

# DRYSIM6의 CFD를 이용한 온도분포 민감도 평가

김대호\*, 신창환, 양용식, 국동학, 김효찬, 홍종대, 임익성, 인왕기, 양재호, 김주성  
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111  
\*kdh@kaeri.re.kr

## 1. 서론

국내 경수로원전의 사용후 핵연료 장기건식저장을 위한 연구개발이 진행되고 있다. 경수로 사용후 핵연료의 장기건식저장에 따른 크리프 거동을 확인하기 위해 실제 사용후 핵연료봉 6개의 가속시험을 위한 종합시험장치(DRYSIM6)<sup>1)</sup>가 설계되고 제작되었으며[1, 2] 노외성능 및 내구성시험[3]이 수행되었다.

Helium 분위기 저장용기 건식환경에서 사용후 핵연료의 장기저장을 위해서는 실제 사용후 핵연료를 이용하여 예측한 값을 검증하고 종합평가하는 일련의 과정이 필요하며, 국내 경수로에서 연소된 사용후 핵연료의 핵적, 물리.화학적 특성파악 후 장기적인 관점에서의 재료 열화거동 평가가 요구된다. DRYSIM6는 실제 사용후 핵연료봉 6개를 사용하여 건식저장 환경에서 발생할 수 있는 현상을 가속시켜 사용후 핵연료의 열화기구에 대한 거동을 평가하기 위해 개발되었으며, 이러한 목적을 위해서는 시험용기 내 정확한 온도분포를 파악해야 한다.

5 m의 DRYSIM6 용기 내에 다양한 구조물은 열적 손실은 물론 유체(헬륨)의 자연대류 열전달 및 복사, 전도에 의해 열유동 분포가 복잡하게 나타나며, 이러한 조건에서의 정확한 온도분포를 위한 성능시험 및 예비해석이 수행되었다. 본 논문은 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics) 방법을 이용하여 DRYSIM6의 열전달 및 유동특성을 평가하고, 400°C 내구성시험에 얻어진 온도측정결과와 비교하여 실제 시험 중 예상되는 온도분포를 예비검증하기 위해 수행되었다.

## 2. 본론

DRYSIM6의 CFD 해석을 위하여 각부품별 Modeling을 실시하고, 열유동에 따른 열분포(CFX) 해석을 통해 내구성시험에서 얻어진 온도결과를 바탕으로 민감도 평가를 실시하였다.

DRYSIM6 용기의 크기와 규모가 직경이 0.75 m, 길이가 5 m의 규모로 STS-304 및 알루미늄의 세라믹구조재로 구성되어 있고, 내부에 히터와 사용후 핵연료 6개의 거치와 지지를 위한 STS-316L 재질의 구조물로 제작되었다. DRYSIM6는 용기 내 Helium 유체가 자연대류로 열전달 및 열전도가 이루어지고, 12개의 카트리지 히터를 열원이 공급된다.

### 2.1 DRYSIM6 CFD 예비해석

사전 해석으로 히터 한 개당 1.66 kW(total 20 kW)를 기준으로 대기압, 헬륨분위기, 난류모델(SST-k $\omega$ )조건에서 Non-slip의 벽조건과 열손실 6%를 가정하여 CFD 해석을 진행하였다. DRYSIM6 해석모델을 위해 Polyhedral mesh type의 약 1,124만개의 셀로 구성하였다. Fig. 1은 전산유체 해석을 위한 DRYSIM6 모델링이며, Fig. 2는 3곳의 횡단면에서 온도와 열유속에 대한 결과이다.

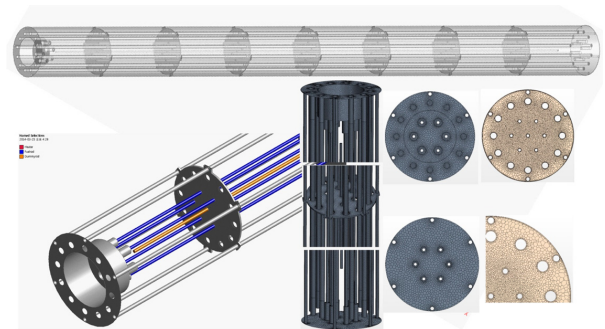


Fig. 1. CFD Models of DRYSIM6.

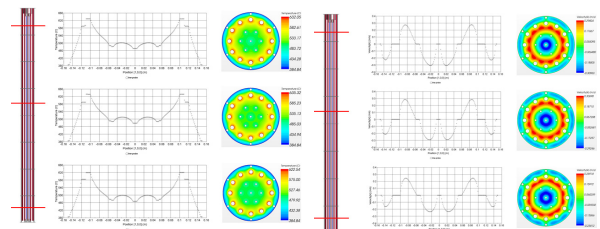


Fig. 2. Preliminary Temperature and Velocity on the Cross-line.

DRYSIM6 유동영역에서 사전 열해석 결과, 내통

1) 사용후 핵연료 장기건전성 평가 종합시험장치, DRYSIM6(DRY storage SIMulation test system with 6 spent fuel rods)

면 온도를 384.91°C로 고정하여 열손실은 6%로 가정할 때 Test rod의 온도는 Inner disk사이에서의 유동으로 인해 480~510°C의 온도분포를 반복적으로 보였으며, 각각의 span에서의 온도분포는 유사하였다. 히터의 표면은 570 ~ 605°C의 온도분포를 보였으며, 히터의 바깥쪽과 Test rod의 안쪽은 유동이 내려가고 히터와 Test rod 사이에서는 유동이 상승하였다. 이로 인해 Inner disk의 위 아래 온도분포가 급격한 차이가 발생하였다.

## 2.2 DRYSIM6 CFD 상세해석

해석을 위한 경계조건으로 시험연료봉이 최대 400°C에 해당하는 히터당 0.85 kW(Total heat : 10.2 kW, 3560 W/m<sup>2</sup>)의 열원과 층류(laminar flow)조건을 반영하였다. 내통 면에서 임의의 함수조건을 반영하여 열손실은 10%로 가정하고, 외부온도를 40°C로 가정하여 전도에 의한 열전달만 고려하여 해석을 진행하였다. 해석상 난류 모델(SST-k $\omega$ )을 적용한 것과 층류 유동결과는 차이가 없었다. 벽면의 축방향 온도분포는 T<sub>b</sub>=50°C에서 T<sub>max</sub>=333.11°C까지 적용하였다.

해석결과 전체적인 유동패턴은 앞의 예비해석과 유사하고, Span에서 온도와 유속에 대한 결과는 Fig. 3과 같다.

Test rod의 온도는 예비해석 결과와 달리 벽면의 온도영향으로 200 ~ 420°C로 넓은 온도분포를 보였다. Fig. 4와 같이 실제 400°C 2주간의 측정된 시험연료봉 온도 Data와 유사한 결과를 보였으나, DRAYSIM6 장비의 상하단의 구조적 형상에 따라 열전도에 의한 상하 온도편차를 확인할 수 있다. 히터의 표면은 250 ~ 480°C의 온도분포를 보였다.

Fig. 5는 DRYSIM6의 전산유체해석 결과와 노외 내구성시험 실측결과를 비교한 결과이다.

## 3. 결론

DRYSIM6의 CFD 해석결과와 실측된 시험연료봉 위치의 온도분포는 중앙부위의 Inner Disk #3 ~ #7까지는 유사한 결과를 보였으나, 상단 구조물에서의 열전도에 의한 열손실로 인하여 Inner Disk #1 ~ #2사이의 시험연료봉에서 온도차이가 대략 30%의 차이를 보이고 있다. 이는 실제 DRYSIM6 운전시 반영되어야 할 사항이며, 운전 종료 후 부수적인 시험결과해석에 적용되어야 한다.

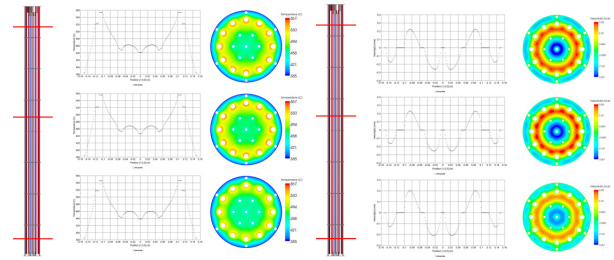


Fig. 3. Final Temperature and Velocity on the Cross-line.



Fig. 4. Measured Temperature Data in DRAYSIM6.

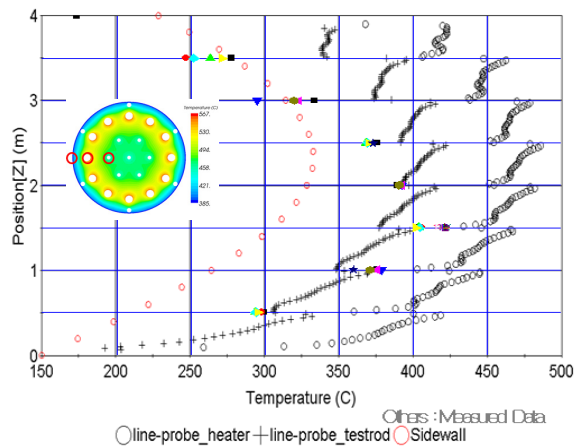


Fig. 5. Comparison of Temperature Distribution of DRYSIM6.

## 4. 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2014171020166A)

## 5. 참고문헌

- [1] 김대호 외., 사용후 핵연료의 장기건전성 종합시험장치(SFFA) 개념설계, 한국방사성폐기물학회 2012 춘계학술발표회, 2012. 5.
- [2] 김대호 외., 사용후 핵연료의 장기건전성 종합시험장치(DRYSIM6) 구조해석 및 제작, 한국방사성폐기물학회 2013 춘계학술발표회, 2013. 5.
- [3] 김대호 외., DRYSIM6 노외성능 및 내구성시험평가, 한국방사성폐기물학회 2014 춘계학술발표회, 2014. 5.