발생하기 쉽다는 사실은 잘 알고 있을 것이다. 여기서 벽을 강체로 가정한 볼트모델의 경우 볼트구멍 주위를 완전 고정으로 구속하였다. 이러한 완전 고정은 해석대상물을 무한대의 강성으로 고정한 것과 같은 의미이다. 따라서 완전 고정의 경우는 경계조건을 설정한 영역 근처에 상당히 큰 응력이 발생하게 된다. 그러나 CAD 데이터를 CAE S/W로 읽어 들여서 해석모델을 작성한 경우는 이 문제를 피할 수 있는 경우가 많다. CAD 모델의 면이나 모서리에 설정한 구속조건은 자동적으로 그 면이나 모서리에 포함되는 다수의 절점으로 분산되어 부가되므로 강성의 국소집중현상이 발생하기 어렵다. 그러나 일부 CAE S/W나 해석모델은 사용자가 절점에 조건을 직접 부여해야 하는 경우도 있다. 특히 주의가 필

요한 것은 구속조건을 설정하는 절점이 1개이거나 몇 개로 적은 경우로 상상의 국소응력이 발생하여 최대응력이 구속조건부분에 발생하게 된다. 이러한 경우 해석결과로부터 단순히 최대응력값을 찾는 것은 부적절한 구속조건에 의하여 응력을 평가하게 되므로 전체의 변형량이나 응력분포와 일치하는지 주의깊게 살펴볼 필요가 있다. 또한 면전체를 완전 고정한 경우 구속한 면의 근처는 강성이 상당히 크게 되므로 변형하기 어렵게 되고 이로 인하여 실제보다 큰 응력이 발생하거나 전체 변형이 적게 되므로 이 점도 주의할 필요가 있다. 현실적이지는 않지만 설명을 간단히 하기 위하여 단면형상이 U자형인 파이프에 윗면으로부터 하중을 가하여 그 변형을 계산하는 예를 살펴보자. 그림 4(a)는 우측 끝면을 완전 고정한 모델의 결과로 우측 끝면 주위의 강성이 보기보다 크게 되어 전체의 변형에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 원래는 그림 4(b)와 같이 우측 끝면을 전면고정하지 않고 상하 방향으로 자유롭게 변형하도록 해주어야 한다. 이렇게 구속조건 설정 한가지로 해석결과가 크게 변할 수 있다.

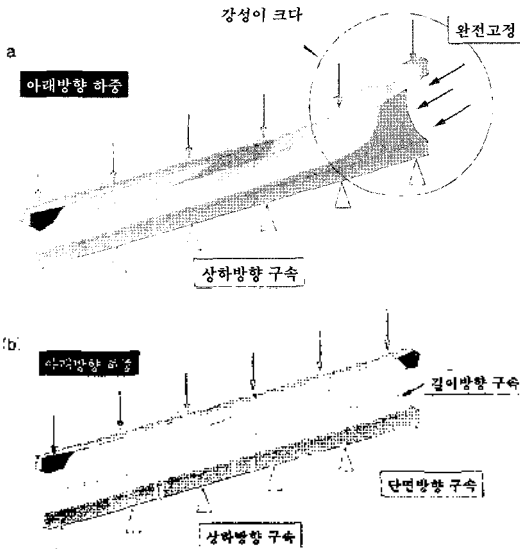


그림 4. 파이프의 해석 예: (a) 우측 끝면을 완전고정하면 강성이 크게 되어 큰 응력이 발생한다. (b) 끝면의 상하방향을 자유롭게 하지 않으면 정확한 결과를 얻을 수 없다.

이상 구속조건에 관해서 기술했는데 마지막으로 하중조건 주의점을 살펴보자. 대표적인 하중조건으로 ①한점에 집중하중이 작용하는 경우 ②끝면에 면하중이 작용하는 경우 ③끝모서리에 모서리하중이 작용하는 경우 ④한점에 일정 변위가 작용하는 경우 ⑤끝면에 일정 변위가 작용하는 경우 ⑥끝점에 모멘트가 발생하는 경우 등을 생각할 수 있다. 여기서 특히 주의가 필요한 것은 한점에 어떤 하중을 작용하는 경우로 한점에 강제적인 하중이 가해지면 그 부분에 실제와는 다른 국소응력이 발생하게 된다. 그 값을 최대응력값으로 평가하면 실제 최대응력이 발생하는 부분을 잘못 판단하게 된다. 따라서 구속조건 및 하중조건을 부여한 부근에 발생하는 응력은 우선 경계조건을 설정했기 때문에 수학적으로 발생한 응력이 아닌지 의심해 볼 필



요가 있다. 최대응력값의 발생장소가 경계조건을 설정한 부분 근처는 아닌지 경계조건에 대하여 가정한 것과 같은 변형이 발생했는지 등 계산된 응력값을 충분히 음미할 필요가 있다.



본 기사는 한양대학교 기계공학부 민승재 편집위원이 NIKKEI MONOZUKURI 2006년 3월호 인제기사에서 발췌하였으며, 출판사인 Nikkei Business Publications, Inc.의 연락처는 다음과 같다.

Fax : 81-3-5210-8122

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