Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society(2012. 4), Vol. 23, No. 2, pp. 150~155
DOI: http://dx.doi.org/10.7316/KHNES.2012.23.2.150

연료전지 차량의 전기적 절연 특성에 관한 연구

유정한[1†] · 김덕환[1] · 김주한[1] · 정귀성[1] · 금영범[1] · 김세훈[1] · 안득균[1]
[1]현대자동차

Study on the Electric Insulation Characteristics in a Fuel Cell Vehicle

JUNGHAN YU[1†], DUCKWHAN KIM[1], JUHAN KIM[1], KWISEONG JEONG[1],
YOUNGBUM KUM[1], SAEHOON KIM[1], DEUKKUEN AHN[1]
[1]Hyundai Motor Company. 104, Mabuk-Dong, Gihung-Gu, Yongin-Si, Gyeonggi-Do 446-912, Korea

Abstract >> Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) stack power output is needed to be approximately 100 kW to meet the requirements of automotive applications. In order to secure the electric safety for drivers, passengers and mechanics, it is very important to understand phenomena of an electric insulation in a fuel cell vehicle. In this study, we studied the electric insulation properties and the insulation resistance of stack, system and vehicle in the field of fuel cell was estimated at the applied voltage of 500 V, respectively. Also we discussed the insulation factors such as the conductivity of coolant, the element of vehicle design and the intrinsic resistance of the vehicle components.

Key words : Fuel cell vehicle(연료전지 자동차), Electric insulation(전기 절연), Electrical conductivity(전기 전도도), High voltage(고전압), Stack(스택), Coolant(냉각수)

1. 서 론

친환경 차량으로 각광 받고 있는 연료전지 차량은 Fig. 1과 같이 연료전지 스택(stack), BOP(balance of plant), 전기 모터, 수소 저장 탱크, 각종 PE(power electronics) 부품 그리고 보조 동역원으로 사용되는 배터리로 구성된다. 이 중 연료전지 스택은 수소와 산소의 화학 반응을 통해 전기 에너지를 생성하고 이렇게 생성된 전기 에너지는 차량 주행을 위한 전기 모터의 구동은 물론, 시스템의 유지를 위한 주변 장치 구동에도 사용된다. 당사의 투싼 iX 연료전지차량의 전기 모터는 250~450V의 전압 범위에서 동작을 하며 동시에 이를 구동시키기 위해 스택은 유사 범위의 고전압 전력을 생성하게 된다.

따라서 기존의 내연기관 차량과 달리 고전압으로 구동되는 연료전지 차량은 승객 및 작업자의 보호를 위하여 고전압부와 차체간 절연을 통해 전기적 안전성을 확보할 필요가 있다. 현재 유럽과 북미에서는 각각 ECE R100(economic commission for europe

Fig. 1 Tucson iX FCV (fuel cell vehicle)

†Corresponding author : junghan@hyundai.com
[접수일 : 2012.3.30 수정일 : 2012.4.27 게재확정일 : 2012.4.27]

regulation 100), FMVSS 305(federal motor vehicle safety standard 305) 등의 법규를 제정하여 전기 자동차나 연료전지 자동차처럼 고전압 전기를 사용하는 차량에 대하여 운전 상태(in-use) 혹은 충돌 후(post-crash)의 전기적 안전성에 대한 규제를 하고 있으며, 친환경 차량의 기술 개발 속도에 맞물려 법규의 내용도 보다 구체화되고 있다[1-4]. 따라서 본 연구에서는 당사가 개발하는 연료전지 차량의 전기적 안전을 확보하기 위하여 연료전지 차량의 전기 절연에 필요한 인자(냉각수 전기 전도도, 냉각수 라인 레이아웃, 각 구성 부품의 저항) 및 그 영향도를 이론적으로 분석하고 그 인자에 따른 연료전지 차량의 전기 절연 특성을 시험적으로 검증하여 전기 전도도에 대한 허용 관리 기준 및 전기 안전 설계 기준을 제시하고자 한다.

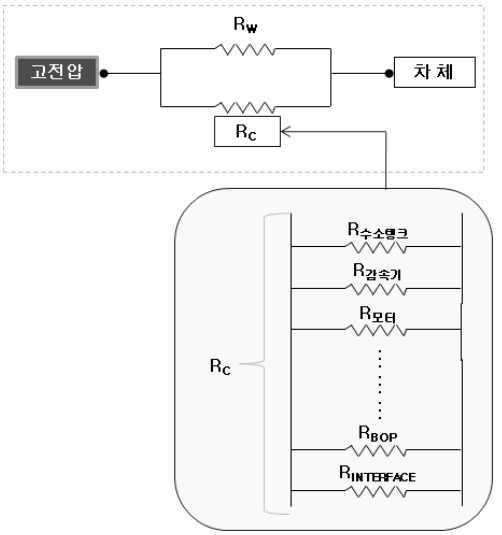

Fig. 2 Schematic diagram of fuel cell vehicle

2. 실 험

2.1 실험 방법

본 실험에서 연료전지 스택, 시스템, 차량의 절연 저항 상관 관계를 파악하고 이론식을 검증하기 위해 연료전지 스택, 시스템, 차량의 절연 저항을 다음과 같이 측정하였다.

- 연료전지 스택: 전기를 발생할 수 있는 단위 셀의 적층형태로서 1.2μS/cm의 DI(deionized) water를 냉각수 라인에 채운 상태에서 절연 저항을 측정하였다.
- 연료전지 시스템: 스택과 운전 장치로 구성되어 전기를 발생시킬 수 있는 최소 단위로서 스택과의 절연 상관관계를 파악하기 위해 1.2μS/cm의 DI water를 시스템의 냉각수 라인에 채운 후 절연 저항을 측정하였다. 또한 냉각수의 전기 전도도에 따른 절연저항을 파악하기 위하여 각 단계별로 연료전지 차량 전용 냉각수와 150μS/cm의 물을 일정 비율로 혼합하였고 전체 냉각수 라인에 일정한 전기 전도도를 확보하기 위하여 5분간 펌프를 구동하여 순환시킨 후 절연 저항을 측정하였다.
- 연료전지 차량: 연료전지 시스템에 구동 및 그 외 구성 부품들이 부가된 형태로서 차량 정지 상태(key off)에서 펌프만 구동 후 냉각수를 5분간 순환시켜 냉각수 전기 전도도를 일정하게 유지한 후 절연 저항을 측정하였다.

세부적으로는 작동되는 전압을 모사하기 위해 (+)단자와 샤시 혹은 (-)단자와 샤시간 500V를 인가한 후 흡수전류의 영향을 배제시키기 위하여 10분 후에 그 값을 측정하였다[5-7]. 절연 저항 측정은 YOKOGWA사의 MY40과 FLUKE사의 1550B를 이용하였고, 전기 전도도의 측정은 iSTEK사의 47C와 차량에 부착된 전기 전도도 센서를 이용하였다.

2.2 연료전지 차량의 절연 특성 분석

연료전지 차량의 냉각수는 스택의 냉각을 위해 스택 내부 유로를 통과하게 된다. 이 때 냉각수 내에 이온과 같은 하전 입자들이 있어 스택 고전압단과 차체간의 전기적인 통로가 연결되며 전기 전도도의 변화에 따라 절연 저항에 영향을 주게 된다[8-11]. 따라서, 연료전지 차량의 절연 저항은 Fig. 2에서 보듯이 냉각수 전도도의 영향을 받는 저항체의 병렬 저항 합(R_W)과 냉각수 전도도의 영향에 무관한 저항체의 병

렬 저항 합(R_C)으로 표현할 수 있고, 이 때 연료전지 차량의 저항(R_V)은 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{R_V} = \frac{1}{R_W} + \frac{1}{R_C} \quad (1)$$

일반적으로, 전도체에 대한 저항 R은

$$R(\Omega) = \rho(\frac{\ell}{A}) \quad (2)$$

로 표현된다. 여기에서 ρ는 비저항(Ω·cm)이고 ℓ은 두 전극간의 거리(cm), A는 단면적(cm^2)이다. 한편, 전기 전도도 σ는 비저항의 역수 (σ = 1/ρ)이므로 식 (2)는

$$R(\Omega) = (\frac{\ell}{A}) \times (\frac{1}{\sigma}) \quad (3)$$

로 나타낼 수 있다. 따라서 냉각수 전기 전도도에 영향을 받는 R_W는

$$R_W = (\frac{\ell}{A}) \times (\frac{1}{\sigma}) \quad (4)$$

로 되고, 식 (4)를 식 (1)에 대입하여 정리하면,

$$\frac{1}{R_V} = (\frac{A}{\ell})\sigma + \frac{1}{R_C} \quad (5)$$

이 되고, 식 (5)를 다시 정리하면 R_V는

$$R_V = (\frac{\ell}{A}) \left\{ \frac{1}{\sigma + \frac{\ell}{A}\frac{1}{R_c}} \right\} \quad (6)$$

로 정리된다.

연료전지 차량에서 식 (6)의 의미를 살펴보면, ℓ은 고전압단과 샤시간 냉각수 호스의 최단거리를 의미하며, A는 분기되는 냉각수 호스의 유효 단면적을 의미한다. 투싼 iX 연료전지 차량에서는 Fig. 3과 같이 냉각수 출구부의 경로 부분이 최단 거리(ℓ)가 된다. 따라서 절연 저항(R_V)을 증가시키기 위해서는 냉각수 전기 전도도(σ)를 낮추어야 하며, 설계적 요소인 ℓ은 길게 할수록, A는 작게 할수록 유리하다. 또한 R_C가 무한대에 가까울수록 절연 저항(R_V)의 값은 증가하게 된다.

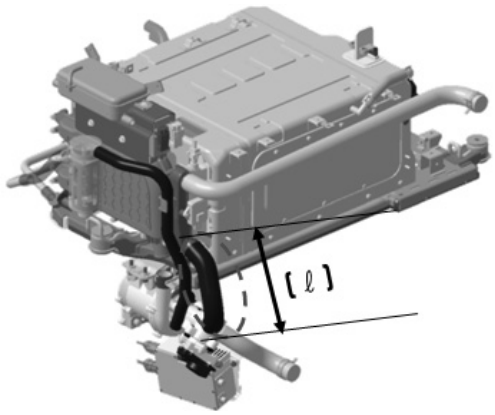

Fig. 3 Stack of Tucson iX FCV (ℓ: minimum distance between high voltage part and chassis)

3. 결과 및 고찰

3.1 스택과 시스템의 절연 저항

Fig. 4는 냉각수의 전기 전도도가 1.2μS/cm 인 상태에서 스택과 연료전지 시스템의 절연 저항을 나타낸다. 이 그래프에서 스택 절연 저항 값은 시스템 절연 저항값의 100배 정도 높은 값을 가진다. 전반적으로 스택과 시스템의 절연 저항은 유사한 경향을 보이나 각 시료에 따른 절연 저항의 차이는 일정하지가 않다. 더욱이 시료 7, 12, 13의 경우는 특히 그러하다. 이는 연료전지 시스템의 구성 단품 절연 저항(R_C)들이 각각 상이하기 때문이다. Fig. 2와 같이 연료전지 차량의 구성 부품들은 병렬 저항 구조로 구성되므로 시스템을 구성하는 스택 이외에 타부품들의 절연 저항이 작은 경우는 스택의 절연저항이 높더라도 시스템 구성 후에는 절연 저항 값이 낮아진

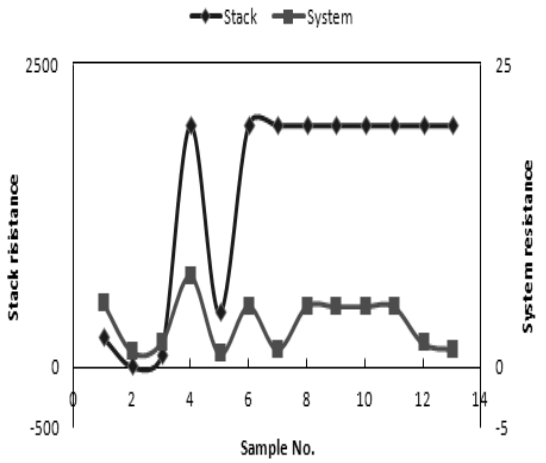

Fig. 4 The graph of insulation resistance (Stack vs. System)

다. 시료 7, 12, 13이 이런 경우에 해당하며, 스택 이외 부품의 절연 저항이 낮다는 것을 의미한다.

3.2 냉각수의 영향: 절연 저항(R_W)

Fig. 5는 냉각수 전도도에 따른 시스템의 절연 저항을 나타낸 그래프이다. 연료전지 시스템에서 냉각수의 전기 전도도가 증가함에 따라 연료전지 시스템의 절연 저항은 낮아지는 경향을 보였다. 2회에 걸친 실험 결과 동일한 경향을 보였다.

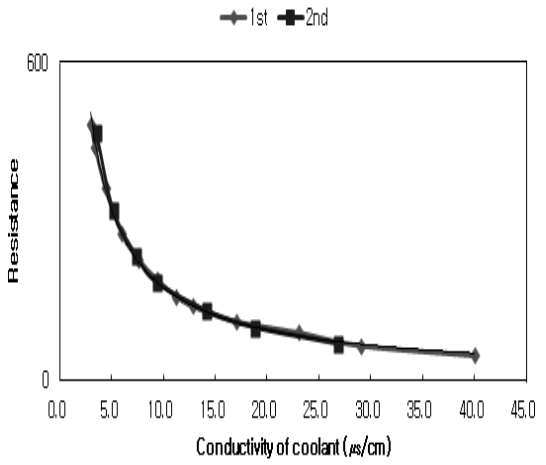

Fig. 5 The system resistance curves as a function of coolant conductivity

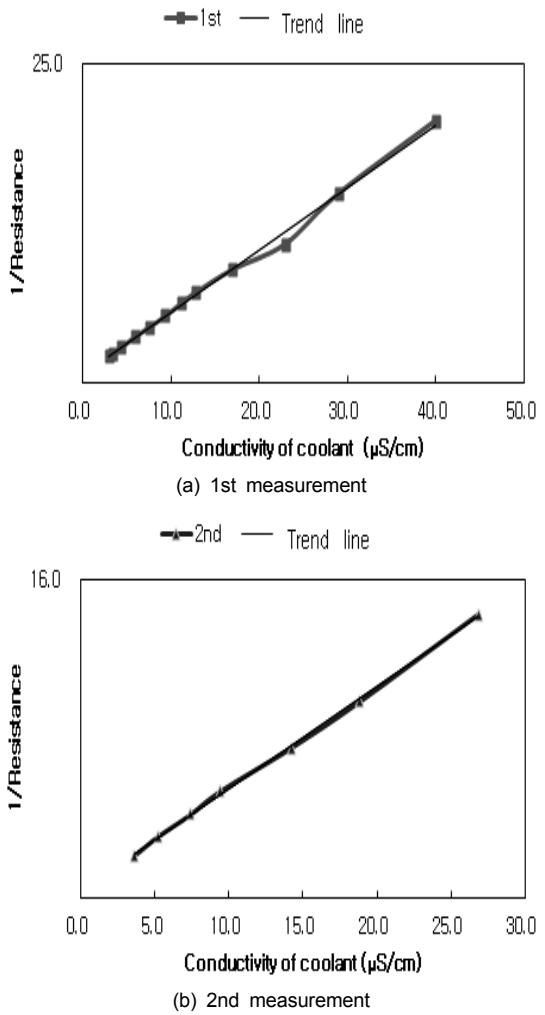

Fig. 6 The relation between the system resistance and coolant conductivity

Fig. 6은 연료전지 시스템에서 전기 전도도에 따른 절연 저항의 역수와의 관계를 나타낸 것으로 선형 직선의 형태로 나타난다. 이는 식 (5), 식 (6)에 상응하는 내용으로 전기 전도도와 절연 저항과의 반비례 관계를 나타낸다. 고전압 상태에서 냉각수의 전기 전도도 증가는 냉각수에 함유되어 있는 이온과 같은 하전 입자들의 증가 또는 이동성 증가를 의미함으로 누설 전류가 증가하게 된다. 즉, 냉각수 내에 하전 입자의 농도 및 이동성이 증가할수록 전기 전도도는 증가하고 절연 저항은 낮아지게 된다[8-11].

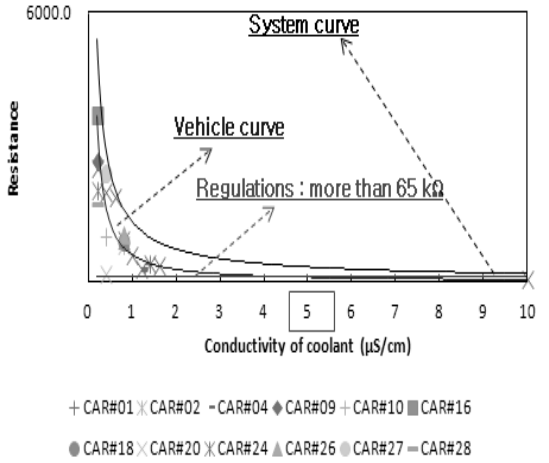

Fig. 7 The graph of insulation resistance (System vs. Vehicle)

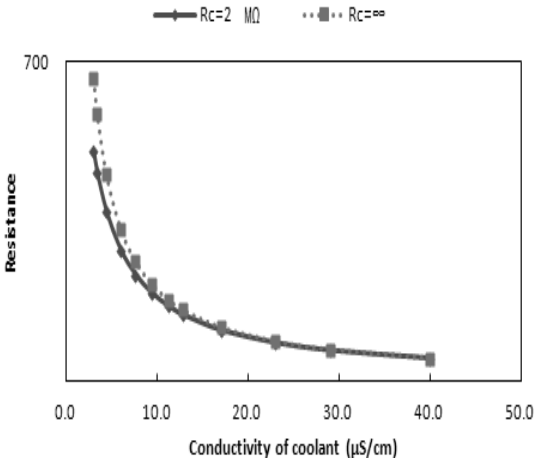

Fig. 8 The relation between the system resistance and R_C

3.2 냉각수 이외 영향 요소(R_C)

Fig. 7에서 같은 범위의 전기 전도도에서 차량의 절연 저항이 다른 이유는 차량의 전기 전도도 센서의 측정오차가 ±0.2μS/cm 수준으로 상대적인 분해능이 낮기도 하지만 주된 원인은 $R_{C_차량}$가 각 차량 마다 편차가 있기 때문이다. 이는 냉각수의 전기 전도도를 배제하더라도 각 구성 부품의 고유 절연 저항 및 인터페이스간 절연 저항이 각 차량별로 상이함을 의미한다.

Fig. 4는 연료전지 스택과 시스템 간의 절연 저항을 나타낸 것으로 스택의 절연 저항이 상대적으로 연료전지 시스템 보다 더 높다. 한편, Fig. 7은 연료전지 시스템과 차량의 절연 저항을 나타내는데, 유사하게 연료전지 시스템과 연료전지 차량의 절연 저항은 동일 수준의 전기 전도도에서 연료전지 시스템이 상대적으로 더 높다. 이는 Fig. 2에서 보듯이 차량의 절연 저항은 각 부품 절연 저항의 병렬 합으로 구성되어 냉각수에 무관한 저항의 크기가 $R_{C_스택} > R_{C_시스템} > R_{C_차량}$이기 때문이다.

한편, Fig. 7에서 법규 기준과 측정한 차량의 절연 저항 평균을 고려할 때 투싼 iX 연료전지 차량의 냉각수 전기 전도도는 일정 수준이하에서 관리되어야 한다.

앞서 식 (6)에 의거하여 Fig. 5과 Fig. 6에 해당하는 R_C값을 구할 수 있었다. 이때 $R_C = \infty$ 인 경우, 즉 냉각수의 영향에 무관한 단품들의 병렬 저항의 합이 무한대 이면 Fig. 8의 점선으로 나타낼 수 있다. 이는 연료전지 시스템에서 σ, ℓ, A가 고정인 경우 최대의 절연 저항 값을 갖는 곡선을 의미한다. 따라서 실제 연료전지 차량의 경우 σ, ℓ, A는 고정된 상태이므로 Fig. 8을 통해 각 구성 단품의 절연 수준을 가늠할 수 있다.

3.3 설계적 요소(ℓ, A)에 대한 고찰

Fig. 8에서 $R_C = \infty$ 인 절연 저항의 곡선 보다 더 큰 값을 얻고자 한다면, 식 (6)에서 설계적 요소를 다루어야 한다. 즉, 식 (6)에 의하면 연료전지 차량의 절연 저항의 변수는 σ, R_C이외에 ℓ, A도 있다. 이는 냉각수를 매개로 한 고전압과 샤시간의 근접성으로 설명할 수 있다. 냉각수에는 이온과 같은 하전 입자들이 있는데 고전압과 경로가 길어지면(ℓ이 커지면) 하전 입자들의 전기적 연결이 어려워지므로 절연 저항의 값은 증가하고, 냉각수 유로 면적이 작다면(A가 작아지면) 냉각수내 전기 전달 매체의 수가 상대적으로 감소하여 절연 저항의 값은 커지게 된다[8-11].

즉, 설계적으로 냉각수 내 함유되어 있는 하전 입

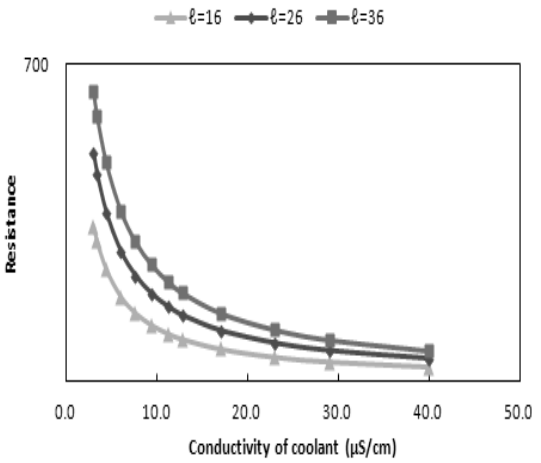

Fig. 9 The relation between the system resistance and ℓ

자의 전기적 연결을 어렵게 하면 동일한 R_W, R_C일지라도 절연 저항(R_V)을 증가시킬 수 있다. 따라서 연료전지 차량 초기 설계시 레이아웃을 고려하여 유효한 범위 내에 ℓ은 크게, A는 작게 구성한다면 연료전지 차량의 최적의 전기 안전성을 확보할 수 있다.

Fig. 9는 식 (6)에 의거하여 ℓ에 따른 절연 저항의 영향도를 나타낸다. 냉각수 배관의 유효 단면적(A)이 일정할 때 길이(ℓ)가 증가할수록 절연 저항(R_V)은 증가하는 경향을 보이는 것으로 앞의 내용을 증명한다.

4. 결 론

본 논문에서 연료전지 스택, 시스템, 차량의 절연 저항 분석 및 냉각수 전기 전도도를 고려한 절연 저항 측정 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 절연 저항의 주요 영향 인자인 전기 전도도(σ), 최단 절연길이(ℓ), 냉각수 배관의 유효 단면적(A), 냉각수에 무관한 저항의 합(R_C)을 파악할 수 있었다.
2) 가장 큰 영향을 끼치는 인자는 냉각수의 전기 전도도(σ)이고, 최단 절연길이(ℓ)와 냉각수 배관의 유효 단면적(A)은 설계적인 요소로 차량 개발 초기에 설계적인 접근으로 절연 저항 값의 목표를 예측 및 설정할 수 있다. 또한, 냉각수에 무관한 저항의 합(R_C)도 더불어 관리해야 할 인자이다.
3) 절연 저항을 높이기 위해서는 전기 전도도(σ)는 낮은 범위에서 관리하고, 설계적인 측면에서는 스택에서 분기되어 나오는 냉각수 라인이 차체와 물리적으로 이어지는 최단 길이(ℓ)는 길게, 냉각수 배관의 유효 단면적(A)은 작게 하여야 하며, R_C값은 높게 품질을 유지해야 한다.
4) 차량의 절연 저항은 냉각수 전도도에 의한 영향이 매우 크며, 전기 안전 법규를 만족하기 위해서는 연료전지 차량의 경우 냉각수의 이온 전도도를 일정 수준 이하로 관리할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 국토해양부 “FCEV 안전성 평가기술 개발” 과제의 일환으로 수행한 결과로서, 이 같은 성과를 낼 수 있도록 지원을 해주신 관계자분들에게 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. UNECE ECE Regulation 100.
2. FMVSS 305.
3. 김일구, 첸시, 박재홍, “연료전지 차량의 전기 안전성 규제안 작성 방법론”, 한국수소 및 신에너지학회논문집, Vol. 20, No. 2, pp. 134-141.
4. IEC60479-1.
5. IEEE Std 43-2000(R2006).
6. 정성규, 이덕출, “고전압 공학”, 문운당, 2003, pp. 215-224.
7. 이복희, “고전압 대기류 공학”, 청문각, 2010, pp. 73-95.
8. John O’M. Bockris, Amulya K. N. Reddy, “Modern Electrochemistry1”, PLENUM, 1998, pp. 35-98.
9. Matthew M. Mench, “Fuel Cell Engines”, WILEY, 2008, pp. 191-209.
10. John Newman, Karen E. Thomas-Alyea, “Electrochemical Systems”, WILEY, 2004, pp. 271-290.
11. Allen J. Bard, “Electrochemical Methods”, WILEY, 2001, pp. 534-560.