

## 차량 로드 덤프 펄스 과도현상에 의한 전기적 방해 현상 분석

### Analysis of Electrical Disturbances from Vehicle Load Dump Transient Pulse

윤 현 복 · 나 완 수

Hyunbok Yun · Wansoo Nah

#### 요 약

본 논문에서는 자동차 및 자동차 부품을 대상으로 ISO 16750-2의 로드 덤프 펄스를 시험품에 인가 시 얻어지는 출력 신호를 예측할 수 있는 방법론 및 모델을 제안한다. 차량 로드 덤프 펄스 과도현상은 차량이 주행 중 알 수 없는 원인에 의해 배터리와 Alternator 간에 연결된 전원 선에 급작스러운 단선이 발생하는 경우, Alternator의 전원 선을 통하여 연결되어 있는 다른 전장품으로 순간적으로 유입되는 신호를 말한다. 이러한 차량 로드 덤프 펄스 과도현상은 큰 에너지양을 가진 신호이고, 전장품에 오동작을 일으키는 주요한 요인으로 개발 단계에서 사전 대책이 필요하다. 이를 위해 로드 덤프 펄스 발생기를 등가회로 모델링하였으며, 회로 해석 기능을 갖춘 소프트웨어를 이용하여 다양한 부하를 대상으로 시뮬레이션하여 부하에 인가되는 펄스 신호를 예측했다. 실장되는 자동차 와셔 모터를 대상으로 시뮬레이션 결과와 실제 로드 덤프 펄스 발생기를 통한 실제 실험 결과를 비교 분석했고, 로드 덤프 펄스가 인가될 때 최대 전압과 상승 시간, 지속 시간을 미리 예측할 수 있었다. 이를 통해 실제 제품의 개발 및 연구 단계에서 로드 덤프 펄스 과도현상 대책을 수립할 수 있음을 보였다.

#### Abstract

In this study, we propose both a methodology and a model for predicting the output signal obtained by applying ISO 16750-2 load dump pulses to a vehicle and vehicle components. Vehicle load dump pulses transiently occur in the event of a discharged battery being disconnected while the alternator is generating a charging current, with other loads remaining on the alternator circuit. In such cases, this current instantaneously flows into the other electrical component connected through the power line of the alternator. As such a vehicle load dump transient pulse is a signal having a large amount of energy, it is necessary to take precautionary measures at the development stage with respect to the main factors causing malfunctions of the electrical equipment. To do this, we have designed an equivalent circuit of the load dump pulse generator and simulated virtual loads using software with an analysis function to predict the pulse signal applied to the load. The simulated results for an automobile washer motor were compared with actual experimental results obtained through the actual load dump pulse generator; the maximum voltage, rise time, and pulse width were predicted when the load dump pulse was applied. This paper shows that it is possible to establish countermeasures for electrical disturbances from the vehicle load dump transient pulse in the actual product development and research stage.

Key words: EMC, Load Dump, Immunity Test, Automotive Transient, Surge

성균관대학교 정보통신대학(School of Information and Communication Engineering, SungKyunKwan University)

· Manuscript received July 18, 2019 ; Revised August 21, 2019 ; Accepted August 26, 2019. (ID No. 20190718-068)

· Corresponding Author: Wansoo Nah (e-mail: wsnah@skku.edu)

## I. 서 론

불과 10여 년 전 과거의 자동차는 기계적 장치와 유압 장치, 아날로그 장치들로 이루어져 있었던 반면에, 오늘날의 최신 자동차에는 ECU(Electronic Control Unit)에 장착되는 초정밀 집적 회로뿐만 아니라, 미래형 자율 주행 자동차 실현을 위한 5G 무선통신 장비와 전자 자동제어 조향 장치, 레이더 거리 인식 장비들까지도 실장되어 있다. 이러한 전자 부품들의 사용이 급진적으로 늘어남에 따라 전자기파로 인한 방해와 전자기파에 대한 내성 부족으로 인한 오작동의 위험도 높아지고 있다. 이러한 이동 수단의 심각한 결함은 인명과 직결하는 중요한 문제이므로, 국제 사회에서 이에 대한 규제를 더욱 강화하고 있는데, 전자기파 적합성과 전자기파 간섭과 관련된 EMC(Electro Magnetic Compatibility) 규제가 그 대표적인 예라고 할 수 있다. 특히, ISO 16750-2 규격<sup>[1]</sup>에서는 차량 로드 덤프 펄스 과도현상에 대해 규제하고 있다. 차량 로드 덤프 펄스 과도현상은 차량이 주행 중 알 수 없는 원인에 의해 배터리와 Alternator 간에 연결된 전원 선에 급작스러운 단선이 발생하는 경우, Alternator의 전원 선을 통하여 연결되어 있는 다른 전장품으로 순간적으로 유입되는 신호를 말한다<sup>[2]</sup>. 이러한 차량 로드 덤프 펄스 과도현상은 큰 에너지량을 가진 서지형(Surge) 펄스이고, Alternator에 연결된 모든 전원선에 서지형 과도 펄스가 유입될 수 있기 때문에 전장품에 오동작을 일으키는 주요한 요인이다. 특히 이러한 서지에 의해서 엔진이 오작동되어 자동차 동작이 정지하거나, 브레이킹 시스템에 영향을 미쳐 제동장치가 제 기능을 못하거나, 또는 자동차의 두뇌 역할을 하는 ECU에 심각한 불량을 일으켜 문제가 발생하게 된다면, 자동차에 타고 있는 승객뿐만 아니라, 해당 자동차가 운행하는 도로 내의 모든 차량의 승객들과 인근 보행자들의 안전에 심각한 위협을 가할 수 있다. 이러한 관점에서 국내·외 완성차량 제조사 및 차량 전장 부품 제조사에서 안정된 전장부품의 설계를 위하여, 다양한 유형의 부하에 인가되는 차량 로드 덤프 펄스 과도현상의 예측과 대비가 반드시 필요하므로, 본 논문에서는 이에 대한 대책을 위한 방법을 등가회로 모델링을 통해서 제시하고자 한다.

## II. 로드 덤프 펄스 분석

## 2-1 로드 덤프 펄스 과도현상 정의

ISO 16750-2 규격에서 차량에서 발생하는 로드 덤프 펄스 신호를 정의하고 이에 준하여 과도 내성 시험을 하게 되어 있다. 로드 덤프 펄스 과도현상이 발생하는 간략한 회로도에는 그림 1<sup>[2]</sup>과 같다.

회로도의 내용으로 규격에서 보편화하여 정의된 로드 덤프 펄스 신호는 그림 2<sup>[1]</sup>에서와 같은 파형 모양을 가진다.

여기서  $t$ 는 시간,  $U$ 는 시험 전압,  $t_d$ 는 펄스의 지속 시간이고,  $t_r$ 는 상승 시간,  $U_A$ 는 시험품 동작을 위한 DC 공급 전압,  $U_s$ 는 공급 전압이다. 오차 범위를 포함한 각

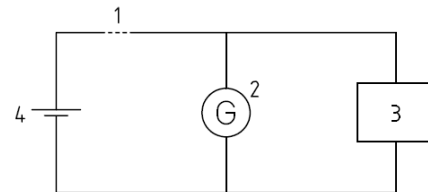


그림 1. 로드 덤프 펄스 발생 회로도. 1: 연결 불량 또는 단선, 2: 차량용 발전기, 3: 시험품, 4: 차량용 배터리

Fig. 1. Circuit diagram for load dump pulse. 1: defective connection, 2: alternator, 3: DUT, 4: battery.

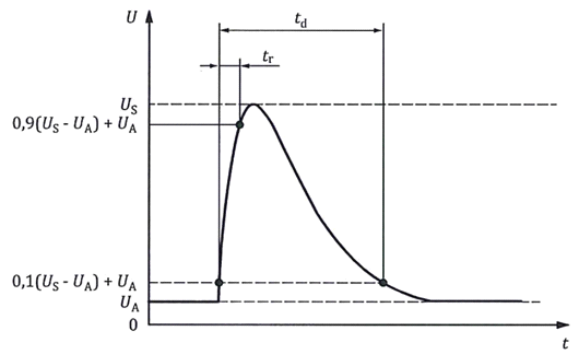


그림 2. 로드 덤프 펄스 신호.  $t$ : 시간,  $U$ : 시험 전압,  $t_d$ : 지속 시간,  $t_r$ : 상승 시간,  $U_A$ : 시험품 동작을 위한 공급 전압,  $U_s$ : 공급 전압

Fig. 2. Load dump pulse.  $t$ : time,  $U$ : test voltage,  $t_d$ : duration of pulse,  $t_r$ : rising slop,  $U_A$ : supply voltage for generator in operation,  $U_s$ : supply voltage.

표 1. 12 V 및 24 V 공칭 전압 시스템에서 로드 덤프 펄스

Table 1. Pulse for load dump in a system with 12 V and 24 V nominal voltage (ISO16750-2).

Para-meter	Type of system		Minimum test requirement
	$U_N=12\text{ V}$	$U_N=24\text{ V}$	
$U_s\text{ [V]}$	$79 \leq U_s \leq 101$	$151 \leq U_s \leq 202$	10 pulses at 1 min intervals
$R_i\text{ [}\Omega\text{]}$	$0.5 \leq R_i \leq 4$	$1 \leq R_i \leq 8$	
$t_d\text{ [ms]}$	$40 \leq t_d \leq 400$	$100 \leq t_d \leq 350$	
$t_r\text{ [ms]}$	10 (0, -5)	10 (0, -5)	

파라미터 값의 정의는 표 1<sup>[1]</sup>과 같다.

표 1과 같이 규격에 정의된 로드 덤프 펄스 신호는 현재 상용화된 자동차 공급 전원에 적용할 수 있도록, 12 V 전원 사용 자동차와 24 V 전원 사용 자동차로 구분된다. 12 V시스템의 경우, 공급 전압  $U_s$ 는 최소 79 V에서 최대 101 V까지로 규정한다. 여기서 그림 2에서는  $U_s$ 가  $U_A$ 를 포함하고 있는 것으로 표현되었으나, 실제 시험에서 최대 전압은 차량 배터리 전압  $U_A$ 에 공급 전압  $U_s$ 를 더한 값으로 진행된다. 펄스 유지시간은 40 ms에서 400 ms이고, 상승 시간은 기본적으로 10 ms에서 5 ms까지로 정의되며, 이와 같은 신호를 최소 1분 간격으로 10개의 신호를 최소 10분 동안 시험품에 인가하게 된다.

## 2-2 로드 덤프 펄스 발생기의 신호 측정

ISO 16750-2 규격에 따라 규정되는 신호는 시험품에 직접 연결하여 시험하기 전에 신호의 극성, 진폭, 지속 시간, 상승 시간과 같은 신호 정의 요소들에 대한 교정 검사를 반드시 하게 규정되어 있다. 본 논문에서는 TESEQ社의 NSG 5500 발생기를 사용하여, 기본 로드 덤프 펄스 신호 측정 실험을 진행하였다. 규격의 신호 검증 요구 사항에 따라 시험품은 연결하지 않고 무부하 상태로 측정하였다. 로드 덤프 펄스 기본 신호의 설정 값은 지속 시간은 400 ms, 상승 시간은 10 ms, 동작 전압은 13.5 V, 공급 전압은 87 V, 내부 저항을 2  $\Omega$ 으로 설정하였고, 결과는 그림 3과 같다.

그림 3에서 알 수 있듯이, 로드 덤프 펄스는 최대 전압

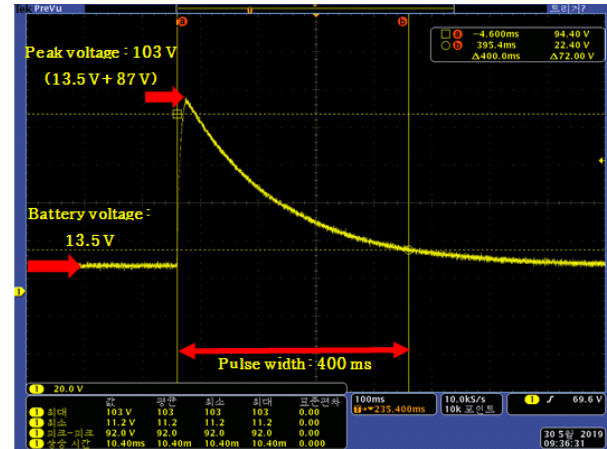


그림 3. 무부하 상태에서 측정된 로드 덤프 펄스 신호

Fig. 3. Measured load dump pulse signal with no load condition.

103.2 V, 지속 시간 400 ms, 상승 시간 10.6 ms로 실험 시작 전 로드 덤프 펄스 발생기의 자동 제어 소프트웨어에 입력한 값과 비교했을 때, 규격에서 정의하는 오차 범위 내에 있으므로 ISO 16750-2 규격의 로드 덤프 펄스 신호에 적합하다. 로드 덤프 펄스 과도현상은 제품 설계 단계에서 가장 먼저 대책을 세우는 항목으로 제품 안전성에 미치는 위험도가 상당한 것을 알 수 있으며, 그에 따라 시험품으로 인가되는 에너지양도 분석을 할 필요가 있다. 오실로스코프로 측정된 데이터를 Matlab을 이용하여 수치 계산하였으며, 저항을 1 Ohm으로 가정하고 계산된 에너지양은 1,265.6 J이며, 오실로스코프를 통해 측정된 지속 시간 400 ms로 나누어 평균 전력을 구하면 3,164 Watt로 작은 용량의 부품 소자들이 견디기에 상당히 큰 전력이며, 이러한 로드 덤프 펄스 과도현상으로 인한 에너지가 순간적으로 자동차 또는 차량 부품에 인가되었을 때, 오작동이 생길 수 있음을 알 수 있다.

## Ⅲ. 로드 덤프 펄스 발생기 모델링

### 3-1 로드 덤프 펄스 발생기 등가회로

실제 로드 덤프 펄스 발생기의 내부 회로는 복잡한 설계를 바탕으로 되어 있기때문에 간단한 등가 회로 모델링을 위해 RC 과도현상 이론을 적용한다. 로드 덤프 펄스

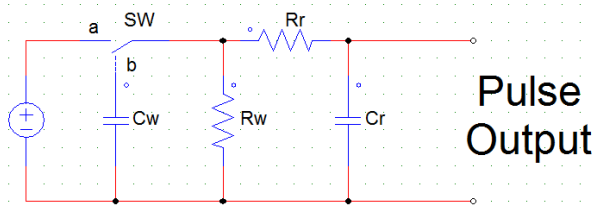


그림 4. 로드 덤프 펄스 발생기의 등가회로  
Fig. 4. Equivalent circuit of a load dump pulse generator.

과도현상에 따른 신호의 모양을 보면 직관적으로 빠른 순간의 충전 후 펄스 지속 시간 동안 방전되어 정상 상태에 도달하는 신호라는 것을 파악할 수 있다. 그림 4<sup>[3]</sup>는 충·방전 모양을 가진 펄스 신호인 로드 덤프 펄스 발생기의 간단한 등가회로이다.

$C_w$  커패시터는 펄스가 방전되기 전까지 충전되는 커패시터이며,  $SW$  소자는 펄스 인가 순간을 조절하는 스위치이다. 실제 로드 덤프 펄스 발생기에서는 한 쌍의 IGBT 트랜지스터를 주로 사용한다.  $C_w$  커패시터와  $R_w$  저항의 조합으로 펄스의 지속시간  $t_d$ 을 조절할 수 있게 설정하였다.  $R_r$  저항과  $C_r$  커패시터의 조합으로 펄스의 상승시간  $t_r$ 을 조절할 수 있게 설정하였다. 정의된 로드 덤프 펄스 신호의 등가회로를 모델링하기 위해 과도현상을 신호의 지속시간 구간과 상승시간 두 구간으로 나누어 소자 값 도출에 대한 정의를 내렸다. 그림 5<sup>[3]</sup>는 펄스의 지속시간을 결정하기 위해 전체 등가회로에서 분리한 부분 회로도이다.

$C_w$  커패시터가 스위치  $a$  위치에서  $b$  위치로 변경되는 순간부터  $C_w$  커패시터에서 방전이 시작되고, 정상상태에 도달하는 시간 중  $0.1 \cdot U_s$  전압에 해당하는 신호의 첫 지점과 두 번째 지점의 시간 간격이 규격에서 정의하는 지

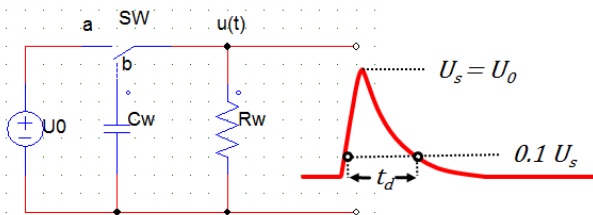


그림 5. 펄스의 지속시간을 결정하기 위한 부분 회로  
Fig. 5. Partial circuit for determining the pulse width.

속 시간이며, 규격에서 제시한 지속 시간 400 ms를 구현하기 위한 적절한 회로 소자의 값을 결정하는 방법으로 회로이론의 RC 회로의 고유 응답 특성을 사용하였다.

그림 5에서 스위치가  $b$ 로 전환된 후의 전압  $u(t)$ 는 식 (1)과 같이 표현이 되며,  $U_0$ 는  $t=0$ 일 때의 전압이다.

$$u(t) = U_0 \times e^{-\frac{1}{C_w R_w} t} \Rightarrow \frac{u(t)}{U_0} = e^{-\frac{1}{C_w R_w} t} \quad (1)$$

여기서 앞서 언급한 지속 시간은  $U_0$ 의 10 %에 해당하는 두 지점 간의 시간 간격이므로, 식 (2)를 적용 가능하다.

$$\frac{u(t)}{U_0} = 0.1 \quad (2)$$

식 (1)에 식 (2)를 적용하면, 펄스의 지속시간  $t_d$ 는 식(3)과 같다.

$$t_d \cong 2.3 \times (C_w R_w) \quad (3)$$

식 (3)의 결과로 등가회로 모델링에서  $C_w$  커패시터와  $R_w$  저항의 곱에 약 2.3배가 400 ms 지속시간을 만족하도록 회로를 구성하였다. 회로의 두 번째 부분으로, 그림 6<sup>[3]</sup>은 로드 덤프 펄스의 상승시간을 결정하기 위해 분리한 부분 회로도이다.

규격에서 정의한 상승시간  $t_r$ 은 로드 덤프 펄스 신호의 최대 전압의 10 % 지점과 90 % 지점의 시간 간격이다. 등가회로에서 설정한  $R_r$  저항과  $C_r$  커패시터의 조합으로 규격에서 정의한 상승시간 10 ms를 구현하기 위한 적절한 회로 소자의 값을 결정하기 위해 RC 회로의 완전 응답 특성을 이용하였다. 그림 6에서 스위치가 On 되었을 때  $u(t)$ 는 다음과 같다.

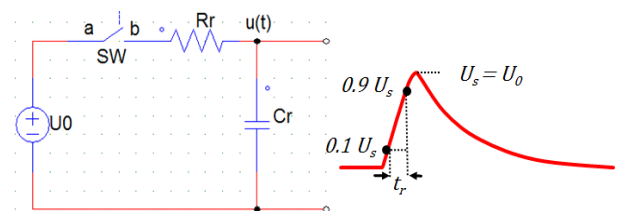


그림 6. 펄스의 상승시간을 결정하기 위한 부분 회로  
Fig. 6. Partial circuit for determining the rise time.

$$u(t) = U_0 \left( 1 - e^{-\frac{1}{R_r C_r} t} \right) \quad (4)$$

식 (4)를 그림 6의 부분 회로에 적용하면 식 (5)와 같다.

$$e^{-\frac{1}{R_r C_r} t} = 1 - \frac{u(t)}{U_0} \quad (5)$$

여기서 앞서 언급한 상승시간은  $U_0$ 의 10 % 지점과 90 % 지점 간의 시간 간격이므로, 식 (6)을 적용 가능하다.

$$\frac{u(t)}{U_0} = 0.9 \quad (6)$$

식 (5)에 식 (6)을 적용하면, 펄스의 상승시간  $t_r$ 은 식 (7)과 같다.

$$t_r \cong 2.3 \times R_r C_r \quad (7)$$

식 (7)의 결과로 등가회로 모델링에서  $C_r$  커패시터와  $R_r$  저항의 곱에 약 2.3배가 10 ms 상승시간을 만족하도록 회로를 구성하였다.

### 3-2 로드 덤프 펄스 발생기 등가회로 모델링

2-2절의 오실로스코프로 측정된 실제 로드 덤프 펄스 신호인 그림 3에서 알 수 있듯이 로드 덤프 펄스 신호는 펄스 발생기 내부의 펄스 형성 네트워크에서 발생되어 자동차 시스템 및 부품 소자의 동작 전원에 감 · 결합 회로망을 통해 동작 전원과 결합되게 된다. 동작 전원은 실제 자동차의 경우 배터리 전원이다. 결합된 로드 덤프 펄스는 최종적으로 시험품에 인가되어 과도 내성 시험을 평가하게 된다. 본 논문은 자동차 시스템 및 자동차 부품을 개발 · 연구 단계에서 로드 덤프 펄스 과도현상에 대한 대책을 사전에 수립하고자 하는 것에 목적이 있으므로, 3-1절에서 제안한 등가회로를 ANSYS 社의 Simplorer 소프트웨어로 시뮬레이션하여 다양한 종류의 부하에 로드 덤프 펄스가 어떻게 인가되는지 확인하였다. 시뮬레이션 모델링은 정확한 로드 덤프 펄스 신호 확인을 위한 펄스 형성 네트워크 등가회로와 시험품과 동작 전원이 연결된 최종 시스템 상태의 두 가지로 시뮬레이션했다. 그림 7은 펄스 형성 네트워크의 시뮬레이션 회로도이다.

사용된 소자 값은 3-1절의 RC 과도현상 분석을 통해

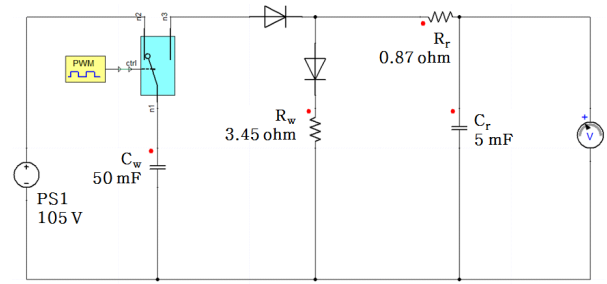


그림 7. 펄스 형성 네트워크 시뮬레이션 회로도  
Fig. 7. Pulse shaping network simulation schematic.

도출한 결과를 바탕으로 설정했으며, 각 소자 값은 다음과 같다.  $PS1$  전압은 105 V,  $C_w$ 는 50 mF,  $R_w$ 는 3.45 ohm,  $C_r$ 는 5 mF,  $R_r$ 은 0.87 ohm이다. 3-1절에서 도출해낸 등가 회로 소자 값 결정식 식 (3)과 식 (7)에 제안된 소자 값을 적용하여 계산하면 ISO 16750-2 규격에서 정의하는 지속 시간과 상승 시간에 적합한 것을 확인할 수 있다. 로드 덤프 펄스 형성 네트워크 모델링에서 전압 측정기의 시뮬레이션 결과는 그림 8과 같다. 시뮬레이션 결과로 얻은 펄스 신호는 최대 전압이 87.0701 V이고, 상승 시간은 7.5 ms이며, 지속 시간은 467 ms의 결과를 얻을 수 있었다. 2.2절에서 측정된 그림 3의 로드 덤프 펄스 발생기의 측정 신호에서 동작 전원 13.5 V를 제거하면 유사한 결과이다.

그림 9는 가상의 부하와 배터리 동작 전원이 연결된 최종 시스템 상태의 로드 덤프 펄스 발생기 시뮬레이션 회로도이다. 그림 7의 소자 값으로 시험한 시뮬레이션 결과와 실제 시험품 실험 결과에 미묘한 차이를 보여 정확도를 높이기 위해 각 소자 값을 미세하게 조정하였으며, 다음과 같다.  $PS1$ 은 105 V,  $C_w$ 는 45 mF,  $R_w$ 는 3 ohm,  $C_r$ 은

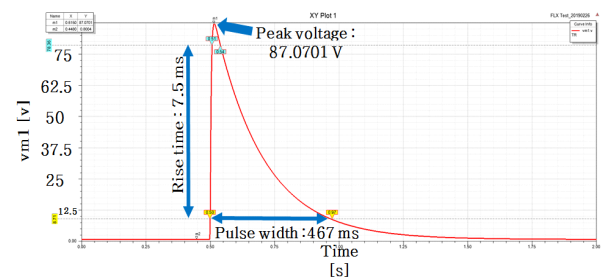
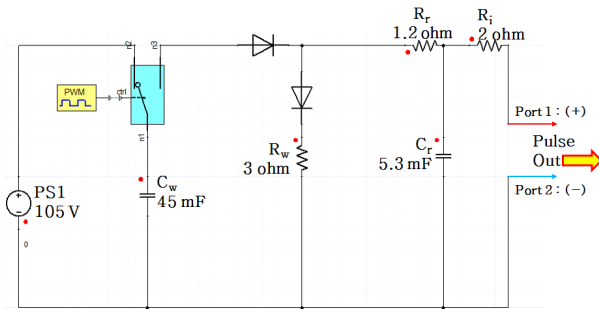
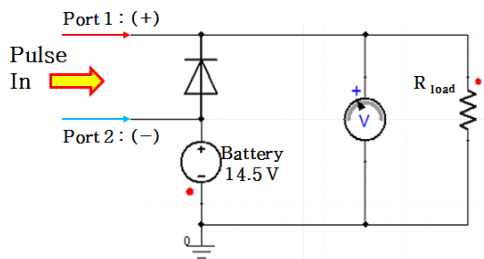


그림 8. 펄스 형성 네트워크 시뮬레이션 결과  
Fig. 8. Pulse shaping network simulation results.



(a) 펄스 형성 네트워크  
(a) Pulse shaping network



(b) 배터리 연결 상태  
(b) Coupled with battery

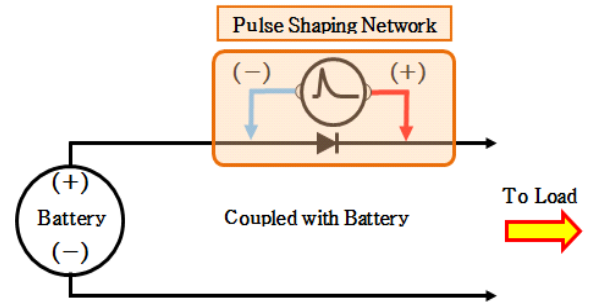
그림 9. 가상 부하와 배터리 전원 연결 상태 회로도  
Fig. 9. Virtual load and battery power connection simulation schematic.

5.3 mF,  $R_r$ 은 1.2 ohm, Battery 전압은 14.5 V이다.  $R_i$ , 2 ohm은 ISO 16750-2<sup>[1]</sup>에서 정의하는 수식으로 결정되며, 이는 로드 덤프 펄스 발생기 내부 저항이며, 본 논문에서는 2 ohm을 사용했다. 실제 자동차 부품의 동작 전원 13.5 V에 펄스 형성 네트워크 회로에서 출력되는 로드 덤프 펄스 신호를 결합하기 위해 그림 10<sup>[3]</sup>과 같은 결합 방법을 사용했다. 건전지 두 개를 직렬로 연결해 두 전압을 합하는 것과 유사하게 배터리 전원의 (+) 단자에 펄스 형성 네트워크의 (-) 단자를 결합함으로써 로드 덤프 펄스를 결합할 수 있었다. 시뮬레이션에서 이러한 결합법을 이용해서 그림 3의 최대 전압 103 V과 같은 결과를 얻었다.

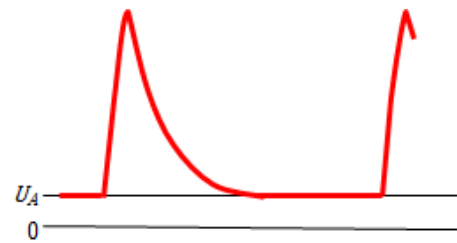
#### IV. 로드 덤프 펄스 발생기 모델링의 유효성

##### 4.1 저항 소자를 이용한 유효성 검증

3장에서 제안한 로드 덤프 펄스 발생기 모델링의 유효



(a) 로드 덤프 펄스와 배터리 전압의 결합 방법  
(a) Coupling method of the load dump pulse with the battery voltage



(b) 작동 전압  $U_A$ 에 연결된 로드 덤프 펄스  
(b) Load dump pulse coupled to operating voltage  $U_A$

그림 10. 로드 덤프 펄스 신호와 동작 전원의 결합법  
Fig. 10. Coupling method of the load dump pulse signal with the battery power.

성을 검증하기 위해 실제 저항 소자를 이용하여 실험을 하였다. 저항 소자는 2, 10, 20, 30, 50, 100 ohm의 6종의 소자를 실험에 사용했다. 그림 11과 그림 12는 사용된 저항 소자와 실험 구성이다.

실험의 결과는 펄스 신호를 결정짓는 주요 요소인 최대 전압, 상승 시간, 지속 시간 3가지 요소로 판별하였다. 결과는 표 2~표 4와 같다. 우선, 최대 전압 값은 전반적으로 높은 저항값으로 갈수록 오차 10 % 미만의 우수한 정확도를 보였다. 최저 저항인 2 ohm 저항의 경우에는 실험에서는 낮은 저항값으로 인한 높은 전류를 필요로 한다. 하지만, 로드 덤프 펄스 시스템의 기본 전원 공급원인 배터리 시뮬레이터에서는 허용 전류치를 초과하는 경우 장비가 셧다운되며, 표 2~표 4의 2 ohm 경우는 장비가 셧다운된 경우에 해당한다. 그 이외의 경우(10 ohm 이상의 경우)에는 셧다운 없이 정상적으로 동작하였다. 이러한 원인으로 인하여 부하가 2 ohm의 경우, 측정과 시뮬





그림 11. 모델링의 유효성 검증 실험 구성  
Fig. 11. Experimental configuration for validation of modeling.

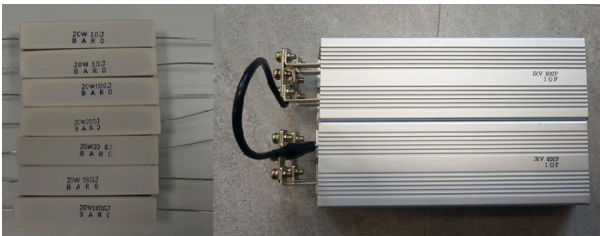


그림 12. 실험용 저항 소자  
Fig. 12. Resistance element for the experiment.

표 2. 유효성 검증 실험 결과: 최대 전압  
Table 2. Results of validation test: Peak voltage.

Resistance [ohm]	Peak voltage [V]	Peak voltage [V]	Error [%]
	Experimental	Simulation	
2	50.4	37.3482	-25.9
10	85.2	72.9013	-14.4
20	92.8	82.8474	-10.7
30	96	86.8106	-9.6
50	98.4	90.2585	-8.3
100	100	93.0535	-6.9

레이션 결과에서 가장 많은 차이를 보이는 것으로 판단된다.

그림 13은 표 2의 데이터를 바탕으로 직관적인 분석을 위해 플롯한 결과 그래프이다.

표 3은  $C_w$  커패시터가 완충 후 스위치 트리거링 순간부터 펄스의 최대 전압까지의 상승 시간을 측정한 값과 시뮬레이션 값을 비교한 결과이다.

표 2에서 비교한 최대 전압 결과와 유사한 양상을 보이며 낮은 저항에서 높은 저항 값으로 갈수록 정확도가 높아지며, 실험 소자 중 최대 저항 값인 100 ohm 저항에서의 차이는 0.83 ms인 8.1 %의 오차를 보인다. 전반적으로 로드 덤프 펄스의 상승 시간은 매우 빠른 10 ms 이내의 속도임에도 불구하고, 높은 정확도를 보이고 있다. 그림 14는 데이터를 바탕으로 플롯한 상승 시간 비교 그래프이다.

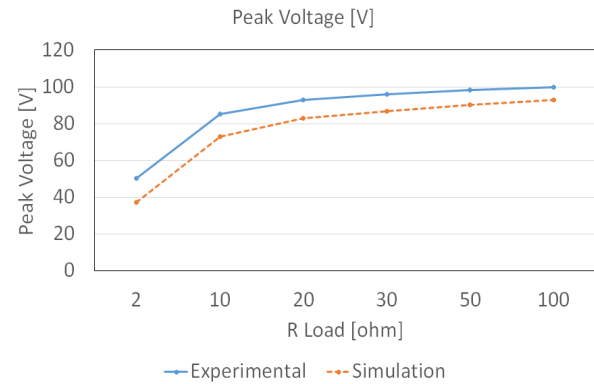


그림 13. 최대 전압 비교 그래프  
Fig. 13. Comparison graph of peak voltage.

표 3. 유효성 검증 실험 결과: 상승 시간  
Table 3. Results of validation test: Rise time.

Resistance [ohm]	Rise time [ms]	Rise time [ms]	Error [%]
	Experimental	Simulation	
2	9.6	6.854	-28.6
10	10.4	8.533	-18.0
20	10.2	8.965	-12.1
30	10.32	9.159	-11.3
50	10.48	9.314	-11.1
100	10.28	9.45	-8.1

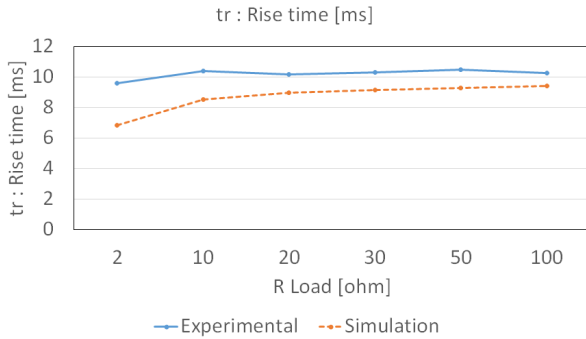


그림 14. 상승 시간 비교 그래프  
Fig. 14. Comparison graph of rise time.

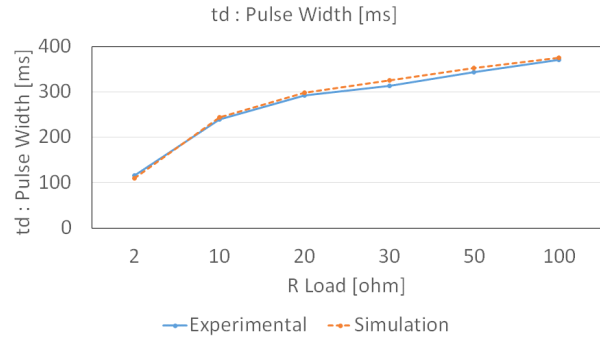


그림 15. 지속 시간 비교 그래프  
Fig. 15. Comparison graph of pulse width.

마지막으로 총 에너지량을 결정짓는 중요한 요소인 지속 시간은 초기 입력 펄스의 시간이 400 ms로 펄스폭이 상승 시간의 40배로 길며, 따라서 3가지 요소 중 가장 높은 정확도의 결과를 얻을 수 있었다. 2 ohm 저항값에서도 오차는 5.4 %로 3가지 신호 요소 중 가장 낮은 오차를 보였으며, 특히 실험 소자 중 최대 저항값인 100 ohm에서는 1.5 %의 오차를 보이는 결과를 얻을 수 있었다.

그림 15는 표 4의 데이터로 플롯한 비교 그래프이다.

그림 15 및 표 4와 같은 데이터로 실제 저항을 이용한 실험 결과와 등가 회로 모델링을 통한 시뮬레이션의 로드 덤프 펄스 테스트 결과를 비교했을 때 충분한 유효성을 가지는 것으로 판단된다.

#### 4-2 실제 자동차 부품을 이용한 실험

4-1절에서 저항 소자를 이용한 유효성 검증을 하였으

며, 본 절에서는 자동차에 실장되는 부품을 사용하여 등가 회로 모델링 시뮬레이션의 유효성을 검증하였다. 실장 부품으로는 자동차 워셔액을 분사시키기 위해 사용되는 DC 모터를 사용하였다.

와셔 모터를 로드 덤프 펄스 발생기에 연결하여 실험을 하였으며, 오실로스코프로 측정한 와셔 모터에 인가된 로드 덤프 펄스는 그림 17과 같다. 최대 전압은 42.4 V이고, 상승 시간은 7.4 ms, 지속 시간은 444 ms로 측정되었다. 입력 펄스에 비해 지속 시간은 길어졌으나, 최대 전압과 상승 시간은 줄어들었다. 낮은 저항을 가진 모터가 앞 절에서 측정한 2 ohm 저항의 측정 결과와 비교할 때 지속 시간이 늘어난 것의 원인은 모터가 생성하는 역전압과 회전자 자속 및 회전 관성 모멘트와 같은 DC 브러쉬 모터의 특성 때문인 것으로 판단된다. 그림 18은 전원 공급 장치에 연결된 일반적인 DC 브러쉬 모터의 등가 회로이다.

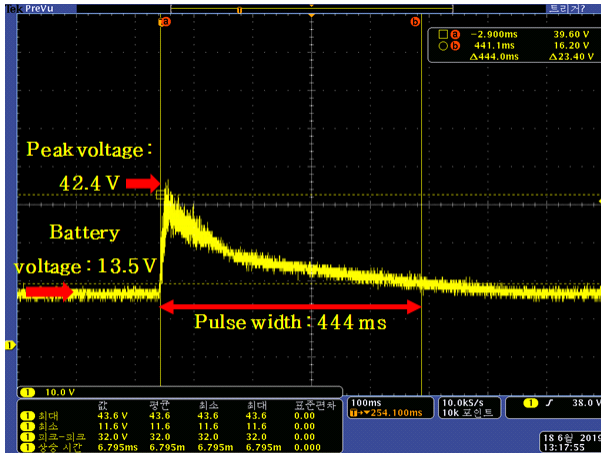
표 4. 유효성 검증 실험 결과: 지속 시간  
Table 4. Results of validation test: Pulse width.

Resistance [ohm]	Pulse width [ms]	Pulse width [ms]	Error [%]
	Experimental	Simulation	
2	116	109.767	-5.4
10	240	244.064	1.7
20	292	298.979	2.4
30	313	325.53	4.0
50	344	351.795	2.3
100	370	375.52	1.5

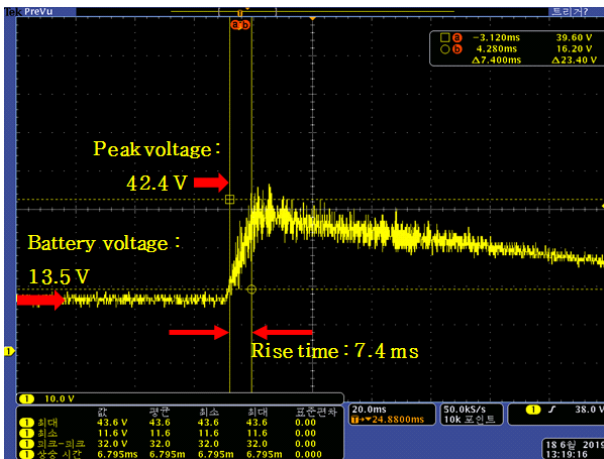


그림 16. 와셔 모터  
Fig. 16. Washer motor.





(a) 펄스 폭 확인을 위한 전체 신호  
(a) Entire signal for the pulse width confirmation



(b) 상승 시간 확인을 위한 신호 확장  
(b) Expand signal for the rise time confirmation

그림 17. 와셔 모터의 로드 덤프 펄스  
Fig. 17. Load dump pulse of washer motor.

등가 회로는 저항과 인덕터 성분 그리고 회전하는 모터에서 생성되는 모터 전압으로 이루어져 있다. 와셔 모터를 등가 회로 모델링에 적용하기 위해 와셔 모터의 임피던스를 LCR 미터를 이용하여 측정을 하였고, 저항과 인덕턴스 성분을 측정할 수 있었다. 실제 구동 중인 와셔 모터의 임피던스는 정지 상태의 측정값과 차이가 있을 것으로 사료되나, 본 실험에 사용된 DC 모터의 임피던스가 1~2 ohm으로 작기 때문에 구동 중 임피던스와 큰 차이가 없을 것으로 보고 실험을 진행하였다.

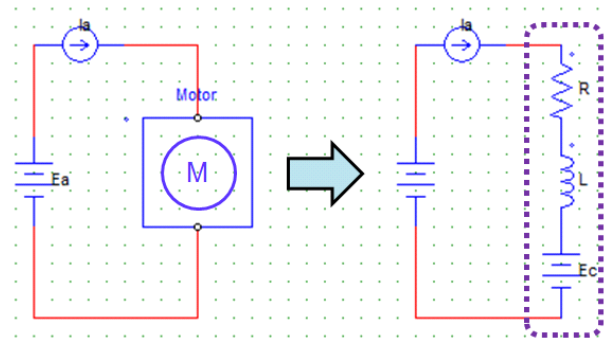


그림 18. 와셔 모터의 등가 회로  
Fig. 18. Equivalent circuit of washer motor.

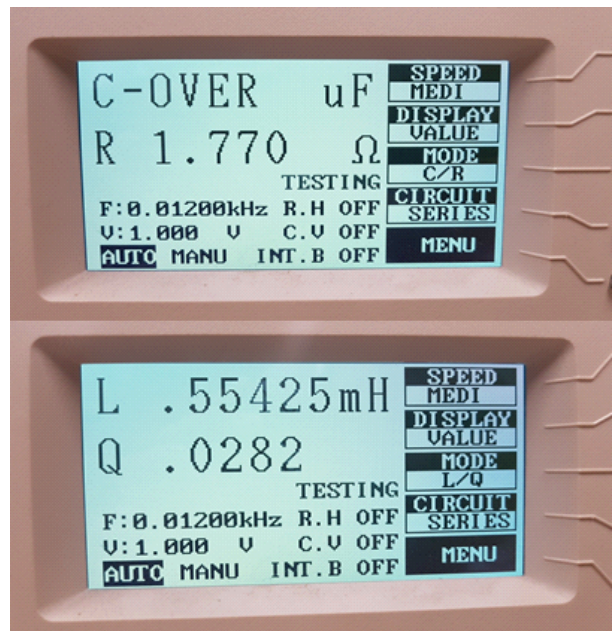


그림 19. LCR 미터를 이용한 임피던스 측정  
Fig. 19. Measurement of impedance with LCR meter.

그림 19와 같이 LCR 미터에서 측정한 와셔 모터의 저항과 인덕턴스 값은 1.77 ohm과 0.55425 mH이다.

측정된 임피던스 값을 시뮬레이션 모델링에 적용했고, 그림 20은 와셔 모터를 적용한 시뮬레이션 결과로 얻은 와셔 모터에 인가된 로드 덤프 펄스이다.

최대 전압은 41.1371 V이고, 상승 시간은 7.189 ms, 지속 시간은 412.706 ms로 그림 17에서 실제 실험한 결과와 비교해 오차 7 % 이내의 근사한 값을 얻었다. 정확한

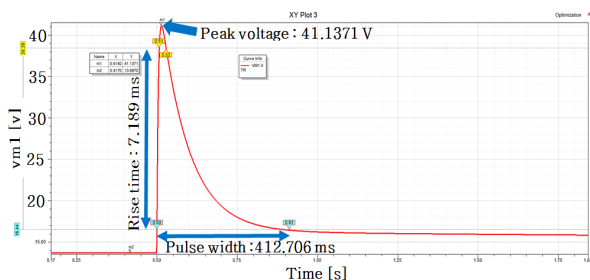


그림 20. 와셔 모터 시뮬레이션 결과  
Fig. 20. Washer motor simulation results.

표 5. 와셔 모터 실험과 모델링 시뮬레이션 비교  
Table 5. Comparison of washer motor experiment and modeling simulation.

Parameter	Experimental washer motor	Simulation	Experimental-simulation	Error
Peak voltage [V]	42.4	41.1371	1.2629	-3.0 %
Rise time [ms]	7.40	7.189	0.211	-2.9 %
Pulse width [ms]	444.0	412.706	31.294	-7.0 %

수치로 본 결과는 표 5와 같다.

와셔 모터를 이용해 측정된 로드 덤프 펄스의 에너지는 132.28 J과 평균 전력 297.9 Watt이고, 시뮬레이션 결과로 얻은 펄스의 에너지는 127.98 J과 평균 전력 310.1 Watt로 오차 범위 5 % 이내의 정확한 결과를 얻을 수 있었다.

## V. 결 론

자동차 및 전장품 관련 EMC 국제 규격에는 다양한 종류의 과도현상 펄스들로 자동차 및 전장품의 안전성을 규제하고 있다. 이러한 국제 규격 인증을 위해 완성차 및 차량 부품 제조 업체에서는 많은 시간과 비용을 투자하고 있으나, 이에 비해 실제 제품의 성능은 적합하지 못하는 경우가 있고, 실제 사례로 사후 관리 검사에서 부적합 적발되는 경우가 다반사이다. 이는 제품의 빠른 출시를 위한 업계의 불합리한 실험과 요행이 있었을 것으로 생각된다. 업계에서 추구하는 이윤 창출 목적과 자동차의

성능과 안전은 양립할 수 없다는 주장이 있으나, 이러한 결과로 직면하는 성능과 안전은 인명과 직결하는 과제이므로 균형을 이루기 위한 빠르고 정확한 안전 인증 대책 시뮬레이션 개발이 필요했다. 특히, 본 논문에서 연구한 Load dump pulse는 큰 에너지량을 가진 펄스이기 때문에 전장품에 오동작을 일으키는 주요한 요인으로 차량 안전에 절대적인 역할을 하며, 이에 대한 사전 대책으로 인가되는 펄스를 예측하기 위한 시뮬레이션이 반드시 필요했다. 연구를 통해 다양한 저항 소자와 실장되는 전장품에 인가되는 펄스의 최대 전압과 상승 시간 및 지속 시간을 미리 예측하는 시뮬레이션이 가능한 것을 확인하였으며, 이에 따라 과도현상에 의해 발생하는 펄스의 총 자기 에너지량도 예측할 수 있었다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 실험 대상 소자들의 임피던스 값과 회로 모델에서 예측되는 로드 덤프 펄스의 자기 에너지 값, 그리고 실제 실험 결과를 모두 데이터 베이스 형태로 구축하여 추후에 보다 진보된 모델링 및 이론을 개발하는 데에 사용할 예정이다. 또한, 현재 회로 설계의 변경을 제외하고 로드 덤프 펄스 현상의 대책은 바리스터(varistor) 또는 TVS 제너 다이오드(transient voltage suppressor zener diode)와 같은 소자를 이용한 대책이 일반적이며, 이것의 가장 효과적인 위치를 파악하는 데에 개발된 회로 모델이 사용될 수 있다. 아울러 본 연구로 예측된 총 자기 에너지량을 분석하여 부품 단가를 고려한 적절한 대책 소자의 선정 (소자의 적절 용량 산정)에 응용할 수 있다. 마지막으로, 컴퓨터 이용 공학 면에서 현재 기업 및 기관에서 사용하는 관련 예측 시뮬레이터는 정확도가 매우 낮을 뿐만 아니라, 다양한 소자에 대한 시뮬레이션이 불가능하였으나, 본 연구 결과로 얻은 시뮬레이션 방법을 통해 실제 실험 결과 대비 정확도를 향상시켰음은 물론이고, 기존에 불가능했던 다양한 종류의 자동차 전자 부품의 과도 내성 평가에 활용될 수 있게 되었다.

## References

- [1] Road Vehicles - Environmental Conditions and Testing for Electrical and Electronic Equipment - Part 2: Electrical Loads, ISO 16750-2 4th ed. 2012.

- [2] *Road Vehicles - Electrical Disturbances from Conduction and Coupling - Part 2: Electrical Transient Conduction along Supply Lines Only*, ISO 7637-2 Standard 2nd ed. 2004.
- [3] TESEQ, Introduction ISO 7637 and variants full 2016.
- [4] TESEQ, FLX 5510 user manual English.  
<https://www.teseq.ch/en/products/downloads/user-manual/>

FLX\_5510.pdf

- [5] J. M. Woo, M. N. Ju, H. S. Lee, S. M. Kang, S. K. Choi, and J. B. Lee, "Vulnerability case analysis of the high power electromagnetic pulse on digital control system," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 9, pp. 698-706, Sep. 2017.

윤 현 복 [(주)이레테크/과장]

<https://orcid.org/0000-0001-6507-9889>



2008년 2월: 국립경상대학교 제어계측공학과 (공학사)  
 2008년 3월~현재: (주)이레테크 전자파솔루션사업부 과장  
 2018년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정  
 [주 관심분야] RF, EMI/EMC, ESD, Transient,

Near Field Scan 등

나 완 수 [성균관대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-0315-3294>



1984년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)  
 1986년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)  
 1991년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학박사)  
 1991년~1993년: SSCL Guest Collaborator

1993년~1995년: 한국전기연구원 선임연구원

1995년~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 교수

[주 관심분야] SI, PI, EMI/EMC 등