

# 2차전지 용액인 DEC(Diethyl Carbonate) + DMMP(Dimethyl Methylphosphonate)계의 연소특성치 측정 및 예측

장유선<sup>1</sup> · 장유리<sup>1</sup> · 최재준<sup>1</sup> · 전덕재<sup>1</sup> · 김용구<sup>2</sup> · 하동명<sup>2†</sup>

## Measurement and Prediction of Combustion Characteristics of DEC(Diethyl Carbonate) + DMMP(Dimethyl Methylphosphonate) for Secondary Battery Solutions

Y. S. Jang<sup>1</sup> · Y. R. Jang<sup>1</sup> · J. J. Choi<sup>1</sup> · D. J. Jeon<sup>1</sup> · Y. G. Kim<sup>2</sup> · D. M. Ha<sup>2†</sup>

### <sup>†</sup>Corresponding Author

Dong Myeong Ha

Tel : +82-43-649-1321

E-mail : hadm@semyung.ac.kr

Received : July 12, 2023

Revised : August 23, 2023

Accepted : September 5, 2023

**Abstract** : Lithium ions can induce the thermal runaway phenomenon and lead to reignition due to electrical, mechanical, and environmental factors such as high temperature, smoke generation, explosions, or flames, which is extremely likely to create safety concerns. Therefore, one of the ways to improve the flame retardancy of the electrolyte is to use a flame-retardant additive. Comparing the associated characteristic value of existing substances with the required experimental value, it was found that these values were either considerably different or were not documented. It is vital to know a substance's combustion characteristic values, flash point, explosion limit, and autoignition temperature (AIT) as well as its combustion characteristics before using it. In this research, the flash point and AIT of materials were measured by mixing a highly volatile and flammable substance, diethyl carbonate (DEC), with flame-retardant dimethyl methylphosphonate (DMMP). The flash point of DEC, which is a pure substance, was 29° C, and that for DMMP was 65° C. Further, the lower explosion limit calculated using the measured flash point of DEC was 1.79 Vol.%, while that for DMMP was 0.79 Vol.%. The AIT was 410° C and 390° C for DEC and DMMP, respectively. In particular, since the AIT of DMMP has not been discussed in any previous study, it is necessary to ensure safety through experimental values. In this study, the experimental and regression analysis revealed that the average absolute deviation (ADD) for the flash point of the DEC+DMMP system is 0.58 sec and that the flash point tends to increase according to changes in the composition employed. It also revealed that the AAD for the AIT of the mixture was 3.17 sec and that the AIT tended to decrease and then increase based on changes in the composition.

Copyright©2023 by The Korean Society of Safety All right reserved.

**Key Words** : electric vehicles, lithium ion battery, electrolyte, DEC(Diethyl Carbonate)+DMMP(Dimethyl Methylphosphonate) system, combustion characteristics

## 1. 서론

최근 이차전지의 사용량이 증가함에 따라 개발과 연구가 진행되고 있다. 널리 사용되는 리튬이온 배터리는 전자제품, 전동킥보드, 전기자동차 등 수요 증가에

화재나 폭발 사고에 대한 우려가 높아지고 있다<sup>1)</sup>.

리튬 이차전지는 충전 시 과전류로 높은 온도, 연기, 폭발, 및 화염 등의 열폭주(Thermal Runaway) 현상을 일으킬 수 있으며 화재로 이어져 대형사고를 유발하기도 한다<sup>2-3)</sup>. 배터리 화재 발생 시 재발화가 되는 위험성

<sup>1</sup>세명대학교 소방방재공학과 석사과정 (Department of Fire Disaster Prevention Engineering, Graduate School, Semyung University)

<sup>2</sup>세명대학교 보건안전학과 교수 (Department of Health and Safety, Semyung University)

이 있다<sup>4,5)</sup>.

리튬이온배터리의 핵심소재인 카보네이트 유기용매는 고리형인 EC(Ethylene Carbonate)와 선형인 DMC(Dimethyl Carbonate), EMC(Ethyl Methyl Carbonate), DEC(Diethyl Carbonate) 네 가지가 있다.

저온에서의 안전성을 확보하기 위해 점도와 유전율이 높은 고리형과 점도가 낮은 선형을 함께 첨가해 사용한다. 첨가제로는 독성이 낮고 난연성이 뛰어난 IPPP(Isopropylphenyl Diphenyl Phosphate), TPP(Tripheyl Phosphate), TEP (Triethyl Phosphate), DMMP(Dimethyl Methylphosphonate)등이 있다.

Hess 등<sup>6)</sup>은 배터리의 안전성을 높이기 위해 EC, EMC 등 유기용매의 혼합물에 대한 연구를 진행하였다. 그러나 유기용매와 난연제 혼합물에 대한 연구는 부족한 편이다. 따라서 선형인 DEC에 난연제인 DMMP를 첨가함으로써 배터리의 안전성을 높일 수 있다.

본 연구에서는 DEC와 DMMP의 순수물질 및 DEC와 DMMP 혼합물에 대한 인화점과 최소자연발화온도를 측정하였다. 인화점은 ASTM D3278 밀폐계 장치, 최소자연발화온도는 ASTM E659-78 장치를 사용하였다. 폭발한계는 측정된 인화점을 이용하여 계산하였고, 활성화에너지는 측정된 자연발화온도와 발화지연시간에 의해 계산하였다. 측정된 인화점과 최소자연발화온도 그리고 계산된 폭발한계를 문헌값과 비교 고찰하였다. 또한 DEC와 DMMP 혼합물은 질량비에 따른 인화점과 최소자연발화온도를 측정하였고 실험값을 이용하여 다른 질량비에서도 인화점과 최소자연발화온도를 예측할 수 있는 모델을 제시하였다. 본 연구에서 얻어진 순수물질의 연소특성치와 혼합물의 예측 모델을 사용하여 이를 취급하는 공정에서 안전을 확보하는데에 목적이 있다.

## 2. 화학적특성 분석

### 2.1 DEC의 화학적 특성 및 위험물 구분

DEC는 일반적으로 유전율이 높고 용매, 시약 및 연료 첨가제와 화합물을 합성하는 데 사용된다<sup>7)</sup>. 위험물 안전관리법에서는 제4류 위험물 제2석유류 비수용성 액체로 분류되고 산업안전보건법에 의한 공정안전보고서(PSM) 제출 대상 물질이며 폐기물 관리법에 의한 규제는 지정 폐기물로 되어있다<sup>8)</sup>.

### 2.2 DMMP의 화학적 특성 및 위험물 구분

DMMP는 무색 또는 담황색의 투명한 액체이며 높은 인 함량과 뛰어난 난연 성능, 편리한 사용법, 낮은 점

도 등 많은 이점을 가지고 있다<sup>9)</sup>. 위험물안전관리법에서는 제4류 위험물 제2석유류 비수용성 액체로 분류되고 있다<sup>10)</sup>.

## 3. DEC와 DMMP의 연소특성치 분석

### 3.1 DEC의 연소특성치

DEC의 기존 문헌에서 인화점 중 가장 높은값 33°C와 낮은값 25°C는 8°C의 차이를 나타내고 있다. 또한, LEL과 UEL은 하나의 문헌값을 제외하면 동일 값으로, 한가지 문헌값을 인용하고 있음을 알 수 있다. 최소자연발화온도는 가장 높은 값 445°C이며, 가장 낮은 값 334°C로 약 110°C의 차이를 보이고 있다.

### 3.2 DMMP의 연소특성치

DMMP의 기존 문헌에서 인화점은 가장 낮은 온도가 43.3°C이며 가장 높은 온도는 USEPA(미국환경보호청)의

Table 1. Comparison of flash points, AITs and explosion limits of DEC

References	Flash points	LELs-UELs	AITs (°C)
KOSHA <sup>8)</sup>	25	1.4~11.0	445
Ignition <sup>11)</sup>	25	1.7~12.4	334
Sigma <sup>12)</sup>	25	1.4~11.0	-
NFPA <sup>13)</sup>	33	1.4~11.0	445
Alfa Aesar <sup>14)</sup>	33	1.4~11.0	445
Acros Organics <sup>16)</sup>	33	1.4~11.0	445
Guo <sup>17)</sup>	33	1.4~11.0	445
Pubchem <sup>18)</sup>	31	-	-
Fluka Chemie AG <sup>19)</sup>	25	-	-
Industrial Solvents Handbook <sup>20)</sup>	25	-	-
Encyclopedia of Chemical Technology <sup>21)</sup>	31.1	-	-
Chen <sup>22)</sup>	25	-	-
K. -C. Möller <sup>23)</sup>	31	-	-

Table 2. Comparison of flash points, AITs and explosion limits of DMMP

References	Flash points	LELs-UELs	AITs (°C)
KOSHA <sup>10)</sup>	69	-	-
Sigma <sup>12)</sup>	69	-	-
NFPA <sup>13)</sup>	68	-	-
Alfa Aesar <sup>15)</sup>	68	-	-
Acros Organics <sup>24)</sup>	68	-	-
Guo <sup>17)</sup>	69	-	-
Fisher Scientific <sup>25)</sup>	68	-	-
Pubchem <sup>26)</sup>	43.3	-	-
U.S. Department of Health and Human Services <sup>27)</sup>	104.4 (Cleveland open cup)	-	-

104.4°C로 약 60°C의 차이를 나타내고 있다. 그러나 DMMP의 폭발한계와 최소자연발화온도는 문헌들에서 제시되어 있지 않기 때문에 방화 및 방폭의 안전성을 위해서 실증적 연구와 예측 방법에 대한 연구가 필요하다.

#### 4. 실험재료 및 방법

##### 4.1 실험재료

본 실험에서 사용된 DEC와 DMMP의 제조사 및 순도, CAS번호와 UN번호는 Table 3에 나타났다.

Table 3. The table of experimental materials

Components	Companies	Assay (%)	CAS No.	UN No.
DEC	TCI	98	105-58-8	2366
DMMP	Sigma-Aldrich	98	756-79-6	1993

##### 4.2 실험방법

실험에 사용된 인화점 장치는 Koehler사의 ASTM D3278 밀폐식을 사용하였다. 실험방법은 전원을 켜고 시료컵에 시료 2 ml를 주입한 후 시료컵을 닫고 가스를 연결한 후 불꽃을 점화한다. 기대 인화점보다 15°C 낮은 온도 도달 후 인화점을 측정한다. 장치를 사용하여 측정할 때 3회 측정하여 3회 모두 동일한 값이 나오면 실험 종료한다. 3회 측정 값이 동일하지 않다면 5회 반복 측정하여 인화점을 제시한다<sup>28)</sup>.

최소자연발화온도는 Koehler사의 ASTM E659-78를 사용하였다. 예상 기준온도보다 30°C 낮게 설정한 후 둥근 플라스크 내부에 시료를 0.1 ml 넣고 발화지연시간을 측정한다. 10분 동안 관찰 후 발화가 일어나지 않으면 비발화로 간주한다. 프로그램에 발화가 일어나면 10°C씩 증가시키면서 발화 시간을 2초 미만까지 측정한다. 측정된 자연발화온도와 발화지연시간을 이용하여 활성화에너지를 계산할 수 있다<sup>29)</sup>.

### 5. 연소특성치 결과 및 고찰

#### 5.1 DEC의 연소특성치 고찰

##### 5.1.1 인화점과 폭발한계

DEC의 인화점은 29°C로 측정되었다. 문헌들에서 제시된 인화점 중 가장 낮은 값 25°C보다 4°C 높다. 측정된 인화점을 이용하여 폭발하한계를 계산하기 위한 Antoine식은 다음과 같다<sup>30)</sup>.

$$\log P = 4.77616 - \frac{1721.904}{(273.15 + t) - 37.959} \quad (1)$$

여기서  $P$ 는 증기압(mmHg)이며  $t$ 는 측정된 인화점 온도(°C)이다. 본 실험에서 얻은 인화점을 이용하여 폭발하한계(LEL)를 예측한 결과 1.79 Vol.%로 계산되었다. KOSHA, Sigma, NFPA, Alfa Aesar, Acros Organics, Guo에서 제시된 1.4 Vol.%보다 0.39 Vol.% 차이를 보이며 Ignition에서 제시된 1.7 Vol.%보다 0.09 Vol.% 높게 계산되었다.

측정된 인화점을 이용하여 계산된 폭발하한계 값이 문헌값과 일치함으로써 다른 카보네이트 유기용매의 폭발한계 연구에 활용될 수 있다고 본다.

##### 5.1.2 최소자연발화온도

DEC의 최소자연발화온도 실험 결과 410°C로 측정되었다. Fig. 1에 Temperature monitoring software인 CLYTmon 프로그램을 활용한 그래프를 나타내었다.

DEC의 최소자연발화온도 문헌에서 가장 높은 값 445°C보다 35°C 낮으며, 가장 낮은 값 334°C보다 76°C 높게 측정되었다.

DEC의 Table 1에 제시된 최소자연발화온도의 기준 문헌값 중 가장 낮은 값과 가장 높은 값의 차이는 11°C로 신뢰성이 부족하다고 판단된다. 따라서 본 연구에서 측정된 최소자연발화온도 410°C를 이용하여 공정 안전 자료로 적용이 가능하다고 본다.

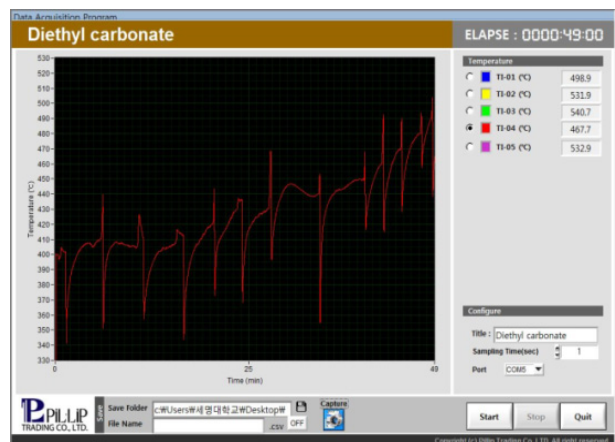


Fig. 1. Ignition temperature inside the flask during an ignition experiment of DEC.

##### 5.1.3 최소자연발화온도와 발화지연시간에 의한 활성화 에너지

본 실험에서 얻은 DEC의 최소자연발화온도와 발화지연시간을 Table 4에 나타내었으며  $\tau_{est}$ 는 추산식에 의해 계산된 발화지연시간이고,  $\tau_{exp}$ 는 실험값이다. 측정된 DEC의 9개 자연발화온도와 발화지연시간을 Arrhenius 형태 식<sup>31)</sup>으로 회귀분석하여 다음과 같은 최적화된 관

계식을 얻었다.

$$\log \tau = -5.67 + 4588.79 \left( \frac{1}{T} \right) \quad (2)$$

실험값과 예측값의 차이를 A.A.D.(Average Absolute Deviation)<sup>32)</sup>로 계산한 결과 0.55 sec이다.

활성화에너지(E)를 계산하기 위해 Semenov<sup>33)</sup>식은 다음과 같다.

$$\log \tau = \frac{52.55E}{T} + B \quad (3)$$

식 (3)을 식 (2)에 대입하여 계산된 활성화에너지는 87.32 kJ/mol이다.

**Table 4.** Comparison of experimental and calculated delay time by AIT for DEC

NO.	T [K]	$\tau_{exp.}$ [s]	$\ln \tau_{exp.}$	$\tau_{est.}$ (Eq. 2)
1	683.15	9.25	2.22	11.16
2	693.15	8.78	2.17	8.93
3	703.15	7.75	2.04	7.18
4	713.15	6.28	1.83	5.82
5	723.15	5.15	1.63	4.74
6	733.15	4.75	1.55	3.88
7	743.15	3.08	1.12	3.20
8	753.15	2.72	1.00	2.65
9	763.15	1.78	0.57	2.20
A.A.D	-	-	-	0.55

## 5.2 DMMP의 연소특성치 고찰

### 5.2.1 인화점과 폭발한계

DMMP는 65°C로 측정되었으며 문헌들에서 제시된 인화점 중 가장 낮은 값 43.3°C보다 21.7°C 높게 측정되었으며 가장 높은 값 104.4°C보다 39.4°C 낮게 측정되었다. 폭발하한계를 계산하기 위해 증기압과 온도의 관계식인 Antoine식을 이용하였다.

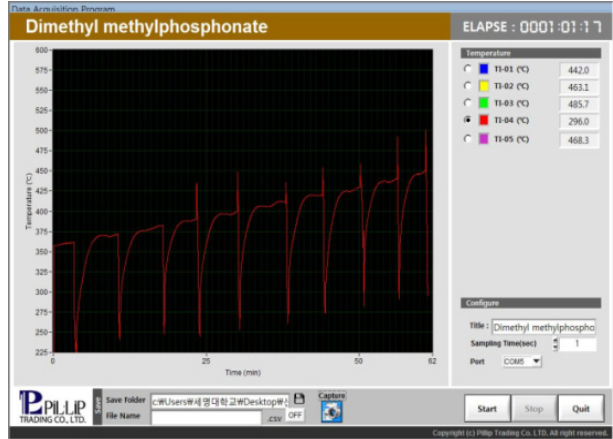
$$\log P = 1.82239 - \frac{444.796}{(273.15 + t) - 224.556} \quad (4)$$

여기서 P는 증기압(mmHg)이며 t는 측정된 인화점 온도(°C)이다. 본 실험에서 얻은 인화점을 통해 폭발하한계(LEL)를 예측한 결과 DMMP는 0.79 Vol.%로 계산되었으며 DMMP의 폭발하한계는 모든 문헌값에서 제시되어 있지 않아 실험값인 0.79 Vol.%를 이용하여 공

정 안전을 확보할 수 있다.

### 5.2.2 최소자연발화온도

DMMP는 거의 모든 문헌에서 AIT가 제시되지 않고 있다. 실험에서 얻은 DMMP의 최소자연발화온도는 390°C로 측정되었으며 Fig. 2에 자연발화 모니터링 그래프를 나타내었다. 본 연구에서 측정된 390°C를 이용하여 공정안전 자료로 활용할 수 있다고 본다.



**Fig. 2.** Ignition temperature inside the flask during an ignition experiment of DMMP.

### 5.2.3 최소자연발화온도와 발화지연시간에 의한 활성화에너지

본 실험에서 측정된 7개의 자연발화온도와 발화지연 시간을 Table 5에 나타내었으며, 최적화된 관계식을 도출하였다.

$$\log \tau = -6.72 + 5029.82 \left( \frac{1}{T} \right) \quad (5)$$

예측값과 실험값의 A.A.D.는 0.16 sec이며, Semenov 식에 의해 계산된 활성화에너지는 95.71 kJ/mol이다.

**Table 5.** Comparison of experimental and calculated delay time by AIT for DMMP

NO.	T [K]	$\tau_{exp.}$ [s]	$\ln \tau_{exp.}$	$\tau_{est.}$ (Eq. 5)
1	663.15	6.99	1.94	7.27
2	673.15	5.56	1.71	5.60
3	683.15	4.81	1.57	4.36
4	693.15	3.28	1.18	3.41
5	703.15	2.80	1.02	2.69
6	713.15	2.01	0.69	2.13
7	723.15	1.73	0.54	1.70
A.A.D	-	-	-	0.16

### 5.3 DEC와 DMMP 계의 인화점과 최소자연발화온도

#### 5.3.1 인화점

DEC와 DMMP의 혼합물에서 DMMP의 조성이 많을수록 인화점이 증가하는 경향을 보였다. 다른 조성에서도 인화점 예측을 위해 실험자료를 2개의 모델로 회귀분석한 결과 다음과 같은 식을 얻었다. 식 (6)에 의한 A.A.D.는 0.59 sec, 식 (7)의 A.A.D.는 0.58 sec로서 식(7)을 이용하여 다른조성에서의 인화점 예측이 가능하다.

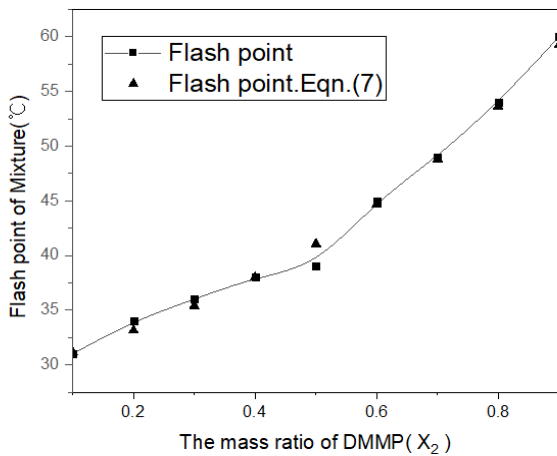
$$T_{fp, MX} = 65.18 - 61.12X_2 + 25.76X_2^2 \quad (6)$$

$$T_{fp, MX} = 65.66 - 68.79X_2 + 45.86X_2^2 - 13.40X_2^3 \quad (7)$$

여기서  $X_2$ 는 DMMP의 질량비이다.

**Table 6.** Experimental and predicted flash point of DEC and DMMP system

Mass ratios		Flash point		
$X_1$	$X_2$	Exp.(°C)	Eqn.(6)	Eqn.(7)
1.0	0.0	29	29.82	29.34
0.9	0.1	31	31.04	31.14
0.8	0.2	34	32.77	33.13
0.7	0.3	36	35.02	35.39
0.6	0.4	38	37.78	38.01
0.5	0.5	39	41.06	41.06
0.4	0.6	45	44.85	44.63
0.3	0.7	49	49.16	48.79
0.2	0.8	54	53.99	53.63
0.1	0.9	60	59.33	59.23
0.0	1.0	65	65.18	65.66
A.A.D		-	0.59	0.58



**Fig. 3.** Comparison of Flash Point prediction curves(Eqn.7) with experimental data for DEC( $X_1$ ) + DMMP( $X_2$ ) system.

#### 5.3.2 최소자연발화온도

DEC와 DMMP의 혼합 조성변화에 따라 최소자연발화온도가 감소하였다가 증가하는 경향을 보이고 있다. 최소자연발화온도 예측을 위해 다음과 같은 최적화된 식 (8)과 식 (9)를 얻었다. 식 (8)의 A.A.D.는 3.36 sec이며 식 (9)의 A.A.D.는 3.17 sec이다.

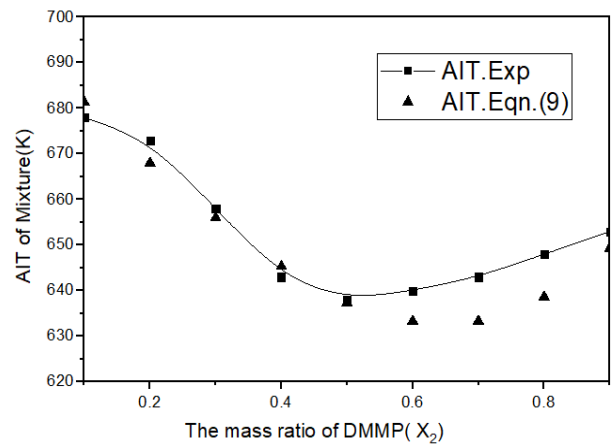
$$T_{AIT, MX} = 661.979 - 102.7695X_2 - 130.7695X_2^2 \quad (8)$$

$$T_{AIT, MX} = 665.3828 - 156.8281X_2 + 272.625X_2^2 - 94.59375X_2^3 \quad (9)$$

여기서  $X_2$ 는 DMMP이다.

**Table 7.** Experimental and predicted AITs of DEC and DMMP system

Mass ratios		AITs			
$X_1$	$X_2$	Exp.(°C)	Exp.(K)	Eqn.(8)	Eqn.(9)
1.0	0.0	410	683	690	687
0.9	0.1	405	678	675	676
0.8	0.2	400	673	663	666
0.7	0.3	385	658	654	657
0.6	0.4	370	643	647	649
0.5	0.5	365	638	643	643
0.4	0.6	367	640	642	640
0.3	0.7	370	643	643	640
0.2	0.8	375	648	647	644
0.1	0.9	380	653	653	652
0.0	1.0	390	663	662	665
A.A.D		-	-	3.36	3.17



**Fig. 4.** Comparison of AIT prediction curves(Eqn.9) with experimental data for DEC( $X_1$ ) + DMMP( $X_2$ ) system.



## 6. 결론

본 연구에서는 리튬이온배터리에 사용되는 DEC와 난연제인 DMMP 각각에 대해 인화점과 최소자연발화온도를 측정하였다. DEC와 DMMP의 순수물질 및 혼합물에 대해 인화점과 최소자연발화온도를 측정한 결과 다음과 같은 결론을 내렸다.

1) Setflash 밀폐식 장치에 의한 DEC의 인화점은 29°C, DMMP는 65°C로 측정되었다.

2) DEC의 측정된 인화점 29°C를 이용한 폭발하한계는 1.79 Vol.%, 문헌에서 제시되지 않는 DMMP의 폭발하한계는 인화점 65°C를 이용하여 0.79 Vol.%로 계산되었다.

3) 측정된 DEC의 최소자연발화온도는 410°C로 기존 문헌값인 445°C보다 35°C 낮게 측정되었다. DMMP는 문헌들에서 제시되지 않고 있으나, 실험을 통해 390°C로 측정되었다.

4) Semenov식을 이용하여 계산된 DEC의 활성화에너지(E)는 87.32 kJ/mol이고 DMMP는 95.71 kJ/mol이다.

5) DEC와 DMMP계의 질량변화에 의한 인화점 예측 모델을 제시하였다.

$$T_{fp, MX} = 65.66 - 68.79X_2 + 45.86X_2^2 - 13.40X_2^3$$

여기서  $X_2$ 는 DMMP의 질량비이다.

6) DEC와 DMMP계의 질량변화에 의한 최소자연발화온도 예측 모델을 제시하였다.

$$T_{AIT, MX} = 665.3828 - 156.8281X_2 + 272.625X_2^2 - 94.59375X_2^3$$

여기서  $X_2$ 는 DMMP이다.

## References

- 1) H. J. Ko and E. J. Lee, "Combustion Characteristics of Ionized Fuels for Battery System Safety", J. Korean Soc. Saf., Vol. 33, No. 1, pp. 22-27, 2018.
- 2) N. S. Choi, E. H. Che, S. S. Kim, S. Narukawa and S. C. Shin, "Design of Non-Flammable Electrolytes for Highly Safe Lithium-Ion Battery", Korean Electrochem, Vol. 12, No. 3, pp. 203-218, 2009.
- 3) H. S. Lee, S. H. Hong, J. H. Lee and M. W. Park, "Analysis of Effect of Surface Temperature Rise Rate of 72.5 Ah NCM Pouch-type Lithium-ion Battery on Thermal Runaway Trigger Time", J. Korean Soc. Saf., Vol. 36, No. 5, pp. 1-9, 2021.
- 4) B. M. Jeong, M. G. Yoon and J. Lee, "A Study on the Hazard Categorization and Loss Prevention Standards of Lithium-Ion Battery Manufacturing Occupancies", Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 19, No. 1, pp. 249-256, 2019.
- 5) N. S. Choi and D. W. Kim, "Ionic Liquid as Electrolyte for Lithium Secondary Battery", NICE (News & Information for Chemical Engineers), Vol. 28, No. 2, pp. 142-152, 2010.
- 6) S. Hess, M. Wohlfahrt-Mehrens and M. Wachtler, "Flammability of Li-Ion Battery Electrolytes: Flash Point and Self-Extinguishing Time Measurements", Journal of The Electrochemical Society, Vol. 162, No. 2, pp. 3084-3097, 2015.
- 7) Benchchem, "<https://www.benchchem.com/>"
- 8) KOSHA, "[https://msds.kosha.or.kr/Diethyl carbonate/](https://msds.kosha.or.kr/Diethyl%20carbonate/)"
- 9) SINOTECH, "<http://www.hasinotech.com/kr/>"
- 10) KOSHA, "[https://msds.kosha.or.kr/Dimethyl methyl phosphonate/](https://msds.kosha.or.kr/Dimethyl%20methyl%20phosphonate/)"
- 11) V. Babrauskas, "Ignition Handbook", Fire Science Publishers, Society of Fire Protection Engineers, 2003.
- 12) R. E. Lenga and K. L. Votoupal, "The Sigma Aldrich Library of Regulatory and Safety Data, Volume I ~ III", Sigma Chemical Company and Aldrich Chemical Company Inc, 1993.
- 13) NFPA, "Fire Hazard Properties of Flammable Liquid, Gases, and Volatile Solids", NFPA 325M, National Fire Protection Association, 1991.
- 14) Alfa Aesar, "[https://assets.thermofisher.com/Diethyl carbonate/](https://assets.thermofisher.com/Diethyl%20carbonate/)"
- 15) Alfa Aesar, "[https://assets.thermofisher.com/Dimethyl methylphosphonate/](https://assets.thermofisher.com/Dimethyl%20methylphosphonate/)"
- 16) Acros Organics, "[https://assets.thermofisher.com/Diethyl carbonate/](https://assets.thermofisher.com/Diethyl%20carbonate/)"
- 17) F. Guo, "Flammability Study on Electrolyte Components in Lithium-ion Batteries Using A Wick Combustion Method", Doctor of Philosophy in Mechanical and Space Engineering, 2019.
- 18) Pubchem, "<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>"
- 19) Fluka Chemie AG, Catalog, CH-9470, Bucks/Switzerland, 1986-87.
- 20) E. W. Flick, "Industrial Solvents Handbook", 3rd Ed., Noyes Data Corp, Park Ridge, New Jersey, 1985.
- 21) Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 3rd

- Ed., John Wiley and Sons, Inc, New York, 1978.
- 22) L. Chen, H. Wu, X. Ai, Y. Cao and Z. Chen, "Toward Wide-Temperature Electrolyte for Lithium-Ion Batteries", *Battery Energy*, Vol. 1, No. 2, pp. 1-24, 2022.
  - 23) K. C. Möller, T. Hodal, W. K. Appel, M. Winter and J. O. Besenhard, "Fluorinated Organic Solvents in Electrolytes for Lithium Ion Cells", *J. Power Sources*, Vol. 97, pp. 595-597, 2001.
  - 24) Acros Organics, "<https://assets.thermofisher.com/> Dimethyl Methylphosphonate"
  - 25) FISHER SCIENTIFIC, "<https://www.fishersci.co.uk/>"
  - 26) Pubchem, "<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>"
  - 27) National Institutes of Health, "Toxicology and Studies of Dimethyl Methylphosphonate", 1987.
  - 28) D. M. Ha, "A Study of the Evaluation of Combustion Properties of Tetralin", *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 33, No. 4, pp. 8-14, 2018.
  - 29) D. M. Ha, "Measurement and Prediction of Fire and Explosion Characteristics of n-Butylacetate", *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 32, No. 5, pp. 25-31, 2017.
  - 30) J. Gmehing, U. Onken and W. Arlt, "Vapor-Liquid Equilibrium Data Collection", DECHEMA, 1980.
  - 31) H. J. Ma, J. H. Kim, S. J. Lee and C. H. Kim, "A Study on Life Cycle Estimation of Battery Using Arrhenius Equation", *KIEE*, Vol. 2013, No. 10, pp. 208-210, 2013.
  - 32) D. M. Ha, "The Measurement and Prediction of the Combustible Properties of Propionic Anhydride", *J. of the Korean Institute of Gas*, Vol. 20, No. 3, pp. 66-72, 2016.
  - 33) N. N. Semenov, "Some Problems in Chemical Kinetics and Reactivity", Princeton University Press, Vol. 2, 1959.