

## 사용후핵연료 시험시설에서 전기 금속 전환반응기의 내열 방안 분석

김영환\*, 윤지섭\*, 정재후\*, 홍동희\*, 박기용\*, 진재현\* (\*한국원자력연구소)

Analysis on the heat-resisting method of the electrolytic metal reduction reactor in the test facility for the spent fuel waste

Young-Hwan Kim, Ji-Sup Yoon, Jae-Hoo Jung, Dong-Hee Hong, Gee-Yong Park, Jae-Hyun Jin  
(Korea Atomic Energy Research Insitute)

### ABSTRACT

To reduce the storage space of spent fuel used at the atomic power plants in the over the world, the uranium elements contained in the spent fuel is being extracted and effectively stored. For this, the spent fuel are oxidized and deoxidized. In this study, it is produced the heat-resisting methods about the spent fuel management technology research and test facility for the spent fuel waste for spent fuel minimized. The first considered processes in the facility are the electrolytic metal reduction reactor process. Since the electrolytic metal reduction reactor is operated at the high temperature range, we have to consider the heat-resisting methods for the devices. For the heat-resisting methods, we have searched and analyzed technical reference for the heat-resisting methods. We have calculated thermal stress and strain of each devices by the commercial analysis software, ANSYS. D.S. It is experimented for inspecting confidence rate of analysis results. By using the results, we have analyzed the problems of parts and determined the heat-resisting material, commercial parts, and the size of parts and O-ring. Based on these results, it is produced the heat-resisting methods of magnesia filter, cathode, and reactor for the electrolytic metal reduction reactor.

**Key Words** : Heat-resisting(내열), Furnace(반응로), Magnesia(마그네시아), Cathodes(음극), SUS 304(스테인레스), High-temperature(고온), Strain(신장), Yield stress(항복응력)

### 1. 서론

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 차세대관리 공정장치의 내열 방안을 도출하는데 목적이 있다. 전기 분해 금속 전환 반응기 및 주변기기의 내열 방안 도출을 위해서 전기 금속전환 반응기 주변기기 부품의 구조에 대한 열 영향 고려 대상 부품을 고려해 보았다. 분석결과, 케이스드 홀더, 마그네시아 필터, 케이스드, 반응로에 대해 내열대상 부품으로 선정하였다. 구조체의 수직 방향의 열변형에 대한 마그네시아 필터, 전극(케소드), 반응로의 상호 최대 변형과 마그네시아 필터와 전극(케소드)의 반경 방향의 변형을 분석하여 부품간의 간섭 영향을 고려하였다.

열 해석 프로그램은 Ansys D.S.(Design Space)를 사용하여 분석하였다. 해석 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 시편을 이용하여 이의 열변형 실험과 해석을 수행하여 이들의 결과를 비교하였다. 시편은 마그네시아 및 SUS304를 사용하였으며 시편의 열변형 실험은 인스트루먼트 사의 TMA-2940로 분석하였다. 열팽창으로 인해 발생하는 Cathode holder 와 마그네시아 filter의 반경방향 응력, 마그네시아 Filter의 축방향 응력, Cathode 의 축방향 응력에 대해 내열 방안 1,2,3 의 제시안 별로 문제점을 분석하였고, 선정된 Cathode holder의 두께를 결정하였다. 이 모든 결과를 종합하여 최종적으로 마그네시아 필터, 케이스드, 반응로의 반경 방향과 축 방향의 열변형을 고려한 내열 방안을 도출하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 실험

### 2.1.1 구조 분석 및 내열대상 부품 선정

금속전환반응기는 가열로에 의하여 650 ℃에서 반응하는 장치로, 고온 작동 시에도 열변형으로 인한 간섭 및 구조 변화가 최소화되도록 설계하여야 한다. 이를 위하여 먼저 열해석을 통하여 고장 발생과 구조 변화에 따른 위험 가능성이 큰 내열대상 부품을 선정하였다. 열영향을 고려하여야 할 대상으로는 캐소드, 마그네시아 필터 접합부(그림 1의 A), 캐소드와 마그네시아 필터의 축방향에 대한 열팽창(그림 1의 B), 및 마그네시아 필터와 반응로의 축방향(그림 1의 C)에 대한 열팽창 등이 있으며 이들에 대한 열변형 해석 결과는 그림 2에서 보는 바와 같다. 그림 2는 금속전환반응기의 Mesh node를 143,232 개, Elements를 80,343 개, 대기 온도를 25 ℃, 냉각장치 접촉 온도를 100 ℃, Furnace의 입력 온도를 650 ℃로 했을 때 전체 구조물 변형 분포를 보여주고 있다. 그림 2에서 Furnace, 마그네시아 필터, 및 캐소드 부위가 가장 큰 변형이 일어남을 알 수 있다. 그리고 반응 메커니즘으로 볼 때, 금속전환반응기의 중심부는 LiCl 매질의 환원 반응과 650 ℃의 고온 접촉 분위기로 인하여 캐소드, 마그네시아 필터, 및 반응로 부품 등이 고장발생 확률이 가장 높다. 따라서, 그림 3에서 보는 바와 같이 캐소드 홀더(그림 3의 A), 마그네시아 필터(그림 3의 B), 캐소드(그림 3의 C), 및 반응로(그림 3의 D)를 내열대상 부품으로 선정하였다.

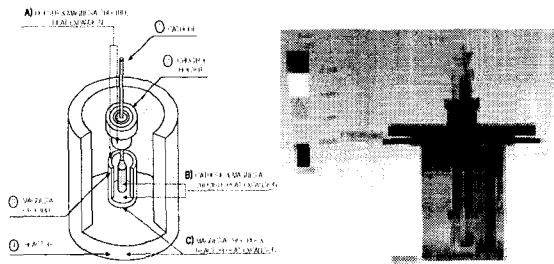


그림 1. 반응기구구조. 그림 2. 열변형 분포(650 ℃).

내열대상 부품의 열팽창 프로그램 해석을 수행하였다. 금속전환반응기의 부품은 대부분 SUS304로 구성되나 U 필터는 마그네시아로 만들어 지기 때문에 필터 주변의 열변형량을 해석하여야 한다. 즉, 그림 3에서 보는 바와 같이 구조체의 수직 방향으로 마그네시아 필터, 캐소드 및 반응로의 상호 최대 변형과 구조체의 반경 방향으로 마그네시아 필터와 캐소드 홀더의 최대 변형을 분석하여 부품간의 간섭 영향을 고려하였다.

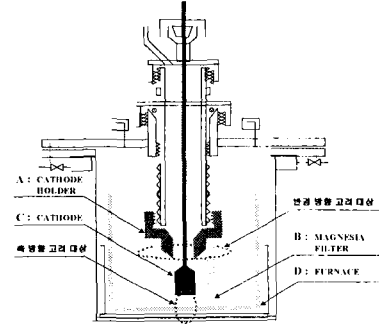


그림 3. 내열대상으로 선정된 부품.

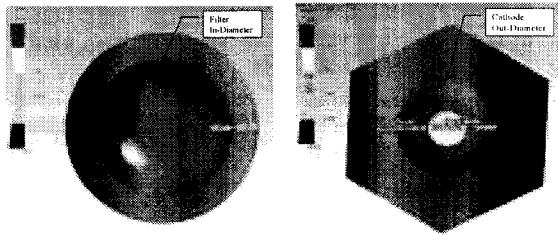
### 2.2 실험 결과

열해석 프로그램으로는 Ansys D.S.(Design Space)를 사용하였으며 그 결과는 표 1 및 표 2와 같다. 표 1은 금속전환반응기의 상판 플랜지 하단 면을 기준으로 각 부품들의 수직 방향에 대한 열변형 간섭량을 나타내고, 그림 4와 표 2는 마그네시아 필터와 캐소드의 반경방향에 대한 열변형 간섭량을 나타낸다. 표 1에서 전체 구조체의 열변형은 온도 분포에 따라 상당한 편차가 일어나고 있기 때문에 상부 고정체인 캐소드의 열변형을 우려하였으나, 상판 플랜지 하단면을 기준으로 해서 캐소드와 마그네시아 필터 및 반응로는 전반적으로 하향 변형이 일어나므로 이격에 대한 편차가 심하지 않음을 알 수 있다. 그러나, 실제 반응로는 바닥의 고정 프레임에 의해 구속되어 있으며, 만약 화학반응 후 최종적으로 배출되는 폐액의 용량을 최대 줄이면서, Li 분말이 정량적으로 공급되어야 한다면 캐소드와 마그네시아 필터가 접촉되어 있어야 한다. 이와 같은 경우는 세라믹 계통인 마그네시아 필터가 파손되거나 캐소드 축이 구부러지는 사고가 발생한다. 마그네시아와 캐소드 홀더와의 반경 방향의 변형은 표 2에서와 같이 열변형에 의한 간섭으로 마그네시아 필터 또는 캐소드 홀더가 파손될 수 있다. 따라서, 설계 시 안전율을 고려하여 +0.1 mm 이상의 +공차를 적용하여야 할 것이다.

해석 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 시편을 이용하여 시편의 열변형 실험과 해석을 수행하여 이들의 결과를 비교하였다. 시편은 마그네시아 및 SUS304를 사용하였으며 크기는 12L x 4W x 1 H mm이다. 실험 결과는 그림 5에서 보는 바와 같다.

표 1. 캐소드, 마그네시아 필터, 반응로의 열변형

부품	고정점에서 변형량	열팽창후 간섭 부품과의 이격	초기 조립 간격	비고
캐소드	2.53 mm	4.46 mm	5.00 mm	
필터	1.09 mm	4.21 mm	5.00 mm	
반응로	1.74 mm			

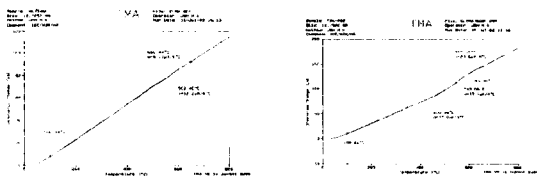


(a) 마그네시아 필터 (b) 캐소드 홀더  
그림 4. 필터와 캐소드 홀더의 반경 방향의 열변형.

표 2. 마그네시아 필터와 캐소드 홀더의 열변형

온도 (°C)	마그네시아 필터(내경) 열변형 (mm)	캐소드 홀더(외경) 열변형 (mm)	열변형량 (mm)
650	0.0628	0.1252	0.0624

표 3에서와 같이 마그네시아 재료는 실험과 해석의 결과 0.027 mm 정도로 약 10%의 오차가 발생되며, SUS304의 경우 결과 0.134 mm로 27%의 오차를 보이고 있다. 따라서, 실제 부품 설계시 이와 같은 오차를 고려하여 설계하여야 할 것이다.



(a) 마그네시아 (b) SUS 304  
그림 5. 마그네시아 및 SUS304 시편의 열변형 실험

표 3. 재료에 대한 시험과 해석 결과(650 °C)

변형량	마그네시아	SUS304	비고
실험값	0.0928 mm	0.1448 mm	시편길이 12 mm
	0.232 mm	0.362 mm	실험길이 12 mm
해석값	0.259 mm	0.496 mm	길이 30 mm
오차	10 %	27 %	

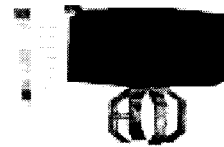
## 2. 2.1 고온용 장치의 내열방안 도출

캐소드 홀더와 마그네시아 필터의 반경방향 응력은 650 °C 분위기에서 각각 SUS재질의 압축항복응력

과 마그네시아 재료의 압축항복응력을 훨씬 상회하므로 필터가 파손될 가능성이 매우 높으나, 마그네시아 필터의 축방향 응력은 반응로의 팽창율이 크기 때문에 마그네시아 필터의 파손에 큰 영향을 주지 않는다. 그러나, 반응로가 구속되어 있다면 마그네시아 필터는 파손된다. 그리고 캐소드의 축방향 응력도 압축항복응력을 훨씬 상회하기 때문에 마그네시아 필터의 취성과파손과 캐소드 축의 휨이 발생된다. 따라서, 홀더와 마그네시아 필터의 반경방향 응력, 마그네시아 필터와 캐소드의 축방향 응력에 대한 내열방안이 고려되어야 한다. 이를 위하여 캐소드 홀더의 구조를 그림 6과 같이 고안하여 구조상의 문제점을 분석하였다. 소켓 A형의 경우는, 고정부가 마그네시아의 필터의 내경 방향으로 접촉된다. 그러나, 고온의 분위기와 고정점에서 마그네시아 필터의 고정핀 구멍은 홀더로부터 멀리 떨어져 있기 때문에 휨이 발생할 우려가 있다. 또한, 소켓 A형은 복잡한 모양 때문에 가공에 어려움이 따른다. Housing형의 경우는, 마그네시아 필터의 외주부분에 접촉되며, 반경방향에 대한 마그네시아 필터의 열팽창량보다 SUS304 재질의 열팽창량이 크기 때문에 간섭을 받지 않는 장점이 있다. 그러나, SUS재질이 마그네시아 재질보다 열팽창율이 크기 때문에 Housing과 Filter 사이에 틈새가 발생할 우려가 있다. 소켓 B형의 경우는, 소켓 A형과 마찬가지로 마그네시아 필터의 내경 방향으로 접촉된다. 그러나, 소켓 A형과 달리 반경방향에 대한 마그네시아 필터의 응력을 흡수해 줄 수 있고, 상부 방향에 대한 마그네시아 필터의 열팽창을 흡수할 수 있는 구조로 되어 있다. 따라서, 소켓 B형을 캐소드 홀더로 선정하였다.



(a) 소켓 A형 (b) Housing 형



(c) 소켓 B형

그림 6 열응력을 고려한 내열방안 (두께 1 mm).

선정된 소켓 B형에 대해 설계시 고려사항은 다음과 같다. 마그네시아 필터와 캐소드 홀더의 반경방

향에 대한 열팽창으로 발생하는 응력때문에 마그네시아 필터가 파손된다. 따라서, 마그네시아 필터가 파손되지 않고 반경방향 완충부가 변형되지 않도록 열응력을 해석하여 반경방향 완충부의 두께를 결정하여야 한다. 즉, 두께에 따른 열응력이 SUS310의 압축항복응력(151.69 Mpa)보다 작으며, 부품의 변형을 흡수할 수 있는 최적의 두께를 결정하는 것이다.

열해석 프로그램(Ansys D. S.)으로 반경방향 완충부(폭 10 mm)의 두께가 0.25, 0.5, 1.0, 및 2.0 mm일 경우 열응력을 계산한 결과는 표 3에서 보는 바와 같다. 두께가 작아질수록 내부응력이 증가하여 두께 0.25 mm 이하(147 Mpa)에서는 압축항복응력에 근사하기 때문에 탄성 변형을 발생할 수 있다. 이에 반하여, 두께가 2.0 mm의 경우는 내부응력이 66.5 Mpa로 안전 응력 범위 이내이나 마그네시아 필터와 케이스드 사이의 최대 공간을 확보하기 위해서는 바람직하지 않다. 따라서 열팽창에 의해 항복하중을 넘지 않으면서 변형을 완충할 수 있는 두께는 0.5~1.0 mm가 적합하다.

표 4. 반경방향 완충부 두께변화에 따른 응력분포

두께(mm)	최대응력분포 (Mpa)	두께(mm)	최대응력분포 (Mpa)
0.25	146.753	1	71.787
0.5	78.887	2	66.530

도출된 내열방안을 고려하여 내열대상 부품의 3차원 설계를 하였다. 선정된 소켓 B형의 케이스드 홀더와 결합한 전기 금속전환반응기의 개념도는 그림 7에서 보는 바와 같다.

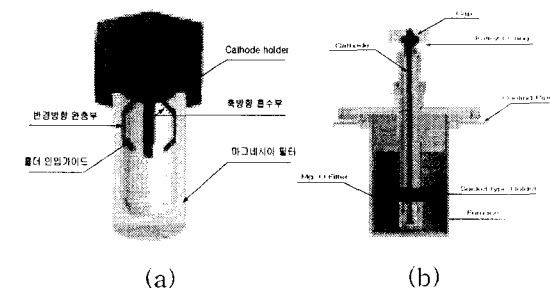


그림 7. 전기 금속 전환반응기 개념도.

### 3. 결론

전기 분해 금속 전환 반응기 및 주변기기의 내열

방안 도출을 위해서 전기 금속 전환 반응기 주변기기 부품의 구조 분석 및 내열 대상 부품을 선정하였고, 열적 거동을 조사하기 위해서 열팽창 해석 프로그램(Ansys D.S.)의 분석을 수행하였다. 해석 결과를 검증하기 위하여 인스트루먼트 사의 열 분석기(TMA-2940)로 실험과 해석을 비교 분석하였다. 해석 결과를 고찰해보면 온도 분포에 따라 상당한 편차를 보이고 있으며 상부 고정체인 케이스드의 변화에 대한 위험도를 우려하였으나 상부로의 변화와 하부로의 변화가 함께 일어나므로 동시 변화에 대한 편향 편차의 줄임을 볼 수 있으며, 케이스드와 마그네시아 필터 및 반응로는 전반적으로 하향 변형이 일어나므로 이격에 대한 편차가 심하지 않음을 알 수 있다. 그러나 반응로가 구속 조건이고 케이스드와 마그네시아 필터가 접촉되어 있다면 세라믹 계통인 마그네시아 필터가 파손되거나 케이스드 측에 휨이 발생된다. 특히 마그네시아와 케이스드 가이드와의 X방향의 변형해석은 조립의 공차를 10에 의한 조건이므로 해석 결과를 미루어 볼 때 파손에 가까운 현상을 추측할 수 있다. 따라서 상호 X방향의 열팽창에 대한 설계시 공차를 유지하여 제작함이 바람직함을 알 수 있었다. 따라서 내열 대상 부품의 내열 방안을 위해서 프로그램 해석 결과에 대해 내열 방안을 분석하여 도출하였다. 따라서 제안된 내열 방안 기준안은 차세대 공정의 전기 금속 전환 반응기 및 주변기기 부품에 대한 현재의 실험 장치를 개선하여 실증용 장치를 제작하는데 활용될 예정이다.

### 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 Structure and Mechanical Properties edited by H. Izumi, J. I. M., Sendai, Japan (1991)997