증기발생기의 슬러지 세척장치 설계 및 제어방법

Design of Sludge Washing Apparatus in Steam Generator and Control Method

김정훈*, 배용한**, 권순량***

(주)코멕 기업부설연구소*, (주)코멕**, 동명대학교 전자공학과***

Joeng-Hoon Kim(kjh5315@hanmail.net)*, Yong-Han Bae(komec777@gmail.com)**,
Soon-Ryang Kwon(srkwon@tu.ac.kr)***

요약

원자력 발전소에서 증기발생기를 장기간 운영할 경우 슬러지가 증기발생기 내부에 축적되어 좋지 못한 영향을 미치게 된다. 본 논문은 이러한 슬러지를 효율적으로 제거할 수 있는 슬러지 세척장치의 설계 및 그 제어방법에 관한 것이다.

본 논문에서는 슬러지 세척장치 설계를 위해, 첫째, 수학적 모델 적용과 랩테스트를 통해 고압수 분사를 위한 노즐을 설계하고, 둘째, 슬러지 세척장치 구동에 필요한 성능 파라미터에 대한 수학적 이론을 정립한다. 셋째, 정립된 성능파라미터에 기반하여 세척장치의 물리적 구조체를 설계하고, 마지막으로 장치의 구동방법을 제시한다.

본 논문에서 제시하는 슬러지 세척장치는 증기발생기의 벽면을 따라 이동하면서 전열관 배열 틈사이에 대응하여 고압수를 분사하는 방식으로 슬러지를 제거함으로써 상대적으로 슬러지가 다량 형성되는 내측 바닥면이 매우 효과적으로 세척될 수 있다.

■ 중심어 : | 증기발생기 | 슬러지 세척장치 | 고압 분사노즐 |

Abstract

In the case of operating steam generators for long periods in nuclear power plants, sludge is accumulated inside the steam generator. This phenomenon could adversely affect the operation of the steam generator. This paper is about the design of a sludge washing apparatus which can remove the sludge efficiently and the control methods of the apparatus.

In this paper, to design the sludge washing apparatus, firstly, we design nozzles for spraying high-pressure water through applying mathematical models and lab tests. Secondly, we establish the mathematical theory for performance parameters required to drive the sludge washing apparatus. Thirdly, we design physical structures of the apparatus based on the established performance parameters. Finally, we present the control methods of the apparatus.

The sludge washing apparatus presented in this paper moves along the walls of the steam generator according to cracks in the tube array, and spray the high pressure water to remove the sludge. By this way, a relatively large amount of sludge formed in the inner surfaces can be washed very effectively.

■ keyword : | Steam Generator | Sludge Washing Apparatus | High Pressure Spray Nozzle |

I. 서론

원자력 발전소는 우라늄의 핵분열 시 발생하는 열로 물을 가열함으로써 발생하는 증기의 힘으로 돌린 터빈의 회전력을 통해 발전기를 가동하여 전기를 생산한다.

이러한 증기를 발생시키기 위해 증기발생기의 내부에는 전열관이 조밀하게 배치되어 있다. 전열관의 내부로는 방사능에 오염된 고온의 물이 흐르고 외부로는 오염되지 않은 저온의 물이 흐른다. 이를 통해 온도차에 의한 열 교환 작용이 일어나 오염되지 않은 물이 고온 고압의 증기로 변환하게 된다[1].

그런데, 이 증기발생기를 장기간 운영하게 되면 운영 기간에 비례하여 이물질(이하 슬러지(sludge)로 표현함)이 증기발생기 내부에 축적된다. 슬러지는 주로 산화철, 산화구리 성분으로 구성되어 있는데 제거하지 않으면 전열관 사이에 고착되어 열효율을 떨어뜨리거나, 물과 함께 유동하면서 전열관을 마모시키기도 한다[2].

따라서, 증기발생기에 나쁜 영향을 주는 슬러지를 줄이기 위하여 일반적으로 원자력발전소는 증기발생기 내부의 냉각수를 일정량 밖으로 배출하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 이러한 방법만으로는 슬러지가 효과적으로 제거되지 않으므로 증기발생기 제작사에서 매년 예방 정비기간 중에 주기적으로 증기발생기 내부를 세정하도록 권고하고 있다[3].

증기발생기 세정시에 방사능 노출로 인해 사람이 직접 청소할 수 없기 때문에 청소 장비 또는 청소 로봇을 이용하게 되는데 그 일례로서 세척수단, 지지대, 승하강 수단을 포함하고 있는 기존의 증기발생기의 슬러지 세척장치가 제안되었다[4]. 그러나 이 장치는 구조가 복잡하고 구성부품 수가 많아 제작 시 생산성이 떨어지고 증기발생기 내부에 장치를 설치하기 까다롭고 사용의 편의성도 낮다. 그리고 고압 세척수가 양방향으로 분사될 때, 불균형하게 분사됨으로써 노즐 헤드가 심하게 진동하여 전열관의 표면이 심각하게 손상될 위험이 있다. 또한 기존 방식으로 분사 시 증기발생기의 중앙은 효율적으로 세정이 가능하나, 증기발생기의 최외각은 슬러지 세척율이 매우 저조하다[5][6].

위와 같은 문제점을 해결하기 위하여, 본 논문에서는 증기발생기의 벽면을 따라 이동하면서 원격제어기의 제어신호에 따라 노즐이 전열관 배열 틈 간격에 대응되도록 고압분사부의 분사 방향을 조절하여 고압 세척수를 분사하는 증기발생기의 슬러지 세척장치를 설계하고 그 제어방법을 제시하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 1장 서론에 이어, 2장에서는 본 논문에서 제안하는 증기발생기의 슬러지 세척장치의 설치 개요도와 가상 동작에 기반한 전반적인 개념을 살펴본다. 3장에서는 세척장치의 핵심인 고압 분사 노즐을 설계 및 시험한다. 4장에서는 수식모델에 기반하여 슬러지 세척 장치를 구동시키는 각 성능 요소의 제원을 설계한다. 5장에서는 4장에서 설계된 제원을 바탕으로 슬러지 세척 장치의 구조체를 설계하고 제어 방법을 제시한다. 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 개요

[그림 1]은 슬러지 세척장치가 증기발생기에 설치된 상태를 나타낸 개요도이다.

그림 1. 슬러지 세척장치 개요도

슬러지 세척 장치(31)는 증기발생기(G)의 핸드홀(H)을 통해 증기발생기의 내부 벽면에 설치된다.

핸드홀(H)의 가장자리에는 슬러지 세척장치와 연결된 제 1케이블을 수납하거나 공급하는 케이블 권취부(19)가 포함된다. 또한, 증기발생기의 외부에는 슬러지

세척장치의 각 구동부를 제어하는 컨트롤러(12)가 제 2 케이블(15)에 의해 연결된다. 그리고, 사무실과 같은 안전한 장소에서 컨트롤러를 제어하기 위해 원격제어기(13)가 연결된다.

따라서, 사용자는 원격제어기를 통해 증기발생기 내의 오염 정도를 육안으로 확인할 수 있으며, 원격제어기를 통한 제어신호의 입력만으로 슬러지 세척장치를 제어하여 증기발생기 내의 슬러지를 간편히 세척할 수 있다.

[그림 2]는 세척장치가 증기발생기 외곽을 회전하면서 고압수를 분사하는 동작의 가상도를 나타낸 것이다.

그림 2. 고압수 분사 동작 가상도

슬러지 세척장치가 증기발생기의 핸드홀을 통해 삽입되면 현장에 구비된 원격제어기를 통해 제어신호가 입력되고, 입력된 제어신호에 따라 각 구동부가 컨트롤러에 의해 제어되어 증기발생기의 세척이 이루어진다. 따라서 사용자의 방사능 노출에 대한 위험성이 현저히 낮아질 뿐 아니라 사용 편의성도 매우 향상될 수 있다.

III. 고압 분사 노즐 설계

노즐의 성능은 수축비(Contraction ratio), 수축각(Contraction angle), 형상비(Aspect ratio), 입구길이비(Inlet length ratio)등에 밀접한 영향을 받는다[7-11].

그림 3. 노즐의 성능 구성 요소

[그림 3]을 기반으로 한 노즐 설계를 위한 주요 파라미터들은 다음과 같다.

- 수축비 : $Rc = d_2^2 / d_1^2$
- 수축각 : θ
- 형상비 : $Ra = L_2 / d_2$
- 입구길이비 : $Rs = L_1 / L_2$

노즐의 성능은 [그림 4]와 같은 수축부의 곡선 형상에 많은 영향을 받는다. 그러나 이 곡선의 계산식들을 이론만으로 유도할 수가 없기 때문에 일정부분은 반 실험식(semi-empirical equation)에 의해 유도하여야 한다. 이 곡선의 식들을 유도하기 위해 일반적으로 고차원 다항식, 타원의 식, Sign 곡선의 식 등이 적용되고 있다.

그림 4. 노즐의 수축부 곡선 형상 ($Ri = Di / 2$)

노즐설계와 관련된 계산식 및 반 실험식은 다음과 같다.

o Bernoulli 방정식으로부터 유도된 식

$$R = \frac{D_i}{2} \left\{ 1 + \left[\left(\frac{D_i}{D_e} \right)^4 - 1 \right] \left[2 \left(\frac{x}{L} \right)^2 - \left(\frac{x}{L} \right)^4 \right] \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

o Batchelor-Shaw가 유도한 BS 곡선의 식

$$\frac{1}{A^2} = \frac{1}{A_i^2} + \left(\frac{1}{A_e^2} - \frac{1}{A_i^2} \right) \left(\frac{x}{L} - \frac{1}{2\pi} \sin 2\pi \frac{x}{L} \right) \quad (2)$$

o Hussain이 실험적으로 유도한 CE 곡선의 식

$$R = \frac{D_i}{2} - \frac{3}{2} (D_i - D_e) \left(\frac{x}{L} \right)^2 + (D_i - D_e) \left(\frac{x}{L} \right)^3 \quad (3)$$

o 타원의 식으로부터 유도된 식

$$\frac{(x+L)^2}{L^2} + \frac{[R + (R_i - R_e)]^2}{(R_i - R_e)^2} = 1 \quad (4)$$

o Rho가 유도한 고차원 다항식

$$R = R_i + (16R_m - 11R_i - 5R_e) \left(\frac{x}{L} \right)^2 + (-32R_m + 18R_i + 14R_e) \left(\frac{x}{L} \right)^3 + (16R_m - 8R_i - 8R_e) \left(\frac{x}{L} \right)^4 \quad (5)$$

이상의 식들을 바탕으로 다양한 랩테스트를 이용한 검증을 통해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) 노즐 형상비가 적을수록 고압액체 분사의 직진성이 높아진다.

이는 노즐팁의 길이가 늘어나면 고압으로 분사되는 액체유동의 마찰손실이 증가되어 분출 속도가 상대적으로 감소하기 때문이다.

2) 노즐의 형상비가 $L/d_o = 0$ 인 경우에 유속과 압력 손실이 가장 적다.

동일한 압력을 준 상태에서 노즐출구에서 분출되는 분류의 확산현상을 관찰한 사진을 분석해 보면 노즐형상비가 영(0)인 경우에 확산현상이 가장 낮게 안정된 것으로 나타난다. 이는 분류의 직진성, 충돌력, 유속의 감소와 연관되어 있다.

이상에서 도출된 랩 테스트 결과를 바탕으로 여러 가지 환경을 고려하여 노즐형상비를 0으로 설정하여 최종적으로 노즐을 설계하였다. 노즐의 외형은 테스트용으로 제작하여 실험 후 Spray head chamber에 적합한 형태로 재설계하였다. 최종적으로 설계한 노즐 및

Spray head chamber의 구성도는 [그림 5]와 같다.

(A) 노즐 측면도

(B) 노즐 사시도

(C) 노즐들을 이용한 전체 Spray head chamber 도면

그림 5. 노즐 및 Spray head chamber의 구성도

IV. 슬러지 세척장치 구동 성능 파라미터 설계

슬러지 세척장치가 증기발생기 내벽에 수직으로 설치된 상태에서 네 개의 자석휠(magnetic wheel)로 몸체의 무게를 지탱한다. 따라서 슬러지 세척장치의 몸체의 무게와 자세를 유지하고 작업 수행에 필요한 성능을 유지하기 위해 슬러지 세척장치 구동에 요구되는 성능 파라미터를 다음과 같이 설계한다.

1. 장치의 제원

- 체적(V) : $1515(\text{cm}^3)$
- 경계 상자 : X : 74.8105 ~ 239.1500
Y : -183.0121 ~ 146.5744
Z : -230.2869 ~ 33.3898
- 관성 모멘트 : X : 33, 013, 490, 992.0293
Y : 49, 241, 732, 958.0753
Z : 39, 820, 585, 961.2471
- 몸체의 무게 :
몸체의 무게는 캐드 프로그램으로 추정할 수 있는데, 알루미늄 재질을 사용할 경우 식 (6)과 같다.

$$W = \gamma_m \cdot V = 3 \times 1515 = 4.545(\text{Kg}_f) \quad (6)$$

여기서, γ_m : 평균비중(g/cm^3), V: 체적 (cm^3)

2. 자석 휠의 지탱 무게

네 개의 자석 휠이 지탱할 수 있는 무게는 5 Kg_f 정도의 슬러지 세척장치 몸체의 무게(식 (6) 참조)를 고려하여 이 값의 수배 정도면 되지만 금속의 마찰변수를 반영하여 10배 이상으로 설계한다.

3. 자석의 흡인력

자석의 흡인력은 자석의 크기와 종류에 따라 달라지므로 여기서는 우선 자석의 특성이 비교적 우수한 니오디움 자석을 기준으로 산정한다.

- 자석의 흡인력 :

$$F = \frac{B^2}{2\mu_0} \cdot S = \frac{1.2^2}{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0.0000785 \quad (7)$$

$$= 45(N) = 4.5(\text{Kg}_f)$$

여기서,

$$S = \pi \cdot \frac{d^2}{4} = \pi \times \frac{0.01^2}{4} = 0.0000785(\text{m}^2) \quad (8)$$

$$1(\text{Wb}/\text{m}^2) = 10^4(\text{Gauss}) = 1\text{T}$$

B : 자속밀도, μ_0 : 투자율, S : 자극면적

4. 모터의 구동토크

운동구동부(Traveling unit)의 구동동력은 금속 간 마찰력을 이용하도록 한다.

- 바닥면과 바퀴의 마찰력 :

$$F_r = \mu \cdot W = \mu \cdot m \cdot g \quad (9)$$

여기서, m: 장비의 질량

μ : 바닥면과 바퀴 사이의 마찰계수

(습식 금속 간 미끄럼 동마찰계수 참고)

- 장비의 구동 평형방정식 :

$$F = F_r \cdot \frac{R_0}{R} \quad (10)$$

여기서, R_0 : 기어의 반지름,

R: 구동 휠의 반지름

- 두개의 구동축을 가진 장비 각각의 토크 :

$$T_G = \frac{1}{2} \cdot F \cdot R = \frac{1}{2} \cdot \mu \cdot m \cdot g \cdot R_0 \quad (11)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 0.2 \cdot 50(\text{Kg}_f) \cdot 1.75(\text{cm})$$

$$= 8.75(\text{Kg}_f \cdot \text{cm})$$

여기서,

수직하중 = 자중+자석의 흡인력

$$= 0 + (12.5 \times 4) = 50(\text{Kg}_f)$$

- 실제 축에 걸리는 토크 :

$$T_M = \frac{T_G}{N \cdot \eta_G} = \frac{\mu \cdot m \cdot g \cdot R_0}{2 \cdot N \cdot \eta_G} \quad (12)$$

$$= \frac{8.75(\text{Kg}_f \cdot \text{cm})}{1.4 \cdot 0.7} = 8.9(\text{Kg}_f \cdot \text{cm})$$

여기서, N: 기어 감속비, η_G : 기계효율

식 (10) ~ (12)에서는 자석바퀴휠과 증기발생기판 사이의 표면 흡인력은 고려하지 않았으며, 차후 자석바퀴 휠 선정 시 고려할 예정이다.

5. 이동속도

장치의 이동속도는 별도의 기준은 없으나 최고 속도 범위에서 가변적으로 움직일 수 있도록 설계하였다. 모터의 부하가 작용하는 상태에서 모터 회전속도가 4000RPM 일때, 최고속도를 가진다.

○ 이동속도 :

$$V = \frac{\pi DN}{60} = \frac{\pi \times 65 \times 43}{60} = 146(mm/Sec) \quad (13)$$

$$N = i \cdot \frac{N_m}{i_m} = 0.71 \times \frac{4000}{66} = 43(RPM) \quad (14)$$

여기서,

i : 기어의 감속비, i_m : 모터의 기어헤드 감속비

6. 마찰저항토크

운동구동부가 평판 위를 바퀴로 굴러갈 때는 많은 동력이 소비되지 않지만 방향전환을 위해 회전할 경우 회전에 저항하는 마찰이 상당한 힘으로 작용하여 모터의 부하를 가중시킨다. 네 개의 지점이 수직 마찰력으로 부착되어 있는 경우 50Kg인 몸체의 무게가 4개의 바퀴에 분산된다.

○ 마찰저항토크 :

$$F_R = \mu \cdot \frac{F}{N} = 0.2 \times \frac{50}{4} = 2.5(Kgf) \quad (15)$$

여기서,

F : 자석의 흡인력, N : 휠의 개수, μ : 마찰계수

○ 이 힘에 의해 발생하는 토크 :

$$T_R = F_R \times R = 2.5 \times 3.25 = 8.125(Kgf \cdot cm) \quad (16)$$

○ 방향전환을 위해 소요되는 총 토크 :
35(Kgf · cm)

7. 모터의 선정

축에 걸리는 토크는 정지 상태에서 출발할 때에 필요한 최고 토크이다. 일반적으로 모터를 선정할 때는 모터 규격에 표시된 정지토크(Stall Torque)보다 2~3배 큰 값을 선택한다. 운동구동부는 두 개로 분리된 구동 메카니즘을 가지므로 모터 한 개당 소비되는 전력의 절반 이상의 출력을 요구한다.

○ 축에 걸리는 토크 :

$$T_M = 44 \cdot 2 = 88(Kgf \cdot cm) \quad (17)$$

○ 소비전력 :

$$H = \frac{T_M \cdot n}{97400} = \frac{88 \cdot 50}{97400} = 45.2(W) \quad (18)$$

8. 구동 방식 설계

슬러지 세척장치의 구동을 위해 두 개의 모터가 사용되는데 하나의 모터로 좌측 앞바퀴를 움직이고, 다른 쪽 모터로는 우측 앞바퀴를 움직인다. 또한, 장치가 정속으로 주행하기 위해 뒤 바퀴도 앞바퀴와 동일한 속도로 움직여야 하는데 앞과 뒤 바퀴 간에는 체인을 연결하는 방식을 채택한다. 그 이유는 체인방식이 벨트 방식에 비해 전달하중이 크고 부피도 작아 효율적이기 때문이다.

9. 구동 체인에 걸리는 장력

체인에 걸리는 토크는 마찰저항토크에서 계산한 토크의 절반 값 이상을 견딜 수 있어야 하므로 이 기준에 따르면 허용토크는 22 Kgf · cm이 된다. 식 (19)를 통해 계산해 본 허용하중의 경우 약 18 Kgf까지 가능하지만 안전을 고려하여 30 Kgf 이상인 것을 선택하기로 한다.

○ 구동 체인에 걸리는 장력 :

$$F = \frac{T}{\left(\frac{D_p}{2}\right)} = 2T \cdot \frac{1}{D_p} = 2 \times 22 \times \frac{1}{2.44} = 18(Kgf) \quad (19)$$

여기서,

D_p : 체인의 피치원지름, $D_p = 24.41(mm)$

F : 구동체인에 걸리는 하중, T : 허용토크

10. 체인의 최대 작용하중

체인의 최대 작용하중의 경우도 허용하중과 비슷하므로 안전함을 알 수 있다. 식 (20)에서 보듯이 체인에 서의 최대 작용하중은 33.5kg이며, 체인을 통한 장치의 전체 속도는 0.067m/sec이다.

○ 체인의 최대 작용 하중 :

$$F = 102 \cdot \frac{K_w}{V} = 102 \times \frac{0.022}{0.067} = 33.5(Kgf) \quad (20)$$

여기서

$$V = \frac{P \cdot N \cdot n}{60 \times 1000} = 4.763 \times 14 \times \frac{60}{60000} = 0.067(m/sec) \quad (21)$$

V. 세척장치의 구조체 설계 및 제어 방법

1. 구조체 설계

[그림 6]은 본 논문의 실제 메카니즘 설계에 따른 증기발생기의 슬러지 세척장치의 분해 개요도를 나타낸 것이다.

그림 6. 슬러지 세척장치의 전체 개요도

슬러지 세척장치(31)는 증기발생기 벽면을 따라 이동 가능하게 하는 운송 구동부(Travelling Unit)(41), 증기발생기의 전열관 간격에 대응되게 복수개의 노즐로 배열되어 세척수를 분사하는 고압분사부(51), 고압분사부를 선택적으로 회전시키는 제1회전구동부(61), 이를 배열축 방향과 수직되는 방향으로 선택적으로 회전시키는 제2회전구동부(71) 및 운송 구동부의 구동을 제어하는 컨트롤러로 구성되어 있다.

여기서, 운송 구동부는 증기발생기 벽면을 따라 이동 가능하며, 이동 방향이 조절되도록 상호 독립적으로 작동하는 한 쌍의 구동수단(43)에 의해 구동된다.

[그림 7]은 증기발생기의 슬러지 세척장치를 나타낸 사시도이다.

그림 7. 슬러지 세척장치의 전체 사시도

고압분사부는 제1회전구동부의 회전지지체(63)에 양단이 지지되어 회전 가능하게 결합되는데, 양단부의 외부기둥에는 회전이 용이하게 이루어지도록 볼 베어링(111)이 각각 결합된다.

이때, 고압분사부에는 회전축과 동심축을 이루어 고압분사부와 일체로 회전되는 제1치형 기어가 장착되고, 타단에는 고압분사부로 물이 공급되기 위한 물공급부재(121)가 장착된다.

여기서, 물공급부재의 측면에는 회전홈(123)에 타단이 연결되어 결합되기 때문에 회전지지체가 제2회전구동부에 의해 회전되더라도 타단은 물공급부재와 일정한 간격으로 유동 가능하게 결합됨으로써 축 방향으로 용이하게 회전할 수 있다.

또한, 물공급부재가 회전지지체(63)에 장착될 때, 보조물공급부재(125)도 물공급부재의 외부기둥을 따라 회전 가능하게 됨으로써 회전지지체(63)의 회전 자유도가 더욱 향상될 수 있다.

그리고, 회전지지체의 상부에는 전열관 틈새의 바닥면에 형성되는 슬러지와 고압분사부의 분사 상태를 확인하고 고압분사부의 분사방향을 감시하는 감시카메라(127)가 배치된다.

더욱이, 증기발생기의 내부는 어둡기 때문에 감시카메라의 시야 확보를 위해 감시카메라에 조명등(129)을 장착하는 것이 바람직하다.

제1회전구동부의 앞부분에는 운송 구동부의 진행 방향에 대한 확인 및 폭넓은 시야확보를 위해 다축 회전

카메라(131)가 장착된다.

구체적으로, 운송 구동부(41) 사이에 고정연결부(133)가 결합되고 고정연결부의 외부 기둥을 따라 회전되는 회전연결부(135)가 구성되는데 이때, 다축 회전카메라의 양측면이 회전연결부의 지지연장부(137)에 회전 가능하도록 즉, 고정연결부의 외부기둥의 회전방향에 수직되는 방향으로 회전되도록 결합되기 때문에 다축 회전카메라에 의해 폭넓은 시야가 확보될 수 있다.

[그림 8]은 [그림 7]을 절단한 단면도를 나타낸 것이다. 제1회전구동부는 회전지지체, 제1치형 기어, 제2치형 기어(57) 및 회전모터로 구성되어 있다.

[그림 9]는 제2회전구동부를 나타낸 측면도이며, 제2회전구동부(71)는 제3치형 기어(77), 제4치형 기어(73) 등으로 구성되어 있다.

그림 8. 슬러지 세척장치의 단면도

그림 9. 슬러지 세척장치의 제2회전구동부

2. 제어방법

[그림 10]은 증기발생기의 슬러지 세척장치의 제어동작을 나타낸 것이다.

s201에서와 같이 슬러지 세척장치는 원격제어기를 통해 신호가 입력됨으로써 입력된 신호에 따라 슬러지 세척장치의 이동 방향이 조절되는데, 슬러지 세척

장치가 증기발생기 내벽을 따라 이동되도록 운송 구동부에 구비된 개별 구동수단이 상호 독립적으로 제어 및 구동된다.

이후, 슬러지 세척장치가 운송 구동부의 작동에 의해 이동되어 신호에 따라 설정된 지점에 도달하면 고압분사부의 노즐이 전열관 배열 틈 사이로 향하도록 제2회전구동부가 제어 및 구동되며, 노즐의 상하방향 분사각도를 조절하도록 제1회전구동부가 제어 및 구동된다.

그림 10. 증기발생기의 슬러지 세척장치의 제어동작

여기서, 제2회전구동부의 제어 및 구동은 운송 구동부가 증기발생기 내벽의 이동된 지점에 따라 복수개의 전열관 틈새를 관통하는 방향 중 기 설정된 틈 사이 방향으로 노즐이 향하도록 제어 및 구동됨이 바람직하다.

그리고, 제1회전구동부 및 제2회전구동부의 제어 및 구동이 완료되면 세척수 밸브가 개방되도록 세척수 밸브가 제어 및 구동된다. 이를 통해 고압 세척수가 노즐을 통하여 분사된다(s205).

이때, 분사되는 고압 세척수로 인해 전열관의 표면이 손상되지 않도록 운송 구동부의 구동수단이 정지되게

제어됨과 아울러 고압분사부의 노즐이 전열관 배열 틈 사이 방향을 향하도록, 또한 상하방향의 분사각도가 조절되어 분사거리가 확대되도록 제1회전구동부가 제어 및 구동된다(s207).

여기서, 고압 세척수의 분사는 증기발생기의 내부가 증복 세척되도록 운송 구동부가 이동된 지점에서 1차 배열 틈사이 방향으로 분사가 완료된 이후 기 설정된 2차 배열 틈사이 방향으로 분사되도록 제1회전구동부 및 제2회전구동부가 제어 및 구동됨이 바람직하다.

VI. 결 론

본 논문은 원자력 발전소 설비중의 하나인 증기발생기의 전열관 배열 틈사이로 고압수를 분사하여 장기간 운영 중에 축적된 이물질들을 효율적으로 제거하는 증기발생기의 슬러지 세척장치 설계 및 그 제어방법에 관한 것이다.

세부적 내용으로 세척장치의 핵심인 고압 분사 노즐을 랩테스트를 거쳐 최적의 형태로 설계하였다. 또한, 수식모델에 기반하여 슬러지 세척 장치를 구동시키는 각 성능 요소의 제원을 설계하였고, 설계된 성능요소의 제원을 바탕으로 증기발생기 벽면을 따라 이동가능하게 하는 운송 구동부, 고압수를 발사하는 복수의 노즐로 구성된 고압분사부, 고압분사부를 배열축 방향 기준으로 선택적으로 회전되도록 지지하는 회전지지체로 구성된 슬러지 세척 장치의 구조체를 설계하였다. 마지막으로 설계된 본 구조체의 동작제어 방법을 제시하였다.

제안된 세척장치는 다수의 전열관 틈 사이에서 두 방향 이상으로 고압 세척수를 분사하도록 설정된 지점에서는 다방향으로 분사가 이루어진다. 이를 통해 전열관이 배치되어 상대적으로 슬러지가 많이 축적되는 내측 바닥면을 증복 세척할 수 있어 매우 효과적이다.

향후 과제로는 본 논문에서 설계된 슬러지 세척장치의 제작과 현장 테스트를 통해 품질 개선이 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 이은철, 원자력이 궁금해요(그린에너지 생생원자력2), 상수리출판사, 2009.
- [2] Hyung Yeol Pyo, "The Characterization of Spherical Particles in Steam Generator Sludge (증기발생기 슬러지 중 구형입자의 특성 조사)", 방사성폐기물학회지, 제4권, 제1호, pp.59-64, 2006.
- [3] 김승태, 증기발생기 건전성평가 및 유지보수 기술 개발, 과학기술부 최종보고서, 2002.
- [4] 김석태, 정우태, 강덕원, "가요성 판상 구조의 증기발생기 세정장비 설계", 한국정밀공학회 학술대회논문집, 제2006권, 제10월호, pp.46-47, 2006.
- [5] 김석태, 정우태, 강덕원, "초음파 변환기를 이용한 증기발생기 슬러지 침적 방지 방법", 한국정밀공학회 학술대회 논문집, 제2007권, 제6월호, pp.557-558, 2007.
- [6] 김석태, 정우태, "수압구동 전열관다발 부분 삽입형 증기발생기 세정장비 설계", 대한기계학회, 제2008권, 제11월호, pp.1132-1135, 2008.
- [7] J. W. Bitting, D. E. Nikitopoulos, S. P. Gogineni, and E. J. Gutmark, "Visualization and two-color DPIV measurements of flows in circular and square coaxial nozzles," Experimental in Fluids Vol.31, No.1, pp.1-12, 2001.
- [8] Y. Okada, K. Ashimine and K. Takeuchi, "Onset of SF6 clustering in steady supersonic Laval nozzle flow," Applied Physics B Lasers and Optics, Vol.70, No.1, pp.117-122, 2000.
- [9] Y. Kuga, S. Satooka, and K. Takeuchi, "Effect of flow pattern in a supersonic nozzle reactor on product branching ratio for UV photolysis of UF6/CH4 mixtures," Applied Physics B Lasers and Optics, Vol.63, No.3, pp. 293-298, 1996.
- [10] Y. Okada, S. Yamaguchi, and K. Takeuchi, "Growth of van der Waals clusters in steady supersonic Laval nozzle flow: change in number

density of SF6 monomers undergoing clustering," Applied Physics B Lasers and Optics, Vol.72, No.4, pp.507-513, 2001.

- [11] Jiusheng Li and Hiroshi Kawano, "Sprinkler performance as affected by nozzle inner contraction angle," Irrigation Science, Vol.18, No.2, pp. 63-66. 1998.

저 자 소 개

김 정 훈(Joeng-Hoon Kim)

정회원

- 2001년 2월 : 동명대학교 정보통신공학과(공학사)
 - 2003년 2월 : 한국해양대 전자통신공학과(공학석사)
 - 2007년 2월 : 한국해양대 전자통신공학과(공학박사)
 - 2007년 ~ 2009년 : (주)모든정보 기업부설연구소 연구소장
 - 2010년 ~ 현재 : 코맥 기업부설연구소 연구소장
- <관심분야> : 인공지능제어, 원자로, 메카트로닉스, 유비쿼터스

배 용 한(Yong-Han Bae)

정회원

- 1997년 : 부산정보대학 자동차과(전문학사)
 - 1996년 : 한국동도공업(주) 대리
 - 2000년 : 금산정기 개발부 과장
 - 2002년 : (주)근화 개발부 과장
 - 2003년 : 한국전력연구원 참여연구원
 - 2004년 ~ 현재 : 코맥 대표이사
- <관심분야> : 원자로, 랜싱장비, 기계설계, 로봇

권 순 량(Soon-Ryang Kwon)

정회원

- 1982년 2월 : 동아대학교 전자공학과(공학사)
 - 1984년 2월 : 부산대학교 전자공학과(공학석사)
 - 1999년 2월 : 충남대학교 전자공학과(공학박사)
 - 1984년 ~ 1999년 : 한국전자통신연구원 책임연구원
 - 1999년 ~ 현재 : 동명대학교 전자공학과 부교수
- <관심분야> : 전자제어, 이동통신시스템, RFID/USN