

SMART 자연대류운전시 주냉각재펌프내의 질소발생량 평가

Evaluation of Nitrogen Gas Accumulated inside MCP During Natural Circulation Operation of SMART

최병선, 김영인, 서재광, 박천태, 이두정, 장문희

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

SMART 일차계통재는 질소가스가 용해되어 있으며, 질소가스의 용해도는 계통의 열수력학적 변수에 따라 변화하게 된다. SMART 일차냉각재의 질소용해도를 Henry의 법칙과 Himmelblau 방정식을 이용하여 온도와 압력의 함수로 계산하였다. 또한 이를 바탕으로 SMART의 가열운전시 일차냉각재의 질소농도 거동을 고찰하였으며, MCP가 정지하는 자연대류운전 모드시 일차계통과 MCP 사이로 형성된 자연대류유량에 따라 MCP 내부에 누적되는 질소발생량을 평가하였다. SMART 일차냉각재의 질소농도는 원자로의 가열운전시 일차계통의 열수력 변수의 상태변화에 의존함을 알 수 있었고, 자연순환운전시 MCP 내부에 누적되는 질소가스량은 정지된 MCP와 일차계통사이에 형성되는 자연대류유량에 따라 결정되어 지는데, MCP 내부의 저널 베어링이 노출되지 않는 4.5 ℓ에 도달되는 시간은 자연대류유량에 따라 100~1000 시간으로 평가되었다. 본 연구에서 수행한 자연순환운전시 MCP내에서 발생하는 질소기체에 대한 정량적인 평가결과는 향후 SMART 원자로의 자연순환운전시간에 대한 요건 설정과 MCP 설계시 활용될 것으로 판단된다.

Abstract

With nitrogen used in pressurizer, primary coolant of SMART will contain dissolved nitrogen. The solubility of nitrogen gas in water is calculated as a function of temperature and pressure by Himmelblau equation based on Henry's law. It is found that the nitrogen concentration of primary coolant is highly dependent upon thermal-hydraulic parameters of the primary system, temperature, pressure and heatup rate. The accumulated nitrogen gas within MCP is evaluated based on the assumed natural convective flows established between SMART core and MCP. It is concluded that the natural circulation time is varied from 100~1000 hrs according to the natural convection flows.

1. 서 론

SMART의 일차냉각재는 암모니아를 이용하여 pH를 조절하는데 주냉각재펌프(MCP) 임펠러의 작동유체인 일차냉각재에는 암모니아의 방사분해의 화학평형에 의하여 발생된 질소(N_2)가스가 용해되어있다. SMART 운전 모드의 변화는 온도와 압력변동을 초래하고 질소가스 용해도(cc/kg-H₂O)를 변화시켜 SMART 일차계통에서 비응축성 기체의 발생을 유발하며 발생된 비응축

성기체는 SMART 내부구조물 중에서 가장 높은 위치인 주냉각재펌프 상단에 포집된다. 주냉각재 펌프 상단에 비응축성기체가 포집되면 상부 저널베어링이 비응축성기체에 노출되어 일차냉각재의 윤활없이 건조마찰(dry friction) 운동을 하게되어 저널베어링의 수명에 치명적으로 나쁜 영향을 준다. 따라서 주냉각재펌프는 회전축의 내부통로를 이용하여 MCP 상단에 포집된 가스를 제거하기 위한 설비가 설치되어 있다. MCP 상단에 기포를 제거하기 위해서는 기포제거 유로에 발생하는 압력강하뿐만 아니라 유로의 입구와 출구의 높이 차에 의한 압력강하를 이길 수 있는 수두가 필요하다. 이 수두는 보조임펠러에 의해 공급된다. MCP 내부의 일차냉각재 순환 유로와 기포제거 유로는 병렬로 연결되어 있기 때문에 각 유로의 설계유량에서 수두가 같아야 설계유량으로 운전된다. 만약 기포제거 설계유량에서 유로의 압력강하가 이보다 적다면 많은 유량이 기포제거 유로를 통하여 방출될 것이다. 따라서 압력강하를 적절하게 조절하여야 하며 상부에 설치된 사각나사 형태의 오리피스가 그 역할을 수행한다.

그림 1에 도시한 SMART의 MCP는 원자로집합체의 상단에 설치되어 있다. 일차계통과 MCP 내부사이에는 MCP 축 등 회전장치의 원활한 구동을 위해 일정한 간격(~1 mm)의 유체 통로가 존재하게 된다. 이 간격으로 일차계통의 냉각수가 MCP 내부로 유입되면 일차계통 질소농도와 MCP 내부의 질소포화농도의 차이에 의하여 질소를 방출하게 된다. 정상운전중 보조임펠러는 MCP 내부의 유체를 순환시켜 노심으로부터 전달되는 열을 제거하기 위하여 유체를 강제 순환시키는 기능과 MCP 내부에서 생성되는 질소가스를 제거하는 기능을 수행한다. 그러나 MCP가 정지하고 자연대류 운전 모드로 전환되면 MCP의 보조임펠러는 구동력을 상실하여 MCP 내부의 강제순환기능 및 질소가스 제거 기능을 상실하게 된다. MCP 내부의 질소제거 기능이 상실되게 되면 MCP 내부에서 생성된 질소가스는 MCP 상단에 누적된다. 누적되는 질소량이 증가하여 수위가 MCP 상단에 위치한 저널 베어링 부위 아래까지 하강하여 베어링이 노출되면 MCP를 재기동시 MCP 베어링의 심각한 손상을 초래할 수 있다. 따라서 MCP 내부에 설치된 저널베어링이 노출되는 시간은 일차계통을 자연대류 운전모드로 운전할 수 있는 시간적 제한 요인이 될 수 있으며, 자연대류에 의해 유체의 출입량이 과다할 경우 자연대류 유량을 제한하는 장치를 강구해야 한다. 이러한 자연대류유량으로 인하여 MCP내에 누적되는 질소가스의 체적이 상부 저널베어링이 노출되지 않는 일차냉각재의 체적(= 4.5 ℓ)을 넘지 않아야 한다. 따라서 자연대류 운전시 MCP 상부 저널베어링이 노출되지 않기 위해서는 MCP 내부에 누적된 질소가스가 4.5 ℓ를 넘지 않아야 한다. MCP 상부에 설치되어있는 저널 베어링의 노출을 방지하기 위한 criteria를 설정하는데 매우 중요한 인자이다.

본 연구에서는 SMART 일차냉각재의 질소용해도를 Henry의 법칙과 Himmelblau 방정식을 이용하여 온도와 압력의 함수로 계산하였다. 또한 이를 바탕으로 SMART의 가열운전시 일차냉각재의 질소농도 거동을 고찰하였으며, MCP가 정지하는 자연대류운전 모드시 일차계통과 MCP 사이로 형성된 자연대류유량에 따라MCP 내부에 누적되는 질소발생량을 평가하였다.

2. MCP로 공급되는 자연대류 유량과 질소의 용해도

MCP가 정지하고 자연순환 운전이 시작되면 그림 2에서 도시한 바와 같이, 임의시간 t 에서 일차계통에서 MCP로 자연대류에 의해 출입하는 냉각재의 유량 $m_i(t)$ 과 $m_o(t)$ 이 동일하다면, MCP내에 축적되는 질소량은 용해도차에 비례하여 증가할 것이다. 따라서 MCP를 출입하는 냉각재에 대한 물질수지 및 질소수지를 세우면 다음과 같다.

$$\frac{dV(t)}{dt} = \dot{m} [S_i(t) - S_o(t)] \quad (1)$$

$$\frac{dM(t)}{dt} = m_i(t) - m_o(t) = 0 \quad (2)$$

여기서, m_i, m_o : 냉각재 유입량 및 유출량(kg/sec),

S_i, S_o : 일차계통 및 MCP에서의 질소용해도($\text{cm}^3 \text{N}_2/\text{kg-H}_2\text{O}$)

냉각재내에 온도에 따른 질소기체의 수증 용해도는 Henry의 분압 법칙인 식(3) 및 Henry 법칙의 상수를 구하기 위해 Himmelblau가 제시한 불활성기체의 수증용해도 계산식 (4)를 사용하여 구할 수 있다. 용해된 질소가스의 화학평형을 고려하면 질소의 분압에 비례하므로 Henry 법칙을 적용하면 다음과 같다.

$$X_i = P_i / H \quad (3)$$

$$H^* = \frac{H}{H_{\max}} \quad (4)$$

여기서 $X_i (= n_{N_2} / (n_{N_2} + n_{H_2O}))$ 질소농도($\text{cm}^3/\text{몰-분율}$)이며 P_i 는 질소가스의 분압(atm)이고, H 는 Henry 법칙의 상수(atm/농도)이다. H_{\max} 는 절대온도의 역수에 대한 최대의 H (atm/몰-분율)의 값이고 H^* 는 식 (5)에 의해 구해진다.[1,2]

$$\begin{aligned} -\log H^* = & 1.142 - 2.846 \left(\frac{1}{T}\right)^* + 2.486 \left(\frac{1}{T}\right)^{*2} \\ & - 0.9761 \left(\frac{1}{T}\right)^{*3} + 0.2001 \left(\frac{1}{T}\right)^{*4} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{여기서, } \left(\frac{1}{T}\right)^* = \frac{(1/T) - (1/T_0)}{(1/T_{\max}) - (1/T_0)}$$

3. 가열운전시 일차냉각재 용존질소의 거동

Henry의 법칙과 Himmelblau의 방정식을 사용하여 온도와 압력에 따른 일차냉각재의 용존 질소농도를 식(1)~(5)을 이용하여 계산을 수행하였으며 그 결과를 그림 4에 나타내었다. SMART의 기동운전시 가압기에서 용해된 질소는 노심으로 이동하게 된다. MCP 등에 의한 일차냉각재의 강제순환이나 자연대류에 의한 유체의 유동이 없다고 하면 노심에서의 질소농도는 질소농도차, 용존질소의 확산계수, 유로의 기하학적 형태등에 의존하게 된다. 일차냉각재의 유동이 없이 용존질소의 농도차에 의한 확산에만 의존하는 경우 노심의 질소농도가 평형농도에 도달하는 데에는 상당한 시간이 소요된다. 따라서 가압기에서 노심으로 용존질소의 확산량 만큼 가압기에서 기-액평형에 의해 장시간에 걸쳐 용해될 것이다. 그러나 MCP가 운전되어 일차냉각재를 강제 순환시키는 SMART의 가열운전시 일차냉각재의 질소농도를 산정하기 위해서는 SMART 원자로의 가열운전에 대한 이해가 필요하다. 간략히 필요한 가열운전에 대하여 설명하면, 원자로 가열운전은 초기출력 0-5%까지 가열률이 $100^\circ\text{C}/\text{hr}$ 로 약 3시간후의 일차냉각재의 온도와 압력은 25°C , 5 MPa에서 거의 선형적으로 증가하여 310°C , 15 MPa에 도달한다. 가열률에 따른 일차계통의 온도와 압력은 그림 3에 도시한 바와 같다. 만약 가압기의 온도가 노심의 온도와 같은 온도조건을 갖는다면, 냉각재의 질소농도는 그림 4에 표시한 것처럼 가열률에 따른 수력학적 특성치(온도, 압력)에 의하여 A(50 atm, 25°C)에서 B(90 atm, 125°C)를 거쳐 C(110 atm, 200°C)를 지나 D(121 atm, 225°C)를 경유하여 E(150 atm, 310°C)의 농도까지 증가하게 될 것이다. 그러나 원자로를 가열함에 따라 일차냉각재의 체적이 증가하여 주변공동에서 환형공동으로 일차냉각재가 surge될 때까지의 열수력학적 변수(온도, 압력)에 따라 일차냉각재의 질소농도가 결정된다. 즉, 그림 3에 나타난 성능해석 결과를 참조하여 보면, 가열운전에 따라 냉각재의 온도 및 압력이 A(50 atm, 2

5℃)에서 ㉔(90 atm, 125℃)를 거쳐 ㉓(110 atm, 225℃)에서 냉각재가 주변공동에서 환형공동의 surge line으로 공급되는 시점이다. 냉각재가 주변공동에서 환형공동으로 surge되기 전까지는 냉각재를 가압된 질소기체가 직접 가압하므로 수력학적 조건(온도, 압력)에 따라 녹아들어 간다고 볼 수 있다. 따라서 녹아 들어간 질소가 저속으로 돌고있는 MCP에 의해 원자로에서 순간적으로 완전혼합이 이루어진다고 가정하였을 때, 이때의 질소농도는 2000 cc/kg-H₂O가 된다. 일단, 가압기 surge line을 통하여 일차냉각재가 가압기의 환형공동과 중앙공동으로 넘어오면, 가압기에서의 100℃, 15 MPa의 질소용해도(1500 = 1491.4 cc/kg-H₂O)를 갖게된다.[3] 따라서 가열과정에서 냉각재가 가압기 환형공동으로 surge되는 시점에서의 열수력적 조건(온도, 압력)이 일차냉각재의 질소농도를 결정하는 요소이다. 상기의 계산 결과는 일차냉각재로 녹아 들어간 질소가 MCP에 의해 완전혼합이 이루어진다는 가정을 바탕으로 계산한 값이기 때문에 실제의 일차냉각재내의 질소농도에 비하여 매우 높은 값으로 판단된다. 실제로는 일차냉각재와 질소기체가 만나는 경계면을 통하여 질소기체의 분압에 따라 녹아 들어간 질소는 기-액 계면으로부터 농도차에 의한 확산과 유체의 이동에 의한 질소 이동이 매우 느리게 일어나게 될 것이다. 또한, 유체의 이동에 의한 혼합이 이루어지더라도 액체내에서 질소분자의 이동은 결국 분자운동에 의한 diffusion에 영향을 받게 될 것이다.

4. 자연순환운전시 MCP 내부의 질소생성량

MCP 내부에서 질소가스가 발생하는 경로는 계통의 압력 또는 온도가 변화하여 MCP 내부유체의 포화 질소농도가 감소하여 MCP 내부유체가 새로운 포화농도로 천이되면서 방출하는 경로와 MCP 내부의 포화농도 보다 높은 농도의 일차계통 유체가 MCP 내부로 유입되면서 방출하는 경로가 있다. 일차계통과 MCP 내부의 유체가 교류하는 경우는 일차계통과 MCP 내부의 온도차로 인하여 자연대류가 발생하는 경우와 일차계통과 MCP 내부의 압력차가 발생하는 경우이다. 자연대류 유동을 발생할 수 있는 가능성이 있는 경로는 MCP 축의 사이의 간격이 있다. 일차계통과 MCP 내부의 압력차이가 발생하는 경우는 MCP 정지 후 MCP 내부 온도 변화에 의한 체적 변화로 인한 일차계통과 MCP 내부의 압력차가 발생하는 경우와 일차계통 또는 MCP 내부의 압력변동으로 압력차가 발생하는 경우가 있을 수 있다. 자연대류에 의한 유체 출입은 기계적 장치를 설치하면 차단이 가능하나, 일차계통과 MCP 내부의 압력차이에 의한 유체 출입은 일차계통과 MCP 내부를 완전격리하기 전에는 근본적인 차단은 불가능하다. 자연순환운전 모드로 전환시 SMART 원자로는 25% 출력으로 운전되며, 이 때 일차계통의 운전압력이 15 MPa에서 13.75 MPa로 12.5 atm의 압력감소가 발생한다. 이러한 압력감소는 일차냉각재내에 용해되어 있는 질소용해도의 감소로 질소기체가 용출된다. 따라서 그림 4의 질소의 용해도 곡선에서 같은 온도조건에서 운전압력이 12.5 atm 감소할 경우, 질소용해도는 질소분압에 비례하므로 질소분압의 감소분만큼 질소가스가 일차냉각재로부터 탈기되어 나오게 될 것이다. 일차냉각재에 녹아있는 최대 질소농도를 2000 cc/kg-H₂O이므로 310℃에서 2000 cc/kg-H₂O의 질소용해도를 갖는 압력은 약 130 atm 정도이다. 따라서 자연순환 운전시에도 약 20 atm에 상당되는 불포화 margin(㉒-㉔)을 갖고 있어 일차냉각재 내에 녹아있는 질소가스는 용출되지 않을 것으로 판단된다. 즉, 원자로가 25% 출력에서 운전되는 자연순환 운전시 계통압력이 15MPa에서 13.75 MPa로 감소하였을 경우에도 일차냉각재의 질소용해도는 약 12 atm의 불포화 margin을 가지고 있어 노심에서의 용해도를 초과하여 발생하는 질소가스의 용출은 없을 것으로 판단된다. 그러나 100℃로 운전되고 있는 MCP 내부로 유입되는 일차냉각재는 질소가스의 포화용해도가 감소하여 질소용해도 특성은 150 atm에서 137.5 atm의 용해도곡선으로 이동하게 된다. 질소가스의 포화농도 변화로 MCP 내부에 존재하던 유체는 질소가스를 방출하면서 다시 평형상태에 도달한다. 따라서 MCP 내부에서 질소가스의 발생량은 노심에서의 질소농도(㉒지점에서의 용해도)와 137.5 bar의 용해도곡선의 85℃의 용해도

(H지점에서의 질소용해도)와의 차이만큼 생성된다고 할 수 있다. 따라서, 자연순환 운전시 압력 감소로 인하여 발생하는 질소량은 150 atm으로 운전되는 경우에 비하여 압력감소에 따른 용해도 차 만큼 더 생성된다. 그러나 MCP 내부에서 압력감소에 의해 생성되는 질소량을 약 12 cm³ 정도로 매우 소량임을 알 수 있었다.

자연순환 운전시 MCP 내부와 노심(일차계통)간의 발생하는 온도차에 의하여 정지된 MCP의 축 외부 간격을 통하여 MCP내부로 공급되는 자연대류 유량은 1~10 kg/hr의 범위에서 가정하여 사용하였다. 그림 5에는 MCP내로 공급되는 자연대류유량에 따라 MCP 내부의 상단에서 온도감소로 인한 포화 질소용해도 차이로 발생하는 질소의 누적량이 4.5 ℓ 이 될 때까지 시간을 나타내었다. 그림 5에 나타낸 바와 같이, 자연순환 운전시 MCP내부와 노심사이에서 MCP 축 외부의 간격을 통해 MCP내부로 공급되는 자연대류유량에 따라 누적량이 4.5 ℓ 이 될 때까지 시간은 100~1000시간의 범위로 자연대류유량에 따라 상당한 시간차가 발생하여 자연대류유량이 클수록 MCP 내부에서 발생하는 질소누적속도가 증가함을 알 수 있다. 즉, 포화 질소농도가 높은 일차냉각재의 유입을 억제할수록 MCP 내에 누적되는 질소누적속도가 감소함을 알 수 있었다. MCP 내로 유입되는 자연대류유량을 작게 할수록 SMART 원자로의 자연대류 운전시간은 증가하기 때문에 MCP 설계시 이러한 자연대류 유량을 줄 일수 있는 방안을 고려하여야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

SMART 주냉각재펌프가 정지하고 원자로가 강제순환에서 자연순환운전 모드로 전환되면, 계통의 열수력학적 변수들의 거동이 변화하게 된다. 즉 계통 압력이 15 MPa에서 13.75MPa로 약 12.5 atm 정도의 압력감소가 발생하게 된다. 이러한 압력감소는 일차계통수내에 용해되어 있는 질소용해도의 감소로 질소기체가 발생된다. 보일러의 일차냉각재의 초기 질소농도는 보일러의 가열운전과 매우 밀접한 관계를 가지고 변화한다. 즉, 일차냉각재의 질소농도는 보일러를 가열하여 일차냉각재의 온도상승으로 가압기의 주변공동에서 환형공동으로 surge되는 시점까지 가압기의 질소분압에 비례하여 녹아 들어감을 알 수 있었다. MCP 내부에서 발생하는 질소기체의 산정결과, MCP 내부의 일차냉각재 온도감소 및 압력강하로 인하여 발생하는 질소기체는 매우 적은 것으로 판단되며, 자연순환운전시 MCP 내부에 누적되는 질소가스량은 정지된 MCP와 노심사이에 형성되는 자연대류유량에 따라 결정되어 지는데, MCP 내부의 저널 베어링이 노출되지 않는 4.5 ℓ 에 도달되는 시간은 자연대류유량에 따라 100~1000 시간으로 평가되었다. 본 연구에서 수행한 정상출력운전시 및 자연순환운전시 MCP내에서 발생하는 질소기체에 대한 정량적인 평가결과는 향후 SMART 원자로의 자연순환운전시간에 대한 요건 설정과 MCP 설계시 활용될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Martha Windholz, et al., "The Merck Index - An Encyclopedia of Chemicals and Drugs", 9th Edition, published by Merck & Co., Inc. (1976)
2. M. Himmelblau, "Solubilities of Inert Gases in Water", Journal of Chemical and Engineering Data, Vol. 5, No. 1, January (1960)
3. 나정원 외, "SMART에서 질소의 용해특성" KNS 2001 춘계학술발표논문, June (2001)

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업이 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

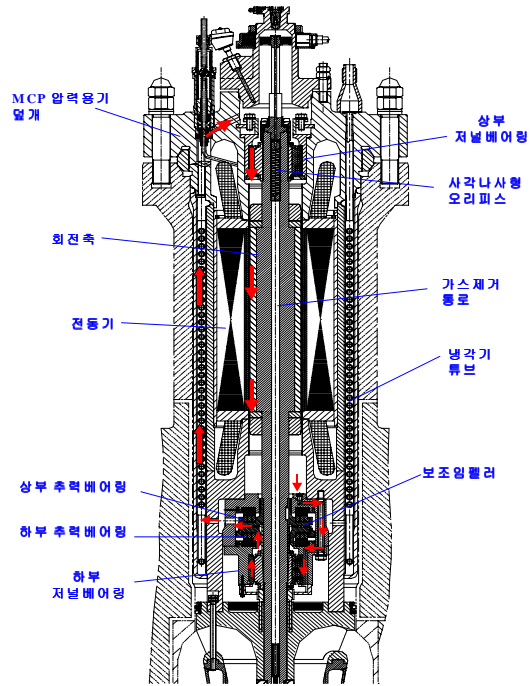


그림 1. MCP 일차냉각재 독립순환유로

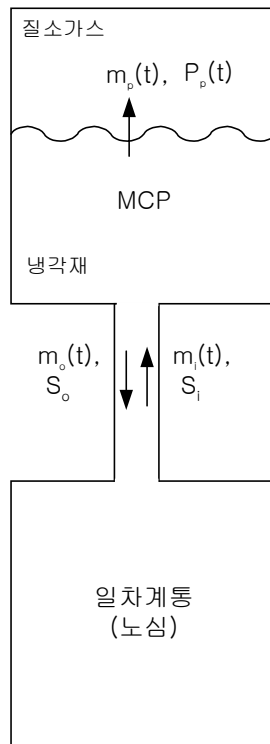


그림 2. MCP와 일차계통사이의 질소이동에 대한 개념도

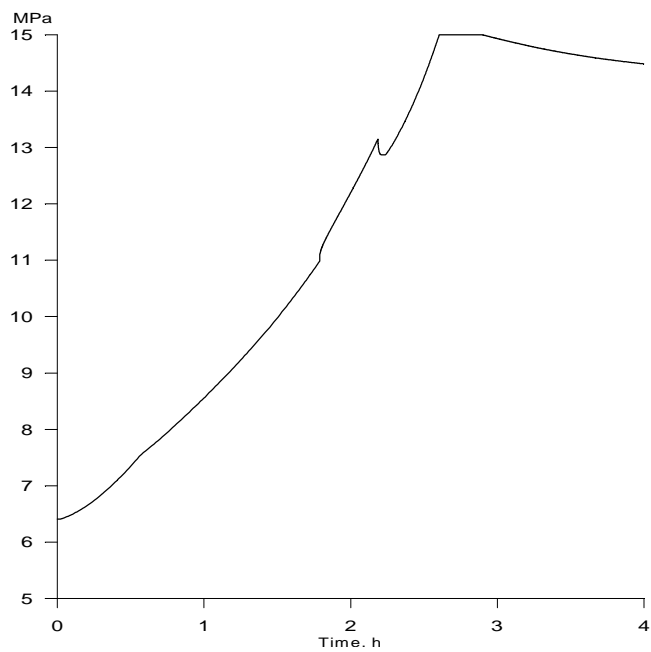
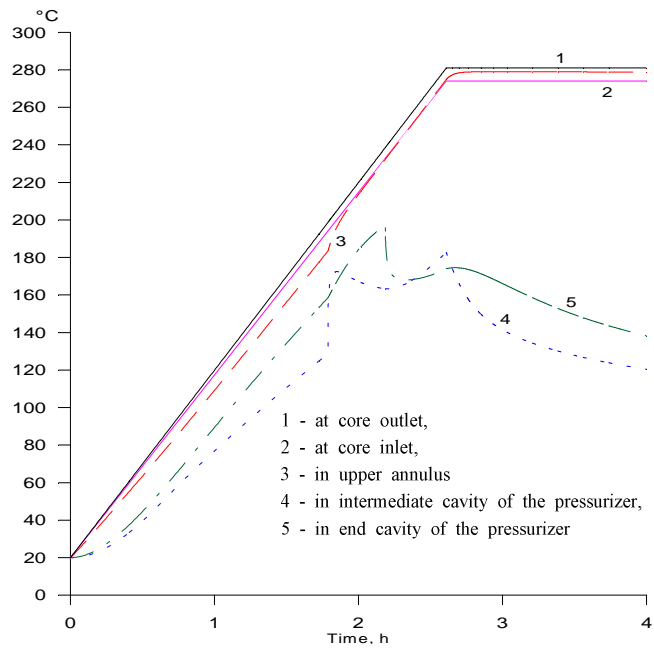


그림 3. SMART 가열운전시 일차냉각재 온도 및 압력변화

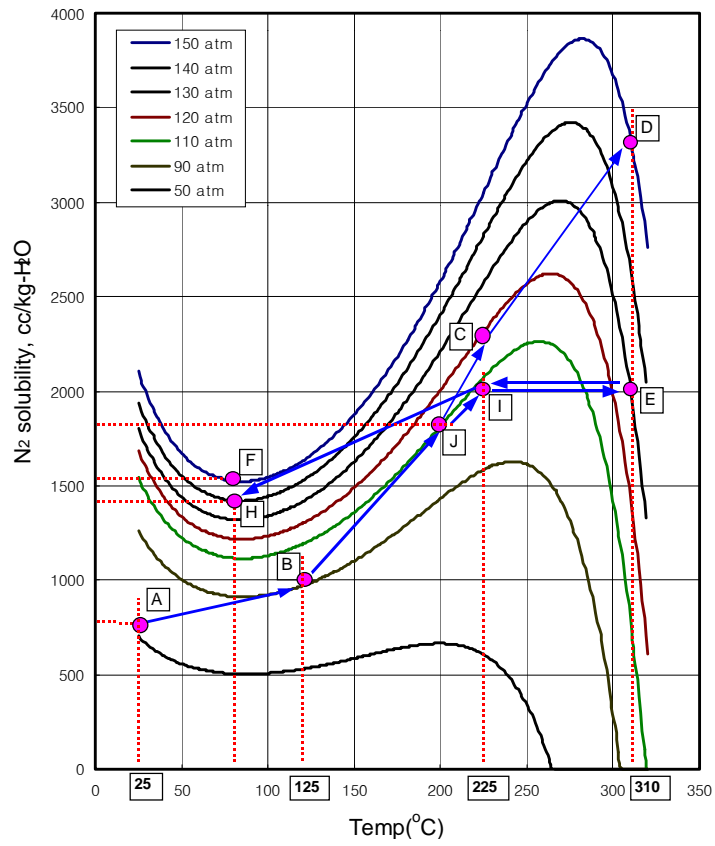


그림 4. 가열운전시 일차냉각재의 질소농도 거동

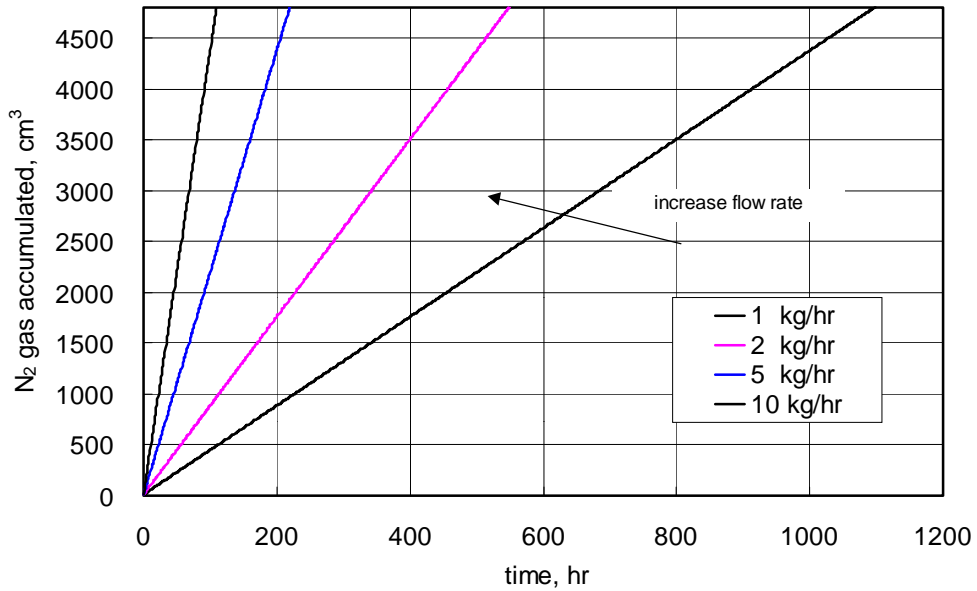


그림 5. MCP 내부에 축적되는 질소가스 축적속도