

대용량 전력 저장용 NaS 전지 기술

글 _ 황진하, 배승묵, 김민경
홍익대학교 신소재공학과

1. 서론

최근의 지속적인 유가 상승, 탄소 원료의 사용에 따른 지구 온난화의 환경 문제, 원자력 발전소의 핵 안전성과 관련된 이슈들로 인해, 안정적인 대용량 전력 공급원의 확보 및 유지가 과거 어느 때보다 그 중요성이 높아지고 있다. 이와 같은 에너지/자원/환경적 난제를 해결할 수 있는 대안 기술 중의 하나로 제안될 수 있는 분야가 대용

량 전력 저장 분야이다. 그린 에너지의 산업화와 온실 가스 감축에 대한 국제적인 이슈가 급속히 진행됨에 따라 전력 에너지 저장은 미래 성장 동력으로서의 그 중요성이 점차 부각되고 있다. 특히 중대형 전력 에너지 시장은 2015년 60조원, 2030년에는 348조로 성장될 것으로 예측되나, 이에 대한 국내의 연구개발은 매우 초기단계라 할 수 있다. 본 투고에서는 Na-S (Sodium-Sulfur) 전지의, 기술 개요 및 기본 기술 이해와 핵심 소재분야인 베타 알

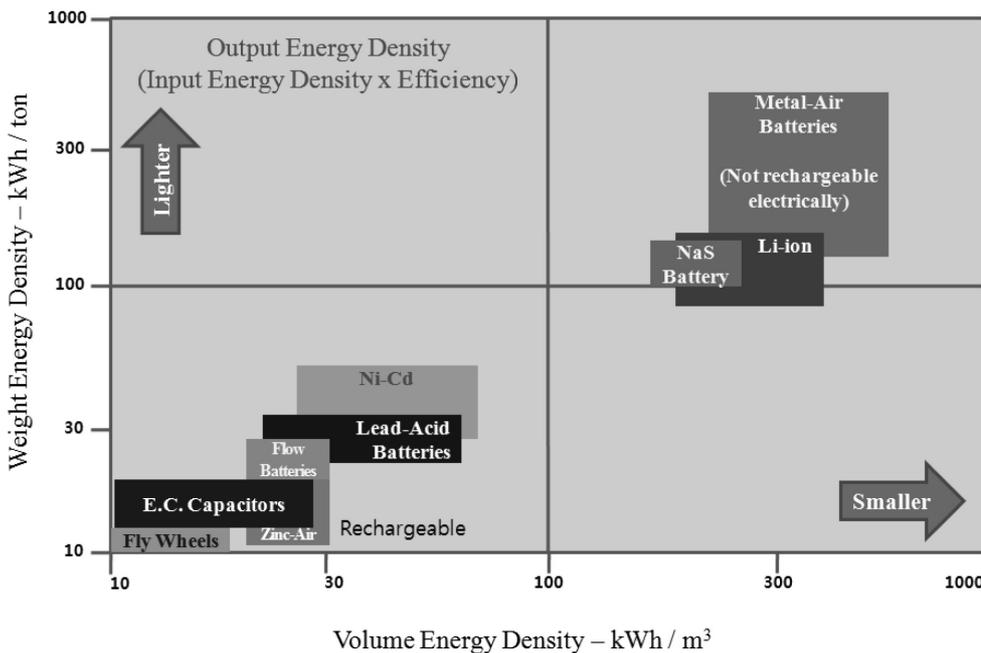


Fig. 1. 대용량 전력 저장 기술의 부피와 무게에 따른 출력 비교

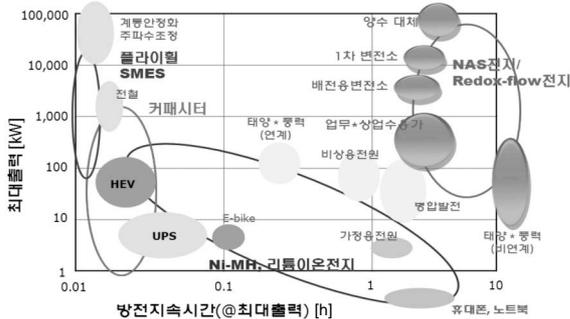


Fig. 2. 이차전지의 종류에 따른 방전시간과 최대출력 비교
 * HEV : Hybrid electric vehicle, 하이브리드자동차
 (전력시스템에서 전력저장의 최신 기술, 2006, 시에무시출판).¹⁾

루미나 전해질과 관련된 기술 동향과 이슈들에 대해 간단히 기술하여 대용량 전력 저장의 한 분야에 대한 이해를 돕고자 하였다.

Na-S는 Fig. 1에서 나타내고 있는 것과 같이, 부피와 무게의 측면에서 고려할 때, 전지는 부피가 가벼우면서도 에너지밀도가 매우 높은 전력 저장 기술이다. 전기화학적 Capacitor, 납축전지, 플라이휠, 플로우 전지 등에 비해 부피와 무게를 고려할 경우, 월등히 우수한 특성을 갖고 있는 것으로 조사되었다. 현재 널리 쓰이고 있는 리튬 이차전지나 니켈 수조 전지는 한 시간 내외의 높은 출력을 요구하지 않는 분야에 적용될 수 있으나, 장시간의 고출력을 요구하는 분야에서는 부적합하다. 이에 반해 Na-S 전지는 장시간의 대용량의 분야에 적용이 가능한 기술로써 Fig. 2를 통해 확인할 수 있다.¹⁾ 대형 전력 저장용 신행 전지로 고려된 전지로는 Na-S, Zn-Cl₂, Zn-Br₂, Redox-flow 등이 고려되었다. 특히 이중 ZnCl₂는 Cl₂와 Br₂가 양극에서 사용되는데 유독 가스로서 전지 충방전 공정에서의 가스 누출 문제와 음극의 아연 전극 수명 문제가 해결되지 않아 상품화가 포기되었으며, Redox-flow 전지는 Na-S 전지에서 구현할 수 있는 에너지 밀도의 1/5정도 수준과 신뢰성 및 경제성 측면의 약점이 부각되어 활발한 연구가 진행되지 않고 있는 상황이다. 특히 Table 1은 Na-S 전지와 경쟁하는 대표적인 전지 분야들과의 요약된 기술 비교표로써 납축전지, Supercapacitor, 리튬전지, Na-S 전지, Redox-Flow 전지 분야를 중심으

Table 1. 전지의 종류에 따른 기술 비교

분류	장점	단점	비고
Lead acid battery	○ 저가격 ○ 모동화 용이 ○ 높은 기술 성숙도	○ 낮은 에너지밀도 ○ 짧은 수명 ○ 향후 납사용 규제	○ 기술의 안정 ○ 가장 널리 사용되고 있음
Supercapacitor	○ 높은 출력밀도 ○ 반영구적 수명	○ 낮은 에너지밀도 ○ 고가격	○ 단시간용 적합
Lithium battery	○ 높은 에너지밀도 ○ 고전압(3.7V-평균)	○ 대용량화 한계 ○ 고가격	○ 보호회로 필요 ○ 안전성 문제점
NaS battery	○ 높은 출력밀도 ○ 높은 효율	○ 고온작동형(>300°C) ○ 고가격 ○ 부가장치 필요	○ 운전 단가 높음 ○ 대용량 : 모동화
Redox flow battery	○ 대형화 유리 ○ 상온 작동형 ○ 초기비용 낮음	○ 낮은 에너지밀도	○ 용량제한 없음 ○ 용출력의 독립적 설계가능 ○ 15MW 보급

로 장, 단점을 설명하고 있다. 낮은 에너지밀도와 저가의 납축전지, 높은 에너지 밀도를 갖지만 대용량이 어려운 리튬전지, 높은 출력밀도를 가지나 짧은 운전시간의 Supercapacitor, 및 상온 작동 및 대형화가 가능하나 에너지밀도가 낮은 Redox-Flow 전지 등이 Na-S 전지와 시장 창출을 위해 경쟁하고 있는 상황이다. Table 1에서 정리된 바와 같이, 전력 저장의 에너지 밀도, 대용량, 환경친화성, 및 기존 전력 시스템과의 조화 등의 장점을 고려한다면, Na의 높은 반응성의 액체, 황 관련 안정성 이슈의 단점을 극복할 수 있는 것으로 판단된다.²⁾

2. Na-S 전지의 기술 개요 및 응용

2.1. Na-S의 필요성

Na-S 전지는 양극으로 황 (Sulfur)를 음극으로 나트륨을 사용하며, 베타 알루미늄을 Na 이온 전도성 전해질로 양극과 음극사이를 분리시키며, Na 이온을 충방전에 따라 움직이면서 작동되는 이차 전지이다. 양극 및 음극 모두가 액체 상태에서 작동하는 관계로 hermetically sealed 된 전지 시스템도 또한 큰 특징의 하나이다. Na-S 전지의 개념은 1966년 Ford Motor사에 의해 제안이 되었으며, 1973년 500kg의 NaS 전지의 장치를 장착하여 200km 까지 주행한 실적을 보고하였다. 일본의 경우, 도쿄 전력이 히타치 제작소와 공동으로 1983년부터 향후의 피크 전력 증가에 대비한 전력 저장 장치의 개발 필요성을 배경으로 NaS 전지 개발에 참여하게 되었다. 특히 일본의 NGK사와 도쿄전력의 대용량 전력 저장 기술의 공동 기

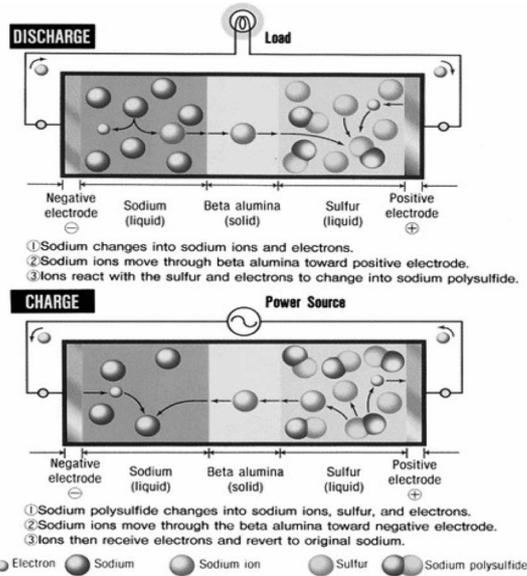


Fig. 3. Na-S 전지의 방전과 충전에 따른 반응 모시도. (a) 방전 시의 전하이동 과정 & (b) 충전시의 전하이동 과정.

술 개발은 최근에 큰 결실을 맺어, 전 세계에 걸쳐 대용량 전력 저장 분야에 있어, 독점적인 기술 경쟁력을 갖고 시장 지배력을 가격과 전략적 측면에서, 후발 혹은 잠정적인 기술 개발 경쟁국을 견제하면서 확대하고 있는 상황이다. 아울러 중국 과학원 세라믹 연구소 (Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, SIC-CAS)도 30 Ah급과 650 Ah급의 단전지 기술을 보이는 등, 일본의 NGK사와 더불어 대용량 연구에 이어 상당한 수준의 기술 발전을 확보한 상태인 것으로 알려져 있다.³⁾

2.2. Na-S 전지의 원리

NaS 전지의 기본 원리는 1967년 Kummer와 Weber에 의해 처음으로 개발되었으며, 그 시스템은 Fig. 2와 같이 300°C 부근의 온도에서, 용융 나트륨 음극과 용융 황 양극으로 그리고 이를 분리한 Na 이온 전도성 고체 전해질로 이루어져 있다.⁴⁾ 지금까지 실용화된 이론에너지밀도가 769Wh/kg으로 가장 높다. 방전은 다음과 같이 3단계로 나뉘어질 수 있다. Na는 Na⁺ 이온과 전자로 분해되고 Na⁺ 이온은 베타 알루미나를 통해 양극(positive electrode)으로 이동한다. 최종적으로 Na⁺ 이온 및 S와 전자와 결합

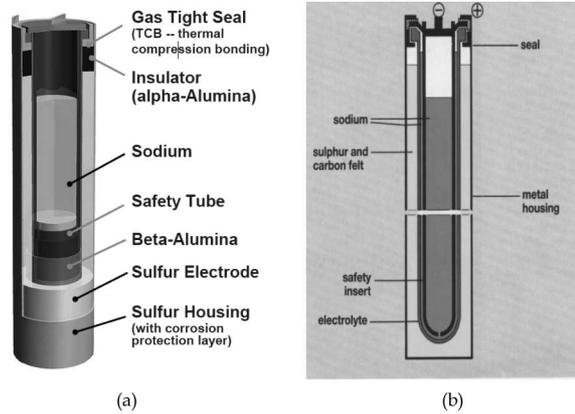


Fig. 4. 대용량 저자용 Na-S 전지용 단전지 구조의 개략도 (a) 차원 개략도 (b)단면도

하여 나트륨과 황의 화합물 (sodium polysulfide)를 형성하게 된다. 충전(Charging)은 이와 반대 방향으로 진행된다. 일차적으로 Sodium Polysulfide가 Na⁺ 이온, S, 전자로 분해된다. 이후 Na⁺ 이온 베타 알루미나를 통해 음극으로 이동하게 되며 최종적으로 Na⁺ 이온은 전자를 받아들여 Na 원자로 변하는 과정을 통해 진행된다. 그 충전 및 방전에 대한 반응을 대략적인 개략도를 Fig. 3에 정리하였다. 아울러 위와 같이 진행되는 반응은 아래와 같이 음극 및 양극에서 진행되는 전기화학 반응으로 요약될 수 있다.

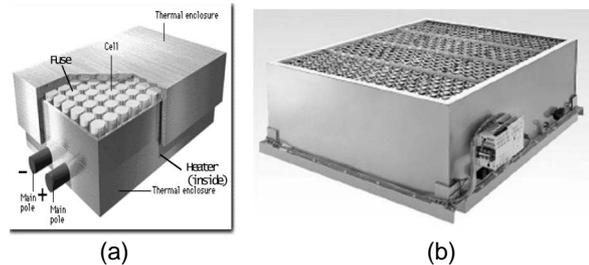
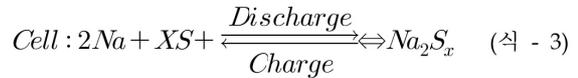
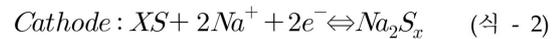
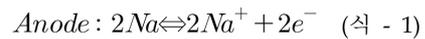


Fig. 5. 모듈화된 Na-S 전지 (a) 개략도 및 (b) 실제 제품 모습.

현재 보고된 Na-S 단전지 구조는 원통형이며, 순차적으로 Na, 베타 알루미늄 전해질, 및 황의 순서로 구성되어 있다. 베타 알루미늄 내부에는 Al 재료로 만들어진 금속 Container가 있어 단전지 운전 시 발생할 수 있는 비정상적인 전류나 전해질의 파손 시에 발생할 수 있는 온도 상승을 억제하도록 설계되어 있다. 아울러 단전지 상층 부분은 금속 Na과 황의 단전지 외부 환경과의 차단을 위해 Thermal Compression Bonding을 통해 Gas-Tight Sealing이 형성되어 있다. 1983년의 단전지의 수준은 0.2 kWh급이었으나, 최근의 단전지는 1.2 kWh급으로 성능이 크게 개선되어 있는 상황이다. 최종적인 모듈은 Fig. 4의 단전지를 단열 용기 내부에 수직 방향으로 집합화하여 사용된다. 그 모듈화하여 상업적으로 제공되는 제품은 Fig. 5에 보여지고 있다.⁵⁾

2.3. NaS 전지의 응용

현재 일본의 NGK사는 MW급의 대용량 저장, 납전지의 1/3면적의 설비 면적, 15년간 장수명의 확보, 공해물질 배출가스가 없다는 점, 무진동, 저노이즈 등의 장점을 부각시키면서 일본과 미국 뿐만 아니라 전 세계 지역을 상대로 수출을 확대하고 있는 상황이다. NaS 전지의 주요 특징을 구체적으로 요약하면 다음과 같다.

i) Na-S 전지의 핵심전해질이 고체 상태이므로, 타전지의 액체기반 전지에 비해, 고효율, 높은 품질의 전력 생산이 가능하며, 에너지 밀도가 납축전지의 3배 이상 커서 전용 면적을 크게 절약할 수 있으며, 구성 소재의 가격이 저렴하다. 아울러 기술적인 성숙도가 높고, 도시 부근에 분산 배치가 가능하다.

ii) 고효율의 충전방전이 가능하고 자체 방전이 없기 때문에 효율적으로 전기를 저장할 수 있다.

iii) Na-S 전지는 300°C 이상의 고온에서 사용해야 관계로, 공기에 노출 시 순간적인 산화반응이 발생하므로, 이에 대비한 밀봉 구조의 클린형 이차 전지이다.

iv) Na-S 전지는 가역반응의 특징을 갖고 있어, 활성 물질이 소모되는 반응이 없으므로 이론적으로는 수명이 무한할 수 있으며, 별도의 정비가 필요하지 않을 만큼 장시간 신뢰성이 우수한 특성을 가진 환경오염을 최소화한

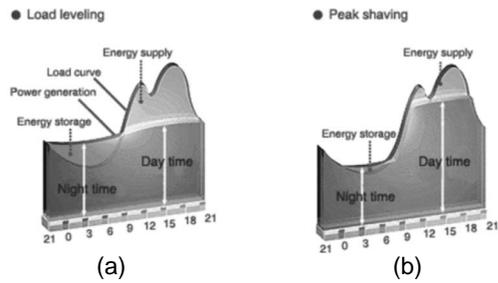


Fig. 6. Na-S의 응용 분야 (a) 부하 평준화와 (b) 첨부 부하 평준화.

환경친화성 전력 저장 기술이다.

v) 주재료인 전해질 및 전극의 원재료가 자연계에 대량으로 존재하여, 자원 고갈의 우려가 없는 고기능성 전지시스템이다.

vi) Na-S전지는 기존 발전 시스템과의 보완적 성격이 강해, 송전/변전/배전 설비 투자 및 단기간 건설이 매우 용이하며, 펌프와 밸브 같은 공정용 소모성 부품이 거의 필요가 없는 보수가 용이한 시스템이다. 부품 및 발전시스템의 전력 생산 비용구조를 경제적으로 발전시킬 경우, 발전단가를 지속적으로 낮출 수 있는 전지이다.

vii) 불규칙한 충전방전에도 성능 저하가 거의 없으며, 환경 변화에 크게 영향을 받지 않는다.

이와 같은 장점을 기반으로 기존의 이차전지가 제안하지 못했던 신규 응용 분야를 다음과 같이 네 가지 핵심 분야를 제시하고 있다.

i) 풍력 및 태양전지와 하이브리드화 (풍력 및 태양전지와 같은 신재생 분산형 전원의 계통 연계를 통한 품질 보상)

풍력과 태양전지와 같은 신재생 그린 에너지의 확대는 자체 출력과 관련된 기술적인 한계점을 갖고 있다. 즉 시간에 따른 일정한 전력 공급이 어렵다는 점으로, 이와 같은 전력 생산 시스템의 불연속성을 Na-S 전지와 하이브리드(Hybrid)화를 통해 그린에너지원의 일정한 전력 공급을 가능하게 된다.

ii) 부하 평준화 (Load Leveling)

대용량의 Na-S 전지는 주야간의 전력 사용량과 전력 공급량의 수급 불균형에 대한 대안을 제시할 수 있다. 즉 부하 평준화를 통한 전력 제어, 즉 주간의 전력 부족시의

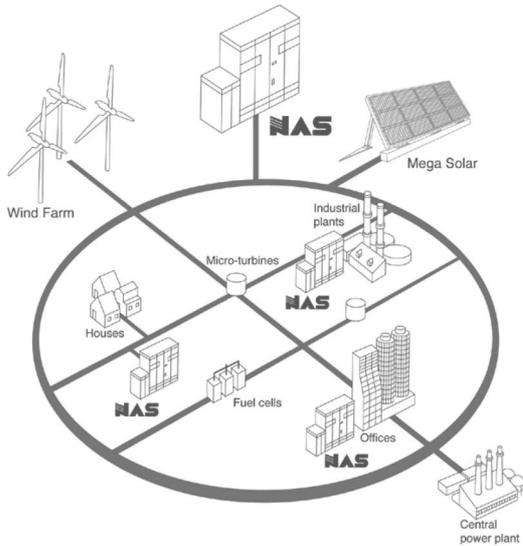


Fig. 7. NaS의 응용 분야에 대한 종합적인 개략도. <http://www.ngk.co.jp/english/products/power/nas/application/smart-grid.html>.

방전을 통한 전력공급, 야간시의 생산전력의 잉여분의 저장을 통한 주야간의 전력 공급의 안정성 확보기능이다.

iii) 첨두부하 평준화(Peak shaving)

수요전력의 급격한 변동에 있어 Na-S 전지의 전력 저장 기술을 통해 전력을 공급함으로써, 잉여발전설비 투자를 줄일 수 있다.

iv) 비상전원

Na-S 전지를 정전과 같은 응급 상황에 대비하기 위한 UPS 혹은 EPS 개념으로써, 정전에 대비한 비상전원으

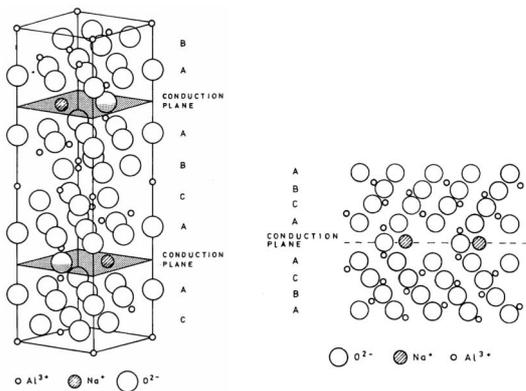


Fig. 8. α-알루미나 unit cell과 Na 이온 전도층⁷⁾.

로 활용할 수 있다.

Fig. 6은 대용량 전력용 Na-S 전지의 부하 평준화와 첨두부하 평준화의 위의 설명을 시간대로 표현하여 구현한 모식도이다. 아울러 비상 전원 및 풍력, 연료전지, 태양 전지와 하이브리드화를 포함한 마이크로 그리드 전력 시스템에 대한 Na-S 전지 응용 방안을 일본 NGK사에서 Fig. 7과 같이 제안하였다.⁶⁾

3. Na-S 전지용 Na 이온 전도성 세라믹 소재

Na-S 전지가 구현 가능했던 이유는 Weber와 Kummer (1967) 등이 발견한 Na 이온의 이동이 가능한 베타 알루미나에 기인한다.⁴⁾ 베타 알루미나는 분리막과 전해질로 작용하면서 동시에 상대적으로 높은 고온 분위기에서 견제적인 내구성을 책임지는 소재이다. Na-S 전지의 핵심은 Na₂O와 Al₂O₃을 핵심 성분으로 한 베타 알루미나의 제작으로, 얇은 세라믹 튜브의 성형 공정, 최종 소결체의 치수 제어, 및 Na₂O의 휘발문제 해결 및 치밀 소결체의 제작 등이 핵심사항이다. 보통 베타 알루미나는 Na₂O · 11Al₂O₃ 조성의 β-알루미나와 Na₂O · 5Al₂O₃~3Na₂O · 16Al₂O₃ 조성의 β'-알루미나를 통칭하며, 전도성은 β"-

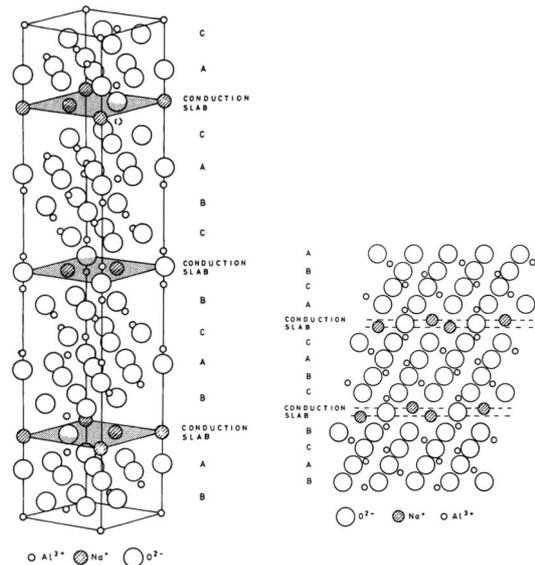


Fig. 9. β'-알루미나 unit cell과 Na 이온 전도층⁷⁾.

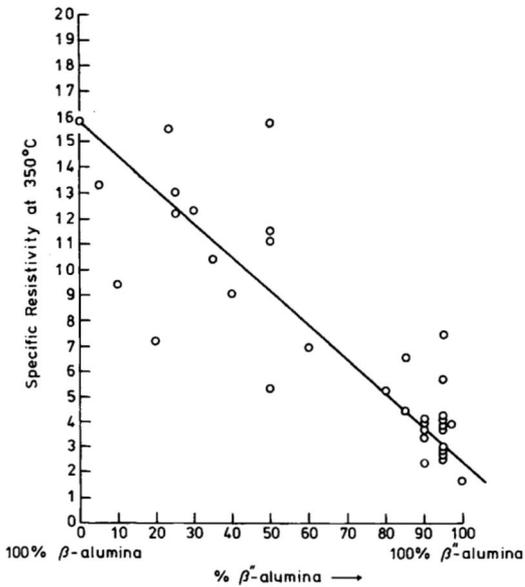


Fig. 10. 350°C에서의 β 알루미나 분율에 따른 Na 이온 전도 저항값의 변화⁷⁾.

알루미나와 β-알루미나가 각각 16 ohm · cm, 2.5 ohm · cm로 β 알루미나의 전기적 특성이 β-알루미나에 비해 대략 6 배 정도 우수하다. 각각의 결정구조는 아래의 Figs. 8과 9에 정리되어 있다. 결정구조와 관련된 중요사항을 Table 2에 정리하여 제시하였다. 베타 알루미나가 가지는 이방성 결정구조에 보는 바와 같이 전기전도도에서도 이방성이 예상되며, 아울러 β-알루미나의 결정구조의 전도대(즉 Spinel Block사이)에서 높은 Na 이온의 농도가 존재하는 특성으로 인해 위의 Na⁺ 이온 전도의 특성의 차이가 발생하는 것으로 알려져 있다. 아울러 β-알루미나와 β-알루미나의 상대적인 β 양의 제어가 전기전도 특성에 매우 중요한 것을 Fig. 10에서 보는 바와 같이 발견할 수 있다. 의 양이 많을수록 전기전도도가 커짐을 실험적으로 확인하였다. 베타 알루미나는 Metastable한 열역

Table 2. 전해질 소재의 특성 비교

Phase	β	α
Space lattice	Hexagonal	Rhombohedral
Space group	Pb ₃ /mmc	R3m
Spinel block	two-fold screw c : 11.23 Å	three-fold screw c : 11.23 Å
a-axis	5.594 Å	5.614 Å
c-axis	22.53 Å	33.85 Å
Ideal formula	N ₂ O · 11Al ₂ O ₃ (NaAl ₁₁ O ₁₇)	N ₂ O · 5.33Al ₂ O ₃ (Na ₂ Al ₁₁ O _{17.6})
Na/Al ratio	1/11~1/5	1/6~1/9

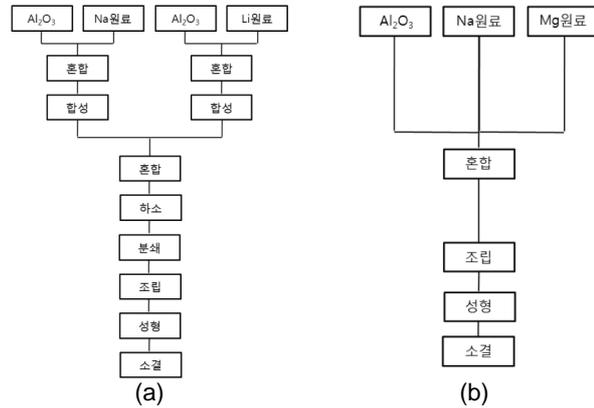


Fig. 11. 베타알루미나의 제작 공정 비교 (a) Li₂O 안정화제를 기반으로 한 전해질 공정 (b) MgO 안정화제를 기반으로 한 전해질 공정.

학적 특성을 갖고 있어, 이와 같은 상대적인 열역학적인 불안정성을 해소하고, 전해질 상을 안정적으로 유지시키는 역할이 매우 중요하다. 이와 같은 안정화제로 Al의 이온 반경 (0.97 Å)과 도펀트의 이온 반경 및 이온상태의 안정성을 고려하여, Li₂O와 MgO가 가장 널리 상안정화제로 쓰인다.⁷⁾ 현재까지 보고된 조성으로는 MgO계열의 경우에는 8wt% Na₂O, 2wt% MgO, 90 wt% Al₂O₃가. Li₂O의 경우에는 8.9wt% Na₂O, 0.7wt% Li₂O, 91.4 wt% Al₂O₃등이 제시되어 있다.⁸⁻¹⁰⁾ 아울러 결정구조의 이방성 즉, Hexagonal 구조와 Rhombohedral 구조에 기인하여, 미세구조의 이방성이 매우 높은 소재로 소결체 제작에 있어 어려움이 예상되는 고체전해질의 특성을 갖고 있다. 특히 베타 알루미나는 공기 중에 노출 시 수분을 흡수하여 저항이 올라가는 문제점이 발생한다. 특히 전도대에 있는 양이온 하나에 물분자가 하나씩 흡착됨으로써, C축 방향의 결정 격자를 변화시킬 수 있다. 이때의 수분 흡착 속도는 수 시간의 단기간 및 수일에 걸친 장기간에 걸쳐 발생할 수 있음이 보고되어 있다.¹¹⁾ 아울러 수분 제거를 위한 저온 열처리 시 베타 알루미나 내에 존재했던 이산화탄소가 Na₂CO₃ 혹은 NaHCO₃상의 석출을 유발할 수 있다.

최종 소결체로 제작된 전해질인 베타 알루미나에 대한 요구 사양은 전통적인 세라믹 재료에 요구되는 사양보다도 훨씬 더 까다롭다. 즉 전해질 제조 공정은 저가의 생

산 공정이면서도 높은 생산 수율과 정밀한 치수 제어를 확보해야 하는 어려움이 있다. 따라서 다음과 같은 다섯 가지 요인에 대한 점검이 면밀하게 진행되어야 한다. i) 화학 조성의 정밀한 제어와 출발물질의 순도 조절, ii) 구성 재료들의 균질한 혼합, iii) 성형 공정의 세밀한 진행, iv) 소결 공정의 정밀 제어, v) 적절한 품질 관리 기법의 개발 등이 확보되어야 한다. 보통 베타 알루미나 제조 공정은 크게 안정화제로 Li_2O 계열소재와 MgO 계열 소재를 사용하는 두가지로 크게 나뉜다.⁶⁾ 전자는 1977년 미국 포드사가 제안한 Zeta Process이고 후자는 NGK가 채택하여 사용하고 있는 MgO 계열이다. 제타 프로세스가 특히 불안정한 베타 알루미나의 재현성을 높인 방법으로 널리 사용되고 되었으나, 유기 용매를 사용하고 공정이 복잡한 점이 단점으로 지적되었다. 이에 수용액으로 공정이 가능한 MgO 계열이 안정화제로 포함된 공정이 Na-S 전지의 상용화에 성공한 NGK사에 보고되었다. Fig. 11(a)는 안정화제로 Li_2O 를 사용하는 제타 프로세스(zeta process)에 대한 공정 개략도이고 Fig. 11(b)는 MgO 를 사용한 NGK사의 공정 모식도이다. 가장 큰 차이점은 하소 공정을 생략한 직접 소결 방식의 장점을 가지고 있다. 가장 핵심적인 부분은 Na의 적절한 제어로 이에 대한 수용액 조절이 핵심으로 여겨지고 있다. 본 NaS-용 전해질 튜브는 대형이면서 두께가 얇은 성형 방법이 요구된다. 이와 같은 요구 조건을 만족하는 방법으로 성형 공정으로는 Wet-Bag CIP(WPCIP)과 Dry-Bag CIP(Cold Isostatic Pressing) 이 채용되어 사용되고 있다. 하소공정이 생략된 경우에는 가스 성분에 의한 중량 감소와 반응 물질과 반응 생성물의 밀도차로 인한 체적변화로 기인한 문제가 발생하여 소결공정의 승온 단계에서 균열이 발생할 가능성이 높아 이에 대한 세심한 주의가 특히 필요하다. 소결 공정은 크게 전기로를 이용한 전통적인 소결 방식과 더불어 플라즈마 소결, Microwave 소결 등이 Na_2O 의 휘발 문제를 최소화하기 위한 소결 공정으로 보고되었다.^{12,13)} Na-S 전지의 핵심 소재인 베타 알루미나는 Na_2O 휘발성 이슈, 1650°C 이상의 고온 소결, β "상의 최적화, 이방성 미세구조의 치밀화 등 많은 기술적인 장벽들이 존재한다. 역으로 이와 같은 기술적 이슈를 극복한 재료 및 공정 개

발은 Na-S 전지의 핵심 소재 확보라는 장점도 갖고 있는 바, 전자세라믹스 관련 다양한 분야의 전문가들의 통합적 노력이 절실하다고 판단된다.

4. 결론

대용량 전력 저장 기술 분야의 향후 발전은 현재의 탄소 연료 기반의 에너지 공급 방식 및 원유 가격의 한계 상황과 지구 온난화와 같은 지구 환경 문제의 심각성에 크게 영향을 받을 것으로 예상된다. 아울러 현재의 세계적인 경제 금융 위기의 여파로 인한, 신재생에너지관련 투자가 감소된 상황인 태양전지, 연료전지, 및 풍력 에너지 산업 상황에 의해서도 영향을 받고 있다. 신재생 에너지의 발전과 Na-S 전지와 관련된 기술 발전이 상호 연관되어 있다는 점이 주목할 만한 사항이다. 멀지 않은 장래에 대용량 전력 저장 기술에 대한 관심이 다시 부각되어, 각광을 받게 될 것으로 예상되며, 2011년 대규모 정전 사태와 같은 전력 공급의 응급 현상에 대한 대비 전력 차원의 차세대 마이크로 Grid를 위한 Na-S 전지의 응용 가능성은 매우 강조될 것으로 예상된다. Na-S 전지 구성에 다양한 세라믹 및 금속 소재로 구성되어 있으나, 고출력 단전지 기능 확보 측면에서 가장 중요한 핵심 소재는 높은 Na 이온 전도성을 갖는 전해질인 베타알루미나이다. 베타알루미나가 우수한 이차전지 특성을 갖고 있음에도 불구하고, 분말, 성형, 및 소결 공정의 높은 난이도는 Na-S 전지의 기술 개발의 장벽으로 판단된다. 이에, 고체 전해질인 베타알루미나 기술 확보를 위한 기초 소재 확보와 성형 및 소결 공정을 포함한 제조 공정의 확보가 Na-S 전지 대용량 전력 저장 기술 개발의 성패를 좌우할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 전력시스템에서 전력저장의 최신 기술, 시에무시출판, 2006.
2. 기획특집 : 에너지 저장 및 전환 ; 대용량 에너지저장 전지, *공업화학 전망*, 13 [2] (2010).
3. Z. Wen, J. Cao, Z. Gu, X. Xu, F. Zhang, and Z. Lin, "Research on Sodium Sulfur Battery for Energy

- Storage," *Solid State Ionics*, **179** 1697-1701 (2008).
4. J. T. Kummer and N. Weber, "Sodium-Sulfur Secondary Battery," *Soc. Automat. Eng. Trans. J.*, **76** 1003-1007 (1968).
 5. T. Takakoshi, Recent Sodium Sulfur Battery Applications in Japan, Presented at the ESA 2001 Annual Meeting in Chattanooga, Tennessee, April 26~27 (2001).
 6. <http://www.ngk.co.jp/english/products/power/nas/application/smartgrid.html>
 7. J.L. Sudworth and A.R. Tilley, "The Sodium Sulfur Battery", *Chapman and Hall Ltd.*, 23-24 (1985).
 8. Tan, S. R. and May, G. *J. Sci. Ceram.*, **9** 103 (1977).
 9. Tan, S. R. and may, G. J. "The Dependence of the Fracture Stress of Beta-alumina on Microstructural Defects" *J. Mater. Sci.*, **12** 1058-1061 (1977).
 10. W.G. Budgen and J.H. Duncan, *Sci. Ceram.*, **9** 348 (1977).
 11. Flor, G., Marini A., Masarotti, V. and Villa, M. "Reactivity of β -aluminas with Water" *Solid Stae Ionics*, **2** 195 (1981).
 12. M. Henrichsen, J. Hwang, V. P. Dravid, and D. Lynn Johnson, "Ultrarapid Phase Conversion in β' -Alumina Tubes," *J. Am. Ceram. Soc.*, **83** [11] 2861-2862 (2000).
 13. R. Subasri, T. Mathews, O. M. Sreedharan, and V. S. Raghunathan, "Microwave Processing of Sodium Beta alumina Solid State Ionics," **158** 199-204 (2003).