

원통형 고체 산화물 연료전지의 집전체 연구 A Study for Current Collector of Tubular SOFC

*박준호¹, 최훈¹, #차석원¹

*J. H. Park¹, H. Choi¹, #S. W. Cha(swcha@snu.ac.kr)¹

¹ 서울대학교 기계항공공학부

Key words : Solid Oxide Fuel Cell, Tubular SOFC, Current collector

1. 서론

최근 유가의 지속적 상승과 지구 온난화 등의 환경 변화에 따라 친환경 에너지원에 대한 관심이 커지고 있다. 화석 연료의 정확한 고갈 시점에 대해서는 여러 가지 의견들이 분분하지만, 화석 연료가 그리 머지 않은 미래에 고갈될 것이라는 데에는 의견을 같이 하고 있다. 또한 심각한 환경 문제를 피부로 겪게 되면서 CO2 배출량 등 각종 환경 규제가 강화되면서 각종 산업 발전에 있어 신재생 에너지의 개발이 요구되고 있다.

연료전지는 수소와 산소의 화학에너지를 직접 전기에너지로 변환하여, 고효율 발전이 가능하고, 그 반응의 부산물로 물이 생성되기 때문에 환경친화적이라는 점에서 현재 사용되고 있는 열기관에 비해 훨씬 더 이상적인 기관에 가깝다[1]. 연료전지는 전해질의 종류 및 작동 온도 등에 따라 여러 종류로 분류할 수 있는데 그 중 대표적인 예로 저온형인 고분자 전해질막 연료전지와 고온형인 고체 산화물형 연료전지가 있다. 그 중 고체 산화물 연료전지의 경우, 다른 연료전지에 비해 고온에서 작동하므로 효율이 높고 공해가 적으며, 내부 개질이 가능하므로 연료 개질 장치가 필요 없으므로 연료의 융통성을 가지는 장점이 있다. 또한 저온형 연료전지의 상용화에 가장 큰 걸림돌이었던 귀금속 촉매가 불필요하고 복합발전에도 필요한 양질의 폐열 생산이 가능하다.

현재 금속연결체의 이용이 가능하여 제조원가를 낮추고 장기 안정성을 향상시킬 수 있는 장점 때문에 중저온에서 작동되는 연료극 지지체식 전지에 대한 연구가 진행되고 있는데 평한평 연료극 지지체의 경우, 전해질 자립막에 비해 기계적 강도는 우수하지만 대면적 제조가 용이하지 않고, 열사이클에 대한 저항이 낮으며, 가스 밀봉 문제가 해결되지 않고 있다. 원통형 구조를 가지는 고체 산화물 연료전지는 반응기체의 밀봉이 간단하고 열응력에 대한 저항성이 강하며 기계적 강도가 높아 대면적 제조가 가능한 기술로 연구가 진행되어 왔다[2]. 원통형 고체 산화물 연료전지를 개발하는데 있어 성능의 최적화를 위해 여러 가지 해결해야 할 과제들이 있는데 그 중 하나가 바로 집전의 문제이다. 전해질-전극 접합체 간 전기화학 반응을 통해 생산된 전기를 집전체에서 집전하는 과정에서의 손실을 최소화함으로써 원통형 연료전지의 성능을 향상시킬 수 있다. 각 전극에 최적 구조의 집전체를 접합함으로써 전자의 이동 경로를 최적화하여 전기적 저항을 최소화하면 연료전지의 성능을 높일 수 있는데 이는 실험적인 측면에서도 알 수 있다.

그러나 여러 가지 집전체 구조를 적용하여 최적의 집전 구조를 탐색하는 실험 방법은 그 비용과 시간의 측면에서 매우 비효율적일 수 있다. 따라서 연료전지 모델을 확립하고 이를 이용하여 연료전지 거동을 예측하고 이해하는 것이 원통형 연료전지의 집전 문제 연구를 촉진시킬 수 있을 것이다. 특히 CFD 를 이용한 연료전지 모델은 연료전지의 거동을 수치해석적으로 예측하여 전기화학적 전달 현상을 시각화하고 이를 통한 구체적인 연구를 가능하게 함으로써 실험적인 연구가 어렵거나 비현실적일 때 매우 유용하게 사용될 수 있다.

본 논문에서는 CFD 를 통한 연료전지 모델을 이용하여 원통형 고체 산화물 연료전지의 집전 구조 연구를 통해 연료전지의 성능 향상 방법을 고찰한다.

2. 이론

본 논문에서는 상용 CFD 소프트웨어 중 Ansys 사의 Fluent 를 사용하여 유동해석을 진행하였고, Fluent 내 Fuel Cell 모듈을 사용하여 연료전지 모델을 구현하였다. 따라서 유로와 다공성 전극 내에서의 유체 흐름이나 열전달, 물질 전달 등은 Ansys Fluent 를 통해 구현되었다. 전기 전도 해석은 열 전달과 유사하게 진행되어 전기장에 대한 지배 공식은 다음과 같은 Laplace 식을 따른다.

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \phi) = 0$$

또한 연료전지의 전압은 Nernst 식에 의해 주어지는 reversible 전압에서 전기화학 반응에 의한 손실과 전기 저항에 의한 손실, 물질 전달에 따른 손실을 고려하여 구할 수 있다.

$$\phi_{ideal} = \frac{RT}{4F} \ln \frac{P_{O_2, cathode}}{P_{O_2, anode}}$$

$$\phi_{cell} = \phi_{ideal} - \eta_{ele} - \eta_{act,a} - \eta_{act,c} - \eta_s$$

전기화학 반응 속도 관계식은 Butler-Volmer 공식에 의해 얻어진다.

$$i = i_0 \left[e^{\frac{\alpha_a n \eta_{act} F}{RT}} - e^{-\frac{\alpha_c n \eta_{act} F}{RT}} \right]$$

이 외 전기화학 반응에 의해 각 화학종의 소모 및 생성은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$S_i = M_i \frac{j}{n_i F}$$

또한 유로와 다공성 전극 내에서의 유체 흐름이나 열전달, 물질 전달 등은 Ansys Fluent 내 질량 보존 및 운동량 보존, 에너지 보존 지배방정식을 통해 구현되었다.

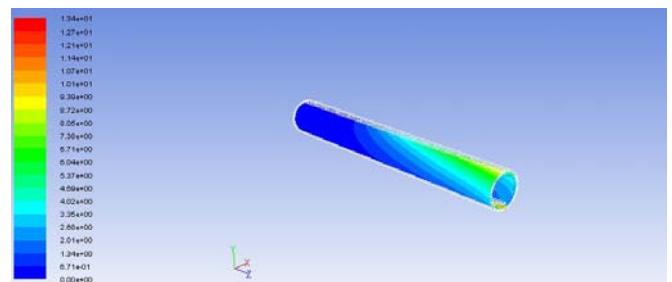


Fig. 1 Contour of current density of tubular cell using coil current collectors

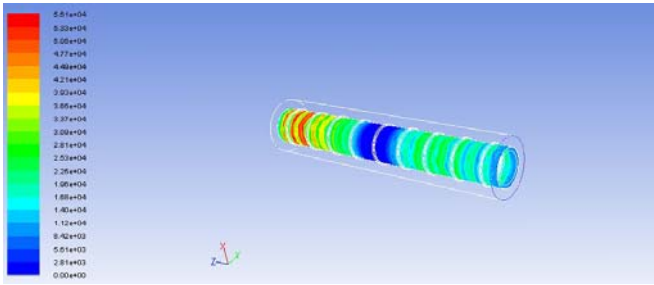


Fig. 2 Contour of current density of tubular cell using bus current collectors

3. 해석 및 결과

본 연구에서는 집전체의 형상에 따른 성능 특성의 변화를 살펴보고자 2 가지 다른 형상의 집전체를 사용한 원통형 고체 산화물 연료전지 모델을 해석하였다. 본 논문에서 해석 대상으로 한 연료전지는 길이가 180mm 인 연료극 지지형으로 전해질-전극 접합체의 가장 바깥쪽인 공기극의 외경이 22mm 이고 공기극의 두께가 25 μ m 이며, 전해질층과 연료극의 두께가 각각 25 μ m, 2mm 이다. 실제로 모델을 구현할 때에는 Fluent 의 연료전지 모듈 중 Unresolved Electrolyte 모델을 사용하여 전해질층은 그 형상을 구현할 때 하나의 표면과 같이 구현하므로 해석 시 전산 도메인에 포함되지 않고 인접한 셀간의 전기화학 반응에 따른 인터페이스처럼 고려하였다.

본 연구에서 해석한 2 가지 형상의 집전체는 각각 전류를 전극의 원주방향으로 흐르도록 집전하는 방식과 전자가 전극의 길이 방향을 이동하여 집전되는 방식을 각각 해석하였다. 그림 1 과 2 는 Bus 를 활용한 연료전지 모델의 해석 결과를 보여주고 있고, 그림 3 과 4 는 코일 형상을 사용한 모델의 해석 결과를 나타낸다.

Bus 를 사용하는 방식은 보다 저항이 큰 전극을 통해 집전체까지 이동하는 경로가 길어짐에 따라 상대적으로 전기적 저항에 의한 손실이 커지게 된다. 코일을 사용하는 방식에서도 마찬가지로 삼상계면에서 생성된 전자가 집전체까지 이동하는 거리에 따라 전기적 저항에 의한 손실이 커지게 되므로 집전체를 보다 촘촘하게 접합했을 때 보다 향상된 성능을 얻을 수 있음을 예상할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 CFD 를 이용하여 원통형 고체 산화물 연료전지의 집전체에 따른 성능 특성을 살펴보았다. 같은 형상임에도 불구하고 집전 방식에 따라 셀의 각 부분에서의 전기적 특성이 다르게 나타남을 확인할 수 있었다. 또한 보다 효율적인 집전을 위해 삼상계면에서 생성된 전자가 집전되기까지 경로의 길이를 최소화하는 것이 연료전지의 성능을 향상시킬 수 있음을 예측할 수 있었다. 실제로 원통형 고체 산화물 연료전지의 성능을 실험을 하는 경우

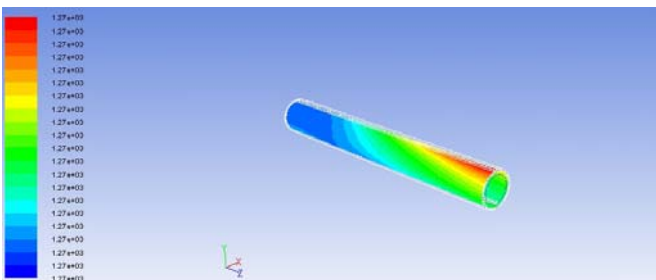


Fig. 3 Contour of static temperature of tubular cell using coil current collectors

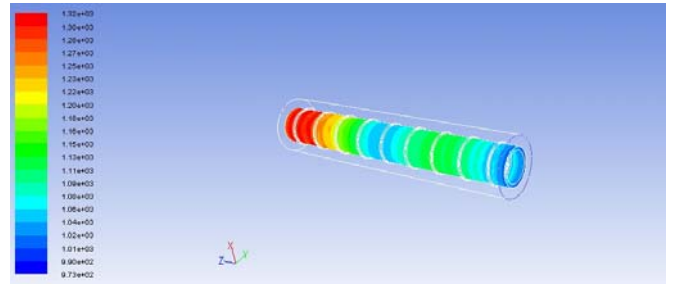


Fig. 4 Contour of static temperature of tubular cell using coil current collectors

에는 주로 긴 집전체를 나선 형태로 전극에 감고 paste 를 이용해 전극에 접합하는 방식을 이용하게 되는데 이러한 방식을 사용했을 때의 성능 특성에 대한 연구도 수반되어야 할 것이다. 그리고 이 해석 결과를 실험 결과와 비교하여 모델의 타당성을 증명할 수 있다면 이를 통해 비용과 시간을 절감하면서 효율적인 집전구조를 연구하는데 많은 도움이 될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. R. O'Hayre, S. W. Cha, W. Colella, F. B. Prinz, 'FUEL CELL FUNDAMENTAL'.
2. 송락현, "원통형 고체산화물 연료전지 기술개발", 2001 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 373~380.