

부식된 얇은 원통 압력용기의 파손 거동 해석

윤자문* · 최문오** · 안석환*** · 남기우**** · 安藤 柱*

* 요코하마국립대학

** 부산소방본부

*** 부경대학교 기계공학부

**** 부경대학교 신소재공학부

Analysis of Failure Behavior for Thin Cylinder Pressure Vessel with Corrosion

JA-MOON YOON*, MOON-OH CHOI**, SEOK-HWAN AHN***, KI-WOO NAM**** AND KOTOJI ANDO*

*Yokohama National University, Yokohama, Japan

**Busan Fire Services, Busan, Korea

***Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

**** Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Local wall thinning 국부감육, Failure behavior 파손거동, Pressure vessel 압력용기, Thin cylinder 얇은 원통, FEM 유한요소법

ABSTRACT: Failure behaviors of thin cylinder with corrosion are very important for the integrity of boiler and pressure vessel system. In this study, FEM with internal pressure are conducted on 1000 mm diameter (length 3000 mm and thickness, 5.9 mm) SS400 carbon steel. Failure behaviors of locally wall thinned cylinders were calculated by elasto-plastic analysis using finite element method. The elasto-plastic analysis was performed by FE code ANSYS. We simulated various types of local wall thinning that can be occurred at cylinder surface due to corrosion. Locally wall thinned shapes were machined to be different in size along the circumferential or axial direction of straight cylinder. In case of local wall thinned length 30 mm, internal pressure, when the crack initiation and the plastic collapse occur, didn't decrease dramatically even though local wall thinned depth was deep. In 400 mm, the more local wall thinned depth is deep, the more internal pressure decreased dramatically. In degraded materials, crack is easily initiation but plastic collapse was difficult.

1. 서 론

현재 보일러·압력용기 등에서는 얇은 원통이 많이 사용되고 있다. 그러나 장기간 사용함에 따라서 부식 등에 의하여 국부적으로 감육이 발생하고, 이러한 내압용기 등의 신뢰성이 저하할 가능성이 있다. 따라서 이와 같은 보일러·압력용기 등의 건전성 평가를 위하여 내압시험이 필요하지만, 이 경우 많은 경비가 필요하다.

본 연구에서는 얇은 원통의 파손 거동을 조사하기 위하여, 얇은 원통 외측에 원형의 감육을 도입하여 감육 깊이, 감육 직경 및 내압 등 3개의 변수를 변화시켜 유한요소해석을 실시하였다. 이 해석 결과를 토대로 감육부가 허용응력에 도달 할 때의 내압, 항복 할 때의 내압, 소성붕괴 할 때의 내압, 균열이 발생 할 때의 내압을 조사하였다. 이 4가지 평가 항목의 데이터를 정리 하여, 외측에 원형 감육이 있는 얇은 원통의 내압에 대한 파손 거동 평가를 조사하였다. 더욱이 장기간 사용에 따라 재료의 재

질이 열화 하였다고 가정하고 이 경우에도 내압에 따른 파손 평가를 조사하였다. 여기서는 이러한 해석 결과를 보고한다.

2. 해석 모델 및 해석과 평가방법

2.1 해석 모델

본 연구에서 대상으로 한 압력용기는 외측에 원형 감육이 있는 얇은 원통이다. 압력 용기의 길이 L 는 3000 mm, 내경 D 은 1000 mm, 판 두께 t 는 5.9 mm로 JIS규격 SS400 탄소강으로 제작했다고 가정했다. 감육 깊이 d 는 0.9~4.9 mm, 감육 직경 l 은 30~400 mm의 범위에서 변화시켰다. Fig. 1은 얇은 원통의 치수와 원형 감육 치수를 나타낸다. Table 1은 P00~P99까지 얇은 원통의 감육 조건을 나타낸다. P00와 P99는 각각의 판 두께가 5.9 mm 및 1 mm의 감육이 없는 건전체이다. 감육 직경은 P01~P05는 30 mm, P11~P15는 50 mm, P21~P25는 100 mm, P31~P35는 200 mm, P41~P45는 300 mm, P51~P55는 400 mm이다. 감육 깊이는 0.9 mm~4.9 mm이다.

남기우, 부산광역시 남구 용당동 100

051-620-1640 namkw@pknu.ac.kr

Table 1 Pressure Vessel Specimen

| No. | Eroded Diameter l (mm) | The Least Thickness t_s (mm) | Thickness t (mm) | Eroded Depth d (mm) |
|---------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| P00 | 0 | - | 5.9 | 0 |
| P01~P05 | 30 | 1.0 ~ 5.0 | 5.9 | 4.9 ~ 0.9 |
| P11~P15 | 50 | | | |
| P21~P25 | 100 | | | |
| P31~P35 | 200 | | | |
| P41~P45 | 300 | | | |
| P51~P55 | 400 | | | |
| P99 | 0 | - | 1.0 | 0 |

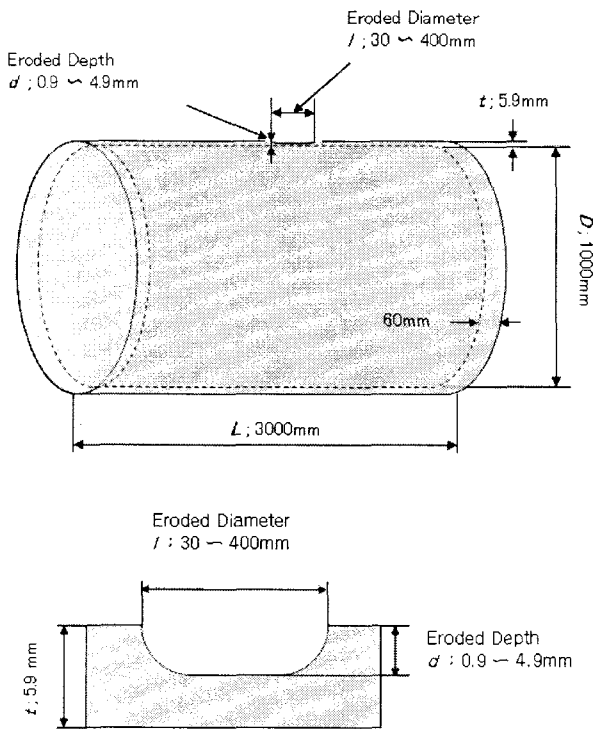


Fig. 1 Geometry of Pressure Vessel and Local Wall Thinning

2.2 해석방법

외측에 감육이 있는 얇은 원통에 0~5 MPa의 내압을 가하여 파손거동에 미치는 내압의 영향을 조사하였다. 감육부에 허용응력 100 MPa, 항복응력 250 MPa이 될 때와 소성붕괴 및 균열 발생 시의 내압에 중점을 두었다. 해석은 유한요소 프로그램 ANSYS ver. 8.1을 사용하였다. 매쉬 모델은 육면체 20절점요소와 사면체 10절점 요소를 사용하였다. 해석 모델 형상은 대칭성을 고려하여, 1/4모델을 사용하여 해석하였다.

2.3 평가방법

2.3.1 허용응력 및 항복응력에 도달 할 때

허용응력 및 항복응력의 해석결과는 von Mises응력으로 검토하였다. 전체적으로 최초로 허용응력 또는 항복응력에 도달하는 것은 감육의 모서리 부분이었다. 각각의 내압을 Fig. 2에 나타내었다.

2.3.2 소성붕괴 할 때

소성붕괴 시의 내압은 내압에 따른 감육부의 증가하는 변위로 결정하였다. 예측 되로 소성붕괴 시의 내압은 감육이 깊을수록, 감육 직경이 클수록 저하하였다.

2.3.3 균열발생 할 때

균열 발생의 예측은 Weiss의 이론¹⁾을 확장한 Miyazaki의 방법²⁾을 사용하였다. 이 예측 방법은 감육부의 상당 변형률(ϵ_{ms})이 다축응력하의 진파단연성(ϵ_{mf})을 초과하였을 때, 균열이 발생한다고 평가하여, FEM해석에 유용하게 적용할 수 있다³⁾.

3. 결과 및 고찰

3.1 감육 깊이 및 감육 직경과 내압과의 관계

Fig. 2에 감육 직경 30 mm, 400 mm의 경우, 내압과 감육 깊이와의 관계를 나타낸다. 실선은 감육 직경 30 mm, 점선은 감육 직경 400 mm이다. 감육 직경 30 mm의 경우, 감육 깊이가 깊을수록 균열이 발생하기 쉽고, 소성붕괴가 발생 할 때, 항복 할 때, 허용응력에 도달 할 때의 내압이 저하하는 것을 알 수 있다. 감육 직경 400 mm의 경우, 감육 직경이 30 mm와 마찬가지로 균열이 발생 할 때, 소성붕괴가 발생 할 때, 항복 할 때, 허용응력에 도달 할 때의 내압이 저하하는 것을 알 수 있다. 감육 직경이 30 mm의 경우, 감육 깊이가 깊어질수록 평가 항목들의 내압이 모두 완만하게 저하하지만, 감육 직경이 400 mm의 경우는 균열이 발생 할 때 및 소성붕괴가 발생 할 때의 내압이 급격하게 저하하는 것을 알 수 있다. 따라서 감육 깊이 및 감육 직경이 클수록 얇은 원통의 신뢰성이 떨어지는 것을 알 수 있다.

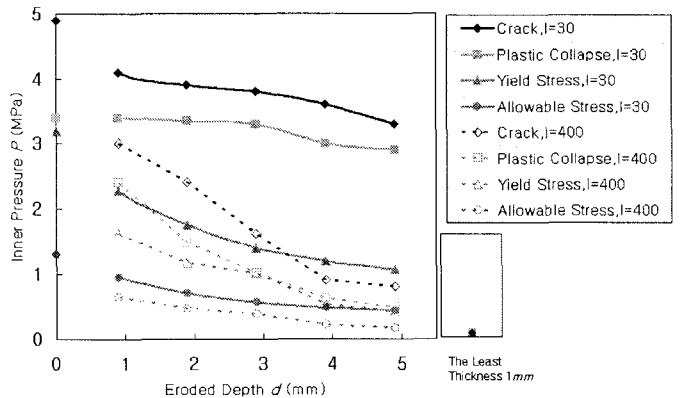


Fig. 2 Relationship between Inner Pressure and The Depth of The Local Wall Thinning and The Diameter of The Local Wall Thinning

판 두께 1 mm의 건전체의 결과는 Fig. 2의 우측에 나타냈다. 감육 깊이 4.9 mm, 즉, 최소 판 두께 t_s 가 1 mm의 결과와 비교하여 볼 때, 감육이 있는 경우의 박육원통이 판 두께 1 mm인 건전한 얇은 원통보다도 더 안전하다는 것을 알 수 있다.

3.2 재질 열화 전 및 재질 열화 후의 경우 비교

장기간 사용함에 따라 재질은 열화할 가능성이 있다. 따라서, 재질 열화한 경우의 파손 거동을 조사하기 위하여, 해석에 사용한 재료 특성을 변화시켰다. 재질 열화 전에 해석에 사용한 항복점은 250 MPa, 진파단응력은 700 MPa, 진파단연성은 0.8이었다. 그러나 변형 시효 등에 의해 재질 열화 후의 항복점은 287.5 MPa, 진파단응력은 586.5 MPa, 진파단연성은 0.25라고 가정하였다. 재질 열화에 의해 항복점을 약 15% 증가 시켰고, 진파단연성은 약 1/3로 감소 시켰다. Fig. 3은 내압이 3 MPa의 경우로 재질 열화 전의 경우와 재질 열화 후의 경우의 파손 평가를 비교를 나타낸다. 그림에서 각각의 선보다 감육 직경 및 감육율이 큰 경우에는 균열 발생 및 소성 붕괴가 발생하지만, 그 이외의 부분은 안전하다는 것을 나타낸다. 균열 발생의 경우, 재질 열화한 선이 재질 열화하지 않은 선보다 아래에 있으므로, 균열이 발생하기 쉽다는 것을 의미한다. 반대로 소성붕괴의 경우, 감육 직경 80 mm까지는 재질 열화한 선이 재질 열화하지 않은 선보다 아래에 있지만, 직경 80 mm이상의 경우는 반대로, 재질 열화된 경우가 소성붕괴하기 어렵다는 것을 알 수 있었다. 따라서 재질 열화한 경우는 감육 직경이 길수록 균열은 발생하기 쉽지만, 소성붕괴는 하기 어렵다는 것을 알 수 있다.

(2) 재질 열화하지 않은 경우와 재질 열화 한 경우와의 해석 결과 비교는 재질 열화 한 경우, 감육 직경이 길수록 균열이 발생하기 쉽지만, 소성 붕괴하기 어렵다는 것을 알았다.

참 고 문 헌

- 1) Weiss V., 1972, "Material Ductility and Fracture Toughness of Metals" Proc. 1st Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials, P.159.
- 2) Miyazaki, M., Nebu, A., Kanno, S., Ishiwata, M. and Hasegawa, K., 2002, "Study on Fracture Criterion for Carbon Steel Pipes with Local Wall Thinning," J. High. Pres. Inst., 40, pp. 6272.
- 3) Takahashi, K. Ando, K. Hisatsune M. and Hasegawa, K., 2004, "Fracture and deformation behaviors of tee pipe with local wall thinning under monotonic bending," Pressure Vessel and Piping Codes and Standards, PVP-Vol.480, pp. 381-386.

2006년 1월 1일 원고 접수

2006년 5월 1일 최종 수정본 채택

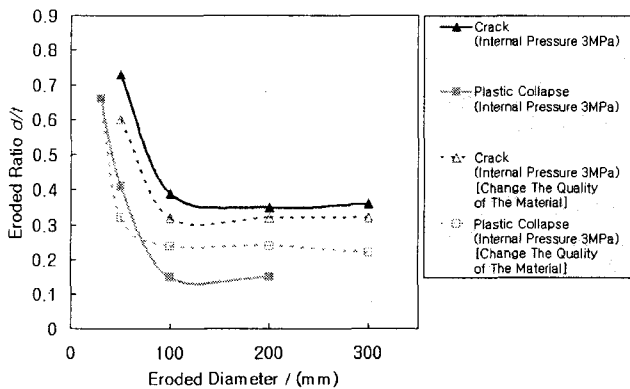


Fig. 3 Fracture Criterion of The Local Wall Thinning

5. 결 론

(1) 감육 직경 30 mm의 경우는 감육 깊이가 깊음에도 불구하고 균열 발생 및 소성 붕괴 시의 내압이 급격하게 저하하지 않았다. 감육 직경 400 mm의 경우는 감육 깊이가 깊을수록 균열 발생 및 소성 붕괴 시의 내압이 급격하게 저하하였다.