2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

APR1400 LBLOCA 재관수기간중 강수관에서의 비등유동 계면마찰모델 개발

Development of Interfacial Drag Model for Bubbly Flow in Downcomer during Reflood phase of APR1400 LBLOCA

정법동, 이영진, 송철화, 권태순
한국 원자력 연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

이석민
서울대학교
서울시 관악구 신림동 산 56-1

김인구
한국 원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

APR1400 LBLOCA 재관수 기간 중 노심 재가열현상의 보다 신뢰성있는 모델을 개발하기 위하여 환형 강수관에서의 계면마찰계수모델을 개발하였다. 모델 개발은 기존의 RELAP5/MOD3 drift flux모델의 버블속도 상관식을 수정하는 형태로 이루어졌으며 FLUENT와 MARS 다차원 해석을 근거로 그 계수를 구하였다. 개발된 상관식을 RELAP5/MOD3.3에 적용하여 APR1400 LBLOCA를 재분석한 결과 재관수 동안 강수관 비등이 발생하는 경우에도 노심 재가열현상이 많이 완화 됨을 알수 있었다. 그러나 개발된 상관식의 검증을 위하여 정량적인 실험결과가 필요하며 계산으로 결정된 계수의 조정이 필요하다.

Abstract

The interfacial drag model for annular downcomer has been developed to have more reliable models for downcomer boiling phenomena during reflood phase of APR1400 LBLOCA. The development has been done by multiplying the existing RELAP5/MOD3 bubble rise velocity of drift flux interfacial drag model. The coefficient of multiplication factor has been determined by the detailed multidimensional analysis using FLUENT and MARS code. The recalculation of APR1400 LBLOCA with the modified RELAP5/MOD3 implanted with new interfacial drag model has been done. The results show that the reheating of core during reflood has been significantly mitigated even though the downcomer boiling occurs. However the developed correlation should be verified using the quantitative experimental results and the coefficient should be also adjusted according to the experimental results.

1. 서론

그 동안 APR1400에서의 대형관 파단시 강수부에서 일어나는 열수력 현상을 파악하기 위하여 많은 실험과 해석적 연구가 수행되어 왔다. APR1400에서 안전 주입방식을 강수부 직접 주입을 채택하고 있으므로, 강수부에서의 다차원 현상이 특히 강조되어 안전주입수 우회현상과 안전주입수 film형성에 대한 연구가 진행되어 왔다. 그러나 대형냉각재 상실사고의 재관수 후기의 노심 재가열 현상은 TRAC-PF1와 RELAP5/MOD3의 계산결과가 특히 다른 부분으로 때때로 서로 상반된 결과를 초래함으로 많은 논의를 불려왔고 이유를 규명하는 과정에서 강수관에서 사용하는 계면마찰모델이 중요한 역할을 하는 것을 알게 되었다. 즉 계면마찰모델은 강수관에서의 버블 속도를 결정하여 강수관의 void를 결정하며 이에 따라 노심과 강수관의 중력차이에 의한 주입되고 있는 유량이 조절되어 노심 재 가열현상에 영향을 미치는 것임을 알게 되었다. 다른 두 코드에서 사용하고 있는 계면마찰모델은 모두 원형 수직관류에서의 실험자료에 의거하여 개발 된 것이며 강수관과 같은 환형 구조물에서의 비등시 발생하는 버블 유동에 적용하기에는 무리가 많은 것을 알게 되었다. 따라서 비등 유동시 환형 강수관에서 적용을 할 수 있는 특별한 계면마찰모델의 필요성을 깨닫기 시작하였으며 본 보고서에서는 이러한 필요에 의해 해석적인 계산과 실험적인 방법을 통하여 계면 마찰 모델을 개발하고 규제검증코드인 RELAP5/MOD3.3에 적용하여 기존의 결과에 비교하고 논의하였다.

2. 계면 모델의 비교 분석 및 개선사항

계면 마찰모델을 개선하기 위하여 RELAP5/MOD3.3에서 사용하고 있는 모델을 검토하였다. RELAP5/MOD3.3의 계면 마찰모델은 크게 drift flux방법을 사용하는 경우와 개별 drag coefficient 방법을 사용하는 경우가 있다. Drag coefficient방법은 RELAP5/MOD2 버전에는

모든 유동형태에 대하여 적용을 하였으나, drift flux방법을 사용하였을 때 수직관 및 번들에서 void fraction 분포의 예측 능력이 탁월하였기 때문에 MOD3에서부터 수직유동형태 중 bubbly-slug 유동에 대하여 drift flux방법을 적용하고 나머지 유동에 대하여는 전과 동일하게 drag coefficient방법을 적용하고 있다. 적용 방법에 대해 좀 더 고찰을 하면 아래와 같다.

일반적으로 이상유동방정식에서 계면마찰항은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_i = C_i |v_R| v_R$$

여기서 $v_R = C_1 v_g - C_o v_f$

$$C_1 = \frac{1 - C_o \alpha_g}{\alpha_f}$$

이식에서 C_i 는 계면 마찰계수이며 v_R은 상간 상대속도로 각 상의 속도분포에 따라 C_o 계수를 갖는다. 계면 마찰계수 C_i는 실험적 상관식으로 구할 수 있다. 즉 계면 마찰계수 C_i와 분포계수 C_o가 결정되면 계면 마찰 항이 결정되는데 이를 구하는 방법이 현재 두가지 방법이 존재한다. 여기에서는 강수환형관에서 적합한 계면마찰모델을 찾기 위하여 이들 두가지 방법 모두를 비교 분석하였다.

2.1 Drag Coefficient 방법

Drag Coefficient 방법은 계면 마찰력을 다음과 같은 드래그식으로 표시할 수 있다는 것에서 출발한다.

$$F = \frac{1}{2}\rho v^2 C_D A$$

$$= \frac{1}{8}\rho_c |v_g - v_f| (v_g - v_f) C_D S_F a_{gf} = C_i |v_g - v_f| (v_g - v_f)$$

윗 식에 의하면

$$C_i = \frac{1}{8}\rho_c C_D S_F a_{gf} \qquad (2.1)$$

여기서 마찰계수는 통상적으로 구형 Particle에서 잘 알려진 다음 식을 사용한다.

$$C_D = \frac{24(1 + 0.1 \cdot Re_p^{0.75})}{Re_p}$$

Re_p ; Particle Reynolds Number

a_{gf} = 단위볼륨당 표면적 = $\frac{3.6 \cdot \bar{\alpha}}{d_0}$

이식에 의하면 상온상압조건하에 평균 버블 diameter는 대략 3 mm 정도이며 상대속도는 35 cm/sec 로 계산되었다. 이는 통상적인 관류나 pool에서의 구형의 버블속도에 해당됨을 알 수 있다. 그러나 강수관에서 한쪽 벽에서 비등이 일어나는 경우 내부에서의 강한 이차유동으로 slip속도가 통산적인 관류보다 상당히 빠른 것을 관측하였다. 또한 한쪽 벽에서 버블이 상호작용을 하여 직경이 계산 치보다 크고 구형으로 유지하지 못할 뿐 아니라 벽면에 void가 치우친 형태가 되는 것도 관측되었다 (제 5 절 실험결과 참조). 내부의 강한 이차유동의 존재는 이 같은 drag coefficient의 방법으로 접근하는 것이 불합리하였기 때문에 다음 절의 drift flux방법을 검토하였다.

2.2. Drift flux방법

Drift flux방법은 평형상태에서 계면 마찰력이 부력과 벽면마찰력과의 평형을 이룬다는 가정에서 출발하여 계면 마찰계수를 유도하는 방법으로 아래와 같은 식으로 계면 마찰계수를 나타낼 수 있다.

$$C_i = \frac{\alpha_g \alpha_f^3 (\rho_f - \rho_g) g \sin \phi_j}{|v_{gj}| v_{gj}} \qquad (2.2)$$

여기서 v_{gj} 는 버블의 drift속도로, 실험적으로 결정하는 값이다. 이러한 접근 방법에 따르면 버블의 직경이나 형태에 상관 없이 버블의 평균속도만 측정할 수 있다면 계면 마찰계수 C_i 를 역산해 구할 수 있으므로 실험적인 상관식을 유용하게 사용하여 모델 할 수 있다. 현재 RELAP5/MOD3에서 사용하고 있는 수직 대형관에서의 버블 drift속도 상관식은 Churn-Turbulent flow의 Zuber-Findlay 상관식과 Kataoka-Ishii 상관식으로 다음과 같이 무차원 공기주입속도에 따라 적용한다.

O 무차원 공기 주입속도 : $j_g^* = \frac{j_g}{\left[\frac{\sigma g(\rho_f - \rho_g)}{\rho_f^2}\right]^{\frac{1}{4}}}$

O $j_g^* < 0.5$ 인 경우

Churn Turbulent Flow : Zuber-Findlay(1965 J. of Heat Transfer) 상관식

$$v_{gj} = 1.41 \cdot \left[\frac{\sigma g(\rho_f - \rho_g)}{\rho_f^2} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.3)$$

O $j_g^* > 1.768$ 인 경우

Kataoka-Ishii (1987, Int. J. H&M Transfer) 상관식

$$v_{gj} = 0.030 \left(\frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{-0.157} N_{\mu f}^{-0.562} \left[\frac{\sigma g(\rho_f - \rho_g)}{\rho_f^2} \right]^{\frac{1}{4}}$$

O 0.5 < j_g^* < 1.768 인 경우

Zuber-Findlay와 Kataoka-Ishii 상관식의 선형 interpolation

Churn Turbulent Bubbly Flow에서 Zuber-Findlay상관식은 8cm 이상의 관에 적용할 수 있는 상관식으로 관 직경에 대한 영향을 받지 않는다. 상관식으로 계산된 Churn turbulent 버블 상승속도는 25cm/sec 정도이나 Cap-버블형태가 되면서 2배 이상 속도가 되어 50 cm/sec에 달하는 것을 알 수 있다. 공기 주입량이 증가함에 따라 내부의 이차유동영향으로 버블 상승속도가 빨라지는 경향이 있는데 Kataoka-Ishii 상관식을 사용하여 void fraction이 0.5인 경우 버블 속도를 계산하면 약 80 cm/sec 로 Zuber-Findlay 상관식의 경우보다 3배 이상 빠르다는 것을 알 수 있다.

APR1400의 대형냉각재 상실사고시 강수관 비등이 발생하는 경우 void fraction이 0 ~ 0.3 정도이므로 대부분 Zuber-Findlay 상관식으로 버블 속도를 계산하게 된다. 강수관 비등실험(제 5 장 참조)에 의하면 버블 모양이 Cap-버블형태이며 내부의 강한 2차 유동에 의하여 Churn-Turbulent 유동이기 보다는 벽면으로 버블 streaming이 형성되어 버블 상승 속도가 상당히 빨라진 다는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 표 2.1과 같이 기존의 RELAP5/MOD3 Drift Flux 계면마찰모델에 대형 환형관의 경우를 추가하여 수정된 상관식을 사용하게 하였다.

표 2.1 수직관에서의 Drift Flux 계면마찰 모델 적용 (대형환형관 추가)

<table>
<tr><th>유량조건</th><th>핵연료번들</th><th>소형관
D< 0.018 m</th><th>중형관
0.018 m < D < 0.08 m</th><th>대형관
D > 0.08 m</th><th>대형환형관
$D_H > 0.08$ m</th></tr>
<tr><td>High upflow</td><td rowspan="5">EPRI</td><td>EPRI</td><td>EPRI</td><td rowspan="5">Churn-Turbulent/
Kataoka-Ishii</td><td rowspan="5">Modified Churn-Turbulent/
Kataoka-Ishii</td></tr>
<tr><td>Medium upflow</td><td colspan="2">Transition</td></tr>
<tr><td>Low flow</td><td>Zuber-Findly Slug</td><td>Churn-Tubulent/Kataoka-Ishii</td></tr>
<tr><td>Medium Downflow</td><td colspan="2">Transition</td></tr>
<tr><td>High Downflow</td><td>EPRI</td><td>EPRI</td></tr>
</table>

High flow : $|G|>100$ kg/m^{2}s ,
Low flow : -50 kg/m^{2}s $< G <$ 50 kg/m^{2}s
Medium flow : 50 kg/m^{2}s $< |G| <$ 100 kg/m^{2}s

대형 환형관에 사용되는 수정된 Drift Flux 계면마찰 모델은 다음과 같다.

$$v_{gj} = v_{gj}^{PIPE} \bullet f(j_g^*)$$
$$\text{where} \quad v_{gj}^{PIPE} = \text{drift velocity for pipe} \qquad (2.3)$$
$$f(j_g^*) = \text{annulus multiplication factor}$$

식(2.3)에서 환형관 증배계수(annulus multiplication factor)라고 명명된 계수는 실험적으로 결정할 계수로 공기 주입량인 j_g^* 나 void fraction, α_g 의 함수로 나타낼 수 있다. 또한 공기 주입량이 아주 작은 경우는 대형 환형관일 지라도 통상적인 pool에서의 drift속도와 같을 것이므로 다음과 같은 함수 형태를 가지는 것으로 가정하였다.

$$f(j_g^*) = 1 + C \cdot g\left(j_g^*\right) \qquad (2.4)$$

함수 g의 형태와 계수 C는 자세한 계산과 여러가지 다른 공기주입으로 실험을 수행하여 버블상승속도를 측정하여 추후에 결정할 수 있을 것이다.

3. 강수관 버블 유동의 FLUENT 및 MARS해석과 상관식 도출

환형 강수관에서의 상세한 계면 마찰모델을 개발하기 위하여는 실험이 필수적이며 이에 따라 공기-물 실험을 수행하고 있다. 본 절은 이를 위한 예비계산으로 일차적인 버블상승속도에 대한 증배계수의 상관식을 도출하고 실험에 대한 지원 자료를 얻기 위함이다.

정체된 물을 담고 있는 사각덕트의 한쪽 벽면에서 Air-버블이 주입되는 KAERI의 강수관 버블장치의 주 계측 초점은 기공률에 따른 수위변동과 기포 상승속도이다. Air-버블주입에 따른 기포 상승속도를 미리 예측해 보기 위해 범용 CFD 해석코드인 FLUENT6.0과 안전해석코드인 MARS2.3을 이용하여 각각 예비분석을 수행하였으며, 이를 상호 비교 분석하였다.

3.1 강수관 버블 유동의 FLUENT해석

범용CFD 해석코드인 FLUENT6.0에서 제공하는 다상(multiphase)모델은 VOF (Volume of Fluid)모델, Mixture모델, Eulerian모델 등이 있다. VOF모델은 각 상이 독립적으로 분리되어 있는 stratified flow나 free-surface 유동해석에 적합한 모델이며, Mixture/Eulerian 모델은 몇 가지 제약사항을 제외하고 일반적인 이상유동계산에 적용할 수 있다. 따라서 본 예비분석에서는 일반적인 Mixture 모델을 사용하였으며, 난류모델로는 k-ε모델을 사용하였다. Air와 Water의 완전 상분리가 이루어지는 경계지점은 Mixture 모델로는 모사할 수 없는 단점이 있어, 물로 채워진 부분만을 계산하고 경계면을 압력경계로 두어 주입된 Air가 압력에 따라 자연스럽게 빠져나가도록 모델링하였다. 해석채널은 높이 1.5m, 폭 0.25m의 2D 채널이며, 총 3750개(25×150)의 해석격자를 사용하였다. 초기조건으로 1기압 20℃의 물이 가득 채워져 있고, 주입부 15cm높이에서 1mm크기의 Air-버블이 0.1m/s로 주입되도록 하였다. 계산을 위해 사용된 초기조건과 모델은 표3.1과 같다.

표 3.1 계산에 사용된 초기조건 및 모델

Parameter	Value / Model
Initial Air Velocity	0.1 m/s
Inlet Air Bubble Size	0.001 m
Inlet Air Fraction	1.0
Operating Pressure	101325 Pa
Multiphase Model	Mixture Model
Turbulence Model	k-ε Model

상용 CFD 해석코드를 이용한 이상유동 해석은 계산의 안정성과 수렴문제로 인해 아직까지 많은 어려움을 겪고 있다. 본 해석에 사용된 FLUENT6.0 또한 FLUENT4에 비해 크게 안정화 되었으나, 천이(Transient)계산에는 여러 가지 제약이 따른다. 따라서 천이계산의 초기에는 계산의 안정성을 위해 매우 작은 시간차(time-step)로 시작하여 점차 시간차를 늘려가는 방법으로 계산을 수행하였다. 100초까지 계산을 수행하여 1초,10초,100초대의 기포율(Void fraction) 및 기포 상승속도(Bubble rise velocity)를 비교하였다.

비교결과 주입된 버블이 벽면을 따라 상승한 후 대부분이 상부 압력경계면으로 빠져나가며, 버블이 역류하여 회전하는 형태를 볼 수 있다. 그림3.1은 100초때의 상부 및 하부의 속도벡터를 나타낸 것으로 기포상승에 따른 내부순환을 잘 나타내고 있다. 그림3.2는 버블 주입부의 위치를 좌변로 볼 경우, 주입부로부터 0.01m(좌변), 0.24m(우변) 에서의 축방향 속도를 나타낸 것이다. 주입부에 근접한 좌변에서 기포의 최대 상승속도가 1.4m/s 1.5m/s로 계산되었으며, 시간에 따른 최대속도의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다.

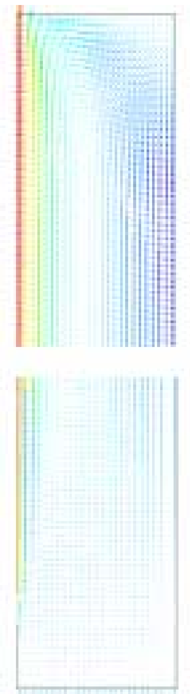

그림 3.1 채널 상 · 하부에서의 속도장

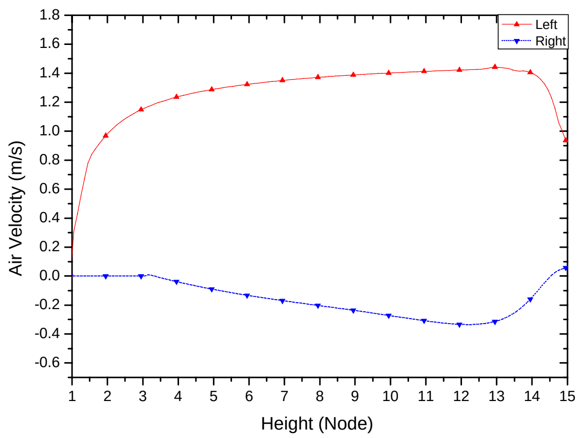

그림 3.2 기포 상승 속도(FLUENT계산)

3.2 강수관 버블유동의 MARS 해석

열수력 최적통합해석 코드인 MARS를 이용하여 FLUENT해석과 동일한 조건의 채널에 대해 계산을 수행하였다. 해석에 사용된 모델로는 다차원 유동계산이 가능하도록 개발된 MARS의 MULTID Component를 이용한 모델과 일반 1D pipe component 을 사용하여 비교 계산하였다. 그림3.3는 두가지 해석모델을 나타낸것으로 MULTID component를 사용한 경우 25cm의 Gap을 5cm씩 5개로 나누고 2m높이의 채널을 0.1m씩 20개로 총100개의 cell로 구성하였으며, 초기에는 1.5m높이까지 1기압, 20℃의 물이 채워져 있으며, 하부 15cm에서 Air-버블이 주입되도록 모델링하였다. 1D Pipe를 이용한 구성도 MULTID와 마찬가지로 0.1m씩 20개의 sub-volume으로 나누었으며, 같은 초기조건으로 구성하여 계산하였다.

MULTID component는 여러 개의 hydraulic volume들이 x,y,z방향에 junction으로 연결되어 있는 것과 같다. 주입된 버블이 상승하는 경우 평면과 수직으로 세워져있는 축방향 junction에서는 vertical flow regime map을 사용하고, 수평으로 놓여있는 junction은 horizontal flow regime map을 사용하여 계산한다. 그런데 horizontal flow regime map의 경우 상간 상대속도가 작거나 혼합유속이 2500kg/m^2-s 이하일 경우 기포율에 상관없이 horizontally stratified flow regime(HST)으로 계산된다. 이 경우 기포가 존재하는 체적은 HST regime이 되어 수평으로 접해있는 체적과의 압력차로 인해 버블 상승속도보다 빠르게 옆으로 빠져나가버린다. 따라서 이 부분에 대한 MULTID의 다차원 flow regime이 필요하다. 그러나 아직까지 다차원 flow regime에 대한 개발이 이루어지지 않았기 때문에, 본 해석에서는 이러한 영향을 줄이기 위해 수평으로 놓여있는 junction에 대해 균질(homogeneous) 운동량방정식으로 계산하도록 옵션을 주어 계산하였다. 그림3.4는 MULTID와 1D pipe의 시간별(1초,10초,100초) 기포상승속도를 나타낸것으로 1D pipe의 경우 상승속도가 0.26m/s의 속도로 거의 일정하게 계산되어 MULTID와 비교할 때 6배정도 속도가 작게 계산되었다. FLUENT 해석결과 내부 자연대류로

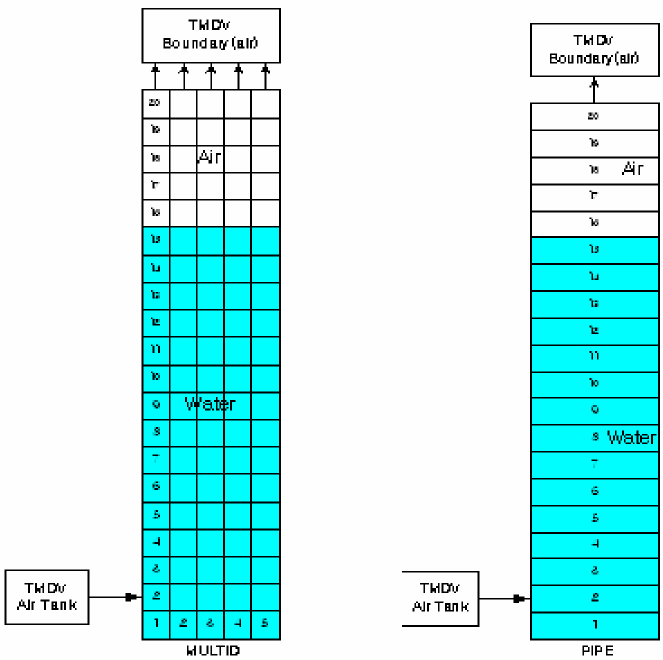

그림 3.3 MARS MULTID및 1D해석

인한 유동을 확인할 수 있었으며, 기포상승속도가 최대 1.5m/s로 계산되어졌다. MARS의 경우 기존 1D 모델로 계산한 경우에는 내부 자연순환을 모사할 수 없는 단점으로 인해 기포상승속도는 0.26m/s로 작게 계산되어졌다. 그러나 다차원유동을 계산할수 있도록 개발된 MARS의 MULTID component로 모델한 결과 상승속도가 1.6m/s로 계산되어져 CFD해석결과와 근사한 결과를 보여주었다. 그림3.5는 100초 시점에서 FLUENT, MARS의 계산결과를 보여주는 것이다.

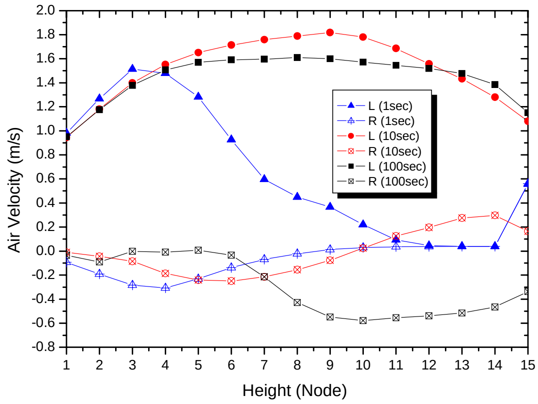

그림 3.4 시간에 따른 축방향 기포속도 (MULTID)

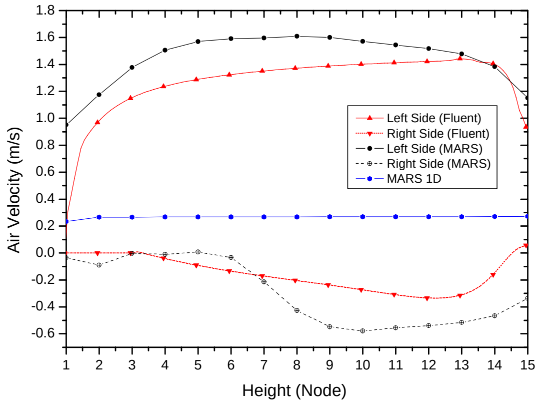

그림 3.5 FLUENT와 MARS 계산 결과 비교(100초)

3.3 강수관 환형증배계수 상관식의 도출

MARS 1D의 계산에서 $j_g^+ \le 0.5$ 일 경우 적용되는 churn turbulent bubbly flow 모델의 drift velocity 상관식에서 환형강수관내 빠르게 상승하는 버블에 대한 증배계수를 구하기 위해 주입속도에 따른 민감도 분석을 하였다.

그림3.6은 축방향 높이에 따라 주입속도를 변화하였을 경우 기포상승속도를 나타낸 것으로 주입속도가 증가함에 따라 기포 상승속도 또한 증가함을 알 수 있다. 1D계산을 보정하기 위해 1D결과와 MULTID결과의 속도비(F_v)를 무차원 공기주입속도

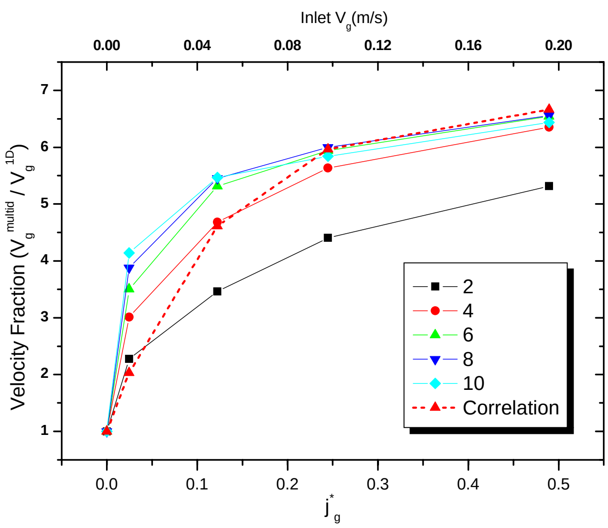

그림 3.6 기포상승속도 증가 비율

(j_g^+)에 대해 나타내면 그림3.6과 같다. 그림의 결과를 바탕으로 1D계산결과를 보정해주기 위한 증배계수를 유추하였다. 식4.1과 같이 $j_g^+ \le 0.5$ 이하일 경우 적용되는 drift velocity 상관식에 증배계수 F_v 를 구하였다.

$$V_{gj} = 1.41 \cdot F_v \cdot \left[\frac{\sigma g \left(\rho_f - \rho_g \right)}{\rho_f^2} \right]^{1/4} \qquad (3.1)$$

그림4.14에서 보면 $j_g^+ = 0.0$ 일 경우, F_v 는 1.0이 되어야 하며, 지수함수 형태로 증가하는 모양을 나타낸다. 따라서 이를 함수 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$F_v = 1.0 + C_1 (1 - e^{-c_2 j_g^+}) \qquad (3.2)$$

여기서, $F_v = \frac{v_g^{MD}}{v_g^{1D}}$

경계조건으로는 계산결과를 이용하여 다음과 같은 경계조건을 주었다.

(1) $j_g^+ = 0.5$, $F_v = F_{v,\max} = 6.6$

(2) $j_g^+ = 0.25$, $F_v = 6.0$

(3) $j_g^+ = 0.0$, $F_v = F_{v,\min} = 1.0$

위의 식과 경계조건을 이용하여 구한 F_v 는 다음과 같다.

$$F_v = 1.0 + 5.776 \times \left(1 - e^{-8.028 j_g^+} \right) \qquad (3.3)$$

식(3.3)을 그림3.6 correlation line으로 나타내었으며 그 경향이 계산결과와 어느 정도 일치함을 알 수 있다. 그림3.7는 식3.3을 MARS코드의 drift velocity를 구하고 있는 부프로그램에 적용시켜 1D계산을 한 결과를 보여주고 있다. 당연한 결과이지만 버블 속도가 5배 정도 증가하여 MARS MULTID와 FLUENT 계산 값에 근접하고 있음을 알 수 있다.

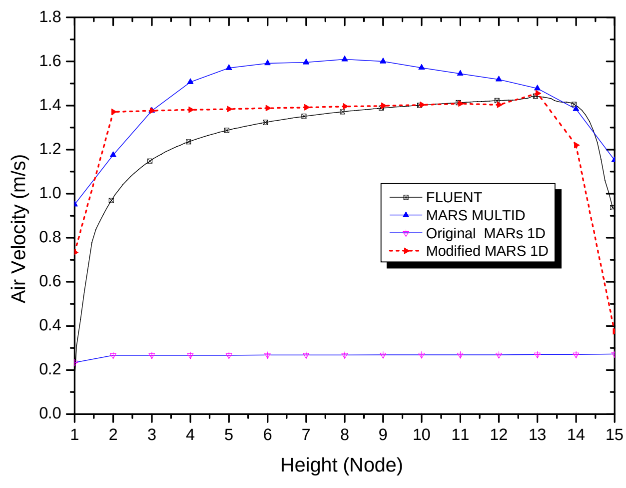

그림 3.7 각 코드의 강수관 버블 속도계산값 비교

4. 강수관 버블 실험장치 설계 및 구축

제 3 절에서 도출한 상관식 (3.3)의 계수는 계산에 의거하여 구한 값이므로 그 신뢰성은 실험에 의하여 증명되어야 하며 수행된 실험자료에 의하여 계수의 수정이 필요하다. 따라서 다음과 같이 실험장치를 설계구축하고 예비실험을 수행하였다.

사각형 덕트 내에 정체된 물 속으로, 한쪽 벽면으로부터 Air 버블이 주입되며, 이에 따라 형성되는 유동형태 및 버블 상승형상을 계측하는 장치의 기본 설계조건은 다음과 같다.

- Dimension : 250x250x2000 mm(WxDxH)
- Pressure : Atmosphere
- Temperature : Room Temperature (25 ^{o}C)
- Fluid : Water(Stagnant)/Air(Injection)
- Material : Acryl
- 버블 Generator : 교체형 타공판

버블을 고루게 분포시키기 위해 직경 1mm 의 작은 구멍이 일정한 간격으로 뚫린 타공판을 통해 Air 를 시험부에 주입한다. 타공판의 구멍직경은 1mm, 2mm, 3mm 의 교체형으로 설계되었다. 그림 4.1 은 버블 generator 의 설치교정을 하면서 얻은 실험사진으로 측면에서 주입되는 버블의 영향으로 강수관 갭내에 강한순환유동이 발생함을 알 수 있다. 이 실험은 FLUENT 나 MARS 의 예비계산과 유사한 경향을 보이고 있으며 관찰된 버블의 속도도 내부의 유동에 의하여 정체된 pool 에서의 상관식에 의한 상승속도 25cm/sec 보다 증가함을 보여주고 있다.

그림 4.1 실험장치 설치교정시 실험사진

5. APR1400 검증계산의 강수관 비등모델불확실도 전파효과 해석

강수관 계면 마찰모델의 민감도 해석을 위하여 버블 속도의 강수관 환형증배계수를 (3.3)

의 상관식을 사용하여 개선한 RELAP5/MOD3.3코드로 APR1400 LBLOCA해석을 재 수행하여 기본 계산과 비교하였다. 기본계산으로는 강수관 비등으로 인하여 노심이 재 가열되는 경우를 택하여 모델의 영향을 분석하였다. 노심은 전체를 20 등분하였으며 강수관 부분은 원주방향으로 6개 등 분할하였다.

그림 5.1은 노심 출력이 가장 높은, 노심 중앙에서 상부로 치우친 13/20지점에서의 핵연료 피복재 온도의 변화를 나타낸다. 그림에서 보듯이 새로운 모델의 버블상승속도의 증배효과로 강수관 비등시 심각한 노심 재가열현상이 모두 없어짐을 알수 있다. 최상위에 해당되는 16/20지점에서의 핵연료 피복재의 재가열은 일어나지만 심각한 정도에 도달하지 않는다. 그림 5.2에서는 강수관에서의 collapsed 수위를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 버블상승속도의 증배효과로 250초 부근에서의 급격한 수위저하 현상이 일어 나지 않게 된다. 이 민감도 계산 결과는 환형강수관 비등 계면마찰모델이 재관수 후반기의 노심 재가열에 결정적인 영향을 주는 요인으로 작용한다는 것을 의미하며 이에 대한 상세한 모델의 개발로 안전현안이 해결될 수 있음을 보여준다.

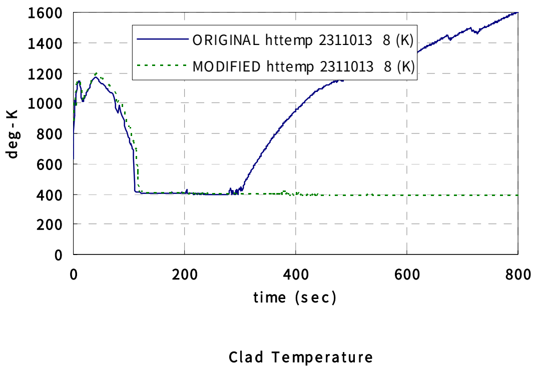

그림 5.1 고 출력노심위치에서 피복재온도변화

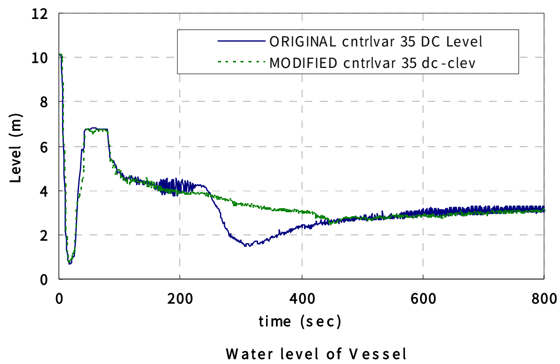

그림 5.2 강수관에서의 collapsed 수위의 변화

6. 결론 및 향후 연구 방향

강수관 비등시의 안전현안인 환형 수직관에서의 계면 마찰모델을 개선하였다. 계면 마찰계수는 Drift flux방법을 사용하는 RELAP5/MOD3의 버블상승속도 상관식에 환형수직관 증배계수를 곱하는 형태로 개발하였다. 버블속도의 환형강수관 증배계수의 상관식을 구하기 위하여 실험장치를 구성하였으며 이에 대한 FLUENT계산과 MARS 다차원 해석을 수행하였다. 해석결과를 이용하여 강수관 내의 강한 유동효과로 인한 버블 속도의 증배계수를 무차원 주입량의 함수형태로 구하였다. 새로운 모델로 개선된 RELAP5/MOD3.3코드를 사용하여 현재 안전현안으로 되어 있는 APR1400 LBLOCA시 강수관 비등현상이 발생하는 경우에 대

해 민감도 해석을 하였다. 해석결과 강수관 비등이 발생할 지라도 계면마찰 모델의 개선으로 인하여 노심 재가열 현상이 완화될 수 있음을 알았다. 향후 본 모델의 검증을 위하여 버블의 상승현상과 속도 등 보다 자세한 정량적인 실험적 결과가 필요하다.

7. 참고문헌

[1] 김효정, 방영석 외 30인, " 원자력안전규제기술개발 – 열수력 안전해석 규제기술개발 (제 1권)", KNS/GR-240, 한국원자력안전기술원, 과학기술부 (2002)

[2] 송철화 외 28인, "차세대원자로설계검증 및 핵심기술개발 – 차세대원자로 계통성능 검증기술개발", KAERI/RR-2219/2001, 한국원자력연구소, 과학기술부 (2002)

[3] 서균렬외 3인, "고유 다차원 유동모델 개발을 위한 열수력 기반실험 요건 개발",KAERI/CM-504/2001,서울대기초전력공학공동연구소, 한국원자력연구소(2002)

[4] 이원재 외, " 최적열수력계통분석코드개발", KAERI/RR-2235/2001, 한국원자력연구소, 과학기술부 (2002)

[5] B.D.Chung, et.al., MARS 2.2 code manual Input requirement, KAERI/TR-2529/2003 (2003)

[6] Kelly, J. M., "TRAC-M Code Consolidation and Development", Fall 2002 CAMP Meeting, Alexandria, Virginia Sponsored by USNRC, October 31 (2002)

[7] Thermal Hydraulics Group "RELAP5/MOD3 Code Manual Volume 1 : Code Structure, System Models, and Solution Methods", Scientech, Inc. , NUREG/CR-5535 (1998)

[8] FLUENT 6.0 User's Guide, Fluent Inc., (2001)

[9] RELAP5-3D© Code Development Team, RELAP5-3D© Code manual Volume 1, INEEL-EXT-98-00834, Rev. 1.1b, July (1999)

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었다.