탄소섬유 복합차체의 낙뢰에 대한 안전성 분석
Safety Analysis of Carbon Composite-body Against Lightning Strikes

김성욱† 박대원* 길경석** 목재균*** 한주섭§
Sung-Wook Kim Dae-Won Park Gyung-Suk Kil Jae-Kyun Mok Ju-Seop Han

ABSTRACT

Light weight of vehicles by composite materials makes possible high speed, energy saving, and low repair cost. As Bimodal Tram and Tilting Train eXpress(TTX) use carbon composite material for their bodies, safety for passengers and electrical devices against unexpected failures has been issued more than ever. Lightning strike which generates high voltages and large currents is the worst case for the safety of passengers and devices. With this background, we experimentally investigated the insulation breakdown phenomena on carbon composite materials by the application of lightning surge voltage and current.

From the experimental results, we could estimate whether the composite body is safe or not for the inside passengers and devices against lightning strikes.

1. 서 론

철도의 고속화를 이루기 위해 3세대 차체 재료로 각광받고 있는 신소재 복합재료는 1,2세대 차체(1세대 차체: 스테인레스강 차체, 2세대 차체: 알루미늄) 철도차량에 비해 차체의 경량화와 에너지 절감 효과가 크며, 낮은 유지보수 비용의 장점을 가지고 있어, 현재 유럽과 일본에서 경량전철과 틸팅열차(TTX)에 많이 적용되고 있다[1,2]. 이러한 복합소재는 예전부터 주로 항공기에 사용되어 왔는데, 항공기를 만드는 재료는 강하면서도 가볍고 다양한 형태로의 변형이 쉬워야 하므로 복합소재는 이러한 요구 조건을 충족시키는 것이다[3].

복합소재의 연구개발이 다양한 분야로 확대되면서 그에 따른 안전성의 문제도 부각되어져 왔다. 특히 낙뢰는 고전압 대전류를 발생하므로 항공기나 철도차량의 승객 및 기기의 안전에 가장 위협적이다. 항공기의 경우, 기체의 경량화와 효율성을 위해 전기 전도성이 없는 복합소재가 많이 사용되고 있으며, 뇌격시 피해를 최소화하기 위해 전기가 흐를 수 있는 도전경로를 만들어 방전전류에 의해 전기적·기계적 속성이 발생하지 않도록 하고 있다[4]. 하지만 철도차량의 경우, 아직 낙뢰에 대한 연구가 없어 낙뢰시 안전성에 대한 고찰이 필요하다. 현재 국내에서는 바이모달 트램(Bimodal Tram)이나 틸팅열차가 복합소재를 적용함에 따라 낙뢰에 대한 안전성에 많은 관심이 모아지고 있다.

본 논문에서는 뇌충격 전압전류 발생장치를 이용하여, 낙뢰시 복합소재에서의 절연파괴기구와 차체의 전위상승에 대한 실험결과로부터 승객과 기기의 안전성을 평가하였다.

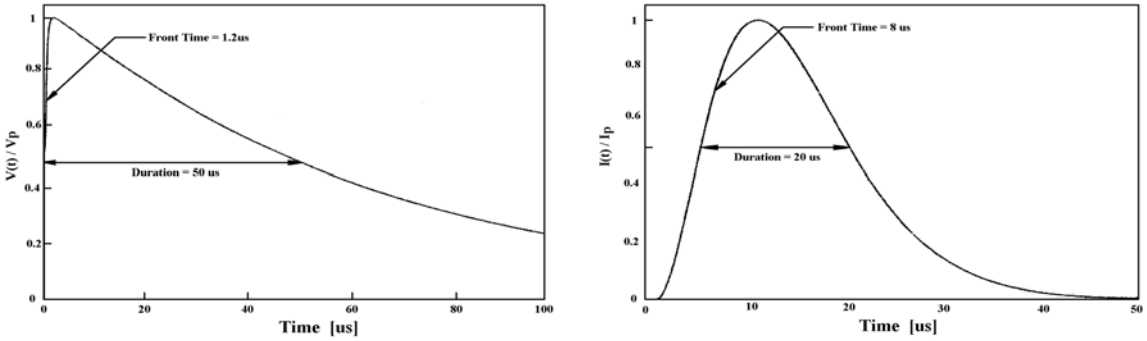
2. 이 론

2.1 뇌방전 현상

낙뢰는 전하를 가진 뇌운에 의해 대지전계가 상승하면서 뇌운과 대지사이에 공기절연이 파괴되어 일어나는 현상이다.

† 한국해양대학교 전기전자공학부 대학원 석사과정, 정회원
E-mail : p5375@hhu.ac.kr
TEL : (051)410-4893 FAX : (051)403-1127
* 한국해양대학교 전기전자공학부 대학원 박사과정, 정회원
** 한국해양대학교 전기전자공학부 교수, 정회원
*** 한국철도기술연구원 바이모달수송시스템연구단, 정회원
§ 한국철도시설공단 KR 기술연구소, 정회원

일반적으로 낙뢰는 수 십 [ms] 간격으로 평균 3 ~ 4회(최대 24회) 연속해서 발생하며, 이 때 전류는 평균 20 ~ 40 [kA], 최대 250 [kA]로 알려져 있다[5,6]. 초기 방전은 50 [m/㎲]의 속도로 계단상 리더(stepped leader)가 진전하며, 정 또는 부전하를 가진 리더가 대지 근처에 도달하면 도전성 채널(channel)을 형성하여 뇌운의 전하가 대지로 방출된다[7,8].
이와 같은 낙뢰에 대한 영향을 모의하기 위한 표준 파형으로는 1.2/50 [㎲] 표준 뇌충격전압과 8/20 [㎲] 표준 뇌충격전류가 있고 그림 1과 같다. 절연부의 절연파괴 시험에는 1.2/50 [㎲]의 뇌충격전압, 도전성부분의 전류내량 평가에는 8/20 [㎲]의 뇌충격전류가 이용된다.



(a) 1.2/50 [㎲] 전압파형 (b) 8/20 [㎲] 전류파형

그림 1. 표준 뇌충격전압 및 전류 파형

2.2 차량의 낙뢰

급전선 및 집진장치를 제외하고 차체에 낙뢰가 발생하면, 뇌운의 전하가 대지로 방출되는 과정에서 절연체에서는 절연파괴가 발생하고, 절연파괴경로 및 도전체에서는 대전류가 흐르게 된다.
그림 2는 차량에 낙뢰시 절연파괴와 대지로의 전류방출과정을 나타낸 것이다. 그림 2(a)에서와 같이 탄소섬유 복합차체의 틸팅열차에 낙뢰시 수 십 [kV]이상의 전위차가 생기면 절연파괴가 발생하고, 표면방전과 동시에 차체 내외부로 전류가 흐르고 철제차륜을 통해 뇌운의 전하가 대지로 방출된다. 이 과정에서 뇌격전류는 진행파(travelling wave)이므로 수 십 [㎲] ~ 수 십 [ms]동안 특성임피던스 및 차체 표면에서의 저항률에 따라 큰 전위차가 발생하여, 기기의 절연파괴 또는 내부 승객에 전기적 충격(electrical shock)을 줄 수 있다. 바이모달 트램의 경우는 철제차륜을 사용하는 틸팅열차와는 달리, 차륜으로 고무절연체가 사용되므로 차제의 전위가 상승한 후, 대지와의 전위차로 고무차륜에서 절연파괴가 발생하고 뇌운의 전하가 대지로 방출되게 되므로, 그림 2(b)와 같이 고무차륜의 손상 또는 폭발이 발생할 수도 있다. 따라서 탄소섬유 복합체를 사용하는 차량은 뇌격전류에 대해 절연을 유지하고, 뇌격전류가 흐를 때 전류를 대지로 충분히 흘려보내 전위상승 및 전위차가 발생하지 않도록 하여야 한다.

(a) 틸팅열차 뇌격 예 (b) 바이모달 트램 뇌격 예

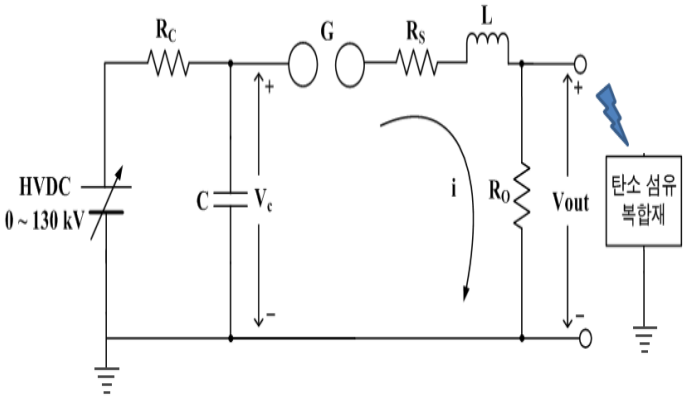
그림 2. 낙뢰시 절연파괴경로

3. 실험 및 방법

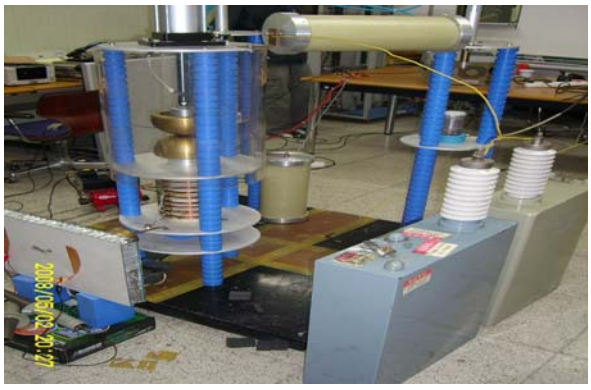
탄소섬유 복합소재에 낙뢰를 모의하기 위하여 100 [kV], 30 [kA]의 뇌충격 전압전류 발생장치를 설계·제작하였다. 그림 3에 구성과 사진, 출력전류 파형을 나타내었으며, R, L, C 로 구성된다.

직류 고전압 전원장치(130 [kV], 2.1 [mA])로 저항 R_C를 통하여 콘덴서 C를 충전한다. 콘덴서의 충전전압이 설정 전압 V_C가 되었을 때, 구갭 G로 방전시키면 파형 조정용 인덕터 L과 저항 R_S을 통해 R_O의 양단에 충격전압 V_{out}이 발생한다.

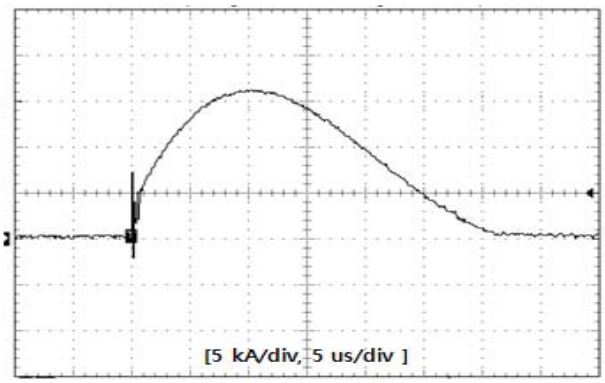
그림 3(c)는 뇌충격 발생장치에 의해 발생한 전류파형의 예를 나타내 것으로, 낙뢰에 의한 절연파괴시 흐르는 그림 1(b)의 표준 뇌충격전류와 동일한 파형이다.



(a) 구성



(b) 사진



(c) 뇌충격전류 파형의 예

그림 3. 뇌충격 전압전류 발생장치

낙뢰시 철도차량에서의 영향을 분석하기 위한 실험은 인가전류에 대한 복합체의 손상여부와 복합체 표면에서의 전위차를 분석하였다. 그림 4와 같이 방전전류 및 복합체 표면에서의 전위차는 각각 고주파 변류기(DC~50 [MHz], 50 [kA])와 고전압프로브(DC~70 [MHz], 40 [kV])로 측정하였다. 탄소섬유 복합체 전면에 뇌충격전류 인가시 후면(차체 내부의 위치)에서의 전위차는 내부 승객에 대한 안전성 평가를 위한 것으로, 인체저항을 고려하여 고전압프로브 양단에 1000 [Ω]의 저항을 연결하였으며, 측정전극의 간격은 20 [cm]이다.

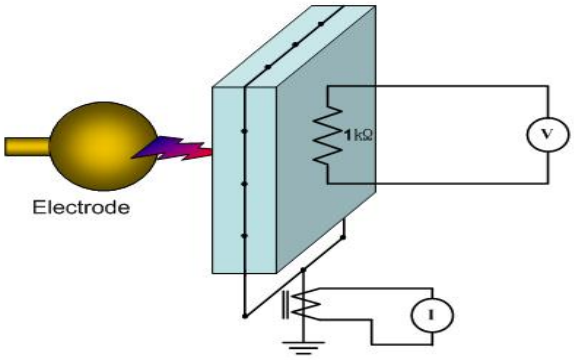
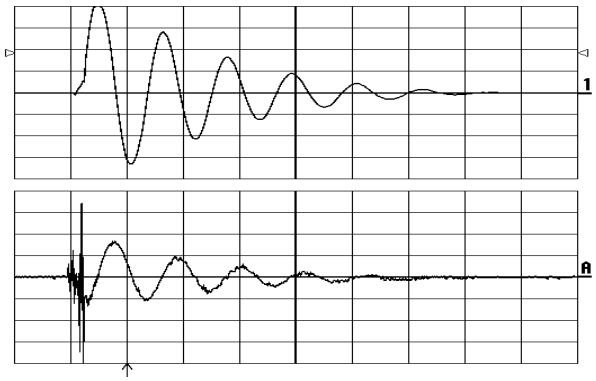


그림 4. 측정계의 구성

4. 결과 및 고찰

복합체 표면에 뇌충격전압 인가시 절연파괴가 발생하고, 절연파괴경로를 따라 차체 내외부로 전류가 흐르게 된다. 이 때 탄소섬유 복합체 자체의 내부 및 표면 저항률에 따라 전위차가 발생한다.

그림 5에는 75 [kV]로 뇌충격전압전류 발생장치의 콘덴서를 충전하여 방전시켰을 때, 방전전류와 복합체 이면부에서 측정된 전압 파형의 예이다. 전류파형은 복합체의 R 및 L에 의해 진동감쇄하는 형태로 최대값은 20.05 [kA]이며, 복합체 후면의 전극 간격 20 [cm]에서 측정된 전위차는 최대 1,570 [V]이다.



상 : [5 kA/div, 10 ㎲/div]
하 : [1 kV/div, 10 ㎲/div]

그림 5. 방전전류 및 표면 전위차

그림 6은 방전전류에 따른 표면 전위차를 나타낸 것으로 방전전류에 비례하여 증가함을 알 수 있으며, 표면 전위차는 평균 350 ~ 400 [V/m/kA]이며, 전체 지속시간은 약 70 [㎲]이다. 본 논문에서는 최대전류 20 [kA]까지 인가하여 얻어진 결과이며, 자연에서의 낙뢰는 평균 40 [kA] 및 최대 250 [kA]까지 보고되었기 때문에 이를 고려하여 낙뢰에 대한 영향을 평가하여야 할 것이다.

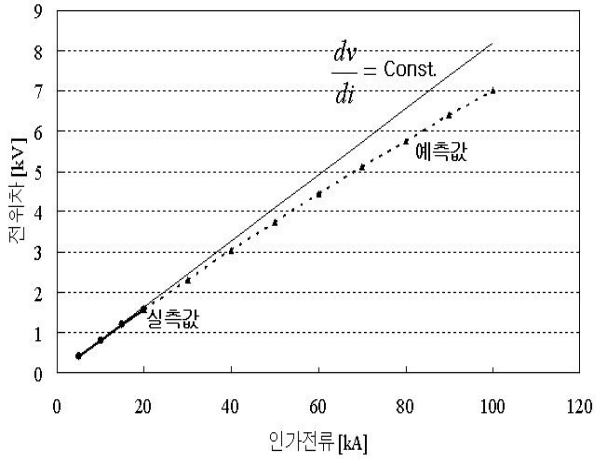


그림 6. 방전전류와 표면 전위차

그림 7은 뇌충격전류에 의해 변화된 탄소섬유 복합소재 전면 뇌격지점의 표면을 나타낸 것이다. 본 실험에서는 20[kA] 충격전류 1회로 전류 인가지점에는 절연파괴 흔적과 순간적 고열과 기계적 충격으로 직경 5[cm]정도가 내부 복합체와 표면절연 접착부분의 박리현상이 확인되었다.

그림 7. 탄소섬유 복합체의 표면손상

5. 결 론

탄소섬유 복합차체의 낙뢰에 대한 안전성을 분석하기 위하여 뇌충격 전압전류 발생장치를 제작하여 낙뢰현상을 모의하고, 뇌충격전류 인가에 따른 탄소섬유 복합체에서의 절연파괴기구와 전위차에 의한 차량 내부 승객의 안전성에 대해 실험적 연구를 수행하였다.

뇌충격전압으로 복합체 표면에 절연파괴가 발생하고, 방전전류에 의해 발생하는 복합체 표면에서의 전위차를 측정할 수 있었다. 실험결과로부터 복합체 표면에는 350 ~ 400[V/m/kA]의 전위차가 수 ~ 수 십 [㎲] 동안 나타날 수 있음을 확인하였다. 본 실험에서와 같이 복합체 단일구조에 낙뢰시, 인체가 복합체 표면에 직접 접촉하게 되면 전기적 충격이 있을 것으로 생각되며, 차량에 설치된 전기전자기기도 절연과 접지상태에 따라 영향을 받을 수 있을 것이다.

낙뢰에 대한 승객의 안전성과 전기전자기기의 손상은 뇌격전류의 크기, 방전경로, 차량구조 및 승객의 위치 등에 따라 현저히 차이가 있으므로 여러 가지 조건에서의 실험적 연구가 필요하다. 또한 본 논문에서는 연구조건의 제약으로 틸팅열차와 같이 차체가 대지에 접지되는 형태로만 실험하였기 때문에, 바이모달 트램과 같은 비접지차량에 대해서는 차체와 대지로의 절연파괴 기구에 대한 연구도 수행되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부의 교통체계 효율화사업의 연구결과로 수행되었음.

참고 문헌

1. K. J. Park, K. B. Shin and S. H. Hahn (2003), "Application of composite materials in Korean eXpress Tilting Train(TTX) system", The 2003 Autumn Conference of Korean society for composite materials, pp.65-68

2. G. Belingardi, M. P. Cavatorta and R. Duella (2003), "Material characterization of a composite-foam sandwich for the front structure of a high speed train", Composite structures, Vol.61, pp.13-25

3. 김태욱, 홍성혁 (1999), “항공기용 복합재료”, 대한기계학회, 기계저널 제39권 제2호, pp.37-42

4. K. E. Crouch and J. A. Plumer (1980), "Improved Test Methods for Determining Lightning-Induced Voltages in Aircraft", NASA Contractor Report 3329, pp33-39

5. Martin A. Uman (1987), "The Lightning Discharge", Academic Press Inc., pp.1-36

6. Martin. A. Uman (1986), “Lightning”, Dover Publications, Inc., pp.2-12

7. P. Hasse (1998), “Overvoltage protection of low voltage systems 2nd Edition”, IEE POWER AND ENERGY SERIES 33, pp.3-10

8. Ronald B. Standler (1989), "Protection of Electronic Circuits from Overvoltages", WILEY, pp.13-14