

O-링이 장착된 가스압력용기의 밀봉특성에 관한 연구

†김 청 균 · 조 승 현

홍익대학교 기계·시스템디자인 공학과
(2003년 9월 17일 접수, 2003년 9월 22일 채택)

A Study on the Sealing Characteristics of O-rings in Gas Pressure Vessel

Chung Kyun Kim and Seung Hyun Cho

*Department of Mechanical and System Design Engineering
Hongik University, Seoul 121-791, Korea*

(Received 17 September 2003 ; Accepted 22 September 2003)

요 약

본 논문에서는 압력용기의 밀봉성과 밀접한 관계를 맺고 있는 O-링 그루브 형상의 온도 분포와 변형거동 특성에 대한 연구를 수행하고자 한다. 압력용기에 작용하는 온도는 히터에 의해 가열되고, 압력은 가스 압축기에 의해 가압된다. 결국, 압력용기는 제한된 작업기간동안 높은 압력과 높은 온도를 유지해야 한다. 이러한 작동조건에서 압력용기의 가스는 구형 그루브에 설치된 두 개의 O-링에 의해 대기중으로 누출되지 말아야 한다. 유한요소해석 결과에 의하면, 압력용기의 밀봉성을 확보하기 위해서는 메탈 시일 소재의 열적, 기계적 특성이 대단히 우수해야 한다는 사실을 지적하고 있다. 즉, 메탈 시일 소재는 높은 열전도 계수와 낮은 기계적 강도를 유지해야 밀봉성을 유지하는데 유리하다. 이러한 소재는 O-링을 설치하는 구형 그루브의 밀봉간극이나 그루브의 폭을 줄여줄 수 있기 때문에 압력용기의 밀봉특성을 향상시키게 된다.

Abstract - This paper presents the temperature distribution and deformation characteristics of O-ring groove geometry in which is strongly related the sealing performance of pressure vessels. A working gas in pressure vessel may be heated by a heater and pressurized by a gas compressor. Thus, the pressure vessel should keep high pressure and temperature for a limited working period. For these operation conditions, the working gas in pressure vessels should not leak to the air by two O-rings with a rectangular groove. The FEM computed results indicate that the thermal and mechanical properties of metal sealing material is very important for stopping a leakage of hot gas in a vessel. Based on the results, high thermal conductive and low mechanical strength material is recommended as a metal sealing one. This may improve the sealing characteristics of O-ring sealing mechanism with a rectangular groove, which reduces the sealing gap between a flange and a cylinder and the width of O-ring groove.

Key words: Sealing characteristic, O-rings, Gas pressure vessel, Rectangular groove

1. 서 론

압력용기는 가스나 액체를 안전하게 저장하여 운반하거나, 특정 위치에 설치한 상태에서 연료 또는 작동유체를 저장하기 위한 안전 구조물을 말한다. 압력용기는 대기압보다 높은 압력을 유지하는 관계로 가스압에 의한 용기의 팽창·폭발 가능성이 상존하므로 모든 나라는 특별히 설계 안전성에 대한 규제를 가하고 있다[1].

이러한 고압가스 압력용기는 ASME 압력용기 설계 기준에 따라 안전성을 충분히 확보해야 하고, 관계 기관으로부터 설계검토 및 안전성에 대한 허가를 받아야 한다. 압력용기를 ASME 기준에 따라 설계와 제작을 진행하면 용기 구조물에 대한 안전성 문제는 없다. 고압가스가 저장된 압력용기의 내부와 외부를 연결하는 개폐구, 밸브 등의 밀봉에 관련된 설계기술은 압력용기의 사용 안전성에 직결되기 때문에 중요하게 다루어야 한다. 압력용기 사고의 대부분이 압력용기의 플랜지나 밸브 등에 연결된 밀봉장치에서 일어나기 때문에 압력용기의 밀봉 설계를 어떻게 하였느냐가 가스 압력용기의 안전성을 보장하는 지름길이 된다.

특히, 압력용기의 가스압력이 대단히 높은 경우는 밀봉장치에 대한 안전설계의 중요성이 크게 강조되어야 하고, 밀봉장치에 대한 신뢰성이 높은 밀봉 메카니즘이 확보되어야 한다. 높은 가스압력을 유지해야 하는 압력용기에 대한 밀봉 설계기술은 다양하게 개발되었는데, 가장 흔하게 사용하는 밀봉 메카니즘으로 폴리머 O-링에 의한 저·중압, 패킹에 의한 중·고압, 에너지라이저 시일(energizer seal)에 의한 고압, 메탈 시일에 의한 고압·초고압 등이 활용되고 있다. 그러나, 우리나라의 밀봉기술은 선진국에 비해 크게 떨어지는 관계로 낮은 단계의 밀봉기술을 확보하고 있으며, 이들 압력도 신뢰성 높은 내구성을 보장하지는 못한다.

따라서, 본 연구에서는 초고압 압력용기 구조물의 밀봉장치에 대한 설계 안전성을 비선형 유한요소법으로 해석·고찰하고자 한다. 높은 압력과 온도에서 작동하는 압력용기의 밀봉 특성을 고찰하기 위해서 O-링이 설치된 구형 그루브의 변형거동 특성과 온도분포를 수치적으로 해석하여 메탈 시일의 특성을 고려한 압력용기의 밀봉성에 대한 안전성을 검토하고자 한다.

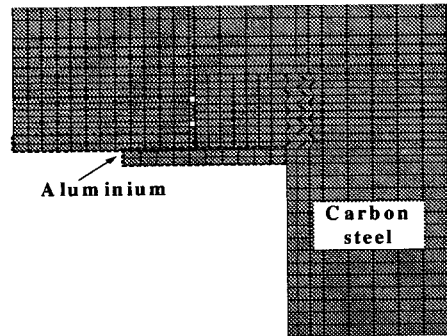
2. 유한요소해석

2.1. 해석모델

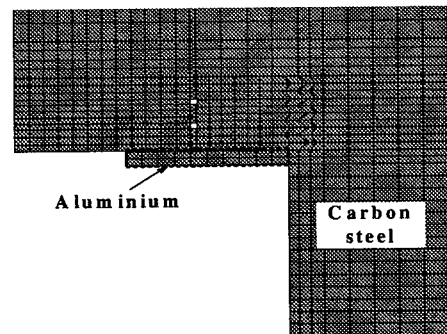
O-링이 장착된 압력용기의 밀봉 시스템에 대한 안전설계를 위해 제시된 Fig. 1의 두가지 해석 모델은 원통형 실린더로 위쪽에 압력용기를 외부로 개방하기 위한 플랜지가 조립되어 있다. 압력용기에 저장된 가스압력을 확보하기 위해 몸통(cylinder)과 플랜지 사이를 따라서 빠져나가는 고압가스를 밀봉하기 위한 O-링 밀봉 메카니즘을 Fig. 2와 같이 설계하였다.

Fig. 2에서 제시한 압력용기의 밀봉성을 확보하기 위해 두 개의 특수 O-링을 플랜지의 외경부에 설치함으로써 압력용기의 내부에 걸리는 가스압력에 의해 작동유체의 외부방출을 차단하기 위한 플랜지와 메탈 시일, O-링 그루브가 잘 묘사되어 있다.

본 연구에서 사용된 압력용기 소재는 일반 탄소강이고, 메탈 실링에는 알루미늄 재질을 사용하였다. 따라서, 이들 소재의 기계적 특성은 일반 핸드북에서 용이하게 얻을 수 있다.

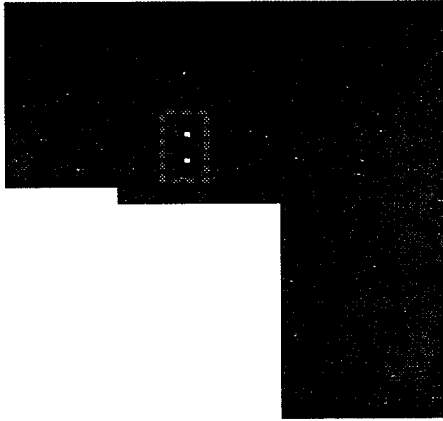


(a) Model I

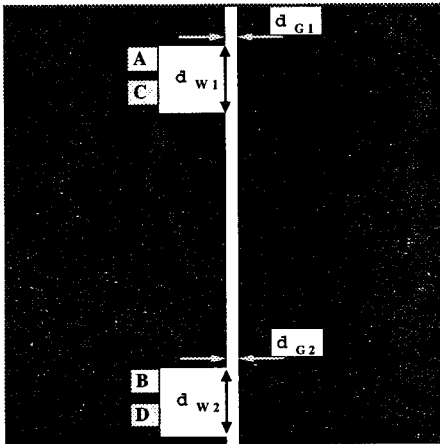


(b) Model II

Fig. 1 Analysis models of high pressure vessel.



(a) Assembled rectangular groove



(b) Detailed sealing gap and groove width

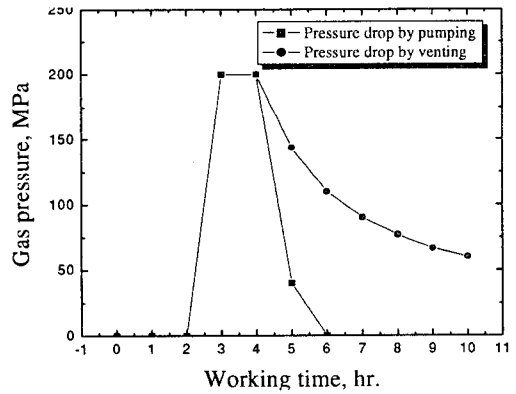
Fig. 2 Rectangular groove for O-ring sealing in pressure vessel.

2.2. 해석조건

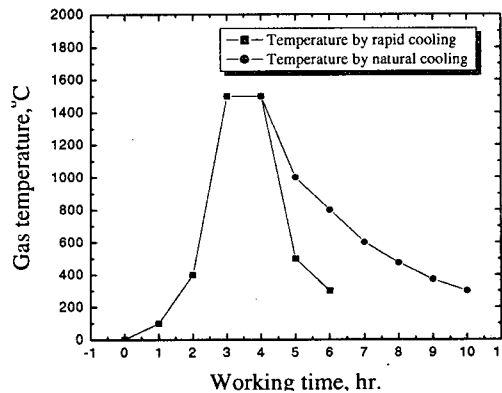
압력용기에 적용된 가스압력은 최대 200MPa이고, 가스의 작동온도는 100°C로 압력용기의 사용조건이 비교적 불안정한 상태에 있다. 본 연구에서 사용한 압력용기는 온도하중과 압력하중을 동시에 받는 경우에 대한 해석모델이므로, 비선형 유한요소해석을 위해 신뢰성이 높은 MARC[2]의 2차원 축대칭 해석모델을 사용하였다. 여기서 압력용기의 냉각은 급속냉각(rapid cooling)과 자연냉각(natural cooling)의 두가지 방법이 채택되었고, 압력강하는 펌프를 이용한 급속한 압력강하(pressure

drop by pump)와 벤트홀에 의한 완만한 압력강하(pressure drop by vent hole)라는 두가지 방식이 각각 활용되었다.

압력용기의 밀봉조건을 정확하게 해석하기 위해 용기에 적용된 온도와 압력을 Fig. 3에서 보여주고 있다. 즉, 압력용기를 가동하기 시작한 후 3시간이 경과하면 최고온도는 1,500°C, 최대압력은 200MPa에 각각 도달하게 되고, 이어서 약 2시간동안 압력용기의 최고압력과 최고온도를 일정하게 유지한 다음에 압력용기의 작동온도는 분당 0~11°C의 냉각속도로, 작동압력은 분당 0~22MPa의 속도로 떨어뜨리는 작동조건을 Fig. 1과 같은 두가지 압력용기 해석모델에 적용하였다. 여기서 제시된 작동온도와 작동압력 사이클은 압력용기에 반복 적용이 가능하며, 1회 사용에 걸리는 총시간은 10시간이다.



(a) Gas pressure



(b) Temperature

Fig. 3 Operation conditions of gas pressure and temperature in pressure vessel.

3. 해석결과 및 토의

이상적인 압력용기의 설계는 하나의 O-링으로 완벽한 밀봉을 할 수 있으면 좋으나, 200MPa의 초고압에서 완벽한 밀봉을 확보하기는 대단히 어렵기 때문에 초고압을 차단하기 위해 1차적으로 메탈 시일을 사용하고, 최종적으로 낮은 압력을 차단하기 위해서 O-링을 사용한다면 이상적인 밀봉 메카니즘이 될 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 200MPa 정도의 초고압이 작용한다는 가정을 하지만, 1차적으로 메탈 시일에 의해 대부분 차단된 상태에서 2차 밀봉장치로 O-링을 사용하고자 한다.

본 연구에서 고려한 압력용기는 200MPa의 높은 가스압력을 받기도 하지만, 동시에 작동유체인 가스의 온도가 100°C인 점을 고려한 유한요소해석을 수행하였다. 본 해석에서 특별한 언급이 없으면, 온도와 변위량 등의 결과는 10시간이 지난 정상상태에 대한 해석결과이다.

3.1. 온도분포

Fig. 4는 압력용기의 내벽면에 분포하는 초기온도가 100°C일 경우에 용기를 밀폐하는 플랜지 구조물에 설치한 O-링 그루브에 걸리는 최고온도를 계산한 유한요소해석 결과이다. 여기서, 압력용기는 100°C의 초기온도에서 주어진 가스압력에서 압력용기를 5시간동안 같은 조건으로 유지한 상태의 해석결과를 제시한다. 압력용기로부터 전도된 온도는 플랜지에 설치한 O-링에 확산되어 O-링의 온도성능에 영향을 미치게 된다. 압력용기로부터 플랜지의 O-링 그루브로 전도된 최고온도를 T_g 라 하고, O-링 소재가 견딜 수 있는 사용온도를 T_s 라 할 경우에, 이들의 온도비 T_g/T_s 를 압력의 변화에 따라 제시한 해석결과가 Fig. 4이다.

본 해석에 사용된 O-링 그루브의 소재는 알루미늄과 내열 탄소강이고, 사용된 O-링의 소재는 최고 사용온도가 120°C인 NBR, 270°C인 PTFE, 370°C인 FFKM의 3가지에 대해 밀봉관련 온도특성을 해석하였다. Fig. 4에서 O-링을 설치하기 위한 소재의 사용조건에 대한 실제 O-링 그루브의 온도분포는 압력용기에 걸리는 가스압력이 변한다해도 O-링 그루브의 온도분포에 별다른 영향을 주지 못하고 있다. O-링 그루브에 걸리는 최고온도 분포는 압력용기는 열전도가 우수한 알루미늄보다는 내열강 소재를 사용하는 것이 유리하고, 특히 O-링

소재의 특성에 따라 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다. O-링 소재로 사용한 NBR의 온도비는 알루미늄 O-링 그루브의 경우 $T_g/T_s = 0.79$ 이고, 내열 탄소강을 사용한 O-링 그루브의 경우는 $T_g/T_s = 0.72$ 로 높게 나타났다. 그러나, PTFE와 FFKM을 O-링 소재로 사용한 경우의 온도비 T_g/T_s 는 알루미늄에 대하여 0.36과 0.33, 그리고 내열 탄소강을 사용한 경우는 0.3과 0.27로 각각 나타났다. Fig. 4에서 제시한 해석결과에서 O-링 그루브에 걸리는 온도특성은 용기에 걸리는 압력이나 소재보다는 사용한 O-링의 소재특성인 T_s 에 크게 의존한다는 사실이다. 따라서, 압력용기의 사용유체의 작동온도 조건에 적합한 O-링을 선정하는 것이 중요함을 알 수 있다.

Fig. 5는 압력용기에 걸리는 작동온도 조건에 따라 O-링 그루브에 전달되는 최고 온도분포를 해석한 결과를 보여주고 있다. 압력용기에 걸리는 가스압력을 150MPa으로 고정한 상태에서 압력용기 내부에 작용하는 온도를 100°C ~ 500°C까지 변화시키면서 온도분포를 고찰하였다. Fig. 5의 해석결과에 의하면, 압력용기 내부의 작동온도가 O-링 그루브의 온도분포에 가장 큰 영향을 미치고, O-링 소재의 최고 사용온도가 중요한 요소로 작용하지만, 상대적으로 압력용기의 소재에는 작은 영향을 주고 있다.

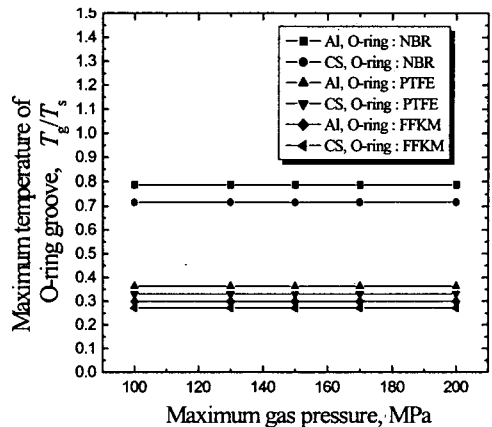


Fig. 4 Maximum temperature ratio T_g/T_s near O-ring groove zone as a function of gas pressure with initial temperature of 100°C in a pressure vessel.

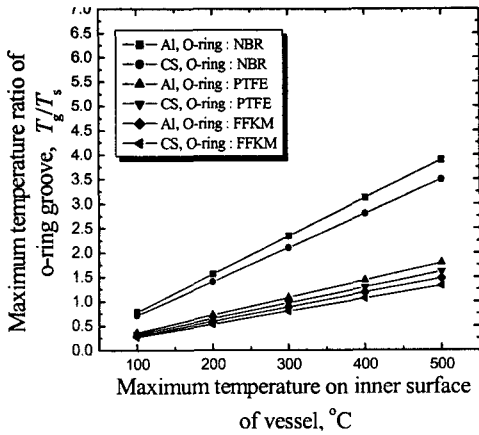


Fig. 5 Maximum temperature ratio T_g/T_s near O-ring groove zone as a function of gas temperature with initial gas pressure of 150MPa in a pressure vessel.

따라서, 압력용기의 O-링 그루브 설계에서 중요하게 검토되어야 할 사항은 압력용기 내부의 작동온도를 가능한 100°C 이하로 유지하는 것이 중요하고, 차선으로 사용하는 O-링 소재의 최고 사용온도가 높은 소재를 선정하는 것이 압력용기의 밀봉 안전성을 확보하는데 중요한 설계요소임을 알 수 있다. 즉, O-링을 사용하여 밀봉해야 하는 압력용기에서 가스압력과 온도가 동시에 개입된 경우는 온도비 T_g/T_s 를 가능한 $\ll 1$ 의 조건에서 사용할 수 있도록 안전설계를 하는 것이 중요하다.

3.2. 변위량 해석

압력용기의 밀봉성을 확보하기 위해 설치된 O-링 그루브의 변형량 특성은 중요한 설계조건이 된다. O-링을 설치하는 그루브에 전달되는 온도하중이나 가스압력 등에 의해 변형량이 크게 발생되면, 이것은 O-링의 초기 압축을 조건을 바꾸는 중요한 요소로 작용하기 때문에 최대한 변형 거동량을 억제해야 압력용기는 밀봉 안전성을 확보하게 된다.

따라서, 압력용기의 사용조건에 의해 설정된 압력과 온도의 변화에 따라 O-링 그루브로 전달된 온도와 압력에 의한 변형 거동량을 제시한 해석결과를 Figs. 6~9에서 보여주고 있다. 여기서 구형 그루브(rectangular groove)의 밀봉간극은 1mm이고, 그루브의 폭은 7mm로 설계되어 있다.

Figs. 6과 7에서 O-링이 설치될 구형 그루브의 밀봉간극은 1mm이고, Fig. 1(a)의 해석모델 I는 gas와 접촉하는 플랜지 하단부에 알루미늄 소재로 메탈 실링을 하지만, Fig. 1(b)의 해석모델 II는 탄소강 소재를 사용한다. 본 연구에서는 이러한 밀봉특성을 고려한 O-링 그루브에 대한 변형거동 특성을 고찰하고자 하였다.

Fig. 6은 구형 그루브에서 압력용기의 반경방향으로 발생된 플랜지(flange)와 동체(cylinder) 사이의 간극 변위 거동량 (d_{G1} , d_{G2})을 제시한 결과로, 해석모델 I(Fig. 1(a))의 경우가 해석모델 II(Fig. 1(b))의 경우보다 밀봉간극이 더 많이 줄어든 결과를 보여주고 있다. 이것은 메탈 실링을 위해 사용한 소재의 열팽창 계수와 기계적 강도가 다르기 때문인 것으로 사료된다. 또한, 압력용기에 공급된 가스압력이 높아짐에 따라 밀봉간극이 상대적으로 벌어지고 있는 결과를 제시하는데, 이것은 압력용기 동체 구조물의 반경방향 변위량이 상대적으로 증가하기 때문이다. 따라서, 밀봉특성을 고려하면 압력용기의 내부압력 증가는 밀봉성을 불안정하게 하지만, 온도조건은 플랜지에 사용하는 메탈 실링에 어느 정도 긍정적인 영향을 미치고 있다는 사실을 예측할 수 있다.

Fig. 7은 플랜지에 설치한 구형 그루브에서 축방향으로 발생된 변위 거동량 (d_{W1} , d_{W2})을 제시한 결과로, 해석모델 I(Fig. 1(a))의 경우가 해석모델 II(Fig. 1(b))의 경우보다 그루브의 폭이 더 많이 줄어든 결과, 즉 수축된 데이터를 보여주고 있으나, 실제의 절대 변위량은 대단히 작다. 또한, 압력용기에 공급된 가스압력 130MPa이 작용하는 경우에 구형 그루브의 폭은 $1.3\mu\text{m}$ 로 수축되었다가 200MPa로 증가된 압력이 작용하면 구형 그루브의 폭은 $0.88\mu\text{m}$ 로 오히려 완화되는데, 이것은 플랜지에 작용하는 가스압력에 의한 뒤뜰림 변형정도가 더 크기 때문이다. 따라서, 밀봉을 해야 하는 구형 그루브의 변형 거동성은 압력용기 구조물 전체에 대한 해석이 진행되어야 신뢰성 있는 밀봉특성 분석이 가능하다.

따라서, 압력용기의 밀봉 시스템 설계에서 플랜지에 부착된 메탈소재는 열팽창 계수가 높고, 기계적 강도가 낮은 소재를 사용하는 것이 O-링을 사용한 구형 그루브에 긍정적인 영향을 미치며, 밀봉특성을 정확하게 예측하기 위

해서는 압력용기 전체에 대한 시스템적 해석을 수행하여 설계하는 것이 중요함을 알 수 있다.

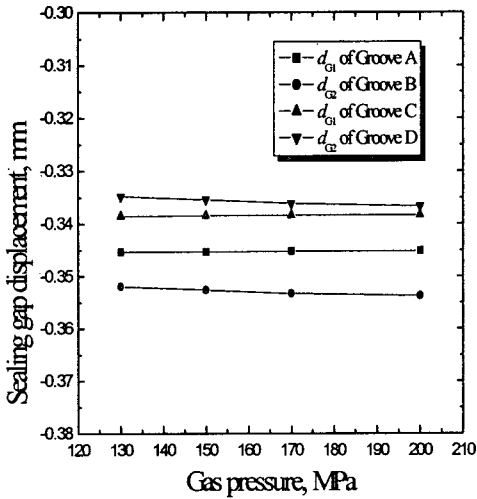


Fig. 6 Sealing gap displacement of O-ring groove in radial direction between a flange and a cylinder in terms of gas pressure.

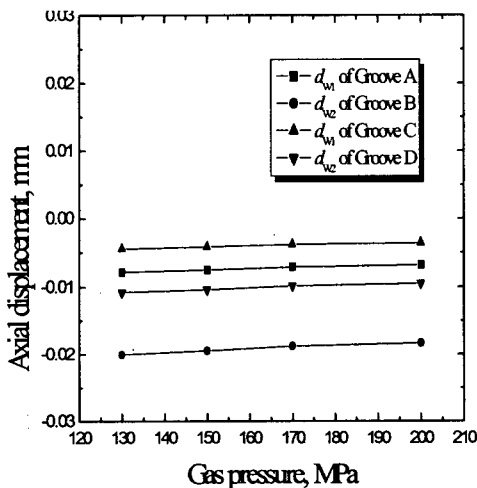


Fig. 7 Axial displacement of O-ring groove width in terms of gas pressure.

Fig. 8은 압력용기에 일정한 압력 150MPa이 작용하는 상태에서 온도하중이 압력용기의 밀

봉특성에 미치는 영향을 고찰한 결과이다. 압력용기에 가해진 온도가 200℃ 이하에서는 해석모델 I(Fig. 1(a))의 경우가 해석모델 II(Fig. 1(b))에 비하여 밀봉간극 (d_{G1} , d_{G2})이 더 많이 압축되기 때문에 밀봉특성이 우수하지만, 온도를 200℃ 이상으로 증가하면 반대 현상이 일어난다. 이것은 해석모델 Fig. 3에서 제시한 소재의 냉각속도 차이로 발생된 결과이다. 즉, 압력용기에 가해진 온도의 승온속도와 냉각속도는 소재에 따라서 다르기 때문으로, 압력용기의 온도가 높아졌다가 냉각되는 과정에서 열전도가 높은 소재를 사용한 메탈 실링이 불리할 수 있다는 데이터이다.

Fig. 9는 압력용기에 일정한 압력 150MPa이 작용하는 상태에서 온도변화에 따라 플랜지의 구형 그루브에 작용하는 축방향의 폭 변위량 (d_{w1} , d_{w2})을 제시한 해석결과이다. O-링을 설치하는 구형 그루브의 폭 변화량은 밀봉간극 변화량을 제시한 Fig. 8에 비하여 절대량이 대단히 작음을 알 수 있다. Fig. 9의 해석결과에서 제시한 것처럼 플랜지의 하단부에 열전도 계수가 높고, 기계적 강도가 낮은 소재를 사용하는 것이 O-링 그루브의 폭방향 변위량도 수축되는 현상을 보여준다.

Fig. 9의 결과에 의하면, 압력용기에 가해진 200℃ 이하의 온도에서는 해석모델 I(Fig. 1(a))의 경우가 해석모델 II(Fig. 1(b))에 비하여 밀봉간극이 더 많이 압축, 즉 수축되기 때문에 밀봉특성이 우수하지만, 온도를 200℃ 이상으로 증가하면 반대 현상이 일어난다. 이것은 Fig. 8에서 제시한 소재의 냉각속도 차이로 발생된 결과이다. 즉, 압력용기에 가해진 승온속도와 냉각속도는 소재에 따라서 다르기 때문으로, 압력용기의 온도가 높아졌다가 냉각되는 과정에서 열전도가 높은 소재를 사용한 메탈 실링이 불리할 수 있다는 데이터이다.

따라서, 가스온도가 높은 압력용기의 밀봉시스템에서 열전도 계수가 높은 소재를 사용할 경우는 압력용기의 온도를 일정치 이하로 규제해야 승온과정과 냉각과정 모두에서 우수한 밀봉특성을 얻을 수 있다. 결국, 압력용기는 분명히 온도에 의한 영향을 크게 받으며, 우수한 밀봉성을 유지하기 위해서는 압력용기의 온도 조건을 일정한 수치이하로 유지하는 것이 바람직하다는 결론에 도달한다.

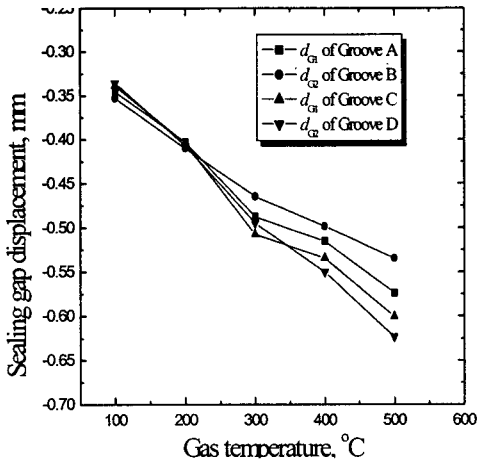


Fig. 8 Sealing gap displacement of O-ring groove in radial direction between a flange and a cylinder in terms of gas temperature.

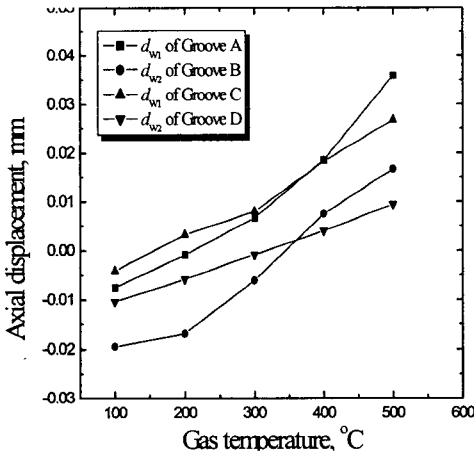


Fig. 9 Axial displacement of O-ring groove width in terms of gas temperature.

4. 결 론

본 연구에서는 메탈 시일이 있는 압력용기에 가스압력과 온도하중이 동시에 작용할 경우에 접촉식 밀봉장치인 O-링 그루브에 걸리는 온도분포와 변형량 거동을 비선형 유한요소법으로 해석하였다.

압력용기에 설치된 O-링 그루브에 작용하는 반경방향의 밀봉간극이나 축방향의 폭 변형 거동량은 플랜지에 설치한 메탈 시일의 소재 특성에 따라 많은 영향을 받고 있다. 상대적으로 낮은 밀봉가스 압력은 가스온도의 사용조건에 영향을 많이 받으나, 제한된 조건에서 작동하는 압력용기는 가스압력이 높아질 경우 동체의 강성도 때문에 밀봉성이 떨어지는 설계조건을 보여준다.

따라서, 고온과 초고압의 압력용기에 설치된 O-링의 밀봉성은 사용된 메탈 시일 소재의 열팽창 계수는 높지만, 기계적 강도는 낮은 소재를 사용하는 곳이 바람직하다. 이 때에 O-링 그루브가 설치된 소재는 일정온도 이내로 유지해야 보다 신뢰성 높은 밀봉성을 확보할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 조승현, 김성원, 김청균, "형상변화에 따른 가스압력용기의 응력거동특성 연구", 한국가스학회 춘계학술대회 논문집, pp.96-104, 2002
- [2] MARC Analysis, Ver. 7.3, 1999