

EU-APR1400 원자로건물여과배기계통(CFVS) 성능검증을 위한 모델링

황도현

한수원(주) 중앙연구원, 대전광역시 유성구 유성대로 1312번길 70

whitepeach@khnp.co.kr

1. 서론

유럽사용자요건(EUR: European Utility Requirements)에 따르면 중대사고 및 특정 설계기 준초과사고(DEC: Design Extension Conditions)의 경우에 대비하여 원자로건물여과배기계통(CFVS: Containment Filtered Venting System) 설계를 하나의 대안으로 인정하고 있다.

세계적으로 상용화되어 있는 CFVS 타입의 적용성을 검토한 결과 EU-APR1400의 CFVS로 벤츄리 세정기(Venturi Scrubber)형이 예비 선정되었다.

이 논문에서는 CFVS 모델링을 통해 설계에 필요한 벤츄리 튜브 개수 및 벤츄리 세정기 저장조 수위를 예측하고자 한다.

2. 본론

2.1 계통 및 기기 용량 산정

EU-APR1400 여과배기계통 용량 산정을 위해 중대사고 해석코드인 MAAP 코드를 이용한 원자로 건물 감압 분석에 의하여 여과배기계통의 방출유량 및 방출면적이 결정된다.

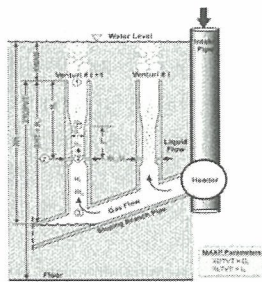


Fig. 1. EU-APR1400 벤츄리 세정기 개략도.

2.2 CFVS 모델링

MAAP5용 CFVS 모델링은 다음과 같은 가정 하에 개발되었다.

- (a) 벤츄리 튜브를 통과하는 기체는 비압축성이며 밀도는 알려진 상수이다.
- (b) 냉각수 유입 위치에서 냉각수는 대기 유동에

의해 완전히 입자화되며 공기/물 혼합 유동은 벤츄리 스토트(Fig. 1의 위치 2)로 유입되는 지점에서 형성된다.

- (c) 벤츄리 냉각수 유입구부터 벤츄리 상부까지의 압력강하는 대부분 액적을 벤츄리 스토트 부분에서 가속시키는데 사용되고, 벤츄리의 확장부 및 벤츄리 튜브 방출구에서 형성되는 압력변화는 무시한다.
- (d) 유효 벤츄리 튜브의 개수는 저장조 수위와 분기관 압력 간의 차에 의해 분기관의 수위와 수력학적으로 변하며 결정된다.

Fig. 1에서 ③지점과 ②지점 간의 기체 유량(kg/s)은 비압축성 오리피스 방정식을 적용하여 다음과 같다.

$$\dot{m}_g = C_g A_t [2\rho_g(P_3 - P_2)]^{1/2} \dots \dots \dots (1)$$

여기서 C_g 는 기체 유동에 대한 오리피스계수이고, A_t 는 벤츄리 스토트 (throat) 면적 그리고 ρ_g 는 기체 밀도이다. 유사한 방법으로 냉각수는 \dot{m}_f 의 유량으로 다음과 같은 오리피스 방정식에 따라 벤츄리로 유입된다.

$$\dot{m}_f = C_f A_f [2\rho_f(P_2 - P_1)]^{1/2} \dots \dots \dots (2)$$

여기서 C_f 는 냉각수에 대한 오리피스계수이고, A_f 는 총 냉각수 유입유동 면적 그리고 ρ_f 는 냉각수의 면적이다. 벤츄리 스토트에서 형성되는 운동량 보존방정식은 다음과 같다.

$$P_2 A_t + \dot{m}_g u_g = P_1 A_t + \dot{m}_f u_f + \dot{m}_g u_g \dots \dots \dots (3)$$

여기서 u_g 는 스토트에서의 기체속도이고 u_f 는 스토트 끝단부위에서의 액적 속도이다. 상기 식에서 가정 사항 (c)를 준용하여 Fig. 1에 도시된 지점 ②*와 ① 지점의 압력은 $P_{2*} = P_1$ 으로 가정하였고 식(3)은 다음과 같이 간략화 된다.

$$(P_2 - P_1) A_t = \dot{m}_f u_f = \dot{m}_f \left(\frac{u_f}{u_g} \right) u_g \dots \dots \dots (4)$$

u_f/u_g 의 비율은 나중에 결정할 미지수이고 u_g 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$u_g = \frac{\dot{m}_g}{\rho_g A_t} = C_g \left[\frac{2(P_3 - P_2)}{\rho_g} \right]^{1/2} \dots\dots\dots(5)$$

식(2), (4), (5)를 결합하면 다음과 같다.

$$(P_2 - P_1)A_t = 2C_f C_g A_f \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{1/2} \left(\frac{u_f}{u_g} \right) [(P_2 - P_2)(P_3 - P_2)]^{1/2} \dots\dots\dots(6)$$

벤츄리 튜브 바깥쪽의 냉각수 수조 밑에서는 다음과 같은 수두 관계식이 성립한다. 여기서 H에 대한 정의는 Fig. 2에서 확인할 수 있다.

$$P_3 - P_1 = \rho_f g H_3 \dots\dots\dots(7)$$

$$P_3 - P_2 = \rho_f g (H_3 - H_2) \dots\dots\dots(8)$$

식(6)에서 P₁, P₂ 항을 소거하기 위해 식(6), (7), (8)을 결합하면 다음과 같다.

$$\rho_f g H_3 - (P_3 - P_2) = B \{ [P_3 - P_2 - \rho_f g (H_3 - H_2)] (P_3 - P_2) \}^{1/2} \dots\dots\dots(9)$$

여기서 B는 다음과 같다.

$$B = 2C_f C_g \left(\frac{A_f}{A_t} \right) \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{1/2} \left(\frac{u_f}{u_g} \right) \dots\dots\dots(10)$$

무차원 압력강하 항, x를 아래와 같이 도입하면

$$x = \frac{P_3 - P_2}{\rho_f g H_3} \dots\dots\dots(11)$$

식(9)는 다음과 같다.

$$1 - x = B[(x - b)x]^{1/2} \dots\dots\dots(12)$$

여기서 b는 다음과 같이 정의한다.

$$b = 1 - \frac{H_2}{H_3} \dots\dots\dots(13)$$

식(12)는 2차 다항식으로 x에 대하여 풀면 다음과 같다.

$$x = \frac{B^2 b - 2 + \sqrt{(B^2 b - 2)^2 + 4(B^2 - 1)}}{2(B^2 - 1)}$$

실제 상황에서 B는 1보다 매우 크므로 이를 적용하면 식(13)은 다음과 같이 간략화 된다.

$$x = b = 1 - \frac{H_2}{H_3} \dots\dots\dots(14)$$

식(14)과 식(11)로부터 다음과 같은 식이 도출된다.

$$P_3 - P_2 = \rho_f g (H_3 - H_2) \dots\dots\dots(15)$$

식(15)을 식(1)에 대입하면 기체 유량을에 대해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{m}_g = C_g A_t [2\rho_g \rho_f g (H_3 - H_2)]^{1/2} \dots(16)$$

2.4 유효 벤츄리 튜브수 결정

N을 유효 벤츄리 튜브의 개수라 하고 벤츄리

세정기 계통을 흐르는 총 기체 유량은 식(16)에서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$m_{g,tot} = N C_g A_t [2\rho_g \rho_f g (H_3 - H_2)]^{1/2} \dots\dots\dots(17)$$

m_{g,tot}은 원자로건물 배기관에서 기체 유량과 동일한데, m_{g,tot}=6.0 kg/s라고 가정할 경우 유효 벤츄리 튜브의 개수를 산정해 보면 다음과 같다.

m_{g,tot}=6.0 kg/s을 식(17)에 대입하고 벤츄리 모델 인자 값을 이용할 경우 벤츄리 세정기 저장조 수위와 유효 벤츄리 튜브 개수간의 관계식은 다음과 같다.

$$N = \frac{513.0}{(H_3 - 1.61)^{1/2}} \dots\dots\dots(18)$$

유효 벤츄리 튜브의 개수와 벤츄리 세정기 저장조 수위, H₃ 간의 관계는 Fig. 2에 제시되어 있고, 식(18)과의 교점이 유효 벤츄리 튜브 개수와 필요한 저장조 수위, H₃를 나타낸다.

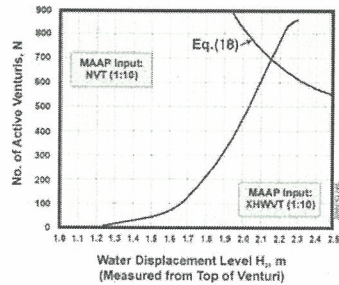


Fig. 2. 유효 벤츄리 튜브 개수와 저장조 수위 간의 관계.

3. 결론

본 논문에서는 MAAP5 코드를 사용하여 유럽형 APRI400인 EU-APRI400의 CFVS 모델링을 수행하였다. 이 모델링을 통해 대기유량을 가정하는 경우 벤츄리 튜브 개수 및 벤츄리 세정기 저장조 수위를 예측할 수 있었다.

4. 감사의 글

본 연구는 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행되었습니다.

5. 참고문헌

[1] 황도현 외, EU-APRI400 원자로건물여과배기계통 성능검증, 한국방사성폐기물학회, 2012년 춘계학술발표회 논문요약집, p. 347-348.