증기발생기 전열관의 파열강도에 미치는 외압의 영향

조성근†·배봉국*·석창성**

Effect of External Pressure on the Burst Strength of Steam Generator Tube

Sung - Keun Cho, Bong - Kook Bae and Chang - Sung Seok

Key Words : Pressurized water reactor(가압경수로), Steam generator tube(증기발생기 전열관), Burst test (파열시험), Burst strength(파열강도), Uniform burst elongation(균일파열 연신율), Total circumferential elongation(총 원주 연신율), Ductile rupture(연성파괴)

Abstract

Tracing the study of the burst test of steam generator tube, few studies have been reported to effect of external pressure acting on secondary-side in service condition. In this study the burst tests of Inconel 690TT were conducted in order to evaluate burst strength characteristics under the effect of external pressure. We obtained the result that the burst strength of Inconel 690TT increased when external pressure increased while both total circumferential elongation and uniform burst elongation were not affected. Also, according to the increased of external pressure, the size of the burst opening became smaller and the tear was getting severe.

1. 서 론

가압경수로(pressurized water reactor)형 증기발생기는 원자로에서 핵연료의 분열반응으로 가열된 310 ℃ 330 ℃의 1차측 냉각수와 약 288 ℃의 2차측 냉각수가 전열관을 경계로 만나는 원전 주요 부품설비 중의 하나이다. 증기발생기는 내부에 수천개의 U-bend형 전열관들이 설치된 구조를 가진 일종의 열교환기로서, 다른 원전 주요 설비들과는 달리 15 MPa의 압력을 가진 1차측과 5 MPa 7 MPa 사이의 2차측 압력경계에 모두 접하게 되는 구조적 특징을 갖는다. 증기발생기 전열관은 이와 같은 가혹한 조건에서 기계적 건전성을 유지해야하므로 기계적 특성 및 내부식성이 우수한 Ni-Cr-Fe 합금인 Inconel이 사용되고 있다.

증기발생기의 파열사고는 지난 20년동안 2년마다 1회의 비율로 발생되어 왔고 최근 몇 년간은 매년 발생되고 있는 추세이다. 이러한 전열관의 손상은 원전의 가동률 저하와 유지보수에 막대한 경제적 손실을 야기시킬 뿐만 아니라 원전의 안전성 확보와 수명관리에 있어서 근본적인 장애요소로 작용하고 있다. 따라서 원전의 안전성 확보와 수명관리를 위해서는 전열관의 파괴특성 연구가 필요하다.[1 3)]

전열관과 같이 고온·고압의 운전조건에서 압력을 받는 튜브의 주된 파괴특성을 조사하기 위해서는 파열시험(burst test)과 맨드럴 시험(mandrel test)이 사용될 수 있다. 맨드럴 시험은 4조각 이상의 맨드럴을 관 내부에 삽입하고 외경 방향으로 가압하여 실험하며, 일정한 응력장을 형성할 수 있으나

† 성균관대학교 대학원 기계공학부
E-mail : sungkny@hotmail.com
TEL : (031)290-7477 FAX : (031)290-7486
* 회원, 성균관대학교 기계공학부
** 회원, 성균관대학교 기계공학부

관 내부에 가해지는 힘을 측정하기 어려운 단점이 있다. 파열시험은 밀봉된 튜브형 시편에 내압을 가하여 파괴특성을 관찰하는 방법으로 실제 전열관의 파괴조건과 유사하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 기존에 연구되어 온 전열관에 대한 파열시험은 1차측의 내압만을 고려한 것으로서, 실제 가동조건인 2차측에서 작용하는 외압의 영향은 무시되고 있는 실정이다. 하지만, 외압이 작용하지 않는 전열관은 2축 응력상태가 되고, 외압이 작용하는 전열관은 두께방향 응력이 추가되어 3축 응력상태가 되므로 이를 고려해 주어야 한다.

따라서 본 연구에서는 내압과 외압을 함께 받는 전열관에 대하여 외압의 변화에 따른 파열특성을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 내·외압을 함께 가할 수 있는 유압식 파열시험기를 제작하여, 결함이 없는 전열관에 대하여 파열시험을 수행하였다.

2. 실 험

2.1 시편준비

본 연구에 사용된 재료는 현재 가압경수로에서 사용되고 있는 전열관으로서, 1,050 ℃부근에서 15 30분 용융 열처리하여 수냉시킨 다음 704 ℃에서 10시간 이상 열처리(thermal treatment)한 Inconel 690TT로 화학 조성은 Table 1과 같다.[2] 전열관의 외경과 내경은 각각 19.06 mm, 16.94 mm이고, 두께는 1.06 mm이다. 끝단 밀봉파열시험(the closed-end burst test)을 위한 파열시편의 길이는 EPRI(electric power research institute)[4 7]지침을 기준으로 전열관 외경의 10배 이상인 250 mm로 제작하였다. Fig. 1은 파열시편의 모습이다.

Table 1 Chemical composition of Inconel 690TT

Element	Ni	Cr	Fe	C	Mn	Si
Comp. (wt%)	≥ 58	28 31	7 11	0.015 0.025	≤ 0.5	≤ 0.5

2.2 파열압력시험 장치

전열관 파열시험은 관 내부에 작용하는 유체의 압력을 일정한 속도로 상승시켜 전열관이 파열되는 순간의 압력을 측정하는 시험이다. 측정된 파열 압력은 실제 증기발생기에서 전열관이 지탱할 수 있는 최대압력, 즉 파단조건이 된다. 파열시험 장치는 짧은 시간동안 압력을 충분히 증가시킬 수 있어야 하고, 가압속도가 일정하도록 조절할 수 있어야 하며 압력 요동을 최소화하여야 한다.

Fig. 1 Burst specimen before test

본 시험에서는 외압이 0 MPa, 7 MPa, 12 MPa으로 작용하는 결함이 없는 증기발생기 전열관에 대하여 파열압력 시험을 수행하였다. 파열압력 시험장치는 Fig. 2에서와 같이 크게 가압부(pumps), 증압부(booster), 시편 고정부(specimen fixture) 및 각 부를 연결하는 유압파이프와 압력을 조절해주는 밸브들로 구성되어 있다. 실제 파열시험기를 Fig. 3에 나타내었다.

수동으로 작동되는 가압부는 외압펌프와 내압펌프로 이루어져 있다. 외압펌프는 밸브의 개폐 여부에 따라 밀봉 시편에 외압을 가해주는 작용 외에도 부스터 실린더(booster cylinder)를 원위치로 복귀시키는 역할을 하고, 내압펌프는 밀봉 시편에 내압을 가해주는 역할을 한다. 부스터 실린더가 충분히 복귀하지 않으면 고압을 발생시키기가 어렵기 때문이다.

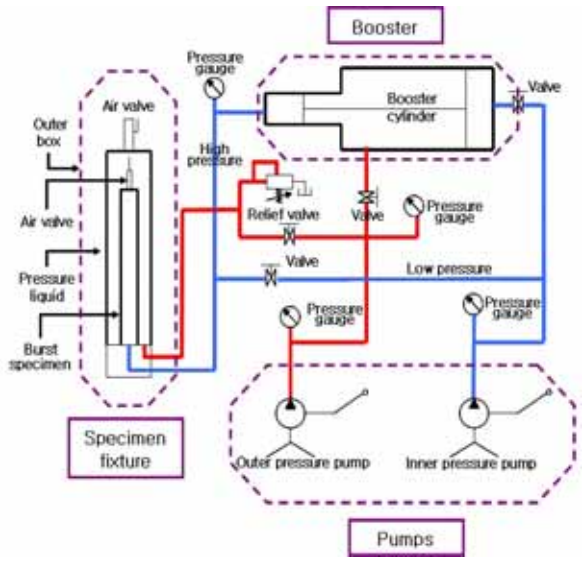


Fig. 2 Circuit diagram of the burst testing system

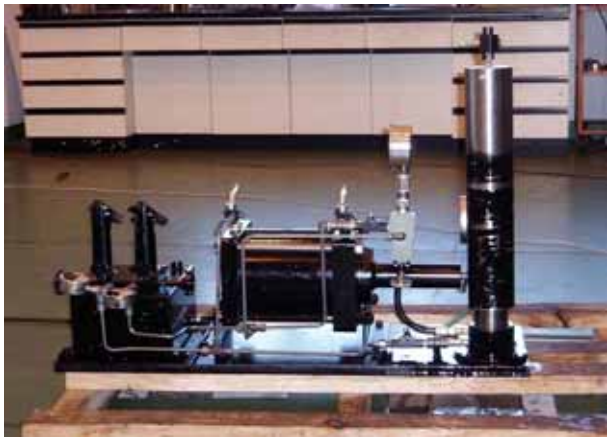


Fig. 3 Burst pressure test equipment

증압부는 저압부(low pressure)와 고압부(high pressure)로 나뉘어 부스터 실린더의 단면적 비에 따라 압력을 상승시키는 장치이다. 장치의 단면적 비는 5 : 1이므로 저압부의 압력이 1 MPa일 때 고압부는 5 MPa이 된다. 결함이 없는 전열관의 파열압력은 약 100 MPa 미만이므로 고압부 최대 압력은 150 MPa까지 가압이 되도록 설계하였고, 작동유체는 유압 작동유를 사용하였다.

시편 고정부는 Fig. 4와 같이 전열관, 니플, 플러그, 공기밸브 그리고 스웨이지락 피팅으로 구성되어 있다. 스웨이지락 피팅은 150 MPa까지의 내압에서도 니플과 연결된 플러그와 공기밸브가 빠지지 않고 견딜 수 있도록 고정력을 강화하는 역할을 한다.

각 부는 최대 용량 200 MPa의 유압 파이프로 연결되어 있으며 압력을 확인하기 위하여 4개의 압력계가 설치되어 있다. 또한 유압 파이프 중간에 설치된 유량을 미세하게 조절할 수 있는 릴리프 밸브는 일정한 외압을 유지하는데 사용된다. Fig. 5는 시편을 고정부에 조립한 모습이다.

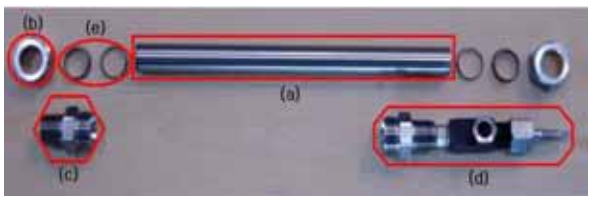


Fig. 4 Assembly of a burst specimen with unflawed tube (a) Inconel 690TT (b) Nipple (c) Plug (d) Air valve (e) Swagelok fitting

Fig. 5 Assembled specimen ready for the burst testing

2.3 파열시험

일반적으로 파열시험에서 가압시간을 10 sec에서 10 msec로 줄이면 파열압력은 약 15 %증가한다.[8] 이에 EPRI 지침서에서는 1.5 15 MPa/sec의 범위에서 파열시험을 수행하도록 권고하고 있다. 본 시험에서는 가압부의 각 행정마다 압력의 급격한 변동(surge)이 발생하지 않도록 하기 위하여 약 3 5 MPa/sec의 가압속도로 유압 작동유를 가압하였다. 외압의 영향을 고려한 시험을 할 경우에는 먼저 외압을 가압한 후에 내압을 같은 속도로 가압하였다.

2.4 결과처리

파열시험으로부터 얻은 파열시 튜브의 내압과 원주방향 신장량을 가지고, 최대파열강도(ultimate burst strength, MPa) 를 다음과 같은 얇은 두께를 가진 원통형 원주응력 공식 (1)로부터 구하였다.

$$\sigma_H = \frac{PD}{2t} \quad \textbf{(1)}$$

여기서, σ_H : ultimate burst strength, MPa
P : maximum fluid pressure, MPa
D : outside diameter, mm
t : pre-test thickness, mm

그리고, 총 원주 연신율(total circumferential elongation, %TCE)을 ASTM B811[9]에 명시된 다음의 식 (2)로부터 구하였다.

$$\%TCE = \frac{(C_f - C_i)}{C_i} \times 100 \quad \textbf{(2)}$$

Table 2 Burst test results of Inconel 690TT

External pressure (MPa)	σ_H (MPa)	%TCE	%UBE
0	755	24	26
7	809	26	25
12	854	27	25

여기서, C_i : pretest circumference, mm

C_f : post test circumference excluding burst opening, mm

균일파열 연신율(uniform burst elongation, %UBE)은 KWU의 Specification NO RE-LE 3384를 규격[10]으로하여 원주길이를 파열 개구부로부터 길이방향으로 20mm되는 지점에서 측정된 값이므로 일반적으로 총 원주 연신율값 보다 작게 나타나나 측정 정밀도 측면에서는 측정에 대한 편차가 작은 장점이 있다.[11] 파열시험 결과를 Table 2에 정리하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 외압 변화에 따른 최대파열강도 및 연신율

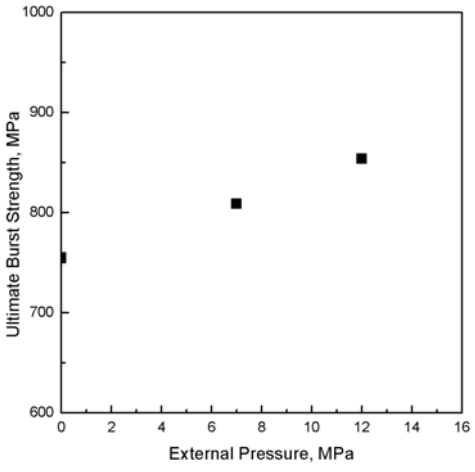


Fig. 6 Ultimate burst strength versus external pressure of Inconel 690TT

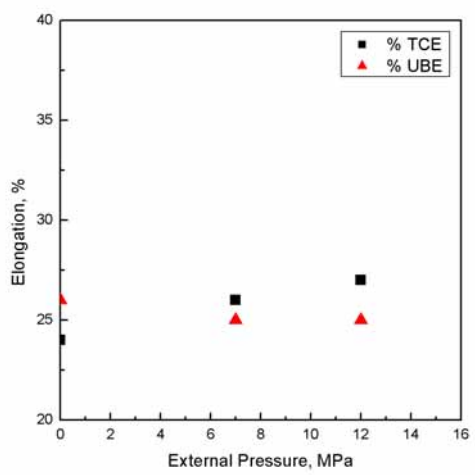


Fig. 7 Elongation versus external pressure of Inconel 690TT

외압 조건을 3가지로 다르게 하여 파열시험을 수행한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 같이 외압이 증가할수록 최대파열강도는 증가되는 것을 알 수 있다. 이는 외압의 영향이 파열시편을 구속하는 구속력으로 작용하기 때문이라고 생각된다. 외압 변화에 따른 균일파열 연신율과 총 원주 연신율을 Fig. 7에 나타내었다. 외압의 영향에 따라 총 원주 연신율의 차이는 최대 3 % 로 나타났고, 균일파열 연신율의 경우 거의 변화가 없었다.

일반적으로 연성재료의 항복과 잘 일치하는 최대 전단 응력설(maximum shear stress)과 연성재료 시험과 가장 잘 일치하면서 정확한 해석을 위해 적용되는 변형 에너지설(distortion energy)은 응력이 작용하는 등방성 재료의 항복응력을 사용하나, 본 논문에서는 이방성 재료의 인장강도를 사용하였다. 이는 파열시험 중 항복강도를 측정할 수 없기 때문이다.

Fig. 8에서 같이 일반적으로 최대 전단 응력설은 변형 에너지설 보다 보수적이다. 이는 최대 전단 응력설은 중간 주응력(σ_2)이 항복조건에 미치는 영향을 고려할 수 없기 때문이다. Fig. 8과 Table 3에서 알 수 있듯이 최대 전단 응력설과 변형 에너지설은 최대 파열강도 보다 보수적인 것으로 나타났다.

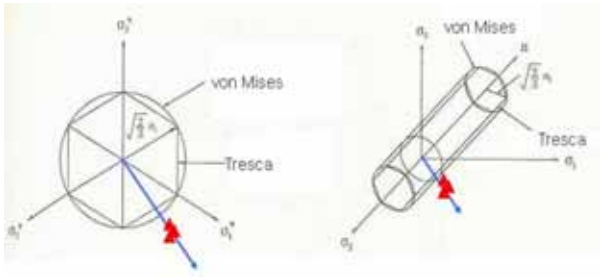


Fig. 8 Yield locus of π plane

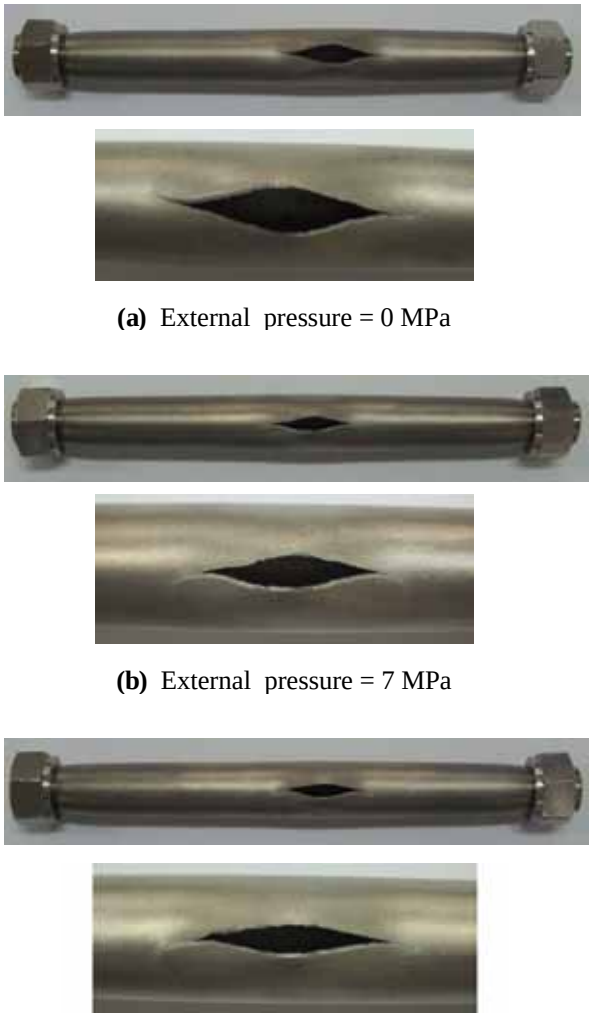
Table 3 Comparison of failure criteria

External pressure (MPa)	σ_H (MPa)	M.S.S (MPa)	D.E (MPa)
0	755	755	654
7	809	802	695
12	854	842	729

※ M.S.S : maximum shear stress (Tresca)
D.E : distortion energy (von Mises)

3.2 파단모습

연성파괴(ductile rupture)의 경우 주응력(principal stress) 방향의 약 45°에서 전단슬립(shear slip)이 일어나는 특성을 가지고 있다. Fig. 9는 외압 변화에 따른 파열시편의 파단모습을 나타낸 것이다. 모든 파열시편의 파단면이 원주방향 응력과 경사져 있는 모습을 통하여 전형적인 연성파괴 현상이 나타났다. 외압의 변화에 따라 총 원주 연신율과 균일파열 연신율은 큰 변화가 없었으나, 전열관이 부풀어 오르고, 파열 개구부(burst opening)의 크기는 감소함을 알 수 있다. 이는 외압이 증가할수록 최대파열강도가 증가함으로서 외압의 변화가 파열시편의 연신율을 구속하였기 때문으로 사료된다.



(a) External pressure = 0 MPa

(b) External pressure = 7 MPa

(c) External pressure = 12 MPa

Fig. 9 Burst specimens after test

4. 결 론

외압 조건을 달리한 3개의 Inconel 690TT 전열관을 가지고 파열시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 외압이 증가할수록 최대파열강도는 점차적으로 증가하였다. 이러한 현상은 외압의 영향이 파열시편을 구속하는 구속력으로 작용하기 때문인 것으로 사료된다.

2. 외압의 변화에 따라 파열시편의 총 원주 연신율과 균일파열 연신율은 큰 변화가 없었으나, 외압이 증가함에 따라 전열관이 부풀어 오르고, 파열 개구부의 크기는 감소함을 알 수 있다.

3. 파열시편의 파단면이 원주방향 응력과 경사져 있는 모습을 통하여 전형적인 연성파괴 현상이 나타났다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2003-B-374) 주관으로 수행된 과제이며 또한 두뇌한국 21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

(1) Y. J. Kim, C. S. Seok, M. W. Suh, J. B. Choi, 19888, "Research Status on the Life Evaluation of Nuclear Components", KSME, pp. 5 12.

(2) Korea Institute of Nuclear Safety, 1999, "Regulatory Technical Report on the Stream Generator Safety of Nuclear Power Plants".

(3) McDonald, P. E., Shah, V. N., Ward, L. W. and Ellison, P. G., 1996, "Steam Generator Tube Failures", NUREG CR - 6365.

(4) EPRI TR-107569 - V1R5, 1997, "PWR Steam Generator Examination Guidelines : Revision 5".

(5) EPRI TR-016743 - V4R1, 1997, "Guidelines for PWR Steam Generator Tubing Specification and Repair".

(6) EPRI TR-107620, 1998, "Steam Generator in Situ Pressure Test Guidelines".

(7) EPRI Draft Report, 1997, "Guidelines for Tube Selection Removal and Examination".

(8) EPRI NP-6865 - L, 1991, "Steam Generator Tube Integrity, Vol. 1 : Burst test results and validation of rupture criteria".

(9) ASTM B811, 1997

(10) Fuchs, Steinberg, 1984, KWU Specification-NO RE-LE, 3384, 11

(11) Kyeong - Ho Kim, Min - Ku Lee, Chang - Kyu Rhee, Whung - Whoe Kim and Myeong - Yong Wey, 2003, "Effects of Final Annealing Temperatures on the Burst Strength of Nuclear Fuel Cladding", J. Kor. Inst. & Mater. Vol. 41, No. 10