

## 주증기관파단사고시 액체유입(Entrainment) 생산방법 Development of Main Steamline Break Entrainment Methodology

송동수, 박영찬  
한국전력공사 전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

### 요 약

주증기관파단사고시 질량 및 에너지 방출에 의한 격납건물내 온도분석은 기기검증에 있어서 매우 중요하다. 사고발생시 순수 증기만 방출되는 것이 아니고 액체도 동시에 방출된다고 가정하면 침두 온도를 감소시키는 측면에서 바람직하다. 이러한 액체유입(Entrainment)을 계산하기 위해서는 실험 자료와 비교하는 것이 필수적이다. 본 논문에서는 액체유입계산을 위하여 증기관파단 액체유입 실험결과와 코드수행결과를 비교검증 하였다. 이를 위해 실험장치를 RETRAN 코드로 모델링하여 코드사용의 타당성을 평가하였으며, RETRAN 코드로 생산된 건도를 열수력 계통해석코드인 LOFTRAN 코드와 연계시켜 질량/에너지를 생산하였다. 그리고 Entrainment를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우를 비교하여 격납건물 침두온도를 계산하여 평가하였다.

### Abstract

The entrainment methodology for the analysis of Main Steam Line Break (MSLB) accidents consists of running LOFTRAN and RETRAN-3D models in an iterative manner. The LOFTRAN model is a representation of the entire Nuclear Steam Supply System (NSSS) that calculates the mass and energy releases. These releases are input into either a Containment calculation or an Environmental Qualification (EQ) calculation. The LOFTRAN model requires the input of the time dependent break quality, since LOFTRAN does not have the capability to perform this calculation. The RETRAN-3D model only represents the Primary and Secondary sides of the broken loop Steam Generator (SG) and calculates the time dependent break quality. The output from the LOFTRAN calculation provides thermal-hydraulic boundary conditions to the RETRAN-3D model, and the RETRAN-3D calculated time dependent quality is input back into the LOFTRAN model. The applicability criteria are defined as those physical and operational parameters of the Steam Generator design that must be in reasonable agreement with those of the test facility and the range over which the benchmarked tests were run.

### 1. 서 론

통상 증기관파단사고(MSLB)가 원자로 냉각재 상실사고(LOCA) 보다 더 제한적인 것으로 알려져 있으며, 고리 1호기의 경우 1970년대에 설계된 원전으로서 기기검증이 고려되지 않았기 때문에 증기관 파단시 질량/에너지 방출량을 분석하지 않았다. 예비분석결과 주증기관파단사고시 질량/에너지 방출에 의한 격납건물내 침두온도는 최고 360°F 까지 올라가는 것으로 나타났다. 따라서 고리 1호기 기기검증을 위한 온도조건을 개선하는 것이 필요하다. 즉 주증기관파단사고시 최고 온도를 낮추게 되면 신설되는 계기뿐만 아니라 기존에 설치되어있는 기기 및 계기의 설계/ 구매요건을 완화할

수 있다. 사고시 온도를 낮추기 위한 방법으로 증기관파단사고시 액체유입(entrainment)을 고려하게 되면 증기와 함께 방출되는 물이 온도를 감소시키는 역할을 한다. 결과적으로 사고시 기기검증용 환경조건을 완화시킬 수 있는 효과가 있어 사고해석에서 액체유입을 가정하는 것은 필수적이다.

## 2. 액체유입(Entrainment)모델 개발

모델개발 목적은 MSLB 해석을 위한 PWR 증기발생기에 대한 액체유입 모델을 개발하는 것이다. 본 모델개발은 1973년도에 CE에서 수행한 MSLB시 습분동반실험(Moisture Carryover Test) 결과를 기반으로 하였으며 사용코드는 RETRAN-3D 이다.

우선 실험결과와 잘 맞는 RETRAN-3D 모델의 특정 입력변수를 작성하는 것이다. RETRAN 계산결과와 실험장치의 측정값을 비교함으로써 Benchmark 하였다. 이러한 비교를 통하여 계산결과와 실험결과와의 불확실도와 bias를 설정한다. 이 모델이 실험장치의 적절한 기하학적 특성을 가진 U-Tube S/G에 대한 MSLB 분석에 적용시 불확실도와 bias를 사용될 수 있다. 이 경우 계산결과가 측정결과와의 95%신뢰도와 95%확률을 갖는 upper bound one side tolerance 내에 있는지 적절한 확인을 거쳐 사용될 수 있다.

방법론은 주로 실험장치의 증기발생기의 기하학적 모델을 개발하는 것으로 이때 CE 실험보고서 및 열수력모델의 가정과 각각의 모델 변수들을 참고하였다. 그런 다음 모델의 민감도 분석을 수행하는데, 각 모델 변수들을 계산결과들이 실험결과와 일치될 때까지 변화시켜 최종적으로 이 모델에 관련된 95/95 제한치를 얻기 위한 불확실도와 bias를 생산한다. 이러한 benchmark를 위해서 10개의 test sets를 사용하였다.

RETRAN-3D 모델은 통상 LOFTRAN과 같은 NSSS 계통 코드와 함께 사용된다. LOFTRAN 코드는 MSLB 건도를 자체생산 할 수 없으므로 입력으로 요구된다. 이때 RETRAN 코드와 LOFTRAN 코드의 모델은 분석하고자 하는 특정발전소의 과도해석모델이어야 한다. RETRAN-3D 모델은 benchmark 모델의 주요 요소들을 고려하여야 하며, 해당 증기발생기의 설계측면에서도 적용성 기준에 맞아야한다. 이러한 방법론을 적용하는 주된 내용은 첫째 RETRAN-3D 모델에 경계조건을 제공하는 다른 계통 모델인 LOFTRAN을 실행하는 것이고, 둘째 RETRAN-3D 모델이 완성된 다음에 RETRAN-3D으로 생산된 건도(Quality) 출력자료를 LOFTRAN 코드의 입력 경계조건으로 입력한다. 이러한 일련의 반복과정을 계속하되 건도가 일정한 값을 갖게 되는 즉 수렴할 때까지 계속 수행한다. 마지막으로 이렇게 RETRAN-3D로 생산된 건도(Quality)에 entrainment 모델 불확실도와 bias를 고려한 Multiplier를 곱한 entrainment값을 LOFTRAN에 입력하여 최종적으로 Mass/Energy를 생산한다.

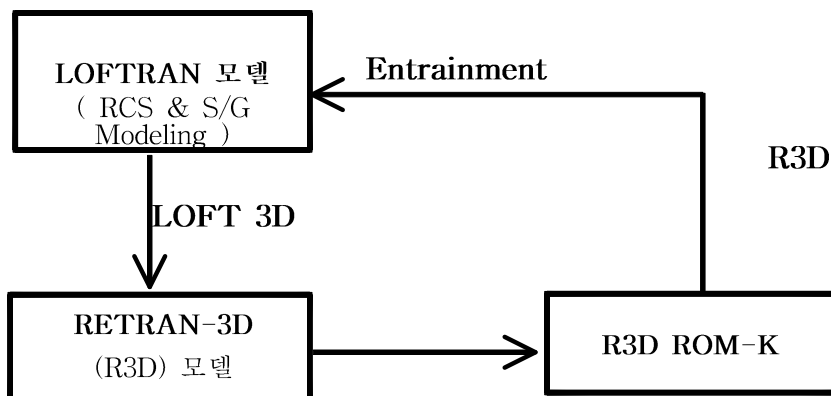


그림 1. Entrainment 생산을 위한 프로그램 연계 체제

LOFTRAN 코드에 의해서 생성된 주요변수들을 RETRAN 코드에 입력할 수 있는 경계조건(B.C)을 생성한다. RETRAN 코드에 경계조건으로 입력되는 변수들로는 Hot leg flow (lbm/sec), Main fw flow (lbm/sec), Aux feed water flow (lbm/sec), Total steam flow (lb/sec), Enthalpy and pressure 등이 있다.

#### 4. 실험장치 모델과 RETRAN 모델 Benchmark

실험 데이터를 RETRAN 코드와 비교하기 위해 그림 2와 같이 실험장치를 RETRAN 코드로 모델링하였다.

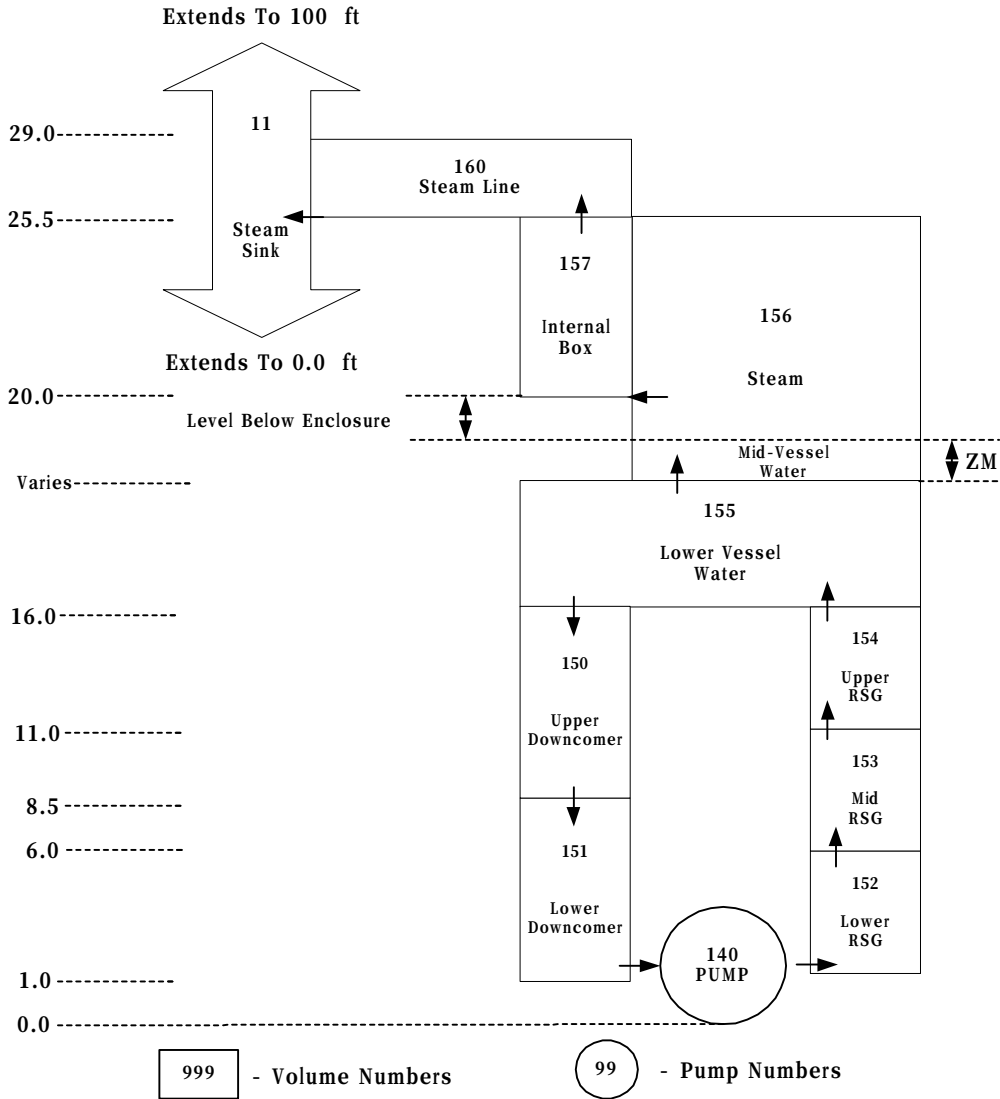


그림 2. 실험장치의 RETRAN 모델링

그림 3은 실험 데이터와 RETRAN 모델결과를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 압력 온도 모두 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

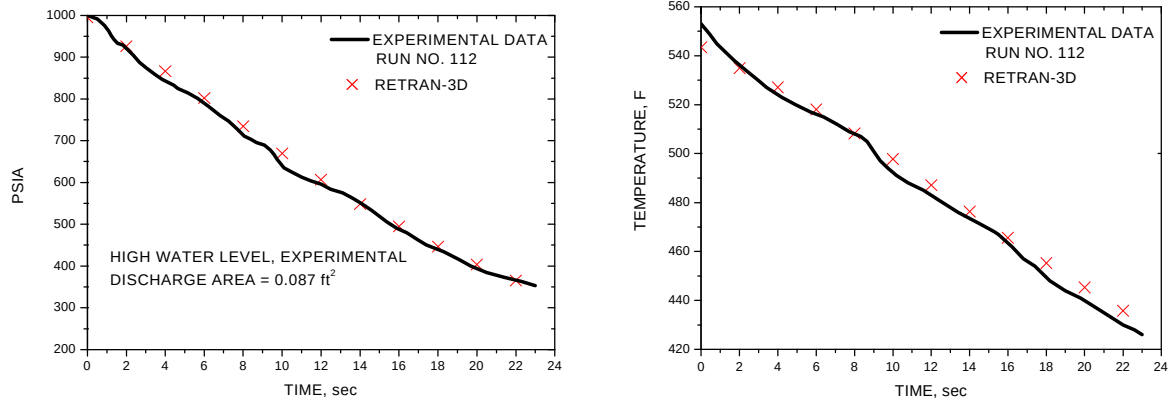


그림 3 실험 Data와 RETRAN 수행결과 비교검증

## 5. Entrainment Multiplication Factor 계산

실험장치에서 얻은 10개의 데이터에 대하여 평균 건도 데이터와 실험장치를 RETRAN Code로 모델하여 얻은 평균건도를 각각 비교하여 그 오차를 통계적으로 계산함으로써 Multiplication Factor를 계산하였다.

| Testsets           | AVERAGE QUALITY (%) |            | MEAS/CALC | MEAS-CALC |
|--------------------|---------------------|------------|-----------|-----------|
|                    | MEASURED            | CALCULATED |           |           |
| 1                  | 58.9                | 100.0      | 0.589     | -41.1     |
| 2                  | 69.5                | 100.0      | 0.695     | -30.5     |
| 3                  | 77.1                | 100.0      | 0.771     | -22.9     |
| 4                  | 21.7                | 21.4       | 1.014     | 0.3       |
| 5                  | 25.7                | 26.7       | 0.963     | -1.0      |
| 6                  | 41.3                | 36.4       | 1.135     | 4.9       |
| 7                  | 65.3                | 68.2       | 0.957     | -2.9      |
| 8                  | 25.8                | 21.6       | 1.194     | 3.9       |
| 9                  | 36.5                | 31.0       | 1.177     | 4.2       |
| 10                 | 48.1                | 43.6       | 1.103     | 4.5       |
| Average Value      |                     |            | 0.9598    | -7.900    |
| Standard Deviation |                     |            | 0.1999    | 16.191    |

Multiple the Calculated Value by  $0.9598 + 2.911 \times 0.1999 = 1.5417$   
(95/95 value of the calculated quality relative to the measured quality)

위와 같이 실험장치와 RETRAN 모델과의 평균 건도 비교결과 1.5417의 Multiplication Factor를 구하였다. 이값을 특정 발전소에 대한 모델결과 계산된 건도에 곱해 줌으로서 Entrainment 값으로 Mass/Energy 계산 입력으로 사용된다.

## 6. 고리 1호기 분석 결과

상기에 열거한 방법론을 토대로 고리 1호기를 대상으로 Entrainment를 생산하기 위하여 RETRAN 모델을 수행하였고 Entrainment를 계산하였다. 계산된 Entrainment 값에 Multiplication Factor를 부과하여 수정된 Entrainment 데이터를 LOFTRAN Code에 입력하여 Mass/Energy를 계산하였다. 계산된 Mass/Energy를 CONTEMPT LT/28 코드에 의해 격납건물 내부 온도/압력을 분석하여 비교하였다.

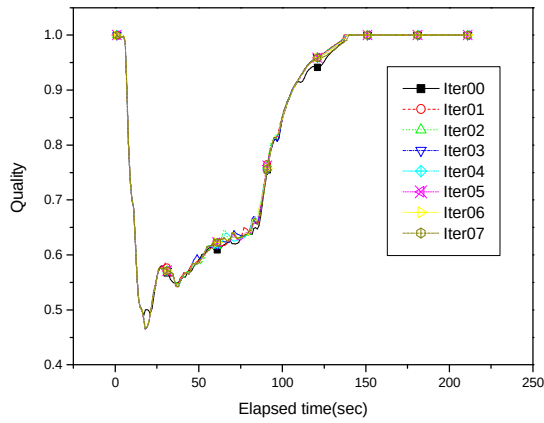


그림 4 RETRAN 건도계산결과(Entrainment)

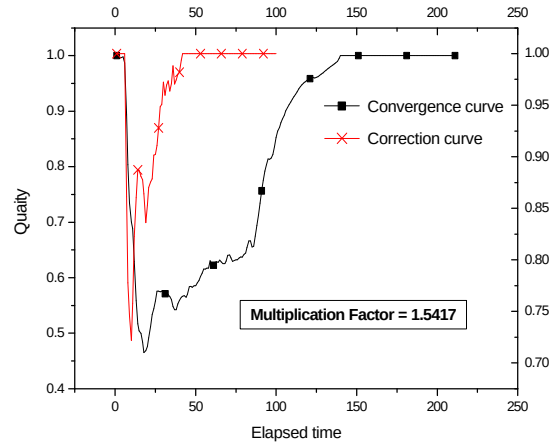


그림 5 Multiplication Factor 반영된 결과

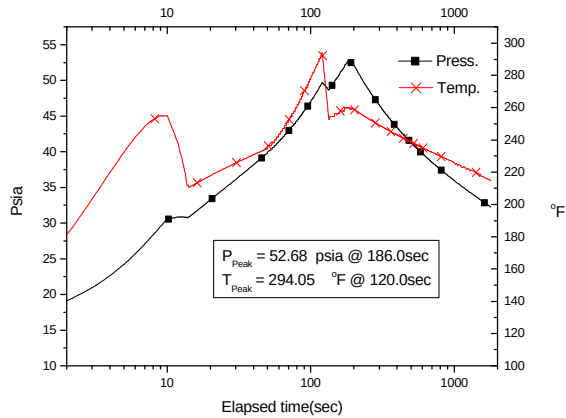


그림 6 Entrainment 고려한 격납건물  
온도/압력 계산결과

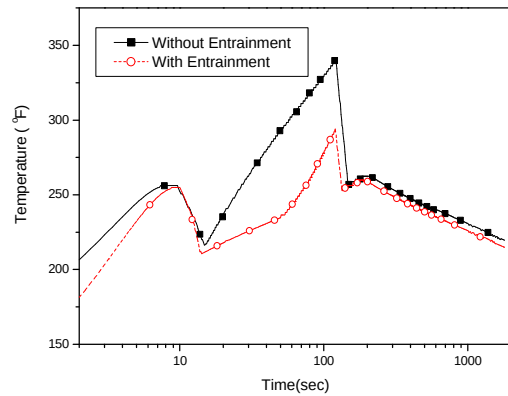


그림 7 온도 계산결과 비교  
(With /Without Entrainment)

## 7. 결 론

Entrainment 효과를 평가하기 위하여 분석 결과를 최종적으로 격납건물 내부의 온도/압력을 계산하여 Entrainment를 고려할 경우와 고려하지 않을 경우에 대하여 각각 침투온도/압력을 비교한 결과 Entrainment를 고려한 경우가 약 45°F정도 온도가 낮게 나타나 결과적으로 Entrainment를 고려함으로써 주증기관과 단 사고시 기기검증 환경조건을 완화하는 데 상당한 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

## 8. 후 기

본 연구는 과학기술부 지원하에 수행중인 국가주도 중장기 과제인 “ 원전 운전과도해석 및 신안전 해석 기술 개발”과제의 일환으로 수행되었다.

## 참고문헌

1. "LOFTRAN Code Description and User's Manual", WCAP-7878, edited by G. H. Heberle.
2. "RETRAN-3D A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flow Systems", NP-7450, Research Project 889-10 Computer Code Manuals, December 1997, Prepared by Computer Simulation & Analysis, Inc. Prepared for Electric Power Research Institute.