

내부 압력변화에 대한 사용후핵연료 분말화장치 가열로의 열 응력 해석

김영환 · 정재후 · 홍동희 · 박병석 · 이종광 · 윤지섭

Thermal Stress Analysis of Spent Fuel Vol-oxidizer Furnace on the Internal Pressure

Y. H. Kim, J. H. Jung, D. H. Hong, B. S. Park, J. K. Lee, and J. S. Yoon

Abstract

We are developing a vol-oxidizer which transforms the spent UO_2 pellets into the U_3O_8 power through oxidizing process. The vol-oxidizer consists of furnace, filter, heater and valve etc. When the filter is blocked by the powder, the internal pressure of the furnace is increased owing to the air flow restriction. Then, the furnace vessel is swelled and deformed by it. In this paper, we proposed a procedure of the thermal analysis for furnace vessel design of spent fuel vol-oxidizer. In this work, we determined the thickness of the furnace through analyzing the internal pressure and the thermal stress of the furnace with respect to various pressure and temperature. To analyze the thermal stress, we used ANSYS 8.0 for constructing a FEM model of the furnace, and then analyzed it based on the ASME code. We also surveyed the material property and yield stress of SUS304 with various temperature. Analysis results are compared with the yield stress of the material. We manufactured the furnace and conduct the verification experiments.

Key Words : Vol-oxidizer, Furnace, Stainless, Pressure, Spent UO_2 Pellets, Thermal Analysis, U_3O_8 Power

1. 서론

원자력 발전소에서 사용하고 난 핵연료는 해마다 그 발생량이 증가하고 있다. 매년 발생하는 화학적 독성이 강한 방사성 폐기물량을 줄임으로써, 방사성 위험도를 감소시키고 환경적 위험으로부터 안전하게 보관 관리를 위하여 차세대관리 공정을 개발하고 있다. 차세대관리 공정들 중에서 방사성

독성이 강한 특정원소를 추출하는 금속전환로의 반응효율을 높이기 위해서 분말화 장치에서 UO_2 펠릿을 산화하여 균질한 U_3O_8 분말을 공급하여야 하며, UO_2 펠릿을 분말화하기 위해서 분말화장치가 개발되고 있다. 분말화장치구성부 중에서 분말을 제조하기 위해서 펠릿을 산화시키는 가열로가 필요하다. 본 연구의 목적은 $500^\circ C$ 에서 가열로 내부의 압력변화에 따른 가열로 두께를 결정한다.

가열로의 가정된 두께인 6mm가 필터 막힘에 의한 가열로 내압증가에 대해 충분한 마진을 가지고 있는지 평가하고 마진이 충분하지 않을 경우 적절한 가열로의 두께를 제시한다. 연구를 수행하기 위해, 열 구조해석이 가능한 유한요소 수치해석 코드인 ANSYS 8.0 을 사용하였다. 본 논문은 방사선환경에서 장치의 안전성을 확보하고 설계 자료를 생산하는데 그 목적을 두고 있다. 가열로 두께의 변형해석은 전체 반응로에 대한 열 구조해석을 수행함으로써 응력분포와 변위를 확인하고 설계 값이 적절한지에 대한 평가와 적절한 설계 data를 제시하였다. 본 연구에서 응력한도에 대한 평가기준은 ASME 설계기준을 따랐다. 최종적으로 장치를 제작하여 고온에서 압력변화에 따라 검증실험을 수행하였다.

2. 해석 방법론 및 해석 대상과 조건

2.1 가열로 응력 해석 방법

그림 1은 분말화장치의 내부구조를 보여준다. 원리 및 구조는 다음과 같다. 먼저 펠릿의 시료를 투입구에 보내어 가열로 내부의 메시에 시료가 쌓이면 500℃까지 가열하고 공기를 보내어 반응을 한다. 이때 반응된 분말이 공기에 의해 출구필터에 막히게 되면 공기 압력이 증가하고 고온상태의 가열로는 높은 압력을 받게 된다. 실제로 투입된 시료는 핵연료 물질이기 때문에 사전에 열응력에 의한 안전설계 기준이 요구된다.

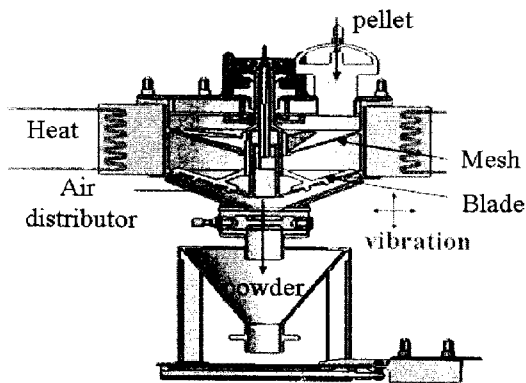


그림 2. 분말화 장치와 내부구조.

가열로에 가해지는 하중은 온도 하중과 내부압력 하중이다. 가열로의 온도 및 내부압력에 대한 해석조건은 지정되어 있다. 본 해석은 ASME 설계기준에 근거하여 가열로 가 탄성영역에서 항복조건을 만족하도록 shake-down할 수 있는 적절한 두께 수치를 제시하는데 그 목적이 있다. 본 해석에서의 응력분류 및 항복조건은 표 1에서 보는바와 같이 1차 응력은 일반적인 외력, 내력 및 모멘트에 의하여 힘의 평형관계를 만족하는 수직 응력 및 전단응력으로 정의하며, 2차 응력은 열응력, 불연속응력, 용접접합에 의한 응력을 나타낸다. 피크응력은 Hole과 같은 기하형상에 의한 국부적인 집중 응력이고 크리프 응력은 페라이트 375℃ 이상, 오스테나이트 및 고 니켈합금 425℃ 이상에서 고려한 것이다. 표 2는 응력 성분별 항복기준을 예시한 것이다. 1차 응력의 항복기준에서 막 응력은 항복강도의 2/3이하이고, 국부응력은 항복강도이하로 한다. 2차 응력은 1차 응력+2차 응력(항복강도 이하)이고, 피크 응력 1,2차 응력+피크응력 (항복강도×2의 이하)이다.

표 1. 응력분류

응력분류	정의
1차 응력	일반적인 외력, 내력 및 모멘트에 의하여 힘의 평형관계를 만족하는 수직 응력 및 전단응력
2차 응력	열응력, 불연속응력, 용접접합에 의한 응력
피크 응력	Hole과 같은 기하형상에 의한 국부적인 집중 응력
크리프 응력	페라이트 375도 이상, 오스테나이트 및 고 니켈합금 425도 이상에서 고려.

표 2. 응력성분별 항복기준

응력성분	항복기준
1차 응력	막 응력(항복강도의 2/3이하), 국부응력(항복강도이하)
2차 응력	1차응력+2차응력(항복강도 이하)
피크 응력	1,2차 응력+피크응력 (항복강도×2의 이하)

2.2 해석 대상 및 해석 조건

그림 2는 가열로의 유한요소 모델을 보여주고 있으며 그림 3은 가열로 구성도를 나타낸다. 그림 3에서 밸브 하단에서 공기가 유입될 때 메시에 쌓인 분말에 의해 필터가 막히게 되고, 동시에 압력이 증가하여 고온에서 가열로가 부풀어 오를 것을 가정한 그림이다. 표 1은 분말에 의해 필터가 막힘으로 가열로 내 압력이 증가하여 가열로의 두께에 변형이 생기는지 알기위하여 해석 조건을 제시한 것이다. 이 해석조건은 가열로 두께를 결정하기 위한 것으로 온도 변화는 500~700℃까지 변화를 주고, 압력은 1~5kg/cm² 까지 변수를 주었다. 또한 재질은 SUS304 계열이고 가열로 두께를 6mm로 가정하였다.

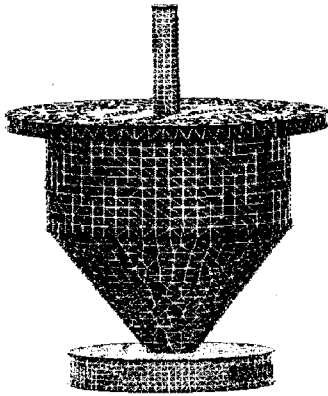


그림 3. 가열로 FE 모델.

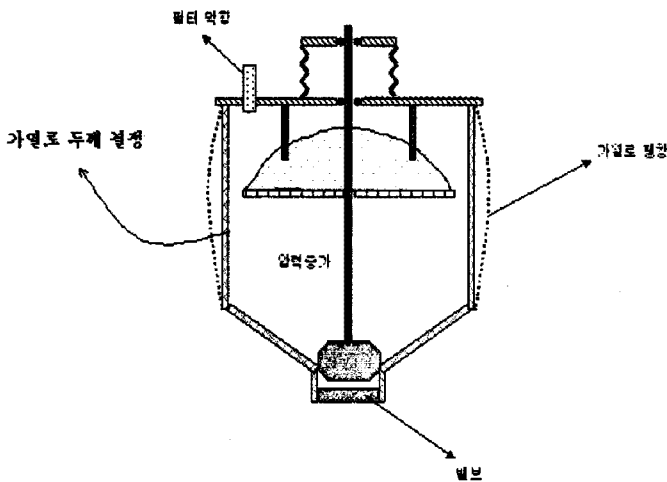


그림 4. 가열로 구성도.

표 3. 가열로 압력 온도 조건

제목	내용
상황	필터의 막힘으로 가열로 내 압력증가 → 가열로두께 변형
결정사항	가열로 두께 결정
온도 조건	500 ~ 700℃
재질	SUS 304
변수	압력(kg/cm ²) : 1, 2, 3, 4, 5
두께 가정	6 mm

2.3 재료 물성치

해석에 필요한 SUS304의 재료 물성치는 표 4와 같다. 그림 4의 항복응력(Yield strength)의 경우 참고문헌에 따른 data가 제한적이어서 2차식으로 내삽한 자료를 사용하였다.

표 4. SUS304 재료 물성치

Properties	Unit	Value
Elastic modulus	GPa	193 (in tension), 78 (in torsion)
Density	g/cm ³	8.03
Poisson ratio		0.29

Temperature (°C)	Mean coefficient of thermal expansion (μm/m/°C)
0-100	17.2
0-315	17.8
0-538	18.4
0-649	18.7

Temperature (°C)	25	600	700	800	900	1000
Tensile Strength (MPa)	600	380	270	170	90	50

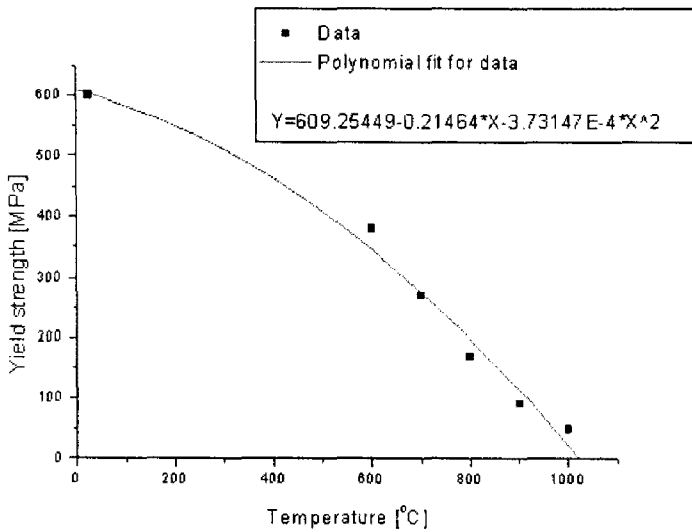


그림 5. SUS304의 온도에 따른 항복강도.

3. 가열로 응력 해석 결과

3.1 가열로 두께 타당성 평가

가열로의 두께가 6mm일 때, 500℃에서 SUS304의 항복응력은 450MPa이다. 그러므로 항복기준은 막 응력 기준으로 300MPa, 국부응력 기준으로 450MPa이다. 본 해석에서 500℃ 조건의 경우 Reference temperature를 500℃로 잡아서 실제로 발생한 응력은 내압에 의한 결과라고 볼 수 있다. 하지만 그림 5~7을 보면 같은 내압 1kg/cm² 환경에서 온도가 500℃부터 700℃까지 올라갈 경우 900MPa이상으로 항복응력을 초과하는 것을 볼 수 있다. 이것은 SUS304가 상대적으로 열팽창계수는 크고 탄성계수는 작은 특징을 가지기 때문이다. 또한 본 해석은 transient 해석이 아니라 static한 상황에서 외부온도와 구조물의 온도가 갑자기 100℃ 이상씩 차이가 나는 것과 같은 효과를 주는 것이므로 실제 구조물과는 차이가 있을 것이다. 500℃의 경우만 참고하자면 평균적인 응력분포는 Cylindrical coordinate에서 가장 큰 응력 성분인 circumferential direction

의 응력 수치인 $\frac{Pr}{t}$ 와 비슷함을 알 수 있다. 표 5의 항복기준과 해석 값을 비교해보면 500℃의 P 변화에 따른 해석결과 값이 안정함을 보여준다.

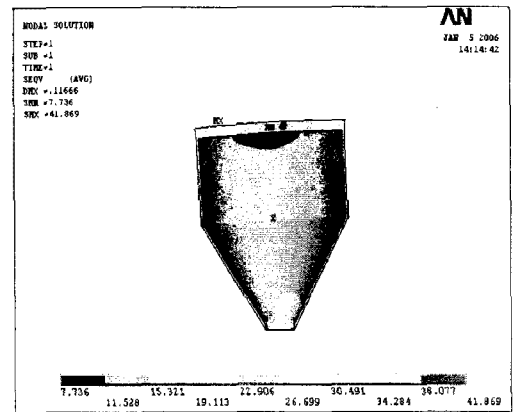


그림 6. 내압 1kg/cm², T=500℃.

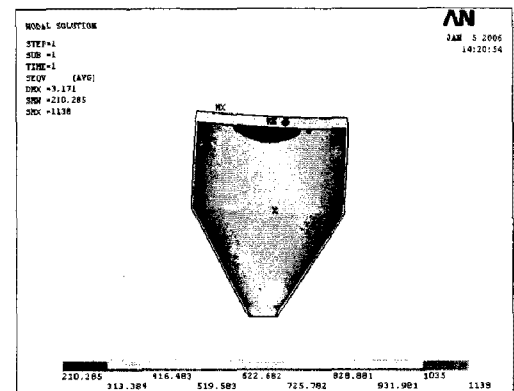


그림 7. 내압 1kg/cm², T=600℃.

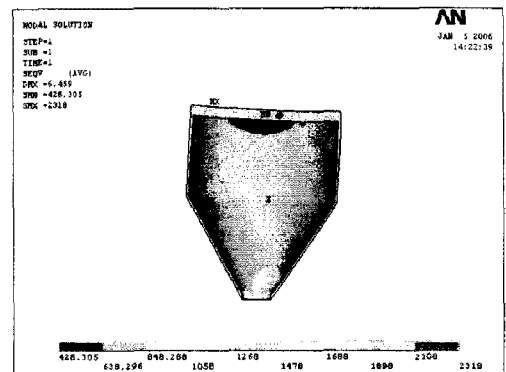


그림 8. 내압 1kg/cm², T=700℃.

표 5 항복기준비교표

조건 (500℃, P변화), kg/cm ²	응력 구분	해석값 (MPa)	허용값 (MPa)
1	P _m	15	300
	P _L	41	450
2	P _m	30	300
	P _L	83	450
3	P _m	45	300
	P _L	125	450
4	P _m	61	300
	P _L	167	450
5	P _m	76	300
	P _L	209	450

그림 9는 가열로 장치의 두께를 6mm로하고 압력과 온도 변화에 따른 검증실험을 수행하였다. 실험조건은 500℃에서 공기를 투입하고 압력의 변화를 1~5 kg/cm²까지 변화를 줌과 동시에 출구를 막고 가열외경과 같은 한쪽이 잘린 링 형태의 지그를 만들어 팽창정도를 버니어 캘리퍼스로 측정하였다. 그 결과 잘린 부분의 틈새는 변화가 없었다. 따라서 500℃, 압력 5 kg/cm² 까지 가열로 두께에 대한 열응력의 영향은 없음을 알 수 있었다.

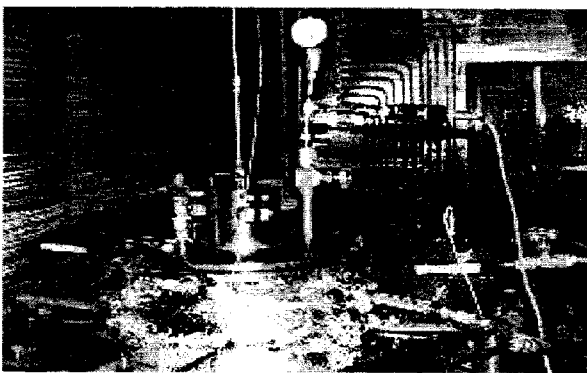


그림 9. 가열로의 압력 검증실험.

4. 결론

차세대관리공정의 금속전환로에 균질한 U₃O₈의 분말을 공급하기 위한 분말화 장치가 개발되고 있다. 분말화장치 가열로두께의 압력에 따른 안전성을 확보하기 위하여 열해석 프로그램을 수행하였다. 본 연구에서 기존 가열로장치의 열 구조 측면에서 안전한지를 확인하고 주요 설계 치에 대해 적절한 공학적인 설계자료 생산을 목적으로 하고 있다. 본 해석에서 설계인자인 가열로 두께는 설계기준측면에서 적절한 값이다. 다만 SUS304의 경우 항복강도 역시 같은 온도의 페라이트계 합금에 비해서 낮은 편이다. 해석결과에 있어서 500℃, 600℃는 압력변화에 대한 항복기준은 안전범위에 있음을 알 수 있었으나 700℃에서는 압력 1kg/cm² 부근에서는 항복응력이 425MPa 이상으로 불안정한 값을 보이고 있다. 검증실험에서 500℃, 압력 5 kg/cm² 까지 가열로 두께에 대한 열응력의 영향은 없음을 알 수 있었다.

본 연구를 통해서 가열로 압력 및 온도 조건과 해석 방법론을 제시하였고, 방사성폐기물을 감소시키는 공정장치의 일부로서 분말화장치의 상용화 설계를 위한 가열로 두께의 설계기술을 확보하였다.

후 기

본 논문은 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 연구 과제입니다.

참 고 문 헌

- (1) ASM, "Atlas of Fatigue Curve" (1986).
- (2) ASME " Boiler & Pressure Vessel Code Section III", (1992).
- (3) J.A. Stone, "Vol-oxidation Studies with UO₂ Reactor Fuels" ANS, Meeting on Fuel Cycles for Eighties, DP-MS-80-9, Sep.-Oct.(1980).