

# 모바일 연료전지용 초소형 수소 레귤레이터

김형진<sup>+</sup>, 서영호\*, 김병희<sup>+</sup>

(논문접수일 2010. 8. 16, 심사완료일 2011. 1. 11)

## Small Hydrogen Regulator for Mobile Fuel Cells

Hyung-Jin Kim<sup>+</sup>, Young-Ho Seo\*, Byeong-Hee Kim<sup>+</sup>

### Abstract

This paper presents small hydrogen regulator for the mobile fuel cell. Mobile fuel cell is generally classified into open-end type and dead-end type. In the open-end type, flow rate of hydrogen is constantly controlled, while pressure of hydrogen is constantly maintained in the dead-end type. Considering the efficiency and stability of the fuel usage, dead-end type is more suitable with mobile fuel cell. Mobile fuel cell operated by dead-end mode requires hydrogen regulator which controls the hydrogen pressure from 0.1bar to 0.5bar within 3% error. In this paper, small hydrogen regulator (volume of 2.6cc) was fabricated by stainless steel. Regulation characteristics was experimentally evaluated.

**Key Words :** Gas regulator (기체 레귤레이터), Mobile fuel cell (모바일 연료전지), Stainless steel etching (스테인레스 강 식각)

### 1. 서론

초소형 정밀기계 기술 (MEMS)의 발전과 더불어 대부분의 전기, 전자 기기들이 더욱 소형화 되고, 이에 따라 구동 에너지 원도 경량화 및 소형화가 요구 되고 있다. 이러한 소형 및 모바일 응용 기기들의 전원 장치로 가장 부합되는 차세대 동력원으로 연료전지가 세계적인 관심을 불러 일으키고 있다<sup>(1)</sup>. 연료전지의 성능 및 효율 해석, 전극 성능 평가, 분리판의 마이크로채널 가공 등 다양한 핵심기술에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다<sup>(2-3)</sup>. 특히 고분자 전해질형 연료전지의 경우, 작동온도가 낮고, 출력밀도가 높으며, 구조가 단순하여 소형 이동전원으로 제작이 가능하다는 특징을 가지고 있다<sup>(4)</sup>. 연료전지는 연료의 공급 방식에 따라 일정한 유량의 수소를 공급하는 open-end 방식과 수소의 압력을 일정하게 유지하는 dead-end 방식으로 나눌 수가 있다<sup>(5)</sup>. 하지만 모바일용 연료전지로는 연료 사용

효율 및 안정성을 고려해 볼 때, dead-end방식이 적합한 것으로 보고되고 있다. 따라서 모바일 연료전지를 위해 초소형 수소 레귤레이터의 개발이 요구됨을 알 수 있다.

초정밀 가공기술 및 MEMS 기술을 이용하여 다양한 유체 유량제어 레귤레이터<sup>(6-8)</sup> 및 기체 압력제어용 레귤레이터<sup>(9)</sup>가 개발되었는데, Polydimethylsiloxane (PDMS)를 이용하여 제작된 MEMS 레귤레이터<sup>(7-8)</sup>는 PDMS 제작공정의 특성으로 기체의 완전 밀폐가 불가능하기 때문에 수소에는 적용할 수가 없으며, 실리콘을 이용하여 제작된 기체 레귤레이터<sup>(6,9)</sup>는 다수의 실리콘 웨이퍼를 접합하는 공정이 요구되어 복잡한 제작 공정과 높은 비용이 요구되는 단점이 있다.

본 연구에서는 기계적 안정성을 가진 스테인리스 스틸을 기반으로 수소 레귤레이터를 설계하고, 기계가공과 화학적 식각 공정을 이용하여 스테인리스 스틸을 가공하여 수소 레귤레이터를 제작하여 그 동작특성을 평가하였다.

\* 강원대학교 기계메카트로닉스공학과 (mems@kangwon.ac.kr)

주소: 200-701 강원도 춘천시 강원대학길 1

+ 강원대학교 기계메카트로닉스공학과

## 2. 동작원리

Fig.1은 본 연구에서 개발된 초소형 수소 레귤레이터의 동작 원리를 보이고 있다. Fig.1(a)와 같이 서로 다른 압력,  $P_A$ ,  $P_B$ ,  $P_C$ 를 가지는 A, B, C 세 부분의 공간으로 나눌 수 있다. 초소형 수소 레귤레이터 상단에 위치한 압력조절 핀을 이용하여 내부 스프링을 압축시켜 스테인리스 스틸 박막을 아래로 변형시키게 되면, 박막은 예압을 받아 A 영역이  $P_A$ 의 압력을 가지는 효과를 나타낸다.

이 때 스프링을 압축시켜 발생시킨 힘은 0.1~0.5bar 사이의 압력이 되도록 설계하였다. 압력조절 핀에 의한 스프링의 압축으로 인해 플러그는 아래로 향하게 되고, 수소 가스가 C 영역에서 B 영역으로 통과할 수 있게 개방 된다. C 공간의 압력,  $P_C$ 는 수소 저장 용기로부터 직접적으로 들어오는 10bar이다.

만약 압력조절 핀으로 스프링을 압축시켜 발생시킨 예압이 0.3bar( $P_A$ )라고 하면, 수소 저장 용기로부터 C 영역을 거쳐 B 영역으로 유입된 수소에 의해  $P_B$ 가 점차적으로 상승하여 아래로 변형된 스테인리스 스틸 박막을 위쪽으로 복원시키게 된다. 점차적으로 상승한  $P_B$ 가 결국  $P_A$ 의 압력 0.3bar에 이르면 Fig.1(b)와 같이 박막과 연결된 플러그가 B 영역과 C 영역을 차단하게 된다. 이 때 C 영역은 수소 저장용기 압력인 10bar

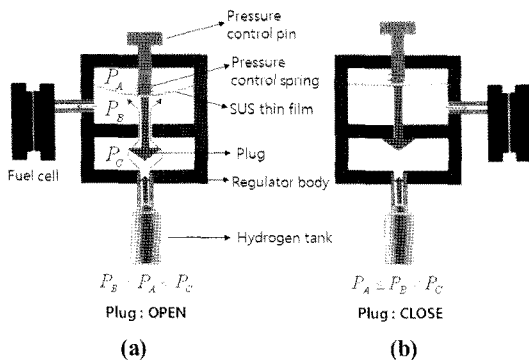


Fig. 1 Working principle of small hydrogen regulator

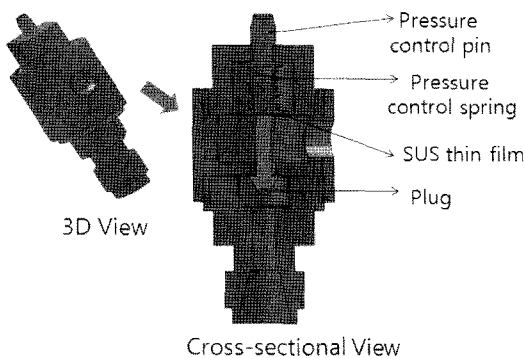


Fig. 2 Design of small hydrogen regulator

를, B 영역은 0.3bar를 유지하게 된다. 또한, B 영역은 연료전지에 연결되어 있으므로 연료전지의 반응에 의해 수소가 점차 소모되면, 점차적으로 B 영역의 압력,  $P_B$ 가  $P_A$ 보다 낮아져 다시 플러그가 열리게 되어 수소가 다시 C 영역에서 B 영역으로 유입되게 된다. 이러한 반복으로 B 영역은 압력조절 핀으로 맞춰진 0.3bar를 일정하게 유지하는 레귤레이터 역할을 수행하게 된다.

## 3. 초소형 수소 레귤레이터의 설계 제작

### 3.1 설계

설계된 초소형 수소 레귤레이터는 모바일 연료전지에 적합하도록 압력 조절 범위를 0.1~0.5bar로 선정하였으며, 전체 부피는 3cc 이하가 되도록 Fig.2와 같은 형태로 설계 되었다. 제안하는 레귤레이터에 있어 가장 중요한 부분이 예압을 통한 스테인리스 스틸 박막의 변형과 수소 저장용기에 의한 스테인리스 스틸 박막의 변형 복원이 되도록 하는 부분이므로, 스테인리스 스틸 박막의 직경 및 두께 선정과 예압을 위한 스프링의 선정이 주요 설계 변수가 된다.

스테인리스 스틸 박막의 두께 선정을 위해 유한요소해석(Solidworks)을 수행하였다. 사용된 스테인리스 스틸 재료는 SUS-304이며, 0.5bar의 압력에 대해 항복응력인 207MPa를 초과하지 않도록 두께와 직경을 결정하였다.

결정된 박막의 두께와 직경은 각각 50 $\mu$ m과 9mm이다. Fig.3은 유한요소해석을 통해 수행한 박막 변형에 대한 결과를 보여주고 있다. 레귤레이터의 최대 조절 압력이 0.5bar이므로 직경 9mm의 박막이 받는 최대 힘은 대략적으로 분포하중(uniform load)을 집중하중(concentrated load)로 환산하면 약 1.74N이 되고, 플러그와 연결된 부분을 제외하고 나면 약 1.34N이 된다. 이를 고려하여 예압을 위해 선정된 스프링은 강성계수가 0.3N/mm인 Misumi 사의 WR3-5를 사용하였다.

### 3.2 제작 및 조립

스테인리스 스틸로 레귤레이터를 제작하기 위하여 SUS-

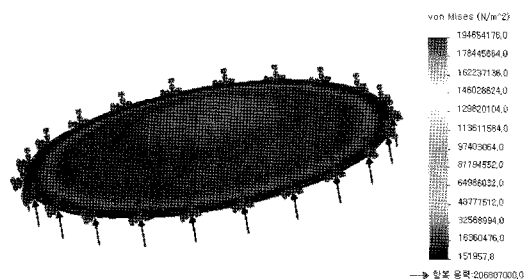


Fig. 3 Analysis result of the stainless steel membrane of thickness of 50 $\mu$ m.

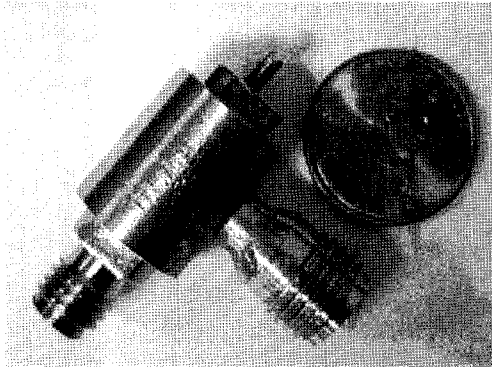


Fig. 4 Photograph of assembled small hydrogen regulator

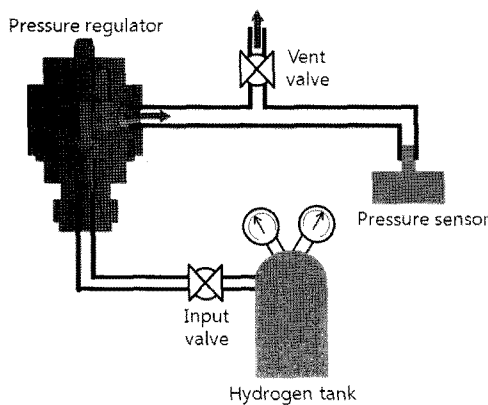


Fig. 5 Schematic diagram of measurement setup for the regulator characterization

304 봉을 절삭가공하여 레귤레이터의 하우징, 레귤레이터와 연료전지를 연결하는 커넥터, 압력조절핀과 플러그를 제작하였다. 레귤레이터 하우징은 압력조절핀이 포함된 상부와 수소 연료가 공급되는 하부에 나사산을 내어 연결하였다. 레귤레이터와 연료전지를 연결하는 커넥터는 1/16인치를 사용하였다. 레귤레이터 내부에 압력 조절을 위한 박막은 50 $\mu$ m 두께의 SUS-304 재질로 원형 박막(sheet)를 식각(etching)하여 제작하였다<sup>(10)</sup>. 식각은 50 $^{\circ}$ C의 온도에서 수행하였으며, 식각 용액은 6:1로 물과 염화제2철(FeCl<sub>3</sub>)을 혼합한 용액을 스프레이식으로 분사하여 수행하였다. 스테인리스 스틸 박막과 플러그의 접착은 플러그를 쉽게 결합할 수 있도록 하기 위해 플러그에 나사산을 내었고, 같은 피치의 나사산을 갖는 너트를 제작하여 박막에 UV 경화성 레진을 사용하여 접합하였다. 스테인리스 스틸 박막과 연결되어 있는 플러그에서 수소가 새는 것을 방지하기 위해 실링(sealing)방법으로 실리콘 탄성체인 PDMS를 0.5mm 두께의 O-ring으로 제작하여 사용하였다. 또한 압력 조절을 위한 방법으로 사용될 압력 가변용 스프링은 압력 조절핀과 연결되어 스테인리스 스틸 박막에 예압을 가할 수 있도록 제작하였으며, 이와 같은 방법으로 제작된 수소 레귤레이터의 전체 부피는 2.6cc이며 Fig. 4에 나타내었다.

## 4. 실험방법 및 실험결과

### 4.1 실험방법

초소형 수소 레귤레이터의 특성을 파악하기 위해 Fig.5와 같이 실험 장치를 구성하였다. 수소 저장용기로부터 인가되는 10bar의 압력이 레귤레이터의 C 영역으로 입력이 되고, 레귤레이터의 B 영역을 거쳐 압력이 제어되고, B 영역에 위치한 출구를 상용 압력센서(SDX15G2, Honeywell Inc.)에 연결하여 레귤레이터의 압력 조절 특성을 평가하였다. 상용 압력센서의 출력은 DAQ보드(NI USB-6009, National Instrument Inc.)를 통하여 수집하였다.

실험은 두 가지 방법으로 실행했다. 첫 번째 실험은 압력조절 핀을 이용하여 스프링의 압축력을 변화시켰을 때 원활하게 출구의 압력을 변화시킬 수 있는지에 대한 동작검증에 대한 평가이며, 두 번째 실험은 압력조절 핀을 원하는 목표압력으로 고정하고, 밴트밸브(vent valve in Fig.5)를 개방하여 레귤레이터의 모든 압력을 제거한 후, 수소 저장용기의 입력밸브(input valve in Fig.5)를 개방하였을 때 설정된 압력으로 상승하는 응답시간과 정상상태 오차를 분석하여 반응특성을 평가하였다.

### 4.2 실험결과

동작검증 실험에서는 수소 저장용기에 80bar의 압력으로 저장된 수소를 고압 레귤레이터를 통하여 10bar로 감압시키고, 감압된 수소를 제작된 레귤레이터의 C 영역으로 연결하였다. 레귤레이터에서는 압력조절 핀을 통하여 스프링의 압축력을 변화시켜 레귤레이터 출구 압력을 0.1bar에서 0.4bar까지의 조절되는지 평가하였다.

Fig.6은 동작검증 실험결과를 나타내며, 그래프에서 보듯이 수소 탱크로부터 배출된 10bar의 압력에서 0.1, 0.2, 0.3, 0.4bar의 4단계에 걸쳐 압력조절이 원활하게 이루어지고 있음을 알 수 있다.

Fig.6에서 각각의 조절 단계 사이에서 그래프의 기울기는 응답 특성을 나타내는 것이 아니라, 수동으로 압력조절을 수행하는 구간을 나타내며, 기울기가 일정하지 않은 것은 수동으로 압력을 조절하기 때문이다.

두 번째 실험은 레귤레이터의 압력조절 핀을 이용해 목표 압력을 0.35bar로 고정시키고, 레귤레이터의 모든 압력을 제거한 상태에서, 수소 저장용기의 10bar의 압력이 레귤레이터의 C 영역으로 인가되었을 때 시간에 따른 B 영역 압력, PB, 의 시간에 따른 변화를 측정하여 그 응답특성을 평가하였다.

Fig.7은 제작된 레귤레이터의 응답특성을 나타내는 그래프이며, 상승구간(①)과 정상상태 유지구간(②)으로 구분됨을 알 수 있다. 0.35bar에 이르는 상승시간(rising time)은 약 40

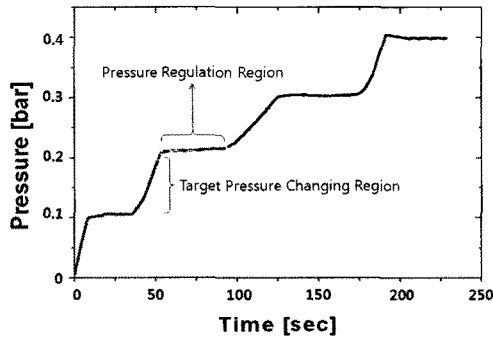


Fig. 6 Hydrogen regulation test from 0.1bar to 0.4 bar

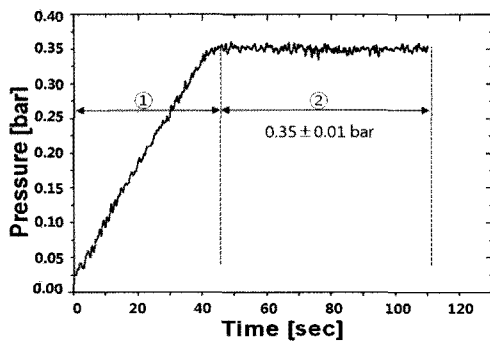


Fig. 7 Response of the regulator adjusted at target pressure of 0.35bar

초이며, 정상상태 오차는 0.35bar의 목표 압력에 대해 약 3% 이내의 오차를 보이는 것으로 평가되었다. 상승시간은 수소 저장용기에 부착된 고압 레귤레이터의 응답시간까지 포함된 결과이므로 제작된 레귤레이터의 응답속도는 40초 이내이다.

### 5. 결론

본 연구에서는 모바일 연료전지의 수소공급 방법 중 dead-end 방식에 사용하기 위한 초소형 수소 레귤레이터를 제작하고 그 성능을 평가하였다. 제작된 레귤레이터는 연료전지 구동 특성에 요구되는 0.1~0.5bar의 압력 범위 내에서 약 3%의 오차를 가지고 일정하게 수소 압력을 유지함을 실험적으로 검증하였다.

### 후기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중 “모바일 PC용 초소형 발전기계 시스템 개발”의 과제 의 지원으로 수행되었으며, 또한 이 연구에 참여한 연구자는 ‘2단계 BK21 사업’의 지원을 받았습니다.

### 참고 문헌

- (1) Voss, H., and Huff, J., 1997, “Portable Fuel Cell Power Generator,” *J. of Power Sources*, Vol. 65, pp. 155~158.
- (2) Kim, H. G., Kim, Y. S., Yang, S. M., and Nah, S. C., 2005, “TA Study on the Performance and the Efficiency in Polymer Electrolyte Embrane Fuel Cell,” *J. of KSMTE*, Vol. 14, No. 4, pp. 75~80.
- (3) Kim, H. G., Kang, S. S., Kwac, L. K., Song, H. Y., and Kang, Y. W., 2007, “A Study on the Performance Analysis and Design of Cathode in Fuel Cells,” *J. of KSMTE*, Vol. 16, No. 1, pp. 75~79.
- (4) Wang, L., Husar, A., Zhou, T., and Liu, H., 2003, “Aparametric Study of PEM Fuel Cell Performance,” *Int. Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 28, pp. 1263~1272.
- (5) Himanen, O., Hottinen, T., and Tuurala, S., 2007, “Operation of a Planar Free-Breathing PEMFC in a Dead-End Mode,” *Electrochemistry Communications*, Vol. 9, No. 5, pp. 891~894.
- (6) Cousseau, P., Hirschi, R., Frehner, B., Gamper, S., and Maillefer, D., 2001, “Improved Micro-flow regulator for drug delivery systems,” *IEEE MEMS Conference*, pp. 527~530.
- (7) Yang, B., and Lin, Q., 2007, “A Planar Compliance-Based Self-Adaptive Microfluid Variable Resistor,” *Journal of MEMS*, Vo. 16, pp. 411~419.
- (8) Doh, I., and Cho, Y. H., 2009, “Passive Flow-Rate Regulators using Pressure-Dependent Autonomous Deflection of Parallel Membrane Valves,” *Lab Chip*, Vol. 9, pp. 2070~2075.
- (9) Debray A., Nakakubo T., Ueda K., Mogi S., Shibata M., and Fujita H., 2005, A Passive Micro Gas Regulator for Hydrogen Flow Control,” *J. Micromech. Microeng.* Vol. 15, pp. 202~209.
- (10) Kim, D. W., Hong, K. P., Cho, M. W., and Lee, E. S., 2010, “Mirrorlike Machining of SUS304 by Combined Process of EP and MR Polishing,” *J. of KSMTE*, Vol. 19, No. 2, pp. 267~274.