

# 제동 시스템을 위한 고주파수 ECU의 제어 특성 연구

연구봉<sup>1\*</sup>, 정정화<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 전자컴퓨터통신공학과

## Study on the Characteristics of Control by High Frequency ECU for Braking System

Kyu-Bong Yeon<sup>1\*</sup> and Jong-Wha Chong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronics Computer Engineering, Hanyang University

**요약** 본 논문은 제동 시스템에서 전자식 주행안정 제어장치(ESC)의 유압 모듈레이터의 솔레노이드 밸브 제어에 대한 것이다. ESC의 전자제어유닛(ECU)을 제어하기 위한 방법으로 고주파수 제어와 슬로프 제어를 적용하였으며, 서지 압력 및 전자파간섭(EMI) 저감 특성을 연구하였다. 고주파수에서의 전자파 방출을 줄이기 위하여 ECU 출력단에 슬로프 제어 기능을 추가하였다. 측정결과 제동 시스템에서 고주파수 ECU의 솔레노이드 밸브제어 방법에 따라 서지 압력과 전자파 방출이 저감될 수 있음을 확인하였다. 결론적으로 고주파수 ECU 제어 연구 결과에 의해 제동 시스템 성능을 향상방안을 제시하고자 한다.

**Abstract** This paper describes the control of a solenoid valve of ESC(Electronic Stability Control) with hydraulic modulator in braking system. ESC ECU(Electronic Control Unit) to control the high-frequency control and slope control method was applied, the surge pressure and EMI(electromagnetic interference) reduction characteristics were studied. The stage of ECU output was added the slope shaping function to reduce electromagnetic emission at higher frequencies. Measurements show that this high frequency ECU manages to reduce the surge pressure and electromagnetic emission by the control of solenoid valve. In conclusion, by using the results of this study for the high frequency ECU control, we could expect enhancement of braking system performance.

**Key Words** : Electronic Stability Control, Electronic Control Unit, Pulse Width Modulation, Slope Control

### 기호설명

$U_a$  : loss of electromagnetic force at air gap  
 $U_s$  : loss of electromagnetic force at steel  
 $P$  : permeance  
 $\Phi$  : magnetic flux  
 $Z$  : air gap  
 $H$  : magnetic field intensity  
 $L$  : magnetic Length

### 1. 서론

자동차 사고로 인명 피해를 줄이기 위해서 자동차용 전자식 주행안정 제어장치(ESC) 장착에 대한 중요성이 급증하고 있다. ESC 장치에서 유압 제어는 고속 솔레노이드 밸브를 이용하여 구동하고 있다[1,2,3].

ESC 장치에 적용되고 있는 솔레노이드 밸브는 가격적인 측면의 경제성 때문에 on-off 방식의 양방향성 솔레노이드 밸브가 가장 많이 적용되고 있다. 본 솔레노이드 밸브는 단순하게 작동되는 두 방향으로의 방향 전환 시에 유압 배관과 차륜 실린더에서 급격한 서지 압력이 발생

\*Corresponding Author : Kyu-Bong Yeon

Tel: +82-41-559-3168 email: kbyeon@katech.re.kr

접수일 12년 03월 26일

수정일 12년 04월 27일

개재확정일 12년 06월 07일

하게 된다. 이 서지 압력은 ESC 장치의 제동 성능을 악화시킬 뿐만 아니라 제동 소음을 유발하기도 한다.

기존 연구에서는 발생 서지를 전제 조건으로 하여 유압 제어 모드를 최적화할 수 있는 제어 측면의 연구를 수행하였다[4,5]. 또한, 유압 배관 재질, 형상 등의 하드웨어 변화를 통하여 서지 압력을 저감시키고자 하는 연구도 일부 추진되었다. 이 같은 기존 연구에서는 서지 압력을 제한적으로 저감시킬 수 있는 방안을 제시하였으나 이를 현저히 저감시킬 수 있는 방안은 제시하지 못하였다[6].

비례제어 밸브를 이용하여 서지 저감을 통한 ESC 제동 성능 향상에 관한 연구를 통하여 근본적인 문제 해결 방안을 제시할 수 있다. 그러나 비례제어 밸브는 신뢰성 확보와 경제성 측면의 어려움으로 대중화에 실패하였다. 따라서 기존 양방향성 솔레노이드 밸브를 활용하여 비례제어 밸브에 상응할 수 있는 제어 기술 연구가 필요하였다.

이를 위하여, 본 연구에서는 기존의 100Hz 내외의 저속 PWM(Pulse Width Modulation) 제어를 탈피하여 20kHz의 고속 PWM 제어를 실시하였다. 솔레노이드 밸브의 가동자 변환 속도를 제어할 수 있는 고속 PWM 듀티 사이클 조건을 제시하고 작용 유압에 대한 영향도 분석하였다. PWM 펄스의 슬로프를 제어함으로써 차량의 EMI 특성을 개선함으로써 전자기적 특성을 개선하였다. 또한, 서지 저감이 가능한 고속 PWM 듀티 사이클 제어 방법을 실차에 적용하여 서지 압력이 제동에 미치는 영향을 분석함으로써 ESC 제동 성능 향상 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 서지 해석 및 제어 방법

### 2.1 가정자로법을 이용한 솔레노이드 밸브 해석

ESC용 솔레노이드 밸브의 동특성을 수학적으로 해석하기 위하여 가정자로법을 이용하였다. 솔레노이드에 전류가 공급되어 발생하는 기자력은 코일의 감은 횟수 N과 공급 전류 I의 곱으로 표현할 수 있다. 공급 기자력은 식 (1)과 같이 철심과 공극에서 소모되는 기자력과 동일하여야 한다.

또한, 공극에서 자기 에너지 변화량은 가동자 변위에 따른 자기력으로 나타낼 수 있다[7,8].

$$NI = \sum HL + \frac{\Phi}{P} = U_s + U_a \quad (1)$$

$$dW = F_{Mag}(dZ) \quad (2)$$

$$d\Phi = U_a \times dP \quad (3)$$

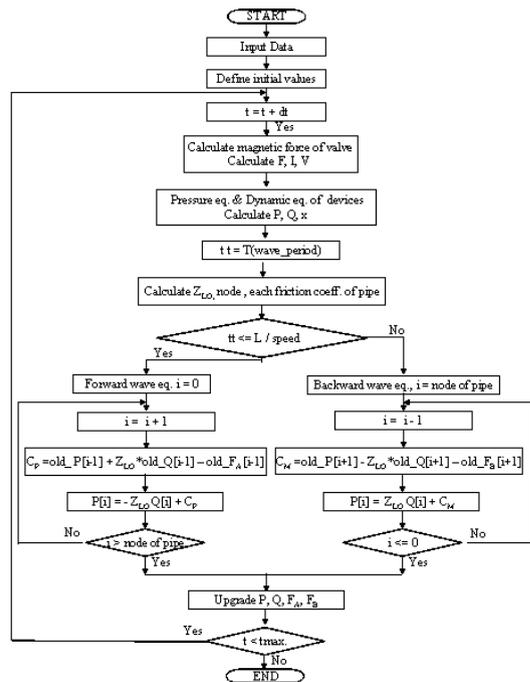
솔레노이드 밸브를 구성하고 있는 가동자, 고정자, 솔레노이드부에 존재하는 공극의 전자력은 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$F_{Mag} = -\frac{1}{2} U_a \frac{d\Phi}{dZ} = -\frac{1}{2} U_a^2 \frac{dP}{dZ} = -\frac{1}{2} \left( \frac{d\Phi}{dP} \right)^2 \frac{dP}{dZ} \quad (4)$$

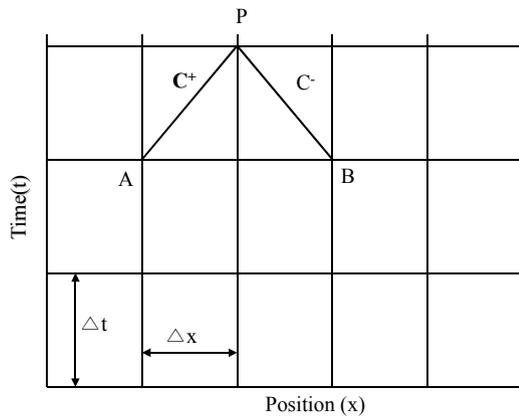
자기회로 내부에서 공극이 다수인 경우, 공극에서 발생하는 전자력은 식 (5)로 나타낼 수 있다

$$F_{Mag} = \frac{1}{2} \sum U_a^2 \frac{dP}{dZ} \quad (5)$$

그림 1은 유압 모듈레이터에서 발생하는 밸브의 전자력과 작용 압력을 계산하고 밸브 특성해석을 위하여 특성 곡선법을 이용한 차륜 실린더와 파이프 라인에서 발생하는 파동주기를 계산하는 과정을 나타낸다.



[그림 1] 서지 압력 시뮬레이션을 위한 플로우차트  
[Fig. 1] Flow chart for simulation of surge pressure



[그림 2] 위치와 시간 평면상에서의 특성곡선  
[Fig. 2] Characteristic lines in the position and time plane

발생되는 전·후진 파동의 상태방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_{\pm} = +\sqrt{E_{ol} \rho} \quad (C^+ \text{ 곡선})$$

$$\frac{dP}{dt} + Z_{lo} \frac{dQ}{dt} + v\sqrt{E_{ol} \rho} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} \right) = 0 \quad (6)$$

$$\lambda_{\pm} = -\sqrt{E_{ol} \rho} \quad (C^- \text{ 곡선})$$

$$\frac{dP}{dt} - Z_{lo} \frac{dQ}{dt} - v\sqrt{E_{ol} \rho} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} \right) = 0 \quad (7)$$

식 (6)은 정 방향으로 진행하는 파동의 시간, 위치의 관계를 나타낸 것이고 식 (7)은 역 방향으로 진행하는 파동의 시간, 위치와의 관계를 나타낸다. 다음 단계에서는 파동 방정식에서 사용하는 각 상수 및 변수 값을 계산하고 파이프의 해석점(node) 개수 결정과 각 해석 점에서 압력과 유량을 계산하였다.

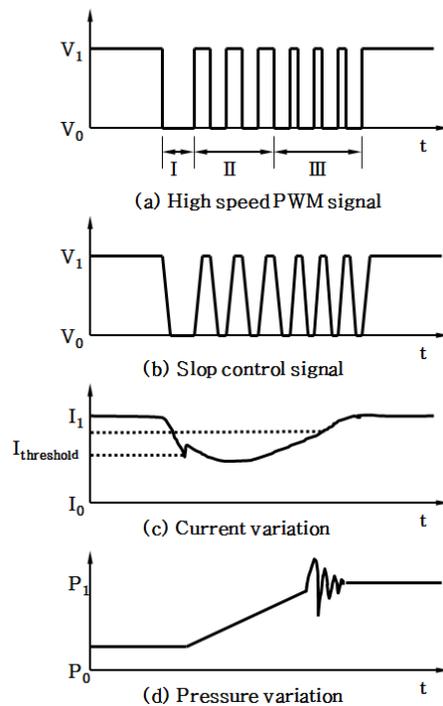
파동의 주기가 배관 길이/파동 속도보다 작으면 전진파, 크게 되면 후진파로 나누어 각 경우의 방정식을 적용하였다. 전진파의 경우, 파이프의 첫 번째 해석 점으로부터 마지막 해석 점까지 각 해석 점의 압력과 유량을 계산하였다. 또한, 후진파의 경우에는 마지막 해석 점으로부터 첫 번째 해석 점의 순서로 순차적으로 각 해석 점의 압력과 유량을 계산하였다. 기 결정된 압력과 유량을 저

장하면서 지정된 시간동안 시뮬레이션을 수행하였다.

## 2.2 듀티 사이클 및 슬로프 제어

기존 ESC 장치에 적용되고 있는 100Hz 내외의 PWM 듀티 제어를 실시하면 일정 전류 값 이상에서 돌입 전류가 발생되어 밸브 가동자가 급격하게 변환되기 때문에 이로 인한 커다란 서지 압력이 발생된다.

이 같은 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 기존 슬레노이드 밸브를 이용하면서 가동자의 위치 변환속도를 제어 할 수 있는 다음과 같은 3 단계의 고속 PWM 제어를 실시하였다.



[그림 3] ESC 유압 모듈레이터의 고속 PWM 제어 개념  
[Fig. 3] Concept of high speed PWM control of ESC hydraulic modulator

가. I 단계 : 인가 전압(V1)에서 기저 전압(V0)으로 일정 시간 동안, 고속 PWM(20kHz) 조건에서 듀티 비율을 0%로 유지시킨다. 이 구간에서 밸브 가동자는 닫힘에서 열림 상태로 변환되는 단계이다.

나. II 단계 : 밸브 가동자가 열림 상태로 일정 시간 동안, 전류 변곡점 부근의 전류를 유지하기 위하여 고속 PWM 조건에서 일정한 듀티 비율을 적용하는 단계이다. 이 구간은 마스터 실린더에서 차륜 실린더로 유량이 증가하여 증압이 시작되는 단계이다.

다. III 단계 : 고속 PWM 제어의 듀티 비율을 일정 시간 동안, II 단계에 비하여 상대적으로 높은 듀티 비율을 적용하는 단계이다. 이 구간에서 차륜 실린더는 증압에서 감압으로 전환되는 단계이다.

특히, III 단계는 일정 시간 동안에 비례 제어 밸브에서 나타나는 선형적인 전류 변화를 얻을 수 있는 고속 PWM 제어 구간이다. 일반 PWM 제어인 경우, 밸브 가동자의 급격한 변위에 의해서 전류 변곡점( $I_{\text{threshold}}$ )이 발생되나 고속 PWM 제어에서는 전류 변화가 완만하게 발생되기 때문에 가동자의 급격한 위치 변환을 예방할 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 주파수 변화에 의한 밸브 기본 특성

그림 4는 기존 ESC 장치에 적용되고 있는 100Hz 내외의 일반적인 PWM 제어와 본 연구에서 제안한 20kHz 내외의 고속 PWM 제어를 실시할 때, 발생하는 전류 및 가동자 변위 상태를 나타낸 것이다. 일반 PWM 제어의 경우, 밸브 가동자가 하강하는 과정에서 전류 변곡점이 크게 발생되어 가동자가 순간적으로 변화되나 고속 PWM 제어에서는 전류 변화가 선형적이기 때문에 선형적인 변위 변화를 확인할 수 있다. 이를 통하여, 기존 ESC 장치에 가장 보편적으로 채용되고 있는 일반 on-off 솔레노이드 밸브를 이용하여 고속 PWM 제어를 통한 연속적인 압력 가능성을 확인할 수 있었다.

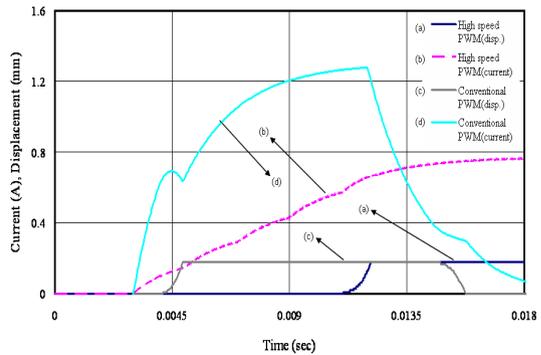
그림 4, 5에서 알 수 있듯이, on-off 솔레노이드 밸브의 선형적인 전류 변화를 얻기 위해서는 아래와 같은 3 단계의 고속 PWM 제어가 필요하다.

제 I 단계에서는 pulse off 상태를 3msec 내외로 유지하여 일반 PWM 제어에서 발생하는 전류 변곡점 부근에 일치시킨다.

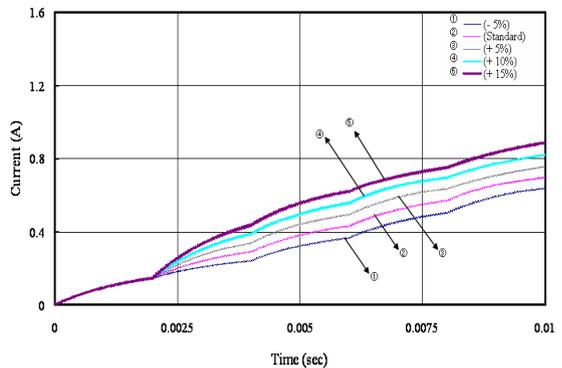
제 II 단계에서는 밸브 가동자가 일정한 열림 시간을 확보하도록 250mA 내외로 2msec 동안 유지시킨다.

제 III 단계는 2msec 단위로 10msec 동안에 완만한 전류 증가를 발생시키는 단계로서 제어의 다양성 확보가 요구된다.

그림 4는 일반 PWM과 고속 PWM 제어를 실시할 때, 발생하는 솔레노이드 밸브의 전류 값 변화와 특정 전류 임계 값 이상에서 발생하는 가동자 변위를 나타낸 대표적인 사례이다. 일반 PWM 제어에서는 4msec에서 0.7A 대역의 큰 변곡점을 갖는 전류 값 변화와 동시에 가동자가 200 $\mu$ m 변위가 발생되었다. 반면, 고속 PWM 제어에서는 10msec에서 전류 값의 변곡점이 없이 0.8A 내외 대역까지 선형적인 전류 변화를 확인하였다.



[그림 4] PWM 제어모드 변화에 따른 전류와 스트로크 특성  
[Fig. 4] Current and stroke characteristics at various PWM control modes



[그림 5] 20kHz 듀티 사이클에 의한 전류 변화  
[Fig. 5] Current variation due to duty cycles at 20kHz

ESC 유압 제어에서 요구되는 최소 미세 증압량은 15bar 내외이기 때문에 이를 만족시킬 수 있는 PWM 제어 조건이 필요하다. 미세 증압 조건을 구현하기 위해서는 발생 전류 600~700 mA 내외, 가동자 열림 시간 4~10 msec 동안에 가동자 변위 시간을 적절하게 제어할 수 있는 고속 PWM 제어 방법이 요구된다. 기본 주파수 20kHz, 듀티 가변의 고속 PWM 제어인 경우, 600~700mA 대역에서 전류 변곡점이 발생하지 않았다. 이 같은 현상은 밸브 가동자 변환에 필요한 최소의 발생 전류를 기점으로 듀티 비율 가변시키는 고속 PWM 제어에 기인한다.

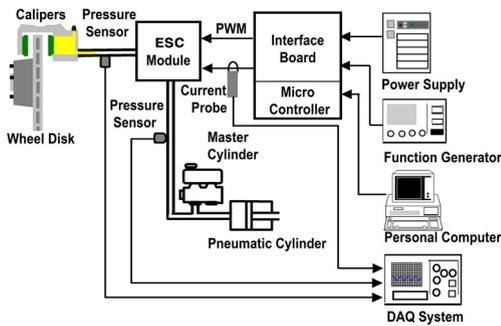
위의 발생 전류와 가동자 열림 시간을 만족시키기 위해서는 20kHz에서 듀티 비율 가변에 따른 발생 전류 기울기가 최소  $\theta=340$ , 최대  $\theta=430$  대역이 포함되도록 하여야 한다.

따라서, 위의 듀티 비율의 범위를 이용하여 밸브 가동자의 급격한 변위 예방이 가능하였으나, ESC 유압 장치에서 발생하는 서지 저감 가능성을 확인할 수 있었다.

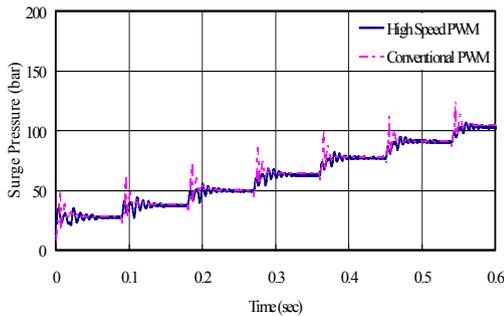
### 3.2 고속 주파수 변화에 의한 서지 저감

100Hz의 일반 및 고속 PWM 제어를 적용했을 때, 발생하는 서지에 대한 HIL(Hardware In the Loop) 시뮬레이션 결과를 그림 7, 8, 9에 나타냈다.

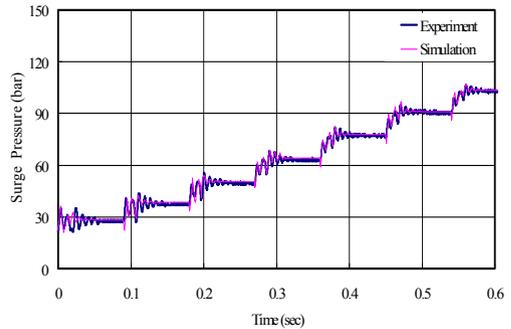
PWM 고속제어에 따른 성능 검증을 위하여 그림. 6과 같이 승용차용 유압 모듈레이터, 마스터 실린더, 전용 PWM 제어기, 차륜 디스크, 유압 배관 등으로 구성된 전용 ESC 시뮬레이터를 활용하였다. 유압 배관은 마스터 실린더에서 차륜 실린더로 압력이 균일하게 공급되도록 하기 위하여 교차형을 적용하였다. 유압 모듈레이터와 차륜 실린더 사이에서 발생하는 서지 현상을 정확하게 검지하기 위하여 압력센서를 유압 모듈레이터와 가장 근접한 400mm 위치에 설치하였다. 또한, 고압 상태에서 발생하는 급격한 압력 변동을 정확하게 측정하기 위한 목적이다.



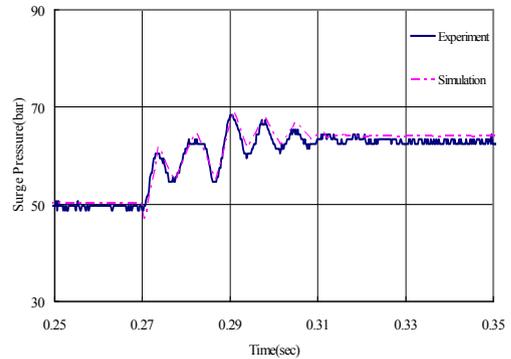
[그림 6] 실험 장치 개념도  
[Fig. 6] Schematic diagram of experimental apparatus



[그림 7] 상용 PWM 제어와 고속 PWM 제어비교  
[Fig. 7] Comparison of conventional and high speed PWM control



[그림 8] 휠 실린더에서의 서지 실험 결과와 시뮬레이션 비교(연속 펄스)  
[Fig. 8] Comparison of simulated and experimental results of surge in wheel cylinder(contiguous pulse)



[그림 9] 휠 실린더에서의 서지 실험 결과와 시뮬레이션 비교(단일 펄스)  
[Fig. 9] Comparison of simulated and experimental results of surge in wheel cylinder (single pulse)

100Hz로 대표되는 일반 PWM 제어를 실시할 경우, 초기 서지 압력이 40bar 내외가 발생되었다.

일반 PWM 제어를 실시하면 밸브 가동자가 열림에서 닫힘으로 고속으로 변환되어 마스터 실린더에서 차륜 실린더로 공급되는 유량이 급속히 차단되기 때문에 커다란 서지가 발생된다. 그러나, 20kHz로 제어하는 고속 PWM 제어에서는 서지 압력이 20bar 내외로서 차륜 실린더에서 발생하는 서지 압력 저감에 큰 효과를 나타냈다.

고속 PWM 제어를 실시하였을 때, 서지 파형은 일반 PWM 제어 방법에 비하여 서지 크기가 50% 저감되고 증압에서 유지로 전환되는 천이 단계에서 압력 변화가 완만하게 발생되었다. 고속 PWM 제어를 실시하게 되면 밸브 가동자의 위치 변환 속도를 제어할 수 있기 때문에 가동자의 급격한 위치 변환을 방지할 수 있게 된다. 위의 실험 및 수치 해석을 통하여 차륜 실린더에서 발생하는

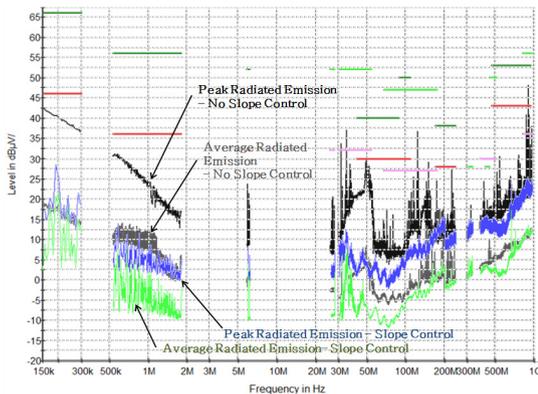
서지 저감에 고속 PWM 제어가 유효함을 확인할 수 있었다. 또한, 특성곡선법과 고속 PWM 제어를 통하여 폐쇄계로 구성된 ESC 유압 장치에서 발생하는 서지를 정량적으로 해석하고 저감시킬 수 있는 방법을 제시할 수 있었다.

### 3.3 슬로프 제어에 의한 EMI 저감

기존의 저속 100Hz PWM의 경우 시스템의 서지발생과 더불어 4채널 제어 측면에서 시스템 응답성이 낮아지는 단점이 있었다. 이를 극복하기 위한 방법으로 고속 20kHz PWM을 적용하기 위해서는 자동차 전자과인증기준에 적합한 시스템 제어가 수반되어야 한다.

제한한 고속 PWM 제어를 적용했을 때, 발생하는 전자파 방출은 고속화 될수록 더욱 많은 전자파를 방출하므로 이에 대한 방사저감을 위해 시그널의 슬로프 제어를 적용하였다. 시그널의 스펙트럼과 형태는 20dB 및 40dB 슬로프율로 고정하여 제어하였다.

전자파 전계강도 측정 결과를 그림 10에 나타냈다. 슬로프 제어를 안했을 경우 최대 전자파 방사 전계강도는 150kHz 대역에서 42dB $\mu$ V로 측정 되었으며 슬로프를 제어 했을 경우 동일 주파수 대역에서는 20dB $\mu$ V로 현저히 저감되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 EMI 표준측정 대역 1GHz 대역까지의 방사된 스펙트럼 최대 전계강도는 슬로프를 제어 했을 경우 평균 13dB 이상 저감되는 것을 확인할 수 있었다.



[그림 10] 슬로프 제어에서의 전자파 방사 특성 측정 비교 결과

[Fig. 10] Comparison of measurements results of electromagnetic emissions by slope control

## 4. 결론

본 논문에서는 기존 자동차 ESC 장치에 일반적으로

적용되고 있는 솔레노이드 밸브에 대한 작용 유압을 고려한 시뮬레이션 해석을 실시하고 이를 실험 해석과 비교 평가하였다. 본 연구는 기존 연구에서 추진하였던 자기장 및 유압 해석과 파동방정식에 기초한 특성곡선법을 이용하여 밀폐계로 구성된 ESC 유압 라인에서 발생하는 서지 현상을 해석하였다.

또한, 기존 ESC의 PWM 제어법을 개선하여 고속 PWM 듀티 제어법을 적용함으로써 발생 서지를 기존 대비 10%로 저감시킬 수 있는 방안을 제시하였으며 슬로프 제어를 추가하여 기존 대비 EMI 저감 효과를 확인할 수 있었다.

향후 연구에서는 고속 주파수 대역을 다양화하고 적용 가능한 고속 PWM 듀티 사이클 제어를 응답특성에 대응하여 적응형 제어를 할 수 있도록 하고자 하며, 전자파 내성특성을 갖출 수 있도록 함으로써 고성능 ECU 개발에 기여하고자 한다.

또한 고성능 제어기를 사용함에 따른 고가격화를 해결하기 위한 전용 ASIC개발을 추진하고자 한다.

## References

- [1] Liebmenn, E., Meder, K., Schuh, J., and Nenninger, G., "Safety and Performance Enhancement: The Bosch Electronic Stability Control (ESP)," SAE Technical Paper 2004-21-0060, 2004.
- [2] Man Kim, H., Kang, I., Choi, K., Wang, H. et al., "Computational Analysis of Pressure Control Characteristics in a VFS Solenoid Valve," SAE Technical Paper 2007-01-0463, 2007.
- [3] Kim, D., Kim, K., Lee, W., and Hwang, I., "Development of Mando ESP (Electronic Stability Program)," SAE Technical Paper 2003-01-0101, 2003
- [4] EB Wylie and VL Streeter., "Fluid Transients in Systems," McGraw-Hill, 1993.
- [5] Wiggert, D. C., Sundquist, M. J., "The Effect Gaseous Cavitation on Fluid Transients," Journal of Fluids Engineering, Vol. 101, No. 10, pp. 79-86, 1979.
- [6] Kim, K. H., Choi. M. J. and Lee K W., "A Study on the Reduction in Pressure Ripples for a Bent-axis Piston Pump by a Phase Interference," Journal of the Korean Society of Precision Engineering
- [7] Stuart M. Wentworth, Fundamentals of Electromagnetics with Engineering Applications, John Wiley & Sons Inc., U.S., 2005.
- [8] Jae Seop Ryu, Chang Seop Koh, Sonam Yun, Young bog

Ham, "Characteristics Analysis of the Solenoid for High-Voltage Circuit Breaker", Proceedings of KIEE, pp.912-914. 2003.

---

**연 규 봉(Kyu-Bong Yeon)**

[정회원]



- 2000년 2월 : 한양대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2006년 2월 : 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과(공학박사수료)
- 1995년 2월 ~ 현재 : 자동차부품연구원 선임연구원

<관심분야>

차량통신, 자동차용 반도체, 전자제어기

---

**정 정 화(Jong-Wha Chong)**

[정회원]



- 1975년 2월 : 한양대학교 전자공학과 (공학사)
- 1977년 2월 : 한양대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1981년 2월 : 와세다대학교 전자통신공학과 (공학박사)
- 1981년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 교수

<관심분야>

통신, CAD, 영상처리, 반도체