

KALIMER 원자로구조물 및 부품의 파단전누설 개념 적용 연구

On the Application of Leak Before Break for KALIMER Reactor Structures and Components

김종범, 이형연, 유봉

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구에서는 액체금속로 파단전누설 개념의 적용 필요성을 살펴보고 국내에서 개발중인 KALIMER 원자로구조물과 부품들에 적용할 파단전누설 평가절차의 일반사항을 제시하고자 하였다. 기존 경수로에 적용되는 파단전누설 개념과 액체금속로의 경우의 차이점을 비교하고 파단전누설의 적용을 고려하고 있는 KALIMER 원자로 부품을 분류하였다. 그리고 아직 완전히 정립되지 않은 파단전누설 평가기술을 보완하기 위해서 필요한 사항들을 검토하고 앞으로의 연구방향을 제시하였다.

Abstract

In this study, the necessity of leak before break application for Liquid Metal Reactors(LMR) was investigated and the outline of leak before break evaluation procedure for KALIMER reactor structures and components was proposed. Leak before break concept for Light Water Reactors(LWR) and the difference between application for LMR and application for LWR were investigated and the applicable KALIMER reactor components were classified. And the future research and development items necessary for the improvement of leak before break evaluation technique, which is still under development, were proposed.

1. 서론

원자력 발전소는 운전중 발생할 수 있는 모든 사고를 가정하여 모든 구조물과 부품들이 기능을 잃지 않고 또한 충분히 건전성을 확보하도록 설계하는데 이러한 가상 사고들 중에 가상 배관양단 파단(DEGB) 사고가 있다. 배관양단파단을 설계에 고려하므로 동적하중이 커지고 이러한 동적하중으로부터 배관 주위의 구조물과 부품들을 보호하기 위해 많은 수의 배관 휨구속물, 충격방지벽, 부격실 등을 설치하게 되었고 이들을 유지, 보수하는데 많은 비용이 들었다. 그리고 설치된 각종 지지구조물들이 배관의 정상적인 열적거동을 방해함으로써 오히려 배관의 건전성에 나쁜 영향을 미칠 가능성이 있는 것도 일부 알려졌다[1]. 따라서 발전소 사업자들은 이를 배제하기 위해서 배관양단파단에 대한 많은 연구노력을 기울여 배관양단파단이 발생할 확률이 작다는 것을 입증하였고, 미국의 NRC는 1986년 10CFR50 App. A GDC4[2]를 개정하여 만일 배관양단파단 가능성이 극히 낮음을 입증하여 NRC의 승인을 받으면 경수로 주배관 설계에서 배관양단파단으로 인한 동적영향을 배제할 수 있도록 하였고 그 대안으로 파단전누설(Leak Before Break: LBB) 개념을 사용할 수 있도록 하였는데 이는 1987년 모든 배관으로 적용이 확장되었다.

파단전누설 개념 적용의 규제지침으로는 USNRC의 NUREG-1061 Vol.3[3]와 SRP 3.6.3[4]이 있는

데 적용기준은 고에너지 배관에 한정되어 있다. 고에너지 배관은 정상운전조건 압력이 275psig 이상이고 온도가 200°F 이상인 배관인데 액체금속로는 경수로와는 달리 주요 배관의 운전온도는 무척 높지만 운전압력이 이보다 낮고 또한 소듐의 에너지가 경수로의 증기 에너지와 비교하면 1000분의 1 정도이므로[5] 경수로에서의 파단전누설 기준을 그대로 액체금속로에 적용하기 어렵다. 그리고 액체금속로는 운전 압력이 낮고 연성이 높은 오스테나이트계 스테인레스강을 재질로 사용하기 때문에 소듐배관의 임의적인 파단은 발생하기 어렵다고 판단하여[6] 배관의 동적효과에 대비한 구속지지물 설치가 기본적으로는 필요가 없어서 파단전누설 개념의 도입 목적이 경수로 경우와는 다르다.

액체금속로의 많은 경험을 갖고 있는 유럽의 프랑스, 영국, 독일, 이탈리아는 공동으로 DCRC(Design and Construction Rule Committee)를 만들어서 액체금속로의 노심지지 경로의 전손상을 방지하고 소듐화재의 위험을 최소화하기 위한 안전요건을 만족시키기 위해 원자로용기와 이차배관과 같은 주요 부품에 적용할 수 있는 파단전누설 절차를 만드는데 합의하고 지금까지 실험과 해석을 비롯한 여러가지 연구노력을 기울여왔다[7, 8]. 특히 프랑스는 CEA를 중심으로 고온 균열 평가와 액체금속로 파단전누설 개념 적용을 위한 데이터를 생산하기 위해 많은 실험을 수행하였고[9] 이 결과를 토대로 RCC-MR의 부록으로 파단전누설 평가 지침서인 A16[10]을 만들었다.

일본은 액체금속로 원형로 몬주를 개발한 경험이 있는 PNC를 중심으로 안전성 관점에서 유럽의 각국과 협조하여 고온 구조건전성 평가기술을 개발하는데 역점을 두고 액체금속로의 부품과 배관에 파단전누설 개념을 적용하고 가상 소듐누출사건에 대비한 설계조절 능력을 키우고 있다. 미국은 고온환경에서 균열의 발생과 성장에 대해서는 많은 노력을 하고 있지만 액체금속로에 파단전누설 개념을 적용하려는 시도는 유럽이나 일본에 비해 활발하지 않은 것으로 조사되었다.

우리나라는 현재 소듐을 냉각재로 사용하는 액체금속로 KALIMER[11]의 개발을 수행하고 있는데 운전압력은 대기압에 가깝고 운전온도는 530°C 정도의 고온환경이다. 액체금속로의 설계코드들은 일반적으로 원자로구조물에 균열과 같은 결함을 허용하지 않지만, 용접결함과 같은 초기결함이 존재하지 않는다고 완벽한 확신이 서지 않는다면 부품과 기기의 안전성과 신뢰성 측면에서 균열 성장 해석을 수행하여 유체의 누설이 발생하지 않음을 입증하여야 하고 또한 관통균열 발생시에는 균열성장의 안정성을 평가해서 급속한 파단에 이르기 전에 감지해서 운전을 정지시킬 수 있음을 입증하여야 한다. 따라서 KALIMER 설계에도 안전성을 입증하여 인허가를 받기 위해서는 파단전누설 개념을 포함한 파괴역학에 기초한 구조건전성 평가 기술을 개발 확보하는 것이 필수적이다. 또한 균열로부터의 누설이 감지되면 수리여부를 판단하여 이를 설계단계에서부터 미리 고려하여 소듐환경에서의 수리, 보수가 어려운 점을 성공적으로 극복할 수 있다는 것을 입증하여 신뢰를 높일 수 있도록 노력을 기울여야겠다. 이러한 목적으로 본 연구에서는 국내에서는 미비한 분야인 액체금속로의 구조건전성 평가기술을 개발, 확보할 것을 목표로 우선 파단전누설 개념을 잠정적으로 설정하였고 이를 구축하기 위해 필요한 사항들을 살펴보았다.

2. 경수로 적용 파단전누설 방법

파단전누설 개념은 원자로 배관에 균열이 생겼다 하여도 균열이 안정적인 성장을 하여 배관이 급속 파단하지 않고, 균열로부터 냉각재의 누설이 발생하며 그 누설을 충분한 여유도를 갖고 감지함으로써 운전을 신속히 정지하면 배관파단을 미연에 방지할 수 있다는 것이다. 따라서 배관의 누설감지 능력으로부터 누설균열 크기를 결정하고 이 누설균열이 배관 설계하중에 대해 안정적인 성장을 한다는 것을 결정론적 파괴역학으로 입증하여야 한다.

파단전누설 개념 적용을 입증하면 경수로 설계단계에서부터 배관 양단파단을 설계하중에서 제

의할 수가 있고 배관 양단파단의 동적효과를 고려한 배관휨 평가, 충격 해석, 동적배관 파단하중 해석, 부격실 압력하중 해석들을 수행하지 않아도 된다. 또한 동적효과에 대비한 배관 휨구속물, 충격방지벽, 부격실 등의 설치가 불필요하고, 따라서 접근성이 향상되어 보수 및 가동중 검사가 용이해져서 설계 및 운전비용이 크게 감소하게 되는데 NRC는 이 비용을 경수로 발전소 1기당 약 1400 억원으로 평가한 바 있다[12].

파단전누설 규제지침[3, 4]의 허용기준에 따르면 파단전누설 적용 대상 배관은 운전압력이 275psig 이상이고 운전온도가 200°F 이상인 고에너지배관에 한정되고 또한 이들 배관이 수격현상, 부식, 침식, 크립, 고주기/저주기 피로에 의한 파단이 발생하지 않음을 입증해야 한다. 또한 화재, 비산물과 같은 배관의 간접적인 파손인자에 대한 평가도 수행해야 한다[13]. 국내에서는 영광 3,4 호기부터 파단전누설 적용이 규제기관인 KINS로부터 승인받아 영광 3,4 호기는 주냉각재배관, 가압기밀림관, 안전주입배관, 정지냉각배관에 파단전누설 개념이 적용되었다. 주증기관과 주급수관에 대해서는 파단전누설의 적용이 시도되었으나 주증기관은 주증기 분리밸브 작동으로 인한 수격하중적용을 고려하여 파단전누설 요건을 만족하지 못하였고 주급수관은 부식에 의한 파손 가능성이 높아 적용이 불허된 바 있다[14].

일반적인 경수로 파단전누설 개념 적용 절차는 다음과 같다. 적용 대상배관을 선별한 후에는 동적, 정적 배관해석을 수행하여 가장 큰 응력이 걸리는 부분에 가상균열의 발생을 가정하고, ASME Section XI[15]에서 규정하는 초기 가상결함 형상에 대하여 피로균열성장 평가를 수행하여 수명말기 피로균열성장이 IWB-3640, 3650[15]을 만족하는지 살펴서 이를 만족하면 초기 가상결함이 관통하지 않고 안정된 것으로 판정한다. 그리고 관통가상 균열은 누설감지장치로 감지가 가능한 균열의 크기로 정하는데 이때 최소감지누설량은 1.0gpm으로 RG1.45[16]에 규정되어 있다. 파단전누설 개념을 적용하기 위해서는 여기에 10 배의 여유도를 주어 10.0gpm의 누설을 허용하는 결함의 크기를 계산해야 한다. 보수적인 유출률과 균열크기를 계산하기 위해 EPRI가 개발한 PICEP 프로그램[17]이 대표적으로 사용된다. 이렇게 결정된 누설감지균열의 성장해석을 수행하는데 정상운전하중과 안전정지지진하중을 더하고 $\sqrt{2}$ 배의 여유도를 주어 하중에 대한 여유도를 평가한다. 그리고 균열크기에 대한 여유도를 평가하기 위해서 정상운전하중과 안전정지지진하중을 더한 하중하에서 누설감지균열크기에 2 배의 여유도를 주어 균열성장 해석을 수행한다. 균열성장해석은 탄소성 파괴역학을 사용하며 균열의 불안정 파괴조건에는 임계하중법, J-T 평가법, R6 선도 방법 등 여러가지가 있고 또한 이 분야에 많은 연구가 진행중이지만 이중 USNRC가 권장하는 J-T 평가법이 가장 널리 사용되고 있는 실정이며, KINS는 현재 한계하중법과 J-T 평가법의 사용을 인정하고 있다[14]. J-T 평가법을 개략적으로 나타내면 그림 1과 같고 T_{APP} 는 찢김계수이며 이는 외력에 의한 J-적분값을 균열길이에 대한 미분치로 정의되고, T_R 은 재료의 물성치이다. 여기서 T_{APP} 가 T_R 과 같아지는 점에서 균열의 불안정 성장이 발생하며 그 이상의 영역이 불안정 영역이 된다.

경수로에 파단전누설 개념을 적용하는 데는 국내에서도 경험이 축적되어 기술개발[18]이 이루어지고 있지만, 파단전누설 개념의 적용 타당성을 입증하는 데는 아직도 어려운 점이 있으며 특히 누설감지능력 향상, 신뢰성 있는 균열성장평가 기술 개발, 동적변형시효나 피로 등의 파손인자 영향분석 등 아직도 연구노력이 필요한 사항들이 많이 남아 있다.

3. 액체금속로의 누설 사건 및 가동중 검사

유럽의 액체금속로인 EFR의 개발을 위해서 프랑스, 영국, 독일, 이탈리아는 파단전누설을 포함한 구조건전성 평가기술 개발을 위한 AGT9과 원자로 소듐 누설사건의 데이터베이스를 구축하는 운전그룹 AGT8 등 여러가지 작업그룹을 만들어 연구노력을 경주하고 있다[7]. AGT8은 액체금속로인 KNK II, DFR, PFR, PHENIX, SUPERPHENIX에서의 74건의 소듐 누설사례를 조사하고 가동중

검사기술 및 누설에 대한 보수경험 사례 데이터베이스를 구축하고 있는데[19] 이는 파단전누설 개념을 적용하기 위한 유용한 통계적 자료를 제공해준다.

액체금속로에서의 누설은 주로 이차계통과 보조계통에서 발생한 것으로 조사되었고 거의 모든 누설이 용접부에서 발생하였으며 누설균열은 대부분 제작결함으로부터 성장한 것으로 조사되었다 [19]. 또한 구조물 형상 불연속부위와 크립에 의한 균열도 누설의 원인이 되었다. 따라서 액체금속로의 설계시 균열을 허용하지 않았다 하더라도 형상 불연속부위를 완전히 배제할 수 없고 제작시 결함의 존재를 완전히 배제하지 못하기 때문에 결함에 대한 건전성 평가와 파단전누설 개념의 적용이 필요함을 알 수 있다.

누설의 감지방식은 소듐 에어로졸이나 연기를 감지하는 것과 소듐의 전기전도에 근거한 Spark plug detector 와 Wire detector 등이 사용되고 전기추적가열장치를 설치하여 소듐이 누설되면 추적요소가 빠르게 부식하여 접지됨으로써 전기격리를 측정함으로써 누설을 감지하는 방법도 있다. 하지만 누설사례의 거의 절반은 감지장치가 경보를 주기 전에 운전원이 정규순찰이나 보수검사 기간에 발견하여 아직도 파단전누설 적용을 위해서는 누설 감지장치의 신뢰성과 민감도를 높이고 또한 빠른 반응과 쉬운 설치요건 등 개선의 여지가 많음을 알 수 있다.

일단 누설을 감지하고 나면 발전소 운전을 정지하고 수리여부를 판단하여 수리가 가능하면 수리를 하고 교체가 필요한 부품은 교체를 하여야 한다. AGT8 은 유럽의 여러 액체금속로에서 발생한 누설사건에 대한 성공적인 수리 경험을 참고문헌 [19, 20]에서 설명하고 있는데 이는 소듐의 불투명하고 화학반응하기 쉽고 또 방사화되기 쉬운 성질 때문에 수리가 어렵다는 기존의 인식을 불식하는데 도움이 된다. 따라서 앞으로의 액체금속로 개발에도 대중 수용을 개선하기 위해 미리 설계 단계에서부터 부품의 수리 가능성에 대한 관심을 기울여야 할 필요성이 있다.

4. KALIMER 적용 파단전누설 방법론 설정

액체금속로 KALIMER[11]의 노심지지 경로의 전손상을 방지하고 소듐화재의 위험을 최소화하기 위한 안전성을 확보하고 기기의 신뢰성을 향상시키며, 체적검사의 규모를 줄이기 위하여 파단전누설 개념의 적용이 필요하다. 기존 액체금속로들의 운전경험에서 설계시 허용되지 않은 균열의 발생과 이로 인한 소듐누설이 발생한 사례를 고려하면 제작결함 등의 이유로 발생할 수 있는 균열의 존재를 가정하여 균열성장의 안정성을 평가하고, 또한 소듐 누설균열의 안정성 평가로 임계상태에 도달하기 전에 누설감지가 가능함을 입증할 수 있는 파단전누설 평가절차의 개발이 요구된다. 이를 위해서는 누설감지기술 개발과 고온 파괴역학방법 개발에 많은 노력을 기울여야 한다. 따라서 본 연구에서는 우선 KALIMER 원자로구조물과 부품에 파단전누설 개념을 적용하기 위하여 적용부위를 잠정 선정하고 평가방법의 기초를 제시하였다.

4.1 파단전누설 적용 대상 구조물

표 1 은 KALIMER 구조물의 파단전누설 적용 부품을 보여주고 있는데 원자로용기는 소듐 누설 방지를 위해 파단전누설 적용이 요구되고 용기 외부에서의 체적 초음파검사를 비롯한 가동중 검사가 요구된다. 원자로용기 내부의 일차펌프에서 유입실로 연결되는 유입배관은 사고시 노심의 냉각과 정지 기능을 입증하고 또한 원자로용기 내부에서의 배관파단 영향을 살펴보기 위하여 배관양단파단을 고려해야 한다. IHTS 배관은 KALIMER 에서 주배관 역할을 하고 있으며 배관의 주위에 누설자켓(Leak jacket)을 설치하여 누설된 소듐이 모일 수 있도록 하고 감지장치를 이용해 누설을 감지한다. 보조배관은 주로 직경이 작으므로 누설감지 균열의 길이가 배관의 크기에 비하여 상대적으로 너무 클 가능성이 많으므로 파단전누설 개념을 바로 적용할 수 없으나 이에 대한 파괴

역학 방법을 신뢰성 있게 적용할 수 있음을 입증할 수 있으면 파단전누설을 적용할 수 있으므로 향후 많은 노력을 기울일 필요가 있다. IHX, SG, 원자로헤드, 및 회전플러그도 파단전누설을 적용할 계획이며, 주증기관과 주급수관은 포함하는 유체가 물과 증기인데 경수로의 경우 아직까지는 파단전누설의 적용이 허용되지 않아 배관 양단파단을 적용하여야 하나 앞으로 규제기관인 KINS의 인증을 받을 수 있도록 파단전누설 적용 노력을 기울일 예정이다.

고온 크립영역에서의 결함평가 기술은 현재에도 유럽[7]과 미국을 비롯한 여러나라에서 활발한 연구개발이 진행중이고 크립이 무시될 수 있는 온도 조건에서는 결함평가기술이 비교적 잘 정립되어 있다. 액체금속로에 적용할 수 있는 파단전누설 개념은 영국[21]과 프랑스[22]가 최근에 단순 접근법을 제안하여 절차를 정립하였고 특히 프랑스는 액체금속로 구조물 설계코드인 RCC-MR의 부록으로 A16[10]을 발간하였다. 본 연구에서는 이들 방법을 참조하여 우리 실정에 맞는 파단전누설 평가절차의 기본 골격을 제안하여 앞으로의 연구개발 방향을 설정하고자 한다.

4.2 파단전누설 평가절차

경수로에 적용한 파단전누설 평가절차가 그림 2에 나타나 있는데 엄밀히 말하면 초기 미관통균열을 가정하여 수명기간 동안에 균열 불안정파괴가 일어나는지 평가하는 것(그림의 왼쪽 줄)은 구조조건전성과 설계여유도를 평가하는 것이며 누설감지 관통균열을 가정하여 수명동안 불안정파괴가 일어나는 임계균열까지 성장하지 않음을 평가하는 과정(그림의 오른쪽 줄)이 파단전누설 평가라 할 수 있는데 KALIMER 파단전누설 평가라 함은 위의 두 가지 평가작업을 다 포함하는 것으로 한다. 평가절차는 다음과 같다.

- 1 단계 : 초기 결함을 선정한다. 결함의 형상은 ASME Section XI[15]을 따르고 결함의 위치는 탄성 해석을 수행하여 최대응력 부위로 하고 제작결함이 있기 쉬운 용접부 등을 고려해서 결정한다.
- 2 단계 : 균열성장해석을 수행하여 수명말기 균열의 관통 여부를 평가한다. 이때 크립을 무시할 수 있는 온도영역에서는 탄소성 파괴역학의 Paris 법칙에 따라 피로균열 성장 해석을 수행한다.

$$\frac{da_f}{dN} = C(\Delta K)^n$$

크립이 중요한 영역에서는 파괴역학 매개 변수가 여러가지가 있다. 우선 정상상태 크립을 고려한 C* 적분과 천이크립을 고려한 C(t) 적분, C*를 천이크립 조건으로 확장한 Ct 적분[23], 및 크립 J 적분 방법[24] 등이 있다. 우선 장시간을 고려하면 정상상태 크립이 지배적일 것이므로 영국의 R5[25]에서 제시한 C* 적분이나 A16[10]의 C* 적분을 이용하여 다음과 같은 크립균열 진전식을 이용한다.

$$\frac{da_c}{dt} = A(C^*)^q$$

위식들에서 a_f 는 피로균열 깊이, a_c 는 크립균열 깊이, C, n, A, q는 재료상수이다. 이렇게 구한 피로균열 증분과 크립균열 증분을 선형 누적하여 균열 성장량을 계산한다. 여기서 향후 연구과제는 C* 적분법을 개선하는 것과 또한 C* 적분 대신 Ct 적분이나 다른 적분 방법을 이용하는 방안 등이다.

- 3 단계 : 수명말기 균열의 안정성을 평가한다. 크립을 무시할 수 있는 온도범위에서의 안정성 평가는 유럽에서는 주로 R6 선도를 이용한 방법이 사용되고 있으나 경수로 인허가 관점에서 KINS가 인증한 J-T 평가법이나 극한하중법을 사용한다. 크립이 중요한 온도범위에서는 균열의 안정성을 평가하기 위해서 영국은 R6 방법을 사용하고, 프랑스는 극한하

중법으로 구한 특성응력값과 참조응력법[10]으로 구한 참조응력에 대한 피로사용계수와 크립파단사용계수가 모두 1 보다 작음을 보일 것을 요구하고 있다. KALIMER 파단전누설 절차에 사용할 방법은 이들의 장단점을 면밀히 살펴본 다음 결정할 예정이다.

- 4 단계 : 누출감지가 가능한 균열길이($2C_L$)를 결정한다. 정상운전하에서 누설 감지장치로 감지할 수 있는 누설량의 10 배의 누설을 허용하는 균열면적을 계산하고 이로부터 누설 감지 균열길이를 구한다. 여기에는 유체의 동적 점성을 고려한 스키 식[21]이나 나가이 식[22]을 비교하여 보수적인 식을 사용한다.
- 5 단계 : 관통 점근 균열길이($2C_S$)를 결정한다. 316SS 강 구조물이 반복하중을 받을때 균열 형상의 발전 모양은 많은 실험과 해석노력 결과 초기 균열크기와는 무관하고 다만 Paris 식의 지수 n 과 작용하중의 굽힘응력범위와 막응력범위의 비에만 의존하는 것으로 알려져있는데 이는 그림 3에 나타나 있다[8]. 그림 3에서 보듯이 공통곡선(Common Curve)은 균열이 성장해서 관통할 때 일정한 형상으로 수렴함을 보여주고 이때의 균열 길이를 점근 균열길이라 한다. 관통시 균열길이가 점근 균열길이보다 큰 길고 얇은 균열 경우는 본질적으로 균열의 성장이 두께방향으로만 이루어지는 것도 알 수 있다. 점근 균열길이는 굽힘응력범위와 막응력범위의 비의 함수로 표현된 C_S 결정 선도(그림 4)에서 구하는데 일반적으로 피로가 지배적인 경우에는 굽힘응력범위가 막응력범위보다 크므로 점근 균열길이가 길어짐을 알 수 있다. 그리고 초기 결함길이가 점근 균열길이보다 긴 경우는 균열의 관통시 길이가 초기 균열길이와 같고 초기 균열길이를 보수적으로 점근 균열길이로 간주한다. 만일 크립균열 성장이 명백히 피로균열 성장보다 크다고 판단되면 응력범위의 비 대신 고온 지속시간 동안의 굽힘응력과 막응력의 비를 사용하여 점근 균열길이를 구한다.
- 6 단계 : 관통균열이 불안정파괴에 도달하는 임계 관통균열길이(C_G)를 결정한다. 영국과 프랑스는 탄성-완전소성 모델에 근거하여 취성파괴와 연성파괴를 고려해서 작성한 R6의 손상평가곡선(Failure Assessment Diagram)을 주로 사용하는데 여기서는 EPRI J 평가법[26]을 잠정적으로 사용하기로 한다. EPRI J 평가법에 따라 탄성 J 값과 소성 J 값을 구해서 이를 손상평가곡선에 적용하거나 J-T 평가법과 연계해서 임계 관통균열길이를 구한다. 앞으로의 연구 과제는 이 방법이 고온 크립거동을 얼마나 표현할 수 있는지 평가하여야 하며 또한 아직까지 확실한 방법이 정립되어 있지 않은 실제의 고온기기의 3 차원 균열 평가 기술을 개발하여야 한다.
- 7 단계 : 파단전누설 적용성을 입증한다. 그림 5에 위에서 열거한 임계 관통균열길이와 누설 감지 균열길이, 점근 관통균열길이, 및 초기 균열길이(C_i)를 나타내었는데 파단전누설 적용 기준은 관통시의 점근 균열길이가 $2(C_G - C_L)$ 보다 작으면 만족한다. 즉, $2(C_S + C_L) < 2C_G$ 를 만족하면 파단전누설이 성립한다. 여기서 제안한 단순평가 방법의 가정과 불확실성을 고려하여 임계 균열길이에 여유도를 줄 예정인데 6 단계의 방법으로 구한 임계 균열길이가 너무 작을 경우에는 제안한 방법으로 파단전누설의 적용이 어려워지므로 이 때에는 상세 유한요소해석을 수행할 필요도 발생한다.

지금까지 KALIMER 에 적용할 파단전누설 절차를 제시하고 설명하였는데 더 상세한 절차와 방법론은 본 연구에서 계속 보완, 개선할 예정이다. 만일 파단전누설을 적용할 수 없으면 배관 양단 파단을 고려해야 하며 또한 안전성 요건에 따라 방대한 규모의 UT 와 RT 체적검사(Volumetric Inservice Inspection)가 요구된다.

4.3 KALIMER 최적설계

원자로구조물과 부품의 안전성을 향상시키기 위하여 파단전누설 개념을 포함한 구조 건전성 기

술을 개발하는 것과 동시에 다음과 같은 최적설계를 수행하고 각각의 제작단계에서부터 엄격한 과정과 검증을 수행하고 또한 사용 재료를 전과정에서 감시하여 제작결함의 발생 가능성을 최소화해야 한다.

가능한 한 구조물 형상이 단순하고 급격한 변화를 갖지 않도록 하여 응력집중을 방지함으로써 낮은 응력수준을 확보한다. 보강영역은 노즐보다는 용기나 배관에 설치도록 하고, 될수록 용접대신 일체형 설계를 함으로써 용접부 수를 최소화하며 길이방향 용접은 될수록 피한다. 용접부는 기계/열하중과 조사노출 부위로부터 될수록 멀리 설계하고 결함검사와 치수검사를 위한 비파괴검사 접근이 용이하도록 한다.

5. 결론

액체금속로의 노심지지 경로의 전손상을 방지하고 소듐화재의 위험을 최소화하여 안전성과 기기의 신뢰성을 향상시키고 또한 체적검사의 규모를 줄이기 위해서는 원자로구조물과 부품에 대하여 파단전누설 개념 적용이 요구된다. 파단전누설 개념을 적용하지 못하면 안전성 관점에서 방대한 규모의 가동중 검사 요건이 필요하지만 파단전누설 개념을 적용할 수 있으면 이를 크게 완화할 수 있다.

본 연구에서는 액체금속로 파단전누설 개념의 적용 필요성을 검토하고 경수로에 적용하는 파단전누설 적용절차와 액체금속로에 대한 유럽의 파단전누설 적용 방법을 참조하여 KALIMER 원자로구조물과 부품에 적용할 파단전누설 개념을 포함한 구조건전성 평가 방법의 일반사항을 제시하고 적용대상 부품을 분류하였다. 크립을 무시할 수 있는 온도범위에서의 절차는 비교적 잘 정립되어 있지만 크립영역인 고온에서의 결함평가 기술은 아직까지도 많은 연구노력이 필요한 분야임을 고려하면 본 연구에서 제시한 개략적인 절차도 앞으로 많은 연구개발이 필요하다. 특히 오스테나이트계 스테인레스강과 페라이트강으로 만들어진 고온기기의 3차원 균열성장 해석기술 개발과 균열의 불안정파괴 평가기술 및 소듐 누설감지기술과 누설량 평가기술의 개발이 파단전누설 평가기술 확립에 핵심적인 연구분야이므로 많은 관심을 갖고 연구노력을 기울일 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 전한다.

참고문헌

- [1] K.Wichman, J.Tsao, M.Mayfield, "LBB Application in the USA Operating and Advanced Reactors," EA/CSNI/R(95)18, Vol.1, pp13-19, 1996
- [2] 10CFR50, Appendix A, General Design Criterion 4, 1996
- [3] NUREG-1061, Volume 3, "Evaluation of Potential for Pipe Break", USNRC, 1984
- [4] USNRC, Standard Review Plan 3.6.3, "Leak Before Break Evaluation Procedure", 1987
- [5] K.Vinzens, H.Laue, B.Hosemann, "Structural Integrity of LMFBRs Including Leak Before Break", Nuclear Engineering and Design 119, pp329-335, 1990
- [6] PRISM Preliminary Safety Information Document, GEFR-00793, GE, 1987
- [7] D.Acker, J.P.Debaene, H.Laue, R.T.Rose, "On-Going Development in Design Methods and Criteria for the LMFBR", in High Temperature Structural Design, ESIS12, Mech.Engr.Pub.Inc., pp61-84, 1992
- [8] B.Riou, M.Sperandio, D.G.Hooton, P.Rathjen, W.Setz, "Leak Before Procedure for Sodium Boundary Components", SMIRT-12, pp89-94, 1993

[9] P.Poussard, S.Chapuliot, E.Curtit, B.Autrusson,"High Temperature Leak Before Break Experimental Austenitic Stainless Steel Center Cracked Plates", SMiRT-14, G13/5, pp525-532, France, 1997

[10] Report CEA-DMT 96.096, A16: Guide for Crack Analysis and Leak Before Break, 1996

[11] KALIMER Design Concept Report, KAERI/TR-888/97, KAERI, 1997

[12] S.A.Swamy, P.R.Mandava, D.C.Bhowmick, D.E.Prager,"LBB Consideration for a New Plant Design", Proceedings of the US NRC, NUREG/CP-0155, pp213-219, 1997

[13] 최영환, 이정배, 은영수,"파단전누설 개념에 관한 규제지침", 제 1 회 배관건전성 평가기술 Workshop, KINS/AR-232, pp161-169, 1993

[14] 최영환, 박운원, 송선호, 이정배,"파단전누설개념 적용에 대한 규제지침", 원전기기설비 건전성 평가 Workshop, KINS, pp6.1-6.7, 1997

[15] ASME B&PV Code, Section XI, Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, Subsection IWB, Requirements for Class 1 Components for Light Water Cooled Plants, 1995

[16] Regulatory Guide 1.45,"Reactor Coolant Boundary Leakage Detection System", USNRC, 1973

[17] D.M.Norris, B.Chexal,"PICEP: Pipe Crack Evaluation Program", EPRI NP3596-SR, 1987

[18] 유영준, 박명규, 윤기석, 박성호,"현재 파단전누설 규제요건에 대한 안전여유도 평가", 원전 기기설비 건전성 평가 Workshop, KINS, pp1.1-1.9, 1997

[19] L.Martin, J.Dubouis, J.D.C.Henderson, W.kathol,"Leak Before Break Operating Experience from European Fast Reactors", Int.Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, FR '91, pp5.4.1- 5.4.14, Japan, 1991

[20] C.V.Gregory, D.Acker,"Repairs in FBR: Experience to Date Prospects for the Future", Int.Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, FR '91, pp5.5.1-5.5.10, Japan, 1991

[21] D.G.Hooton, B.Tomkins," The Development of Structural Integrity Criteria for Austenitic Components", Int.J.Pres.Ves.&Piping 65, pp311-316, 1996

[22] A.Turbat, H.Deschanel, H.Noel, C.Faidy,"Application of LBB Concept to LMFR Components", SMiRT-14, G13/6, pp533-540, France, 1997

[23] 윤기봉," 고온피로 및 크리이프를 고려한 강도설계", '92 년도 피로 및 파괴역학을 고려한 강도설계 기술강습회, pp166-192, 대한기계학회, 1992

[24] 장동일, 정경섭, 한민구," 파괴역학: 이론,해석에서 공학적 응용까지", 원창출판사, 1992

[25] The R5 Procedures: Assessment of Structural Integrity at High Temperatures, Berkeley Nuclear Laboratories Report R5, Nuclear Electric plc, UK

[26] T.L.Anderson, Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, CRC Press, 1991

Table 1. KALIMER 원자로 구조물과 부품의 구조건전성 요건(안)

부품	파단전누설 적용	배관양단파단 적용	비고
원자로용기(RV)	적용		
Inlet Pipe (RV 내부)		적용	
IHTS 배관	적용		
보조계통 배관		적용	
IHX, SG 용기	적용		
원자로헤드, 회전플러그	적용		
주증기배관		적용	파단전누설 시도
주급수배관		적용	파단전누설 시도
기타 부품			추가 분류 필요

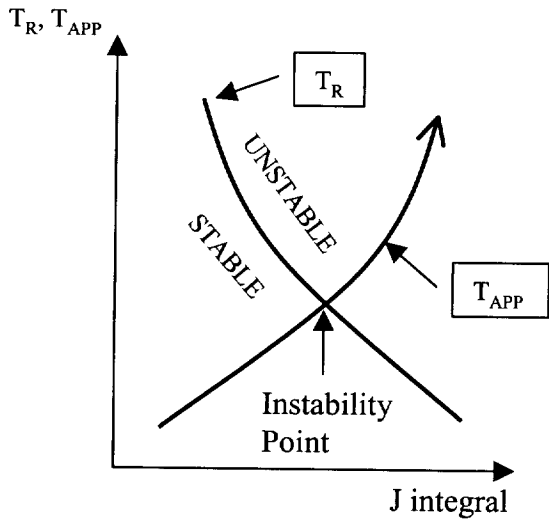


Fig. 1 J-T 평가선도

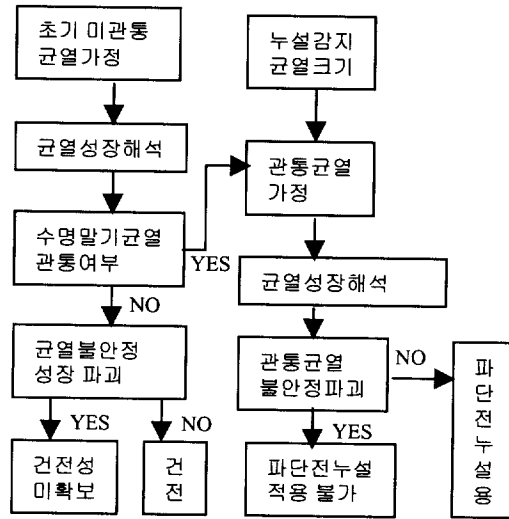


Fig. 2 파단전누설 평가절차

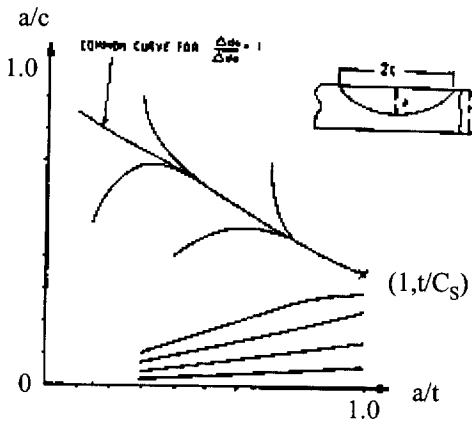


Fig. 3 반복하중하에서 균열형상 발전도

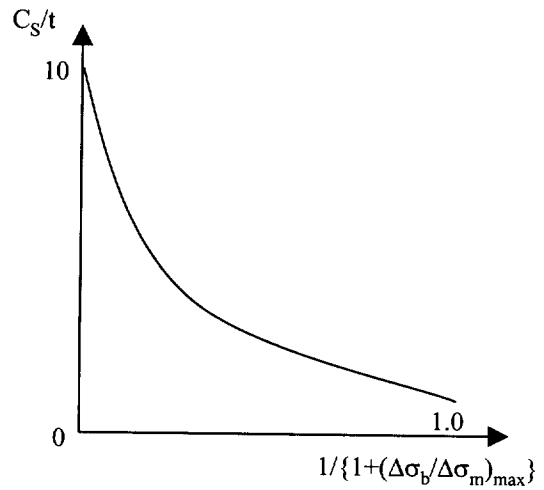


Fig. 4 C_s 결정 선도

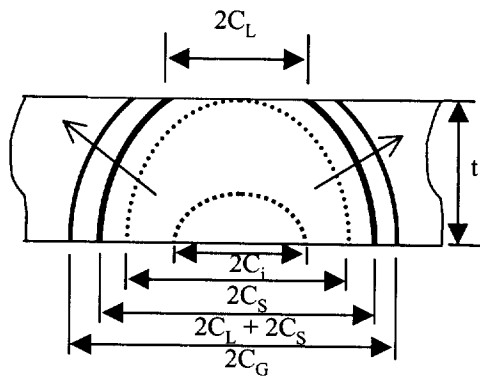


Fig. 5 반타원균열의 형상발전