

# 2 시분해 적외선 분광기를 이용한 액체 전해질 연구

글\_이경구 교수 | 군산대학교 화학과

## 1. 서론

전기 화학 반응을 통한 화학 에너지와 전기 에너지 사이의 변환은 전기 에너지의 효율적인 저장 및 활용이 가능하게 되었다. 현재까지 고안된 전기화학 전지 중 리튬이온배터리(LIB)는 높은 에너지 밀도를 가져 현대 생활에서 가장 널리 사용되고 있다 [1]. LIB 작동 중 전기화학 반응은 전극에서의 레독스 반응과 전해질 용액을 통한 전극 간  $\text{Li}^+$  이온 이동으로 분리할 수 있다. 많은 연구가 에너지 밀도를 높이기 위한 새로운 전극 재료 개발에 집중되어 있다. 이에 비해 전해질에 대한 연구는 전극 간 리튬 양이온 수송을 담당하고 있으며 레독스 반응이 일어나는 전극과 직접 접촉하고 있음에도 불구하고 주목을 덜 받았다. 전해질 내에서 빠른  $\text{Li}^+$  이온 수송 특성을 확보하기 위해 높은 리튬염 용해

도와 낮은 점도 속성을 가져야한다. 그러나 이 두 조건을 동시에 만족시키는 것은 거의 불가능하기 때문에 상업적 LIB를 위한 고성능 전해질 개발에는 많은 어려움이 존재한다.

상용화된 LIB용 전해질은 리튬염(주로  $\text{LiPF}_6$ )과 유기 혼합 용매(주로 카보네이트계 용매들)로 구성된다 (그림 1) [2]. 카보네이트계 용매들은 고전압 전지에 활용될 정도( $> 4.2 \text{ V (vs Li}^+/\text{Li)}$ )로 전기화학 창(Electrochemical window)이 넓기 때문에 LIB 전해질 용매로 주로 사용되고 있다. 더욱이 리튬염과 카보네이트 용매로 구성된 전해질은 고출력 LIB의 실현이 가능할 정도로 높은 이온전도도( $> 10 \text{ mS}$ )를 보이고 있다. 그러나 해당 전해질에서 분자 수준의  $\text{Li}^+$  이온 수송의 작동 원리에 대한 이해도가 낮은 것이 현실이다.

전해질의 이온전도도는 전하 운반체의 농도와

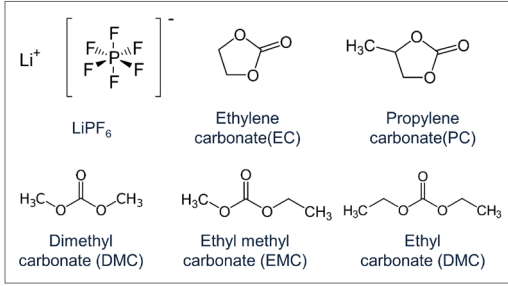


그림 1 ▶ 리튬이온이차전지에서 사용되는 전해질 구성 분자들.

이동성에 의해 결정된다. 용매에 용해된 리튬 염의 농도가 높아짐에 따라 전하 운반체 수가 증가한다. 그러나 리튬 염의 추가는 전해질 내 이온 간 상호작용을 증가시켜 점성도를 높이게 되고 이는  $\text{Li}^+$  이온의 이동성을 저하시킨다. 두 요소가 경쟁적으로 이온 전도에 기여하여 농도에 따른 특징적인 이온전도도(증가했다가 다시 감소)를 보이게 된다 [3].

이온 전도도( $\mu = \frac{ze}{6\pi\eta a}$ )는 전기장에 의해 이온이 이동하는 속도로 전하( $ze$ ), 점도( $\eta$ ), 유체역학 반지름(hydrodynamic radius,  $a$ )에 의해 결정된다. 여기서 유체역학 반지름은 이온과 함께 움직이는 용매 분자들을 포함한 이온의 유효 반지름이다. LIB 전해질의 경우, 일반적으로  $\text{Li}^+$  이온과 극성 유기 용매 분자 간 강한 정전기적 인력으로 인해 견고한 용매화 껍질(solvation shell)이 형성된다. 용매화 껍질의 크기는 이온 이동성을 결정하는 중요 인자이므로  $\text{Li}^+$  이온 주위의 용매화 껍질 구조를 이해하는 것이 이온 전도도의 분자적 원인을 규명하는데 필수적이다. 그러나, 용매화 구조와 그 분자 동역학에 대한 정보를 제공할 수 있는 분광 기법은 그리 많지 않다. 전해질 분석에 많

이 사용되는 FT-IR, Raman과 같은 분광기는 동역학 정보를 제공하지 않아 이온 전도와 분자 동역학 간의 상관관계를 밝히기에는 어려움이 있다.

$\text{Li}^+$  이온 주위의 용매화 구조를 정의하기 위해서는 첫 번째 용매화 껍질 내에 존재하는 용매 분자의 수와 용매화 및 화학적 교환(chemical exchange)같은 동역학 정보를 결정해야 한다. 이를 위해 본고에서는 전통적인 FT-IR 실험과 함께 시분해(time-resolved) 적외선 펌프-프로브와 이차원 적외선 분광법이 적합하다는 것을 보일 것이다.

그동안 시료의 분자 동역학을 관찰하기 위해 일반적으로 펌프-프로브(pump-probe, PP) 방식의 분광법이 널리 활용되었다 [4]. 첫 번째 빛의 펄스(펌프 펄스라고 불림)는 분자를 바닥상태에서 들뜬상태로 들뜨게 한다. 적외선 파장대의 빔을 활용하게 되면 펌프 펄스에 의해 시료의 진동 상태에 변화가 유도된다. 이 변화의 과정은 뒤따라오는 펄스(프로브 펄스)에 의해 관찰이 되게 된다. 펌프-프로브 분광법에서 신호는 3가지 다른 과정(바닥상태 블리칭(ground-state bleaching, GSB), 유도 방출(stimulated emission, SE), 들뜬상태 흡수(excited-state absorption, ESA))을 통해 생성된다. 분자의 일부분이 펌프 펄스에 의해 들뜬 상태로 들뜨게 됨에 따라 바닥상태의 분자의 수가 감소한다. GSB 신호는 펌프 펄스 유무에 따른 바닥상태의 분자 수 차이에 의해 신호가 생성되게 된다. SE 신호의 경우, 펌프 펄스에 의해 들뜬 상태의 분자가 프로브 펄스에 의해 바

닥상태로 떨어지면서 빛을 생성하는 유도 방출 과정이다. ESA 신호는 들뜬 상태의 분자가 프로브 빔에 의해 더 높은 상태의 들뜬 상태로 들뜨면서 생성되는 신호이다. 3가지 다른 과정을 통해 생성되는 PP 신호는 시간에 따른 분자의 들뜬 상태를 관찰 가능하게 한다. 일반적으로 편광(polarization) 의존 펌프-프로브 실험을 통해 입자수 이완 동역학(population relaxation dynamics)과 회전 이완 동역학(rotational relaxation dynamics) 정보를 얻어낼 수 있다 [5].

이차원 진동 분광학(2D-IR)은 펨토초( $10^{-15}$  초) 적외선 레이저 펄스를 이용하여 개발된 분광법이다. 이 실험에서는 먼저 한 쌍의 펌프 펄스를 시료에 비추어 빛-물질 상호작용(light-matter interaction)을 통해 시료를 들뜬상태로 유도한다. 특정 기다림 시간( $T_w$ ) 후 프로브 펄스가 적용되어 시료에서 신호가 생성되게 된다. 생성된 신호 과정은 앞서 기술한 펌프-프로브 분광법과 동일하며 2D-IR은 일차원의 펌프-프로브 스펙트럼을 이차원으로 펼쳐놓은 것과 같다. 기다림 시간은 일반적으로 0초에서 수십-수백 피코초까지 조절되며, 수십 펨토초의 분해능으로 조절할 수 있다. 기다림 시간동안 시료는 들뜬 상태에서 바닥상태로 이완될 것이고 이 과정에서 일어나는 현상을 관찰할 수 있다. 즉, 2D-IR 스펙트럼은 초기 펌프 펄스에 의해 들뜬 분자 상태와 기다림 시간 후 적용된 펄스에 의해 관찰된 분자 상태간의 2차원 상관관계를 보여준다. 2차원 핵자기공명(2D-NMR) 분광법에서와 마찬가지로 2D-IR 분광법은 스펙트럼을 2차원으로 분산시켜 서로 다른

진동모드 간의 동역학 정보를 포함하는 교차 피크(cross peak)를 관측할 수 있게 한다.

2D-IR은 1998년 처음으로 개발된 이후 분자의 초고속 진동 동역학 및 평형상태의 구조 변화에 대한 연구에 활용되어왔다 [6]. 대상 시스템들은 대부분 생화학 및 기초 물리화학 분야에 국한되어왔으나 최근 들어 에너지 소재인 액체 전해질의 동역학 연구에 활용되고 있다 [7-9]. 그 하나의 예를 본고에서 설명하고자 한다.

우선 적외선 PP 및 2D-IR 분광기의 광학 장치에 대해 간략히 설명한 후, 리튬염 전해질에 대한 FT-IR, 들뜸-탐침, 2D-IR 실험 결과를 제시하고 이를 통해 용매화 구조 및 동역학에 대해 설명할 것이다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시분해 분광학

펨토초 레이저를 활용한 초고속 적외선 분광학에 대한 이론적 배경 및 자세한 신호 생성 과정은 본고의 범위를 벗어나므로 인용한 리뷰 논문을 참고하길 바란다 [10-12].

간략히 시분해 적외선 분광기에 대해 설명하면, 우선 Ti:Sapphire 레이저를 이용하여 수십 펨토초( $< 50$  fs) 및 수 mJ의 에너지를 가지는 800 nm 파장의 펄스가 필요하다. 이 펄스는 OPA(optical parametric amplifier)를 이용하여 대상 시료가 흡수하는 적외선 파장대의 펄스로 변환된다.

적외선 펌프-프로브(pump-probe) 분광기는 펌프 빔과 프로브 빔이 이용된다. 펌프 빔은 시료를 들뜨우기 위해 상대적으로 강한 적외선 펄스이며 프로브 빔은 들뜬 분자의 시간에 따른 변화를 관찰하기 위해 상대적으로 약한 적외선 펄스이다. 펌프 빔과 프로브 빔의 시간 간격( $t$ )은 자동화된 딜레이 스테이지(computer controlled delay stage)를 이용하여 조절하며 상대적 펄스의 세기 비는 약 9:1이다.

편광(polarization) 의존 적외선 펌프-프로브(pump-probe) 신호를 측정하기 위해, 편광기를 사용하여 펌프 및 프로브 빔의 편광 방향을 시료 전에 각각  $45^\circ$ ,  $0^\circ$ 로 설정하였다. 시료를 지난 프로브 빔은 컴퓨터로 제어되는 회전 장치에 장착된 선형 편광기에 의해  $45^\circ$ (평행 신호, parallel) 혹은  $-45^\circ$ (수직 신호, perpendicular)로 설정된다. 시료와 상호작용을 한 프로

브 빔은 적절히 신호가 약화된 후 분광기에 보내지며 다채널(보통 64 채널이상) MCT 검출기를 통해 신호가 측정된다. 펌프-프로브(pump-probe) 실험에서 평행 신호( $S_{||}(t; \omega_{pr})$ )와 수직 신호( $S_{\perp}(t; \omega_{pr})$ )는 매  $t$ 에서 순차적으로 측정된다. 측정된 편광 의존 적외선 PP 신호는 아래와 같은 식을 이용하여 들뜬 분자의 수명(lifetime)을 결정할 수 있는 입자수 등방성(isotropic) 이완 신호( $P(t; \omega_{pr})$ )와 회전 비등방성(anisotropic) 이완 신호( $r(t; \omega_{pr})$ )로 변환된다.

$$P(t; \omega_{pr}) = S_{||}(t; \omega_{pr}) + 2S_{\perp}(t; \omega_{pr})$$

$$r(t; \omega_{pr}) = \frac{S_{||}(t; \omega_{pr}) - S_{\perp}(t; \omega_{pr})}{S_{||}(t; \omega_{pr}) + 2S_{\perp}(t; \omega_{pr})}$$

그림 2는 이차원 적외선 분광기에 대한 광학 배치도이다. 생성된 적외선 펄스는 살 분할기

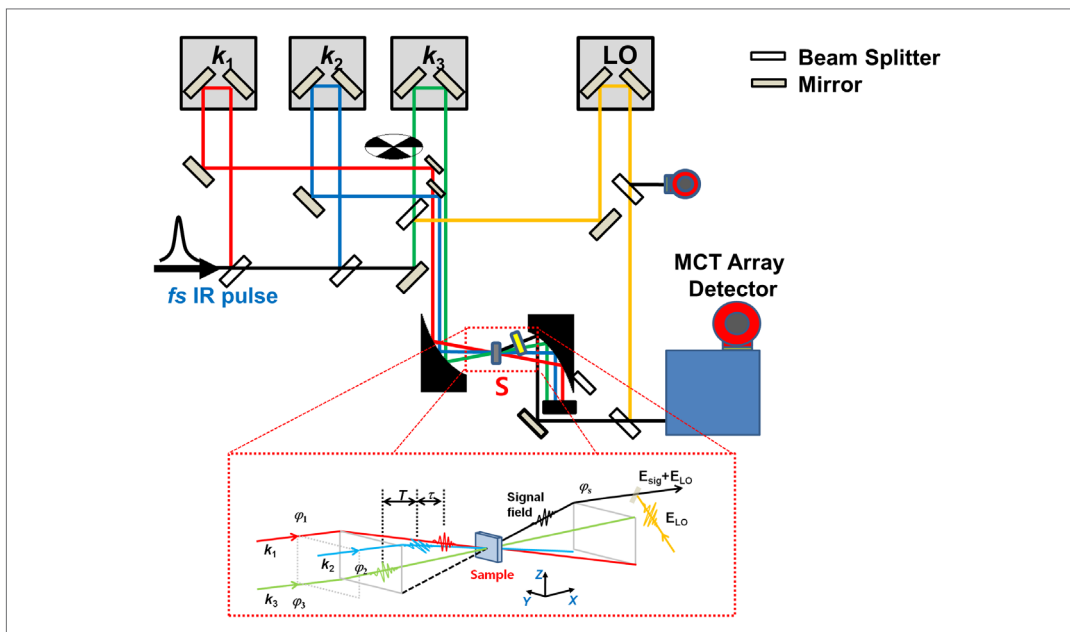


그림 2 ▶ 이차원 적외선 분광기의 광학 배치도.

(beam splitter)를 이용하여 동일한 세기의 4개의 펄스로 나뉘게 된다. 이중 3개의 펄스는 시료를 여기시키는데 사용이 되고 나머지 하나는 헤테로다인 검출(heterodyne detection)을 위해 사용이 된다.

3개의 펄스는 순차적으로 샘플 시료와 상호작용을 하게 되고 시료에 삼차원 편극(third order polarization)이 생성이 된다. 이 편극은 위상 일치 방향(phase matched direction)으로 일정 시간이 지난 후 에코(echo) 신호를 생성하게 된다.

시료를 여기시키는 3개의 빔들 및 생성 빔의 공간적 형태를 박스카 형태(boxcar geometry)로 구성하면 순수한 에코 신호를 측정할 수 있다(그림 2의 박스 부분). 생성된 에코 신호는 LO oscillator라는 reference 펄스와 합쳐져 헤테로다인 측정이 가능하게 된다. 생성된 헤테로다인 신호는 다채널 MCT 검출기를 통해 주파수 분해 스펙트럼(frequency-resolved spectrum)을 얻게 된다. 첫 번째 빔( $k_1$ )과 두 번째 빔( $k_2$ ) 사이의 시간 간격을  $\tau$ 로 정의하고 두 번째 빔과 세 번째 빔( $k_3$ ) 사이 시간을  $T_w$ (기다림 시간)로 정의할 수 있다. 특정  $T_w$ 의 이차원 적외선 스펙트럼을 얻기 위해서는  $T_w$ 를 고정하고  $\tau$ 초를 스캔하게 된다. 이를 통해 한 축은 주파수 영역(frequency domain)을, 다른 한 축은 시간 영역(time domain)을 가지는 이차원 스펙트럼을 실험적으로 얻게 된다.  $\tau$  스캔을 통해 얻은 시간 영역 신호를 푸리에 변환(Fourier transform)하면 최종적으로 두 주파수 영역 축을 가지는 이차원 스펙트럼을 얻게 된다.

$T_w$ (기다림 시간)를 바꾸며 이차원 스펙트럼을 얻게 되면 관심 시스템에 대한 시간에 따른 변화를 관찰할 수 있다.

다음은 이차원 적외선 분광법을 이용하여 측정 가능한 대표적인 현상 중 하나인 평형 상태의 화학적 교환(chemical exchange) 현상이 대상 시료에서 일어날 때 이차원 적외선 스펙트럼에서 어떻게 관찰되는지를 설명하였다. 그림 3에 화학적 교환이 일어나는 상황에서 측정되는 이차원 적외선 스펙트럼에 대해 도식적으로 나타내었다. 단순화하기 위해 용액 내에서 반응물과 생성물이 각각 1종씩 존재하는 평형상태를 고려하였다. 이 평형 반응은 실질적 화학 반응이 될 수도 있으며 수소결합, 용매 교환 반응 등이 될 수 있다. 우선 이차원적외선 분광법을 이용하여 동역학을 관찰하려면 대상 시료들이 분광학적으로 구분이 되어있어야 한다. 화학적 교환이 일어나지 않은 짧은  $T_w$  시간의 이차원 적외선 스펙트럼(그림 3의 왼쪽 스펙트럼)은 대각 위치에 각 피크(diagonal peak)가 나타나게 된다. 대기시간( $T_w$ )이

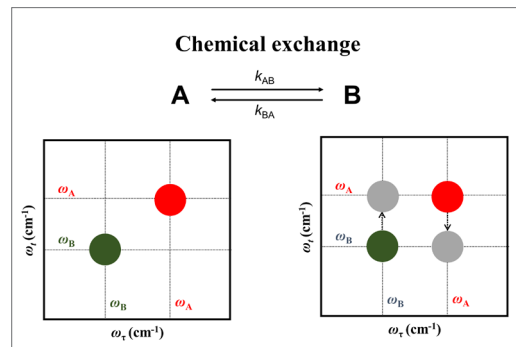


그림 3 ▶ 시료에서 화학적 교환이 일어날 때  $T_w$  (기다림 시간)에 따라 측정되는 이차원 적외선 스펙트럼을 도식적으로 나타내었다.

충분히 길어져서 두 종간의 상호변환이 일어나게 되면 그 양에 비례하여 교차위치 피크(cross peak)의 크기가 증가하게 된다. 따라서 대기시간( $T_w$ )에 따른 이차원 적외선의 대각 위치 및 교차 위치의 신호 크기를 정량적으로 분석하게 되면 화학적 교환 반응에 대한 동역학 및 속도 상수( $k_{AB}$ 와  $k_{BA}$ )를 결정할 수 있다.

### 3. 액체 전해질 연구

#### 3.1 FT-IR 및 펌프-프로브 분광법

FT-IR 분광학은  $\text{Li}^+$  이온의 용매 구조를 연구하기 위한 1차 도구이다. 특히  $\text{Li}^+$  양이온과 상호작용하는 용매 분자(여기서는 카보네이트계 용매)의 특정 진동모드는  $\text{Li}^+$  이온 주변의 국소 환경에 대해 민감한 탐침(probe)으로 사용 가능하다. DEC(diethyl carbonate)용매에  $\text{LiPF}_6$  전해질 염을 녹여 준비된 전해액의 DEC의 C=O 신축 모드의 FT-IR 스펙트럼을 그림 4에 나타내었다. 전해질에서  $\text{LiPF}_6$ 의 농도가 증가함에 따라  $1,715.4 \text{ cm}^{-1}$ 에서 새로운 신호 크기가 커지고 반대로  $1,747.0 \text{ cm}^{-1}$ 의 신호 크기가 감소한다. 즉  $\text{LiPF}_6/\text{DEC}$  용액에서 새롭게 나타나는 피크는  $\text{Li}^+$  이온과 상호작용하는 DEC 분자의 신축 모드에 해당한다.

$\text{Li}^+$  이온을 둘러싸고 있는 일차 용매화 껍질(first solvation shell) 내 DEC 분자의 평균 수를 결정하기 위해 리튬 염 농도에 따른 IR 스펙트럼을 활용하였다. 그림 4(b)에  $1,715.4 \text{ cm}^{-1}$ 의 피크 면

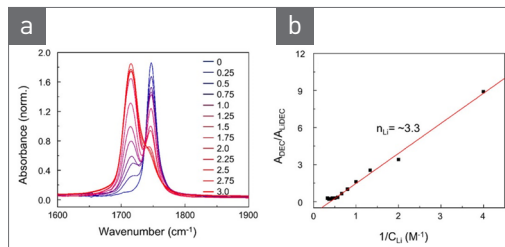


그림 4 ▶ (a) 리튬염 농도에 따른 IR 스펙트럼, (b)  $\text{Li}^+$  첫번째 용매 껍질의 용매수 [8].

적 대비  $1,747.0 \text{ cm}^{-1}$ 의 피크 면적을 전해질 농도의 역수로 표현하였다. 이를 통해  $\text{Li}^+$  이온 주위의 일차 용매화 껍질 내에 존재하는 DEC 분자는 약 3.3개라는 것을 알아낼 수 있다 [8]. 완벽히 용매에 의해 둘러싸인  $\text{Li}^+$  이온이 4개의 카보네이트 분자를 가지고 있음을 감안하였을 때, 1M 농도에서  $\text{Li}^+$  이온은 자유 이온 혹은 하나의 음이온과 접촉 이온쌍(contact ion pair)을 이루는 용매 껍질들이 공존할 것으로 예상된다.

편광 의존 적외선 펌프-프로브 측정법은 용액 상의 관심 분자의 진동 입자수 이완(등방성 신호) 속도와 회전 이완(비등방성 신호) 속도를 측정하는 우수한 시분해 분광법이다. 진동 입자수 이완 속도는 분자 구조뿐만 아니라 주변 분자와의 분자 간 상호작용에도 민감하다. 다른 용매 환경을 가진 두 개 이상의 종은 다른 진동 입자수 이완 속도를 가져, 시분해 적외선 PP 스펙트럼으로 구별이 가능하다. 더욱이 Stokes-Einstein-Debye 식에 따르면, 회전 이완 속도 상수는 회전체(Rotator)의 유효 부피에 반비례한다. 즉 비등방성 PP 신호를 분석하면  $\text{Li}^+$  주위의 각 용매 군집의 대략적인 크기에 대한 중요한 정보를 제공할 수 있다.

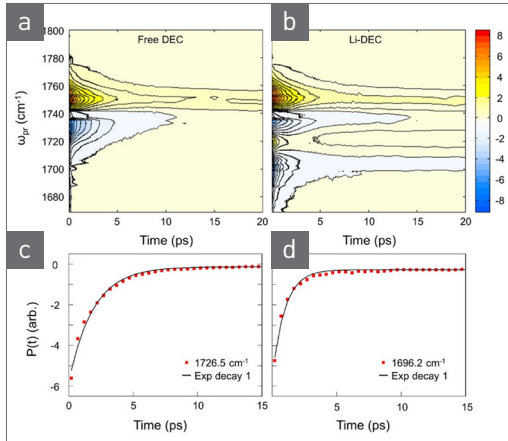


그림 5 ▶ IR PP 스펙트럼. (a) 순수 DEC 시료, (b) 1.0 M LiPF<sub>6</sub>/DEC 시료, (c) a 스펙트럼에서 1,726.5 cm<sup>-1</sup> 위치의 시간에 따른 등방성 PP 신호, (d) b 스펙트럼에서 1,696.2 cm<sup>-1</sup> 위치의 시간에 따른 등방성 PP 신호 [7].

그림 5(a)와 5(b)는 각각 순수 DEC 및 1.0 M LiPF<sub>6</sub> DEC 용액에서 C=O 신축 진동 모드의 주파수 분해 PP 스펙트럼이다. 양의 부호를 가지는 신호는 앞서 설명한 바닥상태 블리칭(GSB)과 유도 방출(SE)에 의한 기여이며, 음의 신호는 들뜬상태 흡수(ESA)에 의해 생성된다. 그림 5(a)에서 볼 수 있듯이, 양의 GSB 및 SE 신호는 긴 기다림 시간대(약 15ps 이상)에서 국소가 열 효과(local heating effect)에 의해 오염되었다. 따라서 들뜬 상태의 진동 수명을 정확하게 결정하기 위해 음의 ESA 신호에 대해 수치 분석을 수행했다. 그림 5(c)와 5(d)는 순수한 DEC 용매의 C=O 신축 모드(1,726.5 cm<sup>-1</sup>)와 1.0 M LiPF<sub>6</sub> DEC 용액(1,696.2 cm<sup>-1</sup>)의 등방성 IR 펌프-프로브 신호이다. 신호는 단일항 지수 함수 형태를 띄며, 해당 진동 수명은 순수한 벌크 상태의 DEC 분자의 경우 2.1 ps, Li<sup>+</sup>···DEC 복합체의 DEC 분자의 경우 1.1 ps인 것으로 확인되었다.

Li<sup>+</sup> 이온 주변의 용매 동역학에 대한 중요한 단서는 비등방성 IR PP 데이터에서 추출할 수 있다. 자유 DEC 분자의 평균 회전 이완 속도 상수는 1.5 ps인 반면, Li<sup>+</sup>···DEC 복합체의 DEC의 속도 상수는 8.5 ps로 상당히 길다. 이 실험 결과는 Li<sup>+</sup>···DEC 복합체의 유효 부피는 Li<sup>+</sup>이온과 상호작용이 없는 DEC 분자보다 약 5.7배 더 크다는 것을 시사한다.

### 3.2 이차원 적외선 분광법

2D IR 분광학은 대각 위치 및 교차 위치 피크 변화를 통해 다른 주파수를 흡수하는 구조들 간 에너지 교환 및 구조 변경 정보를 직접 제공한다. 특히, 주어진 적외선 흡수 분자는 분자 구조 및 주위 환경에 민감하기 때문에 용액 상에서 화학적 교환 동역학 연구가 가능하다.

그림 6(a)는 1.0 M LiPF<sub>6</sub> DEC 시료에 대해 4개의 서로 다른 기다림 시간( $T_w$ )의 2D IR 스펙트럼을 보여준다. 짧은 기다림 시간( $T_w = 0.3$  ps) 2D IR 스펙트럼에서 대각선 방향으로 신호가 길게 늘어나 있는 것을 보아 자유 DEC 분자 및 Li<sup>+</sup>···DEC 복합체는 모두 다양한(inhomogeneous) 구조를 가지고 있음을 알 수 있다. 기다림 시간이 지남에 따라 피크들은 둥근 모양을 띄게 되고 이는 기다림 시간 동안 서로 다른 분자 구조 간 교환이 있음을 알 수 있다.

이 LIB 전해액의 2D IR 스펙트럼에서 가장 주목할 만한 특징 중 하나는 기다림 시간  $T_w$ 에 따라 교차 위치 피크 세기가 증가한다는 것이다(그림에 검은색 원으로 표시하였음). 이는 Li<sup>+</sup>···DEC 복합체를 형성하는 첫 번째 용매 겹질

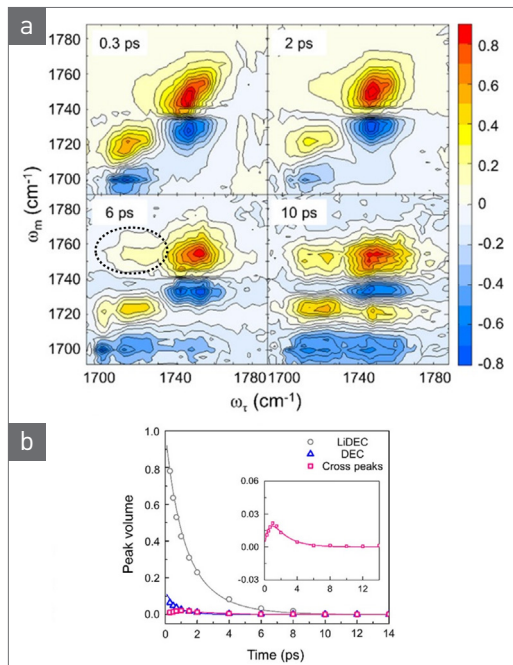


그림 6 ▶ (a) 1.0 M LiPF<sub>6</sub>/DEC 용액의 2D IR 스펙트럼(기다림 시간 : 0.3, 2.0, 6.0, 10.0 ps), (b) 실험적으로 측정된 2D 적외선 스펙트럼에서 얻은 시간 의존 대각 및 교차 위치 피크 신호 크기를 기다림 시간에 따라 도시하였다 [7].

내부 분자와 외부의 DEC 분자 간 화학적 교환에서 비롯될 수 있다. 측정된 2D IR 스펙트럼에 대해 피크 크기 분석(그림 6(b))을 수행하여 교차 위치 피크 세기 변화를 정량적으로 분석하였다. 이를 통해 Li<sup>+</sup>···DEC의 복합체의 형성 및 분해 반응 속도 상수가 각각 17.5와 2.2 ps 임을 알 수 있었다. 그 동안 Li<sup>+</sup>과 용매 간 상호작용이 강해 용매 구조가 굉장히 견고할 것으로 알려져 있으나 이 연구를 통해 용매화 껍질 분자와 벌크 분자 간 교환이 빠르게 일어나고 있음을 알 수 있었다.

## 4. 맺음말

본고에서 LIB 전해질 내 용매 구조와 초고속 용매 동역학을 FT-IR 및 비선형 분광법을 이용하여 어떻게 밝혀낼 수 있는지 보였다. 이러한 연구는 LIB 전해질에 대한 분자적 관점의 이해도를 높일 수 있을 것이다. 특히 Li<sup>+</sup>이온을 둘러싸고 있는 용매들은 그들 간의 강한 상호작용으로 인해 견고한 용매 껍질 구조를 가진 것으로 알려졌으나 새로운 시분해 분광 연구를 통해 기존 가설을 뒤집을 만한 현상을 관찰할 수 있었다.

본 연구를 통해 새로운 분석법을 개발함으로써 그 동안 측정할 수 없었던 현상을 관찰해 전해질에 대한 근본적 이해를 높일 수 있음을 보였다. 또한 시분해 적외선 분광법을 활용한 전해질에 대한 지속적인 연구는 전해질의 미시적 구조 및 동역학 이해를 높여 기존의 시행착오방식의 전해질 개발 방법을 뛰어넘는 효율적 개발 방향을 제시할 수 있을 것이다. 🌟



## 참 / 고 / 문 / 헌

- [1] M. Armand and J. M. Tarascon, *Nature*, 451, 652 (2008).
- [2] K. Xu, *Chem. Rev.*, 104, 4303 (2004).
- [3] K. Kondo, M. Sano, A. Hiwara, T. Omi, M. Fujita, A. Kuwae, M. Iida, K. Mogi, and H. Yokoyama, *J. Phys. Chem. B*, 104, 5040 (2000).
- [4] T. H. Joo, Y. W. Jia, J. Y. Yu, M. J. Lang, and G. R. Fleming, *J. Chem. Phys.*, 104, 6089 (1996).
- [5] S. Woutersen, U. Emmerichs, and H. J. Bakker, *Science*, 278, 658 (1997).
- [6] P. Hamm, M. H. Lim, and R. M. Hochstrasser, *J. Phys. Chem. B*, 102, 6123 (1998).
- [7] K. K. Lee, K. Park, H. C. Lee, Y. H. Noh, D. Kosowska, K. Kwak, and M. Cho, *Nat. Commun.*, 8, 1 (2017).
- [8] J. Lim, K. K. Lee, C. W. Liang, K. H. Park, M. Kim, K. Kwak, and M. Cho, *J. Phys. Chem. B*, 123, 6651 (2019).
- [9] K. D. Fulfer and D. G. Kuroda, *J. Phys. Chem. C*, 120, 24011 (2016).
- [10] M. H. Cho, *Chem. Rev.*, 108, 1331 (2008).
- [11] S. Mukamel, *Annu. Rev. Phys. Chem.*, 51, 691 (2000).
- [12] D. M. Jonas, *Annu. Rev. Phys. Chem.*, 54, 425 (2003).

## 저 / 자 / 약 / 력



성명	이 경 구	
학력	2004년	고려대학교 화학과 이학사
	2006년	고려대학교 화학과 이학석사
	2010년	고려대학교 화학과 이학박사
경력	2010년~2012년	토론토대학교 박사후연구원
	2012년~2013년	LG화학 배터리연구소 연구원
	2013년~현재	군산대학교 화학과 부교수