



천연가스 차량용 리셉터클의 내구성능에 관한 연구

*최 영 · 김영민 · 이용규 · 이장희

한국기계연구원

(2010년 9월 7일 접수, 2010년 12월 17일 수정, 2010년 12월 17일 채택)

A Study on the Durability Performance of a Receptacle for CNG Vehicles

*Young Choi · Young Min Kim · Yong Gyu Lee · Jang Hee Lee

*Dept. of Engine Research, Korea Institute of Machinery and Materials,
Daejeon, 305-343, Korea*

(Received 7. September. 2010, Revised 17. December. 2010, Accepted 17. December. 2010)

요 약

디젤 자동차에 의한 대기오염을 저감하고자 2000년부터 천연가스버스를 본격적으로 보급하기 시작하였고, 그 결과 현재의 도시 대기환경 개선에 많은 기여를 할 수 있었다. 그러나 천연가스 차량은 환경면에서 유리한 대신 화재 발생 시 대형 사고가 잠재하므로 항상 안전에 대한 대책이 요구된다. 천연가스 주입을 위한 연결구인 리셉터클의 경우, 최근 일부 차량에서 누설이 발견됨에 따라 연료용기와 더불어 반복사용에 따른 내구성 확보에 많은 노력을 기울이고 있다. 본 연구에서는 천연가스 차량용 리셉터클을 대상으로 반복 사용시험, 극한 떨림시험, 그리고 고속충전에 따른 내구성능을 평가하였다. 실험 결과 천연가스 차량에 사용되고 있는 리셉터클은 인증규정을 만족하지만, 현장에서 반복적인 고속충전에 따른 부품의 내구성능 저하에 의해 문제점이 발생될 수 있음을 확인할 수 있었다.

Abstract - Compressed Natural Gas (CNG) buses have been supplied since the year 2000 in order to resolve severe atmospheric pollution in metropolitan area and contributed on the improvement of urban atmospheric environment. However, it is indispensable to take an adequate measure to guarantee the safety of CNG vehicles because of the possibility of huge fire accident. A receptacle, connecting device between high pressure fuel supply tank and fuel line, plays an important role in CNG supply system. In recent, leakage of CNG from receptacles has been reported. So, the concern about the security and reliability of receptacles has been arisen. Therefore, a lot of efforts to prevent leakage are invested among researchers and the durability of this component should be guaranteed despite repeated operation. This research has performed durability tests of a CNG receptacle regarding the repeated usage, extreme chattering, and continuous full flow test. Although a receptacle used for CNG vehicle satisfies validation requirements in the test results, it has been found that failure in the function of leakage prevention in a receptacle could take place in the case of prolonged exposure to high supply pressure in common quick charging environment on site.

Key words : CNG, receptacle, durability, chattering, leakage, quick charging

*주저자:ychoi@kimm.re.kr

I. 서 론

대기환경 개선과 다양한 에너지원의 활용을 위해 1990년대 이후 세계 각국은 석유를 대신하여 천연가스를 수송용 연료로 많이 사용하고 있다. 국내의 경우 2002년 한·일월드컵을 계기로 도심지 대기환경을 개선할 목적으로 천연가스 버스의 보급을 지속적으로 확대해 왔으며 2009년 말 현재 2만대 이상의 천연가스 자동차가 운행 중에 있다.

천연가스 연료는 청정성과 우수한 연소특성을 가진 자동차 연료이기 때문에 그 사용량이 많아지고 있지만 최근 고압, 고속 충전에 따른 여러 문제점들이 지적되면서 연료부품의 안전성에 더 많은 관심을 갖게 되었다. 천연가스 자동차에 사용되는 연료부품들은 ECE, ISO, ANSI 등의 국제규정에 따른 안전성 평가기준[1~3]을 만족한 제품들이어도 불구하고 연료누출에 따른 화재사고 또는 연료용기의 폭발사고가 국내외에서 간헐적으로 발생되고 있다.

본 연구에서는 천연가스 자동차에 장착되는 여러 연료부품 중 Fig. 1에 나타난 바와 같은 리셉터클을 대상으로 장시간 사용에 따른 문제점을 파악하고자 반복사용시험, 극한떨림시험, 그리고 고속

충전과 관련된 최대유량시험을 실시하였다. 리셉터클은 고압의 천연가스를 주입하기 위한 연결구의 역할뿐만 아니라 주입된 천연가스가 역으로 방출되지 않도록 체크밸브의 역할도 하는 안전장치로서 고속, 고압의 천연가스와 압축기 오일이 직접 닿는 내구적으로 매우 열악한 환경에 놓여있는 연료부품이다[4].

II. 실험장치 및 방법

내구성능을 평가하기 위해 리셉터클에 최대 320bar 이상의 고압 건조공기를 공급할 수 있는 장치를 사용하였으며 각 시험의 조건 및 방법을 Table 1에 나타내었다. 여기서 반복사용시험, 극한떨림시험, 최대유량시험은 ISO- 15500 규정에 따랐으며 최대유량시험의 일부는 시험조건을 더 강화한 것으로써 실제 사용조건에 따른 내구성능을 평가하기 위해 포함되었다.

각 시험 후에는 각각의 샘플에 대해 300 bar 누설 평가시험을 실시하였으며 밸브실의 표면을 광학현미경으로 촬영함으로써 누설평가시험으로부터 확인할 수 없는 부분들을 가지적으로 평가하였다.

2.1. 반복사용시험

Fig. 2와 Fig. 3과 같이 3개의 샘플을 대상으로 입구 및 출구 압력이 정격사용압력 250bar (125%) 이상과 125bar (65%)이하를 20,000회 반복하여 가압 및 감압되도록 하고, 한 사이클은 10±2초를 유지하되 실온, 고온, 그리고 저온시험을 규정에 맞게 나누어서 시험을 실시하였다. 리셉터클의 경우 엔진 룸에 장착되는 부품이 아니기 때문에 고온과 저온시험을 각각 85℃와 -20℃로 하여도 되지만 좀 더 가혹한 조건을 부여하기 위해 120℃와 -40℃로 하였다.

2.2. 극한떨림시험

리셉터클은 스프링과 출구 및 입구의 압력차이의 힘으로 닫히거나 열리는 구조를 가지고 있어 스프링



Fig. 1. Photograph of a typical receptacle used in CNG vehicles.

Table 1. Durability test items and their methodologies of receptacles.

시험항목	시험방법
반복사용시험	총 20,000 사이클, 정격사용압력에 대해 입구/출구압력을 250bar에서 125bar 사이를 반복, 96% 실온, 2% 고온(120℃), 2% 저온(-40℃) 사이클
극한떨림시험	가장 떨림이 심한 유동조건에서 24시간 방치, 실온
최대유량시험	총 30 사이클, 리셉터클만 220bar에 연결 후 완전 개방, 실온

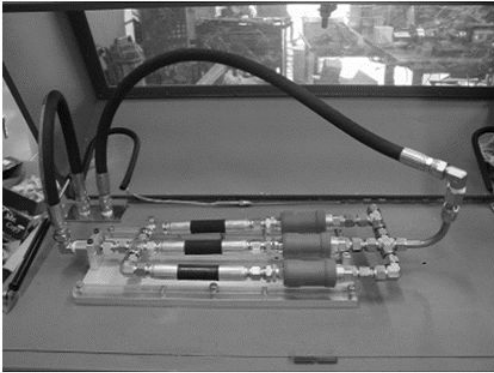


Fig. 2. Photograph of repeated usage test rig.

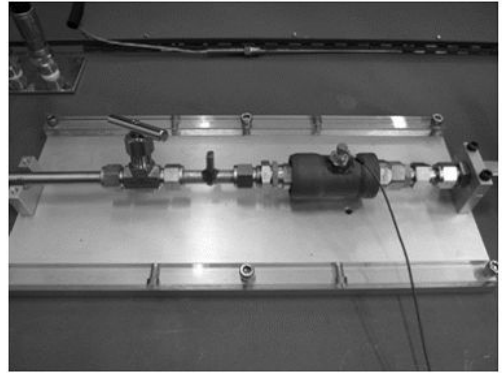


Fig. 4. Photograph of extreme chattering test rig.

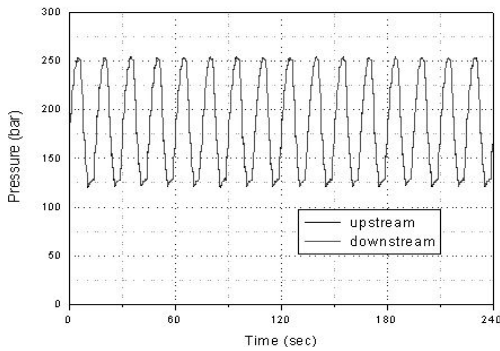


Fig. 3. Upstream and downstream pressure traces of a receptacle (overlapped).

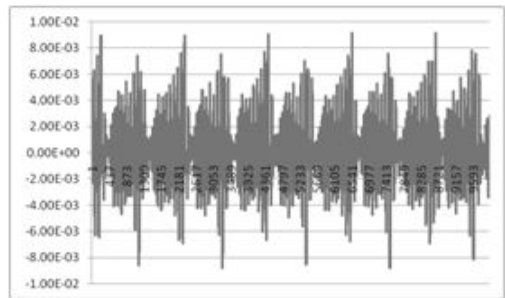


Fig. 5. Acceleration signal traces in chattering test (AC raw voltage values).

힘과 압력차이의 힘이 평형을 이룰 경우 닫히고 열리는 현상이 계속적으로 발생하는 떨림(chattering)이 발생한다. 이러한 떨림현상은 리셉터클 밸브셀의 내구수명에 가장 큰 영향을 주는 현상이므로 공급 압력과 유량에 따라 다른 패턴으로 나타나는데 시험 규정에는 압력과 유량에 대한 특별한 언급이 없어 시험자가 주관을 가지고 조건을 부여할 수밖에 없다.

본 연구에서는 가능한 한 가혹한 극한떨림시험을 실시하기 위해 Fig. 4 및 5와 같이 떨림의 세기를 가속도계를 설치하여 관별하였고 리셉터클 밸브의 떨림이 아닌 다른 부품의 떨림, 예를 들어 파이프의 떨림과 같은 노이즈는 체크밸브의 출구압력을 통해 구별하였다. 다양한 압력과 유량에 대해 시험을 실시한 결과 시험대상 샘플의 경우 50bar, 250 lpm 조건이 떨림의 크기도 크면서 시험에 필요한 가스소모량이 연속 24시간 공급 가능한 것으로 나타나 모든 극한떨림시험은 이 조건에서 실시되

었다. Fig. 5에서 보여지고 있는 가속도계의 시그널을 살펴보면 상기의 시험조건에서 압력변동과 동기되는 떨림의 주파수가 약 50Hz로 나타나 24시간 동안 리셉터클의 밸브가 약 430만번의 열림과 닫힘이 반복되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 극한떨림시험은 리셉터클 밸브의 많은 작동을 유발하여 밸브 셀과 스프링의 반복사용에 따른 내구성능을 짧은 시간에 확인할 수 있다.

2.3. 최대유량시험

총 30 사이클로 구성되며 각 사이클은 가스 공급 압력을 사용압력의 110% (220bar) 이상으로 시작 하되 2초 동안 80% (160bar) 이하로 내려가서는 안 된다. 또한 리셉터클 이후에 어떠한 밸브나 파이프를 연결하여 가스흐름을 방해해서도 안된다. 220bar의 가스가 대기로 그대로 방출되기 때문에 엄청난 소음과 유량을 동반하는 다소 위험한 시험이다.

최대유량시험을 위해 리셉터클 바로 상단에 제어

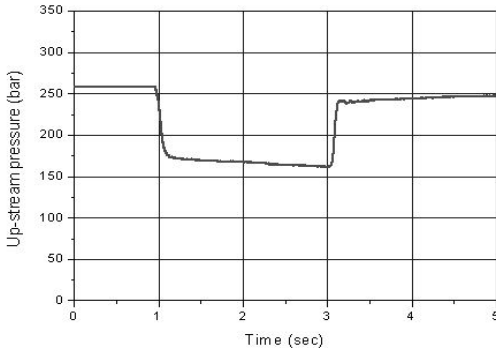


Fig. 6. Pressure traces in full flow test.

밸브를 설치하였으며 압력센서를 장착하여 공급 압력의 변화를 측정할 수 있도록 하였다. Fig. 6은 한 사이클에서의 공급압력의 변화를 나타내는데 시험규정에서와 같이 2초간 160 bar 이상을 유지하는 것을 볼 수 있다. 시험에 적용한 샘플은 2중 2개씩 총 4개로서 구형 2개와 신형 2개이다. 구형을 최대 유량시험에 적용한 이유는 사용 현장에서 결함이 여러 번 발견되는 등 문제점이 제기되었던 제품이 기 때문이다. 주로 발견된 결함은 고속충전에 따른 내부부품의 회전에 의한 스프링 파손이며, 문제 해결을 위하여 개발된 신형 리셉터클을 2007년부터 보급하기 시작하였다.

III. 실험결과

3.1. 반복사용시험

이 시험은 압력변동, 온도변동에 따라 연속적으로 리셉터클 밸브가 작동하는 시험이며 밸브씰 뿐만 아니라 구성하는 몸체와 스프링, 그리고 외부누출 방지씰 등의 내구성능을 함께 평가하는 시험이다. 3개의 샘플(R-1~3)에 대해 20,000회의 반복사용시험을 한 결과 외부결함이나 누설 등은 발견되지 않았는데, 이 시험에 사용된 리셉터클은 이미 ISO 규정에 따른 인증시험을 만족하여 천연가스버스에 실제 사용되고 있기 때문에 일치하는 결과라고 할 수 있다.

Fig. 7은 리셉터클 밸브씰을 광학현미경으로 확대 촬영한 사진(R-3 사진 또한 비슷한 경향이라 그림에서 제외함)의 일부분으로 각각 반복사용(내구) 시험 전후에 대해 보여주고 있다. 밸브씰 표면이 찢어지거나 이물질이 쌓여 있는 것과 같은 누설에 영향을 줄 만한 변화는 발견할 수 없었고 반복사용에 따라 밸브씰의 마모가 조금 진행된 정도임을 확인하였다.

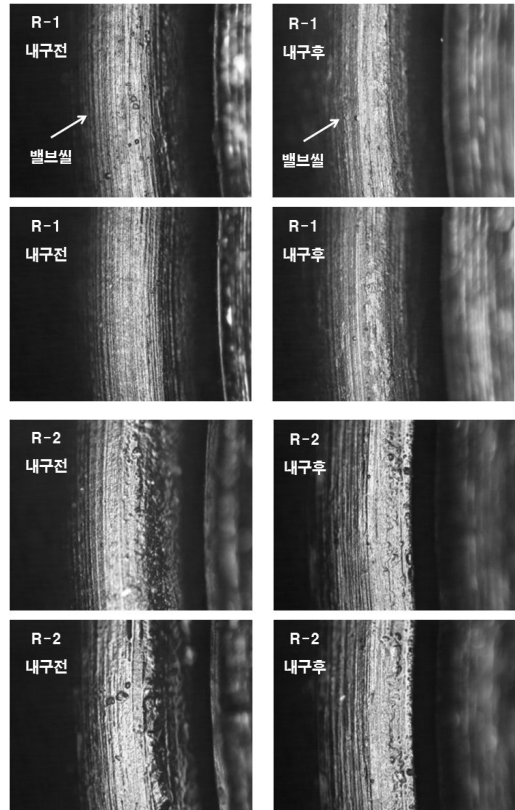


Fig. 7. Microscopic photographs of receptacle seals before and after continuous operation test.

3.2. 극한떨림시험

이 시험은 규정상[2] 반복사용시험에 적용되었던 샘플을 대상으로 추가적으로 실시되는 시험임에 따라 본 연구에서도 반복사용시험을 마친 R-1~3을 대상으로 앞서 언급한 시험조건에서 24시간 극한떨림시험을 개별적으로 실시하였다. 극한떨림시험을 마친 다음 반복사용시험과 마찬가지로 300bar 누설 시험을 실시하였지만 이것 역시 샘플 3개 모두 누설은 발생하지 않았다. 리셉터클의 밸브씰에 영향을 많이 줄 수 있는 극한떨림시험이지만 규정에 따른 시험에서는 모두 요구조건을 만족하는 것으로 나타나 제품의 성능은 신뢰할 만한 수준이라 할 수 있다. 광학현미경으로 촬영한 Fig. 8을 보더라도 극한떨림 시험 이후에 특별히 마모가 더 진행되었거나 찢어짐과 같은 큰 변형이 발생되지 않았음을 알 수 있다.

반복사용시험이나 극한떨림시험에서 밸브씰의 누설 성능에 영향을 줄만한 현상들은 발견되지 않았

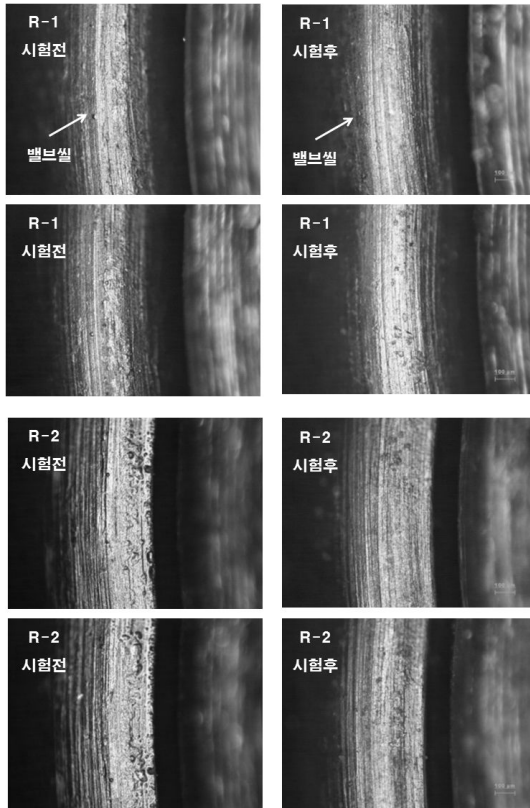


Fig. 8. Microscopic photographs of receptacle seals before and after extreme chattering test.

는데 그 이유는 밸브씰이 ‘c’ 형태의 금속 홈의 안쪽에 장착되어 있어, 밸브씰이 압착될 때 금속홈에 의해 밸브씰의 과도한 변형이나 충격이 방지되었기 때문으로 판단된다. 실제 사용에 있어서 밸브씰의 기밀기능에 문제를 발생시킬 수 있는 또 다른 원인은 압축기오일에 의한 밸브씰의 경화가 있으나[5] 비록 본 논문에 나타내지 않았지만 시험결과 누설에 영향을 줄 만한 변화를 발견할 수 없었다.

3.3. 최대유량시험

앞선 반복사용시험과 극한떨림시험이 주로 밸브씰의 내구성을 검증하는 시험인 것에 반해 최대유량시험은 리셉터클의 내부부품을 구성하는 밸브 또는 스프링 등의 내구성을 검증하는 시험이다. 고압의 연료가 저압의 연료용기로 주입될 때, 압력에 의한 충격과 초기 유속이 매우 크기 때문에 리셉터클의 내부부품이 파손되는 경우가 실제 사용에 있어서 종종 발견된다. 그러나 시험규정에 따라 Fig. 5와

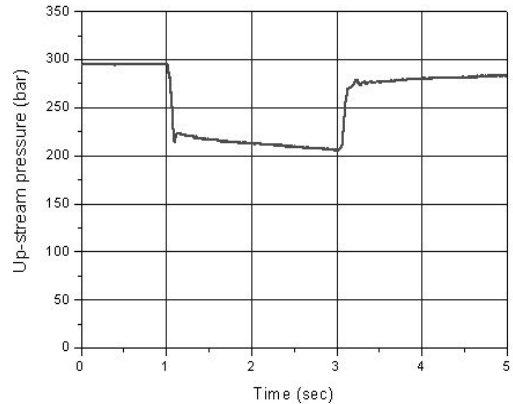


Fig. 9. Pressure traces in full flow test (severer condition than current regulation).

같은 공급압력을 리셉터클에 적용하였을 때 구형과 신형 모두 내구성에 문제점을 발견할 수 없었다. 따라서 시험규정에 의한 시험방법으로는 실제 사용에 있어서 나타나는 문제점을 확인할 수 없다는 결론을 내릴 수 있다.

시험규정에서 제시된 공급압력은 실제 사용 환경과 비슷한 환경이기 때문에 단기간의 시험으로 안전성을 확인하여야 하는 인증시험의 특성상 너무 낮은 수치인 것으로 판단된다.

본 연구에서는 최대유량시험으로서 좀 더 가혹한 조건을 부여하기 위해 Fig. 9와 같이 최초 공급압력 및 사이클 유지압력을 각각 약 50 bar 정도 더 높였으며, 또 다른 샘플의 구형 2개와 신형 2개의 리셉터클에 대해 시험을 실시하였다. 앞선 시험과 마찬가지로 사이클 회수는 30회로 하였으며 최소 공급압력의 유지시간도 2초로 동일하게 하였다.

시험규정에 비해 좀 더 가혹하게 최대유량시험을 실시한 결과 Fig. 10과 같이 구형 리셉터클 2개 모두는 스프링 파손이 발생하였으며, Fig. 11에서 보여주고 있는 신형 리셉터클의 경우 실험을 진행한 2개 모두 문제가 없는 것으로 나타났다.

신형 리셉터클은 내부부품의 강성을 강화하고 부품의 회전을 방지하는 구조를 가지고 있으며, 실제 사용에 있어서도 구형에 발생되었던 문제점을 많이 해결한 부품으로 인정받고 있는 제품이다.

실제 사용에서 나타났던 문제점인 스프링 파손이 가혹 조건의 최대유량시험에서만 확인된 것은 시험규정에 제시된 시험조건이 인증시험 조건으로는 다소 약하다는 것을 의미한다. 리셉터클 제작사를 통해서 확인한 바에 의하면 스프링 파손이 국외보다는 국내에서 종종 발견되는 것으로 나타



Fig. 10. Photographs of a leaking receptacle (left) and a damaged spring(right).

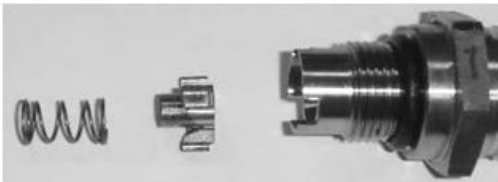


Fig. 11. Photograph of a new type receptacle.

났는데 이는 충전시간을 최대로 단축하기를 바라는 국내 환경과 어느 정도 관련이 있다고 할 수 있다. 비록 국제 인증기준이 있다고 하더라도 국내환경을 반영하지 못한다면 국내기준을 새로 규정할 필요가 있다. 구형 리셉터클의 스프링이 파손되고 신행은 이상이 없는 것으로 나타난 결과를 감안했을 때, 최대유량시험의 경우 시험조건을 본 연구에서와 같이 기존 국제 인증기준보다 50 bar 정도 더 높이는 것이 바람직하며, 이를 통하여 천연가스 연료부품의 안정성을 확보하는 것이 무엇보다 필요하다.

IV. 결 론

천연가스 자동차에 사용되는 리셉터클을 대상으로 여러 가지 내구성능시험을 실시하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 20,000회의 반복사용시험을 실시한 결과, 확대 촬영사진을 통해 밸브셀의 마모가 일부 진행됨을 알 수 있었지만 리셉터클의 내구성능에 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.
2. 24시간 극한떨림시험을 적용한 결과에서도 리셉터클 밸브셀의 마모가 미미했으며 누설기능에 문제점을 발생시킬만한 변형을 발견할 수 없었다.
3. 급속충전과 관련된 최대유량시험의 경우, 필드에서 발견되는 스프링 파손의 문제점을 시험규정에 따른 시험방법으로는 확인할 수 없었지만 이보다 더 가혹한 조건의 최대유량시험에서는 확인이 가능했다.
4. 고속충전과정에서 발생할 수 있는 리셉터클의 문제점을 사전에 확인하여 방지할 수 있도록 최대유량시험의 시험조건을 본 실험에서 제시한 압력조건인 최초 공급압력 250 bar 이상 및 사이클 유지압력 200 bar 이상으로 강화할 필요가 있으며, 이를 통해 리셉터클의 안전성을 확보하는 것이 필요하다.

참고문헌

- [1] ECE - Regulation 110 Revision (Consolidated to Supplement 7) CNG Equipment (2008)
- [2] ISO 14469-1, Road vehicles - Compressed natural gas(CNG) refueling connector - Part 1 : 20 MPa (200 bar) Connector (2004)
- [3] ANSI NGV3.1 - Fuel System Components for Compressed Natural Gas Powered Vehicles (NGV) (2008)
- [4] 여경모, 박경택, 박태조, 강병루. “CNG 차량의 연료공급라인용 Check Valve Seal의 거동해석”, KSTLE, Vol. 22, No. 6, 329~334, (2006)
- [5] 김창기, 최영, 박철웅, “천연가스 차량용 체크 밸브의 내구성능에 관한 연구”, 한국가스학회 논문집, 13권 6호, 15~20, (2009)