

CNG 차량용 Regulator Diaphragm의 변형특성 해석

Deformation Characteristic Analysis of Regulator Diaphragm for CNG Vehicle

*김관준¹, 조현동¹, #박태조², 송명길³, 강병루³
 *K. J. Kim¹, H. D. Jo¹, #T. J. Park(tjpark@gnu.ac.kr)², M. G. Song³, B. R. Kang³
¹경상대학교 대학원, ²경상대학교 기계항공공학부, ³(주)파카하니핀커넥터

Key words : Regulator, Diaphragm, MARC, CNG

1. 서론

CNG(Compressed natural gas)를 연료로 사용하는 차량에는 고압으로 공급되는 연료압력을 엔진의 운전에 필요한 압력으로 제어하기 위한 CNG 전용 레귤레이터(Regulator)의 장착이 필수적이다. 상용 레귤레이터로는 1-Stage 레귤레이터가 개발되어 있으며 고압의 CNG를 1단계의 레귤레이팅(Regulating) 과정을 통해 차량에 필요한 압력을 공급하고 있다. 현재 승용 차량을 위한 레귤레이터가 국내에서 개발 중이며, 2단계에 걸친 감압과정을 통해 안정적인 연료 공급이 가능한 2-stage 레귤레이터를 설계하고 있다. 2-stage 레귤레이터는 1단계의 레귤레이팅 과정에서 고압으로 공급되는 연료를 1차 감압하게 되고 감압된 연료는 다시 2단계 레귤레이팅 과정을 거쳐 감압된 최종 압력을 엔진에 공급하게 된다. CNG 차량의 경우, 장착된 연료 탱크에서 공급되는 CNG의 압력이 연료의 소모로 인하여 지속적으로 떨어지게 되므로 이에 민감하게 반응하여 엔진에 연료를 적정 압력으로 공급할 수 있는 레귤레이터의 개발이 요구된다.

Fig.1은 2-stage Regulator의 3D 모델을 나타낸 그림이다. 저장탱크에서 공급된 연료의 압력은 레귤레이터 입구를 거쳐 밸브와 밸브 시트(Seat) 사이를 통과함으로써 압력 강하가 일어나게 된다. 여기서 다이어프램은 레귤레이팅된 연료 압력을 감지하여 연결된 스프링과의 힘의 평형 관계를 통해 상하로 움직이며 밸브와 시트사이의 유로 크기를 조절하게 된다. 2-stage 레귤레이터는 1단계 및 2단계에서 사용되는 2개의 다이어프램이 설치되며 각각 다른 압력이 다이어프램 하단에 작용하게 된다. 특히, 1단계의 다이어프램은 2단계에 비하여 높은 압력이 작용하므로 손상 및 파손될 가능성이 높다. 따라서, 레귤레이터 설계의 신뢰성을 높이기 위해서는 각각의 다이어프램의 변형 특성을 파악하여 이를 설계에 반영하는 것이 필요하다.¹⁻⁶

본 논문에서는 비선형 해석 전용 소프트웨어인 MARC를 사용하여 두께에 따른 다이어프램의 변형특성과 적정 사용압력 범위를 산출하여 CNG 레귤레이터의 설계 자료로 활용하고자 한다.

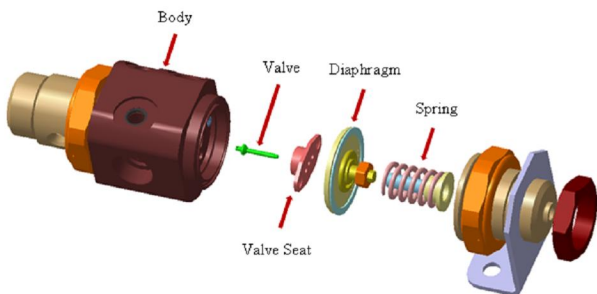


Fig.1 Structure of CNG regulator

2. 해석방법

Fig.2과 Table 1에는 본 논문에서 해석하고자 하는 다이어프램의 전체격자재와 경계조건, 그리고 다이어프램의 재질인 NBR의 물성치를 나타내었다. 해석모델은 축대칭 형상으로 축대칭요소인 Quad 4 Full Integration 10을 사용하였고 총 격자수는 대략 1,000개 정도이다. 이때 다이어프램은 Remeshing 기능을 활용하

여 심한 변형에도 격자의 왜곡현상 등이 발생하지 않고 수렴될 수 있도록 하였다. 다이어프램을 지지하고 있는 케이스(Case)와 금속판(Metal Seat)은 강체(Rigid body)로 지정하였고, 다이어프램과는 접촉상태로 정의하였다. 이때 마찰계수는 0.3을 적용하였다. 경계조건으로는 금속판에 스프링의 압축력과 가스압력, 기타 밸브에 작용하는 압력들에 대한 힘의 평형조건으로부터 구한 등가변위값을 적용하여 -y방향으로 강제변위 시켰다. 이때, 최대 변위는 2.4mm이다. 다이어프램의 하단부에는 출구압력을 적용하였고 다이어프램의 양끝의 외각부분은 설계상 움직일 수 없게 고정되어 있으므로 이 부분의 변위는 0으로 고정하였다. 또한 고탄성재료인 NBR에 대한 정확한 변형거동특성을 위해서 Mooney-Revlin 상수를 적용하여 해석을 수행하였다. 해석순서는 먼저 초기조립상태에서 금속판에 0.15~2.4mm의 변위값을 적용하여 -y방향으로 강제로 변위시킨 다음 0~2MPa의 출구압력을 다이어프램에 작용시켰다. 그리고 급격한 변형으로 인하여 수렴하지 않는 경우를 피하기 위해 Time Table을 적용하였다.

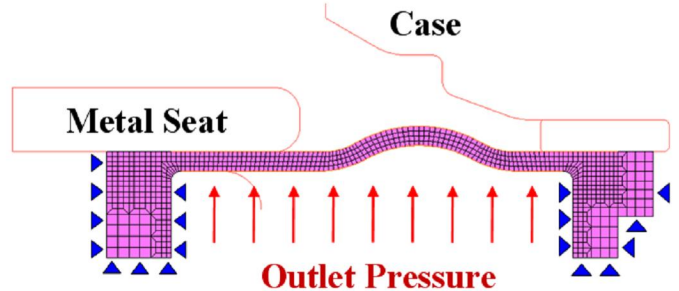


Fig. 2 Finite element model

Table 1 Material property

Mooney-Revlin Coefficient	C ₁₀	C ₀₁
NBR	0.736	0.184

3. 해석결과

Fig.3는 금속판의 변위와 출구압의 작용에 따른 다이어프램의 전변형률을 나타낸 그림이다. (a)는 금속판에 -y방향의 강제변위 2.4mm를 적용하고 난 이후의 변형률을 나타낸 것이고, (b)에서는 강제변위 후 다이어프램 하단부에 출구압 1MPa이 가해졌을 경우의 변형률을 나타내었다. 먼저, (a)의 경우 다이어프램의 초기 형상을 유지하고 있는 반면에 출구압이 가해진 (b)의 경우에는 금속판의 곡면을 따라 크게 변형되면서 케이스와 접촉함을 확인할 수 있다.

Fig.4는 변위량이 2.4mm인 경우에 출구압이 작용할 때 다이어프램에서 발생하는 최대 von-Mises 응력 발생위치에서의 응력분포를 나타낸 것이다. 금속판 상부와 다이어프램의 접촉이 끝나는 부분 직전에 최대값이 나타남을 확인할 수 있다. 금속판과 고무사이의 마찰력에 의해 금속판과 접촉한 부위의 고무가 변형하는 것에 비하여 금속판에 접촉하지 않은 고무가 과도하게 변형됨으로 인해 국부적으로 높은 응력이 발생하는 것으로 판단된다.

Fig.5에서는 출구압이 1MPa 일 때 다이어프램의 두께가 0.4~

1mm로 변화하는 경우에 대한 변형형상과 응력분포를 나타내었다. (a)의 경우 과도한 변형으로 인해 다이어프램과 금속판이 접촉하지 않는 부분에서 넓은 범위에 높은 응력이 발생하고 (b), (c), (d)의 경우도 동일한 부분에서 응력이 높게 나타나고 있으나 두께가 두꺼워짐에 따라 변형 및 응력값과 발생범위도 감소하였다.

Fig.6은 다이어프램의 두께와 출구압력의 변화에 따른 최대 von-Mises 응력을 나타낸 그래프이다. 출구압력이 2bar이하일 경우, 최대 von-Mises 응력은 두께에 따라 큰 차이를 보이지 않지만 출구압력을 증가시키게 되면 두께가 얇을수록 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

Table 2에는 NBR의 인장강도가 18.1MPa인 것을 감안하여 다이어프램을 안전하게 사용할 수 있는 압력범위를 두께별로 나타내었다.

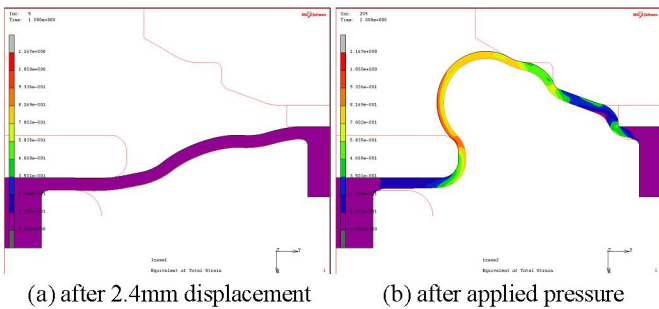


Fig. 3 Equivalent of total strain of diaphragm

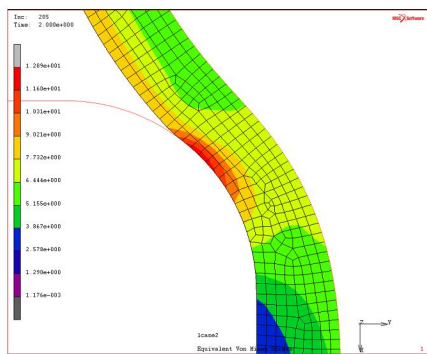


Fig. 4 von-Mises stress distribution

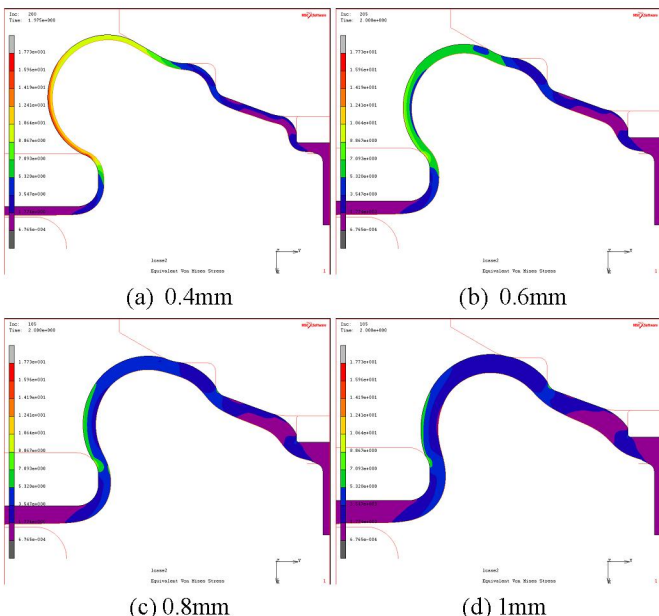


Fig. 5 Deformed diaphragm shape and stress distribution

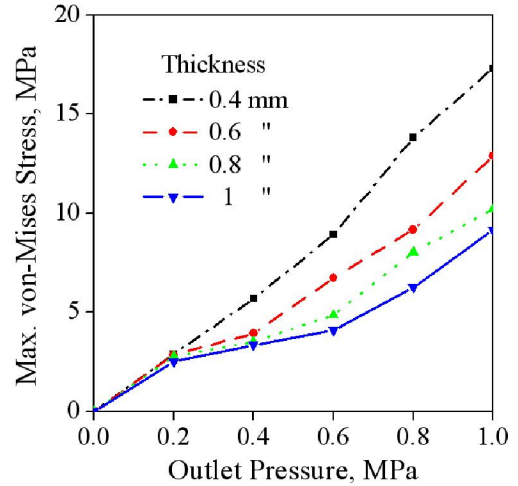


Fig. 6 Variation of the max. von-Mises stress with outlet pressure

Table 2 Max. Operating Pressure

Thickness, mm	0.4	0.6	0.8	1
Max. Operating pressure, MPa	10	12	14.2	16.4

4. 결론

본 논문에서는 2-Stage CNG 레귤레이터의 핵심 부품으로 사용되는 다이어프램의 설계자료를 확보하기 위하여 두께에 따른 다이어프램의 변형특성과 적정 사용압력 범위를 비선형전용 해석프로그램인 MARC를 활용하여 해석하였다. 그 결과, 금속판의 변위 및 출구압의 작용에 따른 다이어프램의 변형형상 및 응력분포를 구할 수 있었다. 또한 두께가 증가함에 따라 동일한 출구압력에서 변형 및 응력값이 감소하고, 최대 von-Mises 응력은 금속판 우측 상부의 다이어프램과 금속판이 분리되는 부분 직전에서 발생함을 확인하였다. 또한 다이어프램 재료의 인장강도를 고려해 두께에 따른 적정 사용압력 범위도 산출하였다. 따라서 본 논문의 해석결과는 2-Stage CNG 레귤레이터에 사용되는 다이어프램의 개발 및 설계 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후기

본 논문은 2단계 BK21사업과 (주)파카하니핀커넥터 및 지식경제부 지방혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Y. S. Lee, T. D. Cho, S. H. Ko, H. S. Lee and S. K. Shin, "Structural Stress Analysis on the Rubber Diaphragm of Air-Operated Valve", Int. J. of Modern Physics B, Vol.20, pp. 4565-4570, 2006.
2. K. M. Yeo, T. J. Park, H. T. Chung, M. G. Song and B. R. Kang, "Flow Analysis of Check Valve for CNG Vehicle Fuel Supply Line", Proc. of KSME, pp.159-163, 2006.
3. S. K. Koh, and H. Y. Hwang, "Strength Analysis of Rubber Diaphragm for Automotive Suspension Damper System", Proc. of KSME, pp.13-18, 2006.
5. K. T. Park, T. J. Park and B. R. Kang, "Design and Performance Analysis of Regulator for CNG Vehicle", Proc. of KSME, pp. 255-260, 2007.
6. T. J. Park, H. D. Jo, M. G. Song and B. R. Kang, "Deformation Behavior Analysis of Diaphragm for CNG Regulator ", Proc. of KSPE, pp. 843-844, 2008.
7. MSC, "MSC. MARC/MANTAT 2007r1 User's Guide", Vol.A~E, 2007.