'2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

# 비균일 가열 수직 환상관의 유동 과도기 조건에서 MARS를 이용한 임계열유속 예측 방법 개발

# Development of Prediction Technique of CHF Inside a Non-Uniformly Heated Vertical Annulus Under Flow Transient Using MARS

최기용, 천세영, 문상기, 양선규

한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

## 요 약

비균질하게 가열되는 수직 환상관에서 유동과도기 조건에서의 임계열유속 실험데이터를 안전해석 최적코드인 MARS를 이용하여 평가하였다. 원형관에서 얻어진 실험데이터를 기초로 하고 있는 MARS의 임계열유속 모델은 수직환상관에서 발생하는 임계열유속을 초과 예측하고 있음이 밝혀졌다. 유동과도기 조건에서 MARS는 실험값보다 훨씬 낮은 질량유속에서 임계열유속이 발생하는 것으로 예측한다. 수직 환상관에서는 액막이 가열벽면과 비가열 벽면을 따라 나뉘어져 흐르는 환상류의 유동양식을 가지며, 임계열유속은 가열벽면에 존재하는 액막이 국부적으로 건조될 때 발생하게 된다. 그러나, 해석코드인 MARS는 액막이 원형관을 흐르는 것으로 가정하여 해를 구하게 되며, 상대적으로 실제보다 두꺼운 액막이 존재하는 것으로 여기게 되므로 임계열유속을 초과 예측하게 된다. 이러한 임계열유속의 초과예측으로 인해 유동과도기 조건에서 임계열유속 발생시간이 커지게 된다. 수직 환상관에서의 임계열유속을 예측하기 위하여 가열벽면과 비가열벽면을 따라 흐르는 액막을 따로 분리한 이중 파이프 모델링 방법을 시도하여 보았다. 이 경우 임계열유속의 예측 정확도는 증가하지만 이중 파이프를 연결하는 브랜치(branch)의 마찰계수에 따라 결과가 민감하게 달라지며, 정량적인 마찰계수를 얻는 데는 무리가 있음이 밝혀졌다. 환상관의 유로 중심선에 따라 액막이 나뉘어져 흐르고, 가열내벽면을 모사하는 유로의 면적분율에 따라 감소된 질량유량이 단일 파이프로 흐른다고 가정했을 경우에는 광범위한 실험데이터와 상당히 근접하는 결과를 얻을 수 있었다.

## Abstract

The critical heat flux (CHF) model in the thermal analysis code MARS is assessed with the experimental data obtained inside a non-uniformly heated vertical annulus under flow transient. The critical heat flux model in MARS, which is developed in circular pipe geometry, is found to overpredict the experimental data in vertical annulus geometry. Under flow transient conditions, MARS predicts that critical heat flux occurs at lower mass flux than the experimental value. The annular flow regime, in which the separated liquid films flow on heated and unheated walls, is obtained in the heated vertical annulus test section. When the liquid film on the heated inner wall is dried out critical heat flux occurs. However, MARS does not consider the liquid film separation in a pipe component so that it predicts thicker liquid film than the real situation. It makes MARS ovepredict critical heat flux, resulting in the time-delay in the estimation of CHF under flow transient conditions. In order to overcome the poor prediction of CHF, double-pipe-components modeling method is tried. It enhances the predictability of CHF, but its results are highly dependent on the flow loss coefficients of the branches that link the adjacent volumes of double-pipe-components. However, when the inlet mass flux is assumed to be splitted at the same fraction to the area fraction of double-pipes and flow upward inside a single pipe component, the prediction of CHFs is found to agree with the experimental data reasonably.

## 1. 서론

현재까지 임계열유속에 관한 연구는 광범위하게 이루어져 왔으며, 많은 실험데이터가 확보되어 있으며, 확보된 실험데이터를 기초로 하여 대부분의 안전해석 코드들이 개발되었다. 대부분의 임계열유속 실험데이터는 주로 정상상태에서 얻어졌으며, 과도기 조건에서 확보된 실험 데이터는 많지 않은 편이다. 실제 원자력발전소에서의 임계열유속은 유량, 출력, 압력 등의 조합으로 이루어진 과도기 상태에서 발생하며, 임계열유속에 대한 과도기상태의 영향은 매우 중요하므로, 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다.
최근에 한국원자력연구소에서는 고온, 고압 임계열유속 실험장치를 이용하여 수직 환상관에서 다양한 출력, 압력 및 유량 조건에서 일련의 실험을 수행해 오고 있다. 출력은 수직방향의 열유속분포가 균일한 경우와 대칭 코사인분포(Symmetric Cosine Distribution)를 갖는 경우를 고려했으며, 광범위한 범위의 압력과 유량이 고려되었다. (천세영 등, 1999; 문상기 등, 1999) 최근에는 유동과도기 조건에서 고리 3/4호기 원자로냉각재펌프의 Flow Coastdown을 모사한 실험을 수행하였으며, Flow Coastdown 곡선의 유량감소율을 변화시켜 유량감소율에 따른 임계열유속의 거동을 저유속 조건 및 광범위한 압력조건에서 조사하였다. (문상기 등, 2000)
본 연구에서는 안전해석 코드인 MARS의 일차원(1-D) 코드를 이용하여 비균일 가열 수직 환상관에서 유동과도기 조건에서 얻은 임계열유속 실험데이터를 예측하였으며, 코드계산 결과와 실험데이터와의 차이를 비교, 분석하였다. 실험데이터의 예측 정확도를 향상시키기 위하여 다양한 코드 입력 파일을 검토하였으며, 최적의 예측방법론을 제시하였다.

## 2. 실험장치 및 평가 실험데이터

표 1 선정된 평가 실험데이터군

| Run no. | P (kPa) | $G_{in}$ (kg/m$^2$-s) | $G_{CHF}$ (kg/m$^2$-s) | $\Delta h_{in}$ (kJ/kg) | Q (kW) | CHF (kW/m$^2$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| FT-A-1-F | 1907.4 | 650 | 205.117 | 217.135 | 36.8 | 667.455 |
| FT-A-4-F | 1895.0 | 650 | 222.954 | 360.266 | 45.3 | 820.686 |
| FT-A-11-F1 | 1847.2 | 650 | 419.153 | 92.018 | 53.3 | 966.776 |
| FT-B-2-F | 5882.9 | 650 | 245.249 | 210.985 | 45.9 | 832.502 |
| FT-B-7-F | 5847.8 | 650 | 325.513 | 81.328 | 46.3 | 839.317 |
| FT-B-9-F | 6079.0 | 650 | 231.872 | 363.023 | 53.3 | 966.396 |
| FT-B-11-F | 5887.6 | 650 | 436.989 | 353.628 | 77.7 | 1408.092 |
| FT-C-3-F | 549.7 | 650 | 521.712 | 342.035 | 56.0 | 1014.748 |
| FT-C-4-F | 552.7 | 650 | 267.545 | 206.735 | 34.9 | 633.003 |

임계열유속 실험장치는 한국원자력연구소의 RCS 열수력 실험장치를 사용했으며, 실험장치에 대한 자세한 설명은 문헌에 기술되어 있다. (Chun et al. 2000; 문상기 등, 2000) 실험에 사용된 시험관은 핵연료봉을 모의하도록 열단계의 수직방향 비균일 출력분포를 갖고 있으며, 내부직경 9.53mm의 가열봉이 외부직경 19.4mm의 원형관에 설치된 환상유로의 구조를 하고 있으며, 길이는 1843mm 이다.
유동과도기 조건에서의 실험데이터를 MARS에서 평가하기 위하여 평가기준이 되는 실험데이터를 다음과 같이 설정하였다. 실험은 fast, normal, slow 세가지 유동과도기 조건에서 이루어졌는데, normal 모드는 고리 3/4호기의 원자로냉각재펌프의 Coastdown 곡선에 의한 초기 유량의 비를 모사하는 유량과도기 모드를 지칭하여, fast와 slow 유동과도기는 normal 모드 곡선을 각각 제곱 혹은 제곱근한 모드를 의미한다. 그러나 실제 실험에서는 펌프의 반응시간의 이상적이지 않고, 펌프의 회전속도 변화 및 이에 따른 유량변화 및 실험장치에서의 압력강하 등의 복합적인 영향으로 인해 이상적인 유량곡선을 얻기가 어려웠다. 실험데이터를 살펴보면 fast 유동과도기 조건과 normal 유동과도기 조건은 유량감소곡선은 거의 일치한다.

그러므로 본 연구의 평가에 사용될 실험데이터는 fast 유량과도기 조건으로 국한했으며, 다양한 압력과 입구 과냉각도를 고려하여 선별적으로 채택하였다. 채택된 평가기준 실험데이터군은 표 1에 표시되어 있다.

### 3. MARS의 임계열유속 평가방법

MARS는 임계열유속을 예측하기 위하여 Groeneveld 등에 의한 AECL-UO CHF Lookup Table 방법을 사용하고 있다. (Ransom et al. 1995) 기본적으로 이 Table은 8mm 원형관을 정규화한 데이터를 근거로 하고 있으나, 봉다발을 포함한 다른 형태의 기하학적 유로에서도 적용이 가능하도록 보정 인자를 제시하고 있다. Lookup Table은 15000여개의 데이터를 기초로 하고 있으며, 압력은 0.1에서 20 Mpa까지 15개의 값, 질량유속은 0.0에서 7500 kg/s-$m^2$ 까지 14가지의 값, 평형건도는 -0.5에서 1.0까지 21가지의 값을 포함하고 있다. Table에서 CHF값을 찾은 후 Geoeneveld 등에 의해 제안된 각종 보정 인자를 곱하여 식 (1)과 같이 Table값을 수정하여 임계열유속을 구하도록 되어있다.

$$CHF = CHF_{table} \times chfmul\,, \qquad (1)$$

여기서 ***chfmul*** 은 Table에서 찾은 임계열유속값을 보정하는 식 (2)로 정의된 인자이며, 구성하는 개별적인 인자들은 문헌에 정의되어 있다.(Ransom et al. 1995)

$$chfmul = k_1 \times k_2 \times k_3 \times k_4 \times k_5 \times k_6 \times k_8 \qquad (2)$$

### 4. 실험장치 노드화

실험장치의 노드화는 세가지로 이루어졌다. 모든 노드화는 일차원 모델이며, 각각의 노드화에 대한 설명 및 평가 결과가 기술될 것이다. 우선 노드화 #1은 환상관인 실험장치를 단일 파이프 구성요소(pipe component)로 모델링하는 것으로 MARS에서 제공하는 가장 기본적인 노드화라고 할 수 있다. 실험장치와 코드와의 상사성은 환상관의 유동면적과 파이프의 유동면적을 동일하게 유지하는 것으로 보존시켰다. 노드화 #2는 환상관내에서 액막이 가열벽면과 비가열벽면으로 나뉘어져 흐르는 현상을 모사하기 위하여, 각각의 액막이 두 개의 파이프로 나뉘어져 흐르는 것으로 가정하여 노드화하였다. 이 과정에서 사용되는 가정에 대한 설명과 보정인자들에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 마지막으로 노드화 #3는 가열벽면을 흐르는 액막의 유량만 분리하여, 단일 파이프로 모델링하는 방법이다.

#### 4.1 노드화 #1 및 평가결과

해석 코드인 MARS에서 임계열유속 실험장치를 모사하기 위하여, 그림 1과 같이 실험장치를 노드화하였다. 시험관은 12개의 체적을 가진 파이프로 모사하였으며, 임계열유속이 발생할 것으로 예상되는 시험관 상부는 체적을 작게 나누었으며, 파이프 상단부의 체적의 중심 고도(elevation)는 열전대가 설치된 실험장치의 고도와 일치시켰다. 실험장치의 환상관과 코드에서의 원형관은 유동면적이 일치하도록 하였으며, 열전달등가직경(heat transfer equivalent diameter)을 고려하여 해석코드 입력화일을 작성하였다.

그림 2는 본 연구의 코드에서 입력으로 사용된 전형적인 유량감소 곡선을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 측정된 유량감소 곡선과 입력에서 사용된 곡선이 서로 같도록 했으며, 실험에서는 임계열유속이 발생하면 유량이 급증하는데 반해 코드 입력에는 계속해서 감소하는 것으로 가정하였다. 계산 시간 0초에서 40초까지는 유동과도가 발생하기 전으로 유동과도기 시작전의 정상상태를 얻기 위함이며, 유량감소는 t=40초에서 시작된다. 그림 3은 MARS를 이용하여 계산한 벽면 온도값과 실험에서 측정한 온도값

을 비교하고 있다. 실험에서 측정된 임계열유속은 시험관 최상부에서 발생하며, 이 위치는 파이프 150의 체적 11에 해당한다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 임계열유속이 발생하는 위치는 제대로 예측하고 있으나, 발생시간은 측정값에 비해 30초 정도 지연된다. 계산에서는 t=100초에 임계열유속이 발생하지만 실험에서는 t=68초에 임계열유속이 발생하는 것으로 측정하였다. 임계열유속 예측시간이 지연된다는 것은 유량이 시간에 따라 계속 감소되도록 입력하였으므로 측정된 유량보다 작은 질량유량에서 임계열유속이 발생한다는 것을 의미한다. 이러한 예측 지연 이유는 그림 4를 통해 설명될 수 있다. 그림 4는 시간에 따른 기공률과 건도의 계산값을 보여주고 있다. 계산 시간 t=50초경에 기공률의 불연속점은 이 지점에서 열전달모드가 과냉비등열전달(Subcooled nucleate boiling)에서 포화비등열전달(Saturated nucleate boiling)로 바뀜으로 인해 발생하는 불연속점이다. 그림에서 임계열유속은 기공률이 1.0에 거의 도달했을 때 발생하는 것으로 예측하고 있음을 알 수 있다. 이것은 파이프를 흐르는 액막이 거의 말랐을 때 임계열유속이 발생함을 의미한다. 그러나 실제로 환상관을 흐르는 유동을 고려한다면, 유동양식은 환상류의 형태를 가질 것이며, 액막은 가열되는 내벽면과 가열되지 않는 외벽면에 나뉘어져 흐를 것이다. 그러므로 가열되지 않는 외벽면에는 액막이 충분히 두껍게 존재해도 가열되는 내벽면에 흐르는 액막만 마른다면 임계열유속은 발생하게 된다. 이러한 액막의 분리 현상을 단일 파이프로 노드화한 경우 MARS의 1-D 모델은 제대로 예측하고 있지 못한다.

### 4.2 노드화 #2 및 평가결과

액막의 분리 현상에 대한 MARS의 예측 가능성을 확인해 보기 위하여 그림 5와 같은 노드화 #2를 시도해 보았다. 노드화 #2의 기본적인 개념은 가열 내벽면과 비가열 외벽면으로 나뉘어져 흐르는 액막을 각각 하나의 파이프로 모사하는 것이다. 본 연구에서는 우선 노드화 #2의 가능성을 확인하는 것이 우선 목적이므로 다음과 같은 가정을 하였다.

1) 환상공간의 중심선, 즉, 환상유로의 중심선을 경계로 하여 두개의 파이프로 분리한다. 이 경우 각각 파이프의 유동면적은 다음과 같이 분리된다.

$$A_{inner} = 9.300 \times 10^{-5}\ [m^2] = 0.415\ A_{total} \quad (3)$$

$$A_{outer} = 1.313 \times 10^{-4}\ [m^2] = 0.585\ A_{total} \quad (4)$$

2) 동일 고도에 이웃하는 두 파이프 체적간의 유동면적은 가열 내벽면 파이프와 동일하게 한다.
3) 동일 고도에 이웃하는 두 파이프 체적간의 유동저항계수인 forward flow energy loss coefficient (kw)와 reverse flow energy loss coefficient (kb)는 조정인자(tuning factor)로 사용한다.

이와 같은 가정을 이용하여 그림 5와 같이 실험장치를 노드화했으며, 이 때 두 파이프로 분기되는 질량유량은 조정인자의 값에 따라 계산된다. 그림 6은 두 파이프로 분기되는 질량유량 계산결과를 보여주고 있다. 그러나 이러한 질량유량의 분기는 동일 고도에 이웃하는 두 파이프 체적간의 유동저항계수에 따라 민감하게 반응하게 된다. 만약, 유동저항계수의 값이 작을 경우 (예를 들어 kw=kb=0.1)에는 이웃하는 두 파이프 체적간의 교류(cross flow)로 인해, 두 파이프의 기공률이 동일하게 유지된다. 앞에서 설명했듯이 이중 파이프로 모델링하는 이유는 가열벽면의 액막이 열속으로 인해 마르는 효과를 고려하기 위함이다. 그러나, 동일 고도에서 가열봉으로 인해 가열벽면을 모사하는 파이프의 기공률이 높아지고, 비가열벽면을 모사하는 파이프의 기공률이 낮아 수위차이가 생기게 되면, 이웃하는 두 파이프들 간에 교류가 발생하게 되며, 결과적으로 비슷한 기공률을 갖게 된다. 그러므로 kw와 kb값에 대한 민감도 분석을 통해 예측가능성을 조사해 보았다.

표 2 마찰계수에 따른 민감도 분석결과 (Run no. : A1-F-1, $T_{CHF}$=68 sec, kw=0.1)

| Kw/kb | CHF 발생시간 | 기공률 (150/152) | 질량유량 (kg/s) | 계산 체적 |
|---|---|---|---|---|
| 0.1/0.1 | 99.6 sec | 0.65832 | 0.04929 | 15009 |
| | | 0.65884 | 0.09648 | 15209 |
| 0.1/10 | 88.6 sec | 0.65938 | 0.04929 | 15009 |
| | | 0.65970 | 0.09649 | 15209 |
| 0.1/1000 | 77.2 sec | 0.66294 | 0.04926 | 15009 |
| | | 0.66327 | 0.09651 | 15209 |

표 3 마찰계수에 따른 민감도 분석결과 (Run no. : A1-F-1, $T_{CHF}$=68 sec, kw=100)

| Kw/kb | CHF 발생시간 | 기공률 (150/152) | 질량유량 (kg/s) | 계산 체적 |
|---|---|---|---|---|
| 100/100 | 77.0 sec | 0.8527 | 0.03316 | 15009 |
| | | 0.4021 | 0.11261 | 15209 |
| 100/1000 | 75.2 sec | 0.8526 | 0.03349 | 15009 |
| | | 0.3976 | 0.11228 | 15209 |
| 100/10000 | 74.2 sec | 0.8525 | 0.03361 | 15009 |
| | | 0.3961 | 0.11216 | 15209 |

표 2와 3은 두 파이프를 연결하는 브랜치(branch)의 마찰계수에 따른 임계열유속 결과에 대한 민감도 분석결과다. 예상했듯이 역마찰계수(kb)의 값이 커짐에 따라 파이프 152에서 파이프 150으로의 교류(cross flow)가 감소하게 되며, 이로 인해 두 파이프 사이의 기공률도 차이가 생기게 되며, 임계열유속 발생시간도 단축되어 실험값($T_{CHF}$=68 sec)에 근접하게 된다. 그러나 결과에서 볼 수 있듯이 마찰계수에 대한 결과의 민감도가 너무 크며, 마찰계수의 절대값에서 물리적인 의미를 찾기가 힘들다. 또한 파이프 150과 152로 분기되는 질량유량도 마찰계수에 따라 민감한 차이를 보이며, 실험값에 근사한 결과를 얻는 데는 무리가 있다. 그러므로 이와 같이 이중 파이프를 이용한 환상관에서의 임계열유속 예측방법은 합리적인 방법이 아니라고 할 수 있겠다.

**4.3 노드화 #3 및 평가결과**

노드화 #2에서는 가열벽면을 모사하는 파이프의 입구 질량유량이 두 파이프를 연결하는 브랜치의 마찰계수에 따라 민감하게 변하므로, 사용된 실험데이터에 따라 동일한 예측 정확도를 얻기가 어려웠다. 그러므로 노드화 #3에서는 가열벽면을 모사하는 파이프로 유입되는 입구의 유량을 이중 파이프의 면적분율에 따라 감소시켰다. 즉, 식 (3)과 같이 유입되는 질량유량의 41.5%만이 가열벽면을 모사하는 파이프로 흐른다고 가정했으며, 실험장치의 노드화는 그림 1과 같이 단일 파이프로 모사했으며, 이 때 단일 파이프의 유동면적은 환상유로의 중심선을 경계로 하여 나누어진 값을 사용했다. ($A_{inner}$ = 9.300 x $10^{-5}$ $m^2$)

계산 결과를 살펴보면 대부분의 경우에 있어서 임계열유속은 파이프의 상부에서 발생하며, 이는 실험과 일치한다. 그림 7은 계산된 가열봉 상부의 온도와 측정된 온도값의 비교의 한 예를 (Run no. : FT-B-7-F) 보여주고 있다. 이 그림에는 질량유속의 비교도 함께 보여주고 있다. 유동과도기는 시간 40초에서 시작되도록 실험데이터와 계산결과를 동기화하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 유동과도기 시작전의 가열봉 온도는 매우 잘 예측하고 있으며, 임계열유속의 발생지점은 실험값과 비교해서 약간의 시간지연이 있기는

하지만 잘 예측하고 있음을 볼 수 있다. 실험에서 임계열유속은 질량유속은 325.513 kg/m$^2$-s 에서 발생한 반면 MARS 계산에서는 약간의 시간지연으로 인해 질량유속 291.828 kg/m$^2$-s 에서 발생하였다. 예측 오차는 10%이며 다른 실험데이터에 대한 계산결과와의 오차비교는 표 4에 정리하였다. 표 4를 보면 본 연구에서 채택된 실험데이터군에 대한 임계열유속 발생지점의 질량유속 예측오차는 약 20%내외 정도이다. 계산된 값이 표시되지 않은 실험데이터들은 임계열유속 발생지점에 거의 도달했을 때 입구에서 발생하는 유량의 불안정성으로 인해 MARS 코드가 계산을 끝내지 못한 경우를 의미한다. 유량의 불안정성을 감소시키기 위한 추가적인 개선이 요구된다.

그림 8은 임계열유속이 발생한 계산 체적의 기공률과 건도를 보여주고 있다. 유동과도기 시작지점전의 기공률은 0.87 정도이며, 질량유속이 감소함에 따라 증가하다가 임계열유속이 발생하게 된다.

표 4 노드화 #3를 이용한 계산결과와 실험값의 비교

| Run no. | $G_{CHF}$-meas. (kg/m$^2$-s) | $G_{CHF}$-calc. (kg/m$^2$-s) | $G_{Error}$ (%) | $T_{CHF}$-measured (sec) | $T_{CHF}$-calculated (sec) | $T_{CHF\ Error}$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| FT-A-1-F | 205.117 | 183.032 | -11.8 | 68.5 | 70.0 | 2.2 |
| FT-A-4-F | 222.954 | 232.097 | 4.1 | 67.0 | 66.0 | -1.5 |
| FT-A-11-F1 | 419.153 | 343.341 | -18.1 | 54.5 | 61.4 | 12.7 |
| FT-B-2-F | 245.249 | 261.115 | 6.5 | 67.0 | 64.6 | -3.6 |
| FT-B-7-F | **325.513** | **291.828** | **-10.3** | **61.0** | **63.0** | **3.3** |
| FT-B-9-F | 231.872 | 285.134 | 23.0 | 67.0 | 64.2 | -4.2 |
| FT-B-11-F | 436.989 | - | - | 54.5 | - | |
| FT-C-3-F | 521.712 | 513.232 | -1.6 | 49.0 | 49.0 | 0.0 |
| FT-C-4-F | 267.545 | 224.546 | -16.1 | 65.0 | 68.2 | 4.9 |

## 4. 결론

축방향으로 비균일한 열유속 분포를 갖는 수직 환상관에서 유동과도기 조건에서 측정된 임계열유속 실험데이터를 이용하여 열수력 최적 해석 코드인 MARS의 임계열유속 모델을 평가하였다. 본 연구에서는 MARS의 일차원(1-D)코드를 사용하여 환상관에서 발생하는 임계열유속을 예측하는 연구를 수행하였다. 실험장치에 대한 모델링은 세가지로 이루어졌으며, 노드화 #1은 환상관인 실험장치를 단일 파이프 구성요소(pipe component)로 모델링하는 것으로 MARS에서 제공하는 가장 기본적인 노드화이고, 노드화 #2는 환상관의 가열벽면과 비가열벽면으로 나뉘어져 흐르는 액막을 모사하기 위하여 각각은 하나의 파이프 구송요소로 모델링하는 것이고, 노드화 #3는 가열벽면으로 나뉘어지는 액막의 질량유량만을 고려하여 입구로 주입되는 질량유량과 파이프의 유동면적을 축소하여 모델링하는 방법이다. 유동과도기 조건은 세가지(fast, normal, slow)중에서 fast 조건만을 대상으로 하여 수행하였으며, 가능한 한 다양한 운전 압력 및 입구 과냉도를 포함하도록 평가 데이터군을 선정하였다. 본 연구를 통해서 다음과 같은 결론은 얻을 수 있었다.

1) 노드화 #1을 사용할 경우 MARS는 임계열유속을 상당히 초과 예측하는 결과를 얻으며, 유동과도기 조건에서 임계열유속이 발생할 때의 임계질량유량은 실험값보다 상당히 작은 값은 갖게 된다. 2) 이는 환상관에서 발생하는 환상류로 인해 액막이 가열벽면과 비가열벽면으로 나뉘어지는 현상을 코

드가 제대로 고려하고 있지 못하기 때문이다. 3) 노드화 #2는 환상관에서 환상류로 흐르면서 액막이 말라서(dry-out) 임계열유속이 발생하는 경우에 대해서 적용 가능성이 있다. 그러나 해석자가 입력해야 하는 면적분율, 브랜치의 유로면적, 브랜치의 마찰계수에 따라 상당히 민감한 결과가 얻어진다. 3) 이 경우 조절인자의 적절한 선택을 통해 실험값에 근접한 결과를 얻을 수는 있으나, 조절인자의 선택에 대한 물리적인 의미의 일관성을 찾기가 어려우므로, 바람직한 방법이 아닌 것으로 생각된다. 4) 노드화 #3의 경우 다양한 범위의 실험값에 상당히 근접한 결과를 얻을 수 있다. 5) 이는 환상관의 임계열유속을 평가할 경우 면적분율을 적절히 조절하고, 이 면적분율에 따라 입구의 질량유속을 축소했을 경우 원형관에서 발생하는 임계열유속과 동등한 결과를 얻을 수 있음을 보여준다. 6) 그러나, 이 경우에 면적분율에 따라 유량이 분리된다는 가정에 대한 보다 면밀한 연구가 필요하며, 보다 넓은 실험데이터군에 대한 평가가 요구된다. 7) 현재로서는 모든 실험데이터에 대한 평가를 수행하지 않았으므로 예측 오차에 대한 정량적인 결론을 도출하기는 어려우며, 추후 보다 광범위한 데이터에 대한 평가가 요구된다.

## 참고문헌


문상기, 천세영 등 (1999), “내부 가열 수직 환상관에서 수직 방향 열유속분포가 임계열유속에 미치는 영향에 대한 실험 연구,” 대한기계학회, ‘99년도 충청지부 추계학술대회 논문집, pp. 15-22, 충북대학교.

문상기, 천세영 등 (2000), “비균일 가열 수직 환상관에서 유동 과도기 상태에서의 임계열유속에 대한 실험 연구,” ‘2000 춘계학술발표회, 한국원자력학회.

천세영, 문상기 등 (1999), “저유속 및 광범위한 압력조건하에서 비균일 가열 수직 환상유로에서의 임계열유속,” ’99 춘계학술발표회, 한국원자력학회.

Se-Young Chun, Heung-June Chung, et al. (2000), “Critical Heat Flux in Uniformly Heated Vertical Annulus Under a Wide Range of Pressures 0.57 to 15.0 Mpa,” Journal of the Korean Nuclear Society, V.32, No. 2 , pp128-141.

Ransom et al. (1995), “RELAP5/MOD3 Code Manual : Volume IV: Models and Correlations,” NUREG/CR-5535, INEL-95/0714.

W. J. Lee, et al. (1998), “Development of a Multi-Dimensional Realistic Thermal-Hydraulic System Analysis Code, MARS 1.3 and its Verification,” KAERI/TR-1108/98, KAERI.

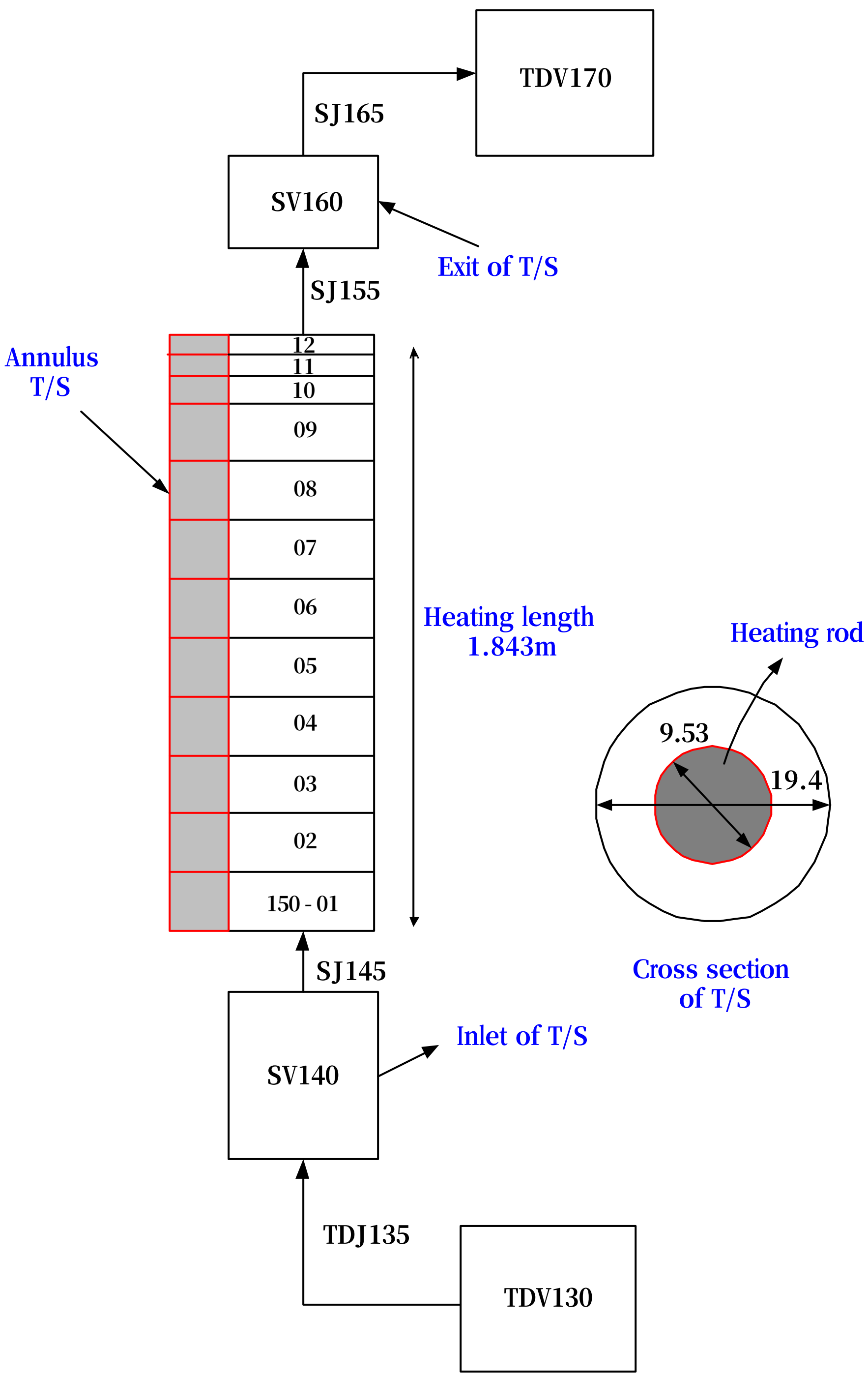


그림 1 단일 파이프를 이용한 수직환상관 실험장치의 노드화 #1

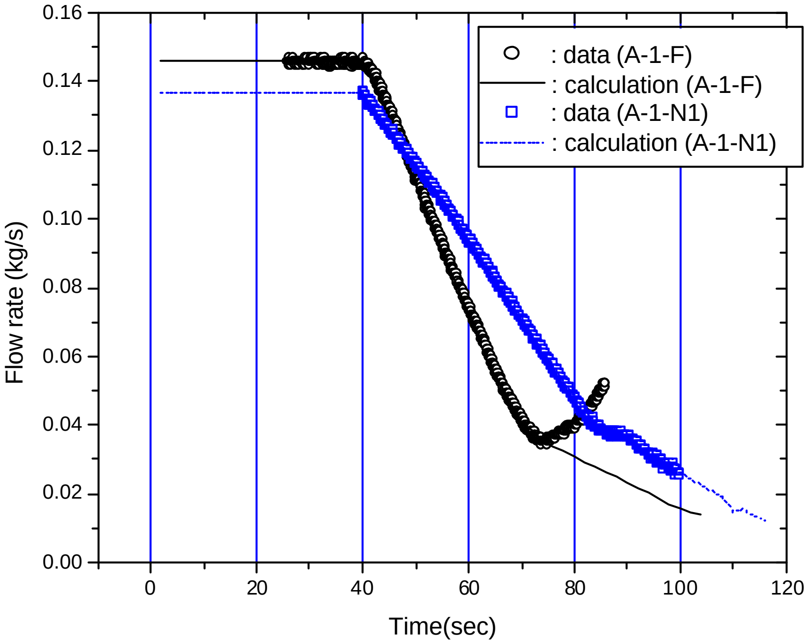


**그림 2 코드계산에서 사용된 유동과도기 조건과 실험값의 비교 (Run no. : FT - A - 1 - F)**

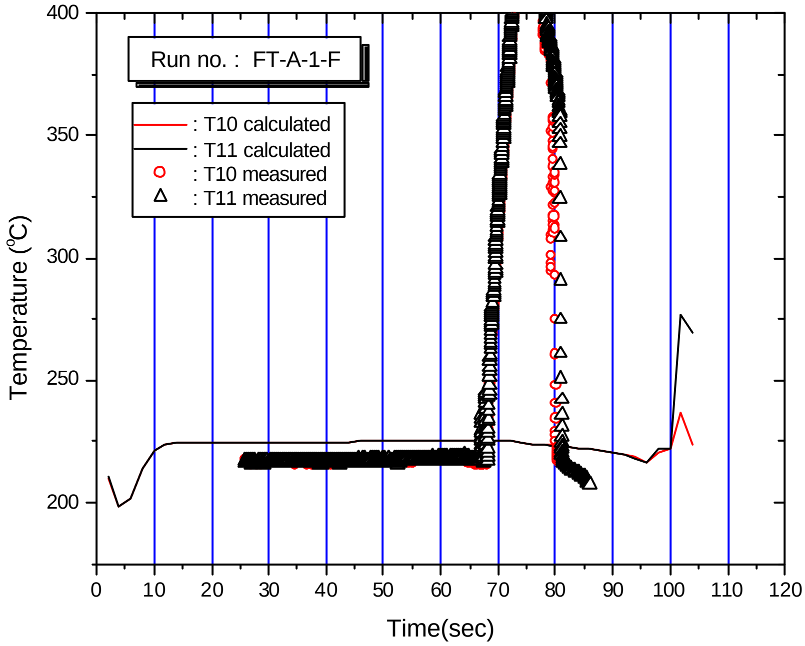


**그림 3 노드화 #1을 이용한 가열봉 벽면온도 평가 결과 (Run no. : FT - A - 1 - F)**

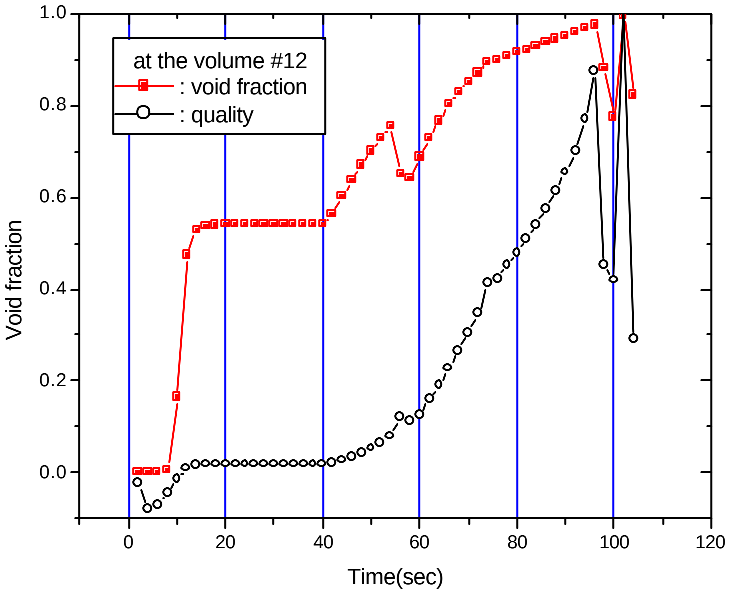


그림 4 노드화 #1을 이용했을 때 계산된 기공률과 건도 (Run no. : FT-A-1-F)

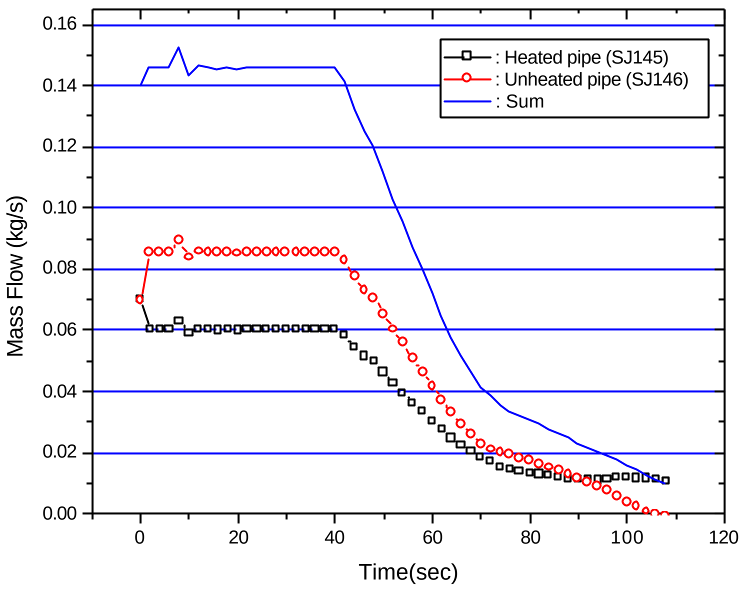


그림 6 두 파이프로 분기되는 질량유량 계산결과 (Run no. : FT-A-1-F)

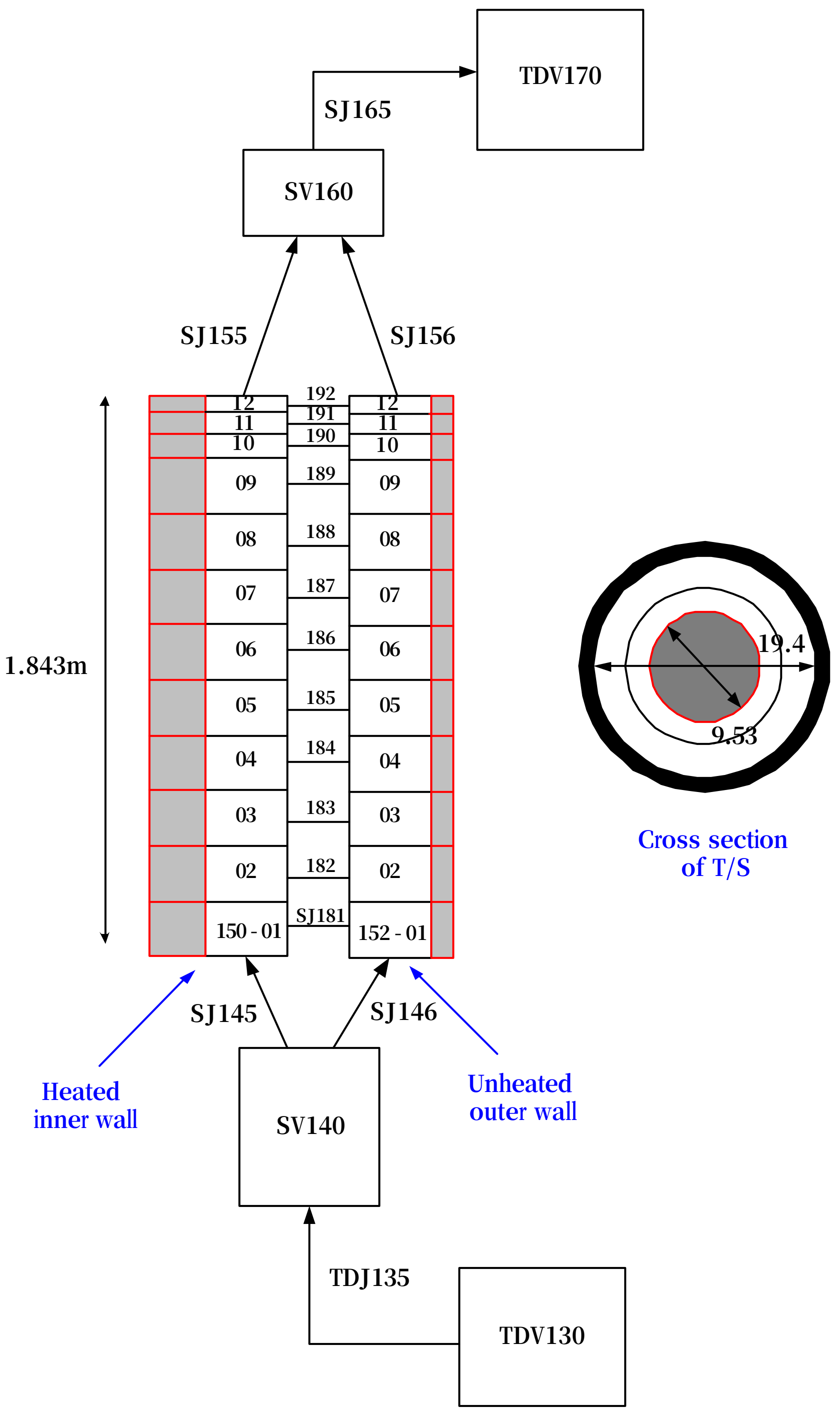


그림 5 이중 파이프를 이용한 수직 환상관 실험장치의 노드화 #2

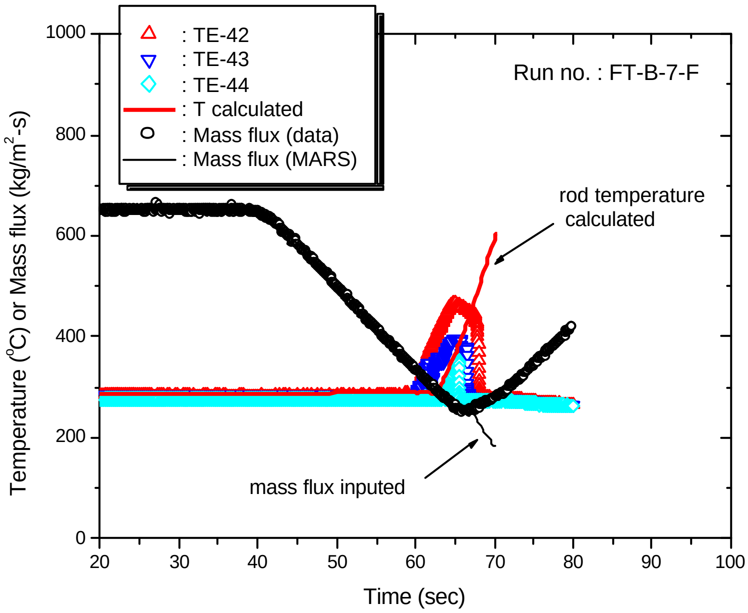


그림 7 계산된 온도와 질량유속의 실험데이터와의 비교 (Run no. : FT-B-7-F)

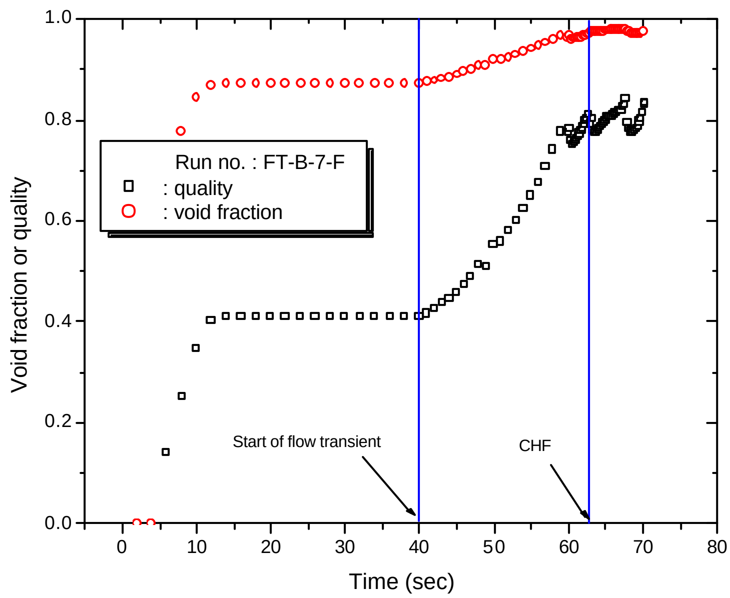


그림 8 계산된 기공률과 건도의 실험데이터와의 비교 (Run no. : FT-B-7-F)