

## 이원계 금속산화물 촉매가 글리세롤카보네이트 합성에 미치는 영향

백재호<sup>1,2</sup>, 문명준<sup>2</sup>, 이만식<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>한국생산기술연구원 친환경청정기술센터, <sup>2</sup>부경대학교 공업화학과

### The Effects of binary metal oxide catalysts for the synthesis of glycerol carbonate

Jae Ho Baek<sup>1,2</sup>, Myung-Jun Moon<sup>2</sup> and Man Sig Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Green Technology Center, Korea Institute of Industrial Technology [KITECH]

<sup>2</sup>Department of Industrial Chemistry, Pukyong National University

**요약** 본 연구에서는 글리세롤과 우레아를 이용하여 글리세롤카보네이트를 합성하는 반응을 진행하였다. ZnO와 Zn-Al 이원계 금속 산화물 촉매를 제조하고, 제조되어진 촉매를 사용하여 글리세롤의 전환율과 글리세롤카보네이트의 수율을 확인하였고, Al의 첨가에 따른 촉매 특성의 분석과 글리세롤카보네이트 합성반응에서의 역할에 대해 확인하였다. 글리세롤카보네이트 합성 반응에서 ZnO를 단독으로 촉매를 사용한 경우보다 Zn-Al 혼합 산화물을 촉매로 사용하여 반응하였을 때, 부반응이 억제되어 전환율 및 수율이 증가함을 확인하였다.

**Abstract** The glycerol carbonate was synthesized by glycerol and urea using metal oxide catalysts. The physical properties of the prepared metal oxide catalysts were investigated by X-ray diffraction (XRD), specific surface area analysis (BET), field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) and temperature programmed desorption (TPD). In addition, we confirmed the conversion of the glycerol and the yield of the glycerol carbonate according to characteristics of metal oxide catalysts. From XRD and FE-SEM analysis, the crystallite size and crystallinity of metal oxide catalysts decrease with addition of Al. In addition, the Zn-Al mixed metal oxide had higher catalytic activity than the pure ZnO due to decreased side reaction in the synthesis of glycerol carbonate.

**Key Words** : Glycerol, Glycerol carbonate, Catalyst, Zinc oxide, Mixed metal oxide

### 1. 서론

21세기로 접어들면서 원유값의 폭등과 지구온난화 문제로 인해 환경 친화적이며 공해 발생이 적은 바이오디젤의 사용 및 공급이 급증하고 있다. 바이오디젤은 유지인 트리글리세라이드(triglyceride)와 메탄올(methanol)의 전이 에스테르화 반응(transesterification) 후 글리세롤(glycerol)을 분리하여 제조된다. 전 세계적인 바이오디젤의 생산량 증가로 인해 부산물로 생성되는 글리세롤의 공급 과잉으로 이어지고, 이는 프로필렌 글리콜(propylene glycol)이

나 소비톨(sorbitol)보다 더 낮은 가격하락으로 이어졌다. 따라서 바이오디젤 생산시 부수적으로 생산되는 글리세롤의 경우 생산량 급증에 따른 새로운 용도 마련을 위한 많은 연구가 진행되고 있다[1-4].

글리세롤은 산화반응(oxidation), 에테르화반응(etherification), 에스테르화반응(esterification), 전이 에스테르화반응(transesterification), 중합반응(polymerization) 등을 통한 다수의 복합체 제조를 위한 합성 중간체로 사용되어질 수 있으며[5,6], 그 중 중요한 유도체는 화학적 중간체, 첨가제 및 용제로 광범위하게 사용되어지는 글리

본 논문은 지식경제부와 한국산업단지공단의 생태산업단지구축사업 (과제번호: 10FF10023)과 지식경제부의 광역경제권 연계협력사업(과제번호: R0000495)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

\*교신저자 : 이만식(lms5440@kitech.re.kr)

접수일 11년 09월 27일

수정일 (1차 11년 11월 30일, 2차 11년 12월 12일)

게재확정일 12년 01월 05일

세롤카보네이트(glycerol carbonate)가 있다. 이러한 글리세롤카보네이트는 저독성, 저휘발성, 저인화점과 보습성 때문에 친환경 화학산업의 여러 분야에서 수요가 증가하고 있는 실정이다. 글리세롤카보네이트의 주요 용도로는 가스 분리막의 주요성분, 다양한 종류의 물질(코팅, 페인트, 세제 등)들에 대한 용매, 산화와 압력에 대한 내성이 좋아 바이오윤활제 등으로 활용되며, 고가의 글리시돌(glycidol)과 같은 새로운 분자물질의 출발물질로 사용이 가능하다[7-9]. 이러한 글리세롤카보네이트는 글리세롤과 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)에 의한 반응[10], 우레아(urea)에 의한 반응[11,12], 메탄올(methanol), 에틸렌 글리콜(ethylene glycol), 프로필렌 글리콜(propylene glycol)과 같은 알콜카보네이트(alcohol carbonate)에 의한 반응[13]으로 합성되어 질 수 있다. 각각의 방법들에 대하여 많은 연구가 진행되어지고 있으며, 특히 글리세롤과 우레아의 반응에 대한 연구도 많이 이루어지고 있다.

글리세롤과 우레아의 반응에서 높은 수율의 글리세롤카보네이트를 얻기 위한 방법으로 금속산화물 촉매(metal oxide catalyst)나 유기 금속염(organic metal salts)을 사용하여 글리세롤카보네이트를 합성하는 것이 많이 보고되어지고 있다[11, 14-16]. 최근의 연구자들은 루이스산(Lewis acid)의 존재가 cyclic carbonate의 높은 수율을 얻기 위한 중요한 성질이고, ZnO는 그에 대한 최적의 촉매로 이야기하고 있다.

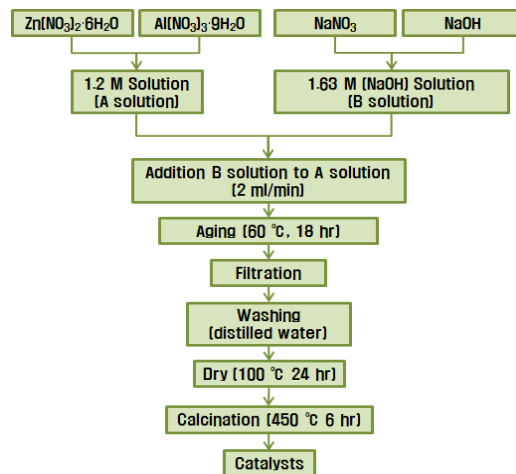
본 연구에서는 글리세롤과 우레아를 이용하여 글리세롤카보네이트를 합성하는 반응에 대하여 이원계 금속산화물 촉매(mixed metal oxide catalyst)를 제조하고, 제조되어진 이원계 금속산화물 촉매를 통해 글리세롤카보네이트를 합성하는 실험을 진행하였다. 이원계 촉매는 Zn과 Al을 이용하여 제조하였으며, Al의 첨가가 글리세롤카보네이트 합성 반응에서의 전환율과 수율의 변화에 미치는 영향에 대한 연구를 진행하였다.

## 2. 실험

### 2.1 촉매의 제조

본 연구에 사용된 촉매는 Zn과 Al의 두가지 성분으로 이루어진 혼합 산화물로 일반적인 공침방법으로 제조되었으며, 자세한 제조방법은 그림 1에 나타내었다. 먼저 zinc nitrate hexahydrate [Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, Aldrich]를 증류수에 금속염의 농도가 1.2 M이 되게 용해시켰다. 그 후 sodium nitrate (NaNO<sub>3</sub>, Aldrich)와 sodium hydroxide (NaOH, Yakuri)의 혼합용액으로 적정하여 ZnO 촉매를

제조하였고, 최종 pH가 6.0이 되게 하였다. Zn-Al 혼합 금속산화물 촉매는 같은 방법으로 하여 Zn/Al의 몰비가 8:2가 되게하여 제조하였다. 금속염이 침전된 용액을 50 °C에서 18시간동안 숙성(aging)시킨 후, 생성된 입자를 필터하고 증류수를 사용하여 알칼리 이온 등의 불순물을 완전히 세척하였다. 이 후 얻어진 입자를 100 °C에서 24시간 건조한 후, 공기 분위기의 450 °C에서 6시간 소성하여 Zn-Al 혼합 산화물 촉매를 제조하였다.



[그림 1] 혼합 산화물 촉매의 제조 방법

[Fig. 1] Overall flow chart for the synthesis of mixed metal oxide catalysts

### 2.2 특성분석

촉매의 결정구조 분석을 위해 X선 회절 분석(XRD : PHILLIPS X'Pert-MPD System)을 행하였으며 40 kV, 30 mA에서 Cu-K $\alpha$  target (wavelength 1.54056 Å)을 사용하여 scan 속도를 5 °/min으로 하여 2 theta값을 5~80 ° 범위에서 측정하였다.

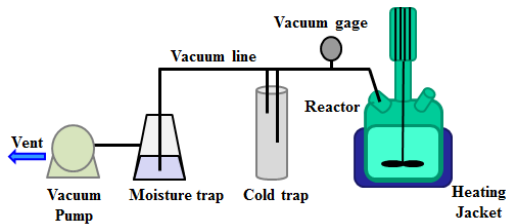
촉매 조성 변화에 따른 비표면적의 변화 및 세공 크기의 분포는 비표면적 측정장치 (ASAP 2010, Micromeritics)를 사용하여 액체 질소 온도인 -196 °C에서 측정하였다. 시료의 전처리에는 질소흡착 전 진공분위기 (약 10<sup>-4</sup> torr)의 200 °C에서 2시간 동안 실시하였으며, 질소 흡착량의 변화를 BET식에 적용함으로써 비표면적을 구하였다.

금속의 조성비에 따른 촉매 입자의 형상 분석을 위하여 전계 방사형 주사전자 현미경(FE-SEM : JEOL. JSM-6700F)을 이용하였다. SEM 측정은 시료를 샘플 cell 위에 고정시킨 후 gold 코팅 과정을 거쳐 배율 10,000배의 배율로 입자의 형상을 관찰하였다.

실험에 사용된 촉매들에 대한 산-염기 특성을 알아보

기 위하여 NH<sub>3</sub> 및 CO<sub>2</sub>의 승온탈착 (TPD : temperature programmed desorption) 실험을 행하였다. 촉매를 200 °C에서 1시간 동안 헬륨을 흘려 전처리한 다음 상온까지 냉각한다. 그 후 상온에서 NH<sub>3</sub> 또는 CO<sub>2</sub> 가스를 30분간 흡착시키고 물리적으로 흡착된 가스를 제거하기 위해 1시간 동안 헬륨을 흘려 퍼지(purge)시킨 후 상온에서 800 °C 온도까지 10 °C/min의 승온속도로 흡착된 가스를 탈착시키며 질량분석기(MS : mass spectrometer, HPR20, HIDEN)로 탈착되는 가스의 량을 측정하였다.

### 2.3 글리세롤카보네이트 합성



[그림 2] 합성장치의 개략도.  
[Fig. 2] Schematic diagram of the experimental apparatus for reaction

본 연구에 사용된 글리세롤카보네이트의 합성장치에 대한 개략도를 그림 2에 나타내었다. 반응 조건은 다른 연구자들에 의해 최적화되어진 조건을 기초로 하여 실험을 진행하였다.[4] 글리세롤카보네이트 합성반응은 유리제의 100 ml round-bottom flask를 사용하였으며, 먼저 반응기에 글리세롤 (glycerol, Aldrich) 0.2 몰과 우레아 (urea, Aldrich) 0.2 몰을 넣고, 일정 속도로 교반시키면서 반응온도인 140 °C로 가열한 후 촉매를 투입하였으며, 촉매는 글리세롤 대비 중량비로 5 wt%를 사용하였다. 반응 중에 생성되는 암모니아 가스는 합성장치에 연결된 진공 line을 통해서 제거되었으며, 반응기내의 진공도는 30 mbar로 일정하게 유지하였다. 총 반응 시간은 5시간으로 하여 글리세롤카보네이트 합성을 완료하였으며, 이후 원심분리기를 사용하여 촉매를 분리 후 가스크로마토그래피(gas chromatography)로 분석하여 글리세롤의 전환율 및 글리세롤카보네이트의 수율을 계산하였다.

### 2.4. 전환율 및 수율의 계산

글리세롤의 전환율 및 글리세롤카보네이트의 수율을 계산하기 위하여 가스크로마토그래피(gas chromatography, Agilent, 7890A)의 불꽃 이온화 검출기(FID:Flame Ionization Detector)를 사용하여 반응 잔류물 및 생성물의 성분을 분석하였다. 컬럼(column)은 HP-INNOWax Capillary

GC Column (30 m X 320 mm X 25 µm)을 사용하고, 시료 주입부(injection)와 검출기(detector)의 온도는 250 °C와 300 °C로 각각 설정하였다. 오븐 온도는 40 °C에서 240 °C까지 10 °C/min로 승온하고 그 후에 240 °C에서 10분간 유지하여 분석을 하였다.

글리세롤카보네이트의 합성 반응 후 글리세롤의 전환율(C, %)과 생성되어지는 글리세롤카보네이트의 수율(Y, %)의 계산은 아래의 식(1)과 (2)를 이용하여 계산하였다 [17]:

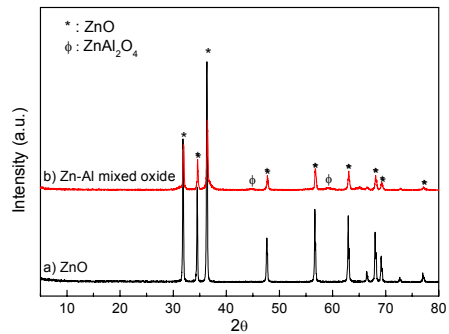
$$C = \frac{100 \cdot M_{0G} - M \cdot X_G}{M_{0G}} \quad (1)$$

$$Y = \frac{M \cdot X_{GC} / MW_{GC}}{M_{0G} / MW_G} \quad (2)$$

여기에서 M<sub>0G</sub>는 초기 글리세롤의 무게(g), M은 반응 후 잔여물의 총 무게(g), X<sub>G</sub>와 X<sub>GC</sub>는 각각 최종 반응 후 잔여물에서 글리세롤의 농도(wt%)와 글리세롤카보네이트의 농도(wt%)를 나타낸다. 그리고, MW<sub>G</sub>와 MW<sub>GC</sub>는 각각 글리세롤과 글리세롤카보네이트의 분자량(molecular weights)을 나타낸다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 촉매 특성 분석



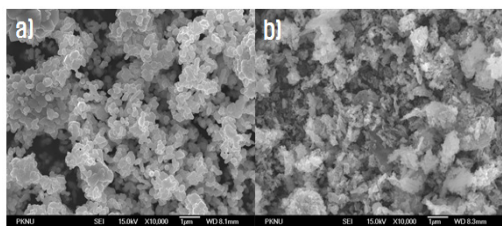
[그림 3] Al 첨가에 따른 XRD 분석 결과 [a] ZnO, b) Zn-Al mixed oxide]

[Fig. 3] X-ray diffraction patterns of catalysts [a] ZnO, b) Zn-Al mixed oxide]

Zn과 Al 혼합 산화물 촉매를 공기 분위기의 450 °C에서 4시간 동안 소성하여 제조하였다. 제조된 촉매의 결정 구조를 확인하기 위하여 XRD로 분석하였으며, 이 결과를 그림 3에 나타내었다. 제조되어진 ZnO 촉매는 육방정

계(hexagonal)의 ZnO 결정임을 확인하였고, Al이 첨가되어지면 ZnO의 결정에 ZnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>의 결정이 나타나기 시작하는 것을 확인하였다. 이는 ZnO에 대해 Al이 첨가됨에 따라 단순 혼합에서 Zn과 Al의 혼합 산화물 형태(ZnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)로 바뀌어져 가고 있음을 알 수 있었다.

ZnO와 Zn-Al의 혼합 산화물 촉매 입자의 SEM 사진 관찰 결과를 그림 4에 나타내었다. 제조되어진 ZnO의 경우가 Zn-Al 혼합산화물 촉매보다 입자의 크기가 더 크고, 결정성이 더 크다는 것을 확인할 수 있었다.



[그림 4] Al 첨가에 따른 촉매의 형상 [a] ZnO, b) Zn-Al mixed oxide]  
 [Fig. 4] SEM image of Zn-Al mixed oxides [a] ZnO, b) Zn-Al mixed oxide]

제조된 Zn-Al 혼합 산화물 촉매의 산-염기적인 특성을 알아보고자 NH<sub>3</sub> 및 CO<sub>2</sub>의 TPD 실험을 한 결과와 비표면적 측정기를 통해 측정한 비표면적의 결과를 표 1에 나타내었다.

[표 1] 촉매의 물리화학적 특성  
 [Table 1] Physicochemical properties of catalysts

Materials	Surface area (m <sup>2</sup> /g)	Acid site density <sup>a</sup> (μmol/g)	Base site density <sup>b</sup> (μmol/g)
ZnO	18	2.5	2.7
Zn / Al = 8 : 2	38.17	9.93	5.41

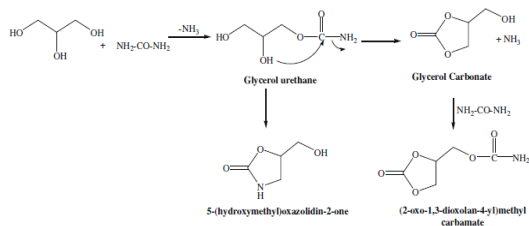
(<sup>a</sup> by TPD of NH<sub>3</sub>, <sup>b</sup> by TPD of CO<sub>2</sub>)

촉매의 산성적인 특성을 파악하기 위한 NH<sub>3</sub>-TPD 결과 NH<sub>3</sub>가 탈착되는 산점의 수는 Al의 첨가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다.

염기인 성질을 파악하기 위한 CO<sub>2</sub>-TPD 결과 제조되어진 촉매가 CO<sub>2</sub>가 탈착되는 염기점을 가지며, Al이 첨가함에 따라 염기점의 수가 증가함을 확인하였다. Al이 첨가되면 산점과 염기점의 수가 증가하고, 이는 촉매의 활성점의 수가 증가한다는 것을 의미한다.

### 3.2 촉매 표면 특성과 반응활성과의 상관관계 글리세롤과 우레아의 반응으로 글리세롤카보네이트가

형성되는 반응과정은 그림 5에 나타난 바와 같이 두 단계의 반응 메커니즘을 따르는 것으로 알려져 있다[19].



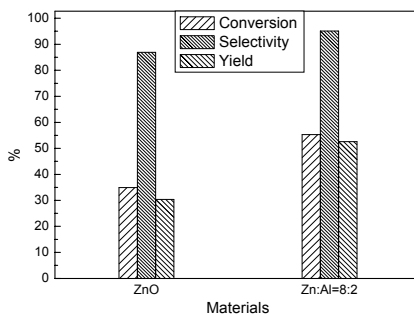
[그림 5] 글리세롤 카보네이트 형성 메커니즘  
 [Fig. 5] The reaction mechanism of glycerol carbonate

첫 번째 단계에서 글리세롤의 카르보닐화가 되는 과정에서 암모니아 가스(NH<sub>3</sub> gas)가 빠져나오면서 글리세롤 우레탄이 형성되는 단계이다. 이 단계는 두 번째 단계보다 훨씬 빠른 반응 속도를 가진다. 두 번째 단계는 글리세롤 우레탄으로부터 암모니아 가스(NH<sub>3</sub> gas)가 분리되어 나오면서 최종 생성물인 글리세롤카보네이트가 형성되는 과정이다. 이 과정에서 반응 진행 중에 암모니아 가스가 원활히 제거되어야 부산물 생성없이 반응이 잘 이루어지는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서 제조되어진 촉매를 사용하여 글리세롤과 우레아를 이용하여 글리세롤카보네이트를 합성한 반응시험 결과를 표 2와 그림 6에 나타내었다.

[표 2] 촉매에 따른 전환율, 선택도, 수율  
 [Table 2] Conversion, selectivity and yield of catalysts

Materials	Conversion (%)	Selectivity (%)	Yield (%)
ZnO	34.9	86.9	30.4
Zn / Al = 8 : 2	55.3	95.1	52.6

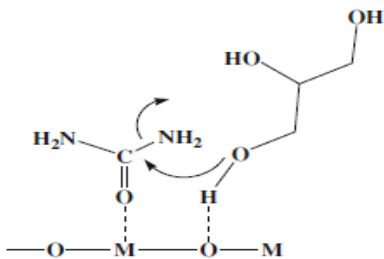


[그림 6] 혼합 금속 산화물 촉매에 따른 전환율, 선택도, 수율  
 [Fig. 6] The conversion, selectivity and yield of products using mixed metal oxide

ZnO 촉매를 사용하여 반응한 경우, 전환율이 34.9%, 수율이 30.4%를 나타내었다. 또한 반응 과정에서 얻고자 하는 최종 생성물인 글리세롤카보네이트 외에 다른 부반응물 생성이 많은 것을 확인하였다. 부반응물이 많이 형성되는 것과 동시에 글리세롤카보네이트로의 전환율이 낮고, 그로 인해 수율이 낮아졌다. 이 원인은 반응이 진행되는 과정에서 생성되어지는 암모니아 가스( $\text{NH}_3$  gas)가 빠져나오는 시간보다 암모니아 가스와 반응 중의 반응 중간체와의 반응되는 시간이 짧아서 다른 부반응물이 많이 얻어졌기 때문으로 판단되어진다. 여기서 생성되어진 부반응물은 그림 5에서 형성되어질 수 있는 것으로 제안되어진 부반응물(5-(hydroxymethyl)oxazolidin-2-one, (2-oxo-1,3-dioxolan-4-yl)methyl carbamate)과 유사함을 확인하였다.

Zn과 Al의 혼합 산화물 촉매에서는 전환율이 55.3%, 수율은 52.6%였다. Al이 첨가됨에 따라 부반응이 억제되고 그에 따라 전환율 및 수율이 증가하는 결과를 보였다.

이러한 수율의 변화를 촉매의 TPD 결과에서 얻어진 산-염기점과 연관지어 생각할 수 있다. 표 1과 표 2의 결과와 같이 글리세롤카보네이트의 수율의 변화와 촉매의 산점과 염기점을 비교하여 보면 Al의 첨가가 이루어지는 것만으로 산점과 염기점의 수가 증가하였으며 산점의 수가 염기점의 수보다 더 많은 것을 확인할 수 있다.



[그림 7] 촉매 표면의 반응 메커니즘  
[Fig. 7] Reaction mechanism on catalyst surface

그림 7에 표시되어진 바와 같이 촉매의 표면에서 글리세롤과 우레아의 반응이 일어나게 되는데, 그 중 촉매 산점이 우레아의 카르보닐기(carbonyl group)의 활성인자로 작용하게 되고, 염기점이 글리세롤의 수산화기(hydroxyl group)의 활성인자로 작용하게 되어, 촉매를 통한 반응이 일어나게 되어 글리세롤카보네이트가 생성되어지는 것으로 알려져 있다[4]. 즉, 글리세롤과 우레아의 반응에서 산점과 염기점이 촉매의 활성점으로 생각되어지며, 촉매의 표면에서 반응이 이루어지는 것으로 사료된다.

글리세롤과 우레아의 반응에서 촉매는 산점과 염기점

의 활성점의 수가 많아야 반응이 원활하게 이루어진다고 사료된다. 본 연구에서도 Al의 첨가를 통하여 산점과 염기점의 활성점의 수를 늘려주었을 때 활성점의 수가 작은 ZnO보다 높은 수율이 나온 것으로 보여진다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 글리세롤과 우레아를 이용하여 글리세롤카보네이트를 합성하는 반응을 진행하였다. ZnO와 Zn-Al 이원계 금속 산화물 촉매를 제조하고, 제조되어진 촉매를 사용하여 글리세롤의 전환율과 글리세롤카보네이트의 수율을 확인하였으며, Al의 첨가에 따른 촉매 특성의 확인과 반응에서 어떤 작용을 하는지 확인하였다. Al이 첨가되어짐에 따라  $\text{ZnAl}_2\text{O}_4$ 가 생성됨을 확인하였다. Zn-Al 혼합 산화물 촉매일 때, 글리세롤과 우레아의 반응에서 글리세롤카보네이트로의 전환율이 55.3%이고, 수율이 52.6%를 얻었으며 부반응이 억제되는 결과물을 얻었다. TPD 측정결과에서 보듯이 글리세롤과 우레아의 반응에서 반응이 잘 진행되기 위해서 가장 중요한 것은 촉매의 산점과 염기점의 활성점 수를 높이는 것이다.

#### References

- [1] M. Pagliaro, et al., "From Glycerol to Value-Added Products", *Angewandte Chemie International Edition*, Vol 46, pp. 4434-4440, 2007.
- [2] J. Bozell, *Oleochemicals as a Feedstock for Biorefinery*, National Renewable Energy Laboratory, August 18, 2004.
- [3] H. Nouredini, W. R. Dailey, and B. A. Hunt, *Production of ethers of glycerol from glycerol the by-product of biodiesel production*, Chemical and Biomolecular Engineering Research and Publications, *Papers in Biomaterials*, 1998.
- [4] M. J. Climent, et al., "chemicals from biomass: Synthesis of glycerol carbonate by transesterification and carbonylation with urea with hydrotalcite catalyst.", *Journal of catalysis*, Vol 269, pp. 140-149, 2010.
- [5] L. Prati, et al., "From Renewable to Fine Chemicals Through Selective Oxidation: The Case of glycerol", *Topics in Catalysis*, Vol 52, pp. 288-296, 2009.
- [6] A. M. Ruppert, et al., "Glycerol Etherification over Highly Active CaO-Based Materials: New Mechanistic Aspects and Related Colloidal Particle Formation",

chemistry - A European Journal, Vol 14, pp. 2016-2024, 2008.

[7] C. H. Zhou, et al., "Chemoselective catalytic conversion of glycerol as a biorenewable source to valuable commodity chemicals", Chem Society Reviews, Vol 37, pp. 527-549, 2008.

[8] A. Murase, JP 6,222,709 (1987).

[9] J. W. Yoo, Z. Mouloungui, A. Gaset, FR 9,800,451 (1998).

[10] M. Aresta, et al., "A study on the carboxylation of glycerol to glycerol carbonate with carbon dioxide: The role of the catalyst, solvent and reaction conditions", J. Mol. Catal. A: Chemical, Vol 257, pp. 149-153, 2006.

[11] S. Claud, Z. Mouloungui, J. W. Yoo, and A. Gaset, US 6,025,504 (2000).

[12] M. Okutsu, and T. Kitsuki, US 6,495,703 (2002).

[13] C. Vieville, et al., "Synthesis of glycerol carbonate by direct carbonatation of glycerol in supercritical CO<sub>2</sub> in the presence of zeolites and ion exchange resins", Catalysis Letters, Vol 56, pp. 245-247, 1998.

[14] M. Okutsu, and T. Kitsuki, EP 11,566,042 (2001).

[15] (a) T. Sasa, and M. Okutsu, JP 2009,067,689 (2009); (b) T. Sasa, and M. Okutsu, JP 2008,285,457 (2008).

[16] M. Okutsu, JP 2007,039,347 (2007).

[17] J. R. Ochoa-Gomez, et al., "Synthesis of glycerol carbonate from glycerol and dimethyl carbonate by transesterification: Catalyst screening and reaction optimization", Appl. Catal. A: General, Vol 366, pp. 315-324, 2009.

**문 명 준(Mtung-Jun Moon)**

[정회원]



- 1983년 2월 : 한국과학기술원(이학석사)
- 1986년 2월 : 한국과학기술원 화학과(이학박사)
- 1987년 5월 ~ 현재 : 부경대학교 공업화학과 교수

<관심분야>  
계면화학, 기능성 재료

**이 만 식(Man Sig Lee)**

[정회원]



- 2003년 2월 : 부경대학교대학원 화학공학 (공학박사)
- 2004년 8월 ~ 2005년 7월 : University of British Columbia Post Doc
- 2005년 3월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 수석연구원, 울산대학교생명화학공학 겸임교수

<관심분야>  
환경, 에너지, 재자원화 기술

**백 재 호(Jae Ho Baek)**

[정회원]



- 2007년 2월 : 부경대학교대학원 공업화학(공학석사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 부경대학교대학원 공업화학(박사과정)
- 2011년 2월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원

<관심분야>  
환경, 에너지, 촉매