

열특성 측정표준 기반구축
산업기술기반조성에 관한 보고서

(3차년도 위탁보고서)

2006. 2. 24.

KAERI

한국원자력연구소

제 출 문

한국원자력소장 귀하

본 보고서를 “열특성 측정표준 기반구축사업에 관한 산업기술기반조성”
(사업기간: 2005. 2. 1. ~ 2006. 2. 28.) 사업의 위탁보고서로 제출합니다.



2006. 2. 24.

주관기관 : 한국표준과학연구원

위탁기관 : 한국원자력연구소

총괄책임자 : 이 상현

위탁과제책임자 : 강 권호

위탁과제참여자 : 박창제, 송기찬

요약문

본 보고서에서는 크게 3가지 분야로 나누어져 연구를 진행하였다. 우선 핵재료 열특성 측정표준 기반구축과 측정 장비 신뢰성 평가, 그리고 표준화 및 산업체 보급으로 나뉘어져 있다. 핵재료 열특성 측정표준 기반구축과 핵재료 열특성 측정 장비 신뢰성 평가 부분에서는 우선, 모의건식공정 핵연료의 표준물질 제조공정을 확립하였으며 핵연료의 표준물질 특성을 조사하였다. 또한 모의 핵연료의 열특성 측정 표준을 구축하기 위해 열중량 분석기와 열팽창 측정기에 대해 장비의 신뢰성 평가를 수행하였다. 그리고 건식공정 핵연료의 열특성 SRD를 생산하였다. 측정장비의 신뢰성 평가부분에서는 열팽창 시험, 열중량 분석 시험, 그리고 열확산도 시험에 대해 측정불확도 평가를 수행하였다. 그리고 시험자 비교시험을 통한 숙련도 시험을 수행하였으며 KOLAS 획득관련 부분을 다루고 있다. 마지막으로 표준화와 산업체 보급부분에서는 열특성 전문위원회 운영 내용과 세미나 개최, 워크샵 개최 등을 다루었고 표준화의 일환으로 모의건식공정 핵연료의 데이터베이스를 구축한 내용을 포함하였다.

목 차

제 1 장 핵재료 열특성 측정표준 기반 구축	1
제 1 절 모의 건식공정 핵연료의 표준물질 제조	1
1. 인증표준물질	1
2. 모의 건식 공정 핵연료의 표준물질 제조공정 확립	3
3. 모의 건식 공정 핵연료 표준물질 특성	5
제 2 절 모의 건식공정 핵연료의 열특성 측정표준	14
1. 열중량 분석기(Thermogravimetric Analyzer)	14
2. 열팽창 측정기의 유지보수 절차	16
제 3 절 모의 건식공정 핵연료의 열특성 SRD	22
1. 열특성	22
제 2 장 핵재료 열특성 측정 장비 신뢰성 평가	29
제 1 절 모의 건식공정 핵연료의 열특성 측정 불확도	29
1. 모의 건식공정 핵연료의 열팽창 시험 불확도 평가	29
2. 모의 건식공정 핵연료의 열중량 분석기의 불확도 평가	34
3. 모의 건식공정 핵연료의 열확산도 시험 불확도 평가	37
제 2 절 숙련도 시험	40
1. 숙련도 시험 내용	40
제 3 절 한국 교정시험기관 인정 획득(KOLAS)	42
1. KOLAS 인증 분야	42
제 3 장 핵재료 열특성 표준화 및 산업체 보급	44
제 1 절 전문위원회 운영	44
1. 전문위원회 활동 내용	45
제 2 절 세미나 개최	48
1. 세미나 개최 내용	48
제 3 절 모의 건식공정 핵연료의 데이터베이스	50
1. 핵연료 열물성 데이터베이스 구축 현황	50
2. 핵연료 열물성 DB 서버의 하드웨어 소개	51
3. 핵연료 열물성 DB 서버의 소프트웨어 소개	51
제 4 절 핵재료 열물성 워크샵	56

1. 워크샵 명칭	56
2. 개요	56
3. 세부일정	56

부록

열중량 분석기 운전절차서

온도보정 절차서

세미나 자료

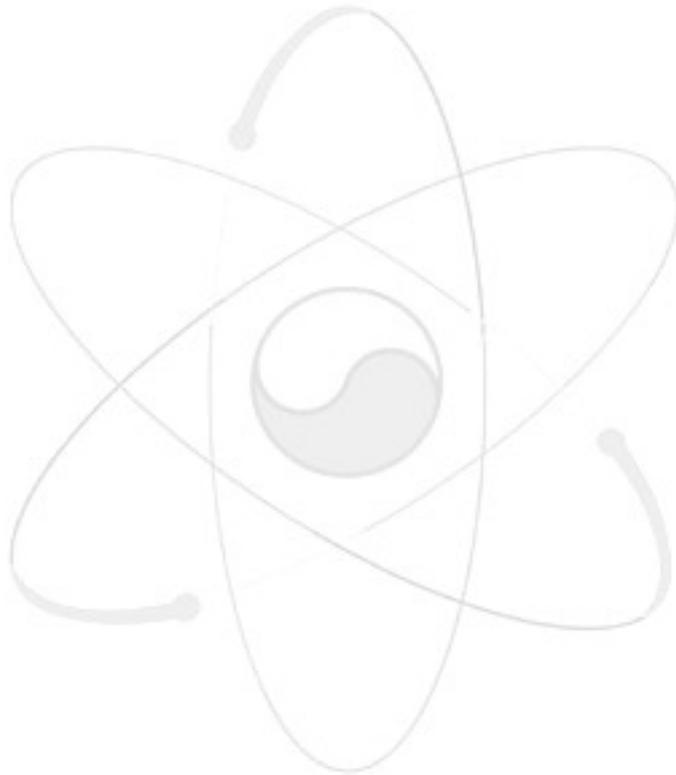


표 목차

표 1. 인증표준물질과 품질관리물질의 비교	2
표 2. 모의 건식 소결체 밀도의 균질성 평가를 위한 분산분석결과표	12
표 3. 고용체 함유 모의 핵연료의 비열 (0. 3, 6, 12 at%)	23
표 4. 고용체 함유 모의 핵연료의 열팽창 (0. 3, 6, 12 at%)	25
표 5. 고용체 함유 모의 핵연료의 밀도 (0. 3, 6, 12 at%)	27
표 6. 고용체 함유 모의 핵연료의 열전도도 (0. 3, 6, 12 at%)	28
표 7. 모의 핵연료의 구성 성분 (SS1)	32
표 8. 모의 건식공정 핵연료의 종류	38
표 9. 모의 건식공정 핵연료의 열확산도 결과 (cm^2/s)	39
표 10. 핵연료 열물성 전문위원회	44



그림 목차

그림 1. 표준물질 생산을 위한 인증프로젝트 설계 절차	2
그림 2. 모의 건식 공정 핵연료 표준물질의 제조 공정	4
그림 3. 고용체 함유한 모의 건식 공정 핵연료(SS1, SS2, SS4)와 표준모의 핵연료(ref1, ref2, ref4)의 조직사진	5
그림 4 모의 건식 공정 핵연료의 line scanning 결과 (결정립계 포함)	6
그림 5 모의 건식 공정 핵연료의 line scanning 결과 (기공포함)	7
그림 6 모의 건식 공정 핵연료의 mapping 결과 (연소도 12 at%)	8
그림 7 모의 건식 공정 핵연료의 mapping 결과 (연소도 6 at%)	9
그림 8. 모의 건식 소결체의 밀도 분포(SS1)	11
그림 9 열중량 분석기의 주요 구성부	15
그림 10. 열중량 분석기의 시험 프로그램	16
그림 11. 고용체 함유 모의 핵연료의 비열 (0. 3, 6, 12 at%)	23
그림 12. 고용체 함유 모의 핵연료의 열팽창 (0. 3, 6, 12 at%)	25
그림 13. 고용체 함유 모의 핵연료의 밀도 (0. 3, 6, 12 at%)	27
그림 14. 고용체 함유 모의 핵연료의 열전도도 (0. 3, 6, 12 at%)	28
그림 15. 모의 건식공정핵연료의 불확도 평가절차	32
그림 16. 시스템 교정 결과	33
그림 17. 모의 건식공정핵연료 불확도 결과 (SS1)	33
그림 18. 모의 건식공정핵연료와 UO ₂ 핵연료의 열팽창 비교	33
그림 19. 핵연료 열중량 분석 시험의 불확도 평가절차	37
그림 20. 모의 건식공정 핵연료의 온도에 따른 열확산도 변화	39
그림 21. 온도에 따른 표준물질의 열팽창 변화	41
그림 22 시험자간 비교실험 결과	41
그림 23. 핵연료 열물성 시험의 조직도	43
그림 24. 핵연료 종합 열물성 DB 홈페이지	53
그림 25. 핵연료 열물성 데이터베이스 구조	53
그림 26. 모의 핵연료 데이터베이스 화면	54
그림 27. 모의핵연료 비열 데이터베이스	54
그림 28. 모의핵연료의 테이블화된 비열 자료	55
그림 29. 여러 핵연료의 비열 모델식	55

제 1 장 핵재료 열특성 측정표준 기반 구축

제 1 절 모의 건식공정 핵연료의 표준물질 제조

1. 인증표준물질

표준 물질 (reference material)은 측정과정 중 의도된 목적에 맞도록 만들어진 하나 또는 그 이상의 특정 특성에 관하여 충분히 균질하고 안정적인 물질로 다음과 두 가지로 분류된다 : 인증표준물질 (certified reference material, CRM) 과 품질관리물질(quality control material, QCM). 주로 CRM이 표준물질로 일컬어지며, 공인된 인증서를 가지고 있어야 한다. 인증서에는 정확한 실험을 위해 소급성이 언급된 특성치가 명시되어 있으며 또한 특정 신뢰도에 대한 불확도가 명기되어 있어야 한다. 이러한 소급성과 불확도가 명확한 인증표준물질은 특정 특성 값과 관련된 불확도 및 계량학적으로 소급성이 언급된 인증서가 하나 또는 그 이상의 특성 값에 대해 계량학적으로 유효한 절차에 의해 특성화된 표준물질로 정의된다. 표준물질은 시험장치의 교정과 측정방법의 해석, 그리고 물질의 특성치 측정 등 매우 널리 사용되고 있다. 주로 표준물질의 제조는 공인된 표준물질 제조 기관에서 품질관리에 충실한 절차에 따라 생성되며 충분한 소급성과 불확도를 만족해야 한다.

한편, 최근에 표준물질의 대안으로 제안되고 있는 품질관리물질인 QCM은 비교적 CRM에 비해 소급성 등이 약하지만 시험소 내부의 자체 품질관리나 시험소 내부의 비교시험 또는 시험소간 비교시험 등에 이용될 수 있다. 또한 측정 장비의 성능 평가, 반복성 연구, 시료의 검사 등에도 CRM을 대신하여 표준물질로 이용될 수 있다. 그러나 QCM을 시험소 외부의 장비를 교정하는데 있어서 소급성을 구축하는데 이용하에서는 안된다. 표 1은 CRM과 QCM의 비교를 나타내고 있다.

모의 건식 핵연료는 아직까지 세계적으로 CRM이 개발되어 있지 않다. 따라서 내부 품질관리 또는 시험소간 비교시험을 위해서는 QCM 제조가 필요하다. 본 사업에서는 모의 건식 핵연료의 QCM을 제조하기 위하여, 입자 크기나 소결체 밀도, 제조 조건 등을 정하고 이를 이용하여 핵연료의 물성치를 표준화하는데 그 목적이 있다. 이러한 모의 건식 핵연료의 경우 외부시스템의 교정을 목적으로 하는 것이 아니라 실험실 자체의 품질관리 목적이 보다 크다고 할 수 있다. 따라서 이러한 표준화된 핵연료의 경우 QCM 표준물질로 분류될 수 있으며 소급성은 약하다고 할 수 있다. QCM을 제조하기 위해서는 여러 가지 조건들을 만족하여야 한다. 이러한 QCM 제

조조건은 CRM 제조조건을 따르며 이는 국제표준지침인 ISO-GUIDE35에 기반한 인증프로젝트에 따라 생산된다. 그림 1은 인증프로젝트의 개요를 보여주고 있다.

표 1. 인증표준물질과 품질관리물질의 비교

인증표준물질 (Certified Reference Material, CRM)	품질관리물질 (Quality Control Material, QCM)
소급성 유지 불확도 표시 ISO Guide 34/35 하나 이상의 인증 특성값 측정시스템 교정 공정평가 품질관리	소급성 유지 힘들 실험실 자체 제작 내부품질관리 목적 경향분석 시험소내/간 결과비교 제품출하시험 기기성능검사

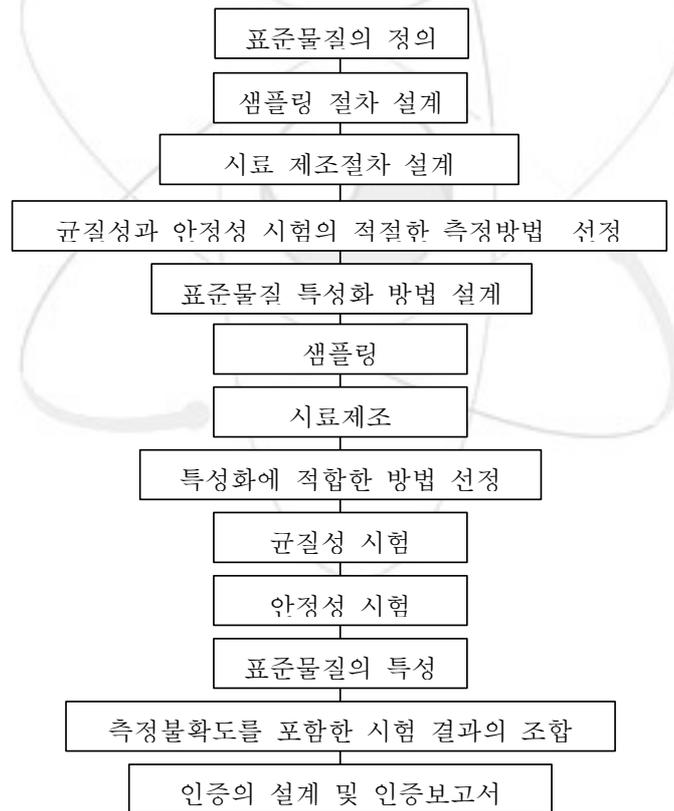


그림 1. 표준물질 생산을 위한 인증프로젝트 설계 절차

주요 표준물질 생산 조건은 안정성과 균질성, 수명, 보관기관 등이다. 안정성은 보관, 운송 등에 의한 시료의 특성값의 변화가 재현성을 유지하는지를 판단하는 것이며 균질성은 시료의 특성치 자체의 분포의 정도를 판단하는 것이다. 이러한 특성의 합격 여부는 통계적 방법으로 수행한다.

본 사업에서는 대상으로 하는 모의 건식 공정 핵연료의 경우 다량의 불순물이 함유되어 있어 균질성 확보가 물성 평가에 중요한 인자로 작용한다. 불순물의 분포를 확인하기 위하여 EPMA를 이용하여 Mapping과 Line Scanning을 수행하였다. 밀도에 대해서는 분산분석을 수행하였다.

2. 모의 건식 공정 핵연료의 표준물질 제조공정 확립

모의 건식 공정 핵연료는 다량의 불순물이 함유되어 있어 물성에 많은 영향을 미친다. 모의 건식 공정 핵연료의 표준물질을 제조하기 위해서는 이들 불순물이 고르게 분포되어 있어야 하며, 불순물의 상도 사용후핵연료와 동일한 형태를 유지해야 한다. 불순물의 양은 ORIGEN 코드를 이용하여 계산하였다. 우선 UO_2 분말에 각각 28 MWd/tU, 56 MWd/tU, 112 MWd/tU까지 연소된 사용후 핵연료에 해당하는 핵분열 생성물을 첨가하였다. 3차원 혼합기인 turbular 장치로 1시간 혼합하여 1차 균질화 하였다. Teflon 병에 ϕ 8.5 mm, ϕ 5 mm 지르코니아 볼과 혼합된 분말을 넣고 1시간씩 2시간 밀링하여 2차 균질화 하였다. 밀링 후 분말과 볼의 분리를 위해 # 100 메쉬(150 μ m)를 이용하여 10분간 체가름을 행하였다. 성형 mould와 성형체간의 마찰력을 줄이기 위해 분말에 0.2 wt%의 Zn stearate를 첨가하여 20분간 turbular 장치를 이용하여 mixing하였다.

일축가압형 자동 프레스를 이용하여 성형하였다. 300 MPa의 압력으로 20초간 유지하였다. 성형에는 ϕ 10 mm mould를 사용하였다.

소결조건은 1800 $^{\circ}$ C에서 6시간 유지하였다. 성형체내 유기체 성분의 제거를 위해 800 $^{\circ}$ C에서 2시간 유지하였으며, 환원 분위기하에서 금속산화물의 환원반응에 의해 발생하는 gas의 제거를 위해 1500 $^{\circ}$ C에서 2시간 유지하였다. 온도 상승 속도 4 $^{\circ}$ C/min, 온도 하강 속도는 5 $^{\circ}$ C/min이었으며 4 % H_2 /Ar의 환원성 분위기에서 소결하였다. 그림 2는 모의 건식 공정 핵연료 표준물질의 제조 공정을 나타낸 것이다.

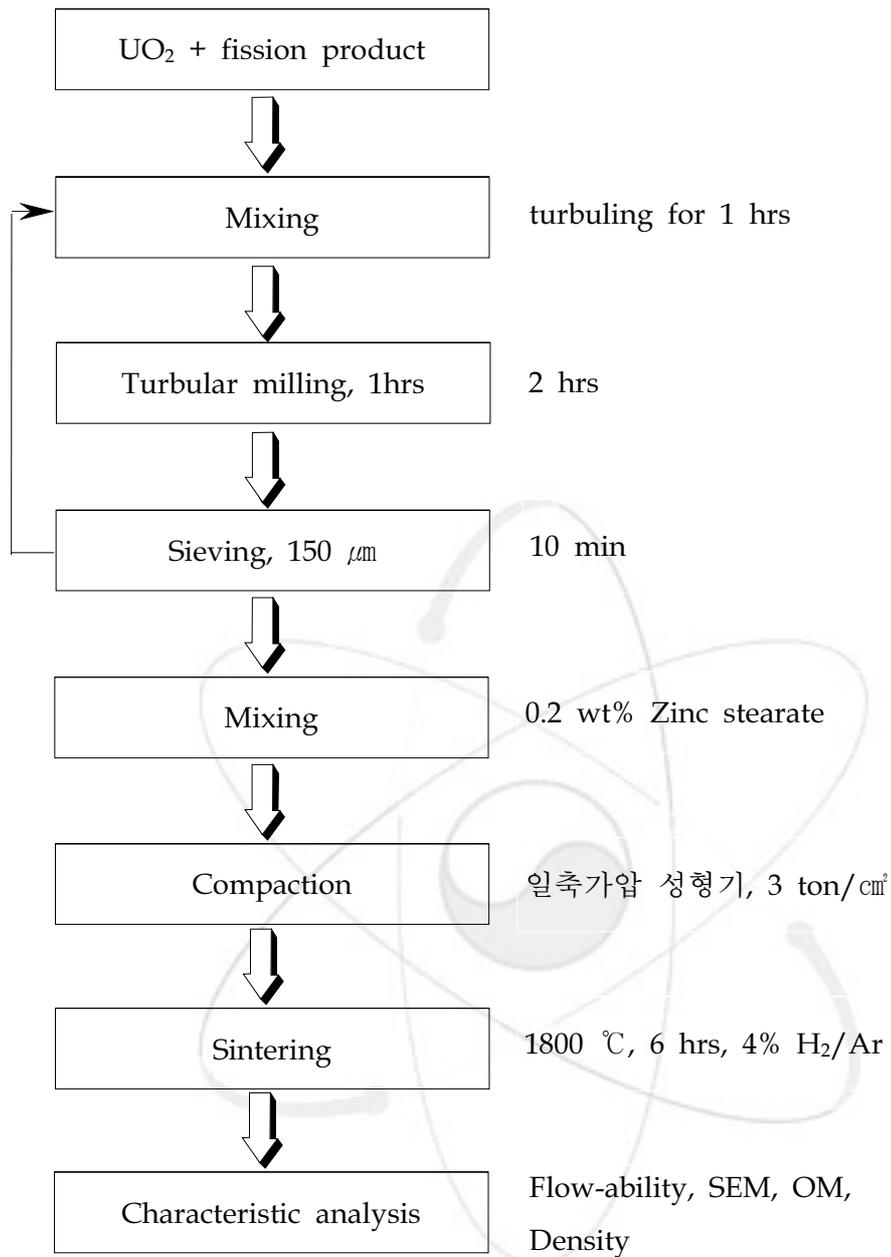


그림 2. 모의 건식 공정 핵연료 표준물질의 제조 공정

3. 모의 건식 공정 핵연료 표준물질 특성

가. 모의 건식 공정 핵연료 표준물질의 균질

모의 건식 공정 핵연료에 함유되어 있는 불순물의 균질성을 확인하기 위하여 EDX를 이용하여 불순물별로 mapping과 line scanning을 수행하였다. 그림 3은 본 사업에서 확립한 모의 건식 공정 핵연료의 제조 공정에 따라 제조한 소결체의 조직 사진으로 고용체만을 함유한 모의 건식 공정 핵연료(SS1, SS2, SS4)와 표준모의 핵연료(ref1, ref2, ref4)를 나타낸 것이다. SS1, ref1은 연소도 3 at %, SS2, ref2는 6 at% SS4, ref4 는 12 at%의 연소도에 해당하는 모의 건식 공정 핵연료를 나타낸 것이다.

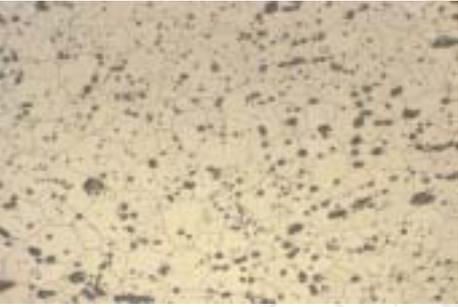
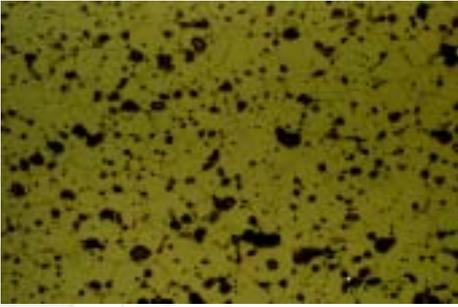
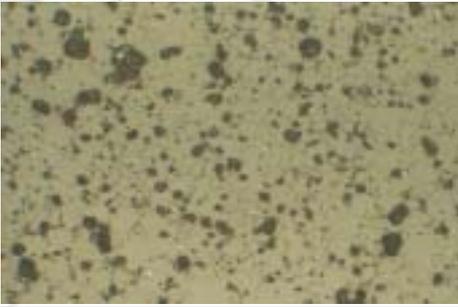
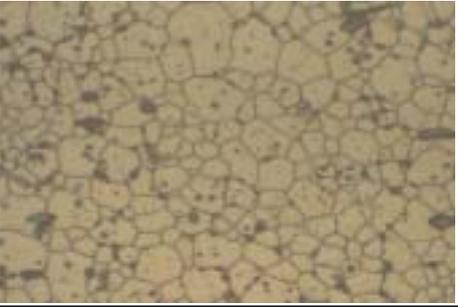
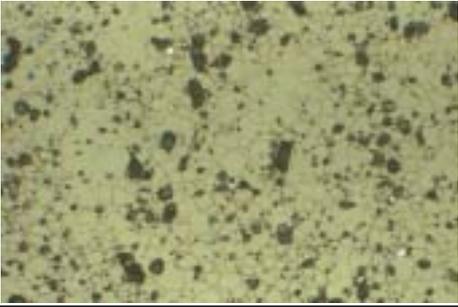
	
ss1, 18.5 μ m, 94.5%	ref1, 13.5 μ m, 95.5%
	
ss2, 94.4%, 13.5 μ m	ref2, 8 μ m, 94.7%
	
ss4, 95.48%, 16.5 μ m	ref4, 6 μ m, 94.5%

그림 3. 고용체 함유한 모의 건식 공정 핵연료(SS1, SS2, SS4)와 표준모의 핵연료(ref1, ref2, ref4)의 조직사진

그림 4는 모의 건식 공정 핵연료중 결정립계를 포함하는 일부를 line scanning한 결과이다. 모든 핵종이 고른 분포를 하는 것으로 나타났으나 intensity가 떨어지는 부분은 결정립계 부분으로서 불순물의 농도가 낮은 것으로 나타났다.

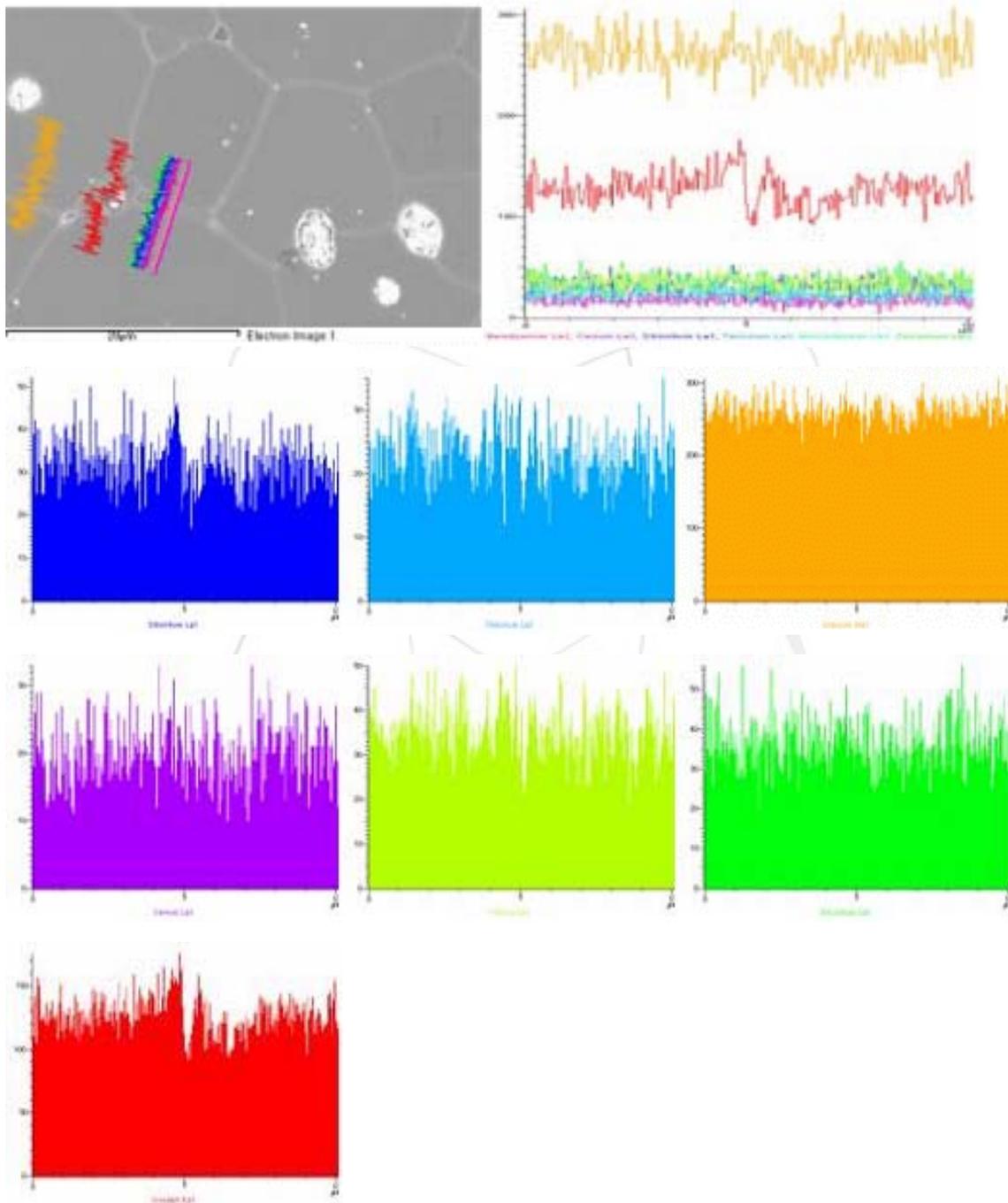


그림 4 모의 건식 공정 핵연료의 line scanning 결과 (결정립계 포함)

그림 5는 모의 건식 공정 핵연료중 기공을 포함하는 일부를 line scanning한 결과이다. 기지에서는 모든 핵종이 고른 분포를 하는 것으로 나타났으나 기공부분에는 intensity가 떨어져 불순물의 농도가 낮은 것으로 나타났다.

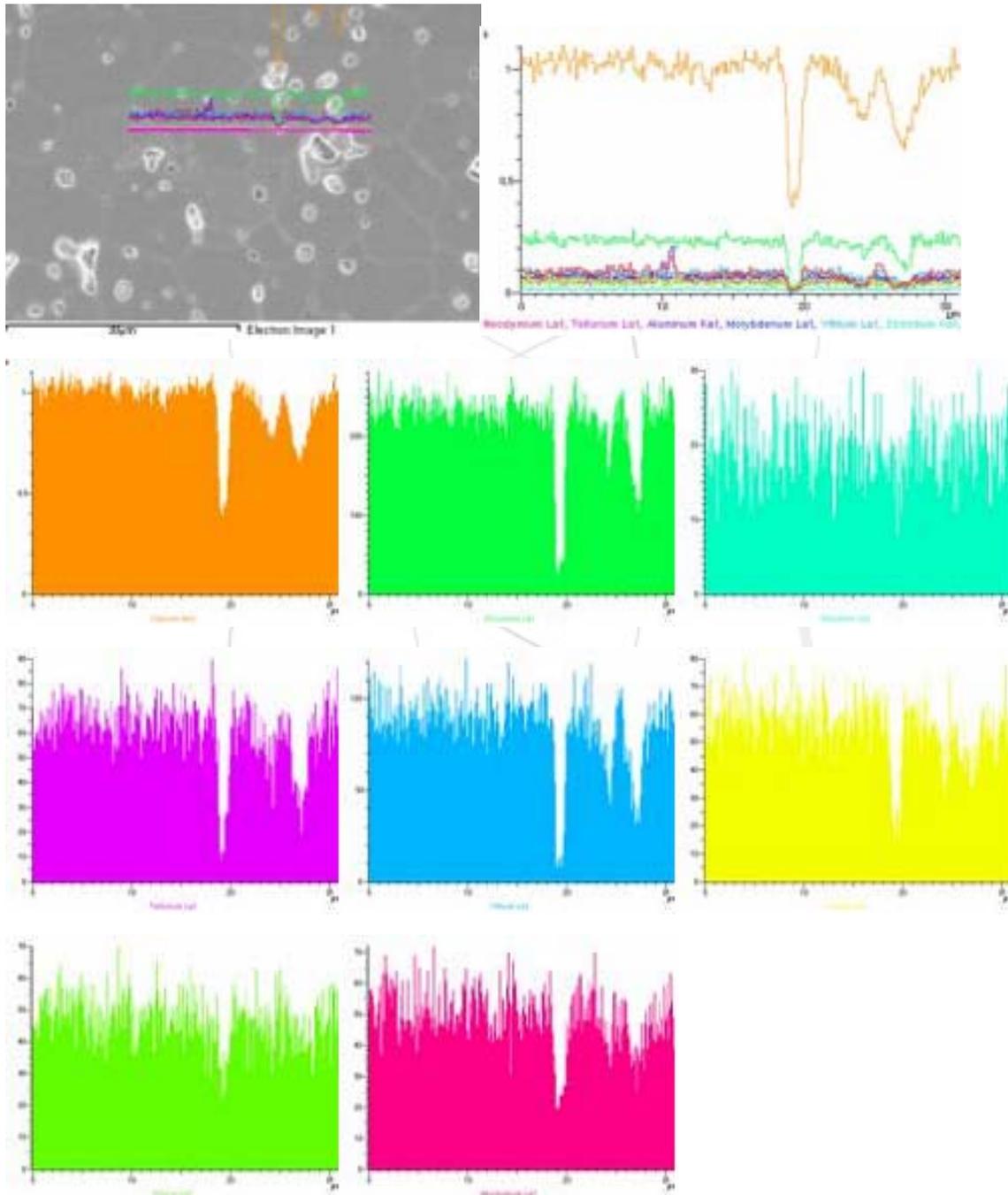


그림 5 모의 건식 공정 핵연료의 line scanning 결과 (기공포함)

그림 6과 7은 모의 건식 공정 핵연료 중 금속석출물의 분포도를 나타낸 것이다. 사진의 하얀 부분이 금속 석출물로서 대체로 고른 분포를 하고 있는 것으로 나타났다.

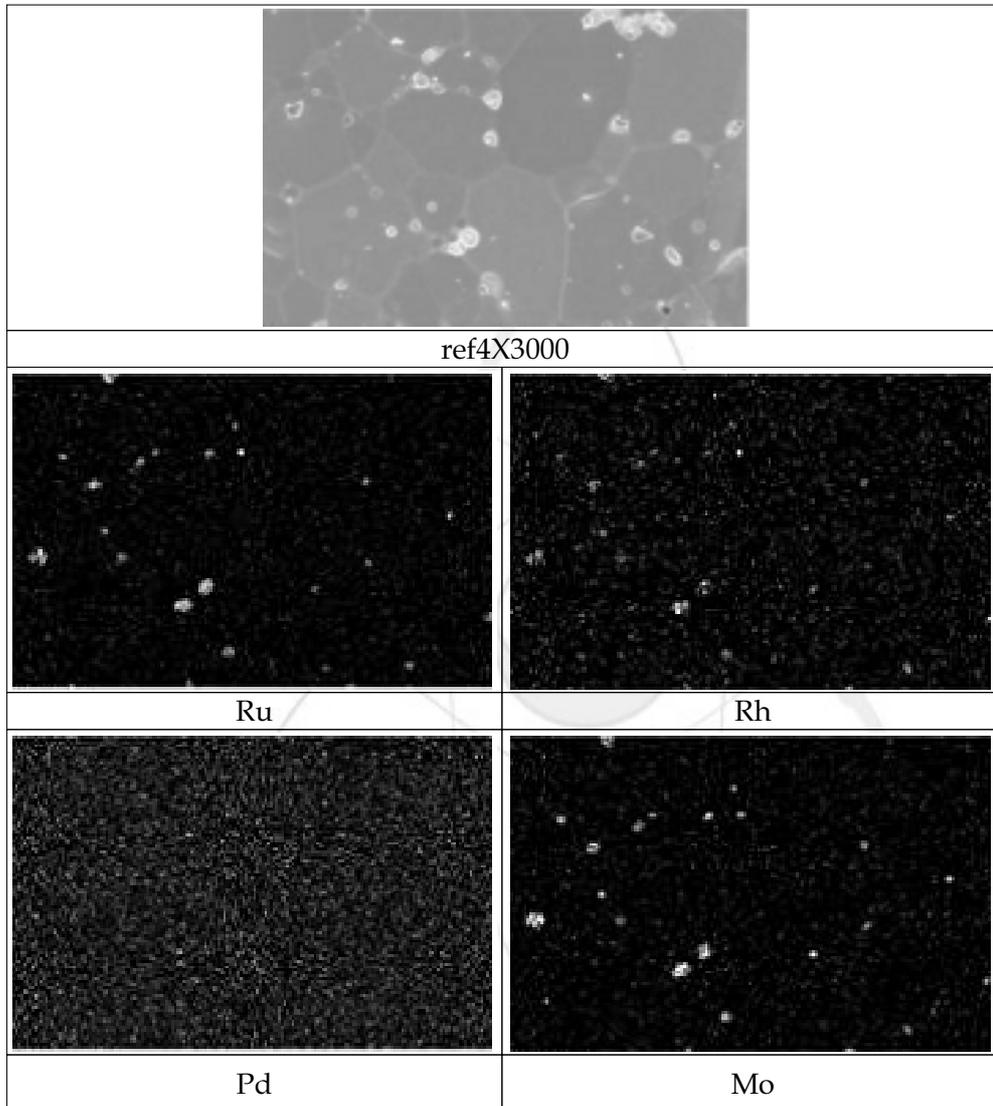


그림 6 모의 건식 공정 핵연료의 mapping 결과 (연소도 12 at%)

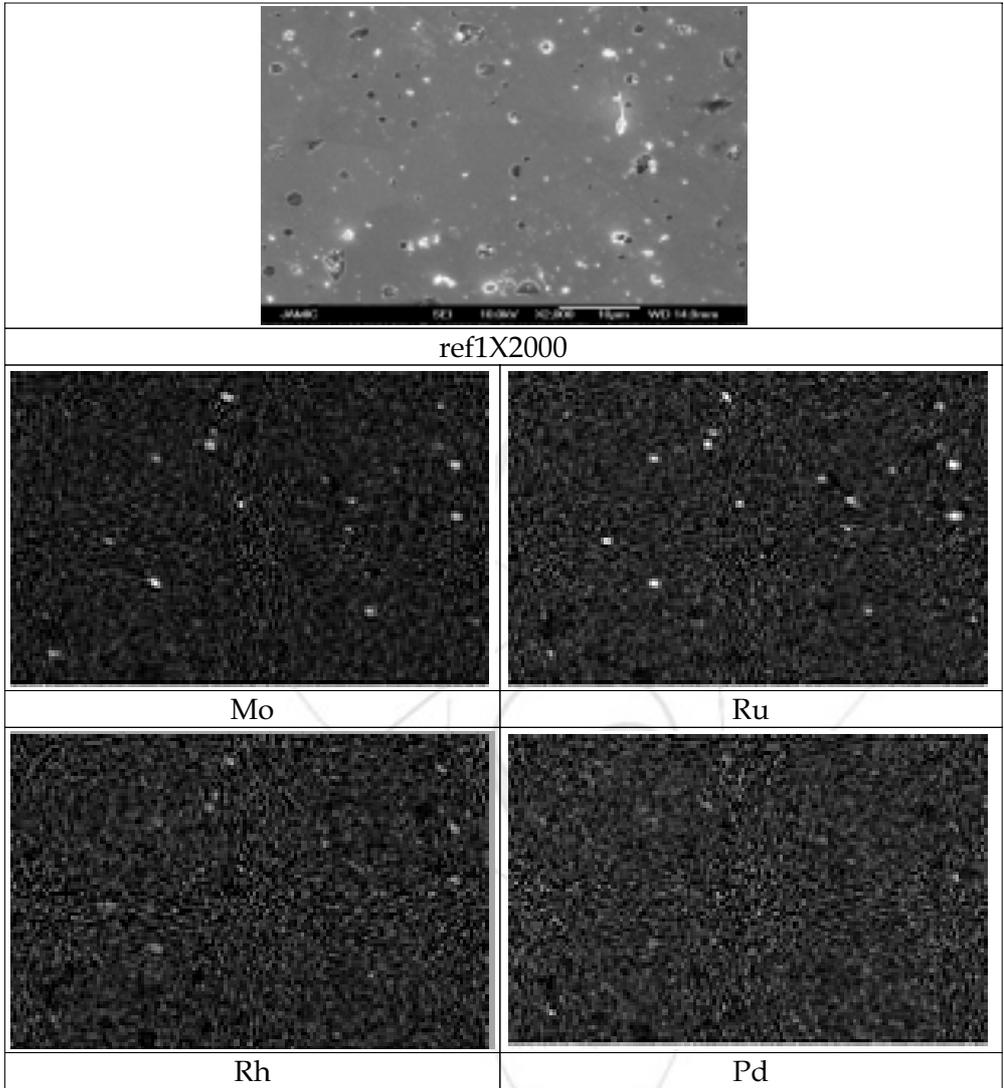


그림 7 모의 건식 공정 핵연료의 mapping 결과 (연소도 6 at%)

나. 밀도 측정

여러 개의 원기둥 모양의 모의 건식 소결체 시료가 일련의 절차를 거쳐 제조되었으며, 각 소결체의 밀도는 일반적인 방법으로 측정되었다. 일단 무게는 전자저울을 이용하여 정확하게 구하여 진다. 그러나 부피는 쉽게 구할 수가 없다. 그리고 소결체 내부의 기공의 존재로 인해 단순히 원기둥의 부피를 이용할 수 없고, 또 소결체 윗면과 아랫면에 움푹하게 파인 dish와 모서리를 처리한 chamfer로 인해 정확한 부피

를 구하기 힘들다. 이러한 세라믹 계역의 소결체 경우 물속에 잠긴부분 만큼 물을 밀어내는 아르키메데스의 원리로 부피를 쉽게 구할수 있다. 그 모의 건식 소결체의 밀도는 물밖에서의 소결체 무게 (w_o)와 물속에서의 무게 (w_i)의 차이를 이용한 다음 식으로 구해진다.

$$F_b / g = w_o - w_i = V_{UO2} \times \rho_w, \quad 1$$

$$\rho_{UO2} = m_{UO2} / V_{UO2} = m_{UO2} \times \rho_w / (w_o - w_i), \quad 2$$

여기서

F_b : buoyant force,

g : gravity constant,

ρ_w : density of water,

V_{UO2}, m_{UO2} : volume and mass of simulated pellet, respectively.

결국 물의 밀도로 물속과 물밖에서의 소결체 무게차이를 나누면 소결체의 부피가 구해지게 된다. 따라서 식(2)와 같이 모의 건식 소결체의 밀도는 쉽게 구할 수 있다.

다. 병간 균질성 분석

1) 시료의 준비

품질관리물질로 모의 건식 소결체를 제조하기 위해 일련의 표준인증 프로젝트 절차를 거쳐야 한다. 우선 시료자체의 특성으로 가장 중요한 균질성 연구를 통계적인 방법으로 수행하였다. 균질성 연구에서는 각 부문별 특성 값의 차이가 특성화의 불확도 요소에 비교하여 무시할 수 있는 정도인지 확인한다. 균질성 연구를 위해 시료는 총 42개를 선택하였으며 모두 14개의 병으로 구분하여 각 병에는 3개의 시료가 있도록 나열하였다. 그림 8은 선택된 시료의 병에 따른 모의 건식 소결체의 밀도 변화를 보여주고 있다.

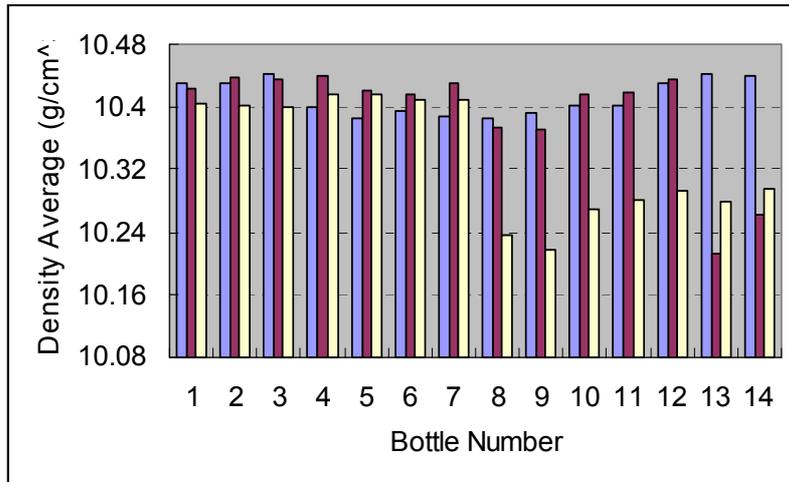


그림 8. 모의 건식 소결체의 밀도 분포. (SS1)

2) 분산분석의 절차

분산분석 (analysis of variance : ANOVA)은 각 모집단의 구성등이 정규분포를 이루며 분산이 같다는 가정하에 두개 이상의 독립집단들의 평균값을 비교하는데 사용하는 통계적 기법이며, 이때의 검증 통계량은 F 이다. 즉, 두개 이상의 모집단으로부터 표본을 추출하는 경우 표본평균값 간의 차이가 클수록 (집단간 분산이 클수록) 그리고 각 표본의 요소들 간의 차이가 작을수록 (집단내 분산이 작을수록) 모집단의 평균값에는 차이가 있을 가능성이 높다. 분산분석은 이러한 논리에 바탕을 두고 분산값들을 분석함으로써 모집단 평균의 차이를 검증하는 통계 기법이다.

분산분석의 절차는 다음과 같은 단계를 거치게 된다.

가) 모든 독립집단의 평균이 같다고 가설을 세운다. (H0)

나) F-ratio 를 다음과 같이 구한다.

$$F_{ratio} = \frac{MST}{MSE} = \frac{SST / (p-1)}{SSE / (n-p)}, \quad 3$$

여기서

SST : 집단간 제곱합(sum of squares due to treatment) 이며 자유도는 p-1,

SSE : 집단내 제곱합 (sum of squares due to error) 이며 자유도는 n-p,

$$SST = \sum_{j=1}^k n_j (\bar{X}_j - \bar{X})^2, \quad 4$$

$$SSE = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_j)^2,$$

5

다) F-table에서 F-rejection를 찾는다.

라) 기각역은 F-rejection 값의 우측에 위치한다. 따라서 F-ratio > F-rejection 이면 가설은 기각되고 F-ratio < F-rejection 이면 가설은 기각되지 않는다.

3) 분산분석의 결과

표 2는 신뢰도 95%로 분산분석을 수행한 결과이다. 이 표에서 볼 수 있듯이 F 값은 1.1871 로 F-기각치인 2.0889 보다 작음을 알 수 있다. 이는 각 병간 모의 건식 핵연료 시료의 밀도가 거의 균질하게 분포하고 있음을 의미한다. 따라서 표준관리물질의 균질성 평가 절차에 따라 충분한 균질성은 만족하고 있음을 확인할 수 있다.

표 2. 모의 건식 소결체 밀도의 균질성 평가를 위한 분산분석결과표

Factor	Process	Residue	Total Sum
Square Sum	0.06653	0.1207	0.18723
Degree of Freedom	13	28	41
Square Mean	0.005117	0.004311	
F-ratio	1.1871		
F-rejection	2.0889		

* F-ratio < F-rejection

라. 균질성 분석

병내 균질성을 유지하기 위해 주로 병내 표준편차 (s_{wb})가 다음과 같이 반복 표준편차 (repeatability standard deviation, s_r)로부터 추정된다.

$$s_r^2 = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_i)^2 / (n-1)p,$$

6

여기서

X_{ij} : density of sample unit j from bottle i,

\bar{X}_i : average density of bottle i

n, p : numbers of samples and bottles, respectively.

그리고 충분한 반복성이 있는 실험으로 균질성 평가를 수행해야하지만 반복성을 만족하지 못하는 측정을 수행할 경우가 종종 발생한다. 이러한 측정 결과에 대하여 배치의 비균질성으로 인한 불확도(u_{bb})를 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$u_{bb}^2 = s_r^2 / n \times \sqrt{2/(n-1)p} . \quad 7$$

그리고 다음과 같은 부등식을 만족하여야 한다.

$$s_{bb}^2 \leq u_{bb}^2 \leq s_{bb}^2 + s_r^2 / n , \quad 8$$

여기서

$$s_{bb}^2 = \sum_{i=1}^p (\bar{X}_i - \bar{\bar{X}})^2 / np - s_r^2 / n , \quad 9$$

$$\bar{\bar{X}} = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^n X_{ij} / np . \quad 10$$

본 연구에서 고려된 결과를 보면, u_{bb}^2 은 6.839E-04 로 추정되며, s_{bb}^2 은 2.689E-04로 구해졌으며, $s_{bb}^2 + s_r^2 / n$ 은 1.706E-03 으로 산출되어 부등식 (8)을 만족한다. 이는 모의 건식 소결체의 밀도가 병내 뿐만 아니라 병간의 균질성도 충분히 만족하고 있음을 보여준다.

품질관리물질 (QCM) 개발의 일환으로 진행되고 있는 모의 건식 소결체의 밀도에 대한 균질성 평가가 ISO 가이드 35에 따라 수행되었다. 분산분석 방법으로 병간 균질성을 평가하였으며 충분한 균질성을 확보하고 있음을 확인하였다. 또한 병간 불확도도 추정하였으며 이로부터 불확도 부등식조건을 만족함을 확인하였다. 향후 품질관리물질의 다른 조건을 인증절차프로젝트에 따라 수행되어야 할 것이다. 이러한 분산분석을 이용한 균질성 평가방법은 다른 분야의 실험에서도 충분히 활용이 가능하리라 판단되며 국제 규격의 평가 지침인 방법으로 실험을 수행하여 실험 결과의 신뢰도를 확보하는데 노력해야 할 것이다.

제 2 절 모의 건식공정 핵연료의 열특성 측정표준

1. 열중량 분석기(Thermogravimetric Analyzer)

가. 적용범위

고온에서 산화 후 20 g 이하인 분말 또는 소결체의 고온에서 산화안정성 분석에 적용한다.

나. 관련규격

- 1) KSMISO11358, Plastics-Thermogravimetry(TG) of polymers-General principles, 2001
ISO 대응 규격 : ISO 11358:1997
- 2) KSC2002, Test method of thermal life evaluation of plastics by thermogravimetry, 1998

다. 시험조건

초기 시험온도조건은 실온 ($20^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$)에서 시작한다.

라. 시험설비 및 장비

건식 공정 핵연료의 고온 산화 시험에 사용되는 장비는 Setaram사에서 제작된 TG 92-12 계열로서, 저울 (balance), 전기로 (furnace), 가스 및 전원 공급장치 (gas circuit and power), 제어기 (controller) 및 컴퓨터로 구성되어 있다.

1) 저울 (balance)

저울의 모델은 B 92 electronic microbalance로 beam balance 이다. 최대 측정용량은 20 g 이며, 측정한계는 1 μg 이다. 자동영점 조정은 0 ± 200 mg이다.

2) 전기로 (furnace)

전기로는 원통형 실리카 튜브형태로 heating element는 RNC로 구성되어 있다. 노내 최대 가열온도는 1000°C 이며 가열율은 분당 99°C 이다. 1000°C 에서 대기 온도까지의 냉각시간은 약 1시간 30분이다.

그림 9와 10은 열중량분석기의 주요 구성부를 나타낸 것이다.



1. 열중량 분석기 본체



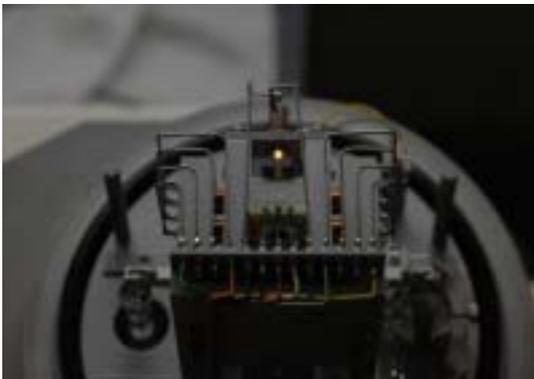
2. 열중량 분석기의 시편용기



3. 제어기



4. 가스 공급 밸브 및 압력계

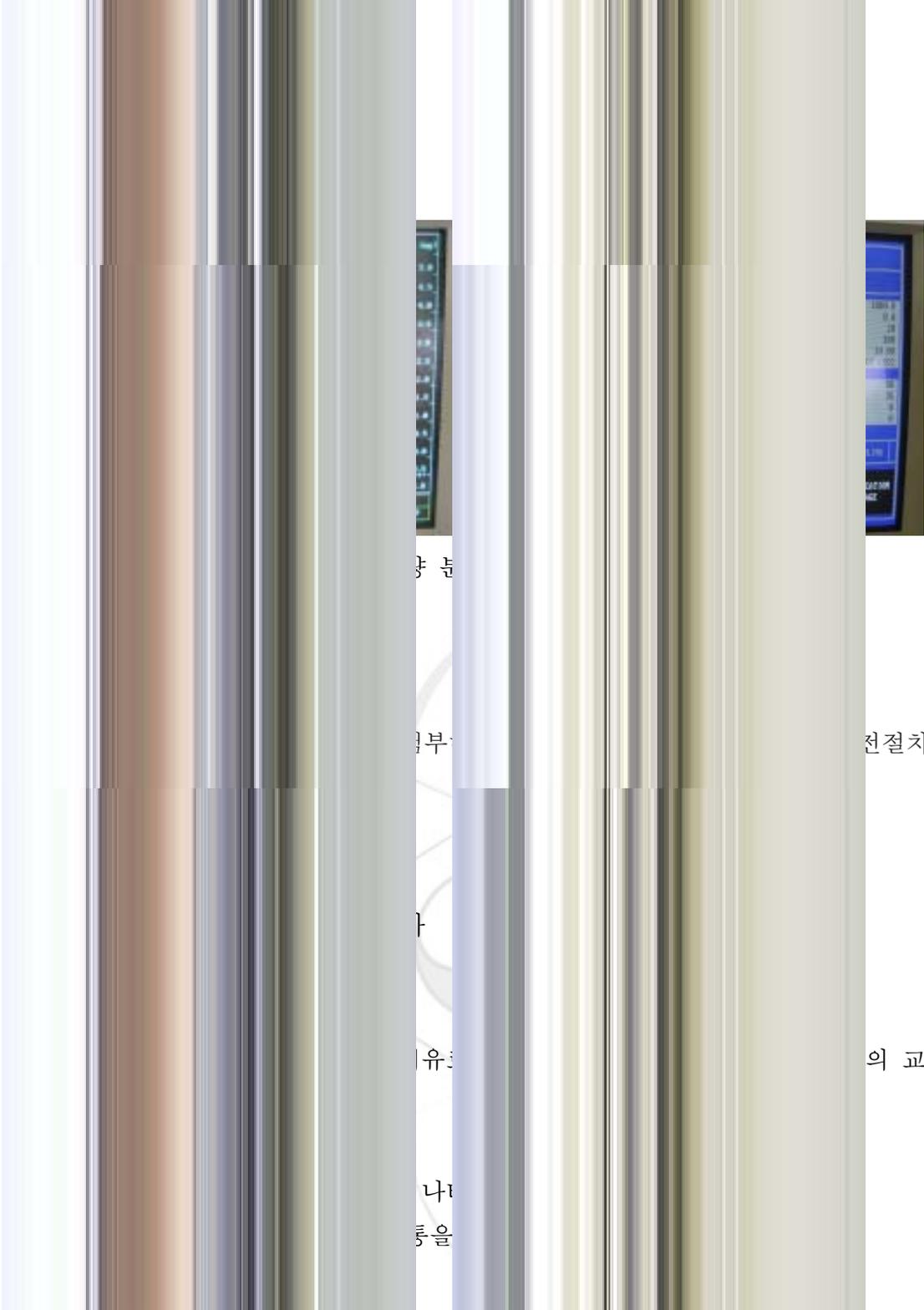


5. Beam Balance



6. Beam Balance의 count part

그림 9 열중량 분석기의 주요 구성부



2) 열전대 케이블과 열전대를 분리한다.



3) 전극으로부터 전원 케이블을 분리한다.



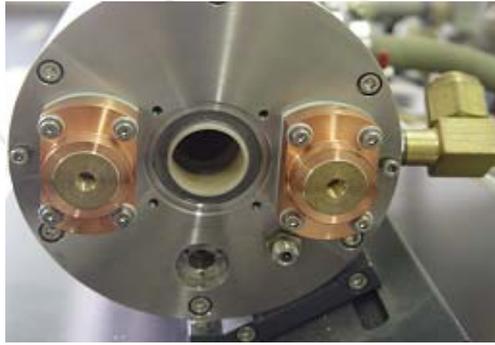
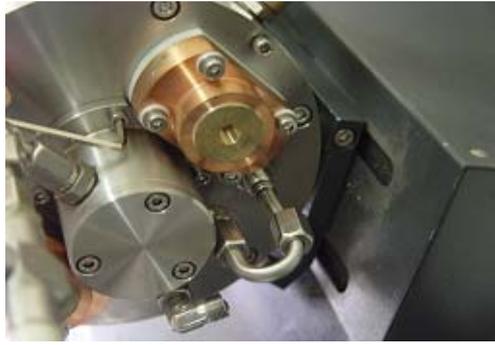


4) 냉각수 라인을 분리한다.



5) Heater 외부 마감부분과 플랜지, 를 분리한다.







6) 반대편의 외부 마개부분을 분리한다. 가스라인 제거



7) 열전대의 내부 모양 점검



시스템의 정밀도 유지를 위해 주기적으로 온도보정을 수행하여야 한다. 온도보정에 대한 절차서는 2004년도 보고서에 수록하였으며, 온도보정을 위한 프로그램 절차서는 그림과 함께 부록에 기술하였다.

제 3 절 모의 건식공정 핵연료의 열특성 SRD

1. 열특성

2004년도에 확립된 운전절차에 의해 모의 건식공정 핵연료의 비열, 열팽창 및 열전도도를 측정하였다. 핵분열 생성물이 불순물로 함유되어있는 핵연료의 열팽창 거동은 사용후핵연료의 중간저장, 최종 처분, 재활용 등에 꼭 필요한 자료이며 이를 근거로 저장조 및 처분장 설계 그리고 재활용 공정 확립을 이룰 수가 있다. 본 사업에서는 연소도 3, 6, 12 at%에 해당하는 건식공정 핵연료의 핵분열 생성물 중 고용체를 형성하는 원소만을 포함하는 모의 건식공정 핵연료를 대상으로 열특성 SRD를 구하였다.

가. 비열

1) 측정방법 : DSC를 이용하여 비열측정

관련근거 : ISO 11357-4:2001, Plastics-Differential scanning calorimeter (DSC)-part 4 : Determination of specific heat capacity
KS M ISO 11357-4:2002, Plastic-시차주사열량계(DSC) 제4부 비열용량측정

2) 비열 모델 및 데이터

- 3 at%

$$C_p = 79.1 + 6.19 \times 10^{-3} T - 1.77 \times 10^6 / T^2 \pm 0.016 \quad 11$$

- 6 at%

$$C_p = 80.0 + 4.66 \times 10^{-3} T - 1.84 \times 10^6 / T^2 \pm 0.031 \quad 12$$

- 12 at%>

$$C_p = 81.5 + 2.09 \times 10^{-3} T - 2.10 \times 10^6 / T^2 \pm 0.029 \quad 13$$

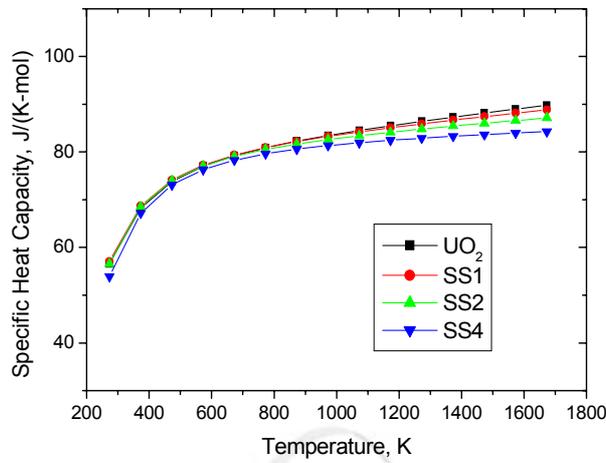


그림 11. 고용체 함유 모의 핵연료의 비열 (0. 3, 6, 12 at%)

표 3. 고용체 함유 모의 핵연료의 비열 (0. 3, 6, 12 at%)

Temp, K	UO ₂	3 at%	6 at%	12 at%
273	56.57793	57.04073	56.5838	53.89635
373	68.27277	68.68686	68.51304	67.18939
473	73.78624	74.11651	73.97994	73.10694
573	77.02242	77.25594	77.06605	76.30728
673	79.22708	79.35797	79.07373	78.27681
773	80.89744	80.92267	80.52283	79.60883
873	82.26358	82.18143	81.65389	80.57786
973	83.44387	83.25327	82.59065	81.32514
1073	84.50423	84.20452	83.40203	81.92932
1173	85.48376	85.07447	84.1289	82.43706
1273	86.40683	85.88763	84.79675	82.87743
1373	87.28928	86.65994	85.42212	83.26932
1473	88.14174	87.4021	86.01615	83.62544
1573	88.9716	88.12152	86.58654	83.95459
1673	89.78409	88.82349	87.13879	84.26301

나. 열팽창

1) 측정방법 : Dilatometer를 이용하여 열팽창 측정

관련근거 : ASTM E228, Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials with a Vitreous Silica Dilatometer

ASTM E831, Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials by Thermomechanical Analysis

2) 열팽창 계수 : 열팽창 자료를 이용하여 열팽창 계수 계산

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{L_{298}} \times \left(\frac{L_T - L_{298}}{T - 298} \right) \quad 14$$

여기서 α 는 평균 열팽창 계수, L_{298} 은 298 K에서 길이, L_T 는 온도 T에서의 길이를 나타낸다.

3) 열팽창 모델, 열팽창 계수 및 데이터

- 3 at%

$$L/L_0 = -0.30614 + 0.00097T - 2.68990 \times 10^{-8} T^2 + 6.38520 \times 10^{-11} T^3 \pm 0.00323 \quad 15$$

- 6 at%

$$L/L_0 = -0.35026 + 0.00124T - 1.94129 \times 10^{-7} T^2 + 1.01810 \times 10^{-10} T^3 \pm 0.00516 \quad 16$$

- 12 at%

$$L/L_0 = -0.42815 + 0.00156T - 4.88337 \times 10^{-7} T^2 + 1.98454 \times 10^{-10} T^3 \pm 0.00298 \quad 17$$

- 열팽창 계수

3 at% : 11.5976×10^{-6} (1/K)

6 at% : 12.3450×10^{-6} (1/K)

12 at% : 13.1438×10^{-6} (1/K)

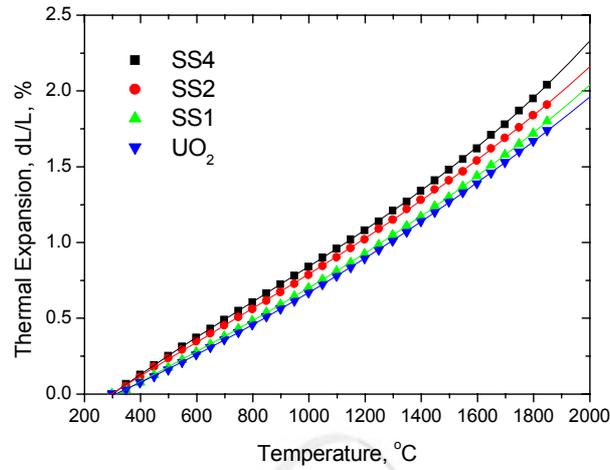


그림 12. 고용체 함유 모의 핵연료의 열팽창 (0. 3, 6, 12 at%)

표 4. 고용체 함유 모의 핵연료의 열팽창 (0. 3, 6, 12 at%)

Temp.	UO ₂	SS1	SS2	SS4
298	0.00366	0.00342	-0.00041	-0.00134
373	0.0522	0.04878	0.07891	0.09557
473	0.13787	0.15075	0.20751	0.22064
573	0.23433	0.25215	0.3213	0.34229
673	0.33378	0.35442	0.42781	0.46055
773	0.4333	0.45848	0.53415	0.57789
873	0.53663	0.56531	0.64362	0.69488
973	0.64236	0.67389	0.75687	0.81157
1073	0.75142	0.78402	0.87343	0.9293
1173	0.86487	0.89671	0.99381	1.05083
1273	0.98177	1.01472	1.11921	1.17549
1373	1.10424	1.14031	1.24903	1.30729
1473	1.23233	1.27097	1.37989	1.44667
1573	1.36075	1.40211	1.50643	1.58631
1673	1.49516	1.54392	1.64261	1.75066
1773	1.63127	1.68846	1.79942	1.91367
1868	1.76311	1.8238	1.93548	2.06552

다. 밀도

1) 측정방법 : 열팽창 자료를 이용하여 밀도변화 계산

$$\rho(T) = \rho(298) \left(\frac{L_{298}}{L_T} \right)^3 \quad 18$$

여기서 $\rho(T)$ 는 온도에 따른 밀도, $\rho(298)$ 은 298 K에서 밀도, L_{298} 은 298 K에서 길이, L_T 는 온도 T에서의 길이를 나타낸다.

2) 밀도 모델 및 데이터

- 3 at%

$$\rho/\rho_0 = 1.00922 - 2.92383 \times 10^{-5}T + 9.06287 \times 10^{-10}T^2 - 1.64882 \times 10^{-12}T^3 \pm 2.98671 \times 10^{-4} \quad 19$$

- 6 at%

$$\rho/\rho_0 = 1.01054 - 3.7352 \times 10^{-5}T + 6.30468 \times 10^{-9}T^2 - 2.91319 \times 10^{-12}T^3 \pm 3.1816 \times 10^{-4} \quad 20$$

- 12 at%

$$\rho/\rho_0 = 1.01269 - 4.62614 \times 10^{-5}T + 1.41292 \times 10^{-8}T^2 - 5.42583 \times 10^{-12}T^3 \pm 2.97769 \times 10^{-4} \quad 21$$

라. 열전도도

고용체 함유 모의핵연료(3, 6, 12 at%)의 열전도도가 UO_2 핵연료보다 낮게 산출됨. 300 K에서 UO_2 의 열전도도에 비해 약 23, 35 및 48 % 작게 나타남. 1673 K에서는 17, 20 및 25% 낮게 나타남.

- 3 at%>

$$\lambda = \frac{1}{0.09819 + 2.3194 \times 10^{-4} T} \quad 22$$

- 6 at%>

$$\lambda = \frac{1}{0.12612 + 2.28795 \times 10^{-4} T} \quad 23$$

- 12 at%>

$$\lambda = \frac{1}{0.18674 + 2.05497 \times 10^{-4} T} \quad 24$$

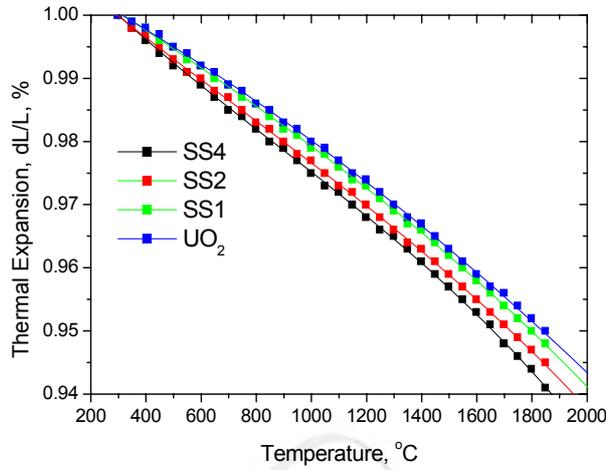


그림 13. 고용체 함유 모의 핵연료의 밀도 (0, 3, 6, 12 at%)

표 5. 고용체 함유 모의 핵연료의 밀도 (0, 3, 6, 12 at%)

Temp. (K)	UO ₂	SS1	SS2	SS4
298	0.99989	0.999897	1.000012	1.00004
373	0.998436	0.998538	0.997636	0.997138
473	0.995875	0.995491	0.9938	0.99341
573	0.993003	0.992473	0.990423	0.989801
673	0.990053	0.989442	0.987275	0.98631
773	0.987113	0.986371	0.984145	0.982862
873	0.984072	0.983231	0.980937	0.97944
973	0.980974	0.980053	0.977633	0.976043
1073	0.977792	0.976843	0.974248	0.972631
1173	0.974496	0.973574	0.970769	0.969126
1273	0.971116	0.970166	0.967161	0.965548
1373	0.967591	0.966556	0.963446	0.961785
1473	0.963923	0.96282	0.95972	0.957826
1573	0.960264	0.959089	0.956135	0.953882
1673	0.956454	0.955077	0.952297	0.949267
1773	0.952616	0.95101	0.947903	0.944719
1868	0.948918	0.947223	0.944113	0.940509

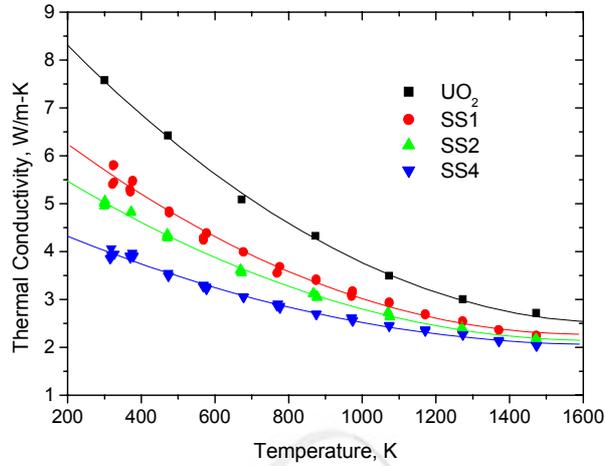


그림 14. 고용체 함유 모의 핵연료의 열전도도 (0, 3, 6, 12 at%)

표 6. 고용체 함유 모의 핵연료의 열전도도 (0, 3, 6, 12 at%)

Temp. (K)	UO ₂	SS1	SS2	SS4
300	8.37782	5.96047	5.106744	4.025942
400	7.08414	5.236534	4.578838	3.718318
500	6.136551	4.669406	4.149851	3.454369
600	5.412556	4.213116	3.794361	3.225409
700	4.841368	3.838064	3.49497	3.024914
800	4.379227	3.524328	3.23937	2.847886
900	3.997627	3.258008	3.018608	2.690434
1000	3.677201	3.02911	2.826016	2.549479
1100	3.404329	2.830263	2.656526	2.422559
1200	3.169158	2.655916	2.506215	2.307676
1300	2.964379	2.501801	2.372004	2.203196
1400	2.784457	2.364592	2.251436	2.107767
1500	2.625127	2.24165	2.142532	2.020261
1600	2.483043	2.13086	2.043677	1.939732
1700	2.355551	2.030506	1.953543	1.865376
1800	2.240511	1.93918	1.871023	1.796511

제 2 장 핵재료 열특성 측정 장비 신뢰성 평가

제 1 절 모의 건식공정 핵연료의 열특성 측정 불확도

1. 모의 건식공정 핵연료의 열팽창 시험 불확도 평가

가. 목 적

본 절차는 모의 건식공정 핵연료 열물성 시험과 관련된 시험업무를 수행하기 위한 불확도 산출절차를 기술함을 목적으로 한다.

나. 적용범위

핵연료 열물성 시험중 Dilatometer(DIL402C)를 사용한 열팽창 시험의 불확도 산출에 적용한다.

다. 시험방법

핵연료 열물성 시험지침서에 따라 열팽창 시험을 수행한다.

라. 시험 자료의 분석

1) 자료 측정

핵연료 열물성 시험지침서에 따라 측정된 자료는 온도 증가에 따라 표시한다. 같은 형태로 기입한다. 온도 증분은 25 K로 하며 계산과정에서 오류를 방지하기 위해 Excel Program을 이용하여 열팽창 시험 결과표를 만들 수 있다.

2) 불확도 산출

가) 모델식

$$f_E = \left(\frac{l(T) - l_0}{l_0} \right) \cdot f_{cal} \quad 25$$

여기서

f_E = 열팽창(Thermal Expansion), 측정 대상이 되는 양 (측정량),

l_0 = 상온 ($20\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$)에서의 시료의 길이 (단위, mm)

$l(T)$ = 온도 $T\text{ }^\circ\text{C}$ 에서의 시료의 길이 (단위, mm)

f_{cal} = 시스템 미교정에 의한 차이의 비

나) 불확도 요인

i) l_0 의 불확도 (u_{l_0})

- 상온 $\pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ 에 의한 차이 ($u_{l_{01}}$)
- 버니어 캘리퍼스의 교정 성적서에 의한 차이 ($u_{l_{02}}$)
- 버니어 캘리퍼스의 분해능 ($u_{l_{03}}$)

ii) $l(T)$ 의 불확도 ($u_{l(T)}$)

- 반복측정에 의한 불확도

iii) f_{cal} 의 불확도 ($u_{f_{cal}}$)

- 온도별 RM의 불확실성 ($u_{f_{cal1}}$)
- RM 비교 과정, 반복측정의 불확실성 ($u_{f_{cal2}}$)

다) 불확도 계산

i) l_0 의 표준 불확도 (u_{l_0})

$$u_{l_0}^2 = u_{l_{01}}^2 + u_{l_{02}}^2 + u_{l_{03}}^2$$

- 유효자유도(ν_{l_0})

$$\nu_{l_{01}} = \nu_{l_{02}} = \nu_{l_{03}} = \infty$$

$$\nu_{l_0} = \frac{u_{l_0}^4}{u_{l_{01}}^4/\nu_{l_{01}} + u_{l_{02}}^4/\nu_{l_{02}} + u_{l_{03}}^4/\nu_{l_{03}}} = \infty$$

26

ii) $l(T)$ 의 표준 불확도 ($u_{l(T)}$)

$$u_{l(T)}^2 = s_l^2/N = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (l_n - \bar{l})^2 / (N-1)$$

27

여기서

N = 반복측정 횟수

l_n = n 번째 측정시 길이 (단위, mm)

- 유효자유도($\nu_{k(T)}$)

$$\nu_{k(T)} = N - 1 \quad 28$$

iii) f_{cal} 의 표준 불확도 ($u_{f_{cal}}$)

$$u_{f_{cal}}^2 = u_{f_{cal1}}^2 + u_{f_{cal2}}^2 \quad 29$$

- 유효자유도($\nu_{f_{cal}}$)

$$\nu_{f_{cal1}} = \frac{1}{2} \left(\frac{100}{R} \right)^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{100}{5} \right)^2 = 200 \quad 30$$

$$\nu_{f_{cal2}} = M - 1 \quad 31$$

$$\nu_{f_{cal}} = \frac{u_{f_{cal}}^4}{u_{f_{cal1}}^4 / \nu_{f_{cal1}} + u_{f_{cal2}}^4 / \nu_{f_{cal2}}} \quad 32$$

여기서

R = 위험도 (100 - 신뢰수준 %), 표준물질의 신뢰도를 약 95 %로 가정.

M = RM 비교시험의 반복횟수

라) 합성 불확도 산출

합성 불확도는 다음과 같이 구하며 유효자유도는 식 (9)에서 구할 수 있다.

$$u_{Total} = \sqrt{C_{l_0}^2 \cdot u_{l_0}^2 + C_{k(T)}^2 \cdot u_{k(T)}^2 + C_{f_{cal}}^2 \cdot u_{f_{cal}}^2} \quad 33$$

34

여기서, 편미분하여 구하는 감도계수는

$$\begin{aligned} C_{l_0} &= \frac{d}{dl_0} \left(\frac{k(T) - l_0}{l_0} f_{cal} \right) \\ &= -\frac{k(T)}{l_0^2} f_{cal} = -\frac{f_{cal}}{l_0} \left(\frac{l}{l_0} - 1 + 1 \right) = -\frac{f_{cal}}{l_0} \left(\frac{k(T) - l_0}{l_0} + 1 \right) \end{aligned} \quad 35$$

$$C_{k(T)} = \frac{d}{dk(T)} \left(\frac{k(T) - l_0}{l_0} f_{cal} \right) = \frac{f_{cal}}{l_0} \quad 36$$

$$C_{f_{cal}} = \frac{d}{df_{cal}} \left(\frac{k(T) - l_0}{l_0} f_{cal} \right) = \frac{k(T) - l_0}{l_0} \quad 37$$

마) 확장 불확도 산출

확장 불확도는 식 (9)로부터 구한 유효 자유도를 이용하여 t분포 표의 신뢰구간

(약 95 %)에 해당하는 자유도 column에 나타난 k값을 곱하여 산출한다.

$$U = u_{Total} \times k$$

38

바) 불확도 표현

불확도의 표현은 [(측정 값)±(확장 불확도)] (신뢰수준 약 95 %, k=)

마. 불확도 산출 절차

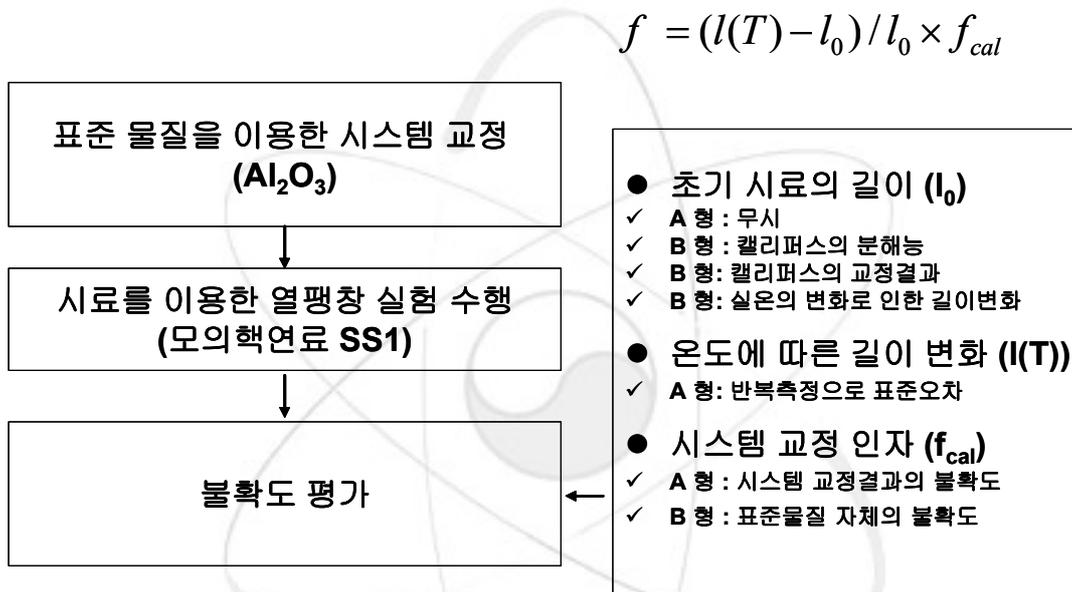


그림 15. 모의 건식공정핵연료의 불확도 평가절차

표 7. 모의 핵연료의 구성 성분 (SS1)

Elements	UO ₂ +SS=100g (UO ₂ +SS1)
SrO	0.057
Y ₂ O ₃	0.04
ZrO ₂	0.23
La ₂ O ₃	0.143
CeO ₂	0.665
Nd ₂ O ₃	0.49

* SS₁: UO₂ + 1.6 wt% solid solution (3 at% 연소도 사용후핵연료 모사)

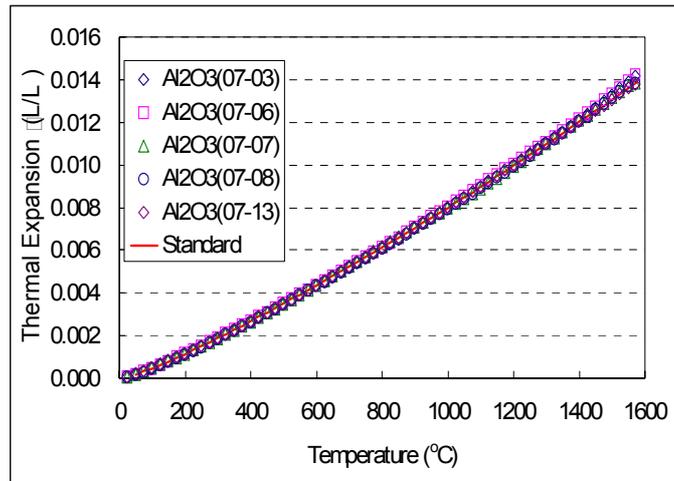


그림 16. 시스템 교정 결과

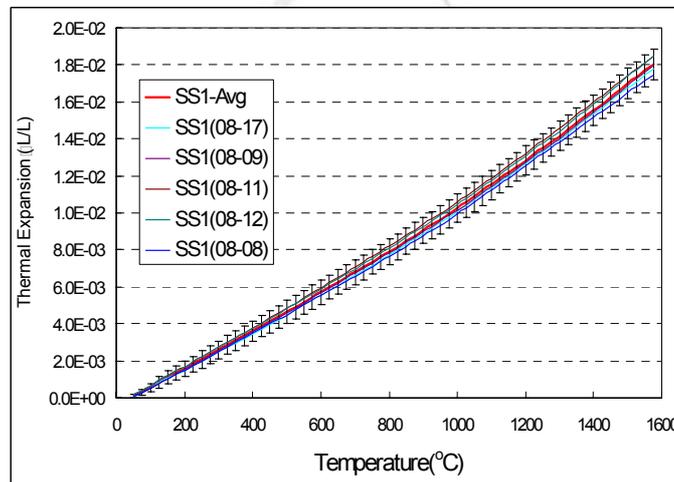


그림 17. 모의 건식공정핵연료 불확도 결과 (SS1)

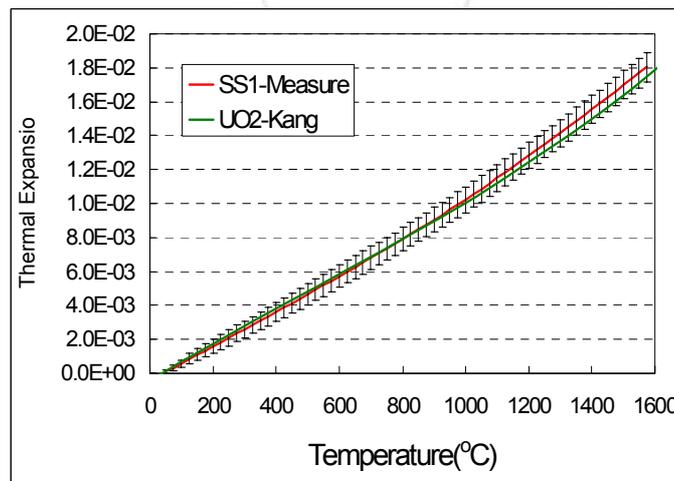


그림 18. 모의 건식공정핵연료와 UO₂ 핵연료의 열팽창 비교

2. 모의 건식공정 핵연료의 열중량 분석기의 불확도 평가

가. 목 적

TG (Thermogravimetry ; 열중량분석기)는 온도나 시간의 함수로 시료의 질량변화를 측정하는 장비로서, 주로 복합 고분자의 연구 개발, 품질 검사등에서 주로 사용된다. 본 절차는 모의 건식공정 핵연료 열중량분석 시험과 관련된 시험업무를 수행하기 위한 불확도 산출절차를 기술함을 목적으로 한다.

나. 적용범위

핵연료 열중량분석 시험중 TG(Thermogravimetry)를 사용한 온도증가에 따른 중량 변화 시험의 불확도 산출에 적용한다.

다. 시험방법

핵연료 열중량 측정기의 운전절차서에 따라 열중량 분석 시험을 수행한다.

라. 시험 자료의 분석

1) 자료 측정

핵연료 열중량분석 시험지침서에 따라 측정된 자료는 시간변화에 따라 표시한다. 온도증분은 50 K로 하며 계산과정에서 오류를 방지하기 위해 Computer Program (Excel)을 이용하여 열팽창 시험 결과표를 만들 수 있다.

2) 불확도 산출

가) 모델식

$$f_w = (u(t) - w_0) \cdot f_{cal}$$

39

여기서

f_w = 열중량분석(Thermogravimetry), 측정 대상이 되는 양 (측정량),

w_0 = 상온 (20 °C ± 10 °C)에서의 시료의 무게 (단위, g)

$u(t)$ = 시간 t sec 에서의 시료의 무게 (단위, g)

f_{cal} = 시스템 미교정에 의한 차이의 비

나) 불확도 요인

i) w_0 의 불확도 (u_{w_0})

- 저울의 교정 성적서에 의한 차이 ($u_{w_{02}}$)
- 저울의 분해능 ($u_{w_{03}}$)

ii) $w(t)$ 의 불확도 ($u_{w(t)}$)

- 반복측정에 의한 불확도

iii) f_{cal} 의 불확도 ($u_{f_{cal}}$)

- 온도별 RM의 불확실성 ($u_{f_{cal1}}$)
- RM 비교 과정, 반복측정의 불확실성 ($u_{f_{cal2}}$)

다) 불확도 계산

- w_0 의 표준 불확도 (u_{w_0})

$$u_{w_0}^2 = u_{w_{01}}^2 + u_{w_{02}}^2 + u_{w_{03}}^2 \quad 40$$

- 유효자유도(ν_{w_0})

$$\nu_{w_{01}} = \nu_{w_{02}} = \nu_{w_{03}} = \infty \quad 41$$

$$\nu_{w_0} = \frac{u_{w_0}^4}{u_{w_{01}}^4/\nu_{w_{01}} + u_{w_{02}}^4/\nu_{w_{02}} + u_{w_{03}}^4/\nu_{w_{03}}} = \infty \quad 42$$

- $w(t)$ 의 표준 불확도 ($u_{w(t)}$)

$$u_{w(t)}^2 = s_w^2/N = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (w_n - \bar{w})^2 / (N-1) \quad 43$$

여기서

N = 반복측정 횟수

w_n = n 번째 측정시 무게 (단위, g)

- 유효자유도($\nu_{w(t)}$)

$$\nu_{w(t)} = N-1 \quad 44$$

- f_{cal} 의 표준 불확도 ($u_{f_{cal}}$)

$$u_{f_{cal}}^2 = u_{f_{cal}}^2 + u_{f_{cal}}^2 \quad 45$$

- 유효자유도($\nu_{f_{cal}}$)

$$\nu_{f_{cal}} = \frac{1}{2} \left(\frac{100}{R} \right)^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{100}{5} \right)^2 = 200 \quad 46$$

$$\nu_{f_{cal}} = M - 1 \quad 47$$

$$\nu_{f_{cal}} = \frac{u_{f_{cal}}^A}{u_{f_{cal}}^A / \nu_{f_{cal}} + u_{f_{cal}}^A / \nu_{f_{cal}}} \quad 48$$

여기서

R = 위험도 (100 - 신뢰수준 %), 표준물질의 신뢰도를 약 95 %로 가정.

M = RM 비교시험의 반복횟수

라) 합성 불확도 산출

합성 불확도는 다음과 같이 구하며 유효자유도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u_{Total} = \sqrt{C_{u_0}^2 \cdot u_{u_0}^2 + C_{u(t)}^2 \cdot u_{u(t)}^2 + C_{f_{cal}}^2 \cdot u_{f_{cal}}^2} \quad 49$$

50

여기서, 편미분하여 구하는 감도계수는

$$C_{u_0} = \frac{d}{du_0} ((u(t) - u_0)f_{cal}) = -f_{cal} \quad 51$$

$$C_{u(t)} = \frac{d}{du(t)} ((u(t) - u_0)f_{cal}) = f_{cal} \quad 52$$

$$C_{f_{cal}} = \frac{d}{df_{cal}} ((u(t) - u_0)f_{cal}) = (u(t) - u_0) \quad 53$$

마) 확장 불확도 산출

확장 불확도는 위에서 구한 유효 자유도를 이용하여 t분포 표의 신뢰구간 (약 95 %)에 해당하는 자유도 column에 나타난 k값을 곱하여 산출한다.

$$U = u_{Total} \times k \quad 54$$

바) 불확도 표현

불확도의 표현은 [(측정 값) ± (확장 불확도)] (신뢰수준 약 95 %, k =)

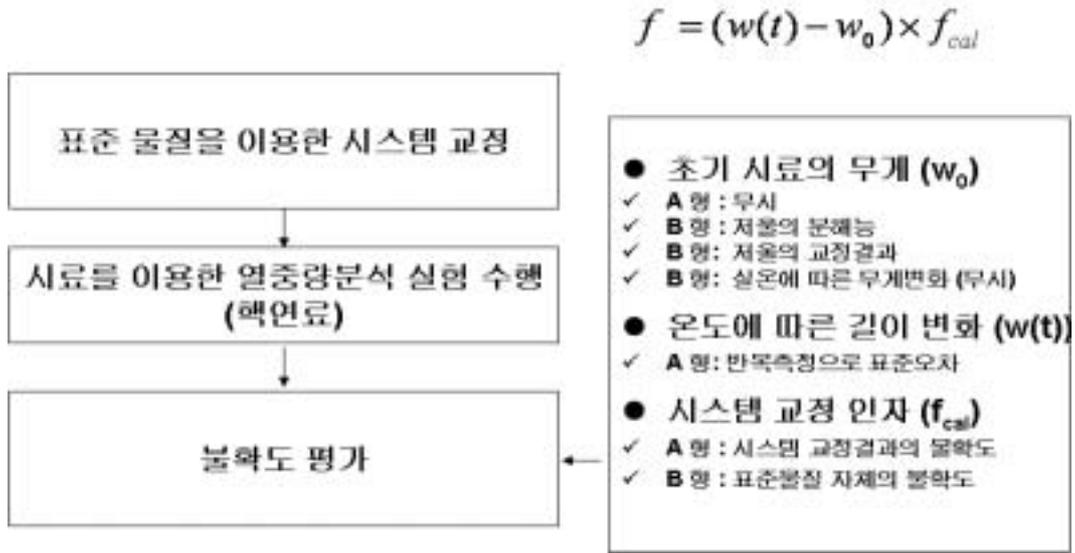


그림 19. 핵연료 열중량 분석 시험의 불확도 평가절차

3. 모의 건식공정 핵연료의 열확산도 시험 불확도 평가

가. 목 적

본 절차는 모의 건식공정 핵연료 열확산도 시험과 관련된 시험업무를 수행하기 위한 불확도 산출절차를 기술함을 목적으로 한다.

나. 적용범위

핵연료 열확산도 시험중 Laser Flash를 사용한 온도변화에 따른 열확산도 시험의 불확도 산출에 적용한다.

다. 시험장비 소개

독일 네취사의 LFA427 장비는 최신 레이저법 기술로 개발된 첨단 장비로 -40 °C 에서 2000 °C 까지 넓은 온도 범위의 측정이 가능하며 혁신적인 적외선 센서 기술이 시스템내에 적용되어 있어 2000 °C 의 높은 온도에서도 반대편의 온도 증가를

정확하게 감지할 수 있다. 이 장비는 다양한 sample holder 가 제공되어 여러가지 크기의 고체 시료뿐만 아니라 분말, 액상 등 다양한 종류의 측정이 가능하며 고분자, 금속, 세라믹 등 거의 대부분의 열확산도 및 열전도도 측정이 가능합니다.

고진공설계가 되어 있어 10^{-5} mbar 까지 감압되어 고온에서 산화반응이 심한 시료도 완벽하게 분석할 수 있습니다. 또한 수직으로 배열된 sample holder 및 furnace 그리고 센서는 시료 교체와 동시에 센서 신호에 대해 최적의 감도를 유지할 수 있도록 설계되어 있습니다.

측정규격은 ASTM E-1461, DIN EN 821 or DIN 30905 등이 있다.

라. 시험 자료의 분석

모의 건식공정 핵연료의 3가지 유형에 따라 열확산도를 실험으로 구하였으며 총 11개의 온도에 따른 자료를 구하였다. 한 온도에서 3번 반복시험을 수행하여 A형 불확도를 추정하였다. 표 8은 사용된 모의건식핵연료의 종류를 보여주고 있다. 확산도 실험 결과 및 불확도는 표 9에 나타나 있으며 그림 20에 도시화 하였다.

표 8. 모의 건식공정 핵연료의 종류

Elements	UO ₂ +S.S = 100g (UO ₂ +SS1)	UO ₂ +S.S = 100g (UO ₂ +SS2)	UO ₂ +S.S = 100g (UO ₂ +SS4)
SrO	0.057	0.114	0.228
Y ₂ O ₃	0.04	0.08	0.16
ZrO ₂	0.23	0.46	0.92
La ₂ O ₃	0.143	0.286	0.572
CeO ₂	0.665	1.33	2.66
Nd ₂ O ₃	0.49	0.98	1.96
total	1.625	3.250	6.500

-SS1: UO₂ + 1.6wt% solid solution (3at% 연소도 SF)

-SS2: UO₂ + 3.2wt% solid solution (6at% 연소도 SF)

-SS4: UO₂ + 6.4wt% solid solution (12at% 연소도 SF)

표 9. 모의 건식공정 핵연료의 열확산도 결과 (cm²/s)

온도 (K)	SS1		SS2		SS3	
	열확산도	불확도	열확산도	불확도	열확산도	불확도
325	2.311E+00	6.429E-03	1.697E+00	9.292E-03	1.699E+00	7.810E-03
376	2.036E+00	7.095E-03	1.490E+00	6.000E-03	1.564E+00	1.790E-02
476	1.672E+00	8.386E-03	1.269E+00	3.606E-03	1.294E+00	1.270E-02
577	1.462E+00	5.859E-03	1.128E+00	1.528E-03	1.145E+00	8.718E-03
677	1.303E+00	2.646E-03	1.035E+00	4.619E-03	1.057E+00	2.887E-03
776	1.184E+00	1.528E-03	9.573E-01	8.021E-03	9.707E-01	7.024E-03
875	1.082E+00	6.083E-03	8.970E-01	5.292E-03	9.107E-01	1.528E-03
974	9.953E-01	6.028E-03	8.450E-01	5.000E-03	8.600E-01	2.646E-03
1073	9.153E-01	4.509E-03	7.997E-01	1.528E-03	8.200E-01	3.000E-03
1273	7.833E-01	5.508E-03	7.263E-01	5.508E-03	7.540E-01	1.000E-03
1473	6.857E-01	3.512E-03	6.537E-01	2.517E-03	6.743E-01	5.774E-04

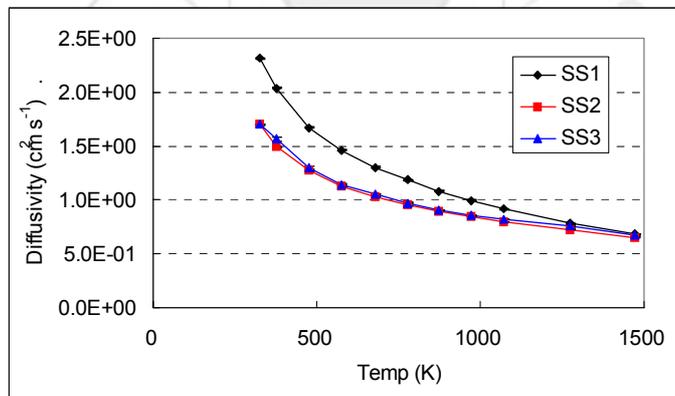


그림 20. 모의 건식공정 핵연료의 온도에 따른 열확산도 변화

제 2 절 숙련도 시험

1. 숙련도 시험 내용

가. 실시일자: 2005.7.2 - 2005.8.5

나. 시험방법:

CRM을 이용한 시험자간 비교 시험

온도 변화에 따른 Dilatometer (DIL402C, Netzsch)를 이용한 열팽창 측정
내부 품질관리 목적으로 수행

다. 시험참가자:

박창제, 문홍수 (KOLAS 시험요원)

라. 시험결과:

시험자간 비교시험을 표준물질 (CRM)인 Al_2O_3 를 이용하여 각각 1회씩 열팽창을 측정하여 그 결과를 표준물질의 표준값과 비교하였다.

불확도 평가를 실시한 결과 표준물질의 불확도 이내에 시험자의 시험 결과가 분포하고 있는 것으로 나타났다. 그림 21과 22는 시험자간 비교시험 결과를 나타낸 것이다.

마. 검토내용:

시험자간 비교시험 결과 표준물질의 열팽창 값과 유사하게 분포하고 있으며 시험 평균값의 불확도 3s 이내에 분포하고 있어서 시험자의 숙련도를 충분히 검증할 수 있다고 판단됨.

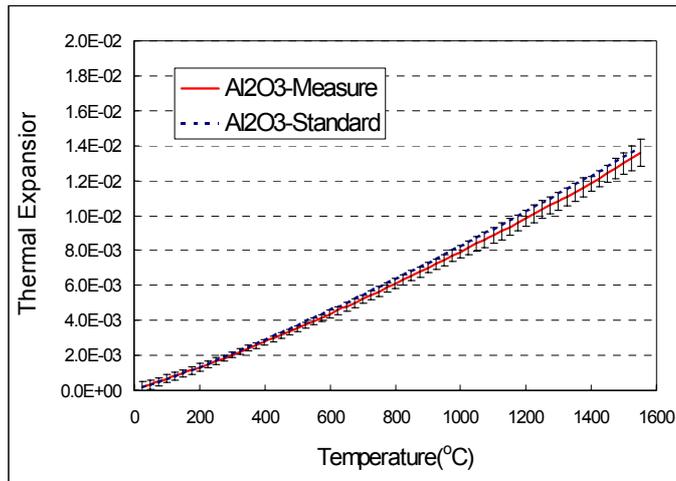


그림 21. 온도에 따른 표준물질의 열팽창 변화

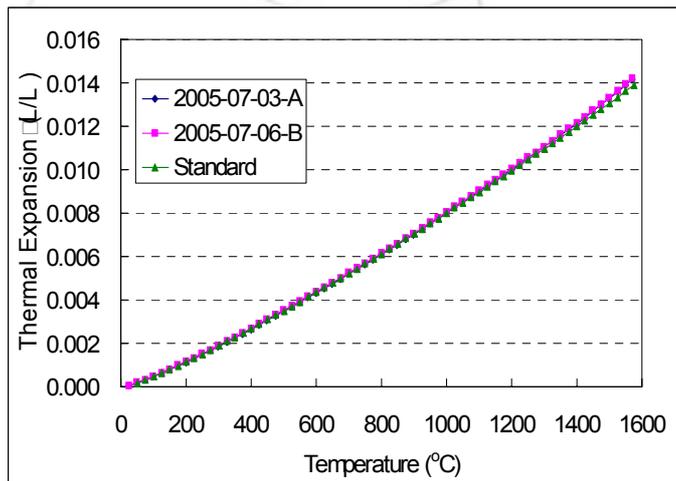


그림 22 시험자간 비교실험 결과

제 3 절 한국 교정시험기관 인정 획득(KOLAS)

1. KOLAS 인증 분야

가. 인정중요도 : 핵연료 국제 공인 시험기관 선정

국내최초로 핵연료 열물성 측정표준기술 개발

나. 인정일 : 2005. 5.30

다. 인정범위 : 열 및 온도측정

라. KOLAS 대상 : UO₂ 핵연료, 열팽창(인정분야 코드:04002002)

대분류: 04_열 및 온도 측정

중분류: 002_열특성의 조사

소분류: 002_열팽창

마. KOLAS 측정 기구: Dilatometer (DIL402C, NETZSCH)

바. 규격명

ASTM E 228:1995 Standard test method for linear thermal expansion of solid materials with a vitreous silica dilatometer

사. 핵연료 열물성 시험 운영 조직

1) 기술책임자의 업무

- 시험/교정 업무와 관련된 비밀정보 및 재산권 보호를 위한 직원의 감독을 수행한다.
- 시험/교정 요원 (연수생 포함)의 작업 수행을 감독한다.

2) 시험요원의 업무

- KOLAS 공인시험/교정 품질매뉴얼의 “조직(QM-BS-01)”을 따르되, 다음의 업무에 대한 추가적인 책임을 갖는다.
 - 가) 시험품목의 접수
 - 나) 소모품 관리
 - 다) 시험 업무에 관련된 고객의 비밀정보 및 재산권에 대한 기밀 유지

3) 핵연료 열물성시험 운영 조직도

아. 조직도

KOLAS 기술책임자 : 강권호 (한국원자력연구소)

KOLAS 기술부책임자 : 박창제 (한국원자력연구소)

KOLAS 시험요원 : 문홍수 (한국원자력연구소)

KOLAS 품질책임자 : 임남진 (한국원자력연구소)

KOLAS 품질부책임자 : 남지희 (한국원자력연구소)

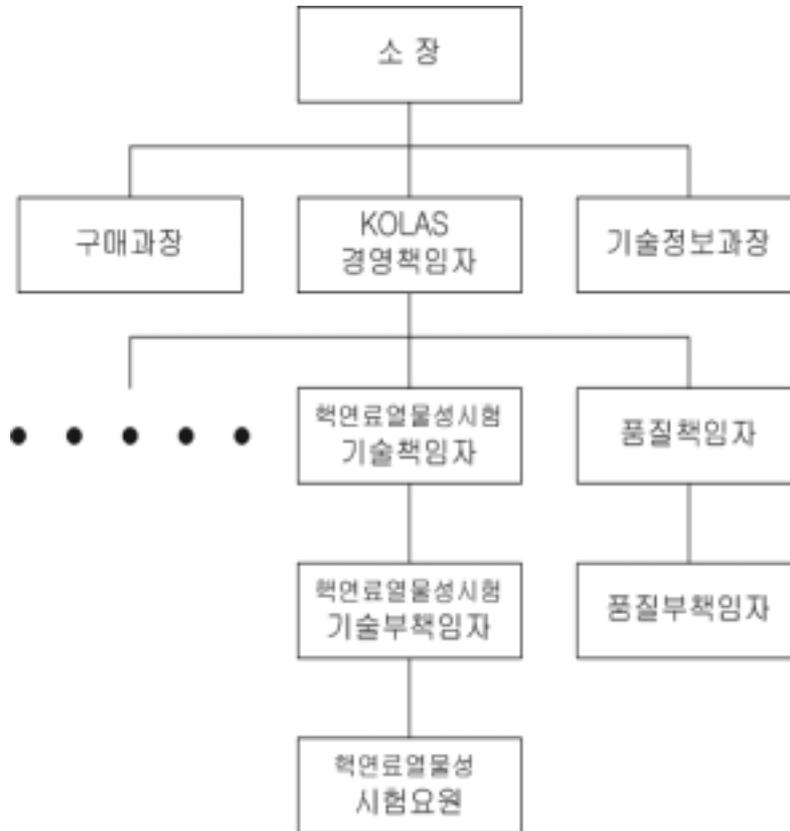


그림 23. 핵연료 열물성 시험의 조직도

제 3 장 핵재료 열특성 표준화 및 산업체 보급

제 1 절 전문위원회 운영

핵재료의 열특성은 재료의 특성, 물성값, 측정법 등에 따라 다양한 표준화가 요구된다. 그러므로 본 사업에서 각 분야별 특성에 맞는 전문가를 중심으로 전문위원회를 구성하여 사업의 진행 기획 및 검토를 수행하고, 적용방법 및 사업의 타당성에 대해 점검하였다. 각 분야별 전문가 초청세미나를 진행하여 본사업의 결과에 대한 보급 및 홍보를 적극적으로 하였다. 전문위원회의 위원은 분야별 국내 전문가로서 학계, 산업계, 연구계로 구성 하였다. 이번 연도에서는 모의 건식공정 핵연료의 표준물질제조, 표준 열물성 자료 등에 대한 자문을 구하였으며, 관련 분야의 세미나도 같이 실시하였다. 다음 표는 핵재료의 열특성 전문위원회 위원들을 나타낸 것이다.

표 10. 핵연료 열물성 전문위원회

성명	소속	연락처	비고
양명승	한국원자력연구소 부장	868-2516 msyang1@kaeri.re.kr	연구계
이영우	한국원자력연구소 책임연구원	868-2129 ywiee@kaeri.re.kr	연구계
나상호	한국원자력연구소 책임연구원	868-2512 shna@kaeri.re.kr	연구계
양재호	한국원자력연구소 선임연구원	868-2813 yangjh@kaeri.re.kr	연구계
유명준	한국원자력연료(주) 부장	868-1970 miryu@mail.knfc.co.kr	산업계
유호식	한국원자력연료(주) 선임연구원	868-1171 hsiyoo@mail.knfc.co.kr	산업계
박춘호	한국원자력연료(주) 부장	868-1171 choonhpark@mail.knfc.co.kr	산업계
김형수	가이아(주) 실장	868-2565 khs234@chollian	산업계
박광현	경희대학교연구소 교수	031-201-2565 kpark@khu.ac.kr	학계
김주식	넷취코리아 이사	031-907-3193 j.kim@nks.netzsch.co.kr	장비계

1. 전문위원회 활동 내용

가. 제 1 회 핵특성 측정표준 전문위원회

- 1) 개최일 : 2005년 4월 7일
- 2) 개최장소 : 유성호텔 회의실
- 3) 참여자 명단 : 강권호, 이영호, 나상호, 양명승, 박창제, 송기찬,
유명준, 김주식, 박춘호, 김형수 외 다수
- 4) 내용
 - 핵연료 열특성 표준화 과제 kick-off 회의
 - 핵연료 산화 거동 실험 결과 및 분석 - 강권호

나. 제 2 회 핵특성 측정표준 전문위원회

- 1) 개최일 : 2005년 5월 31일
- 2) 개최장소 : 유성호텔 회의실
- 3) 참여자 명단 : 강권호, 이영호, 나상호, 박창제, 유명준, 박춘호, 양명승 외
- 4) 내용
 - 핵연료 열물성 워크샵 사전 준비 회의 - 개최 및 장소 일정 토의
 - 핵특성 측정표준의 목적과 전반적인 업무협회 - 강권호

다. 제 3 회 핵특성 측정표준 전문위원회

- 1) 개최일 : 2005년 7월 1일
- 2) 개최장소 : 유성호텔 회의실
- 3) 참여자 명단 : 강권호, 나상호, 박창제, 유명준, 박춘호, 양명승, 송기찬 외
- 4) 내용
 - 핵연료 산화 특성 검토(1) - 나상호
 - 핵연료 표준화 및 전반적인 업무협회 - 강권호

라. 제 4 회 핵특성 측정표준 전문위원회

- 1) 개최일 : 2005년 8월 11일

- 2) 개최장소 : 유성호텔 회의실
- 3) 참여자 명단 : 강권호, 나상호, 박창제, 유명준, 박춘호, 양명승, 송기찬 외
- 4) 내용
 - 핵연료 산화 특성 검토 (2) - 나상호
 - 핵연료 열팽창 실험의 불확도 산출 검토 - 박창제
 - 핵연료 표준화 및 전반적인 업무협회 - 강권호

마. 제 5 회 핵특성 측정표준 전문위원회

- 1) 개최일 : 2005년 10월 24일
- 2) 개최장소 : 유성호텔 회의실
- 3) 참여자 명단 : 강권호, 나상호, 박창제, 유명준, 박춘호, 문제선, 문홍수 외
- 4) 내용
 - 핵연료 산화 특성 검토(3) - 나상호
 - 모의핵연료의 제조공정 검토 - 문제선
 - 핵연료 표준화 및 전반적인 업무협회 - 강권호

바. 제 6 회 핵특성 측정표준 전문위원회

- 1) 개최일 : 2005년 11월 25일
- 2) 개최장소 : 유성호텔 회의실
- 3) 참여자 명단 : 강권호, 나상호, 박창제, 이상현, 김석원 외 다수
- 4) 내용
 - 핵재료 열물성 워크샵 최종 점검회의
 - 핵연료 표준화 및 전반적인 업무협회 - 강권호

사. 제 7 회 핵특성 측정표준 전문위원회

- 1) 개최일 : 2005년 12월 2일
- 2) 개최장소 : 제주 풍림콘도 회의실
- 3) 참여자 명단 : 양명승, 강권호, 나상호, 박창제, 이상현, 김석원 외 다수
- 4) 내용
 - 제 2회 핵재료 열물성 워크샵 참석

- 핵연료 열특성 측정 표준화 과제 진도점검
- 제 3회 핵재료 열물성 워크샵 계획

아. 제 8 회 핵특성 측정표준 전문위원회

- 1) 개최일 : 2005년 12월 13일
- 2) 개최장소 : 대덕 컨벤션 센터 회의실
- 3) 참여자 명단 : Kaiserberger (Netzsch), 민성환, 김태한, 강권호, 나상호, 박창제, 이상현, 최해만, 등 다수의 참가자
- 4) 내용
 - “Hot Cell Design for Thermo-Physical Property Instrument”
 - 핵연료 열특성 측정 표준화 과제 진도점검

자. 제 9 회 핵특성 측정표준 전문위원회

- 1) 개최일 : 2006년 1월 26일
- 2) 개최장소 : 유성호텔 회의실
- 3) 참여자 명단 : 강권호, 나상호, 박창제, 이상현, 양명승, 송기찬, 유명준, 박춘호
- 4) 내용
 - 모의 건식공정 핵연료의 표준물질 제조공정 검토
 - 핵연료 열특성 측정 표준화 과제 최종 진도점검

제 2 절 세미나 개최

1. 세미나 개최 내용

가. 제 1 회 세미나

- 1) 개최일 : 2005년 4월 7일
- 2) 개최장소 : 유성호텔 회의실
- 3) 세미나 강사: 강권호 (한국원자력연구소)
- 4) 세미나 내용:
 - 핵연료 산화 거동 실험 결과 및 분석

나. 제 2 회 세미나

- 1) 개최일 : 2005년 6월 28일
- 2) 개최장소 : 한국원자력연구소 두픽동 세미나실
- 3) 세미나 강사: 김영순 (전남 신소재사업 진흥재단)
- 4) 세미나 내용:
 - 전남신소재 기술산업화 지원센터 소개 및 열특성 측정장비 소개

다. 제 3 회 세미나

- 1) 개최일 : 2005년 7월 1일
- 2) 개최장소 : 유성호텔 회의실
- 3) 세미나 강사: 나상호 (한국원자력연구소)
- 4) 내용
 - 400 °C 미만 온도에서 UO_2 산화거동 (1)

라. 제 4 회 세미나

- 1) 개최일 : 2005년 8월 11일
- 2) 개최장소 : 유성호텔 회의실

- 3) 세미나 강사: 나상호 (한국원자력연구소)
박창제 (한국원자력연구소)

- 4) 세미나 내용:
 - 400°C 미만 온도에서 UO_2 산화거동 (2)
 - 핵연료 열팽창 실험의 불확도 산출

마. 제 5 회 세미나

- 1) 개최일 : 2005년 10월 24일
- 2) 개최장소 : 유성호텔 회의실
- 3) 세미나 연사: 나상호 (한국원자력연구소)
문제선 (한국원자력연구소)
- 4) 내용
 - 400°C 미만 온도에서 UO_2 산화거동 (3)
 - 모의핵연료의 제조공정

바. 제 6회 세미나

- 1) 개최일 : 2005년 12월 13일
- 2) 개최장소 : 대덕 컨벤션 센터 회의실
- 3) 세미나 강사: Kaiserberger (Netzsch)
- 4) 세미나 내용:
 - Hot Cell Design for Thermo-Physical Property Instrument

사. 제 7회 세미나

- 1) 개최일 : 2006년 1월 20일
- 2) 개최장소 : 유성호텔 회의실
- 3) 세미나 연사: 김형수 (가이야주식회사)
- 4) 세미나 내용:
 - 불순물 함유 건식공정 산화물 핵연료 소결체의 용융점 분석

아. 제 8회 세미나

- 1) 개최일 : 2006년 2월 6일
- 2) 개최장소 : 유성호텔 회의실
- 3) 세미나 강사: 이광재 (아주대학교)
- 4) 세미나 내용:
 - 비접촉식 열확산 계수 측정

제 3 절 모의 건식공정 핵연료의 데이터베이스

1. 핵연료 열물성 데이터베이스 구축 현황

핵연료 열물성 종합데이터베이스 시스템은 윈도우2000 서버의 운영체제로 구축하였으며, 현재 DB 시스템의 구축현황은 그림 24와 같이 구축된다. 그리고 DB 내용은 세라믹 핵연료와 금속 핵연료의 열팽창, 열전도도, 비열, 그리고 밀도를 포함하고 있으며 약간의 계산 틀과 자료를 테이블로 제공하고 있다. 또한, 열물성 분석 모델과 보고서 및 세미나 자료 등을 제공하고 있다. 계산 도구는 자바 언어로 만들어졌으며, 특정온도에서 열물성값(열전도도, 열팽창, 밀도, 비열)을 계산할 수 있다. 핵연료 열물성 DB는 연도순으로 배열할 수 있으며, 세부 상세정보는 더 진행하여 볼 수 있다.

그림 25는 핵연료 열물성 종합 데이터베이스 구조를 보여주고 있다. Home 디렉토리에서 크게 TPDB, Models, Data, Tools, Links로 나뉘어져 있다. TPDB에는 실제적인 데이터베이스를 담고 있으며, 세라믹 핵연료와 금속핵연료로 나뉘어져 있다. 그리고 핵연료 열물성 분석 보고서를 PDF 파일 형식으로 제공하고 있다. Models에서는 분석된 핵연료 열물성의 모델식과 그래프를 보여주고 있다. 본 연구에서 제안하는 핵연료 열물성 모델식도 보여주고 있다. Data에서는 각종 핵연료 열물성 실제 자료들을 온도에 따라 테이블로 보여주고 있다. Tools에는 핵연료의 열물성 (열팽창, 밀도, 비열, 열전도도)에 대한 계산 틀을 제공하는데, 온도값을 기입하면 열물성 값들이 보여주고 있다. 그리고 Links에는 핵연료 열물성 관련된 국내외 실험실이나 DB 시스템 사이트를 연결하고 있으며, 핵연료 열물성 관련 세미나 자료를 제공하고 있다. 그리고 데이터베이스를 핵연료별, 열물성별로 나누어 열거하여 보여줄 수 있게 되어 있으며, 또한 발행연도에 따라 순서대로 나열하는 기능도 추가적으로 제공하고 있다. 그리고 핵연료의 열물성에 대한 요약 내용을 PDF 파일형식으로 제공하

여 이용자가 웹상에서 직접 읽어보거나 내려받기하여 이용할 수 있게 하고 있다. 그리고 핵연료 열물성 데이터베이스에서 본 연구 결과로 적절한 핵연료 열물성 모델을 선정하여 모델식으로 제공하고 있으며 이 자료를 테이블 형식이나 열물성 계산틀에 피드백되어 이용된다. 계산틀에 사용된 모델식들은 핵연료 열물성 데이터베이스에서 충분히 분석하여 다양한 실험 결과들을 고려하여 선정된 모델 식이 이용되고 있다.

2. 핵연료 열물성 DB 서버의 하드웨어 소개

핵연료 열물성 종합데이터베이스 시스템의 하드웨어 구성은 펜티엄급 PC와 외장형 하드디스크, 그리고 긴급전력공급장치로 이루어져 있다.

가. 펜티엄급 PC

데이터베이스 시스템은 네트워크로 연결된 일반 펜티엄 II급 PC가 사용되었다. 데이터베이스 서버나 웹 서버의 기능상 속도보다는 용량이 충분하게 유지하는 것이 유리하여 80 Gbyte의 내장형 하드디스크를 사용하고 있다. 그리고 네트워크는 100 Mbps 급으로 유지하고 있으며 다양한 외부 장치를 위해 USB 2.0 지원이 가능하도록 시스템을 구성하였다.

나. 외장형 하드디스크

데이터베이스를 백업하거나 기존 자료를 백업하는 목적으로 외장형 하드디스크를 설치하였으며 유사시 자료의 이동을 손쉽게 하고 있다. 본체와는 USB 2.0 포트로 연결되어 있으며 용량은 80 Gbyte 이며 네트워크로 공유되어 다른 일반 PC와도 연결될 수 있도록 하였다.

다. 긴급전력공급장치 (UPS)

예상치 못한 정전상태에서 시스템을 얼마동안 유지시키는 목적으로 UPS를 본체에 연결하여 가동하고 있다. 이러한 장치는 갑작스러운 정전시에 시스템의 안정성을 보장하고 자료의 손실을 막을 수 있다.

3. 핵연료 열물성 DB 서버의 소프트웨어 소개

가. 운영체제

본 연구에서는 데이터베이스 구축을 위해 최근에 널리 사용되고 있는 마이크로소프트사의 윈도우즈 2000 서버로 운영체제를 구성하였다. 윈도우즈 2000 서버는 기본적인 윈도우즈 기능외에도 웹 서버를 제공할 수 있으며 그 외에도 기존에 이용되는 소프트웨어들을 충분히 호환성 있게 수용할 수 있는 운영체제이다. 이러한 윈도우즈 2000 운영체제는 시스템의 보완과 안정성에도 우수한 것으로 알려져 있으며 지속적인 갱신 (update)를 하여 기존 파일을 최신의 버전으로 갱신하고 있다.

나. 데이터베이스 서버

데이터베이스 서버로는 주로 사용되고 있는 소프트웨어로는 오라클, 시퀀(SQL), 그리고 액세스 (Access) 등이 있다. 주로 저용량의 데이터베이스 구축을 위해서는 사용하기 간단한 액세스가 주로 사용되며, 고용량의 데이터베이스 구축을 위해서는 오라클이나 시퀀 등이 사용된다. 시퀀(SEQUEL, Structured English Query Language)은 1970년대에 IBM사에서 데이터베이스 검색을 위해 개발한 컴퓨터 언어이다. 시간이 갈수록 언어의 기능이 추가되어 단지 데이터베이스 본 연구에서는 시퀀을 채택하였고 그 중에서 MS사에서 개발한 데이터베이스 서버의 운영체제인 SQL 서버 2000을 사용하고 있다. 이 소프트웨어는 DB의 효율적인 이용과 함께 안정성, 보완성이 우수하다. 또한 사용자가 손쉽게 접근하여 사용할 수 있는 장점이 있다. 주로 SQL 서버 2000은 윈도우 NT 또는 2000에서 사용할 것을 권장한다.

다. 웹서버

웹서버를 제공하기 위하여 기본적인 편집 도구가 필요한데 본 연구에서는 나모 웹에디터를 사용하고 있다. 이 소프트웨어로 웹 파일의 편집이 용이하여 웹 상의 형태를 바로 볼 수 있다. 또한 그림을 쉽게 삽입하거나 파일을 링크할 수 있다.

기타 사용되는 소프트웨어는 바이러스 방지 소프트웨어이다. 윈도우즈 웹서버나 DB 서버는 해커들의 집중적인 공략 대상이 되고 있다. 이를 거의 실시간으로 방어하기 위한 노력이 진행되고 있으며 바이러스 감지 및 제거 소프트웨어로 V3를 선택하여 시스템에 사용하고 있다. V3는 네트워크로 상시로 최신 버전으로 update 되며 지속적으로 바이러스를 online으로 감시하고 있다.

그림 26에서 29까지는 DB 서버의 내용중에서 모의핵연료의 데이터베이스 부분을 보여주고 있다. 그림 26은 초기의 모의핵연료 DB 자료화면이고 그림 27은 모의 핵연료의 비열 부분의 수집된 실제 DB를 보여주고 있다. 그림 28은 도표화된 모의 핵연료의 비열 자료이며 그림 29는 핵연료의 비열에 대한 모델식을 나타내고 있다.



그림 24. 핵연료 종합 열물성 DB 홈페이지

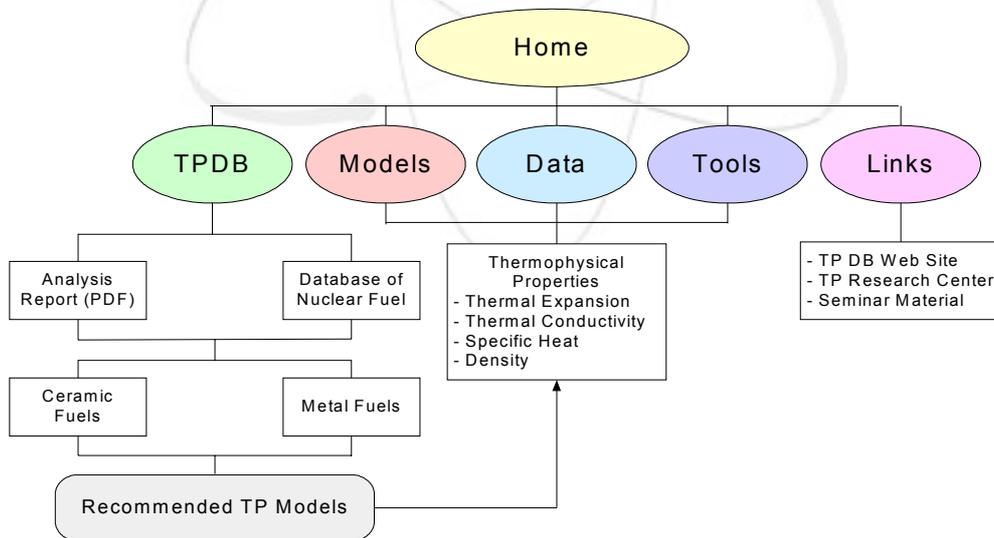
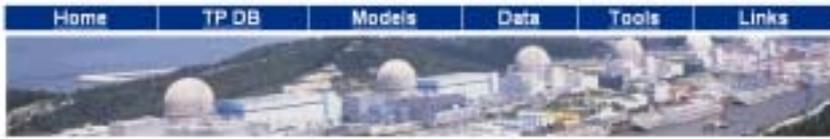


그림 25. 핵연료 열물성 데이터베이스 구조

Spent Fuel TPDB



Thermophysical Database of Spent Fuel

[Thermal Expansion](#)

[Specific Heat](#)

[Thermal Conductivity](#)



Copyright(c) 2003-2005 KAERI Dry Process Fuel Performance Evaluation Team. All rights reserved
ngihang@kaeri.re.kr

그림 26. 모의 핵연료 데이터베이스 화면

Specific Heat DB of Spent fuel

The screenshot shows a navigation bar with the following links: Home, TP DB, Models, Data, Tools, and Links. Below the navigation bar is a large image of a nuclear power plant with several containment domes.

Name	Year	Title	Author	Institute	Source	Property
stu-37	2001		Araya, Uno, Mizuo		J. Nucl. Mater. 294,1	Co-ef
stu-36	2001		Yakov, Popov, Ivanov		J. Nucl. Mater. 299,161	
stu-30	1996		Lucata, Verrill, Henderson		J. Nucl. Mater. 220, 251	Co-data, Co-ef
stu-29	1996		Verrill, Lucata		J. Nucl. Mater. 220, 251	Co-data
stu-26	1992		Lucata, Matzka, Verrill		J. Nucl. Mater. 223, 51	Co-data
stu-27	1992		Lucata, Matzka, Verrill, Toorian		J. Nucl. Mater. 198, 133	Co-data

Sort by: Id Year

The screenshot shows a navigation bar with the following links: Home, TP DB, Models, Data, Tools, and Links.

Copyright(c) 2003-2005 KAERI Dry Process Fuel Performance Evaluation Team. All rights reserved
ngihang@kaeri.re.kr

그림 27. 모의 핵연료 비열 데이터베이스

A.3. Heat Capacity (J/mol-K) of Simfuel

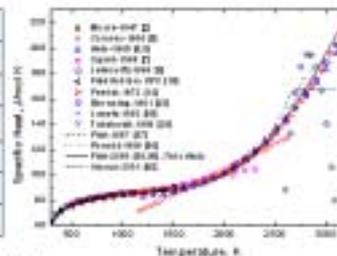
Temp (K)	1 at%	3 at%	5 at%	8 at%
298.15	63.63757	63.6806	63.72364	63.76819
300	63.84369	63.88699	63.93029	63.99525
350	68.48482	68.53534	68.58585	68.66163
400	71.80565	71.86339	71.92113	72.00773
450	74.28014	74.34509	74.41004	74.50748
500	76.19336	76.26553	76.3377	76.44596
550	77.72226	77.80165	77.88104	78.00012
600	78.98032	79.06692	79.15353	79.26344
650	80.04254	80.13636	80.23019	80.37082
700	80.95996	81.061	81.16204	81.31359
750	81.76814	81.87639	81.98465	82.14704
800	82.49247	82.60795	82.72342	82.89663
850	83.15147	83.27416	83.39685	83.58088
900	83.7589	83.88881	84.01872	84.21358
950	84.32532	84.46244	84.59957	84.80525
1000	84.85904	85.00338	85.14772	85.36424
1050	85.36697	85.51853	85.67009	85.89743

그림 28. 모의핵연료의 테이블화된 비열 자료

열물성 모델 - Specific heat

$$C_p = \frac{C_1 E_a e^{E_a/T}}{T^2 (e^{E_a/T} - 1)^2} + 2C_2 T + \frac{C_3 E_a e^{-E_a/T}}{T^2}$$

	UO ₂ [1]	UO _{2-x} [2]	PuO ₂ [3]	SIMFUEL[2]	Unit
Temp.	< 3120		< 1800	< 1300	K
C ₁	302.27	302.27	322.49	302.27	J/ku K
C ₂ × 10 ⁻⁵	8.463	8.463	14.679	C ₂ × (1 + 0.0118)	J/ku-K ²
C ₃ × 10 ⁷	8.741	C ₃ × x	-	8.741	J/ku
E	548.68	548.68	587.41	548.68	K
E _a	18531.1	18531.1	-	18531.1	J



T_0 = Einstein temp.,

E_a = electron activation E./Boltzman const.,

x = O/M, B-bumup(at.%)

* MOX의 비열은 Kapp-Neumann rule을 따른다.

[1] Park, 2000

[2] Matzke, 1997

[3] Harding, 1989

핵연료 열물성 종합 데이터베이스

그림 29. 여러 핵연료의 비열 모델식

제 4 절 핵재료 열물성 워크샵

1. 워크샵 명칭

제 2 회 핵재료 열물성 워크샵 (The 2nd Workshop on the Nuclear Material
Thermophysical Properties (NMTP-2005))

2. 개요

가. 목적

국내외 핵연료 열물성 전문가들의 논문발표 및 기술교류를 통하여 국내 핵연료 열물성 측정표준 기반구축과 원자력 재료 연구에 이바지함을 목적으로 합니다.

나. 주최: 산업자원부, 과학기술부

다. 주관: 한국원자력연구소, 원자력재료 열특성 측정표준 기반구축과제

라. 후원: 한국원자력학회, 한국열물성 학회, Nezsch-Korea

마. 일정: 2005년 12월 1일(목요일) - 12월 2일(금요일)

바. 장소: 제주 풍림 리조트

사. 참석자: 강권호 윤연숙 김석원 이상현 나상호 박종만 김창규 양재호 김연구
정창준 박창제 최항복 유명준 최해만 윤병로 양명승 송기찬 김웅기
김종현 문제선 문홍수 홍진기 이광재 김소연 민성환 김태한 금 일
최우석 정윤희

3. 세부일정

12:00 - 13:30 Lunch

13:30 - 13:40 Registration

13:40 - 14:00 Opening Address: Myung Seung Yang (KAERI)

Opening Address: Yoon Hee Jung (POSTEC)

Thursday, December 1, 2005 : Session I (14:00 ~ 15:00)

Chairperson : Young Woo Lee (KAERI)

14:00 - 14:20 A Proposal of New Method for Oxidation of Mixed Oxide Pellet

(Sang Ho Na, KAERI)

14:20 – 14:40 Thermal Diffusivity Measurement by Photoacoustic Method (Sok Won Kim, Ulsan Univ.)

14:40 – 15:00 Ab initio Study for Xenon Diffusion in UO₂ and ThO₂ (Younsuk Yun, Kyung Hee Univ.)

15:00 – 15:20 Coffee Break

Thursday, December 1, 2005 : Session II (15:20 ~ 16:20)

Chairperson : Sok Won Kim (Ulsan Univ.)

15:20 – 15:40 Thermal Properties of Uranium-Molybdenum Alloy (Sang Hyun Lee, KRISS)

15:40 – 16:00 Thermal Characteristics of Multi-Core U-Mo Fuel Rod for KOMO-3 Irradiation Test (Jong Man Park, KAERI)

16:00 – 16:20 Thermal Behavior of a Duplex Burnable Poison Fuel Pellet (Jae Ho Yang, KAERI)

16:20 – 16:40 Coffee Break

Thursday, December 1, 2005 : Session III (16:40 ~ 17:40)

Chairperson : Sang Hyun Lee (KRISS)

16:40 – 17:00 Uncertainty of the Fission Gas Release Calculation by ELESTRES-D (Hangbok Choi, KAERI)

17:00 – 17:20 Decay Heat Characteristics of the Spent Nuclear Fuel (Chang Joon Jeong, KAERI)

17:20 – 17:40 An Analysis of the Thermal Behavior of Irradiated Rod-Type U-Mo/Al Dispersion Fuel (Chang Kyu Kim, KAERI)

Thursday, December 1, 2005 : Poster Session (14:00 ~ 18:30)

P-1. Thermal Conductivity Measurement of Thin Films by Thermo-reflectance Method (Sok Won Kim, Ulsan Univ.)

- P-2. (U,Gd)O₂ Sintered Pellet Fabrication Process for CRM Thermal Property
(Myung Joon Yoo, KNFC)
- P-3. The Effect of Heating Rate and Sintering Atmosphere on the Solid Solution Formation of (U,Ce)O₂ (Yeon Goo Kim, KAERI)
- P-4. Uncertainty Evaluation of the Thermal Expansion Measurement for Simulated Fuel (Je Sun Moon, KAERI)
- P-5. Homogeneity Study of Pellet Density of the Simulated Fuel by the ANOVA Test (Je Sun Moon, KAERI)
- P-6. Monte Carlo Uncertainty Estimation for the Linear Thermal Expansion Coefficient of UO₂ Fuel (Je Sun Moon, KAERI)

18:30 – 21:00 Banquet

Friday, December 2, 2005 : Working Group Meeting on the Thermophysical Property of Nuclear Fuel

09:30 – 10:30 Discussion about the Problems during Measurement of the Thermophysical Properties and Manufacturing Standard Reference Material of Nuclear Fuel

10:30 – 10:40 Coffee Break

10:40 – 12:00 Discussion about the 3rd Workshop on the Nuclear Material Thermophysical Property (NMTP-2005)

12:00 – 13:00 Lunch



그림 29. 제 2 회 핵재료 열물성 워크샵 기념사진

워크샵 자료는 첨부하였음.

서 지 정 보 양 식

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호 호		위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드	
KAERI/RR-2641/2006					
제목/부제		열특성 측정표준 기반구축 산업기술기반조성에 관한 보고서 (3차년도 위탁보고서)			
연구책임자 및 부서명 (TR, AR인 경우 주저자)		강권호 (건설공정핵연료기술개발부)			
연구자 및 부서명		송기찬, 박창제 (건설공정핵연료기술개발부)			
출 판 지		발행기관	한국원자력연구소	발행년	2006.2
페 이 지	p. 58	도 표	있음(0), 없음()	크 기	26 Cm.
참고사항					
비밀여부	공개(o), 대외비(), — 급비밀, 소내만 공개 ()		보고서종류	Technical Report	
연구위탁기관		계약 번호			
초록 (15-20줄내외)					
<p>본 보고서에서는 크게 3가지 분야로 나누어져 연구를 진행하였다. 우선 핵재료 열특성 측정표준 기반구축과 측정 장비 신뢰성 평가, 그리고 표준화 및 산업체 보급으로 나누어져 있다. 핵재료 열특성 측정표준 기반구축과 핵재료 열특성 측정장비 신뢰성 평가 부분에서는 우선, 모의건설공정 핵연료의 표준물질 제조공정을 확립하였으며 핵연료의 표준물질 특성을 조사하였다. 또한 모의 핵연료의 열특성 측정 표준을 구축하기 위해 열중량 분석기와 열팽창 측정기에 대해 장비의 신뢰성 평가를 수행하였다. 그리고 건설공정 핵연료의 열특성 SRD를 생산하였다. 측정장비의 신뢰성 평가부분에서는 열팽창 시험, 열중량 분석 시험, 그리고 열확산도 시험에 대해 측정불확도 평가를 수행하였다. 그리고 시험자 비교시험을 통한 숙련도 시험을 수행하였으며 KOLAS 획득관련 부분을 다루고 있다. 마지막으로 표준화와 산업체 보급부분에서는 열특성 전문위원회 운영 내용과 세미나 개최, 워크샵 개최 등을 다루었고 표준화의 일환으로 모의건설공정 핵연료의 데이터베이스를 구축한 내용을 포함하였다.</p>					
주제명키워드 (10단어내외)		열특성, 핵재료, 표준화			

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.	Standard Report No.	INIS Subject Code		
KAERI/RR-2641/2006					
Title/Subtitle	Basement Construction of Measurement Standardization for Thermal Property and Basement Preparation of Industrial Technology				
Project Manager and Department	Kwon Ho Kang (Dry-processed Fuel Technology Development Department)				
Researcher and Department	Kee Chan Song, Chang Je Park (Dry-processed Fuel Technology Development Department)				
Publication Place	Publisher	KAERI		Publication Date	2006.2
Page Note	p. 58	Ill. & Tab.	Yes(o), No ()	Size	26 Cm.
Classified	Open(o), Restricted(), ___Class Document, Internal Only ()		Report Type	Technical Report	
Sponsoring Org. Abstract (15-20 Lines)			Contract No.		
There are three main categories in this report : 1)Basement construction of measurement standardization for nuclear material thermal property, 2) Reliability evaluation of measurement instrument, and 3) Standardization and industrial propagation.					
Subject Keywords (About 10 words)	Thermal Property, Nuclear Material, Standardization				