

CNG 차량의 연료주입라인용 Check Valve내의 비정상상태 유동해석 Unsteady Flow Analysis of Check Valve for CNG Vehicle Fuel Supply Line

여경모¹, 박경택¹, **박태조², 강병루³

K. M. Yeo¹, K. T. Park¹, **T. J. Park(tjpark@gnu.ac.kr)², B. R. Kang³

¹경상대학교 대학원, ²경상대학교 기계항공공학부, ³(주)파카하니핀커넥터

Key words : CNG(Compressed Natural Gas), Check Valve, CFD, Unsteady Flow, FLUENT

1. 서론

현재 국내에서 운행중인 NGV(Natural gas vehicle)의 연료충전라인은 Receptacle, 체크밸브(Check valve) 및 CNG 저장탱크 등으로 구성되어 있으며, 210bar 정도의 고압으로 충전된다. 이와 같이 충전압력의 고압화로 인하여 사용중에 구성부품에서 문제가 발생할 가능성이 많다. 특히, 저장탱크에서 CNG가 역류되는 것을 방지하는 체크밸브에서는 체터링(Chattering)이 발생하거나 충전완료단계에서 포핏(Poppet)이 닫힐 때 수격현상(Fluid shock)이 발생할 수 있다. 이러한 경우, 고압의 충격압력이 구성부품에 작용하므로 수명이 단축될 뿐만 아니라 파손에 따른 가스의 누설은 대형폭발사고나 인명피해를 초래할 수 있다. 따라서 이러한 문제발생을 방지하기 위해서는 충전시에 구성부품내에서의 유동특성을 정확하게 이해하는 것이 아주 중요하다.

하지만 지금까지의 CNG 충전시스템 구성부품에 관련된 연구 결과는 소수에 불과하다. Gato 등[1]은 파이프 내에서의 CNG 유동에 대한 수치해석을 수행하였으며, 여경모 등[2]이 FLUENT를 사용하여 CNG충전용 체크밸브에 대한 정상상태 CFD해석결과를 구하였다. 이종훈 등[3]은 저압인 차량용 PCV밸브의 동특성 파악을 위해 비정상상태로 해석하였다. 한편, 유재찬 등[4]은 참고문헌[2]의 결과를 사용하여 간섭량과 충전압력에 의한 시일의 변형거동 해석결과로부터 시일의 이탈원인을 규명하였다.

본 논문에서는 CNG 충전완료단계의 연료충전라인용 체크밸브 내에서 발생하는 문제점들의 원인을 규명하기 위한 기초자료를 확보하기 위하여 열-유체해석 프로그램인 FLUENT를 사용하여 비정상상태유동을 해석하였다.

2. 수치해석 및 방법

내부의 형상이 복잡한 체크밸브 내의 유동특성은 포핏의 위치 변화에 따라 달라지므로 포핏의 동적거동을 모사하기 위하여 MDM(Moving dynamic mesh) 기법을 이용하였다. Fig.1은 전처리 프로그램인 Gambit을 이용하여 생성한 수치해석에 사용한 격자계를 나타낸 그림으로 메쉬의 수는 25만개 정도이다.

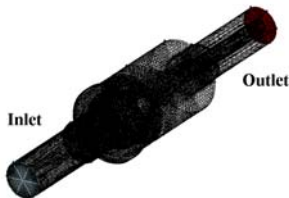


Fig. 1 Grid generation of check valve

한편, 포핏의 움직임은 입-출구간의 차압에 의해서 발생하는 유체력과 스프링력간의 힘의 평형에 의해서 결정되므로 이들 관계를 뉴턴의 운동방정식을 이용하여 나타내면 다음과 같다.

$$-a \frac{dv}{dt} = \frac{1}{m} (F - kx), \quad -\frac{dx}{dt} = v \quad (1)$$

이들 식은 오일러 양해법을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta v = \frac{1}{m} (F - kx) \cdot \Delta t \quad (2)$$

$$v_{i+1} = v_i + \Delta v, \quad x_{i+1} = x_i + \Delta v \cdot \Delta t \quad (3)$$

위의 식을 프로그램화하여 서브루틴을 만들어 FLUENT에 적용하였다. 해석과정은 FLUENT에서 해당되는 시간간격에서의 유체질량, 운동량, 에너지 보존방정식을 계산하여 포핏의 표면에 걸리는 유체력의 정보를 서브루틴에 전달한다. 서브루틴은 포핏의 이동속도를 계산하게 되고 이를 FLUENT에 전달하여 미소변위 Δx 만큼 포핏을 이동시키게 된다.

본 논문에서는 해석을 위하여 이상기체에 대한 3차원 압축성 비정상상태 난류유동을 적용하였다. 이때 난류모델로는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며, 표준벽함수(Standard wall function)를 적용하였다. 입구의 CNG압력은 210bar로 고정하였으며, 충전이 완료되는 상황을 가정하기 위해 출구압력은 209.5bar에서 시간에 따라서 증가하도록 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig.4와 Fig.5는 시간에 따른 유량과 포핏의 위치변화를 각각 나타낸 결과이다. 출구압력이 증가할수록 입-출구간의 압력차이가 작아지므로 포핏의 하류측에서 작용하는 힘이 증가하여 스프링력과 합쳐져 상류측에서의 작용력보다 커지게 된다. 이는 포핏을 입구 쪽으로 이동시키는 힘으로 작용하며 Body와 포핏사이의 간극은 작아지게 된다. 이로 인해 증가한 유동저항력은 출구의 압력증가와 함께 유량을 감소시키는 원인이 된다.

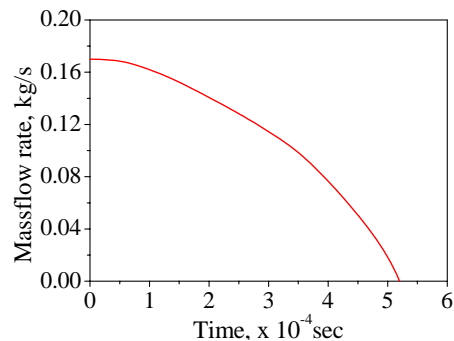


Fig. 2 Variation of CNG mass flow rate with charging time

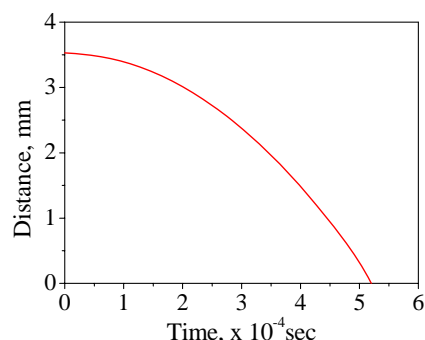


Fig. 3 Variation of poppet position with time

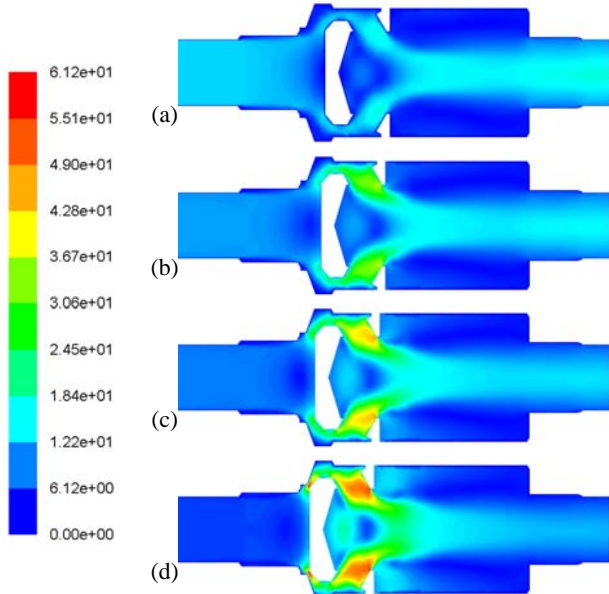


Fig. 4 Velocity distribution : (a) Full opened, (b) 1/4 closed, (c) 1/2 closed, (d) 3/4 closed

하지만 Fig.4에 나타난 것과 같이 포핏이 닫힐수록 유량의 감소에도 불구하고 최대유속은 증가하고 있다. 즉, 완전히 열린 상태에서는 포핏의 하류에서 최대유속이 발생하지만 3/4이 닫혔을 때 포핏과 시일 사이의 간극에서 유속이 훨씬 빠르게 나타난다. 이는 유량의 감소량에 비해 포핏의 이동속도가 상대적으로 빨라서 시간에 따른 유동단면적의 축소비율이 커지기 때문이다.

Fig.5는 체크밸브의 닫힌 정도에 따른 정압(Static pressure)의 분포를 나타낸 그림으로 체크밸브가 Full opened일 때와 3/4이 닫힌 상태일 때 간극을 기준으로 전후에서 압력분포가 크게 차이를 보이고 있다. 이러한 압력분포의 차이는 체크밸브가 열리는 경우에는 시일을 이탈시켜 충전불능을 초래하는 원인으로 작용한다. Fig.6에는 Seal inner face와 Seal side face간의 압력차이를 나타낸 결과로 포핏이 닫힐수록 증가하고 있다. 이는 유체가 좁은 간극을 통과하면서 압력강하가 발생하여 두면에 각각 다른 압력이 작용하며, 이러한 압력의 차이는 시일을 이탈시키려는 힘으로 작용한다[4].

Fig.7에서는 포핏이 닫힘에 따라서 포핏의 선단부에는 주입압력보다 높은 서어지(Surge) 압력이 순간적으로 작용함을 알 수 있다. 특히 포핏이 이동하여 간극이 좁아질 때 이러한 현상이 더욱 심화되며 포핏이 완전히 닫히면 포핏 근처의 압력이 더욱 높아져 유동방향의 반대로 압력이 전달될 것이다. 이 결과, 소음과 함께 진동이 발생하여 체크밸브와 연결된 배관라인까지 손상을 줄 수 있다.

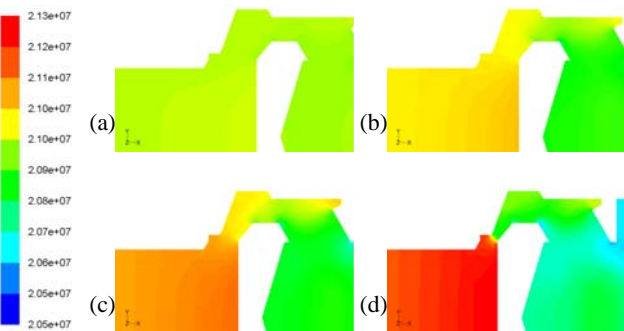


Fig. 5 Static pressure distribution : (a) Full opened, (b) 1/4 closed, (c) 1/2 closed, (d) 3/4 closed

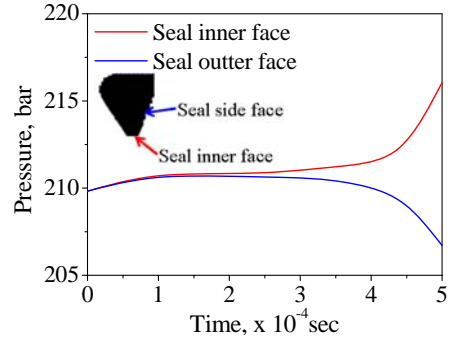


Fig. 6 Static pressure variation between seal faces

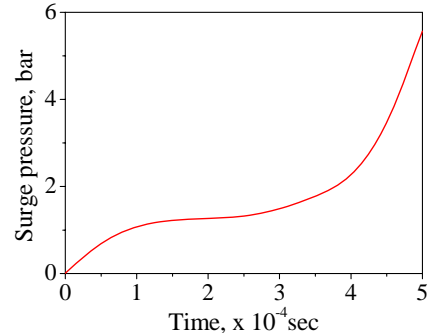


Fig. 7 Surge pressure variation at poppet front

4. 결론

본 논문에서는 CNG 차량의 연료충전라인용 체크밸브에서 발생할 수 있는 문제들의 원인을 규명하기 위해 열-유체해석 상용 프로그램인 FLUENT를 사용하여 체크밸브의 포핏이 시간에 따라 이동하는 경우에 대한 비정상 유동특성을 상세하게 조사하였다. 이 결과, 포핏이 닫힘에 따라 시일에 불균일한 압력이 작용하며, 주입압력보다 높은 서어지 압력이 포핏 선단부에 순간적으로 발생하여 배관에서 수격현상이 발생할 수 있음을 확인하였다. 본 논문에서의 이러한 결과는 CNG 충전라인용 체크밸브에서 발생하는 문제점들의 발생원인을 부분적으로 규명함과 아울러 유사한 구조의 CNG 충전라인 부품설계에 유용하게 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

후기

이 논문은 2007년도 지방대학혁신역량강화사업에 의하여 지원되었음을 밝힙니다.

참고문헌

- Gato, L. M. C. and Herniques, 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.
- Yeo, K. M., Park, T. J., Chung, H. T., Song, M. G. and Kang, B. R., "Analysis of Check Valve for CNG Vehicle Fuel Supply Line," Trans. of the KSME, pp.159~163, 2006.
- Lee, J. H., Lee, Y. W. and Kim, J. H., "A Study on Internal Flow Characteristics of PCV Valve According To Spool Dynamic Behavior," Trans. of the KSCFE, pp.223~227, 2006.
- Yoo, J. C., Yeo, K. M., Park, T. J. and Kang, B. R., "Analysis of Check Valve Seal for CNG Vehicle Fuel Supply Line," J. of the KSTLE, Vol.22, pp.329~334, 2006.