2004 춘계학술 발표회 논문집
한국원자력학회

층상 수평관의 분기관에서의 액체 및 기체 견인발생 조건의 2.5 승 보편스케일에 대한 비판

Critical discussion on the universal 2.5 power scale for the onset criteria of the liquid entrianmnet and vapor pul-through through branches in a Horizontal pipe with staratified flow

이재영, 황기석
한동대학교
경북 포항시 북구 흥해읍

황수현, 김만웅
한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19 번지

요 약

수평관내 층류유동 발생시 분기관으로 액적 및 기포 견인 시작점 모델이 가지는 2.5 승 보편 스케일에 대한 비판이 실험결과를 바탕으로 이루어졌다. 액체 및 기체 견인 현상은 수평관에서 수평 성층화가 발생할 시에 그 관에 연결된 분기관으로 연속된 한 상의 다량 유출로 인해 다른 상이 견인되는 현상으로 그 시작점을 결정하는 것은 사고시 안전해석에 중요하다. 견인 시작점에 관한 여러 연구 결과들은 각각 다른 수평관 및 분기관 지름의 실험 결과를 바탕으로 모델을 개발하여 상이한 연구 결과를 제시하고 있음에도 불구하고 2.5 승의 지수 형태로 나타나는 모델이 지배적이다. 견인되는 종류에 관계없이, 분기관의 지름에도 관계없이 사용되는 2.5 승 보편 스케일에 대하여 실험 데이터를 통한 검증을 하였다. 그 결과, 분기관의 방향에 따른 차이가 존재하며 보편 스케일을 사용하는 것은 무리가 있고 이를 위한 물리적 이해와 합리적 모델링이 필요함을 확인 하였다.

Abstract

Critical discussion is made on the universal 2.5 power scale for the onset criteria of the liquid entrianmnet and vapor pul-through through branches in a Horizontal pipe with staratified flow. Liquid entrainment and vapor pull-through can be observed for the stratified flow in the horizontal pipe due to the fact that a continuous phase entrains the other phase. The determination of the onset of entrainement is important for the nuclear safety analysis. The previous works on the onset of entrainment propose the different results based on their own experimental data, but 2.5 power scale for the model is a dominant theory until now. In the present study, the careful evalution on the model that is universally applied to the onset of entrainment without considering the entrained phsase and the effect on the diameter of branch pipe was performed by using the experimenet data. The evaluation suggested that it is not proper to accept 2.5 power scale as the universal scale because there are variation according to the orientation of branch and the effect of d/D. Therefore, more precise understading on the phenomena and the reasonable model for the onset point of entrainment are requesting.

1. 서 론

원자력 발전소 계통에는 수평관에 분기관이 연결되어 있는 기하학적인 형상이 다양한 형태로 존재한다. 이러한 형상으로 말미암아 수평관에서 상 분리 발생시 이에 연결된 분기관으로 견인(Entrainment)이 일어나는 경우가 있다. 이러한 현상은 흔히 한 상(phase)이 다른 연속상(continuous phase)의 흐름에 떨어져 나가기 때문에 발생하는 것으로 이에 관한 모델을 Off-take 모델이라고도 한다.

Off-take 모델은 분기관을 통해 견인이 일어나는 시작점의 결정과 분기관으로 방출되는 유량을 예측에 사용되는 것으로 가상 냉각재 상실사고시에 열수력학적 거동을 분석하는데 기본적인 관계식을 제공한다. 이 모델은 원자로의 Passive Safety System 의 안전 해석 분석에 중요한 역할을 하며, 소형관 파단사고시 파단유량의 계산뿐만 아니라 Mid Loop 운전 시 잔열제거 계통에로의 냉각재 유입의 결정에도 중대한 역할을 한다. 또한, CANDU 형 중수로의 헤더관과 다분기관 사이에서 임의 각도에 대해서 다분기관으로 유입되는 냉각수의 계산이 원자로 채널의 안전성 평가에 중대한 역할을 한다.

Zuber(1980) 등은 대형 수평관에서 소형관 파단사고가 발생하였을 때 일어나는 견인 현상을 정확히 예측하기 위해서 모델 개발 필요성을 제안하여 이에 대한 연구가 촉발되었다. 본 연구과 관련있는 기존 연구들은 몇몇 국가에서의 개별실험들로써, 이들 실험에서는 고온관에서 상향, 측향 또는 하향으로 소형 파단면이 발생하였을 경우에 이상류의 방출 유동에 대한 실험적 연구를 수행하였고, 이를 모델링하고 상관식을 제시하고 있다. 연구의 결과로 현재 열수력 코드(RELAP5/MOD3)내 수평관에서의 액체 혼입과 증기 흡입모델(Thermal Hydraulic Groups, 1998)에 반영되어 있다.

위에서 언급한 액적 및 기포 견인 시작점을 예측하기 위해서 현재 열수력 코드에 반영되어 있는 모델은 액적 견인 시작점을 모델하여 얻은 2.5 지수승의 형태의 상관식으로 상향, 측향, 하향 세가지 분기관에 분기관의 지름에 상관없이 적용하여 견인 현상을 분석하고 있다. 열수력 코드의 Off-take 모델 중 액적 및 기포 견인 시작점에 관한 상관식은 KfK(Smoglie, 1984)에서 제안한 것이다. 수직 상향 분기관에서의 현상만을 근거로 모델을 제안하고 실험 결과를 이용해 모델의 타당성을 검증한 것이다. 비록, 당시 실험장치는 수평관의 지름과 분기관 지름의 비가 매우 작아 분기관 지름의 견인 시작점에 대한 영향은 고려하지 않았다. 하지만, 1980 년대 후반에 나온 연구 결과들 검토해보면 분기관 지름의 크기가 견인 시작점에 영향을 미약하게나마 주고 있음을 알수있다.

따라서, 본 연구는 중수로(CANDU)의 Genetic Safety Issue 중의 하나인 분기관 유동 유동장 해석의 연구와 관련하여 현재 정설로 받아들여지는 견인 시작점에 관한 단일 상관식이 모든 분기관 지름에 적용할 수 있는지에 관한 타당성을 검증하고자 한다. 이의 연구를 위해서 견인이 일어나는 시작점에 관한 기존의 모델을 검토하고, 기존 실험 자료 및 현재 실험 자료를 바탕으로 단일 모델이 다양한 분기관 지름에 보편 타당하게 적용 가능성에 관한 논의를 하고자 한다.

2. 기존 모델

본 연구와 관련된 기존 모델의 타당성을 검증하기 위해서 몇몇 연구기관에서 제시한 모델을 면밀히 검토하는 것은 중요하다. 따라서, 견인 시작점 모델의 간략한 설명을 통해 모델간의 비교와 모델이 가지는 문제점을 기술하고자 한다.

모델의 개발은 액체 견인 시작점으로부터 출발하고 있으며, 제시된 상관식을 이용해 기체 견인 시작점까지 확장 적용하고 있다. 그림 1 은 수평관에서 상 분리시 상향, 측향, 하향 분기관에서의 견인 시작시 발생하는 현상을 모델하기 위해서 사용한 공통적인 파라미터(Parameter) 정의를 나타내고 있다.

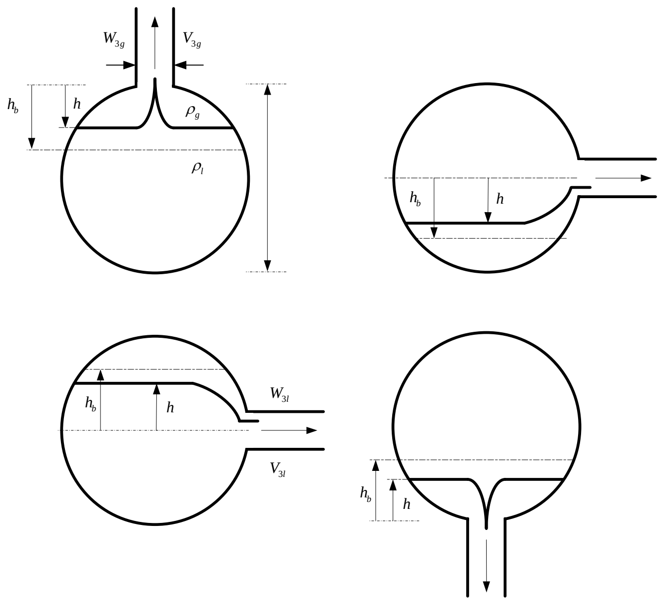

그림 1. 성층화된 수평관에서 분기관으로의 액체/기체 견인 개략도

그림 1 의 (a)는 상향 분기관에서 액체 견인현상을, (b)는 측향 분기관에서 액체견인 현상을, (c)는 측향 분기관에서 기체 견인 현상을, (d)는 하향 분기관에서 기체 견인 현상을 각각 간략히 도식화 한 것이다. 각 그림에서 기하학적인 파라미터들로는 수평관의 지름(D), 분기관의 지름(d), 분기관에서 수면까지의 거리(h), 액체 견인 시작시 분기관에서 수면까지의 거리(h_b)가 있으며, 동적 성량 파라미터들로는 분기관을 통해 유출되는 기체의 질량 유량(W_{3g}) 및 액체의 질량 유량(W_{3l}), 분기관을 통해 유출되는 기체의 속도(V_{3g}) 및 액체의 속도(V_{3g})가 있다. 물성치 파라미터로는 기상의 밀도(ρ_g), 액상의 밀도(ρ_l)가 존재하며, 두 상의 밀도차를 $\Delta\rho$ 로 나타냈다. 또한, 외적인 힘 중력가속도를 g 로 표현했다.

액체 견인 시작점의 모델에 관해서, Craya(1949)는 수조내 측향 분기관에서의 액적견인 현상과 관련한 관계식을 최초로 유도하였으며, Gariel(1949)와 Crowely 및 Rothe(1981)에 의해서 실험적으로 입증하였다. 그림 2 은 모델을 제시하기위해서 측향분기관으로의 액체견인에 대한 개략도를 나타내고 있다.

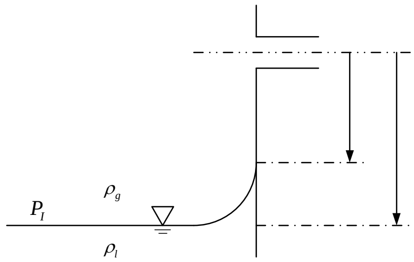

그림 2. 측향 분기관으로의 액체견인에 대한 개략도

관계식 유도를 위해서 그는 견인 시작시 발생하는 현상을 간략화하여 정지 상태의 액체의 점성과 표면 장력을 무시할 경우에 대해서 열수력학적인 조건과 베르누이(Bernoulli)방정식을 만족하는 조건을 이용하였다. 또한, 액체 견인 시작점은 성층화된 유동의 경계면에서 계면이 불안정한 상태일 때라는 수학적 개념을 이용했다. 이때의 조건은 $r = 4h/5$ 으로 다음의 식을 유도하였다.

$$h_b = K\left[\frac{\rho_g q^2}{g\Delta\rho}\right]^{0.2} \tag{1}$$

윗식에서 q 는 분기관으로 유출되는 기상의 부피 유량이다. 최종적으로 위 식에서 K 에 대해서 0.688 이라는 값을 얻었다. Craya(1949)가 제시한 모델은 액체 견인 시작점의 최초의 시도라는 점에서 의미는 있지만, 분기관의 지름이 유도과정에서 제외되어 있어 이의 효과는 무시되어 있다는 문제점을 안고 있다.

Rouse(1956)는 공기-물, 담수-해수 계통들에 대하여 비순환 물 분출(non-circulatory waterspout)에 관한 실험적인 관계식을 얻었다. 이 실험은 큰 수조에 서로 다른 직경의 배관을 부착하여 계면으로부터의 거리(h)에 따라서 수행되었으며, 이들 자료를 바탕으로 하여 다음과 같은 실험식을 얻었는데 최초로 무차원 계면수위(h_b/d)와 중력과 관성력의 비인 Froude 수를 이용한 관계식을 도출하였다.

$$Fr_g\left(\frac{\rho_g}{\Delta\rho}\right)^{0.5} = C_1\left(\frac{h_b}{d}\right)^{C_2} \quad Fr_g = \frac{V_{3g}}{\sqrt{gd}} \tag{2}$$

윗식에서 Froude 수는 분기관의 직경(d)와 분기관내 유체의 속도(V_{3g})로 나타내어 진다. 일반적으로 윗식에서 C_1 및 C_2 는 실험적 경험에 의해 주어지는 상수이다. 위의 식과 같이 Froude 수에 의한 상사는 Zuber(1980)에 의해 파단면을 통한 방출유동에 대한 스케일링에 대해 타당하다고 제시하고 있으며 기포율의 상사와 동일한 결과를 낳을 수 있다고 되어있다. 이 식은 지금까지 상향, 하향, 측향 분기관 모두에서 기체 또는 액체의 견인의 시작시점에 대하여 대표적인 상관식으로 쓰여지고 있다.

Corwley 와 Rothe(1981)는 실험적 상수로서 C_1 및 C_2 에 대해 각각 3.25 와 2 를 제시하고 있다.

한편, 독일 KfK(Reimann et al, 1984)은 성층화된 수평관에서 상향, 측향, 하향의 세가지 방향에 대해서 소형 파단에서의 단상 질량 유량(mass flow rate) 및 건도(quality)를 결정할 수 있는 실험적 근거를 마련하였다. 수평관 직경은 0.206 m 이며, 작업유체로는 물-공기를 사용하였다. 최대 압력은 0.5 MPa, 온도는 상온범위에서 실험을 획득하였으며, 수직 상향 분기관에 대해서는 지름 6, 12, 20 mm 크기를 사용하여 실험하였다. 위 실험 결과를 바탕으로 Smoglie(1984)는 Potential Flow Theory 를 이용해 관계식을 유도하였으며 이에 대한 계략도는 그림 3 에 나타나 있다. 이 모델은 분기관을 통해서 지속적으로 공기가 유출됨으로 발생하는 함몰점(Sink Point)을 분기관의 정 가운데 점으로 모델한 것이 특징이다.

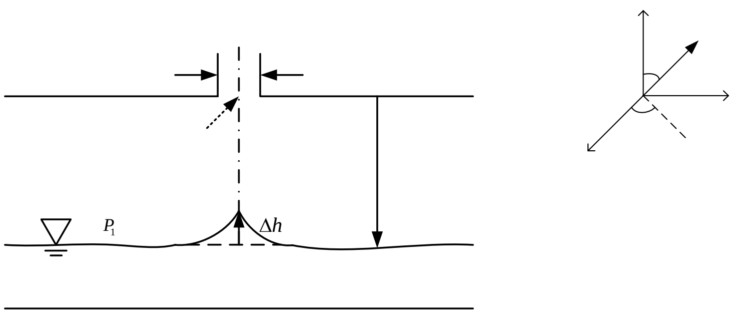

그림 3. 상향 분기관으로의 액체견인에 대한 개략도

분기관 입구에서 발생하는 압력 강하에 의한 힘과 중력과의 상관관계를 이용하여 견인 시작점을 유도하였으며 그 결과는 다음과 같으며 Craya(1949)가 측향 분기관에서 유도한 식(1)과 같은 결과를 보여준다.

$$h_b = 0.688 \frac{W_{3g}^{0.4}}{\left[g\rho_g \left(\rho_l - \rho_g \right) \right]^{0.2}} \tag{3}$$

위 식은 식(2)와 같은 식이며 유도한 식에 의한 값은 $C_1 = 3.25$, $C_2 = 2.5$ 이며, Smoglie(1984)는 실험 결과에 의해서 상향, 측향, 하향의 액체/기체 견인에 대해서 각각 C_1, C_2 값을 얻었으며, 특히 상향분기관에서의 상수값은 $C_1 = 0.353$, $C_2 = 2.5$ 을 제안하였다. 상향 분기관에서 C_1 은 이론에 의한 값과 실험에 의한 값이 약 10 배 가까이 차이남을 알 수가 있다.

이 모델은 수직 상향 분기관으로의 액체견인데 대한 최초의 모델이라는 점에서 의미는 있지만, Reimann et al.(1984) 의 실험결과에 따라 d/D 값이 매우 작은 값이므로 함몰점이 분기관 지름의 효과를 고려하지 않아 액체 견인 시작시 분기관의 지름 효과가 무시되는 문제점을 안고 있다.

미국의 UCB 에서 Schrock et al.(1986)은 수평관 직경 0.102m 의 실험장치를 이용하여 세방향의 분기관 조건에 대한 실험을 수행하였다. 작업 유체로는 물-증기 및 물-공기를 모두 사용하였으며, 액체 견인의 경우에는 이러한 작업유체의 차이가 주는 효과는 크지 않은 것으로 나타났다. 수직 상향 분기관에 대해서 액체 견인 시작점에 대해서는 지름 3.76, 3.96, 6.72 mm 의 분기관을 사용하여 실험을 수행하여 식(2)를 이용하여 $C_1 = 0.395$, $C_2 = 2.5$ 의 결과를 제시하

였다. 이는 KfK 의 결과와 유사하다.

프랑스의 CENG 에서 Maciaszek et al.(1986)은 수직 상향 분기관의 액체 견인 시작점을 결정하기 위해서 Bharathan et al.(1982)의 제안에 따라 상관식을 유도하였다. 그는 2 차원 흡입유량의 세기를 적용하여, 액체 견인시 분기관 근처 계면상에서 발생하는 물결이 λ 만큼의 거리 차이를 두고 발생한다고 주장한다. 이는 한몰점이 분기관의 가장자리에 있다는 것을 의미하는 것으로 그림 4 에서는 그 개념을 간략하게 도식화 한것이다.

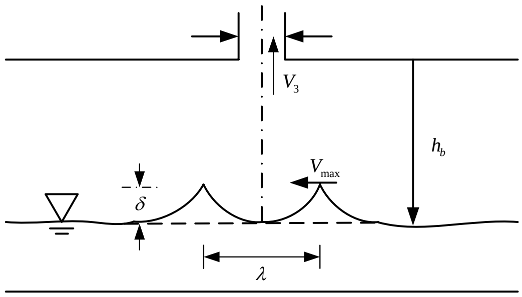

그림 4. 상향 분기관으로의 액체견인에 대한 개략도

그림 4 의 개념도에 따라 연속 방정식과 퍼텐셜(Potential) 흐름 이론을 적용하고, 액체 견인 시작점은 성층화된 유동의 경계면에서 계면이 불안정한 상태일 때라는 수학적 개념이용하여 물견의 높이 $\delta = 1/3 h_b$ 의 결과를 제시한다. 위 과정을 정리하여 다음식이 유도 된다.

$$h_b = \frac{3}{2}\left(\frac{w_{3g}^2}{\pi^2 \rho_g \Delta\rho g \lambda^2}\right)^{1/3} \quad (4)$$

여기서, λ 는 계면이 분기관과 거리가 가까워 질수록 분기관 지름 d 와 동일하다고 가정하고 관계식을 다음처럼 유도하였다.

$$h_b = 0.7\left(\frac{w_{3g}^2}{\rho_g \Delta\rho g d^2}\right)^{1/3} \quad (5)$$

위 식은 식(2)에서 $C_1 = 2.17$, $C_2 = 1.5$ 이며, KfK 의 실험자료를 함께 고려하여 $C_1 = 1.54$, $C_2 = 1.5$ 의 결과를 제시한다.

본 모델은 실험시 발생하는 현상을 근거로 모델을 제시하였다는 데 그 의미가 있으나, 분기관과 수면과의 거리에 따른 물결간의 거리(λ)에 관한 면밀한 고찰이 없어 모델의 정확성은 다소 떨어지는 현상을 보인다.

미국 OSU 의 Wu et al.(2000) 등은 지름 0.1524m 의 수평관에서 지름 5cm 의 수직 상향 분기관에 관해서 액체 견인 시작점 및 방출 건도에 대해서 실험을 수행하였다. 특히, 견인 시작점을 모델하기 위해서 Maciaszek et al.(1986)이 제시한 모델을 바탕으로 Imaginary Potential Flow 이론을 이용하여 λ 와 d 의 관계를 분기관과 계면의 거리에 따라 상세히 고찰하였다. 그 결과는 다음식과 같다.

$$\frac{\lambda}{d} \propto a\left(\frac{h_b}{d}\right)+1 \tag{6}$$

위 식에서 a 는 상수이며 실험식에 의해서 값이 결정된다. 위 식을 식(4)에 적용하고, 분기관으로 유출되는 기상의 유량에 따른 h_b 와 D 사이의 관계를 직관적으로 고려해 다음식을 유도하였다.

$$Fr_g\left(\frac{\rho_g}{\Delta\rho}\right)^{0.5} = K\left(\frac{h_b}{d}\right)^{1.5}\left[a\left(\frac{h_b}{d}\right)+1\right]\left[1-\left(\frac{h_b}{D}\right)^2\right]^{-0.5} \tag{7}$$

위 식에서 Wu 등은 그들의 실험자료로부터 $K = 1.0125,\ a = 0.22$ 의 결과를 얻어내었다.

위 모델은 λ 와 d 의 관계를 면밀히 고찰하여 Maciaszek et al.(1986)이 제안한 상관식을 보완하고 수평관의 지름이 미치는 영향을 직관적으로 고려하였지만 수평관의 영향에 대한 논의는 더욱 보완되어야 할 것으로 보인다.

위에서 살펴본 바와 같이 여러 기관에서 제시한 견인 시작점에 관한 상관식을 정리해보면 다음과 같이 일반화 시킬 수 있다.

$$Fr_g\left(\frac{\rho_g}{\Delta\rho}\right)^{0.5} = C_1\left(\frac{h_b}{d}\right)^{C_2} + C_3\left(\frac{h_b}{d}\right)^{C_4} \tag{8}$$

위 식을 근거로 $C_1 \sim C_4$ 의 상수값을 요약하여 표 1 에 나타내었다.

표 1. 액체 견인 시작점에 관한 상수값 요약

			KfK	UCB	CENG	OSU	RELAP5
상향		C_1	0.353	0.395	2.17	0.22	0.353
		C_2	2.5	2.5	1.5	2.5	2.5
		C_3	0	0	0	1	0
		C_4	-	-	-	1.5	-
측향	액체견인	C_1	3.21	3.21	3.21	-	3.21
		C_2	2.5	2.5	2.5	-	2.5
	기체견인	C_1	2.61	1.18	3.21	-	2.61
		C_2	2.5	2.5	2.5	-	2.5
하향		C_1	0.23	1.47	$1-R^{0.2}$	-	0.46
		C_2	2.5	2	2.5	-	2.5

표 1 에 나타난 바와 같이 KfK 에서는 C_2 에 관한 값으로 모든 분기관 방향에 대해서 2.5 를 제시하고 있으며 이는 RELAP5 에 그래도 반영되어 있다. UCB 의 경우에도 하향 분기관을 제외하고는 모두 2.5 를 제시하고 있으며 CENG 의 경우에는 상향을 분기관을 제외하고 모두 2.5 를 제시한다. 또한 OSU 에서는 상향 분기관에 대해서 다른 연구 기관과는 달리 C_3, C_4 를 제시하여 변형된 형태의 상관식을 보인다.

C_2 의 값을 2.5 로 제안한다는 것은 분기관의 지름에는 상관없이 견인 시작점이 결정된다는 의미로 KfK 와 RELAP5 에서는 이를 받아들이고 있으나, UCB 의 하향 분기관, CENG 의 상향 분기관 OSU 의 상향 분기관에서는 각각 다른 상수값을 제시함으로써 분기관이 견인 시작점에 영향을 주고 있다는 결론을 제시한다.

따라서, 본 연구에서는 2.5 의 지수승로 일관되게 견인 시작점 상관식에 대해서 보편적으로 모든 분기관에 적용할 수 있는지에 대해 자세히 고찰하고 이에 대해 비판을 하고자 한다.

3. 실험자료

2.5 의 지수승으로 나타난 모델을 검증하고 비판하기 위해서 데이터를 수집하였다. 수집된 데이터는 상향, 측향, 하향 분기관에 대해서 액체/기체 견인 시작점 자료이며, 상기 언급한 KfK, UCB 에서 얻어진 실험 결과에 본 연구를 통해 획득하게 된 HGU 에서의 연구 결과를 첨부하였다. 특히, 상향 분기관의 액체 견인 시작점의 자료로 KAIST 의 실험 결과를 추가로 수집하였다. 각 기관별 실험 범위와 실험 조건을 요약하여 표 2 에 나타내었다.

표 2 견인 시작점의 실험 자료의 요약

연구자	D(m)	D/d	작업유체	분기관 방향
Reimann and Khan(1986) (KfK 자료)	0.206	34.3, 25.7, 17.1, 10.3	공기-물	상향, 측향, 하향
Schrock 등(1986) (UC-Berkeley 자료)	0.102	27.2, 25.8, 16.1, 10	공기/증기-물	상향, 측향, 하향
Moon and NO(2000) (KAIST 자료)	0.295	5.9, 4.2	공기-물	상향
Hwang and Lee(2002) (HGU 자료)	0.184	11.5, 7.4	공기-물	상향, 측향, 하향

위의 표에 나타난 바와 같이 4 개의 연구 기관에서는 서로다른 지름의 수평관과 분기관을 사용하였으며 작업유체로는 공기-물 또는 증기-물을 사용하였다. KfK, UCB 에서는 D/d 의 범위과 거의 동일하며, 이 두 실험 장치에 비교했을 때 HGU 는 조금 낮은 범위의 값을 가진다. 또한 KAIST 의 실험장치는 밀림관을 모사하는 실험장치이므로 비교적 낮은 값을 가진다. 각 기관별 실험 조건 및 견인 시작점에 대한 정의는 참고문헌에 상세히 기술되어 있으므로 본 논문에서는 그에 대한 기술을 생략하도록 한다.

4. 모델의 타당성 검토

2 장에서 언급한 바와 같이 KfK 와 UCB 에서 제안한 액체/기체 견인 시작에 관한 상관식의 2.5 지수승의 보편 타당성을 검증하고자 한다. 타당성 검토를 위해서 앞서 언급한 몇몇 기관의 개별실험 결과를 이용하여 각기 다른 분기관에서 얻어진 실험자료를 바탕으로 최적 상관

식을 도출하여 2.5 지수승의 타당성을 검토하였다. 그 결과를 분기관의 방향별로 정리를 하여 다음과 같이 나타내고자 한다.

4.1 상향 분기관

상향 분기관에서는 액체 견인만 발생할 수 있다. 그 시작점에 대한 실험 결과를 그림 5 에 나타내었다. 실험 자료는 대체로 산포를 보이며 KfK, UCB 자료는 h_b/d 가 비교적 높은 곳에 분포하고 있으며 KAIST 와 HGU 의 자료는 h_b/d 가 낮은 곳에 위치한다. KfK 와 UCB 에서 제안한 상관식은 로그 스케일에서 직선으로 나타나며, 그들의 실험자료를 비교적 잘 예측하는 것처럼 보인다. 또한, 이 모델들은 비교적 큰 분기관에서 얻어진 KAIST, HGU 의 실험자료를 h_b/d 에서도 잘 예측하는 것럼 보인다. Maciaszek et al.(1986)이 제안한 상관식은 비교적 기울기가 완만한 직선으로 나타내고 있는데 h_b/d 이 낮은 영역에서 이격이 심하게 나타나고 있다. Wu et al.(2000)이 제안한 상관식은 h_b/d 가 큰 영역에서는 KfK 와 UCB 가 제안한 상관식과 비교적 일치하는 현상을 보이지만 h_b/d 가 낮은 영역에서는 기울기가 완만해지면 실험 결과와 점차 이격을 보이고 있다.

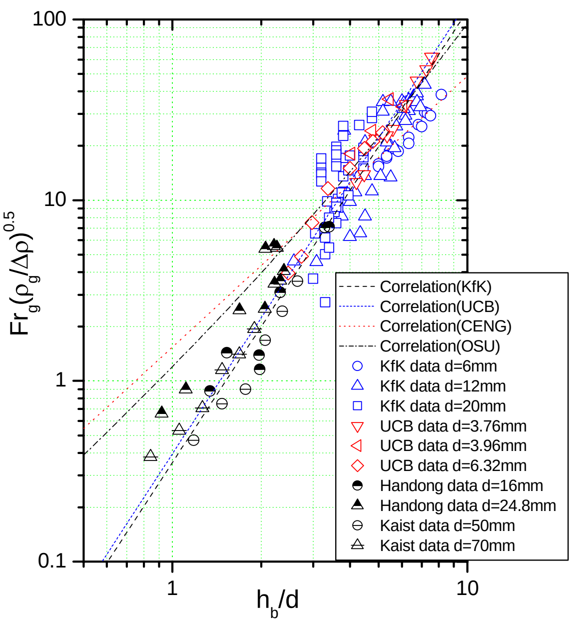

그림 5. 상향 분기관의 액체견인 시작점 데이터 및 상관식의 비교

그림 5 에 나타난 바와 같이 각 기관별로 분기관에 따라서 데이터의 위치가 다르긴하나 그 정도가 그리 크지 않고 또한 산포 범위 안에 존재함으로 분기관의 효과를 분석하기에는 적절하지 못하다. 따라서, 각 분기관 지름에 따라 식(2)의 형태로 나타내어지는 최적 상관식을 도출하여 상수값 C_1, C_2 를 결정하여 표 3 에 나타내었다.

표 3. 분기관별 상수값의 요약 및 이격도 분석

연구기관	d(m)	D/d	C1	C2	2.5지수승과 이격도(%)
KfK	0.006	34.3	1.132	1.63	-34.8
	0.012	17.1	0.352	2.44	-2.4
	0.020	10.3	0.295	2.8	12.0
UCB	0.00376	27.2	0.27	2.67	6.8
	0.00396	25.8	1.794	1.67	-33.2
	0.00632	16.1	0.474	2.45	-2.0
KAIST	0.05	5.9	0.277	2.5	0.0
	0.07	4.2	0.497	2.034	-18.6
HGU	0.016	11.5	0.389	2.316	-7.4
	0.0248	7.4	0.77	2.106	-15.8

위의 표에 나타난바와 같이 C_2의 값은 1.63 에서 2.8 까지로 다양하게 나타나며, 2.5 지수승과 비교 해 보았을때는 최대 -34.8 %의 오차와 평균 16%의 오차를 가진다.

분기관 지름에 따른 C_2값의 변화를 분석하기 위해서 그림 6 에는 표 3 의 내용을 그래프로 타내나였다.

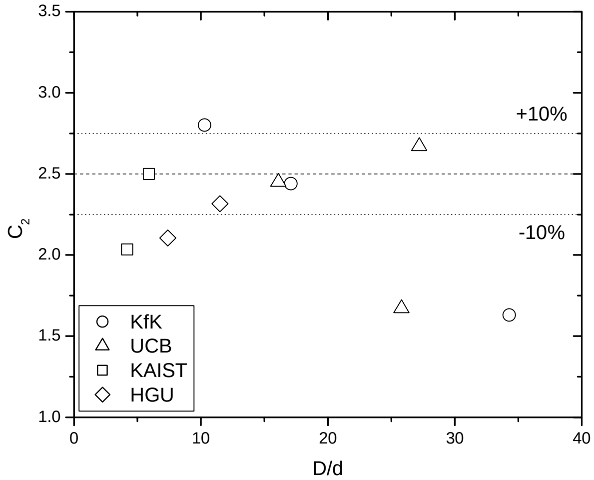

그림 6. 상향분기관 액체견인의 다양한 실험에 대한 C_2 상수값의 이격도 분석

위의 그림에서 데이터들은 일정한 경향성 없이 산포하고 있으며, 2.5 의 값과 ±10% 오차를 가지는 실험자료는 10 개 중에 단지 5 개가 존재할 뿐이다. 따라서, 상향 분기관 액체 견인 시작점 상관식에 C_2값을 2.5 로 표현하는 것은 잘못될 가능상이 많다.

4.2 측향분기관

측향 분기관에서는 수위에 따라 액체 및 기체 견인이 동시에 일어난다. 먼저 액체 견인에 대해서 살펴보고자 한다.

액체 견인의 실험 자료와 관계식을 그림 7 에 나타내었다. KfK 와 HGU 의 실험 자료는 UCB

자료보다 작은 산포를 가진다. UCB 는 h_b/d 가 비교적 높은 곳에 분포하고 있으며 KfK 의 자료는 넓은 범위의 데이터를 HGU 는 h_b/d 가 낮은 곳에 분포하고 있다. KfK 와 UCB 에서 제안한 상관식은 로그 스케일에서 직선으로 나타나며 동일한 상관식을 제안하고 있다. 또한, 상관식은 실험자료를 비교적 잘 예측하는 것처럼 보인다.

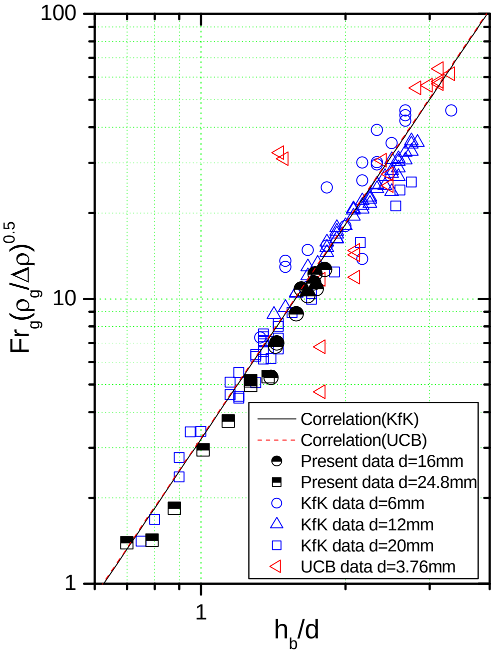

그림 7. 측향 분기관의 액체견인 시작점 데이터 및 상관식의 비교

하지만 분기관 지름에 따른 액체 견인 시작점의 영향에 관한 정량적 분석을 위해서 위 그림은 적절하지 못하다. 따라서, 각 분기관 지름에 따라 식(2)의 형태로 나타내어지는 최적 상관식을 도출하여 상수값 C_1, C_2 를 결정하여 표 4 에 나타내었다.

표 4. 분기관별 상수값의 요약 및 이격도 분석

연구기관	d(m)	D/d	C1	C2	2.5지수승과 이격도(%)
KfK	0.006	34.3	4.83	2.12	-15.20
	0.012	17.1	4.46	2.03	-18.80
	0.020	10.3	3.33	2.11	-15.60
UCB	0.00376	27.2	4.43	2.09	-16.40
HGU	0.016	11.5	2.17	3.05	22.00
	0.0248	7.4	2.75	2.28	-8.80

위의 표에 나타난바와 같이 C_2 의 값은 2.03 에서 3.05 까지로 다양하게 나타나며, 2.5 지수승과 비교 해 보았을때는 최대 +22 %의 오차에 16%의 평균 오차를 보인다. 분기관 지름에 따른 C_2 값의 변화를 분석하기 위해서 그림 8 에는 표 4 의 내용을 그래프로 타내나였다.

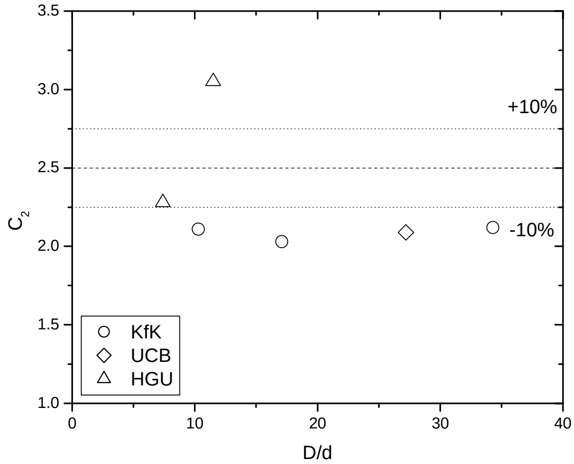

그림 8. 측향분기관 액체견인의 다양한 실험에 대한 C_2 상수값의 이격도 분석

위의 그림에서 알 수 있듯이 비교적 2.5 보다는 2.0 에 근접하는 현상을 보이고 있다. 2.5 의 값과 ±10% 오차를 가지는 실험자료는 6 개 중에 단 1 개가 존재할 뿐이다. 따라서, 측향 분기관 액체 견인 시작점 상관식에 C_2 값을 2.5 로 표현하는 것은 잘못될 가능상이 많다.

이번에는 측향분기관의 기체견인에 대해서 살펴보고자 한다. 수집된 실험자료를 기존의 모델과 함께 그림 9 에 나타내었다. UCB 에서 얻어진 실험 자료는 h_b/d 가 비교적 높은 곳에 분포하고 있으며 KfK 와 HGU 에서 얻은 자료는 h_b/d 가 비슷한 범위에 위치하고 있다. UCB 의 실험자료는 KfK, HGU 의 실험자료보다 더 우측에 위치하고 있으며 이는 기체 견인 시작시 분기관에서 수위까지의 거리가 더 멀리 있음을 의미하는 것이다. 이것의 원인은 시작점 판별 기준의 차이일 수도 있다. 또한, UCB 의 자료는 그들이 제안한 상관식은 로그 스케일에서 직선으로 나타는데, 상관식과 실험 자료가 잘 맞는듯 하지만 실험자료의 거시적 분포는 상관식의 기울기와는 다소 차이가 있어보인다. 또한, UCB 의 실험결과와 KfK, HGU 의 실험 자료를 모두 포함해 볼 때 그 기울기는 반드시 2.5 가 아닐수 있음을 그림으로 확인 할 수가 있다.

분기관 지름에 따른 기체 견인 시작점의 영향에 관한 정량적 분석을 위해서 위 그림은 적절하지 못하다. 따라서, 각 분기관 지름에 따라 식(2)의 형태로 나타내어지는 최적 상관식을 도출하여 상수값 C_1, C_2 를 결정하여 표 5 에 나타내었다.

표 5 에 나타난바와 같이 C_2 의 값은 1.19 에서 2.38 까지로 다양하게 나타나며, 2.5 지수승과 비교 해 보았을때는 최대 -52.5 %의 오차에 25%의 평균 오차를 보인다. 분기관 지름에 따른 C_2 값의 변화를 분석하기 위해서 그림 10 에는 표 5 의 내용을 그래프로 타내나였다.

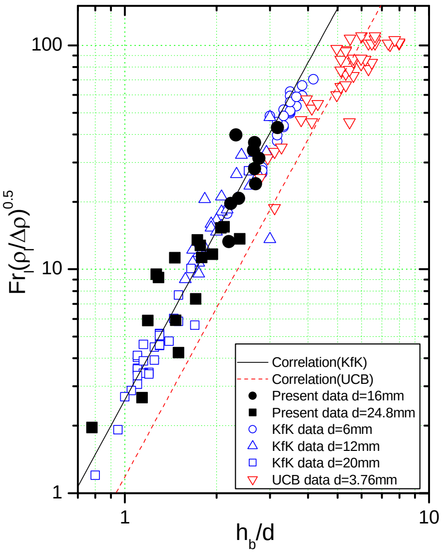

그림 9. 측향 분기관의 기체견인 시작점 데이터 및 상관식의 비교

표 5. 분기관별 상수값의 요약 및 이격도 분석

연구기관	d(m)	D/d	C1	C2	2.5지수승과 이격도(%)
KfK	0.006	34.3	3.27	2.20	-12.00
	0.012	17.1	4.53	1.82	-27.20
	0.020	10.3	2.56	2.38	-4.80
UCB	0.00376 (A-W)	27.2	5.15	1.49	-40.40
	0.00376 (S-W)	27.2	4.84	1.19	-52.44
HGU	0.016	11.5	3.30	2.25	-10.00
	0.0248	7.4	3.65	1.84	-26.40

그림에서 알 수 있듯이 전반적으로 2.5 보다는 작은 값을 가지며 뚜렷한 경향을 찾아 볼수가 없다. 2.5 의 값과 ±10% 오차를 가지는 실험자료는 7 개 중에 단 2 개가 존재할 뿐이다. 따라서, 측향 분기관 기체 견인 시작점 상관식에 C_2 값을 2.5 로 표현하는 것은 잘못될 가능성이 많다.

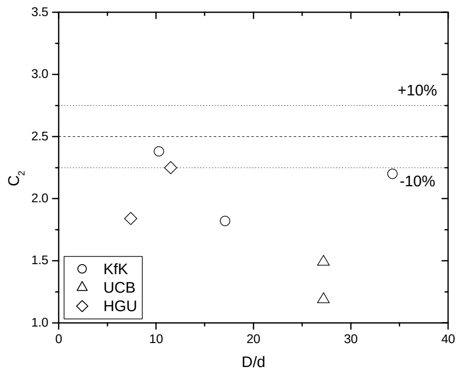

그림 10. 측향분기관 기체견인의 다양한 실험에 대한 C_2 상수값의 이격도 분석

4.3 하향분기관 기체견인

하향분기관에서 수집된 실험자료를 기존의 모델과 함께 그림 11 에 나타내었다. UCB 에서 얻어진 실험 자료는 KfK 와 HGU 에서 얻은 자료 그 분포한 위치 뿐만 아니라 다른 경향을 보인다. UCB 의 실험자료는 KfK 와 HGU 의 실험자료의 경향보다 더 완만한 기울기를 보이는데 이는 분기관 지름의 크기가 시작점 결정에 영향을 미친다는 의미를 지닌다. UCB 의 상관식 또한 KfK 와 HGU 의 모델과는 다른 경향을 보이고 있다. 또한, UCB 의 실험결과를 면밀히 살펴 볼 때 KfK, HGU 의 실험 자료의 기울기가 반드시 2.5 가 아닐수 있음을 그림으로 확인 할 수가 있다. 즉, UCB 가 제안한 기울기 2 의 분포를 나타낼 수도 있음을 알수가 있다.

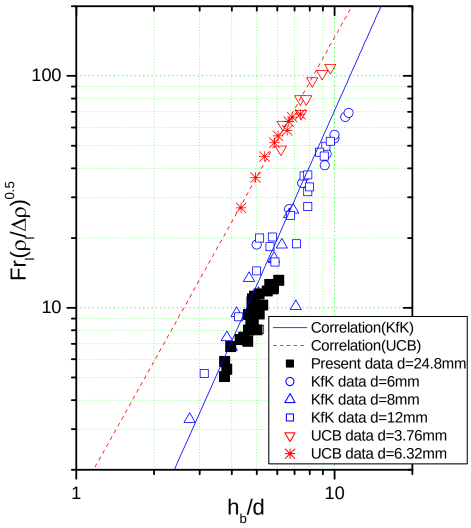

그림 11. 하향 분기관의 기체견인 시작점 데이터 및 상관식의 비교

분기관 지름에 따른 기체 견인 시작점의 영향에 관한 정량적 분석을 위해서 위 그림은 적절하지 못하다. 따라서, 각 분기관 지름에 따라 식(2)의 형태로 나타내어지는 최적 상관식을 도출하여 상수값 C_1, C_2 를 결정하여 표 6 에 나타내었다.

표 6 에 나타난바와 같이 C_2 의 값은 1.32 에서 2.07 까지로 다양하게 나타나며, 2.5 지수승과 비교 해 보았을때는 최대 -47.2 %의 오차에 30%의 평균 오차를 보여 비교적 큰 차이를 나타내고 있다.

분기관 지름에 따른 C_2 값의 변화를 분석하기 위해서 그림 10 에는 표 5 의 내용을 그래프로 타내나였다. 그림에서 알 수 있듯이 전반적으로 2.5 보다는 작은 값을 가지며 2.5 보다는 오히려 2 의 값에 수렴하는 경향을 보인다. 따라서, 측향 분기관 기체 견인 시작점 상관식에 C_2 값을 2.5 로 표현하는 것은 오류를 범하는 것이 된다.

표 6. 분기관별 상수값의 요약 및 이격도 분석

연구기관	d(m)	D/d	C1	C2	2.5지수승과 이격도(%)
KfK	0.006	34.3	1.33	1.60	-36.00
	0.012	17.1	0.47	2.07	-17.40
	0.020	10.3	0.64	1.80	-28.00
UCB	0.00376 (A-W)	27.2	2.49	1.70	-32.00
	0.00632 (A-W)	16.1	2.13	1.78	-28.80
	0.00376 (S-W)	27.2	0.65	2.03	-18.64
	0.00632 (S-W)	16.1	2.38	1.32	-47.20
HGU	0.0248	7.4	0.46	1.89	-24.40

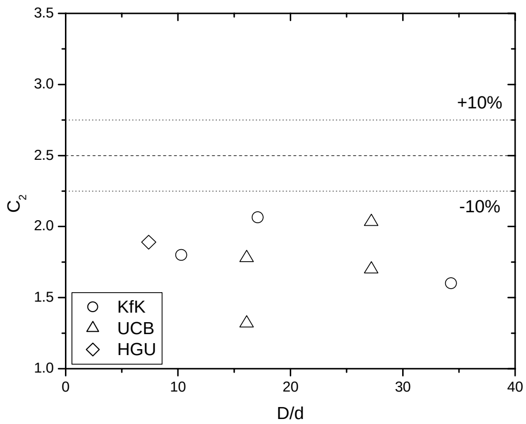

그림 8. 하향분기관 기체견인의 실험에 대한 C_2 상수값의 이격도 분석

5. 결　론

본 연구를 통해 견인 시작점 상관식으로 2.5 지수의 보편 적용에 대한 비판을 하였다. 기존의 실험자료 및 현재의 실험자료를 바탕으로 분기관에 따른 최적 상관식을 도출하였다. 이를 통해 상관식의 지수는 액체 견인 시작점에서는 상향 분기관과 측향 분기관에서 동일하게 16%의 평균오차를 가지고, 기체 견인 시작점에 관해서는 측향 및 하향 분기관에서 각각 25%, 30%의 평균오차를 보인다. 상향 분기관 및 측향 분기관의 기체 견인 시작점에 관한 지수승 비교에서 일정한 경향을 보이지 않음을 알 수 있었는데, 측향 분기관의 기체 견인 시작점과 하향 분기관의 경우 2 로 수렴하는 현상을 보였다. 이는 견인 시작점이 분기관의 지름에 관련있음을 시사하는 것으로 2.5 승의 부적절함을 알려주는 판단 기준이 되기도 한다. 이를 바탕으로 볼때, 2.5 의 값이 보편적으로 적용되기에는 무리가 있어 보인다. 이러한 차이는 현재까지의 연구가 각기 다른 실험 장치를 이용하여 각기 다른 관찰자의 주관에 따른 견인 시작점의 판별을 근거로 얻어진 자료에서 난다. 따라서, 보편 타당한 값을 얻어내기 위해서는 동일한 기하학적 형상의 객관적인 견인 시작점에 의한 실험자료가 요구된다. 뿐만 아니라, 이에 대한 물리적 모델이 실제 현상에 기초하여 이루어져야 한다. 또한 UCB 에서 기체견인에 대한 물/공기, 증기/물 실험의 차이를 물성치의 변화에 기인한다고 판한하며 점성수와 본드수(Bond number)로 분석한 부분과 관련하여 프라우스 수(Froude number)와 본드수의 조합적인 분석도 필요하다.

감사의글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력 연구개발 중장기계획사업 지원의 일환으로 한국원자력안전기술원이 수행하는 “ 중수로 안전성 평가체제 수립 및 안전현안 검증기술개발 과제” 의 위탁연구로 수행되었다.

참고문헌

Charathan, D., Wallis, G.B., H.J., “Lower Plenum Voiding,” J. Heat Transfer, 104, pp. 479-486, 1982

Craya, A. Theoretical Research in the Flow of Non-Homogeneous Fluids, La Houille Blanche, pp. 44-55 (1949).

Crowley, C.J. and Rothe, P.H., "Flow Visualization and Break Mass Flow Measurements in Small Break Separate Effects Experiments," Proc. of ANS Specialist Meeting on SBLOCA I LWRs, Monterey (1981).

G.S. Hwang and J.Y. Lee et al. “OFF-TAKE EXPERIMENT AT T-JUNCTION BETWEEN HEADER AND FEEDER PIPES IN CANDU,” NURETH-10, Seoul, OCT 2003

Maciaszek, T. and Micaelli, J.C., The CATHARE Phase Separation Model in Tee Junctions, SETH/LEML-EM/89-159 (1989).

Q. Wu, K.B. Welter, Y.Yao and J.N. Reyes, Jr. Stephen M. Bajorek, “Improvement and Evaluation of Models for Liquid Entrainment at an upward oriented vertical Branch Line from a Horizontal Pipe.” Personal communication with Lee J.Y.(2000)

Rouse, H., "Seven Exploratory Studies in Hydraulics," J. Hydr. Div. Proc. ASCE, HY4, pp(1038) 1-35, (1956)

Schrock, V. E., Revankar, S.T., Mannheimer, R. and Wang, C-H.., Small Break Critical Discharge - The Roles of Vapor and Liquid Entrainment in a Straified Two-Phase Region Upstream of the Break, NUREG/CR-4761 (1986).

Smoglie, C., "Two-Phase Flow Through Small Branches in a Horizontal Pipe with Stratified Flow, "Kernforschungszentrum Karlsruhe, (KfK) 3861 (1984).

Thermal Hydraulics Group “RELAP5/MOD3 Code Manual Volume 4 : Models and Correlations”, page 3-9, Scientech, Inc. , NUREG/CR-5535 (1998)

W. Bryce, Numerics and Implementation of the UK Horizontal Stratification Entrainment Off-Take Model into RELAP5/MOD3, AEA-TRS-1050, AEEW-R 2501, Atomic Energy Establishment Winfrith, March 1991.

Y.M. Moon and H.C. NO, “Off-take Experiment at T-junction with Vertical-up Branch in the Horizontal Pipe,” Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, 2003.

Zuber, N., Problems in Modeling of Small Break LOCA, NUREG-0724, U.S. Nuclear Regulatory Commission (1980).