

## 안전을 고려한 상용 2,3-Butanediol 탈수반응 시스템 설계

송대성<sup>\*,\*\*,\*†</sup>

\*한경대학교 사회안전시스템 공학부  
17579 경기도 안성시 중앙로 327  
\*\*전남대학교 화학공학부  
61186 광주광역시 북구 용봉로 77

(2020년 3월 24일 접수, 2020년 6월 28일 수정본 접수, 2020년 7월 2일 채택)

## Design of Commercial 2,3-Butanediol Dehydration Reaction System Considering Safety

Daesung Song<sup>\*,\*\*,\*†</sup>

\*School of Social Safety System Engineering, Hankyong National University,  
327 Jungang-ro, Anseong-si, Gyeonggi-do, 17579, Korea  
\*\*School of Chemical Engineering, Chonnam National University,  
77 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju, 61186, Korea

(Received 24 March 2020; Received in revised from 28 June 2020; Accepted 2 July 2020)

### 요 약

본 연구에서는 기존의 2,3-Butanediol (2,3-BDO) 탈수 반응시스템의 문제점을 해결하기 위해 새로운 반응 시스템이 제안되었다. 대기압 근처에서 2,3-BDO 반응물을 반응온도 360 °C 까지 올리기 위해서, 상용공정에서 일반적으로 사용되는 용광로를 사용하게 되면 반응 시스템이 적절히 작동할 수 없다는 것이 확인되었다. 그것은 2,3-BDO 올리고머로 고려되는 물질 때문이다. 그것은 용광로 튜브 안의 막힘, 폭발과 같은 안전 문제 뿐 아니라 반응 시스템의 유지보수의 어려운 문제점을 일으킬 수 있다. 그러한 문제점을 해결하기 위한 방법은 용광로를 대신해 감압운전 하에서 고압스팀을 사용하는 열교환기를 사용해서 반응물의 온도를 낮추고 반응 온도를 낮추는 것이다. 반응 속도론을 사용하여, 반응기의 성능이 감압운전과 더 낮은 온도, 330 °C에서 크게 다르지 않다는 것을 보였다. 이 결과는 왜 새로운 반응 시스템이 제안되었는지를 설명한다.

**Abstract** – In this study, a new reaction system is proposed to solve the problems of the existing 2,3-Butanediol (2,3-BDO) dehydration reaction system. It was confirmed that the reaction system did not work as it should operate properly when using a furnace, which is commonly used in commercial processes, to raise the reactant, 2,3-BDO, to the reaction temperature, 360 °C, at near atmospheric pressure. It is because of the substance considered to be oligomers of 2,3-BDO. It can lead to safety problems, such as blockages inside the furnace's tube and explosions, as well as tricky maintenance issues in the reaction system. To solve it, the temperature of reactant can be brought down by using a heat exchanger with High Pressure (HP) steam instead of the furnace, which has a hot spot problem through the vacuum operation and reduce the reaction temperature. It can be seen that the reactor performance is almost similar under the vacuum operation and the lower reaction temperature, 330 °C, by using a reaction kinetics. This result explains why the new reaction system is proposed.

Key words: 2,3-Butanediol, 2,3-Butanediol dehydration reaction, Reaction system, Reactor performance

### 1. 서 론

#### 1-1. 연구배경

기존의 화석 자원에 대한 의존도를 낮추기 위해 바이오 기반 연료

및 화학물질 생산을 위한 노력이 계속되고 있다[1]. 2,3-Butanediol (2,3-BDO)는 설탕(sugar), 리그노 셀룰로오스 성(lignocellulosic) 폐기물 및 글리세롤(glycerol) 및 합성 가스(syngas)의 발효에 의해 생성 될 수 있는 전형적인 바이오 기반 화학물질 중 하나이고 1,3-Butadiene(1,3-BD), Methyl Ethyl Ketone (MEK) 등과 같은 다양한 유도체 생산에 적용 가능한 플랫폼 화학 물질이다[2,3]. 2,3-BDO에서 1,3-BD와 MEK로의 탈수반응에 대한 연구는 1940년대 이후 여러 연구 그룹에서 수행되었지만, 대부분의 연구는 실험실 규모의 연구로 우수한 성능을 보이는 탈수 촉매 또는 반응조건을 확인하기

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

E-mail: dssong@jnu.ac.kr

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.

위한 연구였고 상용 공정 설계에 대한 연구는 거의 진행되지 않았다.

하지만, 최근 2,3-BDO 탈수공정 상용화를 위한 연구 개발을 위해 amorphous calcium phosphate (a-CP) 촉매 및 반응 속도론[4], 촉매 비활성화[5], 파일럿 규모의 실험 및 반응기 모델[6], 그리고 공정에 대한 개념설계[7,8] 연구가 수행되었고, 해당 기술은 2,3-BDO를 활용한 유도체 생성 연구 중 가장 상용화 가능성이 높은 공정이라고 할 수 있다.

공정 설계에 있어 반응 시스템 설계는 가장 중요한 부분이다. 앞에서 언급한 파일럿 규모의 실험 및 반응기 모델 개발 연구에서 반응기 공급 시스템과 관련된 중요한 사실을 발견하였다. 98.65%의 2,3-BDO를 Hot Spot을 일으킬 수 있는 전기 히터를 이용하여 360 °C 유지 시 배관 막힘을 초래하였다. 반응물인 2,3-BDO를 반응온도(360 °C)까지 올리기 위해 상용공정에서 일반적으로 사용하는 Furnace를 사용할 경우 2,3-BDO의 올리고머(Oligomers)로 간주되는 물질로 인해 반응시스템이 제대로 작동할 수 없다는 사실이다[6]. 개념설계 연구에서도 상압에서 Furnace를 사용하는 반응시스템을 반영하였다[7,8].

이러한 반응시스템의 문제점은 Furnace 내부의 Line 막힘과 같은 공정의 유지보수 문제 뿐 아니라, 심각한 경우 폭발과 같은 안전 문제를 야기할 수 있다[9,10]. 이 문제를 해결할 수 있는 방법 중 하나는 감압운전을 통해 Hot Spot 문제를 가지고 있는 Furnace를 사용하지 않고 스팀(Steam)을 사용하는 열교환기를 이용해 반응물의 온도를 올리고 반응온도는 낮춰서 2,3-BDO의 올리고머 생성을 억제하는 것이다. 본 연구에서는 기존에 개발된 반응 속도론을 이용하여 감압운전 시 반응기 성능에 어떤 변화가 생기는지 확인하고 그 결과를 이용해 안전을 고려한 상용 2,3-BDO의 탈수반응 시스템을 제안하였다.

## 2. 기존 반응 시스템 및 반응 속도론

### 2-1. 기존 반응 시스템

2,3-BDO 탈수공정은 크게 반응기, Quencher, 1,3-BD 회수, 물

제거, MEK 회수 및 폐수처리 부분으로 구성되어 있다. 물을 1.45% 포함하고 있는 2,3-BDO는 360 °C에서 탈수화 되고 기상으로 탈수 생성물이 배출된다. 선행연구에서 제안한 기존 반응 시스템을 Fig. 1에 도시하였다[7].

2,3-BDO 반응물은 반응기(R100) 후단의 생성물과 H100에서 열교환 후 Furnace (FH101)에서 반응온도(360 °C)까지 가열된 후 기상으로 반응기에 들어간다. 이렇게 생성된 생성물은 반응물과 열교환 후 기상과 액상의 생성물 분리를 위해 Quencher로 들어가고, 후단 분리 부분들로 보내지게 된다.

선행연구에서 진행한 파일럿 규모의 실험에서 기존의 반응시스템과 같이 상압에 가까운 압력에서 Furnace를 이용하여, 반응물인 2,3-BDO를 반응온도(360 °C)까지 올리게 되면, Furnace 내부에 존재하는 Hot Spot 등의 고온으로 인해 이므로 반응물이 올리고머로 변해 공정의 유지보수 문제 뿐 아니라, 폭발과 같은 안전문제를 일으킬 수 있다.

### 2-2. 반응 속도론

위에서 언급한 문제를 해결할 수 있는 방법 중 하나는 감압운전을 통해 Hot Spot 문제를 가지고 있는 Furnace를 사용하지 않고 스팀을 사용하는 열교환기를 이용하고 반응 온도를 낮추는 것이다. 하지만 감압 및 낮은 온도로 운전할 경우 반응기 성능의 변화가 일어나 원하는 전환율과 수율을 얻지 못할 수 있다. 따라서 기존에 개발된 반응 속도론을 이용하여 감압 및 낮은 온도로 운전 시 반응기 성능 변화를 확인하고자 한다.

선행연구의 촉매 a-CP를 사용한 2,3-BDO에서 1,3-BD 및 MEK로의 탈수반응 속도론을 사용하였다. 2,3-BDO 탈수반응의 주요 경로는 아래 반응에 의해 설명된다[4].

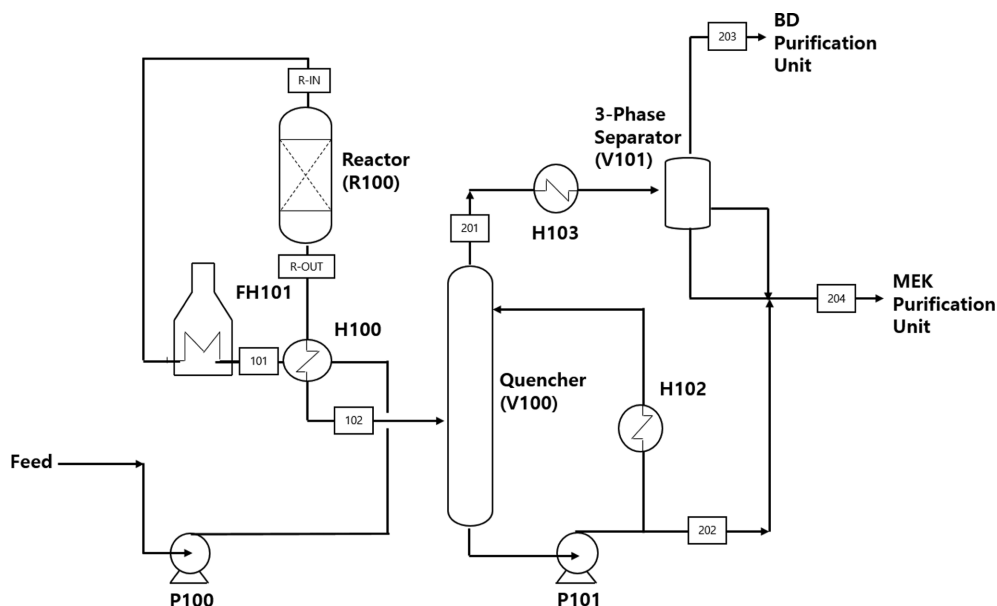


Fig. 1. The existing reactor system process flow diagram [7].

**Table 1. Kinetic parameters of the power law model [4]**

Model Parameter	Value
$E_1$	2.33E+05
$E_2$	2.82E+05
$E_3$	1.93E+05
$E_4$	1.66E+05
$k_{T_{ref},1}$	7.45E-04
$k_{T_{ref},2}$	4.41E-04
$k_{T_{ref},3}$	6.44E-04
$k_{T_{ref},4}$	1.27E-04
$n1, n3, n4$	0.0187
$n2$	0.146



반응 속도식은 아래와 같다.

$$r_i = k_i C_{react,i}^{n_i} \quad (5)$$

여기서

$$C_j = \frac{P_j}{RT} \quad (6)$$

$$k_i = k_{T_{ref},i} \exp\left(\frac{-E_i}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) \quad (7)$$

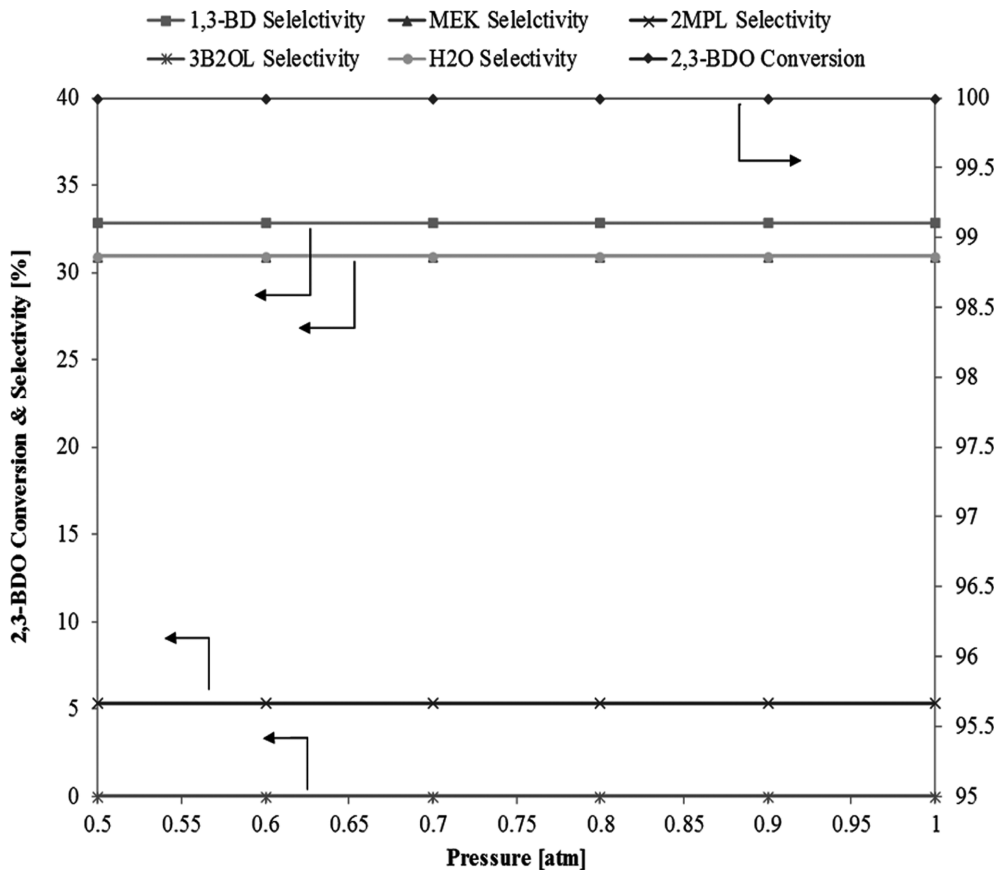
여기서  $i$ 는 반응순서,  $r$ 은 반응속도,  $react$ 는 반응물,  $C$ 는 몰 농도,  $n$ 은 반응차수,  $j$ 는 물질순서,  $P$ 는 압력,  $R$ 은 이상기체상수,  $T$ 는 온도,  $k$ 는 반응속도상수,  $E$ 는 활성화 에너지 그리고  $T_{ref}$ 는 기준온도이다. 반응 속도식에 사용한 파라미터 값은 Table 1에서 확인할 수 있다.

### 3. 연구결과

#### 3-1. 감압운전에 따른 반응기 성능변화

감압운전에 따른 반응기 성능변화를 기존의 반응 속도론을 이용하여 수행하였다. 첫 번째로, 고압(HP) 스팀을 이용해 얻을 수 있는 반응온도 330 °C에서 압력을 0.5~1 atm으로 변경하여 2,3-BDO 전환율, 생성물들의 선택도, 주요 생성물(1,3-BD, MEK)의 수율 변화를 확인하였다. Fig. 2와 3는 그 결과를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 주요 반응 지표 모두가 기존의 반응 시스템의 값과 유사하고 거의 변화가 없이 일정함을 확인할 수 있다.

두 번째로, 약 72% 2,3-BDO 전환율을 보이는 반응온도인 320 °C에서 압력을 0.5~1 atm으로 변경하여 2,3-BDO 전환율, 생성물들의 선택도, 주요 생성물(1,3-BD, MEK)의 수율 변화를 확인하였다. Fig. 4와 5는 그 결과를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 2,3-BDO Conversion의 경우 압력이 1 atm에서 0.5 atm으로 떨어지면서 72.66%에서 71.74%로 약 1.3%가 줄어든다. 반면 생성물들의 선택도는 거의 변화가 없이 일정하다. 주요 생성물의 수율도 2,3-BDO 전환율이 줄



**Fig. 2. Effects of reactor pressure on 2,3-BDO Conversion and selectivity of the major products at 330 °C.**

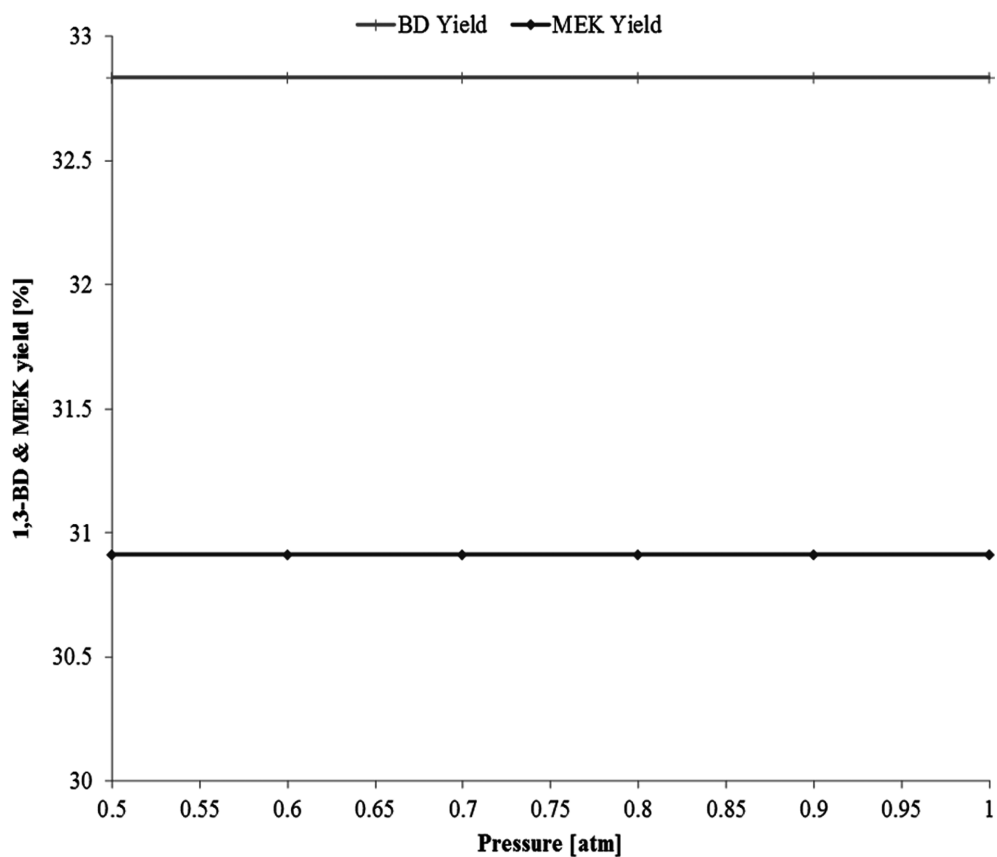


Fig. 3. Effects of reactor pressure on yield of 1,3-BD and MEK at 330 °C.

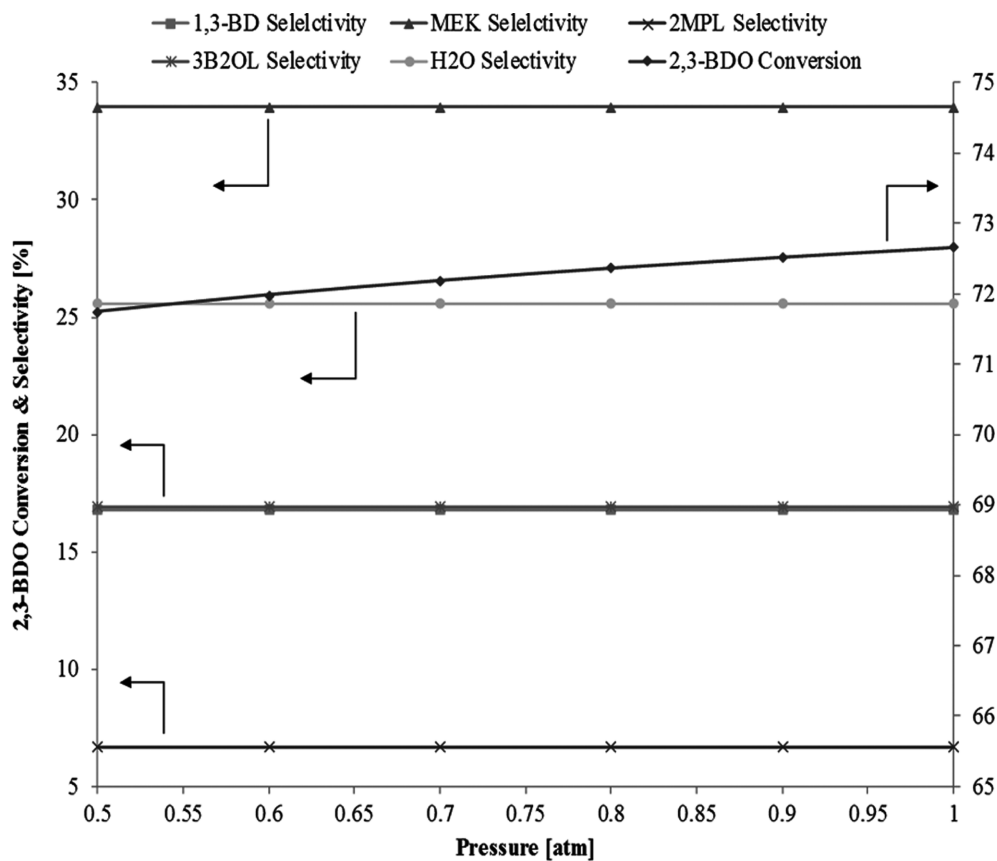


Fig. 4. Effects of reactor pressure on 2,3-BDO Conversion and selectivity of the major products at 320 °C.

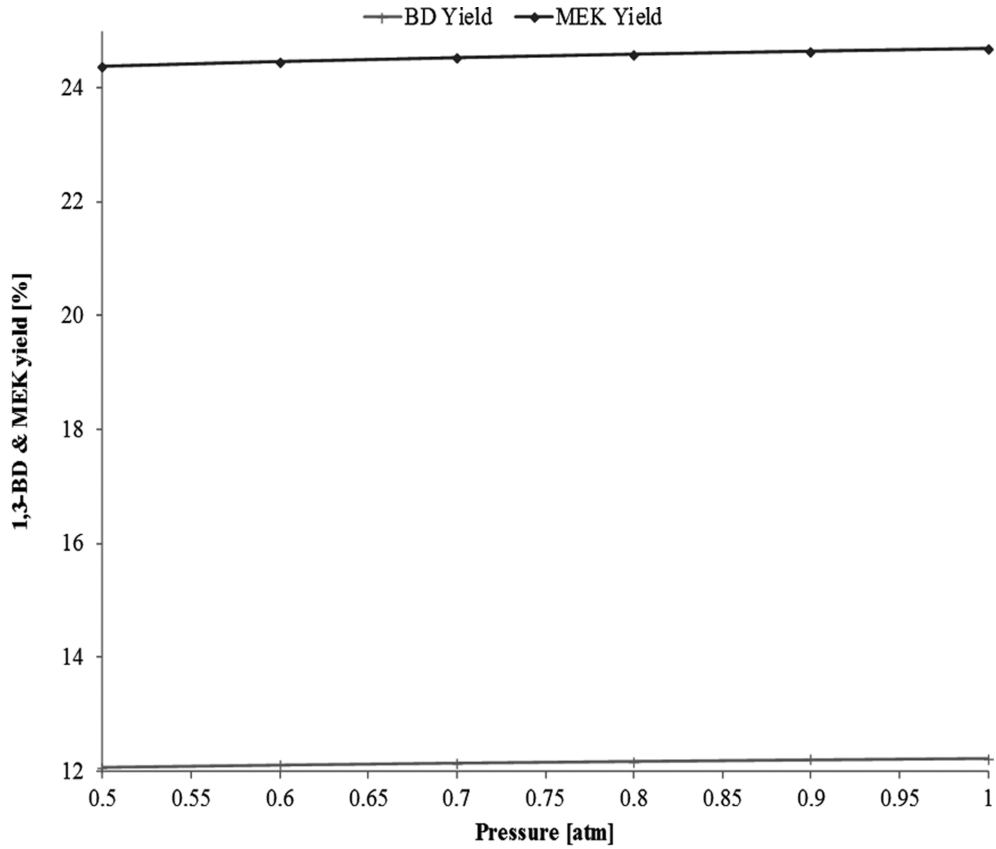


Fig. 5. Effects of reactor pressure on yield of 1,3-BD and MEK at 320 °C.

어든 만큼 약 1.3%가 줄어든다.

주요 반응식의 반응 차수가 0에 가까워 농도(기상에서는 압력)에 따른 반응 속도의 변화가 거의 없기 때문에 위와 같은 결과가 얻어진 것이다. 높은 전환율을 유지한다면 감압운전에 따른 반응기 성능 차이가 크지 않다는 것을 알 수 있다.

### 3-2. 새로운 반응 시스템

위의 결과로부터 반응압력에 따른 반응기의 성능차이가 크지 않다는 점과 공정의 유지보수 문제 뿐 아니라, 심각한 경우 폭발과 같은 안전 문제를 야기할 수 있는 기존의 반응 시스템의 문제를 반영하여 새로운 반응 시스템을 Fig. 6에 제안하였다.

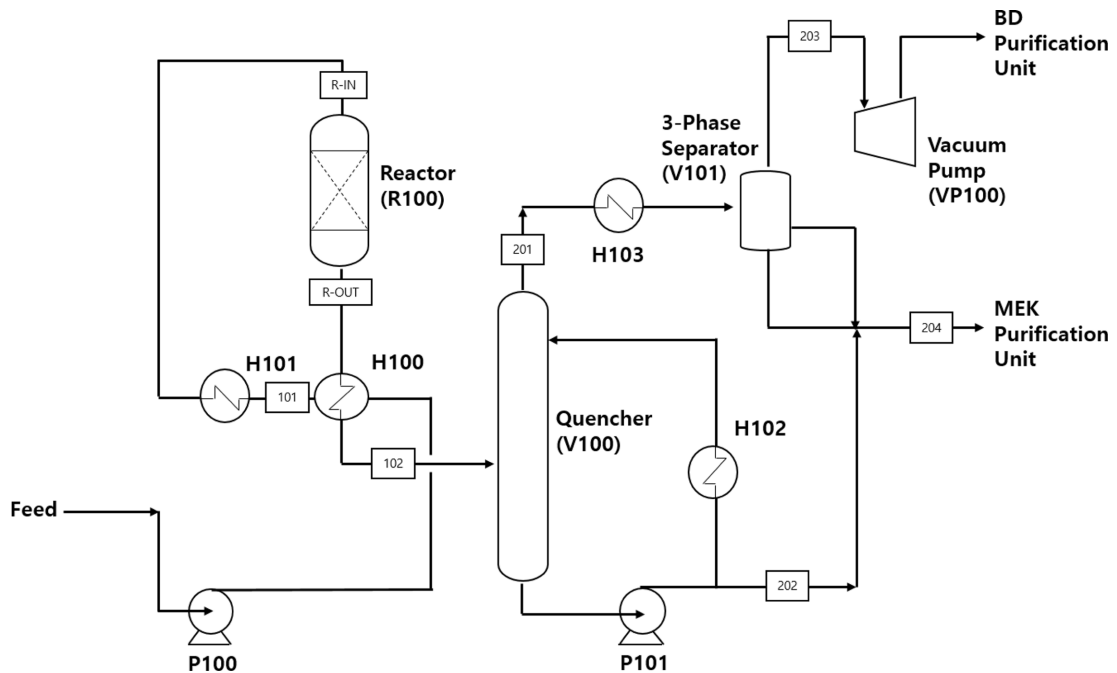


Fig. 6. The new reactor system process flow diagram.

새로운 시스템은 Vacuum Pump (VP100)를 이용해 반응기와 Quencher까지 감압운전을 통해 Hot Spot 문제를 가지고 있는 기존 반응시스템의 Furnace를 사용하지 않고 스팀(Steam)을 사용하는 열교환기를 이용해 반응물의 온도를 올리고 고압 스팀으로 구현이 가능한 반응온도 330 °C에서 반응을 함으로써 2,3-BDO의 올리고머 생성을 억제할 수 있다.

### 3.3. 기존 및 새로운 반응 시스템의 비교

두 시스템의 비교를 위해 기존의 운전조건과 새로운 운전조건의 반응기 결과를 반영하고 시스템의 물질 및 에너지 발란스를 비교하였다. 이를 위한 가정은 아래와 같다.

- 1) 반응기의 성능은 위 반응 속도식을 이용함.
- 2) 반응기 후단의 불순물 함량 변화는 일정함.
- 3) 장비별 압력강하는 가정한 값을 반영함.

아래 Table 2와 3에서 두 Scheme에 대한 물질 및 에너지 발란스를 확인할 수 있다. 반응기의 운전 온도가 360에서 330 °C로 낮아지면

서 1,3-BD의 선택도가 32.3에서 32.2%로 낮아지고 MEK의 선택도는 31.4에서 30.3%로 낮아진다. 온도가 낮아지면서 생산성이 다소 낮아지지만 반응 시스템을 안정적으로 운전할 수 있다는 것이다.

반응이 흡열반응이고 일정 온도 이상일 때 그 성능을 최대로 유지할 수 있다. 따라서 반응기 설계 시 반응기 온도를 일정하게 유지하기 위한 제어 시스템 설계가 꼭 필요하다. 따라서 반응 특성을 반영한 반응기 타입을 결정하고 반응기 성능이 최대가 될 수 있도록 제어 시스템 설계가 필요하다. 또한, 감압 조건의 운전으로 인해 Quencher 후단에서 얻어지는 gas와 액상 Stream(203과 204)의 유량 및 조성의 변화에 따른 후단부에 대한 Scheme Study가 추가로 수행하여 Quencher를 포함한 공정 전체를 대상으로 하는 분리 공정 연구가 필요하다.

반응 시스템의 운전 압력을 감압으로 유지해야 함으로 이로 인한 투자비 및 운전비에 대한 고려가 필요하다. Furnace를 대신하여 감압조건에서 스팀을 사용하기 때문에 두 장비의 가격 비교가 필요하다. 또한, 반응기 및 Quencher가 감압으로 운전으로 인해 기존의

**Table 2. Stream Information on the existing reactor system**

	Units	FEED	101	R-IN	R-OUT	102	201	202	203	204
Mass Flows	kg/hr	12500	12500	12500	12500	12500	5197	7303	4452	8048
Mass Fractions										
1-BUTENE		0.000	0.000	0.000	0.003	0.003	0.007	84.3197 PPM	0.008	212.585 PPM
1,3-BD		0.000	0.000	0.000	0.324	0.324	0.760	0.014	0.847	0.035
2-BUTENE		0.000	0.000	0.000	0.003	0.003	0.007	102.86 PPM	0.008	254.241 PPM
Acetaldehyde		0.000	0.000	0.000	300.487 PPM	300.487 PPM	484.994 PPM	169.165 PPM	507.508 PPM	185.983 PPM
2MPL		0.000	0.000	0.000	0.049	0.049	0.033	0.060	0.022	0.064
MEK		0.000	0.000	0.000	0.314	0.314	0.168	0.418	0.098	0.434
H2O		0.000	0.000	0.000	0.294	0.294	0.025	0.486	0.017	0.448
3B2OL		0.000	0.000	0.000	95.347 PPB	95.347 PPB	12.6066 PPB	154.237 PPB	3.33811 PPB	146.237 PPB
ACETOIN		0.000	0.000	0.000	270.438 PPM	270.438 PPM	5.68145 PPM	458.876 PPM	516.215 PPB	419.733 PPM
2,3-BDO		1.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
HEAVIES		0.000	0.000	0.000	0.012	0.012	1.56475 PPM	0.021	trace	0.019
Pressure	atm	1.0	2.9	2.5	2.4	1.9	1.8	4.4	1.5	4.4
Temperature	C	25.0	196.1	360.0	360.0	180.0	51.9	79.6	40.4	76.9
Mass Enthalpy	kJ/kg	-6060	-5669	-4704	-3842	-4232	581	-9346	1114	-8786

**Table 3. Stream Information on the new reactor system**

	Units	F-FEED	101	R-IN	R-OUT	102	201	202	203	204
Mass Flows	kg/hr	12500	12500	12500	12500	12500	10426	2074	9644	2856
Mass Fractions										
1-BUTENE		0.000	0.000	0.000	0.003	0.003	0.004	1.70198 PPM	0.004	1.58621 PPM
1,3-BD		0.000	0.000	0.000	0.322	0.322	0.386	199.747 PPM	0.418	204.37 PPM
2-BUTENE		0.000	0.000	0.000	0.003	0.003	0.004	2.11263 PPM	0.004	2.03016 PPM
Acetaldehyde		0.000	0.000	0.000	300.487 PPM	300.487 PPM	358.492 PPM	8.86163 PPM	385.924 PPM	12.0455 PPM
2MPL		0.000	0.000	0.000	0.052	0.052	0.062	0.003	0.067	0.003
MEK		0.000	0.000	0.000	0.303	0.303	0.359	0.022	0.385	0.029
H2O		0.000	0.000	0.000	0.304	0.304	0.184	0.906	0.122	0.915
3B2OL		0.000	0.000	0.000	108.193 PPB	108.193 PPB	105.085 PPB	123.823 PPB	110.025 PPB	102.01 PPB
ACETOIN		0.000	0.000	0.000	270.439 PPM	270.439 PPM	78.5913 PPM	0.001	35.7022 PPM	0.001
2,3-BDO		1.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
HEAVIES		0.000	0.000	0.000	0.012	0.012	0.001	0.067	264.559 PPM	0.052
Pressure	atm	1.0	3.1	0.7	0.6	0.5	0.3	4.4	0.2	4.4
Temperature	C	25.0	168.5	330.0	330.0	180.0	51.6	60.0	38.0	53.9
Mass Enthalpy	kJ/kg	-6060	-5739	-4773	-4009	-4329	-3024	-14464	-2257	-14627

반응 시스템과 비교 시, 주요 장비의 크기가 커져 투자비가 증가 및 운전의 어려움이 예상된다. 감압 조건에서 Fuel을 대신 Stream을 사용하고 낮은 온도(330°C)에서 운전하는 것을 반영하여 운전비에 대한 검토가 추가로 필요하다.

#### 4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 기존의 2,3-BDO 탈수반응 시스템이 가지고 있는 문제점을 해결하고자 새로운 반응 시스템을 제안하였다. 파일럿 규모의 실험 및 반응기 모델 개발 선행 연구에서 상압에 가까운 압력에서 반응물인 2,3-BDO를 반응온도(360 °C)까지 올리기 위해 상용 공정에서 일반적으로 사용하는 Furnace를 사용할 경우 2,3-BDO의 올리고머로 간주되는 물질로 인해 반응시스템이 제대로 작동할 수 없다는 사실을 확인하였다. 이러한 문제점은 Furnace 내부의 Line 막힘과 같은 공정의 유지보수 문제 뿐 아니라, 심각한 경우 폭발과 같은 안전 문제를 야기할 수 있다. 이 문제를 해결할 수 있는 방법 중 하나는 감압운전을 통해 Hot Spot 문제를 가지고 있는 Furnace를 사용하지 않고 스팀(Steam)을 사용하는 열교환기를 이용해 반응물의 온도를 올리고 반응온도는 낮춰서 2,3-BDO의 올리고머 생성을 억제하는 것이다.

기존에 개발된 반응 속도론을 이용하여 감압운전 및 반응온도를 낮추어도 높은 전환율을 유지한다면 감압운전에 따른 반응기 성능 차이가 크지 않다는 것을 알 수 있다. 그 이유는 주요 반응식의 반응 차수가 0에 가까워 농도(기상에서는 압력)에 따른 반응 속도의 변화가 거의 없어 위와 같은 결과가 얻어진 것이다.

이러한 결과를 바탕으로 새로운 반응 시스템을 제안하였다. 새로운 반응 시스템은 감압운전을 통해 Hot Spot 문제를 가지고 있는 기존 반응시스템의 Furnace를 사용하지 않고 스팀(Steam)을 사용하는 열교환기를 이용해 반응물의 온도를 올리고 고압 스팀으로 구현이 가능한 반응온도 330 °C에서 반응을 함으로써 2,3-BDO의 올리고머 생성을 억제할 수 있을 것이다. 본 연구에서 얻어진 결과는 향후 상용화 규모의 2,3-BDO 탈수반응기 설계 및 운전 시 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다. 추가적으로 상용 반응기 설계 시 반응기 타입 결정 및 반응기 온도 제어를 위한 제어시스템의 구축이 필요하고 반응기 및 Quencher를 포함한 감압운전에 따른 장치 크기 및 운전 비용에 대한 정량적 예측이 필요하다. 또한, 감압운전에 따른 후단 분리공정 변화를 반영한 연구가 필요하다.

#### 감 사

이 논문은 환경대학교 2019년도 학술연구조성비의 지원에 의한 것임.

#### Reference

1. Bai, Y., Page, S. J., Zhang, J. and Zhao X., "Kinetic Modelling of Acid-catalyzed Liquid-phase Dehydration of bio-based 2,3-Butanediol Considering a Newly Identified by-product and An Updated Reaction Network," *CHEM ENG J*, **389**, 124451-124456 (2020).
2. Lee, S. Y., Kim, H. U., Chae, T. U., Cho, J. S., Shin, J. H., Kim, D. I., Ko, Y., Jang, W. D. and Jang, Y., "A Comprehensive Metabolic Map for Production of Bio-based Chemicals," *Nat. Catal.*, **2**, 18-33(2019).
3. Sun D., Li Y., Yang C., Su, Y., Yamada, Y. and Sato, S., "Production of 1, 3-butadiene from Biomass-derived C4 Alcohols," *Fuel Process. Technol.*, **197**, 106193-106209(2020).
4. Song D., "Kinetic Model Development for Dehydration of 2,3-Butanediol to 1,3-Butadiene and Methyl Ethyl Ketone over an Amorphous Calcium Phosphate Catalyst," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **55**(45), 11664-11671(2016).
5. Song D., "Development of a Deactivation Model for the Dehydration of 2,3-Butanediol to 1,3-Butadiene and Methyl Ethyl Ketone over an Amorphous Calcium Phosphate Catalyst," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **56**(39), 11013-11020(2017).
6. Song D., "Modeling of a Pilot-Scale Fixed-Bed Reactor for Dehydration of 2,3-Butanediol to 1,3-Butadiene and Methyl Ethyl Ketone," *Catalysts*, **8**(2), 1-13(2018).
7. Song, D., Yoon, Y. G. and Lee, C. J., "Techno-economic Evaluation of the 2,3-butanediol Dehydration Process Using a Hydroxyapatite-alumina Catalyst," *Korean J. Chem. Eng.*, **35**(12), 2348-2354 (2018).
8. Song, D., Yoon, Y. G., Seo, S. K. and Lee, C. J., "Improvement of 1,3-Butadiene Separation in 2,3-Butanediol Dehydration Using Extractive Distillation," *Processes*, **7**(7), 1-11(2019).
9. Lee, K. O., Park, J. Y., and Lee, C. J., "Evaluation of a Mitigation System for Leakage Accidents Using Mathematical Modeling," *Korean Chem. Eng. Res.*, **35**(2), 348-354(2018).
10. You, C. and Kim, J., "HAZOP Study for Risk Assessment and Safety Improvement Strategies of CO<sub>2</sub> Separation Process," *Korean Chem. Eng. Res.*, **56**(3), 335-342(2018).