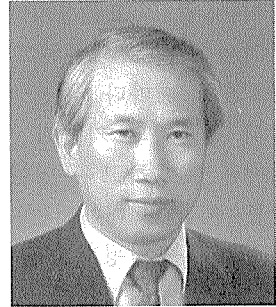


## 재료손상은 안전성 저해의 출발 재료개발은 미래 시스템의 초석



국 일 현

한국원자력연구소  
원자력재료기술개발부장

우리나라에는 현재 고리 1, 2, 3, 4호기, 영광 1, 2, 3, 4호기, 울진 1, 2호기를 포함한 10기의 경수로가 가동중이며, 월성 1호기 중수로 1기가 가동중이다. 고리 1호기가 '78년 4월에 운전을 시작하여 이제 20년째 가동중이고, 고리 2호기와 월성 1호기가 14년, 고리 3호기가 12년, 고리 4호기와 영광 1호기가 11년, 영광 2호기와 울진 1, 2호기가 10년째를 접어 들어 가동이 되고 있다. 다시 말해서, 우리나라 원자력발전소도 30~40년의 설계수명과 비교하면 중년기에 속한다.

사람이나 동물도 나이가 들면 어렸을 때와 달리 여기저기 고장이 나고, 몸을 함부로 쓰면 쉽게 퇴화되듯이 원자력발전소도 마찬가지로 나이가 들면 이곳 저곳이 고장이 날 확률이 늘고 초기에 무리하여 운전하면 중년 이후에 급격히 그 성능이 저하된다. 그런데, 원자력발전소가 가동시간에 따라 기능이 저하되는 거의 대부분의 문제가 설비재료의 퇴화(degradation)에서부터 출발하는 것이 일반적이다. 주요설비로서 성능이 저하되는 대표적인 예로 경수로의 압력용기 및 원자로 내

부와 압력경계 재료가 중성자조사에 의하여 취화되어 가고, 배관 및 증기발생기 재료가 고온, 고압, 부식 환경에 따라 기계적 특성이 저하되고 결함이 발생하며, 중수로의 압력관 재료가 중성자조사에 의해 치수가 변하고 수소취화현상이 발생하여 취화되는 등이 있다.

특히, 이러한 구조설비의 손상은 발전 효율을 떨어뜨리고 기능 자체를 위협할 뿐만 아니라, 발전소의 수명을 직접 좌우하는 요소로 작용한다. 원자력발전소를 하루 정지할 경우 발전단가로만 고려해도 8억원의 손실을 초래하고, 설비손상을 보수 또는 교체하는 비용과 수명을 단축시키는 비용을 고려하고, 심지어 여름 최고 수요시기에 전력예비율을 육박하는 등 산업파급 효과까지 고려하면 구조설비재료의 급격한 손상에 의한 경제적 손실은 막대하다.

고리 1호기를 미국 웨스팅하우스로부터 100% turn-key 방식으로 도입한 이후 많은 구조설비를 하나씩 우리 손으로 제작·설치하도록 노력한 결과로 압력용기 등 대부분의 설비를 한중을 통해 국산화하였다. 그러나 배

관 등에 쓰이는 스테인레스강재나 증기발생기의 니켈합금 전열관재 등 건전성에 영향을 미치는 중요 고급설비재는 아직까지 국외로부터의 수입에 의존하고 있다. 초기에는 문제가 있을 때마다 완전 국외기술에 의존하여 국외 전문가의 자문과 국외 기술로 우리 설비재를 보수하고 운영했으나, 이제는 우리가 만든 제품에 대해서는 품질과 운전조건 및 안전성과 수명평가를 실시하고 있다. 그러나, 아직도 압력용기강 등 우리의 제품 수준이 만족할 만한 수준에 도달하지 못하고 있고, 우리나라에서 제조하지 못하는 설비재를 포함하여 고온, 고압, 부식환경, 중성자 조건하에서의 내구성·건전성의 평가 기술과 손상방지 기술을 확립하지 못한 실정이다. 현재까지 관련 기술개발 실태와 국외 기술과의 비교·분석을 통해 향후 추진할 일을 주요 설비재별로 검토하여 연구개발하고 있다.

우리나라는 가압경수로의 설계를 국산화하여 '95년에 영광 3호기, '96년에 영광 4호기를 건설하였고, '98년에 울진 3호기, '99년에 울진 4호기, 2001년에 영광 5호기, 2002년에는 영광 6호기를 한국표준형 원자로로 완성한다는 목표로 건설중에 있다. 이와 같은 설계는 구조재료의 특성을 기본 데이터로 구조계산을 선행하여 이루어져야 하는데 구조재료에 대한 우리의 성능평가 결과가 없으므로 기초적인 설계 데이터는 국외의 자료를 인용한 셈이다. 실제로 이러한 자료는 우리 산업제품의 성능 평가로부터 출발해야 하며 이러한 작업이 한국원자력연구소에서 수행되고 있다. 다시 말해서, 원자로 압력용기재료의 조사취화 시험을 한국원자력연구소의 하나로 연구용원자로를 활용하여 수행하고, 배관 및 증기발생기 재료의 내부식 및 파단전 누수 조건을 모사 실험으로 수행하고 있다. 뿐만 아니라, 현재 사용하고 있는 재료는 1950년 또는 1960년대에 개발된 것들로서 개선의 여지가

많으며 이에 따른 설계의 변경도 요구되고 있다. 한국원자력연구소에서는 증장기 연구를 통하여 intercritical heat-treated vessel material, texture controlled pressure tube material, boundary controlled steam generator material, nitrogen strengthened stainless steel, atomized spherical powder for research reactor fuel 등 우수한 결과를 도출하였고 이들의 성능평가 결과에 따라 우리 원전의 개선과 활용이 기대된다.

최근 유럽 및 미국은 체르노빌 사고 이후 원자력산업이 급격히 퇴조하여 설계엔지니어링 뿐만 아니라 설비구조재의 공급산업도 거의 사양화되고 사라지고 있는 실정이다. 예를 들면 압력용기, 배관, 증기발생기 전열관 제조회사 등은 프랑스, 일본과 한국을 제외하고 과거 우수 회사들은 업종을 바꾼지 오래 되었다. 반면에, 동북아에서는 에너지 부존 자원의 부족으로 지속적으로 원자력을 성장시켜 관련 산업이 튼튼히 자리를 잡아 가고 있다. 특히 이 지역은 원자력산업의 수요와 더불어 향후 수출 전망도 증가하고 있으며 일본은 중국 등을 대상으로 수출을 위한 준비를 오래 전부터 착실히 진행하고 있다. 우리나라도 충분히 원자력산업의 수출이 가능하다고 판단되며 적어도 우리 원자력산업의 신뢰를 확보하고 건전성과 경제성을 바탕으로 이에 대한 준비를 해야 한다고 본다.

최근 우리나라는 방사성폐기물 처리처분장 뿐만 아니라 마치 원자력이 환경을 악화시키는 산업처럼 오인되어 원전부지를 찾기가 어려워지고 월성 1호기의 압력관 파손, 영광 2호기의 증기발생기의 누수, 핵연료의 파손 등을 기화로 일반 국민의 원자력에 대한 신뢰도가 저하되어 가고 있다. 이런 시점에서 원전의 건전성은 우선적으로 확보되어야 하고 이를 위한 개선 노력은 더욱 중요한 과제이다. 원전의 건전성을 저해하는 손상은 구조재

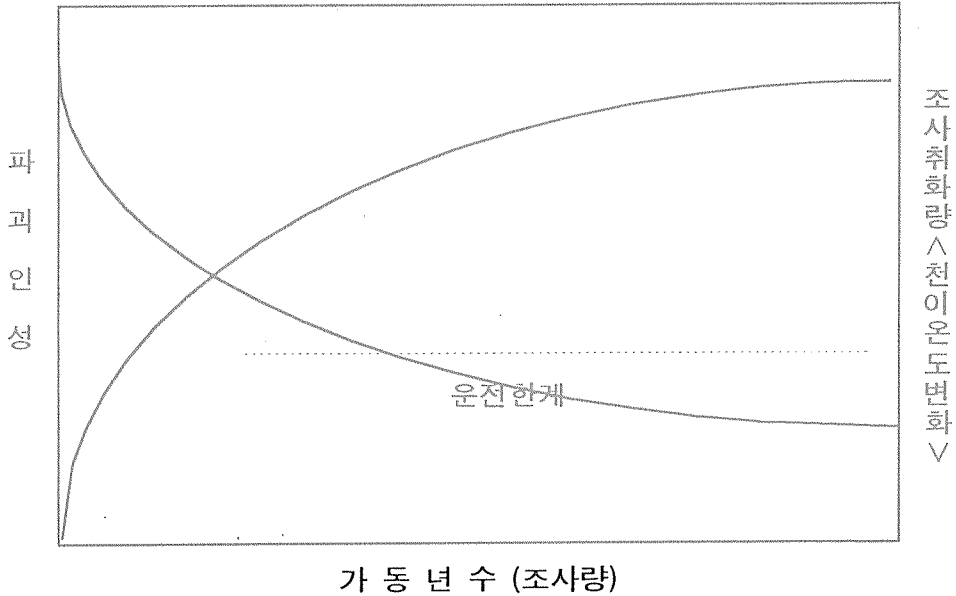


그림 1. 가압경수로의 압력용기강 및 용접부위가 중성자 조사량에 따라 물성이 저하되는 현상. 점선의 수명한계에 도달하면 이들 설비재료는 그 이상 사용이 불가능하게 된다.

료의 건전성과 내구성에서부터 출발하며 이에 대한 지속적인 평가와 감시가 요구되며 100% 신뢰도 확보와 더불어 개선을 멈출 수 없다. 특히, 구조재료의 잔존 수명의 연장 및 예측을 지속하여 원전의 효율적인 관리를 해야 한다.

원자력발전소에서 가장 중요한 역할을 담당하고 중성자 조사, 고온, 고압 등 가장 심한 조건에서 운전이 되고 있는 설비구조는 가압 경수로에서는 압력용기, 가압 중수로에서는 압력관이다. 경수로의 압력용기는 높은 에너지의 중성자를 항상 맞고 있으며 이 때문에 초기의 질긴 성질을 상실하고 운전시간과 조사량에 따라 취화되어 간다.

따라서, 정상운전 때와 정지 시의 운전 수압이 온도에 따라서 다르게 조절 되어야 하는데 압력용기의 잔존 인성에 의거하여 기준 무연성 천이온도를 결정하고 그 결과에 따라서 온도-압력을 관리하고 있다. 그러나, 압력

용기강의 인성은 운전년수에 따라서 급격히 감소하고 한계값에 이르면 원자로의 수명은 다하게 된다. 이와 같은 상황을 설계 초기에 예측하여 계산한 것이 원자로의 설계수명이다. 이 설계수명은 초기 압력용기의 제조 상태의 인성을 근거로 계산되어야 함은 물론이고, 운전기간이 지나면서 주기적으로 당시의 변화된 인성을 점검하여 말기 수명의 변화를 지속적으로 예측하여 점검시의 안전성도 확인해야 한다. 경우에 따라, 초기 예측과 달리 인성이 급격히 감소하여 설계수명을 만족시키지 못하는 경우도 있거니와, 반대로 예상보다 인성감소가 늦거나 작아서 설계수명을 연장시킬 수 있는 경우도 있다. 중성자속이 높은 연구용 원자로를 이용해서 수명말기 조사량을 동일재료에 투입하고 그 인성을 분석하여 설계수명의 정확한 판정과 원자로의 안전성을 확인하고 있다. 한국원자력연구소는 '95년부터 가동하기 시작한 30MW급 연구용원

자료 하나를 이용하여, 상기 분석이 가능하게 되었다. 또한, 연구소에서는 초기인성을 대폭 향상시킬 수 있는 intercritical heat-treatment(2상 영역 열처리 법)의 개발도 이루었다.

우리나라는 현재 1기의 중수로를 가동하고 있고 '97, '98, '99년을 준공목표로 3기를 추가로 건설중에 있다. 중수로에서 경수로의 원자로 압력용기와 동일한 역할을 하는 구조설비는 압력관이다. 최초 캐나다 AECL이 중수를 설계·공급한 자료에 의하면 설계수명 30년을 보장하는 것으로 되었다. 그러나, 중성

자 조사에 의한 Zr-Nb 압력관 재료의 성장과 rolled joint부위의 잔류응력과 압력관 자중 및 핵연료에 의한 처짐으로 calandria tube와 접촉하여 응력구배 및 온도구배를 형성하여 수소와 중수소를 국부적으로 흡수하고 농도를 높혀 hydride 석출물을 생성시키고 심지어 blister현상까지 전개시킨다. 이와 같은 과정을 통해 압력관은 파손되고 캐나다의 Pickering-2는 압력관 전량을 교체했으며, Pickering-3는 수소지연과피로 18개를 교체했고, Pickering-4는 52개를 교체했고, Bruce-2는 3개를 교체했다.

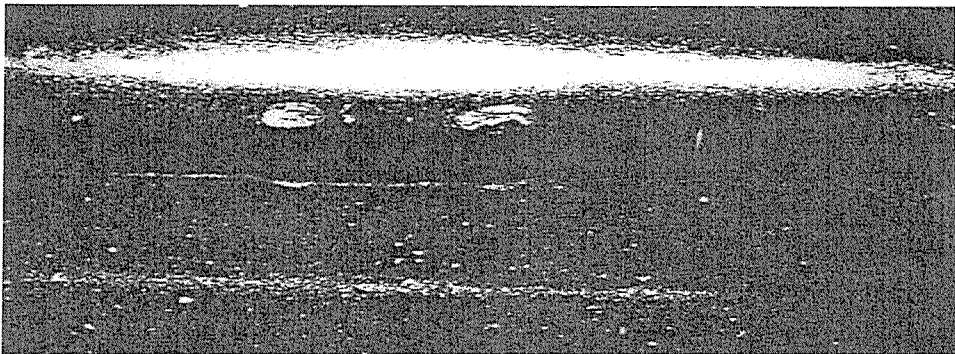


그림 2. 가압 중수로에서 수소석출물과 blister가 발생한 압력관의 예

우리나라의 월성 1호기도 예외는 아니어서 3개의 압력관을 교체했고 13개 압력관에 처짐 현상이 발생한 예가 있다. 이와 같은 손상 형태는 CIGAR 검사 등과 감시시험을 지속적으로 실시하여 건전성의 예측과 잔존 수명의 분석을 요구한다. 2, 3, 4호기에 사용될 압력관재료는 quadruple melting으로 초기 수소량을 감소시킨 재료이나 연구용 원자료를 통해서 사전에 수명을 판단하는 준비가 있어야 한다. 한국원자력연구소에서는 하나로를 이용해서 말기 인성을 분석하고 교체 압력관 재료의 특성 향상을 위하여 texture controlled 및 미량원소합금 개선으로 재질을 개량하고 있다.

여기서 원전 구조재료의 모든 문제를 전부 다룰 수는 없지만 증기발생기 전열관은 매우 중요하고 빼놓을 수 없다고 생각하여 언급한다. '94년 미국 EPR1보고에 의하면 전세계 236기의 원전을 조사한 결과, 초기 5년간 전열관 손상을 겪지 않은 원전은 48기에 지나지 않고, 이들 48기마저 손상 가능성을 내포하고 있다고 한다. 주요 손상원인은 응력부식 균열로서 1차측과 2차측이 동시에 가능성을 가지고 있다. 이들 응력부식균열이 발생하는 부위는 U-bend 또는 환관 부위이며, 제조 당시의 잔류응력이 남아 1차측 고압수와 2차측 알칼리성 수질분위기에서 부식이 발생하고 니켈합금의 결정입계를 타고 균열이 성장하

는 것이다. 이러한 응력부식균열 현상이 발생하는 것을 대비하여 인코넬 600이라는 초내식성 합금을 사용했으나 심한 경우 전체 전열관 수의 20%까지 손상의 비율이 증가하고 최근에는 690으로 설비를 변경하고 있다. 그러나, 690의 경우는 납 또는 중성수에 약한 경향이 있음이 최근 보고로 밝혀지고 있다. 따라서, 비파괴방법으로 전열관의 상태를 지속적으로 감시하고 있으며 손상이 발견되면

plugging, sleeving 등으로 2차수를 보호한다. 한국원자력연구소에서는 고온, 고압, pH를 조절하면서 손상기구를 규명하고 이를 바탕으로 내응력부식 재료의 개발과 수질화학의 개선을 통해 전열관 손상을 저하시키는 노력을 하고 있다. 특히, 결정입계 조절에 의해 응력 부식균열이 현저하게 감소하는 결과를 얻은바 활용이 기대된다.

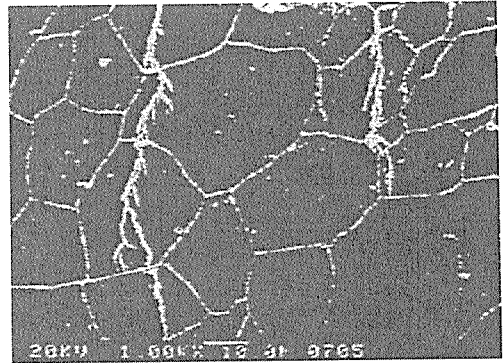
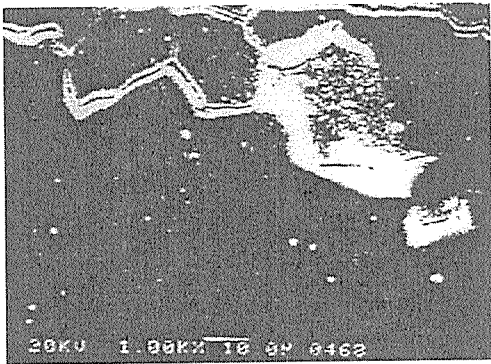


그림 3. 증기발생기 전열관이 응력부식균열로 손상된 예, 좌측은 합금 600에서 입계균열이 나타난 주사전자현미경 사진이며, 우측은 합금 690에서 입내균열이 나타난 주사전자현미경 사진이다.

이와 같이 원전재료의 평가와 개선은 원전의 건전성 확보와 효율적 운용에 없어서는 안되는 매우 중요한 요소이다. 이들 개발 결과는 우리 설계와 발전소 운용에 활용할 수 있도록 중성자 조사시험, 고온고압시험, 내부식시험 등 검증 절차를 거쳐야 한다. 또한 nano-size의 초미립 분말형 정밀요업재료의 개발과 활용, 세라믹재료의 도포기술, 저장사화 배관재료의 개발과 활용 등으로 미래에

너지시스템 개발을 위한 재료의 개발도 이루어지고 있다. 정부와 한국전력공사는 정부주도 중장기연구를 통해 이와 같은 연구를 적극 지원해 왔는 바, 이 기회를 통해 감사의 뜻을 표하고자 한다. 필자는 이러한 개발기술이 우리나라 발전소의 건전성 확보와 내구성 향상에 기여할 뿐만 아니라 이 기술이 적용되어 국외의 발전소보다 더욱 우수한 제품으로서 수출에도 기여할 수 있기를 바란다.

