



THEME 03

소형 일체형 가압경수로 SMART의 파괴역학 적용

최 순 | 한국원자력연구원 스마트개발본부, 부장 | e-mail : schoi@kaeri.re.kr

이 글에서는 소형 일체형 가압경수로인 SMART를 소개하고 그 설계에 대하여 파괴역학을 적용한 사례를 간단히 소개하고자 한다.

원자력의 유용성

인류의 발전은 필요에 의한 발견과 창의적 사고에 의한 발명에 기인하며, 기술적 발전에 따라 새로운 문명이 지속되고 있다. 18세기에 스코틀랜드의 제임스 와트가 발명한 증기기관은 산업혁명을 일으켜 농업 중심의 사회를 공업 중심의 사회로 바꾸었다. 그 뒤 기차, 자동차, 증기선 등의 운송수단의 발명이 이어졌으며, 19세기 말에는 전기에너지를 이용한 의사전달 수단인 전화기, 텔레비전 등의 발명이 계속되었다. 이처럼 우리의 일상생활을 윤택하게 하는 발명들은 필연적으로 많은 에너지의 소비를 필요로 하게 되었으며, 인류는 새로운 문명의 개발과 유지를 위하여 보다 안정적인 대규모 에너지원을 확보하고 활용하기 위한 방안으로 원자력 분야의 기술개발에 매진하게 되었다.

1956년 영국에서 세계 최초의 원자력 발전소(Calder Hall-1으로 60MW급 기체냉각형 원자로)가 전력을 생산한 이래로 체르노빌사고와 최근의 후쿠시마 사태 등으로 표출된 부정적인 일면도 있으나 원자력발전은 여전히 다음과 같은 장점을 가지고 있다. 첫째, 연료공급의 안정성이다. 원자력발전의 연료인 우라늄은 전 세계에 널리 분포되어 있으며 다른 에너지원보다 안정적인 공급

을 기대할 수 있다. 또한 적은 양에 비하여 막대한 규모의 에너지를 낼 수 있으며 수송과 저장이 용이하다. 둘째, 환경 친화적 에너지이다. 최근 지구 온난화의 주원인은 석탄과 석유 등 화석연료의 과다 사용으로 인한 이산화탄소, 황산화물, 질소산화물 등과 같은 환경오염 물질의 배출로 인한 것이다. 원자력발전은 이산화탄소를 배출하지 않는 친환경 에너지원으로 지구 환경을 보호할 수 있다. 셋째, 경제적인 에너지이다. 원자력발전 단가는 석탄, 석유, 가스, 수력과 비교하여 경쟁력을 가진다. 최초의 원자력발전소가 건설된 이후로 원자력 시설의 건설, 운영 및 관련 기술의 발전과 축적 경험을 통하여 향후 건설이 예정된 원자력발전소의 경제성과 안전성은 매우 개선될 것으로 전망된다.

위와 같은 이유로 오늘날 에너지전문가들은 원자력 발전이 '신고유가 시대의 지속과 기후변화 협약의 발

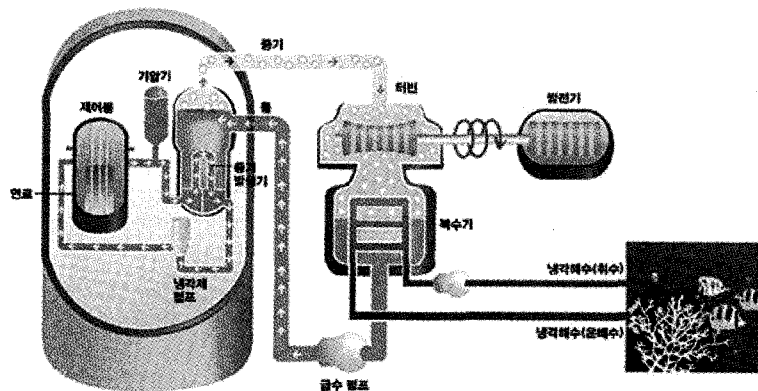


그림 1 가압경수로형 원전의 발전 원리(출처: 원자력 입문자료, 교육과학기술부, 2010)

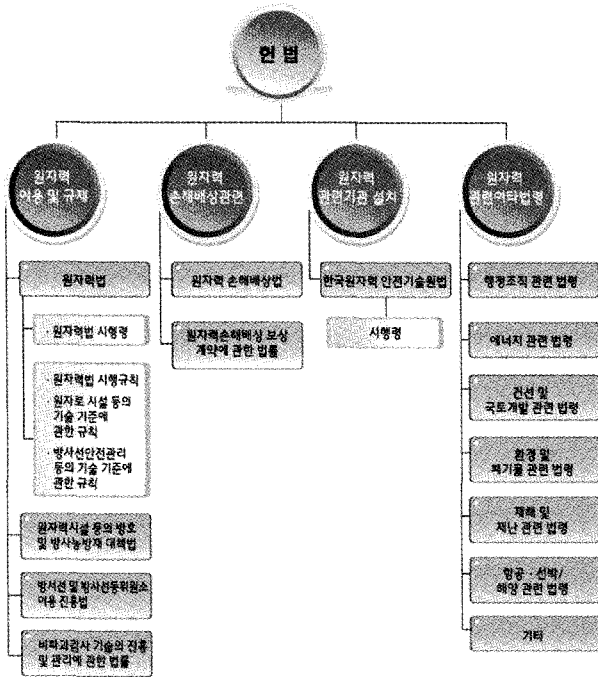


그림 2 원자력 관련 법령(출처 : 원자력 입문자료, 교육과학기술부, 2010)

효'에 따른 현 상황에서 외적 영향을 가장 적게 받는 효율적인 에너지원이라는 데 의견을 같이하고 있다.

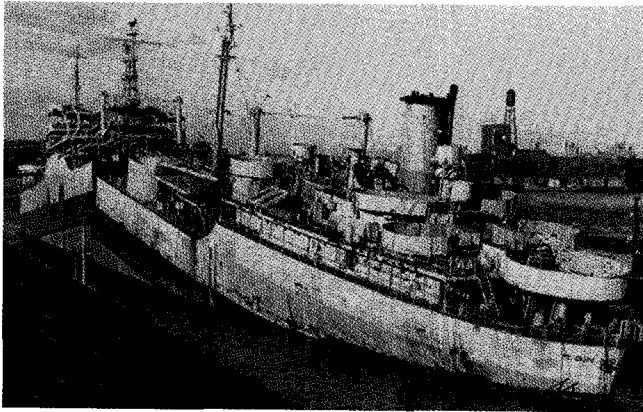
SMART 원자로의 소개

원자로는 크게 나누어 볼 때 방사선 동위원소의 생산 및 연구를 목적으로 개발된 연구로와 전력을 생산하기 위하여 건설된 발전로로 구분된다. 발전로의 경우, 전 세계적으로 전력생산 목적의 대용량 원자로가 대부분이며, 원자로 기술개발도 이들 대용량 원자로를 중심으로 이루어져 왔다. 국내에 건설된 원자력발전소는 1978년에 상업운전을 시작한 고리 1호기가 처음이며 모두가 전력 생산량이 600MWe 이상이다. 그러나 지속적인 전력 수요의 증가와 더불어 원자력 에너지의 다양한 활용에 대한 관심이 증가하면서 소형 원자로 시장의 개발에 대한 노력이 점차 증가하는 추세에 있다. 일반적으로 소형원자로는 전력 생산량이

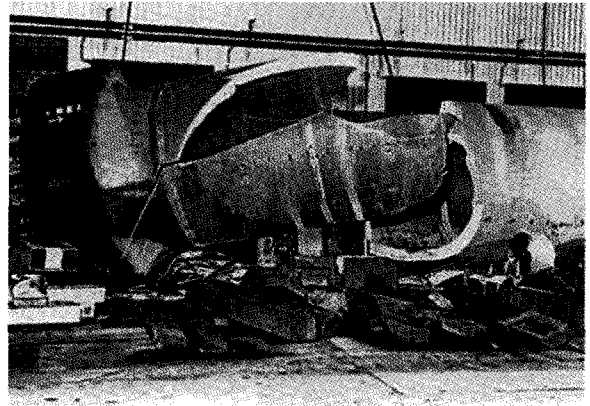
300MWe 이하의 원자로를 말한다. 우리나라는 일찍이 원자력에너지 활용의 다변화에 관심을 가지고 전력기반이 취약한 개발도상국 및 물 부족 지역을 대상으로 소규모 전력생산과 함께 해수담수화를 위한 에너지를 동시에 공급할 수 있는 SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor) 원자로를 우리의 고유 기술로 개발하였다. 현재 개발된 SMART는 열출력 330MWt(전력기준 100MWe) 용량의 가압경수로로서 인구 10만의 도시에 전력과 담수를 동시에 공급할 수 있는 규모이다. SMART 원자로는 소형원자로로 분류되며 지역 및 원거리 전력수요에 대응이 가능하므로 개발도상국을 비롯한 원격 지역이나 전원망 접속이 어려운 지역에 적합한 원자로이다.

일반적인 가압경수로(그림 1 참조)는 원자로를 구성하는 주요기기(증기발생기, 가압기, 냉각재펌프 등)를 분산하여 배치하고 각각의 기기를 대구경의 배관으로 연결하여 원자로 계통을 구성한다. 그러나 SMART 원자로는 기존 상용로와 달리 노심, 증기발생기, 가압기, 원자로냉각재펌프 등이 배관 연결 없이 한 개의 원자로 용기 안에 설치되는 신개념의 일체형원자로로 설계되었으며, 원자로 계통의 단순화와 피동계통의 도입 등을 통하여 원자로의 안전성을 획기적으로 향상시켰다.

원자로의 설계는 관련 원자력법령(그림 2 참조) 및 규제기준에 따라 수행되어야 하며 공공의 안전에 영향을 미치지 않도록 안전성을 확보하였음을 규제기관의 심의를 통해 입증하여야 한다. 원자력발전소의 주요 계통 및 기기에 안전성을 확보하기 위하여 세계 각국은 필요한 법령, 규제지침 및 기술기준을 제정하고 이를 참조하여 원자로 계통을 설계하도록 제도화하고 있는데, 국내에서 참조하고 있는 대표적인 기술기준에는 KEPIC(전력산업기술기준)과 ASME 등이 있다. SMART 원자로 계통의 모든 기기는 기술기준에 따라 설계, 제작, 시공 및 품질관리가 수행되어야 하며 원자로 계통의 압력경계를 구성하는 기기에는 최고 수준의 설계와



출처 : <http://www.aukevisser.nl/t2tanker/id484.htm>
 그림 3 파손 사례



출처 : <http://www.theiiwmumbai.8m.com>

품질관리가 요구된다. 원자로 구조물의 설계에서 가장 중요한 요소는 고온, 고압의 운전 조건과 방사선 환경에서 60년 이상의 설계 수명을 보증하는 것이다.

특히 원자로 용기의 경우 방사능 물질이 외부로 유출되는 것을 막는 방호용기역할을 수행하며, 정상운전과 사고 시 발생하는 하중에 대하여 노심과 각종 기기들을 보호하며 내부에 장치된 부품을 지지하는 역할을 수행하는 구조물로서, 엄격한 법규 및 기준(KEPIC 원자력 1등급 기기)에 따라 설계되어야 한다. 일반적으로 원자로용기의 설계는 간편한 공식과 도표를 적용하여 설계제원을 결정하는 ‘공식에 의한 설계(design by formula)’ 방법과 함께 ‘해석에 의한 설계(design by analysis)’ 방법에 기초하여 수행된다. ‘해석에 의한 설계’는 최근 비약적으로 발달한 CAD/CAE 기술을 직접적으로 적용할 수 있으나 ‘입증된 기술(proven technology)’의 측면에서 충분한 유효성과 보수성이 입증된 방법만이 사용된다. 아울러 설계수명 기간 동안의 방사선과 원자로냉각재의 수화학 환경으로 인한 원자로용기 재료의 열화 특성과 운전 기간 동안 발생할 수 있는 과도상태(transient condition)를 반영한 설계 여유가 원자로용기 설계에 보장되어야 한다.

파괴역학적 접근법

수세기 전까지 인간은 한정된 소재와 시행착오를 통해 이루어진 설계경험에 의존하여 구조물을 설계하였다. 물론 대부분의 구조물은 외부의 충격으로부터 인간의 소중한 재산과 생명을 지킬 수 있도록 파괴나 붕괴와 같은 재난을 피할 수 있는 설계 개념이 포함되었다. 고대 로마인들은 새로 건설한 다리를 시험할 경우, 새 다리 위로 마차가 지나가는 동안 다리 아래에 설계 기술자를 서 있도록 요구하였다고 한다. 이는 고대에도 파괴 방지를 위한 설계가 사회, 정치적으로 중요했음을 보여주는 일화이다. 파괴 하중과 결함 크기 사이의 정량적인 관계는 1920년 Griffith에 의해 유리와 같은 이상적인 취성재료에 대해 처음으로 수립되었으며, 본격적인 파괴역학의 발달은 제2차 세계대전 중 Liberty 수송선에 발생한 취성파괴의 원인을 밝히는 과정에서 시작되었다. 이 배들은 선체를 모두 용접 가공으로 건조함으로써 그 당시 리벳 설계보다 매우 저렴한 비용으로 더 빨리 건조할 수 있는 혁신적인 방법으로 설계되었다. 그러나 그 당시 변경된 설계에는 오늘날과 같은 결함을 고려한 파괴역학적 기법이 반영되지 못하였다. 제2차 세계대전 이후 파괴인성이 개

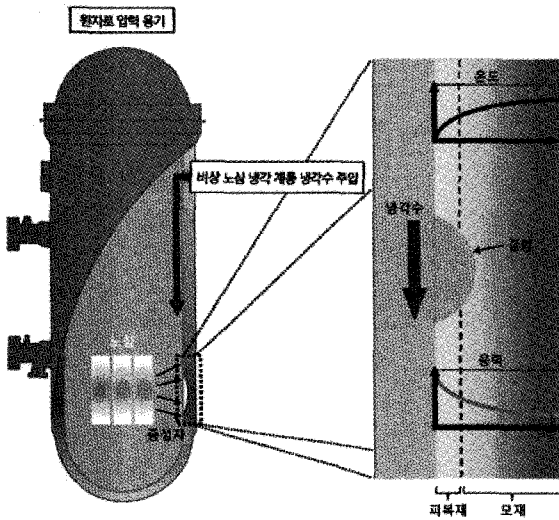


그림 4 원자로 용기의 중성자조사 취화

선된 구조용 강이 개발되었고, 용접 품질을 관리하는 규격도 발달하였다. 또한 워싱턴에 있는 해군연구소에서는 파괴 문제를 본격적으로 연구하여 현재 파괴역학 분야의 근간을 탄생시켰다.

파괴역학의 발달은 점차 산업 전반에 걸쳐 확대 적용되었으며, 특히 대용량 및 고온·고압조건에서 압력용기를 사용하는 석유화학플랜트 분야와 원자력 분야에 파괴역학을 고려한 설계가 적용되고 있다.

적용 사례

원자로용기의 건전성은 용기설계와 재료특성에 의해 주어진 하중부담능력과 발전소 운영 중 발생할 수 있는 실제 하중 사이의 여유도에 의해 보장된다. 따라서 원자로용기는 설계 시 필요한 여유도를 예측하고 이를 반영하여 엄격한 법규 및 기준에 따라 설계 및 제작되어야 한다. KEPIC과 ASME는 방사선 및 수화학 환경으로 인한 재료의 대표적인 열화현상 중의 하나인 중성자조사에 의한 재료의 취화현상에 대한 정성적 및 정량적인 평가를 원자로용기 설계에 고려하도록 제도화하고 있다. 이와 같은 규정에 의해 제작 사용되는 원

자로용기는 원자로의 가동연수가 증가함에 따라 중성자 조사로 인하여 재료의 강도와 경도가 증가하고, 연성과 인성이 감소하는 조사취화 현상이 나타나 파괴 저항성이 감소하게 된다. 이러한 조사취화가 계속 진행되어 기준무연성 천이온도 값이 상승하면 관련법규에서 요구하는 안전여유를 만족할 수 없으며 더 이상 발전을 정상적으로 운전할 수 없게 된다. 따라서 원자로용기의 전수명기간 동안 가동연수에 따른 조사취화량을 측정하고 이를 평가하여 취화된 재료성질을 고려한 비연성 파괴방지 안전 운전곡선인 압력-온도한계곡선을 작성하고 조사취화에 따라 조사량감축계획을 실시하여 운전상태를 제한하게 된다. SMART 원자로의 경우, ASME 코드 요건에 따라 원자로용기 내에 가상 표면균열을 고려하여 구조적 건전성이 보장되는 최대 압력과 최소온도를 보장하는 제한 곡선을 탄상파괴역학 개념을 적용하여 생산하였다.

또 하나의 사례는 허용 압력-온도한계를 초과하는 경우로 가압열충격이 이에 해당한다. 현재 원자로용기의 구조건전성을 평가하기 위한 여러 가지 절차와 방법론이 원자로의 형태에 따라 일부 국가에서 제시되어 적용 중에 있다, 그 예로 미국 원자력규제위원회(USNRC)에서는 원자로용기의 안전성에 대한 규제의 필요성을 인식하고 평가지침을 법제화하였다. 그러한 법규 중 10 CFR 50.61은 원자로용기의 가압열충격 방지요건에 관한 규정이다. 비상운전조건 중 하나인 가압열충격은 내압이 유지 또는 재상승하는 상태에서 과도한 냉각이 발생하는 사고를 의미하며, 이는 대형 냉각재 상실사고시의 단순한 열충격 문제와는 달리 과도한 냉각으로 인해 용기내벽에 존재하는 균열이 비선형 파괴거동을 나타낼 수도 있다. SMART 원자로의 경우 규제지침서에 따라 노심대 재료에 대한 구리 함량을 제한하기 위해 수명말기에서 원자로용기 내벽으로부터 특정위치에 대한 조사 후 무연성천이온도가 200°F 미만이 되도록 설계를 하였다.