

연속 자왜소자를 이용한 증기발생기 초음파 세정에 대한 연구

The study on steam generator ultrasonic cleaning with continuous magnetostrictive transducer

*김석태¹, #정우태¹

*S. T. Kim¹(dimbar@kepc.co.kr), #W. T. Jeong¹(wtjeong@kepri.re.kr)

¹ 한전전력연구원

Key words : Cleaning, magnetostrictive transducer, steam generator, nuclear power plant

1. 서론

원자력발전소의 증기발생기 내부는 가동기간이 증가할수록 증기발생기 내부에 슬러지가 침적되어 열전달을 방해하여 원자력발전소의 출력을 저하시키고 증기발생기의 부식을 초래하여 그 수명을 단축시켜 교체주기를 짧게 하여 막대한 예산을 낭비하게 한다. 이러한 슬러지는 냉각수가 2차계통의 배관을 통과하는 중에 배관의 내부표면을 마모시켜 떨어져나온 금속성입자들이 증기발생기 내부에 침적되어 발생한다. 그러므로 원자력발전소에서는 핵연료 교체시기인 계획예방정비기간을 이용하여 증기발생기 내부의 슬러지를 제거하는데, 현재 우리나라에서 이용중인 증기발생기 세정방법은 크게 2가지가 있다. 첫 번째는 화학세정제를 이용하여 증기발생기 내부의 슬러지를 제거하는 방법으로 높은 세정효율을 가지지만 화학약품에 의한 약간의 증기발생기 표면손상과 방사성폐액의 발생으로 인한 높은 예산이 발생하므로 매 계획예방정비기간에 이용하지 않고 증기발생기 내부의 사정이 열악한 경우 수행되고 있다. 최근에는 화학세정제의 농도를 묽게 하여 세정하기도 하고 있다. 두 번째는 고압수 분사방식의 증기발생기 세정방법으로 특히, 슬러지가 많이 침적되는 증기발생기 관판(tube-sheet) 상단영역을 세정하는데, 이 세정방법은 매 계획예방정비기간에 수행되고 있다. 그러나 고압수 분사영역이 증기발생기 내부의 모든 영역을 다 세정할 수 없어 부분적으로 세정이 되지 않는 영역이 존재한다.

그러므로 상기의 2가지 방법의 단점을 보완하기 위하여 본 논문에서는 초음파 자왜소자를 이용하여 증기발생기 내부에 침적된 슬러지를 제거하는 방법을 제안하고자 한다.

2. 본문

증기발생기 슬러지 침적방지에 대한 논문¹을 이미 발표된 바 있다. 원자력발전소 가동 중 슬러지 침적방지를 위해 펄스파를 이용하여 자왜소자의 초음파를 불연속적으로 가진하여 슬러지가 증기발생기에 침적되어 굳어지는 현상을 방지하였다. 일본 Tomari 원전에 초음파 세정이 적용된 바가 있는데, 이는 복합세정의 방법으로 화학세정제인 ASCA와 압전소자의 한 종류인 push-pull transducer를 이용하여 소자를 증기발생기 내부에 투입하여 초음파 세정을 수행하였지만, 초음파 세정의 효과를 볼 수 있는 부분은 초음파 소자 주위영역만 세정이 되었다². 본 논문에서는 좀 더 적극적인 방법으로서 이전의 초음파 전달경로를 이용하여 이미 침적된 슬러지를 제거할 수 있는 가능성을 가늠하는 시뮬레이션과 실험을 수행하였다.

이전의 증기발생기 슬러지 침적방지의 경우, 원자력발전소가 가동 중에 상시적으로 불연속적 초음파를 가진하였기 때문에 많은 초음파에너지가 필요로 하지 않았을 뿐만 아니라 시간적인 제약도 없었다. 그러나 증기발생기의 슬러지의 제거를 위해서는 많은 초음파 에너지가 투입되어야 하며, 원자력발전소의 계획예방정비기간이 정해져 있기 때문에 단기간에 많은 초음파 에너지를 투입해야 한다. 그러나 무조건 많은 초음파 에너지를 투입하게 되면 증기발생기의 구조물에도 무리가 되므로 적당량의 초음파 에너지를 전가할 필요가 있다.

본 논문의 초음파 세정방법은 증기발생기 구조물을 미세하게 진동시켜 증기발생기로부터 슬러지를 떨어뜨리는 효과와 초음파 에너지에 의하여 증기발생기 내부의 초음파 전달 매개체의 공동현상(cavitation)을 이용하여 슬러지를 제거하는 효과 등이

있는데, 본 논문에서는 특히 공동현상에 의한 슬러지 제거에 초점을 맞추었다.

공동현상에 의한 세정 효과를 얻기 위해 얼마의 초음파 에너지가 필요한가를 알아보기 위해 몇 가지 시뮬레이션과 실험을 수행하였는데, Fig. 1과 같이 자왜소자를 증기발생기 관판에 장착하는 방법으로 초음파 세정을 수행할 경우를 고려하여 Fig. 2와 같이 자왜소자가 부착되는 증기발생기 관판의 부분을 축소하여 모형을 설계·제작하였다. 모형을 축소하여 설계한 이유는 현재 보유중인 1kW용 자왜소자로 공급할 수 있는 초음파 에너지가 제한되므로 세정대상물을 축소하였다.

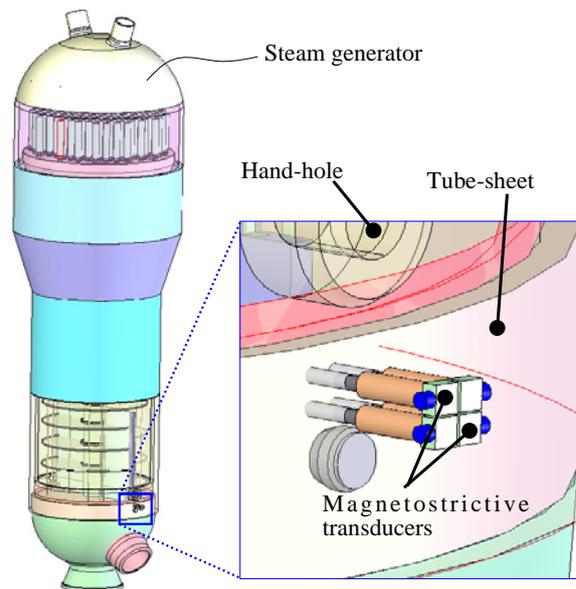


Fig. 1 A set of magnetostrictive transducers attached to the tube-sheet of steam generator

초음파 세정의 중요한 요소인 공동현상은 음압의 세기와 어느 정도 관계가 있으므로 Fig. 2(a)의 설계 모델링을 가지고 모형 안에 물을 채운 뒤 약 1kW용 자왜소자로 초음파를 가진하여 발생하는 음압경향 시뮬레이션을 수행하였다.

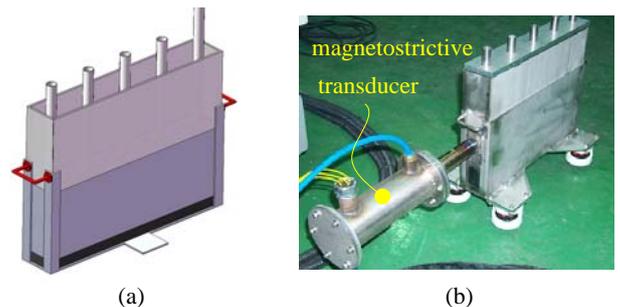


Fig. 2 Design of a scale-reduced modeling(a) and mockup(b) from a partial steam generator

Fig.3은 시뮬레이션의 음압경향 결과를 가시적으로 보여주고

있는데, 음압의 세기가 강 할수록 파란색에서 붉은색을 띄게 된다. 오른쪽 줄은 모델링을 횡단면으로 전열관(tube) 주변의 음압경향도 보여주고 있다.

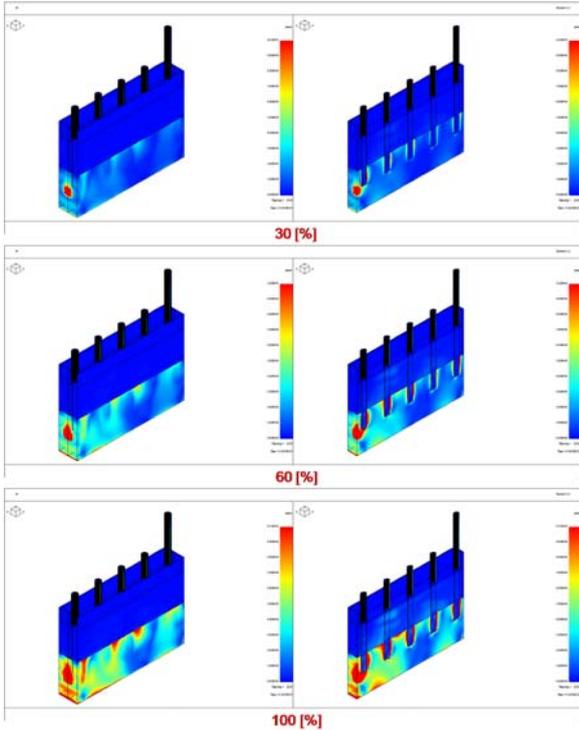


Fig. 3 Results of the simulation on sound pressure from acoustic energy onto the mockup of partial steam generator

Fig. 4는 시뮬레이션의 음압경향을 나타낸 그래프로 붉은색 선은 초음파 에너지 증가에 따른 최대음압(피크치)을 나타내고 있고 검은색 선은 평균음압을 나타내고 있다. 두 값의 경향 모두 초음파 에너지가 증가할수록 선형적으로 증가하고 있다. 그러나 국부적으로 또는 순간적으로 음압이 높은 것 보다 평균적으로 음압이 높아야 공동현상의 빈도가 높아져 공동현상의 세기가 증가할 것이다. 그러므로 초음파 세정은 최대음압보다 평균음압에 더 의존적일 것이다. 음압은 공동현상이 음압의 세기에 어느 정도 비례하지만 정확하게 비례관계에 있지는 않을 것으로 예측하고 있다. 어느 음압 이상에서 공동현상이 활발히 일어나는 지점이 있는데, 이 지점을 찾기 위해 실제 Fig. 2(b)와 같이 제작하여 자왜소자를 부분 증기발생기 축소모형에 용접하여 달아 직접 초음파 세정실험을 수행하였다. 사용한 1kW용 자왜소자의 초음파 에너지 출력을 조절하기 위하여 자왜소자의 공급전압을 가변하여 초음파 에너지를 10%에서 100%로 서서히 증가하였다. 또한 공동현상의 세기를 눈으로 확인하기 위하여 알루미늄 쿨링포일을 이용하였다.

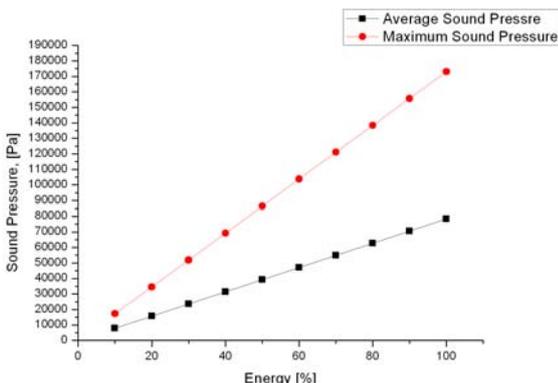


Fig. 4 Graph of sound pressure vs acoustic energy

Table. 1은 실험의 결과를 육안으로 확인할 수 있도록 사진으로 구성된 테이블로 초음파 에너지가 증가함에 따라 공동현상의 세기가 강해짐을 보여준다. 공동현상에 의한 세정효과는 입력전력의 40%이상이면 효과가 있는 것으로 보인다.

Table. 1 Comparison of cavitation in increasing input power

10%	20%	30%	40%
50%	60%	70%	80%
90%	100%	○ 100% input power into the magnetostrictive transducer is 1kW.	

3. 결론

실험에 사용된 자왜소자의 100% 입력과위가 1kW이고 가진 대상물의 질량은 약 44kg이므로 최대입력과위의 40%인 약 0.4kW의 파워이면 44kg의 대상물을 세정하는데 효과가 있다. 그러므로 공동현상에 의한 세정효과를 얻기 위한 파워는 1kg당 약 9W가 필요하고 자왜소자의 에너지 변환율이 약 85%인 점을 감안할 때 8W에 해당하는 단위시간당 초음파 에너지, 즉 인텐시티(intensity)가 필요하다고 판단된다³. 또한 이 값이 공동현상에 의한 세정효과를 얻을 수 있는 임계 인텐시티 값으로 판단된다.

하지만, 이 결과는 단순히 자왜소자 한 개를 이용한 실험이고 더욱 거대한 구조물인 증기발생기에 여러 개의 자왜소자를 어떻게 배치하여 적용하는가에 따라 세정효율을 더욱 높일 수 있을 것이다. 향후 이러한 연구를 위해서 자왜소자의 초음파 전파현상 및 전파경로를 알아볼 필요가 있다. 또한, 종래에 사용되는 화학세정제 보다 높은 농도의 세정제를 초음파 전달 매개체로 활용한 복합식 세정의 연구도 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 김석태, 정우태, 강덕원, 유동현, 김홍덕, "초음파 변환기를 이용한 증기발생기 슬러지 침적 방지 방법," 한국정밀공학회 춘계학술대회, 557, 2007.
2. Naonobu Sasada, Sotaro Kaneda, Robert D. Varrin. and Philip J. Battalia, "ASCA and UEC Applications at Tomari Unit 2," International Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor System, 32-37,2005.
3. 김양한, "음향학 강의", 청문각, 2008.