



초고압 압력용기에서 메탈시일의 설계 안전성에 관한 연구

†김 청 균

홍익대학교 기계시스템디자인공학과
(2004년 12월 22일 접수, 2005년 2월 11일 채택)

A Study on the Design Safety of Metal Seals in High Pressure Vessels

†Chung Kyun Ki

Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University
(Received 22 December 2004, Accepted 11 February 2005)

요 약

본 논문에서는 고압용기의 밀봉을 위해 사용하는 메탈시일의 설계 안전성에 대한 연구결과를 제시하고 있다. 기본적으로 고압용기의 1차적 밀봉은 메탈시일에 의해 이루어지고, 2차적 밀봉은 탄성체 고무로 제작된 O-링에 의해 가스누출이 차단된다. 유한요소해석 결과에 의하면, 가스누출을 위해 사용한 알루미늄 소재의 밀봉장치는 강재를 사용한 경우보다 우수한 밀봉성을 보여주고 있다. 이것은 알루미늄 소재의 열팽창 특성이 상대적으로 우수하기 때문이다. 메탈시일과 압력용기 구조물에 걸리는 변형과 응력 분포는 외부에서 공급된 가스압보다는 용기 내부에서 전달된 온도차에 의해 크게 지배를 받는 것으로 알려져 있다. 따라서 메탈시일의 소재는 통상적으로 200°C 이하로 유지되는 것이 소재의 강도와 밀봉성 측면에서 안전하다.

Abstract – This paper presents the design safety of metal seals in pressure vessels. For a high-pressure vessel, a metal seal is usually used as a primary sealing, and an elastomeric rubber O-ring is adopted as a secondary sealing unit. The FEM computed results show that an aluminium material for sealing a gas leakage is superior to a steel one because of the thermal expansion rate. The deformation and stress distributions on the metal seal and pressure vessel structures are mainly dominated by transferred temperature compared to those of the gas pressure in which is supplied by an external pump. Thus, the temperature of a metal seal material should be restricted to under 200°C.

Key words : Metal seal, Pressure vessel, Design safety, Gas pressure, Transferred temperature

I. 서 론

압력용기(pressure vessels)는 용기내부의 압력을 대기압보다 높게 유지하기 위한 구조물로 보통은 가스, 액체와 같은 작동유체를 사용하여 압력을 올려준다. 압력용기에 저장된 유체는 외부로 방출하여 작동유체로 사용하던지, 또는 용기 내부에 공작물을 넣어 물리적 가공을 위한 압력소스로 활용된다. 이러한 압력용기는 내부에 걸리는 압력정도에 따라 위험성도 크게 달라지는데, 특히 작동유체가 액체인 경우보다는 가스인 경우가 운동 에너지 증가로 인한 위험성이 더 높다.

따라서 압력용기는 ASME VIII의 압력용기 설계기준[1]을 따라서 제작하도록 강제하고 있으며, 공신력을

갖춘 기관으로부터 안전검사를 받도록 한다. 이것은 압력용기의 강도저하로 인한 폭발사고를 미연에 방지하여 인명이나 재산피해를 줄이고자 하는 최소한의 안전대책이다. 우리나라에서도 일반 산업용 압력용기는 한국산업안전공단에서, 그리고 가스용 압력용기는 한국가스공사에서 각각 안전성 검사를 전담하고 있다.

압력용기는 유체를 단순히 밀봉·저장하는 기능이 대부분이지만, 특별한 경우는 용기에 가스를 고압으로 충전한 상태에서 내부에 열원을 공급·가열하게 되면 공작물을 가공할 수 있는 또 다른 작업공간으로 활용할 수 있다. 따라서 압력용기 내부의 작업공간에 공작물을 넣어둔 상태에서 용기 내부에 고온과 고압을 동시에 가하게 되면, 용기에 내장된 공작물의 기계적 특성은 변하게 된다. 이러한 압력용기의 압력조건과 온도 조건은 구조물에 걸리는 응력이 ASME에서 규정한 응

†주저자:ckkim@wow.hongik.ac.kr

력범위 이내에 있어야 한다. 특히 구조물을 연결하는 각 부분에 대한 밀봉성을 완벽하게 확보해야 압력용기의 안전성이 확보된다[2].

본 연구에서는 압력용기의 밀봉성을 안전하게 보장할 수 있는 밀봉장치에 대한 설계 안전성을 해석하고자 한다. 이것을 위해 본 연구에서는 초고압과 온도하중을 동시에 받는 압력용기 구조물에 유한요소법을 적용하여 밀봉소재의 변형량과 응력거동을 해석하고, 설계 안전성을 고찰하고자 한다.

II. 밀봉장치

압력용기는 가스압력에 의해 구조물에 걸리는 응력을 균일하게 분포하도록 설계하여 강도 안전성을 확보할 수 있도록 원통형(cylinder)으로 제작된다. 본 연구에서 고려한 압력용기는 플랜지를 열고 닫을 수 있도록 제작한 구조물로 가스압력을 밀봉하기 위해 Fig. 1에서 보여준 것과 같이 플랜지의 하단부에 설치한 밀봉소재 Ⅰ와 압력용기 구조물의 내측면에 부착된 밀봉소재 Ⅱ와의 축방향 밀봉간극 h 에 의해 1차적으로 밀봉작용을 한다. 동일한 밀봉소재 Ⅰ와 밀봉소재 Ⅲ의 반경방향 밀봉간극 e 에 의해 2차 밀봉을 하도록 설계되어 있다. Fig. 1에서 1차와 2차 밀봉작용은 메탈소재에 의해 이루어지지만, 1차와 2차 밀봉간극을 통과한 작은량의 누출가스는 상부의 O-링에 의해 차단하도록 탄성체 시일을 설치하여 압력용기 구조물의 누출 안전성을 완벽하게 보장한다.

압력용기 구조물이 고온에 노출되면 기계적 강도저

하에 의한 강도와 밀봉 안전성을 크게 위협받기 때문에 Fig. 1에서 보여준 것처럼 온도는 원통형 단열재(cylindrical insulator)에 의해 차단되도록 제작되어 온도하중에 의한 기계적 강도를 보장한다. 압력용기 구조물은 기계적 강도가 높은 강재(SKD61)로 제작하여 고압가스나 고온조건에 잘 견디도록 한다.

압력용기 구조물의 내측에 설치한 단열재에 의해 구조물에 작용하는 온도를 100~200°C로 유지하게 되면, 상온보다는 크게 높지만 사용소재의 기계적 강도에 미치는 영향은 작기 때문에 통상적인 압력용기 설계에는 큰 문제가 없다. 구조물에 작용하는 온도하중에 의한 열적 안정성은 열팽창 특성과 기계적 강도에 의해 안전성을 동시에 고려해야 한다. 압력용기의 작동유체로 가스를 사용하여 압력을 상승하는 경우는 밀봉장치에 대한 안전설계를 엄격하게 수행해야 한다. 특히 용기에 작용하는 압력이 2000 bar 정도의 초고압이 작용하는 경우는 보통의 탄성체 고무(elastomeric rubber)로 제작한 밀봉장치로는 가스압을 견딜 수 없으므로 메탈시일(metal seal)에 의해 차단하고, 저압은 NBR, FKM과 같은 탄성체 고무를 사용하여 완벽하게 밀봉한다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 1에서 보여준 것과 같이 알루미늄 소재로 제작한 디스크 형상의 메탈시일 구조물 Ⅳ를 설치하여 고압가스 누출을 차단한다. 알루미늄 소재는 변형 거동성과 온도 팽창성이 우수하기 때문에 일정한 압력이 가해지면 굽힘에 의한 접촉 밀봉력이 1차적으로 모델 I과 같이 발생하고, 소재에 전도되는 온도하중에 의해 소재가 반경방향으로 팽창하면서 압력용기 구조물의 내경측과 접촉 밀봉되면서 모델 II와 같이 2차로 가스누출을 적극적으로 차단한다.

초고압 압력용기의 밀봉은 플랜지 하단부에 설치한 메탈소재 Ⅰ에 의해 고압측 가스의 외부누출을 축방향과 반경방향으로 차단하지만, 메탈소재에 의한 밀봉은 압력용기에 작동가스를 충전 또는 방출하는 과정에서 압력이나 온도하중을 충분히 받지 못하기 때문에 부분적인 가스누출은 불가피하다. 따라서 저압의 가스가 누출하는 것을 차단하기 위해 탄성체 O-링 2개를 설치하여 누설 안전성을 3차로 보장한다. 압력용기에서 초고압의 가스누출을 차단하기 위한 밀봉장치는 메탈시일에 의한 1, 2차밀봉과 고탄성 O-링에 의한 3차밀봉을 담당하게 하여 Fig. 1과 같은 압력용기의 밀봉성을 완벽하게 확보하도록 하였다.

III. 해석모델 및 해석조건

압력용기에 대한 강도설계 안전성을 해석하기 위해

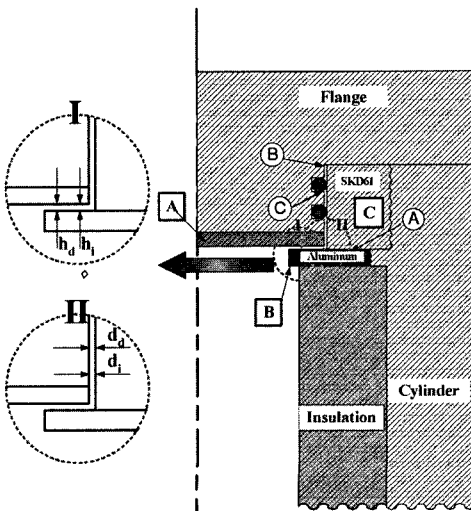


Fig. 1. General view of pressure vessels with sealing units.

온도하중과 가스압력을 동시에 고려한 비선형 유한요소 해석[3]을 위해 Fig. 2에서 보여준 것과 같은 유한요소 해석모델과 경계조건을 사용하였다. 구조물의 강도 안전성을 효율적으로 해석하기 위해 2차원의 축대칭 해석모델을 사용하였고, 압력용기에 작용하는 가스압력과 온도하중은 모든 소재에 균일하게 작용하는 것으로 간주하였다.

압력용기에 작용하는 가스압력과 온도조건은 Fig. 3에서 제시한 운전조건 결과를 적용하여 압력용기 구조물에 대한 설계 안전성의 유용성을 높였다. 즉, 압력용기를 한번 사용하는데 걸리는 총시간은 10hr를 기준으로 설계하였다. 압력용기에 가해지는 10시간에서 가스와 온도를 올리기 시작한 후 3시간 정도가 경과하면 용기의 압력과 온도는 2,000 bar와 1,500°C로 상승하여 최

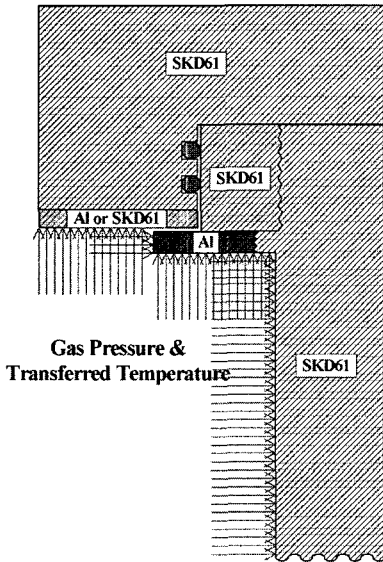


Fig. 2. Boundary conditions for FEM analysis.

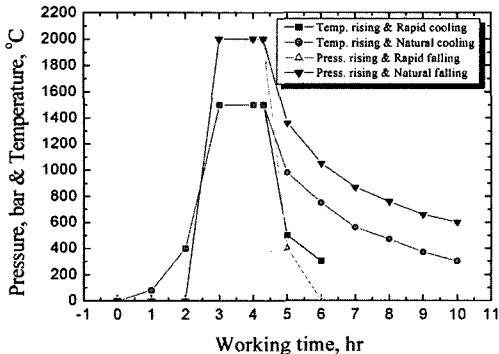


Fig. 3. Gas pressure and temperature conditions.

고의 작동조건에 도달한다. 이러한 최고의 작동조건에서 2시간 정도를 일정하게 유지하다가 온도는 0~11°C/min의 냉각속도로 온도를 서서히 떨어뜨리고, 동시에 압력은 0~22.2 bar/min의 감압속도로 압력을 내린다. 이렇게 압력용기 구조물은 1차적으로 온도와 압력을 상승하고, 2차적으로 최고압력과 초고온도에서 일정시간 유지하다가 냉각과 가스방출 조건을 따라서 초기의 대기압과 상온상태로 되돌아오는 작업공정을 반복하게 된다.

IV. 해석결과 및 고찰

4.1. 변위분포

압력용기에서 변위량은 온도하중과 압력에 의해 발생하는 접촉면압, 즉 밀봉력을 발생시키는 중요한 설계 파라미터이다. 따라서 압력용기 안전설계에서 변위량은 중요하게 다루는 설계요소로 구조물의 강도와 밀봉성을 적절히 유지될 수 있도록 소재의 선정과 최적설계는 적절히 조화를 이루어야 한다.

Fig. 1과 같은 압력용기 모델에 적용된 작동조건을 보면, 압력용기 구조물에 작용한 허용온도는 100°C이고, 최고압력은 1,000~2,000 bar이다. 압력용기에 작용하는 전체 작업 사이클은 Fig. 3에서 제시한 것처럼 가열/승압, 최고온도/최고압력의 유지, 냉각/감압의 과정을 10시간에 걸쳐서 진행한다고 가정하고 설계 안전성 문제를 해석하였다.

Fig. 4의 변위비(displacement ratio) 해석결과는 Fig. 1에서 표시한 I지역에서 가스압력과 100°C의 표면온도가 작용하면서 발생된 플랜지 하단부의 밀봉소재 A와 압력용기 B 구조물 사이의 밀봉간극 변화량 h_d 를 A와

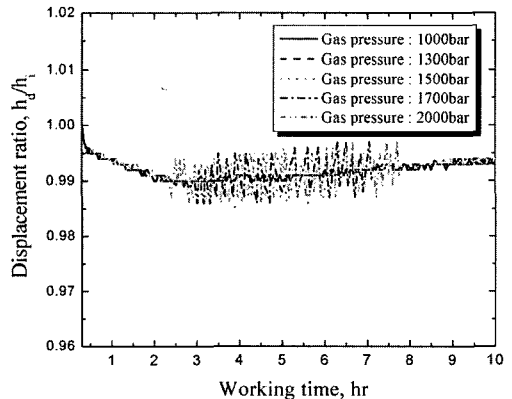


Fig. 4. Displacement ratio, h_d/h_i of sealing material, Al at I zone of Fig. 1 as functions of gas pressure and working time.

Fig. 3에서 제시한 압력용기의 작업시간 10시간에 걸쳐서 발생된 무차원 변위비 h_d/h_i 는 Fig. 4에서 0.986~0.998로 계산되었다. 이러한 변위비 해석결과는 플랜지 Ⅱ의 밀봉소재로 사용한 알루미늄은 가스압력(1,000~2,000 bar)을 받아 초기의 밀봉간극으로 설계된 $h_i = 1.0 \text{ mm}$ 에서 2~14 μm 정도가 줄었다는 것을 의미한다. 즉, 초기에 접촉하던 밀봉간극이 온도하중과 가스압력에 의해 줄어들면서 이들 두 소재사이의 접촉면압은 상대적으로 높아져 밀봉성능은 그 만큼 증가되었다는 것이다. Fig. 4에서 가스압이 1,000~1,500 bar 정도로 작용하면, 밀봉간극은 비교적 고르게 분포하여 안정되어 있지만, 가스압이 1,500 bar 이상으로 올라가게 되면 상대적으로 불균일한 접촉면 거동상태를 나타낸다. 무차원 변위비 h_d/h_i 이 불균일하게 분포하는 것은 변형성이 안정된 강재(steel)에 비하여 알루미늄 소재의 낮은 강성도로 변형량이 불균일하게 발생하는 접촉거동 특성 때문이다.

Fig. 5는 10시간의 작업시간 동안에 압력용기의 내부에 가해지는 압력을 1,500 bar로 일정하게 유지하고, 압력용기로 전달된 표면온도가 변하는 경우에 대한 무차원 변위비 h_d/h_i 의 해석결과를 보여준다. 압력용기에 작용하는 온도하중이 100~500°C로 변화할 때, 알루미늄 밀봉소재 Ⅱ와 압력용기 구조물 Ⅲ 사이의 밀봉간극 변형비율 h_d/h_i 의 해석결과에 의하면, 밀봉소재에 온도가 가해지면서 알루미늄은 열팽창에 의해 늘어나면서 강도저하가 발생된다. 따라서 변위량 무차원량은 0.97~0.99로 변하고, 실질적으로 초기간극은 줄어들어 밀봉작용을 하게 된다. 즉, 초기간극 $h_i = 1.0 \text{ mm}$ 에서 3 μm 정도가 줄었다는 것을 의미한다.

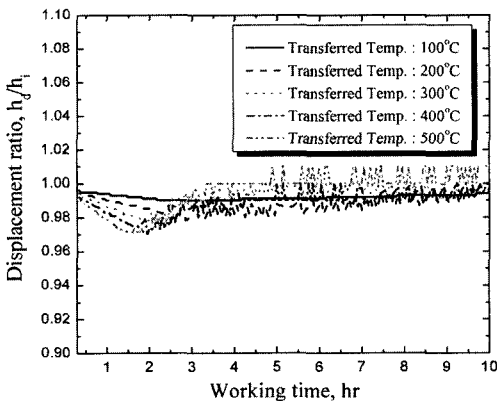


Fig. 5. Displacement ratio, h_d/h_i of sealing material, Al at I zone of Fig. 1 as functions of transferred temperature and working time.

Figs. 4와 5의 해석결과에 의하면, 플랜지의 하단부에 설치한 알루미늄 디스크 Ⅱ와 압력용기 구조물 Ⅲ 사이의 밀봉작용은 단열체에 의해 낮은 온도조건(100°C)을 유지하는 온도하중에 의해 발생된 반경방향의 변위량(1~3 μm)에 의하기보다는 초고압 하중조건에 의해 보다 많은 축방향의 변형 거동량(2~14 μm)이 발생되어 가스압력에 의한 축방향의 메탈밀봉 작용을 원활하게 이루어지고 있음을 알 수 있다.

Figs. 6과 7은 2차 밀봉장치에 가스압력과 온도하중이 미치는 영향을 파악하기 위한 해석결과이다. Fig. 1의 II지역에서 플랜지 하단부에 설치한 밀봉소재 Ⅱ의 외경측과 압력용기 구조물 Ⅲ의 내경측 사이에 반경방향으로 존재하는 밀봉간극을 설계기준 간극으로 나누어 무차원 d_d/d_i 의 해석결과를 제시하고 있다.

Fig. 6은 10시간의 작업시간 동안에 압력용기 구조물에 전달된 표면온도를 100°C로 균일하게 유지한 상태에서 압력용기에 가해진 압력을 1,000~2,000 bar로 변화시키면서 변위량에 대한 해석결과를 보여준다. Fig. 1의 d_d 는 압력용기 II지역에서 밀봉소재 Ⅱ의 외경측과 압력용기의 내경측 사이를 나타내는 초기간극이고, d_i 는 이들 두 구조물이 100°C의 일정한 온도로 유지된 상태에서 가스압력 1,000~2,000 bar에 의해 변형된 거리를 각각 나타낸 것이다. Fig. 6의 해석결과에 의하면, 플랜지 하단부의 밀봉소재 Ⅱ를 알루미늄 소재로 사용하면 강재(SKD61)를 사용하는 경우에 비하여 d_d/d_i 가 높게 나타났다. 이것은 강도 안전성 측면에서 유리한 강재에 비하여 알루미늄 소재를 사용하게 되면 반경방향의 변형거동이 잘 일어나므로 밀봉성 확보가 유리하다는 것이다.

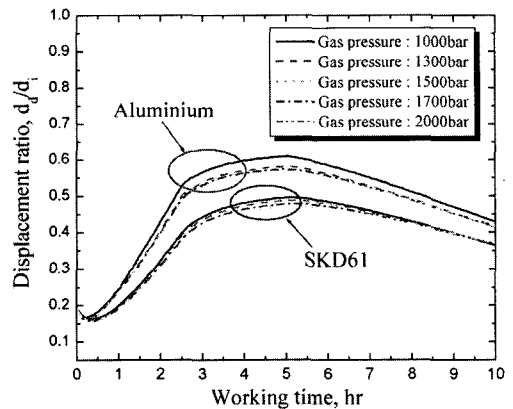
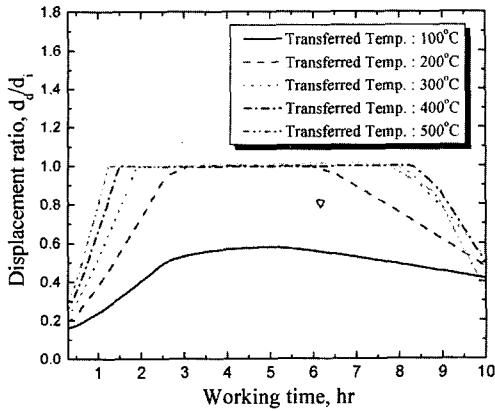
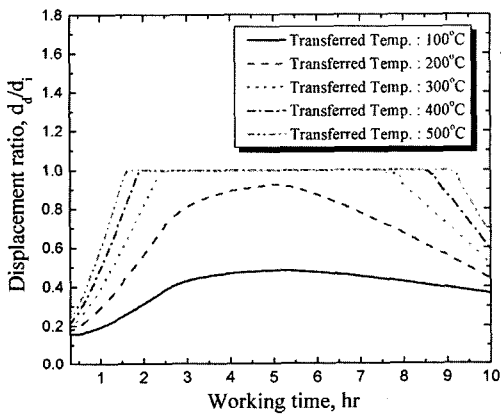


Fig. 6. Displacement ratio, d_d/d_i of sealing material, Al at II zone of Fig. 1 as functions of gas pressure and working time for a transferred temperature of 100°C.



(a) Al, sealing material of ㉠



(b) SKD61, sealing material of ㉠

Fig. 7. Displacement ratio, d_0/d_1 , of sealing materials, Al and SKD61 at II zone of Fig. 1 as functions of transferred temperature and working time for a gas pressure of 1500 bar.

Fig. 7은 밀봉소재 ㉠에 작용하는 온도하중에 의한 밀봉성의 영향을 고찰한 결과이다. 즉, 압력용기에 가해진 압력을 1,500 bar로 일정하게 유지한 상태에서 압력용기를 Fig. 3에서 제시한 10 hr의 작업시간 동안에 압력용기의 걸리는 표면온도를 100~500°C로 변화시켰다. 밀봉소재 ㉠을 알루미늄으로 사용하는 경우의 해석결과를 Fig. 7(a)에서 제시하는데, 밀봉소재에 가해진 온도조건이 상승하면 변형량은 크게 증가하여 밀봉성능을 향상시키는 해석결과를 보여준다. 그러나, 밀봉소재를 강재(SK61)로 사용한 경우는 온도하중에 따라 밀봉성이 증가하는 경향을 보이지만, 알루미늄 소재에 비하여 변형 거동성이 떨어진다. 이것은 소재의 열팽창특성에 의해 나타나는 것으로 강재는 강도 안전성에서 우수성을 보이지만, 밀봉성에서는 알루미늄 소재를 사

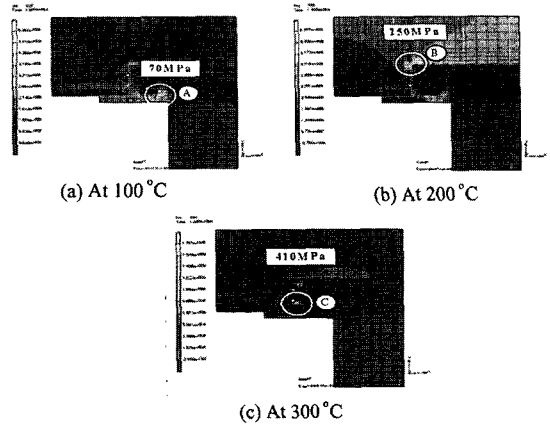


Fig. 8. Maximum von Mises stress distributions of pressure vessel with temperature variations after 5 working hours.

용하는 것이 좋다는 결과를 Figs. 6과 7의 해석결과에서 잘 나타내고 있다.

4.2. 응력분포

Fig. 8은 플랜지 하단부의 밀봉소재 ㉠을 알루미늄으로 사용한 경우에 대한 응력 분포도를 보여주고 있다. 압력용기에 가해지는 가스압력이 1,500 bar이고, 전달된 온도가 100~300°C일 때 압력용기에서 발생한 von Mises 응력분포를 보여주고 있다. 해석결과에 의하면 표면의 온도를 100°C로 유지할 경우, von Mises 최대응력은 ㉠의 위치에서 70 MPa 정도 발생하고, 200°C로 올라가게 되면 ㉡지역에서 250 MPa의 높은 최대응력이 발생한다. 계속하여 전달된 온도를 300°C로 높이면, 410 MPa 정도의 von Mises 최대응력이 ㉢지역에서 발생하여 최대응력이 걸리는 위치가 온도하중에 따라 변동하고 있음을 제시하고 있다.

Fig. 9는 압력용기 구조물에 전도된 표면온도가 100°C일 때, 압력용기의 밀봉 구조물에서 발생한 von Mises 최대응력 σ_{max} 을 밀봉소재의 항복응력 σ_y 로 나눈 무차원 응력비 σ_{max}/σ_y 의 해석결과를 보여준다. 해석결과에 의하면, von Mises 최대응력은 Fig. 1의 ㉠지역에서 발생하고, 압력용기에 가해지는 압력이 증가함에 따라서 완만한 증가를 보여준다. 압력용기에 걸리는 최고 압력을 2000 bar로 설계하였기 때문에 플랜지의 밀봉소재로 알루미늄(또는 SKD61)을 사용하여도 압력용기에 걸리는 최대응력이 $\sigma_{max}/\sigma_y < 0.38$ 이기 때문에 밀봉용기 구조물의 강도 안전성에는 문제가 없다. 플랜지의 밀봉소재로 알루미늄을 사용한 경우가 강재(SKD61)에 비하여 높은 응력비 σ_{max}/σ_y 를 나타내는데, 이것은 알루미늄

늘 소재의 열팽창 계수가 높기 때문에 발생한 열응력 결과로 알루미늄 소재의 경우가 밀봉성이 높게 나타나 는 결과와 일치한다.

Fig. 10은 압력용기에 가해지는 가스압력이 1,500 bar로 일정할 때, 구조물에 전도된 표면온도가 100~300°C로 변화하면서 발생한 von Mises 최대 응력비 σ_{max}/σ_y 의 해석결과를 제시하고 있다. 여기서 제시한 온도조건은 100~300°C로 변화되지만, 그 때의 온도로 유지된 경과시간은 모두 5시간을 기준으로 von Mises 최대응력이 걸리는 위치와 크기는 각각 다르게 나타내고 있다. Fig. 10의 해석결과에 의하면, 압력용기에 걸리는 온도가 100°C일 때는 ①위치에서 최대 von Mises 응력이 걸리는 것으로 나타났고, 이 때에 걸리는 응력의 대

부분은 온도하중보다는 가스압력에 기인한 것으로 나타났다. 온도를 200°C로 올리게 되면, ②의 위치에서 von Mises 최대응력이 발생하고, 플랜지의 밀봉소재를 알루미늄으로 사용한 경우가 강재를 사용한 경우보다 온도하중의 영향을 더 많이 받아 σ_{max}/σ_y 가 높게 나타났다. 온도를 300°C로 더 올리게 되면, 알루미늄 소재의 경우는 ③에서, 그리고 강재의 경우는 ④위치에서 최대응력이 각각 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 압력용기 구조물의 온도를 300°C로 올리게 되면, 압력비가 $\sigma_{max}/\sigma_y > 1.0$ 로 되어 구조물의 안전성을 더 이상 보장할 수 없기 때문에 압력용기의 밀봉소재로 인한 강도 안전성에 문제가 될 가능성이 대단히 높아 실제로는 사용할 수 없다.

Figs. 9와 10의 해석결과에 의하면, 압력과 온도하중에 의한 압력용기 구조물의 강도 안전성은 가스압력보다는 온도하중에 더 민감하게 반응하고 있음을 보여준다. 즉, 구조물에 전달된 표면온도가 100°C인 상태에서 가스압력을 올려도 구조물의 강도 안전성에는 큰 문제가 없는 것으로 나타났다. 그러나, 1500 bar의 높은 가스압력 상태에서 운전되는 압력용기 구조물의 표면온도를 300°C 정도로 올리게 되면, 강도 안전성에서 문제가 있다. 따라서 압력용기의 온도하중을 200°C 이하로 유지해야 최대응력이 비교적 안정된 강도 안전성을 보여주기 때문에 이 점을 고려하여 안전설계와 운전조건을 선정하도록 해야 한다.

V. 결 론

초고압 압력용기에 대한 밀봉장치의 설계 안전성을 고찰하기 위해 플랜지에 설치한 메탈시일 소재의 변형 거동과 접촉응력을 유한요소법으로 해석하였다. 압력용기에 공급된 가스압력과 용기의 내부온도를 단열재에 의해 완벽하게 차단하지 못해 용기 구조물로 전달된 온도하중에 의해 메탈시일은 축방향의 밀봉력을 1차적으로 발생시키고, 동시에 반경방향의 밀봉력을 발생시켜 가스누출을 거의 차단한다. 그러나 메탈시일은 작동의 초기와 말기상태에서 신속한 변위거동을 하지 못하기 때문에 불가피하게 누출하는 미량의 가스는 탄성체 O-링에 의해 차단된다.

해석결과에 의하면, 메탈시일의 밀봉소재로 알루미늄 소재를 사용하는 것이 강재를 사용하는 경우에 비하여 우수한 밀봉성을 보여주고 있다. 압력용기에서 가스압력에 의한 밀봉성 유지보다는 온도하중에 의한 영향이 더 크게 나타났고, 특히 온도가 300°C 이상으로 상승하면 압력용기에 사용된 밀봉소재의 강도 안전성

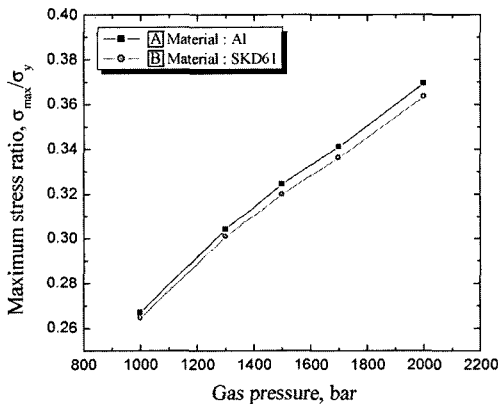


Fig. 9. Stress ratio, σ_{max}/σ_y , between maximum von Mises stress and yield stress at position ① in Fig. 1 as a function of gas pressure after 5 working hours.

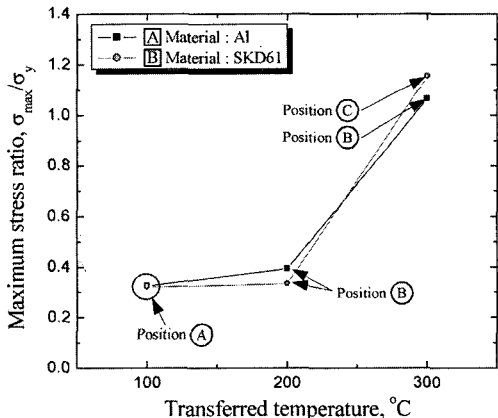


Fig. 10. Stress ratio, σ_{max}/σ_y , between maximum von Mises stress and yield stress at positions ①, ② and ③ in Fig. 1 as a function of transferred temperature after 5 working hours.

에 문제가 되는 것으로 나타나 밀봉소재를 선정할 경우는 온도특성을 강도보다 엄밀하게 고려하여 200°C 이하로 설계하는 것이 필요하다.

참고문헌

- [1] 2004 ASME Boiler & Pressure Vessel Code, ASME, (2004)
- [2] 조승현, 김성원, 김청균, “형상변화에 따른 가스압력 용기의 응력거동특성 연구”, 한국가스학회 춘계학술대회 논문집. 96-104, (2002)
- [3] MARC Analysis, Ver. 7.3, (1999)