복합차체의 낙뢰에 대한 인체 안전성 분석

Safety Analysis for Passengers of Composite Car-body against Lightning Strikes

김성욱† 최수연* 박대원** 길경석§

Sung-Wook Kim Su-Yeon Choi Dae-Won Park Gyung-Suk Kil

ABSTRACT

In this paper, the safety for passengers of composite car-body against lightning strikes was analyzed by the application of an impulse generator which can produce impulse current up to 50 [kA] with 8/20 [us] waveform. Potential difference on inside surface of the car-body was measured as a safety parameter for the passengers against lightning strikes.

The potential difference between 20 [cm] distant was 175 [V] at 37.67 [kA], and it corresponded to 875 [V] between 1 [m] distant. The amount of charge flowing a passenger at 100 [kA] impulse current can be estimated to 0.31 [mA·s]. This is much less than the limit amount of charge for human body, 30 [mA・s] which is presented by Koeppen and Osypka.

1. 서 론

철도는 국가의 중추적 교통수단으로서 국가 경제에 큰 기여를 하였으며, 철도 고유의 특성인 정시성, 대량 수송성, 안전성 등의 장점 때문에 세계적으로 가장 필수적인 교통수단이다. 국내에는 철도의 고속화를 이루기 위해 신소재 복합재료를 적용한 한국형 고속틸팅열차(TTX)와 바이모달 트램(Bimodal Tram)이 신교통수단으로 개발되고 있으며[1,2], 복합차체 차량의 연구개발이 가속화되면서 그에 따른 안전성 문제도 부각되어져 왔다. 특히 낙뢰는 고전압 대전류를 발생하므로 철도차량의 승객 및 기기의 안전에 위협적이다. 국내 2005년 8월 6일에는 철도차량에 낙뢰가 발생하여 급전선이 파손되고 600여명의 승객이 대피하는 사고가 발생하였으며, 2006년과 2007년에는 호주와 영국 등에서 낙뢰에 의해 트램(Tram)의 운행이 중단되는 등 철도분야에서도 낙뢰사고가 번번히 발생하고 있다. 낙뢰에 의한 열차사고가 매년 발생하면서 낙뢰 또는 그와 유사한 조건의 전압 및 전류에 대한 실험적 연구가 요구되고 있다. 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[3,4]. 하지만 철도차량의 경우, 아직 낙뢰에 대한 연구가 없어 낙뢰시 안전성에 대한 분석이 필요하다.

본 논문에서는 뇌충격 전압전류 발생장치를 이용하여, 낙뢰시 신소재 복합차체에서의 절연파괴 기구와 차체의 전위상승에 대한 실험결과로부터 내부 승객의 안전성을 검토하였다.

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

2. 이 론

2.1 뇌방전 현상

일반적으로 낙뢰는 전하를 가진 뇌운에 의해 대지전계가 상승하면서 뇌운과 대지사이에 공기절연이 파괴되어 일어나는 현상으로, 뇌운 내부에서 발생하는 운방전(Cloud discharge)과 뇌운 간에 발생하는 운간방전(Cloud to cloud discharge), 뇌운과 대지사이의 방전인 낙뢰(Cloud to ground discharge), 공기 중에서 방전하는 공전(Cloud to air discharge)으로 구분된다. 그림 1에 뇌방전의 여러 가지 형태와 진전과정을 나타내었으며, 이들 방전 중 차량에 직접적으로 피해를 줄 수 있는 낙뢰는 뇌운과 대지사이에 발생하는 낙뢰이다.

뇌방전의 진전과정은 뇌운의 부극성 전하와 정극성 전하가 만나 절연파괴가 발생하여 대기의 절연파괴강도(약 30 [kV/cm])를 넘어서면 초기방전이 시작되어 계단상리더(Stepped leader)가 대지로 진전한다. 계단상리더가 대지 근처에 도달하면 높은 부전위가 형성되고 대지의 불평등 전계 중 전계가 집중된 부분이 뇌운으로 방전을 시작하여 채널(Channel)을 형성하는 부착과정(Attachment process)이 끝나면 채널을 통한 귀한뇌격(Return stroke current)이 약 70 [μs]동안 발생한다. 그 후에 뇌운에 전하가 잔류하게 되면 후속 리더가 형성되어 대지로 진전하게 되는데, 이를 다트리더(Dart leader)라 하며 제 2, 제 3의 귀환뇌격이 발생하게 된다. 일반적으로 낙뢰는 30~40 [ms] 간격으로 평균 3~4회, 최대 24회 연속해서 발생하며, 이 때의 전류는 평균 20~40 [kA], 최대 250 [kA]로 알려져 있다[5,6].

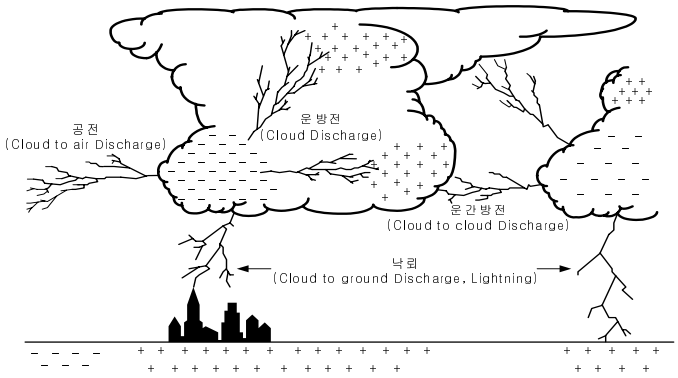


그림 1 뇌방전 현상

2.2 차량의 낙뢰

탄소섬유 복합차체에 낙뢰가 발생하면, 급전선 및 집진장치를 제외하고 차체표면에 절연파괴가 발생하고, 그 절연파괴 경로를 따라 대전류가 흐르게 될 것이다.

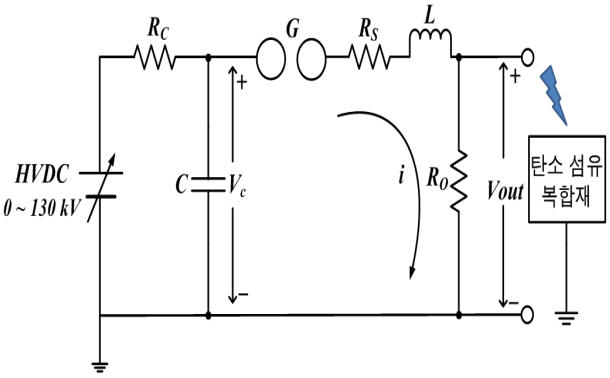
그림 2는 차량에 낙뢰시 절연파괴와 대지로의 전류방출과정을 나타낸 것이다. 그림 3에서와 같이 복합차체의 틸팅 열차에 낙뢰시 절연파괴가 발생하고, 표면방전과 동시에 차체 내외부로 뇌격전류가 흐르고 철제차륜을 통해 뇌운의 전하가 대지로 방출하게 된다. 이 과정에서 뇌격전류는 진행파(Travelling wave)이므로 수 십 [μs] ~ 수 십 [ms]동안 뇌격전류 전파경로의 특성임피던스 및 차체의 저항률에 따라 전위차가 발생할 수 있어, 이에 대한 분석과 대책수립이 요구된다. 특히 복합차체를 사용하는 차량은 뇌격전류에 의한 전위상승과 대지로의 전하방출 등을 충분히 고려하여 기기의 절연내력과 접지 등을 설계하여야 한다.

그림 2 차량뇌격 예

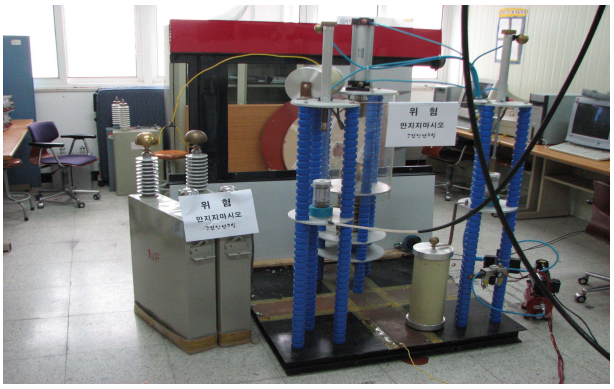
3. 실험 및 방법

복합차체에서 발생하는 낙뢰를 모의하기 위하여 그림 3과 같이 뇌충격 전류 발생장치를 설계·제작하였으며, 사양은 표 1과 같다.

뇌충격전류 발생장치는 직류고전압 전원장치 $HVDC$, 충전저항 R_C, 충전용 콘덴서 C, 방전갭 G, 파두 및 파미 조정용 저항 R_S+R_O와 인덕터 L로 구성된다. 직류고전압 전원장치로 R_C를 통하여 C를 충전하고, G를 트리거 시키면 R_S+R_O와 L로 충전된 전하가 방전하면서 R_O양단에 충격전압 V_{out}이 발생한다.



(a) 구성



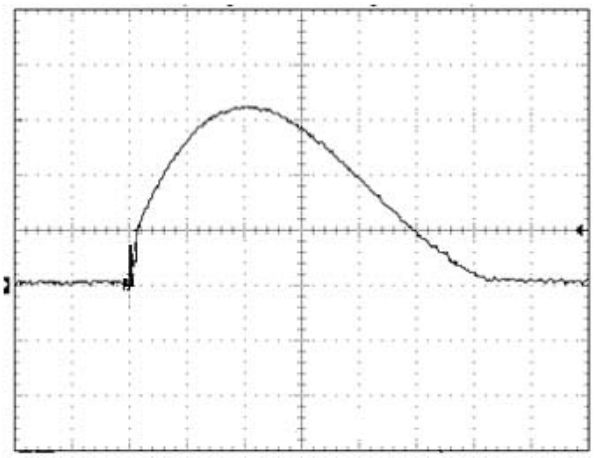
(b) 사진

그림 3 뇌충격전류 발생장치

표 1 뇌충격전류 발생장치의 사양

항 목	사 양	항 목	사 양
고전압 발생장치 (HVDC)	130 [kV_{max}] 2.3 [mA_{max}]	파형조정용 저항 (R)	0.2~10 [Ω]
충전용 콘덴서(C)	100 [kV], 4 [μF]	방전구갭(G)	황동구갭 직경 : 150 [mm]
파형조정용 인덕터 (L)	공심단층원통형 4~50 [μH]	변류기(CT)	tr : 100 [ns] Max : 50 [kA]

그림 4는 뇌충격전류 발생장치에 의해 얻어진 8/20 [μs]파형의 예를 나타낸 것으로, 출력단에 접속되는 시편의 임피던스에 따라 변화하게 된다.



[5 kA/div, 5 μs/div]

그림 4 뇌충격전류 파형의 예

뇌충격전류 인가에 의한 탄소섬유 복합차체의 손상여부와 표면에서의 전위차를 측정하기 위하여 그림 5와 같이 실험계를 구성하였다. 방전전류 및 복합차체 표면에서의 전압측정에는 고주파 변류기(DC~50 [MHz], 50 [kA])와 고전압프로브(DC~70 [MHz], 40 [kV])를 사용하였다. 또한 차체 이면부 즉, 차량내부에 해당하는 부분은 실제 적용될 두께 약 10 [mm]의 불연내장재를 설치하였고, 방전 전극과 차체의 거리는 10 [cm]이다. 복합차체 전면에 뇌충격전압이 인가되면 공기와 차체의 절연파괴가 발생하면서 차체 내외부를 통해 전류가 대지로 흐른다. 이때 전류의 빠른 분산을 위해 차체 하부에 접지역할을 하는 편조선을 설치하였다.

차체 표면에서의 전위차 측정은 내부 승객이 접촉시 안전성을 평가하기 위한 것으로, 시편 이면부에는 인체저항을 고려하여 고전압프로브 양단에 1 [kΩ]의 저항을 연결하였고, 측정 전극의 간격은 20 [cm]이다.

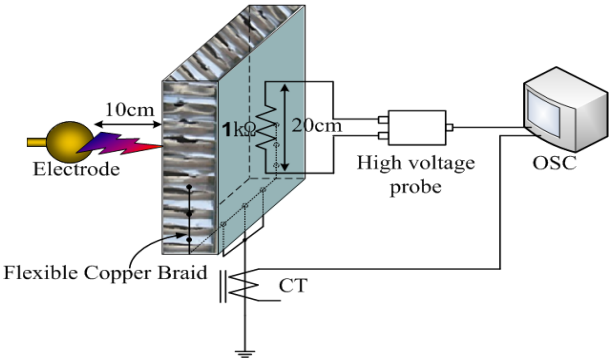
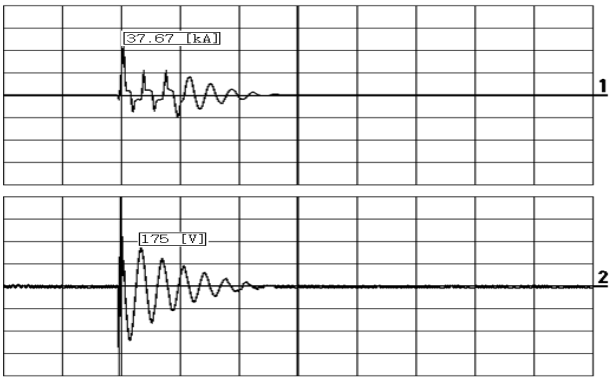


그림 5 측정계의 구성

4. 결과 및 고찰

복합차체 표면에 뇌충격전류 인가시 절연파괴가 발생하고, 절연파괴경로를 따라 차체 내외부로 전류가 흐르게 된다. 이때 탄소섬유 차체의 내부 및 표면 저항률에 따른 전위차가 발생한다. 뇌충격전류 발생장치의 콘덴서를 각각 40 [kV], 60 [kV], 80 [kV]충전하여 방전시켰을 때, 방전전류와 복합차체 이면부에서 측정된 전압 파형의 예를 그림 6에 나타내었다. 전류파형은 복합차체의 R 및 L에 의해 진동감쇄하는 형태이며, 37.67 [kA]에서 최대 175 [V]로 방전의 최대지속시간은

약 130 [μs]이다.
방전전류와 전위차는 표 2와 같고, 이들 전위차는 측정저항 1 [kΩ]에 무관하게 나타났다.



상 : 방전전류 [17.2 kA/div, 50 μs/div]
하 : 표면전위차 [100 V/div, 50 μs/div]

그림 6 방전전류와 표면전압의 파형 예

표 2 방전전류와 전위차

방전전류 [kA]	20 [cm]간격으로 측정시 전위차 [V]	1 [m] 간격으로 환산시 전위차 [V]	1 [m]간격으로 1 [kA]당 전위차 [V]
9	81	405	45
16.8	120	600	35.7
37.7	175	875	23.2

표 2에서 방전전류의 증가에 의해 두 점사이에 나타나는 전위차는 증가하지만, 전류에 대한 전위차 증가율($\frac{dV}{dI}$)은 오히려 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 방전전류가 증가함에 따라 복합차체의 저항률이 감소하기 때문이다.

그림 7은 시편에 인가되는 뇌충격전류의 크기에 따른 차체 내부표면 1 [m] 간격에 직접 접촉시 최대 전위차를 나타낸 것으로, 10 [kA]에서 500 [V]이하, 20 [kA]에서 720 [V]이하, 40 [kA]에서 930 [V]이하로 예측된다. 방전전류 증가에 따라 전위차는 증가하겠지만 $\frac{dV}{dI}$는 감소하므로 100 [kA]의 전류에 대해 최대 전위차는 1,290 [V]로 산출된다.

한편, 40 [kA]의 방전전류가 흐를 때, 피부에 직접 접촉시 인체에 인가되는 전하량 Q [mA·s]는 다음과 같이 산출할 수 있다. 인체 최소저항을 500 [Ω], 방전전류의 지속시간을 120 [μs]이내로 하고 인체를 흐르는 전류 I [A]는

$$I = \frac{930\ V}{500\ \Omega} = 1.86\ \text{[A]} \qquad (1)$$

전하량 Q는

$$Q = I \times T = 1.86 \times 120 \times 10^{-6} = 0.22 \ [\text{mA·s}] \qquad (2)$$

이다. 마찬가지로 100 [kA]로 계산하면 전하량은 0.31 [mA·s]로 교류전류로 제시된 인체의 안전 한계전하량 30 [mA·s]보다 훨씬 작은 값이므로 인체 안전을 전혀 위협하지 않는 수준이다.
본 계산은 인체의 손과 발 등 피부가 차체내부 표면에 직접 접촉하는 전기적으로 가장 악조건에서 계산된 것이며, 실제 조건에 있어서는 차체 표면의 뇌격전류 밀도가 감소하고 승객이 신발을 착용하게 되어 절연저항이 크게 증가하므로 감지 조차하지 못할 수 있다.

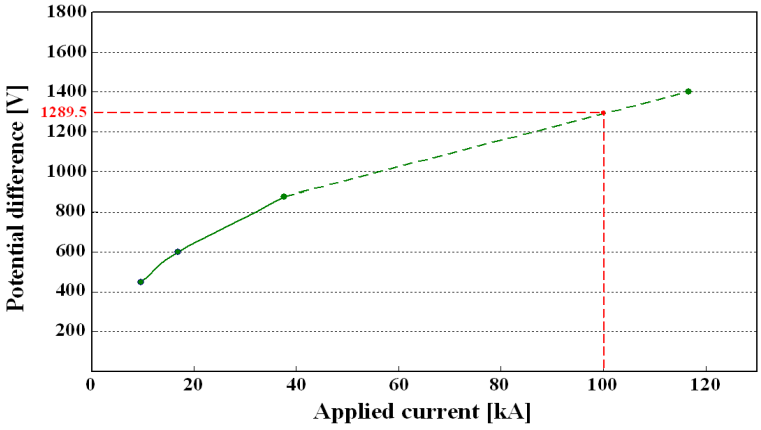


그림 7 방전전류-전위차

그림 8은 뇌충격전류에 의한 복합차체의 손상된 표면을 나타낸 것이다. 36.7 [kA] 인가시 순간적 고열과 기계적 충격으로 Carbon/epoxy 부분이 직경 7 [cm]정도 파손되었고, 약 3초간 일시적인 발화현상이 있었으나 내부에는 어떠한 변화도 관측되지 않았다.

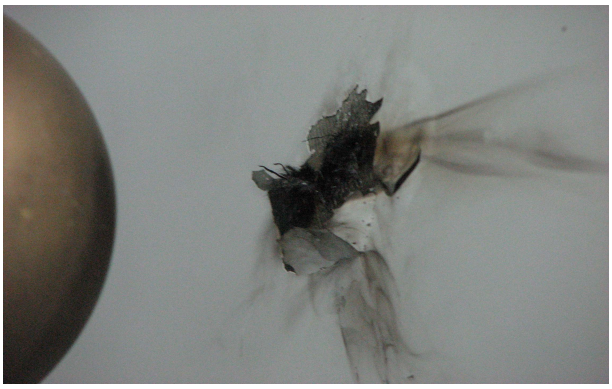


그림 8 복합차체의 표면손상

5. 결 론

탄소섬유 복합차체의 낙뢰에 대한 안전성을 분석하기 위하여 뇌충격전류 발생장치를 설계 및 제작하여 낙뢰현상을 모의하고, 뇌충격전류 인가에 따른 복합차체에서의 절연파괴기구와 전위차에 의한 차량 내부 승객의 안전성에 대해 실험적 연구를 수행하였다. 뇌충격전류의 인가에 의해 복합차체 표면에 절연파괴가 발생하고, 방전전류에 의해 발생하는 복합차체 표면에서의 전위차를 측정

할 수 있었으며, 결론은 다음과 같다.

실험결과로부터 복합차체에 40 [kA]의 방전전류가 흐를 때 내부 승객이 피부에 직접 접촉시 인체를 흐르는 전하량은 0.22 [mA·s]로 인체 안전한계전하량 30 [mA·s]보다 훨씬 작은 값이므로 내부 승객은 전기적 절연파괴로부터 안전하다고 판단된다. 실제조건에 있어서는 방전전류의 분산경로가 크게 증가하여 전위차는 감소하고, 승객도 신발을 착용하게 되므로 절연저항도 크게 증가하며, 방전시간도 수 백 [μs]이하이므로 감지 조차하지 못할 수 있다.

차체에 뇌격시 절연파괴와 방전전류에 의한 차체표면의 변화에 있어 36.7 [kA] 충격전류 인가시 절연파괴로 인한 순간적 고열과 기계적 충격으로 직경 7 [cm]정도가 손상되면서 약 3초간 일시적 발화현상이 있었으나, 내부에는 어떠한 변화도 관측되지 않았다. 이와 같은 방전전류에 의한 표면손상에 대해서는 더 높은 전류에서 실험평가가 필요하다.

한편, 낙뢰에 대한 승객의 안전성과 전기전자기기의 손상은 뇌격전류의 크기, 방전경로, 차량구조 및 승객의 위치 등에 따라 현저히 차이가 있으므로 향후 여러 가지 조건에서 실험적 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 (주)한국화이바의 연구비지원으로 수행되었음.

참고 문헌

1. 서승일, 한성호, 김남포, 김정석(2006), “한국형 틸팅열차 기술 개발 연구”, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp.287-291
2. 신광복, 이재열, 이상진(2007), “초저상 버스 차체 적용을 위한 샌드위치 패널들의 저속충격 특성 연구”, 대한기계학회논문집 A권, 제31권, 제4회, pp.506-516
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 (1986), “Lightning”, Dover Publications, Inc., pp.2-12
6. Martin A. Uman (1987), "The Lightning Discharge", Academic Press Inc., pp.1-36