2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

ISAAC에 사용된 수평연료관 처짐 모델이 수소 생성에 미치는 영향 평가

An Evaluation of Sagging Model on Hydrogen Generation in ISAAC

김시달, 김동하, 박수용
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

월성발전소의 대형 및 소형 냉각재 상실사고, 노심 내 튜브 파손사고 그리고 증기발생기 급수 상실사고에 대해 수평연료관 처짐 모델 변수인 FSAGKT(감속재로의 열전달 면적 비)와 TSAGKT(압력관과 칼랜드리아 튜브의 평균 온도값) 값 변화에 따른 민감도 분석을 ISAAC을 이용하여 평가하였다. FSAGKT와 TSAGKT는 사용자 입력 변수로, 이 값에 따라 사고 진행이 영향을 받고, 특히 수소 생성량 등에 차이가 있음을 확인하였다. 처짐 조건을 결정하는TSAGKT의 경우 기본값을 1273 K로 사용한 것은 타당하다고 판단된다. 현재의 ISAAC 코드는 고정된 FSAGKT 값이 입력되고, 모든 채널에서 처짐 조건을 만족하면 바로 열전달 면적을 감소시켜 사고 진행을 모의하고 있다. 그러나 실제로는, 각 채널 조건에 따라 처지는 정도가 다르고, 이에 따라 감속재와의 표면적 접촉 비율도 사고진행 시간에 따라 달라진다. 해석결과 FSAGKT의 값에 따라 수소 생성량 및 사고진행이 영향을 받으므로 고정된 FSAGKT 값을 대체할 수 있는 처짐 모델 개발의 필요성이 제안되었다.

Abstract

Sensitivity studies using the sagging model parameters of FSAGKT and TSAGKT are performed for Large LOCA, Small LOCA, Pressure Tube Rupture and Loss of feed water sequences at Wolsong Plants. It is found that the accidents progression and the amount of hydrogen generated depend on FSAGKT and TSAGKT. The default value of TSAGKT, which is 1273K, is evaluated reasonable. By the way, the core degradation pattern highly relies on FSAGKT. If the sagging condition is satisfied, ISAAC reduces the calandria tube heat transfer area to the moderator by multiplying the constant FSAGKT right away. There is no consideration for the sagging condition of each channel. Therefore, one suggestion for FSAGKT is to model the sagging degree for all channels reflecting the channel conditions and is to add the transient effect.

1. 서론

처짐 (sagging)은 냉각재 및 감속재 상실로 수평 연료관이 가열되면, 양쪽 끝이 고정되어 있는 수평연료관 (주로 칼랜드리아관)은 온도 증가에 따라 관의 연성이 증가하면서 자체의 무게 때문에 중앙 부위가 처지게 되는 현상이다. 이러한 현상은 정상 운전 중에도 발견되며, 특히 중대사고의 범위에서는 처지는 정도가 심해 이에 대한 모델이 필요하다. 즉, 수평연료관이 심하게 처지게 되면 그 아래에 위치한 건전한 연료관과 닿게 되며, 이때의 연료관 사이의 접촉 조건에 따라 칼랜드리아관과 감속재 사이의 열전달 면적의 변화로 칼랜드리아관의 건전성이 영향을 받게 된다.

현재 ISAAC[1]에서 고려하고 있는 칼랜드리아관 처짐 모델은 연료관끼리 접촉하는 경우 모델 변수를 도입하여 칼랜드리아관과 감속재 사이의 열전달 면적 변화 (감소 효과)를 고려할 수 있도록 간단한 모델을 포함하고 있다. 이렇게 감속재로의 열전달량이 감소하게 되면, 감속재로의 열손실을 제외한 나머지 붕괴열은 연료관을 가열하여 수평 연료관을 고온으로 유지시켜 노심 손상을 촉진시킨다.

2. 처짐 모델 관련변수 및 모델 설명

ISAAC에서 고려하고 있는 칼랜드리아관 처짐 모델 변수는 FSAGKT와 TSAGKT 이고, 각각의 변수에 대한 설명은 다음과 같다.

2.1 FSAGKT

수평연료관의 처짐이 일어났을시 감속재로 전달하는 열전달 면적 비 (즉, 감속재로의 열전달 면적=칼랜드리아관 표면적 * FSAGKT)로, 이 값은 처지기 시작하면서부터 holding bin으로 이송되기 전까지 사용되며 기본값은 0.1을 사용한다. 압력관과 칼랜드리아 튜브의 평균 온도가 사용자의 지정 값 (TSAGKT)을 초과할 때, 칼랜드리아 튜브는 처져 쌓이기 시작하고 결과적으로 입력자 지정값 (FSAGKT)에 의해 칼랜드리아 튜브에서 감속재로의 열전달 면적은 감소된다.

2.2 TSAGKT

압력관과 칼랜드리아 튜브의 질량을 기준으로 계산한 평균 온도값이 TSAGKT보다 커지면 sagging model을 사용하도록 하며, TSAGKT의 기본 입력으로 1273 (K)을 사용한다.

칼랜드리아관의 처짐을 모의하기 위해서 먼저 압력관과 칼랜드리아관의 질량에 기초한 평균온도를 다음처럼 구한다:

$$TPTKT = \frac{TKTN(i,iCH,iL)* MKTN(i,iCH,iL) + TPTN(i,iCH,iL)* MPTN(i,iCH,iL)}{MKTN(i,iCH,iL) + MPTN(i,iCH,iL)}$$

여기서 TKTN과 TPTN은 칼랜드리아관 온도와 압력관 온도를,
MKTN과 MPTN은 칼랜드리아관 질량과 압력관 질량을,
TPTKT는 칼랜드리아관과 압력관 평균온도를,
i는 수평연료관 채널 내부의 연료 다발 (bundle) 위치를,
iCH는 수평연료관의 위치를, 그리고
iL은 폐회로의 위치를 의미한다.

일단 TPTKT가 TSAGKT 보다 높아지면 그 연료 다발에서 ISAGKT (i,iCH,iL)을 1로 정의한다. ISAGKT가 1로 바뀐 후에는 해당 연료다발 (노드)의 감속재로의 열전달 면적이나 수증기와의 접촉에 의한 산화 가능 면적을 이 비율로 줄여 계산한다.

3. 사고 분석[2]

대형 냉각재 상실사고 (LLOCA), 소형 냉각재 상실사고 (SLOCA), 노심 내 튜브 파손사고 (PTR) 그리고 증기발생기 급수 상실사고 (LOFW)에 대해 처짐 모델 변수인 FSAGKT와 TSAGKT 값 변화에 따른 민감도 분석을 ISAAC을 이용하여 월성1호기에 대해 수행하였다. 비상 노심 냉각계통 (ECCS)과 감속재 및 차폐체 냉각계통, 그리고 국부공기 냉각기가 고장난 상당히 보수적인 사고경위이며, 피동 계통인 격납건물 살수계통은 가용 하다고 모든 분석사고에 대해 가정하였다. 기본 입력 (FSAGKT=0.1, TSAGKT=1273 K)을 이용한 각 사고에서의 해석 결과를 아래에 나타내었다.

분석에 사용된 ISAAC 전산 코드는 월성 원전에서의 중대사고 진행을 모사할 수 있는 기본적인 모델, 즉 냉각재 상실로 인하여 연료봉이 가열되고, 감속재 냉각 계통의 손실로 붕괴열에 의한 감속재 고갈과 이로 인한 연료봉 노출, 그리고 이어지는 노심의 건전성 붕괴 등이 고려되어 있다. 또한, 칼랜드리아 내부로 이송되는 핵연료 물질과 이에 반응하는 칼랜드리아의 거동, 그리고 이와 동시에 격납건물에서의 가스, 냉각수, 핵연료 물질의 이송이 1차 계통과 연계되어 모사 되어 있다. 이외에도 ISAAC은 감속재 냉각 계통, 쉴드 냉각 계통, 정지냉각계통, 비상노심 주입계통, 격납건물 살수 계통, 그리고 국부 공기 냉각기 등 월성 1호기의 여러 안전계통의 작동 효과를 정량적으로 분석할 수 있도록 개발되었다. 따라서, 이 코드는 종합적으로 격납건물의 건전성을 평가하고, 여러 사고 경위에서의 중대사고 대처 전략과 사고 관리 방안을 제시하는데 유용하게 활용될 수 있다.

월성1호기에서의 중대사고를 모의하기 위해 발전소 자료를 종합하여 ISAAC 전산코드의 입력을 작성해야 한다. 입력은 크게 발전소의 기하학적 구조 자료와 중대사고 현상을 모의하는 모델 변수로 구성되는 parameter file과 사고 경위를 모의하는 input file로 구성된다. 발전소의 기하학적 입력은 크게 격납건물 부분과 일차계통, 이차계통, 칼랜드리아, 그리고 안전계통으로 나눌 수 있다.

ISAAC 전산코드의 일차계통은 두 개의 독립된 폐 회로로 구성되며 (편의상 Loop 1과 Loop 2로 구분), 각 폐회로의 두 개의 증기발생기도 Broken SG와 Unbroken SG로 정의하여 사용한다. 두 개의 폐회로는 Loop Isolation Valve (LIV)를 통해 가압기와 연결되어 있으며, LIV는 어느 폐회로든지 압력이 설정치보다 낮아지면 닫히도록 설계되어 있다. 폐회로의 과압을 막기 위해 Liquid Relief Valve (LRV)가 Degasser Condenser Tank (DCT)로 연결되어 있고, DCT는 격납건물로 연결되어 있다. 그림 1 에는 ISAAC에서 모사하는 일차계통이 정리되어 있다.

모두 380개로 구성되어 있는 수평연료관을 모사하기 위해 각 폐회로 당 6개씩 모두 12개를 대표 연료관으로 가정하였고, Broken Loop에 3개, Unbroken Loop에 3개씩 배정하되 6개가 다른 높이에 위치하도록 하였다. Channel 1부터 6으로 정의되는 6개의 연료관은 각기 다른 출력을 가지며, 출력 분포는 입력으로 처리하였다.

격납건물은 다음의 12개의 격실로 구분하였다: 1) 지하실 (basement), 2) 칼랜드리아 볼트, 3) 연료교체방 (F/M 107), 4) 연료교체방 (F/M 108), 5) 감속재 방, 6) 접근 통로 (access area), 7) 보일러 공간, 8) 상부 돔, 9) 격납건물살수탱크, 10) Degasser Condenser Tank, 11) Endshield 1, 12) End Shield 2. 격납건물 격실 사이에는 모두 18개의 유로를 정의하여 격납건물 안에서의 기체 및 냉각수, 그리고 핵연료 물질의 이동을 모의하였다. 격납건물 파손 압력은 519kPa로 가정하였다.

상세한 ISAAC 입력은 참고문헌[3]에 있으며 중대사고 관점에서 사고 진행을 분석하기 위하여 사고 시작 후 72시간까지 계산하였다.

3.1 대형 냉각재 상실사고 (LLOCA) 경위 해석

대형 냉각재 상실 기본 사고는 원자로 출구모관 (reactor outlet header) ROH3에서 대형 파단 (파단 면적 0.2594 m^2)이 발생한 사고다.

증기발생기로의 주급수 계통은 원자로 정지 시점까지 가동되나, 정지 후에는 보조급수계통의 고장을 가정하여 더 이상 증기발생기로의 급수는 이루어지지 않는다. 원자로 트립 시점은 FSAR에서 계산된 결과를 이용하였고 0.87초에 수동 정지하도록 하였다 [4].

1차 계통에서 발생되는 파단 사고의 경우 비상 노심 냉각 계통을 일찍 작동시키기 위해 증기발생기의 안전밸브 (MSSV)를 열어 2차 계통을 급속하게 냉각 (crash cooldown)시키도록 설계되어 있

다. 이를 모의하기 위하여 LOCA 신호가 접수되고 30초 후에 MSSV가 열리고, 계속 열린 상태를 유지하도록 하였다. 또한 LOCA 신호가 발생하면 가압기로 연결되어 있는 두 개의 폐회로는 가압기 격리 밸브를 잠금으로 서로 격리되도록 하였다. 이 사고의 경우, LOCA 신호는 1차 계통의 압력이 5.56 MPa 이하로 감소하는 3.3초에 발생하며, 가압기 격리밸브는 약 23초에 닫히고, 약 33초에 MSSV는 개방된다.

3.2 소형 냉각재 상실사고 (SLOCA) 경위 해석

소형 냉각재 상실 기본 사고는 원자로 입구모관 (reactor inlet header) RIH2에서 소형 파단 (2.5% RIH, 파단 면적 0.013325 m^2)이 발생한 사고다.

증기발생기로의 주급수 계통은 원자로 정지 시점까지 가동되나, 정지 후에는 보조급수계통의 고장을 가정하여 더 이상 증기발생기로의 급수는 이루어지지 않는다. 원자로 트립 시점은 8.0초에 수동 정지하도록 하였다.

1차 계통에서 발생되는 파단 사고의 경우 비상 노심 냉각 계통을 일찍 작동시키기 위해 증기발생기의 안전밸브 (MSSV)를 열어 2차 계통을 급속하게 냉각 (crash cooldown)시키도록 설계되어 있다. 이를 모의하기 위하여 LOCA 신호가 접수되고 30초 후에 MSSV가 열리고, 계속 열린 상태를 유지하도록 하였다. 또한 LOCA 신호가 발생하면 가압기로 연결되어 있는 두 개의 폐회로는 가압기 격리 밸브를 잠금으로 서로 격리되도록 하였다. 이 사고의 경우, LOCA 신호는 1차 계통의 압력이 5.56 MPa 이하로 감소하는 86초에 발생하며, 가압기 격리밸브는 약 106초에 닫히고, 약 116초에 MSSV는 개방된다.

3.3 노심 내 튜브 파손 사고 (PTR) 경위 해석

노심 내 튜브 파손 기본 사고는 Loop1에서 (파단 면적 0.000592 m^2) 발생한 사고다.

증기발생기로의 주급수 계통은 원자로 정지 시점까지 가동되나, 정지 후에는 보조급수계통의 고장을 가정하여 더 이상 증기발생기로의 급수는 이루어지지 않는다. 원자로 트립 시점은 20초에 정지하도록 하였다.

1차 계통에서 발생되는 파단 사고의 경우 비상 노심 냉각 계통을 일찍 작동시키기 위해 증기발생기의 안전밸브 (MSSV)를 열어 2차 계통을 급속하게 냉각 (crash cooldown)시키도록 설계되어 있다. 이를 모의하기 위하여 LOCA 신호가 접수되고 30초 후에 MSSV가 열리고, 계속 열린 상태를 유지하도록 하였다. 또한 LOCA 신호가 발생하면 가압기로 연결되어 있는 두 개의 폐회로는 가압기 격리 밸브를 잠금으로 서로 격리되도록 하였다. 이 사고의 경우, LOCA 신호는 1차 계통의 압력이 5.56 MPa 이하로 감소하는 134초에 발생하며, 가압기 격리밸브는 약 154초에 닫히고, 약 164초에 MSSV는 개방된다.

3.4 증기발생기 급수 상실사고 (LOFW) 경위 해석

주급수 공급이 상실되면서 시작되는 사고는 일차계통에서 이차계통으로의 전달되는 전출력 열량을 제거하지 못해 이차측의 압력 증가로 증기발생기의 안전밸브가 열리며 (약 3초), 또한 일차계통도 이차계통으로의 부족한 열제거로 압력이 증가하여 Degasser Condenser Tank로 연결되어 있는 Liquid Relief Valve가 열림 (약 7초)으로 과압을 방지한다. 일차계통의 고압으로 원자로는 트립되며 (약 22초), 주급수에 이어 증기발생기로의 보조 급수도 상실되어 증기발생기는 고갈된다 (약 2,807초)

4. 분석결과[2]

LLOCA, SLOCA, PTR 그리고 LOFW 사고에서의 FSAGKT와 TSAGKT에 따른 수평연료관 손상 시점, 감속재 고갈 시점, 칼랜드리아 탱크 손상 시점, 그리고 노심 내 수소 생성량등을 비교하였다.

4.1 FSAGKT 영향 평가

4.1.1 사고 전반적인 영향

FSAGKT 값에 따른 수평연료관 손상, 감속재 고갈, 칼랜드리아 탱크 손상 시점, 그리고 노심 내 수소 생성량이 표1부터 4에 정리되어 있다. 표의 MH2CRT(iL)은 Loop iL로부터 생성된 총 수소량 (kg)을 의미한다.

LLOCA/SLOCA/PTR의 경우 건전한 폐회로 (Loop 2)에서는 FSAGKT에 따라 약간 차이가 있긴 하지만 모두 creep rupture가 발생한다. LOCA가 발생한 폐회로 (Loop 1)에서는 LLOCA/SLOCA/PTR의 경우 FSAGKT가 0.4까지의 범위에서는 creep rupture가 발생하지만, 0.5이상부터는 연료관 파손은 일어나지 않고, LOFW의 경우는 FSAGKT 값에 상관없이 creep rupture가 발생한다.

감속재 고갈 시점 및 칼랜드리아탱크 손상도 FSAGKT에 따라 영향을 받는다. 0.5 이상의 FSAGKT 값에서는 초기사고에 상관없이 72시간까지 감속재가 고갈되지 않고, SLOCA/PTR/LOFW 에서는 0.4 이상부터 그리고 LLOCA 에서는 0.5 이상부터 칼랜드리아 탱크도 건전성을 유지한다.

4.1.2 수소 생성에 미치는 영향

참고문헌 2의 그림 4.1-1 부터 4.1-16에는 LLOCA, SLOCA, PTR 그리고 LOFW 초기사고에서 FSAGKT가 0.1과 0.5인 경우 Loop 1,2 에서 수소 생성량을 보여준다. FSAGKT 값을 0.1과 0.5의 그림을 보여주는 이유는 0.1은 기본값으로 쓰이는 값이고 0.5는 수소 생성량이 가장 많기 때문이다. 연료관의 피복재 (CL), 압력관 (PT), 그리고 칼랜드리아관 (KT)에서 수소가 생성되며, 이 중 칼랜드리아관, 피복재, 그리고 압력관의 순서로 수소가 많이 생성된다.

참고문헌 2의 그림 4.1-17 부터 4.1-20에는 FSAGKT가 0.1과 0.5인 경우 초기사고별 Loop 1,2 에서 수소 생성량을 보여준다. 초기사고에 따른 수소 생성량은 크게 차이를 보이지 않으나, FSAGKT에 따라서는 차이를 보인다. 즉, FSAGKT=0.1인 경우는 Loop 1에서 약 70-85 kg 정도 발생되나, 0.5에서는 72시간에 전체 발생량이 약 250-280 kg 정도이다. FSAGKT값이 0.1, 0.5인 노심 내 수소 생성량은 SLOCA, LLOCA, LOFW, 그리고 PTR 순이다.

참고문헌 2의 그림 4.1-21 부터 4.1-36에는 LLOCA, SLOCA, PTR 그리고 LOFW 초기사고에서 FSAGKT가 0.1에서 0.9인 경우 Loop 1,2 에서 수소 생성량을 보여준다. 수소 생성량의 경우 LLOCA, SLOCA, PTR인 경우는 Loop 1인 경우 FSAGKT 값이 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.3, 0.2, 0.1 순이며 Loop 2인 경우는 FSAGKT 값이 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1 순이다. 수소 생성량은 LOFW의 경우는 Loop 1,2 모두 FSAGKT 값이 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1 순이다. 그러나 Loop 1,2를 합한 총 수소 생성량은 각 초기 사건의 경우 FSAGKT가 0.5에서 제일 많다. FSAGKT가 낮을수록 수소 생성량은 사고 초반에 집중적으로 생성되며, FSAGKT가 0.4 이상에서는 꾸준히 수소가 생성된다.

참고문헌 2의 그림 4.1-37 부터 4.1-44에는 LLOCA, SLOCA, PTR 그리고 LOFW 초기사고에서 FSAGKT가 0.1과 0.5인 경우 Loop 1에서 노심의 최대온도와 Holding Bin으로 재배치된 연료물질의 양을 보여준다. FSAGKT=0.1의 경우 네가지 사고에서 모두 감속재로의 열전달 부족으로 노심이 가열되어 Holding Bin으로 재배치됨을 알 수 있다. 그러나 FSAGKT=0.5 에서는 노심 가열로 인한 재배치가 일어나지 않으며, 이는 감속재로의 충분한 붕괴열 제거로 채널의 건전성이 유지되기 때문이다. 수소는 연료관이 Holding Bin으로 재배치되기 전까지 생성되며, FSAGKT가 0.1의 경우 사고 초반에 Holding Bin으로 일찍 재배치되므로 수소 생성에 필요한 시간이 제한되므로 초반에 생성되는 것 이외에는 더 이상 수소가 생성되지 못한다. 한편, FSAGKT=0.5에서는 수평연료관의 재배치가 이루어지지 않아 수평연료관이 제 위치에서 서서히 가열되어 수증기와 접촉할 시간이 많아 장기간에 걸쳐 수소가 생성된다.

4.2 TSAGKT 영향 평가

4.2.1 사고 전반적인 영향

TSAGKT 값에 따른 주요 사고 시점이 표5부터 8에 정리되어 있다.

LLOCA/SLOCA/PTR의 경우 LOCA가 발생한 폐회로 (Loop 1)와 건전한 폐회로 (Loop 2)에서는 TSAGKT에 따라 약간 차이가 있긴 하지만 모두 creep rupture가 발생하였다. LOFW의 경우 creep rupture가 발생하고 파손 시간은 Loop1 이 11401초 그리고 Loop2는 11937초로 TSAGKT에 관계없이 같다. 다른 사고의 경우 감속재 고갈 및 칼랜드리아 탱크 손상 시점이 TSAGKT에 따라 영향을 받지만 큰 차이를 보이지는 않는다. 감속재 고갈 시점은 초기사고에 상관없이 TSAGKT 값 1173K, 1273K, 1373K 순으로 늦어졌으며, 칼랜드리아 탱크 손상은 TSAGKT 값에 따라 1.2 시간의 차이를 보인다.

4.2.2 수소 생성에 미치는 영향

참고문헌 2의 그림 4.2-1 부터 4.2-6에는 TSAGKT가 1173K, 1273K 그리고 1373K인 경우 초기사고별 Loop 1,2에서 수소 생성량을 보여준다. 초기사고에 의한 영향보다는 TSAGKT에 따라 수소 생성량의 차이를 보인다. 즉, TSAGKT=1173K인 경우는 약 119-125 kg 정도 발생되나, 1273K에서는 약 146-161 kg 그리고 1373K에서는 약 188-201 kg정도이다.

참고문헌 2의 그림 4.2-7 부터 4.2-14에는 LLOCA, SLOCA, PTR 그리고 LOFW 초기사고에서 TSAGKT가 1173K, 1273K, 1373K인 경우 Loop 1,2 에서 수소 생성량을 보여준다. 대부분의 경우 TSAGKT에 따라 Loop 1에서는 약 30 ~ 50 kg, Loop 2에서는 약 40 ~ 60 kg 으로, 모두 70 ~ 110 kg의 큰 차이를 보인다. 이러한 차이는 TSAGKT가 낮을수록 재배치가 일찍 일어나 수소 생성이 제한되는 반면 TSAGKT가 높을수록 지속적으로 수소가 생성되기 때문으로 이해된다.

5. 결론 및 추후 연구 내용

월성 원전에서의 칼랜드리아관의 처짐 모델에 대한 검토와 관련 모델 변수인 FSAGKT와 TSAGKT에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 분석 대상으로 대형 LOCA, 소형 LOCA, 압력관 파단 사고 (PTR), 그리고 증기발생기 급수 상실사고 (LOFW)를 선정하고, 각 변수가 사고 진행 및 노내 수소 생성에 미치는 영향을 평가하였다.

FSAGKT와 TSAGKT에 따라 사고 진행이 영향을 받고, 특히 수소 생성량 등에 차이가 있음을 확인하였다. 노심 손상을 야기시키는 초기사고에는 크게 영향을 받지 않음을 확인하였다. TSAGKT는 기본값으로 1273 K를 사용하였고, 1173 K와 1373 K에 대하여 각 사고 경위별로 사고진행 및 노내 수소 생성량을 비교하였다. 수소 생성량은 온도에 따른 수평연료관의 처지는 시점이 달라 70 ~ 110 kg의 차이를 보였지만 사고 진행에는 큰 영향을 보이지 않았고, 따라서 기본값으로 사용한 1273 K는 타당하다고 판단된다. FSAGKT는 0.1부터 0.9까지 변화시켜 가면서 사고 진행 및 수소 생성량을 비교하였는데, FSAGKT 값에 따라 수소 생성량은 물론 사고 진행 경향은 달리 나타난다. 즉 0.1부터 0.3 까지는 수평 연료관의 재배치로 칼랜드리아 탱크가 파손되지만 0.5이상의 값에서는 칼랜드리아 탱크가 건전함을 보여준다. 기본값으로 사용하는 0.1의 경우는 사고 진행이 빨라 칼랜드리아 탱크가 손상되는 등 보수적인 결과를 얻을 수 있었다

현재의 ISAAC 코드는 고정된 FSAGKT 값이 입력되고, 모든 채널에서 처짐 조건을 만족하면 바로 열전달 면적을 감소시켜 사고 진행을 모의하고 있다. 그러나 실제로는, 각 채널 조건에 따라 처지는 정도가 다르고, 이에 따라 감속재와의 표면적 접촉 비율도 사고진행 시간에 따라 달라진다. 해석결과 FSAGKT의 값에 따라 수소 생성량 및 사고진행이 영향을 받으므로 고정된 FSAGKT 값을 대체할 수 있는 처짐 모델 개발의 필요성이 제안되었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구 개발 사업의 일환으로 수행 되었습니다.

참고문헌

1. “Development of Computer Code for Level 2 PSA of CANDU Plant” KAERI, KAERI/RR-1573/95, December 1995.
2. S.D.Kim, "An Evaluation of Sagging Model on Hydrogen Generation in ISAAC," KAERI, KAERI/TR-2557/2003, August 2003.
3. “월성1호기 격납건물 건전성 확률론적 안전성 평가(제3차 분기 진도 보고서),” 한국원자력연구소, July 2002.
4. “Wolsong NPP 1 FSAR,” KEPCO, December 1989.

표 1. LLOCA에서의 FSAGKT 변화에 따른 주요 사건 일지

	FSAGKT								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
수평연료관 손상 (Loop1)(초)	6067	6271	6605	7503	No Fail				
수평연료관 손상 (Loop2)(초)	9839	9752	9808	9715	9679	9665	9673	9671	9677
감속재고갈시점(초)	31253	32095	34453	48871	No				
칼랜드리아탱크 손상(초/시간)	144889 (40.2)	134612 (37.4)	141778 (39.4)	255640 (71.0)	No Fail				
노심 내(CL+PT+KT) 수소생성량(kg) MH2CRT(1) + MH2CRT (2)	150.2	163.3	277.8	491.7	516.2	512.4	510.5	508.7	508.7

표 2. SLOCA에서의 FSAGKT 변화에 따른 주요 사건 일지

	FSAGKT								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
수평연료관 손상 (Loop1)(초)	15590	16087	17714	33717	No Fail				
수평연료관 손상 (Loop2)(초)	13813	13813	13813	13813	13813				
감속재고갈시점(초)	38993	39543	41765	97903	No				
칼랜드리아탱크 손상(초/시간)	155495 (43.2)	159917 (44.4)	168661 (46.9)	No Fail					
노심 내(CL+PT+KT) 수소생성량(kg) MH2CRT(1) + MH2CRT (2)	161.4	212.1	307.8	336.0	529.3	523.7	519.9	512.4	510.5

표 3. 노심 내 튜브 파손 사고 (PTR)에서의 FSAGKT 변화에 따른 주요 사건 일지

	FSAGKT								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
수평연료관 손상 (Loop1)(초)	9449	9743	10296	9718	No Fail				
수평연료관 손상 (Loop2)(초)	9640	9638	9617	9628	9614	9613	9614	9607	9609
감속재고갈시점(초)	32596	33272	35771	56495	No				
칼랜드리아탱크 손상(초/시간)	147354 (40.9)	136278 (37.9)	143755 (39.9)	No Fail					
노심 내(CL+PT+KT) 수소생성량(kg) MH2CRT(1) + MH2CRT (2)	146.4	165.2	253.4	497.4	512.4	508.7	508.7	506.8	506.8

표 4. LOFW에서의 FSAGKT 변화에 따른 주요 사건 일지

	FSAGKT								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
수평연료관 손상 (Loop1)(초)	11401								
수평연료관 손상 (Loop2)(초)	11937								
감속재고갈시점(초)	31472	32112	34256	56848	No				
칼랜드리아탱크 손상(초/시간)	144992 (40.3)	135269 (37.5)	152168 (42.3)	No Fail					
노심 내(CL+PT+KT) 수소생성량(kg) MH2CRT(1) + MH2CRT (2)	148.3	167.1	296.6	469.3	523.7	523.7	523.7	523.6	523.6

표 5. LLOCA에서의 TSAGKT 변화에 따른 주요 사건 일지

LLOCA	TSAGKT		
	1173 K	1273 K	1373 K
수평연료관 손상 (Loop1)(초)	6048	6067	6123
수평연료관 손상 (Loop2)(초)	9835	9839	9802
감속재고갈시점(초)	30277	31253	33475
칼랜드리아탱크 손상(초/시간)	145003 (40.3)	144889 (40.2)	143970 (40.0)
노심 내(CL+PT+KT) 수소생성량(kg) MH2CRT(1) + MH2CRT (2)	121.0	150.2	201.0

표 6. SLOCA에서의 TSAGKT 변화에 따른 주요 사건 일지

SLOCA	TSAGKT		
	1173 K	1273 K	1373 K
수평연료관 손상 (Loop1)(초)	15498	15590	15902
수평연료관 손상 (Loop2)(초)	13813	13813	13813
감속재고갈시점(초)	36928	38993	41260
칼랜드리아탱크 손상(초/시간)	155438 (43.2)	155495 (43.2)	152671 (42.4)
노심 내(CL+PT+KT) 수소생성량(kg) MH2CRT(1) + MH2CRT (2)	125.4	161.4	188.0

표 7. 노심 내 튜브 파손 사고 (PTR)에서의 TSAGKT 변화에 따른 주요 사건 일지

PTR	TSAGKT		
	1173 K	1273 K	1373 K
수평연료관 손상 (Loop1)(초)	9390	9449	9540
수평연료관 손상 (Loop2)(초)	9646	9640	9626
감속재고갈시점(초)	31796	32596	34770
칼랜드리아탱크 손상(초/시간)	147107 (40.8)	147354 (40.9)	145298 (40.4)
노심 내(CL+PT+KT) 수소생성량(kg) MH2CRT(1) + MH2CRT (2)	122.3	146.4	194.6

표 8. LOFW에서의 TSAGKT 변화에 따른 주요 사건 일지

LOFW	TSAGKT		
	1173 K	1273 K	1373 K
수평연료관 손상 (Loop1)(초)	11401	11401	11401
수평연료관 손상 (Loop2)(초)	11937	11937	11937
감속재고갈시점(초)	30012	31472	33862
칼랜드리아탱크 손상(초/시간)	144612 (40.2)	144992 (40.3)	149138 (41.4)
노심 내(CL+PT+KT) 수소생성량(kg) MH2CRT(1) + MH2CRT (2)	119.5	148.3	190.4

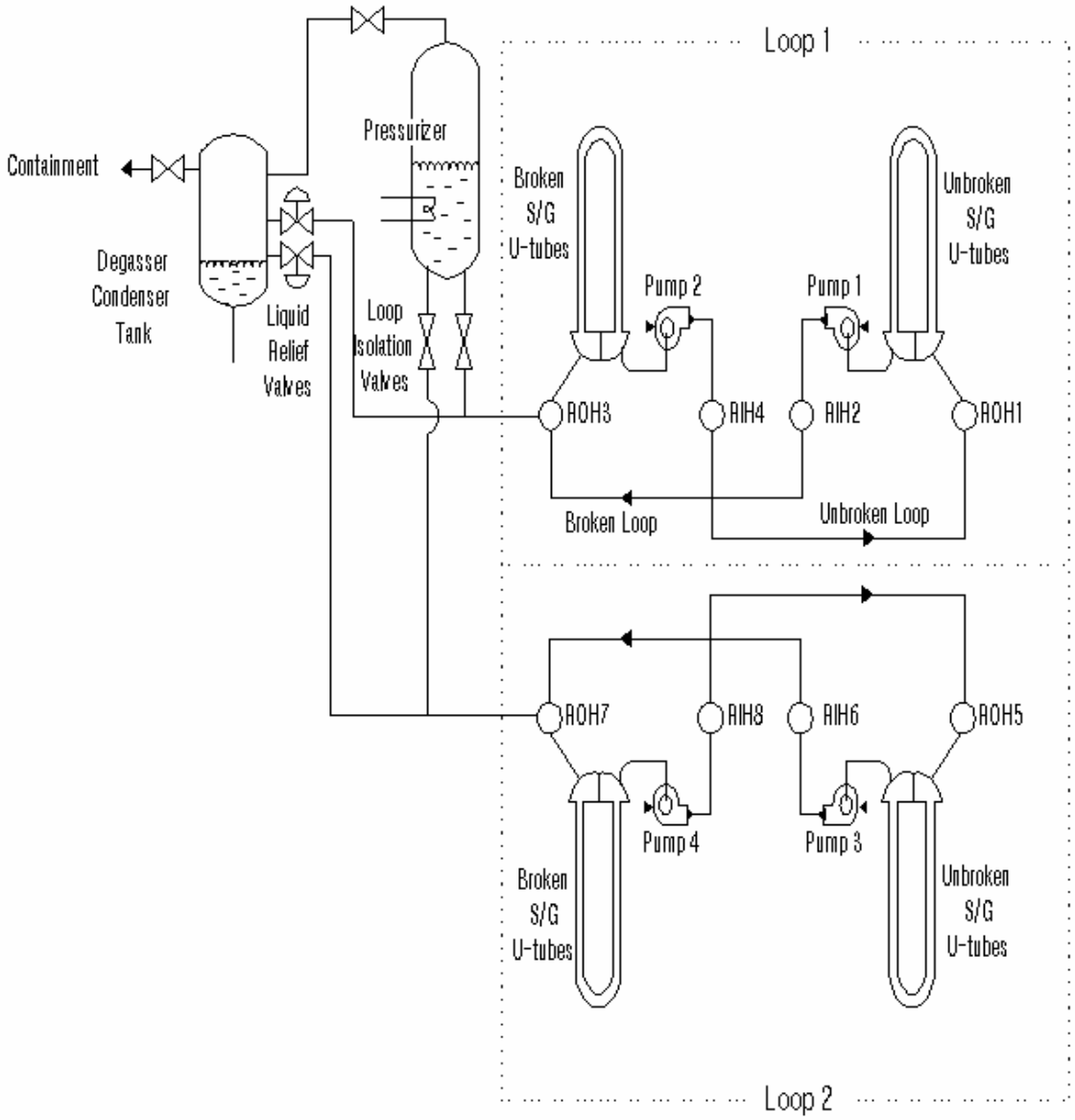

그림 1. 월성 1호기 일차계통 ISAAC 구성도