

마그네슘 금속연료전지의 출력특성에 관한 연구

A Study of Power Output Characteristics for the Magnesium Metal Fuel Cell

김 용 혁[†]
(Yong-Hyuk Kim)

Abstract - The electric power output characteristics of magnesium fuel cell were investigated with regard to internal resistance. A equivalent circuit with the series-connected three internal resistance was introduced to analyze the response to change of power. The power output analysis was employed in order to investigate the effect of internal resistances for the electrolyte concentration, air electrode area, Mg electrode area and distance between the electrodes. It was confirmed that internal resistance is generated by the electrolyte, air electrode and metal electrode, then those Internal resistances had a significant effect on the power output decrease. The power output was a maximum when the load resistance matches the internal resistance of the magnesium fuel cell. The fuel efficiency was only 50% at maximum power output. Higher fuel efficiency was achieved when the load resistance is greater than the internal resistance.

Key Words : Fuel cell, Power output, Internal resistance, Electrolyte, Air electrode, Fuel efficiency

1. 서 론

오늘날 금속연료전지는 산화력이 높은 금속을 음극으로 하고 공기를 양극으로 하는 신개념의 연료전지로서 매우 높은 전기적 퍼텐셜을 갖고 있다. 또한 귀금속 촉매를 사용하지 않기 때문에 제작비가 저렴하고 인체에 유해한 가스의 발생이 없을뿐더러 반응생성물은 화학적으로 매우 안정된 산화물 형태로 존재하게 된다. 그리고 에너지밀도가 리튬전지보다도 훨씬 높기 때문에 고가의 리튬전지를 대체할 전기기술로 개발되어 왔다. 최근에 들어 모바일 전자기기의 발전으로 휴대용 전원으로서의 가치를 인정받고 있다. 또한 수소연료전지에 필적되는 성능으로 인하여 전기자동차의 구동전원이나 발전용 전지로서 크게 기대되고 있다[1-3].

금속/공기연료전지의 기본구조는 탄소를 재료로 한 공기전극과 연료인 금속전극 그리고 전류흐름을 위한 전해질로 구성된다. 금속전극(Anode Electrode)의 각 원자는 수분(H_2O)의 수산기(OH^-)와 산화반응을 일으킴으로서 전자를 방출시켜 금속전극에 전위를 생성한다. 이때 금속전극의 산화반응에 의해서 생성된 수산화물은 전기가 통하지 않는 반응물로서 슬러지 상태로 침전된다.

공기전극(Cathode Electrode)은 시트모양의 얇은 막으로서 매우 조밀한 소수성 고분자 막과 전도체 성분의 금속 망을 갖는 활성탄소 층으로 구성된다. 공기전극의 한 면은 공기 중에 노출되어있고 다른 면은 수용성 전해질에 접촉됨으

로서 공기 중에 있는 산소와 금속전극으로부터 유입된 전자를 결합하는 환원작용을 한다. 이와 같은 구조의 금속/공기 연료전지에서 사용되는 금속전극재료는 전해질과의 반응특성에 따라서 가장 이상적인 금속들이 사용되고 있다[4-6]. 특히 전해질로써 염화나트륨 전해질을 사용하는 경우, 마그네슘금속에서 가장 우수한 출력특성을 나타내는 것으로 보고되었으며 마그네슘을 금속전극으로 사용하는 경우 유해물질의 생성이 전혀 없고 화학적으로 안정되므로 사용면에서 매우 안전한 전지로 평가되고 있다[7-9].

지금까지 금속연료전지에 대한 연구의 대부분은 보다 많은 출력산출의 관점에서 전류량을 증대시키기 위한 구조적 성능개선이나 공기전극 개발에 초점이 맞추어져 왔다[10-11]. 지금까지 연료전지의 출력특성을 내부저항 관점에서 보고된 내용은 주로 수소연료전지나 PEM연료전지 등에 국한되어있다[12-13]. 그러나 아직까지 금속연료전지의 내부저항에 따른 출력특성에 대해서 다루어진 연구는 매우 미비한 편이다. 금속연료전지의 성능은 공기전극뿐만 아니라 금속연료전지 자체의 내부저항에 따라 전력발생량에 크게 영향을 미칠 수 있음을 예상할 수 있으며, 연료전지의 소형화 내지는 전지의 출력효율을 극대화할 수 있는 방안으로서 전지의 내부저항이 출력특성과 전지효율에 미치는 영향을 조사하는 것은 금속연료전지의 효율적 사용 측면에서 매우 중요한 과제라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 금속재료 중에서 염화나트륨 수용액 전해질에 대해서 뛰어난 특성을 나타내면서 높은 에너지 밀도를 갖는 마그네슘 금속연료전지에 대해서 전지의 내부저항에 따른 출력변화를 전해질 농도, 전극간 거리, 전극크기 면에서 조사하였다. 이를 위하여 전해질 농도변화와 전극면적에 따른 내부저항 변화를 측정하여 금속연료전지의 내부저항이 출력특성이 미치는 영향에 대해서 조사하였다.

[†] Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Gachon University, Korea

E-mail : kimyh@gachon.ac.kr

접수일자 : 2014년 4월 25일

수정일자 : 2014년 5월 16일

최종완료 : 2014년 7월 4일

2. 금속연료전지 등가회로

그림 1에 금속연료전지의 전기적 등가회로를 나타내었다. 금속연료전지에 외부회로가 연결되면 전지의 산화-환원의 화학적 반응과 전해질 반응에 의해서 내부저항이 r 이 생성된다. 내부저항 r 은 공기전극반응에 의한 저항 r_a , 전해질 내의 저항 r_e , 그리고 금속전극반응에 의한 저항 r_m 을 포함하고 있다. 내부저항은 전류를 제한하기 때문에 출력을 저하시키고 전지효율을 저감시키는 요인으로 작용한다. 기전력 E 는 두 전극 사이의 화학적 전위차이며, 전압 V 는 외부저항 R 에 의해서 생겨난 전압강하로써 외부측정 전압이다.

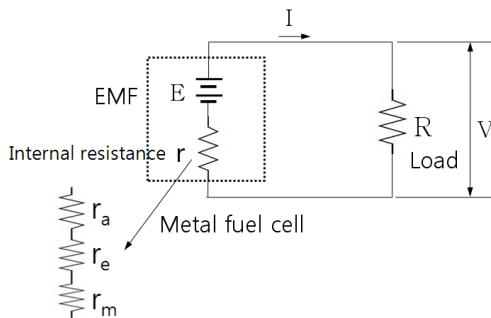


그림 1 금속연료전지의 전기적 등가회로
Fig. 1 Electrical equivalent circuit of metal fuel cell

3. 실험

본 실험에서 사용된 금속/공기연료전지 구조를 그림 2에 나타내었다. 전해질과의 전기화학적 산화반응을 일으키는 산화용 금속전극은 90mm(L)×90mm(W)×10mm(t) 크기의 판상형 마그네슘 합금금속(AZ91)을 사용하였다. 환원용 공기전극으로는 Ni-mesh에 활성촉매탄소를 혼합시킨 공기전극(미트제품)을 사용하였으며 전극면적은 금속전극과 같은 크기로 하였다. 전해질로는 염도 5~15wt%의 염화나트륨 수용액을 사용하였다. 전지의 전압-전류특성은 연료전지 분석장치(PRO200F, ProPower제작)를 이용하여 측정하였고, 저항 부하는 분석장치 내부에 실장된 전자로드를 사용하였다.

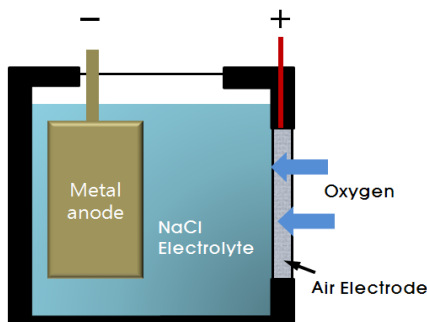


그림 2 금속연료전지의 구조
Fig. 2 Structure of metal fuel cell

4. 결과 및 검토

4.1 금속연료전지의 전압 및 전력특성

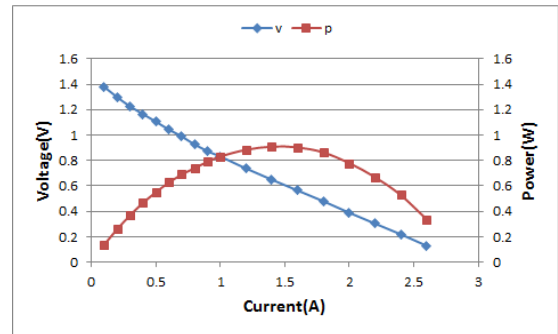


그림 3 전류-전압, 전력특성
Fig. 3 Voltage and power characteristics as a function of current

그림 3은 연료전지 분석장치로 측정된 마그네슘 금속연료전지의 전류변화에 따른 전압과 전력특성을 나타낸 것이다. 무부하시 전압이 1.4V로 측정되었으며 부하전류의 증가와 더불어 전압이 선형적으로 감소되는 특성을 나타내었다. 전력은 일정 전류값을 정점으로 좌우로 낮아지는 특성을 나타내었다. 이와 같은 금속연료전지의 부하전류에 대한 전압, 전력특성은 금속연료와 공기전극 그리고 전해질 내에서의 물리, 화학적 작용이 복합적으로 혼합되어 나타난 결과라 할 수 있다. 특히 금속연료전지의 산화/환원 작용에 의해서 생성되는 기전력과 내부저항은 회로전류를 결정하는 내부적 요인으로 작용하게 된다. 이 중에서 부하전류가 증가되는 과정에서 발생하는 화학적 변화의 진행속도나 전해질 내 이온의 이동도 등으로 인해 생성된 내부저항은 금속연료전지의 전력특성을 좌우하는 중요한 척도가 된다.

그림 1의 등가회로에서, 전류 I 는 기전력 E , 전지 내부저항 r 과 부하저항 R 과의 관계에서 다음 식으로 나타낸다 [14].

$$I = \frac{E}{r+R} \quad [A] \quad (1)$$

전지에서 발생된 전력은 다음 식으로 나타낸다.

$$P_E = IE \quad [W] \quad (2)$$

그리고 부하저항에 나타나는 전지출력은 다음 식으로 된다.

$$P_L = I^2 R = IV \quad [W] \quad (3)$$

전지의 최대출력 조건은 다음 식으로 정해한다.

$$P_L = I^2 R = \left(\frac{E}{r+R} \right)^2 R \quad (4)$$

$$\frac{dP_L}{dR} = \frac{d}{dR} \left(\frac{E}{r+R} \right)^2 R = 0 \quad (5)$$

이 식으로부터, 내부저항 r와 부하저항 R의 관계는 다음 식으로 된다.

$$r = R \quad (6)$$

즉, 전지 내부저항과 부하저항이 같을 때 최대출력을 나타내게 된다.

4.2 전해질 농도에 따른 전류-전압특성

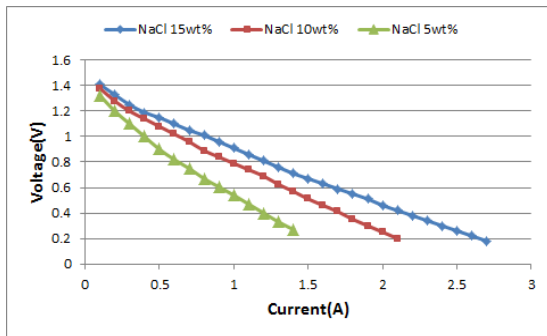


그림 4 전해질 농도에 따른 전류-전압특성
Fig. 4 Current - voltage characteristics as a function of electrolyte concentrations

그림 4는 전극간 거리 10mm, NaCl 전해질 농도 5~15wt%, 에 있어서, 전류변화에 따른 전압변화를 나타낸 것이다. 초기 전류에서 전압의 하강의 속도가 다소 빨라지다가 전류가 증가되면서부터 점차 완만해지는 특성을 보이고 있다. 두 전극 사이에 흐르는 전류는 외부회로로 흐르는 전자전류와 전해질 내를 흐르는 이온전류의 평형으로 나타나게 된다. 이 과정에서 비교적 전류가 적은 영역에서의 빠른 전압강하는 금속의 산화반응을 활성화 시킬 만큼의 전류가 흐르지 않기 때문에 나타나는 현상으로 볼 수 있다. 따라서 저 전류 영역에서의 전압특성은 주로 금속전극과 공기전극의 제한된 산화/환원반응의 결과로 볼 수 있다. 나아가 전류가 보다 증가됨에 따라 전압이 거의 일정한 기울기로 낮아지는 오음성 특성을 나타냈다. 이러한 전류-전압 영역에서의 회로전류는 주로 전해질 이온흐름이 주가 되어 나타나는 것으로 생각된다. 그리고 전해질 농도가 증가할수록 전압이 크게 증가하는 특성을 나타냈으며, 전해질 농도 5wt%의 경우, 10wt%나 15wt%에 비해서 상대적으로 빠른 하강 기울기를 나타내었다.

일반적으로 전해질 내의 이온 도전율 σ 는 다음 식으로 나타낸다.

$$\sigma = nZ_e \mu \quad (7)$$

여기서, n은 단위 체적당의 이온 수
 Z_e 는 이온전하량
 μ 는 이온의 이동도 이다.

따라서 비교적 이온농도가 적은 전해질의 경우에는 단위 체적당의 이온 수가 적기 때문에 이온 도전율이 떨어져 부하에 대한 대응능력이 미약하여 전압강하가 빠르게 진행된다고 볼 수 있다. 이와 같은 전해질 의존성은 도전율의 변화, 즉 전해질에 의한 저항변화로 이어지고, 전압-전류특성과 전지출력을 특정 짓게 되므로 전해질 저항변화에 따른 전지출력의 변화를 아는 것은 전지의 효율적 사용면에서 매우 중요하다고 하겠다.

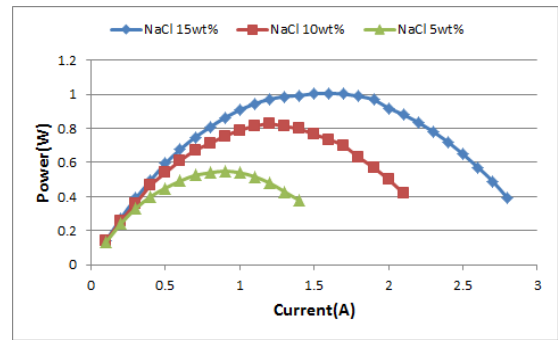


그림 5 전해질 농도에 따른 전류-출력특성
Fig. 5 Current - power characteristics as a function of electrolyte concentrations

그림 5에 회로전류 증가에 대한 출력변화를 전해질 농도에 따라 나타내었다. 전류는 부하저항을 통해서 흐르기 때문에 전류로 인해 발생된 출력은 결국 부하저항에서 소비되는 전력으로 나타내게 된다. 출력이 전해질 농도가 증가됨에 따라 큰 폭으로 증가하는 현상을 나타냈다. 이와 같은 현상은 염화나트륨 수용액 농도가 증가함에 따라 이온의 수가 증가했기 때문 인 것으로 볼 수 있다.

금속연료전지에서 전해질은 전하를 이동시키는 역할을 한다. 이때 소금물에 용해된 Na^+ 이온과 Cl^- 이온은 서로 반대방향으로 이동하면서 전류흐름 통로 역할을 한다. 이러한 전해질은 회로전류의 흐름을 제어하는 저항성이 있으므로 그 역할 면에서 금속도체의 고유저항과 같다고 할 수 있다. 즉, 그림 1의 내부저항 r_e (electrolyte)에 해당되는 것으로서 전지구성 요소인 전해질이 갖고 있는 내부저항 성분을 의미한다. 물론 그림 5에서 나타낸 출력은 공기전극에 의한 저항성분 r_a (air)와 금속전극에 의한 저항성분 r_m (metal)을 포함하고 있기 때문에 전해질 저항성분 r_e 뿐만이 아니라 이들 3가지 성분이 복합적으로 작용했다고 볼 수 있다. 그러나 공기전극과 금속전극을 변화없이 일정하게 유지시킨 상태에서 단지 전해질 농도만을 변화시켰을 때의 출력변화라는 면에서 전해질 농도에 의해서 결정되는 저항성분이 출력에 영향을 미치고 있다는 사실은 분명하다고 할 수 있다.

전해질 농도에 따른 전지의 내부저항 변화를 관찰하기 위하여 전극간 거리 10mm, 전해질 농도 5~15wt%에 대해서 부하저항에 따른 출력변화를 그림 6에 나타내었다.

전지출력이 부하저항에 따라 저 저항 영역에서 종 모양의 특성곡선을 나타내었다. 식 (5), (6)과 같이 전지의 부하저항이 내부저항과 같을 때 최대출력은 나타내게 된다. 최대출력일 때의 부하저항은 전해질 농도 5%, 10%, 15%에 대해서 각각 0.67Ω , 0.58Ω , 0.39Ω 으로 나타났다. 즉, 전해질 농도가

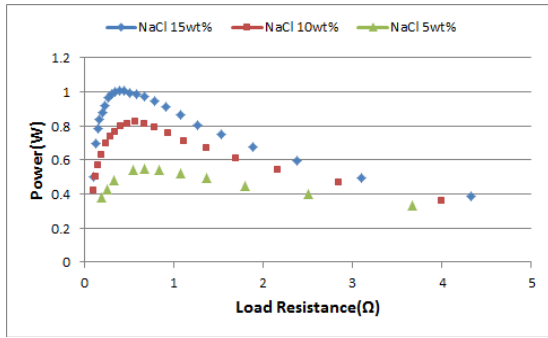


그림 6 전해질 농도에 따른 출력특성
 Fig. 6 Power characteristics as a function of electrolyte concentrations

증가할수록 낮은 저항에서 최대출력을 나타내었다. 최대출력 시의 부하저항은 결국 전지의 내부저항 값과 같으므로 전해질 농도의 증가는 전지내부저항의 감소로 나타났음을 확인할 수 있다. 이와 같은 특성은 전해질 농도가 증가할수록 이온농도가 증가됨으로써 전류흐름을 증가시켰기 때문이다. 따라서 증가된 전류만큼 전해질 저항이 감소되었다고 할 수 있다. 그림 6에서 나타난 부하저항에 따른 출력특성 곡선은 J. B. Benziger 등이 제시한 연료전지의 전력실행곡선과 일치된 패턴으로 나타났다[12].

4.3 전극간 거리에 따른 부하저항-출력특성

금속연료전지의 전극 간 거리는 전해질 이온이 한 전극에서 대향전극으로 이동하는 거리로서, 이온의 이동거리에 따른 출력변화를 예상할 수 있다. 전극 간 거리가 출력특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여, NaCl 전해질 농도 10wt%에서 전극간 거리를 10mm에서 30mm로 변화시켰을 때의 부하저항-출력특성을 그림 7에 나타내었다.

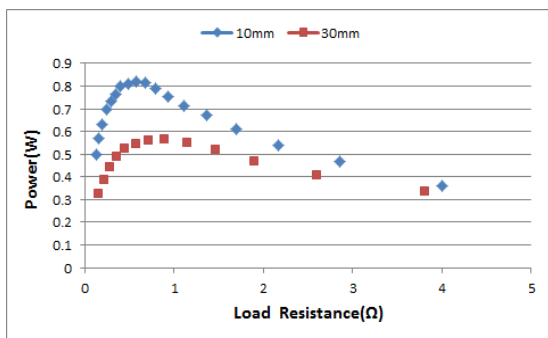


그림 7 전극간 거리에 따른 출력특성
 Fig. 7 Power characteristics according to electrode distance

전극간 거리가 증가됨에 따라 출력이 낮아지면서 내부저항이 증가되는 현상을 나타냈다. 또한 전극간 거리가 커짐에 따라서 부하저항에 대한 출력변화가 다소 완만해지는 특성을 나타내었다. 전극간 거리 10mm와 30mm에서의 내부저항이 각각 0.58Ω과 0.88Ω으로 측정되었다. 이러한 현상은 전극간 거리가 클수록 전해질의 이온밀도가 낮아지기 때문

인 것으로 생각된다. 이와 같은 결과로부터 금속연료전지의 전극간 거리가 증가할수록 내부저항이 증가되며 그로 인해 출력이 저하된다는 것을 확인하였다.

4.4 공기전극 면적의 영향

공기전극은 외부 회로를 통해서 일(work)을 하고 돌아온 전자를 받아들여서 공기 중의 산소와 반응하여 수산화(OH⁻)를 만들어내는 작용을 하며, 이때 공기전극의 환원반응은 다음 식으로 나타낸다.

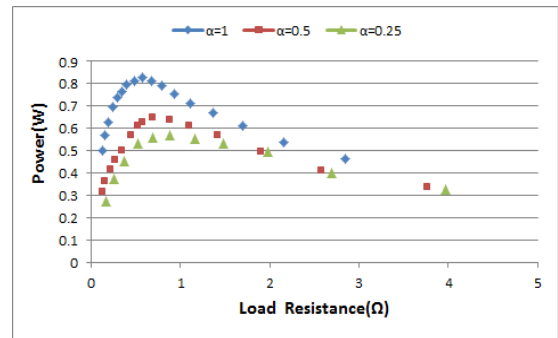
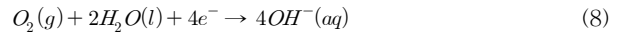


그림 8 공기전극 면적에 따른 출력특성
 Fig. 8 Power characteristics according to air electrode area

그림 8은 전극간 거리 10mm, 전해질 농도 10wt% 조건에서, 공기전극 면적을 변화시켰을 때의 부하저항에 따른 출력변화를 나타낸 것이다. 여기서, α는 대향된 금속전극면적에 대한 공기전극면적의 비이다. α를 α=1, α=0.5, α=0.25로 하였을 때, 내부저항은 각각 0.58Ω, 0.69Ω, 0.88Ω이 되었다. 공기전극 면적이 감소됨에 따라 전력이 감소되면서 내부저항이 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서 공기전극 면적이 작아지면 환원작용이 원활치 못하기 때문에 결국 내부저항이 증가되는 현상으로 나타난다고 볼 수 있다. 이 결과로 인해 회로전류가 감소되면서 출력저하로 나타났다고 볼 수 있다.

4.5 금속전극 면적의 영향

금속전극은 전자를 만들어 내는 전극으로서 연료전극(anode)이다. 금속전극으로 마그네슘을 사용하는 경우, 마그네슘은 산화 반응(oxidation reaction)을 통해서 물(H₂O)의 수산화(OH⁻)와 반응하여 전자를 방출하고 수산화마그네슘으로 변화한다. 이때 화학반응은 다음 식으로 된다.

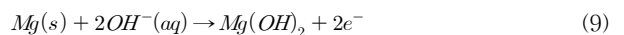


그림 9는 금속전극의 면적을 변화시킨 경우의 저항-출력특성을 나타낸 것이다. 금속전극면적이 감소됨에 내부저항이 더욱 증가되는 경향을 나타냈고 이에 따라 출력이 저하되는 특성을 나타냈다. 공기전극면적에 대한 금속전극면적

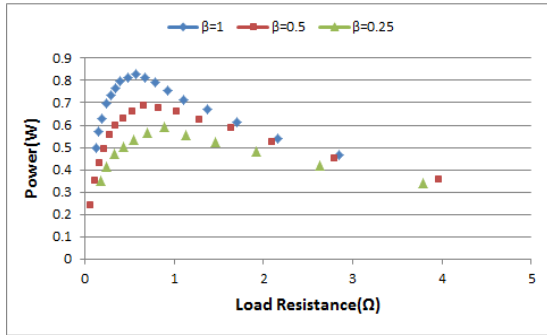


그림 9 금속전극면적에 따른 출력특성
 Fig. 9 Power characteristics according to metal electrode area

비 β 를 $\beta=1$, $\beta=0.5$, $\beta=0.25$ 로 하였을 때 내부저항은 각각 0.58Ω , 0.68Ω , 0.89Ω 이 되었다. 이와 같은 현상은 금속전극면적이 상대적으로 작게 되면 산화작용으로 생성되는 전자밀도가 그만큼 감소되기 때문에 회로전류가 감소되어 출력이 낮아지게 된다고 볼 수 있다. 이와 같이 금속전극면적의 변화에 의해서 출력이 변화된다는 것은 금속전극의 산화반응 조건에 의해서 전지내부저항이 변화된다는 것을 보여준 결과라고 할 수 있다.

4.6 전지의 연료변환 효율

금속연료를 사용하는 전지에 있어서의 연료변환효율은 생성된 전력에 대한 부하공급전력의 비로써 다음 식으로 나타낸다.

$$\eta = \frac{P_E}{P_L} = \frac{IE}{IV} = \frac{R}{r+R} \quad (10)$$

그림 10에 전해질농도에 따른 전지의 연료변환효율을 나타내었다. 전해질 농도가 증가될수록 연료변환효율이 다소 증가되는 경향을 나타냈으며, 부하저항의 증가에 대해서는 크게 상승되는 특성을 나타냈다. 대체로 부하저항 약 7Ω 이상에서 효율이 90% 이상으로 크게 증가되었다. 이와 같은 결과로서 금속연료 변환효율은 전해질 농도에 따른 내부저항

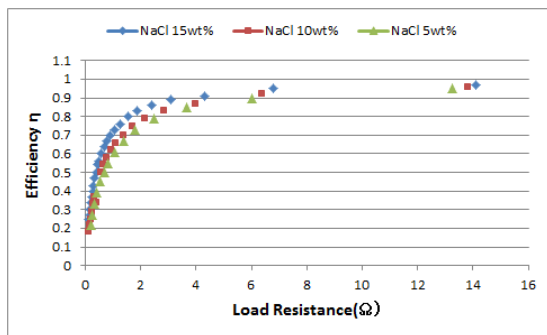


그림 10 금속연료 변환효율의 전해질 농도 의존성
 Fig. 10 Electrolyte concentration dependence of metal fuel conversion efficiency

의 영향을 거의 받지 않지만 부하저항에 대한 영향은 크게 작용한다는 것을 확인하였다.

전해질 농도 외에 금속전극 면적이 연료변환효율에 미치는 영향을 조사하기 위해서 그림 11에 마그네슘전극 면적에 따른 금속연료 변환효율을 나타내었다. 금속전극면적이 적을수록 효율이 약간 저하되는 특성을 나타냈지만 전반적으로 큰 차이를 보이지 않았다. 연료변환효율 면에서 내부저항 약 7Ω 이상에서 90% 이상의 효율을 나타냈으며 그림 10의 전해질농도에 따른 결과와 거의 유사한 특성을 나타냈다.

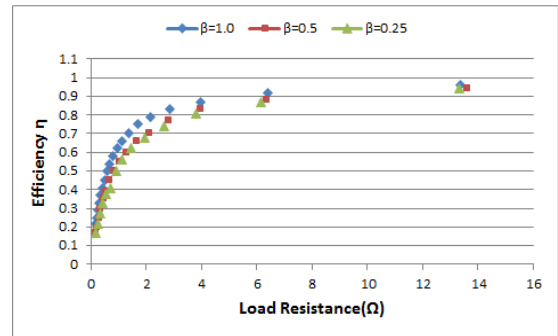


그림 11 금속전극면적에 따른 금속연료 변환효율
 Fig. 11 Metal fuel conversion efficiency as a function of metal electrode area

이상의 결과로써 금속연료전지의 연료변환효율은 전해질 농도나 전극면적에 크게 의존되지 않고 단지 금속연료전지 고유의 연료변환효율로 특정 지을 수 있음을 알 수 있다. 이미 앞에서 관찰한 바와 같이 부하저항을 변화시켰을 때 어느 한 부하 점에서 최대출력이 나타나게 되고, 이때 최대출력은 부하저항과 전지내부저항이 같을 때 전달된다는 사실을 확인하였다. 식 (10)에서와 같이, 최대출력에서 전지효율 η 는 50%가 된다. 이는 금속연료 중 1/2이 산화과정에서 내부적으로 자연 소비된다는 것을 의미한다. 따라서 금속연료전지에서 금속연료의 효율과 출력을 동시에 최대화할 수 없는 것이다. 그림 10과 그림 11의 특성과 같이, 금속연료의 변환효율을 증가시키기 위해서는 전지의 출력감소라는 희생이 뒤따르지 않으면 안 된다. 따라서 금속연료전지시스템을 기기에 적용하는 경우, 최대전력과 연료변환효율 중 어느 것에 초점을 맞출 것인가에 대한 고려가 선행되어야 한다.

5. 결 론

본 논문에서는 금속연료전지의 출력특성 변화를 내부저항의 관점에서 조사하였다. 금속연료전지의 내부저항을 전해질저항, 공기전극저항과 금속전극저항이 직렬로 연결된 회로로 등가화 하였다. 이러한 회로구성을 통하여 금속연료전지의 출력이 각각의 내부저항에 따라 어떻게 변화하는가에 대해 실험적으로 해석하였다. 부하저항에 따른 최대출력곡선으로부터 전해질 농도, 전극간 거리, 공기전극 면적, 금속전극 면적조건에 따른 내부저항값을 산출하였으며, 금속연료전지의 출력특성이 이들 내부저항에 의해 영향을 받는 사실을 확인하였다. 그리고 전지의 출력은 부하저항이 전지의 내부저항보다 크거나 작은 경우에 감소되는 특성을 나타내었으

며, 연료효율은 부하저항의 증가에 따라 크게 증가하는 특성으로 나타났다. 최대출력에서 연료효율이 50%이라는 점에서, 금속연료전지의 최대출력과 금속연료효율을 동시에 최적화할 수 없음을 확인하였다.

References

- [1] B. Worth, A. Perujo and K. Douglas, "Investigation on storage technologies for intermittent renewable energies", WP ST9-Metal/Air Report, 2002.
- [2] Richard, K et al, "Aluminium-Air Cell: A Hands-on Approach to the Teaching of Electrochemical Technology", Int. J. Engng. Vol. 18, No. 3, pp. 379-388, 2002.
- [3] S. M. Faris et al, "Metal-air fuel cell battery system employing metal fuel cards", US patent 6,544,678B2, 2003.
- [4] G. P. Park, H. S. Chun, " Effect of Electrolyte-Additives on the performance of Al-Air cells", J. of Korean Ind. & Eng. Chemistry, Vol. 9, No. 1, pp. 52-57, 1998.
- [5] E. Budevski et al, "Investigation of a large capacity medium power saline aluminium-air battery", J. Appl. Electrochem., Vol. 19, pp. 323-330, 1989.
- [6] Gregory D.P., " Metal-air batteries", Mills & Boon Limited, 1972.
- [7] A. Kaisheva, " Metal-Air batteries : research, development, application", Proceedings of the international workshop "portable and emergency energy source—from materials to systems", 16-22 sept, Primorsko, Bulgaria, 2005.
- [8] Y. H. Kim, "The Effect of Ion Exchange Membrane on the Electrical Conduction in Metal Fuel Cell", Trans., KIEE, Vol. 59, No. 12, pp. 2235-2239, 2010.
- [9] A. Kaisheva, I. LLiev, J. Milusheva, " Mechanically rechargeable magnesium-air cells with non-aggressive electrolyte", Proceeding of Int. Battery Recycling Congress, 3-5 July, Vienna Austria, 2002.
- [10] L. Carrette, K. A. Friedrich, U. Stimming, "Fuel Cells : principles, types, fuels, and applications", Chemphyschem, vol. 1 No. 4, pp. 162-193, 2000.
- [11] Z.H. Wang. C. Y. Wang. K. S. Chen, "Tow phase flow and transport in the air cathode of proton exchange membrane fuel cells", J. Power Sources, vol 94, No. 1, pp. 40-50, 2001.
- [12] J. B. Benziger et al, " The power performance curve for engineering analysis of fuel cells", J. power source, vol. 155, pp. 272-285, 2006.
- [13] S. srinivasan, et al., "High energy efficiency and high power density PEM fuel cells-electrode kinetics and mass transport", J. power source, vol 36, pp. 299-320, 1991.
- [14] J. D. Irwin, R. M. Nelms, "Engineering circuit analysis", John Wiley & Sons, 2011.

저 자 소 개



김 용 혁 (金 龍 赫)

1988년 인하대학교, 공학박사
1993년 일본명성대학 연구교수
현재, 가천대학교 전기공학과 교수