

Li-Ion전지 Pack의 안전설계

(주)일본IBM
Portable Systems
제4선진제품개발
三戸 敏嗣

Note PC용 Li-Ion전지 Pack의 안전설계

1. 배경

Note PC에 있어서 Li-Ion은 가격이 비교적 비싸지만 경량, 충전감각과 사용시간이 비례하는 등의 이점이 User로부터 호평을 얻어 점차 사용비율이 높아지고 있다. 성능향상뿐 아니라 Cost 저감도 진행되어 양산시 18650 단전지 1Cell의 시가는 약 \$5(¥550) 정도이다. 또한 한정된 Maker로 수요를 충분히 만족시키지 못하는 생산수량 때문에, 신규참여하는 Maker의 증대와 각사의 증산에 힘입어 공급이 증가하고 많은 기기 Maker와 누구라도 사용할 수 있는 시대가 되어 가고 있다. 게다가 CoO₂ Graphite로 1.5Ah, 325Wh/L의 용량이 표준이 되고 연내에는 1.6~1.7Ah가 실현되며 더욱이 Ni酸과 Sn Amolphos를 채용하여 2.0Ah에 400Wh/L이상의 전지가 양산준비중이다. 향후 용량이 적은 전지는 더욱더 가격이 하락하며 한편으로는 고용량화가 진행되어 기술유무로 Maker도 차별화되는 상황이다. 그러나 기본적인 전지구조, 구성은 동일하여 가연성 유기용매를 사용하는 점과 과충전,과방전 보호회로(Safety Unit)를 사용하는 점에는 변함이 없다. 또한 정전압충전이 가능한 특성 때문에 단순한 충전기 구성이 가능하여 Set Maker로부터 공급되는 정품 충전기 이외의 충전기에 의한 과충전사고도 발생되고 있다. 또한 당사에서도 몇몇 Li-Ion Pack 개발중에 얼마간의 Trouble을 경험했다. 금번에는 Note PC 개발경험으로부터 Li-Ion 전지 Pack의 안전성에 대하여 종합하여 서술한다.

2. Note PC의 전지에

ThinkPad의 경우 기종별로 Li-Ion전지가 분류되어 사용된다.

- 최고 기종 : ThinkPad 760/765
- 보급 기종 : ThinkPad 310/380
- 경량박형기종 : ThinkPad 560/535

특수한 경우를 제외하고는 최고기종에는 최신기술과 최고 Energy Density의 전지, 보급기종에는 Energy Density뿐 아니라 Cost Performance도 우수한 전지, 경량박형기종에는 작은 Size에 중량 Energy Density가 우수한 전지를 선택한다. 기종에 따라서는 전지의 Grade up이 가능한 설계를 요구하는 경우도 있다. 이러한 조건들에 따라 ThinkPad에는 Li-Ion 전지가 최고기종과 경량박형기종에, 보급기종에도 상위 Model에 사용된다.

ThinkPad Battery 97

Model	Chemistry	Size	Voltage	Capacity
ThinkPad 760	Li-Ion	17500	10.8V	3.0Ah
ThinkPad 560	Li-Ion	17500	10.8V	2.2Ah
ThinkPad 535	Li-Ion	17500	10.8V	2.2Ah
ThinkPad 380	Li-Ion	18650	10.8V	2.6Ah
	Ni-MH	4/3A	8.4V	3.5Ah
ThinkPad 310	Ni-MH	4/3A	10.8V	3.5Ah

<표.1> '97 ThinkPad 전지

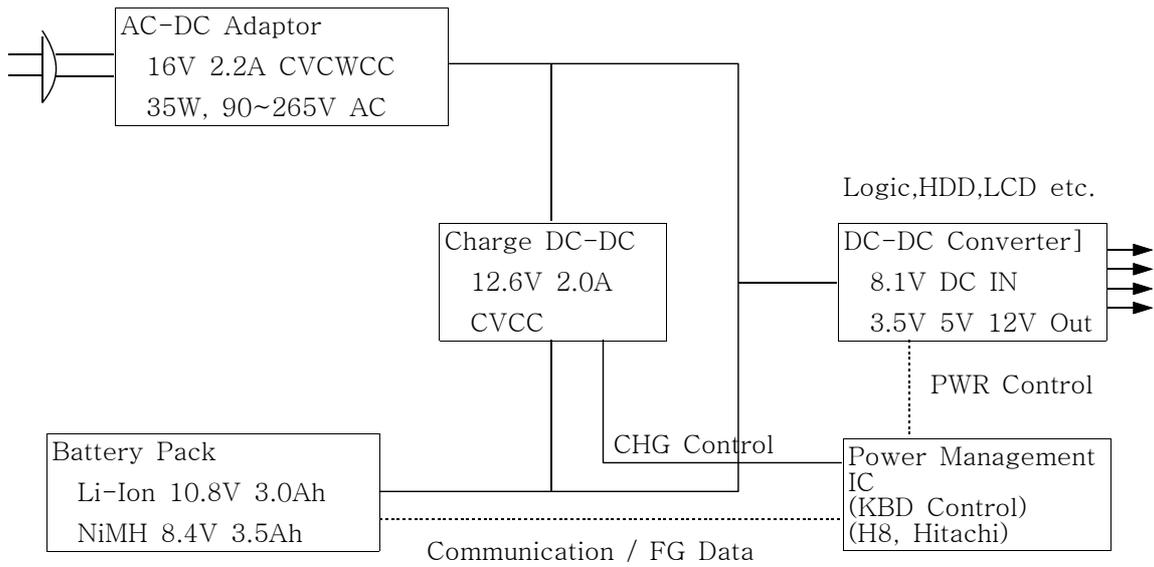
3. 전지의 안전성 규격

Li-Ion 2차전지에 관한 국제적인 공업규격은 아직 제정되어 있지 않다. 기본적으로 UL1642를 사용하고 일본의 축전지공업회(SBA)의 Li-Ion 2차전지 안전성평가기준 Guide Line을 모두 채용하고 있다. 매우 잘 정리된 Guide Line이기는 하지만 설명중에 끊어진 것처럼 단전지 대상으로 되어 있기 때문에 실제의 Pack, 기기설계에 있어서는 충분한 내용은 아니다. Note PC 본체는 IEC950을 사용하지만 Li-Ion 전지 Pack에 관한 구체적인 서술은 없다. 그러나 Energy Contained Device라 하여 일부부품은 특별히 취급을 한다. 지금의 각종 경험에서 2차전지 Pack은 2중보호를 기본으로 한 100V/200V와 동일한 위험전압과 동등부품으로 취급한다. 기본적 사고는 1개의 부품이 파손되어도 다른 하나의 부품이 보호하는 구조의 설계이다. 예를들면 Thermostat이 파손되어도 직렬접속된 Poly Switch가 과전류를 보호하는 것과 총방전제어 FET가 단락되어도 다른 하나의 과전압 IC가 동작하는 것이다. 전지내부에도 보호장치가 있지만 이것은 외부회로에 의해 보호가 되지 않았을 경우의 최종적 보호장치로 적극적으로 신뢰할 수 있는 Pack의 설계에 있어서는 동작불가한 것으로 간주한다.

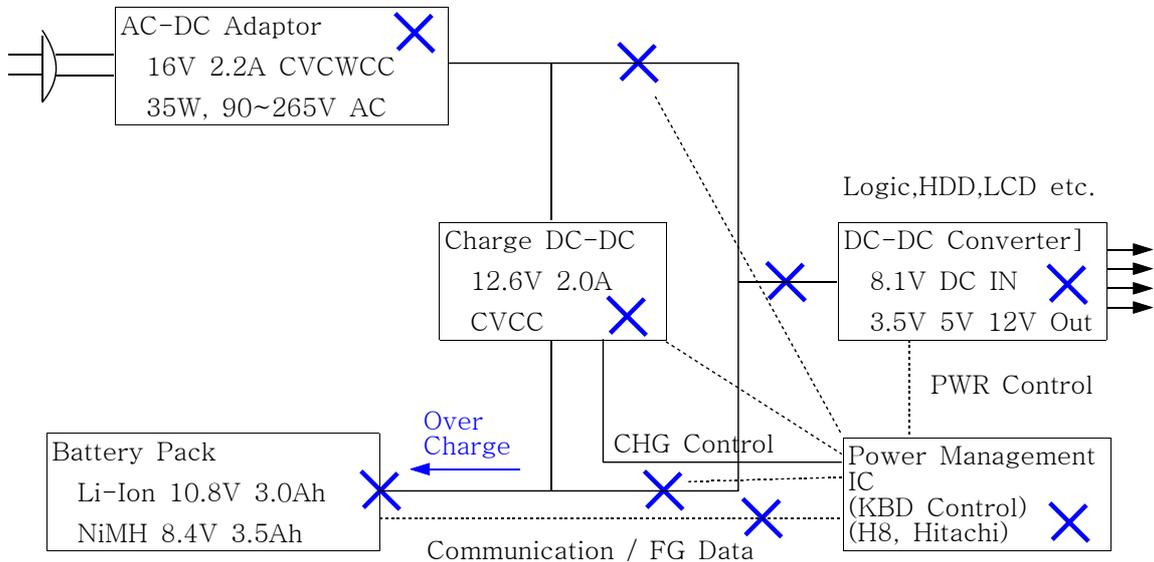
4. Li-Ion전지 Pack의 안전설계

94년 12월 개발중에 지금까지의 NiCd/NiMH 전지의 경험을 근본으로 설계한 Li-Ion 전지 Pack이 실온, 만충전상태 보존중 자연발열이 일어나 Case가 녹는 사고가 발생하였다. 전지 Maker에 있어서는 처음 있는 경험으로 철저한 원인규명, 재현실험, 대책을 수립, 실시하고 또한 동시에 타사의 Li-Ion 전지와 Pack도 Test 하였다. 이러한 Test의 결론은 Li-Ion 전지는 지금까지의 NiCd, NiMH 전지와는 다른 매우 어려운 전지라는 점이었다. 해석의 결과 최종적 원인은 전지자체가 아닌 보호회로 기판상의 누설전류가 원인으로 추정되어 가능한 각종대책을 추가하여 95년 5월에 발표, 출하한 것이 ThinkPad 755CX이다. 게다가 각사의 전지구조와 특성, 안전변, 전류차단기구의 상이점뿐 아니라 전지 안전성에도 상당히 다른점이 있다는 것을 알았다. 또한 안전회로의 설계상이점도 알게 되었다. 이러한 작업을 통하여 전지 Cell만의 안전성뿐이 아닌 총방전 System 전체를 검증하고 신중히 설계할 필요가 있다는 것을 통감하였다.

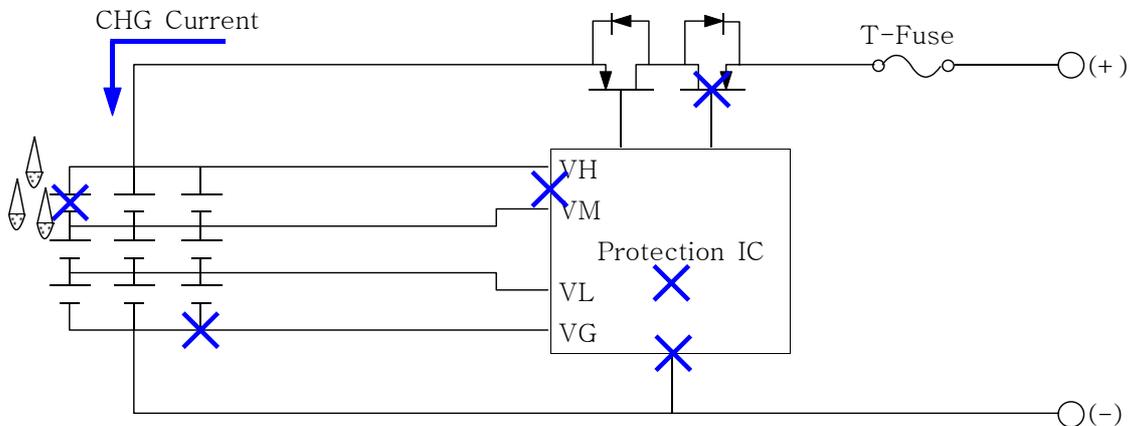
- 1) 충전회로
- 2) 방전회로
- 3) 보호회로 IC, 부품
- 4) 단전지의 안전성 평가
- 5) Pack 조립공정
- 6) Case 설계
- 7) System의 동작조건
- 8) 품질관리
- 9) 사용부품, 재료
- 10) 전지 Pack의 평가



< 그림.1 > Note PC 전원 System 예



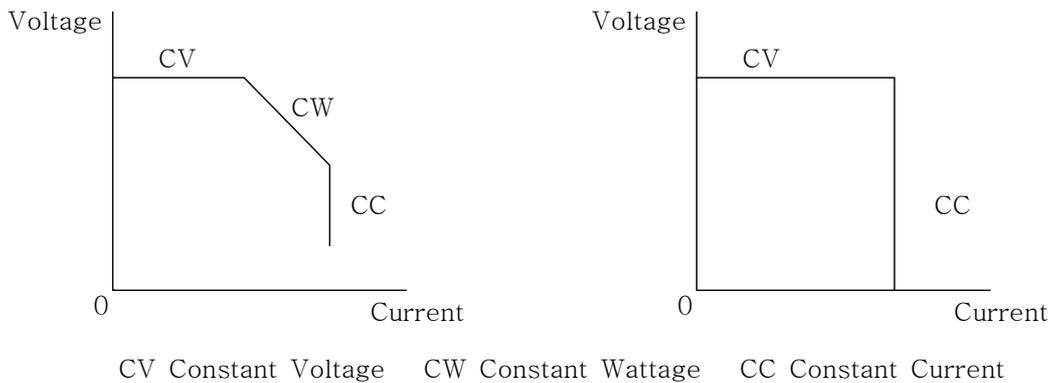
< 그림.2 > 추정되는 고장개소



< 그림.3 > 추정되는 전지 Pack 내부의 고장

1) 충전회로

AC-DC Adaptor, DC-DC 충전회로에 있어서 하나의 부품이 파손(단락, 개방)된 경우에 흐르는 최대전류, 인가된 최대전압을 상정한 Test를 실시할 필요가 있다. 간단히 말하면 AC-DC Adaptor의 출력을 직접, 안전회로, 안전소자를 제거한 Pack에 인가한다. Adaptor의 출력특성에 따라 다르겠지만 전지는 Adaptor의 출력전류에 의해 과충전된다. 단전지와는 달리 전지상호간의 온도상승 영향에 의해 전지는 임계온도점을 넘을 가능성이 높게된다. 전지내부가 약 140℃전후의 임계온도를 초과하게 되면 전지 내, 외부의 보호기능으로는 반응을 제어할 수 없으므로 전지는 파열하게 된다. 최근에는 Air Line Adaptor라는 항공기기에 사용되는 Adaptor Service가 미국을 중심으로 시작되고 있다. DC 입력 Connector만 적합하다면 어떤 전압, 전류, 전력의 Adaptor가 삽입되었는지 알수 없다. 특히 Li-Ion 전지는 3, 4 직렬구성이 있어 15V 또는 20V 전후 전압의 Adaptor를 사용하는 경우가 많다. 저전압 기종에 고전압의 Adaptor가 삽입되면 문제가 발생할 가능성이 있다.



< 그림.4 > AC-DC Adaptor 출력예

2) 방전회로

Note PC에 있어서 전지는 과충전이 되는 사용 Mode는 없다. 그러나 PCMCIA Card를 삽입하여 Suspend 상태로 장기간 보존한 경우등에 전지 Pack은 과방전되는 경우가 있다. 전지의 용량이 커서 이를 초과한 적은 없지만 Suspend 전류도 가능한 적게 하는 노력이 필요하다. 현재 통상 50~100mW 정도이다. 동작시간은 짧게 되지만 Suspend 상태에 들어가는 전압을 약 3.2~3.3V 정도 이상으로 높게 설정함으로써 약 數週간 System은 Suspend 상태를 유지할 수 있다. 전지의 과방전 보호회로가 동작하지 않는 시간이 길어지게 되면 전지는 비교적 단시간에 급속 재충전을 시작하는 것이 가능하여 전지가 충전되지 않는다는 Claim은 줄어들게 된다. 또한 DC-DC Converter의 Power off시에 누설전류를 가능한 적게 하는 것도 중요하다. 과방전 보호회로는 약 2.5V/Cell 이하에서 동작하고 회로의 누설전류는 수십 μ A이하인 것이 바람직하다. Li-Ion 전지는 과방전 보호회로를 동작시키지 않고 비교적 높은 전위로 유지하는 것이 가능하다면 Trickle 충전전류로 약 15분 이내에 급속충전 가능전압까지 복귀시키는 것이 가능하여 전지의 충전불가 문제는 없어진다.

3) 보호회로 IC, 부품

Li-Ion 전지의 개발초기와는 달리 Mitsumi, Seiko, Murata 등 많은 Maker에서 전용 IC가 발매되고 있다. 사용되는 전지의 특성에 맞는 보호전압, 검출시간등을 선택할 필요가 있다. 기본적으로는 보호IC와 P-Ch 또는 N-Ch FET를 사용한 회로가 사용된다. 회로는 1차 보호IC 또는 FET가 파손되어도 또 하나의 IC가 동작하는 등의 2중 보호구성으로 할 필요가 있다고 여겨지고 있다. 2차 보호회로는 통상의 사용환경에서는 동작하지 않도록 설정한다. SONY Chemical과 Uchihashi에서 공급되는 저항이 붙은 온도 Fuse와 전압보호 IC를 조합하여 구성하고 일단 한번 동작하면 다시 사용할 수 없게 되는 회로구성도 고려되고 있다. 또 FET는 도중에 불완전한 단락고장을 일으킨 경우에 200℃ 이상 온도가 상승하기 때문에 기판을 태워 전지 Pack의 사고로 간주된다. 온도Fuse는 FET 근처에도 배치할 필요가 있다. 전지 주전력회로에 삽입하는 것은 온도 Fuse, Thermostat(Breaker), Poly Switch가 있다. 각각 동작온도, 전류정격, 동작형태(가역, 비가역)등이 다르기 때문에 특징에 맞춰 사용할 필요가 있다. 전지는 기기로부터의 열충격도 고려하여 1차 보호는 전지표면온도로 약 75℃ 전후에서 동작시키고 2차는 100℃ 전후의 온도에서 보호한다. 전압및 온도 각각 2단계 보호회로 구성이 바람직하다. 또한 Thermistor로 온도를 검출하여 전기적 신호로 충전, 방전을 제어하는 것도 가능하다.

4) 단전지 안전성 평가

기본적으로는 축전지공업회의 기준에 따라 Test하면 문제는 없다고 판단된다. 그러나 Pass된 전지라도 실제로 시장에서 시장에서 사고가 일어나고 있는 점을 생각하면 Cell이 Test에 합격하는 것뿐 아니라 사용자의 입장에서 Test를 하지 않으면 안전성은 확보되지 않는다고 생각한다. 지금까지의 경험으로 실제 사고를 반영한 Test로 Soft Nailing Test를 실시하고 있다. 통상 UL등에서는 5mm Nail에 의한 관통 Test를 실시하고 있지만 충전된 전지를 Jig에 고정하여 Nail을 관통시키면 전극 전체가 일순간에 단락되어 버리는 것과 전지 Cell의 발열이 Jig에 전달되어 버리기 때문에 실제의 사용상태에 있어서 충전단락을 상정할 수 없다고 생각한다. 실제의 Pack에서는 병렬접속된 인근전지로부터의 Energy도 더해지는 것을 고려하여 Pack의 만충전상태에서 국부 단락을 Test하는 것이 유효하지 않은가 생각한다. 그래서 나무판위에서 관통도중에 Nail을 멈추는 방법(대략 전지의 2~5층을 관통)으로 실시하고 있다. 이 방법은 기술적으로도 나름대로 입증된 Test라는 견해를 Maker로부터 얻었기 때문에 현재도 계속 Test를 채용하고 있다. 이외에 전류차단기구가 들어있지 않은 Cell을 채용하기 위해 과충전 Test를 실시한다. 이것은 Pack 상태에서 병렬접속된 전지의 Spot 용접이 떨어져 충전전류가 1 Cell의 전지에 집중적으로 흐르는 것을 상정한 Test이다. AC-DC Adaptor로 직접 Pack에 충전하는 간단한 방법이다. 최근에 알게 된 것으로 CID(전류차단기구)를 채용한 전지에도 과충전에서 파열된 것이 있었다. 試작용으로 CID의 압력설정이 높았다라는 설명이었으나 약 15kg/cm²의 최적치로 개선시켜도 과충전에서 파열되었다. 각종 조합과 측정으로부터 알게 된 것은 전해액의 첨가제가 원인이라는 것이었다. 또 과충전 전압파형을 조사해 보면 파열의 조금전에 전압이 저하되는 기간이 있었다는 점이다. Impedance가 떨어지기 때문에 이 전압저하 기간중에 Energy가 저장

되어 물론 과충전전류에 의해 전지내부온도가 임계온도를 초과해 버린것으로 추정된다. 전류차단변이 있기 때문에 안전하다는 말은 틀렸다고 인식되었다. 또 보호회로에 의해 심방전을 방지하고 있지만 장기간의 방치, 보존을 상정한 과방전 Test가 있다. 이것은 Li-Ion전지가 과방전상태가 되면 동의 석출이 있어 전극간 단락등의 위험이 있다고 알려져 있기 때문이다. 그러나 만충전된 전지를 출하하여, 고객이 Note PC를 구입, Manual을 보지 않고 LCD Cover를 열었을 때 매력적인 Message가 튀어나오기를 바라는 요구는 뿌리깊고, 이 요구에 대하여 전지가 완전 과방전된 상태에서도 안전성을 확보하기 위해 현재는 27일간의 강제방전후에 Trickle 충전을 실시하여 급속충전 가능전압까지 복귀되는 것을 확인하고 있다. 금속 Li의 석출과 그 후의 Cycle 열화가 없는지도 모두 확인하고 전해액의 개선으로 요구를 달성하고 있다. 어떠한 항목도 전지 Maker만의 Data에 의존하기 보다는 User의 입장에 선 관점에서 Test를 실시할 필요성이 있다.

5) 조립공정

NiCd, NiMH 전지와 달리 보호회로 기판을 반드시 필요로 하는 Li-Ion 전지 pack의 특징때문에 과거의 전지 Pack 조립공정과 다른 관리가 필요하다. 정전기 대책은 물론이고 기판의취급과 납땜의 관리등 실제 제조 Line에서의 불량원인을 해석하고 설계에 반영하는 것이 필요하다. 전지 Cell에 불필요한 열을 가하지 않고 납땜 Point 마무리 작업성 향상, 납땜 Land를 넓게, 납땜통소를 적게, 납땜기의 온도관리, 땜납의 성분확인등 기본적인지만 중요한 항목이다.

6) Case 설계

각종 전지 Cell의 상정된 고장 Mode에서 Case는 설계된다. 우선 낙하강도는 76cm에서 기능장해가 없을 것, 1m에서 안전상 위험이 없을것을 기준으로 견고한 목판에 낙하 3회를 확인한다. 도전성 전해액이 분출하여 보호회로에 묻고 다른 전지의 Energy에 의해 회로기판이 연소되는 사고를 방지하기 위해 전지 Cell과 회로간에 격벽을 설계하고 있다. 또한 서서히 새어나오는 휘발성의 전해액을 상정하여 외부로 새어나갈 수 있는 구멍을 얼마간 설계하고 있으며 전지의 (+)극에서 새어나온 전해액에 의해 발생하기 때문에 전지의 (-)측을 회로기판측에 향하도록 하는 전지 Cell의 배열도 필요하다고 생각된다. Case 재질은 전해액에 침식되지 않는 PC, XYRON등을 사용한다.

7) System의 동작조건

전지는 본체를 통하여 충전,방전되지만 본체의 Power Management Control을 잘 파악, 설계하지 않으면 문제가 생긴다. Note PC에서는 전력을 저감시키기 위한 많은 FET Switch를 설계하여 ON/OFF를 자주 반복하지만 Suspend 상태에서 통상동작상태가 되는 경우와 Set 동작중 충전중인 AC-DC Adaptor의 뽑으면 직접 AC-DC의 전압이 전지에 인가되어 제어되고 있는 FET가 파손되는 경우가 있다. 여러 가지 동작 Mode에서의 조합 Test를 반복하지만 기능도 비약적으로 향상하고 있기 때문에 실제에 있어 전체 상태를 검증하는 것은 어려운 것이 현실이다. 그래서 전지에서는 System에서의 최악의 경우를 상정한 과전압, 과전류, 과부하, 이상온도, 장기보존등의

Test를 실시하며 또 여기에 견딜수 있는 전지Pack을 설계할 필요가 있다.

8) 품질관리

100% 전수검사를 했어도 공장에서 불량률이 발견되는 경우가 있다. 그 대부분은 기기와의 결합에서 일어나며 전지 Pack 자체의 결함은 적다. 그러나 전지문제로 분류된 것을 해석하여 보면 접속은 되어 있으나 떨어져 가고 있는 Spot 용접과 회로기판의 땀납이었다. 단전지 그 자체보다는 Pack 조립공정에서의 문제가 많다는 점에 입각한 품질관리 및 재발방지의 Pack 설계를 할 필요가 있다.

9) 사용부품, 재료

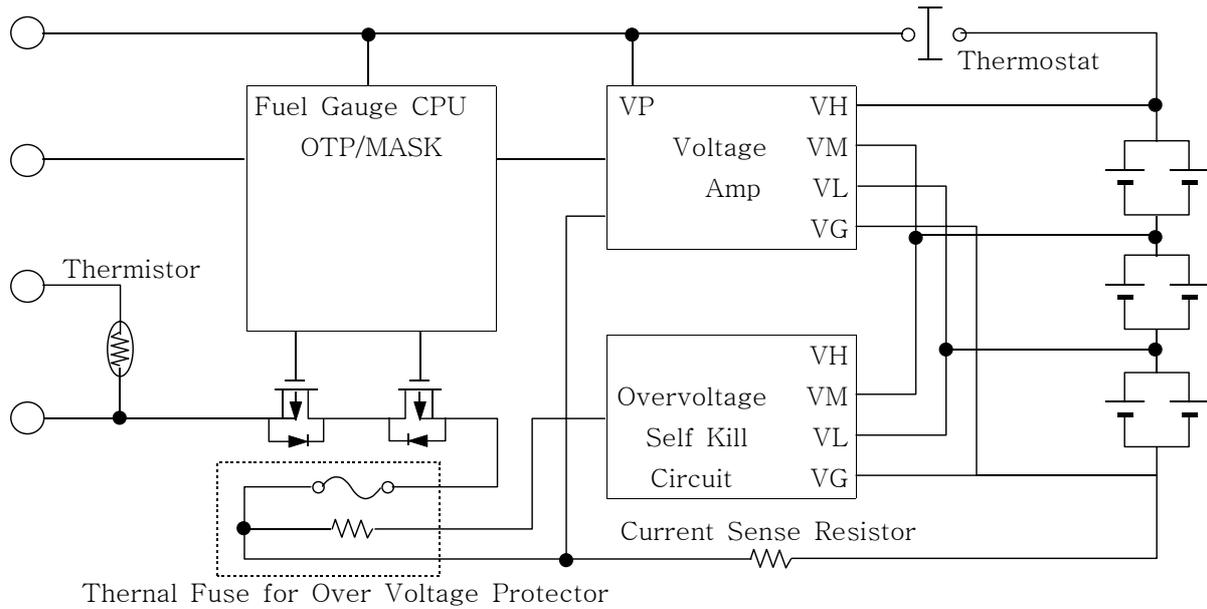
발암성과 오존층을 파괴시키는 물질을 사용해서는 않된다. 또한 Li-Ion은 가연성의 전해액을 사용하기 때문에 전지 Case, 회로기판, 배선재, Label은 UL94V0, VW-1, 94VTM0에 상당하는 자기소화성의 난연재료를 사용하여야 하는 것이 최소한의 요구이다.

10) 전지 Pack의 평가

실제 사고에서 가장 빈번한 단자간 출력단락은 당연히 실시하고 동시에 FET의 ASO도 충분히 margine이 있는 것을 확인한다. 전류제한회로가 동작하기 직전과 연속대전류방전 등에 내부 FET와 온도 Fuse의 동작도 확인한다. 또한 도중에 알수 없는 부하의 단락을 상정하여 10A/sec의 부하전류 상승률로 출력을 단락하여 문제유무를 확인하고 있다. 이것은 완전단락보다 부품에 있어서는 가혹한 조건인 경우가 많다. 또 지금까지 경험해온 문제를 근거로 실시하는 제품안전 Review는 중요한 평가항목중 하나이다.

4. FG 부착 2중보호 전지 Pack

이상의 설계방침과 잔존용량계(FG, FUEL GAUGE)를 조합한 경우의 전지 Pack구성을 표시한다. 이전에는 FG의 통신기능 유무를 하나의 보호로 생각하는 것이 가능하였지만 전지 Pack 출하수량의 증대에 수반하여 순정충전기 이외의 충전기로 충전되는 경우가 많이 발생되고 있다. 전체 미승인 충전기를 규제하는 것은 사실상 불가능하기 때문에 통신의 유무에 관계없이 전지를 보호할 수 있는 회로구성이 필요해지고 있다. 당연 전지 Cell과 Pack에 대한 Test방법도 보다 엄격하게 상향시킬 필요가 있지만 아주 특수한 Test방법은 개발일정을 지연시키기만 할뿐으로 바람직하지 않다. 단기간에 효율적으로 각종 Test를 실시하는 것이 중요하다. 향후에도 전지의 고용량화 경쟁과 안전성의 딜레마가 개발의 관건이 되는 것은 사실이다.



< 그림.5 > FG 부착 보호회로

5. 결론

간단히 Note PC용 Li-Ion전지 Pack의 안전성 설계에 대하여 종합하여 보았지만 전지 자체도 나날이 개량되고 있다. Li-Ion 전지를 특별히 위험한 전지라고 생각하고 싶지는 않다. 예를들어 말하면 가솔린 같은 것이다. 대단히 연소되기 쉬운 위험한 연료이지만 일상에서 보통으로 사용되어 지고 있다. 그러나 Gasoline Stand로 담배불을 붙이는 사람은 없다. 그것은 누구라도 그 행위가 위험하다는 것을 인식하고 있기 때문이다. 위험물을 사용하고 있다는 것을 말하려는 것이 아니라 전지 System 설계자는 확실히 Li-Ion전지의 안전성과 특성을 인식하여 설계할 필요가 있다는 것이다. 그리고 User가 안심하고 사용할 수 있는 제품을 공급하는 것이 중요하다고 생각한다. 천만다행으로 현재까지는 100만 Pack 이상의 Li-Ion전지 Pack을 전세계에 출하하였으나 시장에서의 사고는 1건도 발생하지 않았다. Engineer로서 하루라도 더 이 기록이 유지되기를 바라며 개발을 해나가고 싶다고 생각한다.

--이상--