2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

소듐-물반응 사고시 증기발생기 소듐배출해석모형 개발

Development of a Thermal Hydraulic Analysis model for Sodium Draining of a Steam Generator in the event of a SWR

김의광, 어재혁, 최석기, 김성오

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

칼리머 증기발생기내 물-소듐반응사고 직후 파열판을 통한 소듐배출에 대한 열유체적 해석모형을 개발하였다. SWR 사고후 소듐배출 탱크로 소듐의 배출이 이루어질 때 커버가스의 온도, 압력조건을 결정하고, 소듐배출 종료소요시간 등을 파악하는데 필요한 계산 모형을 설정하였다. 칼리머의 증기발생기의 경우에 대한 예비계산을 수행하였으며, 수소유입량은 1.6 kg/s, 파열판 직경은 0.5 m 로 하였을 때 총 소듐배출시간은 약 16 분, 커버가스의 최종온도는 약 967°C 로 계산되었다.

Abstract

In order to analyze the sodium discharge phenomena after a rupture disk breakage in the event of a sodium-water reaction, thermal-hydraulic analysis model was developed. The simple calculation model for the sodium discharge and the cover gas temperature and pressure was set up to investigate the termination time of sodium clearing. Through this work, the preliminary analysis for the sodium draining phenomena of a SWR event in KALIMER was carried out. It is confirmed that the sodium clearing time was about 16 minutes after tube leakage, and final temperature of cover gas space was about 967°C when the inflow rate of hydrogen gas is 1.6kg/sec and the diameter of rupture disk is 0.5m.

1. 서 론

국내에서 개발중인 칼리머 액체금속로는 소듐을 일차 및 중간계통의 냉각재로 사

용을 사용하고 있다. 소듐은 열전도성이 뛰어나고 열수송측면의 특성 또한 좋은 장점이 있는 반면에 물과 접촉하면 화학적 반응이 급격히 발생한다.

본 논문에서는 칼리머 증기발생기에 SWR(Sodium-Water Reaction) 사고가 발생하여 계통내 압력상승으로 파열판(Rupture Disk)이 파열된 후 증기발생기 하단에 부착된 소듐배출 탱크로 소듐의 배출이 이루어질 때 커버가스의 온도, 압력, 소듐배출 종료소요시간 등을 파악하는데 필요한 계산 모형을 설정하고, 칼리머의 증기발생기의 경우에 대한 예비계산을 수행하였다.

SWR 사고시 물-증기누출량은 설계기준사고인 3 개 튜브의 길로틴 양단파단형태이다. 소듐과 물-증기와 화학적 반응에 의해 발생한 수소가스는 전량 커버가스영역으로 유입되고, 화학반응시 수소의 온도는 1300 K 로 가정하였다. 커버가스영역은 부피팽창으로 인한 일과 수소유입 이외에는 주위와 에너지교환은 없으며, 소듐배출탱크의 압력은 대기압으로 가정하였다. 수소유입량은 0.8, 1.6, 3.3 kg/s, 파열판 직경은 0.25, 0.5, 0.75 m 로 하였을 때 결과를 비교하였다.

이 논문에서는 먼저 커버가스영역의 열역학적 계산모델과 파열판을 통한 소듐의 배출속도를 결정하는 증기발생기내 소듐과 파열판사이의 유동저항을 기술하고, 칼리머설계를 기준으로 한 열유체적 조건하의 해석결과를 논의한 후, 마지막으로 결론에 대해 기술하기로 한다.

2. 커버가스영역의 열역학적 계산모형

SWR사고시 튜브 파손부위에서 누출되는 물은 소듐과 반응하여 수소를 생성하고,발생된 수소는 전량 Cover gas공간으로 유입된다. SWR사고시 계통의 과압방지를 위해 설정된 압력값에 따라 파열판이 개방되고, 증기발생기내 소듐은 소듐배출탱크와 Cover gas공간사이의 압력차, 수두차에 의해 소듐배출탱크로 배출이 이루어지며 배출속도는 두 지점 사이의 유동저항에 의하여 결정된다.주요가정은 다음과 같다.

1) SWR 사고시 튜브파손은 설계기준사고인 3 개 튜브의 길로틴 양단 파단형태이고, 파단튜브를 통한 물/증기누출량은 21.57 Kg/s 이다. [참고문헌 1]
2) 누출된 물/증기는 즉시 화학반응후 수소를 생산하고, 반응식은 다음과 같다.

$$H_2O + 2Na \rightarrow Na_2O + H_2$$

3) 발생한 수소가스는 전량 Cover gas 공간으로 유입되고, 이때 수소의 온도는 1300 K 이다.
4) 소듐은 비압축성이고, Cover gas 는 부피팽창으로 인한 일과 수소유입 이외에는 에너지교환은 없다.

5) 소듐배출탱크의 압력은 대기압으로 유지된다.

6) 중간계통과 보조계통에서 증기발생기로 추가로 유입되는 소듐과 알곤가스는 없다.

Cover gas공간을 검사체적으로 택할 때 질량평형식에서 검사체적에 유입되는 질량은 수소가스 발생량이고, 에너지평형식에서 일과 에너지전달은 부피팽창으로 인한 일과 수소유입으로 이루어진다. 그림1에 소듐배출 계산모형이 있다.

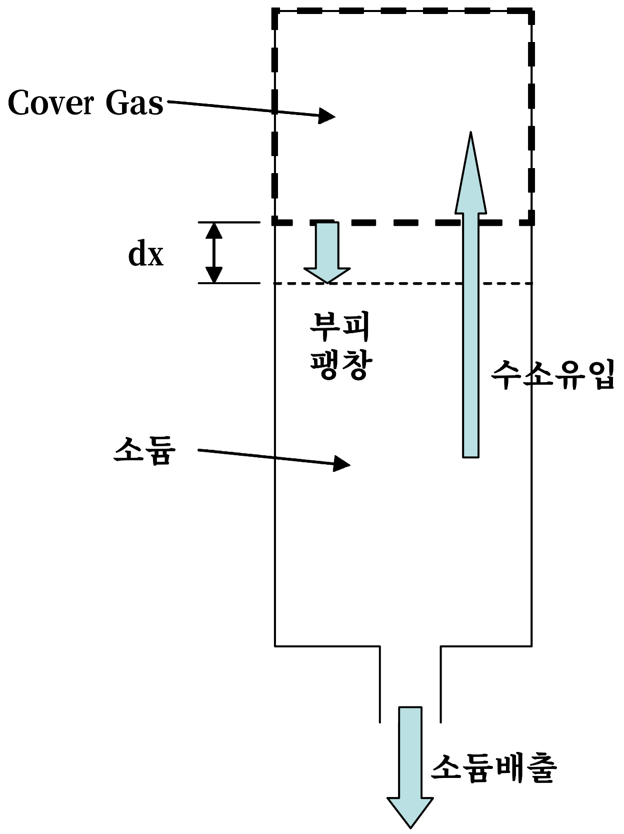

그림 1. 소듐배출 계산모형

질량평형식 :

$$\frac{d\,m_{CV}}{dt} = \dot{m}_{in} = \dot{m}_{H_2}$$

에너지평형식 :

$$\frac{d\,E_{CV}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_{in}\left(h_i + \frac{V^2}{2} + gZ\right)$$

위 식에서

$$\frac{d\,E_{CV}}{dt} = \frac{d\left(\int r_{CV}(u + KE + PE)dv\right)}{dt}$$

이 식의 운동에너지와 위치에너지를 무시하면

$$\frac{d\,E_{CV}}{dt} = \frac{d\left(\int r_{CV} u dv\right)}{dt}$$

가정 5)에 따라 주위와 열교환은 없으므로

$$\dot{Q} = 0$$

부피팽창에 의한 일은 검사체적의 압력 P 에 관한 Reynold's transport theorem 에서

$$\frac{d\left(\int P\,dv\right)}{dt} = \int \frac{\partial P}{\partial t} dv + \int P\overline{V} \bullet \overline{n} dS$$
$$= \frac{\partial P}{\partial t} v_0 + \dot{W}$$

따라서

$$\dot{W} = \frac{d\left(\int P\,dv\right)}{dt} - \frac{\partial P}{\partial t} v_0$$

유입되는 수소가스의 운동에너지와 위치에너지를 무시하고, 위의 각 식을 대입하면 검사체적의 에너지평형식은 다음과 같다.

$$\frac{d\left(\int r_{CV} u dv\right)}{dt} = 0 - \frac{d\left(\int P\,dv\right)}{dt} + \frac{\partial P}{\partial t} v_0 + \dot{m}_{in} h_i$$

따라서

$$\frac{d\left(\int (r_{CV} u + P) dv\right)}{dt} = \frac{\partial P}{\partial t} v_0 + \dot{m}_{in} h_i$$

$h = u + P / r$ 를 적용하면,

$$\frac{d\left(m_{CV} h_{CV}\right)}{dt} = \frac{\partial P}{\partial t} v_0 + \dot{m}_{in} h_i$$

이 식의 왼쪽 항은

$$\frac{d(m_{CV}h_{CV})}{dt} = \frac{d\left(m_{AR}h_{AR} + m_{H_2}h_{H_2}\right)}{dt} = \frac{d\left(m_{H_2}\right)}{dt}h_{H_2} + m_{AR}\frac{d\,h_{AR}}{dt} + m_{H_2}\frac{d\,h_{H_2}}{dt}$$

위 식에 0 K 일 때 엔탈피는 0 을 기준으로 하고 비열이 계산온도구간에서 일정하다고 가정할 때, $h = C_P T$ 을 적용하면 다음 식을 얻는다.

$$\dot{m}_{H_2}C_{P,H_2}T + m_{AR}C_{P,AR}\frac{d\,T}{dt} + m_{H_2}C_{P,H_2}\frac{d\,T}{dt} = \dot{m}_{H_2}C_{P,H_2}T_i + \frac{dP}{dt}v_0$$

여기서 T_i 는 유입되는 수소의 온도를 나타낸다

검사체적의 압력은 알곤가스와 수소가스의 분압의 합으로 나타낼 수 있다.

$$P_{CV}\,V_{CV} = (P_{AR} + P_{H_2})V_{CV} = \left(\frac{m_{AR}}{M_{AR}} + \frac{m_{H_2}}{M_{H_2}}\right)\overline{R}\,T$$

경계조건으로 $t = 0$ 일 때 검사체적 초기온도는 $T = T^0$, 검사체적내 초기 수소량은 $m^0{}_{H_2} = 0$ 으로 적용하고, 위의 두 식을 이용하여 시간에 따른 검사체적의 온도와 압력을 구한다.

3. 압력손실 모형

소듐 level 과 파열판 출구사이의 유선에 베르누이식을 적용하면 다음과 같다.

$$\int_i^e r\frac{\partial V}{\partial t}ds + \frac{rV_i^2}{2} + P_i + rgh = \frac{rV_e^2}{2} + P_e + \sum_i K_i(\dot{m})^2$$

식의 비정상항은 파열판 면적과 증기발생기 단면적의 비, A_{RD}/A_{SG} 가 0.1 보다 적으면 그 영향을 무시할 수 있다. [참고문헌 2]

압력손실항의 손실계수 K 는 각각 다음과 같다.

1) 튜브번들에 의한 손실계수

증기발생기내 압력손실은 소듐면의 위치에 따라 달리 적용되며, 튜브번들에는 Gunter and Shaw [참고문헌 3]을 적용하고 상관식은 다음과 같다.

$$\Delta P_{tr} = \frac{f_{tr}}{2}\frac{G^2L}{D_V\,r}\left(\frac{m}{m_W}\right)^{-0.14}\left(\frac{D_V}{S_T}\right)^{0.4}\left(\frac{S_L}{S_T}\right)^{0.6}$$

$$\frac{f_{tr}}{2} = \frac{0.96}{\left(\mathrm{Re}_{D_V}\right)^{0.145}}, \quad where \ \mathrm{Re}_{D_V} = \frac{D_V\, r_{gap} V_{gap}}{m}$$

2) 파열판배관 급수축에 의한 손실계수

$K = 0.5$

3) 파열판배관 90º elbow 에 의한 손실계수

$K = 0.75$

4) 파열판배관 급팽창에 의한 손실계수

$K = 1$

5) 파열판의 불완전파열($A_{불완전} / A_{완전} = 0.7$)을 가정하면 오리피스와 유사한 손실계수[참고문헌 4]

$$K = \frac{1}{C^2}\left(A_{완전} / A_{불완전}\right) = \frac{1}{0.8^2}\left(1/0.7\right) = 3.2$$

베르누이식에 $rA_{SG}V_i = rA_{RD}V_e$ 식을 대입하고, 정리하면 소듐배출탱크로 빠져나가는 소듐의 속도는 다음과 같다.

$$V_e = \sqrt{\left(\frac{2\left[P_i - P_e + rgh - \sum_i K_i (\dot{m})^2\right]}{r\left[1 - \left(\frac{A_{RD}}{A_{SG}}\right)^2\right]} \right)}$$

위 식에서 튜브번들의 손실계수는 유속의 함수이므로 반복계산으로 유속을 구한다

4. 해석결과

그림 2, 3,4 는 유입 수소유량변화시 커버가스의 압력, 온도, 소듐면 높이 변화이다. 수소유입량과 유입온도를 1.67735 kg/s, 1300 K 로 했을 때 소듐배출에 걸린 시간은 약 16 분이 소요되고, 유입유량이 증가할수록 커버가스의 압력은 증가하고 배출종료시간은 짧아진다. 커버가스의 최종온도는 967 °C 까지 상승하여 압력보다는 온도인자가 구조적 문제점이 될 가능성이 있다. 그림 5, 6, 7 은 파열판 직경변화시 커버가스의 압력, 온도, 소듐면 높이 변화이다. 직경이 작을 경우 압력이 높게 형성되는 것을 볼 수 있다.

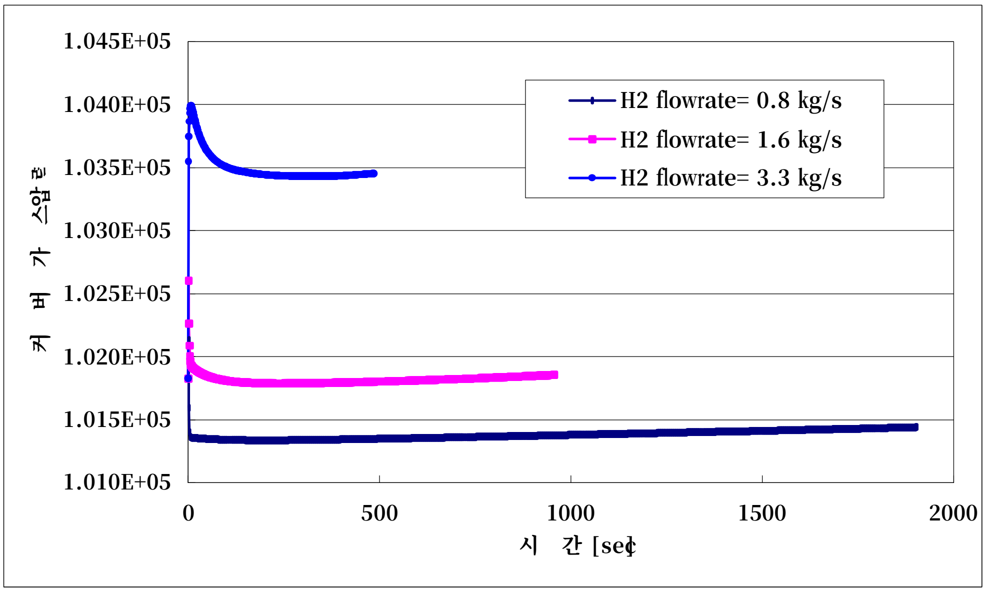

그림 2. 수소유량 변화시 커버가스 압력변화

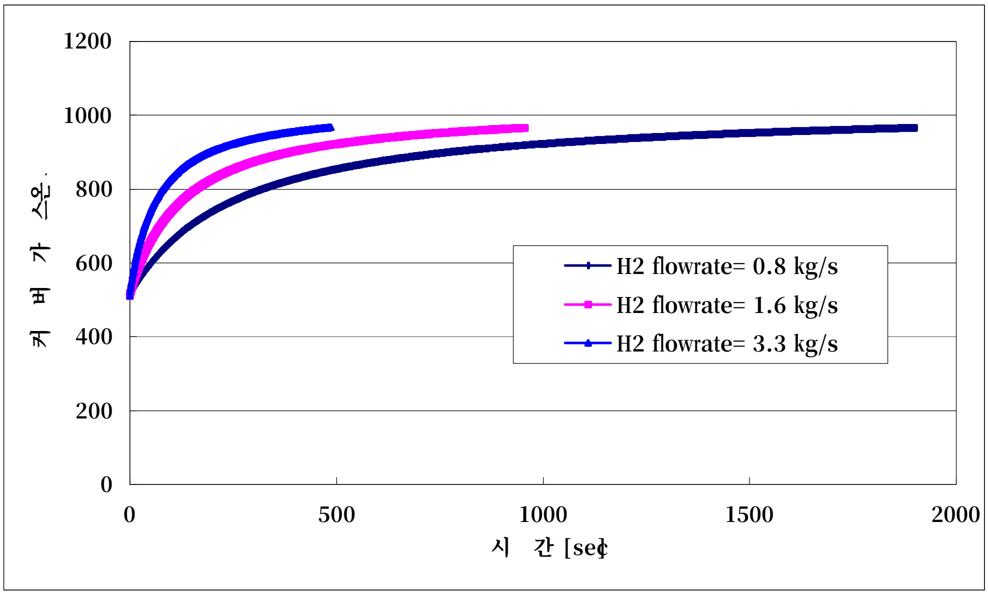

그림 3. 수소유량 변화시 커버가스 온도변화

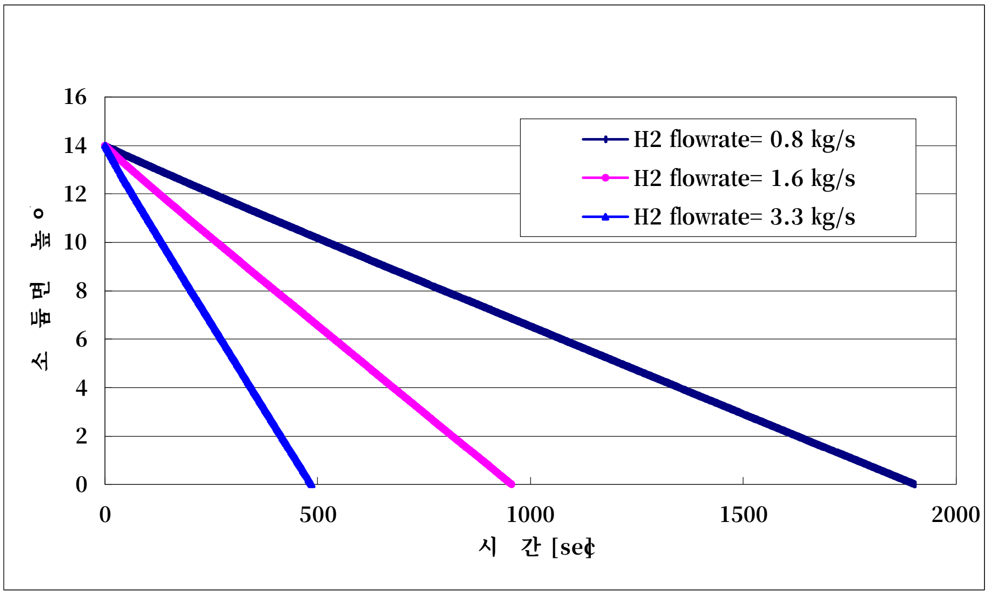

그림 4. 수소유량 변화시 소듐면 높이 변화

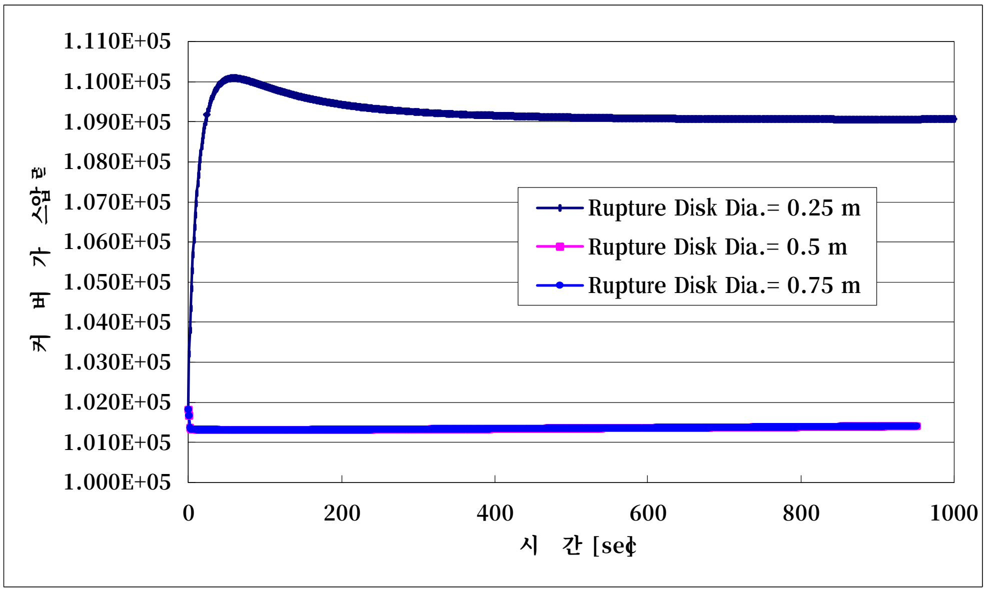

그림 5. 파열판 직경변화시 커버가스 압력변화

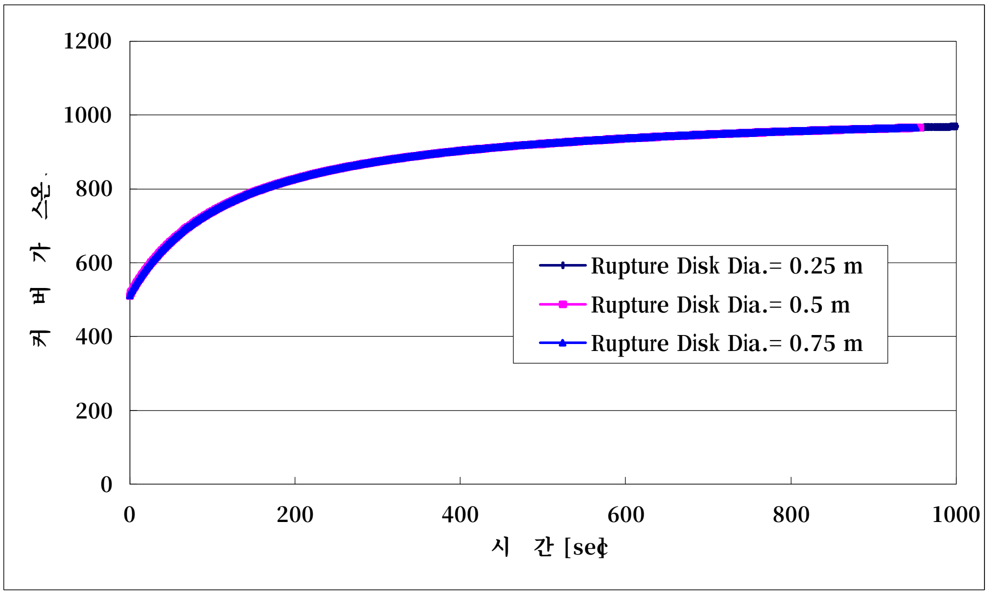

그림 6. 파열판 직경변화시 커버가스 온도변화

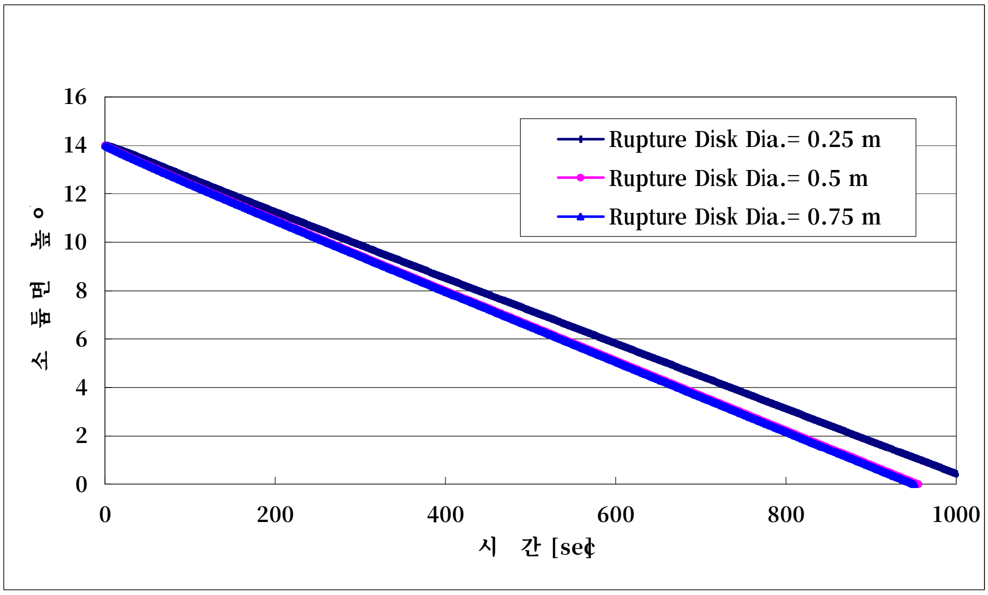

그림 7. 파열판 직경변화시 소듐면 높이 변화

5. 결론

증기발생기에 SWR 사고가 발생하여 파열판(Rupture Disk)이 파열된 후 소듐배출탱크로 소듐의 배출이 이루어질 때 Cover gas 가스의 온도, 압력, 소듐배출 종료소요시간 등을 파악하는데 필요한 계산모형을 설정하였다.

수소유입량과 유입온도를 1.68 kg/s, 1300 K 로 했을 때 소듐배출에 걸린 시간은 약 16 분이 소요되고, 커버가스의 최종온도는 967 °C 까지 상승하였다

감사의 글

이 연구는 과학기술부에서 주관한 원자력 중장기 연구계획의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 김연식 외, KALIMER SWR 초반기 거동해석, KAERI/TR-1918/2001, 2001. 9

[2] R.H. Sabersky et al., Fluid Flow 2nd , The Macmillan Company, 1971

[3] N.E. Todreas and M.S. Kazimi, Nuclear Systems II Elements of Thermal Hydraulic Design, Hemisphere Publishing Corporation, 1990

[4] COMMIX-1B VOLUME II User’s Manual, NUREG/CR-4348 Vol.II, 1985