

이동참조 프레임

MRF(Moving Reference Frame)

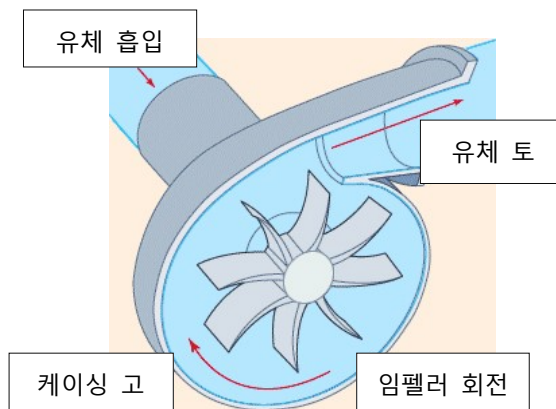
1. Abstract

이동참조 프레임은 회전체의 해석을 정상상태로 해석하기 위해 사용합니다. 이동참조 프레임을 사용하면 펌프나 송풍기(팬)의 성능 평가 시 효율적으로 분석할 수 있습니다. 사용방법은 특성정의에서 활성화 시키고, 벽면이동조건에서 회전벽면을 정의하여 사용할 수 있습니다.

2. Technology 배경

2-1. 회전체 해석

그림 1 과 같이 펌프는 임펠러 회전에 의해 유체에 힘을 전달합니다. 하지만 임펠러 이외의 부품은 정지해 있는 상태입니다. 특별한 방법을 적용하지 않고 이 상태를 해석하려고 하면 요소망이 뒤틀리거나 겹치게 됩니다. 유동해석에서는 이를 해결하기 위해 여러 가지 방법들이 개발 되었습니다. 가장 많이 사용되는 방법은 슬라이딩 메쉬 기법과 이동참조 프레임 기법 입니다.



[그림 1] 회전 유체기계 해석조건

2-2. 슬라이딩 메쉬(Sliding Mesh) 기법



펌프나 팬의 주기성 해석을 위해서는 슬라이딩 기법을 사용해야 합니다.

슬라이딩 기법은 회전하는 임펠러 주변의 요소망을 분리하여 시간에 따라 요소망을 실제로 회전시키는 기법입니다. 이 때 물리량의 전달은 접촉조건을 통해

전달됩니다. 슬라이딩 기법을 사용하면 외부의 영향을 반영할 수 있지만, 과도해석을 진행해야 하기 때문에 해석시간이 오래 걸리고 효율이나 토크 등의 평균값을 얻기 위해 추가적인 처리가 필요합니다.

2-3. 이동참조 프레임(Moving Reference Frame) 기법

이동참조 프레임 기법은 그림 2 와 같이 임펠러를 회전시키는 대신에 회전구간의 유체에 반대방향 속도성분을 부여합니다. 상대속도 측면에서 본다면 동일한 조건이 됩니다. 자동차 풍동 실험과 같은 원리라고 생각하면 됩니다. 자동차 풍동 실험에서도 자동차의 저항계수를 구하기 위해 자동차는 정지해 있는 상태에서 정면에 자동차 주행시의 바람을 불어줍니다. 물론 정확한 해석을 위해서는 원심력이나 코리올리 가속도에 1 대한 부분을 추가적으로 방정식에 적용해 주어야 하며 midas NFX CFD 는 이를 반영하고 있습니다.

1 회전 좌표계에 대하여 상대속도로 운동하고 있는 물체가 갖는 실제적인 가속도를 말합니다. 회전 좌표계에 대한 상대 속도와 고정 좌표계에 대한 구심 가속도를 합하여 고정좌표계에 대한 가속도를 알 수 있습니다.

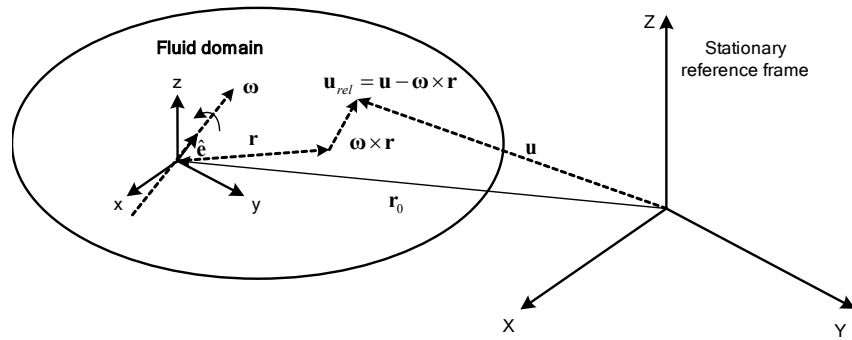


[그림 2] 이동참조 프레임의 원리

3. Technology 이론 소개

3-1. 이동 좌표계

이동 좌표계를 정지 좌표계에 대해서 그림 3 과 같이 나타낼 수 있습니다. 그림에서 XYZ 는 정지 좌표계(stationary reference frame)이고, xyz 는 이동 좌표계를 나타냅니다. 이동 좌표계의 움직임은 직선운동(translational motion)과 회전운동(rotational motion)을 나타내는 ω 를 통해 정의합니다.



[그림 3] 이동하는 유체에서의 정지 좌표계와 이동 좌표계

midas NFX CFD에서는 이동좌표계의 직선운동을 고려하지 않습니다. 이동 좌표계의 회전속도(rotational velocity) ω 는 회전축(rotating axis)을 나타내는 단위벡터(unit vector) $\hat{e}$ 와 회전속도의 크기 ω 의 곱으로 나타낼 수 있습니다.

$$\omega = \omega \hat{e} \quad (3.1.1)$$

상대속도(relative velocity)는 이동 좌표계에서의 속도이고 절대속도(absolute velocity) $\mathbf{u}$ 와 다음과 같은 관계로 정의됩니다.

$$\mathbf{u}_{rel} = \mathbf{u} - \omega \times \mathbf{r} \quad (3.1.2)$$

$\mathbf{u}_{rel}$: 상대속도
 $\mathbf{r}$: 이동 좌표계에서의 위치벡터

상대속도를 지배방정식에 대입하여 이동 좌표계에서의 식을 구할 수 있습니다. 이동 좌표계에서 회전만 고려될 경우, 질량보존 방정식에서는 각각의 회전성분이 소거됩니다. 따라서 이동 좌표계에서의 질량보존 방정식은 회전이 고려되지 않은 식과 같아집니다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_{i,rel}}{\partial x_i} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1.3)$$

$u_{i,rel}$: i 방향 상대속도

운동량보존 방정식에 회전속도를 대입하여 정리하면 회전력이 반영된 다음 식을 구할 수 있습니다.

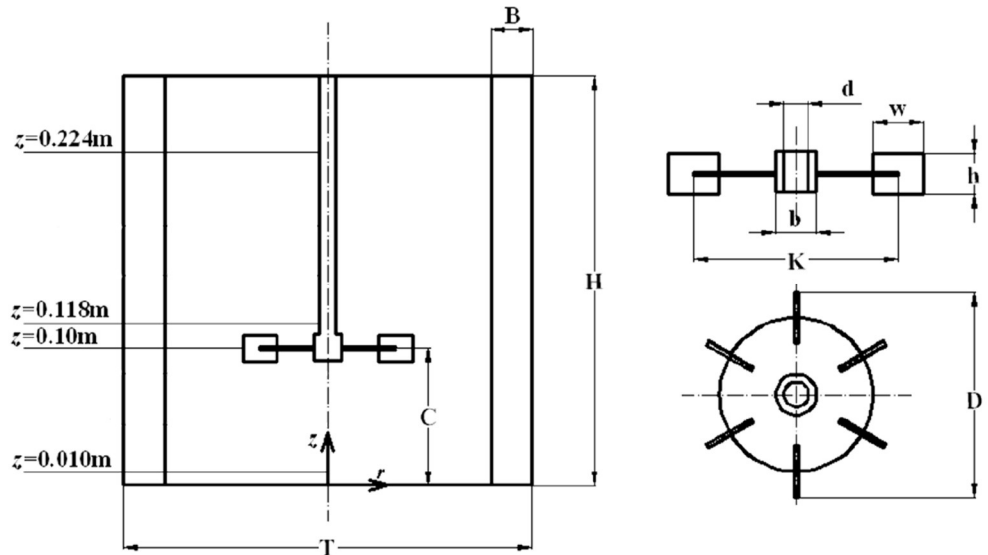
$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + u_{i,rel} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho b_j + \mu \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_i} + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \rho (\omega \times \mathbf{u})_j \quad (3.1.4)$$

$\rho (\omega \times \mathbf{u})_j$: j 방향 회전력

4. Technology 사용법

4-1. 예제 설명

예제는 교반기(Mixer) 모델이며 형상은 다음과 같습니다.



구분	T	H	D	B	K	b	d	w	h
크기(m)	0.3	0.3	0.1	0.03	0.075	0.02	0.012	0.025	0.02



교반기의 해석은 슬라이딩 메쉬 기법으로도 해석 가능합니다. 하지만 평균적인 교반기의 성능을 빠르게 파악하기 위해서는 MRF기법을 추천합니다.

해석목적은 다음과 같습니다.

- 교반기 내부 유동 특성 파악
- 배플 효과 검토
- 임펠러에 의한 혼합 효과 확인

해석조건은 다음과 같습니다.

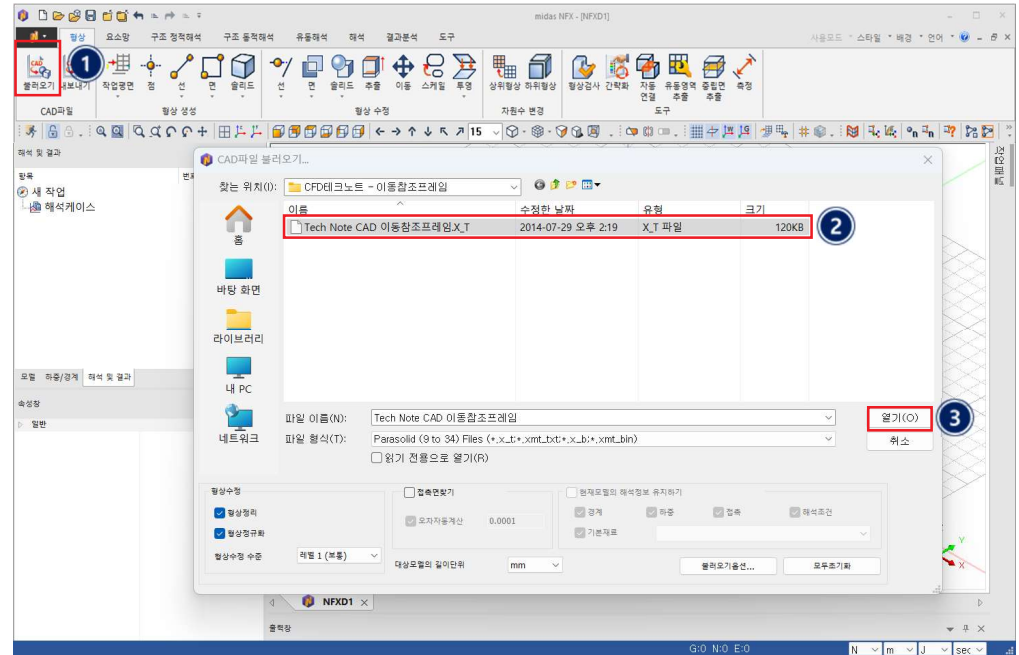
- 밀도 : $998.2kg/m^3$
- 점성 : $0.00089kg/m\cdot s$
- 회전속도 : 250rpm

본 예제는 정기교육을 이수하신 분을 기준으로 작성되었습니다.

4-2. 예제 따라하기

4-2-1. 기하형상 제작

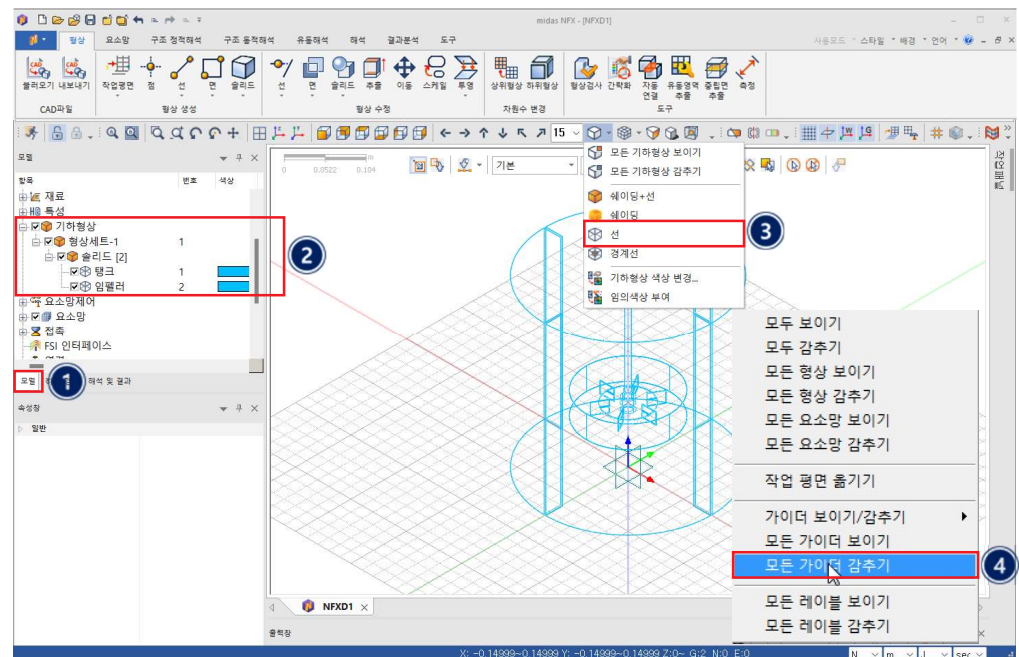
- ① "형상"탭 > "CAD 파일"리본메뉴 > "불러오기"를 클릭합니다.
- ② 배포된 "Tech Note CAD 이동참조프레임.X_T" 파일을 선택합니다.
- ③ "열기"를 클릭합니다.



- ① "모델"창으로 이동합니다.
- ② "기하형상"트리를 열어 솔리드 형상이 2 개인지 확인합니다.
- ③ "보기모드(기하형상)"을 "선"으로 선택합니다.
- ④ 작업화면 마우스 우클릭 > "모든 가이드 감추기"를 클릭합니다.

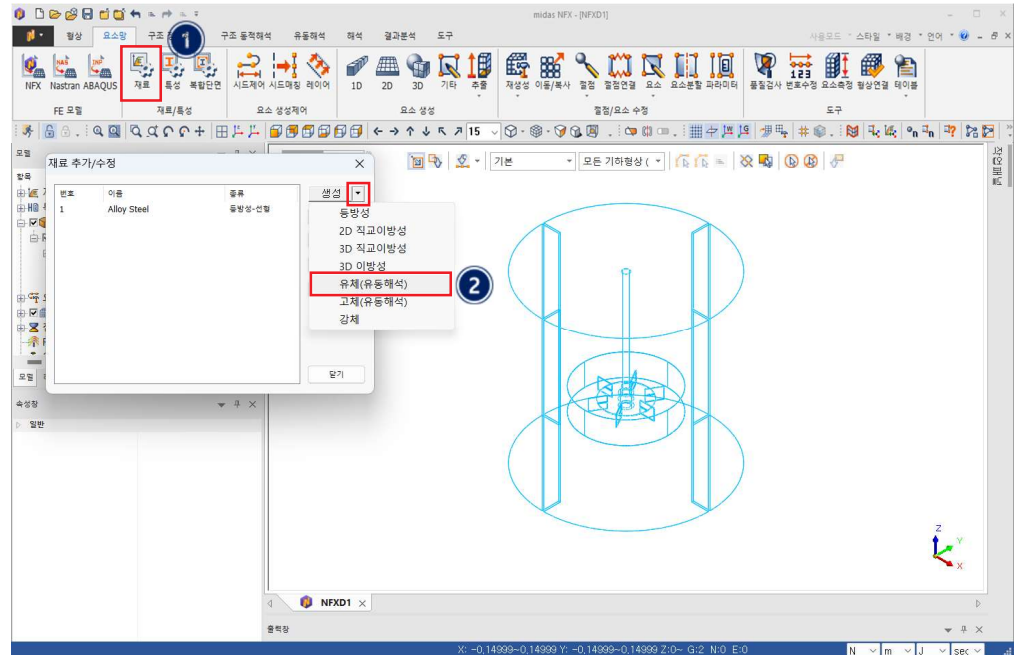


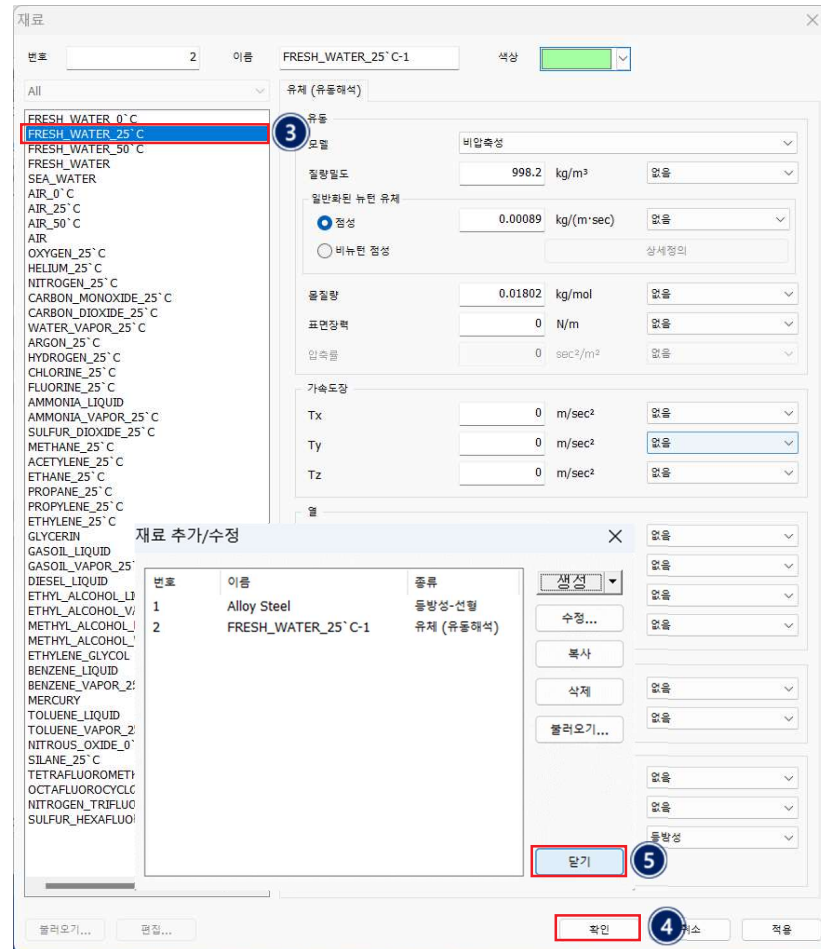
이동참조 프레임 해석 시에는 회전하는 임펠러 주변영역과 정지해 있는 영역을 구분하여 유동체적을 생성하여야 합니다.



4-2-2. 재료·특성 정의

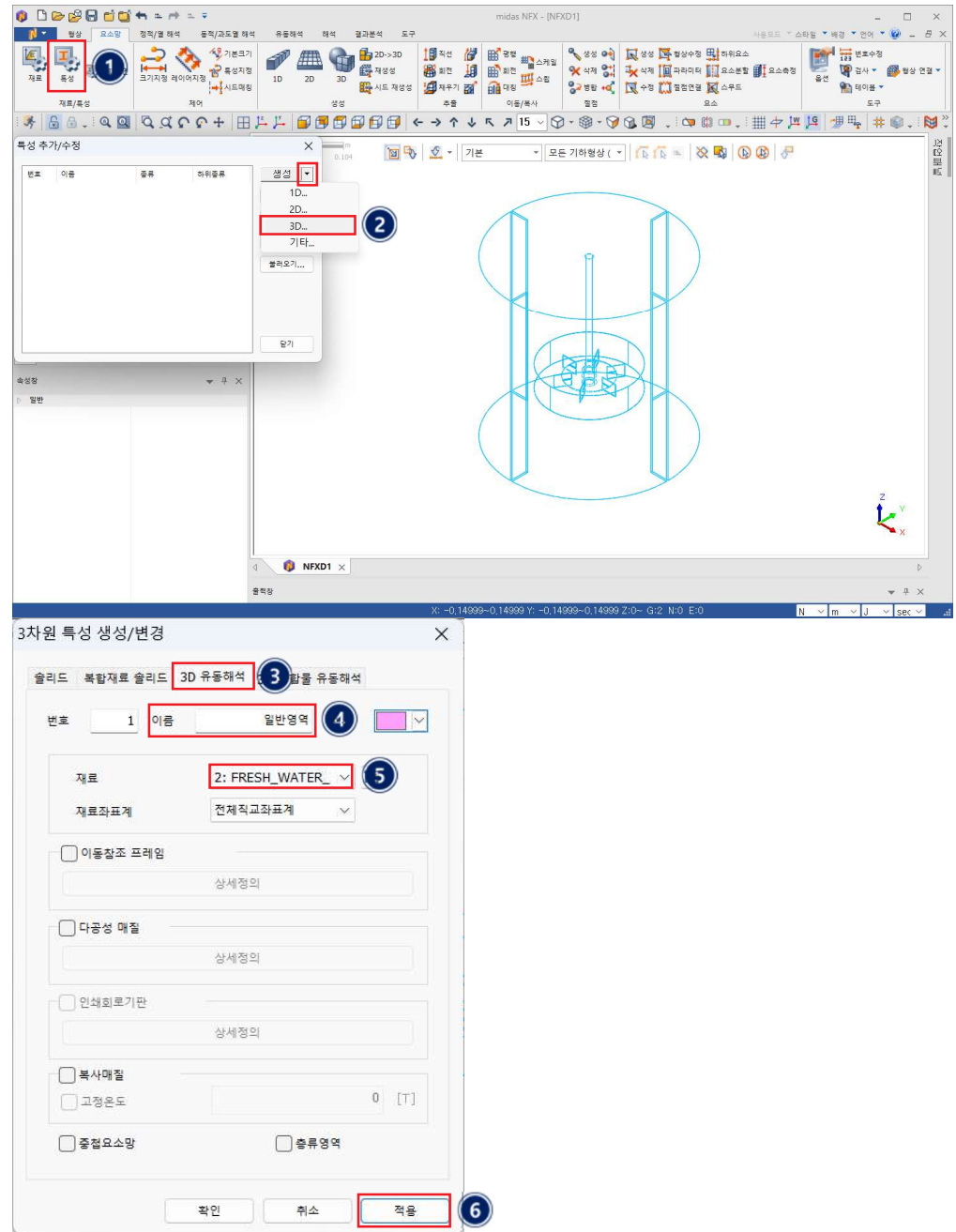
- ① "요소망"탭 > "재료/특성"리본메뉴 > "재료"를 클릭합니다.
- ② "생성"옆 화살표 클릭 > "유체(유동해석)"을 선택합니다.
- ③ "FRESH_WATER_25'C"를 선택합니다.
- ④ "확인"을 클릭합니다.
- ⑤ "닫기"를 클릭합니다.





특성 정의하기(일반영역)

- ① "요소망" 탭 > "재료/특성" 리본메뉴 > "특성"을 클릭합니다.
- ② "생성" 옆 화살표 클릭 > "3D..."을 선택합니다.
- ③ "3D 유동해석" 탭을 선택합니다.
- ④ 이름에 "일반영역"을 입력합니다.
- ⑤ 재료를 "2:FRESH_WATER_25°C"로 선택합니다.
- ⑥ "적용"을 클릭합니다.

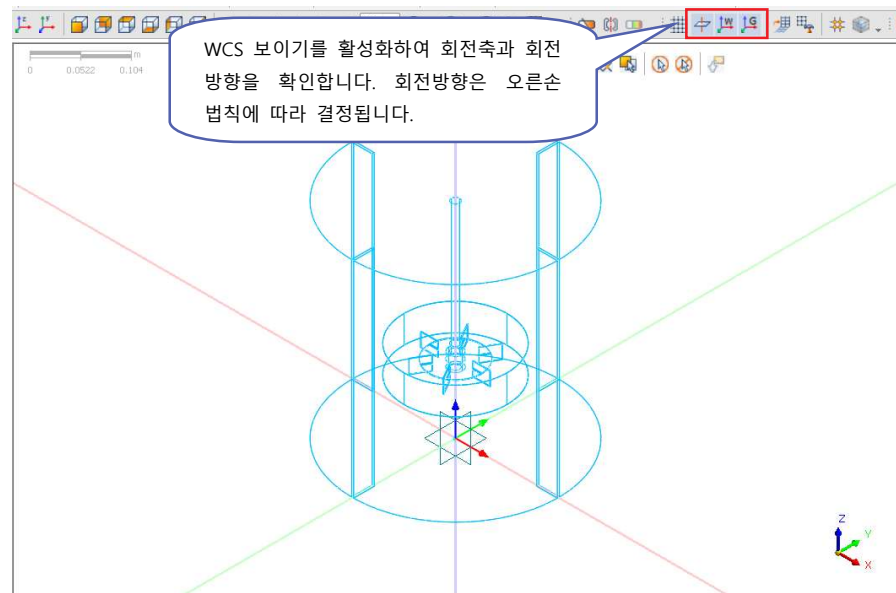


특성 정의하기(MRF 영역)

- ① 이름에 "MRF 영역"을 입력합니다.
- ② 재료를 "2:FRESH_WATER_25'C"로 선택합니다.
- ③ "이동참조 프레임"을 체크합니다.
- ④ "상세정의"를 클릭합니다.
- ⑤ 회전축의 원점 "0,0,0"과 방향 "0,0,1"을 입력합니다.
- ⑥ RPM 을 선택하고 "각속도"에 "250"RPM 을 입력합니다.
- ⑦ 이동참조 프레임 창의 "확인"을 클릭합니다.
- ⑧ "3 차원 특성 생성/변경" 창의 "확인"을 클릭합니다.



모델의 회전축을 주축(x,y,z)과 일치 시키는 것이 편리합니다.

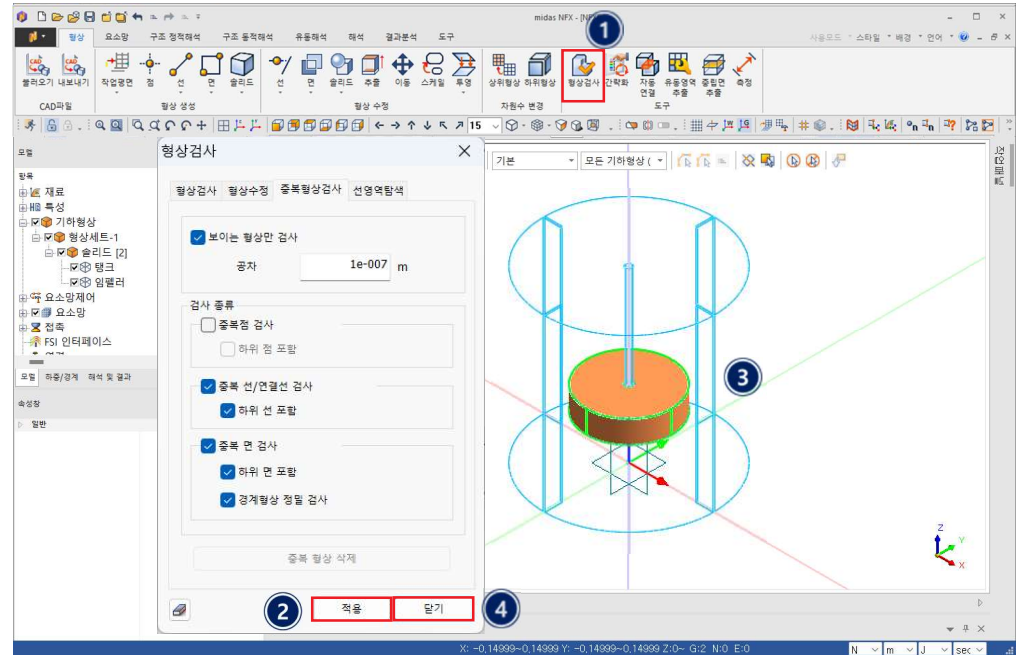


4-2-3. 인접 조건 설정

- ① "형상"탭 > "도구"리본메뉴 > "형상검사" > "중복형상검사"를 클릭합니다.
- ② "적용"을 클릭합니다.
- ③ 분리된 유체부분이 중복형상으로 나오는지 확인합니다.
- ④ "닫기"를 클릭합니다.

TIP

외부 CAD에서 유체를 분리한 경우 중복형상으로 나타나지 않을 수 있습니다. 이런 경우에는 "도구" 리본메뉴 > "자동연결"을 선택하여 중복면을 생성합니다.

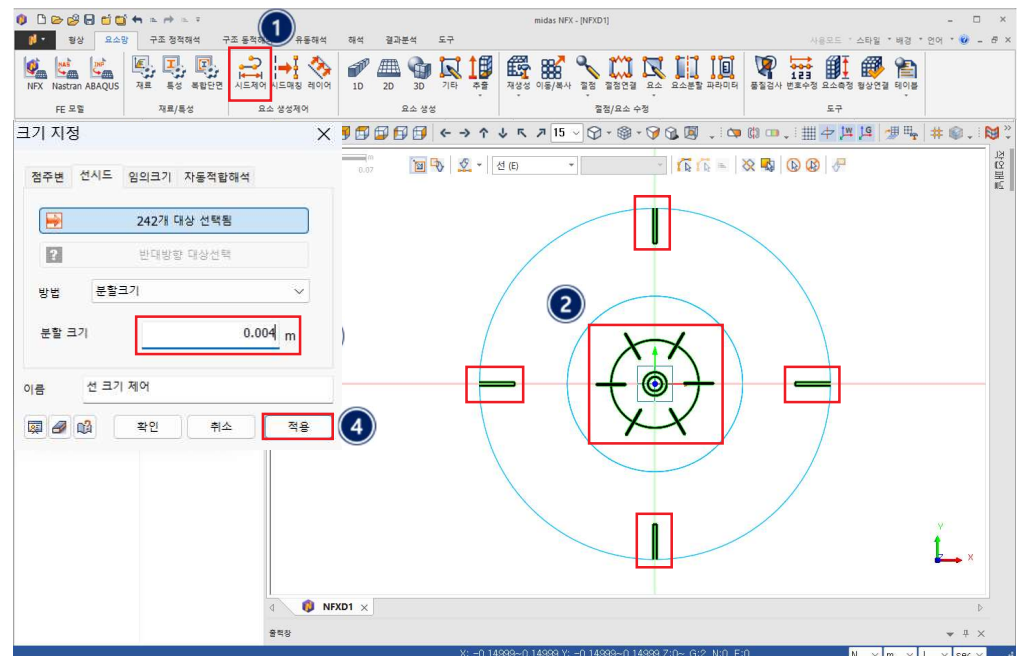


4-2-4. 요소망 생성

- ① "요소망"탭 > "요소 생성제어"리본메뉴 > "시드제어"를 클릭합니다.
- ② 임펠러와 배플을 드래그하여 선택합니다.
- ③ "분할크기"를 "0.004"로 입력합니다.
- ④ "적용"을 클릭합니다.

TIP

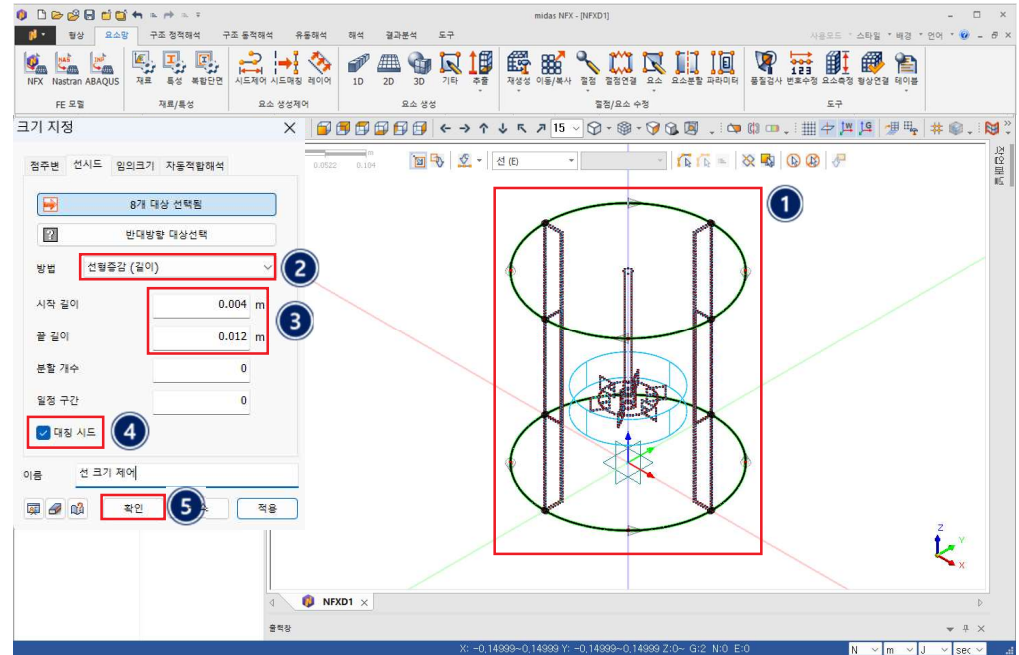
유동장이 복잡할 것으로 예상되는 임펠러와 배플 주변에 요소망을 집중시켜 줍니다. 실무모델 적용 시에는 요소크기를 좀 더 작게 입력하는 것을 추천합니다.



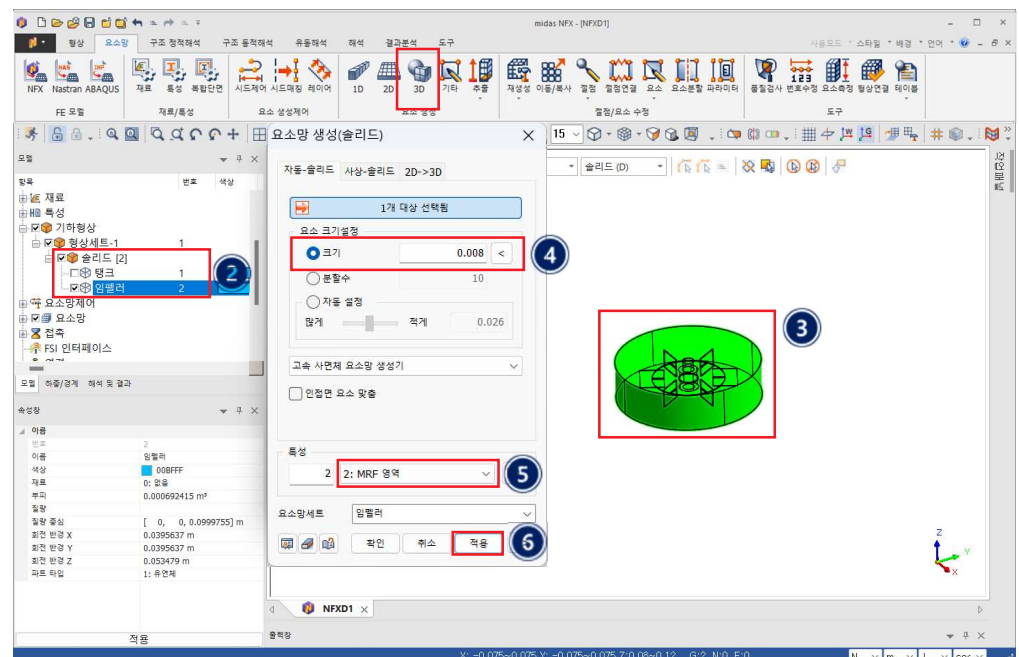
TIP

선형증감(길이) 등의 기능을 이용하여 요소망의 크기가 자연스럽게 증가되도록 하여야 계산이 안정적으로 진행됩니다.

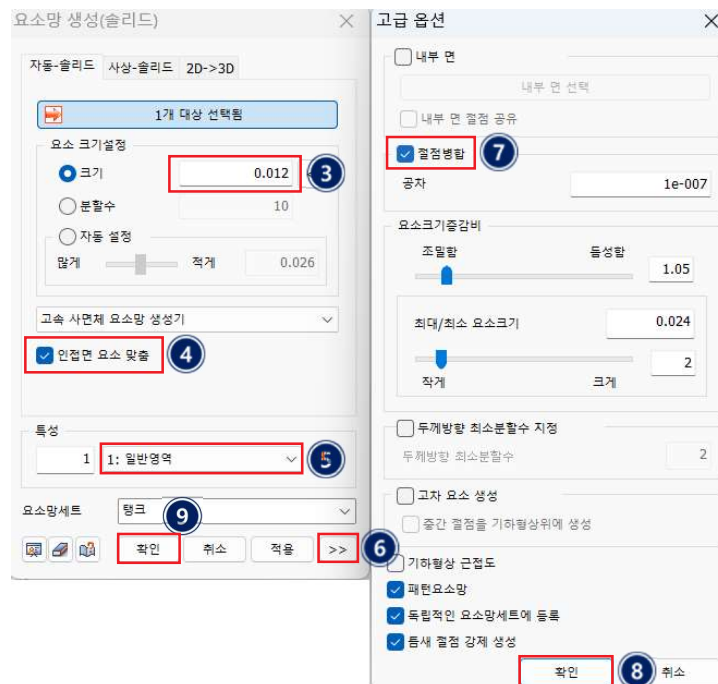
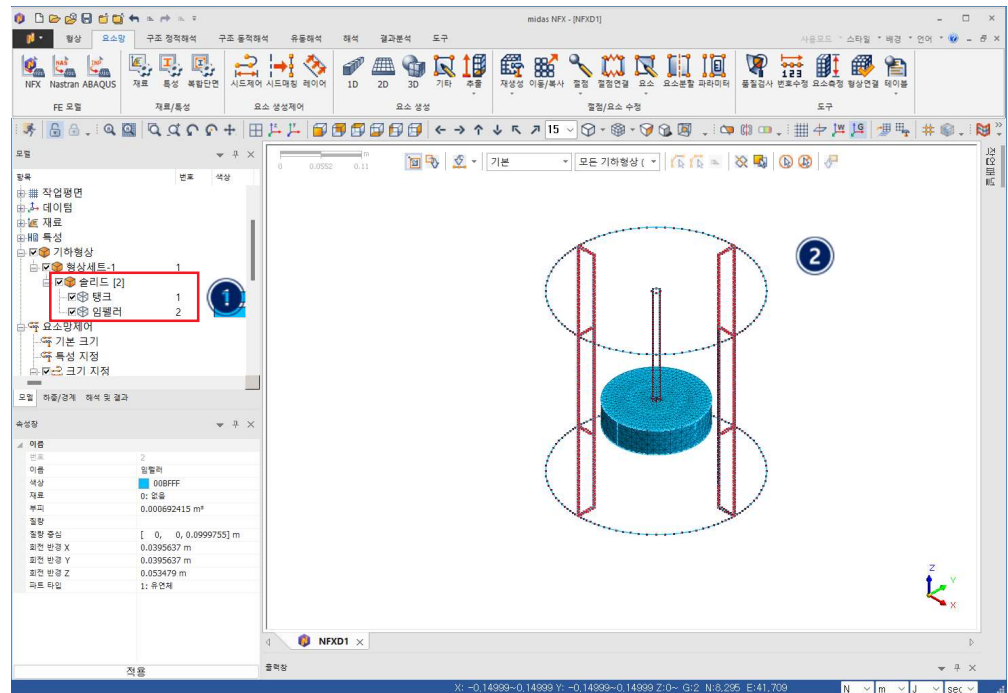
- ① 실린더 외곽선을 선택합니다.
- ② 방법을 "선형증감(길이)"로 변경합니다.
- ③ "시작길이"에 "0.004"를, "끝 길이"에 "0.012"를 입력합니다.
- ④ "대칭시드"를 체크합니다.
- ⑤ "확인"을 클릭합니다.



- ① "요소망"탭 > "생성"리본메뉴 > "3D"를 클릭합니다.
- ② "모델"창 > "기하형상"트리에서 임펠러 솔리드만 체크합니다.
- ③ 임펠러 솔리드를 선택합니다.
- ④ "크기"를 "0.008"로 입력합니다.
- ⑤ "특성"을 "MRF 영역"으로 선택합니다.
- ⑥ "적용"을 클릭합니다.

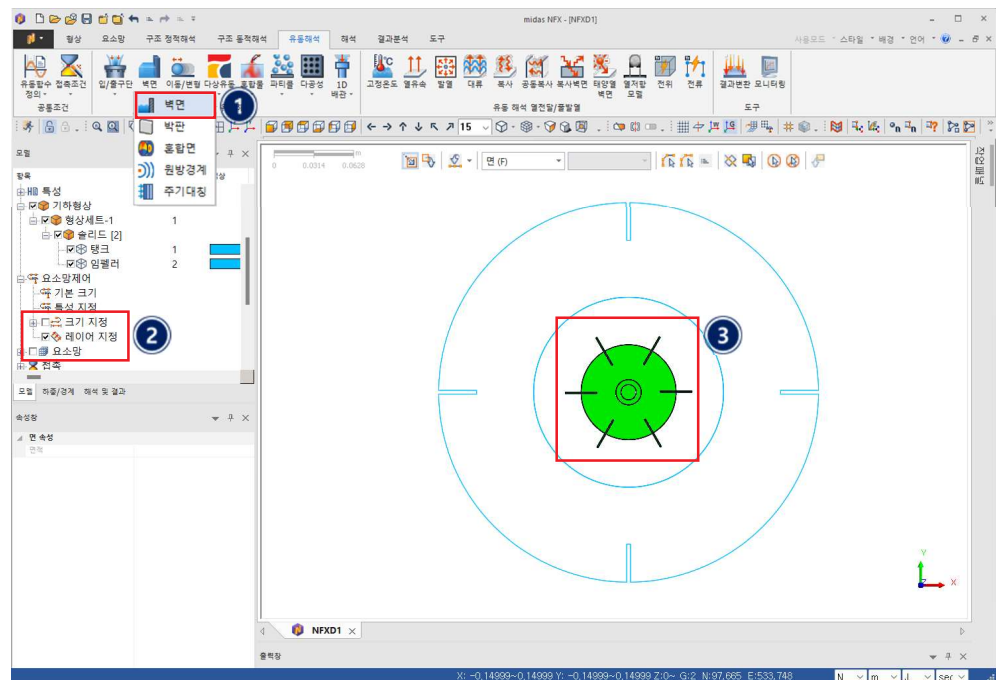


- ① "모델"창 > "기하형상"트리에서 탱크를 체크합니다.
- ② 탱크 솔리드를 선택합니다.
- ③ "크기"를 "0.012"로 입력합니다.
- ④ "인접면 요소 맞춤"을 체크합니다.
- ⑤ "특성"을 "일반영역"으로 선택합니다.
- ⑥ ">>"를 클릭합니다.
- ⑦ "절점병합"을 체크합니다.
- ⑧ "확인"을 클릭합니다.
- ⑨ "확인"을 클릭합니다.



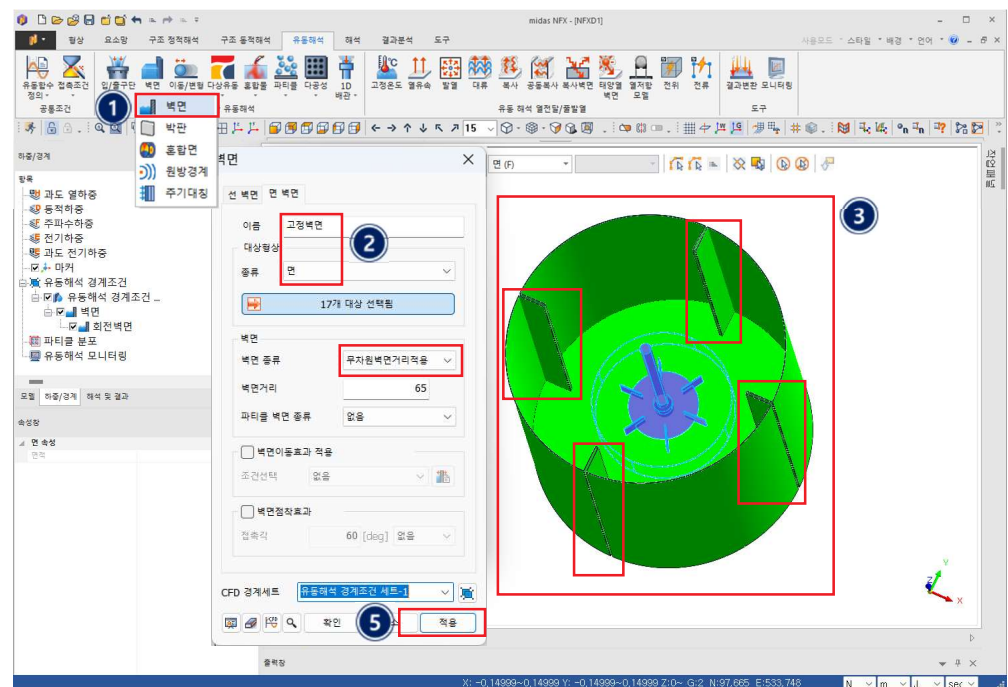
4-2-5. 경계 조건 입력

- ① "유동해석"탭 > "일반 유동해석"리본메뉴 > "벽면" > "벽면"을 클릭합니다.
- ② "요소망"과 "요소망 제어"의 "크기 지정"을 체크 해제합니다.
- ③ 회전하는 벽면을 드래그하여 선택합니다.
- ④ "이름"을 "회전벽면"으로 입력하고 "종류"를 "면"으로 선택합니다.
- ⑤ "벽면종류"를 "무차원벽면거리적용"으로 선택합니다.
- ⑥ "벽면이동적용"을 체크합니다.
- ⑦ "벽면이동정의"를 클릭합니다.
- ⑧ "생성"을 클릭합니다.
- ⑨ "벽면 이동 효과"탭을 선택하고 "회전 이동"을 체크합니다.
- ⑩ "원점"에 "0,0,0"을, "방향"에 "0,0,1"을 입력합니다.
- ⑪ "각속도"에 "250"RPM 을 입력하고 "확인"을 클릭합니다.
- ⑫ "닫기"를 클릭합니다.
- ⑬ "조건선택"을 "조건선택-1"로 선택합니다.
- ⑭ "확인"을 클릭합니다.

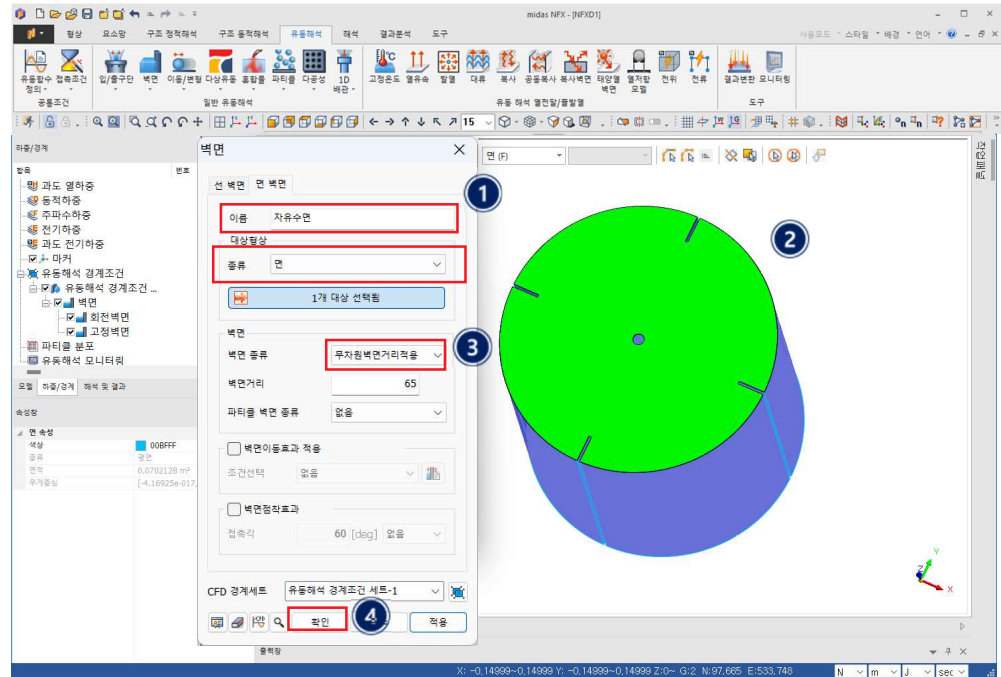




- ① "유동해석"탭 > "일반 유동해석"리본메뉴 > "벽면" > "벽면"을 클릭합니다.
- ② "이름"을 "고정벽면"으로 입력하고 "종류"를 "면"으로 선택합니다.
- ③ 배플과 탱크의 옆면, 밑면을 선택합니다.
- ④ "벽면종류"를 "무차원벽면거리적용"으로 선택합니다.
- ⑤ "적용"을 클릭합니다.

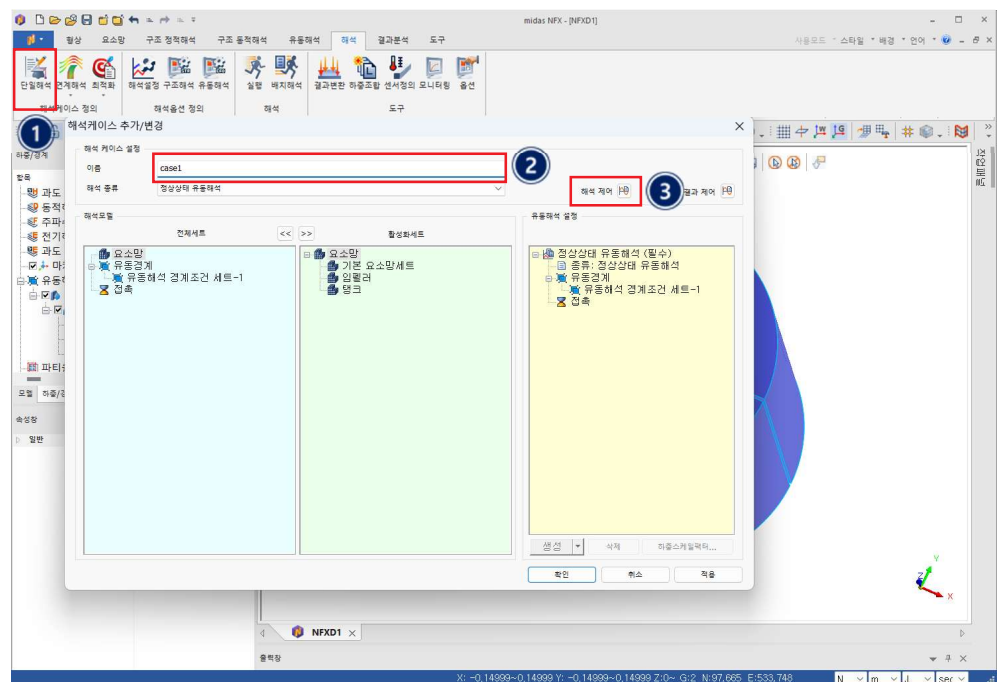


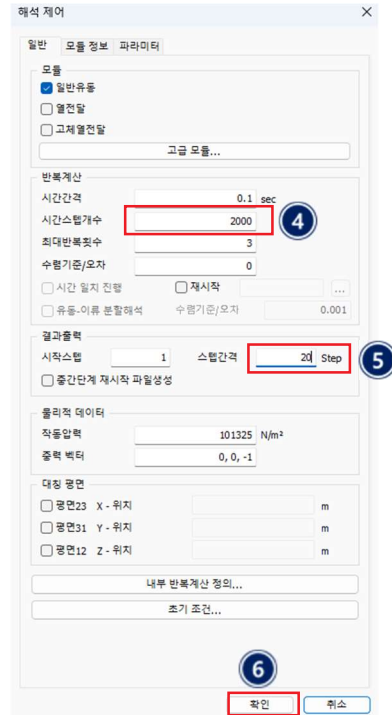
- ① "이름"을 "자유수면"으로 입력하고 "종류"를 "면"으로 선택합니다.
- ② 윗면을 선택합니다.
- ③ "벽면종류"를 "무차원벽면거리적용"으로 선택합니다.
- ④ "확인"을 클릭합니다.



4-2-6. 해석 케이스 정의

- ① "해석"탭 > "해석케이스 정의" 리본메뉴 > "단일해석"을 클릭합니다.
- ② "이름"에 "CASE1"을 입력, "해석종류"에 "정상상태 유동해석"을 입력합니다.
- ③ "해석제어"를 클릭합니다.
- ④ "시간스텝개수"에 "2000"을 입력합니다.
- ⑤ "결과출력"의 "스텝간격"에 "20"을 입력합니다.
- ⑥ "확인"을 클릭합니다.





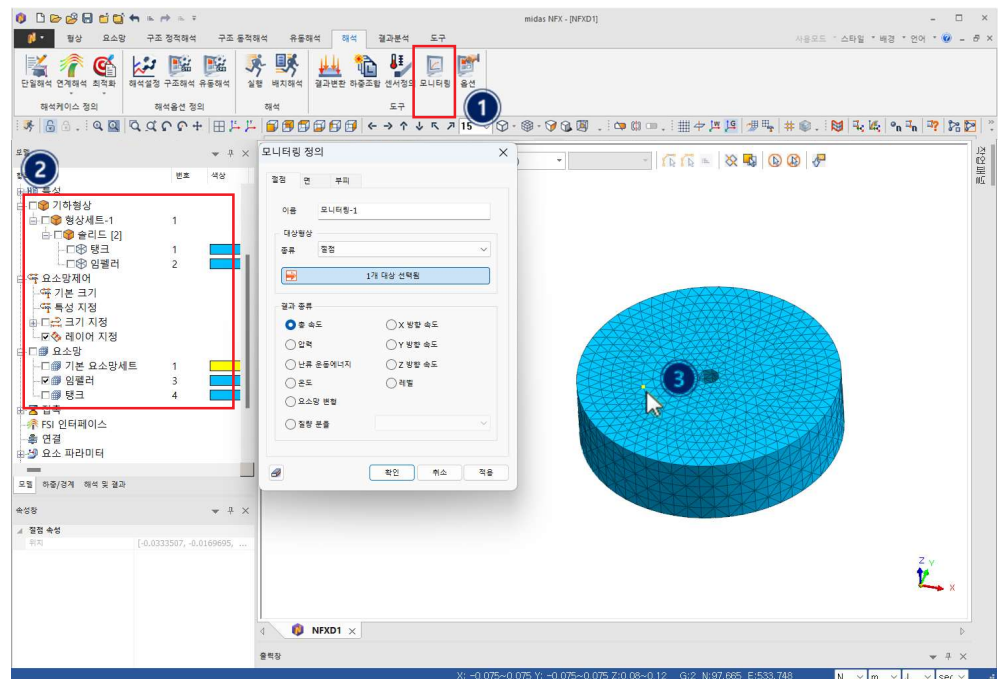
4-2-7. 계산 실행

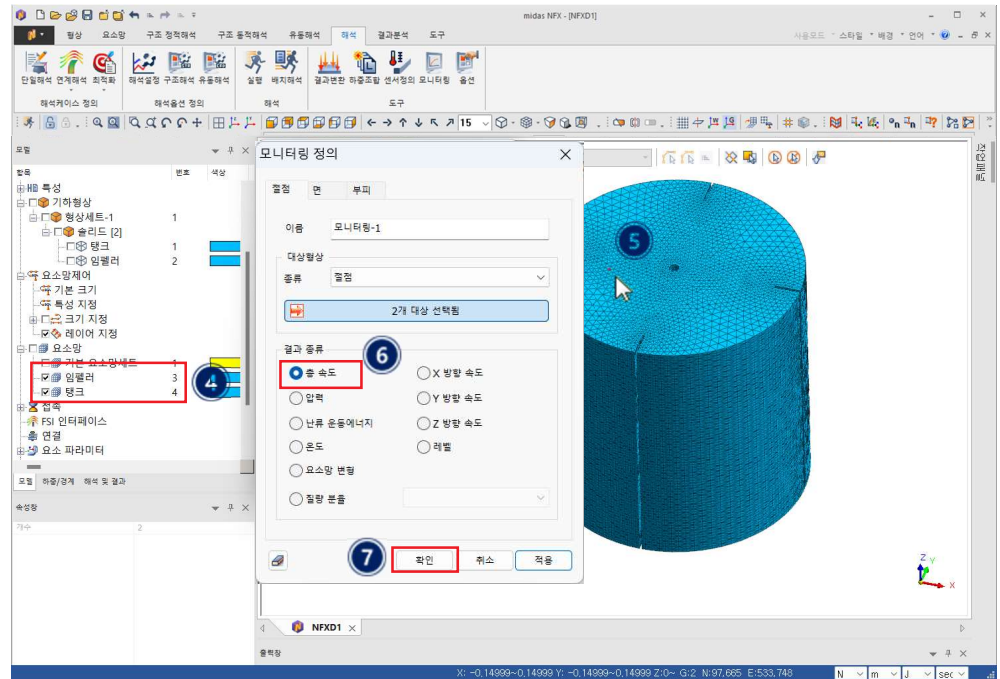


TIP

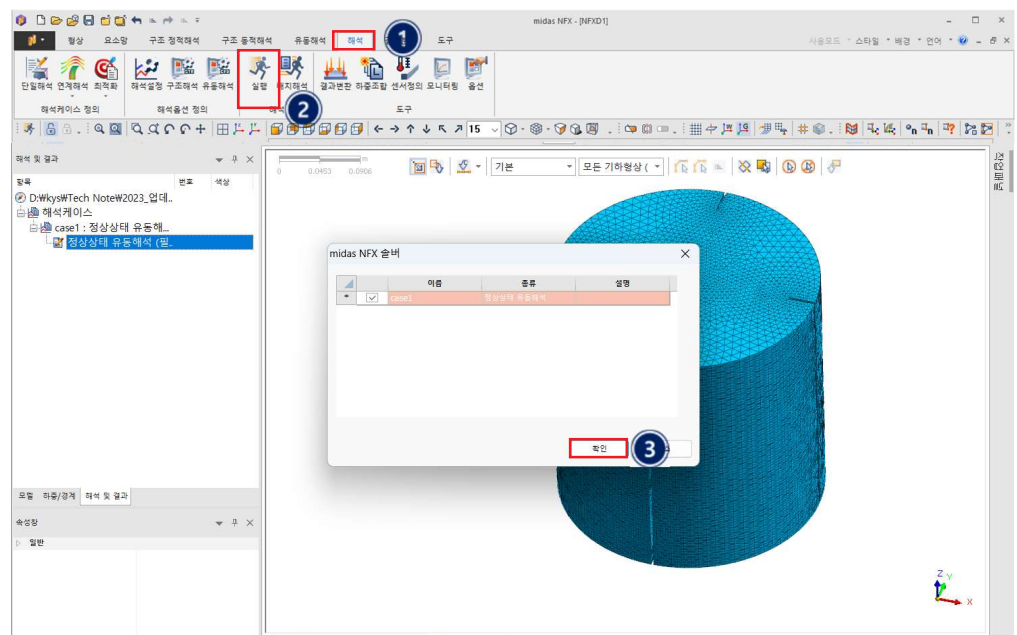
모니터링 위치는 값의 확인이 필요한 중요한 부분으로 선택합니다. 모니터링을 지정하면 *.grf 파일에 매 step마다 저장됩니다.

- ① "유동해석"탭 > "모니터링"을 클릭합니다.
- ② "모델"창의 기하형상 체크를 해제하고 임펠러 주변 요소망만 체크합니다.
- ③ 적당한 위치를 클릭합니다.
- ④ "모델"창의 "요소망"트리에서 탱크 요소망을 체크합니다.
- ⑤ 상부 적당한 위치를 클릭합니다.
- ⑥ "충속도"를 체크합니다.
- ⑦ "확인"을 클릭합니다.





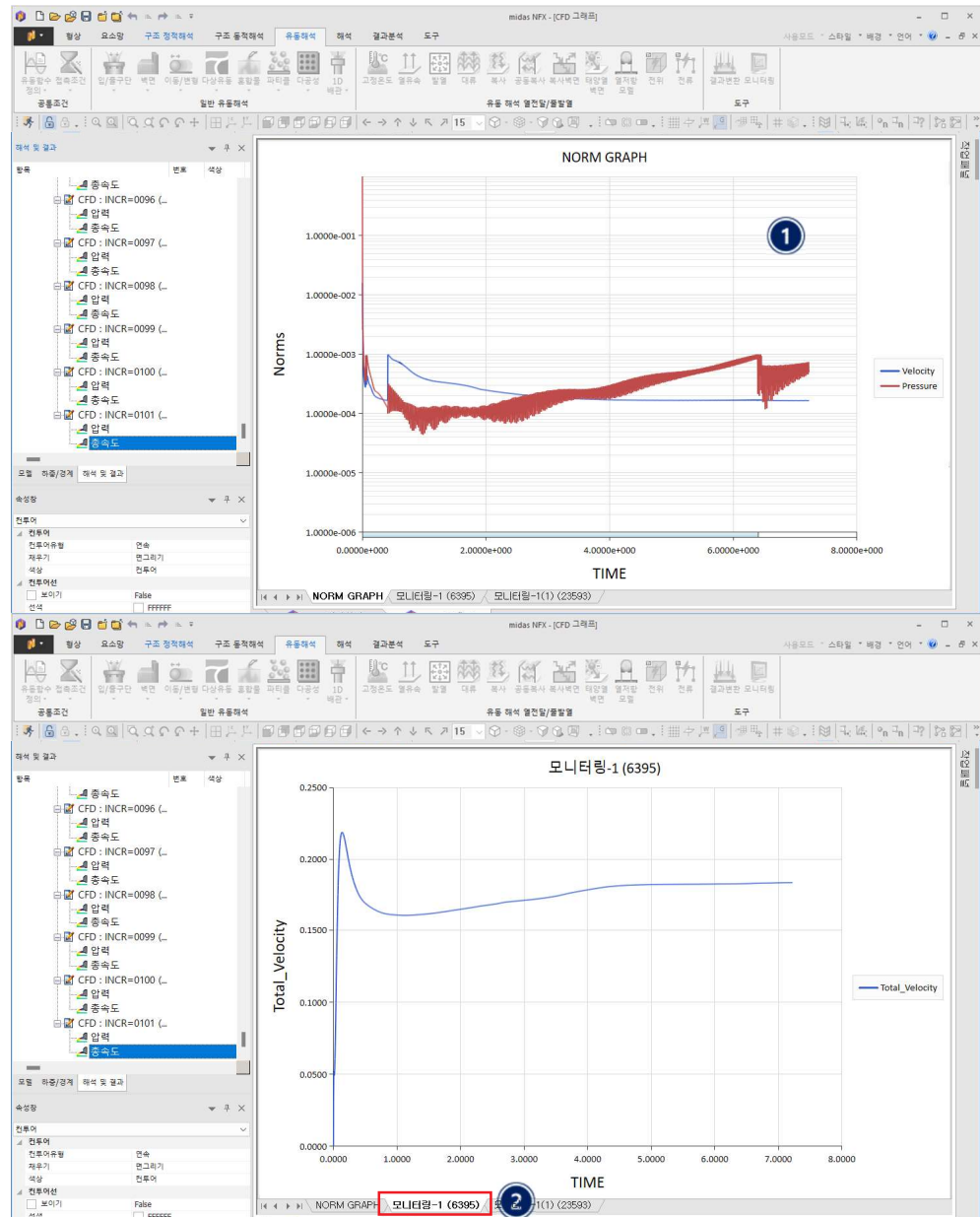
- ① "해석"탭을 클릭합니다.
- ② "해석" 리본메뉴 > "실행"을 클릭합니다.
- ③ "CASE1"이 체크 되어있는지 확인한 후 "확인"을 클릭합니다.

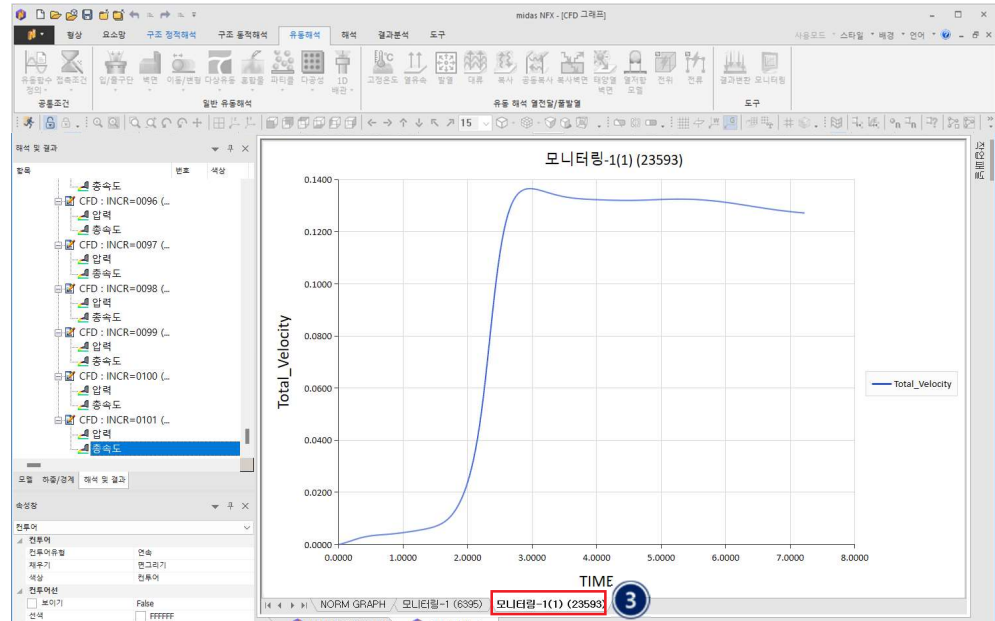


- ① "Norm graph"와 출력창으로 Norm 값이 0.001 이하로 떨어지는지 확인합니다.
- ② 모니터링 값이 정상상태에 도달했는지 확인합니다.



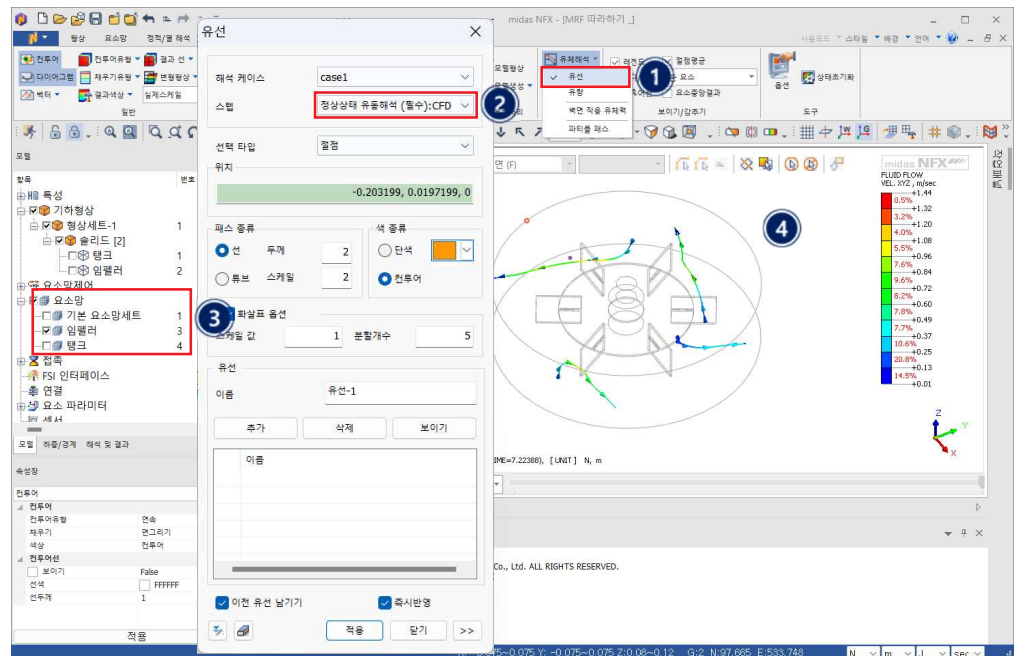
모니터링 위치에 따라 정상상태에 도달하는 시간이 달라집니다. 따라서 해석목적에 맞는 곳에 모니터링을 하고 그 값이 일정해 질 때까지 반복계산을 수행해야 합니다.

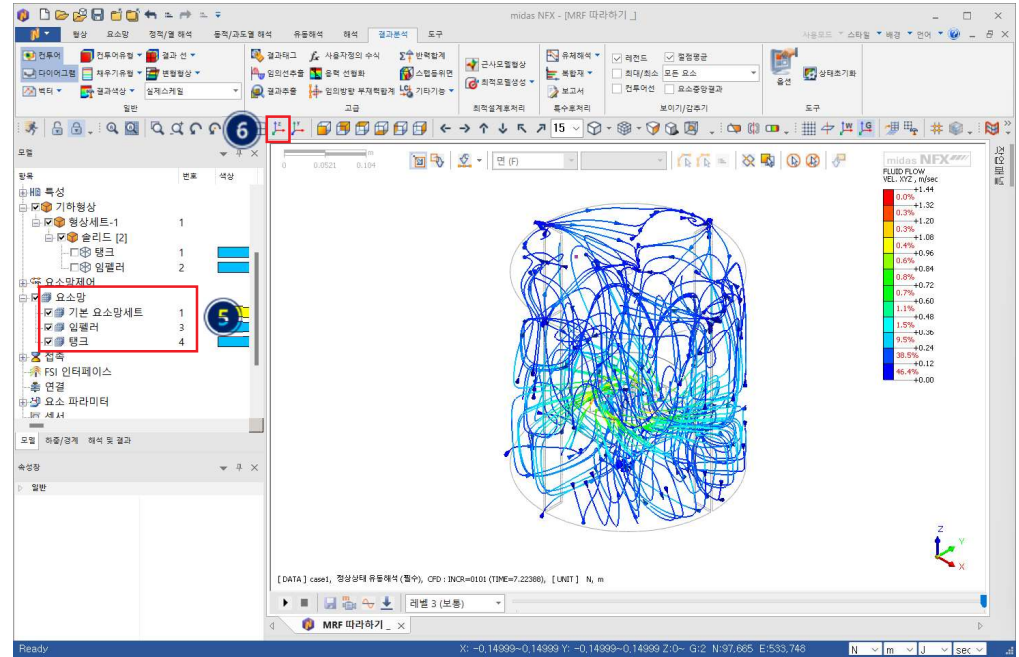




4-2-8. 결과 검토

- ① "결과분석"탭 > "특수후처리"리본메뉴 > "유체해석" > "유선"을 클릭합니다.
- ② "스텝"을 최종스텝으로 선택합니다.
- ③ 임펠러 부근 요소망만 활성화합니다.
- ④ 윗면과 아랫면 각각 4 군데씩 클릭합니다.
- ⑤ 전체요소망을 활성화 합니다.
- ⑥ "등각보기"를 클릭합니다.

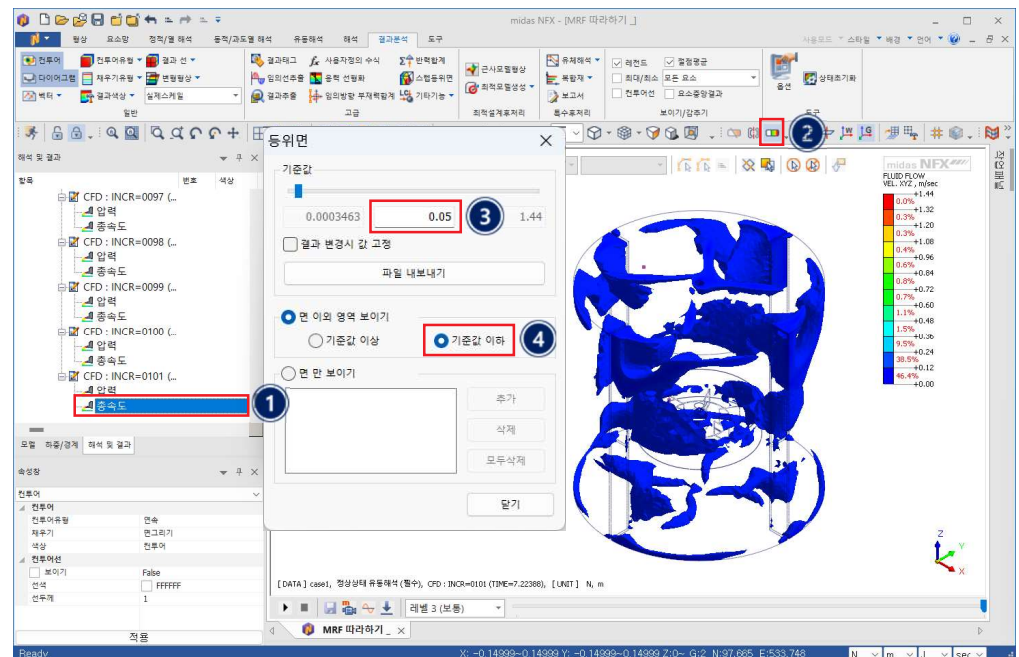




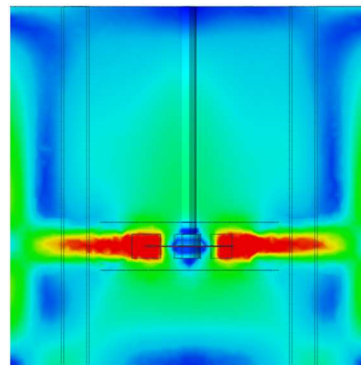
- ① "해석 및 결과"창 > 최종 스텝의 "총속도"를 더블 클릭합니다.
- ② "특정결과면 보이기"를 클릭합니다.
- ③ "기준"에 "0.05"를 입력합니다.
- ④ "기준값 이하"를 체크합니다.



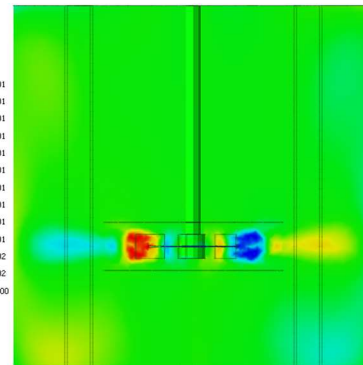
등위면 보이기 기능을 이용하여 유속이 낮은 부분을 확인할 수 있습니다. 유속이 낮은 구간은 정체점이 발생할 수 있으며 낮은 부분이 작아질수록 혼합이 잘 된다고 판단할 수 있습니다.



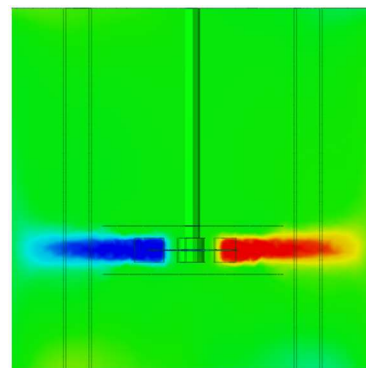
해석 결과 모음



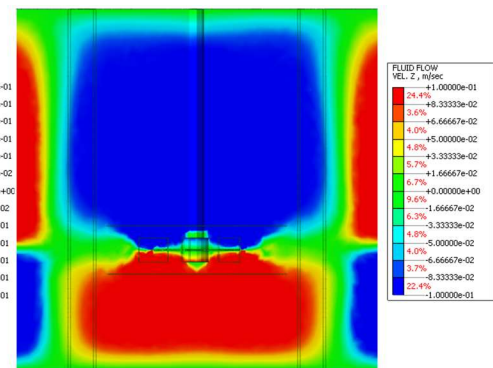
<Velocity magnitude>



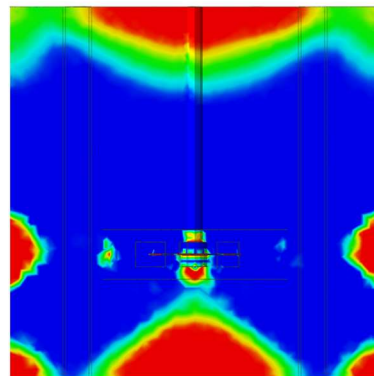
<Velocity x>



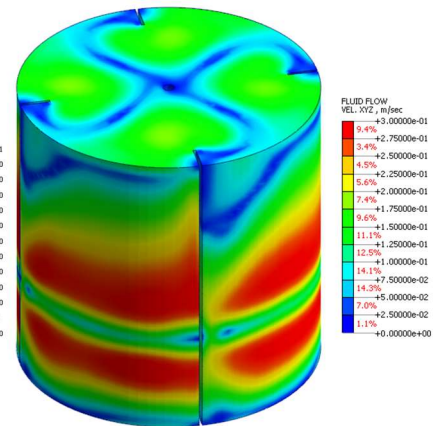
<Velocity y>



<Velocity z>



<Pressure>



<3D view of velocity magnitude>