

증기발생기 취출수계통 비재생열교환기 전열관 관막음 기준 설정

Tube Plugging Criteria for the Non-Regenerative Heat Exchanger in the Steam Generator Blowdown System of Nuclear Power Plant

김형남*, 최성남*, 유현주*, 최진혁*

* 한국전력공사 전력연구원

ABSTRACT Nuclear power plants are urged to reduce operating and maintaining costs to remain competitive as well as to increase the safety preventing the radioactive material to the atmosphere. To reduce the cost and to increase the safety, the inspection of balance-of-plant heat exchanger becomes important. However, there are some problems for plugging the heat exchanger tubes since the criterion and its basis are not clearly described. The codes and standards related to show the tube plugging criteria may not exist currently. In this paper, a method to establish the tube plugging criteria of BOP heat exchangers is introduced and the tube plugging criteria for the non-regenerative heat exchanger in the steam generator blow-down system of nuclear power plant. This method relies on the similar method used to establish the plugging criteria for the steam generator tubes.

1. 서 론

원자력발전소는 안전성을 향상시키면서 운영 및 유지보수 비용을 줄여 발전비용을 절감하려고 한다. 원자력발전소의 안전성을 저해하면서 비용을 절감한다는 것은 생각할 수 없는 일이다. 그러므로, 발전비용의 절감을 위해서는 2차측에 눈을 돌릴 수밖에 없다.

발전비용을 절감하기위해 취할 수 있는 방법 중 하나는 비파괴검사이다. 누설 가능성이 있는 기기나 배관을 미리 탐지하여 조치를 취함으로써 향후 예상되는 출력저하 및 방사성 물질의 유출을 막아, 이에 수반되는 비용을 줄일 수 있다.

원자력발전소 열교환기 전열관은 계통의 온도, 압력 및 환경에 견딜 수 있도록 설계되고 제작되었다. 그러나 예기치 못한 인자가 운전 과정에서 개입됨으로써 전열관 두께 감육이 일어나게 된다. 일반적으로 열교환기 전열관은 와전류탐상검사를 수행하여 규정치 이상의 결함이 발견되면 그 전열관에 대하여 관막음(Plugging)을 함으로써 향후 예견되는 사고를 막고 있다. 그러나, 국내 원자력발전소의 경우 증기발생기를 제외한 열교환기 전열관에 대한 관막음 기준(Plugging Criteria)은 마련되어 있지 않다. 본 논문에서는 손상된 증기발생기 전열관 관막음 기준을 설정한 근거가 되는 USNRC Reg. Guide 1.121을 적용하

여 증기발생기 취출수계통(Steam Generator Blowdown System) 비재생열교환기 전열관의 관막음 기준을 설정하였다.

비재생열교환기의 전열관이 누설되면 탈염이 되지 않은 증기발생기 취출수가 기기냉각수로 유입되게 된다. 탈염이 되지 않은 취출수에는 방사능 오염물질이 포함되어 있을 수 있다. 그러므로, 파손 가능성이 있는 전열관을 계획예방정비기간에 일정 기준에 따라 선별하고, 선별된 전열관을 예방 관막음함으로써 오염물질의 확산을 방지하여 원자력발전소 운영의 신뢰도를 확보해야 한다.

본 논문에서는 증기발생기 취출수계통 비재생열교환기 전열관에 작용하는 압력, 온도구배에 의한 응력을 계산하고, 최대응력과 재료의 허용응력을 비교하여 울진 3, 4호기의 비재생열교환기 전열관 관막음 시점 판단에 대한 기준(전열관 두께)을 제시하였다.

2. 전열관 관막음 기준

증기발생기 전열관은 벽두께가 얇아졌을 때 관막음을 수행해야 할 시점이 명확히 제시되어 있다. 열화된 증기발생기 전열관 관막음 기준은 USNRC Reg. Guide 1.121에 주어진 허용 전열관

두께에 대한 지침을 따른 것이다. 이는 ASME Sec. III에서 요구하는 안전율에 기준을 두고 있다. 그러나, 비재생열교환기와 같은 일반 열교환기 전열관이 마모 등으로 벽두께가 얇아졌을 때, 보수 시점을 알려주는 문헌은 없다. ASME Code 에도 열교환기 설계시 전열관의 재질에 따라 적용하는 최소 요구두께를 나타내는 조항과 U-자형 전열관 제작시 급흡전 전열관의 요구 두께에 대한 식은 있으나 얇아진 전열관의 보수 시점을 알려주는 조항이나 식은 없다. 본 논문에서는 USNRC Reg. Guide 1.121과 비슷한 기준을 적용하여 울진 3, 4호기 증기발생기 취출수 비재생열교환기 전열관의 관막음 기준을 설정하였다.

USNRC Reg. Guide 1.121의 내용은 정상운전 상태와 사고 상태로 구분된다. 정상운전 상태에서 만족해야 할 조건은 일반 기계설계에서 적용하는 조건과 유사하다. 즉, 정상운전 중 발생하는 응력이 항복강도를 초과하지 않아야 하며, 파손에 대한 안전율은 3 이상이 되도록 하여야 하는 조건이다. 비재생열교환기 전열관에 대해서도 같은 조건을 적용할 수 있다. 울진 3, 4호기 비재생열교환기 전열관의 경우는 증기발생기 전열관과 달리 기준이 되는 재료의 강도를 ASME Sec. II Part D의 Sec. I(Rules for Construction of Power Boilers)과 Sec. III의 Class 2, 3 혹은 Sec. VIII에 적용하는 값을 사용하였다.

사고 상태의 증기발생기 전열관에 대한 USNRC Reg. Guide 1.121의 내용은 주증기관 파단과 LOCA(Loss of Coolant Accident)를 다루고 있어 비재생열교환기에 적용할 수 없다. 물론, 탄성 안정성(Elastic Stability) 평가를 수행할 수도 있으나 전열관 내, 외면이 모두 비압축성 유체로 채워져 있거나, 비파괴검사에서 덴트를 결함으로 취급하지 않는 경우에는 의미가 없으므로 본 보고서에서는 탄성 안정성을 고려하지 않았다.

2.1 가정

일반적으로 전열관이 감육된 단면은 Fig. 1(a)와 Fig. 1(b) 사이의 어떤 한 형태를 가질 것이다. 감육된 전열관의 관막음 기준(두께 기준)은 전열관에 작용하는 응력에 근거를 두고 설정하게 된다. 정확한 응력해석을 위해서는 실제 전열관의 감육된 형태가 주어져야 가능하다. 그러나 Fig. 1(a)와 1(b)와 같은 두 개의 극단적인 경우의

응력값(이 경우 최대응력)이 큰 차이가 없다면 어느 한 경우를 이용하여 관막음 기준을 설정하여도 큰 무리는 없을 것으로 판단된다.

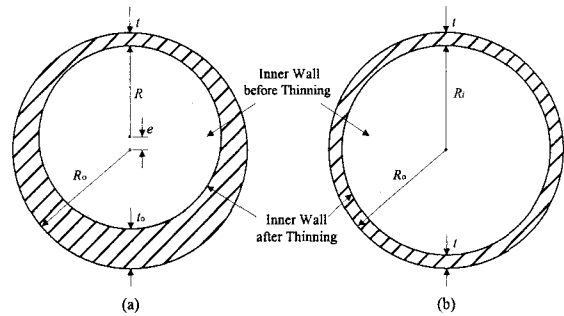


Fig. 1. Thinned Shapes (a) Eccentric, (b) Uniform

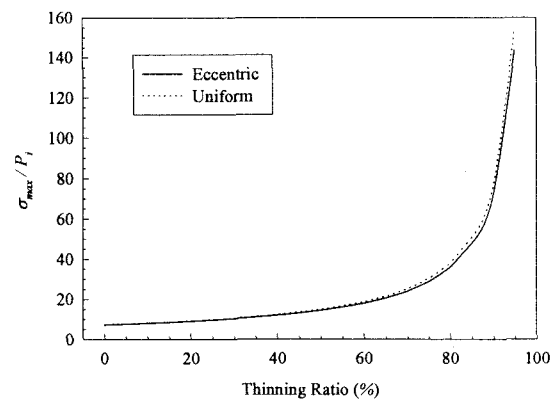


Fig. 2. Stresses in the tubes with the eccentric and uniform cross-section for the thinning ratio

2.2 USNRC Reg. Guide 1.121

USNRC Reg. Guide 1.121은 열화된 증기발생기 전열관 관막음 기준을 설정하는 데 참고가 되는 지침이다. 앞서서도 설명한 바와 같이 일반 열교환기 전열관 두께를 설계하는 데 참고가 되는 자료는 많으나, 열화된 전열관 관막음 두께 기준을 설정하는 데 참고가 되는 문헌은 없다. Kenji의 논문("EPRI Condition Assessment and Inspection Program for Reducing Heat Exchanger Tube Leak", Proceedings of 6th EPRI Balance-of-Plant Heat Exchanger NDE Symposium, 2000)은 USNRC Reg. Guide 1.121과 비슷한 기준을 적용하여 일반 열교환기의 관막음 기준을 설정하고 있다는 것을 보여준다. 본 보고서에서도 USNRC Reg. Guide 1.121을 기초로 하여 울진 3, 4호기 비재생열교환기 전열관의 관막음 기준을 설정하였다.

USNRC Reg. Guide 1.121은 ASME Sec. III에서 요구하는 안전율에 기준을 두고 열화된 전열관의 최소 두께를 요구하고 있다. USNRC Reg. Guide 1.121의 내용은 정상운전 상태와 사고 상태로 구분된다. 정상운전 상태에서 만족해야 할 조건은 일반 기계설계에서 적용하는 조건과 유사하다. 즉, 정상운전 중 발생하는 응력이 항복강도를 초과하지 않아야 하며, 파손에 대한 안전율은 3 이상이 되도록 하여야 하는 조건이다. 비재생 열교환기 전열관에 대해서도 같은 조건을 적용할 수 있다.

3. 비재생열교환기 전열관 관막음 기준

울진 3, 4호기 비재생열교환기 전열관 재질은 스테인레스스틸(A249-TP304)이며, ASME Section II-D에 열응력 계산에 필요한 물리적 성질이 주어져 있다(표 1). 본 논문에서는 기준이 되는 재료의 강도로 ASME Sec. II Part D의 Sec. I(Rules for Construction of Power Boilers)과 Sec. III의 Class 2, 3 혹은 Sec. VIII에 적용하는 값을 사용하였다.

Table 1. A249-TP304의 물리적 성질

물성치	단위	A249-TP304
Young's Modulus	psi	27.0×10^6
Poisson's Ratio	.	0.29
열팽창 계수	/°F	9.0×10^{-6}

Table 2. 울진 3, 4호기 비재생열교환기의 온도

	동체측/ 전열관측	위치	온도 (°F)	온도 I (°F)	온도 II (°F)
SGBD 비재생 열교환기	동체측	입구	110.0	124.0	157.0
		출구	138.0		
	전열관측	입구	250.0	190.0	
		출구	130.0		

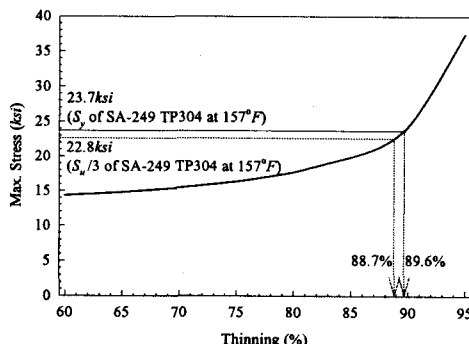


Fig. 3. Normal operating condition

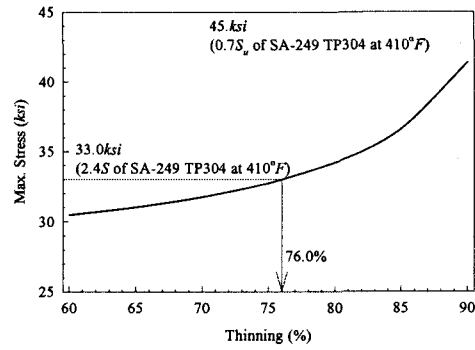


Fig. 4. Design condition

Table 3. 전열관 관막음 기준

운전상태	요건	기준
정상운전	$\sigma_{max} < S_y$	89.6%
	$3\sigma_{max} < S_u$	88.7%
설계조건 운전	$\sigma_{max} < 2.4 S_m$	76.0%
	$\sigma_{max} < 0.7 S_u$	90% 이상
관막음 기준	계산치	76.0%

4. 결 론

USNRC Reg. Guide 1.121은 전열관에 작용하는 최대응력과 전열관 재료의 허용응력을 비교하여 ASME Code에서 요구하는 안전율을 확인하는데 그 바탕을 두고 있다. 여기에서는 USNRC Reg. Guide 1.121에 따라 열교환기 전열관 관막음 기준을 설정하는 방법을 제시하였다. 또한, 울진 3, 4호기 증기발생기 취출수계통 비재생열교환기 전열관에 대한 관막음 기준을 제시하였다.

참고문헌

1. A. C. Ugural : Stresses in Plates and Shells, McGraw-Hills, Inc., 1981, 198 - 199, 263 - 266
2. S. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger : Theory of Plates and Shells, McGraw-Hills, Inc., 1970, 497-501
3. S. Timoshenko : Strength of Materials, Van Nostrand Reinhold Comp., 1958, 134-137
4. C. H. Kent : Thermal Stresses in Thin-Walled Cylinders, Trans. of ASME, 53(1931), 167-180
5. E. U. Schlünder Editor-in-chief : Heat Exchanger Design Handbook, Vol. 4(Mechanical Design of Heat Exchanger), Hemisphere Publishing Corporation, 1983, 25
6. K. Krzywosz : EPRI Condition Assessment and Inspection Program for Reducing Heat Exchanger Tube Leak, Proceedings of 6th EPRI Balance-of-Plant Heat Exchanger NDE Symposium, 2000.