

탄소 복합차체의 낙뢰에 대한 안전성 고찰

김성욱* · 박대원* · 박찬용* · 최재성* · 지홍근* · 길경석**

*한국해양대학교 전기전자공학부 **한국해양대학교 전기전자공학부 교수

Safety Analysis of a Carbon Composite Car-body against Lightning Strikes

Sung-Wook Kim* · Dae-Won Park* · Chan-Yong Park*
Jae-Sung Choi* · Hong-Keun Ji* · Gyung-Suk Kil**

Division of Electrical and Electronics Engineering, National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

요 약 : 국내에는 차량의 경량화로 고속화 실현을 위해 탄소복합소재를 적용한 한국형 고속틸팅열차(TTX)가 개발되고 있다. 낙뢰에 의한 열차 사고가 빈번히 발생하면서 탄소복합소재차량에 낙뢰시 승객과 기기의 안전성에 대한 문제가 제기되고 있다. 본 논문에서는 철제차륜을 사용하는 TTX를 예로 연구를 수행하였으며, 낙뢰시 절연과괴현상을 모의하기 위하여 8/20 [μ s] 30 [kA]의 표준 뇌충격전류 발생장치를 제작하였다. 뇌충격전류 인가시 절연과괴기구와 차체표면에 나타나는 전위차로부터 탄소섬유 복합차체의 안전성을 분석하였다.

실험결과로부터 낙뢰시 차체 표면에는 뇌격전류 1 [kA]당 400 [V]까지 전위차가 측정됨으로서, 이를 고려하여 차량의 접지와 차폐를 실시하여야 한다.

핵심 용 어 : 탄소복합소재, 낙뢰, 뇌충격전류, 전위차, 접지

ABSTRACT : In Korea, Tilting Train eXpress(TTX) with carbon composite materials is on its process to accomplish light weight and high speed. Recently, safety problems regarding electrical devices and passengers on vehicles applying carbon composite car-body have been issued more frequently than ever as railway accidents due to lightning strikes are increasing. We carried out experiments for a TTX equipped with iron-wheels, and built a lightning impulse current generator which can produce 30 [kA] of 8/20 [μ s]. The safety of the carbon composite car-body was estimated by analyzing insulation breakdown mechanism and potential difference on a surface of the car-body when applying lightning impulse current. In the experiment, potential difference between 1 [m] distance is measured up to 400 [V] per 1 [kA]. Therefore, the grounding and shielding plan of carbon composite car-body should consider the peak potential difference that may occur.

KEY WORDS : Carbon composite material, Lightning strike, Lightning impulse current, Potential difference, Grounding

1. 서 론

철도차량은 정시성, 대량 수송성, 안전성 등의 장점이 있어 국가의 중추적 교통수단으로 부각되고 있다. 국내에는 철도의 고속화를 이루기 위해 신소재 복합소재를 적용한 한국형 고속틸팅열차(TTX)가 철도기술연구개발사업(2001~2007년)을 통

해 시제차량의 본선시험운전을 완료하였고, 현재 한국형 틸팅 열차의 신뢰성 평가 및 운용기술개발사업(2007~2012년)이 진행되고 있다[1]. 열차에 탄소복합소재를 적용함으로써 차체의 경량화로 주행시 공기의 저항을 적게 받고 철제차륜과 레일간의 마모를 최소화하여 유지보수비용 절감과 에너지를 절감할

* p5375@hhu.ac.kr, 051)410-4893

* dwpark77@hhu.ac.kr

* cypark@hhu.ac.kr

* matiachoi@hanmail.net

* adonis1024@nate.com

** kilgs@hhu.ac.kr 051)410-4414

수 있는 장점이 있다[2][3]. 이와 같이 신소재 복합차체의 철도 차량 연구개발이 활발하게 진행되면서 차량과 승객의 안전성의 문제도 제기되고 있다. 특히 낙뢰는 고전압 대전류를 발생시키므로 철도차량의 승객 및 기기의 안전에 가장 위협적이다. 국내 2005년 8월 6일에는 철도차량에 낙뢰가 발생하여 급전선이 파손되고 600여명의 승객이 대피하는 사고가 발생하였고, 2006년과 2007년에는 호주와 영국 등에서 열차에 낙뢰로 운행이 중단되는 등 철도분야에서도 낙뢰사고가 빈번히 발생하고 있다. 낙뢰에 의한 열차사고가 매년 발생하면서 낙뢰 또는 그와 유사한 조건의 전압 및 전류에 대한 실험적 연구가 요구되고 있다. 항공기의 경우는 뇌격시 피해를 최소화하기 위해 전기가 흐를 수 있는 도선 경로를 만들어 방전전류를 안전하게 흘려보낼 수 있지만, 복합소재를 사용하는 철도차량에 대해서는 현재까지 낙뢰에 대한 피해를 최소화하기 위한 연구가 전무하므로 낙뢰시 안전성에 대한 분석이 필요하다.

본 논문에서는 표준 뇌충격 전압전류 발생장치를 이용하여, 뇌격전류에 대한 탄소복합차체의 절연파괴기구와 차체에 나타날 수 있는 전위차(위험전압)에 대한 실험결과로부터 승객과 기기의 안전성을 고찰하였다.

2. 이 론

2.1 뇌방전 현상

낙뢰는 전하를 가진 뇌운에 의해 대지전계가 상승하면서 뇌운과 대지사이에 공기절연이 파괴되어 일어나는 현상으로 실제 낙뢰의 발생과정과 뇌방전 진전과정을 Fig. 1에 나타내었다.

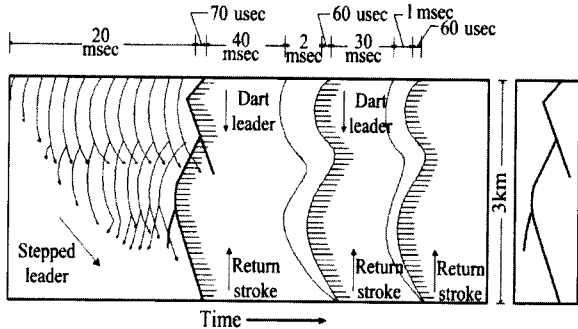


Fig. 1 Progress of lightning discharges

뇌방전의 진전과정은 정 또는 부극성 전하에 의해 공기 중 절연파괴강도를 넘어서면 초기방전이 시작되어 계단상리더(Stepped leader)가 대지로 진전한다. 계단상리더가 대지 근처에 도달하면 높은 전위가 형성되고 대지의 불평등 전장 중 강한 부분이 뇌운으로 방전을 시작하여 채널(Channel)을 형성한다. 채널의 부착과정(Attachment process)이 끝나면 채널을

통한 귀환뇌격(Return stroke)이 약 70 [μs]동안 발생한다. 그 후에 뇌운에 전하가 잔류하게 되면 후속 리더가 형성되어 대지로 진전하게 되는데, 이를 다투리더(Dart leader)라 하며 제 2, 제 3의 귀환뇌격이 발생하게 된다. 일반적으로 낙뢰는 30~40 [ms] 간격으로 평균 3~4회, 최대 24회 연속해서 발생하며, 이때의 전류는 평균 20~40 [kA], 최대 250 [kA]로 알려져 있다[4][5]. 본 연구에서는 이와 같은 낙뢰의 일반적 특성을 기초로 하여 8/20 [μs] 표준 뇌충격전류를 발생시켜 실험을 수행하였다.

2.2 차량의 낙뢰

탄소섬유 복합차체에 낙뢰가 발생하면, 뇌운의 전하가 대지로 방출되는 과정에서 차체표면에 절연파괴가 발생하고, 절연파괴 경로를 따라 대전류가 흐르게 될 것이다.

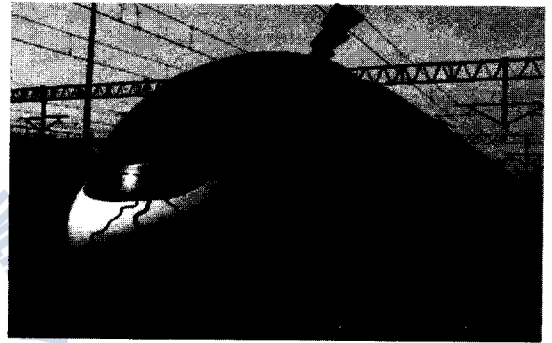


Fig. 2 Typical insulation breakdown path by a lightning strike

Fig. 2는 차량에 낙뢰시 절연파괴와 대지로의 전류방출과정을 나타낸 것이다. Fig. 2에서와 같이 탄소섬유 복합차체의 틸팅 열차에 낙뢰시 절연파괴가 발생하고, 표면방전과 동시에 차체 내외부로 뇌격전류가 흐르고 철제차륜을 통해 뇌운의 전하가 대지로 방출하게 된다. 이 과정에서 뇌격전류는 진행파(Travelling wave)이므로 수십 [μs]~수십 [ms]동안 뇌격전류 전파경로의 특성임피던스 및 차체의 저항률에 따라 큰 전위차가 발생할 수 있어, 기기의 절연파괴 또는 내부 승객에 전기적 충격(Electric shock)을 줄 수 있다. 따라서 탄소섬유 복합차체를 사용하는 차량은 뇌격전류에 의한 전위상승과 대지로의 전하방출 등을 충분히 고려하여 기기의 절연내력과 접지 등을 설계하여야 한다.

2.3 탄소섬유 복합차체

탄소섬유 복합소재는 기존의 금속재료에 비해 비강도, 내구성, 내식성 등이 우수하여 주로 항공기에 적용되어져 왔다. 또한 차체의 경량화, 에너지 절감효과, 낮은 유지보수 비용 등의 장점을 가지고 있어 현재 유럽과 일본에서 경량전철과 틸팅 열차와 같은 차량에도 많이 적용되고 있다. 국내에서도 탄소섬

유 복합소재를 한국형 고속 킬팅열차의 차체에 적용하여 개발하고 있으며, Fig. 3과 같이 탄소/에폭시(Carbon/epoxy) 복합재와 알루미늄 허니콤(Aluminum honeycomb) 샌드위치 구조로 제작되고 있다[6]. 낙뢰시 뇌격전류는 대부분 표피효과에 의해 표면으로만 흐르게 될 것이며, 소재 내부의 알루미늄 허니콤은 전류의 진행방향과 수직으로 배치되어 있어 큰 전류가 흐르지 못하고 전위차만 나타나게 된다[7][8].

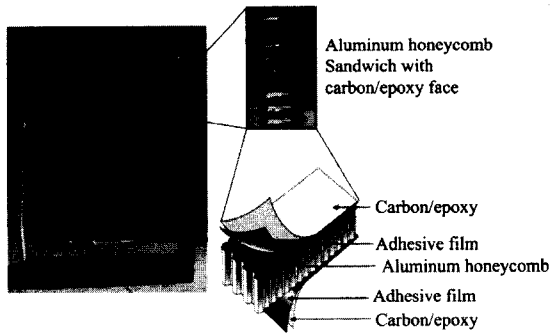


Fig. 3 Structure of a carbon composite car-body

3. 실험 및 방법

탄소섬유 복합차체에 낙뢰를 모의하기 위하여 Fig. 4와 같이 표준 뇌충격 전압전류 발생장치를 설계·제작하였다. 직류고전압 발생장치(130 [kV], 2.1 [mA]), 충전저항 R_C , 충전용 콘덴서 C , 방전갭 G , 파두 및 파미 조정용 저항 R_S+R_O 와 인덕터 L 로 구성된다. 직류전원장치로 R_C 를 통하여 C 를 충전하고, G 를 트리거 시키면 R_S+R_O 와 L 로 충전된 전하가 방전하면서 R_O 양단에는 뇌충격전압 V_{out} 이 발생한다. Fig. 4(a)에서 방전갭 G 의 방전저항을 무시하면 식 (1)이 성립한다.

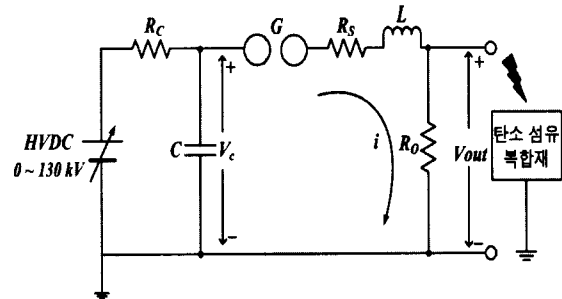
$$L \frac{di}{dt} + (R_s + R_o)i + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = V_c \quad (1)$$

초기조건 $t=0$ 일 때, $R_s+R_o=R$ 이라고 하면, 방전전류가 $R > 2\sqrt{L/C}$ 의 범위에서 동작할 때 출력전압은 식 (2)와 같으며, 급상승후 서서히 감소되는 파형이다.

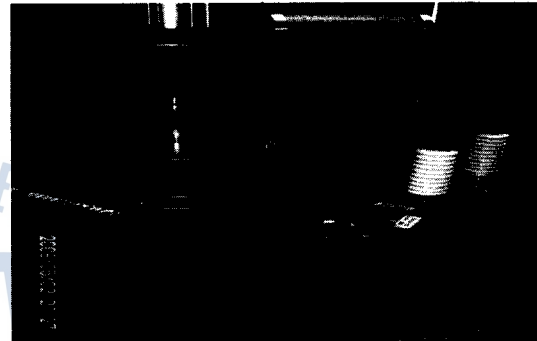
$$V_{out} = iR_o = \frac{R_o E}{R} \cdot \frac{\alpha}{\beta} \{ \varepsilon^{-(\alpha-\beta)t} - \varepsilon^{-(\alpha+\beta)t} \} \quad (2)$$

여기서, $\alpha = \frac{R}{2L}$, $\beta = \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}$ 이다.

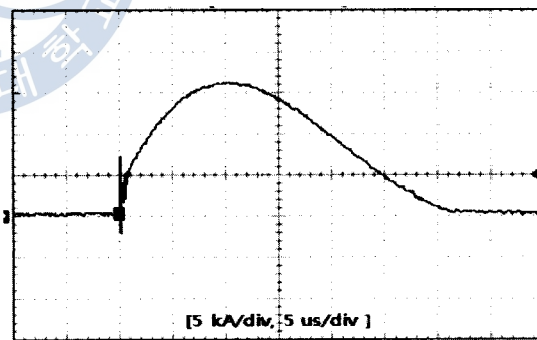
Fig. 4(c)는 뇌충격 발생장치로부터 얻어진 8/20 [μ s] 파형의 예를 나타내 것이며, 출력단에 접속되는 시료의 임피던스에 따라 변화하게 된다.



(a) Configuration



(b) Photograph



(c) Typical output waveform

Fig. 4 Lightning impulse generator

본 논문에서는 철제차륜으로 접지된 차량을 모의하기 위하여 Fig. 5와 같이 실험계를 구성하였다. 뇌충격전류 인가에 따른 탄소섬유 복합차체의 손상여부와 복합체 표면에서의 전위차를 측정하였다. 방전전류 및 복합체 표면에서의 전압측정에는 고주파 변류기(DC~50 [MHz], 100 [kA])와 고전압프로브(DC~70 [MHz], 40 [kV])를 사용하였다. 탄소섬유 복합차체 전면에 뇌충격전압이 인가되면 공기와 복합체 절연파괴가 발생하면서 복합체 내·외부를 통해 전류가 대지로 흐른다. 전위차의 측정 은 내부 승객에 대한 안전성 평가를 위한 것으로, 인체저항을

고려하여 고전압프로브 양단에 1 [kΩ]의 저항을 연결하였으며, 측정 전극의 간격은 20 [cm]이다[9].

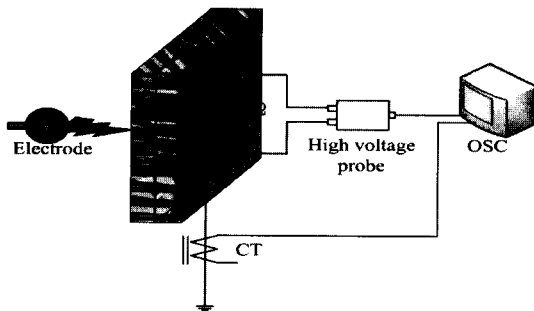
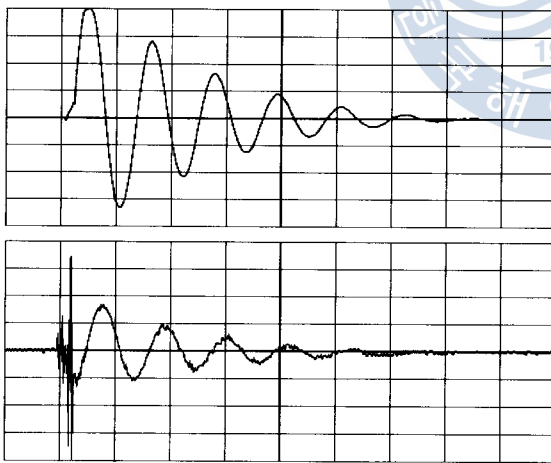


Fig. 5 Experimental system

4. 결과 및 고찰

Fig. 6에는 뇌충격전류를 Fig. 5의 실험계에서 복합체의 표면에 인가시 대지로 흐르는 전류와 이 때 복합체 이면 즉, 차량내부에서 측정된 전압 파형의 예를 나타내었다. 방전전류의 최대값은 20 [kA]이며, 복합체 후면 전극 간격 20 [cm]에서 측정된 전압은 1,570 [V]로 지속시간은 약 70 [μs]이다. 뇌충격전류 발생장치의 출력파형은 8/20 [μs]이었지만, 시료과 접지선의 임피던스의 영향으로 진동감쇠하는 파형이 나타났다.



Upper : Discharge current [5 kA/div, 10 μs/div]

Lower : Potential differences [1 kV/div, 10 μs/div]

Fig. 6 Waveforms of discharge current and potential differences

Fig. 7은 시료에 인가되는 뇌충격전류의 크기를 5 [kA]~20 [kA]까지 증가시키면서 측정한 위험전압을 1 [m]간격으로 환산하여 나타낸 것으로, 두 지점사이에 발생하는 전위차는 1 [kA]당 평균 350~400 [V]이었다.

본 논문에서는 최대전류 20 [kA]까지 실험하고, 인가전류의 증가에 따른 전압차의 변화를 고려하여 100 [kA]까지의 위험전압을 나타내었다. 본 실험에 사용된 탄소섬유 복합소재에서는 뇌격전류 100 [kA]에서 1 [m]사이에 최대 35 [kV]의 위험전압이 발생할 수 있다.

자연의 낙뢰는 평균 40 [kA] 및 최대 250 [kA]까지 발생하는 것으로 보고된 바 있으므로, 파괴설비 및 대책 수립에 있어서는 이를 고려하여야 할 것이다.

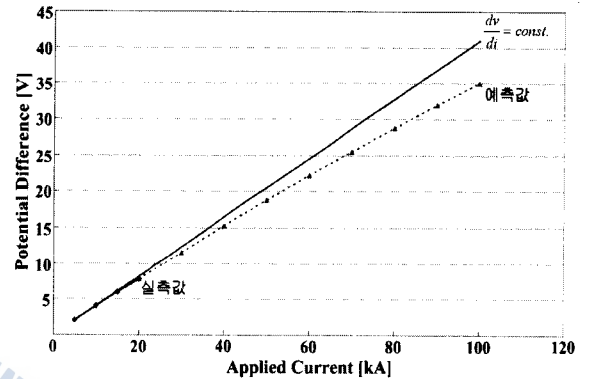


Fig. 7. Changes of potential differences as a function of applied current

Fig. 8은 뇌충격전류에 의해 변화된 탄소섬유 복합소재 전면 뇌격지점의 표면을 나타낸 것이다. 본 실험에서는 20 [kA] 충격전류 1회로 전류 인가지점에는 절연과피 흔적과 순간적 고열과 기계적 충격으로 직경 5 [cm]정도가 내부 복합체와 표면절연 접착부분의 박리현상이 확인되었다.



Fig. 8 Photograph of surface damaged by a lightning current

5. 결론

탄소섬유 복합차체의 낙뢰에 대한 안전성을 분석하기 위하여 뇌충격 전압전류 발생장치를 설계 및 제작하여 낙뢰현상을 모의하고, 뇌충격전류 인가에 따른 탄소섬유 복합체에서의 절연과피기구와 전위차에 의한 차량 내부 승객의 안전성에 대

해 실험적 연구를 수행하였다. 뇌충격전압으로 복합체 표면에 절연과파괴가 발생하고, 방전전류에 의해 발생하는 복합체 표면에서의 전위차를 측정할 수 있었다. 실험결과로부터 복합체 표면에는 350~400 [V/m/kA]의 전위차가 수~수 십 [μ s] 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 절연과파괴 기구에 대한 연구도 수행되어야 할 것이다.

원고접수일 : 2008년 12월 30일

원고채택일 : 2009년 01월 05일

참 고 문 헌

- [1] 서승일, 한성호, 김남포, 김정석, "한국형 틸팅열차 기술 개발 연구", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp.287-291, 2007.
- [2] 신광복, 구동희, 한성호, 박기진, "설계요구조건 검증을 통한 한국형 고속 틸팅열차(TTX)의 차체 재료 선정에 관한 연구", 한국철도학회논문집, 제7권, 제2호, pp.77-84, 2004.
- [3] 신광복, 이재열, 이상진, "초저상 버스 차체 적용을 위한 샌드위치 패널들의 저속충격 특성 연구", 대한기계학회논문집 A권, 제31권, 제4회, pp.506-516, 2007.
- [4] Martin A. Uman, "The Lightning Discharge", Academic Press Inc., pp.1-36, 1987.
- [5] Martin. A. Uman, "Lightning", Dover Publications, Inc., pp.2-12, 1986.
- [6] 김정석, 정종철, 한정우, 이상진, 김승철, 서승일, "한국형 틸팅열차용 복합재 차체의 하중적재에 따른 구조적 특성고찰", 한국철도학회논문집, 제9권, 제3호, pp.251-256, 2006.
- [7] Concettina Buccella, "Skin Effect Considerations on Transient Electrical Stresses in Composite Structures Affected by Electrostatic Discharge", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 38, no. 2, pp.545-548, 2002.
- [8] E. S. M. Mok and G. I. Costache, "Skin-effect considerations on transient response of a transmission line excited by an electromagnetic pulse", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 34, no. 3, pp. 320 - 329, 1992.
- [9] IEEE Power Engineering Society, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", IEEE Std 80-2000, p16-23, 2000.

