

## 핫셀에서 금속전환로의 내열 특성 분석

김영환·윤지섭·정재후·홍동희·박기웅·진재현\*

### Analysis on the Heat-Resisting Property of Metal Conversion Furnace in the Hot-Cell

Y. H. Kim, J. S. Yoon, J. H. Jung, D. H. Hong, G. Y. Park, J. H. Jin

#### Abstract

To reduce the storage space of spent fuels used at the atomic power plants all over the world, the uranium elements contained in the spent fuels is being extracted and effectively stored. For this, the spent fuel are oxidized and deoxidized. In this study, it is produced conceptual design specification about the spent fuel management technology research and test facilities have been produced. The first considered processes in the facilities is the metal conversion furnace in the dry environment. Since this process is operates at the high temperature range, we have to consider heat-resisting designs for the device. For the heat-resisting designs, we have surveyed and analyzed technical references for material properties. Also, we have determined the temperature distribution condition of the device based on experimental results. We have calculated thermal stress and strain of each devices by the commercial analysis software, I-DEAS. By using the results, we have analyzed design configurations of the point at issue by thermal effects, and suggested alternative design configurations. It is experimented for inspecting confidence rate of heat strain. Based on these results, necessary design specifications for heat-resisting design have been produced.

Key Words : Heat-resisting, SUS 304L, SUS 310S, Strain, Yield stress,

#### 1. 서론

경수로형 원자력 발전소에서 사용하고 난 사용 후핵연료 집합체는 현재 2020년까지 누적 예상량이 약 20,000톤에 달해 고 방사능 핵물질의 안전하고 효율적인 관리를 위해 기술 자립이 시급하다. 본 연구에서는 사용후핵연료의 폐기물량 감소와 효율적인 관리 측면에서 폐기물량을 최소화하는 차세대관리 공정장치의 내열 설계요건을 도출하는데 목적이 있다. 차세대관리 공정 중 가장 고려되어야 할 단위공정은 금속전환로이다. 고온으

로 구동되는 금속전환로의 내열 설계요건을 도출하기 위하여 각 장치에 사용되는 고온 내열 소재의 온도에 따른 열적, 물리적 특성을 조사하였다. 그리고, 차세대 핫셀공정의 실험 결과를 토대로 금속전환로(650 ℃)에 대한 온도 분포조건을 결정하고 열 해석 프로그램(I-DEAS)을 사용하여 각 장치의 열변형량 및 작용응력을 계산한 후, 이에 따른 각 장치의 문제점을 분석하고, 이의 해결 방안을 도출하였다. 금속전환로의 열특성 해석은 SUS 304L과 SUS 310S 재료에 대해 수행하였으

\* 한국원자력연구소 사용후핵연료기술개발팀

며, 열변형 상수 차이에 따른 변형 양상과 응력 분포의 차이점을 분석하였다. 또한 유체흐름을 조절하는 Valve shaft 와 Con mold 영역의 반응 온도 조건에 따른 열변형과 응력 차이에 대해서도 분석하였다. 열해석 결과의 신뢰도를 검증하기 위하여 고온 재료의 축소 모델을 이용하여 국가 공인 실험 기관(KOLAS)인 신뢰성 평가센터에서 열해석 검증 실험을 수행하였다. 또한 이를 바탕으로 내열 요건의 설계 자료를 도출하였다.

## 2. 본론

본 실험의 목적은 다음과 같다. 차세대 관리공정의 핫셀 내부에는 우라늄 금속을 생산하기 위한 단위공정 조합으로 되어있다. 종합공정의 단위공정에는 열 영향을 받는 장치들로 구성된다. 공정들 중에 금속전환로는 고려될 중요한 공정이 된다. 이러한 결과들은 종합적인 방사선 고온 환경의 적합한 핫셀 및 공정장치 설계 및 배치의 최적화와 내열 방안 선정을 위한 기본 요건으로 활용될 수 있다. 그림 1과 같이 열영향을 받는 장치는 금속전환로로 650도 분위기에서 주로 용융염 밸브 모듈 등이 열 영향을 받으며, 이에 대한 각 부품의 구조를 고려하고 재질에 대한 열 특성을 분석하고자 한다. 최종적으로 이러한 분석 자료를 토대로 핫셀 실증용 공정 장치 설계에 적용하기 위한 내열 방안의 기초 자료로 활용하는데 목적을 두고 있다.

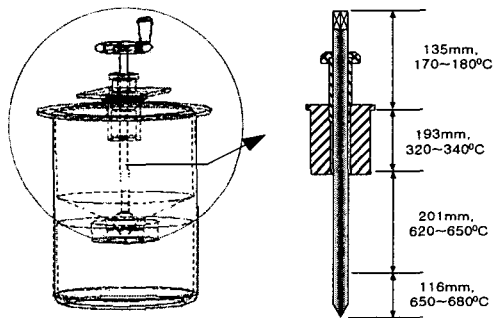


그림 1. 금속전환로 용융염 밸브의 온도 분포도.

실험방법은 다음과 같다. 금속전환반응기에서 유체의 흐름을 조절하기 위해 Valve shaft를 사용하는데, Valve shaft는 Con-mold 부분의 홀을 열고 막는 기능을 수행한다. 그러나 작업 조건이 고온이므로 이에 따른 열변형과 응력에 의해 작업

시의 문제가 발생할 가능성이 높다. 이를 해석을 통해 미리 검증해 본다. 그림 1은 금속전환반응기의 반응 온도 650 °C를 고려하여 주위의 온도 분포를 조사한 것이다. 그림 1과 같이 금속전환로의 경우는 가열기에 의해 전환로의 중심에서 용융염의 흐름을 통제하는 밸브 모듈(650 °C)이 열적 영향을 가장 많이 받는다. 해석은 SUS 304L과 SUS 310S 재료에 대해 수행했으며, 열변형 상수 차이에 따른 변형 양상과 응력 분포의 차이점을 파악해 본다. Valve shaft의 상부에 힘을 가하여 Con mold부분으로 재료가 빠져나가지 못하도록 한다. 경계조건은 상부와 하부를 고정하고 각 단계별로 온도분포가 다르므로 별도의 온도 경계 조건을 적용했다. 또한 Valve shaft의 끝 부분과 Con mold의 일부가 접촉하고 있으므로 접촉하는 부분에 접촉 경계 조건을 부여했다. 고온의 분위기에 의해 Valve shaft의 축 방향 열변형에 다른 부품에 비해 상대적으로 크므로 변형 차이에 의해서 Valve shaft와 Con mold의 접촉부에서 열 응력이 발생하게 된다. 해석은 I-DEAS Simulation 기능을 이용했으며 SUS 310S과 SUS 304L 재료에 대한 해석을 수행, 접촉부의 열응력과 Valve shaft의 열변형량에 대해 검토해 본다.

해석결과는 다음과 같다. 그림 2는 해석모델의 응력 분포를 나타내는 그림이다. 우리가 보고자 하는 부분은 Valve shaft와 Con mold가 접촉하는 부분이고 Valve shaft의 전체적인 변형 형상이다. Valve shaft의 주변형은 아래 방향으로 발생한다. 그런데 Valve shaft와 접하고 있는 Con mold는 주변형 방향이 반경 방향이므로 두 파트의 변형량 차이가 발생한다. 그림에서 알 수 있듯이 Valve shaft가 아래 방향으로 변형이 안되므로 Valve shaft의 중앙부가 휘어지는 현상이 발생하는 것을 알 수 있다.

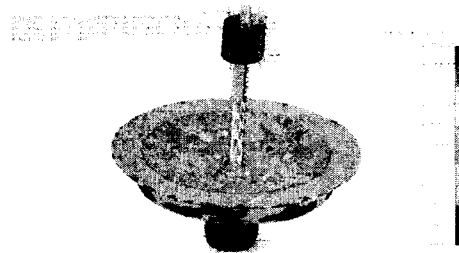


그림 2. 용융염 밸브 모듈의 응력분포(SUS 310S).

최대 응력은 267kgf/mm<sup>2</sup>으로 SUS 310S의 항복응력을 10배 이상 상회하는 값이다. 물론 해석 상에서의 응력은 해석 수행을 용이하게 진행하기 위해서 상, 하부를 모두 구속시켰으므로 실제 거동에 비해 상대적으로 높은 값이 나온 것으로 생각된다. 그러나 과도한 구속 조건임을 감안한다고 하더라도 해석에서 나타난 값을 보면 실제 상황에서도 문제가 발생할 소지가 매우 높다고 할 수 있다. 예를 들어 Valve shaft와 Con mold의 접촉부위가 고온에서 소착 될 가능성이 매우 높다. 세부적인 응력 값과 변형형상을 살펴보기 위해 온도 분포에 따라 해석된 결과를 살펴보기로 한다. 그림 3의 변형형상을 보면 Con mold와 접하는 부분의 변형량이 가장 작고 일직선이던 Valve shaft가 열변형과 Con mold 접촉면의 저항에 의해서 그림 4와 같이 상부의 변형이 휘어져서 나타남을 알 수 있다.



그림 3. Valve shaft의 변형형상(SUS 310S).

응력 결과만으로 보면 재료가 열 응력에 의해 파손 상태까지 이르는 것으로 나타났다. 온도가 600 °C 경우 항복응력이 10kgf/mm<sup>2</sup>을 감안하면 경계조건이 과도하게 부여되었다는 것을 감안해도 결과 값을 보면 실제 운전 중에 문제가 발생할 소지가 높은 것으로 판단된다. 그림 4는 SUS 304L로 해석을 수행한 결과이다. 열팽창 계수가 SUS 310S에 비해 상대적으로 높기 때문에 전체 변형량과 열변형에 의한 응력이 SUS 310S에 비해 크다는 것을 확인할 수 있다. 표 1은 SUS 304L과 SUS 310S의 최대 응력값 과 최대 변형량을 비교한 표이다.

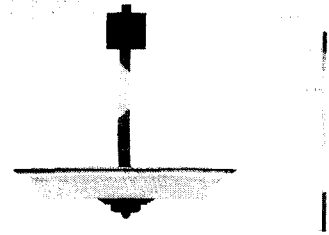


그림 4. 용융염 밸브 모듈의 변형량 (SUS 304L).

표 1. SUS 304L과 SUS 310S의 해석결과

구 분	응력값 (kgf/mm <sup>2</sup> )	변형량 (mm)	열팽창 계수(10E <sup>-6</sup> /F)
SUS 304L	272	2.62	10.4
SUS 310S	267	1.77	9.63

해석결과의 신뢰성 검증을 위해서는 실험은 금속전환로의 용융염 밸브 축의 축소 모델 시편을 이용하였으며, 실험분석에 사용된 실험기의 장비 모델명은 MTS사의 DT1000이다. 실험은 국가 지정 공인실험기관(KOLAS)인 신뢰성 평가 센터에서 수행하였다. 원형 판의 시편을 사용하여 직접 방향으로의 변화량을 측정하였다.

실험은 온도 구간을 25 °C에서 시작하여 650 °C까지 상승시켜 50 °C부터 650 °C까지의 변형량을 측정하였다. 그림 5, 6에서와 같이 SUS 304L 실험 분석 및 해석 결과를 보면 길이 방향의 변형량은 650 °C일 때 0.089mm로 해석결과 0.0925에 비해 약 96.1 %의 값으로 실제 측정값이 해석 결과보다 약 3.9 % 정도 낮게 나왔음을 확인할 수 있다. 이는 해석에서의 결과 값은 650 °C에서의 최종 열팽창 계수를 입력하여 얻어진 값이며, 그 결과는 표 2에서와 같다. 시험은 SUS 304와 동일한 방법으로 수행하였다. 길이 방향의 변형량은 650 °C일 때 0.0813mm로 해석 결과 0.0844에 비해 약 96.2 %의 값으로, 실제 측정값이 해석 결과보다 약 3.8 %정도 낮게 나왔음을 확인할 수 있다.

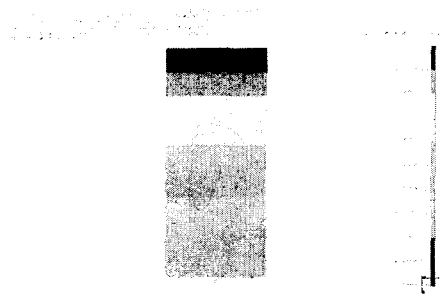


그림 5. SUS 304봉 타입의 해석(온도 650 ℃).

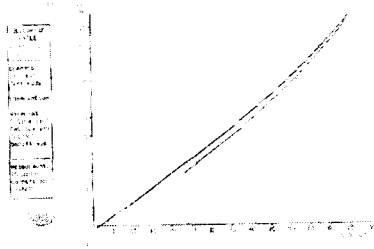


그림 6. 축방향(SUS 310S) 봉 타입 시험 결과.

표 2. 봉타입(SUS 304L/310S) 실험 및 해석 결과

구분	SUS304L (변형량, mm)	해석 결과 (mm)	SUS310S (변형량, mm)	해석 결과 (mm)
650 ℃	0.0890mm	0.0925	0.0813mm	0.0844

#### 4. 결론

경수로형 원자력 발전소에서 사용하고 난 사용후 핵연료 집합체는 현재 2020년까지 누적 예상량이 약 20,000톤에 달해 고 방사능 핵물질의 안전하고 효율적인 관리를 위해 기술 자립이 시급하다. 본 연구에서는 사용후핵연료의 폐기물량 감소와 효율적인 관리 측면에서 폐기물량을 최소화하는 차세대 관리공정장치의 내열 설계 요건을 도출하는데 목적이 있다. 주로 방사선 구역의 공정 장치에 사용되는 SUS 계열의 기계적 열적 특성을 조사하였고, 공정 장치의 온도 분포를 조사하였다. 주 공정 장치인 금속전환로를 선정하였고, 이 장치에 대한 열변형량과 열응력을 조사하였다. 금속전환

로에서 주로 응력이 집중되는 부분은 용융염 밸브 모듈이다. 특히, 금속전환로의 용융염 밸브의 분석을 보면 재질 모두 변형량이 크고 과 허용 응력치에 비해 상당히 높은 수준의 응력이 발생함을 확인할 수 있었다. 이로 인해 SUS 304L 재질과 SUS 310S의 두 재질 모두 Con-mold 부와 Valve shaft의 접촉 지점에서 열 응력에 의한 응착 가능성이 매우 높은 것으로 판단된다. 우선 제안할 수 있는 방법으로는 재질의 선정 시 열팽창 계수가 낮은 재질을 선정하되, 부식을 고려하여 SUS 계열을 사용한다면 구조적 설계를 고려해야 한다. 해석 경계 조건에서는 하단 부를 완전 고정 상태로 구속 조건을 부여했는데 설계 시에 이 부분을 아래 방향의 구속을 풀어 주는 방법으로 설계하는 것이 좋다. 다른 방법으로는 설계된 Valve shaft의 전체 길이를 가능하면 줄이는 쪽으로 설계가 되어야 한다. 열 해석 프로그램인 I-DEAS의 신뢰도를 검증하기 위해 국가공인 검증 기관(KOLAS)에서 분석 실험한 결과 4%의 높은 신뢰도를 보여주었다. 그러므로 현재와 같은 고온에서 운전되는 조건이라면 SUS 계열을 이용할 시 강도 상의 문제 때문에 구조적 설계를 바탕으로 신뢰로 검증 실험 보정 값과 열적 특성을 고려하여 설계하여야 한다.

#### 참고 문헌

1. G. I. Moon, J. Y. Jang "A Study on the Application of New High Temperature Material Based on Inter-metallic Compounds" UCL 125-4717-1, (1992)
2. S. C. Huang, High-Temperature Ordered Inter-metallic Alloys III, edited by C.T.Liu, A.I.Taub, N.S. Stoloff and C.C.Koch, MRS, Boston, (1988)373
3. N. Fujitsna et al., Intermetallic Compounds Structure and Mechanical Properties edited by H. Izumi, J. I. M., Sendai, Japan (1991)997
4. Liang J, Gollhardt N, "A Study of Fatigue and Creep Behavior of Four High Temperature Solders" Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, V.19 N.11, (1996)