

증기주입기 해석을 위한 이상 유동 코드 개발

이승진, 이은철
서울대학교

이경진
조선대학교

요약

기존 냉각수 주입 계통의 안전성 및 신뢰도를 높이려는 노력에서 미국, 일본, 이태리 등 여러 나라에서는 증기 주입기에 대한 분석 기법 개발과 실험을 통한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이들이 이상 유동 현상이 일어나는 혼합 노즐을 해석하기 위해 사용한 방법은 제어체적 분석기법으로, 이 분석 방법에서는 응축 메커니즘을 고려할 수 없다. 본 연구에서는 이러한 사항을 개선하기 위해 혼합 노즐 해석시 one dimensional two fluid model을 적용하여 상간의 운동량 및 에너지 전달을 고려함으로써 비교적 정확하게 해석 모델 및 코드를 개발하였고, 출력 변수인 방출 압력과 방출 온도를 계산하였으며, 개발한 해석 코드를 검증 및 분석을 하기 위해 ANL 실험자료를 근거로 하였다. 개발한 코드에 의해 계산된 방출 압력은 ANL 실험치에 비해 높은 경향을 보여 주었지만 ANL에서 제어 체적 분석 기법을 적용하여 이론식으로 계산한 값보다는 비교적 정확한 경향을 보여 주었다.

1. 서론

사고나 과도 상태에서 기존 냉각수 주입 계통의 안전성 및 신뢰도를 높이기 위한 노력으로 냉각수 주입 계통의 단순화 및 수동화에 대한 많은 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 움직임으로 미국의 ANL, 일본의 도시바, 이태리의 CISE, ENEL에서는 다양한 분야에서 적용할 수 있는 증기 주입기에 대한 연구를 수행하고 있다. 이들은 증기 주입기 각 부품에 대한 분석 기법 개발과 실험을 통한 연구를 수행하고 있으며, 이들이 혼합 노즐 해석을 위해 사용한 방법은 제어체적 기법으로, 이 방법에서는 증기가 주입되는 부분으로부터 증기가 완전히 응축되는 부분까지를 하나의 제어체적으로 보고, 그 제어체적 내에서 보존 방정식을 세워 해석하는 방법이다. 그러나 이 방식에서는 구체적인 응축 메커니즘을 고려할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 이상 유동 현상을 보이는 혼합 노즐 해석시 one dimensional two fluid model을 적용하여 상간의 운동량 및 에너지 전달을 고려하여 해석 모델 및 해석 코드를 개발하였고, 주요 출력 변수인 방출 압력과 방출 온도를 계산하도록 하였다. 해석에 적합한 실험식이 개발되지 않은 관계로 열전달 계수는 M.K.S 단위로 $1.e6 \sim 2.e7$, 상간의 마찰 계수는 0.05를 사용하였고, 이에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 사용된 관벽 마찰 계수는 Blasius correlation이고, 마찰에 의한 압력 강하를 줄이기 위해 관벽으로 증기가 흐르도록 하였

다. 개발한 코드를 비교 분석 및 검증하기 위해 ANL 실험자료를 근거로 하였으며, 주요 출력 변수인 방출 압력과 방출 온도에 대한 결과 분석을 수행하였다.

2. 이상 유동 해석 코드 개발

증기 주입기는 주입수 노즐, 증기 노즐, 혼합 노즐로 구성되어 있다. 본 절에서는 증기 주입기 개념과 각 노즐의 설계 요건을 검토하였고, 혼합 노즐 해석을 위한 입력 조건과 해석 방법을 제시하였다.

2.1 입력 조건 및 설계 요건

증기 주입기관 고온·고압 상태의 증기 열에너지를 운동에너지로 전환하여, 저온·저압의 피주입수를 고압의 계통으로 공급하는 장치를 말한다. 증기 주입기는 노즐과 관련 밸브만으로 구성되어 있어, 별도의 감압 장치나 구동력이 필요 없는 전적인 수동 특성 기기이다. 이러한 특성을 지닌 증기 주입기 각 부품별 설계 요건을 보면, 증기 노즐의 경우 증기가 가지고 있는 열에너지가 노즐 내부에서 운동에너지로 전환되기 때문에 출구에서 최대의 속도를 얻도록 설계하고 있으며, 이것은 주입수 노즐도 마찬가지라 볼 수 있다. 혼합 노즐의 설계 요건은 노즐의 목부분에서 가능한 한 증기의 완전 응축이 일어나야 한다는 것인데, 이것은 하류 쪽에서 이상 유동에 의한 압력 강하를 줄여, 증기 주입기 성능을 향상시키기 위한 것이다.

혼합 노즐을 해석하기 위한 입력 조건은 증기 주입기 각 노즐의 기하학적인 구조, 계통의 압력과 온도, 주입수의 온도와 압력 및 질량 유속이 주어진 상태에서, 주입수 노즐과 증기 노즐 해석 결과 출구에서 구한 속도와 물성치들이다. 이러한 입력 조건을 가지고 출력 변수인 방출 압력 및 방출 온도를 계산하게 된다. 위의 과정을 통해 계산된 방출 압력이 증기 주입 계통의 압력보다 최소한 1.1배 이상이 되면 고압의 계통 내로 냉각수 주입이 이루어질 수 있다.

2.2 이상 유동 해석 모델 개발

혼합 노즐 해석을 위해 일차원적 분석 기법을 적용하여 상간의 에너지 및 운동량 전달을 고려하여 이상 유동 현상을 비교적 정확하게 해석하였다. 해석을 위해 Five equation two fluid model를 적용하였고, 주입되는 증기는 혼합 노즐 내부에서 항상 포화상태인 가정을 사용하여 증기에 대한 에너지 보존식을 해석하지 않았다. 수치해법으로 SIMPLE method를 사용하였으며, Staggered grid를 사용하였다. 또한 모든 지배 방정식 및 Source term를 선형화 하였고, Upwind scheme를 적용하였다. 노즐 외부와의 열전달을 무시하였고, 일차원 유동과 유동의 직각 방향에서 압력은 일정하다는 가정을 사용하였으며, 유동의 직각 방향에서 각 상의 물성치는 일정하다고 가정하였다. 또한 증기가 주입수에 의해 응축이 일어날 때, 자신의 속도를 가지고 응축된다 가정하였다. 증기의 완전 응축이 발생하였는지 판별하기 위해 Void fraction 한계치를 0.001로 하였으며, 이 이하의 값에서는 Single phase라 가정하여 해석하였다.

3. 모델 검증

개발한 해석 모델을 검증하기 위해 ANL 실험자료를 근거로 하였으며, 표 1.에는 실험 범위와 운전 조건을 나타내었다. 표 2.에는 ANL에서 실험한 결과와 유도한 이론식 그리고 본 연구에서 개발한 모델에 의한 결과를 무차원수로 나타내었다. 표 2.에 나타난 실험에 의해 얻어진 무차원 변수는

$$P_{EXP} = \frac{P_{3S} - P_0}{1/2\rho_w u_w^2}$$

또한 ANL에서 해석을 위해 이론에 근거한 무차원 변수는

$$P_{ANL} = U_R^2 (2ALT - ALT^2) MLT$$

본 연구에서 사용한 무차원 변수는

$$P = \frac{P_{3S} - P_0}{1/2\rho_w u_w^2}$$

로 표현하였다. 표 2.에서 보면 해석 모델에 의해 계산한 방출 압력은 실험치에 비해 10 - 60 % 정도 높은 경향을 보이고 있는 반면 ANL에서 이론식으로 계산한 방출 압력은 50 - 110% 정도의 높은 오차를 보이고 있음을 알 수 있다. 이로부터 상간의 운동량 및 에너지 전달을 고려하여 혼합 노즐을 해석할 경우 비교적 정확하게 방출 압력을 계산하고 있음을 알 수 있다.

4. 민감도 분석

본 절에서는 개발한 모델의 중요성과 코드의 정확성을 분석하기 위해 ANL-Run 104를 기준으로 민감도 분석을 수행하였고, 입력 변수의 변화량이 출력 변수 변화량에 어느 정도 영향을 주는지 판단하기 위해 민감도 지수를 도입하였으며, 열전달 계수, 상간의 마찰 계수, 증기 속도를 입력 변수로 하였다. 민감도 분석 결과는 표 3.에 수록하였다. 표 3.에서 보이듯이 방출 압력을 계산하는데 가장 큰 영향을 미치는 인자는 증기 속도임을 알 수 있고, 열전달 계수는 방출 온도를 계산하는데 민감도 지수가 가장 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

민감도 지수 = 출력 변수 변화량 / 입력 변수 변화량

5. 결과 분석

해석 모델에 의해 계산한 방출 압력, 방출 온도는 ANL 실험자료와 비교한 결과 높은 경향을 보여 주었다. 본 절에서는 방출 압력과 방출 온도에 대한 경향을 비교적 정확하게 분석할 필요가 있어서 ANL-Run 104, ANL-Run 110을 중심으로하여 결과 분석을 수행하였으며, 분석 결과는 표 4. 에 나타내었다. 먼저 그림 1. 그림 2.에 보면 해석 모델에 의해 계산한 방출 압력이 실험치에 비해 높게 나타나고 있음을 볼 수 있는데, 이러한 경향을 보이는 주 요인은 증기 속도를 계산하는데 생기는 오차에 기인한 것

으로 판단된다. 따라서 증기 노즐 출구에서 속도를 정확하게 계산함으로써 압력이 높게 나타나는 현상을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 표 4.을 보면 해석에 의해 계산한 방출 온도는 실험치에 비해 10-20%정도 높은 경향을 보이고 있는데, 이것은 혼합 노즐 내부에서 증기는 항상 포화 상태로 유동한다는 가정을 사용하여 증기에 대한 에너지 보존식을 해석하지 않은점과, 민감도 분석을 수행한 결과 사용된 열전달 계수에 의한 영향이 반영된 결과라 판단된다. 실제 증기가 주입수에 의해 응축이 일어난 후, 습분을 포함할 가능성이 있지만 개발한 모델에서는 이러한 효과를 반영하지 못한 결과라 판단된다.

4. 결론

이상 유동 현상을 보이는 혼합 노즐 해석시 one dimensional two fluid model를 적용하여 상간의 운동량 및 에너지 전달을 고려함으로써 비교적 정확하게 모델링한 결과 출구에서 계산한 방출 압력은 실험치에 비해 10~60% 정도 높은 경향을 보여준 반면 ANL에서 제어 체적 기법을 적용하여 이론식으로 계산한 방출 압력은 실험치에 비해 50~110% 정도의 높은 오차를 보여주었다. 이로부터 해석 모델에 의해 계산된 방출 압력이 비교적 정확하게 실험치에 근사하고 있음을 알 수 있었고, 또한 다양한 운전조건에서 증기 공급 계통의 압력보다 높게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 이상 유동에 대한 민감도 분석을 수행한 결과 방출 압력을 계산하는데 가장 큰 영향을 미치는 인자는 증기 속도임을 알 수 있었고, 이로부터 정확한 방출 압력을 계산하기 위해서는 증기 노즐 해석시 이상 유동을 고려하여 해석할 필요가 있을것으로 판단된다. 해석 모델에 의해 계산한 방출 온도는 실험치에 비해 10-20% 정도 높은 경향을 보여 주었는데, 이것은 해석에 적합한 열전달 계수 개발과 증기에 대한 에너지 방정식을 추가하여 해석함으로써 방출 압력이 높게 나타나는 현상을 줄일 수 있을것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] M. Ishii, "Thermo-Fluid Dynamic Theory of Two-Phase Flow", 1995
- [2] Michel A. Saad, "Compressible Fluid Flow" 2nd, 1993
- [3] Suhas V. Pantankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Mcgrawhill Int.
- [4] L. Mazzocchi, P. Vanini, "Steam injectors as passive components for high pressure water supply", 1991
- [5] G. Cattodori, L. Galbiati, L. Mazzocchi and P. Vanini, "A Single-stage high pressure steam injector for next generation reactors : Test results and analysis", 1993

표 1. 실험 및 운전 조건

변수	범위	단위
주입 증기 압력	$15 \leq P_{og} \leq 66$	psia
주입수 압력	$15 \leq P_{ow} \leq 97$	psia
증기 유량	$0.04 \leq M_g \leq 0.18$	lbm/sec
주입수 유량	$1.0 \leq M_w \leq 3.0$	lbm/sec
유량비	$5.8 \leq w \leq 70$	
증기 속도	$U_g \cong 2100$	ft/sec
주입수 속도	$40 \leq U_w \leq 115$	ft/sec
속도비	$17 \leq U_R \leq 9$	
운동량비	$0.25 \leq U_R/w \leq 9$	

표 2. 방출 압력 계산 결과

Run	ALT	MLT	P	P _{ANL}	P _{EXP}	Err(%)	Err _{ANL} (%)
1	0.322	0.01163	1.50	2.12	1.22	23.0	73.8
2	0.354	0.00959	1.35	1.85	1.12	20.5	65.45
3	0.338	0.0102	1.20	1.83	0.86	39.50	112.9
4	0.446	0.00616	1.13	1.32	0.73	54.86	79.9
5	0.496	0.00503	1.08	1.13	0.59	82.3	89.9
6	0.256	0.01238	1.83	2.84	1.88	-3.23	50.7
7	0.299	0.00931	1.49	2.31	1.48	1.08	55.7
8	0.353	0.00664	1.09	1.85	1.08	2.05	72.1
9	0.395	0.00527	1.23	1.56	0.88	40.2	76.7
10	0.453	0.00408	1.11	1.30	0.69	61.9	87.7

표 3. 이상 유동에 대한 민감도 분석 결과

분석 항목	변화량(%)		방출 압력 변화량(%)	방출 온도 변화량(%)	기준조건(M.K.S)
	증가	감소			
열전달 계수	50	-	-1.27	13.38	3.e6
	100	-	-2.22	20.8	3.e6
상간마찰 계수	50	-	0.8	-1.73	0.05
	-	50	0.008	-0.02	0.05
증기 속도	50	-	23.13	1.16	노즐해석
	-	50	-23.65	5.8	노즐해석

표 4. 방출 온도 및 방출 온도 계산 결과

Run	Pov	P _{3s}	P _{3sANL}	Err	T _{3s}	T _{3sANL}	Err(%)
101	0.165	0.744	0.477	55.9	31.3	25.5	22.7
104	0.395	1.085	0.783	38.6	52.7	42.7	23.4
108	0.341	0.692	0.598	15.7	60.5	49.2	22.9
110	0.461	0.948	0.803	18.1	66.5	56.8	17.1
114	0.458	0.671	0.578	16.1	92.5	84.1	9.99
117	0.452	0.623	0.572	8.9	93.1	83.5	11.5

* P_{3s}는 방출 압력, T_{3s}는 방출 온도이다.

* P_{3s} : MPa, T_{3s} : °c

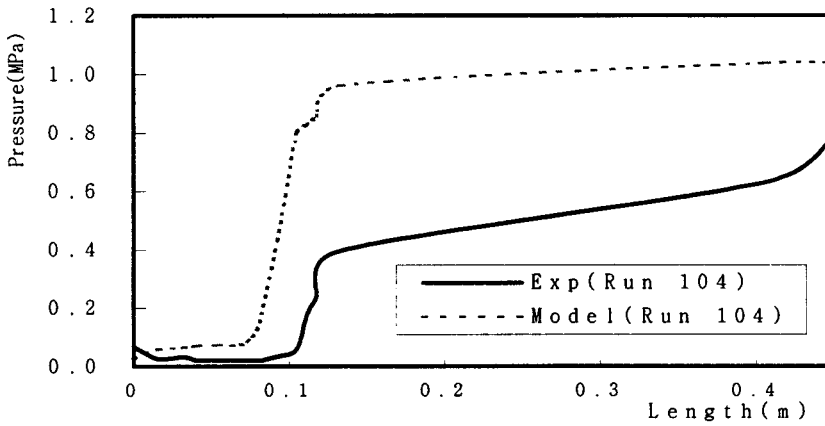


그림 1. 방출 압력(Run 104)

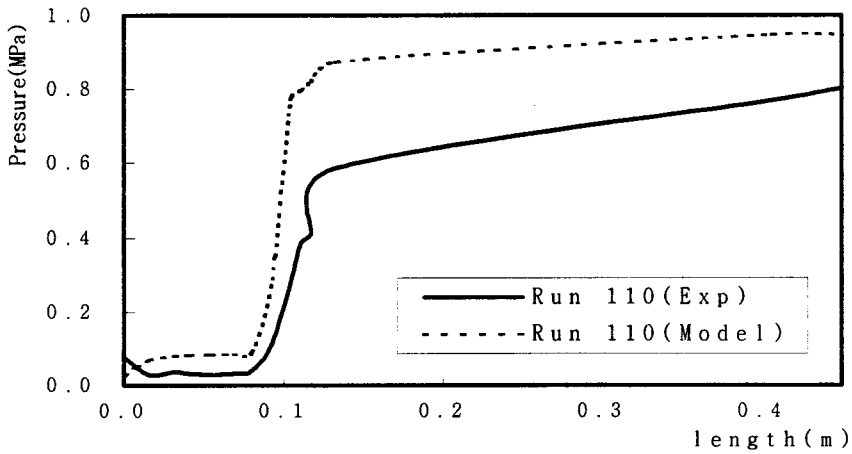


그림 2. 방출 압력(Run 110)