

제4세대 원자력시스템 소듐냉각 고속로의 설계 특성

이 글에서는 제4세대(Generation-IV) 원자로시스템의 자원활용 측면에서 핵연료 주기와 관련하여 새롭게 부각되고 있는 소듐냉각고속로(SFR: Sodium-cooled Fast Reactor)의 개발 목적 및 설계 특성을 기술하고 원자로 구조관점에서 가압경수로(PWR)와 비교 설명한다.

이재한 한국원자력연구원 책임연구원

e-mail : jhlee@kaeri.re.kr

소듐냉각고속로 개발 목적

제4세대 원자로시스템 6개 후보노형 중에서 소듐냉각고속로, 가스냉각고속로, 납합금냉각고속로 등 3개 노형이 고속로이다. 제4세대 원자로 노형 중 현재 가장 먼저 상용화가 예상되어 연구개발이 활발하게 이루어지고 있는 노형은 소듐냉각고속로이다. 소듐냉각고속로의 주요 기술목표는 표 1에서 보는 바와 같이 자원의 지속성, 핵확산저항성, 경제성향상, 고유안전성 등이다.

소듐냉각고속로는 핵분열에 고속중성자를 이용하는 방식으로 핵연료 증식 특성이 있어서 원자력발전

의 초창기부터 우라늄 자원의 효율적 이용이라는 측면에서 개발되었다. 세계적으로 소듐냉각고속로를 개발 중에 있거나 운전 중에 있는 국가는 표 1에 나타난 바와 같다.

경수로를 가동하고 있는 우리나라를 포함한 자원 부족 국가에서의 소듐냉각원자로는 세 가지 목적으로 개발이 이루어지고 있다. 첫째 경수로 사용후연료의 재사용(Reuse), 둘째 사용후연료 폐기물량 및 관리기간 축소(Reduce), 셋째 재순환(recycle)을 통한 연료 활용성의 획기적 향상으로 자원지속성 확보 등으로 그림 1에 나타난 바와 같다.

표 1 소듐냉각고속로의 개발 중 또는 운전 중에 있는 국가의 현황

Gen-IV 원자로 시스템 기술목표								
지속성 확보	핵확산저항성 확보		경제성 향상		안전성 입증			
<ul style="list-style-type: none"> • 자체순환로 CR:1.0-1.3 • 연소로 CR:0.5-1.0 	<ul style="list-style-type: none"> • 임계질량 ↓ • 열생성률 ↑ • 핵분열물질 농축도 ↓ 		<ul style="list-style-type: none"> • FOAK - 4 ¢/kWh - 2,000 \$/kWe 		<ul style="list-style-type: none"> • CDF < 10⁻⁴/R·Y • 사고시 3일 이상 대처 허용시간 			
	한국	일본	프랑스	미국	영국	러시아	중국	인도
SFR 가동 경험 (가동예정시기)		Joyo Monju (2010)	Rapsodie Phenix S-Phenix	FFTF EBR-II	DFR PFR	BOR60 BN-600 BN-800 (2012)	CEFR (2010)	FBTR PFBR (2012)
SFR 건설 계획	KALIMER (2028)	JSFR (2025)	ASTRID (2020)	S-PRISM		BN-1200 (2020)	CDFR (2018)	CFBR (2023)

이러한 장점을 살리기 위해서는 핵물질의 무기화가 근본적으로 차단되는 핵확산저항성 특성과 사고 확률이 매우 낮아 주민이 위협에 노출되지 않는 높은 안전성과 사업자의 투자를 유도할 수 있는 경제성의 확보가 전제되어야 한다.

소듐냉각고속로의 구조적 특성

소듐냉각 원자로시스템은 경수로와는 달리 원

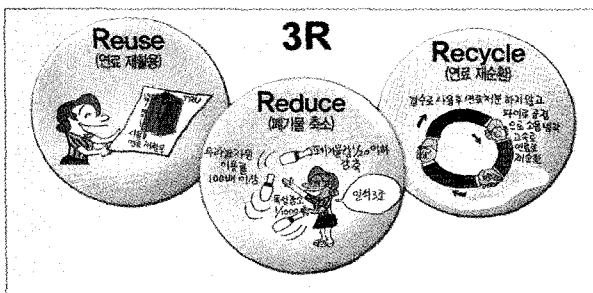


그림 1 소듐냉각고속로와 파이로연료공정의 유용성

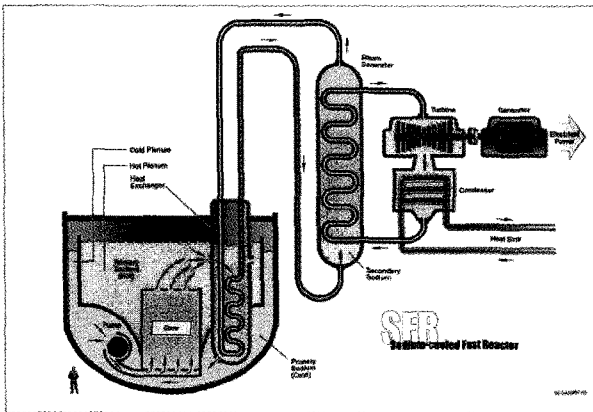


그림 2 플형 소듐냉각고속로

자로에서 발생한 열을 증기발생기로 보내는 과정에 그림 2와 같이 중간열전달계통(IHTS: Intermediate Heat Transport System)을 추가적으로 갖고 있다. 이는 소듐과 물이 만나면 급격히 열을 발생시키는 화학반응을 하기 때문에 노심을 지나는 1차 소듐 냉각재가 어떠한 사고에서도 직접 물과 접촉하는 것을 방지하기 위한 것이다. 1차 냉각계통은 원자로용기 내부에 위치하는 노심, 중간열교환기(IHX), 1차 소듐펌프, 노심 입구 배관 등으로 구성된다.

기기설계 관점에서 보면 소듐냉각고속로와 경수로의 구조적 차이는 원자로에 가해지는 지배하중이 무엇인가에 따라 원자로의 구조형상이 결정된다. 즉 소듐냉각고속로에서는 경수로의 고압환경과 비교하여 대기압 수준의 낮은 압력에서 운전되지만, 반면에 500°C 이상의 고온조건에서 운전된다. 이로부터 구조물에 발생하는 온도차에 따른 열응력이 커지고, 고온 환경에 따른 재료항복강도의 저하에 따라 탄소성 변형 및 크리프 손상이 발생할 수 있다. 그러나 운전압력이 낮아 1차 응력이 작기 때문에 기기구조물의 단순 변형 또는 크리프에 의한 손상 가능성보다는 반복된 열하중에 따른 라체팅 변형과 크리프-피로 혼합손상이 주된 손상모드가 된다.

또한 소듐냉각고속로 구조 설계에서는 고온 저압 환경에서 열응력을 줄이기 위해 원자로용기 등 구조물의 두께가 경수로에 비해 매우 얇기 때문에 지진하중의 영향이 커진다. 그림 3은 경수로와 소듐냉각고속로에 발생하는 압력과 열과도 등 주요지배 하중과 주요

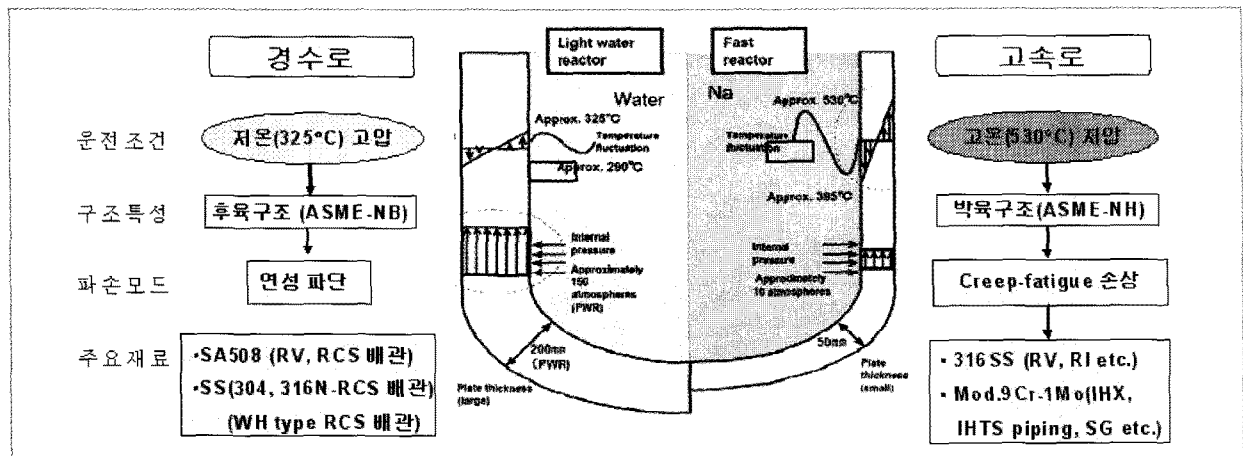


그림 3 소듐냉각고속로와 가압경수로의 구조 특성

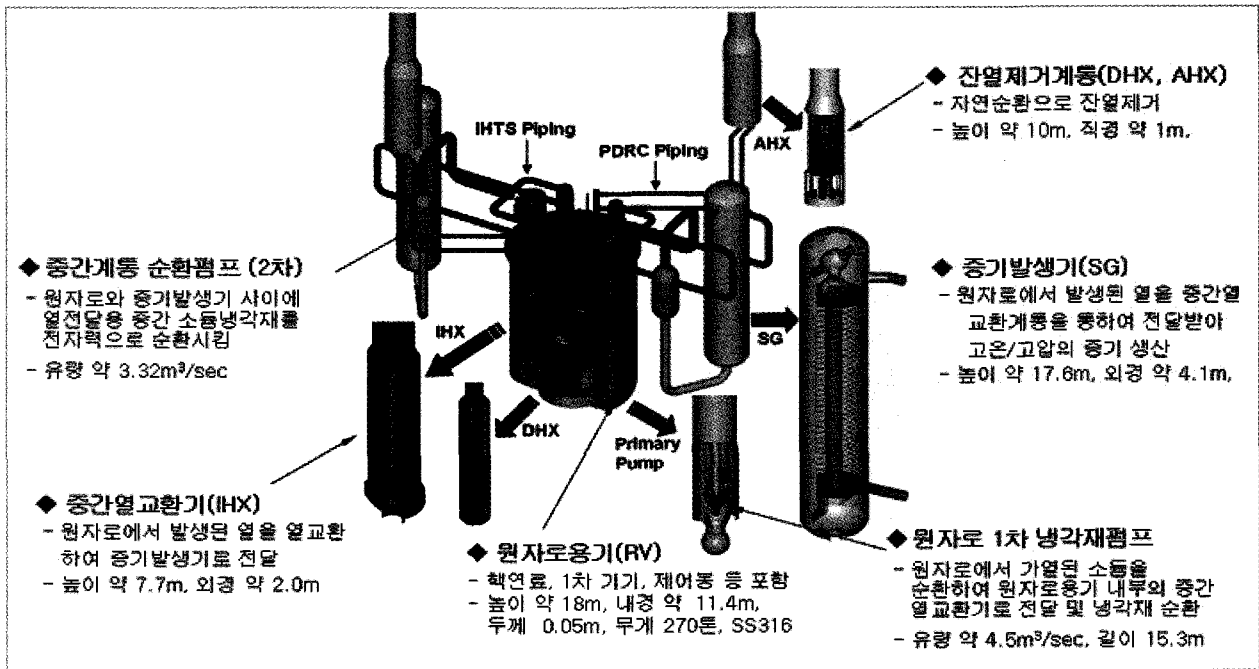


그림 4 KALIMER-600 원자로계통 개념

재료, 적용코드를 비교하여 나타낸 것이다.

풀형 소듐냉각고속로에서 원자로계통 구조물의 기본적인 기능은 다음과 같다. 원자로용기(RV)는 1차 압력경계가 되어 1차 소듐을 담고 있으며, 원자로용기 내에 노심과 내부구조물, 1차 소듐펌프, 중간열교환기, 잔열제거용 열교환기, 연료교환기 등이 설치되어 있다. 원자로용기에 대한 크리프-피로와 라체팅 등의 열손상 방지를 위해 원자로베플에 의해 고온소듐을 원자로용기로부터 격리하거나 원자로용기 안쪽에 저온냉각재를 흘려준다.

원자로 하부내부구조물은 원자로 내의 노심과 원자로기에 대한 구조적 지지 및 고온 냉각재 유로를 제공한다. 상부내부구조물은 고온 노심출구 소듐에 의한 유동기인진동으로부터 제어봉 구동축 보호, 노심 상부에 위치한 계측기 지지, 노심 출구 소듐의 혼합축진, 노내 핵연료교환기 지지 등의 기능을 한다.

원자로헤드는 원자로용기 내부에 있는 주요기기를 지지하며 기기가 통과하는 공간을 제공한다. 하단부에는 불활성 아르곤 가스층과 차폐절연체가 있어 고온의 소듐냉각재와 접하지 않으며 헤드를 통과하는 기기구멍은 방사선 차폐를 위한 단층구조로 되어 있고, 기기밀봉 기능도 갖는다.

핵연료 교환은 경수로와 달리 소듐 냉각재가 공

기와 접촉하면 화재가 발생하기 때문에 원자로헤드를 개방하지 않고 불활성 가스로 밀봉된 상태에서 수행된다. 핵연료를 교환하기 위해서는 노심 상단에 위치한 상부내부구조물을 피해서 핵연료 취급장치가 기구학적으로 노심집합체 상단에 수직으로 접근할 수 있도록 설계 된다.

그림 4는 Gen-IV SFR 후보노형으로서 한국 원자력연구원에서 개념설계가 수행된 600MWe 용량의 KALIMER-600의 원자로계통 개념도이다. 금속연료를 사용하는 풀형 원자로로 2-루프 중간열전달계통을 채택하고 있는 Gen-IV 원자로 주요 기술목표에 접근하는 개념이다.

소듐냉각고속로의 지진설계 특성

최근에 설계 중인 소듐냉각고속로에는 대부분 수평 면진장치를 적용하고 있다. 면진장치는 일반적으로 고무와 강판을 교차적층하여 제작함으로써 수직강성은 높고 수평강성은 낮다. 이의 채용에 따른 이점은 건물에 전달되는 수평방향 지진에너지를 차단하는 것으로서 이를 통하여 구조물의 경량화가 가능하며, 구조적인 건전성이 향상된다. 면진장치가 갖추어야 할 요건은 원하는 면진주파수 범위(0.5Hz~1.0Hz)를 맞추어

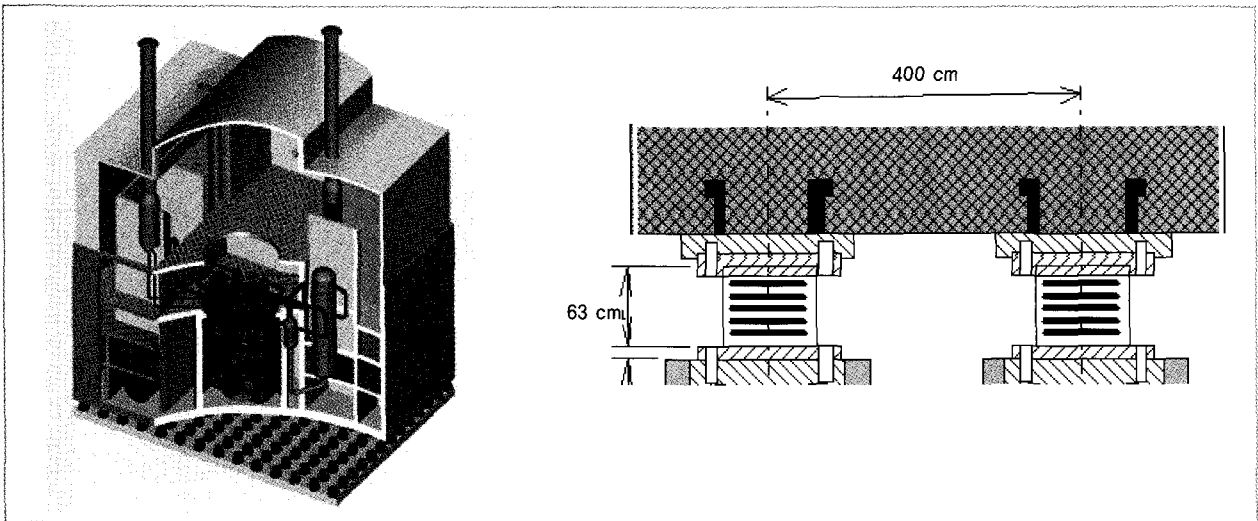


그림 5 원자로건물 및 면진베어링 설치 개념도

주는 강성과 지진에너지를 흡수하는 충분한 감쇠(12%)를 갖는 것이다.

우리나라에서 개발 중인 소듐냉각고속로의 원자로건물 크기는 그림 5와 같이 길이 49m, 폭이 36m, 높이가 55m로 개념설계 되었다. 면진층과 비면진층 사이의 간격은 기존 설계와 같은 1.2m를 유지하였고, 면진베어링은 176개를 배치하였다. 이들 면진베어링은 주로 수직벽 하부에 위치한다. 이와는 별도로 연료 이송, 저장 및 취급계통 건물도 동일한 면진개념을 도입하였다. 두 건물 사이의 연결은 고정식이 아닌 유연한 연결 구조물을 설치하여 지진에 의한 상대 변위를 흡수하도록 설계한다.

소듐냉각고속로 개발 방향

소듐냉각고속로의 상용화를 막고 있는 문제로는 여러 가지가 있다. 첫째로 원자로와 증기발생기 사이의 중간열전달계통의 설치, 둘째 소듐이 존재하는 배관계통 및 소듐기기에 대한 소듐 고화를 방지하는 소듐 예열계통과 소듐과 공기를 분리하는 아르곤 가스계통 설치, 셋째 소듐-물 반응에 대비한 보호계통으로 소듐화재 진

압용 질소 가스계통, 소듐과 보호가스의 순도를 유지하기 위한 불순물 제거용 정화계통, 넷째 고온 환경에서 구조물을 보호하는 열차단 라이너 등 경수로에 없거나 확연히 차이나는 설비·계통이 추가된다.

이러한 문제점들로 인해 경수로와 동일 개념을 사용할 경우 소듐냉각고속로의 경제성이 낮아진다. 소듐냉각고속로의 경제성을 향상시키는 방안으로 Supercritical CO₂ Brayton 사이클터빈 사용, 중간열전달 계통의 삭제 등 기술적으로 기존 개념과 확연히 다른 혁신 개념에 대한 연구가 있다. 더불어 보다 현실적인 접근 방법으로는 기존 개념을 개선하는 항목으로 원자로 및 건물크기 축소, 루프수 최소화, 간결한 내부기기 배치, 통합기기 및 대형화 기기 개발, 경제적 가동중 검사 방법 개발, 증기발생기 이중벽튜브 채택 등이 제시되어 연구되고 있다.

이러한 연구개발은 많은 비용이 들어가고 성공가능성을 확신할 수 없기 때문에 각국이 공동으로 또는 독자적으로 미래에너지 자원 확보차원에서 활발하게 수행 중이며, 국내는 교육과학기술부 미래형원자력시스템 개발 중장기과제로 한국원자력연구원을 중심으로 연구개발이 수행되고 있다.