

고온용 장치 부품의 내열 특성 분석

Analysis on the Heat-Resisting Property of High Temperature Process Parts

김영환, 윤지섭, 정재후, 홍동희, 진재현, 박기용
한국원자력연구소

요 약

세계 각국에서는 원자력 발전소에서 사용하고 난 사용후핵연료의 저장공간을 감소시키기 위하여, 사용후핵연료 내에 잔존해 있는 방사선 독성이 강한 원소만 산화/환원시켜 효과적으로 관리·보관하고 있다. 본 연구에서는 사용후핵연료의 폐기물량을 최소화하는 차세대 관리공정장치의 내열 설계요건을 도출하는데 목적이 있다. 차세대 관리공정 중 가장 고려되어야 할 단위공정으로는 건식분말화/혼합장치와 금속전환로이다. 고온으로 구동되는 건식분말화/혼합장치와 금속전환로의 용융염 밸브의 내열 설계 요건을 도출하기 위하여 먼저 국내외 기존 자료를 조사하였고, 각 장치에 사용되는 고온 내열 소재의 온도에 따른 열적, 물리적 특성을 조사하였다. 그리고, 차세대 공정의 실험 결과를 토대로 건식분말화/혼합장치(600 °C)와 금속전환로의 용융염 밸브(650 °C)에 대한 온도분포 조건을 결정하였다. 열 해석 프로그램(I-DEAS)을 사용하여 각 장치의 열변형량 및 작용응력을 계산한 후, 이에 따른 각 장치의 문제점을 분석하고, 이의 해결 방안을 도출하였다. 열변형 신뢰도를 검증하기 위하여 축소 모델의 고온 재료를 제작하여 열분석 검증 실험을 수행하였다. 또한 이를 바탕으로 내열 요건의 설계 자료를 도출하였다.

SUMMARY

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 powdering and mixing process 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.

1. 서론

경수로형 원자력 발전소에서 사용하고 난 사용후핵연료 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 단위공정으로는 건식분말화 혼합장치이다. 고온으로 구동되는 건식분말화/혼합장치의 내열 설계 요건을 도출하기 위하여 각 장치에 사용되는 고온 내열 소재의 온도에 따른 열적, 물리적 특성을 조사하였다. 그리고, 차세대 공정의 실험 결과를 토대로 건식분말화/혼합장치(600 °C)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. 건식분말화/혼합장치의 열특성 해석은 SUS 304와 SUS 310S 재료에 대해 수행하였으며, 열변형 상수(Thermal expansion coefficient) 차이에 따른 변형 양상과 응력 분포의 차이점을 분석하였다. 또한 가열로의 두께(Thickness) 변화에 따른 열변형과 응력 차이에 대해서도 분석하였다. 열해석 결과의 신뢰도를 검증하기 위하여 고온 재료의 축소 모델을 이용하여 국가 공인 실험 기관(KOLAS)인 신뢰성 평가센터에서 열 해석 검증 실험을 수행하였다. 또한 이를 바탕으로 내열 요건의 설계 자료를 도출하였다.

2. 본론

2.1 실험목적

차세대 관리공정의 핫셀 내부에는 우라늄 금속을 생산하기 위한 단위공정 조합으로 되어 있다. 종합공정의 단위공정에는 열 영향을 받는 장치들로 구성된다. 공정들 중에 건식분말화/혼합장치는 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 건식분말화/혼합장치로 400~600도 분위기에서 주로 가열로 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.

2.2 실험방법

건식분말화/혼합장치의 열특성 해석을 위하여 핫셀환경에서 사용되는 재질은 내 부식성, 방사선 영향을 고려해야 하고, 특히 차세대 관리 공정의 단위 공정들은 고온 특성에 대한 설계 요건들도 반영해야 한다. 따라서 핫셀 환경에 대한 열적/물리적 특성을 조사해 보았다. 그림 2는 SUS 304L, 310S의 분류에 따라 열팽창 특성 차이를 보여주고 있다. 분말이 통과 되도록 3개의 메쉬 층이 가열로 내부에 존재한다. 온도 분포 특성을 보면 그림 1에서와 같이 건식분말화/혼합장치의 가열기가 내재되어 있는 몸체부에서 400~600 °C의 열영향을 받

는다. 가열로 내부의 온도는 입구부터 3차 메쉬 층까지는 600℃이고 3차 메쉬 층부터 출구까지는 330℃의 온도 분포를 가진다. 해석은 SUS 304와 SUS 310S 재료에 대해 수행했으며, 열변형 상수(Thermal expansion coefficient) 차이에 따른 변형 양상과 응력 분포의 차이점을 파악해 본다. 또한 가열로의 두께(Thickness) 변화에 따른 변형과 응력 차이에 대해서도 검토해 본다.

2.3 실험결과

SUS304, SUS310S의 두께별, 재질별 응력분포와 변형량을 조사하였다. 표 1은 SUS 304의 해석 결과이고, 그림 3 은 가열로의 두께가 3mm, 그림 4는 SUS304의 응력분포를 보여 준다.

구속 조건이 없다면 실제 열에 의한 변형량은 재료의 두께에 무관하고 재료의 길이에만 비례한다. 그러나 여기서는 구속 조건에 의해서 두께가 3mm일 때의 가열로의 변형량(4.69mm)이 두께가 7mm일 때의 변형량(4.55mm)보다 크게 나타남을 알 수 있다.

응력 분포는 가열로의 상단부를 완전 구속 조건으로 정의한 상태로 해석을 수행하였다. 이로 인해 응력 값이 과도하게 평가된 부분이 있을 수 있는데 실제 거동은 완전 구속된 부분(변형량 = 0mm)도 일정 정도의 열변형이 발생할 수 있기 때문이다.

해석 결과만으로 평가해 보면 항복응력을 훨씬 상회하는 결과가 나왔는데 이는 응력 값이 과도하게 평가되었다고 하더라도 열변형에 의한 파손이 우려되는 결과라 할 수 있을 것 같다. 또한 열변형에 의한 최대 변형량도 약 4mm이상이므로 주변 조립품과의 변형에 따른 간섭 문제도 상당 부분 고려되어야 한다. 해석 결과는 표 1에서와 같이 알 수 있듯이 변형량이나 응력 값 모두 SUS 310S가 SUS 304보다는 좋은 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 두 재료 모두 열 응력이 항복 값(10kgf/mm²)을 훨씬 상회하는 값을 나타내고 있다.

2.4 유한요소 해석 결과 검증을 위한 실험과 해석 결과 비교

해석결과의 신뢰성 검증을 위해서는 실험결과와 해석 결과와의 비교를 통해 오차를 확인하는 과정이 필요하다. 이는 해석과 실험과의 상관관계를 규명하여 실험의 횡수를 줄임과 동시에 해석을 이용한 분석에 대한 신뢰도를 확보하기 위함이다. 실험은 가열로의 등근 형태의 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 직경 방향으로의 변화량을 측정하였다.

SUS 304 실험 분석 및 해석 결과를 보면 실험은 온도 구간을 25 ℃에서 시작하여 600 ℃까지 상승시켜 100 ℃부터 600 ℃까지의 변형량을 측정하였다. 600 ℃에서의 반경으로의 변형량은 0.0589mm으로 나타났고 해석결과는 0.0615mm로 해석 결과값이 실험 결과보다 약 4.4 % 정도 높게 나타났다. 그림 5는 온도가 600 ℃일 때의 플레이트의 열변형 해석 결과 값이다.

SUS 310S 실험 분석 및 해석 결과를 보면 실험은 SUS 304와 동일한 방법으로 수행하였다. 온도 구간을 25 ℃에서 시작하여 600 ℃까지 상승시켜 100 ℃부터 600 ℃까지의 변형량을 측정하였다. 600 ℃에서의 반경으로의 변형량은 0.0498mm으로 나타났고 해석결과는 0.0523mm로 해석 결과값이 실험결과보다 약 5.0 %정도 높게 나타났다.

SUS 304 플레이트, SUS 310S 플레이트를 실험했으며, 그림 6은 SUS 304 플레이트 실험 결과를 나타내며, 표 2는 평판(SUS 304/310S) 실험 결과 및 해석 결과 비교한 것이다.

실험 결과와 해석 결과는 분석에서 알 수 있듯이 해석 결과가 실험 결과에 비해 약간 높은 값이 나타남을 알 수 있었다. 결과 분석에서 언급한 것처럼 해석 결과가 실험 결과에 비해 4~5 % 정도 높다는 것을 확인할 수 있었다. 그러므로 열변형과 관련된 해석에서 얻어진 결과 값을 바르게 활용하기 위해서는 결과 값이 5 % 정도는 차세대 관리공정 실증장치 설계 요건으로 고려해야 될 것이다.

3. 결 론

경수로형 원자력 발전소에서 사용하고 난 사용후핵연료 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 건식분말화/혼합장치를 선정하였고, 이 장치에 대한 열변형량과 열응력을 조사하였다. 건식분말화/혼합장치에서 주로 응력이 집중되는 부분은 가열로를 지지하기 위해 상부에 플랜지 형태로 설계된 플레이트이다. 특히, 이 부분은 완전 구속 조건을 부여해서 해석을 수행했으므로 이 부분의 설계를 슬라이딩이 가능한 구조로 변경한다면 응력은 상당히 줄어들 수 있다. 그러나 열에 의한 변형량이 4mm 정도로 비교적 큰 값으로 나타났다. 이는 주변 기계 장치들과의 접촉에 의한 문제가 발생할 소지가 높다. 그러므로 주변 장치의 설계 시 열변형량을 고려해야 한다.

열 해석 프로그램인 I-DEAS의 신뢰도를 검증하기 위해 국가공인 검증 기관(KOLAS)에서 분석 실험한 결과 4~5 %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, E. L. Hall ; High-Temperature Ordered Inter-metallic Alloys III, edited by C.T.Liu, A.I.Taub, N.S. Stoloff and C.C.Koch, MRS, Boston, Massachusetts (1988)373
3. N. Fujitsna et al., Intermetallic Compounds Struture and Mechanical Properties edited by H. Izumi, J. I. M., Sendai, Japan (1991)997
4. Liang J, Gollhardt N, Lee PS, Schroeder SA, Morris WL "A Study of Fatigue and Creep Behavior of Four High Temperature Solders" Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures , V.19 N.11 , (1996)
5. Lee WS, Lin CF "High-Temperature Deformation Behavior of TI6AL4V Alloy Evaluated by High Strain-Rate Compression Tests" Journal of Materials Processing Technology , V.75 N.1-3 , (1998)
6. Kuznetsov GV "High-Temperature Failure of Rubberlike Heat-Shielding Material under Conditions of High Pressure" High Temperature-USSR , V.34 N.6 , (1996)

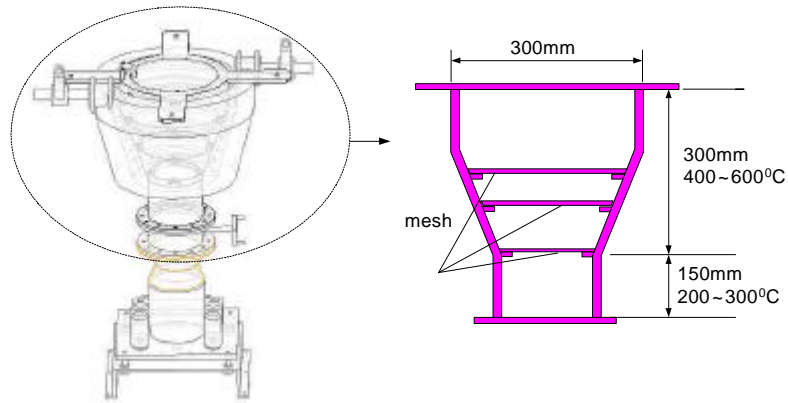
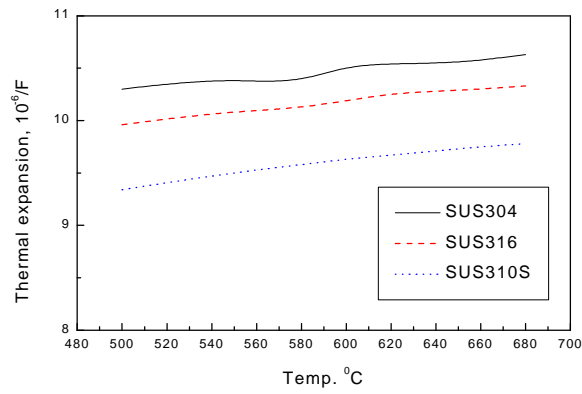


그림 1. 건식분말화/혼합장치의 온도 분포도



.그림 2. 산화반응 온도 영역에서 고온 재료의 열팽창 계수 비교.

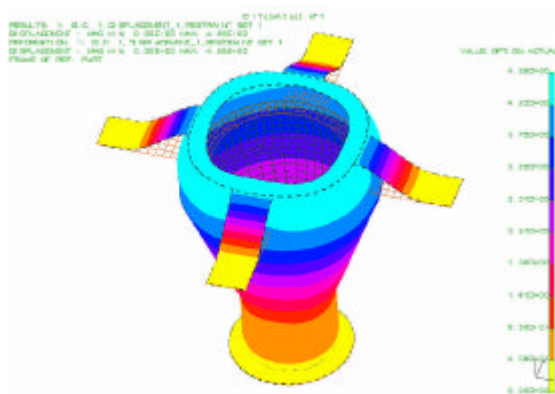


그림 3. 가열로(SUS 304)의 변형량(두께 3mm).

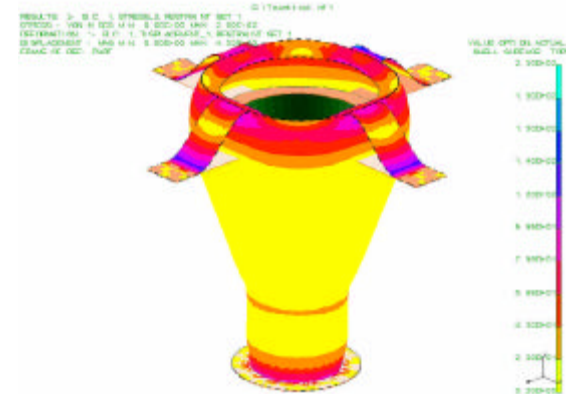


그림 4. 가열로(SUS 304)의 응력 분포(두께 3mm).

표 1. SUS 304와 310S의 해석 결과

구분	변형량 (mm)	응력 (kg/mm ²)	비고
3mm	4.69	131	SUS 304
7mm	4.55	200	SUS 304
3mm	4.32	126	SUS 310S
7mm	4.20	191	SUS 310S

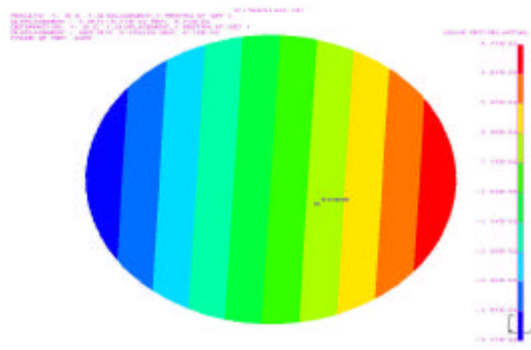


그림 5. 원주방향 (SUS 304) 플레이트의 해석 결과(온도 600 °C).

표 2. 평판(SUS 304/310S) 실험 및 해석 결과

구분	SUS304 (변형량, mm)	해석 결과 (mm)	SUS310S (변형량, mm)	해석 결과 (mm)
600 °C	0.0589mm	0.0615	0.0498mm	0.0523

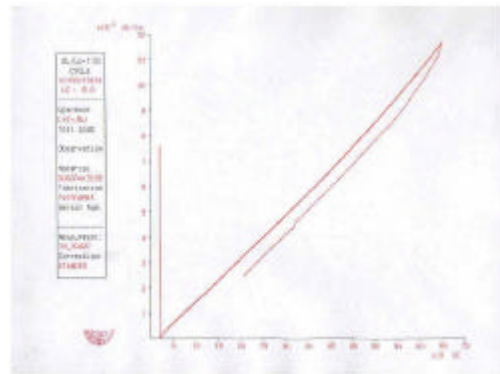


그림 6. 원주 방향(SUS 304) 플레이트 실험 결과.