

midas NFX를 활용한

실무 유한요소해석의 이해와 활용

선형정적해석

(주)마이다스아이티

선형정적해석

1. 선형정적해석 (Linear Static Analysis)

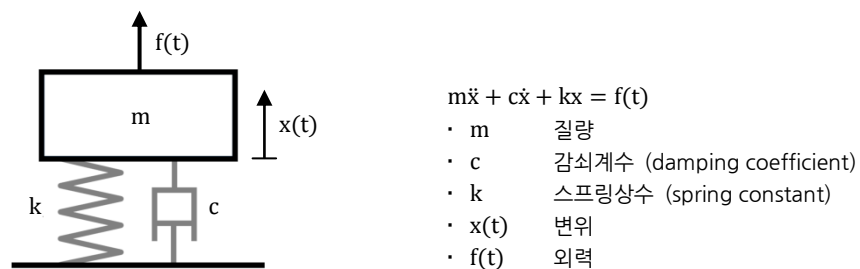
선형정적해석은 모든 해석의 기본, 출발이 되는 해석으로 외부하중의 작용에 대해 구조물의 변형과 강도적 안정성을 검토하는 해석입니다.

올바른 선형정적해석을 수행하기 위해서는 다음의 두 가지 사항이 요구됩니다.

- ✓ 고체역학의 기본개념과 이론에 대한 이해
- ✓ 프로그램에서의 관련 기능과 사용법의 이해

선형정적해석에서 요구되는 고체역학의 관련 사항들은 <고체역학의 기본개념> 장에 정리되어 있으며, 본 장에서는 선형정적해석을 수행하기 위한 프로그램의 관련 기능, 사용법과 결과분석 방법 등에 대해 살펴봅니다.

일반적으로 구조해석에서 사용하는 지배방정식은 다음과 같이 정의됩니다. (단자유도계 기준)



<그림 1> 단자유도계(single DOF system)의 운동방정식

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t)$$

이 식에서 $m\ddot{x}$ 는 관성력(inertial force), $c\dot{x}$ 는 감쇠력(damping force), kx 는 복원력(elastic force)입니다.¹

이 가장 일반적인 운동방정식에서 각 항의 사용여부와 방법에 따라 다음과 같이 동해석, 정적해석, 준정적해석으로 구분할 수 있습니다.

- ✓ 동해석 (dynamic analysis)
이 운동방정식을 그대로 풀이하는 것으로 관성력과 감쇠력, 그리고 시간에 따라 변하는 하중조건을 모두 사용합니다.
- ✓ 정적해석 (static analysis)
관성력과 감쇠력을 무시하고, 시간에 대해 변하지 않는 일정한 하중조건을 사용합니다.

$$kx = f$$

¹ 관성은 변화에 대한 저항, 감쇠는 운동에너지의 손실을 의미합니다.

✓ **준정적해석 (quasi-static analysis)**

관성력과 감쇠력을 무시하지만, 시간에 따라 변하는 하중조건은 그대로 사용하는 약식 동해석 방법입니다. 시간에 대한 변화를 해석하는 동해석에서 정적해석의 조건에다 단지 각 계산시간의 하중조건만 사용하여 구조물의 동적거동을 해석하는 방법입니다.¹ 두 가지 중요한 동적효과인 관성력과 감쇠력을 고려하지 않으므로 진정한 동해석이라고 할 수는 없습니다.

$$kx = f(t)$$

즉, 정적해석(static analysis)은 동적거동을 표현하는 특성인 관성력과 감쇠력을 무시하고, 작용하중이 시간에 따라 변하지 않는 근사조건의 해석입니다. 정적해석에서는 구조물이 정적인 평형상태를 유지하여야 하므로, 하중이 동적인 효과를 유발하지 않도록 아주 천천히 가해지는 것으로 가정합니다.² 실무적으로는 작용하중(실제로는 반복하중, cyclic load)의 진동수가 구조물의 가장 낮은 고유진동수의 1/4이하이면 정적하중으로 취급할 수 있습니다.

그리고, 선형(linear)은 물체에 작용하는 하중과 물체의 응답(변위, 응력 등)의 관계가 선형임을 의미하며, 일반적으로 다음의 조건을 만족하여야 합니다.

✓ **재료가 탄성영역 내에서 후크의 법칙(Hooke's Law)을 따라 거동합니다. (↔ 재료비선형)**

하중과 변위, 응력과 변형률은 선형의 관계를 가져야 하며, 결과적으로 하중-변위-변형률-응력이 모두 선형비례 관계이어야 합니다. 이를 위해 재료는 선형탄성(linear elastic)이어야 하고, 하중은 재료의 항복을 발생시키지 않는 범위 내에서 작용하여야 합니다.

✓ **발생변형에 의한 구조물의 강성변화를 무시할 수 있을 만큼 변형이 작아야 합니다.**

(↔ 기하비선형)

변위와 변형률의 관계가 선형이어야 하며, 일반적으로 변형률이 0.2%보다 작은 것으로 가정합니다. 변형이 미소한 것으로 가정하기 때문에 판 두께의 20% 이내, 요소의 작은 변 길이의 약 2% 이내의 미소 변위가 일어나는 경우에 선형해석을 적용하는 것이 적절합니다.

✓ **하중이 작용하고, 이로 인한 구조물의 변형이 발생하는 동안 경계조건이 변하지 않아야 합니다.**

(↔ 경계비선형, 접촉)

2. 선형의 특징과 활용

선형(linearity)의 가장 큰 특징은 중첩(superposition)의 원리가 적용 가능하다는 점입니다.

$$f(x + y) = f(x) + f(y), \quad f(a \cdot x) = a \cdot f(x)$$

$$\text{<예> } f(x)=3x \rightarrow f(2)+f(3)=15=f(2+3), 2 \cdot f(3)=18=f(2 \cdot 3)$$

¹ 즉, $kx=f(t)$ 의 방정식은 좌변은 정적해석의 항(kx)을, 우변은 동해석의 항($f(t)$)을 사용하는 것입니다.

² 하중이 최대 크기에 이를 때까지 아주 서서히 점진적으로 증가하고(↗), 최대 크기에 도달한 후에는 시간에 따라 변하지 않고 일정하게 유지된다고(→) 가정합니다. 이 최종 상태의 최대 크기 하중이 정적해석에서 사용하는 하중입니다.

선형정적해석에서는 다음과 같은 두 가지 방식으로 이 중첩의 원리를 활용할 수 있습니다.

- 하중의 크기 변화에 대해 재해석 또는 반복해석을 수행할 필요없이 비례관계로 결과를 계산할 수 있습니다. $\rightarrow f(a \cdot x) = a \cdot f(x)$

선형정적해석에서는 입력인 하중의 크기가 N배 증가하면, 변위 등 출력결과도 N배 비례 증가합니다.

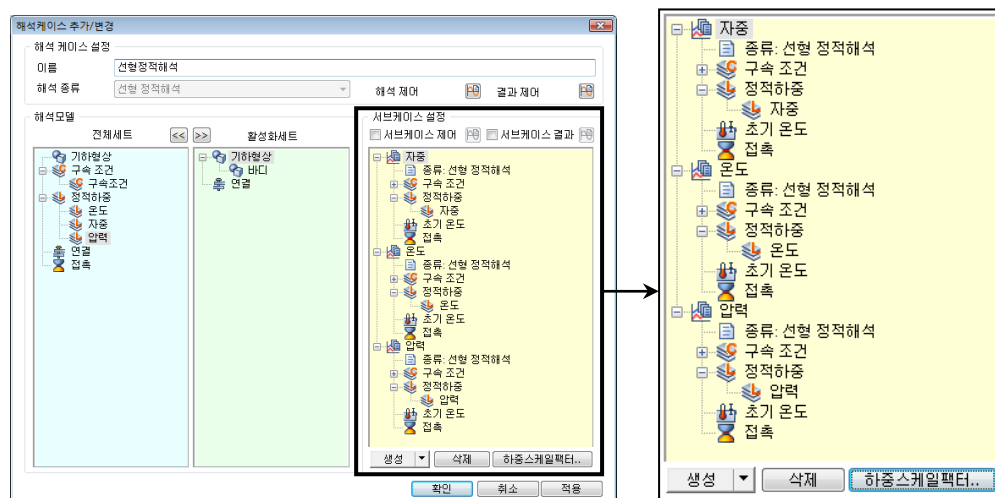


- 여러 개의 하중조건에 대해 개별적인 해석을 수행하고, 그 결과를 조합하여 전체하중 또는 다양한 하중조합에 대한 결과를 계산할 수 있습니다. $\rightarrow f(x + y) = f(x) + f(y)$

예로, 자중(중량, weight)과 온도, 압력, 세 개의 하중이 작용하는 구조물에 대한 선형정적해석을 수행할 경우, 다음처럼 두 가지 방법으로 해석하는 것을 생각할 수 있습니다.

- ✓ 세 개의 하중 전체를 한 번에 적용, 해석하여 전체하중에 대한 결과를 확인할 수 있습니다.
 - ✓ 세 개의 하중에 대해 개별적으로 해석하고, 그 결과의 중첩(조합)으로 전체하중이 작용했을 때의 결과 또는 자중과 온도하중만 작용했을 때의 결과, 자중과 압력하중만 작용했을 때의 결과 등 다양한 부분하중의 조합결과를 확인할 수도 있습니다.
- 그리고, 중첩의 원리를 이용하여 개별하중의 결과를 조합할 때에는 각 하중에 대해 다른 배율(scale factor)을 적용할 수도 있습니다. $\rightarrow f(a \cdot x + b \cdot y) = a \cdot f(x) + b \cdot f(y)$

두번째 방법은 다양한 하중조건에 대한 설계검토를 할 때에 상당히 유용하게 활용할 수 있습니다. 만약 전체하중을 한 번에 적용하면 해석결과가 NG일 때, NG의 원인인 하중을 확인할 수 없습니다. 하지만, 하중조합을 이용하면 전체하중의 조합결과에서 NG가 발행하였을 때, 개별하중에 대한 결과를 확인하여 쉽게 NG의 원인이 되는 하중을 찾고, 이 하중에 대한 개선 방안을 강구할 수 있습니다.



<그림 2> midas NFX (Designer)의 서브케이스 관련 GUI

하중조건별 해석과 조합은 midas NFX에서 <그림 2>와 같이 선형정적 해석케이스에서 서브케이스(subcase)를 이용하여 1회의 해석으로 간편하게 처리할 수 있습니다. 각 서브케이스에서 개별 하중조건을 지정하고, 조합하여 전체 또는 부분하중의 조합결과를 확인할 수 있습니다.

3. 선형정적해석의 수행절차

일반적인 선형정적해석의 수행절차는 다음과 같습니다.

(1) 해석 대상 구조물의 기하형상 작성

CAD에서 작성한 모델을 불러오거나 프로그램에서 직접 전처리 기능을 이용하여 기하형상을 모델링합니다.¹

지나치게 정교하게 기하형상을 모델링하는 것은 오히려 다음 단계에서 작성할 유한요소모델(요소망)의 형상 품질을 떨어뜨리고 부분적으로 해석결과의 오차를 증가시킬 수 있으므로 미소한 필렛이나 구멍처럼 중요하지 않은 부분은 간략화시키는 것이 좋습니다. 만약 CAD에서 작업한 정교한 기하형상을 사용할 경우에는 프로그램이 제공하는 간략화(simplify) 기능을 이용하여 기하형상을 적절하게 조정하는 것이 좋습니다.

(2) 유한요소모델 작성

완성된 기하형상에 대해 요소망을 생성합니다.

자동요소망생성 기능을 이용하여 간편하게 요소망을 생성할 수 있으며, 대부분의 선형정적해석에서는 고차사면체 요소망을 이용하는 것으로 충분합니다.

midas NFX (Designer)에서는 사용자가 별도로 요소망을 작성하지 않으면, 해석을 수행할 때 프로그램이 자동으로 적절한 요소망을 생성하므로 이 단계는 생략할 수도 있습니다.

(3) 재료물성 및 요소특성 정의

해석모델의 각 부분(파트)에 재질을 정의합니다.

솔리드 모델의 선형정적해석에서는 특별한 요소특성의 정의가 요구되지 않습니다.

midas NFX (Designer)에서 대부분의 재질은 프로그램이 제공하는 재질 DB에서 재질을 선택할 수 있고, 재질 DB에 없는 경우에만 사용자가 직접 재료물성을 입력, 정의하면 됩니다.

(4) 하중 및 경계조건 부여

실제 구조물의 작동조건을 묘사하는 하중과 경계조건을 부여합니다.

(5) 해석조건 설정과 해석수행

선형정적해석의 수행조건을 설정하는데, 대부분의 경우에 선형정적 해석케이스만 만들어서 바로 해석을 수행하면 되고, 사용자가 특별히 조건을 설정 또는 변경할 필요는 없습니다.

(6) 결과 분석

해석이 정상 완료된 후에 변위, 응력 등의 주요 결과를 확인하고, 결과의 타당성을 검토합니다.

¹ 참고로, midas NFX (Designer)에서는 직접 기하형상을 모델링할 수 없으며 CAD에서 작성한 모델을 이용하여야 합니다. 만약, 직접 기하형상을 모델링 해야 할 경우에는 midas NFX (Analyst) 전처리의 기하모델링 기능을 이용하여 작업하고, 그 결과 기하형상을 midas NFX (Designer)로 전달하여 작업합니다.

필요한 경우에는 midas NFX가 제공하는 자동 보고서 작성 기능을 이용하여 간편하게 해석보고서를 만들 수도 있습니다.

그러면, midas NFX (Designer)를 기준으로 위의 (3) 단계부터 각 단계와 관련된 프로그램의 주요 기능과 사용 예를 보다 상세하게 살펴보도록 하겠습니다.

4. 재질의 정의

<그림 3>은 midas NFX (Designer)의 등방성 재질(isotropic material) 정의 대화상자입니다.¹

<그림 3> 재질 정의 대화상자

재질의 입력 데이터는 그 용도에 따라 5개의 부분으로 구분할 수 있습니다.

- 탄성계수, 프와송비, 질량밀도
응력/변형해석을 위해 가장 기본적인 재질 데이터입니다.
- ✓ 탄성계수 (elastic modulus)
재료의 탄성구간에서 응력과 변형률의 비례상수입니다. ($\sigma = E\varepsilon$)

¹ 등방성(isotropic)은 특성이 방향성을 갖지 않고, 모든 방향으로 동일하다는 의미입니다.

✓ **프와송비 (Poisson's ratio)**

재료가 수평방향으로 하중이 작용하여 이 수평방향으로 변형이 발생하면 수직방향으로도 변형이 발생합니다.

프와송비는 수직방향의 변형률(ϵ_{trans})과 수평방향의 변형률(ϵ_{axial})의 비입니다.¹ ($\nu = -\frac{\epsilon_{trans}}{\epsilon_{axial}}$)

✓ **질량밀도 (mass density)**

선형정적해석에서는 하중조건에 구조물의 **중량(weight)**을 포함시킬 경우에만 필요합니다.

이 경우, 중량은 $W = \rho g V$ (ρ : 질량밀도, g : 중력가속도, V : 구조물의 체적)의 식으로 계산되며, 사용자는 재질에서 질량밀도 ρ 를 정의하고, 하중조건으로 중력을 지정하면 됩니다.

• **열팽창계수와 참조온도**

선형정적해석에서 **온도변화에 의한 열변형/열응력**을 계산하고자 할 때에 필요한 데이터입니다.

온도차(온도의 증가/감소)에 의한 **열변형률(thermal strain)**은 $\epsilon = \alpha \Delta T = \alpha(T - T_{ref})$ 의 식으로 계산되며, 이 식에서는 α 는 **열팽창계수**, T 는 **온도하중**(하중조건으로 정의), T_{ref} 는 **참조온도**입니다.

참고로, 열변형률은 구조적인 하중(압력 등)의 작용과 무관한 **초기변형률(initial strain)**이며, 실제 구조물의 **총변형률(total strain)**은 구조적 하중의 작용으로 발생한 변형률과 초기변형률의 합으로 계산됩니다. (예: 봉에서 하중 P 와 온도차 ΔT 에 의한 축방향 총변형률 $\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \Delta T = \frac{P}{AE} + \alpha \Delta T$)

✓ **열팽창계수 (coefficient of thermal expansion)**

열변형률 계산을 위한 재료의 열팽창계수로, 단위온도당 변형률입니다. (단위: $[1/T]$)

✓ **참조온도 (reference temperature)**

온도차(temperature difference) ΔT 를 계산하는 기준온도(T_{ref})입니다.

실제 열변형률의 계산에 사용되는 것은 온도의 크기가 아니라 온도차(ΔT)이므로, 이 참조온도는 별도로 지정하지 않고, 온도하중(T)을 실제 온도차로 입력하는 것도 가능합니다.

예로, 초기에 20°C인 구조물이 100°C로 온도가 상승하였을 때의 열변형/열응력을 계산할 경우, (1) 참조온도를 20, 온도하중을 100으로 입력하는 것과 (2) 참조온도는 별도로 지정하지 않고(기본값 0), 그냥 온도하중을 온도차인 80으로 입력하는 방법 모두 (온도차가 80으로 같기 때문에) 동일한 결과를 제공합니다.

만약 선형정적해석의 하중조건에 온도하중이 없으면, 이 두 개의 정보는 생략해도 무방합니다.

• **열전도율**

열전달해석에만 필요한 재료정보이며, 선형정적해석에서는 사용하지 않습니다.

• **안전율 계산방법**

선형정적해석에서 계산된 응력결과를 이용하여 **안전율(factor of safety)**을 계산하고자 할 때 사용할 계산기준과 관련 극한응력정보입니다.

재료가 연성(ductile)인지 또는 취성(brittle)인지 따라 다른 계산기준을 사용하여야 합니다.

연성재료의 경우에는 극한 인장응력과 von Mises 응력의 비율($F.S. = \frac{\sigma_u}{\sigma_{vm}}$)로 계산하고, **취성재료**는 극한 인장/압축응력과 주응력의 비율($F.S. = \min \left[\left| \frac{\sigma_{tension}}{\sigma_1} \right|, \left| \frac{\sigma_{compression}}{\sigma_3} \right| \right]$)로 계산합니다.

¹ 수평방향으로 인장이 발생하면, 수직방향으로는 압축이 발생하므로 이 두 변형률의 비는 항상 음(-)이며, 계산식에는 (-)가 붙어서 양(+)의 값으로 변환해 줍니다.

안전율에 대한 보다 자세한 설명과 계산방법은 <고체역학의 기본개념> 장을 참고합니다.

• 피로

선형정적해석 자체와는 무관하고, 선형정적해석의 결과를 이용하여 후처리에서 피로해석을 수행하고자 할 때 필요한 재료 피로특성 정보입니다.

이 **피로한계응력진폭(endurance limit)**과 **한계사이클(cycles at endurance)**은 피로해석을 위한 재료의 **S-N 곡선**을 정의합니다.

피로해석 및 관련 재료물성에 대한 자세한 설명을 <피로해석> 장을 참고합니다.

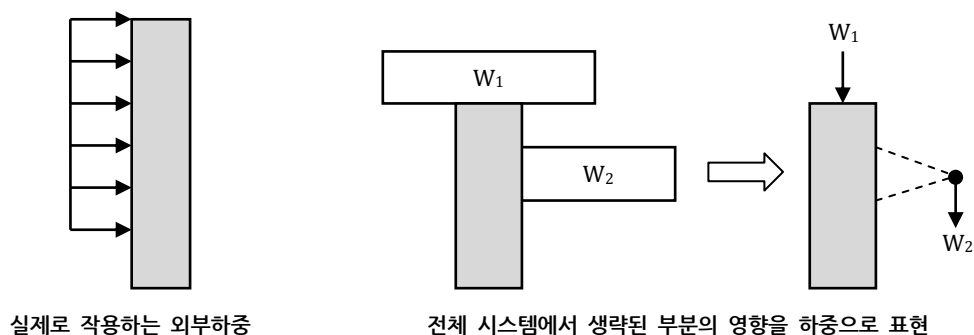
이상에서 살펴본 재질 데이터 중 선형정적해석에서 요구되는 항목들을 요약하면 다음과 같습니다.

- ✓ **최소, 필수입력 데이터**
탄성계수(E)와 프와송비(ν)
- ✓ **해석모델의 중량 고려시**
질량밀도(ρ)
- ✓ **온도하중 고려시 (온도에 의한 열변형/열응력 계산)**
열팽창계수(α)와 참조온도(T_{ref})
- ✓ **안전율 계산시**
안전율 계산방법 및 관련 데이터 (연성/취성재료에 따라 다름)

5. 하중조건

<유한요소해석의 기본개념> 장에서 설명한 것처럼 하중은 해석모델의 움직임, 변형을 유발하는 작용입니다.

구조물에 작용하는 실제 외부하중일 수도 있고, 전체 시스템에서 생략된 부분이 해석부분에 미치는 영향을 하중으로 표현할 수도 있습니다.



<그림 4> 하중조건의 예

midas NFX (Designer)가 제공하는 선형정적해석의 전체 하중조건 중 실무해석에서 자주 사용하는 것들은 다음과 같습니다.¹

¹ midas NFX (Designer)의 전체 하중조건에 대한 상세한 설명은 프로그램의 온라인 도움말을 참고합니다.

- 중력 (gravity)

해석모델의 중량을 표현하는 하중입니다.

재질 대화상자에서 입력한 질량밀도(ρ)와 중력가속도(g), 그리고 프로그램이 계산하는 해석모델의 체적(V)의 곱으로 계산되는 중량($W=\rho gV$)이 지정한 방향의 하중으로 작용합니다.

중력 대화상자의 중력가속도는 작업 단위계 기준으로 프로그램이 기본값을 제공하며, 특별한 이유가 없는 한 중력은 기준좌표계와 반대방향으로 작용하므로(예: -Z축 방향), 중력가속도의 부호(-)에 주의가 필요합니다. 만약, 재질 대화상자에서 질량밀도(mass density) 대신 **중량밀도**(weight density, ρg)를 입력한 경우에는 대화상자에서는 중력가속도를 -1로 지정해야 합니다.

전체 해석모델에 작용하는 것이므로 별도로 대상을 선택/지정할 필요는 없고, 하중조건 자체만 정의해 주면 됩니다.

- 집중하중 (force)

해석모델의 특정 기하면에 작용하는 하중입니다.

실제 해석을 수행할 때에는 대상 기하면에 생성된 절점에 작용하는 **절점하중(nodal force)**으로 처리되며, **총합력**과 **개별하중**으로 지정할 수 있습니다.

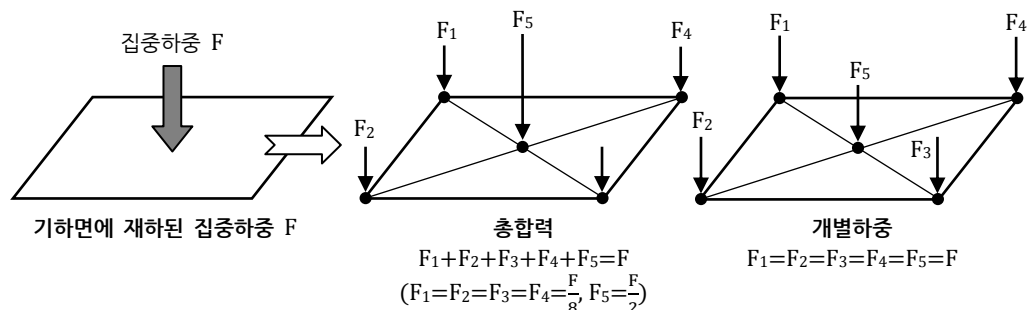
- ✓ **총합력 (total force)**

이름 그대로 선택한 모든 대상 기하면들에 작용하는 총합력으로 재하되는 것입니다.

총합력이 절점하중으로 배분될 때에 각 절점이 차지하는 유효면적에 따라 다른 크기가 부여되므로 실제 각 절점하중의 크기는 모두 다를 수 있습니다.

- ✓ **개별하중**

지정한 하중이 대상 기하면의 모든 절점에 그대로 동일하게 부여됩니다.



〈그림 5〉 총합력과 개별하중의 처리

- 압력 (pressure)

선택한 기하면에 작용하는 압력하중입니다.

단위면적당 작용하는 **분포하중**으로 단위는 $[N/m^2]$ 입니다. 그리고, 대상 기하면에 생성된 솔리드요소의 요소면에 부여되는 **요소하중**입니다. 단위면적당의 힘이므로 압력은 선택한 모든 대상면에 동일하게 부여됩니다. 사용자가 특정 방향을 압력하중의 작용방향으로 지정할 수도 있지만, 대부분의 경우에 압력하중은 면에 수직방향으로 작용합니다.

참고로, 집중하중과의 차이점은, 집중하중은 단위가 $[N]$ 인 **힘**이며, 대상 기하면에 생성된 하위절점에 **절점하중**으로 부여된다는 점입니다.

두 하중조건의 해석결과에 차이는 없으며, 실제 사용에서 주어진 하중조건의 집중/분포하중 여부와 작용방향에 따라 편리한 하중을 선택하여 사용하면 됩니다. 특히, 실린더, 경사면, 임의형상의 곡면에 수직방향으로 작용하는 분포하중을 부여할 때에는 압력하중을 이용하는 것이 편리합니다.

- **이동변위 (translational displacement)**

선택한 대상면을 지정한 거리만큼 강제로 병진이동(translation)을 시킵니다.

실제 해석에서는 대상 기하면에 생성된 절점의 해당 병진자유도 성분(T_x , T_y , T_z)에 이동변위로 지정된 값을 부여하게 됩니다. 이러한 자유도값 지정의 의미는 다음과 같은 두 가지 특징을 갖습니다.

- ✓ **변위값을 0으로 지정하면 구속조건과 동일한 역할이 됩니다.**

구속과 이동변위 모두 자유도에 특정값을 지정하는 기능이며, 단지 구속은 값이 0인 것입니다.

- ✓ **이동변위가 지정된 방향으로만 구속조건을 생략하여도 무방합니다.**

만약 솔리드모델에서 X, Y, Z, 세 방향으로 모두 이동변위가 정의된 경우라면 경계조건(구속조건)이 없어도 정상적인 해석을 수행할 수도 있습니다.

- **회전변위 (rotational displacement)**

선택한 대상면을 지정한 회전축을 기준으로 지정 각도만큼 강제로 회전시킵니다.

솔리드요소의 절점은 회전자유도(R_x , R_y , R_z)가 없기 때문에 회전축의 기준위치에서 대상면(들)을 **강체연결(rigid link)**로 묶고, 이 강체연결의 주절점(master node)에 지정한 회전변위를 부여합니다.

- **리모트하중 (remote load)**

<그림 4>의 오른쪽 예에서 생략된 부분의 중량 W_2 를 재하하는 하중이 리모트하중입니다.

이처럼 리모트하중은 생략된 파트의 중량 등을 집중하중, 모멘트로 해석모델에 재하하는 기능이며, 옵션으로 질량을 함께 추가할 수도 있습니다. 질량을 추가하는 경우는 자중을 고려할 때 실제 전체 중량을 고려하기 위한 목적과 모달해석 등에서 정확한 질량을 부여하기 위한 목적이 있습니다.

리모트하중은 생략된 파트의 도심(centroid) 또는 사용자가 지정한 위치에서 생략된 파트와 만나는 해석모델의 기하면들을 **강체연결(rigid link)**로 묶고, 이 도심 또는 사용자 지정위치에 지정한 하중 또는 질량을 부여합니다. 즉, 도심 또는 사용자가 지정한 위치에 강체연결의 주절점(master node)이 만들어 지고, 해석모델의 연결 기하면에 생성된 절점들이 종속절점(slave node)이 됩니다.

이 리모트하중과 위의 회전변위를 이용한 해석에서 강체연결로 인하여 해당 위치에서 국부적으로 **결과/응력의 불연속**이 발생하므로 결과 분석시 주의가 필요합니다.¹ 그러므로, 결과가 중요한 위치에는 강체연결(리모트하중, 회전변위 등 강체연결이 이용되는 하중조건)을 사용하지 않는 것이 좋습니다.

- **온도하중 (temperature)**

선택한 파트에 온도변화에 의한 열변형을 계산하기 위한 온도(T)를 지정합니다. 그리고, 온도차 계산을 위한 기준 **참조온도(T_{ref})**는 해석케이스에서 지정할 수 있습니다.

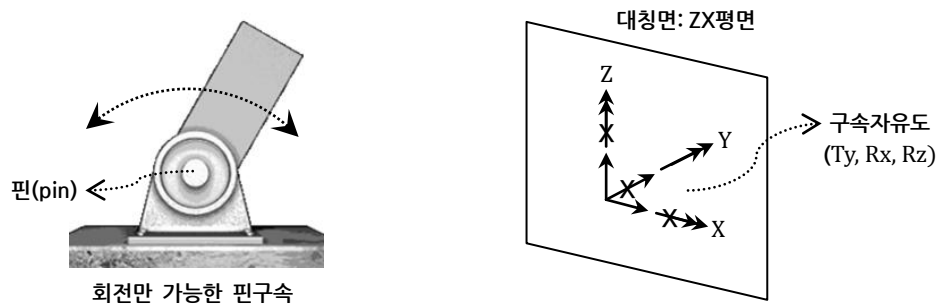
열변형에 대한 자세한 설명은 앞의 재질부분의 **열팽창계수와 참조온도** 부분을 참고합니다.

¹ 강체연결에서는 종속절점이 하중에 의한 거동을 하지 않고, 주절점의 거동에 종속적으로 거동하게 되어 (하중에 의한 거동을 하는) 이웃 절점과 상대거동을 하지 않습니다. 즉, 거동의 불연속이 발생하며, 이로 인해 연결부위로 부터 국부적인 범위 내에서 응력분포의 불연속이 발생합니다.

6. 경계조건

경계조건은 해석모델의 움직임, 변형을 제한/구속하는 조건입니다.

midas NFX (Designer)가 제공하는 경계조건 중 일반적인 솔리드모델의 실무해석에서 가장 많이 사용되는 것은 핀구속과 대칭구속입니다.



〈그림 6〉 핀구속과 대칭구속

- **핀구속 (pin, hinge)**

핀구속은 〈그림 6〉의 왼쪽과 같이 마치 핀을 끼워서 고정시킨 것처럼 구조물이 이동은 하지 못하고 회전만 가능한 구속조건입니다. 이러한 조건에 따라 핀구속은 병진자유도 T_x , T_y , T_z , 3개를 모두 구속시킵니다. 하지만, 솔리드요소의 절점은 병진자유도만 가지기 때문에 이 핀구속은 결국 솔리드요소를 완전구속시키는 역할을 합니다.

참고로, 병진/회전자유도 6개(T_x , T_y , T_z , R_x , R_y , R_z)를 모두 구속시키는 완전구속(fixed)을 이용해도 결국 솔리드요소에는 회전자유도가 없기 때문에 동일합니다.

- **대칭구속 (symmetry)**

대칭모델의 대칭면에 위치한 기하면에 지정하는 구속조건입니다.

- ✓ **대칭모델**

기하형상, 재질, 하중조건, 경계조건, 이 4개가 모두 대칭인 모델입니다. 이러한 대칭모델은 대칭조건을 이용하면 해석시간이 단축되고, 결과의 대칭성을 확보할 수 있습니다. 1/2 또는 1/4 대칭모델에 대한 해석은 후처리에서 전체모델의 결과로 표현할 수 있습니다.

대칭구속의 기준은 “구조물의 변형이 대칭면을 침범하면 안된다” 입니다.

그러므로, **대칭면상의 자유도** 중에 대칭면을 침범하는 거동을 허용할 수 있는 자유도를 구속시키면 됩니다. 가장 일반적인 경우에서 6개의 자유도(병진/회전)가 모두 있다고 하고, 〈그림 6〉의 오른쪽에서 대칭면이 ZX평면이라고 하면, 이 경우에 대칭모델이 T_y , R_x , R_z 거동을 하면 대칭면을 침범하여 대칭조건을 위배하게 됩니다. 그러므로, 이 경우에는 대칭면에서 이 3개의 자유도 T_y , R_x , R_z 를 구속시켜야 합니다. 솔리드모델의 경우는 회전자유도가 없으므로 T_y 자유도 하나만 구속시키면 됩니다.

midas NFX (Designer)에서는 특정 평면(기하면)에 대칭구속을 지정하면 프로그램이 자동으로 해당 면에서 적절한 자유도들을 구속시켜 줍니다.

대칭모델을 이용한 해석에서는 반드시 하중의 크기도 대칭모델에 맞게 변환되어야 합니다. 즉, 1/2

대칭모델에서는 하중의 크기도 1/2이 되어야 하고, 1/4 대칭모델에서는 하중의 크기도 1/4이 되어야 합니다.

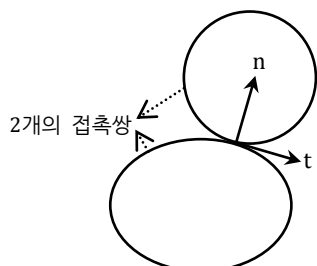
참고로, 선형정적해석에서는 대칭모델에 대해 자유롭게 대칭 경계조건을 사용할 수 있지만, 모드형상과 좌굴형상은 일반적으로 대칭이 아니므로 **모달해석**, **좌굴해석**에서는 대칭조건을 적용하면 안됩니다. 즉, 모델이 대칭이라 하더라도 결과형상이 대칭이 아닐 수 있으므로 대칭모델이 아닌 전체모델을 이용하여 모달, 좌굴해석을 수행해야 합니다.

만약 핀구속, 대칭구속처럼 정해진 자유도를 구속시키는 것이 아니라 특정 자유도만 개별적으로 구속하고자 할 때에는 **자유도 구속** 기능을 이용합니다.

7. 선형접촉

먼저 접촉거동의 일반적인 사항과 종류에 대해 간단하게 알아보도록 하겠습니다.

접촉거동은 접촉쌍(contact pair) 사이에서 법선방향(n)과 접선방향(t)으로의 상대거동의 가능여부에 따라 다음과 같이 4개로 구분할 수 있습니다.¹



	상대운동의 가능여부	
	법선방향 (n)	접선방향 (t)
일체거동 (welded)	X	X
슬라이딩 (sliding)	X	○
거친접촉 (rough)	○	X
일반접촉 (general)	○	○

〈표 1〉 법선/접선방향으로의 상대거동 여부에 따른 접촉거동의 분류

선형정적해석에서도 파트와 파트 사이의 연결을 위해 접촉조건을 사용할 수 있으며, 선형해석이라는 특성상 **일체거동(welded)**, **슬라이딩(sliding)**, **보간연결(interpolation)**, 세 가지 접촉조건만 선형거동의 범위 내에서 사용할 수 있습니다.

선형거동의 범위 내에서의 선형접촉을 위한 요구조건은 다음의 두 가지로 요약할 수 있습니다.

- ✓ **접촉쌍은 거동의 초기부터 최종상태까지 만난 상태가 유지되어야 합니다.**

선형접촉에서는 초기의 접촉쌍에 대해서만 접촉력을 정의/부여하기 때문에 접촉면은 초기부터 최종 변형상태까지 붙어 있어야 합니다. 즉, 선형접촉에서는 법선방향의 상대운동이 허용되지 않으므로 초기에 떨어져 있던 접촉면이 변형 중에 만나거나, 반대로 초기에 붙어 있던 접촉면

¹ 접선방향의 상대운동(슬라이딩, 일반)에서는 마찰계수를 지정하여 마찰효과를 고려할 수도 있습니다.

거친접촉은 마치 마찰계수가 무한대(∞)인 아주 거친표면상의 운동이어서 접선방향으로 상대운동을 할 수 없다는 의미로 “거친(rough)”이라는 표현을 사용하는 것입니다.

이 변형 중에 떨어지는 거동은 표현할 수 없습니다. 또한, 접선방향으로의 상대거동인 슬라이딩에서도 마찰은 지원되지 않습니다.

✓ **대변형 거동(대회전)이 발생하지 않아야 합니다.**

기하비선형해석이 요구되는 대변형, 특히 대회전(large rotation)이 발생하지 않아야 합니다.

선형정적해석에서 사용할 수 있는 세 가지 접촉조건에 대해 정리하면 다음과 같습니다.

- **일체거동 (welded)**

〈표 1〉에 정리된 것처럼 일체거동 접촉에서는 접촉쌍이 법선/접선방향으로 모두 상대운동을 할 수 없기 때문에 마치 두 파트가 요소망이 일치하게 연결된 것처럼 하나로 움직이게 됩니다.

접촉쌍이 일정간격 만큼 떨어져 있는 경우에 이 간격을 유지하면서 일체거동을 시키고자 하면, 접촉 라미터에서 이 간격을 초기 접촉공차(initial tolerance)로 지정하여 간격을 유지시킬 수 있습니다.

참고로, 일체거동 접촉을 정의하면 해석수행시 초기 접촉쌍에 대해 법선방향과 접선방향으로 접촉력(elastic contact force)을 재하하여 접촉쌍이 서로 상대운동을 하지 못하도록 처리합니다.

- **보간연결 (interpolation)**

일체거동과 유사하게 접촉쌍이 상대운동은 할 수 없고 일체거동을 하는 접촉거동입니다.

보간연결 접촉에서는 접촉쌍을 보간(interpolation) 방식의 강체(rigid link)로 연결하여 일체거동 처리합니다.¹

보간연결은 일체거동 접촉과 달리 회전거동이 고려/반영되는 특징이 있습니다. 그러므로, 두 파트의 일체거동이 필요한 대부분의 경우에는 일체거동 접촉을 사용하는 것이 편리하지만, 예외적으로 쉘 요소와 솔리드요소가 연결될 때, 두 요소를 일체거동을 시키고자 하면 보간연결을 사용합니다.

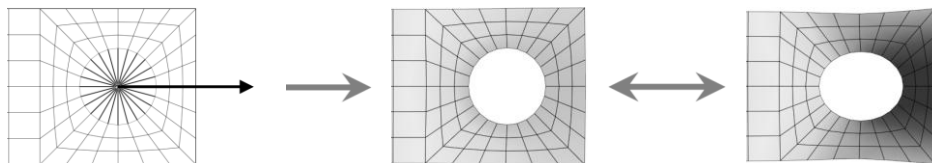
- **슬라이딩 (sliding)**

〈표 1〉의 정리와 같이 슬라이딩 접촉조건은 접선방향으로의 상대운동만 가능한 접촉거동입니다.

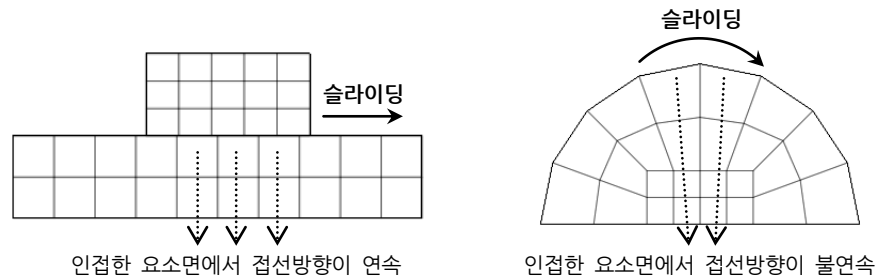
슬라이딩 접촉에서는 접선방향으로의 상대운동이라는 특성상 인접한 요소면에서 접선방향의 연속성 여부에 따라 해석에 의한 거동이 영향을 받을 수 있습니다.

〈그림 7〉의 왼쪽에서는 인접한 요소면에서 접선방향이 연속성이 유지되므로 쉽게 슬라이딩 거동을 할 수 있지만, 오른쪽처럼 불연속일 경우에는 접선방향이 바뀌는 요소경계에서 슬라이딩 거동에 어려움을 겪을 수도 있습니다.²

¹ 일반 강체연결(rigid link)에서는 주절점의 거동이 결정된 후, 이 거동에 따라 종속절점의 거동이 결정되지만, 보간(interpolation) 방식에서는 주절점에 부여된 하중, 질량이 지정한 비율에 따라 (대부분 균등배분) 종속절점으로 배분됩니다. 즉, 일반 강체연결에서는 종속절점이 완전하게 주절점의 거동을 따라가지만, 보간 방식에서는 배분된 하중에 따라 종속절점이 (독립적인) 거동을 하게 됩니다. (아래 그림의 가운데는 일반 강체연결로 변형 후에도 초기 원형이 유지되지만, 오른쪽 보간연결에서는 종속절점이 하중에 따른 거동을 하여 초기 원형이 유지되지 않습니다.)



² 즉, 접촉쌍이 요소경계에서 쉽게 넘어가지 못하고 걸릴 수 있습니다.



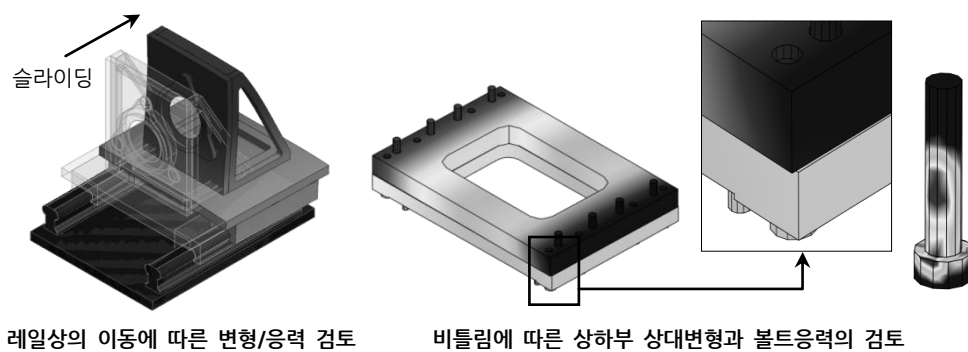
〈그림 7〉 슬라이딩 거동에서 접선방향의 연속성에 의한 영향

이러한 사항을 참고하여 슬라이딩 접촉거동의 사용에서는 다음의 두 가지 사항을 고려하는 것이 좋습니다.

- ✓ 선형 슬라이딩 접촉은 마찰이 없는 **평면상의 슬라이딩(on-plane sliding)**에만 사용하는 것이 좋습니다.
- ✓ 선형/비선형 슬라이딩 접촉 여부와 무관하게 접촉면이 곡면인 경우(〈그림 7〉의 오른쪽)에는 가급적 접선방향의 불연속성이 덜 심하도록 요소망을 조금 조밀하게 만들어 주는 것이 좋습니다.

참고로, 대변형의 경우에도 대회전(large rotation) 없이 대변위(large translation)만 발생하는 경우에는 하중의 작용방향에 변화가 없고, 구조물의 강성변화도 없으므로 선형 슬라이딩 접촉을 사용하는 것이 가능합니다.

참고로, 슬라이딩 접촉조건을 정의하면 해석수행시 초기 접촉쌍에 대해 **법선방향으로 접촉력(elastic contact force)**을 재하하여 접촉쌍이 법선방향으로 상대운동을 하지 못하도록 처리합니다.



〈그림 8〉 선형정적해석에서 슬라이딩 접촉의 활용예

접촉거동과 처리방법 등 전반적인 사항에 대해서는 〈접촉해석〉 장에서 보다 상세하게 정리합니다.

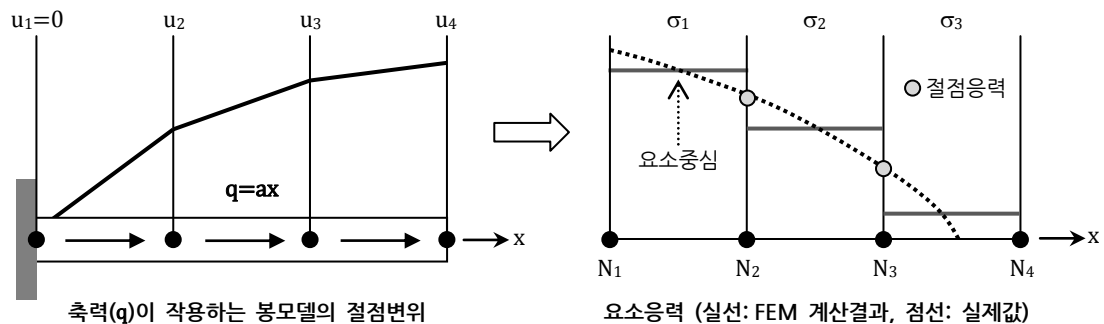
8. 결과분석

선형정적해석의 결과분석에서 일반적으로 확인, 검토하는 사항은 변형과 강도 안정성, 즉 **변위**, **응력**, 그리고 **안전율** 결과입니다.

변위는 그 의미가 직관적이고, 안전율에 대해서는 <고체역학의 이해> 장과 앞의 재질 부분에서 상세하게 설명하였으므로 여기에서는 응력 결과에 대해 자세하게 알아보도록 하겠습니다.

<유한요소해석의 이해> 장에서 정리한 것처럼 유한요소법을 이용한 응력해석에서 미지수는 절점의 자유도, 즉 변위이며, 먼저 이 변위를 계산한 후, 변형률과 응력을 계산하게 됩니다.

그리고, 변위는 절점단위의 결과데이터인 반면, 변형률($\epsilon_x = \frac{u_{i+1} - u_i}{L}$)과 응력($\sigma_x = E \cdot \epsilon_x$)은 **요소단위**로 계산되는 결과데이터입니다.

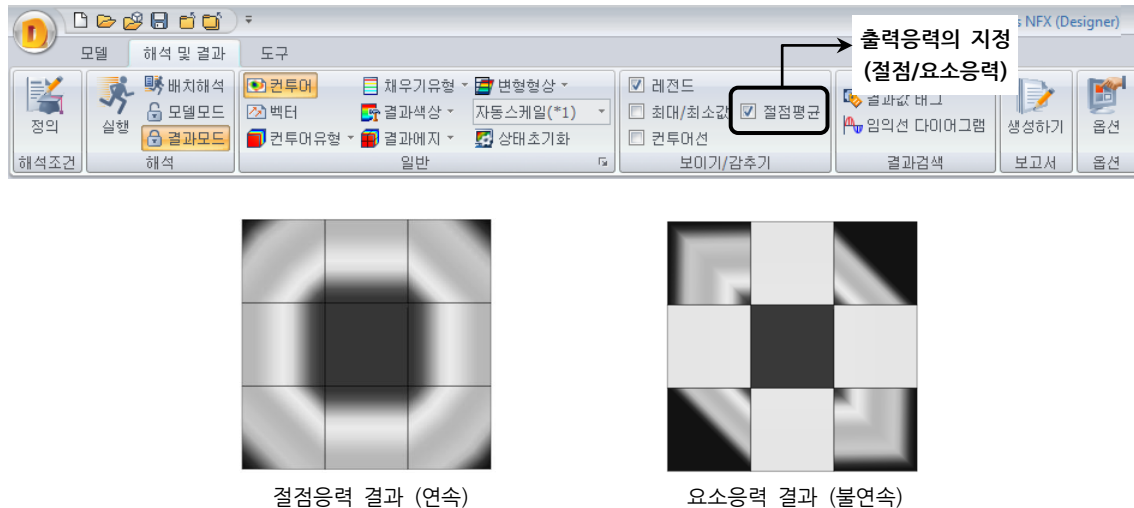


<그림 9> 축력이 작용하는 1차원 봉모델에서 변위와 응력 결과

<그림 9>의 축력이 작용하는 봉모델의 변위, 응력결과를 참고하여 다음과 같은 중요한 사항을 정리할 수 있습니다.

- ✓ 절점변위는 연속적이고 비교적 정확하지만, 응력결과는 요소경계에서 불연속이고 부정확합니다.
- ✓ 응력은 요소의 중심에서 가장 정확도가 높습니다.
(그러나, 최대값은 아닙니다)
- ✓ 절점응력은 해당 절점이 속한 요소에서 계산된 응력을 평균한 응력이며($\sigma_{N2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$), 요소응력에 비해 정확도가 높습니다. 그러므로, 절점응력을 이용하여 결과를 평가하는 것이 합리적입니다.
- ✓ 요소망을 조밀하게 할수록 응력결과의 정확도는 향상됩니다.
(실제값으로 수렴합니다)

〈그림 10〉에 보이는 것처럼 midas NFX (Designer)에서는 평균한 절점응력을 기본 응력결과를 제공하며, <해석 및 결과> 도구모음에서 <절점평균> 옵션을 이용하여 절점응력과 요소응력을 선택하여 확인할 수 있습니다. 즉, <절점평균> 옵션을 끄면 불연속의 요소응력을 확인할 수 있습니다.



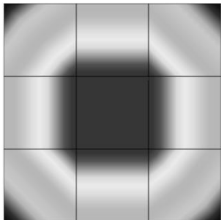
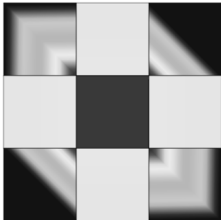
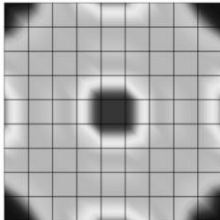
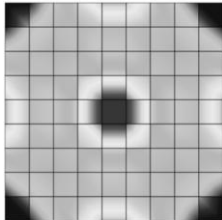
〈그림 10〉 midas NFX (Designer)에서 절점/요소응력의 지정 옵션과 응력결과 예

절점응력의 결과가 더 합리적이고, 또 〈그림 10〉과 같이 그래픽 결과가 예쁘기 때문에 단순히 절점응력만 확인하고, 보고서 등을 작성하는 것은 경우에 따라서 위험할 수도 있습니다.

응력결과는 요소응력 변화의 불연속성을 보여주며, 이 불연속성/변화의 정도를 기준으로 요소망 조밀도의 적절성과 이에 따른 응력결과의 신뢰도를 판단할 수 있는 중요한 정보가 됩니다.

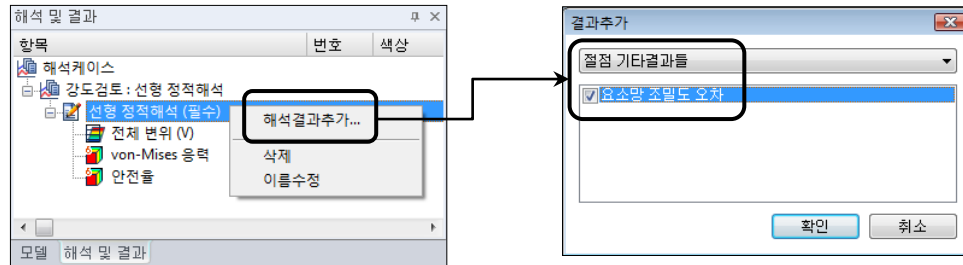
즉, 응력결과가 불연속이지만 그 차이의 정도가 심하지 않으면 요소망의 조밀도와 응력의 신뢰도 모두 적절한 것이지만, 〈그림 10〉의 요소응력결과의 예처럼 요소경계에서의 불연속이 심하고, 한 개의 요소 내에서 결과가 심하게 변하면 조밀도와 신뢰도 모두 부적절한 것입니다.

아래의 <표 2>는 〈그림 10〉의 예제 모델의 요소망을 보다 조밀하게 만들어서 절점응력과 요소응력을 비교한 예입니다. 이번에는 절점응력과 요소응력에 큰 차이가 없으며, 즉 요소망의 조밀도와 응력의 신뢰도 모두 적절하다고 판단할 수 있습니다.

초기 요소망 (부적절)		개선된 조밀한 요소망 (적절)	
			
절점응력	요소응력	절점응력	요소응력

〈표 2〉 요소망의 조밀도에 따른 절점응력과 요소응력의 차이 비교

midas NFX (Designer)에서는 이처럼 요소망의 조밀도와 이에 따른 응력결과의 신뢰도를 보다 쉽게 체계적으로 판단할 수 있도록 **요소망 조밀도 오차(mesh convergence error)**라는 결과를 제공합니다. (<그림 11> 참고)



<그림 11> midas NFX (Designer)에서 요소망 조밀도 오차 결과 불러오기

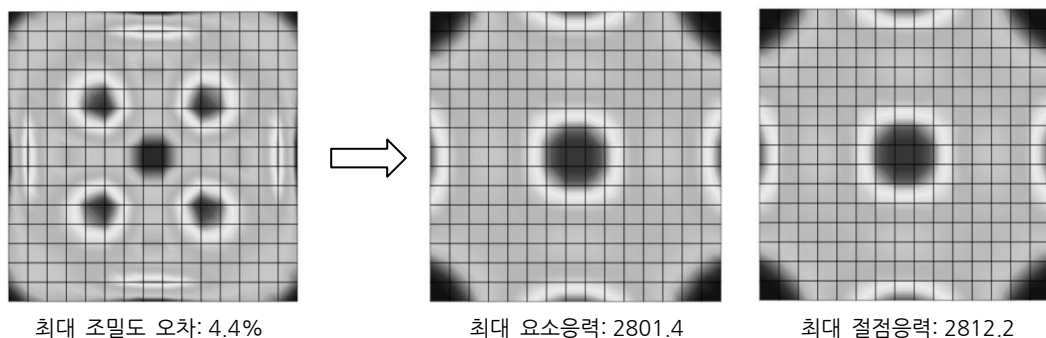
요소망 조밀도 오차는 절점단위로 제공되며, von Mises 응력을 기준으로 각 절점에서 절점응력과 요소응력의 차이를 기준으로 계산합니다.

$$\text{조밀도 오차} = \frac{(\text{요소응력} - \text{절점응력}) \text{의 표준편차}}{\text{절점응력}} \rightarrow e_i = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\sigma_i^n - \bar{\sigma}_i)^2}}{|\bar{\sigma}_i|}$$

(σ_i^n : 요소응력, $\bar{\sigma}_i$: 절점응력)

이론적으로는 이 오차가 5% (0.05) 이하이면 요소망 조밀도가 적절한 것으로 판단하지만, 실무 모델에서는 7% 이하의 조밀도 오차에 대해서는 적절한 것으로 판단할 수 있습니다.

다음의 <그림 12>는 <그림 10>의 예제 모델에 대해 최대 요소망 조밀도 오차가 5% 보다 작도록 요소망을 보다 조밀하게 작성한 후에 절점응력과 요소응력을 비교한 것입니다. 그림에서 보이는 것처럼 두 응력의 분포와 수치값에 거의 차이가 없는 것을 확인할 수 있습니다.



<그림 12> 5% 이하의 요소망 조밀도 오차에서 절점응력과 요소응력의 비교

마지막으로 <고체역학의 이해> 장에서 설명한 것처럼 재료의 종류에 따라 연성재질은 von Mises 응력, 취성재질은 주응력 결과를 이용하여 재료의 항복여부와 안전성을 판단하여야 합니다.

응력결과의 검토와 안전성의 판단에 대한 자세한 설명은 <고체역학의 이해> 장을 참고하도록 합니다.

그리고, midas NFX (Designer)는 각종 해석결과를 보다 쉽게 효과적으로 확인할 수 있도록 다양한 후처리 결과 출력 및 정리/분석 기능을 제공하고 있습니다.

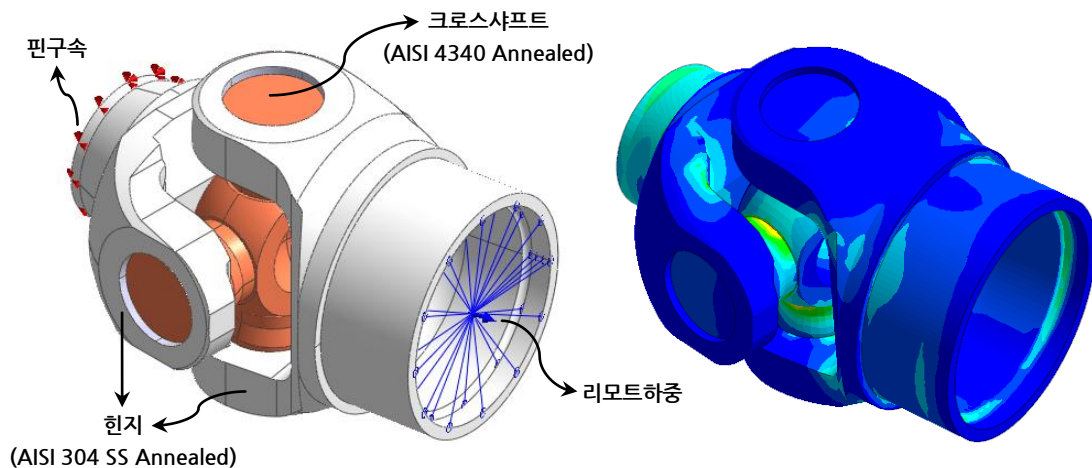
midas NFX (Designer)가 제공하는 전체 후처리 결과분석 기능의 종류와 사용법은 프로그램의 온라인 도움말과 따라하기 예제들을 참고합니다

A. 선형정적해석 예제 <1>

3개의 파트로 구성된 유니버설조인트(universal joint)의 강도해석을 수행하는 예제입니다.

※ 이 예제의 모델과 결과는 <피로해석>에서 예제로 사용되므로 반드시 실습을 수행해 보고, 모델 및 결과파일은 보관해 두도록 합니다.

먼저 해석모델의 개요와 선형정적해석을 수행하는 작업절차를 알아보겠습니다.



<그림 1> 유니버설조인트 해석모델과 von Mises 응력결과

- 해석모델**
 2개의 힌지(hinge)와 이들을 연결하는 크로스샤프트(cross shaft), 총 3개의 파트로 구성되어 있는 어셈블리 모델이며, CAD 파일을 불러와서 해석작업을 수행합니다.
- 재질**
 이 예제에서는 2개의 힌지에 AISI 304 SS Annealed 재질, 크로스샤프트에는 AISI 4340 Annealed 재질을 사용합니다.
 두 재질 모두 midas NFX (Designer)가 제공하는 재질 DB에서 선택하여 정의합니다.
 참고로, 중량이 고려되지 않고, 온도하중이 없으므로 실제 해석에 사용되는 재질 데이터는 탄성계수와 프와송비 두 가지이며, 안전율 계산을 위해 극한 인장강도가 추가적으로 필요합니다.
- 하중 및 경계조건**
 하중조건으로는 리모트하중을 이용하여 두 방향으로 동시에 작용하는 비틀림하중을 부여합니다.
 그리고, 반대쪽 끝면에 핀구속을 지정합니다.
 3개의 파트는 접촉조건으로 연결하며, CAD 파일을 불러올 때, 자동접촉기능을 이용하여 일체거동 접촉을 지정합니다.
- 결과분석**
 변위, von Mises 응력, 그리고 안전율 결과를 확인하여, 비틀림하중의 작용시 모델의 변형형상과 강

도 안정성을 검토합니다.

• 작업절차

이 예제에서 해석을 수행하는 작업절차는 다음과 같습니다.

- ① CAD 파일을 불러옵니다.
이때, 불러오기 대화상자에서 <접촉면찾기> 옵션을 체크하여 자동으로 접촉면을 검색하여 접촉조건을 정의하도록 합니다.
- ② 2개의 재질을 정의하고, 각 파트에 재질을 지정합니다.
- ③ 하중(리모트하중)과 경계조건(핀구속)을 지정합니다.
- ④ 선형정적 해석케이스를 만들고, 해석을 수행합니다.
요소망은 해석수행시 프로그램이 자동으로 생성해 주는 것을 그대로 사용합니다.
- ⑤ 해석이 정상적으로 완료된 후, 변위, von Mises 응력과 안전율 결과를 확인합니다.

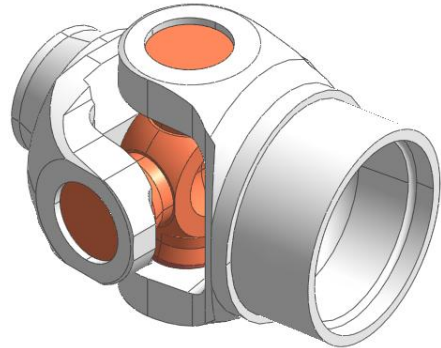
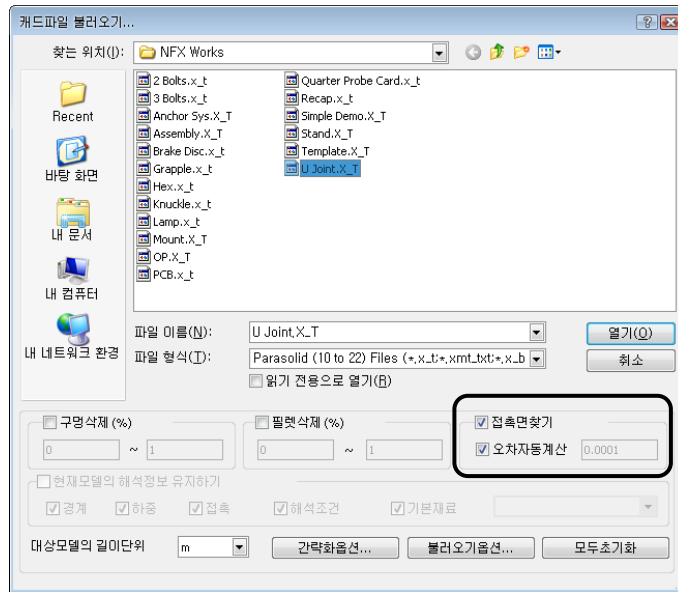
그러면, 실습을 시작하겠습니다.

첫번째 단계로 CAD 파일을 불러오고, 자동접촉정의 기능을 이용하여 일체거동 접촉조건을 지정합니다.

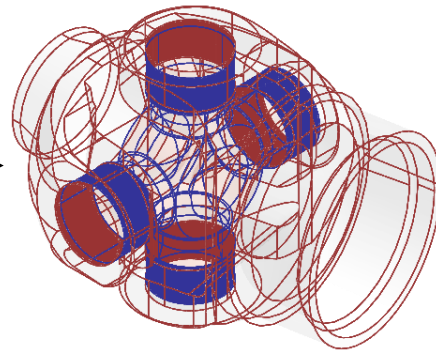
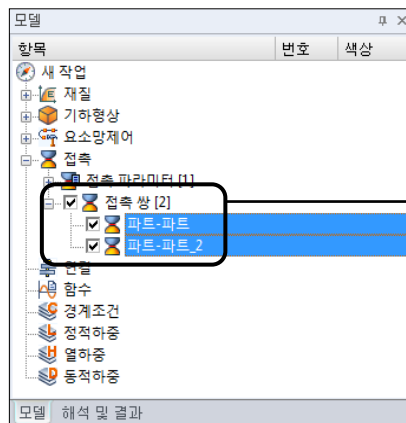
- (1) 먼저, 바탕화면의 **midas NFX (Designer)** 아이콘()을 더블클릭하여 프로그램을 실행합니다.
- (2) 프로그램의 가장 위쪽에 있는 기본 도구모음에서 세번째 위치한 <캐드파일 불러오기> 아이콘()을 클릭합니다.
- (3) <그림 2>를 참고하여 <캐드파일 불러오기> 대화상자에서 <파일 형식>을 “Parasolid (10 to 22) Files”로 지정하고, “U Joint.x_t” 파일을 선택합니다.¹
그리고, 대화상자에서 <접촉면 찾기> 체크박스를 체크하여 프로그램이 자동으로 접촉면을 검색하여 정의하도록 합니다. 자동 검색/등록되는 접촉쌍은 기본적으로 “일체거동” 접촉조건으로 정의됩니다.
- (4) 새로운 문서가 열리면서 <그림 2>와 같이 해석을 수행할 유니버설조인트 모델이 들어옵니다.
- (5) <그림 3>과 같이 모델 작업트리 <접촉>의 <접촉 쌍>에 자동으로 정의된 2개의 접촉쌍이 등록된 것을 확인합니다. 작업트리에서 개별 혹은 전체 접촉쌍을 클릭하면 작업화면에서 해당 접촉쌍(들)이 정의된 면을 그래픽으로 확인할 수 있습니다.²

¹ “U Joint.x_t” 파일은 midas NFX 기술지원사이트(www.NFX.co.kr)의 기술자료 페이지에서 다운로드합니다.

² 접촉쌍이 작업화면에 그래픽으로 표시될 때, 접촉쌍의 마스터(master)면은 빨간색, 슬레이브(slave)면은 파란색으로 표시되며, 일체거동 접촉에서는 마스터/슬레이브의 구분이 큰 의미가 없습니다.
접촉쌍에서 마스터/슬레이브의 의미와 정의에 대해서는 <접촉정의> 장에서 상세하게 설명합니다.



〈그림 2〉 <카드파일 불러오기> 대화상자와 불러들인 U Joint 기하모델



〈그림 3〉 자동검색/등록된 접촉쌍과 정의된 접촉쌍을 화면에서 그래픽으로 확인하는 예

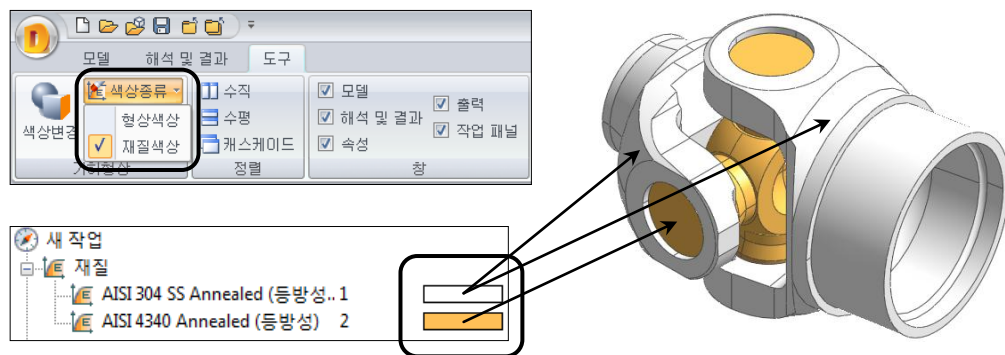
다음 단계로 2개의 재질을 정의하고, 각 파트에 재질을 지정합니다.

midas NFX (Designer)에서 기하모델의 파트에 재질을 지정하는 방법에는 두 가지가 있습니다.

- ✓ 작업트리에서 재질을 선택하고 작업화면의 기하파트로 드래그앤드롭(drag & drop) 합니다.
- ✓ 작업화면에서 기하파트를 선택하고 마우스 오른쪽 버튼 메뉴의 <재질정의>에서 지정하려는 재질을 선택합니다.

첫번째 방법은 한 개의 기하파트에만 재질을 지정할 수 있고, 두번째 방법은 여러 개의 재질에 대해서 동시에 재질을 지정할 수 있습니다. 본 예제에서는 두번째 방법을 이용하여 재질을 지정합니다.

- (6) 모델 작업트리에서 <재질> 부분을 펼치면, 프로그램에 의해 기본으로 제공된 “Alloy Steel”이 있습니다.¹ 이 “Alloy Steel”을 선택한 후, 마우스 오른쪽 버튼을 클릭하여 <편집> 메뉴를 호출합니다.
- (7) <재질> 대화상자가 나타나면, 왼쪽의 재질 DB 목록에서 “AISI 304 SS Annealed”을 선택합니다. 대화상자 우측 상단의 <색상> 버튼을 클릭하여 적당한 색을 지정한 후, <확인> 버튼을 클릭합니다.
- (8) 모델 작업트리에서 <재질>에서 마우스 오른쪽 버튼을 클릭하고 <추가> 메뉴를 실행합니다.
- (9) 이번에는 <재질> 대화상자 왼쪽의 재질 DB 목록에서 “AISI 4340 Annealed”을 선택합니다. 역시 대화상자 우측 상단의 <색상> 버튼을 클릭하고 “AISI 304 SS Annealed”에 지정한 색과 다른 색을 지정한 후, <확인> 버튼을 클릭합니다.
- (10) 작업화면에서 2개의 힌지 파트를 클릭하여 선택한 후, 마우스 오른쪽 버튼 메뉴의 <재질정의>에서 하위의 “AISI 304 SS Annealed”를 선택합니다.
- (11) 동일한 방법으로 작업화면에서 크로스샤프트를 선택하고, 마우스 오른쪽 버튼 메뉴의 <재질정의>에서 이번에는 “AISI 4340 Annealed”를 선택합니다.
- (12) 프로그램의 리본메뉴 도구모음에서 <도구> 탭을 선택하고, 왼쪽 <색상변경>의 <색상종류>에서 “재질색상”으로 설정하여 각 기하파트를 지정된 재질의 색상으로 그려서 지정된 재질을 확인합니다.
(<그림 4> 참고)



<그림 4> 각 기하파트를 지정된 재질의 색상으로 표현하여 재질 지정을 확인하는 예

다음은 세번째 단계로 하중과 경계조건을 지정합니다.

- (13) 먼저 경계조건으로 힌지의 한쪽 끝면에 핀구속을 지정합니다.

¹ 새로운 프로젝트를 시작할 때, 기본으로 제공되는 재질은 <옵션> 대화상자의 <기타> 탭에 있는 “기본재질”에서 정의할 수 있으며, 여러 개의 재질을 설정할 수도 있습니다.

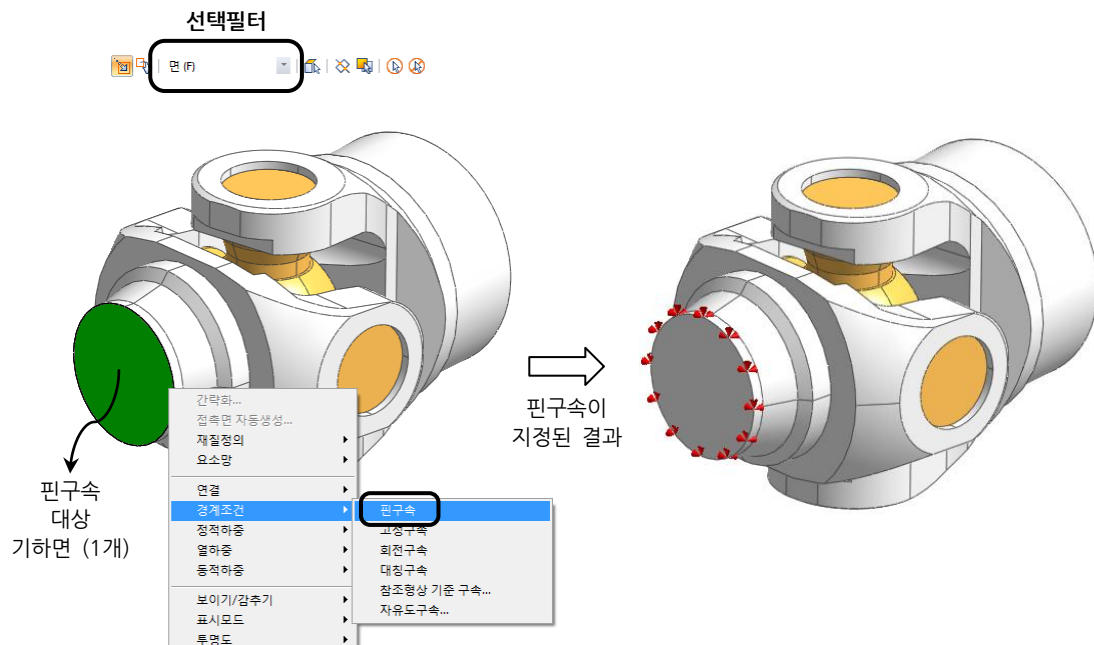
〈그림 5〉를 참고하여 선택필터를 “면 (F)”으로 변경하고, 작업화면에서 왼쪽 힌지의 끝면을 선택합니다. 그리고, 마우스 오른쪽 버튼 메뉴에서 〈경계조건〉의 〈핀구속〉을 선택합니다.¹

핀구속은 3개의 병진자유도(Tx, Ty, Tz)를 구속시키는 것이므로 별도의 대화상자가 나타나지 않고, 선택한 기하면을 대상으로 바로 실행됩니다.

- (14) 리모트하중으로 두 방향으로 동시에 작용하는 비틀림하중을 부여합니다.

〈그림 6〉과 같이 오른쪽 힌지의 안쪽면 1개를 선택하고, 마우스 오른쪽 버튼 메뉴에서 〈정적하중〉의 〈리모트하중〉을 선택합니다.

〈리모트하중〉 대화상자에서 〈방법〉을 “하중지점 직접입력”으로 변경하고, 〈하중지점 직접입력〉을 “선택된 대상의 중심”, 〈하중타입〉을 “모멘트”로 선택합니다. 그리고, 〈하중성분〉에서 두 방향으로 작용하는 비틀림하중을 표현하기 위하여 “X”에 3e5, “Y”에 1e5를 입력한 후, 〈확인〉 버튼을 클릭합니다.



〈그림 5〉 힌지 파트의 기하면에 대한 핀구속 경계조건의 지정

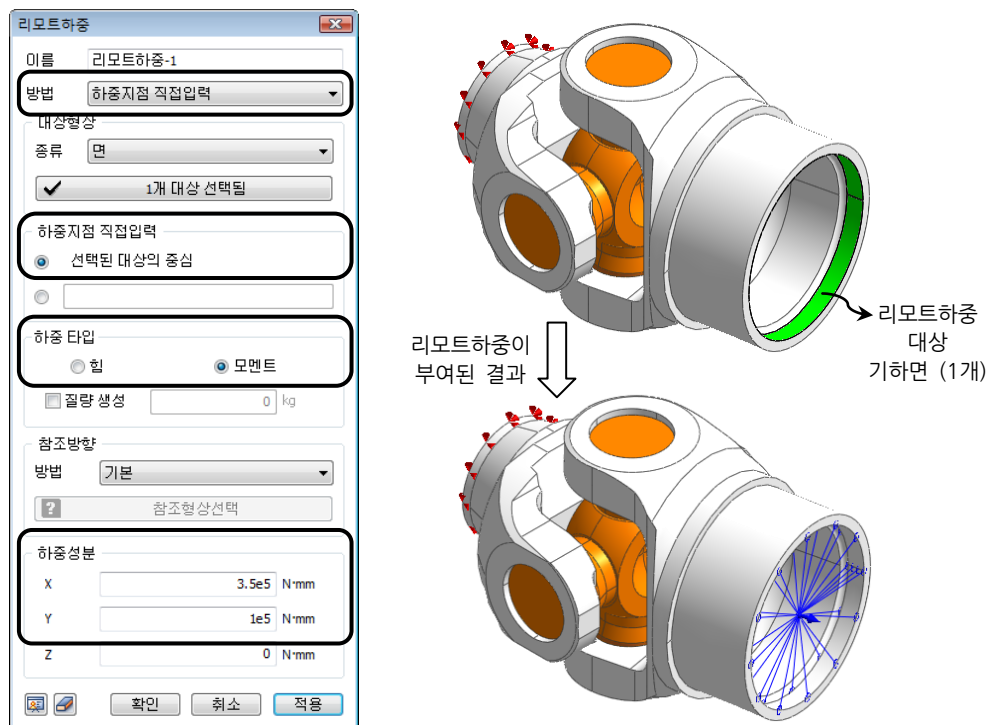
모든 해석조건 정의가 끝났으므로, 이제 선형정적 해석케이스를 만들고 해석을 수행합니다.

- (15) 작업트리에서 모델 및 해석결과 탭으로 변경하고, 〈해석케이스〉의 마우스 오른쪽 버튼 메뉴에서 〈선형정적해석〉을 선택하여 기본설정값을 갖는 선형정적 해석케이스를 만듭니다.²

¹ 작업화면의 시점을 회전시킬 때에는 Ctrl키를 누른 상태에서 마우스 오른쪽 버튼을 드래그합니다.

² 프로그램에 의해 만들어진 해석케이스의 이름은 작업트리에서 F2키를 눌러서 변경할 수 있습니다.

- (16) 만들어진 “선형 정적해석-1” 해석케이스를 선택하고, 마우스 오른쪽 버튼 메뉴에서 <해석실행>을 호출합니다.
- (17) 파일 저장 대화상자가 나타나면 <파일 이름>으로 “U Joint”라고 입력하고, <저장> 버튼을 클릭합니다.
- 해석을 위한 고차사면체 요소망이 자동으로 생성되고, 바로 솔버에 의한 해석이 수행됩니다.



〈그림 6〉 비틀림하중 재하를 위한 리모트하중의 지정

해석이 정상적으로 완료되면 **모델 및 해석결과** 작업트리의 해당 해석케이스 아래에 확인가능한 결과데이터들이 등록됩니다.

이제 마지막 단계로 결과를 확인합니다.

- (18) 먼저 변위결과와 변형형상을 확인합니다.

모델 및 해석결과 작업트리의 “선형 정적해석-1” 해석케이스 아래의 결과데이터에서 “**전체 변위 (V)**”를 더블클릭합니다.

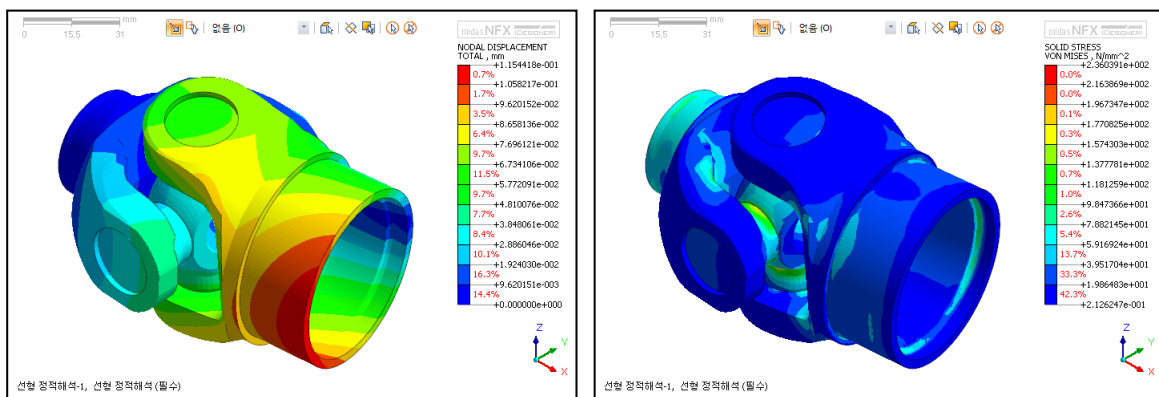
작업화면에 변위의 컨투어와 모델의 변형형상이 그려집니다. (〈그림 7〉 참고)

변형형상을 애니메이션으로 확인하고 싶으면 작업화면 하단의 애니메이션 도구모음에서 <▶ 재생> 버튼을 클릭합니다.

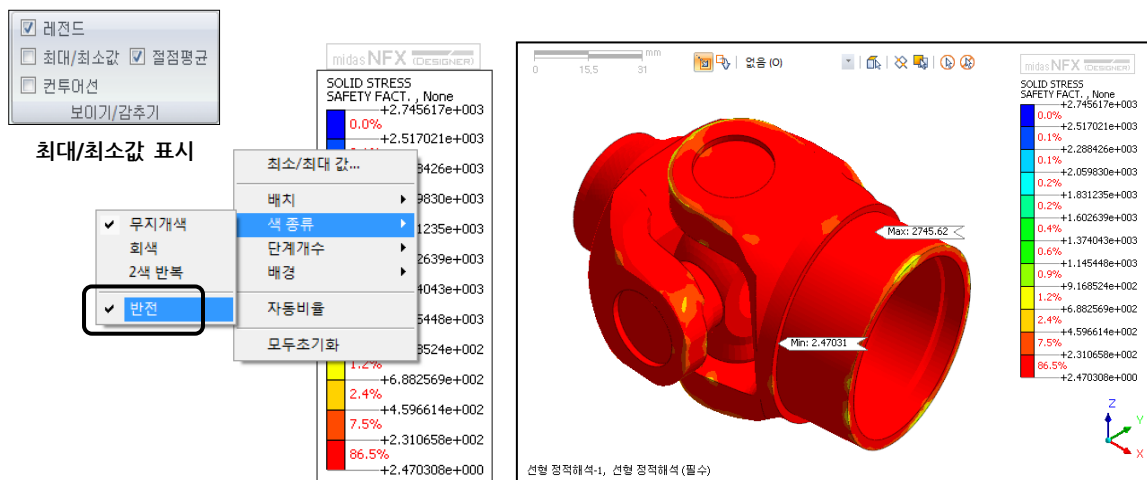
애니메이션을 확인한 후에는 <■정지> 버튼을 클릭하여 애니메이션을 멈춥니다.

- (19) 동일한 방법으로 결과데이터에서 “von-Mises 응력”을 더블클릭하여 응력 결과를 확인합니다.
- (20) 마지막으로 “안전율” 결과를 더블클릭하고 최소 안전율을 검토합니다.
안전율을 확인할 때에는 최소 안전율이 빨간색으로 그려지도록 컨투어 색상의 순서를 뒤집어 주는 것이 편리합니다. <그림 8>과 같이 작업하면 우측의 <레전드>에서 오른쪽 버튼을 클릭하고 <색 종류>에서 <반전> 메뉴를 선택합니다.
- (21) <해석 및 결과> 도구모음에서 <최대/최소값>을 체크하면 <그림 8>과 같이 최대/최소값의 발생위치에 태크로 표시할 수 있습니다.
- (22) 모든 결과확인이 완료되었으므로, (20)에서 지정한 레전드의 색상 순서 <반전> 메뉴를 다시 호출하여 색상 반전을 끕니다.

이상으로 선형정적해석 예제 <1>을 마칩니다.



<그림 7> 변위와 von Mises 응력의 결과 분포 컨투어

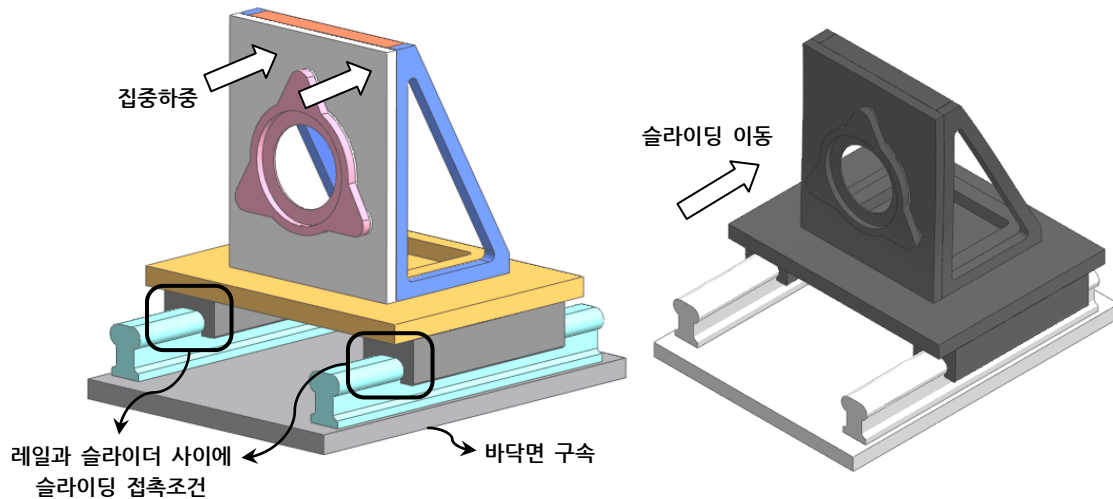


<그림 8> 안전율 결과 확인을 위한 레전드 색상의 반전과 최대/최소값 표시

B. 선형정적해석 예제 <2>

선형 슬라이딩 접촉을 이용하여 렌즈마운트(lens mount)의 레일 이동을 해석하는 예제입니다.

먼저 해석모델의 개요와 작업절차를 알아보겠습니다.



<그림 1> 렌즈마운트 해석모델과 슬라이딩 결과

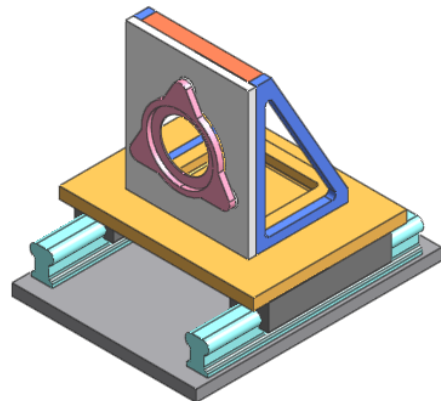
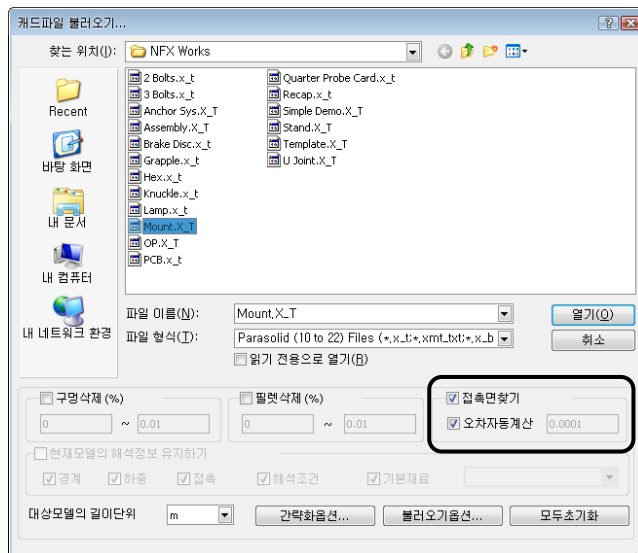
- 해석모델**
 11개의 파트로 구성된 어셈블리 모델이며 CAD 파일을 불러와서 해석작업을 수행합니다.
- 재질**
 이 예제는 선형정적해석에서 슬라이딩 접촉조건을 활용을 실습하기 위한 목적이므로, 재질은 별도로 정의/지정하지 않고 전체 파트에 대해 기본재질을 그대로 사용합니다.
- 하중 및 경계조건**
 상부가 레일을 따라 이동할 수 있도록 상부 앞면에 **집중하중**을 부여하고, 하부의 바닥면에는 **핀구속**을 부여합니다.
 <그림 1>의 왼쪽과 같이 상부의 슬라이더와 하부의 레일이 만나는 부위에는 **슬라이딩 접촉조건**을 부여하고, 나머지 접촉부위에는 자동접촉기능으로 정의된 **일체거동 접촉**을 그대로 사용합니다.
 일단 CAD 파일을 불러올 때 자동접촉기능으로 전체 접촉부위에 일체거동 접촉조건이 지정되도록 한 후, 슬라이더와 레일의 접촉정의에 대해 개별적으로 접촉종류를 슬라이딩 접촉으로 변경합니다.
- 결과분석**
 슬라이딩 접촉조건에 의한 거동을 보기 위하여 **변형형상** 결과를 확인합니다.
- 작업절차**
 이 예제의 작업절차는 다음과 같습니다.
 - ① CAD 파일을 불러옵니다.
 이때, 불러오기 대화상자에서 <접촉면찾기> 옵션을 체크하여 자동으로 접촉면을 검색하고

접촉조건을 정의하도록 합니다.

- ② 슬라이더와 레일의 접촉정의에 대해 접촉종류를 슬라이딩 접촉으로 변경합니다.
- ③ 상부 앞면에 집중하중을 부여하고, 하부 바닥면에 경계조건(핀구속)을 지정합니다.
- ④ 선형정적 해석케이스를 만들고, 해석을 수행합니다.
요소망은 해석수행시 프로그램이 자동으로 생성해 주는 것을 그대로 사용합니다.
- ⑤ 해석이 정상적으로 완료된 후, 애니메이션으로 슬라이딩 거동을 확인합니다.

첫번째 단계로 CAD 파일을 불러오고, 자동접촉정의 기능을 이용하여 일체거동 접촉조건을 지정합니다.

- (1) 바탕화면의 **midas NFX (Designer)** 아이콘(📁)을 더블클릭하여 프로그램을 실행합니다.
- (2) 프로그램의 가장 위쪽에 있는 기본 도구모음에서 세번째 위치한 <캐드파일 불러오기> 아이콘(📁)을 클릭합니다.
- (3) <그림 2>를 참고하여 <캐드파일 불러오기> 대화상자에서 <파일 형식>을 “Parasolid (10 to 22) Files”로 지정하고, “Mount.x_t” 파일을 선택합니다.¹
대화상자에서 <접촉면 찾기> 체크박스를 체크하여 프로그램이 자동으로 접촉면을 검색하여 정의하도록 합니다. 자동 검색/등록되는 접촉쌍은 기본적으로 “일체거동” 접촉조건으로 정의됩니다.
- (4) 새로운 문서가 열리면서 <그림 2>와 같이 해석을 수행할 렌즈마운트 모델이 들어옵니다.

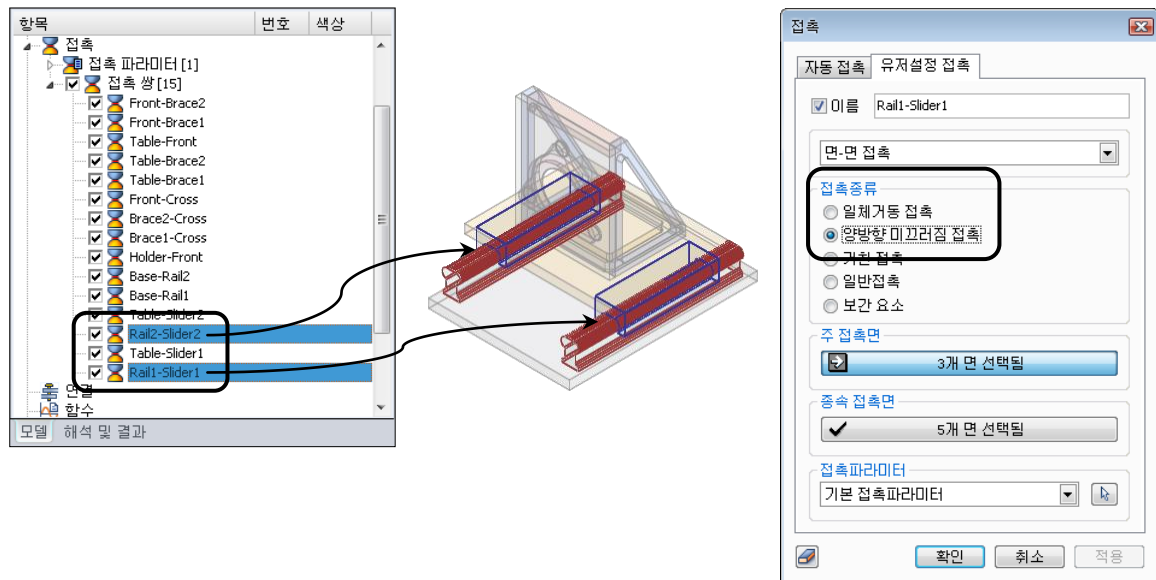


<그림 2> <캐드파일 불러오기> 대화상자와 불러들인 Mount 기하모델

¹ “Mount.x_t” 파일은 midas NFX 기술지원사이트(www.NFX.co.kr)의 기술자료 페이지에서 다운로드합니다.

자동접촉 검색/등록된 접촉정의 중에 좌/우 레일과 슬라이더, 2개의 접촉쌍을 찾아서 접촉종류를 슬라이딩 접촉으로 변경합니다.

- (5) <그림 3>과 같이 모델 작업트리 <접촉>의 <접촉 쌍>을 펼치면, 프로그램에 의해 자동 정의된 15개의 접촉쌍이 등록된 것을 확인할 수 있습니다. 이중에서 “Rail1-Slider1”을 찾아서 클릭하면 작업화면에서 해당 접촉쌍이 정의된 면(오른쪽 레일과 슬라이더의 접촉면)을 그래픽으로 확인할 수 있습니다.
- (6) <접촉 쌍>의 “Rail1-Slider1”에서 마우스 오른쪽 버튼을 클릭하여 <편집> 메뉴를 호출합니다. <접촉> 대화상자에서 <접촉종류>를 두번째 “양방향 미끄러짐 접촉”으로 변경하고, <확인> 버튼을 클릭합니다.
- (7) 접촉쌍 “Rail1-Slider1”에 대해서도 (5), (6)의 과정을 반복하여 “양방향 미끄러짐 접촉”으로 변경합니다.



<그림 3> 레일-슬라이더 접촉정의의 변경 (일체거동→양방향 미끄러짐)

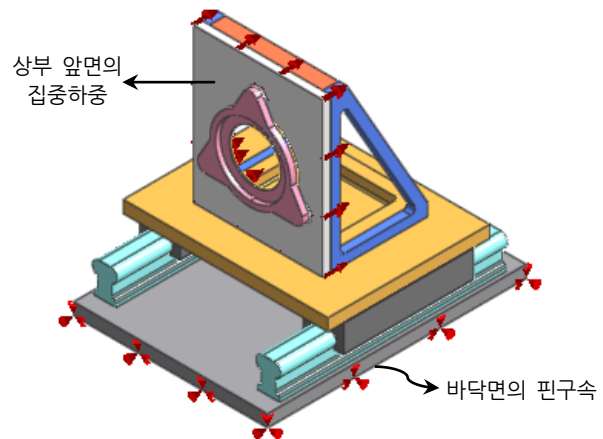
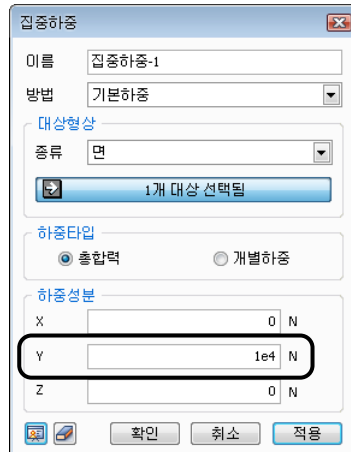
다음은 세번째 단계로 하중과 경계조건을 지정합니다.

- (8) 먼저 경계조건으로 하부의 바닥면에 핀구속을 지정합니다.
선택필터를 “면 (F)”으로 변경하고, 작업화면에서 하부 바닥면을 선택하고, 마우스 오른쪽 버튼 메뉴에서 <경계조건>의 <핀구속>을 선택합니다.¹ (<그림 4> 참고)
- (9) 그리고, 상부의 앞면에 집중하중을 부여합니다.

¹ 기하면에 대한 핀구속의 지정 방법은 <선형정적해석 예제 <1>>에 상세하게 설명되어 있습니다.

〈그림 4〉을 참고하여 상부 앞면을 선택하고, 마우스 오른쪽 버튼 메뉴에서 〈정적하중〉의 〈집중하중〉을 선택합니다.

〈집중하중〉 대화상자의 〈하중성분〉에서 “Y”에 $1e4$ 를 입력한 후, 〈확인〉 버튼을 클릭합니다.



〈그림 4〉 하중과 경계조건의 지정

모든 해석조건의 정의가 끝났으므로, 선형정적 해석케이스를 만들고 해석을 수행합니다.

- (10) 작업트리에서 **모델 및 해석결과** 탭으로 변경하고, 〈해석케이스〉의 마우스 오른쪽 버튼 메뉴에서 〈선형 정적해석〉을 선택하여 기본설정값을 갖는 선형정적 해석케이스를 만듭니다.
- (11) 만들어진 “선형 정적해석-1” 해석케이스를 선택하고, 마우스 오른쪽 버튼 메뉴에서 〈해석실행〉을 호출합니다.
- (12) 파일 저장 대화상자가 나타나면 〈파일 이름〉으로 “Mount”라고 입력하고, 〈저장〉 버튼을 클릭합니다.

해석을 위한 고차사면체 요소망이 자동으로 생성되고, 바로 솔버에 의한 해석이 수행됩니다.

해석이 정상적으로 완료되면 **모델 및 해석결과** 작업트리의 해당 해석케이스 아래에 확인가능한 결과데이터들이 등록됩니다.

이제 마지막 단계로 결과를 확인합니다.

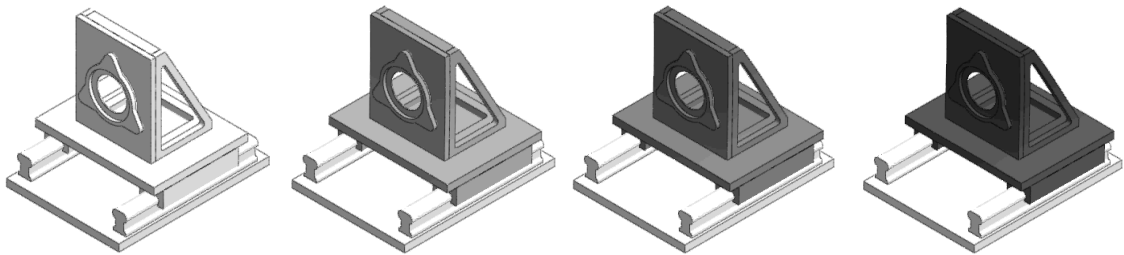
- (13) 변위결과와 변형형상 결과로 슬라이딩 거동을 확인합니다.
모델 및 해석결과 작업트리의 “선형 정적해석-1” 해석케이스 아래의 결과데이터에서 “전체 변위 (V)”를 더블클릭합니다.

작업화면에 변위의 컨투어와 모델의 변형형상이 그려집니다. (〈그림 5〉 참고)

슬라이딩 거동을 애니메이션으로 확인하기 위하여 작업화면 하단의 애니메이션 도구모음에서 <▶재생> 버튼을 클릭합니다.

애니메이션을 확인한 후에는 <■정지> 버튼을 클릭하여 애니메이션을 멈춥니다.

이상으로 선형정적해석 예제 <2>를 마칩니다.



〈그림 5〉 애니메이션으로 슬라이딩 거동 확인