

증기주입기 계통 해석 코드 개발

이 경 진
조선대학교

요약

증기주입기란 고온, 고압의 증기 열에너지를 운동에너지로 전환하여, 저압의 피주입수를 고압의 계통으로 펌핑하는 장치를 말한다. 원자로에서 과도상태나 사고 발생 시, 저온 저압의 냉각수를 고온 고압의 계통으로 주입시켜야 되는 상황이 종종 발생한다.

기존 원자로의 경우 먼저 여러 가지 능동적인 수단을 사용하여 계통의 압력을 떨어뜨린 후, 능동기기를 사용하여 냉각수를 주입시킨다. 냉각수를 주입시키기 위해서는 먼저 계통의 압력을 떨어뜨려야 한다. 기존 방식의 단점으로는 감압이 어렵고, 능동기기에 대한 전원 유지가 필수적이며, 능동기기(펌프)의 고장 가능성을 들 수가 있다.

증기주입기는 감압 및 구동력이 필요하지 않고, 움직이는 부분이 없이 노즐과 밸브로만 구성되어 있어, 냉각수 주입계통의 신뢰도를 크게 향상시킬 수 있다. 따라서 광범위한 운전 조건하에서 안정되게 작동할 수 있는 증기주입계통을 개발하기 위한 분석 기법연구 및 분석 코드를 개발하였다.

1. 증기주입기 부품해석 모델 개발

증기주입기 부품은 크게 주입수 노즐, 증기노즐, 그리고 Mixing 노즐로 구성되어 있다. 본 절에서는 증기주입기 해석을 위한 문제를 정의하고, 각 부품에 대해서 보존식을 세워서 원하는 출력을 구하는 방법을 제시한다.

1.1 문제 정의

증기주입기 부품해석은 증기주입기의 기하학적 구조, 즉 각 노즐의 Dimension 및 구조, 그리고 계통 및 주입수의 조건, 즉 계통의 압력 및 온도 그리고 주입수의 압력 및 온도, 그리고 운전조건, 즉 주입수의 질량유속이 주어진 상태에서 방출압력을 계산하는 것으로 한다.

계산된 방출압력이 마찰에 의한 압력손실을 보상하고도 남을 정도가 되어야 요구되는 유량을 주입할 수가 있다. 통상 방출압력이 계통압력의 1.1 배 정도가 되면, 요구되는 주입수량을 주입시키기에 충분하다고 볼 수 있다.

본 논문은 조선대학교의 지원으로 수행되었음

1.2 주입수 노즐 해석

증기주입기 주입수 노즐에는 비압축성의 밀상액체가 흘러감으로 분석이 비교적 간단하다. 주입수 노즐에 대한 질량보존식은 다음과 같다 :

$$u_{1l} = \dot{m}_{1l} / (\rho_l A_{1l}). \quad (1)$$

운동량보존은 마찰손실을 고려한 베르누이 정리를 사용하면 다음과 같다 :

$$P_1 = P_{0l} + \rho_l g H - \frac{1}{2} K_l \rho_l u_{1l}^2. \quad (2)$$

1.3 증기노즐 해석

증기노즐의 경우에는 압축성을 고려하여 이상기체에 대한 보존방정식을 세워야한다. 입력 자료로 주어진 계통압력 P_0 와 주입수 노즐 해석에 의한 후압 P_1 를 이용하여 증기노즐을 통한 증기주입질량유속 \dot{m}_{1v} , 증기배출속도 u_{1v} , 그리고 증기배출 엔탈피 h_{1v} 를 계산한다.

거의 모든 적용 범위에 대해 증기노즐의 목에서는 임계유동이 발생한다. 이 경우 임계유동에 의한 임계유량은 다음과 같이 주어진다 :

$$\begin{aligned} \dot{m}_{1v} &= \rho^* A_{st} V^* \\ &= \gamma^{1/2} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} A_{st} \rho_0 (R T_0)^{1/2} \\ &= \gamma^{1/2} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} A_{st} P_0 (R T_0)^{-1/2} \end{aligned} \quad (3)$$

단열, 등엔트로피를 가정하고, 이상기체라는 가정을 사용하면 에너지보존식으로부터 다음과 같이 증기배출속도를 계산할 수 있다 :

$$\begin{aligned} u_{1v} &= [2(1-\xi_n)(h_{0v} - h_{1v})]^{1/2} \\ &= [2 C_p (1-\xi_n) (T_{0v} - T_{1v})]^{1/2} : \text{Ideal Gas Assumption} \\ &= \left[\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{P_{0v}}{\rho_{0v}} (1-\xi_n) \left(1 - \left(\frac{P_1}{P_{0v}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 ξ_n 은 마찰에 의한 손실을 고려하기 위한 항이다. 실제의 경우 마찰에 의한 손실항 ξ_n 을 구할 수 없고, 또한 경우에 따라서 등엔트로피 유동이라는 가정을 사용할 수가 없다 (노즐 내에 Shock가 존재하는 경우). 이러한 경우에는 노즐에 대한 정밀한 해석을 통해서 증기배출속도를 계산하여야 한다.

1.4 Mixing 노즐(주입축-팽창 노즐) 해석

Mixing 노즐(주입축-팽창 노즐)에서는 증기가 과냉의 주입수에 의해 응축이 되는 이상유

동 현상이 일어난다. 이 경우에 대한 해석 방법은 크게 제어체적 방법(Control Volume Approach)와 일차원적 해석 기법(One Dimensional Method)이 사용된다.

제어체적 방법에서는 증기가 주입되는 부분으로부터 증기가 완전히 응축되는 부분까지를 하나의 제어체적으로 보고, 그 제어체적내에서 보존방정식을 세움으로서 Mixing노즐 부분에 대한 해석을 수행하는 방식이다. 이 방식에서는 구체적인 응축 메카니즘등이 고려되지 않음으로 다소 정확성은 떨어지지만, 분석기법이 간단하기 때문에 실제적으로 자주 사용되고 있다.

노즐 내에서 압력의 변화가 없다는 가정은 응축이 되는 지점의 단면적이 이상적인 단면적이 될 경우에 적용될 수 있다. 일반적으로는 설계된 증기주입기가 여러 가지 운전조건에 사용되기 때문에, 응축이 되는 지점의 단면적이 이상적인 단면적과는 다른 값을 갖게 된다. 이러한 경우에는 응축기 내에서 압력이 일정하다는 가정이 유효하지 않게 된다. 본 연구에서는 응축시의 압력변화를 고려하여 모델을 개발하였다.

응축 및 팽창과정에 대해 질량, 운동량, 에너지 보존식을 세우면 다음과 같은 방출압력식을 구할 수 있다.

$$P_{3s} = P_1 + \frac{1}{2} \rho_l u_{1v}^2 \cdot MLT \cdot C_{Loss} \quad (5)$$

(5)식의 MLT 는 Mixing Loss Term을 나타낸다. 한편 (5)식에 나타나는 C_{Loss} 를 노즐의 면적항으로 나타내면 다음과 같다 :

$$C_{Loss} = ALT^2 \cdot \left[1 - \frac{4A_2}{A_1 + A_2} \right] + ALT \cdot \frac{4A_2}{A_1 + A_2} \quad (6)$$

, where $ALT \equiv \frac{A_{2i}}{A_2} < 1$.

(5)식을 볼 때, 실제 Mixing 노즐에 있어서의 압력손실은, 외부응축기에 비해 저속의 주입수와의 혼합에 의한 Mixing Loss Term과 노즐목의 팽창에 의한 Area Loss Term으로 구성되어 있음을 알 수 있다.

한편 에너지보존 방정식을 이용하면 완전 응축을 위한 최소 주입수 요구량 \dot{m}_{1l} 를 구할 수 있다 :

$$\dot{m}_{1l} = \dot{m}_{1v} (h_{1v} + 1/2 u_{1v}^2 - h_f - 1/2 u_2^2) / (h_f + 1/2 u_2^2 - h_{1l} - 1/2 u_{1l}^2) \quad (7)$$

2. 설계 및 해석 코드 개발

(5)식으로 주어지는 방출 압력 $P_{3s} = P_1 + \frac{1}{2} \rho_l u_{1v}^2 C_{Loss} \left(\frac{1+w/u_R}{1+w} \right)^2$ 을 최대화하기 위해서는, $u_R \gg 1$ 이므로 $w = \dot{m}_{1l} / \dot{m}_{1v}$ 를 최소화하고, $u_R = u_{1v} / u_{1l}$ 를 가능한 한 1에 근접한 값을 갖도록 하여야 한다. u 를 최소화하기 위해서는 \dot{m}_{1l} 가 작을수록 좋지만, \dot{m}_{1l} 가 너

무 작으면 증기를 모두 응축시킬 수 없다. u_R 을 1에 근접시키기 위해서는 주입수의 유속을 증기의 유속에 근접시켜야 하는데, 물의 경우 마찰에 의한 손실이 크기 때문에 물의 속도를 증기에 속도에 근접시키는 것은 거의 불가능하다.

다만 (5)식에서 $\rho_l u_{lv}^2/2$ 항이 있기 때문에 가능한 한 증기노즐에서의 유속 u_{1v} 를 최대화하는 것이 필요하다.

제약조건을 만족시키면서, 방출압력 P_{3s} 를 최대화시키기 위해, u 와 u_{1v} 를 최대화하는 방안은 다음과 같다.

***u*의 최소화**

- 에너지보존식으로부터 응축 가능한 최대 \dot{m}_{1v} 계산
- 계산된 최대 \dot{m}_{1v} 를 흘려보내기 위한 증기노즐의 최대 목면적 A_1 계산

***u_{1v}*의 최대화**

- \dot{m}_{1v} 에 의해 베르누이 정리를 이용하여 증기노즐의 후압 P_1 계산
- 주어진 P_0 , P_1 에 대해 출구 노즐속도 u_{1v} 를 최대화 할 수 있는 형태의 증기노즐 설계 (최적 Expansion Ratio 계산)

Mixing Nozzle의 설계

- 이상적인 Mixing Nozzle 단면적 A_2 계산
- 상간의 열전달 식에 의해 Mixing Nozzle의 길이 계산

3. 검증 계산 및 최적 설계 계산

개발된 분석기법과 코드 패키지를 검증하기 위하여 검증 계산 및 예제 계산을 수행하였다. 아직 실험을 수행하지 못한 관계로 미국 Argon 국립연구소에서 수행했던 실험결과를 기준으로 하였다 (ANL-7443 참조).

여러 가지 운전조건에 대해 실험한 결과 및 ANL에서 유도한 이론식과 본 연구에서 개발한 모델에 의한 결과를 표1에 제시하였다. 표2에서 P_{exp}^* 는 실험에 의해 얻어진 무차원 변수로서 다음과 같이 표현된다.

$$P_{exp}^* = \frac{P_{3s} - P_1}{1/2 \rho_l u_{1v}^2} \quad (8)$$

또한 P_{AML}^* 는 ANL에서 유도한 이론식에 근거한 무차원 변수로서 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} P_{AML}^* &= \frac{P_{3s} - P_1}{1/2 \rho_l u_{1v}^2} \\ &= u_R^2 (2ALT - ALT^2) MLT \end{aligned} \quad (9)$$

한편 P^* 는 본 연구에서 개발된 모델을 사용한 것으로서 (5)식으로부터 다음과 같이 표현

된다.

$$\begin{aligned}
 P^* &= \frac{P_{3s} - P_1}{1/2 \rho_1 u_{1i}^2} \\
 &= u_R^2 C_{Loss} MLT
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

표1에서 비교해 보면, ANI에서 개발한 이론식은 실험 결과에 비해 너무 큰 예측을 하는 것을 볼 수 있다. 개발된 모델식은 ANI의 실험 값에 비해 훨씬 정확하게 묘사하는 것을 볼 수가 있다. 증기주입기에 대한 검증 계산 및 예제 계산을 수행하여 다음과 같은 분석 결과를 도출하였다.

증기주입기 성능 제약 조건

증기주입기 부품의 기하학적 구조(Geometry) 및 계통압력 P_{3s} 과 P_{water} 가 결정된 후, 주입수의 양이 어느 한계 이하로 줄어들면,

- ① 증기를 완전히 응축시키지 못하거나,
- ② 증기노즐의 후압이 계통압력 보다 높아져서 증기의 주입이 불가능해진다.

반면 주입수의 양이 어느 한계 이상으로 늘어나면,

- ③ 방출압력이 계통압력 이하로 떨어져서 계통으로의 주입이 불가능하거나, 효율이 급격히 떨어진다.

증기주입기 작동 특성

증기주입기의 구조 및 계통압력이 결정된 상태에서, 주입수량을 늘리면, 그림4.2.9에 보인 것처럼 방출압력이 떨어진다. : Negative Feedback

따라서 정상운전에 의한 주입 수량이 계통의 Perturbation에 의해 감소될 경우, 방출압력이 증가하여 주입수량을 증가시키는 방향으로 작동한다. 역으로 계통의 Perturbation에 의해 주입수량이 늘어나는 경우에는 방출압력이 감소하여 주입수량을 줄여주는 방향으로 작동한다. 따라서 개발된 증기주입기 계통은 정상상태를 유지하면서 운전을 하기에 적절한 특성을 가지고 있다고 볼 수 있다.

증기주입기 주입수량 조절

증기주입기의 주입수량 조절은 증기주입기의 방출구(Downstream) 쪽에 조절밸브를 설치하여, 조절밸브의 조정을 통해 원하는 수량에 쉽게 Setting 할 수 있다.

증기노즐의 선택

Pressure Gain을 최대도 하기 위해서, P_b / P_{3s} 에 따라서, 최대 출구 속도를 얻을 수 있는 팽창률의 노즐 선택해야 한다.

- ① P_b / P_{3s} 가 비표적 클 때에는 Convergent Nozzle이 최대 출구 증기속도를 얻는데 유리하다.

- ② 또한 주입수량이 저유량일 경우에는 증기 주입량이 후압(Back Pressure)에 연동하는

Convergent 노즐을 사용하는 것이 "증기가 완전히 응축되지 않는 경우를 방지하는데 유리하다.

③ P_b / P_{sys} 가 아주 작을 경우에는 ($P_b / P_{sys} \leq 0.1$), 적절한 Expansion ratio를 갖는 수축-팽창 노즐을 사용하여 노즐의 출구에서 초음속을 얻는 것이 유리하다.

4. 논의

증기주입기에 대한 검증 계산 및 예제 계산 결과 개발된 모델 및 코드는 증기주입기에 대한 정성적인 분석을 수행하는데 적합한 것으로 판단된다. 그러나 정량적인 분석을 위해서는 Area Loss Term ALT 에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 여겨진다. ALT 에 대한 연구는 이상유동모형을 사용하여 응축에 대한 정확한 모델을 개발하는 방법과 실험을 이용하여 ALT 에 대한 실험적 관계식을 도출하는 방법을 사용할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. L. Mazzocchi, P. Vanini, *Steam Injectors as Passive Components for High Pressure Water Supply*, IAEA Technical Committee Meeting on Progress in Development and Design Aspects of Advanced Water Cooled Reactors, Rome, Italy, Sep. 1991.
2. T. Narabayashi, et. al, *Thermohydraulics Study on Steam Injector for Next Generation Reactor*.
3. M. A. Grolmes, *Steam Water Condensing Injector Performance Analysis with Supersonic Inlet Vapor and Convergent Condensing Section*, ANL-7443, 1986.

표 1 ANL 연구소의 실험 결과 및 이론식과의 비교

RUN #	W	U _R	ALT	MLT	Dimensionless Pressure		
					P*	P* _{exp}	P* _{ANL}
1	16.73	18.36	0.322	0.01163	1.070	1.220	2.120
2	21.12	18.27	0.354	0.00959	0.972	1.115	1.853
3	31.19	17.87	0.338	0.01020	0.940	0.859	1.831
4	42.49	17.55	0.446	0.00616	0.743	0.731	1.315
5	69.95	17.35	0.496	0.00503	0.668	0.594	1.128
6	13.29	22.70	0.256	0.01238	1.336	1.885	2.840
7	17.63	22.10	0.299	0.00931	1.150	1.480	2.305
8	25.83	21.73	0.353	0.00664	0.949	1.075	1.850
9	35.19	21.59	0.395	0.00527	0.841	0.880	1.555
10	56.24	21.25	0.453	0.00408	0.743	0.690	1.295