

직렬형 하이브리드 굴절차량용 대용량 LPB 팩의 적용 및 성능 평가

이강원^{1,a}, 목재균²

¹ 한국철도기술연구원 시험인증안전센터

² 한국철도기술연구원 트램바이모달실용화연구단 TFT

Performance Evaluation for Application of Large Capacity LPB Pack Equipped to Series Hybrid Articulated Vehicle

Kang-Won Lee^{1,a} and Jai-Kyun Mok¹

¹ Test and Certification Center, Korea Railroad Research Institute, Uiwang 437-757, Korea

² Tram-Bimodal System Rearch Team, Korea Railroad Research Institute, Uiwang 437-757, Korea

(Received August 27, 2012; Revised October 24, 2012; Accepted October 24, 2012)

Abstract: Newly developed Series hybrid low-floor articulated vehicle which can meet both road and railway running conditions. It has the rated driving speed of 80 km/h and three driving modes with hybrid(engine+battery) driving mode, engine driving mode, battery driving mode. The battery driving mode requires the several 10 km running without additional charging operation. The vehicle has been equipped with LPB (lithium polymer battery) pack for the series hybrid propulsion system. LPB pack consists of 168 cells (3.7 V in a cell, 80 Ah) in series, DC Circuit breaker, mechanical rack, BMS (battery management system). This paper has shown the design process of LPB pack and application to the vehicle. Driving results in the road was successful to be satisfied with the requirement of the series hybrid vehicle.

Keywords: Series hybrid, Low-floor, LPB

1. 서 론

기후 온난화 및 사회적 약자에 대한 대중적 관심이 증가됨에 따라 대중교통 시스템도 이에 대한 요구를 반영하여 환경 친화적이고 사회적 약자를 고려한 시스템으로 변모해 가고 있다. 환경 친화적인 측면에서 세계적으로 탄소 배출량을 줄이기 위한 다양한 노력이 진행되고 있으며, 그 중에서도 전 세계 탄소 배출량의 약 절반 가량을 차지하는 도로차량 분야에서의 연구 및 상용화 노력은 괄목할만하다. 도로차량 분야

에서는 차량에 추진력을 제공하는 내연 기관에서의 화석연료 사용이 주된 원인이므로 차량의 연비를 향상시켜 차량에서 소비되는 화석연료량을 최대한 감소시키거나 차량의 내연기관을 환경 친화적인 연료전지로 대체 또는 배터리만으로 운행되는 플러그인 전기차를 사용하는 쪽으로 많은 연구 및 상용화가 진행되고 있다. 그러나 아직까지 승용차와 같은 작은 수송능력을 가진 소형 차량에만 국한되어 활발하게 추진되고 있을 뿐이다 [1,2]. 1년 365일 동안 1일 주행거리가 길고 연속 주행하는 시간이 길며 분 당 매우 많은 수의 승객을 단거리 혹은 장거리로 수송해야 하는 대중교통 수단에 대해 친환경 에너지원을 적용하려는

a. Corresponding author; wklee@krii.re.kr

연구는 현재 각국에서 진행 중에 있으나 상용화는 미진한 실정이다. 특히 친환경 차량 중 주전원으로 배터리 전원을 사용하는 전기버스와 같은 경우에는 잦은 충전, 긴 충전 대기시간, 짧은 1회 충전거리 등으로 인하여 실제 노선 투입에 많은 어려움을 겪고 있다. 이러한 어려움은 2차전지 기술의 획기적인 전환점이 마련되고 전기버스의 사용이 대중화되면 감소될 수 있겠으나 현실적으로 단기간 내 해소되기는 힘들 것으로 예상된다 [3,4].

본 논문에서는 친환경 대중교통 수단으로써 개발되어 1회 100명 이상 탑승이 가능하고 최고 운행속도 80 km/h로 자동주행이 가능한 직렬형 하이브리드 CNG (compressed natural gas) 저장굴절 차량에 탑재되는 LPB 팩의 설계 및 차량 탑재 후 실제 시험선 주행 환경 하에서 충전 동작에 따른 LPB 팩의 성능을 살펴 보았다. 잦은 충전이 이루어지는 하이브리드 주행 환경 하에서 LPB 팩의 전압, 전류, SOC (state of charge) 등이 측정되었고, 측정된 결과를 통하여 탑재된 LPB 팩이 직렬형 하이브리드 저장 굴절차량용으로 적합함을 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 LPB 팩의 설계

차량에 요구되는 추진성능에 적합한 LPB (리튬폴리머 배터리)의 용량은 한 셀 당 전지 전압을 3.7 V로 한 경우에 하나의 팩에 대해 650 V, 80 Ah로서 200 kW의 정격을 갖도록 설계되었다. LPB는 기존 널리 사용되어온 배터리에 비해 단 셀 당 전지전압 (3.7 V)이 높고 높은 에너지 밀도와 전력 밀도를 가지고 있어 동일정격 대비 차지하는 부피 및 중량이 줄어드는 효과를 얻을 수 있다 [5,6]. LPB 폴리머 배터리 셀의 전기적 용량은 충전 또는 방전 시 전류 크기 및 주위 온도에 따라 다른 특성을 보여준다.

2.2 LPB 구성요소의 특성 평가

그림 1은 0.5 C (40 A), 1.0 C (80 A), 2.0 C (160 A)로서 정전류 (CC)-정전압 (CV) 충전을 하여 4.2 V로만 충전되기까지 셀에 충전되는 전압과 흐르는 전류값을 나타내고 있다. C-rate를 증가시킴에 따라 4.2 V로만 충전되는 시간이 상당히 감소한다는 것을 알 수 있다. 그러나 2.0 C를 초과하는 C-rate로 충전하는

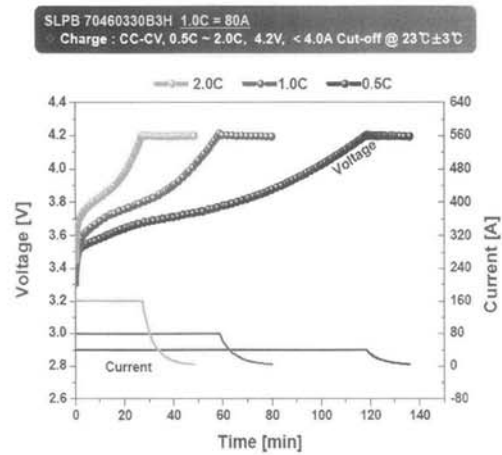


Fig. 1. LPB charging characteristics (Kokam).

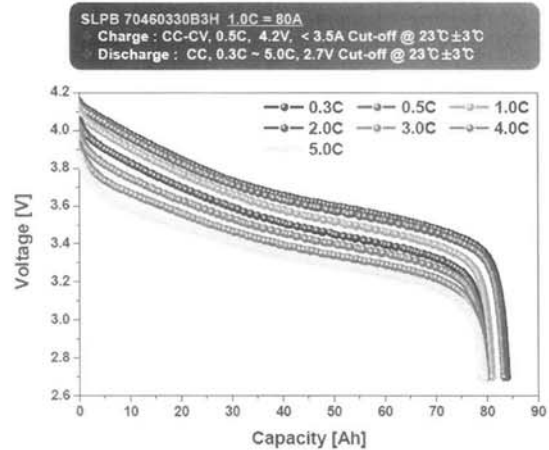


Fig. 2. LPB discharging characteristics (Kokam).

경우에는 2.0 C와 거의 같은 시간에 충전되는 것으로 확인되었다. 즉 본 개발에 사용된 배터리의 전기 화학적 충전 특성은 2.0 C까지의 외부 충전 조건에 대해 충전 시간을 감소시킬 수 있으나 2.0 C 이상의 C-rate에서는 내부적 전기 화학적 반응 속도의 제한적 요소에 따라 더 이상의 충전시간 감소는 불가능하였으므로 향후, 이에 대한 개선 연구가 필요하다고 본다.

그림 2는 0.5 C로 충전하여 4.2 V만 충전된 상태에서 0.3 C - 5.0 C 사이의 7개의 다른 C-rate로 방전하였을 때의 셀 전압의 변화를 나타내고 있다. 5.0 C로 방전한 경우는 0.3 C로 방전한 경우에 비해 약 0.36 V 정도의 전압 차이를 보였으며 이를 LPB 팩 전압으로 환산하게 되면 63.36 V의 전체적인 전압강하가 발생하게 된다는 것을 보여준다.

또한 LPB용량도 5 C로 과방전하는 경우는 0.3 C로

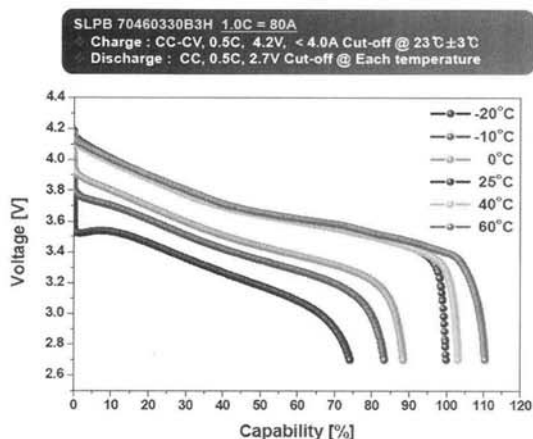


Fig. 3. Temperature characteristics of LPB capacity.

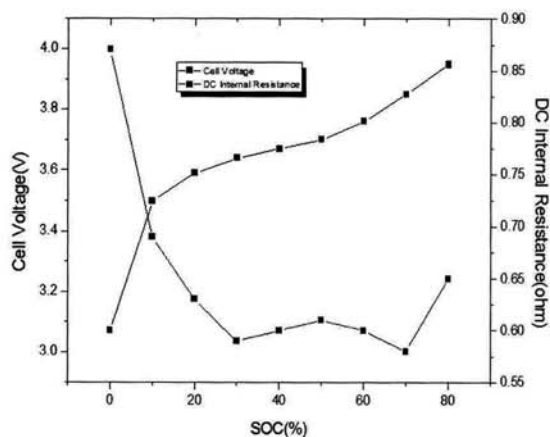


Fig. 4. DC internal resistance of LPB cell.

방전한 경우에 비하여 약 6%의 차이를 보여주는 것이 확인되었다. 과방전에 따른 전압강하의 발생은 과전류에 따른 내부 전극의 온도 상승 또는 전기 화학적 영향에 의한 LPB 내부 저항의 증가로 인하여 발생하는 것으로 판단되고 LPB 용량의 차이도 이와 같은 이유에 기인한 것이라고 생각된다.

그림 3은 0.5 C로 4.2 V만 충전된 초기 상태에서 -20°C - 60°C 사이의 각 온도 별로 0.5 C의 정전류로 방전하여 2.7 V에서 차단될 때까지의 방전 곡선들을 나타낸 것이다. 가로축의 capacity (%)는 1 C (80 Ah) 방전용량을 100%로 정하였을 때 비교한 값이다. 온도 범위가 25°C - 60°C인 경우에는 각 셀 전압이 3.4 V까지는 거의 차이가 발생하지 않고 3.4 V 이하에서 차단 전압인 2.7 V 사이에서 capability가 약 10% 차이가 발생하는데, 이것은 고온 환경에서 LPB

내부의 보다 활성화된 전기 화학적 반응에 의한 것으로 보인다. 그러나 0°C, -10°C, -20°C에서 측정된 각 방전곡선은 25°C에서 측정된 방전곡선에 비하여 동일 capacity (50%)에서 각각 0.2 V, 0.3 V, 0.5 V 정도의 전압 차이를 나타내고 있다. 또한 방전 초기 0°C 이하에서는 25°C의 방전 곡선에 비해 보다 가파른 전압강하가 발생하게 되는데 이는 저온 상태에서 LPB 셀의 이온 이동도 감소와 전기 화학적 반응의 저하로 인한 것으로 판단된다. LPB는 2.7 [V] 저전압 상태 또는 4.2 [V] 과전압 상태 중 수명의 유지 및 안전을 위하여 어느 한 가지 상태도 허용되지 않아야만 한다. 특히, 4.2 [V]를 초과하여 충전되면 LPB 수명과 안전에 큰 영향을 초래하므로 반드시 4.2 [V] 이하에서 사용되어야만 한다. 차량에서 발전기에 의해 발생한 전압은 기본적으로 엔진회전 속도에 의해 제한되므로 발전기로부터 충전되는 전류는 2.0 C 이하로 유지될 수 있다. 그러나 차량이 제동할 때 전동기에 의한 회생전압은 주행 속도가 높을수록 전압은 높아져 이에 따른 LPB로의 충전전류는 3.0 C 이상이 될 수 있다. 실제 차량에서는 전압이 일정수준 이상 초과 시 회생제동 저항으로 전류를 흐르게 하는 방법으로 전압상승을 제한하고 이에 따라 충전 전류도 제한되어야 한다.

그림 4는 LPB의 단일 셀에 대한 SOC (state of charge) 별 셀 전압과 직류내부 저항에 대한 측정 결과를 보여주고 있다. 내부 저항과 셀 전압의 SOC값에 따른 변화에 따라 3개의 구간으로 나누어 살펴볼 수 있다. 0%-30%의 첫 번째 SOC 구간에서는 내부 저항이 감소하고 셀 전압이 급격히 증가하였다. 30% - 70%의 두 번째 SOC 구간에서는 내부 저항은 거의 동일한 값을 유지되었고 셀 전압은 서서히 증가하였다. 70% - 80%에서의 증가경향을 보면, 80% 이상에서는 내부 저항과 셀 전압이 다시 급격히 증가할 것으로 예상할 수 있었다. 이러한 SOC의 구간에 따른 셀 전압 및 내부 저항의 변화 경향을 살펴보았을 때 차량의 제동 시 회생에너지를 LPB에 충전하기 위한 여유용량을 생각하여 SOC는 최대 70%를 넘지 않도록 유지되어야 하고 추진 시 방전량을 고려하여 SOC는 최소 40% 이하가 되지 않도록 하는 것이 필요할 것으로 추정된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 LPB팩의 차량 적용성 검토

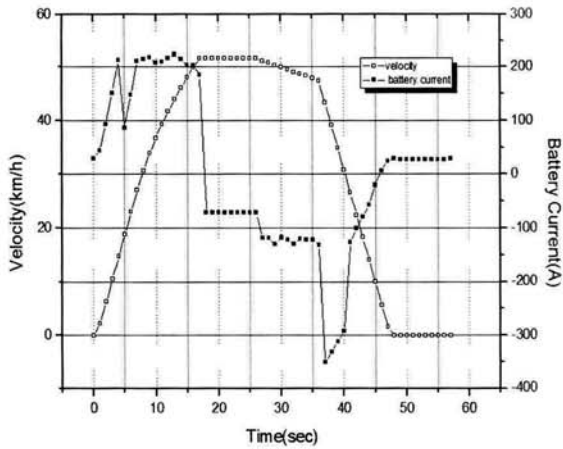


Fig. 5. Simulated vehicle driving pattern.

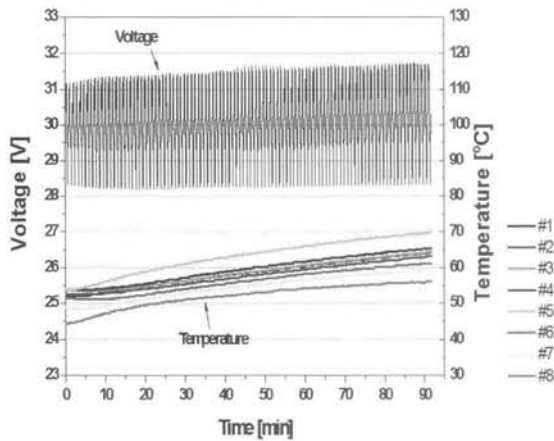


Fig. 6. Temperature distribution of LPB cell.

여러 가지 검토 결과를 토대로 직렬형 하이브리드 차량에서 LPB 팩의 셀 당 사용 전압을 SOC가 70%인 3.84 V에서 SOC가 20%인 3.4 [Vdc]로 제한하였으므로 LPB 팩의 운용 시 사용전압 범위는 최대 646.8 [Vdc] 부터 최소 571.2 [V]로 정하여 졌다. 이 결과를 토대로 직렬형 하이브리드 차량의 운영 효율화와 LPB의 장수명화를 위하여 SOC 범위는 다시 55% - 65%로서 10% 이내로 정하였다.

그림 5는 LPB 셀의 충방전 특성을 확인하기 위한 가상의 직선로를 주행하는 경우에 추진 (가속), 타행 (속도 일정), 제동 (감속)을 약 1분 간에 걸쳐 모의된 주행패턴을 보여주고 있다. 초기 추진 시 LPB는 방전하고 타행 시엔 방전이 정지되며 제동 시에는 견인 전동기의 회생 발전으로 LPB는 충전된다. LPB 셀의 온도 특성은 앞서 살펴보았듯이 매우 중요하므로 모의된 주행패턴에 따라 주행한 경우에 셀에서의 온도

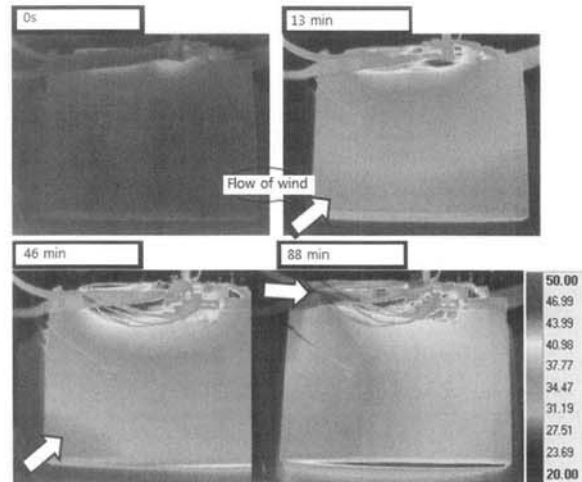


Fig. 7. Temperature distribution on LPB surface.

분포를 측정하였다.

그림 6은 8개를 직렬로 하나의 모듈로 제작하였던 초기 모델을 차량의 주행패턴 (1 cycle)에 따라 101 cycle (약 101분)의 충방전하였을 때 8개의 셀에 부착된 온도 센서에서 측정된 결과를 보여주고 있다. 8개의 셀은 아래로부터 #1 → #8로 순번이 정해져 측정되었고 셀의 온도는 충방전이 지속되는 동안 지속적으로 상승하였다. 셀의 온도 안정성을 고려하여 시험은 셀의 온도가 70°C에 도달하였을 때 중지시켰다. 메이커마다 사용 온도의 제한은 다를 수 있으나 일반적으로 가능한 최대 사용온도는 60°C를 넘지 않도록 하여야 하며, 실제 사용온도는 가급적 20 - 40°C를 유지하는 것이 LPB 성능을 최적으로 유지하기 위해 제작사에서 추천하는 온도 범위이다.

초기 모듈 모델에 대한 시험은 외부에서의 강제 냉각없이 외기 온도 25°C에서 자연적인 전도와 대류에 의해 온도가 상승되는 것을 확인하는 것이었으며, 결과는 예상대로 상부와 하부 온도가 중첩되는 중간부분의 #5 셀 온도가 가장 높은 것으로 측정되었고, 바닥 접촉되어 공기순환이 이루어지지 않는 하부 셀들이 공기 순환이 이루어져 자연 냉각이 이루어지는 상부 셀들보다 온도가 높게 측정된 것으로 보인다.

그림 8은 최상부에 위치한 셀의 한 면을 적외선카메라를 이용하여 촬영한 결과를 보여주고 있다. 주행 사이클에 따라 충방전을 실시한 직후 전극에서 열발생이 관측되었고 13분 경과 후에는 전극에서 발생된 열이 점점 셀 측으로 이동하였고 시험 종료 전 88분이 경과되었을 때 관찰된 셀의 한 쪽 측면온도는 가

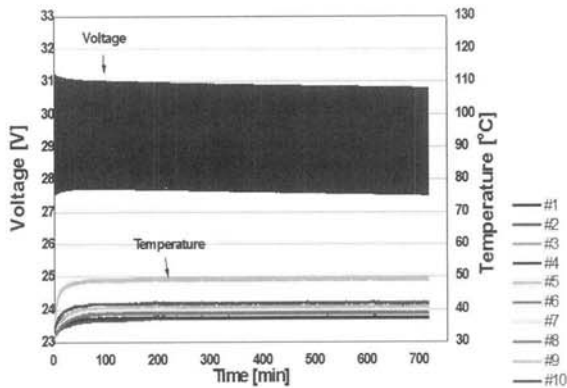


Fig. 8. Temperature saturation of Revised LPB module.

장 높은 전극부를 제외하고 균일하게 분포하는 것을 확인할 수 있었다.

그림 7에서 보여지는 화살표는 바람에 의한 냉각 효과를 살펴보고자 소형 선풍기로 바람을 불어 보낸 방향으로 바람 방향에 따라 온도가 내려가는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 LPB에서 충전 시 반응열은 (+)전극으로부터 이동한 리튬이온이 (-)전극에 의해 고정될 때 흡수되는 열에 일치한다. 또한 이 반응열에 등가인 열의 양은 방전하는 동안 발생되므로 LPB 자체적으로는 충전과 방전 시 에너지가 동일하다면 열 발생은 거의 0이다. 그러나 현실적으로는 다양한 불일치가 발생하며, 이 불일치는 열로서 발생되고 또한 전극 및 내부 저항을 흐르는 전류에 의한 Joule 열은 셀의 충방전 시 셀에 대한 온도 상승을 이끄는 주요 원인이므로 우선 전극에서의 열 발생을 최대한 줄이고 각 셀 표면에서의 열 발생을 가급적 억제할 수 있는 구조가 냉각을 위하여 요구되어 진다. 다음은 냉각 팬을 부착하고 셀 간 공극을 마련한 구조로 개선한 간이 모듈에 대해 주어진 주행 패턴 하에서 LPB 셀의 온도 상승을 살펴보았다.

그림 8은 한 모듈 (8S1P)에서 셀과 셀 사이를 약 2 mm 정도 이격하고 열이 가장 많이 발생하는 전극부분으로 냉각 팬을 설치하여 한쪽 팬으로는 외기를 흡입하고 다른 쪽 팬으로는 전극에 의해 데워진 공기를 밖으로 빼내도록 하는 구조로 변경하여 시험한 결과이다.

가장 높은 온도를 보인 지점은 각 셀로부터 외부전극에 연결되어 지는 부분 (#9)이었고 다음으로 온도가 높은 곳은 전극 탭과 외부 케이블 탭이 접속되는 부분 (#10)이었으며 셀 가운데 가장 높은 부분은 가

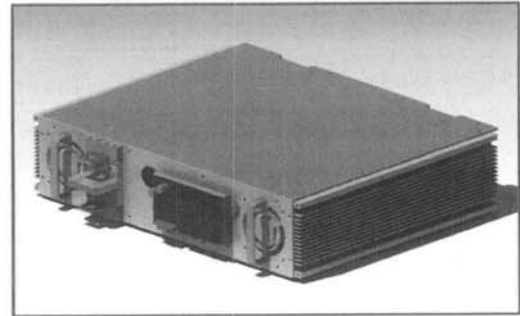
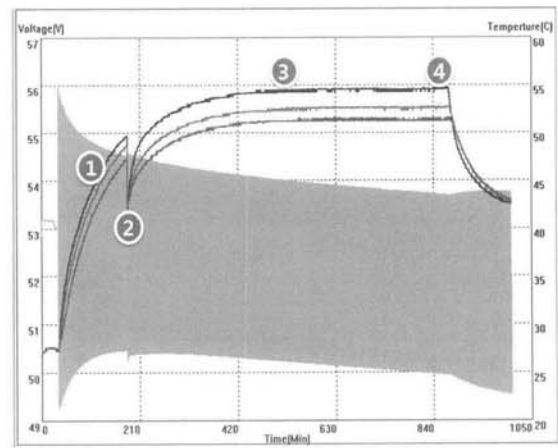


Fig. 9. Appearance of prototype LPB module.



| No | Contents |
|----|--|
| 1 | Case cover is opened and Fan stopped |
| 2 | Temporary stop while case cover fixed |
| 3 | Restart the test and Fan stopped |
| 4 | Fan starts running with case cover fixed |

Fig. 10. Temperature characteristics of prototype LPB module.

장 가운데 있는 셀 (#5)과 바닥면에 연결한 셀 (#1)이었다. 이 결과는 셀의 표면온도 분포를 적외선 카메라로 살펴보았을 때 전극 부분이 가장 먼저 온도가 상승한 것과 그 부분의 온도가 가장 높았던 결과와 일치하므로 보여주며 전극 부분을 냉각함으로써 온도가 더 이상 상승하지 않는다는 것을 실험으로써 확인하였다. 그러므로 실제 차량에 적용되는 LPB 모듈의 구조는 본 실험에서 냉각 팬을 가진 구조로 수정되어

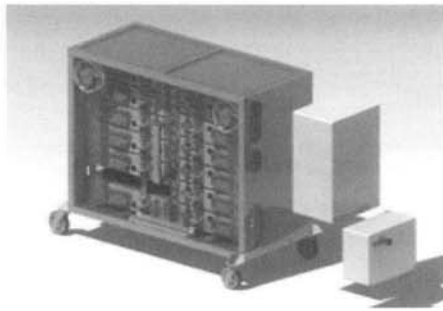


Fig. 11. Appearance of designed LPB pack.

야만 할 것으로 판단되었으며, 그림 9는 최종 수정된 구조로 제작된 모듈의 외형을 보여주고 있다.

그림 10은 수정된 설계에 의해 제작된 LPB 모듈에서 냉각 팬을 동작시키지 않은 경우와 냉각 팬을 가동했을 때의 모듈 내 각 셀들의 온도 상승 곡선을 보여주고 있다. 냉각팬을 동작시키지 않은 경우에 온도가 약 55℃까지 상승하였으나 냉각 팬이 동작된 후에는 온도가 40℃까지 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 정해진 LPB 팩 사이즈에 적합하도록 제작된 LPB 모듈은 14S1P 모듈 12개와 8S1P 모듈 1개이나 모듈로부터 전원을 공급받는 BMS (battery management system)의 전력소비 (약 5 W)에 의해 8S1P 모듈의 전압 강하가 다른 14S1P 모듈 12개에 비해 크게 되고, 이 차이는 계속적으로 유지되어 팩 내부의 모듈 간 전압 불균형이 발생하여 8S1P 모듈 및 팩 전체의 충방전 효율을 저하시키는 것으로 확인되어 14S1P 모듈 12개만을 적용하는 것으로 결정하였다. 이러한 과정을 거쳐 차량에 설치하기 위한 LPB 팩은 14S1P 모듈이 12개이고 8S1P 모듈이 1개로 총 176 cell, 650 V로 설계 제작되었다.

그림 11은 차량에 적재하기 위하여 제작된 LPB 팩에 대한 외형을 보여주고 있다.

3.2 LPB 팩의 실차적용 및 주행특성 평가 및 고찰

차량용 LPB 팩은 직류차단기함과 배선용 단자함이 함께 포함되어 총 650 [kg]의 중량으로 엔진룸의 하단부에 설치되었다.

그림 12는 굴절차량의 엔진룸 하단 중앙부에 설치된 LPB 팩의 설치된 모습을 보여 주고 있다. LPB의 성능은 온도와 밀접한 관계가 있으므로 성능평가 지

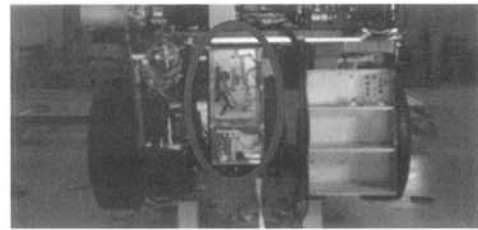


Fig. 12. LPB pack installed on the vehicle.

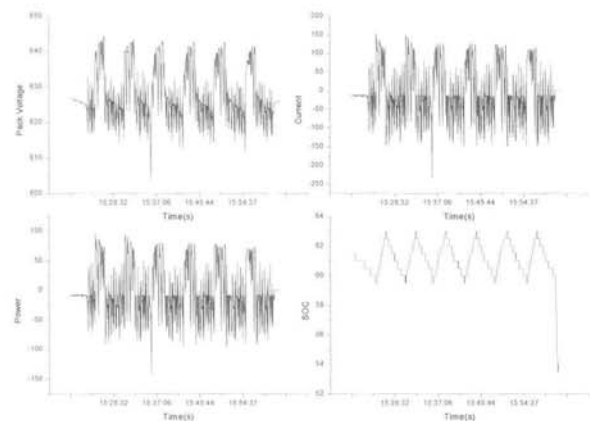


Fig. 13. LPB power, voltage, current, SOC measured in the road running test of vehicle.

수로서 주행 중 온도 변화를 중점적으로 살펴보았다.

엔진룸은 상부와 하부가 구분된 구조이고 상부에는 엔진, 발전기, 라디에이터가 설치되어 있고, 그 하부에 LPB 팩이 위치하므로 엔진동작 시 발생하는 열과 라디에이터에서 발생된 열에 직접적이지는 않으나 간접적으로 노출될 수 있게 되어 의도되지는 않았으나 LPB 팩 자체적으로 상부측과 하부측 사이에는 이로 인한 온도차가 존재하게 된다. 차량용 LPB 팩에서는 가급적 이러한 외부환경의 영향을 줄이고 팩 내부 온도를 가능한 일정하게 유지시키기 위하여 차량실내로 환기구를 연결하여 팩 내부로 강제적으로 공기를 유입시키는 구조로 설계하였다. LPB 팩이 설치된 시작 차량은 2009년 5월에 제작이 완료되어 공장 구내 시험 등을 거쳐 약 5,000 km의 예비도로 주행시험을 가졌으며 일반도로 1회 완주 당 약 50 km를 주행하였다. 도로주행 조건은 일반 자동차와 혼합되어 주행하므로 일정 패턴을 정확하게 유지할 수 없으므로 가능한 운전자의 재량에 의해 가급적 동일한 주행패턴을 가지도록 노력하였다.

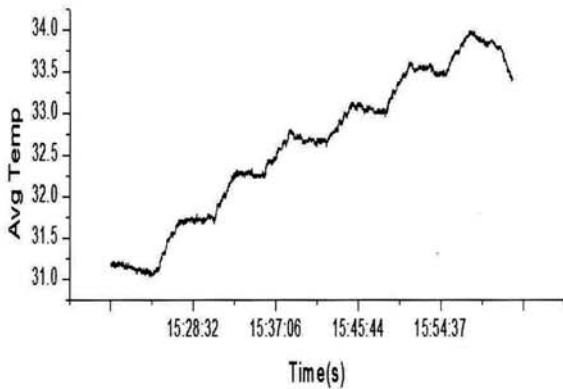


Fig. 14. Average temperature rising pattern of LPB pack driven with figure 13.

그림 13은 차량이 도로주행 시 LPB 팩에서 측정된 팩 전압, 전류, 전력, SOC에 대한 그래프를 보여주고 있다. 추진시스템의 추진모드 설정에 따라 차량이 정차된 상태에서 하이브리드모드로 동작 시 SOC가 59% 이상이면 엔진속도가 2,400 [rpm]으로 상승하여 LPB 팩을 충전하고 SOC가 63%에 도달하면 엔진속도는 아이들 (900 [rpm])로 하강하여 차량 내 전원이 LPB 팩에서 공급되어지도록 한다. 차량의 주행을 위하여 가속페달을 밟게 되면 엔진은 추진시스템의 TPLC (traction programmable logic controller)의 제어에 따라 SOC에 관계없이 2,400 [rpm]으로 상승하게 되고 가속페달의 정도 즉 추진에너지의 사용량에 따라 LPB 팩의 충전 동작이 행해진다. LPB 팩이 발전기로부터 출력된 전력에 의해 충전이 이루어지면 LPB 팩의 전압은 상승하고 전류는 충전전류가 되어 (+)로 모니터링 프로그램에 저장 및 현시된다. 그리고 LPB 팩이 방전하게 되면 LPB 팩의 전압은 하강하고 전류는 방전전류가 되어 (-)로 그래프에 표시된다.

그림 13은 굴절차량이 하이브리드모드로 정해진 주행선로를 일정한 주행패턴으로 주행 시 LPB에서 측정된 충·방전 특성을 보여 주고 있다. 그림 13에서 주행 초기에는 SOC가 이미 63%에 도달하여 엔진 속도가 아이들로 내려가고 LPB 팩은 방전하게 되어 LPB 팩 전압 및 SOC는 서서히 감소하게 된다. 이때 전류는 (-)전류가 흐른다. 차량이 추진하게 되면 기동시 기동전류가 크므로 주로 LPB 팩으로부터 전력이 공급되어 방전전류가 크게 흐르고 어느 정도 차량이 주행하여 일정속도 이상 또는 타행구간에 도달하게 되면 발전기로부터 공급되는 전력에 의해 방전전류가 감소하고 반대로 충전전류가 흘러 LPB 팩으로 충전된다.

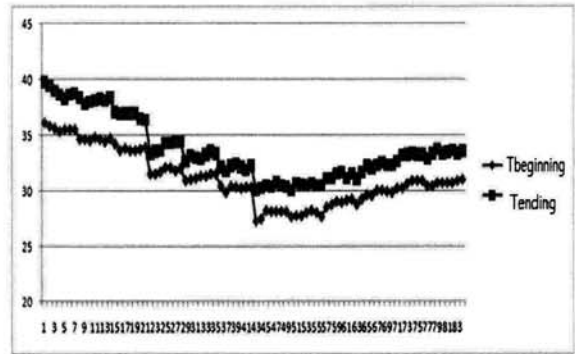


Fig. 15. Temperature distributions of LPB cells from the beginning to the end of driving test.

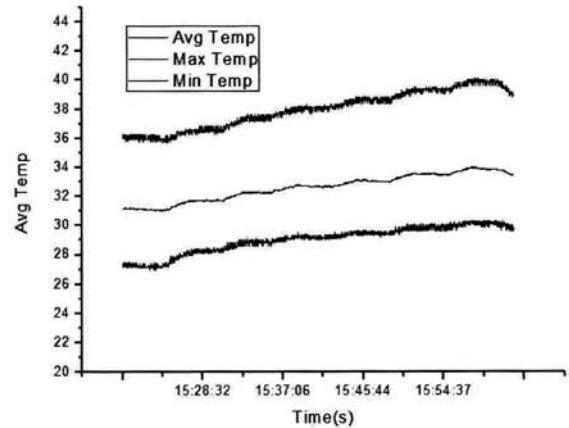


Fig. 16. Max, average, Min temperature rising curve of LPB cells through the driving test.

그림 14는 차량의 도로 주행 시 (그림 13) LPB 팩에서 충전 또는 방전되는 전류에 의한 LPB 팩 내부 온도의 평균적인 온도 변화를 보여준다. LPB 팩의 충전 또는 방전전류의 지속시간에 따라 지속시간이 길어지면 온도가 상승하고 지속시간이 짧은 즉 충전전류와 방전전류가 반복적으로 짧게 흐르는 동안에는 온도의 상승이 거의 일정하게 된다.

그러나 도로 주행 시 LPB 팩의 온도는 전반적으로 내부 냉각량과 발열량이 평형을 이루는 온도까지 계속적으로 상승하게 된다.

LPB 팩의 내부 셀들의 위치에 따라 셀 간 온도 차가 발생하며 온도 차에 따라 최고 온도와 최저 온도의 분포를 나타내게 되며 평균 온도는 이들 셀들의 어느 시간에서 LPB 팩에 분포된 온도를 평균한 것이다.

그림 15는 어느 순간에 측정된 LPB 팩 내 셀들의

온도 분포를 나타낸 것이고, 그림 16은 이들 셀들의 도로 주행 시 최대, 최소, 평균 온도의 변화를 보여주고 있다. LPB 팩 내 셀들의 배치는 차량진행 방향으로 6개 모듈이 1열을 이루어 2개열로 되어 있다. 온도센서는 두개의 셀 중간에 설치되어 측정되므로 하나의 LPB 팩에 설치된 셀은 총 168개으로써 온도 센서는 총 84개가 된다.

그림 15에서 1번 온도는 차량 후방부에 위치한 열의 맨 위에 설치된 셀들에 대한 온도이고, 42번과 43번 온도는 모두 LPB 팩 하부에 위치한 셀들에 대한 온도를 나타낸다. 그리고 84번 온도는 차량 전방으로 배치된 열의 맨 상부 측 온도를 보여주고 있다.

LPB 팩의 흡기구는 차량 실내와 연결되어 있고 LPB 팩의 아래 부분에 위치하여 차량 실내에서 냉각된 공기를 LPB 팩의 맨 하단부로 유입시키므로 LPB 팩의 맨 하단부에 위치한 42번 주위 셀들의 온도가 배터리팩들 중 가장 낮은 온도 분포를 보이게 된다.

또한 LPB 팩의 상부에 위치한 셀들의 온도는 LPB 팩의 아래 부분에 위치한 셀의 온도보다 높은 온도 분포를 보인다는 것을 알 수 있으며 1번 온도가 가장 높은 이유로는 배터리팩의 상부와 엔진룸 간에 단열재가 설치되어 있으나 엔진룸의 구조상 엔진룸에서 엔진방열기에 의해 뜨거워진 바람이 엔진 냉각팬에 의해 엔진룸에서 LPB 팩 쪽으로 불어 나가게 되어 있어 LPB 팩의 차량 후방부측의 맨 윗부분의 셀들이 엔진룸에서 오는 열에 간접적으로 노출되기 때문이다. 이러한 이유로 LPB 팩 내에서 셀 간 온도의 최대 차이는 살펴보면 약 10 [°C] 정도가 된다 (그림 16). LPB 팩 내에서 온도 차이가 발생하는 것은 LPB 팩 내에 설치된 셀들의 성능을 균질하게 유지시키는데 방해가 되고 더 나아가 배터리 팩의 유지보수 비용을 증가시키는 요인이 되므로 셀 간 온도 차이를 최소로 유지하는 것이 매우 중요하다. 개발된 직렬형 하이브리드 저상굴절에 대한 시작차량은 배터리 팩이 엔진룸의 하단부에 위치되어 엔진룸에서 발생된 열이 배터리 팩에 대한 온도를 부분적으로 상승시키게 되므로 배터리 팩에 대한 단열 처리 및 유입된 실내 공기를 배터리 팩 내부에 균일하게 배분되도록 공기 통로를 개선할 필요성은 있는 것으로 파악되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 직렬형 하이브리드 저상 굴절차량에 적합하게 설계된 LPB 셀, 모듈 및 팩에 대한 다양한 특성들을 살펴보고, 이러한 특성들에 대한 검증 결과로써 차량에 적용하여 차량주행 성능에 적합함을 확인하였다. 직렬형 하이브리드 저상굴절 차량에 장착된 LPB 팩을 구성하는 단위 셀 전지의 충방전 특성은 충방전 전류의 크기에 따라 차이가 발생하나 2C 이상의 충전 능력과 5C 이상의 방전 능력은 하이브리드 차량의 주행요구 성능에 합당함을 보여주었다. 그러나 주위 온도가 낮아질수록 충방전 최대 용량이 감소됨은 LPB 팩 내부 온도를 10도 이상으로 유지하도록 구조 설계가 필요함을 보여주었다. 이와 같이 파악된 LPB의 셀 전지 특성을 기반으로 하이브리드 차량의 변동 전압 범위에 적합한 셀의 사용 전압 범위 및 SOC 사용 범위를 셀 전압에 따른 LPB 직류 내부 저항의 특성과 여러 가지 검토를 통하여 결정하였다. 이와 같이 결정된 셀의 사용 전압 범위와 전동기 특성을 고려한 모의 주행패턴을 상정하여 LPB 모듈에 대한 충방전 특성을 살펴보고 이때 초기 설계된 LPB 모듈의 온도 분포를 확인하여 냉각팬이 달린 LPB 모듈의 최적화된 구조로 개선하였다. 개선된 LPB 모듈이 수납될 LPB 팩을 공기순환 및 냉각을 고려하여 설계 및 제작하였다. 최종 제작된 LPB 팩은 차량에 탑재되어 실차시험이 실시되어 실주행 상태에서 충방전이 이루어지는 LPB 팩의 온도 분포가 측정되었고 그 시험 결과로써 설계된 LPB 팩은 직렬형 하이브리드 저상굴절 차량의 동작 성능에 충분히 적합한 것으로 평가되었다.

REFERENCES

- [1] C. C. Chan, *Proc. of the IEEE*, 95, 704 (2007).
- [2] A. Khaligh and Zhihao Li, *Vehicular Technology on IEEE Trans.*, 59, 2806 (2010).
- [3] A. Etxegarai, P. Eguia, and I. Zamora, *Int. Conf. on Renewal Energy & Power Quality*, 13 (2011).
- [4] C. Zhu, R. Lu, L. Tian, and Q. Wang, *Vehicle Power & Propulsion*, 6 (2006).
- [5] R. Spotnitz, *Vehicle Power & Propulsion*, 7 (2005).
- [6] H. S. Kim, M. S. Yun, B. H. Ko, and D. H. Kim, *J. KIEEME*, 16, 1047 (2011).