

논문 17-6-7

Ethylene Oxide기를 갖는 Acrylate계 Gel Polymer Electrolyte의 전기화학적 특성에 관한 연구

A Study on Electrochemical Properties of Acrylate-based Gel Polymer Electrolyte with Ethylene Oxide Group

김현수^{1,a}, 신정환¹, 문성인¹, 오대희²
(Hyun-Soo Kim^{1,a}, Jung-Han Shin¹, Seong-In Moon¹, and Dae-Hee Oh²)

Abstract

The gel polymer electrolyte was prepared by radical polymerization using tetra(ethylene glycol) diacrylate and tri(ethylene glycol) dimethacrylate to investigate affect of the number of ethylene oxide. The gel polymer electrolyte showed good electrochemical stability up to 4.5 V vs. Li/Li⁺ and high ionic conductivity at various temperatures. The lithium-ion polymer batteries with the gel polymer electrolyte, tetra(ethylene glycol) diacrylate- and tri(ethylene glycol) dimethacrylate-based, also represented good electrochemical performances such as rate capability, low-temperature performances and cycleability. However, the cell with tri(ethylene glycol) dimethacrylate, which has three ethylene oxide, showed better electrochemical performance.

Key Words : Monomer, ionic conductivity, Gel polymer electrolyte, TEGDMA, TEGDA, Radical polymerization

1. 서론

최근 휴대폰, IMT-2000, PDA, DVD, 노트북 PC, 디지털카메라, 캠코더 등 휴대용 전자기기들이 급속히 보급되고 있다. 이들 휴대용 전자기기들의 전원으로는 종래의 니켈수소전지 보다 성능이 매우 우수한 리튬2차전지가 주로 사용되고 있다. 그 중에서 액체 전해액을 사용하는 리튬이온전지(LIB; lithium ion battery)는 충방전수명, 저온 및 고율특성 등이 우수하다. 그러나, 액체 전해액의 누액가능성이 있으며, 외장재로 금속을 사용함으로써 박형화가 곤란하며 에너지밀도가 낮은 단점이 있다[1].

이러한 문제점을 해결하기 위하여 리튬이온폴리머전지(LIPB; lithium-ion polymer battery)를 개발하고 있으며, 일부는 상용화되어 있다[2]. 리튬이온폴리머전지는 기존의 리튬이온전지에 사용되는 전극 및 액체 전해액을 그대로 활용하기 때문에 전기화학적 특성이 우수하며, 전지의 두께 및 중량을 줄일 수 있는 차세대 전지라고 할 수 있다[3]. 리튬이온폴리머전지의 하나는 겔폴리머 전해질(GPE; gel polymer electrolyte)을 이용하는 것으로서, 이는 반응성 모노머를 전지 내부에 주입하고 전지 제조 후에 열을 이용하여 중합함으로써 가교형 고분자 겔을 만드는 방법이다[4]. 리튬이온폴리머전지가 상용화되기 위하여 겔폴리머 전해질의 이온전도도는 상온에서 10^{-3} Scm^{-1} 이상이 되어야 한다[5,6].

Kang 등은 PEO 계열인 BPAEDA (bisphenol A ethoxylate diacrylate)와 LiPF₆/EC+PC로 구성된 겔폴리머 전해질을 제조하였으며, 이온전도도는 30 °C에서 약 $3.5 \times 10^{-3} \text{ Scm}^{-1}$ 로 보고하였다[7]. 한

1. 한국전기연구원 전지연구그룹
(경남 창원시 성주동 28-1)
2. 부경대학교 공업화학과
a. Corresponding Author : hskim@keri.re.kr
접수일자 : 2004. 2. 9
1차 심사 : 2004. 3. 11
2차 심사 : 2004. 3. 23
심사완료 : 2004. 4. 9

편 두개 이상의 고분자를 사용하여 겔폴리머 전해질을 리튬이온폴리머전지에 적용하는 연구도 진행되고 있다. 예를 들어 PVC(poly vinyl chloride) 및 PEMA(polyethyl methacrylate)의 블렌드와 $\text{LiPF}_6/\text{EC} + \text{PC}$ 로 구성된 겔폴리머 전해질의 상온 이온전도도는 10^{-3} Scm^{-1} 보다 높았고, 이를 채용한 전지는 1.0 C의 방전율로 충방전하였을 때 100회 후에도 초기용량의 92%의 성능을 보였다[8]. Du 등은 PU(polyurethane)와 PEO(polyethylene oxide)를 혼합하고 $\text{LiClO}_4/\text{PC} + \text{EC}$ 와의 겔폴리머 전해질의 상온 이온전도도는 $1.6 \times 10^{-3} \text{ Scm}^{-1}$ 라고 보고하였다[9]. 또한 모노머로 P(VdF-co-HFP)와 PAN을, 전해액으로 $\text{LiPF}_6/\text{EC} + \text{DMC}$ 를 사용한 겔폴리머 전해질을 채용한 전지는 사이클시험 (0.2 C) 시에 50회 경과하였을 때 초기용량의 약 95%를 나타내었다[10]. 저자 등은 polyurethane acrylate, PMMA, TEGDA, TEGDMA 등 반응성 단량체 또는 매크로머를 사용한 겔폴리머 전해질을 합성하고, 그 전기화학적 특성이 우수함을 보고하였다[11-13].

본 연구에서는 전기화학적으로 안정하며, 액체 전해액과 상용성이 기대되는 ethylene oxide기를 함유한 TEGDA(tetraethylene glycol diacrylate) 및 TEGDMA(triethylene glycol dimethacrylate)를 이용한 겔폴리머 전해질을 합성하고 이들 단량체의 구조 차이가 전지 성능에 미치는 영향을 알아보았다. 즉, ethylene oxide기 3개인 TEGDMA와 4개인 TEGDA를 반응성 단량체로 사용하였을 때의 전기화학적 특성에 대하여 조사하였다.

2. 실험

본 실험에서 반응성 단량체로는 TEGDA(tetraethyleneglycol diacrylate, aldrich chemical)와 TEGDMA(triethylene glycol dimethacrylate, aldrich chemical)를 사용하였고, 반응개시제로는 BBP[bis (4-tert-butylcyclohexyl) peroxydicarbonate, Aldrich Chemical]를 사용하였다. 이 단량체들의 화학구조식은 그림 1에 나타내었다. 전해액으로는 1.0 M $\text{LiPF}_6/\text{EC}:\text{DEC}:\text{EMC}$ (30:40:30 vol%)를 사용하였고, 단량체는 액체 전해액에 대해 5 vol%를 첨가하였다. 정극 및 부극활물질로는 시판 중인 LiCoO_2 와 MCF(Mesophase Carbon Fiber)를 사용하였다. 도전재 및 결합제로는 VGCF(vapor growth carbon fiber)와 PVDF(polyvinylidene fluoride)를 각각 사용하였다. 정극 및 부극의 전극

조성은 활물질:도전재:결합제를 91:6:3 및 90:2:8 (wt%)로 하였다. 리튬이온폴리머전지는 정극 및 부극 전극을 적층한 후 precursor를 주입하고 진공 봉입을 하여 제작하였다. 그리고 3일간 aging 후에 60 °C에서 1시간 열중합하여 반응성 단량체가 함유된 precursor를 가교형 고분자로 만들었다.

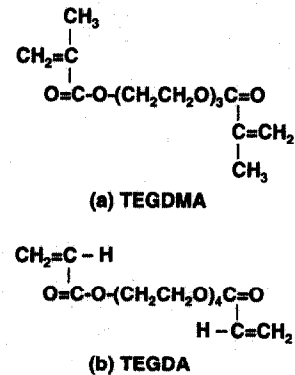


그림 1. TEGDMA 및 TEGDA의 화학구조.

Fig. 1. Chemical structures of TEGDMA and TEGDA.

Precursor의 점도는 Brookfield사의 viscometer (DV-II')를 사용하여 측정하였다. 0.5 ml의 시료를 시료 tray에 넣고, CPE-40 스펀들을 이용하여 RPM을 1~100으로 변화시키면서 점도를 측정하였다. 겔폴리머 전해질의 전기화학적인 안정성은 CV(cyclic voltammetry)를 이용하여 평가하였다. 작용전극으로는 스텐레스합금을, 상대 및 비교전극으로는 각각 리튬 금속박을 사용하였다. 기기는 Zahner Elektrik사의 IM6를 이용하였으며, 셀은 OCV(open circuit voltage)에서 4.5 V (vs. Li/Li')까지 10 mVsec^{-1} 의 주사속도로 스캔한 후에 -0.5 V까지 전위를 변화시켜 그 때의 전류를 측정하였다. 열중합하여 겔폴리머 전해질을 합성하고 그 이온전도도는 Zahner Elektrik사의 IM6로 측정하였다. 스텐레스합금 전극 사이에 직경 1 cm의 겔폴리머 전해질을 삽입하고, 주위는 불소계 고무를 이용하여 격리하였다. 이때 교류전압의 진폭은 10 mV, 주파수 영역은 100 mHz ~ 2 MHz로 하였다.

제작된 리튬이온폴리머전지에 대해서는 방전율 및 온도별 방전성능, 사이클수명 특성 등을 평가하였다. 방전율에 따른 방전특성을 평가하기 위하여 대상 전지를 0.2 C의 전류로 4.2 V까지 정전류 충

전한 후, 4.2 V에서 전류가 0.1 C가 될 때까지 정전압 충전을 하였다. 충전 후에는 30분 간 휴지한 후 0.2 C, 0.5 C, 1.0 C, 2.0 C의 전류로 셀의 전압이 3.0 V가 될 때까지 방전하였다. 온도에 따른 방전특성은 60, 40, 20, 0, -10, -20 °C에서 평가하였다. 상온에서 0.2 C로 4.2 V까지 정전류 충전한 후, 4.2 V에서 전류가 0.1 C가 될 때까지 정전압 충전을 하였다. 충전 후에는 항온조의 온도를 일정하게 유지시키고, 그 온도에 도달한 후 12시간 유지한 후 방전을 하였다. 방전은 0.2 C의 전류로 3.0 V까지 하였다. 사이클 특성은 충방전 전류를 0.5 C/0.5C로 하였으며, 상온에서 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 TEGDA 및 TEGDMA의 양에 따른 precursor의 점도를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 액체전해질의 점도는 약 4.5 mPa·s 이었고, 반응성 단량체의 함량이 증가하면 precursor의 점도는 증가하였다. 예를 들어 반응성 단량체가 5.0 vol% 함유된 TEGDMA계 및 TEGDA계 프리커서의 점도는 각각 4.7 및 4.8 mPa·s로, TEGDMA계가 약간 낮은 값을 나타내지만 거의 동등한 수준이었다. TEGDMA계 프리커서가 TEGDA계 보다 점도가 더 낮기 때문에 적층된 전극의 내부로 함침되는 것이 더 유리할 것이라고 판단되나 그 차이는 미세하리라 판단된다. 더욱이 프리커서의 함침성은 점도에만 좌우되는 것이 아니라 사용하는 전극과 프리커서와의 상대적 친화성에 따라서 변하기 때문이다[14].

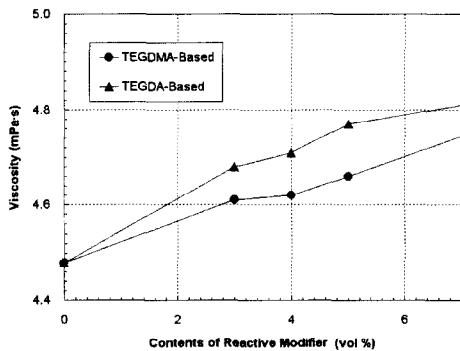


그림 2. 단량체 함량에 따른 점도 변화.
Fig. 2. Viscosity of the precursor with the contents of TEGDA and TEGDMA.

그림 3에는 TEGDMA계 겔폴리머전해질의 전기화학적 안정성을 알아보기 위하여 측정된 CV 결과를 나타내었다. TEGDMA계 겔폴리머전해질은 -0.5~0 V의 전위구간에서 리튬금속의 산화에 의한 Li⁺ 해리를 나타내고 있고, 반대로 0~1.0 V 구간에서는 Li⁺의 환원에 의한 리튬금속의 석출을 나타내는 피크가 관찰되고 있다. 그리고, 4.5 V까지의 전위구간에서는 전류가 거의 흐르지 않음을 알 수 있다. 따라서 리튬코발트산화물을 정극활물질로 사용하는 리튬2차전지가 대부분 최고 4.2 V까지 사용되고 있음을 고려할 때 TEGDMA계 겔폴리머전해질은 전기화학적으로 안정하다고 판단된다[15,16].

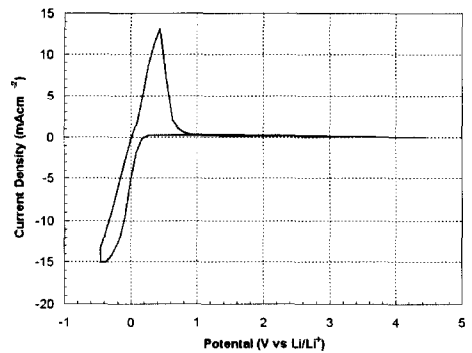


그림 3. TEGDMA계 겔폴리머전해질의 CV 결과.
Fig. 3. Cyclic voltammogram of the TEGDMA-based gel polymer electrolyte.

표 1. 겔폴리머전해질의 이온전도도 변화.
Table 1. Ionic conductivity of gel polymer electrolyte at various temperatures.

Temperature (°C)	Ionic conductivity (mScm ⁻¹)	
	TEGDA	TEGDMA
-20	1.10	1.06
-10	1.67	1.62
0	2.30	2.26
20	4.10	4.08
40	5.86	5.99
60	7.58	7.74

TEGDMA계 및 TEGDA계 겔폴리머전해질의 이온전도도를 측정된 결과를 표 1에 정리하였다. 상온 이온전도도를 비교해 보면 TEGDMA계 겔폴리머전해질은 4.08×10⁻³ Scm⁻¹, TEGDA계는 4.10×10⁻³ Scm⁻¹로 거의 유사한 값을 나타내었다. 문헌에 의하면, PAN(polyacrylonitrile)과 LiPF₆/EC+DMC, PANI [polyacrylonitrile-co-bis (2-(2-

methoxy ethoxy) ethyl) itaconate]와 $\text{LiClO}_4/\text{EC}+\text{BL}$ 및 PEGME(polyethylene glycol methyl ether)와 $\text{Li}(\text{SO}_2\text{CF}_3)_2/\text{PC}$ 로 구성된 겔폴리머 전해질의 상온 이온전도도는 각각 2.8×10^{-3} , 1.9×10^{-3} , $2.0 \times 10^{-3} \text{ Scm}^{-1}$ 이었다[17-19]. 그리고 Jo 등은 MMA (methyl methacrylate) 및 styrene 공중합물과 $\text{LiClO}_4/\text{EC}+\text{DMC}$ 와의 겔폴리머 전해질도 10^{-3} Scm^{-1} 대의 이온전도도와 우수한 기계적 특성을 나타낸다고 보고하였다[20]. 따라서, TEGDMA 및 TEGDA계 겔폴리머 전해질의 이온전도도는 문헌에 보고된 다른 겔폴리머 전해질의 이온전도도보다 높은 값이다. 그리고, TEGDMA계가 TEGDA계에 비하여 약간 낮은 이온전도도를 나타내는 것은 이들 단량체의 구조적인 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, ethylene oxide기가 4개인 TEGDA계에 비하여 3개인 TEGDMA계는 가교밀도가 높아 유연성이 상대적으로 낮고, 반대로 기계적 강도는 더 높을 것으로 사료된다.

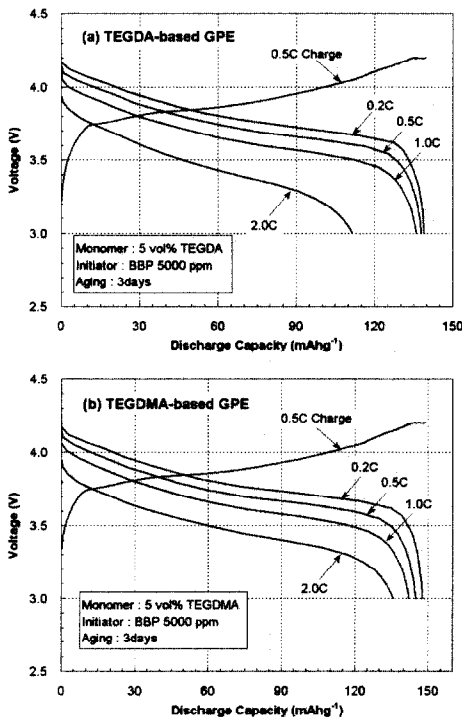


그림 4. TEGDA계 (a) 및 TEGDMA계 (b) 겔폴리머 전해질 전지의 방전율 특성.

Fig. 4. Voltage profiles of the cells with (a) TEGDA and (b) TEGDMA-based gel polymer electrolyte at different current densities.

그림 4에는 TEGDA 및 TEGDMA계 겔폴리머 전해질을 채용한 리튬이온폴리머 전지의 방전율에 따른 방전특성을 나타낸 것이다. 충전은 0.5 C로 하였으며, 방전 시의 방전율은 0.2 C, 0.5 C, 1.0 C, 2.0 C로 하였고, 이는 전류밀도로 환산하면 각각 0.5, 1.2, 2.3, 4.7 mAcm^{-2} 에 해당하는 것이다. 표 2에는 방전용량 및 용량유지율을 백분율로 나타낸 것이다. TEGDA계 겔폴리머 전해질을 채용한 리튬이온폴리머 전지는 방전율이 0.2 C, 0.5 C, 1.0 C, 2.0 C로 증가함에 따라 방전용량은 139.0, 137.9, 136.0, 111.6 mAhg^{-1} 으로 감소하였다. 2.0C의 고율방전에서 얻은 방전용량의 값은 0.2 C 방전용량의 약 80 %로 양호한 성능을 보였다. 그러나, TEGDA계 겔폴리머 전해질 전지의 초기용량이 TEGDMA계에 비하여 약간 낮게 나타나는데 이의 원인은 아직 불명확하다.

표 2. 겔폴리머 전해질 전지의 방전율에 따른 용량.

Table 2. Discharge capacity of TEGDA- and TEGDMA-based LIPB at various current densities.

C rate	TEGDA-based		TEGDMA-based	
	Discharge capacity (mAhg^{-1})	Capacity retention (%)	Discharge capacity (mAhg^{-1})	Capacity retention (%)
0.1C	139.0	100	147.7	100
0.5C	137.9	99.2	144.9	98.1
1.0C	136.0	97.8	142.2	96.3
2.0C	111.6	80.2	135.8	91.9

한편, TEGDMA계를 채용한 전지는 방전율이 0.2 C, 0.5 C, 1.0 C, 2.0 C로 증가함에 따라 방전용량은 147.7, 144.9, 142.2, 135.8 mAhg^{-1} 로 감소하였다. 또한 2.0 C의 고율방전에서도 0.2 C 방전용량의 약 92%로 TEGDA계에 비하여 더 우수한 고율특성을 나타내었다. 뿐만 아니라, 문헌상의 다른 겔폴리머 전해질들의 율특성과 비교하여도 TEGDA계의 율특성은 우수한 것으로 판단된다[3,15,21]. 이는 이온전도도 특성에서 예상한 결과와 반대이다. 즉, TEGDMA계가 TEGDA계에 비하여 유연성이 상대적으로 낮아서 이온전도도가 높았다. 따라서 TEGDA계 겔폴리머 전해질 전지의 방전율 특성이 더 높을 것이 예상되었으나, 그림 4와 표 2에서 알 수 있듯이 TEGDMA계의 율특성이 더 우수하다. 이러한 이유는 TEGDMA계가 겔이 더 안정하며, 전극간의 밀착력이 높아 내부저항이 더 낮게 유지되어 율특성이 더 우수한 것으로 사료된다[22].

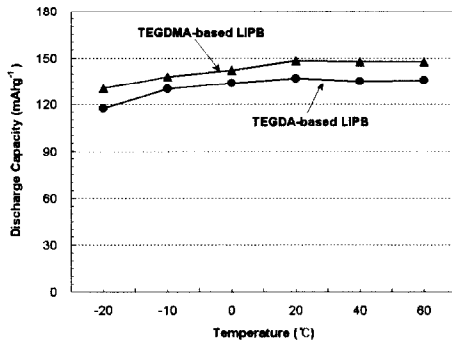


그림 5. 겔폴리머 전해질 전지의 온도에 따른 용량 변화.

Fig. 5. Discharge capacities of the cell with gel polymer electrolyte at various temperatures.

그림 5는 TEGDA 및 TEGDMA계 겔폴리머 전해질을 채용한 리튬이온폴리머전지의 온도에 따른 방전용량을 나타낸 것이다. 충전은 0.2 C율로 하였고, 방전은 -20, -10, 0, 20, 40, 60 °C에서 12시간 유지한 후에 0.2 C율로 실시하였다. TEGDA계 겔폴리머 전해질 전지의 방전용량은 온도가 -20, -10, 0, 20, 40, 60 °C로 증가함에 따라서 117.3, 130.1, 133.6, 136.9, 135.0, 135.5 mAhg⁻¹로 증가하였다. 또한, TEGDMA계 겔폴리머 전해질 전지의 방전용량은 온도가 -20, -10, 0, 20, 40, 60 °C로 증가함에 따라 각각 130.3, 137.9, 142.3, 148.2, 147.7, 147.6 mAhg⁻¹로 증가하였다. 그림 5에서 알 수 있듯이, TEGDA 및 TEGDMA계 겔폴리머 전해질 전지의 저온성을 서로 비교하면 TEGDMA계가 TEGDA계에 비하여 약간 높은 성능을 보였다. 이는 그림 4의 율특성에서 설명한 것과 동일한 원인에 의한 것으로 판단된다.

그림 6은 TEGDA 및 TEGDMA계 겔폴리머 전해질 전지의 사이클 특성을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 TEGDA 및 TEGDMA계 모두 양호한 사이클특성을 나타내고 있다. 100회의 사이클이 경과 후, TEGDA 및 TEGDMA계 겔폴리머 전해질 전지의 방전비용량은 각각 124.6 및 134.9 mAhg⁻¹이었다. 100회의 충방전 사이클이 경과한 후 TEGDMA계 겔폴리머 전해질 전지의 방전용량을 초기용량에 대한 백분율로 계산해보면 약 94 %로써, TEGDA계의 92 %에 비하여 약간 더 우수하지만 거의 동등한 성능이다. 이러한 리튬이온폴리머

전지의 사이클특성은 다른 문헌에서 보고되는 것에 비하여 우수한 결과이다[8,10,15,21].

따라서, ethylene oxide기를 갖고 있는 TEGDA계 및 TEGDMA계 모두 겔폴리머 전해질을 합성하는 반응성 모노머로 적합하며, 특히 ethylene oxide기를 3개 함유하는 TEGDMA이 더 우수한 특성을 나타낸다고 사료된다.

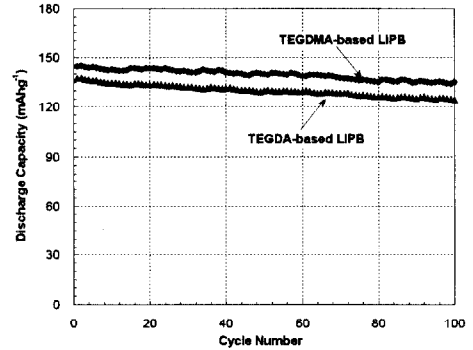


그림 6. 겔폴리머 전해질 전지의 사이클 특성.

Fig. 6. Cycle life performance of the gel polymer electrolyte cell.

4. 결론

본 연구에서는 ethylene oxide기의 수가 서로 다른 TEGDA와 TEGDMA를 이용하여 겔폴리머 전해질을 합성하고, 그 전기화학적 특성의 차이를 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

5 vol%의 단량체를 함유하는 전구체의 점도는 TEGDA계가 TEGDMA계에 비하여 약간 높은 값을 보이나, 액체 전해액의 점도와 거의 동등한 값을 나타내었다. 또한 CV 실험 결과, TEGDA와 TEGDMA계 겔폴리머 전해질은 모두 4.5 V (vs. Li/Li⁺)까지 전기화학적으로 안정하였다. 또한, TEGDA와 TEGDMA계 겔폴리머 전해질은 상온 이온전도도는 약 4×10⁻³ Scm⁻¹ 이상으로 매우 양호한 특성을 보였다.

겔폴리머 전해질을 채용한 리튬이온폴리머 전지의 전기화학적 특성을 고찰한 결과, TEGDA계 전지는 2.0 C의 고율방전에서 방전용량이 0.2 C 방전용량에 대해 80 %였고, -20 °C 저온에서 방전용량은 상온 대비 86 %의 성능을, 또한 100회 사이클 경과 후 초기용량의 92 %의 방전용량을 나타내었다.

한편, TEGDMA계는 2.0 C의 고율방전 시 방전용량이 0.2 C 방전용량의 92 %를 나타내었고, -20 °C 방전용량은 상온 대비 88 %의 성능을, 그리고, 100회 충방전 경과 후 방전용량은 초기용량의 약 94 %였다.

TEGDMA 및 TEGDA계 두 종류의 단량체는 말단에 이중결합을 갖고 있어서 겔폴리머전해질용으로 적합하다. 특히 구조 내부에 3개의 ethylene oxide기를 갖는 TEGDMA는 가교밀도가 높아 안정한 겔을 만들뿐만 아니라 내부저항도 낮기 때문에 리튬이온폴리머전지를 위한 호스트폴리머로 더 적합하다.

참고 문헌

- [1] H. Kim, J. Shin, C. Doh, S. Moon, and S. Kim, "Preparation of gel polymer electrolytes using tri(ethylene glycol) dimethacrylate and their electrochemical performances", *J. Power Sources*, Vol. 112, p. 469, 2002.
- [2] 김현수, 신정환, 나성환, 엄승욱, 문성인, 김상필, "PMMA IPN계 겔폴리머전해질을 채용한 리튬이온폴리머전지의 전기화학적 특성", *전기전자재료학회논문지*, 16권, 11호, p. 994, 2003.
- [3] K. Kezuka, T. Hatazawa, and K. Nakajima, "The trends of sony li-ion polymer battery", *J. Power Sources*, Vol. 97-98, p. 755, 2000.
- [4] H. Kim, J. shin, S. Moon, M. Yun, and S. Kim, "Electrochemical performances of gel polymer electrolyte using tetra(ethylene glycol) diacrylate", *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 58, p. 1715, 2003.
- [5] F. B. Dias, L. Plomp, and J. B. Veldhuis, "Trends in polymer electrolytes for secondary lithium batteries", *J. Power sources*, Vol. 88, p. 169, 2000.
- [6] 김종욱, 문성인, 진봉수, 구할본, 윤문수, "이온전도성 Poly(ethylene oxide) 고분자전해질의 전도특성", *전기전자재료학회논문지*, 8권, 4호, p. 412, 1995.
- [7] Y. Kang, K. Cheong, K. Noh, C. Lee, and D. Seung, "A study of cross-linked PEO gel polymer electrolytes using bisphenol A ethoxylate: ionic conductivity and mechanical properties", *J. Power Sources*, Vol. 119-121, p. 432, 2003.
- [8] H. Han, H. Kang, S. Kim, and H. Kim, "Phase-separated polymer electrolyte based on poly(vinyl chloride) / poly(ethyl methacrylate) blend", *J. Power Sources*, Vol. 112, p. 461, 2002.
- [9] Y. Du and T. Wen, "The frasibility study of composite electrolytes comprising thermoplastic polyurethane and poly(ethylene oxide)", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 71, p. 62, 2001.
- [10] D. Kim and Y. Sun, "Electrochemical characterization of gel polymer electrolytes prepared with porous membranes", *J. Power Sources*, Vol. 102, p. 41, 2001.
- [11] H. Kim, J. Shin, S. Moon, and S. Kim, "Preparation of gel polymer electrolytes using PMMA interpenetrating polymeric network and their electrochemical performances", *Electrochim. Acta*, Vol. 48-11, p. 1573, 2003.
- [12] H. Kim, G. Choi, S. Moon, and S. Kim, "Electrochemical properties of li ion polymer battery with gel polymer electrolyte based on polyurethane", *J. Applied Electrochem.*, Vol. 33, p. 491, 2003.
- [13] H. Kim, J. Shin, S. Moon, and M. Yun, "Electrochemical properties of poly(tetra ethylene glycol diacrylate) based gel electrolytes for lithium-ion polymer batteries", *J. Power Sources*, Vol. 119-121, p. 482, 2003.
- [14] 김현수, 김성일, 최관영, 문성인, 김상필, "리튬이온전지용 UtethanerI 겔폴리머 전해질에 관한 연구", *전기전자재료학회논문지*, 15권 12호, p. 1033, 2002.
- [15] D. Kim, "Electrochemical characterization of poly(ethylene-co-methyl acrylate) -based gel polymer electrolytes for lithium-ion polymer batteries", *J. Power Sources*, Vol. 87, p. 78, 2000.
- [16] H. Kuo, W. Chen, and T. Wen, "A novel composite gel polymer electrolyte for

- rechargeable lithium batteries", J. Power Sources, Vol. 110, p. 27, 2002.
- [17] H. Min, J. Ko., and D. Kim, "Preparation and characterization of porous polyacrylonitrile membranes for lithium-ion polymer batteries", J. Power Sources, Vol. 119-121, p 469, 2003.
- [18] B. Choi, Y. Kim, M. Gong, and S. Ahn, "Characterization of new polyacrylonitrile-co-bis [2-(2-methoxyethoxy)ethyl] itaconate based gel polymer electrolytes", Electrochim. Acta, Vol. 46, p. 3475, 2001.
- [19] H. R. Allcock, W. R. Laredo, and R. V. Morford, "Polymer electrolytes derived from polynorbornenes with pendent cyclophosphazenes: poly(ethylene glycol) methyl ether(PEGME) derives", Solid State Ionics, Vol. 139, p. 27, 2001.
- [20] S. Jo, H. Sohn, D. Kang, and D. Kim, "Electrochemical studies of gel polymer electrolytes based on methyl methacrylate-styrene copolymers", J. Power Sources, Vol. 119-121, p. 478, 2003.
- [21] D. Kang, D. Kim, S. Jo, and H. Sohn, "Preparation and characterization of gel polymer electrolytes based on methyl methacrylate-styrene copolymers", J. Power Sources, Vol. 112, p. 1, 2002.
- [22] 이재안, 김종욱, 구할분, "리튬 폴리머전지용 PVD/PAN계 고분자 전해질의 이온전도 특성", 전기전자재료학회논문지, 13권, 4호, p. 306, 2000.