

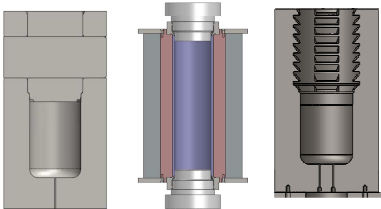
초고압 반응용기의 피로파괴 예방을 위한 설계 및 제조기법

박종범
 (주) 일신오토클레이브
 (jbpark@suflex.com)

1. Introduction

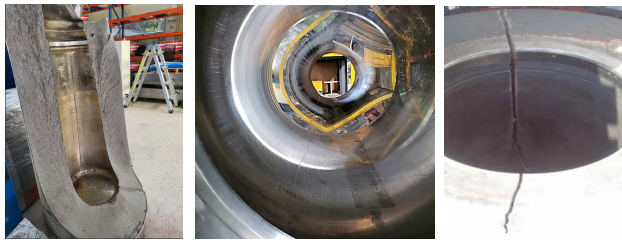
- 초고압 압력용기는 통상 유체의 반응, 저장 또는 합성, 분리의 목적으로 사용되는 밀폐용기로 정의되며 다양한 운전상태에 따라 내·외부적으로 복합적인 다양한 하중을 받는다.
- 최근 차세대 배터리 제조기술인 세라믹 이온전도체 기반 2차 전지 셀 제조 시 고밀도 치밀화 공정에 사용되는 정수압프레스의 용기 사용압력은 450MPa 이상으로 이는 반응용기 소재가 갖고 있는 고유 물성치인 항복응력에 가까운 응력이 발생되어 셀 제조에 필요한 초고압처리 과정에서 가압과 감압의 반복적인 하중으로 인한 초고압 용기의 피로파괴가 종종 발생되고 있다. 더욱이 초고압 용기의 피로파괴는 수명기준 공정 반복횟수가 수백만번 이상의 고속회전의 기계류나 항공기와 달리 수천번에서 수만번을 넘지 않는 경우에서 발생한다. 즉 가압 또는 감압에 의한 반복하중 횟수는 적지만 교번하중이 큰 상태의 피로현상으로 소성변형을 일으키지 않는 저 사이클 피로로서 교번소성이라 불리며, 항복변형도를 초과한 큰 변형이 발생할 수 있어 비유적인 부분과 장비의 안전성에 큰 문제가 될 수 있다.
- 따라서 이러한 문제점을 해결하고자 반응용기의 피로현상에 대한 동향과 영향요인에 대해 파악하고 반복하중 하에서 운전되는 압력용기의 내부 실린더와 외부 실린더의 임계부위에 대한 구조적 건전성 평가를 위해 부가된 잔류응력에 대한 강도이론설계와 수명과 관련된 피로해석 설계기법을 소개하고 내구성 향상을 위한 잔류 압축응력공법의 압력용기 제조기법을 기술하고자 한다.

정수압프레스 반응용기 종류



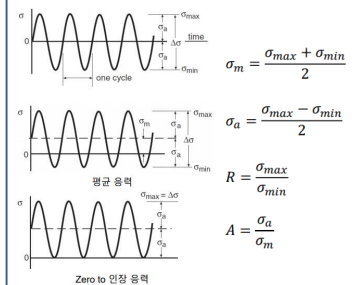
핀타입 클로우저타입 슬레드타입

반응용기 피로파괴 사진



가압 또는 감압의 반복적인 하중으로 인한 피로파괴 발생

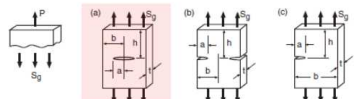
교번응력의 성질



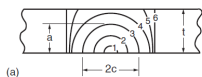
2. Theoretical Modeling(ASME SEC VIII, DIV3) & Residual compressive stress method

Concept of LBB(Leak Before Burst)

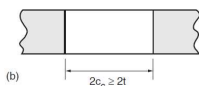
1. 압력용기의 균열은 압력변화와 연관된 반복하중의 영향 또는 재료에 발생하는 화학적인 침식에 의해 진전된다.
2. 균열은 보통 평면 결함에서부터 시작하여 아래 그림(a)에 나타난 것처럼 압력 용기의 벽면에 수직한 방향으로 최대응력이 작용할 때 진전된다.



압력용기 내부의 균열 종류

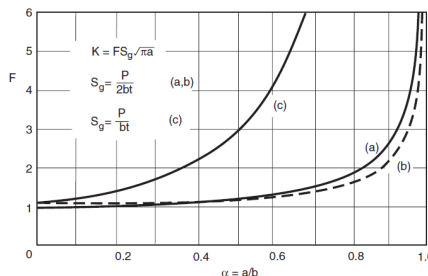
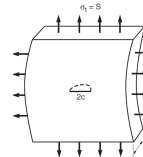


3. 진전초기에 균열은 대략적으로 균열 길이 a의 두배의 값을 가지는 면 길이 2c를 가지면서 진전된다.
4. 만약 취성파괴가 발생하지 않는다면, 균열의 진전은 (b)에 표현된 것처럼 면 길이 2c가 두께의 2배의 값, 2t를 가지는 결과로 관통 균열에 이르는 형태를 보이며 진전된다.

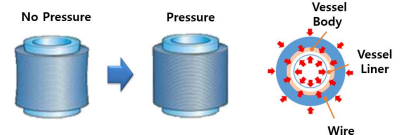


5. 만약 재료가 최소한의 관통 균열 크기를 견딜 수 있을 만큼 충분한 인성을 가지고 있지 않는 경우에는 균열이 벽을 관통하기 전에 갑작스런 취성파괴가 발생할 것이다. (Cc ≥ t)

$$c_c = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_t} \right)^2$$



잔류압축응력 원리 및 방법



[Residual Stress and Deflections in Cylinder due to Flat Wire Winding (KD-9)]

$$\sigma_r(x_1) = - \left[1 - \left(\frac{D_I}{x_1} \right)^2 \right] \int_{D_{I'}}^{D_w} \frac{x}{x^2 - D_I'^2} S_w(x) dx$$

$$\sigma_t(x_1) = - \left[1 + \left(\frac{D_I}{x_1} \right)^2 \right] \int_{D_{I'}}^{D_w} \frac{x}{x^2 - D_I'^2} S_w(x) dx$$



열박음공법-1차

와이어와인딩공법-2차

3. Conclusion

- ❖ 450MPa이상의 압력을 사용하는 초고압용기 설계에 있어 교번하중으로 인한 피로파괴를 방지하기위해 파단 전 누설 설계(LBB)는 압력강화나 용기 내용물의 유출로부터 쉽게 사용자가 발견할 수 있기 때문에 압력용기의 안전을 위해 필수적으로 설계에 반영이 되어야 하며, 압력용기 균열에 대한 부분은 응력확대계수 참고하여 면밀히 검토되어야 한다.
- ❖ 또한 초고압 압력용기의 안정성과 내구성을 확보하기 위한 방법으로 이중 실린더 사이에 잔류압축응력을 부가하는 열박음 또는 와이어와인딩 공법을 활용하는 제조기술이 산업계에 적용되고 있다.