< 기술 논문 >

Charged Cable Model (CCM) 정전기 방전(ESD)에 의한 전자제어장치의 손상

하 명 수* · 정 재 민

콘티넨탈오토모티브시스템 엔진시스템 하드웨어팀

Charged Cable Model (CCM) ESD Damage to ECU

MyongSoo Ha* · JaeMin Jung

Engine Systems Electronics, Continental Automotive Systems Corporation, 45-29 Saeum-ro, Icheon-si, Gyeonggi 467-080, Korea
(Received 13 August 2012 / Revised 3 September 2012 / Accepted 4 September 2012)

Abstract : ESD damage by Charged Cable Model (CCM) is introduced. Due to its own impedance characteristic unlike Human Body Model (HBM) or Machine Model (MM) electric component can be destroyed even though it is located after typical protection circuit. Possible mechanism of ESD damage to automotive electric control unit (ECU) in vehicle environment by CCM discharge was investigated. Based on investigation, field-returned vehicle whose ECU is expected to be damaged by CCM discharge was tested to reproduce it and similar electric component destruction inside ECU was observed. Suggestions to reduce the possibility of ESD damage by CCM are introduced.

Key words : CCM(Charged Cable Model, 대전 케이블 모델), ESD(Electro Static Discharge, 정전기방전), ECU(Electric Control Unit, 전자제어장치), LPI(Liquefied Petroleum Injection, 액화 석유 분사)

Nomenclature

E : energy, J
 U : voltage, V
 R : resistance, Ω
 C : capacitance, F
 L : inductance, H
 l : length, m

Subscripts

DUT : device under test
HBM, CCM : human body model, charged cable model
wire : cable of CCM

1. 서 론

일반적으로 자동차에 장착되는 전자제어장치(ECU, Electric Control Unit)는 정전기 방전(ESD, Electro-Static Discharge) 충격에 내성 있는 회로설계 과정 및 규격화된 ESD 시험 검증을 거친다. 자동차 전장품의 ESD 내구 시험 검증을 위한 규격은 ISO/IEC 국제 표준 및 각 완성차 업체에서 구체적으로 정의하고 있으며, ECU 제품이 사람 혹은 기계와 접촉 시 발생할 수 있는 ESD 특성을 모델링한 Human Body Model (HBM), Machine Model (MM) 조건을 명시하고 있다.

자동차 제조 및 수리 과정에서 ECU는 자동차 배선과 연결된다. ECU와의 결합 시 배선의 기생 캐패시턴스로 인해 배선에 전하가 충전되어 있는 상태이면, 충전된 전하는 커넥터를 통해 ECU로 빠른 속도로 방전된다. 이 방전 전류는 HBM의 방전 전류와 다른 특성을 보이며, Charged Cable Model (CCM)의

*Corresponding author,
E-mail: myongsoo.ha@continental-corporation.com

방전 전류 특성에 더 가깝다. CCM ESD는 자동차 전장 분야에서보다는 통신 분야에서 더 잘 알려져 있는 모델이다. (예: 이더넷 인터페이스에 긴 LAN 케이블을 연결하는 과정에서 발생하는 ESD)²⁾ CCM ESD는 Cable Model (CM) discharge 또는 Cable Discharge Event (CDE)로도 알려져 있다.^{1,3)}

자동차 전장분야에서 나날이 증가하는 제어기능의 요구에 따라 ECU 내 전자부품은 수량이 늘어가고 소형화되며 기능 구현을 위해 ECU와 결선된 배선 수 또한 증가하는 추세이다. 차량 배선이 증가함에 따라 CCM ESD로 인한 ECU의 손상이 부각되고 있으나 HBM 및 MM을 제외한 현실적인 시험 규격 제정 및 분석은 진행되고 있지 않은 실정이다.

CCM ESD는 고유의 임피던스 특성으로 인해 HBM ESD보다 더 빠른 방전 전류를 형성한다. 결과적으로 같은 ESD 전압 조건에서도 HBM보다 더 높은 에너지를 방출하여 ECU 손상의 가능성을 증가시킨다.

본 논문에서는 CCM ESD가 기존의 ECU 입력단 회로에 손상을 유발하는 메커니즘을 기술하고 실차 및 단품 시험을 통해 이를 검증하고자 한다. 또한 CCM ESD로 인한 손상 가능성을 감소시킬 있는 방안을 제안하고자 한다.

2. CCM 메커니즘

자동차 배선은 다수의 경로로 전하가 충전될 수 있다. 먼저 마찰 전기에 의한 충전(triboelectric effect)이 있는데, 자동차 배선이 해당 ECU에 연결되기 전 다른 물질과의 접촉이 발생하는 과정 중에 전하가 충전되는 경우이다. 배선 운송 중 보호커버와의 마찰로 전하의 충전이 유발될 수 있으며, 자동차 생산라인에서 배선 장착 과정 중 다른 부품과의 접촉 및 마찰도 요인이 된다. 또한 배선 다발 내 케이블 간의 마찰로 인하여 전하가 충전되기도 한다. 위 예와 같은 과정을 통해 전하가 자동차 배선의 절연 피복에 축적되고, 절연피복 내 전도체의 전위가 상승하는 효과가 발생한다.

또 다른 경로로 자동차 배선과 다른 전위를 가지는 물체 간의 전하 이동이 있을 수 있다. ECU 또는 작업자와 자동차 배선이 접촉했을 때, 두 객체 간의

전위차가 존재하면 전위가 높은 곳에서 낮은 곳으로 전하가 이동하면서 자동차 배선이 충전된다.

전자기장 유도 또한 전하가 충전되는 경로가 된다. 자동차 배선 주변에 전류가 흐르면서 전자기장을 형성하면, 유도 전하가 배선에 축적될 수 있다.

Fig. 1은 CCM ESD의 특성을 실험할 수 있는 장비 구성과 시뮬레이션할 수 있는 회로를 나타낸다.¹⁾ 1m 길이의 240Ω 저항을 가진 전선에 고전압 발생기로 전하를 충전한 뒤, test board에 연결하여 방전전류를 측정하는 개념이다. 전선의 기생 캐패시턴스는 습도의 영향을 받으므로 일정한 온도 및 습도 환경(21°C, 35% RH)을 유지한다. 시뮬레이션 회로는 이 실험의 등가회로를 나타낸 것으로 결과를 서로 비교할 수 있도록 구성되어 있다.

Fig. 2는 Fig. 1의 실험 및 시뮬레이션 결과를 토대로 CCM과 HBM의 방전 특성을 비교한 그래프이다.¹⁾ HBM이 높은 임피던스와 낮은 캐패시턴스 특성을 가진 반면에, CCM은 낮은 임피던스 특성을 가지고 있다. 이러한 낮은 임피던스로 인해 CCM은 다른 ESD 모델들에 비해 빠른 방전 속도를 보인다 (Fig. 2).^{1,2)}

CCM ESD는 높은 에너지를 방출하면서 전압과 전류를 모두 빠르게 변동시킨다. HBM은 높은 임피던스(330Ω~2kΩ)로 인해 제한된 전류 변동을 일으

Fig. 1 CCM ESD measurement & simulation set up¹⁾

Fig. 2 Discharging speed of CCM & HBM¹⁾

키고, 또한 CCM보다 상대적으로 낮은 에너지를 방출한다.⁴⁾ HBM과 CCM의 방출 에너지는 아래 식 (1)과 식 (2)로 각각 표현할 수 있다.¹⁾

$$E_{HBM} = \frac{R_{DUT}}{2(R_{HBM} + R_{DUT})} \cdot C_{HBM} U^2 \quad (1)$$

where

R_{DUT} : input resistance of device under test (Ω)

R_{HBM} : resistance of HBM (Ω)

C_{HBM} : capacitance of HBM (F)

U : applied ESD voltage (V)

$$E_{CCM} = U^2 \cdot \sqrt{\frac{C_{wire}}{L_{wire}}} \cdot \frac{2l_{wire} \sqrt{\epsilon_R}}{c} \quad (2)$$

where

U : applied ESD voltage (V)

C_{wire} : capacitance of CCM (F)

L_{wire} : inductance of CCM (H)

l_{wire} : length of CCM (m)

ϵ_R : relative permittivity of CCM

c : coefficient

계산식 (1)로부터, Fig. 1의 모델(입력 저항 50 Ω)에 8kV 크기의 HBM ESD (330 Ω , 150pF)를 가할 때의 에너지는 다음과 같이 계산된다.

$$E_{HBM,8kV} = 0.63mJ$$

계산식 (2)로부터, 8kV HBM ESD와 같은 에너지를 방출하는 CCM ESD는 2m 길이의 전선에 1.5kV의 전압이 충전되었을 때 생성됨을 알 수 있다.¹⁾

Fig. 3 Discharging energy of CCM & HBM [1]

Fig. 3은 위 계산식 (1)과 (2)를 Fig. 1의 모델에 적용하여 CCM과 HBM 간의 방출 에너지 차이를 나타낸 그래프이다.¹⁾

Fig. 4는 일반적인 ECU 입력단 내부 회로를 나타낸다. 커넥터 근처에 ESD 보호용 캐패시터 C1 또는 ESD 보호용 제너다이오드가 배치되어 있고, 저항 R1과 캐패시터 C2가 1st order low pass filter 역할을 한다. 입력단 회로를 통해 안정화된 입력신호를 전달하고 외부의 전기적 충격으로부터 내부 micro-controller를 보호한다.

캐패시터에는 기생 인덕턴스가 존재하는데, 이로 인해 특정 고주파 이상에서 캐패시터의 임피던스는 증가하게 된다. (실험결과 0805 사이즈 10nF chip 캐패시터의 경우 약 30MHz 근처에서 임피던스가 증가하기 시작한다.) HBM ESD의 경우 방전전류의 상승 시간에 해당하는 주파수 영역에서 ESD 보호용 캐패시터의 임피던스가 충분히 낮으므로, 방전전류가 ESD 보호용 캐패시터를 통해 그라운드로 빠져나가게 된다. 반면 CCM ESD의 경우, 방전 전류

Fig. 4 Typical input protection circuit of ECU

의 상승 시간이 약 200psec이므로¹⁾ 방전 전류는 해당 주파수에서 높은 임피던스 특성을 나타내는 ESD 보호용 캐패시터를 지나쳐서 필터 회로쪽으로 흐르게 된다.

ESD 보호용 제너다이오드는 입력 전압이 제너다이오드의 항복 전압보다 높으면 전류를 통전시켜 외부 ESD로부터 내부 회로를 보호한다. 제너다이오드가 항복전압에서 전류를 통전시키는 반응 시간이 CCM ESD 전류의 상승 시간보다 긴 경우, 방전 전류는 제너다이오드 또한 지나치게 된다.

Fig. 5는 고주파수에서 chip 저항의 등가회로 모델을 나타내고 있다.⁷⁾ 주파수가 증가함에 따라, 저항의 기생 캐패시턴스로 인해 임피던스는 감소하기 시작한다. 주파수가 계속 증가하면 이전까지 감소하던 임피던스는 저항의 기생 인덕턴스로 인해 다시 증가하기 시작한다.

만일 CCM ESD 전류의 상승 시간이 충분히 짧아서 해당 스펙트럼이 R1 저항의 임피던스가 최소가 되는 공진 주파수 근처에 존재하게 되면, 방전 전류는 R1 저항을 통과하여 내부 microcontroller의 손상을 유발한다(Fig. 6).

Table 1은 chip 저항의 패키지 사이즈 별 기생 캐패시턴스 및 기생 인덕턴스를 나타낸다. 이는 동등

Fig. 5 Equivalent circuit model of chip resistor at high frequency

Fig. 6 Mechanism of CCM ESD damage to internal microcontroller

Table 1 Typical parasitic capacitance and inductance of each chip resistor package^{5,6)}

Package Impedance	1206	0805	0603	0402
Capacitance	0.05pF	0.09pF	0.05pF	0.04pF
Inductance	2nH	1nH	0.4nH	0.12nH

한 저항치를 가진 chip 저항도 패키지 크기에 따라 다른 임피던스 특성을 나타낼을 의미한다. CCM ESD 전류의 스펙트럼과 근접한 영역에 공진주파수가 존재하는 특성을 나타내는 chip 저항 패키지를 Fig. 6의 R1 저항에 사용할 경우 내부 microcontroller의 손상을 유발할 가능성이 높다.

패키지의 크기가 작을수록 기생 캐패시턴스와 기생 인덕턴스가 감소하여 공진주파수가 증가하는 경향을 보인다. 고주파에서 소형 패키지가 더 낮은 임피던스 특성을 보이므로, 이에 상응하는 방전 속도를 가진 CCM ESD 전류가 발생할 경우, 방전 전류가 소형 패키지의 chip 저항을 통과할 가능성이 중형 패키지의 chip 저항보다 높다.

3. 차량 및 단품 시험

일반적으로 LPI 차량은 LPG 연료탱크와 LPG 연료펌프 제어가 트렁크에 위치하고, 엔진제어장치가 이를 제어하는 방식으로 구성되어 있다. 엔진제어장치가 엔진룸에 위치하기 때문에 두 제어기 사이의 배선이 다른 배선보다 긴 구조이다. 이러한 긴 배선과 차체 사이에는 상대적으로 큰 기생 캐패시턴스가 생성된다(Fig. 7). 큰 기생 캐패시턴스는 CCM ESD가 발생할 가능성을 증가시킨다.

Fig. 7 Mounting positions of LPG fuel tank & engine control unit

Fig. 8 Internal damage of microcontroller

엔진제어장치와 연료펌프 제어기 간의 배선 중에는 진단 정보 전달을 위한 배선이 존재한다. 연료펌프 제어기는 이 배선을 통해 진단 정보를 엔진제어장치에 전달하며, 배선에 문제가 포착되면 해당 정보가 엔진제어장치에 저장된다. 이러한 정보가 저장된 엔진제어장치 제품이 고객사로부터 전달되었고, 이에 대한 분석이 이뤄졌다. 분석 결과, microcontroller 내부 반도체에 있는 I/O pin단 클램핑 회로가 손상된 것이 발견되었으며(Fig. 8), 손상된 pin과 배선 사이를 연결해 주는 ECU 입력 회로는 손상을 입지 않은 것으로 밝혀졌다.

ECU 커넥터 단에 긴 배선이 연결되어 있는 사실, 입력단 회로의 손상 없이 내부 microcontroller만 손상을 입은 사실 등을 근거로 해당 ECU가 CCM ESD로 인해 손상된 것으로 판단하였고, 이를 재현하기

Photo. 1 CCM ESD test on single ECU

위해 단품 실험이 진행되었다. 1.5미터 길이의 전선에 2kV 고전압을 가하여 전하를 충전시켰고, 충전된 전선을 고객사로부터 전달된 엔진제어장치와 같은 종류의 제품의 해당 핀에 스위치를 통해 연결하였다(Photo 1).

실험 결과, 내부 microcontroller가 손상된 제품이 발생하였고, 이로부터 CCM의 빠른 방전 전류(Fig. 2)에 대해 ECU 입력단 회로의 ESD 보호 기능이 제한될 수 있는(Fig. 6) 가능성이 확인되었다(Fig. 9).

제품 실험 결과를 바탕으로 ECU의 해당 microcontroller pin 손상이 발생한 실제 차량에서 재현시행을 진행하였다. CCM 구현을 위해 엔진제어장치와 연료펌프 제어기로부터 배선 연결을 해제한 뒤, 배선의 연료 펌프 제어기 연결단에 ESD pulse(0Ω / 300pF, 2kV)를 가하여 전하를 충전시켰다. 충전된

Fig. 9 CCM ESD damage

배선을 커넥터를 통해 엔진제어장치에 연결한 결과, ESD 보호용 capacitor가 파괴되었다. 2kV 전압 레벨의 HBM ESD pulse는 ESD 보호용 캐패시터의 파괴를 발생시키지 않으므로 같은 전압 레벨에서 CCM ESD가 HBM ESD보다 더 큰 에너지를 방출하는 특성을 확인하였다(Fig. 3). 실험 결과 HBM ESD를 가하면 5.3kV에서부터 ESD 보호용 capacitor가 파괴되는 경향이 관찰되었다.

4. 토 의

단품 시험에서 CCM ESD로 인한 내부 microcontroller의 손상이 재현된 반면, 차량시험에서는 ESD 보호용 캐패시터가 손상되었다. 이는 차량시험에서 발생시킨 방전 전류의 상승이 배선과 ECU 내부 microcontroller 사이의 회로를 통과할 수 있는 빠른 속도 특성을 보유하지 않은 것으로 원인을 유추할 수 있다. 그리하여 높은 에너지를 가진 방전 전류가 ESD 보호용 캐패시터로 흐르면서 캐패시터의 손상이 발생한 것으로 간주할 수 있다. 방전 전류의 상승 시간은 공기의 흐름, 습도, 전자기장 등과 같은 외부 환경에도 민감한 영향을 받으며,⁴⁾ 빠른 방전 특성의 CCM ESD는 재현성이 낮다.¹⁾ 더 빠른 방전 특성이 나오는 환경에서 차량시험을 진행하면 차량에서도 엔진제어장치 내부 microcontroller의 손상을 재현할 수 있을 것으로 예상된다.

현재 자동차 전장 분야에서는 자동차의 연비 개선 및 내부 공간 확보를 위해 ECU를 소형화하여 설계하면서도 ECU에 요구되는 제어기능은 증가하는 추세이다. 이에 따라 ECU 내부 소형 패키지 소자의 적용 비율이 증가하고 있으며, chip 저항의 패키지 크기도 0402 등의 소형 패키지로 대체되는 비율이 증가하고 있다. 그러나 0603 또는 0805 패키지가 CCM ESD 전류에 대해 더 높은 임피던스 특성을 보이므로, 긴 배선이 연결된 ECU 입력단 내부 회로에 소형 패키지 chip 저항을 적용하면 내부 microcontroller가 손상될 가능성이 증가한다. 실제로 본 논문에서 CCM ESD 손상으로 간주된 입력단 회로의 직렬저항(Fig. 5, R1)에 0402 패키지가 사용되었다. 이를 0603 또는 0805 패키지로 변경하면 내부 microcontroller의 손상가능성을 감소시킬 수 있다.

자동차 배선에 충전되는 전하량을 줄이는 조치도 CCM ESD에 의한 손상을 방지할 수 있는 방법이다. 접지가 잘 이뤄져 있는 배선 제작 및 조립 공정 환경이 배선에 전하가 충전될 위험성을 감소시킬 수 있으며, 특히 긴 길이의 배선은 높은 기생 캐패시턴스로 인해 많은 양이 전하가 충전될 수 있으므로 ECU와의 연결 이전에 미리 방전을 시키는 공정을 추가하는 것도 좋은 방지책이 된다.

5. 결 론

CCM은 낮은 임피던스 특성으로 인하여 약 200psec의 빠른 방전 속도와 높은 에너지를 방출하는 특성을 보인다. 그리하여 기존의 HBM에 비해 같은 전압에서도 더 높은 파괴력을 지니며, 기존의 입력단 회로가 CCM ESD에 대해 보호 기능을 발휘하지 못하여 ECU 내부 반도체IC가 파손되는 경우가 발생한다.

CCM은 ECU의 설계단계에서부터 고려되어야 하며, CCM ESD 특성에 해당하는 높은 주파수에서 더 유리한 임피던스 특성을 가지는 소자를 보호회로에 사용하고 강한 내성을 가지는 IC를 사용하는 등의 대책이 필요하다. 또한 자동차 배선의 제작 및 조립 공정에서 전하가 충전되는 것을 최대한 방지하여 CCM ESD를 억제할 수 있다.

현재까지 자동차 전장 분야에서는 CCM ESD에 대한 연구가 활발하게 이뤄지지 않고 있는 실정이다. 그러나 CCM ESD는 ECU의 손상을 유발할 수 있으므로 보다 많은 사례 연구와 자동차 환경에서 발생할 수 있는 CCM ESD의 에너지 및 전압 강도에 대한 연구가 필요하다.

References

- 1) B. Arndt, F. zur Nieden, R. Poehmerer, J. Edenhofer and S. Frei, "Comparing Cable Discharge Events to IEC 61000-4-2 or ISO 10605 Discharges," IEEE EMC 20th Symposium, pp.157-160, 2009.
- 2) L. Chang, Cable Discharge Event, National Semiconductor Application Note 1511, 2006.
- 3) W. D. Greason, "Analysis of Cable Discharge

- Event,” IEEE Electrostatics Joint Conference, Boston University, 2009.
- 4) Cable Discharge Event in the Local Area Network Environment, Intel, 249812-001, 2001.
 - 5) R. S. Johnson, C. Wakeman and W. Cuvillo, “Frequency Response of Thin Film Chip Resistors,” Technical Note 60107, Vishay, 2009.
 - 6) Chip Resistors - introduction, application note chip resistors, Philips Components, Laguna Hills, pp.184-197, 1999.
 - 7) Electromagnetics Research Group, EMC Course (EMC 407) Note Module 5 : Non-ideal Behavior of Circuit Components, pp.1-34.