

원자력 증기발생기 튜브/튜브시트 확관방법별 특성평가

The Evaluation of Tube to Tubesheet Joint Part on Nuclear S/G

심상한*, 배강국*, 김인수*

* 한국중공업(주) 기술연구원 생산기술연구팀, 경남 창원시

ABSTRACT The expanding method of tube to tubesheet joint part on nuclear steam generators are classified into three classes of roller expanding, explosive expanding and hydraulic expanding. After the expanded Mock-Up specimen are made by the three expanding method, The general properties, microstructure/microvickers hardness, pull-out strength, hydraulic leak pressure, of tube to tubesheet joint part were inspected. and We evaluated the operation efficiency of expansion, reproduction of expanded joint about three expanding method. Through the overall evaluation of tube to tubesheet joint part, The hydraulic expanding and explosive expanding could be certificated more useful expanding method.

1. 서론

원자력발전소의 사용수명과 밀접한 관계를 가지는 증기발생기(S/G)의 사용수명이나 안정성은 대부분 튜브와 튜브시트 접합부분의 제반성질에 크게 의존한다. 즉 보다 안전하고 완벽한 증기발생기 제작을 위해서는 튜브와 튜브시트 접합방법에 나름대로의 신뢰성과 연속성이 보장되어야 한다. 따라서 증기발생기 제작시 요구되는 중요한 사항은 튜브/튜브시트 접합부위에서 인발강도(Pull-Out Strength)가 높고, 누수(Leaking)가 일어나지 않으며, 확관후 최소한의 잔류응력이 도입되고, 튜브시트 전 두께범위에서 균일한 확관이 되는 신뢰성과 재현성이 우수한 확관방법을 확립하는 것이다.

따라서 본 연구에서는 튜브를 튜브시트에 확관하는 방법에 따라 분류되는 롤확관(Roller Expanding), 폭발확관(Explosive Expanding) 및 수압확관(Hydraulic Expanding) 등 세가지 확관방법에 대해 튜브/튜브시트 확관접합 부분의 제반물성(조직/경도시험, 상온(고온)인발시험, 허용수압), 확관부위 잔류응력, 응력부식파괴 저항성등의 확관품질과 재현성 및 확관작업성 등에 대한 종합적인 성질을 파악하여 최적의 확관공정을 확립하고자 하였다.

2. 확관과정

2.1 롤확관(Roller Expanding)

이전까지 원자력 증기발생기등 열교환기류의 튜브/튜브시트 확관에는 전통적인 방법인 롤확관이 주로 사용되어 왔는데 이를 간단히 살펴보면 대략 다음과 같다. Fig. 1에서 보듯이 롤확관기 Cage내에 경사진 맨드릴이 외력에 의해 회전하면서 앞으로 전진하면 Cage 홈내에 위치한 3~7 정도의 강화롤러가 회전하고 이 회전하는 롤러의 힘이 점진적으로 튜브내벽에 가해짐으로써 튜브가 확관되는 것이다. 여기서 맨드릴을 구동시키기 위한 구동시스템으로는 공기나 전기모터등 여러 가지가 있는데, 보다 일정한 확관율과 반복적이며 연속적인 확관율을 얻기 위해서는 구동시스템의 구동력이 조절되어 맨드릴에 공급되는 토크를 일정하게 제어하는 것이 중요하다.

2.2 폭발확관(Explosive Expanding)

폭발확관(Explosive Expanding) 방법은 화약의 폭발력(화약폭발시 생기는 순간 초고압 동적에너지)을 이용하여 튜브를 확관시키는 새로운 확관방법으로 롤확관의 제반 문제점을 해결하기 위하여 개발된 확관방법으로 이 폭발확관 과정을 간단히 살펴보면 Fig.2의 (a)~(d) 과정을 통하여 확관이 이루어진다. 또한 이 폭발확관 방법은 앞에서 살펴본 롤확관과는 달

리 작업성이 우수하고, 보다 균일한 확관율이 얻어지며, 작업속도가 빨라 열교환기류의 제작 납기를 획기적으로 단축시킬 수 있는 등의 여러 가지 잇점을 가진다.

2.3 수압확관(Hydraulic Expanding)

수압확관 방법은 기본적으로 수압을 이용하여 튜브를 확관시키는 방법으로 이를 간단히 살펴보면 확관시키고자 하는 튜브내에 수압확관용 맨드릴을 끼운 다음 이 내부로 물을 채운 후 압력 증폭시스템을 통하여 30,000~50,000psi 정도의 압력을 물에 전달시켜 수압에 의해 튜브를 튜브시트의 원하는 위치에 확관시키는 방법인데, 이 과정을 단계별로 정리해보면 Fig.3의 (a)~(f)의 단계를 거쳐 수압확관이 이루어 진다. 이 수압확관의 특징은 튜브소재의 보다 큰 물성변화없이 부분적으로나 전체적으로 확관이 가능하고, 일정한 적용압력에 의한 완벽한 조절이 가능하며, 확관후 잔류응력도입 등의 측면에서 매우 유리한 확관법이다.

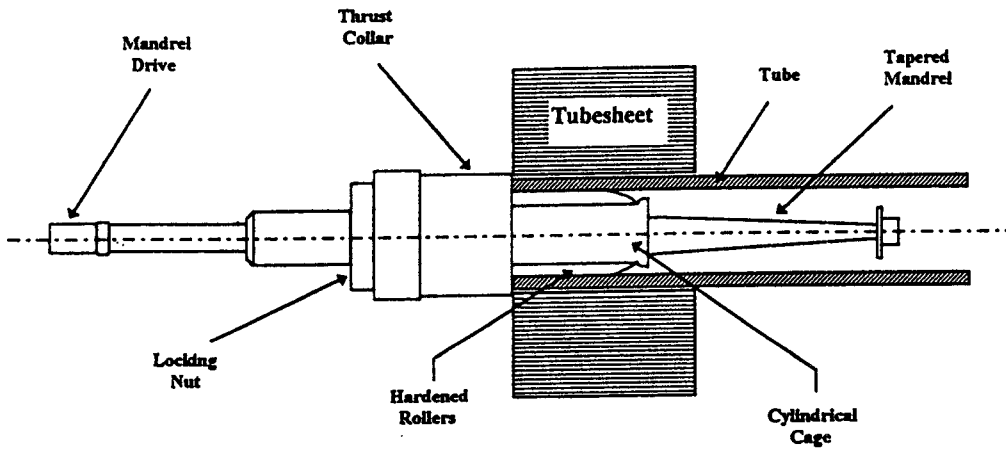


Fig. 1 The Typical Roller Expander

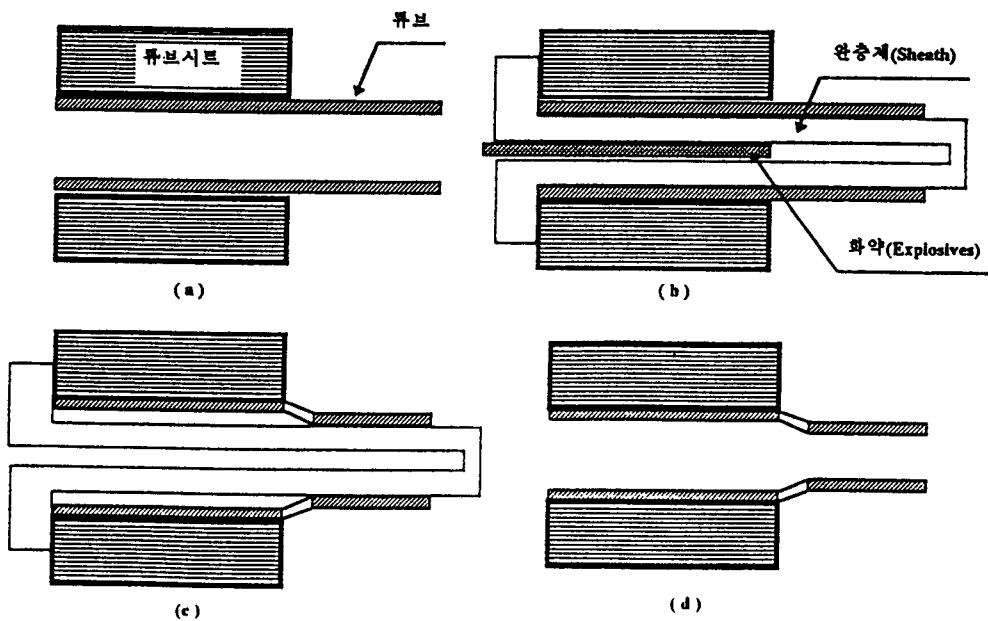


Fig. 2 The Explosive expanding cycle

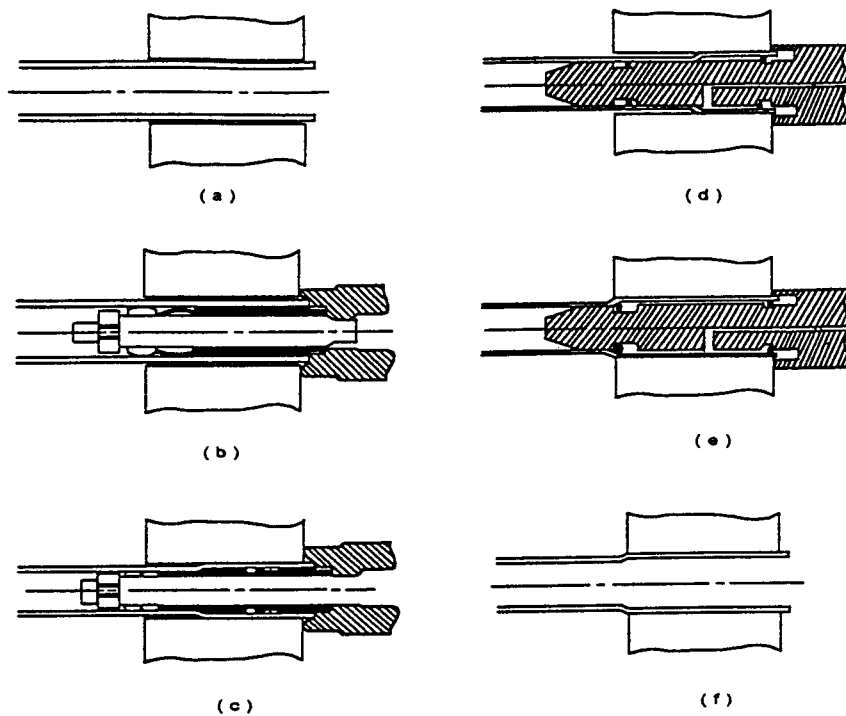


Fig. 3 The Hydraulic expanding cycle

3. 실험

3.1 튜브/튜브시트 준비

본 실험에 사용한 튜브는 지금까지 원자력 증기발생기 튜브소재로 많이 사용되고 있는 Inconel 600 Seamless Tube(19.05^{OD} x 1.05^t)를 적당한 길이로 절단하여 사용하였으며, 튜브시트 역시 증기발생기 튜브시트 소재로 사용되는 SA508 cl.3를 이용하여 튜브시트 Mock-Up(Hofe Dia. 19.25 ± 0.05)을 제작해 사용하였다.

3.2 확관모의실험

준비된 튜브와 튜브시트를 이용하여 앞에서 살펴본 확관과정에 따라 롤확관, 폭발확관 및 수압확관 모의실험을 실시하였다.

Table1. Roller, Explosive & Hydraulic Expanding Mock-Up Test

확관방법	부가하중	예상확관율(%)	Mock-Up I.D.	확관 Tool	비 고
롤확관	3.8 A	1.0~2.5	RA	Roller Expander	중계관공장
	5.0 A	3.0~5.0	RB		
	6.5 A	5.0~	RC		
폭발확관	7.5 Gr/FT	1.0~2.0	EA	Explosives Assemblies	폭발시험장
	15 Gr/Ft	2.5~3.5	EB		
	25 Gr/Ft	3.5~4.5	EC		
	31 Gr/Ft	5.0~	ED		
수압확관	28,000 psi	1.0~2.0	HA	Hydroswage	원자력공장
	36,000 psi	2.0~3.0	HB		
	42,000 psi	3.0~4.0	HC		

3.3 조직/경도시험

확관후 튜브/튜브시트 확관접합부의 조직/경도변화, 확관계면 상태 및 Clearance Gap 등을 조사하였다

3.4 인발시험(Pull-Out Test)

확관후 튜브/튜브시트 확관접합부의 접합강도를 알아보기 위해 상온 및 고온(350°C)에서 인발시험을 실시하였다.

3.5 수압시험(Hydrostatic Pressure Leak Test)

확관후 튜브/튜브시트 확관접합부의 밀착도를 검사하는 시험으로 수압시험을 실시하였다.

4. 실험결과

4.1 확관특성

롤확관의 경우는 작업자의 숙련도나 확관장비의 상태 등에 따라 확관품질이 달라지고 확관의 재현성이 떨어진다. 또한 튜브시트 두께가 두꺼운 경우 튜브시트 전범위에서 1-Step에 의한 확관이 불가능하므로 확관율이 불균일할 수 있다. 그러나 폭발확관이나 수압확관은 작업자의 숙련도에 관계없이 일정한 확관이 가능하고 재현성이 우수하며, 튜브시트 두께에 관계없이 튜브시트 전범위에서 1-Step에 의한 확관이 가능하므로 확관율이 균일하다. 단, 수압확관의 경우 확관시 튜브의 찢수에 매우 민감하므로 튜브찢수의 공차가 일정해야 균일한 확관이 가능하며, 초기 적용수압이 증가하면 Mandrel Back-Up Ring의 소모가 많이 생기는 약점을 가지는 것으로 나타났다.

4.2 조직/경도

세가지 확관법 모두 확관후 튜브의 조직변화는 없었다. 단, 확관후 튜브의 미소경도 변화는 롤확관의 경도상승이 가장 컸고 경도의 분포도 위치에 따라 불균일하였으나, 폭발확관과 수압확관의 경우는 경도 상승폭도 작았고, 경도분포도 균일하였다. 특히, 수압확관의 경우 확관후 경도상승이 거의 없었으며 경도분포도 매우 균일하게 나타났다.

4.3 인발강도(Pull-Out Strength)

확관후 튜브/튜브시트 확관접합부의 접합강도를 표시하는 인발강도의 경우 롤확관이 전 확관을 범위에서 가장 높게 나타났고, 수압확관, 폭발확관의 순이었다. 한편, 원자력 증기발생기 사용온도인 340°C정도에서의 고온인발강도는 확관방법이나 확관율에 관계없이 상온 인발강도보다 높았으며, 이는 고온인발시 튜브와 튜브시트 사이에서의 "Stick-Slip Friction" 때문이라 사료된다.

4.4 최대허용수압(Maximum Allowable Hydrostatic Pressure)

확관후 튜브와 튜브시트 사이의 밀착도를 나타내는 허용수압은 인발강도의 경우와 마찬가지로 롤확관이 가장 높았고, 수압확관도 상당히 높은 수준이었다. 그러나 폭발확관의 경우는 확관후 Clearance Gap이 상대적으로 커짐으로 인해 허용수압이 떨어지는 것으로 나타났다.

5. 참고문헌

1. J. Druetz and A. Bazergui "Through-thickness measurement of residual stresses in thin tubes", *Experimental Mechanics*, June, 1983, 211-216
2. D. A. Scott, G. A. Wolgemuth and J. A. Aikin "Hydraulically expanded tube to tubesheet joints", *ASME*, March 1, 1982, 1-8
3. P. H. Berge, H. D. Bui, J. R. Donati and D. Villard "Residual stresses in bent tubes for nuclear steam generators", *Corrosion-NACE*, Vol.32, 9, Sept. 1976, 537-364