

## 유한요소법과 무요소법을 이용한 극저온 절단 시뮬레이션

김성균, 이동규, 정종헌

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045 (덕진동 150-1)

[sungkyun@kaeri.re.kr](mailto:sungkyun@kaeri.re.kr)

원자력 시설 해체에는 현재 상용화되고 있는 다양한 해체기술이 사용되고 있다. 그러나 일부 고방사능 시설의 해체에서의 상용 절단기술은 2차 폐기물 발생, 절단두께의 한계, 원격 제어 가능 여부 등의 문제로 적용하기가 매우 어렵다. 최근 이러한 문제점을 극복한 새로운 해체기술로 극저온 절단기술이 대두되고 있다. 극저온 절단기술은 액체질소와 같은 극저온 물질과 연마재를 혼합하여 초고압(400 MPa)으로 분사하여 대상물을 절단하는 기술을 말한다. 이 기술의 특징은 다른 해체절단 기술에 비해 2차 폐기물량이 거의 발생하지 않고 대상의 재질에 상관없이 절단이 가능하며 열이 발생되지 않아 화재에 민감한 재료의 절단에 적용이 가능하다.

본 연구에서는 극저온 절단 실험 이전에 극저온 절단 기술의 적용 가능성을 파악하고자 전산 시뮬레이션을 수행하였다. 극저온 절단 시뮬레이션과 같은 유체와 고체 해석이 연계된 문제를 효과적으로 풀기 위해 본 연구에서는 SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)와 FEA(Finite Element Analysis)를 연계한 Hybrid 코드를 이용하여 해석을 수행하였다.

### - 대상물 및 유체 모델링

본 시뮬레이션에서는 절단 대상물로 40×30×10 mm의 크기를 갖는 저탄소강으로 선정하였으며 이에 대한 물성치는 표 1과 같다. 절단 대상물의 모델링은 8 절점 요소를 갖는 사각요소로 격자를 생성하였으며 총 27,511 절점을 갖고 24,000 요소를 갖도록 유한요소법으로 모델링 하였다. 액체질소는 절단 대상물과 달리 대변형을 일으키는 유체이므로 더 이상 유한요소법이 적용되지 못한다. 최근 유체의 모델링 기법으로 SPH 기법이 개발되었다. 이 기법은 무요소법 중에 하나로 연속체를 질량과 속도와 같은 물리량을 수반하는 입자들의 집합으로 표현하는 방법이다. 본 연구에서는 액체질소를 지름 1 mm 높이 40 mm의 원기둥으로 11,571 개의 입자로 갖도록 무요소법으로 모델링하였다. Fig. 1(a)는 유한요소법을 이용한 절단대상물의 모델링 결과를 나타내며 (b)는 무요소법을 이용한 액체질소의 모델링한 결과를 나타내고 있다.

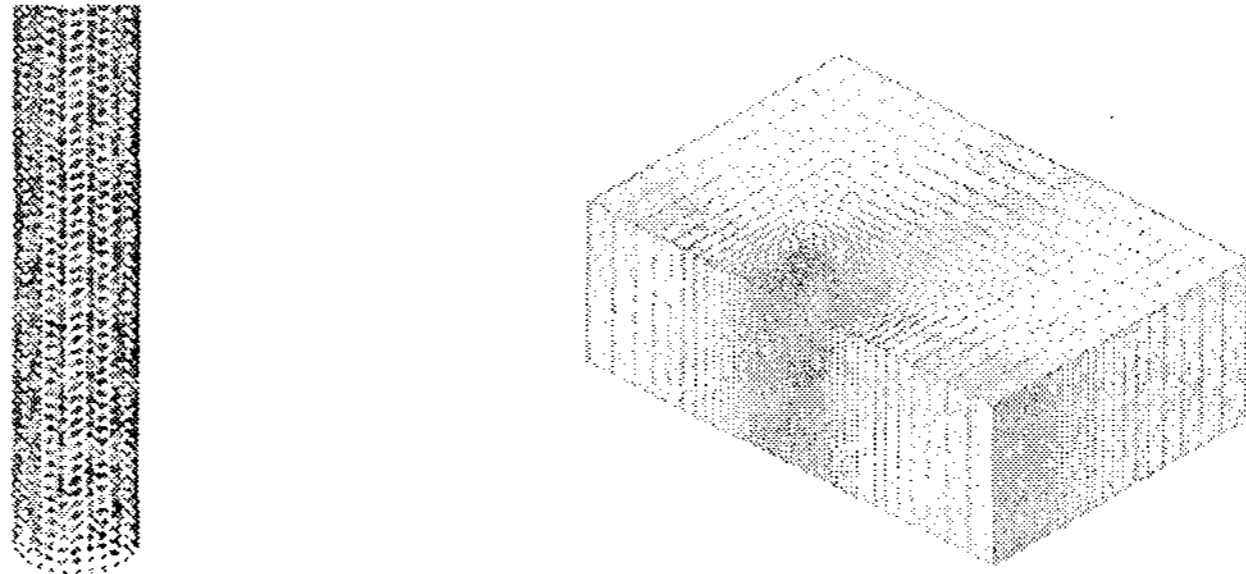
Table 1. Material properties for target material

Properties	Material(low carbon steel)
$\rho$ , Material density (kg/m <sup>3</sup> )	7860
E, Elasticity modulus (GPa)	210
$\nu$ , Poisson's coefficient	0.284
$\sigma_y$ , Yield stress (MPa)	260
$\epsilon$ , Failure strain	0.33
$\sigma_b$ , Tensile strength (MPa)	350

### - 시뮬레이션

본 시뮬레이션은 SPH 모델과 FEM 모델이 서로 커플링되어 연산이 이루어지며 두 모델은 접촉(Contact) 조건으로 연계되도록 정의하였다. 시뮬레이션 절차는 다음과 같다. 먼저 SPH 입자의 속도와 위치에 대한 입력정보로 입자들이 가하는 압력을 계산하고 이 값을 이용하여 입자가 외부

에 가하는 힘을 계산한다. 그리고 다시 갱신된 SPH 입자의 속도와 위치를 계산한다. 갱신된 SPH 입자의 속도와 위치 정보로 SPH 노드와 FEM 노드와의 접촉 여부를 판별하고 만약 접촉이 이루어지면 접촉력을 계산한다. 이 접촉력에 의한 FEM 노드의 변위를 계산하고 변위를 이용하여 재료의 변형률, 응력, 데미지 값을 계산하게 된다. 만약 요소의 응력 또는 변형률 값이 절단 대상물의 파괴 기준을 넘으면 그 요소는 절삭된 것으로 판단한다. 본 연구에서는 탄소강의 파괴 모델로 Johnson-Cook 모델을 사용하였다.



(a) LN2 SPH model (b) Target FE model

Fig 1. LN2 and Target modeling

Fig. 2는 SPH 입자가 600 m/s의 속도로 절단 대상물에 충격을 가했을 때 대상물이 절단되어 가는 모습을 나타내고 있으며 초기 설정한 600 m/s 유체속도로 10 mm 두께의 강판이 절단됨을 확인하였다. 유체속도 600 m/s를 베르누이정리를 이용하여 압력으로 환산하면 180 MPa이며 이 값을 통해 극저온 절단 실험 시 압력의 설정 값을 파악하였다.

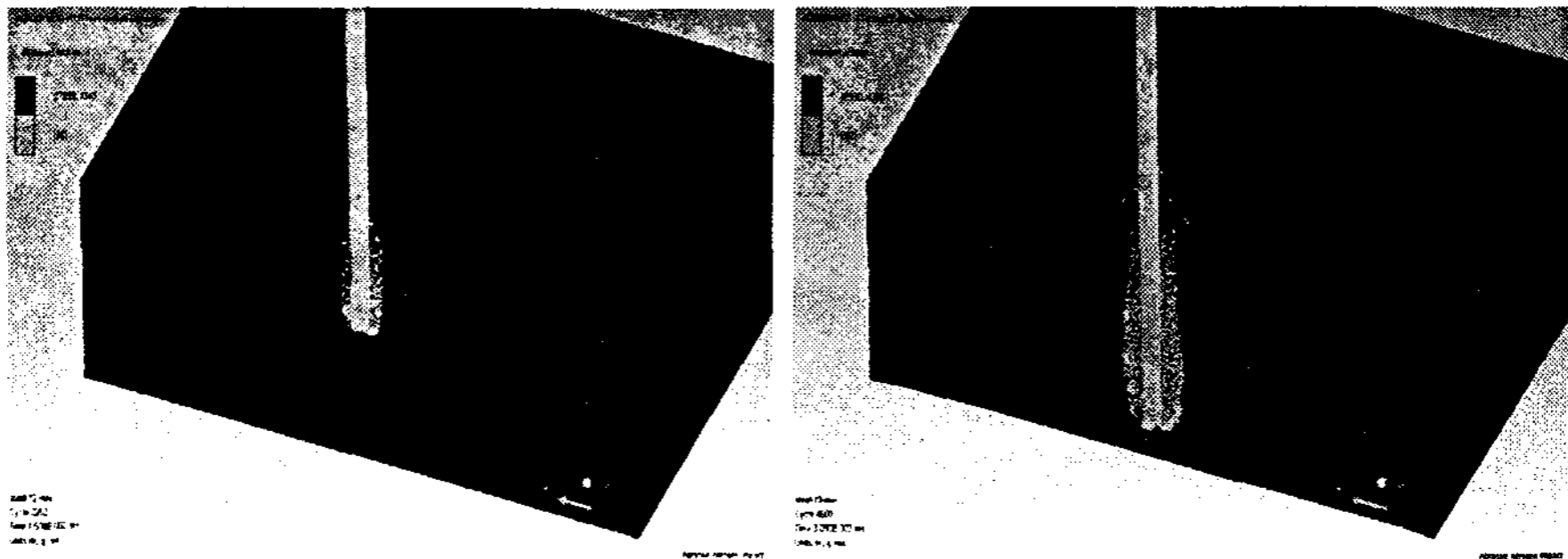


Fig 2. Results of cutting simulation for the steel 4340

- 결론 및 향후 계획

본 연구를 통해 극저온 절단 기술의 적용 가능성을 확인하였으며 또한 극저온 절단 실험에 필요한 실험변수들의 범위를 파악하였다. 본 연구는 구조물에 유체가 충돌하는 문제를 SPH와 FEM 기법을 적용하여 문제를 풀 수 있음을 보였으며 앞으로 이와 유사한 분야에 많은 응용이 가능할 것으로 판단된다. 향후계획으로 극저온 절단 장치를 제작하여 각종 변수의 변화에 따른 절단 성능 실험을 수행할 예정이다. 본 기술은 새로운 해체절단 기술로써 고방사능 시설과 같은 특수 시설의 해체에 매우 유용하게 사용될 것으로 판단된다.