

CNG차량의 연료공급라인용 Check Valve Seal의 거동해석

유재찬[†] · 여경모 · 박태조[‡] · 강병루*

경상대학교 기계항공공학부, *(주)파카하니퍼넥터

Analysis of Check Valve Seal for CNG Vehicle Fuel Supply Line

Jae-Chan Yoo[†], Kyeong-Mo Yeo, Tae-Jo Park[‡] and Byeong-Roo Kang*

Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University

*Parker Hannifin Connector Ltd.

Abstract – In CNG (Compressed natural gas) fuel supply line, whose main components are receptacle and check valve are used to charge high pressure gas to the tank of NGV (Natural gas vehicle). It is reported that the seal is separated occasionally from valve seat and results in blockage of gas flow. In this paper, MARC is used to investigate the reasons of seal separation and suggest design improvements. The static gas pressure distributions acting on the seal which calculated using FLUENT are considered to investigate accurate seal deformation behaviors. Deformed seal shapes are obtained for various amounts of seal interference and its location, gas pressure distributions and Young's modulus of the rubber used. The results showed that the reasons of seal separation problems are verified theoretically, and suggested examples of new design method. Therefore the present numerical methods can be applied in designing and performance analysis of rubber seals adopted in high pressure fluid machineries.

Key words – CNG, check valve, seal, numerical analysis, MARC, FLUENT

1. 서 론

천연가스(Natural Gas)는 원유와는 달리 매장지역이 세계 각지에 고르게 분포되어 있으며, 매장량도 풍부하여 장기적으로 안정적인 공급이 가능한 석유대체 에너지원이다. 또한, 공기보다 가볍기 때문에(상대비중 0.65) 누출되어도 대기중으로 빠르게 확산될 뿐만 아니라 연소하한계(연소될 수 있는 자연발화온도)도 높기 때문에 LPG에 비하여 화재나 폭발 등의 사고위험성이 매우 낮다. 여기에 전기나 석유보다도 열효율이 높기 때문에 최근에는 전세계적으로 수요가 급증하고 있다. 그러나 이러한 많은 장점을 가진 천연가스는 -162°C 이하의 저온에서만 액화되는 특징을 가지고 있어 대부분의 경우에는 200~250 bar 정도의 고압에서 압축된 CNG (Compressed natural gas) 형태로 사용되고 있다.

1930년대에는 과잉생산된 천연가스를 소비하기 위한 목적으로 이를 연료로 사용하는 자동차(NGV, Natural gas vehicle)가 이탈리아와 러시아에서만 제작되었지만 1970년대의 두 차례 석유파동 이후에는 에너지 절약의 목적으로 전세계에 보급되고 있다. 우리나라에서는 2000년부터 석유자원의 대체와 청정연료사용에 의한 환경오염방지를 목적으로 대도시지역을 중심으로 NGV를 대대적으로 보급하기 시작하였으며, 2007년까지 전국에 400개소의 충전소를 설치하여 2만대 정도의 시내버스가 운행될 계획이다.

한편, LPG 차량 및 충전소 폭발사고의 예에서 경험한 바와 같이 가스누설은 인적, 물적 피해뿐만 아니라 환경오염에 이르기까지 엄청난 손실을 초래한다. 그러나 CNG는 LPG에 비해서 대기중으로 쉽게 확산될 수 있어 이러한 사고발생 가능성이 적다. 하지만 가스누설은 여전히 보급에 큰 걸림돌로 작용하고 있는 실정이므로 완벽한 성능의 관련부품이 필수적으로 요구된다.

Fig. 1은 NGV에서의 연료주입계통을 개략적으로 나

[†]주저자 : hydshop7@nate.com

[‡]책임저자 : tjpark@gsnu.ac.kr

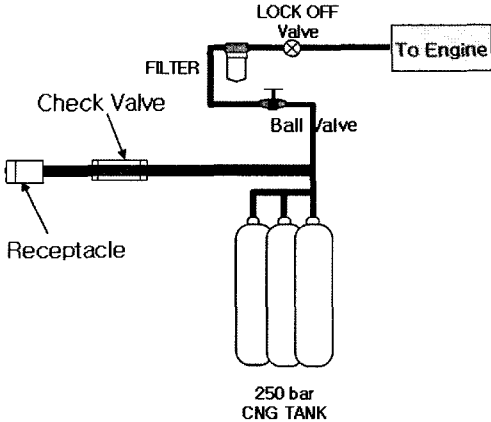


Fig. 1. Schematic of CNG fueling system.

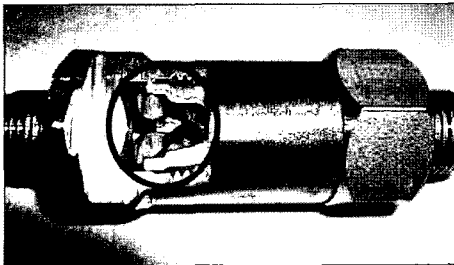


Fig. 2. Shape of failed seal in check valve.

타낸 그림으로 충전소의 주입장비와 연결되는 Receptacle을 통해서 CNG가 차량내의 저장탱크로 충전된다. 여기서, 체크밸브(Check valve)는 충전되지 않을 경우에 저장탱크내의 CNG가 역류하여 대기중으로 누설되는 것을 방지하는 기능을 한다. 현재, 운행중인 NGV의 주입라인에서 발생하는 문제의 대부분은 Receptacle과 체크밸브와 관련된 것으로 보고되고 있다[1]. 특히, 체크밸브에서 발생하는 가장 심각한 문제는 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 시일(Seal)이 이탈되고 이것이 포핏(Poppet)의 구멍(Fig. 3 참조)을 차단하여 충전을 막는 경우이다. 따라서, 이러한 문제의 발생원인을 규명하고 방지방법을 설계하기 위해서는 CNG를 충전중인 밸브에서의 시일 거동에 대한 정확한 해석이 요구된다. 하지만 고압으로 유동하는 가스에 의한 영향까지를 고려한 체크밸브용 시일에 대한 변형거동은 아직까지 연구되지 않고 있는 실정이며, CNG가 비정상상태로 유동하는 배관계에 대한 수치해석결과가 Gato & Henriques [2]에 의해서 제시되어 있는 정도이다.

본 논문에서는 CNG 차량의 연료공급라인용 체크밸브

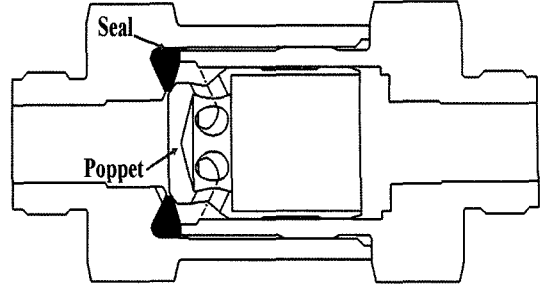


Fig. 3. Cross sectional view of check valve.

브내의 시일이 이탈하는 원인을 해석적으로 규명하고 이것의 이탈을 방지할 수 있는 설계개선방안을 도출하고자 한다. 이를 위하여 시일의 간섭량과 가스압력 등의 변화에 따른 시일의 변형거동을 비선형문제 해석전용 프로그램인 MARC[3]를 이용하여 상세하게 조사하였다. 여기서, 시일에 작용하는 가스압력의 분포는 유동해석전용 프로그램인 FLUENT[4]를 사용하여 상세하게 구하였다.

2. 해석 방법

Fig. 3은 본 논문에서 사용한 체크밸브의 단면과 해석할 시일의 형상을 개략적으로 나타낸 그림이다. 충전소 주입장비와 연결된 Receptacle을 통과한 고압의 가스로 인하여 포핏이 오른쪽으로 이동하면 CNG는 시일과 포핏 선단부 사이에 형성된 간극과 포핏 구멍을 통하여 탱크로 저장된다. 이때, 조립된 체크밸브에서 상대부품인 바디가 시일을 누르는 양인 간섭량과 충전 중인 CNG에 의한 압력분포 등이 시일의 이탈과 이로 인한 충전불량을 유발시키는 가장 큰 원인으로 작용할 것으로 추정된다. 이러한 시일의 변형문제를 해석하기 위해서는 응력에 대하여 비선형적인 거동을 나타내는 고무에 대한 정확한 모델이 요구된다. 본 논문에서 사용한 시일의 재질은 등방성의 NBR이며, 비선형해석을 위해서 Mooney-Rivlin 모델을 사용하였다[5]. Table 1에는 이에 대한 물성치와 Mooney-Rivlin 계수를 각각 나타내었다.

Fig. 4는 변형해석에 사용한 시일의 단면형상과 Mesh를 나타낸 그림으로 Quad 4 Full Integration 10의 축대칭 Element를 채용하여 모델링하였다. 포핏과 분리되기 전에는 시일이 이탈하지 않기 때문에 본 논문에서는 포핏에 의한 제반영향은 고려하지 않았다. 경계조건으로는 시일이 접촉하는 시트(Seat)인 왼쪽면과

Table 1. Material properties and Mooney-Rivlin coefficient of used seal

Material property of NBR	
Young's modulus	2.82 MPa
Poisson ratio	0.49
Mooney-Rivlin coefficient	
C10	0.293
C01	0.177
DD	0.0425

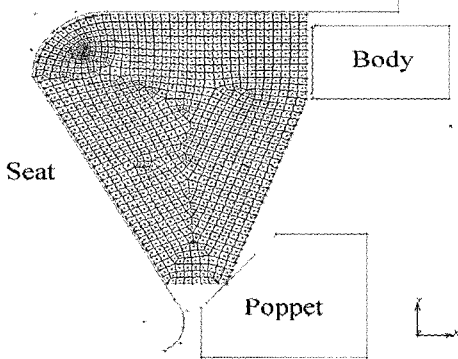


Fig. 4. Mesh used in analysis.

윗면은 강체(Rigid)로 가정하여 변위를 고정시켰으며, 조립된 밸브에서 시일을 누르게 되는 바디(Body)도 강체로 정의하고 이의 간섭량을 변위로 설정하였다. 한편, 시일과 강체면과의 마찰계수는 모두 0.2로 가정하였으며, 시일에 간섭량과 압력이 동시에 작용하는 경우의 거동해석은 간섭에 의한 해석을 먼저 수행한 다음에 압력을 작용시켰다[3]. 여기서, 포핏의 열린 정도에 따라서 큰 차이를 나타내는 충전가스의 압력분포 [6,7]는 유동해석 프로그램인 FLUENT를 사용하여 구하였다.

3. 결과 및 고찰

본 논문에서는 NGV의 연료공급라인용 체크밸브에서 발생하는 충전불량문제의 원인을 규명하기 위하여 시일의 변형거동에 미치는 간섭량, 작용압력 및 고무경도에 의한 영향을 상세하게 해석하였다.

Fig. 5는 간섭량의 차이에 따른 변형량 분포와 변형된 시일의 형상을 원래 형상과 겹쳐서 순차적으로 나타낸 결과이다. 간섭량이 작을 경우에는 바디와의 접

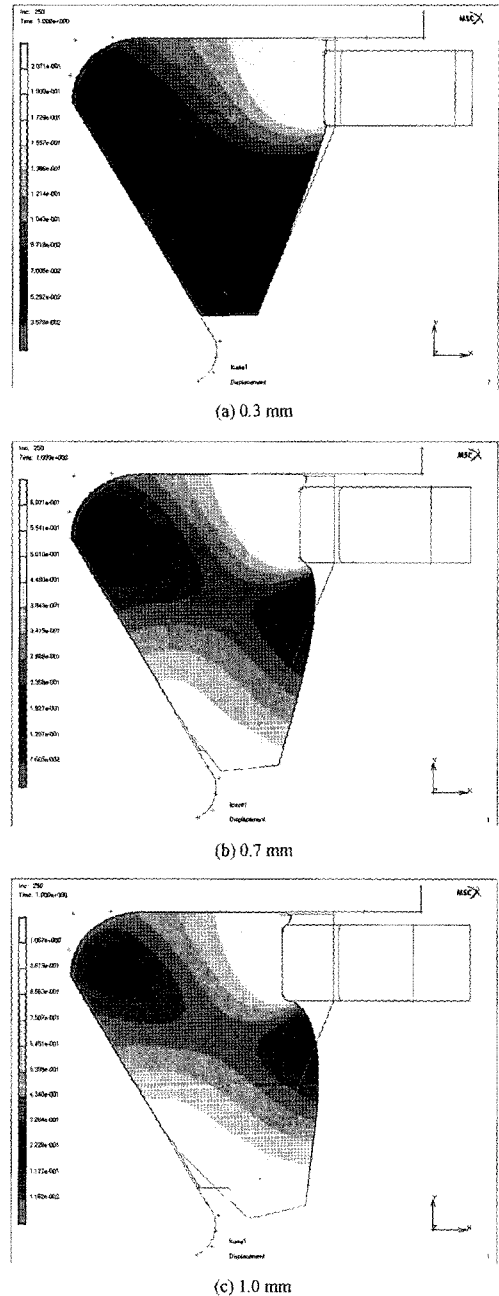


Fig. 5. Displacement distribution and deformed seal shape under body interference.

촉부 부근에서는 시일이 변형되지만 여기서 조금 떨어진 부분에서는 원래의 형상을 거의 유지하고 있다. 하지만 간섭량이 크게 될수록 시일은 전체적으로 변형될 뿐만 아니라 변형량도 크게 증가되었다. 특히, 바디와 멀리 떨어진 끝부분에서는 시일이 시트와 접촉하지 않

고 이탈된 부분이 확장되고 있다. 이러한 결과는 거의 비압축성 재료인 고무의 특성과 조립시에 시일을 누르는 부품인 바디가 상대적으로 위쪽에 설계되었기 때문으로 추정된다. 만일 바디부의 간섭에 의하여 변형되고 끝부분이 시드에서 이탈된 (b), (c)와 같은 형상의 시일에 CNG의 충전압력이 작용할 경우에는 Fig. 5의 결과와는 상당히 다른 변형거동을 나타낼 것으로 추정할 수 있다.

한편, 실제 충전에서와 같이 포핏이 열리면 시일과 포핏 사이의 유로를 통과하는 CNG에 의해서 시일에는 불균일한 가스압력이 작용하며, 이의 크기와 분포가 간섭에 의하여 변형된 시일의 형상에 영향을 미칠 것으로 예상된다. Fig. 6은 Fig. 5(b)와 같은 시일 형상에서 포핏이 완전히 열린 경우와 1/4만 열린 경우에 대하여 유동해석 프로그램인 FLUENT를 사용하여 구한 압력(Static pressure)분포를 나타낸 그림이다. 여기서, 가스의 유동은 포핏의 열린 정도와 무관하게 정상 상태로 가정하였다. 포핏이 완전히 열린 경우에는 거의 동일한 크기의 압력이 시일에 작용하지만 1/4 정도 열린 경우에는 시일과 포핏 사이에서 국부적으로

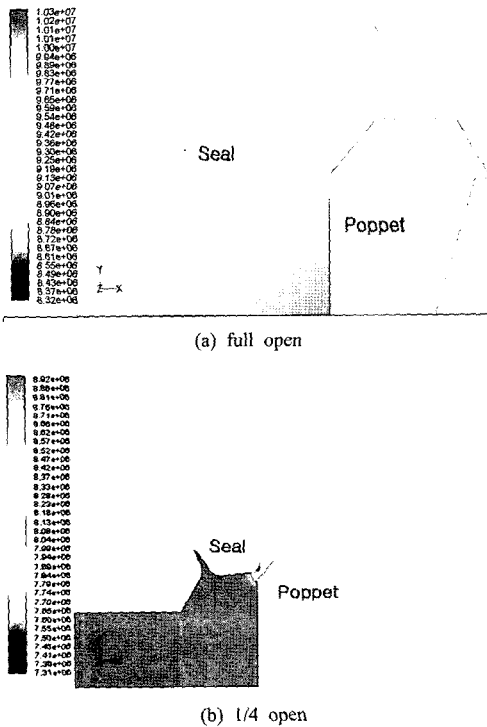


Fig. 6. Static pressure distribution near poppet and seal.

2 MPa 정도의 압력강하가 발생하고 있다. 이와 같이 포핏의 열린 정도에 따라서 시일에 작용하는 가스압력의 크기와 분포는 아주 크게 변화된다[7]. 특히, Fig. 5의 (b), (c)와 같이 간섭에 의해서 이탈된 시일에 Fig.

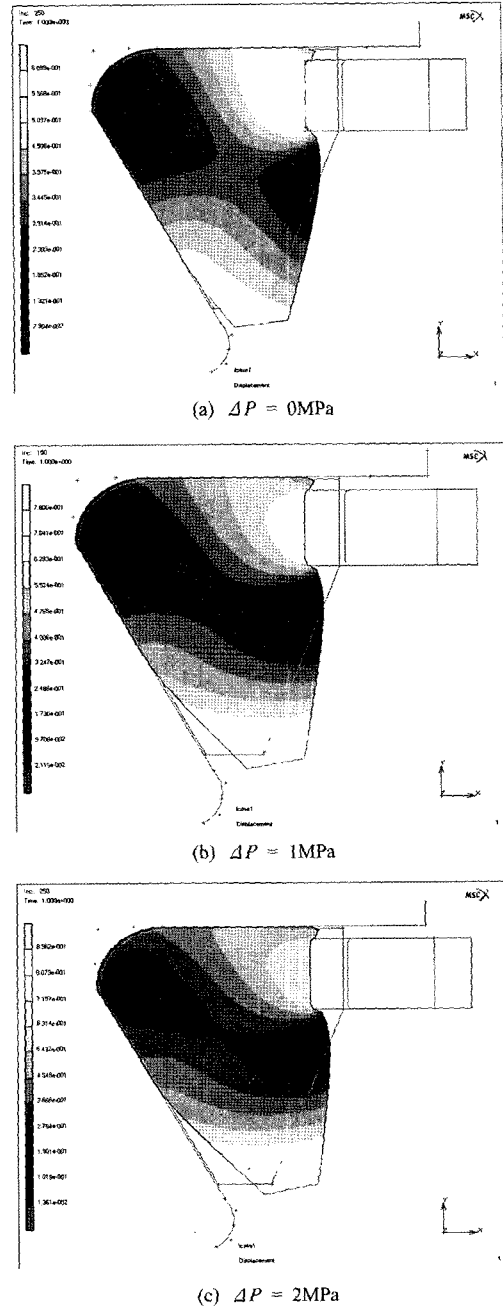


Fig. 7. Displacement distribution with seal interference and pressure difference.

6(b)와 같은 분포의 압력이 작용하면 시일의 이탈 정도는 더욱 크게 될 것으로 예상된다.

Fig. 7에는 Fig. 5(b)와 같은 시일 형상에서 CNG 압력이 바디 안쪽부분에 추가적으로 작용하는 경우의 변형형상을 나타내었다. 여기서, ΔP 는 포핏의 상류에서 압력이 5 MPa인 CNG가 포핏과 시일 사이를 유동하면서 발생하는 최대압력강하의 크기를 의미한다. Fig. 7(a)는 포핏이 완전히 열린 Fig. 6(a)와 동일하게 시일에 균일한 압력이 작용하는 경우로 결과는 간섭량만에 의한 Fig. 5(b)와 거의 동일하다. 하지만 시일에 작용하는 가스압력의 분포가 Fig. 6(b)와 같고 최대압력강하의 크기가 클수록 시일 끝부분은 유로측으로 많이 변형됨과 동시에 시트에서 많이 이탈하고 있다. 이상의 결과에서 포핏이 열리기 시작할 경우에는 충전가스의 유동이 시일 이탈에 미치는 영향이 아주 크지만 완전히 열린 상태에서는 무시할 정도임을 의미한다. 따라서 고압의 CNG를 차량에 충전할 때 초기에 발생하는 충전불량문제는 바디의 간섭과 시일에 작용하는 불균일한 가스압력이 복합적으로 작용하여 시일을 이탈시키고, 과도하게 이탈된 시일이 유로를 차단하기 때문에 발생하는 것으로 추정된다.

이상의 결과에서, 체크밸브에서의 충전불량문제를 해결하기 위해서는 바디의 간섭과 가스압력 등에 의하여 시트에서 시일이 쉽게 이탈되지 않도록 설계해야 됨을 알 수 있으며, Fig. 8과 Fig. 9에는 이에 관련된 간단한 예를 나타내었다. Fig. 8은 지금까지 사용한 바디의 위치를 아래로 약간 이동시킨 경우에 대한 결과로 나머지 해석조건은 Fig. 7(a)의 경우와 동일하다. CNG가 유동하는 유로측으로 돌출되는 시일의 변형량이 줄어

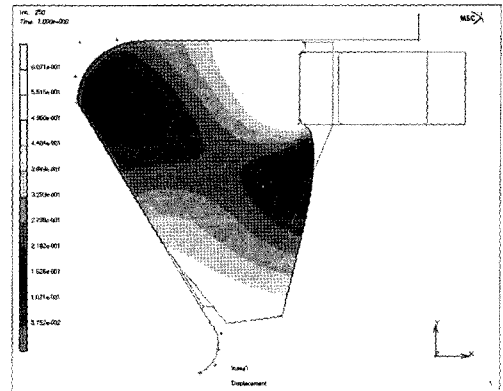


Fig. 9. Displacement distribution for higher Young's modulus.

드는 것은 유동단면적을 크게 하여 결과적으로는 유동저항의 감소와 이로 인한 결빙(Icing)발생을 줄이는 효과를 기대할 수 있다. 특히, 시트에서의 시일 이탈은 거의 발생하지 않았다. 반면에 바디의 바깥쪽으로 돌출되는 시일의 양은 증가하였다. Fig. 9는 Fig. 7(c)의 경우보다 시일의 강도(Young's modulus)만 10배로 크게 한 경우의 해석결과이다. 시일 재료의 강도가 높아질수록 변형량과 이탈량은 현저하게 감소함을 알 수 있다. 따라서, CNG차량의 연료공급라인용 체크밸브에 발생하는 시일의 이탈문제를 해결하기 위한 효과적인 방법중의 하나는 보다 강도가 높은 재질의 시일을 채용하는 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 NGV의 연료공급라인용 체크밸브에서 충전개시초기에 발생하는 충전불량문제의 원인규명을 위하여 간섭량, 가스압력 및 고무의 경도 등이 시일의 변형거동에 미치는 영향을 상세하게 조사하였다. 이를 위하여 비선형문제 해석전용 프로그램인 MARC를 사용하여 시일의 변형량을 예측하였으며, 시일에 작용하는 가스의 압력분포는 유동해석 프로그램인 FLUENT를 사용하여 구하였다. 이 결과, 바디의 간섭량과 시일에 작용하는 가스압력이 복합적으로 작용하여 시일을 이탈시키고, 이것이 포핏 구멍을 차단하기 때문에 문제가 발생하는 것으로 추정되었다. 또한, 이러한 문제가 발생하는 것을 방지하기 위한 새로운 설계방안도 함께 제시하였다. 따라서, 본 논문에서 처음으로 제시한 유동해석결과를 고려한 고압의 유체기계용 시일의 변형

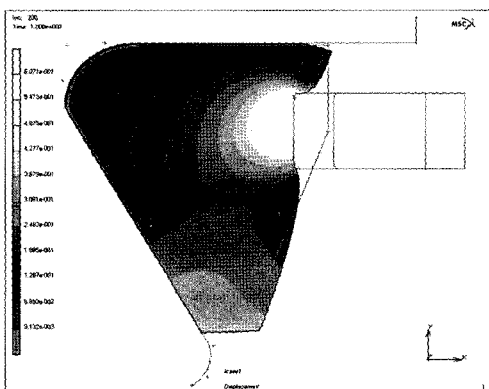


Fig. 8. Displacement distribution with changed interference position.

거동해석방법은 유사한 용도의 시일 설계에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대되며, 추가적인 많은 연구가 요구된다.

후 기

이 논문은 (주)파카하니핀커넥터와 2006년도 지방대학혁신역량강화사업에 의하여 지원되었음.

참고 문헌

1. Gas Research Institute, "NGV Check Valve / Fueling Receptacle Performance," GRI Technical Report, GRI-97-0369, 1997.
2. Gato, L. M. C. and Henriques, J. C. C., "Dynamic Behaviour of High-pressure Natural-gas Flow in Pipelines," *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, Vol.26, pp.817-825, 2005.
3. MARC User's Manual, Ver.2005 R2, MSC Software Inc.
4. FLUENT, FLUENT 6.0 Manual, 2002.
5. Nikas, G. K. and Sayles, R. S., "Nonlinear Elasticity of Rectangular Elastomeric Seals and its Effect on Elastohydrodynamic Numerical Analysis," *Tribology Int.*, Vol.37, pp.651-660, 2004.
6. Banerjee, R., *et al.*, "CFD Simulation of Critical Components in Fuel Filling Systems," SAE Paper 2002-01-0573, 2002.
7. 여경모, 박태조, 송명길, 강병루, "CNG차량의 연료 공급라인용 Check Valve내의 유동해석," 대한기계학회 춘계학술대회논문집, pp.159-163, 2006.