“2000 춘계학술발표대회 논문집
한국원자력학회

손상핵연료 데이터베이스 구축 및 수소화 손상 특성 분석

Development of Failed Fuel Database and Hydriding Failure Analysis

이명찬, 안용수, 황태원, 김경덕
한국전력공사 원자력환경기술원
대전시 유성구 덕진동 150

김용수, 양용식
한양대학교 원자력공학과
서울시 성동구 행당동 17

요 약

핵연료의 손상은 원전의 출력저하 및 정지에 따른 경제성 감소와 안전성의 문제를 야기시켜 원전 운전에 중요한 요인으로 작용하고 있다. 우리나라의 경우 20여 년간의 원전 운전 경험 중 발생한 핵연료의 손상은 공급회사의 다양성으로 인해 각 핵연료의 설계/제작상의 차이, 여러 종류의 형태 및 재질등을 갖고 있어 손상의 근본 원인을 파악하는 것이 쉽지 않은 데다 열악한 국내연구환경으로 손상 원인 규명 등의 연구는 거의 수행되지 않고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 국내 핵연료 손상에 관한 자료를 축적하고 손상 핵연료에 대한 빠른 대책 마련과 현재 국가적으로 수행되고 있는 고성능 핵연료의 개발 연구를 지원하기 위해 최근 손상이 발생한 B원전 7주기 연료 손상 자료를 포함한 손상 핵연료 종합데이터베이스를 구축함과 동시에 데이터베이스 활용의 한 예로써 최근의 장주기·고연소도 핵연료에서 그 중요성이 다시 부각되고 있는 이차 수소화 손상에 대한 특성 분석을 수행하였다.

Abstract

Nuclear fuel failure is one of the critical issues in the nuclear power operation since it brings about the reduced power operation and the potential threat to safe operation.

Since 1979 nuclear power plants have been operating in Korea and experiencing a variety of PWR nuclear fuels designed and manufactured by several fuel vendors, foreign or domestic.

In this study, PC-based a database for failed nuclear fuel, called Korea Nuclear Fuel Database (KNFDB), is developed using relational database system. KNFDB contains a number of detailed information on the fuel failures that had occurred since 1986 in Korean nuclear power plants: nuclear design, fuel design, power history, coolant activity data, visual inspection, etc. It will provide the statistical basis for R&D of high performance fuel and expertise for preparation for the remedy of damaged fuel on site.

As an example of the applications, hydriding failure case is chosen for the analysis in the KNFDB. In this analysis it is found that hydriding failures have certain characteristics and the properties in the post-defective fuel deviates from the intact fuels.

1. 서 론

핵연료의 손상은 원전의 이용률을 감소시켜 경제적인 손실을 가져오며 원전의 안전성 측면에서도 중대한 영향을 끼치게 되므로 원전에 사용되는 핵연료는 운전 중 설계된 열적/기계적 성능을 유지하여야만 한다. 핵연료의 손상이 미미한 경우에는 원전의 운전 및 유지에 큰 영향을 끼치지 않는 경우도 있지만 핵연료 손상이 심각하게 발생한 원전의 경우 상당한 이용률의 감소가 따르게 된다. 국내에서도 고리 1호기 이후 약 20여년의 원전 운영 경험 중에 다수의 핵연료 손상을 겪었으나 손상 원인 규명연구 미흡 및 손상 메카니즘에 대한 인식 부족으로 원전 선진국과 같이 손상 핵연료 연구를 통한 핵연료 성능 개선 및 고성능 핵연료의 설계/제작에 대한 연구가 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 데이터의 효율적인 관리 및 데이터 검색의 신속성 측면에서 각광을 받아온 관계형 데이터베이스를 기반으로 하여 1986년 이후 발생한 PWR형 핵연료 손상에 대한 데이터베이스를 구축하여 선진국과 같은 연구에 활용할 수 있도록 하였으며 구축된 데이터베이스 활용의 한 예로써 최근의 장주기·고연소도 환경하에서 중요한 핵연료 손상 원인으로 다시 부각되고 있는 수소화 손상에 대한 특성 파악 및 중요 인자들에 대한 분석을 수행하였다.

2. KNFDB(Korea Nuclear Fuel DataBase)의 구축

가. KNFDB의 구조

데이터베이스란 서로 연관성을 가지는 데이터들의 집합체로서 편리하고 효율적으로 데이터를 활용할 수 있도록 체계화한 것이라 할 수 있다.

이러한 데이터베이스는 크게 계층형(hierarchical), 망형(network), 관계형(relational) 모델들로 분류할 수 있는데 이들 중 1980년 이후 현재까지 가장 널리 쓰이는 관계형 데이터 모델은 계층형 모델과 망형 모델의 장점을 채택한 것으로서 데이터의 효율적인 관리 및 데이터 활용의 신속성등 많은 장점을 지니고 있다. 이 관계형 데이터베이스는 개체와 관계 및 각 개체의 속성을 테이블화하여 수록함으로써 이러한 테이블들의 수학적 조합을 통하여 원하는 정보를 검색하는 기능을 가지고 있다.

이 연구를 통해 개발된 KNFDB도 이러한 PC용으로 개발된 관계형 데이터베이스를 그 기본구조로 하고 있다. 핵연료의 손상은 핵연료의 설계/제작적인 측면 뿐 만이 아니라 손상이 발생한 주기의 운전 이력 및 노심 설계등에 연관된 종합적인 문제이므로 KNFDB는 원전 운영에 대한 자료는 물론 운전 주기의 운전 자료, 사용된 핵연료에 대한 설계/제작자료, 그리고 손상이 발생한 주기에 대해서는 손상에 관련된 정보를 함께 제공할 수 있도록 세 영역으로 나누어 개발하였다(그림 1).

첫 번째 영역은 주기중 운전 이력과 핵설계 자료에 대한 정보를 수록하기 위해 구축된 NDR(Nuclear Design Report) 영역으로서 86년 이후 운전된 전 원전에 대한 자료를 수록하였다. NDR영역을 통해서는 각 주기의 핵설계 자료, 노심 배치, 영역(region) 정보, 축 방향 출력 분포 등에 관한 정보를 조회할 수 있다.

두 번째 영역은 손상 영역으로서 손상이 발생한 집합체와 연료봉을 원전 호기수와 주기별로 분류하여 수록하였으며 각 연료봉에 대한 연소도, 손상 인접 그리드 번호, 손상 연료봉의 집합체내 위치, 손상 집합체의 노심내 위치, 손상시기, 후속 조치 사항, 손상 원인 등에 관한 자료는 물론 손상 발생 주기 중 일차 냉각수내 방사능 준위 및 손상 연료봉 육안 검사 자료를 수록하였다.

세 번째 영역은 핵연료 영역으로서 각 원전에서 사용된 핵연료를 형태/설계자/제작자로 별로 총 14개의 핵연료로 분류하였다. 분류된 핵연료에 대한 정보는 핵연료 펠렛, 연료봉, 피복관, 그리드, 집합체로 세분하여 각각 수록하였으며 세분된 핵연료 정보에 대한 설계/제작 자료를 사진과 도면 등의 자료와 함께 수록하였다.

그림 2는 KNFDB의 E-R (Entity-Relation) diagram으로서 각 영역에 속해 있는 속성 및 개체들과 각 개체들간의 연관관계를 쉽게 파악할 수 있다. 그림 2에 나타나 있는 바와 같이 각 영역은 다른 영역과 연관성을 가지고 있으므로 앞에서 언급한 관계형 데이터베이스의 특성상 연결되

어 있지 않은 다른 영역으로부터도 쉽게 접근할 수 있다.

구축된 KNFDB는 GUI(Graphic User Interface) 환경으로 사용자 환경을 구성함으로서 데이터베이스에 대한 이해가 부족한 사용자도 편리하게 사용할 수 있게 하였으며 그림 3(a)와 그림 3(b)에는 KNFDB의 메인화면 및 NDR 상의 loading pattern을 조회한 화면이 나타나 있다.

나. KNFDB의 보안

모든 데이터베이스는 각 사용자가 접근할 수 있는 정보의 영역에 제한을 두고 있다. 특히 KNFDB는 핵연료의 손상과 관련된 여러 가지 정보를 포함하고 있기 때문에 사용자의 권한을 일반 사용자 그룹, 손상 검색권한 사용자 그룹, 시스템 관리자 그룹의 세 그룹으로 분류하여 정보의 보안 및 데이터베이스의 유지에 효율성을 높였다.

여기서 정의되는 일반 사용자 그룹은 불특정 그룹이 아니라 데이터베이스에 접근이 허용된 원전연료와 관련된 업무에 종사하는 사람을 의미한다.

각 사용자들에 대한 사용권한 구분은 사용자의 ID와 password로서 하며, 상위 단계의 사용자 화면에 나타나는 데이터베이스 주요 메뉴들이 하위 단계의 사용자가 데이터베이스에 접근할 경우에는 나타나지 않게 함으로서 접근을 막을 수 있게 설계되어 있다.

3. 수소화 손상 특성 분석

앞에서 언급한 바와 같이 핵연료의 손상은 원전의 경제성과 안정성을 위협하는 중요한 원인이 되고 있으며 손상 원인 또한 다양한 양상을 지니고 있다. 최근 들어 핵연료 손상 빈도가 크게 줄어들고 있기는 하지만 최근의 추세인 장주기·고연소도 환경하에서도 핵연료의 손상율은 계속되고 있다 (표 1). 대부분의 손상은 그림 4와 같이 이물질이나 유체의 진동에 의한 그리드와 연료봉의 프레팅(fretting)이나 피복관의 수소화에 의한 손상으로 나타나 있다, 특히 수소화 손상은 피복관의 일차 수소화로 인한 핵연료 손상의 직접적인 원인이 되고, 일차 결함후 발생할 수 있는 이차 수소화로 인한 급격한 손상의 확산등은 세계 여러 원전 운전국에서 손상 사례가 자주 보고되고 있다[1].

이러한 수소화 손상이 최근 미국의 Oconee Unit 2나, 국내 B원전, A원전등에서 보고되고 있어 이러한 수소화 손상의 특성을 파악하기 위해 이차 수소화의 손상 기구 및 형태에 대한 고찰과 함께 KNFDB를 이용하여 국내에서 발생한 여러 손상중에서 A원전 1주기 초기노심에서 발생한 두 개의 연료봉과 B원전 7주기 평형노심에서 발생한 하나의 핵연료봉을 선택하여 각각의 노심 및 핵연료 설계자료를 비교 분석하고 손상 원인 규명을 위해 수행한 PIE(Post-Irradiation Examinations)분석 결과를 바탕으로 한 손상 특성 분석을 수행하였다.

가. 수소화 반응 기구

<u>일차 수소화</u> [2]

일차 수소화 반응은 주로 핵연료 펠렛내의 수분, 펠렛내부내 기공에 갇혀있던 수소, 연료봉 충진기체내의 불순물로 함유된 수소, 유기 오염물(organic contaminant)등의 방사화 분해 등에 의해 생성된 수소등에 의해 피복관 내면이 수소화 반응을 일으키는 것을 나타내며 핵연료 손상의 주요한 원인이 된다.

<u>이차 수소화 손상기구 및 형태</u>

일반적으로 일차적인 피복관 결함은 10^{-3} - 10^{-2} mm 정도에 불과한 pinhole이나 hairline crack이다. 전형적인 hairline crack의 길이는 5mm 정도이며 폭은 1 2μm이고 이러한 초기 결함은 pellet-cladding 상호작용 (PCI)이나 일차 수소화 반응에 의해 생성될 수도 있지만 50% 이상이

debris fretting과 같은 기계적인 요인에 의해 발생되는 것으로 보고되고 있다 [3].

이와 같이 발생된 매우 작은 크기의 일차결함은 이따금 커다란 이차 수소화 결함을 발생시킨다. 기존의 연구결과 이차 수소화 반응은 4단계로 진전되는 것으로 알려져 있다

첫 번째 단계는 결함의 개시단계로서 결함이 발생한 핵연료봉은 봉내의 압력과 외부의 압력차에 의해 냉각수가 유입되게 되며 유입된 냉각수는 고온의 핵연료 표면과 반응하여 수증기로 변화된다. 시간이 지남에 따라 봉내와 외부의 압력차는 떨어지게 되며 봉내의 핵분열생성물들이 외부로 유출되게 되고 이것으로 인해 핵연료봉의 결함을 판단할 수 있게 된다.

두 번째 단계는 수소화 반응 단계이다. 유입된 수증기는 지르칼로이 피복관 내면과 산화반응을 일으키면서 산소는 소모되고 수소는 핵연료봉내에 축적되게 되는데 앞에서 언급한 바와 같이 핵연료와 수증기의 반응, 수증기의 방사화분해에 의해서 생성된 수소등도 연료봉내의 수소 대 산소의 비가 임계치에 이르도록 기여하게 된다. 이렇게 증가된 수소가 산화막을 통하여 피복관 내부로 침투하게 되며 이때 산화막이 국부적으로 보호적인 성질을 잃거나 어떤 미세조직상 결함이 발생하면 이 부분을 통하여 대량수소침투가 발생하고 특히 피복관 내벽과 외벽의 온도차는 피복관 외면으로 이동한 수소가 수소화물로 석출될 수 있는 환경을 만들게 된다 (그림 5). 특히 반경방향으로 석출된 수소화물을 일반적으로 `sunburst`라고 하며 (그림 6) 이때 낮은 수소화물의 밀도로 인해 수소화물 부위는 팽창하며(14%증가) 이 'sunburst'가 피복관 외면까지 도달되면 균열의 생성으로 인해 핵연료봉 관통결함(through-wall defect)이 발생하게 된다. 한편 대량수소침투가 국부적으로 발생하지 않고 피복관 전체에 걸쳐서 이루어질 경우 파손이 축 방향으로 진행되어 손상될 수 있다[4]. 이 단계의 마지막 단계에 이르면 국소적인 수소 침투가 아닌 연료봉 전체에 걸친 수소화가 발생하게 되며 국부적인 대량 침투가 발생한 sunburst가 피복관벽을 관통하게 되며 2차 균열로 인해 방사능 방출속도에 큰 변화가 발생할 수 있다. 이와 같이 추가적으로 발생한 결함은 직경이 1mm까지 증가하며 피복관이 부풀어 반경이 증가하게 된다. 세 번째 단계는 핵연료의 노출 단계로서 추가적으로 발생한 대형 결함을 통해 핵연료가 냉각재에 노출되는데, 이 단계에서는 수소화 반응이 일어난 피복관 산화반응에 의해 결함이 악화되는데, 일차 결함의 확장과정보다 훨씬 빠르게 결함이 악화되며 마지막 단계인 피복관 파열에 이르게 된다.

나. 수소화 손상 사례 분석

A원전 손상연료 (A1, A2)

A원전 1주기 초기노심 운전중에 두개의 핵연료봉이 손상되었다. 두개의 핵연료봉중 A1은 일차 수소화에 의한 피복관 손상으로 손상이 발생하였으며, A2 연료는 이물질에 의한 관통결함이 발견되었다. A원전은 ABB/CE형의 핵증기 공급 계통(NSSS)을 사용하고 있으며, 장전된 핵연료는 ABB/CE사의 설계에 의해 한국원전연료(KNFC)가 제작하여 공급한 16×16형 핵연료 177개 다발을 1주기에 장전하였다.

A2봉은 B2영역(농축도: 2.36wt%)에 속하는 연료봉으로서 피복관은 standard Zry-4를 사용하였으며 집합체내에서 2번째 열에 위치하고 있고 육안검사(Visual Test)결과 1번 그리드 부근에서 이물질에 의한 관통결함이 발견되었으며(그림7(a)), 7번 그리드 부근에서는 이차 수소화로 인한 추가적인 손상이 발견되었다(그림7(b)). 인출후에 수행된 검사를 통한 연소도는 2013 MWD/MTU이다.

A1봉은 D1영역(농축도: 3.36wt%)에 속하며 피복관 재질은 standard Zry-4이다. 이 연료도 집합체 내에서 2번째 열에 위치하고 있고 육안검사 결과 3번과 4번 그리드 사이에서 내부 수소화로 인한 손상이 관찰되었다 (그림 8). A1 연료봉의 연소도는 1875 MWD/MTU로 밝혀졌다.

B원전 손상연료 (B1)

B원전 7주기 평형노심은 운전중에 B1 핵연료봉에서 관통결함이 발생하였다. B원전은 프라마톰사에서 제작한 원자로와 알스톰사의 핵증기공급계통을 사용하고 있으며 손상이 발생한 핵연료

는 Simens사가 설계하고 한국원전연료(주)에서 제작한 17×17형 KOFA(Korea Optimized Fuel Assembly)를 사용하였다.

B1봉은 9영역(농축도: 3.80wt%)에 속하는 연료봉으로서 피복관 재료로는 low tin Zry-4를 사용하였고 집합체내에서 최외각에 위치한 연료봉이다. 핵연료봉 인출 뒤 수행한 육안검사 결과 3번 그리드 부근에서 관통결함이 발견되었고 (그림 9 (a)), 이차 수소화에 의한 추가 손상이 6번과 7번 그리드 사이에서 발견되었다 (그림 9 (b)). B1 연료봉의 연소도는 11806 MWD/MTU로 밝혀졌다.

다. 수소화 손상 특성 분석

A원전 1주기 A1 연료봉의 내부 수소화 손상

PIE 수행결과 A1 연료봉의 손상원인은 내부 수소화임이 밝혀졌다. 일반적으로 내부 수소화 손상의 원인이 되는 수소는 핵연료 펠렛에 포함되어 있는 수분이 주요 공급원이며[2], 대량으로 피복관에 침투한 수소는 hydride blister를 형성하고 기계적 성질의 열화를 발생시킨다.

그림 10에서 볼 수 있듯이 수소화로 인한 blister의 발생 및 수소화로 인한 균열이 발견되었다. 그림 11에는 A1 연료봉의 파괴검사 결과인 핵연료 펠렛의 미세조직 사진이 나타나 있다. 그림 11의 가운데 그림에서 볼 수 있듯이 시편의 원주 방향으로 중심으로부터 거의 동일한 거리에서 밝은색으로 보이는 반점들이 발견되었다(r=0.6R). 연료봉 높이 1200 2000mm에서 발견되는 이러한 반점들은 높은 선출력과 대량의 산화 환경하에서 발생한 비정상적인 원주형 결정립의 (columnar grain) 성장에 의한 것으로 판명되었다 (그림 12).

일차 수소화 과정을 정량적으로 평가하기 위해 A1 핵연료봉 내·외면 산화막의 생성량을 미국 EPRI의 ESCORE(EPRI Steady-state Core Reload Evaluator) code를 사용하여 평가하였다[5].

내부 수소화시 수반되는 피복관 내면 산화막의 두께 증가는 외부의 수소공급원이 없는 상태이기 때문에 지르칼로이 산화 반응이 activated process이며 이는 핵연료봉내의 온도 분포에 의존하게 된다.

그림 13 (a)와 (b)는 PIE 수행결과 얻어진 내·외면 산화막의 분포가 ESCORE code를 통해 계산된 온도분포의 형태와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. ESCORE의 계산을 위해 사용된 입력 데이터는 A원전 NDR상의 데이터를 기본으로 하였다.

초기 원전 운전기간에서와 같이 핵연료 펠렛내의 온도가 높고 수분 함유량이 충분한 환경하에서는 펠렛의 미세조직의 재결정, 결정립의 성장, stoichiometry의 변화와 같은 현상들이 가속화된다. 이러한 현상들은 높은 선출력을 나타내는 핵연료의 위치에서 PIE를 통하여 관찰되었으며 ESCORE를 통한 예측과 잘 일치하고 있다(그림 13(c))

A원전 A2 연료봉과 B원전 7주기 B1 연료봉의 이차 수소화 손상

그림 14에는 A2 연료봉의 육안 검사 결과가 나타나 있다. 그림에 나타난 hydride blister와 균열은 일차 결함을(95mm) 통해 봉내로 유입된 냉각수가 피복관 내면과 반응하여 발생한 수소가 대량으로 피복관 내부로 침투하여 발생한 이차 수소화에 의한 것이다. 또한 A1 연료봉에 비해서 뚜렷하지는 않으나 높은 선출력에 지역에 띠모양으로 형성된 밝은 반점들이 파괴검사 결과 발견되었다 (그림 15). 앞에서 언급한 바와 같이 작은 일차 결함에 의한 대량의 이차 수소화 손상이 자주 발생하며[1], 핵연료 피복관내의 H_2/H_2O의 비가 임계치에 도달하고 그 위치에서의 산화막이 손상되어 수소 침투에 대한 방어벽의 역할을 하지 못하는 등의 조건이 만족되면 대량의 수소 침투가 발생한다[6].

일반적으로 일차 결함이 발생한 위치에서의 산화막이 가장 두꺼운 경향을 띠며 결함에서 멀어짐에 따라 산화막이 얇아지는 경향을 나타낸다고 알려져 있지만 지르칼로이 산화에 영향을 끼치는 가장 중요한 인자는 온도이기 때문에 온도의 분포에 따라 일반적인 산화막 분포와는 다른 경향을 보인다. 그림 16 (a)에 나타나 있듯이 ESCORE에 의해 평가된 온도는 핵연료봉의 중심에서

가장 큰 값을 나타내었으며 일차 결함이 발생한 위치로부터 멀어질수록 온도의 증가에 따라 산화막의 두께가 오히려 증가하는 것을 볼 수 있다(그림 16(b)).

B원전 7주기에서 발생한 B1 연료봉에서도 일차 결함의 발생후 이차 수소화에 의한 추가 손상이 발생하였다. B1 핵연료 봉에 대한 PIE test 결과가 그림 17에 나타나 있다.

일차 수소화 혹은 이차 수소화는 빠른 산화반응과 풍부한 수소의 공급을 필요로 하기 때문에 선출력이 높은 위치에서 발생하는 것으로 알려져 있다. 하지만 B1 연료봉의 경우에는 집합체의 장전위치가 노심의 외각쪽, 즉 baffle과 접하고 있는 부분이며 노심 평균 출력의 66% 정도의 저출력 영역에 속해 있었지만 대량 수소침투에 의한 이차 수소화가 발생한 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 결함 연료봉의 경우에는 연료봉 주위의 환경이 핵연료 온도와 더불어 산화 및 대량 수소침투에 영향을 미치는 중요한 인자라는 것을 알 수 있다.

즉, 핵연료봉이 일반적인 헬륨 분위기에서 수증기 분위기로 바뀌게 되면 먼저 갭내에 충진된 수증기의 낮은 열전도도로 인해 펠렛 중앙의 온도가 올라가게 되며 이와 함께 핵연료도 산화되면서 hyperstoichiometry (UO_{2+x})를 갖게 된다 UO_2에서 UO_{2+x}로의 변화는 펠렛의 열전도도를 감소시키게 되고 이로 인해 펠렛 중앙의 온도는 더욱 증가하게 된다. 이러한 열적 환경 변화가 낮은 출력의 연료봉에서도 높은 핵연료 온도를 야기하므로 이차 수소화에 이를 수 있게 된다.

수소화에 따른 산화 가속화 현상

그림 13과 그림 16에 나타나 있듯이 두개 연료봉의 피복관 내면 산화막 두께가 ESCORE로 예상한 표면온도의 분포와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 실제로는 결함 부위 주변의 산화막 두께가 다른 지역에 비해 다소 증가한 것으로 나타났는데 이러한 산화 가속화의 원인은 지르칼로이의 산화반응중 기지(matrix)내에 석출된 수소화물의 영향인 것으로 여겨진다.

금속-산화막 경계면에서 수소의 석출물이 존재하는 경우에 산화가 가속화된다는 것은 널리 알려진 바 있으나 최근의 연구에 의하면 경계면에서 수소의 석출이 발생하지 않더라도 산화와 수소화 반응이 지속적으로 진행되고 H_2/H_2O의 비가 큰 환경하에서는 산화가 가속화된다는 연구결과가 보고되고 있다(그림 18). 따라서 결함 주변의 비정상적인 산화막 두께 증가는 갭(gap)내에서 지속적인 반응이 유지되었기 때문으로 여겨진다.

갭내에서의 반응이 진행됨에 따라 온도가 높은 부분에서의 수증기는 피복관과의 산화반응이 빠르기 때문에 급격히 감속하여 수소가 축적된다. 축적된 수소에 의하여 수소침투가 발생하며 이는 다시 산화를 가속화시키는 상승작용을 반복하여 궁극적으로 산화 가속화와 대량 수소 침투에 의한 피복관 손상이 발생한다.

일차수소화 혹은 이차 수소화가 발생하여 갭 내부에 수증기가 발생하는 경우, 수증기는 초기 핵연료봉 충진 기체인 헬륨에 비해 열전도도가 10%정도에 지나지 않으므로 급격한 온도의 증가가 발생한다. 최근에 hyperstoichiometric로 천이된 수증기 산화반응시에 UO_2의 열전도도가 감소한다는 연구결과과 보고되는 것으로 미루어 대략 수백도 정도의 펠렛 평균온도가 증가하고 이로 인해 결정립 성장이 가속화되는 것으로 여겨진다.

4. 결 론

1986년 이후의 손상 핵연료봉을 중심으로 한 KNFDB는 손상 핵연료에 대한 다양한 정보를 수록하여 손상 경험을 바탕으로 한 고성능 핵연료 개발의 기반을 마련하였으며 손상이 발생하지 않은 주기에 대해서도 NDR상의 설계자료, 사용된 핵연료의 자료등을 충실히 수록하여 현장에서의 노심 관리 업무의 능률 향상을 기대할 수 있게 하였다. 또한 관계형 모델을 기반으로, 사용자 측면에서 활용이 수월한 환경(GUI환경)으로 구축하였기 때문에 데이터베이스에 대한 일반적인 지식을 가지지 않은 사용자들에게도 손쉽게 데이터베이스를 이용할 수 있는 방법을 제시하였다.

본 연구에서는 구축된 KNFDB 활용의 한 예로써 현재까지 발생한 여러 손상들에 대한 통계적 처리 및 분석을 시도하여 특히, 고연소도·장주기 핵연료에서 문제성이 부각되고 있는 수소화 손상에 촛점을 맞추어 손상 특성 분석을 수행하였다. 먼저 손상 자료 조회를 통하여 수소화 손상이

발생한 핵연료들에 대한 사례분석을 수행하였으며 NDR, 핵연료 설계/제작등에 대한 일반적인 설계 특성 및 손상이 발생한 주기에서의 출력 분포 핵연료의 구성 및 노심 내의 위치, 설계연소도, 손상이 발생한 위치등에 대한 상세한 정보를 분석하였다. 또한 제공된 핵설계 자료 및 핵연료 설계/제작 자료를 바탕으로 입력 데이터(Input data)를 작성하고 ESCORE를 이용하여 손상 핵연료에 대한 코드해석을 병행하였다.

수행된 PIE 결과에 의해 A1 연료봉의 손상 원인은 내부 수소화임이 밝혀졌으며, A2 연료봉과 B1 연료봉은 일차 결함을 통해 유입된 냉각수에 의해 이차 수소화가 발생한 것으로 나타났다. 또한 ESCORE 코드를 통한 예측결과와 PIE 데이터가 잘 일치하는 것으로 나타났다.

정밀분석 결과 결함 부위 주변의 산화막 두께 증가는 지르코늄 기지에 석출된 수소화물의 영향으로 밝혀졌고 석출된 수소화물이 산화를 더욱 가속화시킨 것으로 나타났다.

추가적으로 B1 연료봉의 예에서 나타나듯이 이차 수소화는 결함 핵연료봉이 처한 수증기 산화 분위기에 의해 변화된 여러 열물리학적 특성들에 의해 비록 낮은 선출력을 가진 핵연료봉에서도 발생할 수 있다는 사실이 밝혀졌다.

참 고 문 헌

[1] J.H. Davies and G.A. Potts, Post-defect Behavior of Barrier Fuel, *Fuel for the 90s: Proc. ANS/ENS International Topical Meeting on LWR Fuel Performance*, Avignon, France, Vol. 1 (April 1991) 272

[2] F. Garzarolli, R. von Jan, and H. Stehle, The Main Cause of Fuel Element Failure in Water-Cooled Power Reactors, *Atomic Energy Review*, 17 (1979) 31

[3] J.C. Clayton, Internal Hydriding in Irradiated Defected Zircaloy Fuel Rods, *Zirconium in the Nuclear Industry: Eighth International Symposium, ASTM STP 1023* (1989) 266

[4] 정성연, 김선기, 제원목, 김용수, 김용환, 임현태, 목용균, 이승재, 김재원, 수증기 산화 및 수소 침투가 질코늄 합금 튜브의 건전성에 미치는 영향 연구, '95 한국원자력학회 추계학술발표대회, 3 (1995) 611

[5] Combustion Engr. Inc., ESCORE-the EPRI Steady State Core Reload Evaluator Code, *EPRI NP-5100* (1987)

[6] S. Vaknin and D.R. Olander, Secondary Hydriding of Defected Zircaloy-Clad Fuel Rods, *EPRI RP-1250-23* (1972)

표 1. 미국 내 경수로 핵연료 손상사례 및 원인 분석 결과 (핵연료 집합체 수)

손상 원인	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
Handling Damage		6	2			1	1	
Debris	146	11	67	20	13	6	10	1
Baffle Jetting								
Grid Fretting	14	18	9	33	36	9	33	19
Primary Hydriding		1		4				
Crud/Corrosion							4	1
Cladding Creep							1	
Collapse								
Other Fabrication	1	15	1	5	3	1	15	3
Other Hydraulic					1			
Inspected/Unknown					36	36	13	2
Uninspected	43	58	35	61	14	3	12	1
Total	204	109	114	123	103	56	89	27

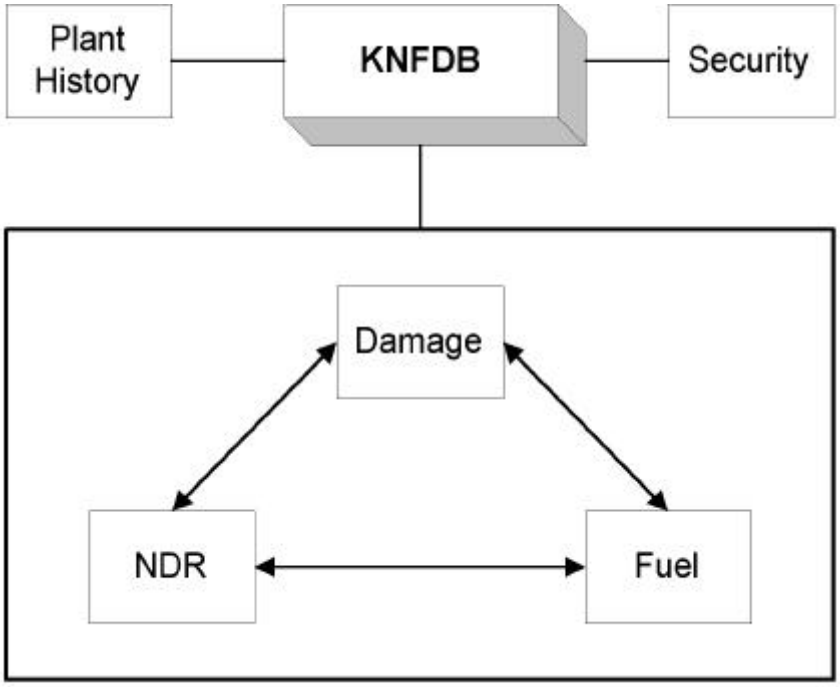


그림 1. KNFDB의 구조

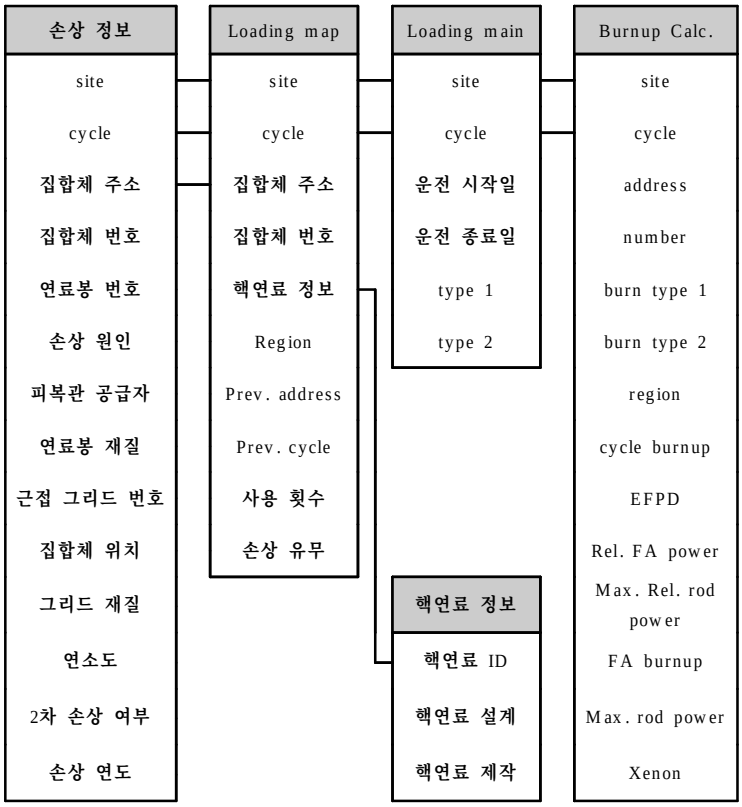


그림 2. KNFDB의 E-R Diagram

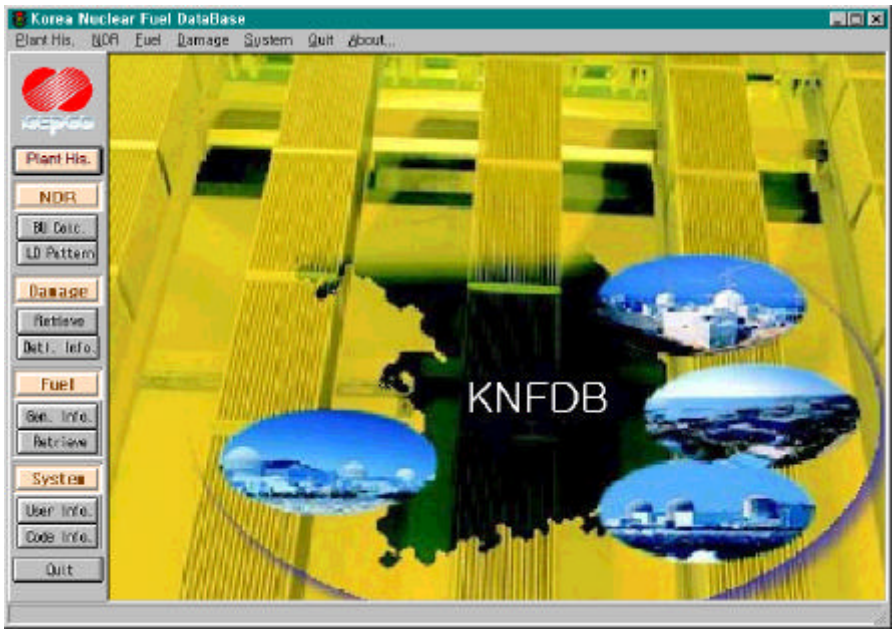


그림 3 (a). KNFDB의 메인 화면

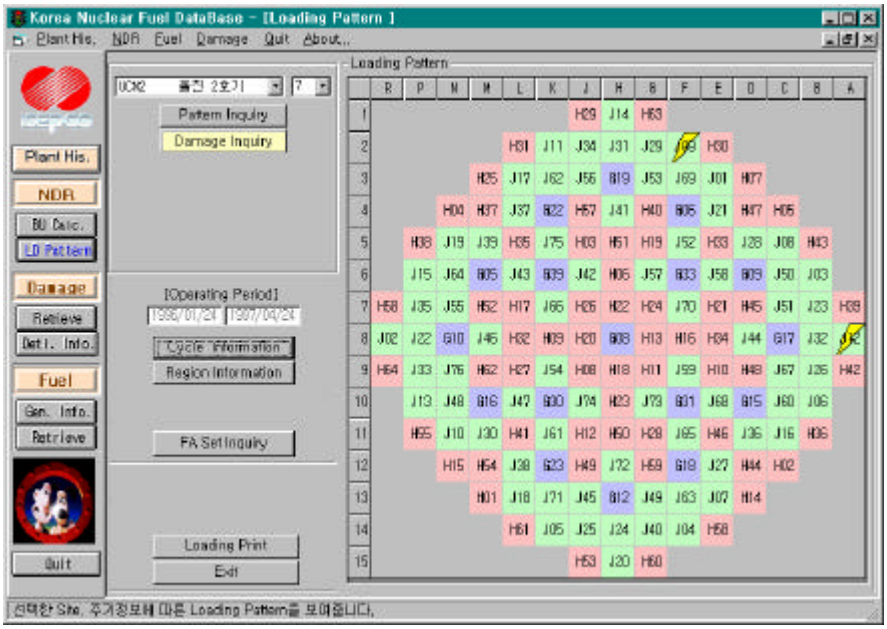


그림 3 (b). Loading pattern 조회 화면

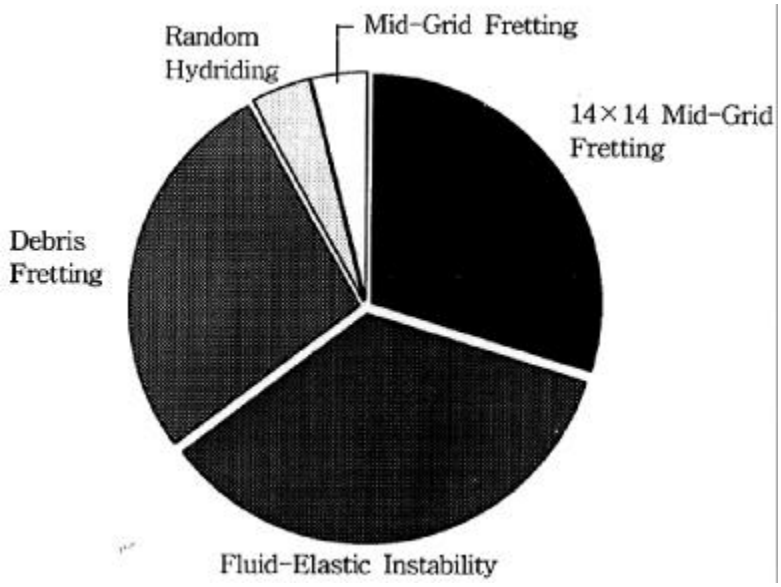


그림 4. Westinghouse사 핵연료의 손상 원인별 분류

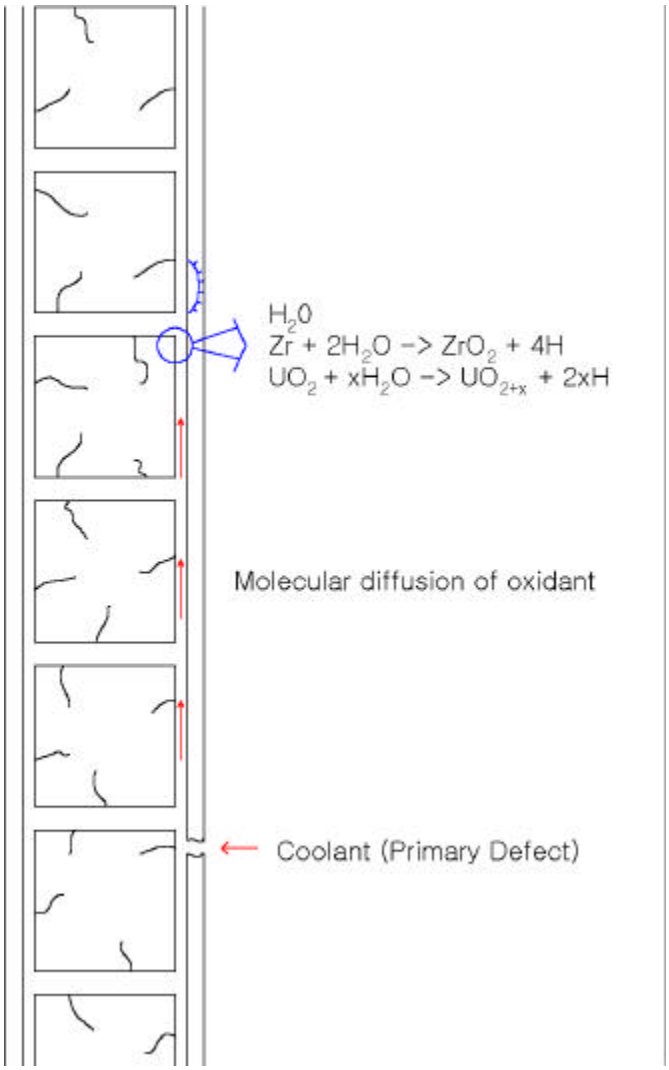


그림 5. 손상 핵연료에서의 수소 반응 기구

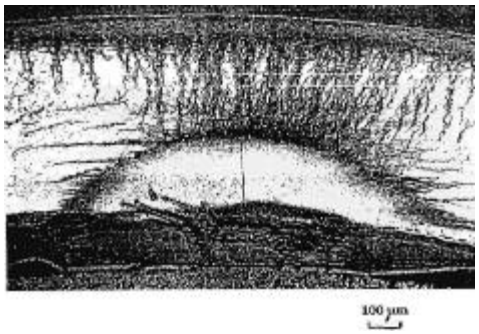
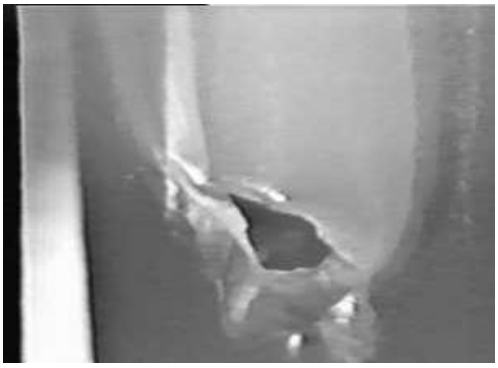


그림 6. **국부 대량 수소 침투에 의한** ‘sunburst’

그림 8. A1 **연료봉 손상 모습**

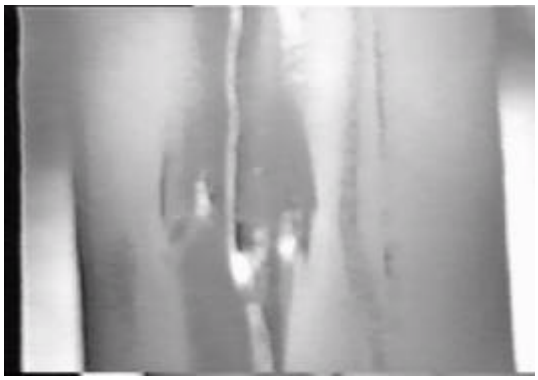
(a)



(a)

(b)

그림 7. A2 **연료봉 관통결함 모습과 추가 수소화 손상**



(b)

그림 9. B1 **연료봉 손상 모습**

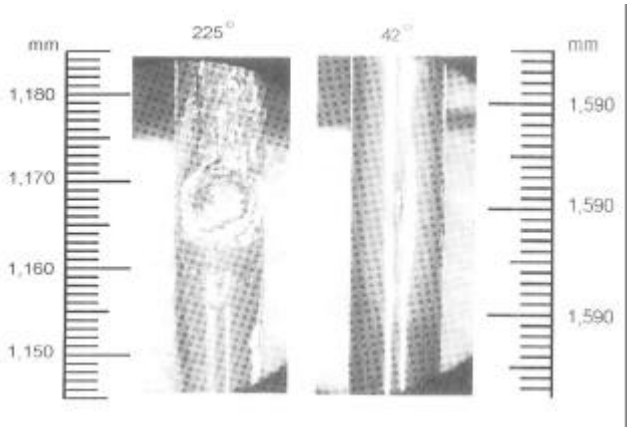


그림 10. A1 연료봉 육안 검사

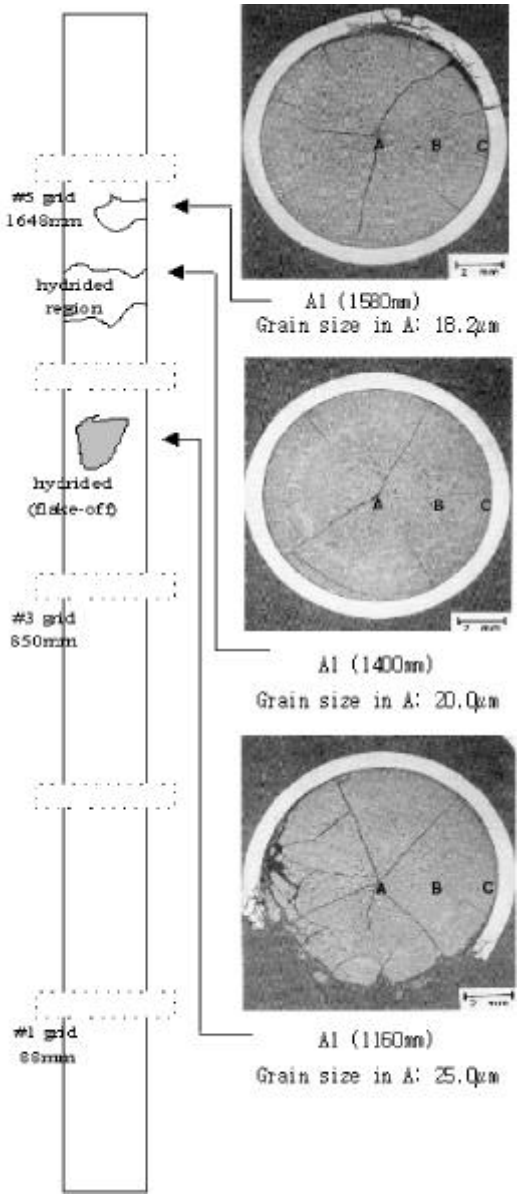


그림 11. A1 핵연료 펠렛의 미세조직 사진

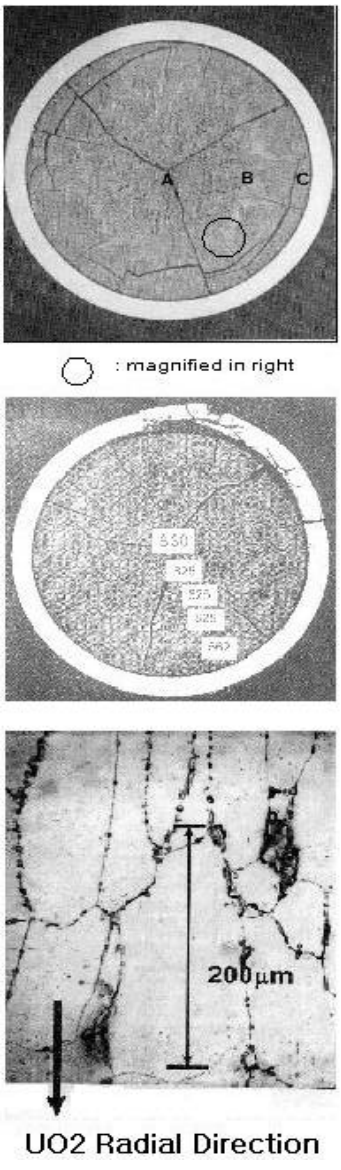


그림 12. 수증기 산화 분위기에서의 원주형 결정립 성장

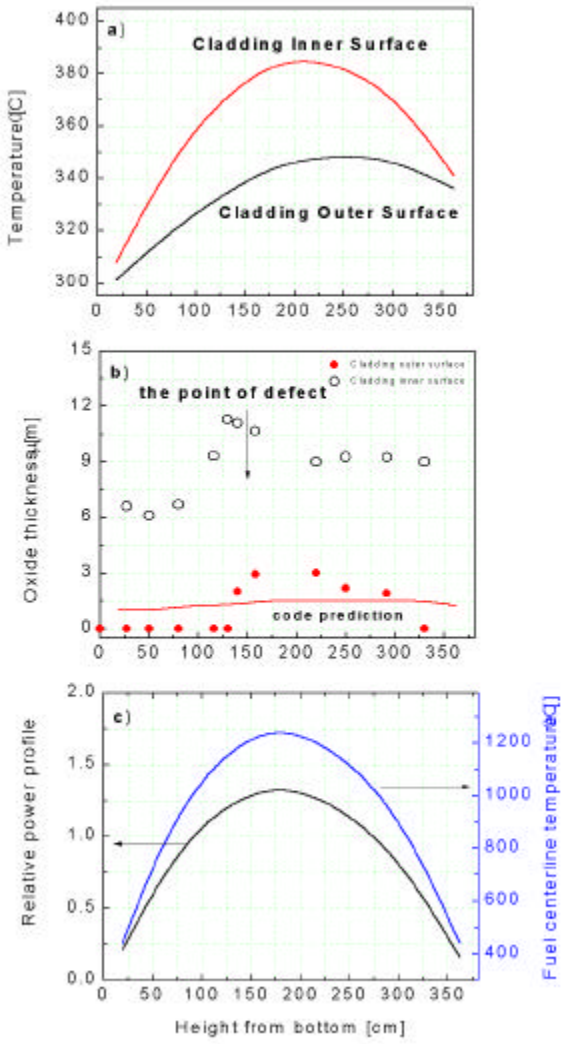


그림 13. A1 연료봉의 PIE 결과와 코드 예상치 비교

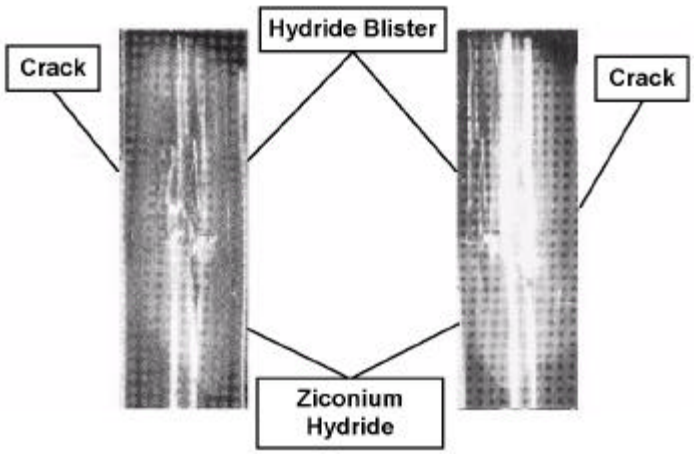


그림 14. A2 연료봉의 수소화 손상 모습 (2,660mm)

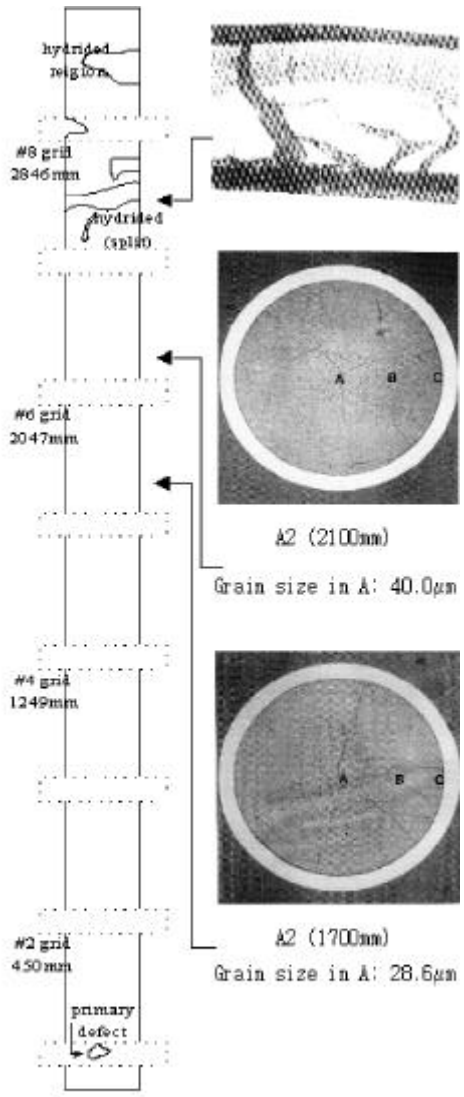


그림 15. A2 핵연료 펠렛의 PIE 결과와 미세조직 모습

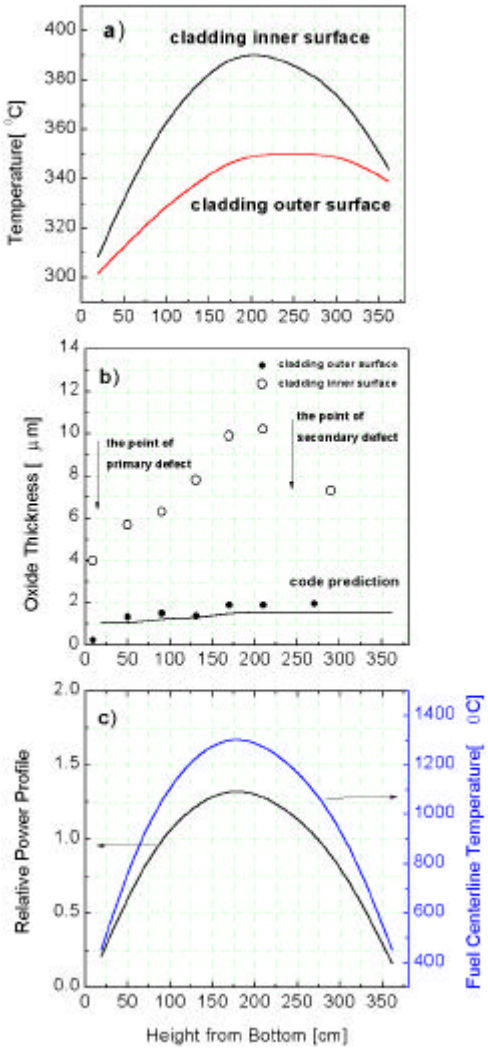


그림 16. B208-R8 코드 예상치 비교

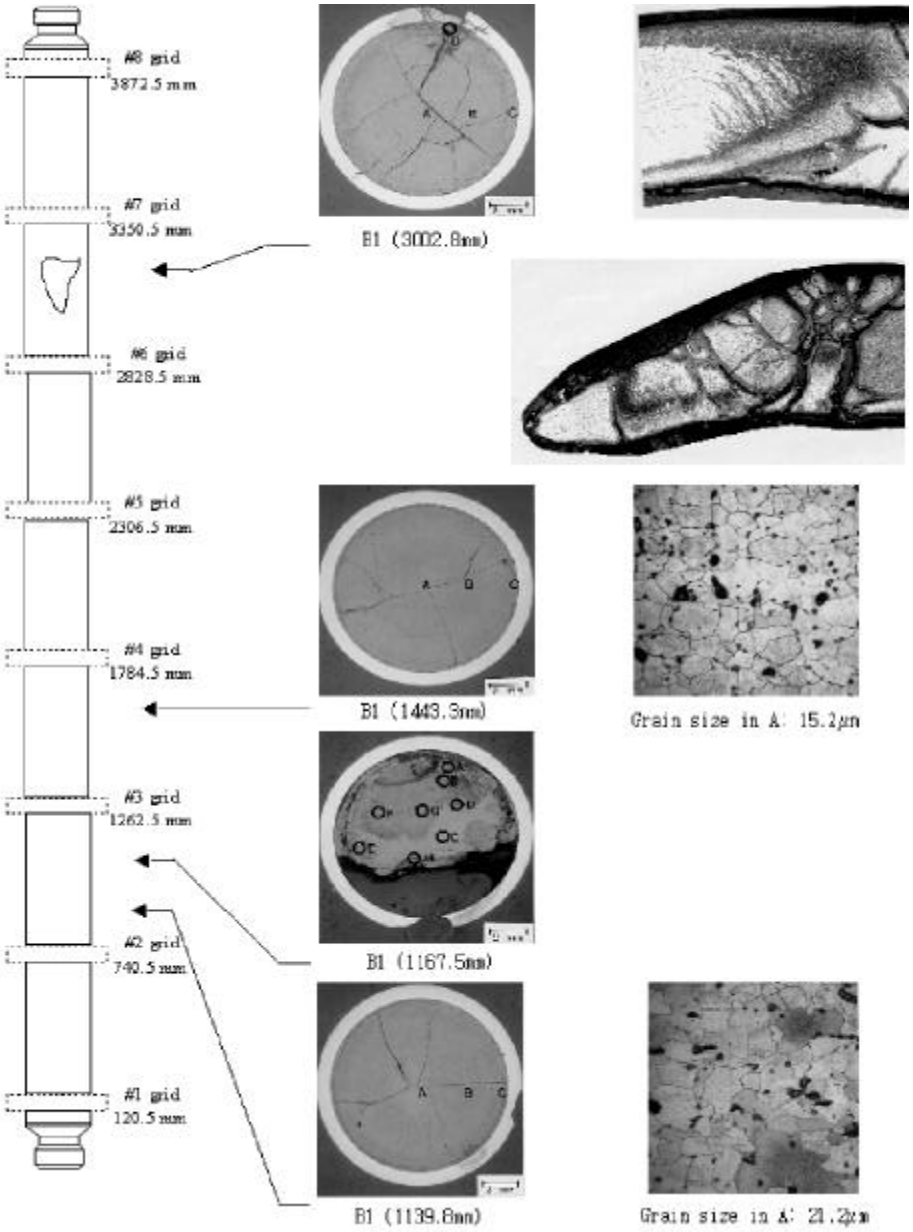


그림 17. B1 연료봉의 PIE 결과

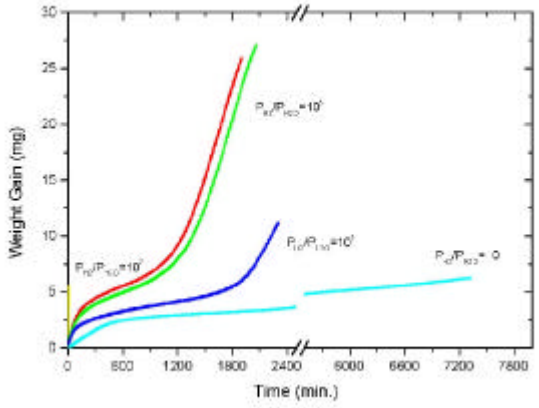


그림 18. 수소 분위기에서 지르칼로이 산화 가속화