Journal of the Korean Ceramic Society
Vol. 42, No. 6, pp. 425~431, 2005.

Direct-Write Fabrication of Solid Oxide Fuel Cell by Robo-Dispensing

Yong-Bum Kim, Jooho Moon,† Joosun Kim,* Jong-Ho Lee,* and Hae-Weon Lee*
School of Advanced Materials Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea
*Nano-Materials Research Center, KIST, Seoul 136-791, Korea
(Received April 22, 2005; Accepted May 2, 2005)

로보 디스펜싱을 이용하여 직접묘화방식으로 제조된 고출력 소형 고체산화물 연료전지

김용범 · 문주호† · 김주선* · 이종호* · 이해원*
연세대학교 세라믹공학과
*한국과학기술연구원 나노재료연구센터
(2005년 4월 22일 접수; 2005년 5월 2일 승인)

ABSTRACT

Line Shaped Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) with multilayered structure has been fabricated via direct-writing process. The cell is composed of the single line-shaped electrode and electrolyte of Ni-YSZ cermet anode, YSZ electrolyte and LSM cathode. They were processed into pastes for the direct writing process. Syringe filled with each electrode and electrolyte paste was loaded into the computer-controlled robo-dispensing machine and the paste was dispensed through cylindrical nozzle of 0.21 mm in diameter under the air pressure of 0.1 torr onto a moving plate with 1.22 mm/s. First of all, the anode paste was dispensed on the PSZ porous substrate, and then the electrolyte paste was dispensed. The anode/electrolyte and the PSZ substrate were co-fired at 1350°C in air atmosphere for 3 h. The cathode layer was similarly dispensed and sintered at 1200°C for 1 h. All the electrode/electrolyte lines were visually aligned during the direct writing process. The effective reaction area of fabricated SOFC was 0.03 cm^2, and the thickness of anode, electrolyte and cathode was 20 μm, 15 μm, and 10 μm, respectively. The single line-shaped SOFC fabricated by direct-writing process exhibited OCV of 0.95 V and maximum power density of 0.35 W/cm^2 at 810°C.

Key words* : *SOFC, Robo-dispensing, Direct-writing process

1. 서 론

고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell : SOFC)는 수소와 산소가 가지고 있는 화학적 에너지를 전기화학반응에 의해 직접 전기에너지로 변환시키는 에너지 변환장치인 연료전지의 한 종류로서 높은 변환효율과 환경친화적인 면에서의 많은 장점 때문에 차세대 에너지 변환장치로 주목을 받고 있다.[1-3] 특히 고체전해질을 사용하는 SOFC는 액체전해질을 사용하는 기존 1세대 연료전지에 비해 안정성이 뛰어나 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)와 함께 차세대 연료전지로 각광 받고 있다. 현재 이동통신기기나 휴대용 정보통신 단말기, 군사용 혹은 레저용 이동전원 등과 같은 소형 전자기기 산업의 급성장에 따라서 고성능 전원에 대한 수요가 크게 증가 하고 있으며 이에 상응되는 경박 단소의 고출력 전원이 필요하게 되었다. 소형 연료전지 분야는 현재까지 주로 MEMS 공정기술과 폴리머 전해질을 이용한 PEMFC나 메탄올 연료전지를 중심으로 개발되고 있으나, SOFC의 경우 PEMFC나 DEMFC에 비하여 연료전처리 장치 없이도 내부개질이 가능하기 때문에 다양한 연료가 사용될 수 있으므로 무게와 부피를 최소화 시키는데 용이하고 높은 출력밀도 특성으로 장시간 사용이 가능한 가벼운 휴대용 전원장치로 응용될 수 있을 뿐만 아니라 열에너지를 통시에 이용할 수 있는 장점을 가지고 있다.[4]

일반적으로 SOFC의 구조는 서로 상이한 3가지 이상의 소재와 치밀체/다공체의 상반된 미세구조의 층상 형태를 이루고 있으므로 고도의 정밀한 제조공정을 필요로 한다.[1-3] 특히 SOFC의 소형화에는 구성소재의 물성향상 및 구성요소의 박막화 기술과 경제성 있는 스택 제조 기술이 필요하다. 현재 SOFC의 제조에 있어서 가장 일반적으로 사용되어지고 있는 제조법은 스크린 프린팅을 이용하는 방법과 테이프 캐스팅법 그리고 테이프 캘린더링 방법 등이 있다.[5-8] 이러한 방법은 단순한 형상의 대면적 전극 성형에는 적합하지만 소형 및 마이크로 SOFC에서 필요한

†Corresponding author : Jooho Moon
E-mail : moon@yonsei.ac.kr
Tel : +82-2-2123-2855 Fax : +82-2-365-5882

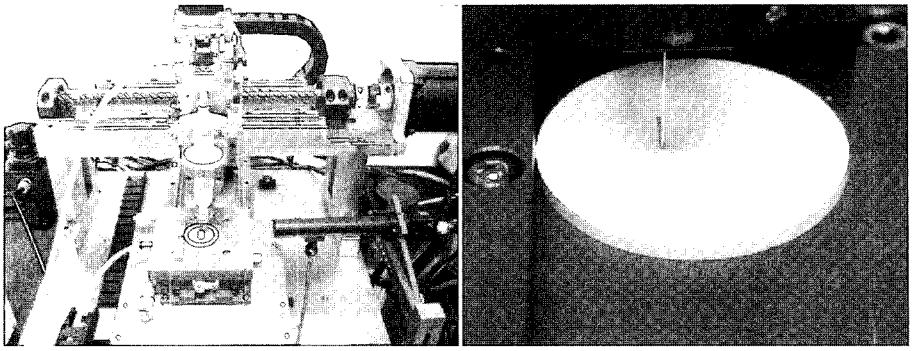

Fig. 1. Schematic pictures illustrating the processing machine for robo-dispersing used for fabricating the integrated planar SOFC.

다양한 복잡형상의 셀 제작에는 용이하지 못하다. 본 연구에서는 이러한 관점에서 고체산화물 연료전지의 새로운 제조법으로 로보 디스펜싱이라는 새로운 기술을 도입하였다. Fig. 1에 도시한 것과 같이 로보 디스펜싱은 페이스트화된 소재를 미세한 노즐사이로 토출시키면서 동시에 노즐의 x-y축 움직임 및 공압의 on-off 신호를 디지털 방식으로 제어함으로써 임의 형상의 미세 패턴을 비교적 정밀하게 직접묘화 할 수 있는 기술이다.[9-11] 다중 복합소재의 적층 및 정렬이 요구되어지는 평면 집적형(Integrated Planar) SOFC를 로보 디스펜싱 기술을 적용하여 제작하기 위한 선행 연구로서 연료전지 성능 발현에 적합한 페이스트 소재를 사용하여 적층된 단일 라인 형상의 단위 셀을 제조하였다.

2. 실험 방법

평면 집적형 SOFC를 제작하기 위하여 우선 다공성의 지지체 재료에 대한 제조 공정을 확립하였다. 기판 즉 지지체로 사용되는 다공성 재료는 연료전지 성능 특성에 관여하지 않아야 하고 열적 및 기계적 충격 저항성이 우수해야만 한다. 또한 연료가스를 음극에 원활히 공급해줄 수 있을 만큼 충분한 기공구조를 가져야 한다. 이를 위해서 전해질로 사용되는 YSZ와 유사한 열팽창계수를 가지고 있는 부분안정화 지르코니아(PSZ, TZ3YS, Tosoh)를 사용하였다. 높은 기공률과 높은 강도의 상반되는 요구조건을 동시에 만족시키는 다공성 지지체를 구현하기 위하여 열경화성 결합제를 기공 형성제로 사용하였다. TZ3YS는 먼저 1000°C에서 2시간 동안 하소한 후 열경화성 결합제와 함께 습식 볼 밀링을 하였고 혼합된 분말은 액상응결법(Liquid Condensation Process : LCP)으로 과립화시킨 후 35 mm의 직경을 가진 pallet 형상으로 열간 가압하여 성형 하였다.[12,13] 제조된 성형체는 분당 2°C의 승온 속도로 1350°C에서 3시간 동안 열처리 하였다. 제조된 지지체의 기공율은 Archimedes 방법과 수은침투법(Mercury Porosimeter, Micrometrics)로 측정하였고 가스투과율에 대한 분석은 Perm Porometer(PMI)를 사용하였다. 지지체의 기계적 특성은 시편을 3 × 4 × 30 mm가 되도록 가공한 후, universial test machine (Model No4460, Instron)을 이용하여 측정하였다.

미세노즐을 통한 토출에 적합한 연료전지 구성 소재의 페이스트화를 위하여 각각의 분말에 용매(α-terpineol)를 15~20 vol%의 비율로 첨가한 후 Planetary milling (Plenerisette 5, Fritsch Co.)을 통하여 혼합, 분쇄하여 제작하였다. 페이스트의 유동특성을 제어하기 위하여 결합제로서 ethyl cellulose를 8~12 wt% 첨가하였다. 음극 재료로는 NiO (Sumitomo)와 YSZ(TZ8Y, Tosoh)분말을 원료로 사용하였으며 NiO와 YSZ의 중량비가 56 : 44가 되도록 제조하였다. 전해질의 경우 YSZ 단일 성분으로 구성하여 제조하였다. 양극은 순수한 (La,Sr)MnO_3 (LSM, Seimi)을 원료로 사용하여 페이스트를 제조하였다. 페이스트의 유동특성은 Cone-Plate 타입의 점도계(CV100, Haake)를 이용하여 측정하였다.

디스펜싱 공정변수에 대한 최적화 실험을 위하여 제조된 페이스트중에 음극과 전해질 페이스트를 사용하여 다공성 지지체위에 단일 라인 드로잉 작업을 수행하였다. 디스펜싱 공정 시 노즐과 기판의 높이는 0.1 mm로 고정시킨 후, 노즐의 이동속도와 공압 레벨, 페이스트의 점도 등의 변수에 따라 디스펜싱 하였다. 디스펜싱 된 전극 및 전해질 라인의 선폭, 두께, 및 건조 시 생기는 결함 등을 광학현미경(DMLM, Leica)과 주사전자현미경(FEIXL-30 FEG, Philips)을 이용하여 관찰하였다.

공정변수를 최적화 한 후 단위 셀 제작에는 다공성 PSZ 지지체 위에 컴퓨터로 제어되는 디스펜서(ML-505GX, Musashi)를 사용하여 각각의 페이스트를 0.21 mm의 내경을 가지는 노즐로 0.1 torr의 압력으로 1.22 mm/s의 속도로 움직이면서 토출하였다. 먼저 음극 페이스트를 길이 10 mm, 선폭 0.5 mm가 되도록 디스펜싱 한 후에 건조하고 전해질 페이스트를 음극 라인 중심에서 20 μm 정도의 off-set을 두고 길이 12 mm, 선폭 1.5 mm가 되도록 적층하였다. 음극/전해질/지지체 구조물은 600°C에서 2시간 동안 열처리 하여 유기물을 휘발시키고 1350°C에서 3시간 동안 동

시 소결하였다. 소결이 끝난 후 양극층을 같은 방법으로 디스펜싱 한 후 1200°C에서 1시간 동안 소결하였다.

완성된 단전지의 전류를 포집하는 역할을 해주는 집전체로 양극과 음극 모두 Au Mesh/Wire를 이용하였고, 판상의 밀봉재를 단전지 지지체의 모양에 맞게 절단 가공하여 사용하였다. 출력특성 측정에는 100 W급 연료전지 평가 시스템(Scribner, SAT 890 – 100 W)을 이용하였고 단전지의 개회로 전압 및 운전중의 출력 전압은 전압계 (196, Keithley)를 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. PSZ 다공성지지체

연료극으로의 원활한 가스공급이 가능하고 높은 기계적인 강도를 동시에 만족시키는 다공성 지지체 제작에는 기공 형성제 등을 이용하는 기존 제조법과는 달리 분말을 열경화성 결합제와 함께 액상응결법으로 과립화 하고 이를 이용하여 일축가압 성형하는 방법을 선택하였다. 수은침투법으로 확인한 PSZ 지지체의 평균기공 크기는 1 μm 내외였고 평균 기공율은 40%였으며 제조된 지지체의 미세구조를 Fig. 2에 나타내었다. 지지체 내부 기공들의 연결도를 확인하기 위해 압축공기를 0~30 Psi까지 압력을 변화시키면서 지지체를 투과하는 가스의 유량을 측정한 결과 3.69×10^{-12} m^2의 가스 투과도를 나타내었다. 4점 굽힘 강도법으로 측정하여 얻어진 다공성 지지체의 기계적인 강도는 98 MPa이었다. 이들 결과로 판단할 때 평면 집적형 SOFC의 제작에 필요한, 크기 1 μm 미세 기공이 균일하게 분포되어 높은 가스 투과도를 나타냄과 동시에 기계적 물성도 우수한 지지체를 제조할 수 있었다.

3.2. 페이스트의 유동특성

페이스트 소재를 디스펜싱하여 얻게 되는 라인 패턴의

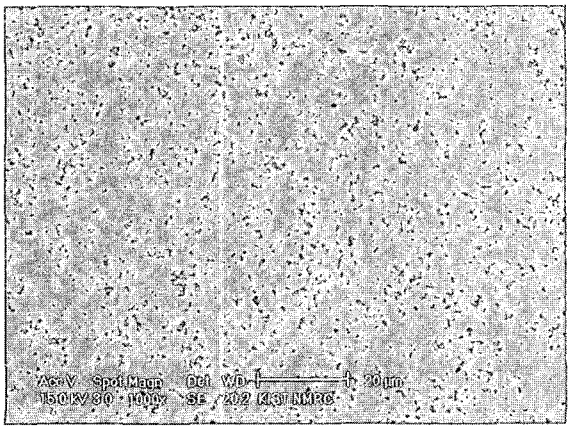

Fig. 2. Cross-sectional SEM image of porous PSZ substrate manufactured by LCP granulation process.

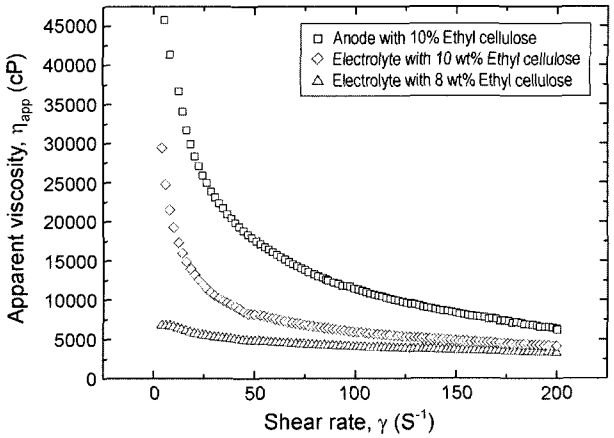

Fig. 3. Reological behavior of each constituent paste with the varying binder concentration.

형상을 결정하는 중요 변수로는 노즐과 기판 사이의 거리, 노즐의 이동속도, 공압 레벨, 기판의 표면조도, 건조 등이 있다. 본 실험에서는 위에서 언급된 변수 중 건조 온도(70°C)와 노즐-기판 간 사이 간격을 0.1 mm로 일정하게 유지한 후 실험하였다. 기존의 스크린 프린팅에서 사용되어지고 있는 페이스트에 비하여 미세노즐을 통한 토출 과정에서 사용되는 페이스트의 유동특성은 공정상에서 매우 중요한 변수로 작용한다. 과도하게 높은 점도의 페이스트는 디스펜싱 공정시 노즐에서의 토출을 어렵게 만들고 너무 낮은 점도의 페이스트는 미세한 라인 패턴 작업을 어렵게 한다. 로보 디스펜싱용 페이스트 소재의 유동특성의 변화를 주기 위하여 페이스트 성분 중 결합제로 사용된 ethyl cellulose 의 함유량을 음극의 경우는 10 wt%로, 전해질의 경우는 8 wt%와 10 wt%로 각각 제조한 후 유동특성을 평가하였고 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

사용된 모든 페이스트는 ethyl cellulose 함량이 증가 될수록 점도는 증가하는 경향을 나타내었다. 음극 페이스트가 전해질 페이스트 보다 점도가 높게 관찰되었고 이는 사용한 음극 분말 소재의 특성 및 분산성 차이로부터 기인된다고 판단된다. 점도값은 shear rate이 1 sec^{-1} 조건에서 음극 페이스트가 40,000 – 45,000 mPa · s, 10 wt%의 ethyl cellulose가 첨가된 전해질의 경우 25,000 – 30,000 mPa · s, 그리고 8 wt%의 ethyl cellulose가 첨가된 전해질의 경우 5,000 – 8,000 mPa · s를 나타내었다. 이와 같은 특성을 지닌 페이스트를 사용하여 디스펜싱 공정을 통하여 토출된 라인 패턴의 형상을 Fig. 4에 나타내었다. 광학사진에서 볼 수 있듯이 페이스트의 유동특성에 따른 디스펜싱 공정의 경우 8 wt% ethyl cellulose가 첨가된 전해질 페이스트를 사용한 경우 650 μm의 선폭을 나타내었고, 10 wt%의 ethyl cellulose가 첨가된 경우에는 390 μm의 선폭을 나타내었다. 결합제의 함량 감소로 상대적으로 낮은 점도를 나타내는 경우에는 좀 더 넓은 선폭을 관찰 할 수 있었

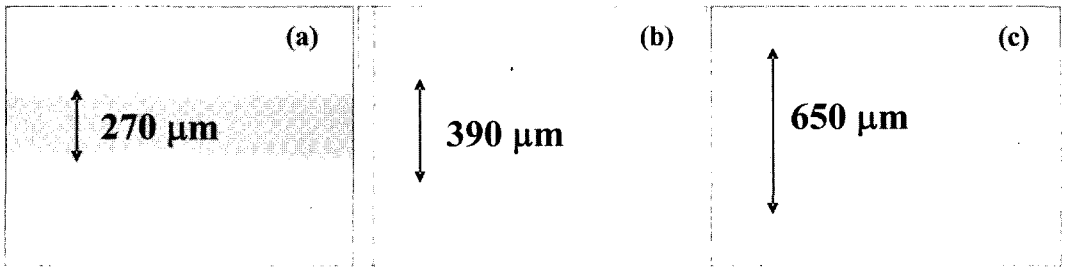

Fig. 4. The resulting line by anode and electrolytes pastes dispensed from the pastes with varying rheological behavior (pressure: 0.1 torr; nozzle size: 210 μm; moving speed: 1.22 mm/sec); (a) anode with 10 wt% ethyl cellulose, (b) electrolyte with 10 wt% ethyl cellulose, and (c) electrolyte with 8 wt% ethyl cellulose.

다. 이러한 결과는 점도가 낮아지게 되면 같은 압력에서도 노즐과 페이스트의 마찰력이 상대적으로 작아지기 때문에 많은 양의 페이스트가 토출되므로 보다 넓은 선폭을 갖는 패턴 구현이 되는 것으로 판단된다.

3.3. 로보 디스펜싱 공정변수 최적화

디스펜싱 공정상에서 생길 수 있는 변수로는 토출 시의 압력레벨과 노즐의 이동속도가 가장 큰 변수로서 작용하게 된다. Fig. 5는 8 wt% ethyl cellulose가 첨가된 전해질 페이스트를 이용하여 토출 시의 압력 레벨과 노즐 이동속도 변화에 따라 디스펜싱 하여 얻어진 라인의 선폭과 두께를 70°C에서 50분동안 건조 후 나타낸 결과이다. 토출압력에 따른 선폭과 두께를 살펴보면 0.25 torr 공압에서 토출 된 경우 선폭이 ~820 μm, 최대 두께가 47 μm

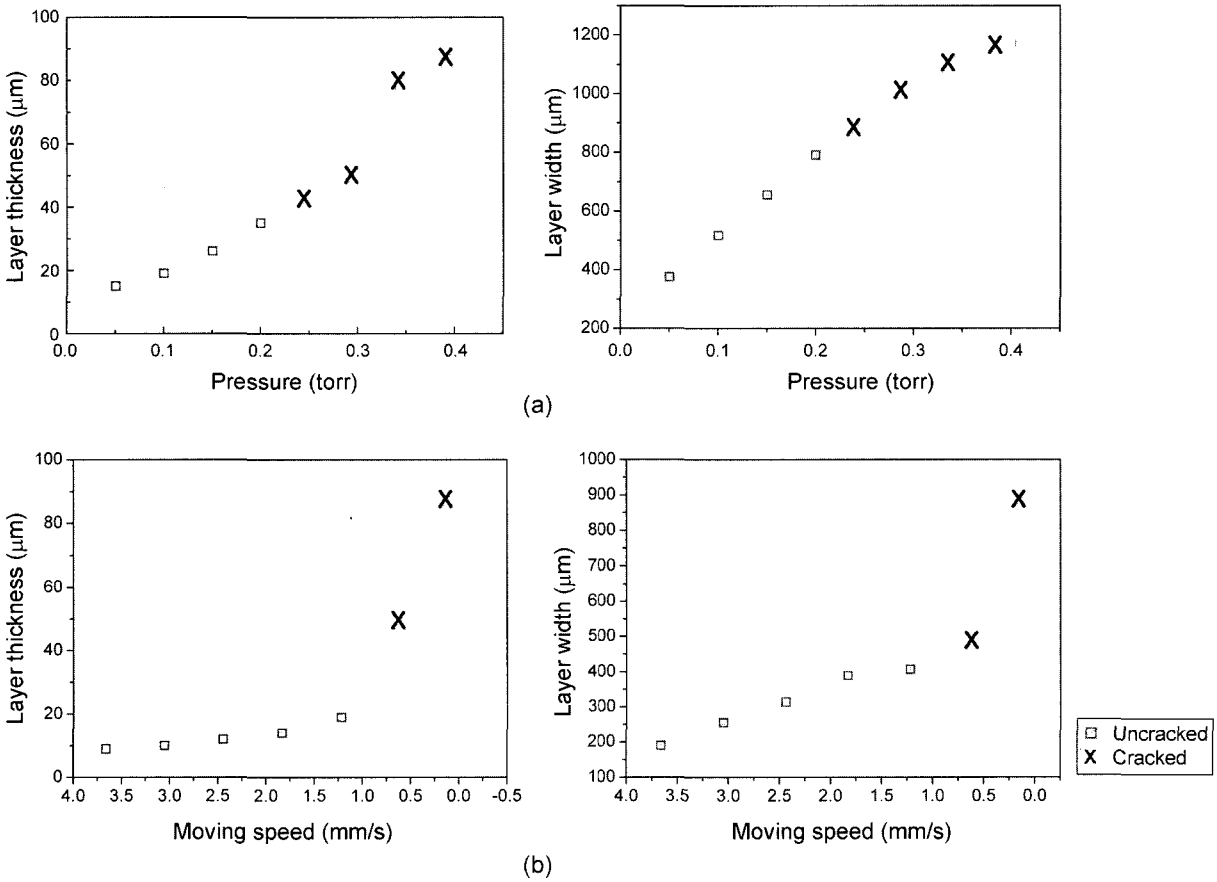

Fig. 5. The lines width and the height of the resulting line pattern as a function of pressure level and moving speed of the nozzle; (a) variations of the layer thickness and width by the pressure level and (b) variations of the layer thickness and width by nozzle moving speed.

를 나타내었고 이 두께 이상에서는 건조과정에서 라인 패턴과 지지체 사이의 층간분리(delamination)나 표면균열, 왜곡현상과 같은 결함이 발생하였다. 노즐의 이동속도가 0.5 mm/s 이하로 감소되는 경우에도 높은 압력에서 토출되는 것과 같이 50 μm 이상의 선 두께와 500 μm 이상의 선 폭을 가지는 라인이 패터닝되고 건조과정에서 유사한 결함이 발생되었다. 이와 같은 결과는 공압이 0.25 torr 이상이 되거나 노즐 이동속도가 0.5 mm/s 이하로 느려지게 되면 지지체의 단위 면적 당 토출되는 페이스트의 양이 적정량을 초과하여 증가하게 되므로 디스펜싱 노즐에서 토출되어 형상화 되는 단일라인의 두께가 50 μm 이상이 되기 때문이다. Fig. 5(a)와 (b)에서 단일라인의 두께가 0.2 torr 이하의 압력과 1.0 mm/s 이상의 노즐 이동속도에서는 45 μm 이하의 두께를 나타내었고 건조 및 소결 후 결함이 관찰되지 않았다.

건조 결함은 건조되는 동안에 페이스트 내부에서 입자들의 유동성에 기여하였던 용매(α-terpineol)가 제거되고 입자 간격이 줄어듦에 따라서 발생되는 수축 과정에서 생기게 된다. 또한 건조동안에 생길 수 있는 입자 혹은 유기상의 편리에 의해서 발생되기도 하는데 본 연구에서 사용된 페이스트의 경우 높은 분자량의 결합제에 의하여 입자와 유기상이 흡착되어 있으므로 그 이동이 매우 작다고 할 수 있다. 건조과정에서 생기는 수축은 본 연구에서 형상화된 단일라인의 단면을 Fig. 6에 나타낸 것처럼 반원형 형태로 도포되기 때문에 두께가 두꺼운 중심 부분과 상대적으로 얇은 선 가장자리 부분에서 차등적 수축을 발생시키게 된다. 차등적 수축에 의한 결함발생 원인은 용매의 건조 과정 중 내부와 외부의 수축률 차이로 인해 발생하는 인장 응력이 건조되어 얻어지는 라인 패턴의 건조 상태의 강도 보다 크다면 결함이 발생된다고 예상할 수 있다. 따라서 특정 페이스트를 사용하여 결함없이 도포할 수 있는 라인 패턴의 임계 두께는 이의 건조강도에 따라 좌우되리라 예상되며, 이는 입자 크기, 고용량, 입자 Packing 구조, 그리고 결합제 함량 및 분자량 등에 의존하게 된다. 이러한 건조과정에서 생기는 작고 큰 결함들은 소결 과정에서는 더 큰 결함으로 발전되고 특히 박리현상과 같은 결함이 발생하게 된다.

Fig. 6은 이러한 결함을 나타낸 것이다. Fig. 6(a)를 보면 두께가 45 μm 정도에서는 건조결함이 발생하지 않았으나 (b)의 그림에서와 같이 두께가 50 μm 이상이 되면 선의 끝부분에서 왜곡 현상(warping)에 의한 박리현상이 발생하였다. 이러한 결과들을 토대로 0.1 torr의 압력에서 1.22 mm/s의 이동속도로 디스펜싱 하였을 때 건조시의 결함을 최소화 할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 너무 적은

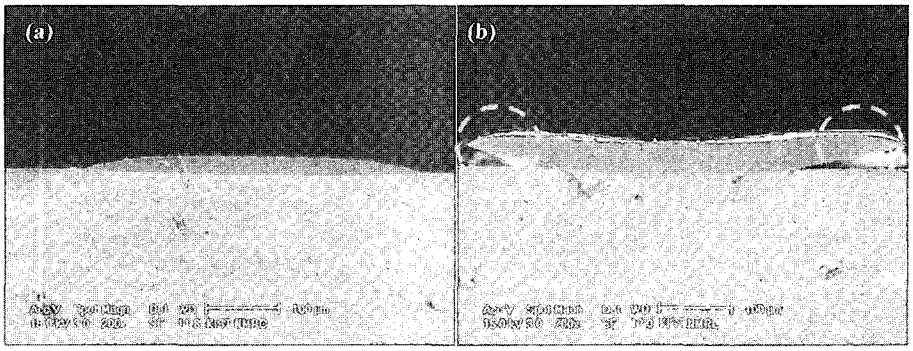

Fig. 6. Cross-sectional SEM images of line pattern formed by dispensing process; (a) line with 45 μm thickness and (b) line with ~70 μm thickness in which delamination is observed.

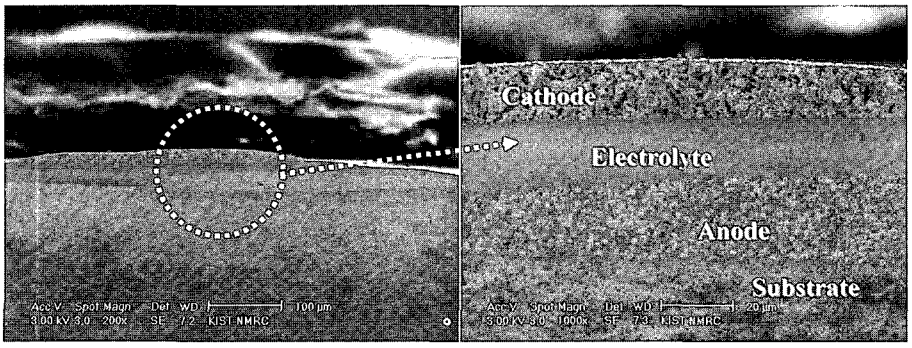

Fig. 7. Cross-sectional SEM images of direct-write fabricated SOFC unit cell after sintering.

압력과 빠른 이동속도는 건조결함을 최소화 시킬 수는 있지만 라인의 적층 및 패턴 형성시 정확성 및 재현성이 떨어지는 문제점이 있다.

3.4. 단전지의 미세구조

SOFC는 다중소재가 사용되며 또한 치밀성과 다공성의 서로 상반되는 미세구조가 요구되는 구조적 특징을 가지고 있다. Fig. 7은 다공성 지지체 위에 로보 디스펜싱으로 직접묘화된 단전지의 SEM 단면 미세구조를 나타낸 것이다. 다공성 PSZ 지지체 위에 ~20 μm의 두께를 가지는 음극층이 형성되었고 그 위에 ~15 μm 두께의 치밀성 전해질층이 형성되었다. 마지막으로 ~15 μm 두께의 양극이 형성되면서 다공성의 음극층과 양극층 사이에 치밀성을 가지는 전해질 층이 계면 결함 없이 형성됨을 관찰할 수 있었다. 이러한 구조는 연료전지 구동에 있어 핵심적인 미세구조로서 기공율이 서로 다른 다중 소재의 적층 소결체를 층간분리(delamination)와 같은 공정결함 없이 로보 디스펜싱에 의한 직접묘화 방식으로 연료전지 단위 셀 제작이 가능하다는 것을 보여주고 있다.

3.5. 단전지 성능 평가

작동온도 755°C, 810°C에서 수소와 공기를 각각 연료와 산화제로 사용하여 얻은 단전지의 출력특성과 단위면적당 출력밀도의 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 단전지의 기전력은 810°C의 온도에서 0.95 V를 나타내었고 단전지의 평균 최고 출력밀도는 단전지의 유효면적으로 환산시 810°C에서 0.35 W/cm^{2}로 나타났다. SOFC 평판형 단전지의 이론 기전압인 1.2 V보다 낮은 기전압이 관찰된 이유는 다공성 지지체 위에 전극과 전해질이 패터닝 된 이외의 영역에서 연료가스와 산화가스가 서로 섞이지 않게 격리하는 역할을 하는 밀봉재가 패터닝 된 셀 부분을 완벽하게 밀봉하지 못하였기 때문으로 판단된다. 그리고 음극의 전류를 포집하기 위하여 사용된 Au 막 역시 치밀성이 상대적으로 떨어져 가스의 누수 및 혼합이 발생하여 기전력 저하를 가져온 것으로 생각된다. 이를 보완하기 위해서는 집적형 고체산화물 연료전지의 접속제로서 사용 되고 있는 LSCr($La_{0.85}Sr_{0.15}CrO_x$)[1,2]에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

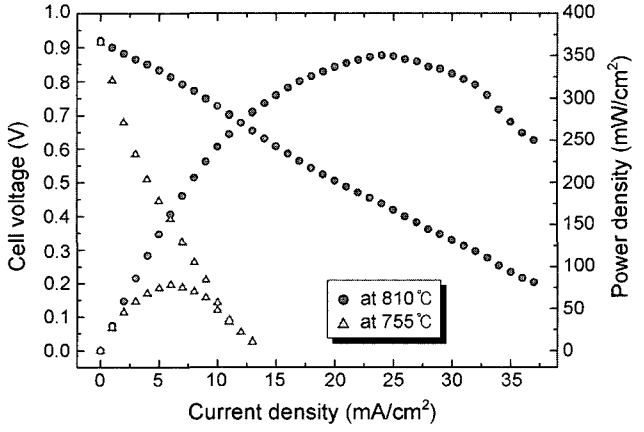

Fig. 8. The discharge properties of the single-line shaped SOFC fabricated by direct writing properties at 755°C and 810°C with hydrogen as fuel and air as oxidant gas.

4. 결 론

평면 집적형 소형 고체산화물 연료전지를 제조하기 위한 방법으로 기존의 방법보다 정확성, 확장성, 그리고 재현성이 우수한 로보 디스펜싱으로 명명된 새로운 제조법을 개발하였다. 로보 디스펜싱은 페이스트화 된 다중소재를 미세한 노즐사이로 토출 시키면서 동시에 노즐 x-y축 움직임 및 공압 on-off 신호를 디지털 방식으로 제어함으로써 임의 형상의 미세 패턴을 비교적 정밀하게 직접 묘화할 수 있는 기술이다. 다공성 PSZ 지지체 위에 연료전지의 전극 및 전해질의 요소 소재를 페이스트화 한 후 라인형상의 미세패턴을 정밀하게 구현하였다. 완성된 단전지의 미세구조는 다공성과 치밀성의 서로 상반되는 특성을 가지는 음극과 전해질 그리고 양극이 계면결함 없이 제조될 수 있음을 보여주었다. 로보 디스펜싱공정에 의하여 라인 형상으로 적층 패턴된 SOFC 단일 셀은 출력밀도가 810°C에서 0.35 W/cm^{2}로 비교적 우수한 성능을 관찰할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 에너지 관리공단의 학진사업(2003-N-FC03-P-06-0-000)의 연구비 지원으로 이루어 졌으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. N. Q. Minh, "Ceramic Fuel Cell," *J. Am. Ceram. Soc.*, **76** [3] 563-88 (1993).
2. N. Q. Minh and T. Takahashi, "Science and Tecchnology of Ceramic Fuel Cells," pp. 1-14, *Elsevier Science, Amsterdam* (1995).
3. H. Moon, J.-H. Lee, and H.-W. Lee, "Ni Loss During the Fabrication of SOFC Anode, Ni-YSZ Composite(*in Korean*)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **38** [2] 137-42 (2001).
4. J.-H. Lee, J.-H. Moon, H.-W. Lee, J. Kim, J.-D. Kim, and K.-H. Yoon, "Quantitative Analysis of Microstructure and its Related Electrical Property of SOFC Anode, Ni-YSZ Cermet," *Solid State Ionics*, **148** 15-26 (2002).
5. J.-H. Lee, J.-W. Heo, D.-S. Lee, J. Kim, G-H. Kim, H.-W. Lee, H.-S. Song, and J.-H. Moon, "The Impact of Anode Microstructure on the Power Generating Characteristics of

SOFC," *Solid State Ionics*, **158** 225-32 (2003).
6. H.-W. Lee, B.-G. Yoon, and H.-S. Song, "Fabrication of Porous Ceramics and Multi-Layered Ceramics Containing Porous Layers; I. Pore Structure(*in Korean*)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **31** [9] 1044-52 (1994).
7. C. Badini, P. Fino, A. Ortona, and C. Amelio, "High Temperature Oxidation of Multilayered SiC Processed by Tape Casting and Sintering," *J. Eur. Ceram. Soc.*, **22**, 95-102 (2002).
8. A. K. Maiti and B. Rajender, "Terpineol as a Dispersant for Tape Casting Yttria Stabilized Zirconia Powder," *Mater. Sci. and Eng.*, **A333** 35-40 (2002).
9. S. L. Morissette and J. A. Lewis, "Direct-Write Fabrication of Pb(Nb,Zr,Ti)O_3 Devices : Influence of Paste Rheology on Print Morphology and Component Properties," *J. Am. Ceram. Soc.*, **84** 2462-68 (2001).
10. V. Tohver, S. L. Morissette, and J. A. Lewis, "Direct-Write Fabrication of Zinc Oxide Varistors," *J. Am. Ceram. Soc.*, **85** 123-28 (2002).
11. B. A. Haberman and J. B. Yong, "Three-Dimensional Simulation of Chemically Reacting Gas Flows in the Porous Support Structure of an Integrated-Planar Solid Oxide Fuel Cell," *Int. J. Heat Mass Transfer*, **47** 3617-29 (2004).
12. H. Luhleich, J. Dias, and H. Nickel, "The Coat-Mix Procedure Using Carbon Fillers," *Carbon*, **35** 95-102 (1997).
13. H.-Y. Jung, T.-W. Roh, J. Kim, H.-W. Lee, H. Ko, K.-C. Lee, and J.-H. Lee, "Power Generating Characteristics of Anode-Supported SOFC Fabricated by Uni-Axial Pressing and Screen Printing(*in Korean*)," *J. Kor. Cerm. Soc.*, **41** 456-63 (2004).