

초음파 변환기를 이용한 증기발생기 슬러지 침적 방지 방법

The method of preventing from accumulating sludge inside nuclear power plant steam generator with ultrasonic transducer

*#김석태¹, 정우태¹, 강덕원¹, 김홍덕¹, 이원석², 유동현³

**S. T. Kim(dimbar@kepco.co.kr)¹, W. T. Jeong¹, D. W. Kang¹, H. D. Kim¹, W. S. Lee², D. H. You³
¹ 한전전력연구원 원자력발전연구소, ² ㈜몰코, ³ 세안기술㈜

Key words : Ultrasonic transducer, Steam generator, Nuclear power plant, sludge

1. 서론

원자력발전소의 발전원리는 원자로에서 핵분열에 의해 발생된 열에너지가 증기발생기에서 열교환이 일어나면서 증기를 발생시켜 터빈을 돌려 전기에너지로 변환되는 일련의 과정이다. 증기발생기는 방사성을 띤 1 차 냉각수와 방사성을 띠지 않은 2 차 냉각수의 경계이기 때문에 매우 중요한 구조물이며, 원자력발전소의 운영기간이 늘어날수록 증기발생기 내에 슬러지가 침적되며, 증기발생기의 열전달을 방해하여 원자력발전소의 출력 감발을 초래하거나 구조물의 부식을 촉진시켜 증기발생기의 교체를 앞당기게 된다. 그러므로 원자력발전소 운영진은 매 계획예방정비기간에 고압수 분사 방식의 랜싱(Lancing)작업으로 증기발생기 하부의 슬러지를 제거하고 있다.

본 논문에서 소개할 방법은 증기발생기 내부에 쌓이는 슬러지를 미연에 방지하는 방법으로 매회 실시하는 증기발생기 랜싱 세정을 2 주기 또는 3 주기에 한번 정도 수행함으로써 예방정비기간 단축과 랜싱작업 비용을 감소할 수 있는 경제적 효과도 예측할 수 있다.

2. 초음파를 이용한 세정 원리

초음파를 이용한 세정 원리는 주로 공동현상(Cavitation)에 의존한다. 물론 초음파의 진동이 대상물에 전달되어 이 물질을 떨어뜨리는 효과도 있으나 공동현상은 미세한 기포를 발생시켜 그 기포가 폭발할 때의 에너지를 이용하여 이 물질을 제거한다.

초음파 발전기에서 전기신호를 변환기로 전달하면 변환기에서 미세하게 진동을 발생시키는데, 이 진동에 의해 액체속에서 파동을 형성하며 구간에 따라 정압(Positive pressure) 또는 부압(Negative pressure)을 형성된다.

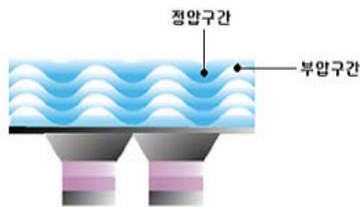


Fig. 1 Positive pressure and negative pressure by ultrasonic wave

기포(공동)는 정압구간과 부압구간을 반복하게 되는데, Fig. 2 에서 보는 바와 같이 부압구간에서 기포가 생성·성장하고 정압구간에서 기포가 압축되면서 에너지가 높아진다. 기포는 이렇게 압축과 팽창을 반복하며, 에너지가 축적되다가 기포내의 압력이 액체의 표면장력 이상이 되면 순간적으로 폭발하면서 충격파를 일으키며 에너지를 방출한다. 이 에너지를 이용하여 Fig. 3 에서 처럼 피세정물의 이물질을 제거하게 된다.

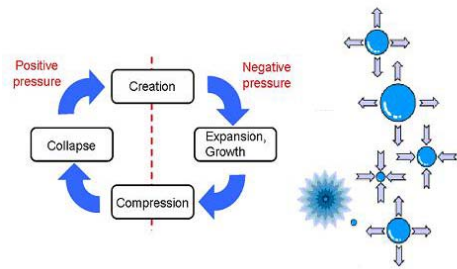


Fig. 2 Growth cycle of the bubble from cavitation

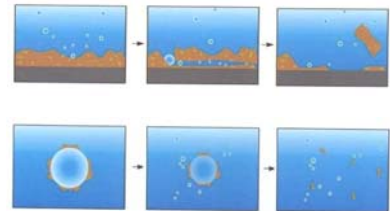


Fig. 3 Removal of sludge in solution by cavitation

이러한 기포의 발생 위치는 주로 부압구간에서 액체 중 미세한 이물질의 표면에서 발생이 되며, 공동현상은 보통 낮은 주파수(20kHz 부근)를 사용하고 주의 압력이 약 2 기압(물 기준) 정도와 약 70°C 에서 음압이 클수록 잘 발생이 된다.

3. 증기발생기 슬러지 침적 방지 방법

초음파를 이용한 증기발생기 세정이나 슬러지 방지는 아직 국내에선 적용된 사례가 없으나, 일본의 Tomari 원전 증기발생기에 예방정비기간을 이용하여 화학세정제인 ASCA(Advanced Scale Conditioning Agents)와 함께 압전소자인 Push-pull Transducer 를 이용해 세정작업을 수행한 바가 있다. 하지만 적용 과정에서 Push-pull Transducer 근처 영역엔 세정이 잘 되었지만, 멀리 떨어진 영역에선 세정효과가 급감하였다. 이는 논문의 후반부 실험에서 언급한 바와 같이 액체매질에서 거리에 따라 공동현상이 급감하기 때문이기도 하고 증기발생기 전열관이 장애물이 되어 초음파의 진행을 방해하기 때문인 것으로 생각된다. 그러므로 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 새로운 방법을 고안하게 되었다.

본 논문에서 소개할 증기발생기 슬러지 침적 방지 방법은 Fig. 3 에서처럼 증기발생기 튜브시트(Tubesheet)에 직접 도파봉을 용접하여 증기발생기 가동 중에 자왜소자를 이용하여 초음파를 직접 튜브시트에 펄스형태로 가진하므로 튜브시트와 연결된 전열관이 장애물이 아니라 오히려 초음파 전달경로가 되어 공동현상을 촉진시켜 슬러지가 쌓이지 않도록 미연에 방지한다. 실제 적용 시에는 2 개를 한 세트로서 튜브시트의 원주방향으로 설치하는 것이 보다 효과적일 것이다.

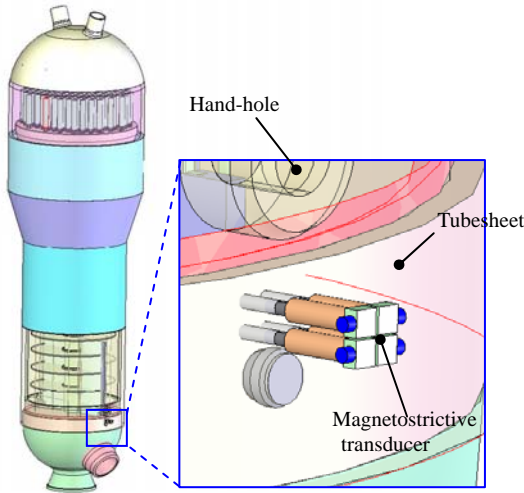


Fig. 4 A set of magnetostrictive transducers attached to the tubesheet of the steam generator

4. 초음파 세정실험장치 설계 및 실험

실험장치는 Fig. 5 에서 보는 것처럼 슬러지 방지 및 제거를 목적으로 증기발생기의 Hand-hole 을 기준으로 폭 1.1m, 길이 2.2m 의 일부분을 잘라내어 설계제작 하였다. 그리고 튜브시트에 도파봉을 용접하고 자왜소자를 설치하고 세정효율을 높이기 위해 세정액 순환펌프와 히터도 설계에 반영하였다.

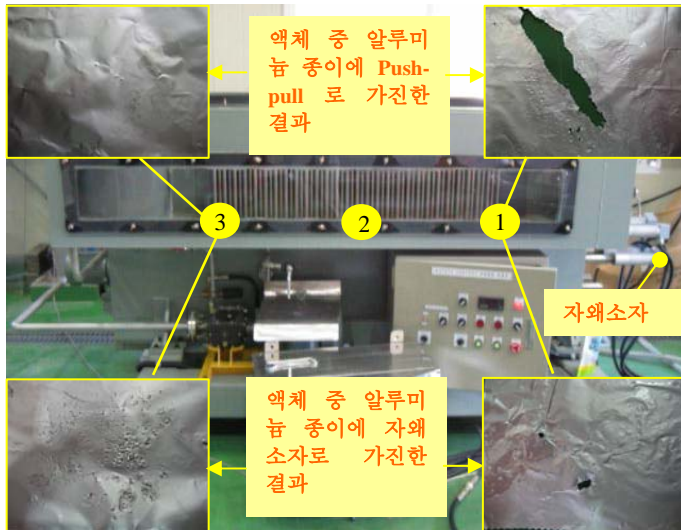


Fig. 5 Mock-up of the steam generator for ultrasonic cleaning

공동현상은 주로 음압(sound pressure)의 세기에 따라 비례하므로 Push-pull Transducer 와 Magnetostrictive Transducer 를 Fig. 5 의 실험모형에 설치하여 Table 1 과 같이 수중에서 음압을 측정하였다. 초음파의 전달 경로를 살펴보면, Push-pull Transducer 은 Tomari 원전에서와 같이 액체 중에 초음파를 방사하여 액체를 매질로 전달되고, Magnetostrictive Transducer 는 튜브시트에 설치하여 금속을 매질로 초음파가 전달되므로 전열관까지 전달되어 액체 중에서 공동현상을 일으킨다. 이러한 공동현상은 Fig. 5 에서처럼 알루미늄 종이를 침식시키는 결과를 일으킨다.

Table 1 에서 음압의 수치는 세 지점에서 대표하는 음압 수치를 나타내었다. 총 49 개의 지점에서 음압측정을 하였지만, 거리가 멀어질수록 감소하지만 초음파의 반사파에 의해 중간중간 데이터들이 경향을 벗어나는 수치들도 있었다. Magnetostrictive Transducer 에 비해 Push-pull Transducer 의 음압수치는 거리에 비례하여 급감하여 직경이 4m 가 넘는 증기발생기에 적용하기에는 부적합하다고 판단되어

Magnetostrictive Transducer 를 이용하여 향후 증기발생기 세정실험을 수행할 것이다.

Table 1 Graphs of magnetostrictive and push-pull transducer from hydrophone

Table legend	Magnetostrictive transducer	Push-pull transducer
Sound pressure at spot 1 in Fig.5		
Sound pressure at spot 2 in Fig.5		
Sound pressure at spot 3 in Fig.5		

5. 결론

증기발생기의 슬러지 침적을 방지하는 방법으로 소개된 이 방식은 증기발생기가 가동 중에 자왜소자를 이용하여 펄스형태로 초음파 에너지를 튜브시트에 전달하여 일부 슬러지를 제거하고 쌓이는 것을 방지할 수 있다. 그 효과는 약 4 개월 정도 수행한 후 나타날 것이라 예상하고, 계획에 방정비기간 중 랜싱작업을 매 주기마다 수행하지 않아도 되어 원전가동일수를 증가시킬 것으로 예상된다. 또한 일본 Tomari 원전에 적용된 초음파 세정방법은 F 형 증기발생기의 무전열관 영역에 압전소자를 넣어 세정하는 방법으로 적용이 제한적이지만, 본 논문에서 소개된 방식은 모든 종류의 증기발생기에 다 적용이 가능하기 때문에 특히, 증기발생기 종류가 다양한 우리나라 실정에 알맞은 방법이다.

6. 향후 계획

본 논문에서 소개한 방식을 더 발전시켜 연속과 자왜소자를 구매하여 모사 슬러지를 증기발생기 실험모형에 침적시켜 실험할 계획이다. 그리고 기존의 랜싱과 ASCA 세정제와 복합적으로 결합하여 예방정비기간 중 단시간에 초음파 세정이 가능하도록 개발할 계획이다.

참고문헌

1. 정우태, 김석태, “자왜소자 타입의 초음파 세정 원리 규명”, 전력연구원 Technical Memo, 2006.
2. 초음파연구회, "쉬운 초음파의 응용," 기전연구사, 1974.
3. Naonobu Sasada, Sotaro Kaneda, Robert D. Varrin, Philip J. Battalia, "ASCA and UEC Applications at Tomari Unit 2" International Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor System, 32-37, 2005.