

이차전지 수분 제거용 유도가열 양산 시스템 개발에 관한 연구

지완근¹, 김성환¹, 정해영² , 이석현¹ 

¹ 인하대학교 전기공학과

² 세명대학교 소방방재학과

A Study on the Development of Induction Heating Mass Production System for Moisture Removal of Secondary Battery

Wangeun Ji¹, Sunghwan Kim¹, Haiyoung Jung², and Seok-Hyun Lee¹

¹ Department of Electrical Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

² Department of Fire and Disaster Prevention, Semyung University, Jecheon 27136, Korea

(Received September 1, 2022; Revised September 30, 2022; Accepted October 12, 2022)

Abstract: In this study, an induction heating system using resonance is developed to remove remaining moisture and contaminations which could be generated during fabricating secondary batteries. This system is composed of power supply and induction coil. Power supply needs an oscillator, zero crossing detection, frequency tracking function, and induction coil needs a dummy coil to obtain a uniform temperature distribution. It is very important to obtain a uniform heating temperature distribution of battery cell case in the induction heating system before pouring electrolyte into battery cell. Experimental results show a temperature distribution deviation of below 1°C in the external position of battery cell cases. As well, the temperature of battery cell itself shows distribution of 40°C±3°C.

Keywords: Induction heating, Secondary battery, Resonance circuit, Frequency tracking

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

최근 전 세계 자동차 산업분야의 최대 관심사로 떠오르는 주제가 바로 전기자동차로 지금까지 화석연료 자동차에 비해 상대적으로 판매량이 적은 편이었으나 2025년 이후 점차 증가하기 시작하여 2040년 전체 신차 판매량의

54%, 전 세계 자동차 시장의 33%를 전기자동차가 점유하게 될 것으로 전망되고 있다. 이는 하루 약 8백만 배럴의 연료를 대체하는 효과이며, CO₂감축과 석유자원 고갈 문제 해결에 기여할 수 있다. 따라서 세계 각국은 운송수단으로 인해 발생하는 환경오염 문제를 해결하기 위해 전기자동차에 대한 투자와 노력을 증가시키고 있으며, 최첨단 하이테크 기술이 적용된 다양한 부품들을 전기자동차에 적용시키고 있다. 전기자동차를 구성하는 파워트레인, 이차전지, 플랫폼은 3대 핵심요소로 주행거리를 좌우하는 이차전지는 패킹 방법에 따라 원통형, 각형, 파우치형으로 나뉜다.

본 연구에서는 원통형 이차전지의 전해액 주입 공정에서 내부에 수분이나 불순물이 존재하면 전해액의 순도가 떨어지고 배터리의 성능이 저하되는 문제를 해결하기 위

✉ Seok-Hyun Lee; plasma@inha.ac.kr

Haiyoung Jung; hyjung@semyung.ac.kr

Copyright ©2023 KIEEME. All rights reserved.

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.

해, 전해액 주입 전 수분제거를 위한 가열코일 및 유도가열 양산 시스템을 개발하고 그 성능을 평가하고자 한다 [1,2].

1.2 연구의 방법 및 내용

연구의 내용은 원통형 이차전지 전해액 주입 전 셀 내부의 수분을 제거하기 위한 유도가열 코일 및 양산시스템 기술개발에 관한 것이다. 원통형전지는 양극재와 음극재 사이에 분리막으로 절연하여 젤리롤(jelly roll)을 만들어 강자성체(steel)재질의 캔(can, 원통형 전지의 패키징을 위한 외부 case)에 삽입하고 전해액을 주입하여 밀봉한다. 전해액을 주입하기 전에 원통형 전지 내부에 수분이나 불순물이 존재하면 전해액의 순도가 떨어지고 배터리의 성능이 저하되는 문제점을 갖고 있다. 이를 개선하기 위해 원통형 전지 수분 제거용 유도가열 코일 개발기술을 통해 전해액 주입 전에 캔을 가열시킴으로써 수분이나 불순물을 증발시켜 내부 전해액의 순도를 높이고 온도가 상승함에 따라 전지 내부의 기포가 감소함으로 함침속도 및 함침량을 증가시켜 원통형전지의 성능을 개선할 수 있다. 양산 시스템을 구축하기 위해서는 생산성, 균일성, 재연성 등이 필수적이다. 생산성 향상을 위해 4식의 유도가열 발전기와 4식의 코일로 구성하되 코일당 18개의 채널(개별코일)로 하여 총 72채널(개별코일)로 제작하여 분당 200개 이상의 셀을 처리할 수 있도록 하였으며 실험을 통하여 코일별/채널별로 온도를 측정하여 다채널 코일의 균일성을 검증하고 3회 연속 측정하여 재연성을 검증한다.

2. 실험장치

그림 1은 유도가열 장치의 전체 회로도이다. 유도가열 장치는 크게 발전기(oscillator)와 가열코일(heating coil)로 구성되는데 발전기는 피가열체에 적합한 주파수의 전력을 공급한다. 이때 주파수가 높으면 전류가 매우 작게 흐르므로 LC공진을 구현하여 고주파 전력을 공급한다. 그림 2는 유도가열 발전기로 여러가지 제어시스템과 매칭트랜스가 내장되어 있다. 그리고 18개 채널의 온도를 동시에 측정하기 위해서는 다채널 온도 기록장치가 필수적이다. 열전대를 원통형전지의 외부와 내부에 부착하여 코일별/채널별로 온도를 측정하여 기록할 수 있다.

생산성을 높이기 위해 그림 3과 같이 1식의 코일 당 18개의 채널(개별코일)로 하고 4식의 코일을 제작하였다. 총

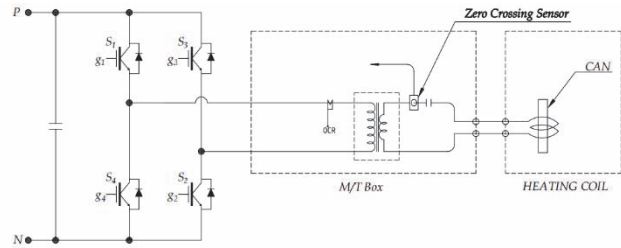


Fig. 1. Circuit diagram of induction heating system.



Fig. 2. Induction heating oscillator system.

72채널(개별코일)의 온도 편차를 줄이기 위해서는 채널(개별코일)의 인덕턴스 값이 최대한 동일해야 한다. 인덕턴스는 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스로 나뉘는데 채널(개별코일) 별 자기 인덕턴스는 정밀가공 된 보빈에 동일한 권수와 이웃코일과 같은 간격으로 권선하여 거의 동일하다. 상호 인덕턴스는 이웃 채널(개별코일)에 의해 영향을 받는데 그림 4와 같이 보빈을 고정하는 상 하판을 정밀 가공하고 등 간격으로 하여 오차를 최소화할 수 있다. 채널(개별코일)은 직렬로 연결하되 가동결합으로 결선하는데 이웃 코일의 자기장을 이용하여 더 많은 열을 공급하는 효과가 있다. 하지만 1번과 18번 채널은 이웃 채널(개별코일)이 한 쪽에만 있어 상대적으로 20퍼센트 정도 덜 가열된다. 따라서 그림 3과 같이 양 사이트에 더미코일을 부착하여 균일한 온도를 얻을 수 있다. 코일의 상, 하간격을 동일하게 권선할 경우 캔 표면의 온도가 중앙에 집중되므로 중앙부의 권선간격을 조절하여 캔 표면의 온도를 거의 균일하게 제작하였다.

그림 5는 다양한 코일을 제작하여 실험한 것이다. 가열 효율, 캔 표면의 열분포도, 제작의 편리성, 균일성, 코일의 냉각방법 등에서 문제들이 발생하여 모든 조건을 만족하는 그림 3의 코일을 제작하였다.

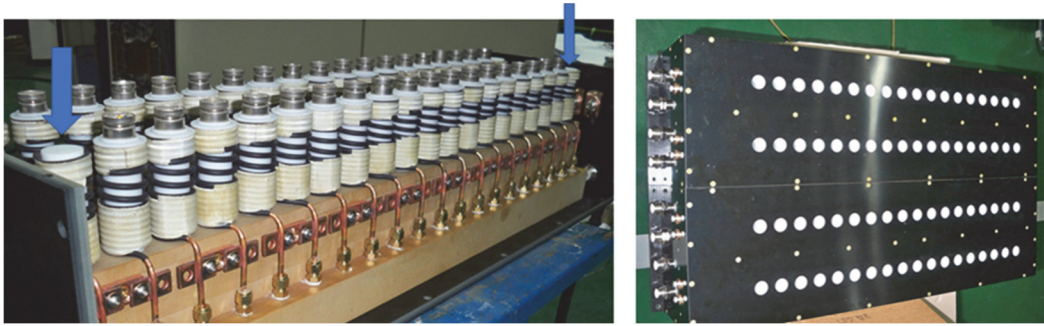


Fig. 3. Induction heating coil with dummy coils.

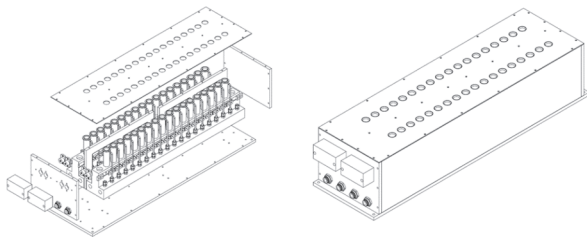


Fig. 4. Schematic diagrams of induction heating coil.

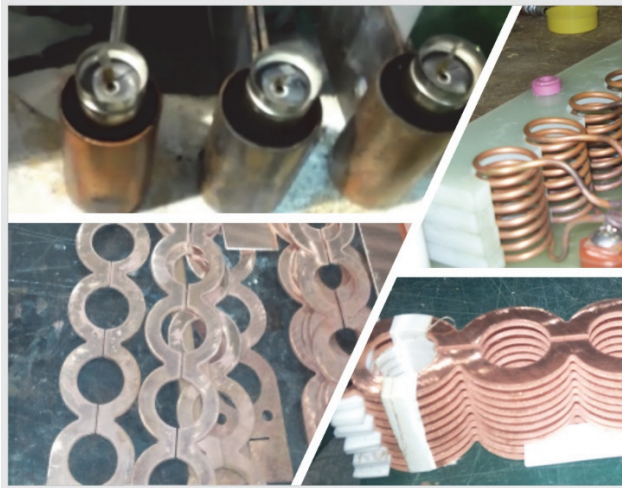


Fig. 5. Various coils through trial and error.

3. 실험 방법

원통형 전지 상부가 개방되고 전해액이 주입되기 전에 원통형전지의 수분 제거용 유도가열 코일에 전력을 공급하면 코일에서 발생된 자기장에 의해 원통형 전지 외부(캔)에 유도전류가 흘러 전지가 가열된다. 다수의 원통형 전지에서 균일한 온도를 얻기 위해서는 정교한 코일 설계 제작

과 함께 유도가열 장치의 전력제어 기술이 필수적이다. 전력제어로는 정전압, 정전류, 정전력 방식이 있는데, 본 연구에서는 정전압 방식을 사용하였다. 정전압 제어를 통하여 입력전압 또는 부하의 변동과 관계없이 설정출력에 의해 일정하게 유지되는 직류 전원을 얻을 수 있다. 결과적으로 다음 표 1에서와 같이 셀 수량별 설정 출력에 따른 정전압을 얻을 수 있었다. 예상전압은 설정 출력(%)을 설정하면 3배의 전압이 자동으로 설정된다.

실제로는 공정 상황에 따라 투입되는 셀 수량이 달라질 수 있는데 센서로 셀 수량을 감지하여 수량에 맞는 설정출력에 의한 정전압을 인가한다. 하지만 주파수는 셀 수량에 따라 상호 인덕턴스가 달라져 인덕턴스가 변하므로 다음식에 의해 공진 주파수도 변하게 된다.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

따라서 주파수 자동 추종 기능이 필수적이다. 공진이 되지 않으면 전류가 작게 흐르거나 가열효율이 떨어져 원할한 가열이 힘들다 [3]. 표 1에 수량 별 공진 주파수를 측정 한 결과도 제시되어 있다. 본 연구에서는 다채널 코일의 인덕턴스 변화에 의한 공진주파수를 자동 추종하기 위해, 제로크로싱의 원리로 주파수 자동 추종회로를 구현하였다. 그림 6은 공진 시 발진 콘덴서의 전압과 전류 파형이다. 이때 전류의 위상은 전압에 $\pi/2$ 만큼 앞서므로 전압이 최대, 최소 일 때 전류는 0이된다. 즉 이 시점이 인버터의 turning point라는 것을 알 수가 있다. 그림 7은 이와 같은 제로크로싱의 원리로 주파수를 자동 추종하는 파형을 나타낸 것이다. 발진 콘덴서에 흐르는 전류의 위상(사인파)은 발진 콘덴서 전압에는 $\pi/2$ 만큼 앞서지만 IGBT 출력파형(구형파)과는 동위상이 된다. 즉 IGBT의 게이트 인가 전압과도 동위상이 되므로 콘덴서의 전류가 0일 때를 검출하여 반전을 일으키는 원리를 사용하여 주파수 자동추종 회

Table 1. Voltage and oscillating frequency vs. the number of cells.

Cell quantity	Set output(%)	Expected voltage(V)	Measuring voltage(V)	Measurement frequency(kHz)
1	13.0	39.0	39.2	22.1
2	16.5	49.5	50.1	21.7
3	20.0	60.0	60.2	21.3
4	23.5	70.5	70.3	21.0
5	27.0	81.0	81.7	20.7
6	30.5	91.5	90.9	20.5
7	34.0	102.0	102.5	19.9
8	37.5	112.5	112.2	19.7
9	41.0	123.0	123.0	19.5
10	44.5	133.5	133.3	19.1
11	48.0	144.0	144.2	18.8
12	51.5	154.5	154.9	18.5
13	55.0	165.0	165.4	18.1
14	58.5	175.5	174.9	17.8
15	62.0	186.0	186.9	17.4
16	66.0	198.0	199.2	17.3
17	70.0	210.0	210.8	17.0
18	74.0	222.0	223.1	16.2

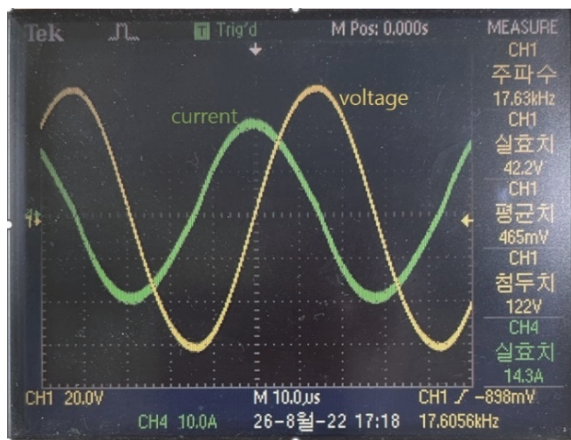


Fig. 6. Voltage and current of oscillator.

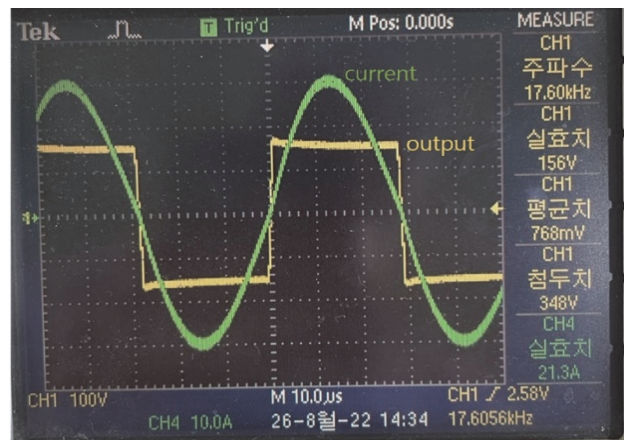


Fig. 7. Zero crossing waveform.

로의 공진을 구현하였다 [4-6].

코일 당 18채널의 셀 온도 측정을 위하여 모든 전지의 중심부와 외부에 열전대를 접촉하여 온도를 측정하였다. 가열시간은 1차가열 6초, 휴지시간 3초, 2차 가열 6초로 설정하였다. 외부의 온도는 100°C를 초과하지 않도록 출력을 설정한다(2차가열은 1차가열 출력의 약 80%로 설정). 90초 후 내부(중심부)온도를 측정하고, 출력 설정이 완료되면 3회 연속 반복하여 채널 별 온도를 측정한다. 한 개의 코일측정이 완료되면 같은 방법으로 총4개의 코일을 측정하여 코일별/채널별의 온도 데이터를 얻는다. 만약 외부

캔의 온도가 100°C를 초과하면 캔 과 젤리롤(jelly roll)을 절연하는 분리막이 손상되어 화재나 폭발의 원인이 될 수 있으므로 주의가 필요하다.

4. 실험 결과 및 고찰

셀 내부의 온도를 코일별/채널별로 3회 반복하여 측정 한 결과, 가열 90초 후 내부 온도가 기준치인 40.0°C±3°C 내에 분포하는 것으로 나타났고 이를 그림 8에 제시하였다.

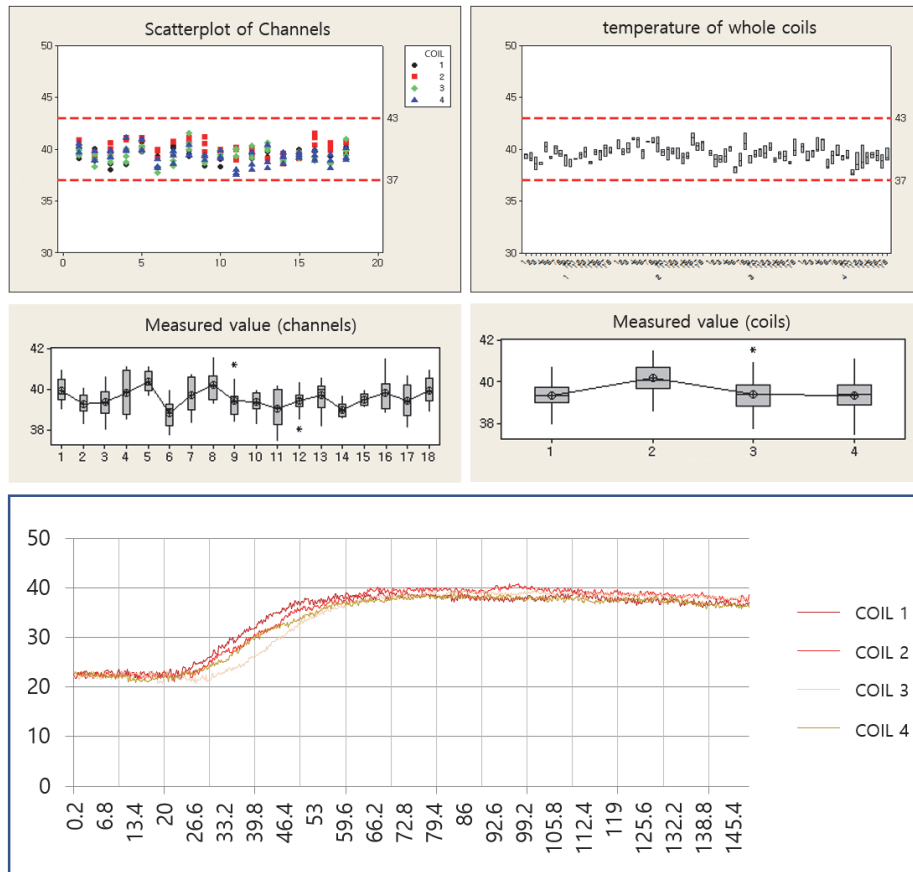


Fig. 8. Temperature variation vs. coils and channels.

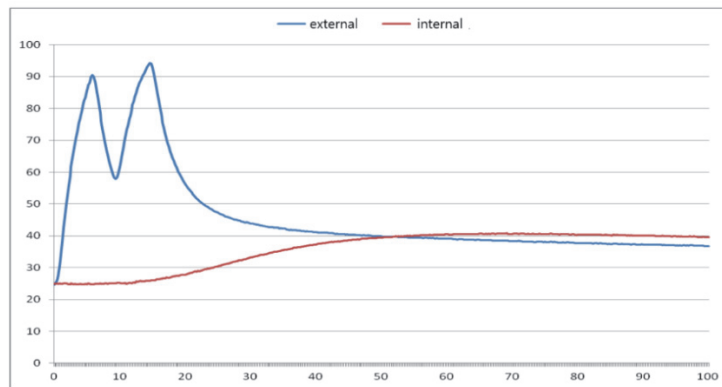


Fig. 9. Changes in external and internal temperature.

코일에 따른 동일 조건에 의한 발생 온도 차이는 중심값 기준으로 1°C 이하 수준으로 측정되었다.

그림 9를 보면 외부의 온도는 100°C를 초과하지 않는 것으로 나타났으며 출력 전압 및 전류 편차는 ±2 V, ±0.5 A 이하(그림 10)로 모두 허용 범위 내 균일하게 분

포되었음을 확인할 수 있었고, 출력 결과 역시 균일하게 제어됨이 확인되었다.

일반적으로는 가열체의 가열온도가 100°C 미만이고 가열시간이 휴지시간 포함 15초 일 경우 외부의 온도는 ±0.5°C이내의 편차를 유지할 수 있지만 셀의 온도는 상

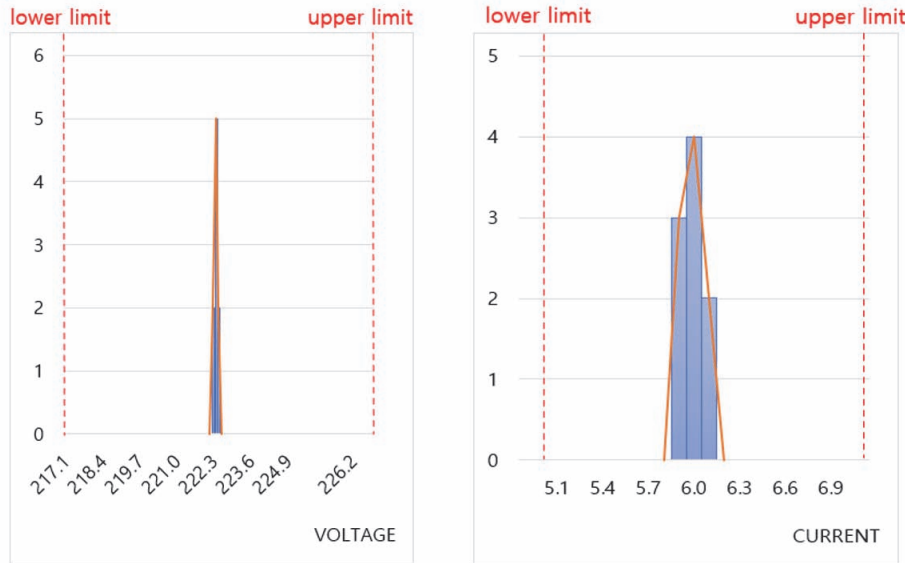


Fig. 10. Voltage and current variation.

대적으로 편차가 많이 발생한다($\pm 3^{\circ}\text{C}$ 이내). 코일에 공급되는 전압 전류 주파수가 동일하고 코일 별로의 온도 산포나 같은 코일에서의 온도 산포가 비슷하기 때문에 셀 자체의 문제로 판단하였다. 캔에 공급되는 열량은 동일하데 내부(중심부) 온도의 편차가 발생하는 것은 외부에서 내부(중심부)까지의 열전도율이 셀마다 다르기 때문이다. 열 전도가 잘 되면 내부(중심부)온도가 높은 반면 열 전도가 잘 안 되면 동일시간대에 상대적으로 외부 온도가 높기 때문에 외부에서 식는 열량이 많아지게 되므로 90초 후 내부 온도는 상대적으로 낮아지게 된다. 열 전도가 다른 이유는 조립 공정에서 캔에 젤리롤(jelly roll)을 삽입할 때 공차가 있기 때문에 미세한 공극이 발생하게 된다. 전극 외경의 공차 또는 한쪽으로 쏠림 정도에 따라 캔 내벽과의 접촉 정도가 달라지게 되므로 열 전도율이 달라지게 된다.

5. 결론

본 연구에서 유도가열 기술을 토대로 개발한 원통형 전지 수분제거용 유도가열 코일은 전지 내부의 수분이나 불순물을 증발시킴으로써 주입되는 전해액의 순도를 높이고, 온도가 상승함에 따라 전지 내부에 기포가 줄어들어 함침 속도 및 함침량을 증가시켜 원통형전지의 성능을 증가시키는데 유용하였다. 이를 통해 개발된 유도가열시스템 및 코일은 분당 200개 이상의 셀을 수분제거에 적합한 기준

치 온도까지 균일하게 가열시키므로 이차전지 양산에 필요한 적합성과 생산성을 검증할 수 있었다.

특히, 개발된 원통형전지 코일 및 유도가열 양산 시스템은 산업현장에서 여러가지 형태로 변형 또는 변화시켜 다양한 범위에서 생산성 향상을 위한 다채널 가열이 필요한 공정에 적용이 가능하고 여러가지 히터 대체품으로도 이용 가능하다.

본 연구는 자동차 시장의 패러다임 변화에 따라 이차전지와 전기차 모터의 효율을 극대화하는데 유용한 유도가열 기술을 개발한 후 그 성능을 평가하고자 원통형 전지 수분 제거용 코일에 유도가열 기술을 적용한 것이다. 유도가열 코일 개발은 피가열체의 형상, 재질, 가열온도, 가열 부위, 가열시간, 침투 깊이 등에 따라 다양하게 적용될 수 있으며, 이 과정에서 주파수의 결정과 고효율이 되도록 설정하는 매칭 트랜스의 설계가 매우 중요한 역할을 한다. 발전기는 이러한 코일에 고주파 전원을 공급하는 장치로써 수 kW에서 수 백kW의 용량이 있으며, 주파수 역시 다양하지만 주로 20 kHz에서 50 kHz를 사용한다. 안정적인 고주파 전원 공급을 위해 정전압, 정전력, 주파수 자동추종 시스템이 구비되어야 하고, 모니터링 시스템을 통해 전압, 전류, 발전주파수, 가열온도 등을 기록 저장하고 상, 하한 알람을 설정함으로써 가열불량의 혼입을 사전에 차단할 수 있어야 한다. 따라서 가열코일의 성능을 최대로 유도하기 위해서는 매칭 트랜스와 발전기의 제어가 매우 중요한 역할을 한다.

ORCID

Seok-Hyun Lee
Haiyoung Jung

<https://orcid.org/0000-0002-7763-0276>
<https://orcid.org/0000-0001-5531-2923>

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원
으로 수행되었음(과제번호 RS-2021_KA164174).

REFERENCES

- [1] O. Lucia, P. Maussion, E. Dede, and J. Burdío, *IEEE on Industrial Electronics*, **61**, 2509 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2281162>]
- [2] E. Kim, S. Kim, W. Hong, and D. Cho, *J. Korean Society of Marine Engineering*, **38**, 688 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.5916/jkosme.2014.38.6.688>]
- [3] S. Won, Thesis, Master of engineering, Electrical Engineering, University of Seoul (2017).
- [4] J. Kim, Thesis, Master of engineering, Electrical Engineering, Bookyung University (2018).
- [5] D. Kim, Thesis, Master of engineering, Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education (2021).
- [6] W. Yu, Thesis, Master of engineering, Electrical Engineering, Bookyung University (2018).