



리튬이온전지의 불꽃방전에 의한 폭발위험성에 관한 연구

*이춘하 · 지승욱 · 김시국

호서대학교 소방방재학과

(2010년 2월 16일 접수, 2010년 6월 9일 수정, 2010년 6월 9일 채택)

A Study on the Explosion Hazard by Spark Discharge of the Lithium-Ion Battery

*Chun Ha Lee · Seung Wook Jee · Shi Kuk Kim

Dept. of Fire and Disaster Protection Engineering, Hoseo University, Korea

(Received 18. February. 2010, Revised 9. June. 2010, Accepted 9. June. 2010)

요 약

본 논문은 리튬이온전지의 불꽃방전에 의한 폭발위험성에 관한 연구로서 휴대용기기의 전원으로 사용되는 리튬이온전지(일반용, 노트북용)를 시료로 선정하고, 폭발성 시험가스인 메탄, 프로판, 에틸렌, 수소를 대상으로 IEC형 불꽃점화 시험장치를 이용하여 불꽃점화실험을 실시하여 불꽃방전에 의한 폭발위험성을 규명하였다. 또한, 사고 시 단락전류에 의한 자체점화 가능성을 확인하고자 열화상카메라를 이용하여 온도변화를 측정하였다. 실험결과 리튬이온전지는 폭발성가스가 존재하는 폭발위험장소에서 사용할 때는 안전에 각별히 주의하여 사용·설계되어야 한다.

Abstract - This paper was studied on the explosion hazard by spark discharge of the lithium-ion battery. The experimental samples were chosen lithium-ion battery(general, notebook) which were used for source of portable equipment. The IEC(International Electrotechnical Commission) type spark ignition test apparatus and experimental gases such as methane, propane, ethylene or hydrogen were used for explosiveness test. It was confirmed through the experiment that the explosion hazard by spark discharge. Also, it was used thermal imager for confirm that spontaneous ignition possibility by short-circuit. As the result, this paper verified that lithium-ion battery should be used and designed by special attention safety in the hazardous zone which is existed explosiveness gas.

Key words : explosion hazard, spark discharge, lithium-ion battery, spark ignition test

1. 서 론

우리나라는 1964년에 최초로 건립된 울산공장에서 LPG를 생산하면서부터 가정에서 가스를 연료로 사용할 수 있게 되었으며, 이때부터 가스의 소비량은 급격하게 증가하였다[1]. 그러나 이로 인해 가스폭발 사고 또한 급격히 증가하고, 사고의 규모도 점차 대형화되고 있는 추세이다[2]. 또한, 가스의 급속한 보급처럼 현대 사회에서는 휴대용 전화기, 계측기, 캠코더, 노트북, 디지털카메라 등 휴대용 전기기기의

급속한 발전과 보급 확대도 빨라지고 있으며, 이로 인해 사용되어지는 2차전지의 수요도 급증하고 있다. 이런 휴대용 전기기기는 폭발성 가스가 존재하는 위험한 장소에서 사용될 때 정상동작 및 사고 시에 발생하는 불꽃 및 단락전류에 의해 점화되어 사고를 일으킬 가능성이 충분하기 때문에 폭발성가스가 존재하는 위험장소에서 사용하는 휴대용 전기기기는 반드시 방폭구조로 만들어야 할 필요성이 있으며, 이들 기기에 여러 가지 방폭구조로 사용되는 전지 또한 점화 가능성에 대한 검토가 이루어져야 한다[3,4]. 가스폭발사고를 방지하기 위한 방폭구조 중에서 본질 안전 방폭구조는 방폭지역에서 정상 시 및 사고 시에

*주저자:leecha@hoseo.edu

발생하는 스파크, 아크 또는 고온부에 의하여 발생하는 전기적 에너지를 제한하여 전기적 점화원의 발생을 억제하고 만약 점화원이 발생하더라도 폭발성 가스분위기에 점화를 일으킬 수 없다는 것이 시험을 통하여 확인된 구조로써 국·내외에서 사용이 증가하는 추세이다[5,6].

따라서 본 연구에서는 국내에서 시판되고 있는 2차전지중에서 가장 많이 사용되고 있는 리튬이온전지(일반용, 노트북용)를 시료로 선정하고, 불꽃점화시험장치를 이용하여 기기의 그룹에 따른 대표적인 폭발성 시험가스인 메탄, 프로판, 에틸렌, 수소를 대상으로 리튬이온전지의 불꽃방전에 의한 폭발위험성을 규명하고자 한다. 또한 열화상카메라를 이용하여 사고 시 단락전류에 의한 리튬이온전지의 온도변화를 측정하여 사고 시 온도상승에 의한 자체점화가 가능 여부를 확인하고자 한다.

II. 실험

2.1. 실험시료

국내에서 시판되고 있는 2차전지중에서 가장 많이 사용되고 있는 리튬이온전지(일반용, 노트북용)를 제조사별로 선정하였다. 또한, 보호회로(PCM: Protec-

Table 1. Specification of lithium-ion battery.

Use	Form	Company	Capacity mAh	Nominal voltage V
General	18650	A1	2200	3.70
	18650	A2	2400	3.70
	18650	A3	2600	3.70
	18650	A1-P	2200	3.70
	18650	A2-P	2400	3.70
	18650	A3-P	2600	3.70
Note book	SSB-T10CLS	A	4400	11.10
	PCGA-BPS2A	B	4400	11.10
	X-note	C	4400	11.10
	SSB-T10CLS	A-P	4400	11.10
	PCGA-BPS2A	B-P	4400	11.10
	X-note	C-P	4400	11.10

tion circuit module)의 유·무에 따라 보호회로를 가진 리튬이온전지의 경우 제조사 옆에 P를 붙여 표기하였다. Table 1은 실험에 사용한 리튬이온전지의 사양을 나타낸 것이다.

2.2. 실험가스

KSC IEC 60079-11에 의거하여 본질안전 방폭형 전기기기를 시험할 때 기기의 그룹에 따른 대표적인 불꽃점화시험의 시험가스를 사용하였다. Table 2는 실험에 사용한 실험가스와 공기와의 혼합비율을 나타낸 것으로 기기 그룹에 따라 각각의 가스별 최소 점화한계 농도를 대상으로 하였다[6].

2.3. 실험장치

Fig. 1은 IEC형 불꽃점화 시험장치로써 기계적으로 동작하는 개폐전극을 사용하여 통전중인 전기회로를 개폐할 때 발생하는 불꽃방전에 의한 가스의 점화 유·무를 시험하는 장치이다. IEC형 불꽃점화 시험장치를 이용하여 리튬이온전지의 불꽃방전에 의한 실험가스들의 점화 유·무를 측정하였다[7].

Table 2. The experimental gases.

Group	Compositions of explosive test mixtures Vol.% in air
I	(8.30 ±0.30) % methane
IIA	(5.25 ±0.25) % propane
IIB	(7.80 ±0.50) % ethylene
IIC	(21.00 ±2.00) % hydrogen



Fig. 1. The IEC type spark ignition test apparatus.

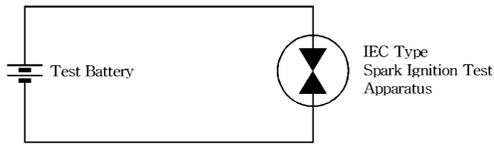


Fig. 2. Circuit diagram of experiment.

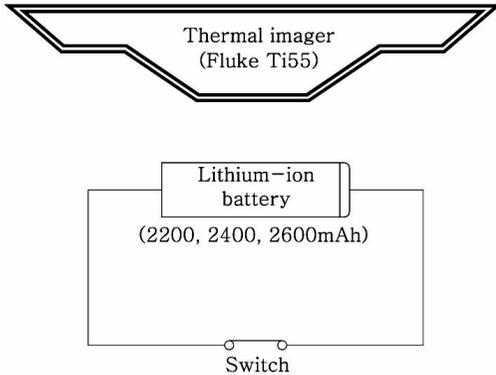


Fig. 3. Schematic diagram of temperature change experiment.

2.4. 실험방법

실험환경은 상온 25 °C, 습도 55 ± 5 %, 대기압(1 atm)의 일반적인 상태에서 실시하였고 모든 실험은 10회 실시 후 평균값으로 나타냈다. 또한, 신뢰성 있는 실험을 위하여 실험 전 불꽃점화 시험장치의 점화감도실험을 실시하여 점화감도를 맞추었다.

2.4.1 불꽃점화실험

Fig. 2와 같이 임의의 회로를 구성하여 불꽃점화 시험장치의 전극간 극성을 각각 400회까지 바꾸어 실험가스들을 대상으로 개폐불꽃을 발생시켜 가스의 점화 유·무를 측정하였다. 리튬이온전지는 KSC IEC 61960(휴대기기용 리튬2차전지)기준에 의하여 완충전 시킨 후 각각 전지의 평균전압을 구하였고, 평균값 이상의 전지만을 선택하여 실험에 사용하였다. 또한, 직렬연결이 가능한 일반용 리튬이온전지는 직렬연결 시 점화되는 전지의 최소 개수를 확인하였고, 직렬연결이 불가능한 노트북용 리튬이온전지는 그 자체의 점화 유·무만을 확인하였다.

2.4.2 단락전류에 의한 온도변화실험

Fig. 3은 단락전류에 의한 온도변화실험의 구성도

를 나타낸 것으로 사고 시 단락전류에 의한 리튬이온 전지의 온도상승에 따른 자체점화 가능성 여부를 확인하고자 열화상카메라(Fluke사 Ti55)를 이용하여 단락전류에 따른 온도변화를 측정하였다. 실험에 사용한 시료는 자체점화 가능성이 가장 높은 보호회로가 없는 일반용 리튬이온전지(용량 2200, 2400, 2600 mAh)를 대상으로 실시하였다.

III. 실험결과 및 고찰

3.1. 불꽃점화실험

3.1.1. 메탄/공기혼합가스

Table 3은 메탄/공기혼합가스에서 리튬이온전지의 최소 점화한계를 나타낸 것이다. 보호회로가 없는 일반용 전지의 경우 전지 2개를 직렬연결 시 점화가 일어났으며, 보호회로가 있는 일반용 전지의 경우 전지 6개를 직렬연결 시 점화가 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 노트북용 전지의 경우도 제조사별 차이점을 발견할 수 없었으며, 보호회로의 유·무에 따라 점화가 발생하는 것을 볼 수 있었다. 보호회로가 없는 노트북용 전지의 경우 점화가 일어났지만, 보호회로가 있는 경우 점화가 일어나지 않는 것을 확인할 수 있었다.

3.1.2. 프로판/공기혼합가스

Table 4는 프로판/공기혼합가스에서 리튬이온전지의 최소 점화한계를 나타낸 것으로 메탄/공기혼합가스와 마찬가지로 보호회로의 유·무에 따라 최소 점화한계에 차이가 발생하는 것을 볼 수 있었다. 보호회로가 없는 일반용 전지의 경우 전지 2개, 보호회로가 있는 일반용 전지의 경우 전지 5 ~ 6개를 직렬연결 시 점화가 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 보호회로가 없는 노트북용 전지의 경우 점화가 일어났지만, 보호회로가 있는 경우 점화가 일어나지 않는 것을 확인할 수 있었다.

3.1.3. 에틸렌/공기혼합가스

Table 5는 에틸렌-공기혼합가스에서 리튬이온전지의 최소 점화한계를 나타낸 것으로 프로판/공기혼합가스와 마찬가지로 보호회로의 유·무에 따라 최소 점화한계에 차이가 발생하는 것을 볼 수 있었다. 보호회로가 없는 일반용 전지의 경우 전지 2개, 보호회로가 있는 일반용 전지의 경우 전지 4개를 직렬연결 시 점화가 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 보호회로가 없는 노트북용 전지의 경우 점화가 일어났지만, 보호회로가 있는 경우 점화가 일어나지 않는 것을 확인할 수 있었다.

Table 3. The minimum ignition limits.
(methane/air mixture gas)

Kind	Form	Average Voltage V	Minimum ignition limits	
			No. of battery	Ignition
General	18650	7.85 V (A1)	2	O
	18650	7.61 V (A2)	2	O
	18650	7.85 V (A3)	2	O
	18650	22.80 V (A1-P)	6	O
	18650	22.81 V (A2-P)	6	O
	18650	22.79 V (A3-P)	6	O
	Note book	SSB-T10CLS	12.33 V (A)	1
PCGA-BPS2A		11.24 V (B)	1	O
X-note		15.20 V (C)	1	O
SSB-T10CLS		12.33 V (A-P)	1	X
PCGA-BPS2A		11.24 V (B-P)	1	X
X-note		15.20 V (C-P)	1	X

3.1.4. 수소/공기혼합가스

Table 6은 수소/공기혼합가스에서 리튬이온전지의 최소 점화한계를 나타낸 것으로 에틸렌/공기혼합가스와 마찬가지로 보호회로의 유·무에 따라 최소 점화한계에 차이가 발생하는 것을 볼 수 있었다. 보호회로가 없는 일반용 전지의 경우 전지 1개, 보호회로가 있는 일반용 전지의 경우 전지 3개를 직렬연결시 점화가 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 보호회로가 없는 노트북용 전지의 경우 점화가 일어났지만, 보호회로가 있는 경우 점화가 일어나지 않는 것을 확인할 수 있었다.

이상과 같이 가스의 위험등급과 보호회로의 유·무에 따라 최소 점화한계(전지의 점화개수)에 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

Table 4. The minimum ignition limits.
(propane/air mixture gas)

Kind	Form	Average Voltage V	Minimum ignition limits	
			No. of battery	Ignition
General	18650	7.78 V (A1)	2	O
	18650	7.60 V (A2)	2	O
	18650	7.78 V (A3)	2	O
	18650	19.00 V (A1-P)	5	O
	18650	22.80 V (A2-P)	6	O
	18650	22.81 V (A3-P)	6	O
	Note book	SSB-T10CLS	12.33 V (A)	1
PCGA-BPS2A		11.20 V (B)	1	O
X-note		15.10 V (C)	1	O
SSB-T10CLS		12.33 V (A-P)	1	X
PCGA-BPS2A		11.20 V (B-P)	1	X
X-note		15.10 V (C-P)	1	X

3.2. 단락전류에 의한 온도변화실험

Fig. 4는 사고 시 단락전류에 의한 리튬이온전지의 온도변화실험의 결과를 그래프로 나타낸 것으로 공칭전압이 3.70 V로 일정한 리튬이온전지의 경우 용량에 상관없이 단락전류인가 시 온도가 급격하게 상승하여 온도가 최대 95 °C 전후로 유사한 온도그래프가 나타났고, 용량이 2200 mAh인 경우 온도 유지시간이 6180 s, 2400 mAh인 경우 6600 s, 2600 mAh인 경우 7380 s로 용량에 따라 최대온도 유지시간에 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 전압과 용량에 의해 온도와 지속시간이 결정되는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 점화온도가 약 100 °C이하인 폭발성가스가 존재하는 장소에서는 사고 시 단락전류에 의한 온

Table 5. The minimum ignition limits.
(ethylene/air mixture gas)

Kind	Form	Average Voltage V	Minimum ignition limits	
			No. of battery	Ignition
General	18650	7.78 V (A1)	2	O
	18650	7.60 V (A2)	2	O
	18650	7.78 V (A3)	2	O
	18650	19.00 V (A1-P)	4	O
	18650	22.80 V (A2-P)	4	O
	18650	22.81 V (A3-P)	4	O
Note book	SSB-T10CLS	12.33 V (A)	1	O
	PCGA-BPS2A	11.20 V (B)	1	O
	X-note	15.10 V (C)	1	O
	SSB-T10CLS	12.33 V (A-P)	1	X
	PCGA-BPS2A	11.20 V (B-P)	1	X
	X-note	15.10 V (C-P)	1	X

Table 6. The minimum ignition limits.
(hydrogen/air mixture gas)

Kind	Form	Average Voltage V	Minimum ignition limits	
			No. of battery	Ignition
General	18650	3.71 V (A1)	1	O
	18650	3.93 V (A2)	1	O
	18650	3.87 V (A3)	1	O
	18650	11.37 V (A1-P)	3	O
	18650	11.37 V (A2-P)	3	O
	18650	11.20 V (A3-P)	3	O
Note book	SSB-T10CLS	12.18 V (A)	1	O
	PCGA-BPS2A	11.10 V (B)	1	O
	X-note	15.00 V (C)	1	O
	SSB-T10CLS	12.18 V (A-P)	1	X
	PCGA-BPS2A	11.10 V (B-P)	1	X
	X-note	15.00 V (C-P)	1	X

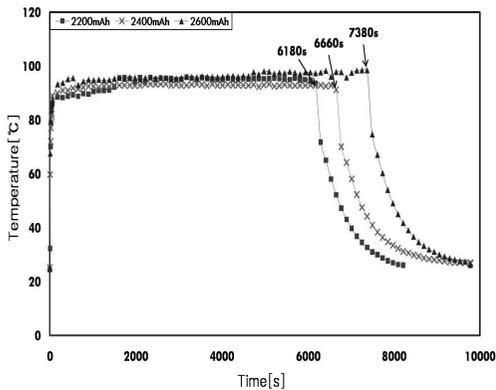


Fig. 4. Result of temperature change experiment.

도상승으로 자체점화가능성이 충분할 것으로 생각 된다.

Fig. 5는 용량 2400 mAh 리튬이온전지의 시간에 따른 온도변화를 열화상카메라 관찰한 것이다. 단락 전류 인가 시 전지의 +극에서 온도가 급격히 상승하여 -극 쪽으로 온도가 서서히 전파되는 것을 관찰할 수 있었다. 이와 같이 +극에서 온도상승이 심한 이유는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 과전류에 의한 전지의 온도상승을 막기 위한 PTC(Positive temperature coefficient) 서미스터가 내장되어 있어, 단락전류 인가 시 +극의 PTC서미스터의 저항이 급격히 증가하여 줄열($H=0.24I^2RT$)에 의해 온도가 급격히 상승하게 되고 그 후 전류를 제한해 주기 때문에 일정온도를 계속 유지하는 것으로 생각된다.

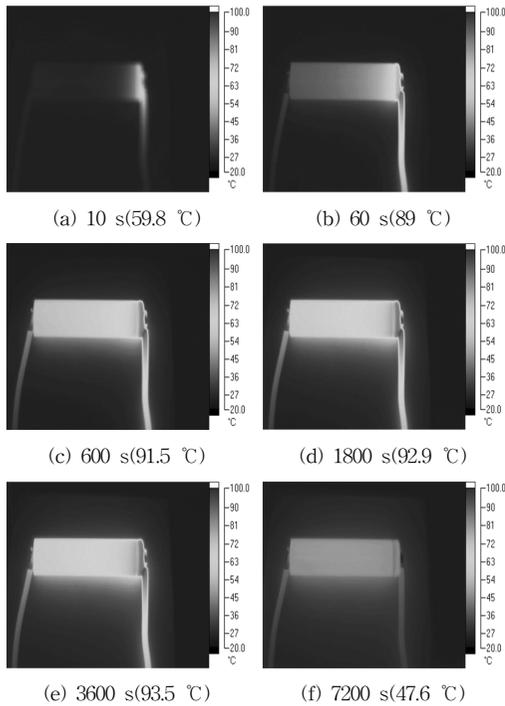


Fig. 5. The temperature change of the lithium-ion battery.(2400mAh)

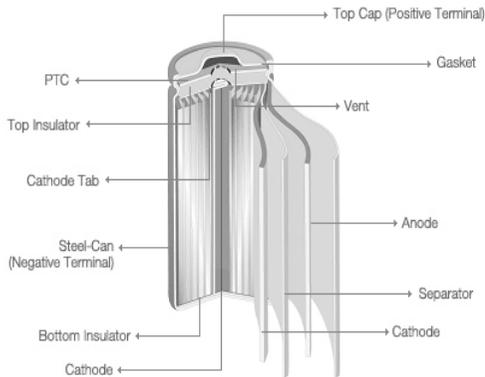


Fig. 6. Structure of the lithium-ion battery[8].

IV. 결론

본 논문은 휴대용기기의 전원으로 사용되는 리튬이온전지(일반용, 노트북용)를 시료로 선정하고 IEC

형 불꽃점화 시험장치를 이용하여 대표적인 기기 그룹에 따른 대표적인 폭발성 시험가스인 메탄, 프로판, 에틸렌, 수소를 대상으로 불꽃점화실험을 실시하여 불꽃방전에 의한 폭발위험성을 규명하였다.

1. 불꽃점화실험결과 폭발성가스 종류별로 최소 점화한계(전지개수)에 차이가 나는 것을 확인 할 수 있었다. 이에 따라 전지를 내장하는 본질안전 방폭형 전기기는 폭발성가스의 종류를 고려하여 사용 가능한 전지 수를 확인한 후 설계되어야 한다.

2. 보호회로의 유·무에 따라 최소 점화개수에 차이가 나는 것을 확인할 수 있었으며, 보호회로가 없는 경우 폭발성가스가 존재하는 폭발위험장소에서 사고 시 안전을 보장할 수 없을 것으로 생각된다. 반면에 보호회로가 있는 경우 과충전, 과방전, 과전류 방지 등의 기능이 있어 폭발위험장소에서 안전하다는 것을 확인할 수 있었다.

3. 단락전류에 의한 온도변화실험 결과 단락전류 인가 시 온도가 급격하게 상승하여 온도가 최대 95 °C 전후로 나타나, 점화온도가 약 100 °C이하인 폭발성 가스가 존재하는 장소에서는 사고 시 단락전류에 의한 온도상승으로 자체점화 가능성을 확인할 수 있었다.

따라서 리튬이온전지의 경우 폭발성가스가 존재하는 폭발위험장소에서 사용할 때는 전지수에 따른 최소점화한계 및 사고 시 단락전류에 의한 온도상승 등을 고려한 후 사용 설계되어야 하며, 2차전지의 보호회로 설치에 관한 법규나 제도적인 마련을 통해 높은 안전성을 확립할 필요가 있다고 생각된다.

감사의 글

“이 논문은 2009년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임”(2009-0174)

참고문헌

[1] 김외곤, “우리나라 가스사고의 문제점 및 그 대책”, 가스산업과 기술지, Vol. 4, No. 1, 75-83, (2001)
 [2] 박교식, 김지윤, “1995~1998년 가스사고 분석 및 사고감소대책 제시”, 한국가스 학회지, 제4권, 제3호, 1-8, (2000)
 [3] 이윤철, 이재환, 임영이, 조성선, “2차전지 최신 기술 및 시장동향”, 전자통신동향분석, Vol. 14,

- No. 6, 99-114, (1999)
- [4] 이춘하 외, “방폭시험 평가 방안에 관한 연구(I)”, 한국기계연구소, (1990)
- [5] 이춘하 외, “방폭시험 평가 방안에 관한 연구(II)”, 한국기계연구소, (1991)
- [6] 한국산업규격, “방폭 전기기계 · 기구- 제11부: 본질안전 방폭구조(KS C IEC 60079-11)”, (2007)
- [7] 이춘하, “건전지의 방전불꽃에 의한 수소-공기 혼합가스의 점화에 관한 연구”, 消防技術 54, 14-20, (1998)
- [8] LG화학 홈페이지, <http://www.lgchem.co.kr>