2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

연구로용 U-Mo 분산핵연료 문제점과 해결방안 고찰

Drawbacks of U-Mo dispersion fuel for Research Reactor and Consideration on the Solutions

김 창규, 이 돈배, 오 석진, 손 동성
한국원자력연구소

요약

한국, 미국, 프랑스, 카나다에서 핵비확산의 저농축 우라늄 고밀도 U-Mo 핵연료를 노내조사시험한 결과 핵연료입자내의 핵분열 생성 가스의 bubble생성에 의한 팽윤은 무시할 정도로 작았으나 기지 물질 aluminum과의 반응이 온도가 높을수록 심하게 반응됨을 보였다. 열확산 거리가 짧은 판상핵연료에는 사용 가능한 것으로 평가하였으나 봉상핵연료는 우라늄 밀도를 증가시키는데 한계가 있는 것으로 평가되었다. 순수 U-Mo 물질은 연소 중 안전한 거동을 나타내는 특성이 있으므로 얇은 U-Mo박판을 사용하여 기지 물질 aluminum과의 반응을 최소화 시키는 하는 방안을 찾아내면 성능이 우수한 핵연료를 개발할 수 있을 것으로 기대된다. 출력이 높을 경우에 피복재 표면에 열전도성이 매우 낮은 bohemite물질의 형성으로 핵연료 내부 온도가 상승하는 문제에 대하여는 피복재 재료의 개선 또는 표면개질 등이 요구된다.

Abstract

The irradiation tests, which have been performed by KAERI, ANL, CERCA, and AECL, showed that the swelling by the interaction between aluminum matrix and fuel particles was severe and sensitive to the fuel meat temperature. However, the swelling by the bubble formation of fission gas was examined to be very small as negligible. The U-Mo dispersion fuel was accessed to be applicable to the thin plate type fuel with very short heat diffusion distance of less than 0.5 mm, while the rod type fuel with long heat diffusion distance of more than 3.0 mm is assumed to be limited in using U-Mo dispersion fuel with high uranium density. Especially pure U-Mo material in fuel particle was investigated to have a stable irradiation behavior up to relatively high temperature. Accordingly it is expected that a fuel designed using thin U-Mo plate to minimize the interface temperature would be applicable. In addition, the thick formation of bohemite at the cladding surface in case of high power irradiation was observed to affect the fuel meat temperature increase. To improve the corrosion-resistant property of cladding surface efforts such as coating the cladding surface or using more corrosion-resistant aluminum alloy are required.

1. 서론

핵비확산 정책의 일환으로 고성능 연구로의 핵연료의 농축도를 저농축으로 낮추고자 RERTR program은 U-Mo분산 저농축우라늄 고밀도(8.0 g-U/cc 이상) 핵연료 개발을 1996년부터 세계적으로 추진하여 왔다[1]. 제 1차 후보재료별로 ATR에서 낮은 출력으로 노내조사시험한 결과는 U-Mo 분산핵연료가 안정한 거동을 보여 우라늄 고밀도 후보재료로 선정되었다. Mo함량을 6 10 wt.% 범위에서 여러 U-Mo입자를 우라늄 밀도 8 g-U/cc까지 분산 시킨 핵연료를 고출력 조건에서 노내조사시험한 결과 Mo함량이 7wt.%이상에서는 안정한 거동을 나타내어 핵연료로 사용가능한 것으로 평가되었다. KAERI에서 개발한 원심분무 핵연료분말 제조기술로 시제조한 구형의 U-Mo입자 분산핵연료는 기존의 파쇄방법으로 제조한 비정형의 U-Mo핵연료보다 노내조사시험한 결과에서 우수함을 나타냈다[2][3].

미국의 사용후 연구로핵연료에 대한 환수정책이 2006년 종료됨에 따라 사용후 핵연료 처분방법이 재처리 처분 방법으로 정책을 변경되었다. 기존의 uranium silicide핵연료는 재처리가 어려운 반면에 U-Mo핵연료는 재처리가 쉽다[4]. 따라서 RERTR program은 기존의 uranium silicide 핵연료를 재처리 가능한 U-Mo핵연료로 대체하고자 U-Mo분산핵연료 실용화를 1999년부터 추진하게 되었다[5]. 실용화 대상은 U-7wt.%Mo분산물질로 우라늄 밀도 6 g/cc를 목표로 하였다. 미국의 ANL은 긴급히 2000년 1월에 workshop을 개최하여 실용화 인허가에 필요한 핵연료의 특성 또는 성능시험 항목을 도출하였다. 미국은 한국원자력(연)에서 공급한 원심분무 U-Mo분말과 카나다 AECL에서 제조한 파쇄 U-Mo 분말을 사용하여 우라늄 밀도를 6과 8 g-U/cc로 제조한 축소형 판상핵연료를 ATR원자로에서 2000년 8월부터 조사시험에 착수하여 연소도를 50 at.%와 80 at.%로 노내조사시험을 수행하였고, 50 at.%로 연소시킨 후 핵연료를 관찰하여 2002년 RRFM 회의에서 발표하였다[6]. 실용화를 위한 실증노내조사시험을 하고자 한국원자력(연)이 공급한 원심분무 핵연료분말과 카나다 AECL에서 공급한 파쇄 U-Mo분말을 사용하여 BWXT에서 각 -2- set의 핵연료를 제조하여 네델란드의 HFR-Petten 연구시험로에서 할 예정이다[7].

프랑스는 신규 건설하는 Jules Horowitz 연구용원자로에 U-Mo핵연료를 사용하기 위하여 서둘러 개발을 추진하고 있다. 20%와 35% 농축 우라늄으로 기존 핵연료 제조공법인 파쇄방법으로 핵연료를 제조하여 OSIRIS에서는 20% 농축 핵연료를 저출력으로 노내조사시험을 성공적으로 하였으나 비교적 고출력으로 HFR에서 수행한 노내조사시험은 35% 농축 U-Mo 핵연료에서 failure가 발생되었다[8]. 카나다는 chipping and pulverizing기술로 U-Mo봉상핵연료 성공적으로 제조하여 2000년 9월말 경에 NRU에 장전하여 145 kW/m로 조사시험을 하던 중 failure발생하여 11월 초에 인출한 바 있다.

우리나라에서는 uranium silicide (U_3Si) 핵연료인 하나로 핵연료를 우라늄 고밀도의 U-Mo분산 봉상 핵연료로 대체하여 원자로의 성능을 향상시키고 사용후 핵연료에 대한 처분을 다변화 시키기 위해 U-Mo분산 봉형 핵연료 개발을 원자력 중장기 연구사업으로 추진하게 되었다[9]. 2000년부터 U-Mo분산 봉상 핵연료를 시제조하여 2001년 6월 26일에 하나로에 장전하여 노내조사시험을 착수하였으나 8월 중순부터 핵연료가 손상되는 징후가 나타나기 시작하였고, 8월 27일에는 노내조사시험 핵연료를 하나로에서 인출하였다. 손상된 핵연료봉을 출력별로 절단하고 단면을 관찰하여 RRFM 2002 meeting에서 결과를 발표하였다[10].

본 논문에서는 여러 국가에서 U-Mo핵연료에 대한 노내조사시험을 하고 발표한 내용에서 U-Mo의 주요 연소 거동 특성 및 failure 원인과 문제점을 분석 규명하고 이에 대한 해결방안을 고찰하였다. 하나로의 노심 성능 향상과 우라늄 밀도를 높여 조사공을 추가로 확보할 수 있는 U-Mo분산봉상핵연료의 개발방향을 모색하여 보았

다.

2. U-Mo 핵연료 노내조사시험 중에 Failure 발생

한국원자력(연)에서 노내조사시험 중에 failure가 발생한 U-Mo분산봉상핵연료는 출력이 가장 높게 형성된 핵연료로 우라늄 밀도가 6.0 g-U/cc 되도록 U-9.0 wt.% Mo분말을 aluminum 기지에 33 Vol.% 분산시킨 직경이 5.49 ㎜인 봉상핵연료이다. 손상된 핵연료 봉을 출력별로 절단하여 단면을 그림 1과 같이 관찰되었다. 출력이 높고 손상이 심한 부분의 단면에서 중심부에는 열전도도가 양호한 aluminum 기지물질은 분산 핵연료입자와 완전히 반응되어 소진되었고, 큰 void가 형성되어 있음을 나타냈다.

출력이 낮은 상부 단면은 aluminum 기지물질이 핵연료 입자와 약간 상호반응됨을 보였다. 피복재가 내부 상호 반응에 의한 부피 증가로 압력이 발생된 것으로 보여지며 압력은 피복재를 원주 방향으로 인장시키는 힘을 주게 되었으며 피복재는 파단되는 현상을 나타냈다. 그러나 파단 mode는 ductile rupture보다는 피복 압출시에 서로 다른 방향에서 압출 성형되어 맞닿아 bonding되는 부위가 취약하여 떨어진 현상처럼 나타났다.

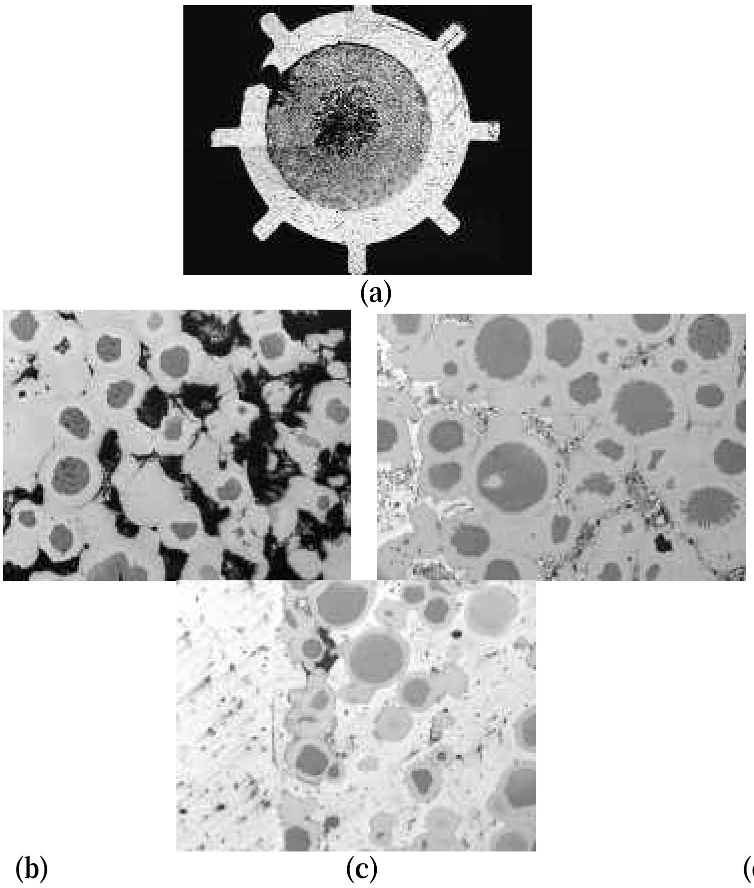


Figure 1. 손상 핵연료봉의 고출력 위치 절단 단면 사진; (a) 전 단면 저배율 사진, (b) 중앙부, (c) 중간부분, (d) 주변 부분

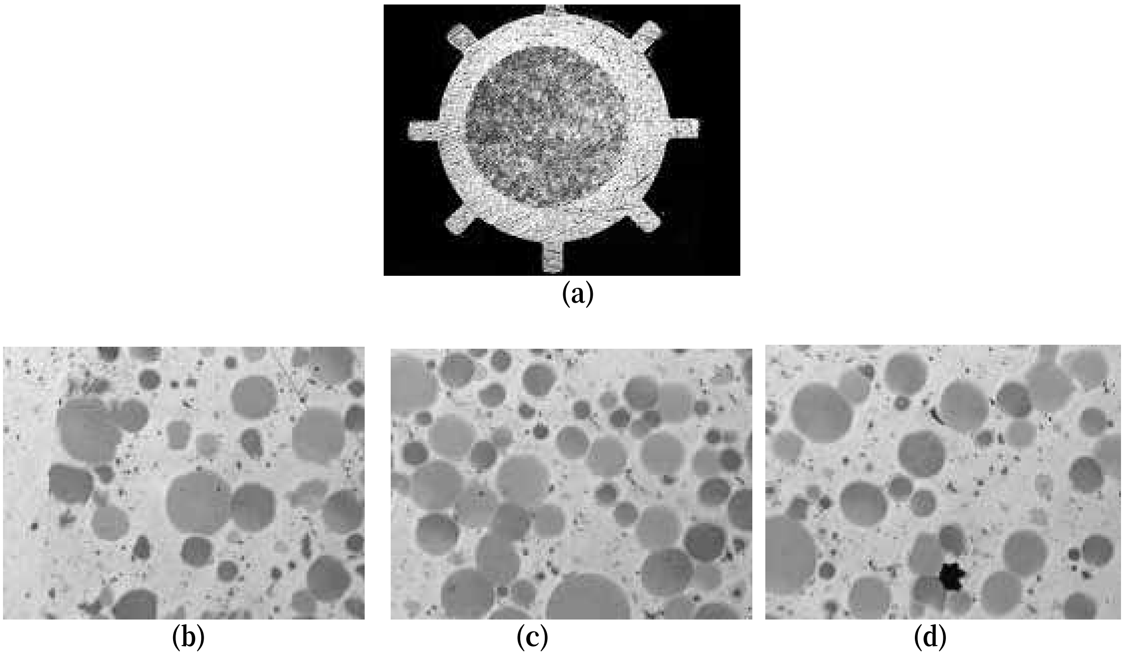


Figure 2. 손상 핵연료봉의 고출력 위치 절단 단면 사진; (a) 전 단면 저배율 사진, (b) 중앙부, (c) 중간부분, (d) 주변 부분

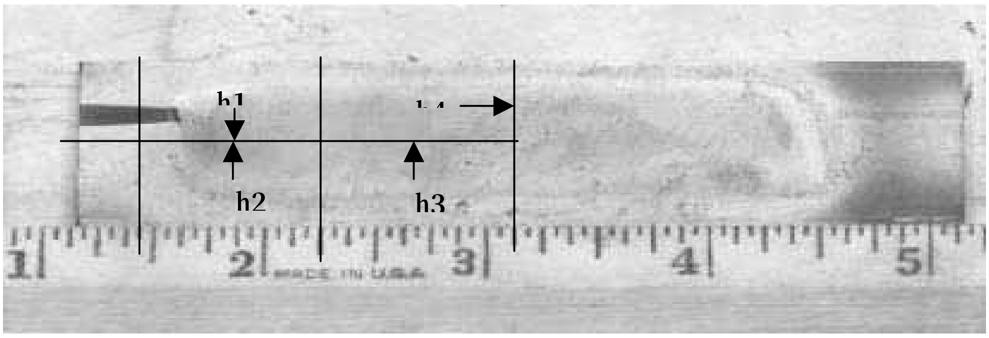
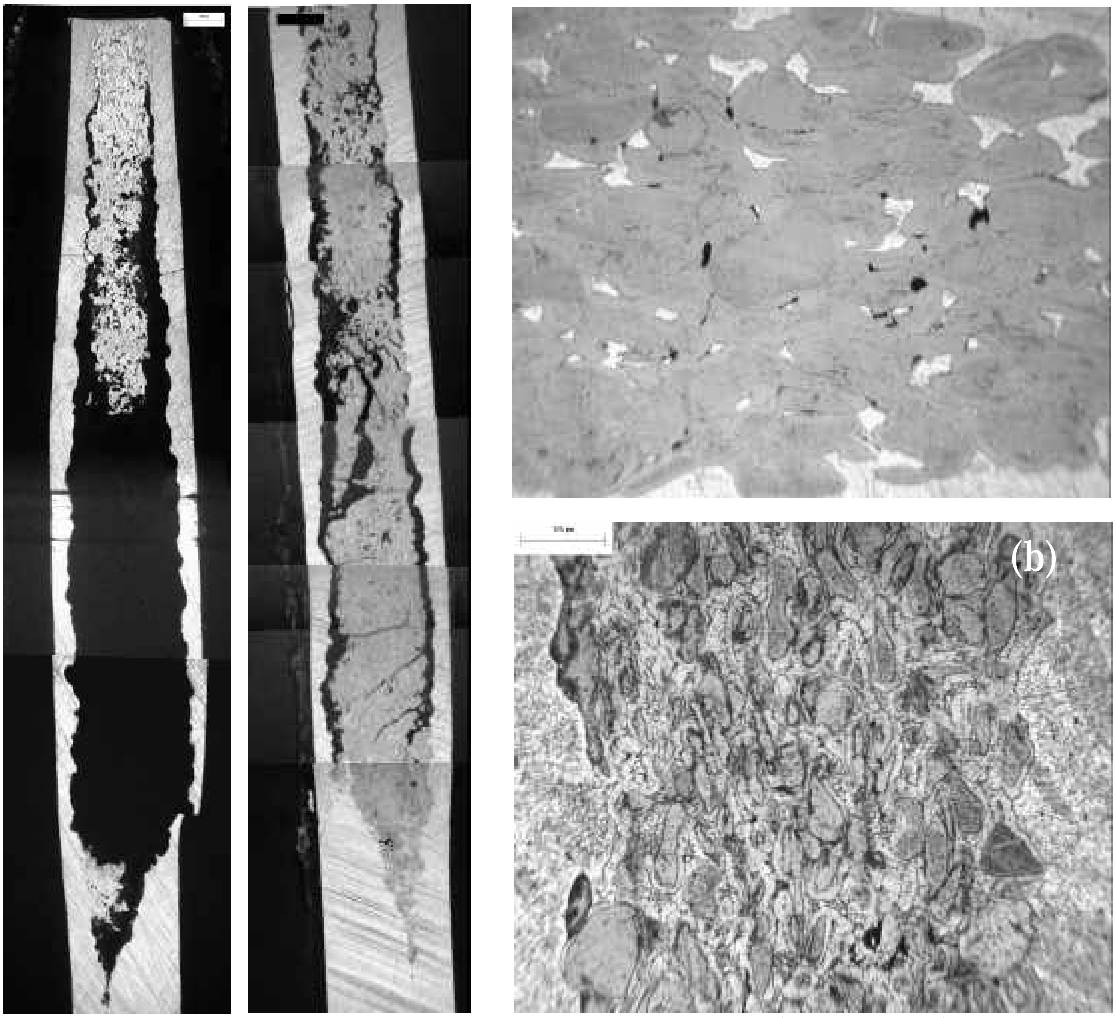


Figure 3. 손상 핵연료 절단 위치

Aluminum과 U-Mo핵연료 입자와의 반응은 온도가 증가 할수록 기하급수적으로 증가되는 것으로 알려져 있듯이 출력이 큰 부분에서 상승된 온도로 인하여 aluminum 기지물질과 U-Mo핵연료와 반응이 빨라진 것으로 생각된다. 특히 반응물 (U-Mo)Al_4는 열전도도가 약 6 W cm^{-1} K^{-1}로 기지 물질 Al(~6 W cm^{-1} K^{-1})보다 30배 이상 낮다. 노내조사 시작 후 상호반응물이 생성되면 열전도도는 떨어지면서 열도도 떨어진 만큼 중심 온도는 상승시키는 악 순환 현상이 발생된다. 한국원자력(연)의 U-Mo분산봉상핵연료의 failure는 기지물질 aluminum이 핵연료 U-Mo입자와 반응에 의한 심한 부피팽창이 주 원인인 것으로 생각된다. 피복재 동심압출 공정에서 결합이 잘되도록 공정 개선을 하면 failure발생 시기를 지연시킬 수 있을 것으로 생각된다.

미국은 카나다 AECL에서 제조한 U-Mo분말을 사용하여 제조한 축소 판상 핵연료(Q8003I)에서 failure가 발생되었다. 8월 19일 조사시험시작 후 10일만에 냉각수와

stack에서 activity 증가됨이 감지되었으나 약 2 주후 activity는 정상으로 회복되었고 추후 activity 증가하는 현상 없이 조사시험을 106일 동안 계속하였다. 손상 핵연료를 그림 3과 같이 절단하여 그림 4와 같이 관찰되었다. 카나다 AECL의 기계 가공방법으로 제조한 U-Mo분말은 비정형이어서 압연 성형이 불량하였다고 하며 dog bone 현상의 발생으로 두께가 50 - 75 ㎛ (정상적인 두께 380 ㎛보다 1/5 이하임) 정도로 얇게 형성된 피복재가 내부의 보다 두꺼운 핵연료 심재에서 보다 많이 발생되는 열로 인하여 손상된 것으로 추정하였다.



h1 h2 h3(상) h4(하)

Figure 4. 손상 핵연료 절단 단면 사진

핵연료 피복판 손상은 핵연료 끝부분에서 발생되었고, 손상부분을 통하여 핵연료 심재 물질이 냉각수에 용출되어 빠져나가고 빈 공간으로 남아 있는 현상이 발생되었다. 빈 공간은 손상부위에서 약 7.3 ㎜까지 진전되었다. 또한 핵연료 심재와 피복재 사이에 gap이 형성됨을 보였다.

프랑스는 35% 농축 우라늄으로 제조한 핵연료에서 그림 5과 같이 failure가 발생되었는데 표면출력은 약 240 W/cm^2 이었다. 미국의 RERTR-5 시험에서 고출력시의

표면 출력 값인 167 W/cm^{2}보다 훨씬 높은 값이다. 따라서 핵연료 심재의 온도는 물론 상승되어 계산된 피복재의 온도는 150-170 °C로 컸으며 피복재가 손상된 이유를 온도 상승 현상으로 추정하였다[11].

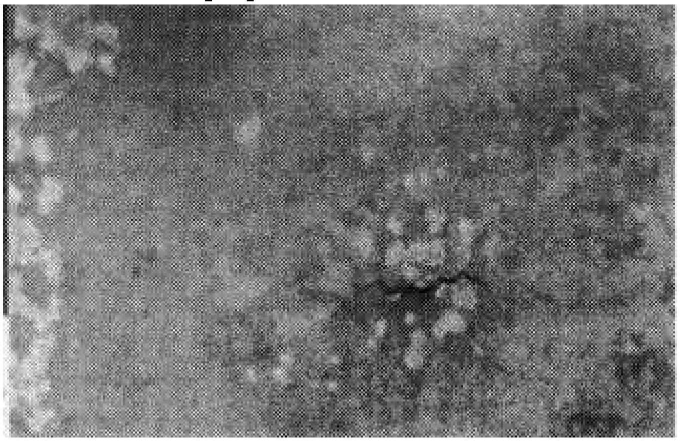


Figure 5. 프랑스 CERCA가 HFR에서 노내조사시험 중에 failure가 발생한 핵연료 표면 사진

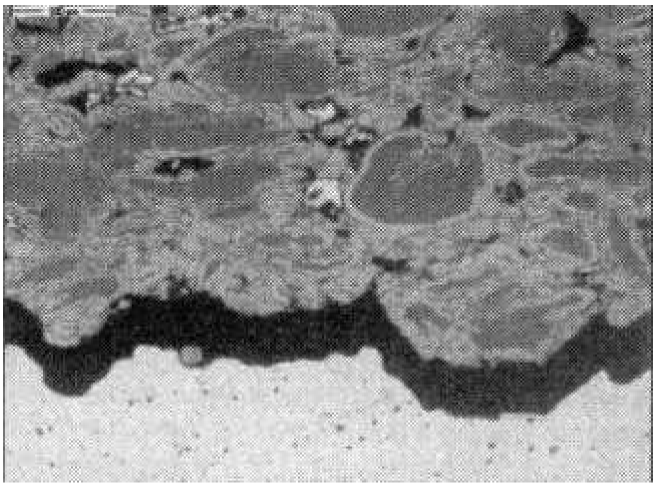


Figure 6. 프랑스 CERCA가 HFR에서 노내조사시험 중에 failure가 발생한 핵연료 단면 사진

손상 핵연료 표면에 냉각수와 반응하여 형성된 bohemite 층의 두께가 약 80 ㎛ 정도로 측정되었다. 이러한 피막 형성은 핵연료 온도를 약 80 °C 정도 상승시켜 주는 것으로 계산되었다.

3. U-Mo 핵연료의 주요 연소 거동 및 특성

미국 ANL은 RERTR-5 조사시험 핵연료에 대하여 조사후 시험평가(PIE)를 한 결과에서 핵연료 팽윤은 U-Mo 분말 입자 부피분율 증가 즉 우라늄 밀도가 클수록 크게 증가하는 경향을 그림 6과 같이 나타냈다. U-Mo입자 부피분율이 크면 aluminum 기지와 핵연료입자사이의 계면, 비표면적이 넓어져 상호반응이 많아지기 때문인 것으로 생각된다.

팽윤은 제조 중에 형성된 기공(porosity)이 완충 역할을 하는 것으로 보였다. 캐나다 AECL에서 기계가공 파쇄 방법으로 제조한 핵연료분말을 사용한 핵연료 심재는 기공(porosity)가 약 4~8 %인 반면 한국 원자력(연)에서 제조한 원심분무 구형 핵연료분말을 사용한 핵연료심재는 기공(porosity)가 0-2 %로 작다. 파쇄 분말 핵연료는 제조중에 형성된 기공이 완충 역할을 하여 그림 6과 같이 전체적인 팽윤이 파쇄 핵연료가 작은 것으로 보였다.

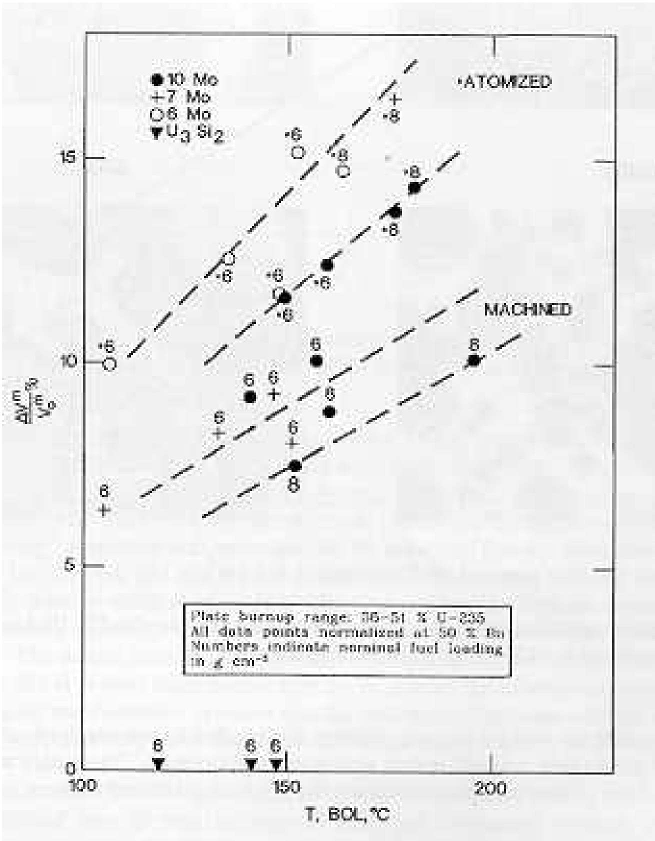
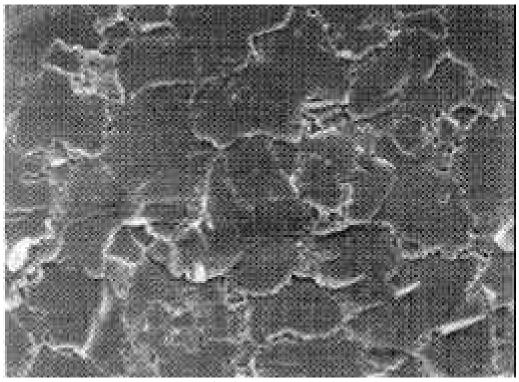
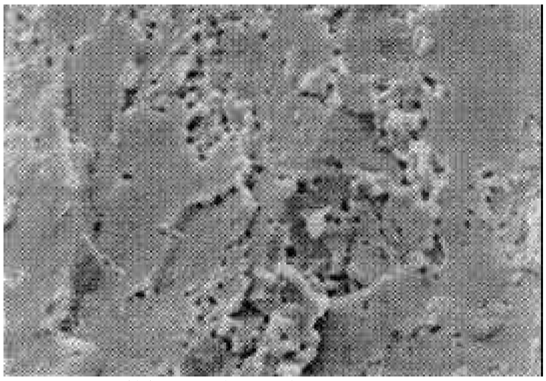


Figure 6. 미국 RERTR-5 조사시험 핵연료별 팽윤 결과

핵연료 재료의 Mo함량이 많을수록 핵연료의 안정성이 다소 우수한 것으로 보였다. 그림 6에서 보면 파쇄 핵연료는 뚜렷한 차이는 없으나, 원심분무 구형분말 핵연료에서는 Mo함량 10 wt.%와 6, 7 wt.%는 확연한 차이 있음을 나타냈다. Mo함량이 많을수록 감마상 안정성이 높으며 기지물질 aluminum과의 반응속도가 느려지기 때문인 것으로 생각된다.

U-Mo 핵연료 입자내의 핵분열 가스 bubble에 의한 팽윤은 거의 무시할 정도로 작은 것으로 관찰되었다. 연소도가 약 32.5% 계산된 RERTR-5의 핵연료입자 단면을 그림 7에서 보면 핵연료 생성 가스 bubble들이 결정립 계면에서만 매우 미세하게 생성되는 것으로 나타냈다. 이러한 sub-micron 크기의 bubble에 의하여 부피팽창은 거의 무시할 정도도 작다. RERTR-1,2,3조사시험결과와 같이 원심분무 핵연료 입자에서 핵연료 가스 bubble의 크기 작고 분포 bubble수도 더 적은 것으로 관찰되었다. 따라서 원심분무 핵연료가 파쇄 분말 핵연료보다 더 안정한 거동을 하는 것으로 평가된다.





(a) Atomized U-Mo (b) Machined U-Mo

Figure 7. RERTR-5 조사시험 후 핵연료입자 파단면 사진

U-Mo분산핵연료의 팽윤의 주 원인은 기지 물질 aluminum과 핵연료 U-Mo와의 상호반응에 이므로 핵연료입자가 클수록 비표면적이 크기 때문에 유리하다. 카나다에서 제조한 파쇄 U-Mo핵연료분말 입도분포는 표 1과 같이 원심분무 핵연료분말 입도분포가 휠씬 크다. RERTR-5 조사시험 결과에서 원심분무 핵연료보다 파쇄 핵연료 핵연료가 외형적으로 팽윤이 적게 발생하는 결과를 초래하게 되었다.

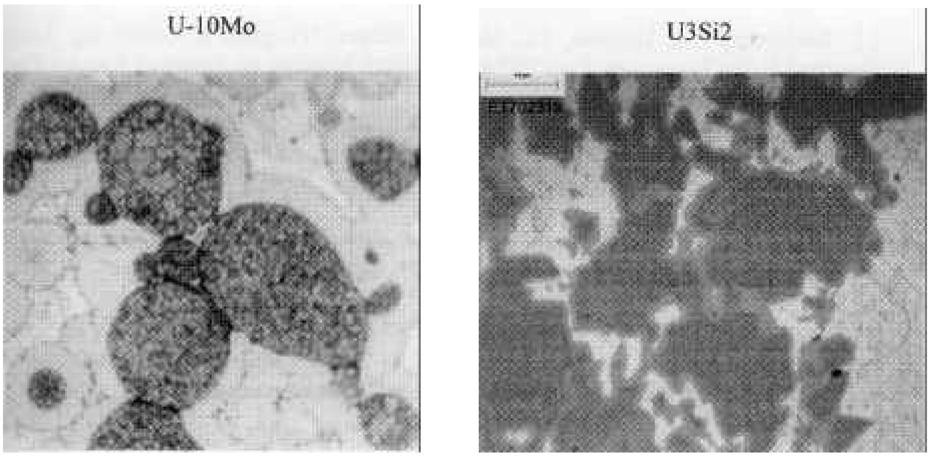
U_3Si_2보다 기지물질 aluminum과 반응이 더 쉽게 즉 더 빨리 진행되는 것으로 밝혀졌다. 그림 8에서 보면 U_3Si_2분산 핵연료는 U-Mo핵연료 보다 기지물질과 핵연료입자와의 반응이 휠씬 적게 반응됨을 보여주고 있다. U-Mo 분산핵연료의 상호반응물질은 (U-10Mo)Al4.4로 U 원자 당 Al원자 4.4 개가 결합되지만 U_3Si_2분산핵연료는 반응물이 $U(Al0.75, Si0.25)_3$ 물질이므로 U 원자 당 Al원자 2.25 개가 반응되는 관계에서 U-Mo분산핵연료에서 기지에서 더 많은 Al 물질이 핵연료 입자로 확산 이동해가는 현상이 발생될 것으로 추정된다.

Table 1. RERTR-5에서 사용된 핵연료분말 입도 비교

Sieve size range (mesh)	Particle size range (μm)	Weight Fraction(%)	
		AECL	KAERI
+100	>150	0.05	0
-100+140	106-150	36.64	2.58
-140+200	75-106	32.59	24.45
-200+230	63-75	14.01	17.65
-230+325	45-63	16.61	24.48
-325	< 45	0.11	29.99

ANL에서는 팽윤을 연소도에 대하여 계산하여 본 결과 U_3Si_2분산핵연료의 팽윤은 0.25 %/ at.% of U^{235} burnup이지만 U-Mo핵연료는 0.5 %/ at.% of U^{235} burnup로 매우 높았다. 또한 상호 반응속도도 U-Mo분산핵연료 물질이 더 빠르며 생성된 물질

은 열전도도가 6 W/cm/K로 매우 낮아 중심부 온도 증가와 온도 증가로 반응속도 증가되는 증폭현상으로 핵연료는 failure 발생 단계로 진행될 수 있다.



(a) U-Mo (b) U3Si2

Figure 8. 핵연료 물질별 기지물질 Al과 핵연료 입자와 상호반응 비교

4. U-Mo 핵연료의 주요 문제점에 대한 해결 방안

U-Mo분산핵연료의 장점은 uranium밀도가 15.5 g-U/cc로 높지만 기지물질 aluminum과 반응이 온도에 민감하게 잘 일어나는 것이 문제점이다. 특히 직경 6.35 mm인 하나로 핵연료와 같은 봉상 핵연료는 판상 핵연료 심재 두께 약 0.6 mm보다 열확산 길이가 길어 중심온도가 상대적으로 매우 높다. 미국 ANL의 핵연료 전문가 Dr. Hofman은 RRFM2002 meeting에서 U-Mo 분산 봉상 핵연료에 대하여 Uranium 밀도를 6.0 g-U/cc로 가정하고 핵연료 심재의 직경을 5.0 mm로 가정하여 연소도에 따라 핵연료심부의 온도를 계산하여 그림 9 와 같이 발표를 하였다. 직경이 크고 출력이 높은 조건에서 핵연료 심부의 온도는 급격히 높게 상승함을 나타냈다. 초기 온도에 영향이 있으며 초기 온도가 200 ℃ 미만일 경우 대체로 안정성이 유지됨을 보였다. 판상 핵연료와 같은 얇은 조건과 유사한 봉상 핵연료에서는 핵연료 심부 온도 변화가 거의 없음을 나타냈다. 초기 온도가 높은 조건에서 연소도에 따라 급상승하는 원인은 그림 10에서 보여주는 바와 같이 기지 물질 Al과 U-Mo 핵연료 입자와의 반응이 빠르게 진행되면서 열전도도가 극히 나쁜 반응층이 열전도도를 저하시키면서 심부 온도를 더욱 높여주는 증폭 작용인 그 원인으로 생각된다. 직경이 작을수록 열전도도 저하가 둔화 됨을 볼 수 있다.

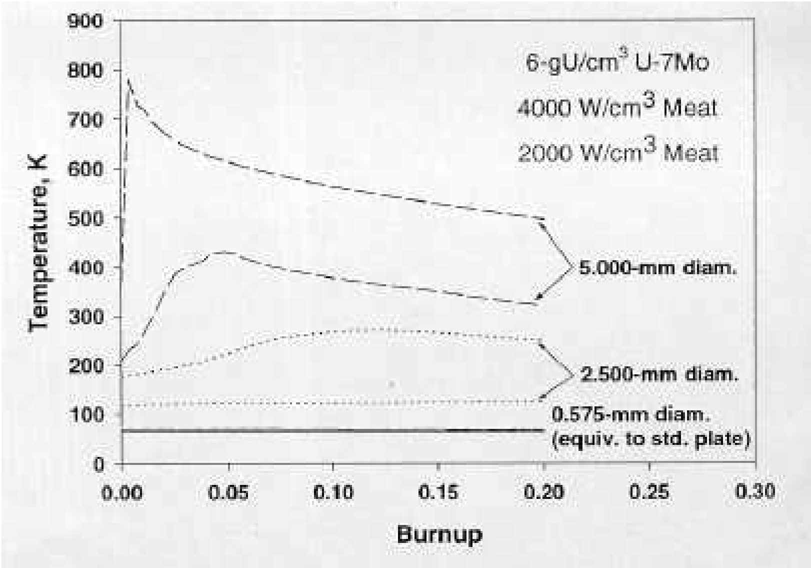


Figure 9. U-Mo 분산 봉상 핵연료에서 6 g-U/cc밀도의 여러 직경 및 출력별로 핵연료 심부 온도를 연소도에 대하여 미국 ANL에서 계산한 결과

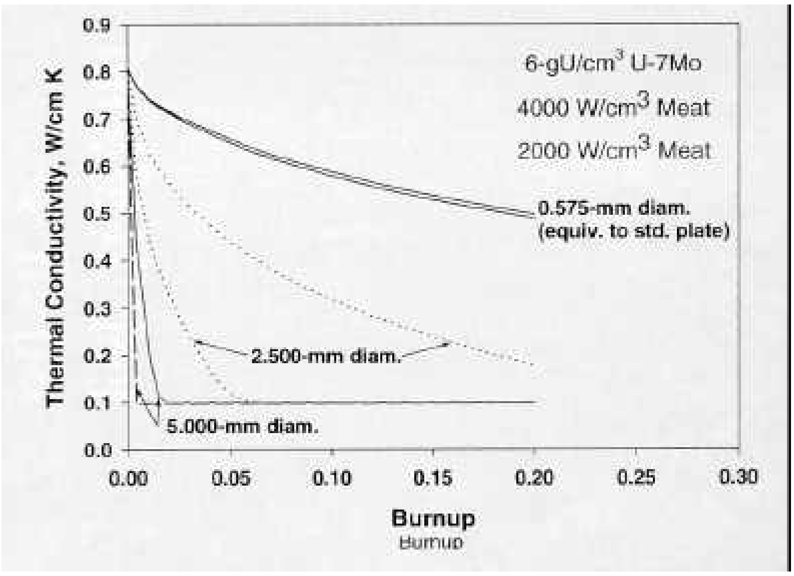


Figure 10. U-Mo 분산 봉상 핵연료에서 6 g-U/cc밀도의 여러 직경 및 출력별로 핵연료 심재 열전도도를 연소도에 대하여 미국 ANL에서 계산한 결과

U-Mo분산 핵연료의 우수한 노내거동은 핵연료 입자내에 핵분열 생성 가스 bubble이 크게 성장 되지 않고 안정하게 유지되는 거동이다. 따라서 U-Mo물질을 입자 형태로 비표면적을 크게 하는 형태로 분산 시키지 않고 U-Mo 순수 물질을 얇은 박막을 aluminum 기지에 복합물질 형태로 제조하여 박막 형태의 U-Mo물질 내에 온도를 낮게 유지하면 노내 연소 안정성을 유지 하면서 U-Mo순수 물질 사용으로 uranium density가 높은 핵연료일 것으로 생각된다. 미국 ANL에서는 U-Mo박막을 aluminum으로 피복하여 RERTR-5 노내조사시험에 포함하여 시험한 결과 피복 물질 aluminum과 U-Mo박판 계면에서 상호 반응이 거의 일어나지 않았고 U-Mo 박판 내부

에도 핵분열 생성 가스 bubble이 형성되지 않았다. 하나로 핵연료와 같은 봉상 핵연료는 얇은 U-Mo tube를 aluminum 물질로 피복한 형태를 생각 할 수 있다.

U-Mo 분산 핵연료 사용으로 uranium 밀도를 높이면 출력이 상승함에 따라 핵연료 표면 온도가 상승될 경우가 발생 할 것이다. 프랑스의 고농축 U-Mo 핵연료 노내조사시험에서 약 목표 연소도의 1/5 정도 연소한 조건에서 핵연료 피복재 표면에 bohemite가 약 80 μm까지 형성함을 나타냈다. 따라서 출력 상승에 따른 aluminum 표면의 열전도도를 저해하는 bohemite 형성을 방지하는 방안이 필요하다. Aluminum에 합금 원소를 첨가하거나 표면개질 방법으로 bohemite 형성을 억제하는 방안이 필요하다.

5. 결론

고성능 연구로의 저농축 핵연료 및 기존 uranium silicide핵연료를 대체하기 위하여 U-Mo분산 핵연료를 시제조하여 미국, 프랑스, 카나다, 한국에서 노내조사시험을 하는 중에 모두 failure가 발생하였다. 조사후 시험평가를 한 결과 기지물질 aluminum이 핵여료 입자와 온도에 민감하게 반응이 되는 것이 가장 큰 문제로 밝혀졌다. 판상 핵연료에서는 얇아서 열확산 거리가 짧아 중간 uranium 밀도 핵연료는 사용 가능한 것으로 평가되나 고출력의 고밀도 판상 핵연료는 만족스럽지 못하다. 특히 봉상 핵연료는 열확산 거리가 길어서 중심온도 상승이 문제된다. 그러나 순수 U-Mo핵연료 물질은 안정한 거동을 갖는 특성이 있으므로 U-Mo사용이 바람직 할 것으로 생각된다.

또 하나의 문제점은 출력이 높아질 경우 핵연료 피복 표면에 과다한 bohemite가 형성되는 문제다. 핵연료 피복재료 aluminum에 합금 원소 첨가 또는 표면개질방법으로 상기 물질 형성을 억제하는 방안이 필요하다.

6. 참고문헌

1. James L. Snelgrove, "Development of Very-High-Density Fuels by the RERTR Program," The Proceedings of the International RERTR 10th Meeting, Seoul, Korea, 1996
2. M.K. Meyer, "Irradiation Behavior of Uranium-Molybdenium Dispersion Fuel: Fuel Performance Data from RERTR-1 and RERTR-2," The Proceedings of the International RERTR 22th Meeting, Budapest, 1999
3. K.H. Kim, C.K. Kim, “Stable in-reactor performance of centifugally atomized U-10wt.%Mo dispersion fuel at low temperature,” Journal of Korean Nuclear Society Korea, 2001
4. A. Gay, M. Belieres in COGEMA, "Reprocessing ability of high density fuels for research and test reactors", The proceedings of the 20th RERTR meeting, Jackson Hole USA, 1997
5. A. Travelli, "Progresses of the RERTR Program in 1999," The Proceedings of the International RERTR 22th Meeting, Budapest, 1999
6. G.L. Hofman, “Progress in Development of Low-enriched U-Mo Dispersion Fuels,” The Proceedings of the RRFM 2002, Belgium
7. A. Travelli, "Progresses of the RERTR Program in 2001," The Proceedings of the RRFM 2002 Meeting, Belgium, 2002
8. A. Languille, “Experimental Irradiation of U-Mo Fuel,” The Proceedings of the RRFM 2002 Meeting, Belgium, 2002
9. 김 창규, “연구로용 개량 핵연료 개발 현황, 재료마당, 2000
10. C.K. Kim, “Status of the Qualification Program for Atomized U-Mo dispersion rod fuel in Korea,” The Proceedings of the RRFM 2002 Meeting, Belgium, 2002
11. H. Vacelet, "Development program for U-Mo fuel: Staus as of October 2000" The Proceedings of the 2000 International RERTR Meeting, Budapest, ANL

감사의 글

본 결과는 과학기술부의 원자력연구개발 중장기계획사업의 일환으로 연구로용개량핵연료개발 과제에서 수행한 것으로 지원에 대하여 감사드립니다.