

세라믹-세라믹 컴포넌트 접합용 글라스 실란트의 제조 및 접합력 평가

허유진 · 김효태[†]

한국세라믹기술원 나노소재·공정센터

Fabrication and Adhesion Strength Evaluation of Glass Sealants for Ceramic to Ceramic Component Joining

Yu Jin Heo and Hyo Tae Kim[†]

Nanomaterials and Nanotechnology Center Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology,
101, Soho-ro, Jinju-si, Gyeongsangnam-do 52851, Korea

(Received December 2, 2019; Corrected December 26, 2019; Accepted December 28, 2019)

초 록: 전력저장용 전기에너지 저장장치의 일종인 NaS 전지 단위 셀을 개발함에 있어서 알파-알루미나 절연세라믹 캡과 베타-알루미나 전해질 튜브 간의 세라믹-세라믹 상호 접합을 위하여 글라스 기반의 실링소재가 필요하다. 본고에서는 이 세라믹-세라믹 접합용 글라스 실링 페이스트를 제조함에 있어서, 열간 퀘칭법에 의한 글라스 프리트 제조와 상분석, 분말입도 분석 및 글라스 조성에 따른 열팽창계수 변화 및 표면거칠기를 분석하였다. 또한 글라스 실란트의 접합력 평가를 위해 종래 솔더 볼 조인트의 접합력 평가용 분석장비인 Dage bond tester를 이용하여 세라믹-세라믹 컴포넌트의 작은 접합면에 대한 접합력 측정 방법을 제안하였다.

Abstract: Glass base sealant is required as a ceramic-ceramic joining material between α -alumina insulation cap and β -alumina electrolyte tube in the development of NaS battery cell package for electrical energy storage system. The fabrication of glass frit by thermal quenching method, phase analysis, particle size analysis, coefficient of thermal expansion and surface roughness according to the glass compositions were analyzed for the fabrication of glass sealing paste for ceramic-ceramic joining. Also, a new evaluation method of the adhesion strength of glass sealant at the small area in ceramic-ceramic joining component was proposed using conventional Dage bond tester that was used to measure the adhesion of solder ball joint.

Keywords: Glass sealant, ceramic-ceramic joining, NaS cell package, adhesion strength, energy storage system

1. 서 론

에너지 저장 시스템(energy storage system: ESS)은 초기 소형가전용 충전전지에서 시작하여 이후 태양광, 풍력 발전과 같은 신재생에너지 분야에서의 발전에너지 저장 및 전력전송에 있어서 순간정전 대응이나 peak-shift와 같은 스마트그리드용으로 적용이 확산되고 있다. 또한 하이브리드 전기차(hybrid electric vehicle: HEV)와 전기차(electric vehicle: EV)와 같은 수송수단, 그리고 향후 빌딩, 가정용 전력저장 시스템 등의 잠재적인 시장 수요를 갖고 있어 성능 발전과 효율 향상을 위해 지속적인 연구개발이 필요한 분야이다. 이 ESS에서 핵심부품인 전기에너지 저장장치(electrical energy storage: EES) 기술은 초

기의 Pb-acid 계 전지와 Ni-Cd 및 Ni-MH 계 충전용 전지 기술에서 이후 리튬이온전지(lithium ion battery: LIB)와 황화나트륨(sodium sulfur: NaS) 전지, 그리고 최근의 metal-air 전지 및 supercapacitor로 이어지고 있다.¹⁾ 그 중 NaS 전지는 LIB와 함께 대표적인 ESS 용 EES로 사용되고 있다. 현재 일본의 NKG Insulators Ltd. 사는 NaS 전지 제조 및 ESS 분야 상용화에 있어서 대표적인 선도 기업이며, 세계 NaS 전지 시장에서 여전히 압도적인 시장 점유율과 기술적 우위를 점하고 있다.

NaS 전지의 단위 셀(cell) 구조는 양극재인 나트륨(sodium)과 음극재인 황(sulfur) 및 베타-알루미나 전해질(β -alumina electrolyte)의 주요 활성 셀 부분과 외부하우징, 그리고 베타 알루미나 튜브와 알파-알루미나(α -alumina)

[†]Corresponding author
E-mail: hytek@kicet.re.kr

© 2019, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

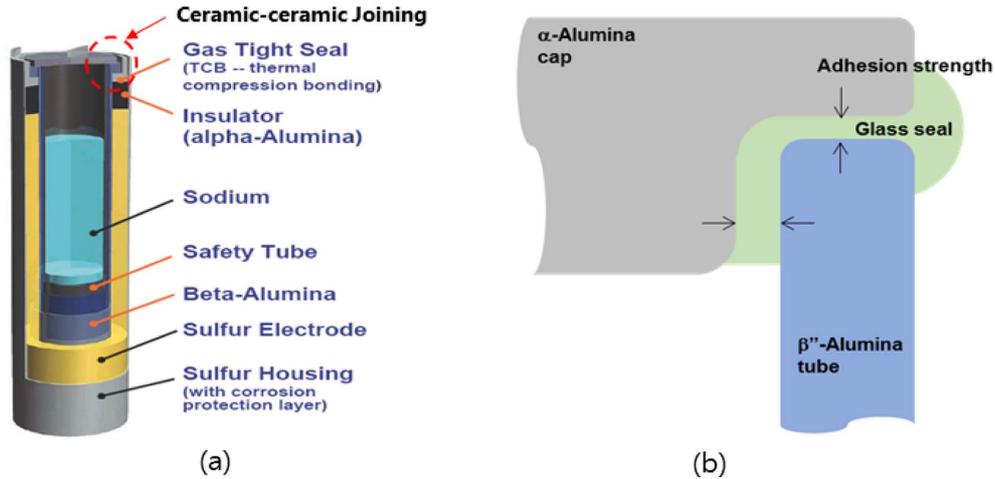


Fig. 1. Schematic diagram of NaS battery cell with (a) Cut-away view²⁾ and (b) enlarged view of ceramic-ceramic joining area.

절연 캡(insulation cap)부 등의 셀 패키지 부품으로 구성되어 있다(Fig. 1(a)).²⁾ 그 중에서 셀 패키징은 통상 알파-알루미나 절연 캡부와 외부 금속재 하우징과의 ceramic-metal 접합은 열간압착접합(thermal compression bonding: TCB) 기술로 접합하는 것과, 알파-알루미나 절연 캡부와 베타-알루미나 전해질 튜브간의 ceramic-ceramic 접합은 글라스 실링재(glass sealant)를 사용한 용융 접합 (melt joining) 기술³⁻¹²⁾을 사용한다(Fig. 1(b)).

본고에서는, NaS 전지 셀 패키지 부문에서 특히 알파-알루미나 절연 캡부와 베타-알루미나 전해질 튜브간의 ceramic-ceramic 컴포넌트 접합용 글라스 실링재의 제조와 물성분석, 그리고 접합력 평가에 관하여 고찰하고자 한다.

2. 실험 방법

알파 및 베타-알루미나 간의 세라믹-세라믹 접합용 글라스 실링재로서 글라스 페이스트(glass paste)를 제조하기 위하여, 우선 저온용융 글라스 프리트(glass frit) 분말을 제조하는 것이 필요하다. Table 1은 800~850°C의 접합온도를 타겟으로 하는 알루미노 보로실리케이트(alumino borosilicate) 계열의 글라스 프리트 제조를 위한 원료 조성표이다. 여기서 글라스 프리트의 물성 튜닝을 위한 알루미늄과 비스무스 산화물 원료의 상대적 함량 비율 외의 타 조성 원료는 편의상 일련의 조성범위로만 제시하였다.

글라스 조성 원료는 산화물(metal-oxide)로서 SiO₂,

Al₂O₃, B₂O₃, Bi₂O₃ 및 MgO를, 탄산염(carbonate)으로서 Na₂CO₃와 K₂CO₃를 사용하였고, 각각 평균입도(D₅₀)가 1~2 μm, 순도는 산화물 분말은 ≥99.9%, 탄산염 분말은 ≥99%의 고순도 원료를 사용하였다. 준비된 원료는 Table 1의 조합비로 계량하여 에탄올(ethanol) 용매를 첨가하여 12시간동안 볼밀(ball mill)로 혼합하였다. 혼합된 슬러리(slurry)는 오븐에 넣어 85°C에서 6시간 건조한 다음, 유발로 분쇄하여 φ = 30 mm 크기의 케익으로 만들어 백금도가니(platinum crucible)에 넣어서 1,600°C에서 약 2시간 용융시킨다. 이후 균일하게 녹은 글라스 용융체(glass melt)를 스테인레스스틸 롤러(stainless steel roller)에서 얇은 리본형태로 압착하고, 연이어 상온의 순수(deionized water) 트레이에서 열간 퀘칭(thermal quenching)하여 글라스 플레이크(glass flake)를 만들었다. 글라스 플레이크는 유발로 1차 분쇄(hand crushing)한 다음 지르코니아 jar에 지르코니아 볼과 에탄올을 혼합하여 planetary ball mill (Pulverisette 5, Fritsch)로 1시간 분쇄하여 건조함으로써 글라스 분말을 제조하였다.

이로써 얻어진 글라스 분말은 X-선 분말회절법(X-ray powder diffraction method: XRD)과 주사전자현미경(scanning electron microscopy: SEM) 및 입도분석기(particle size analyzer)로 각각 상분석과 분말형상 및 입자크기를 분석하였다. 제조한 글라스의 열팽창계수(coefficient of thermal expansion: CTE)를 측정하기 위하여 글라스 분말에 2% PVA 바인더 수용액을 첨가하여 100 mesh의 씨브(sieve)를 사용하여 그레놀화(granulating) 한

Table 1. Chemical compositions of sealing glass frit powders (wt%)

Glass code	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Bi ₂ O ₃	MgO	Total (%)
G1	35-40	25	20-25	3-8	1-5	-	2-7	100
G2	35-40	20	20-25	3-8	1-5	5	2-7	100
G3	35-40	15	20-25	3-8	1-5	10	2-7	100
G4	35-40	10	20-25	3-8	1-5	15	2-7	100
G5	35-40	5	20-25	3-8	1-5	20	2-7	100

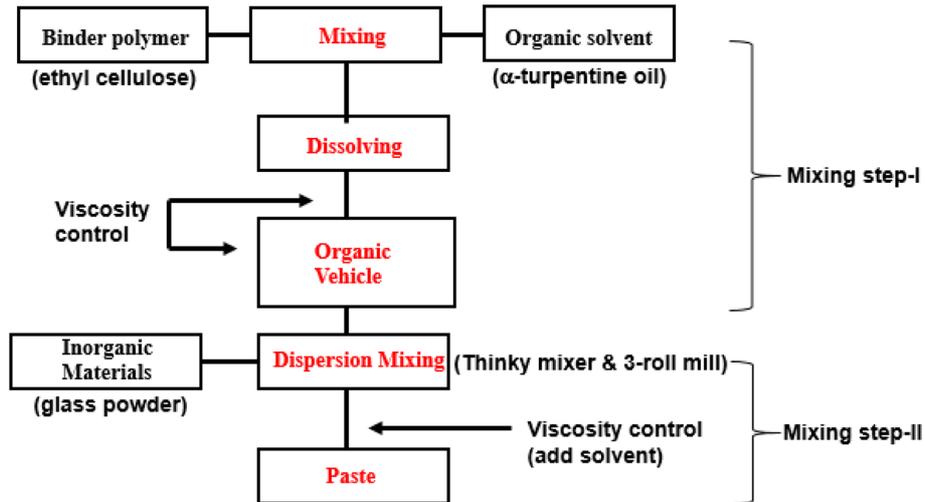


Fig. 2. Process flow chart of glass paste fabrication.

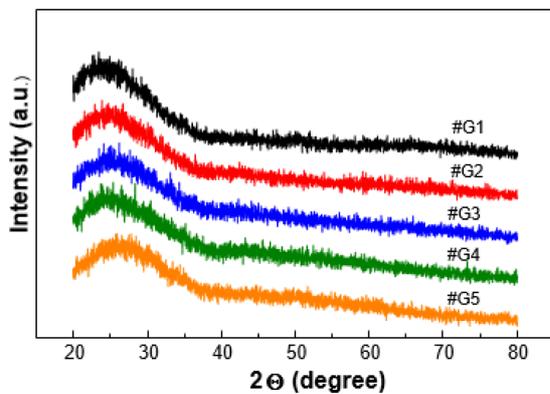


Fig. 3. XRD patterns of thermally quenched glass frit powders.

다. 이후 글라스 그레놀 분말을 초경물드로 성형한 디스크 펠렛을 850°C에서 열처리한 다음 thermo-mechanical analyzer(TMA 450, TA Instruments)를 사용하여 NaS 전지의 사용온도 부근인 상온 ~350°C의 온도범위에서 CTE를 측정하였다.

앞에서 준비한 글라스 프리트 분말을 접합용 실란트로 사용하기 위해서는 글라스 페이스트를 제조해야 한다. 글라스 실란트로 사용하기 위한 페이스트 제조는 에틸셀룰로즈(ethyl cellulose: EC) 바인더와 α-turpentine oil 용제를 써서 제조하였다. Fig. 2는 글라스 실란트 페이스트의 제조과정을 간략히 요약한 공정흐름도이다. 페이스트의 제조는 바인더의 충분한 용해와 글라스 프리트 분말의 균일한 분산을 위하여 2단계의 공정으로 진행하였다. 우선 1단계로서 EC 바인더를 용제(solvent)인 α-turpentine oil에 용해하는 단계로서, 바인더와 용제를 혼합해서 넣은 비이커를 핫플레이트 위에 놓고 약 85°C에서 마그넷 스틱을 이용하여 천천히 교반하여 바인더가 완전히 용해되게 한다. 이렇게 용해된 바인더 솔루션에 2단계로서 글라스 프리트 파우더를 첨가하고 수작업으로 스패츨라(spatula)를 써서 예비 혼합을 한 다음, 약 2,000 rpm의 고속혼합기

(AR350, Thinky Ltd.)로 약 3분간 1차 혼합 후, 3-roll mill (EXAKT-50, Exakt Technologies)로 2~3회 2차 균일화 과정을 거쳐 글라스 페이스트를 제조한다. 이 때 균일화 및 탈포(de-airing) 과정에서 페이스트의 용제가 휘발하면서 점도가 급격히 상승하므로, 용제를 조금씩 추가하면서 실링에 적합한 페이스트의 점도(35,000~50,000 cps)로 보정하였다.

제조한 조성별 글라스 실란트 페이스트는 각각 알파-알루미나 기판에 스크린 인쇄한 다음 용융 접합온도인 850°C 부근에서 열처리 한 다음, surface profiler(Dektak 150, Veeco Instruments Inc.)를 써서 표면 거칠기(surface roughness)를 측정하였다. 마지막으로, Dage bond tester 장비(Dage 4000, Nordson)로 접합면의 전단파괴 응력을 측정하여 제조한 글라스 실란트의 접합력을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실링용 글라스 프리트의 제조 및 물성분석

수직형 전기 용융로에서 퀘칭한 알루미늄 보로실리케이트계 글라스 분말의 결정상태를 분석하기 위해 XRD 분석을 한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 그 결과 5개 조성(G1~G5)의 글라스 분말 모두가 전형적인 비정질(amorphous) 구조의 상(phase)을 나타내었고, 별개의 미반응 결정질상 피크가 발견되지 않은 것으로 보아 5개의 조성에서 모두 글라스 형성이 잘 이루어진 것을 확인하였다. Fig. 4의 (a)는 퀘칭한 글라스 플레이크 리본을 planetary ball mill로 1시간 분쇄한 글라스 프리트 분말의 형상을 SEM으로 관찰한 사진으로서, 글라스 소재의 특성상 물리적 분쇄공정에 의한 입자의 모서리가 일반적인 다결정질(polycrystalline) 세라믹 분말의 입자에 비해 매우 날카롭게 각이진 것을 알 수 있다. Fig. 4의 (b)는 이 분말에 대한 입자사이즈 및 분포를 분석한 결과로서 평균

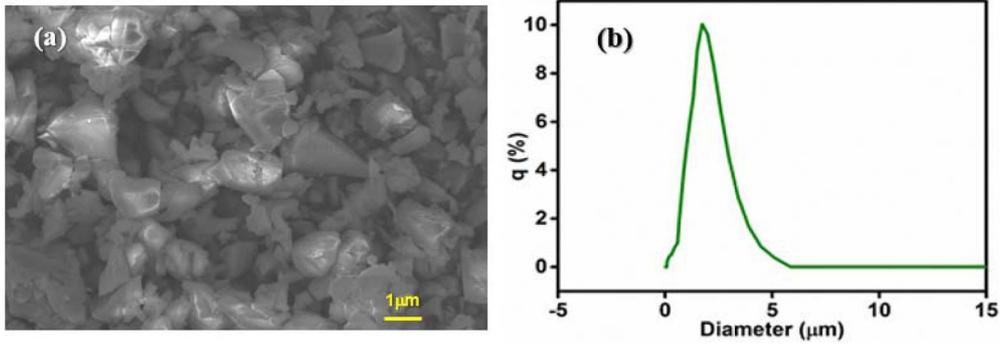


Fig. 4. (a) SEM micrograph and (b) particle size distribution of the planetary ball milled glass frit powders.

Table 2. Glass transition temperatures and thermal expansion coefficients of the fabricated glasses

Glass code	G1	G2	G3	G4	G5
T _g (°C)	803	760	722	672	649
CTE (ppm/°C)	3.44	3.70	4.04	4.20	5.08

입경이 약 1.6 μm 인 단분산(single-mode) 구조의 입도 분포를 가짐으로서 글라스 분말의 분쇄공정이 충분히 이루어졌음을 나타낸다. 글라스 플레이크의 경우 분쇄 에너지가 비교적 낮은 rotary 볼밀로 할 경우 장시간 분쇄를 해도 입자의 파쇄가 충분치 않아 일반적으로는 쌍봉(bimodal) 형태의 입도분포를 갖게 된다.

Table 2는 글라스 조성 G1~G5에 대한 유리전이점(T_g)과 CTE 측정값을 요약한 것이다. 통상 NaS 전지는 300~350°C의 온도영역에서 운전되기 때문에 단위 셀 패키지 소재의 열팽창 특성을 이 온도범위에서 측정하는 것이 바람직하다. 그 결과 CTE 값은 알루미늄 대신 비스무스 산화물(Bi_2O_3)의 함량이 증가되는 조성일수록 커지는 것을 알 수 있었다. 이 결과는 타 연구자의 글라스-금속 접합(glass-metal joint)용 MgAl_2O_3 계 글라스 조성의 물성 연구에서 알루미늄 함량이 감소할수록 T_g 가 낮아지고, CTE가 증가한 결과와도 일치한다.¹³⁾ 여기서 비스무스 함유 보로실리케이트계 글라스 조성을 택한 이유는 타 선행 연구에서 나트륨에 대한 화학적 내성이 타 조성계에 비해 비교적 양호한 것으로 알려져 있기 때문이다.^{14,15)} 한편, NaS 전지 셀에서 알파-알루미늄과 베타-알루미늄 전해질 튜브의 접합을 위해서는 가능한 CTE 값이 이들 두 가지 소재에 근접하는 것이 바람직하다. 이를 위해서는 NaS 전지 셀 패키지에서 글라스 실란트의 적정 CTE 값은 어느 정도인지 고려해 볼 필요가 있다. 상온 ~400°C 범위에서 알파-알루미늄($\geq 99.5\%$)와 베타-알루미늄(beta + beta' phase)의 CTE는 각각 8.4 ppm/°C와 7.2 ppm/°C로 알려져 있다.^{16,17)} 그러나 이 값은 이들 두 가지 소재의 CTE는 각각에 대한 첨가물과 열처리 조건에 따라 미소한 차이가 발생할 수도 있다. NaS 전지 셀의 패키징 상태에서 알파-알루미늄 캡이 베타-알루미늄 튜브보다 CTE

가 크므로 셀의 작동온도에서 알파-알루미늄 캡은 베타-알루미늄 튜브 쪽으로 인장응력(tensile stress)이 작용하게 되고, 반대로 CTE가 작은 베타-알루미늄 튜브는 중심 방향으로 압축응력(compressive stress)이 작용하게 된다. 만약 이들 간의 접착제인 글라스 실란트의 CTE가 베타-알루미늄 튜브의 7.2 ppm/°C 보다 크거나 같을 경우 알파-알루미늄 캡의 큰 열팽창 계수에 의해 베타-알루미늄 튜브의 외경 쪽으로 응력이 가해지므로 알파-알루미늄 보다 상대적으로 기계적 강도가 취약한 베타-알루미늄 튜브는 온도구배가 큰 열 사이클 환경에서 균열이 일어날 가능성이 커지게 된다(α -alumina: 350~370 MPa > β -alumina: 210~330 MPa). 여기서 두 가지 알루미늄 소재간의 CTE 값 차이는 1.2 ppm/°C이므로, 이들 간의 응력을 최소화하기 위한 글라스 실란트는 셀 패키지 외각의 CTE가 작은 베타-알루미늄 튜브보다 1.2 ppm/°C이 작은 약 6 ppm/°C 정도가 적절한 값으로 볼 수 있다. 본 실험에서의 글라스 조성계에서 얻은 CTE는 3.43~5.08 ppm/°C로서, G5 글라스 조성 경우 어느 정도 적정 CTE 값에 근접하기는 했으나, 여전히 약 1 ppm/°C 정도 낮은 값이다. 따라서 이상적인 CTE 값을 얻기 위해서는 향후 이 알루미늄 보로실리케이트계 조성계의 조합비 튜닝을 좀 더 할 필요가 있다. 실제로 최근 시판되는 NaS 전지용 선진사의 상용 실링글라스의 경우 CTE는 5.2~6.7 ppm/°C (@20 - 300°C)로 알려져 있다.¹⁴⁾

3.2 글라스 실란트 페이스트의 열처리 후 표면거칠기 및 접합력 평가

본 연구에서는 앞서 다섯 가지 종류의 글라스 프리트 조성에서 NaS 전지 셀 패키지의 알파-알루미늄과 베타-알루미늄과의 열팽창계수 완충값(CTE buffering value)에 근접한 G5 글라스를 선택하였다.

Fig. 5는 G1~G5 조성으로 제조한 글라스 페이스트를 알파-알루미늄 기판에 인쇄 후 850°C에서 열처리 한 다음 글라스 후막의 표면거칠기(surface roughness)를 측정 한 그래프이다. 그 결과, 글라스 프리트 조성의 알루미늄 함량이 줄고 상대적으로 비스무스 산화물 함량이 커질수록 글라스 용융체 후막의 표면은 더욱 평탄해졌다. 이것으

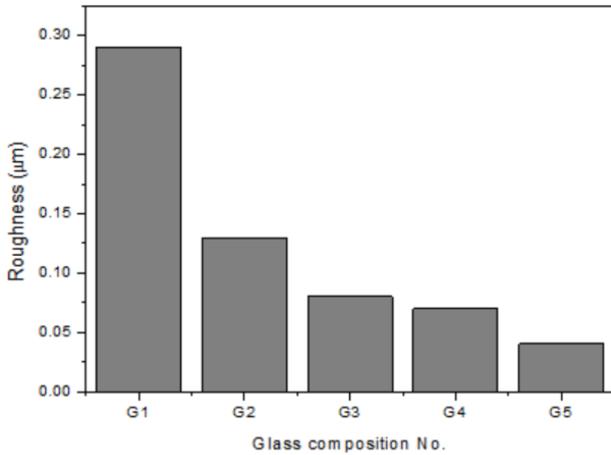


Fig. 5. Surface roughness of glass paste after heat treatment at 850°C.

로 본 실험에 적용된 알루미늄 보로실리케이트 글라스 조성계에서는 알루미늄 함량이 줄고 비스무스 함량이 높아질수록 유리전이점(Tg)이 낮아지는 데(Table 2) 기인한 것으로 판단된다.

한편, 본 연구에서는 제조한 글라스 프린트에 대해 알파-알루미나와 베타-알루미나 튜브간의 세라믹-세라믹 접합력을 평가하기 위해, 종래에 솔더볼의 접합력 평가용

으로 사용해 왔던 Dage bond tester를 사용하여 측정하였다(Fig. 6). 실험용 시료는 알파-알루미나 기판($t = 0.65 \text{ mm}$)에 G5 조성의 글라스 실란트 페이스트를 스크린 인쇄하고 그 위에 베타-알루미나 소결체 필러(pillar, $\phi \leq 3 \text{ mm}$, $h = 5 \text{ mm}$)를 올려놓은 상태로 800°C에서 30분간 열처리하여 용융접착 시킨다. 이 때 글라스 실란트의 접합면적은 가능한 베타-알루미나 필라의 단면적보다 같거나 더 작은 것이 바람직하다. 글라스 실란트가 필라의 밖으로 밀려나오면 접합면적을 산출하기가 용이하지 않아 측정값의 오차가 커지기 때문이다. 준비된 시료는 Dage bond tester 스테이지에 장착시켜서 전단모드(shear mode)에서의 파괴응력을 측정하였다.

Table 3은 G5 글라스 조성으로 만든 실링 글라스 페이스트로 접합하여 800°C에서 열처리 한 다섯 개의 시료에 대한 접합력 시험결과를 요약한 것이다. 그 결과, bond tester 팁(tip)의 전단응력 인가에 의한 알파 알루미나-베타 알루미나 접합면의 파괴응력(fracture force)은 48.61~50.05 N으로 측정되었고, 이것을 각 시료의 접합부 면적을 반영하여 MPa 단위로 환산한 경우(conversion of $1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ MPa}$)의 전단 파괴응력은 7.11~7.62 MPa로서 G5 글라스를 사용한 알파 및 베타-알루미나 간의 평균 접합력은 약 7.3 MPa에 이르는 것으로 나타났다. 이것은 고

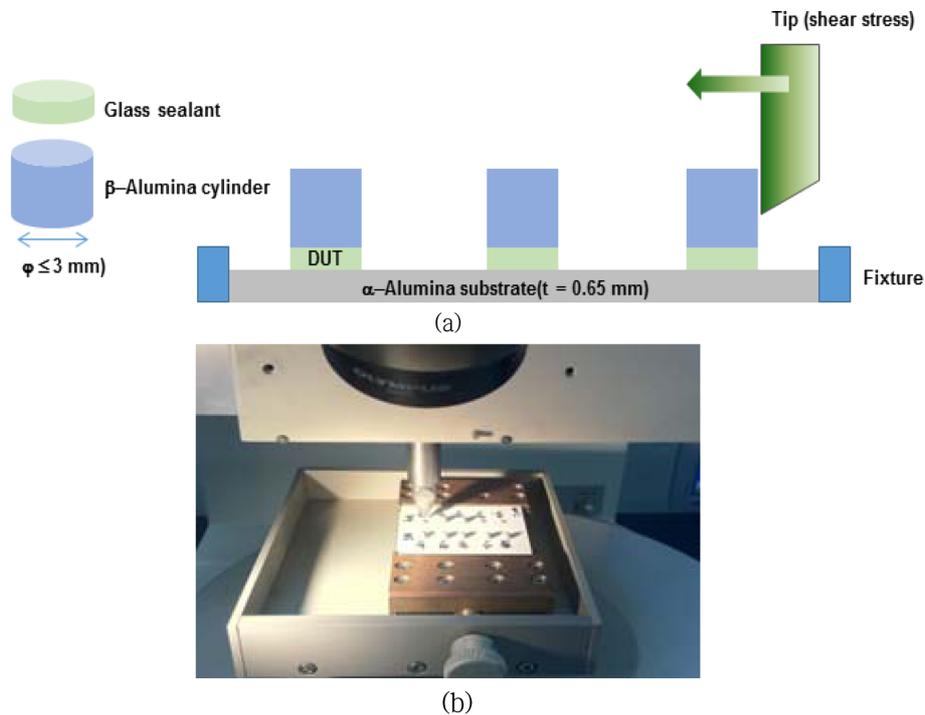


Fig. 6. (a) Schematic illustration and (b) measuring scene of the adhesion strength of ceramic-ceramic joining using Dage bond tester.

Table 3. Adhesion strength of glass sealants evaluated by Dage bond tester

Sample ID	G5-1	G5-2	G5-3	G5-4	G5-5	Average
Adhesion area ($\times 10^{-2} \text{ cm}^2$)	6.88	6.69	6.56	6.97	6.83	6.79
Fracture force (N)	49.97	49.57	50.05	49.68	48.61	49.58
Adhesion strength (MPa)	7.25	7.40	7.62	7.12	7.11	7.30

체연료전지셀(solid oxide fuel cell) 패키지에 대한 연구에서 A. Selcuk 등¹³⁾이 측정 한 glass-to-metal joint에서의 assymetric lap joint compression test 에 의한 전단응력값인 7.3 ± 1.7 MPa와, S. Song 등¹⁵⁾의 NaS 전지용 실링글라스에 대한 연구에서 만능시험기(universal test machine: UTM)로 측정 한 인장응력 시험값인 $3.5 \sim 10$ MPa($\pm 10\%$)의 접합력과 거의 유사한 범위의 결과를 얻은 것으로 보인다. 이로써 세라믹-세라믹 컴포넌트 간의 접합력 평가에 있어서 종래의 만능시험기를 이용한 인장응력 뿐 아니라 bond tester(Dage)에 의한 전단응력에 의한 접합력 시험방법도 유용할 것으로 사료된다. 다만, 이 bond tester의 경우 일반적인 만능시험기 보다 시험 가능한 최대 응력범위가 낮으므로 시료의 단면이 아주 작은 경우에만 적용 가능한 한계점은 있으며, 향후 좀 더 큰 범위의 전단응력 시험 키트가 보급되면 그 효용성은 커질 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 NaS 전지의 셀 제조에 있어서 베타-알루미나 전해질 튜브와 알파-알루미나 캡간의 세라믹-세라믹 컴포넌트 접합을 위한 실링 글라스를 개발함에 있어서 alumino borosilicate 기반의 유리조성에서 알루미나와 비스무스 산화물의 조합비에 따른 물리적 특성과 접합특성을 살펴보았다. Alumino borosilicate 기반의 유리조성에서 알루미나의 함량이 줄고 상대적으로 비스무스 산화물의 함량이 증가함에 따라 열팽창계수가 $3.44 \sim 5.08$ ppm/ $^{\circ}$ C로 선형적으로 증가하였고, 이들 글라스 분말로 제조한 실링 글라스 페이스트를 알루미나 기판에 코팅하여 850° C에서 열처리 한 시료의 표면거칠기는 비스무스 산화물의 함량의 증가에 따라 감소 즉 표면이 평활해 짐을 알 수 있었다. 상용 제품의 열팽창계수 값에 근접한 G5 조성의 실링글라스에 대한 알파 및 베타알루미나 접합면의 접합력을 Dage bond tester를 사용한 전단파괴 응력값을 측정하여 분석한 결과, 종래의 만능시험기에 의한 인장응력 시험법에 의한 접합력 값과 거의 유사한 결과를 보였다. 이 결과로써 세라믹-세라믹간의 소면적 접합시료의 경우 Dage bond tester에 의한 접합력 측정방법이 활용될 수도 있을 가능성을 시사한다고 보여진다.

Acknowledgements

This work was supported by the “Development of Ceramic Core Materials for NaS Base Rechargeable Battery for Energy Storage System” funded from KETEP R&D program under the MOCIE (Grant No. 2011201010004B).

References

1. Y. T. Kim, “Battery Technology for Clean Energy Policy of Korea”, Asia Clean Energy Forum 2018 (2018).
2. NGK Insulators Inc., “NAS ENERGY STORAGE SYSTEM: Sodium Sulfur Battery”, (2019) from www.ngk.co.jp/nas.
3. Z. Wen, J. Cao, Z. Gu, X. Xu, F. Zhang, and Z. Lin, “Research on Sodium Sulfur Battery for Energy Storage”, Solid State Ion., 179, 1697 (2008).
4. J. L. Sullivan, and L. Gaines, “A Review of Battery Life-Cycle Analysis: State of Knowledge and Critical Needs”, by Center for Transportation Research Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, ANL/ESD/10-7 (2010).
5. S. H. Kee, Z. F. Xu, J. P. Jung, and W. J. Kim, “Joining of Ceramic and Metal using Active Metal Brazing”, J. Microelectron. Packag. Soc., 18(3), 1 (2011).
6. S. Song, Z. Wen, Q. Zhang, and Y. Liu, “A Novel Bi-doped Borosilicate Glass as Sealant for Sodium Sulfur Battery. Part 1. Thermophysical Characteristics and Structure”, J. Power Sources, 195, 384 (2010).
7. G. Zhang, Z. Wen, X. Wu, and G. Ma, “Improvement of Sealing Performance for NaS Battery by Surface Modification Process”, Solid State Ionics: Ionics for Sustainable World, 152, (2013).
8. P. Prigent, M. L. Boucheto, and J. Poirier, “Andalucite: An Amazing Refractory Raw Materials with Excellent Corrosion Resistance to Sodium Vapors”, Ceram. Int., 37, 2287 (2011).
9. L. C. Klein, and C. J. Brinker, “Behavior of Silicate and Borosilicate Glasses in Contact with Metallic Sodium. II. Borosilicate Glasses”, Phys. Chem. Glasses, 22, 22 (1981).
10. Y. B. Son, S. W. Kim, and M. H. Kim, “Study on Filler Effects of High temperature Glass Sealant”, J. Microelectron. Packag. Soc., 6(1), 51 (1999).
11. J. Konig, R. R. Petersen, and Y. Yue, “Influence of the Glass Particle Size on the Foaming Process and Physical Characteristics of Foam Glasses”, J. Non-cryst. Solids., 447, 190 (2016).
12. C. H. Kim, Y. J. Heo, and H. T. Kim, “Porosity control of the sealing glass for joining alumina components in a NaS battery cell packaging”, J. Microelectron. Packag. Soc., 23(4), 57 (2016).
13. A. Selcuk, and A. Atkinson, “Measurement of Mechanical Strength of Glass-to-Metal Joints”, Fuel Cells, 15(4), 595 (2015).
14. Schott AG, “Sodium resistant sealing glasses”, from www.schott.com/epackaging
15. S. Song, Z. Wen, and Y. Liu, “Development and characterization of Bi₂O₃-containing glass-ceramic sealants for sodium sulfur battery”, J. Non-cryst. Solids., 375, 25 (2013).
16. Accuratus, “Aluminum Oxide, Al₂O₃ Ceramic Properties”, (2013) from <https://accuratus.com/alumox.html>
17. J. Garche, C. K. Dyer, P. T. Moseley, Z. Ogumi, D. A. J. Rand, and B. Scrosati, “Encyclopedia of Electrochemical Power Sources”, Eds., pp.202, Newnes, Elsevier, Amsterdam (2013).