

소듐냉각 고속로 원자로기기 설계 및 평가 기술

이 글은 소듐냉각 고속로에 대한 개발 현황과 핵연료주기와 관련하여 새롭게 부각되는 원자로개발의 목적을 기술하고, 원자로의 열전달 계통과 운전 지배하중에 따라 가압경수로와 달라진 원자로 구조 특성, 불투명 소듐냉각재 환경에서의 내부구조물 검사방법과 경수로에서 다루지 않았던 500°C 이상 고온구조물 비탄성거동 및 건전성 평가방법에 대해 소개한다.

소듐냉각 고속로 개발 현황

소듐냉각 고속로(SFR : Sodium Fast Reactor)는 핵분열에 고속중성자를 이용하는 방식으로 핵연료 증식특성이 있어서 원자력발전 초창기부터 우라늄 자원의 효율적 이용이라는 측면에서 개발되었다. 미국을 제외한 다른 나라에서는 경수로 및 농축기술의 미국 의존 탈피를 위해 개발된 측면도 있다. 현재까지는 고농축 우라늄 사용에 관련된 핵확산문제와 경제성이 좋지 않아 경수로가 주된 상

업발전용 원자로가 되었다. 최근에 들어서 제4세대(Generation-IV) 원자로시스템개발 프로그램에 나타난 바와 같이 증식을 통한 우라늄 자원의 충분한 활용과 초장수명 방사성 핵종의 소멸 처리 및 핵무기용 플루토늄 연소용 원자로의 활용가능성으로 고속로가 다시금 주목을 받고 있다. 지속성, 경제성 향상, 핵확산저항 특성, 고유안전성이 강조된 소듐냉각 고속로의 노형개발이 진행되고 있다.

미국은 신형 핵연료주기와 원자로 개발을 위한 주요 프로그램으로 Advanced Fuel Cycle

Initiative(AFCI)와 Gen IV 프로그램을 수행 중이다. 프랑스는 Phenix 원자로의 최종 개선 작업을 2003년에 완료하고, 총 6 주기 동안 핵변환 연구를 수행한 후 최종적으로 2010년에 운전을 종료하게 된다. 프랑스의 고속로 개발은 폐쇄 핵연료주기와 연계한 소듐냉각 고속로와 가스냉각 고속로를 대상으로 하고 있으며 2020년까지 노형 선정을 완료하고 2040년까지 상용화를 목표로 하고 있다. 일본은 실험로 JOYO의 조사시험 성능 향상을 위해 출력을 140MWth로 높인 MK-III 노심구성을 마치고 전 출력 운

소듐냉각 고속로의 열전달 계통

소듐냉각 원자로시스템은 경수로와는 다르게 2차 열전달 계통을 갖고 있다. 이는 소듐과 물이 만나면 화학반응을 하기 때문에 1차 소듐냉각재가 어떠한 상황에서든 직접 물과 접촉하는 것을 방지하기 위해서 중간열교환기를 통하여 1차 소듐과 2차 소듐 냉각재 간의 열전달이 이루어지는 중간계통(IHTS : Intermediate Heat Transfer System)을 추가로 사용한다. 1차 냉각계통은 노심지역, 중간열교환기(IHX), 소듐순환펌프, 연결배관들로 구성된다. 소듐냉각 고속로의 유형에는 이들 기기의 연결방식에 따라 루프형과 풀형 등 두 개의 대표적 노형이 있다. 루프형은 그림 1과 같이 중간열교환기와 1차펌프가 원자로용기 밖에 존재하고 원자로용기와 이들 기기 사이는 배관으로 연결된다. 풀형은 그림 2와 같이 모든 1차 계통 기기는 소듐으로 채워진 원자로용기 내부에 있다. 풀 내부에 있는 펌프 출구에서 노심 입구까지에만 짧은 배관이 사용된다. IHX를 통과한 냉각재는 원자로용기 안의 소듐풀로 방출되고, 펌프는 소듐풀에서 냉각재를 가져온다. 양 설계개념에서 노심에서 방출되는 방사선으로부터 구조물의 조사취화를 방지하기 위한 차폐체를 설치한

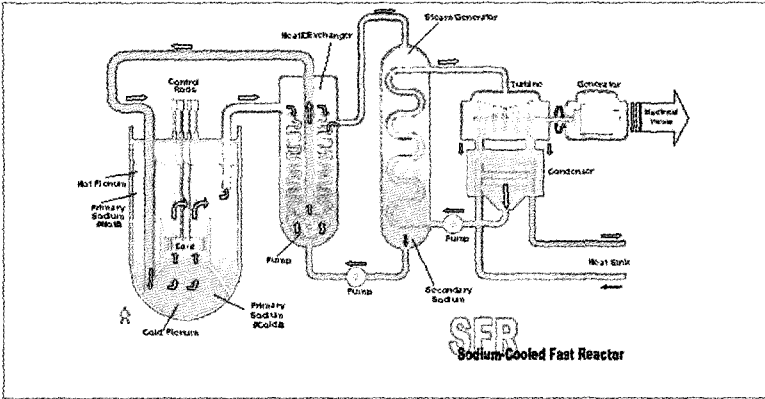


그림 1 루프형 소듐냉각 고속로

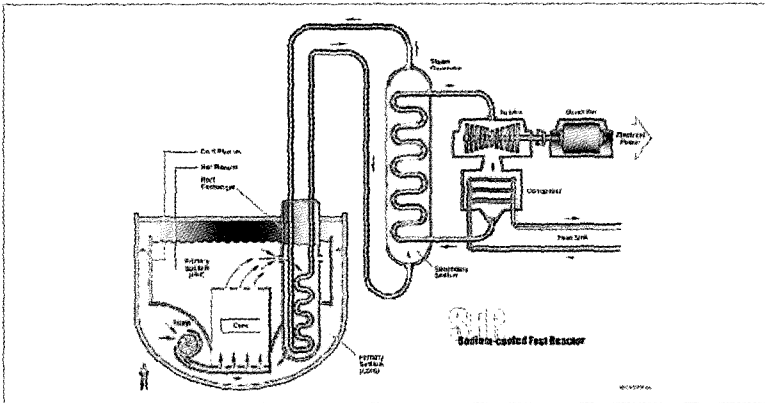


그림 2 풀형 소듐냉각 고속로

전 중이다. 소듐냉각 원형로 문주 (Monju)는 1995년 12월 소듐냉각 누출사고 이후 가동 중단 상태에 있었으나 2005년 후쿠이현 지사가 문주 재가동을 위한 보수에 동의하여 2008년에 임계에도달할 계획이다. 러시아는 BOR-60이 2009년까지 운전될 계획이며, BN-800 원자로는 원자로 건물이 완성되어 2012년에 완공될 계획이다. 중국은 65MWth 소듐냉각 실험로 CEFR을 건설 중에 있고, CEFR

후속으로 600MWe급 소듐냉각 원형로 CPFTR을 2020년에 완공할 계획이다. 인도는 13MWe급 소듐냉각 실험로 FBTR을 운전 중이며, 500MWe급 소듐냉각 원형로 PFBR 건설이 진행되고 있다. 우리나라에서는 원자력 발전의 증가로 우라늄 자원의 효율적인 활용뿐만 아니라, 사용 후 핵연료의 저장 및 처분량 저감방안으로서 소듐냉각 고속로 연구 개발의 중요성은 증대될 것으로 판단된다.

다. 두 노형 설계는 각각 장단점을 갖고 있기 때문에 어느 원자로 노형이 일반적으로 우수하지 않다.

소듐냉각 고속로 기기 설계

기기설계 관점에서 소듐냉각 고속로와 경수로의 차이는 원자로에 가해지는 지배하중이 무엇인가에 따라 원자로의 구조형상이 결정되고 있다. 즉 소듐냉각 고속로에서는 경수로의 고압환경과 비교하여 압력이 낮은 대기압에서 운전되지만 500℃ 이상의 고온 운전환경을 갖고 있다. 이로 부터 구조물에 발생하는 온도차에 따른 열응력이 커지고, 고온에 따른 재료항복강도의 저하에 따라 탄소성 및 크리프 변형이 쉽게 발생한다. 그러나 운전환경을 보면 압력이 낮아 1차 응력이 작기 때문에 연성파괴와 단순 크리프 손상 가능성이 높지는 않다. 이 때문에 반복 열하중에 따른 라체팅 변형과 크리프-피로 손상이 SFR 기기에 나타나는 주된 손상모드가 된다. 열응력을 줄이기 위해 원자로 용기의 두께가 경수로에 비해 매우 얇기 때문에 지진이 지배적인 하중이 된다. 그림 3에는 일반적으로 경수로와 소듐냉각 고속로에 발생하는 압력과 열과도 등 주요 지배 하중을 비교하여 나타낸 것이다. 다양한 열과도 하중에서 열성장과 열

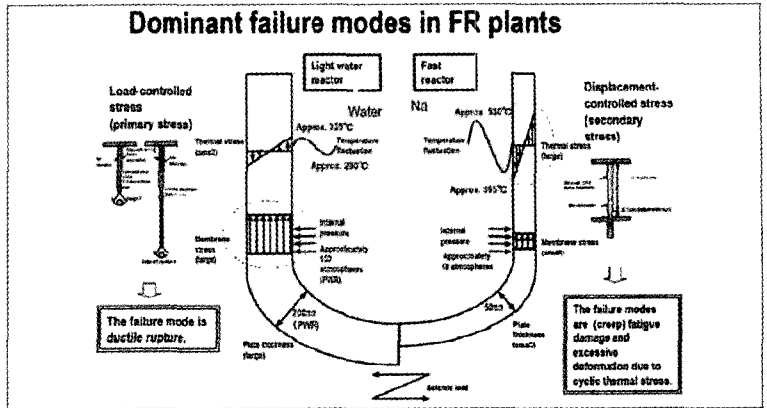


그림 3 소듐고속로와 가압경수로

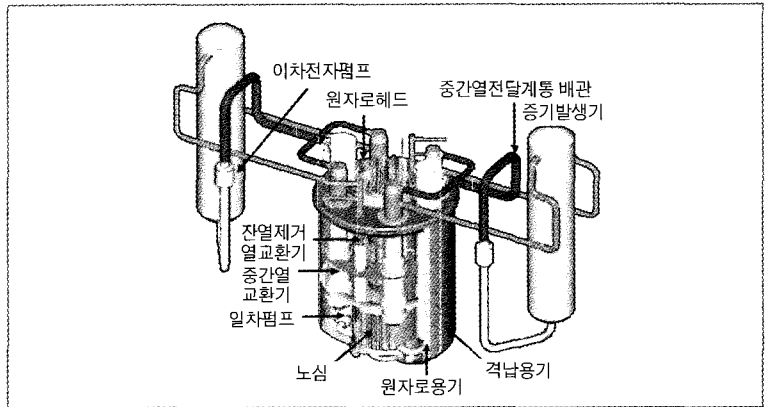


그림 4 KALIMER-600 원자로계통 개념

스트라이핑은 액체소듐이 갖는 고열전도도와 시스템에 발생하는 큰 온도차에 의해서 구조관점에서 심각한 현상이다. 이들 열하중은 운전 중에 반복되어 크리프-피로균열과 라체팅변형에 의한 손상으로 진행할 수 있다.

그림 4는 GEN-IV 후보노형으로 한국원자력연구소에서 개발 중인 KALIMER-600의 개념도를 나타낸 것이다. 원자로 하부 지지물은 원자로 내의 노심과 원

자로 기기에 대한 구조적 지지를 해준다. 상부내부구조물(UIS : Upper Internal Structure)은 원자로 노심을 제어하는 제어봉의 지지와 측정센서를 안내하는 구조물로서 제어봉 구동축의 수평지지, 소듐 유체기인진동으로부터 제어봉 구동축 보호, 노심 상부에 위치한 계측기 지지, 노심에서 방출되는 소듐의 혼합축진, 노내 핵연료교환기 지지 등의 기능을 한다. 원자로 내부구조물은 원

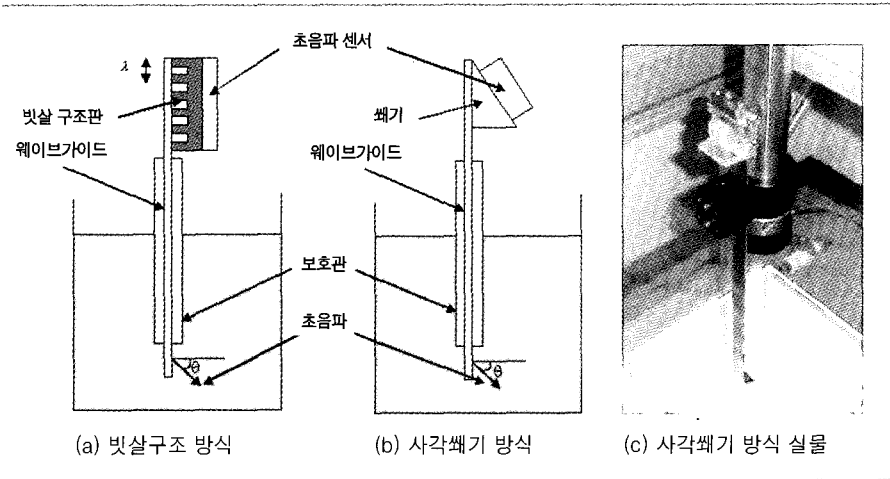


그림 5 웨이브 가이드 초음파 센서 개념 및 모형

자로기기 지지와 원자로 내부에 존재하는 고온 및 냉각재유동 하중에 잘 견디도록 한다.

500°C 이상의 고온에서 운전되는 소듐냉각 고속로는 고온 과도운전하중에 의해 원자로용기(RV)와 내부구조물에 크리프-피로와 라체팅 등의 열손상이 점진적으로 발생할 가능성이 있다. RV 열손상 방지구조 개념에는 원자로 배플에 의한 고온소듐 단일격리방식과 thermal baffle을 원자로 배플 안쪽에 추가로 설치하는 고온소듐 다중격리방식, 그리고 원자로용기 안쪽에 저온냉각재를 흘려주는 방식 등이 있다. 원자로 헤드는 원자로 기기를 지지하며 기기가 통과하는 여유 공간을 제공한다. 헤드를 통과하는 기기구멍은 방사선 차폐를 위한 단층 구조로 되어 있고, 기기밀봉 기능도 갖고 있다.

핵연료 교환방식은 원자로 헤드의 공간제약성, 노심연료집합체의 접근성, 구동 메커니즘의 복잡성 등에 따라 몇 가지 방식을 선택할 수 있다. 핵연료를 교환하기 위해서는 노심 상단에 위치한 상부내부구조물이 방해가 된다. 이를 피해서 핵연료 취급장치가 노심집합체 상단에 수직으로 접근하는 것이 필요한데, 접근방식에 따라 여러 가지 교환방식이 있다. 원자로헤드의 공간 제약성이 중요한 설계 요소이며, 제어봉의 배치에 따른 핵연료 접근성을 우선 해결해야 한다.

소듐냉각 고속로의 격납 설계 하중은 소듐 누설로 인한 화재와 중대사고이며, 경수로와는 달리 소듐-물 반응의 영향으로부터 격납경계 안에 위치한 계통을 격리하기 위해 증기발생기를 격납경계 밖에 두는 것이 일반적이기

때문에 주증기관 파단하중은 격납설계에 고려되지 않고 또한 냉각재 상실 시에도 가압 경수로로는 사고압력이 높음에 비하여 소듐 화재로 인해 압력이 미량만 증가하게 되어 경수로의 격납과 많은 차이가 있다.

최근에 설계 중인 액체금속로에는 대부분 수평면진시

스템을 적용하고 있다. 수직면진은 일부 원자로에 채택하고 있으며, 수직면진방식은 건물 전체에 대한 수직면진을 도입하는 경우와 개별 기기에 대한 수직면진을 적용하는 경우로 나눌 수 있다. 면진장치 채용에 따른 이점은 건물에 전달되는 지진에너지를 차단하는 것으로 이를 통하여 면진구조물의 경량화가 가능하며, 구조적인 건전성이 향상된다. 건물 전체를 단일층으로 면진할 경우 건물이 단일 회전운동을 하므로 건물 길이(폭)가 긴 경우에 각 기기가 가질 수 있는 회전각은 작다. 3차원 면진장치가 갖추어야 할 요건은 원하는 면진주파수(0.5Hz~1.5Hz)를 맞추어 주는 수직강성과 지진에너지를 흡수하는 충분한 감쇠(12%)를 갖는 것이다. 강성과 감쇠를 구현하는 장치는 여러 종류가 있는데, 두 개를

하나의 장치에서 구현하는 통합형 방식과 강성과 감쇠를 각각 독립적으로 구현하는 분리형 장치가 있다.

소듐환경 변형 및 결함 탐지방법

소듐냉각 고속로는 불투명한 소듐 냉각재를 사용하기 때문에 가동 중 검사에서 광학적인 육안 검사가 불가능하여 원자로 내부 구조물들의 변형과 손상을 감지하는 방법으로 초음파를 이용한 소듐내부 가시화(USV : Under-Sodium Viewing) 검사기술을 개발하고 있다. 소듐내부 가시화 검사기술은 큐리 온도가 높은 압전소자를 사용하여 제작된 초음파 센서를 이용하는 방법과 고체봉과 같은 도파체(wave guide)를 적용한 웨이브 가이드 센서를 이용하는 방법이 있다. 그림 5에서 웨이브 가이드 센서를 활용한 개념을 나타낸 것으로 탐지영역에 반사체가 존재하게 되면 초음파신호가 반사하게 되고, 수신된

반사신호를 처리하여 소듐 내의 구조물 형상을 가시화한다. 또 구조물 내면으로 침투하여 반사된 신호로부터 내부 결함을 탐지한다.

소듐이 누설되면 소듐이 물과 반응하여 화재가 발생할 수 있으므로 소듐 경계면의 건전성 확보와 함께 소듐 누설탐지를 위한 연속감시를 적용한다. 액체금속로 가동 중 검사 규정인 ASME XI Div. 3의 요건에 의한 검사방법은 표 1과 같이 요약된다.

원자로기기 건전성평가

고온, 저압 운전환경을 받는 액체금속로 구조물의 지배하중은 고온 열과도 하중과 지진하중이다. 지진하중의 경우는 면진시스템을 도입하여 수평방향의 하중을 상당히 완화시킬 수 있다. 열하중의 경우에는 고온 냉각재가 구조재에 직접적으로 접촉하는 것을 최소화하는 설계를 추구하며 이러한 설계가 불가능한 경우에는 고온영역에 적용되는 ASME B&PV Code Section

III Subsection-NH(이하 ASME-NH) 등의 코드 절차에 따른 기기 구조건전성평가를 수행하여야 하며, ASME-NH의 건전성평가 개략도를 그림 6에 나타내었다. 고온 구조건전성평가 적용절차는 경수로 원자로에 적용하는 ASME B&PV Code Section III Subsection-NB와 완전히 다르며 하중제어 능력에 대한 제한요건을 만족시켜야 하는 외에 수명 동안의 비탄성 변형을 제한요건을 만족시켜야 하고 크리프-피로 손상과 고온 좌굴 요건을 만족시켜야 한다. 현재 1종기기의 고온설계코드인 ASME-NH를 적용할 수 있는 구조재료로는 304SS, 316SS, 2.25Cr-1Mo, Alloy 800H 및 Mod.9Cr-1Mo강이 있으며 볼트 재료로서 Inconel 718이 있다. 이들의 사용온도는 재료별로 다른데 스테인리스강의 경우에는 800°C, Cr-Mo강은 650°C이다. 2종 및 3종기기의 고온설계는 Code Case N-253-9를 적용하고 노심지지구조물은 Code

표 1 가동 중 검사 방법

검사 기기	가동 중 검사 방법
원자로용기, 소듐배관 및 밸브	육안검사(VTM-2), 연속감시
원자로 재부구조물, 격납용기, 판형 및 셸형 지지 구조물	육안검사(VTM-3)
원자로헤드 및 회전플러그, 1차 커버 가스 시스템, 제어봉 구동장치	연속감시
이종용접부	연속감시, 체적검사
용기와 배관의 접합부	표면검사 또는 체적검사

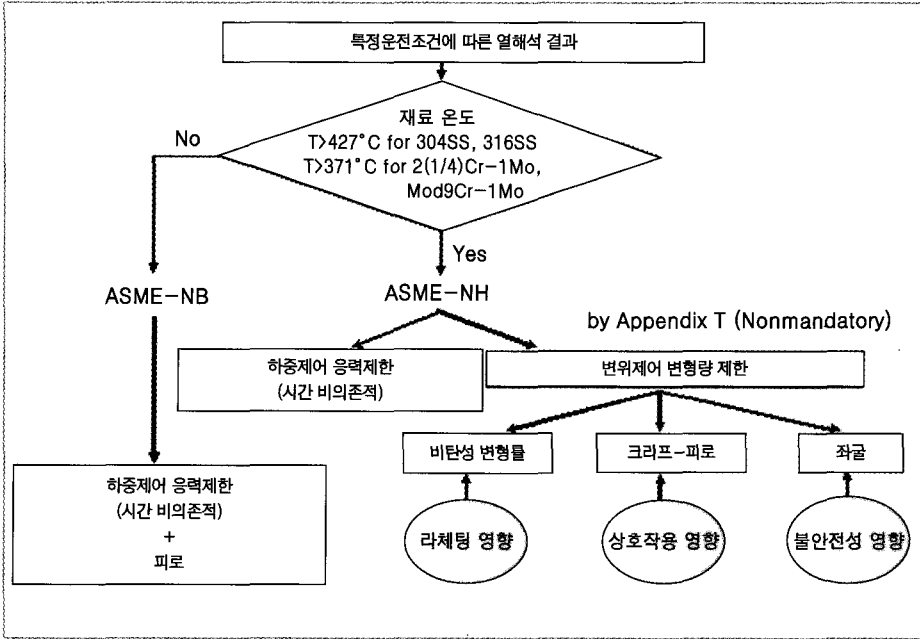


그림 6 ASME Section III Subsection-NH의 건전성 평가 개략도

용하면 그동안 잔류응력은 응력의 재분배로 완화되면서 시간에 따른 변형률의 증가가 발생하여 열과도 하중이 작용하지 않은 경우보다 변형률이 늘어나게 된다. 이렇게 추가적으로 응력의 완화로 인한 크리프 변형률의 증가를 강화 크리프라 한다.

열라체팅은

Case N-201-4를 적용해야 한다. 프랑스와 일본은 ASME 코드를 기반으로 시작해서 독자적인 고온구조 설계코드인 RCC-MR과 FDS를 각각 개발하였으며 영국은 고온구조물 건전성평가코드인 R5를 보유하고 있다.

가. 고온 파손모드 및 특징적 거동

고온 환경에서 구조물의 파손모드는 단기하중에 의한 연성파단과 좌굴, 장기하중에 의한 크라프 파단과 크리프 좌굴, 반복하중에 의한 라체팅과 크리프-라체팅, 및 크리프-피로 손상이 있다. 고온 구조물에 발생하는 비탄성 변형 중에서 대표적인 것은 탄성추종(elastic follow-up), 강화

크리프(enhanced creep), 및 열라체팅(thermal ratcheting)이 있는데 개략적으로 다음과 같은 현상이다.

액체금속로의 불연속 구조물에서 발생하는 특징적인 거동 중의 하나인 탄성추종은 구조적으로 취약한 부위와 강한 부위가 연결되어 있을 때 강한 부위로 인해 취약부위의 비탄성 변형이 더욱 증가하고 응력은 완화되는 현상을 일컫는다. 이때 이차응력 성격인 변위하중이 가해진 경우에도 불연속부 취약 부위의 거동은 일차응력의 성격도 갖게 되어 설계시 주의가 요구된다. 고온에서 일차응력을 받고 있는 상태에 열과도하중이 작용하여 잔류응력이 발생한 뒤에 고온유지시간이 작

530~550°C의 고온 소듐의 자유표면이 상하운동에 의해 소듐을 담고 있는 용기에 소성변형이 누적되는 현상을 가리키며, 일반적인 라체팅은 일차응력과 이차응력의 조합으로 인해 발생하는데 비하여 열라체팅은 일차응력이 없이 이차응력만으로도 라체팅을 유발하는 특수한 거동이다. 반복하중으로 인한 피로와 원자로 가동과 같은 고온 유지시간 동안에 발생하는 크리프가 동시에 발생하면 손상의 가속효과가 나타나게 되어 이를 크리프-피로 손상이라 하며 그림 7과 같은 2직선 평가선도를 적용하여 판정한다. 마지막으로 또 한 가지 중요한 파손모드는 좌굴인데 박막 구조를 많이 사용하는 액체금속

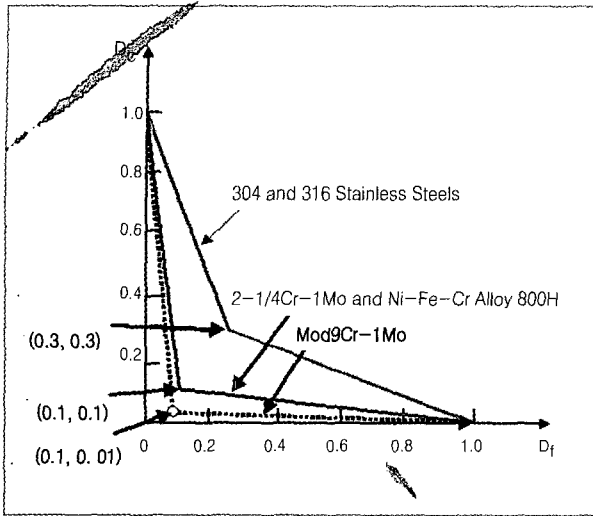


그림 7 크리프-피로 손상 평가도

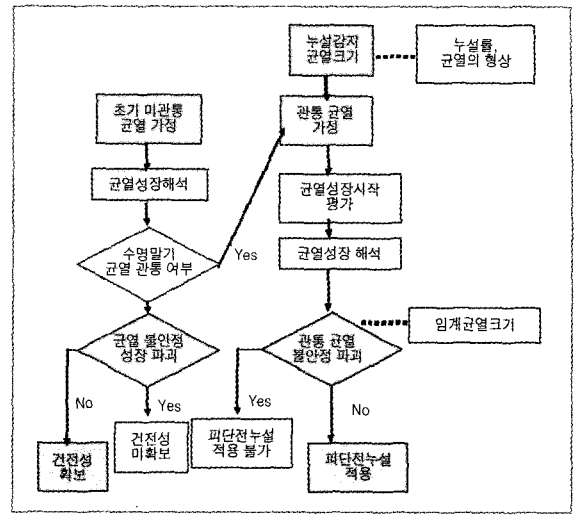


그림 8 고온 파단전누설 평가흐름도

로의 경우 굽힘좌굴, 전단좌굴 및 고온 열좌굴 등이 발생할 수 있다.

나. 비탄성 해석기술 및 고온구조 LBB 평가기술

고온구조물의 비탄성 거동은 소성과 크리프가 복합적으로 발생하기 때문에 해석이 복잡하고 어려워진다. 소성과 크리프를 동시에 모사하기 위해서는 크게 분리형 점소성 해석과 통합형 점소성 해석 등 두 가지 방법이 가능하다. 분리형 점소성 해석은 탄소성 해석과 크리프 해석을 연계하여 사용하는 방법을 나타내고 통합형 점소성 해석은 Chaboche의 통합형 점소성 모델과 같이 소성과 크리프가 별도로 분리되

지 않고 일체로 해석하는 방법을 나타낸다. 현재 ABAQUS ANSYS와 같은 상용 유한요소해석 코드들에서는 탄소성 해석 모델은 많은 발전을 이루었지만 통합형 점소성 모델은 아직도 제공되지 않고 있는 실정이다. 해석모델이 복잡하고 진화함에 따라 사용되는 구성식에서 요구하는 재료상수의 개수가 늘어나서 신뢰성 있는 해석을 위해서는 신뢰성 있는 재료상수의 사용이 중요해지고 많은 양의 실험 데이터가 필요하다.

크리프 손상이 발생하지 않는 400°C 이하에서 운전되는 가압경수로의 설계에는 파단전누설(LBB : Leak Before Break) 기술이 비교적 잘 정립되어 경제

성을 향상시키는 목적으로 사용되고 있는 반면에 액체금속로의 경우에는 안전성의 향상을 위해 고온 파단전누설을 적용하고 있는데 핵심 기술은 크리프-피로 손상에 대한 파괴역학적 평가기술이다. 고온 파단전누설의 전체적인 평가 흐름은 그림 8에 나타나 있는 것과 같이 초기 미관통 균열 또는 누설을 수반하는 관통 균열을 가정하고 고온 균열성장 평가를 수행하여 임계균열로 성장하는지를 평가한다. 균열이 임계크기에 도달하기 전에 누설을 감지하여 필요한 조치를 할 수 있을 때 파단전누설이 성립되는 것이다.