

고주파수 PWM 제어를 이용한 ABS의 특성 평가에 관한 연구

김병우*, 이용주⁺, 박 호⁺⁺

(논문접수일 2003. 7. 10, 심사완료일 2003. 8. 12)

A Study on Estimating Characteristics of ABS Using High Frequency PWM Control

Byeong-Woo Kim*, Yong-Joo Lee⁺, Ho Park⁺⁺

Abstract

In general the surge pressure generated in hydraulic systems causes noise, vibration and odd effect to the system. To reduce the surge pressure, high frequency PWM control of 20KHz was attempted. To estimate the braking noise caused by surge, a vehicle equipped with on-board ABS hydraulic modulator has been experimented with respect to the various breaking condition. Through this experiments, it was found that breaking noise has been reduced using high frequency PWM control method compare with low frequency method. To evaluate high frequency control in practice, including verification of general functionality, EMI tests was experimented. Its was found that it is necessary to have the solution to electromagnetic interference(EMI) generated by switching elements.

Key Words : ABS(제동장치), PWM(펄스폭 변조), Modulator(모듈레이터), Solenoid Valve(솔레노이드 밸브), Duty Ratio(듀티비), Surge Pressure(서지 압력), Brake Noise(제동 소음), Conductive Noise(전도성 소음), EMI(전자파 간섭)

1. 서 론

산업체에서 널리 사용되고 있는 제동장치는 유압을 사용하여 제동력을 발생시키는 것으로써 일반 공작기계 뿐 만 아니라 자동차, 선박 등 그 적용분야가 다양하다. 이러한 제동장치는 주로 유압 모듈레이터 속에 솔레노이드 밸브가

내장되어 있고 이 솔레노이드 밸브의 동작으로 유압의 방향 과 압력을 제어하여 제동성능을 발생시키고 있다.

자동차의 제동장치인 ABS는 약 200bar 내외의 압력으로 작용하며, 솔레노이드 밸브는 On-Off 방식으로 제어된다. 밸브가 열림 상태에서 닫힘 상태로 전환될 때 제동력이 발생하는 이러한 유압 장치에서는 급격한 압력 변동

* 주저자, 자동차부품연구원 전장개발부 (bwkim@katech.re.kr)

주소: 333-912 충청남도 천안시 풍세면 용정리 74

+ 두원공과대학 자동차과

++ 천안공업대학 자동차과

이 발생하게 된다. 이 같은 급격한 압력 변동을 서지 압력 (surge pressure)이라 하는데 이러한 현상으로 소음과 진동이 유발될 뿐만 아니라 제동 성능에도 나쁜 영향을 미치게 되는 것이다.

이러한 영향을 감소시킬 수 있는 방법으로 일반적으로 인가하는 주파수인 100Hz보다 높은 주파수인 약 20kHz의 PWM 신호를 ABS에 인가하여 실험한 결과 약 10bar 이상의 서지 압력을 감소시킬 수 있었다⁽¹⁾.

본 논문에서는 이러한 고주파수 PWM 신호를 사용한 ABS의 성능을 평가하기 위하여 평균 제동소음을 측정하였으며 전자파 간섭 노이즈(EMI)를 평가하기 위하여 CISPR 25에 근거한 전도성 노이즈 영향을 분석하였다.

2. 고주파수 PWM 제어

2.1 고주파수 제어 방법

고주파수 PWM 제어란, Fig. 1에서와 같이 일반적인 ABS에서 사용하는 100Hz의 저주파수 제어를 하였을 경우에 발생하는 급격한 전류변곡점(current(low))을 발생하지 않도록 하기 위하여 약 20kHz의 고주파수의 신호를 모듈레이터에 공급하는 방법이다. 이렇게 하면 전류의 변화가 선형적으로 변화하게 되어(current(high)) 솔레노이드 밸브의 동작을 비례제어밸브와 같이 동작시킬 수 있게 되며 따라서 서지 압력의 발생도 줄어들게 되어 ABS에서 발생하는 압력의 맥동현상을 줄일 수 있게 되는 것이다.

전체 제어 신호 주기는 일반 상용 ABS 장치에서 적용되고 있는 90msec를 기준으로 전용 PIC 제어기를 이용하여 임의의 듀티비 변경이 가능하도록 고주파수 PWM 제어를 실시한다. 이러한 PWM 제어 조건과 전류 변화의 상관관계는

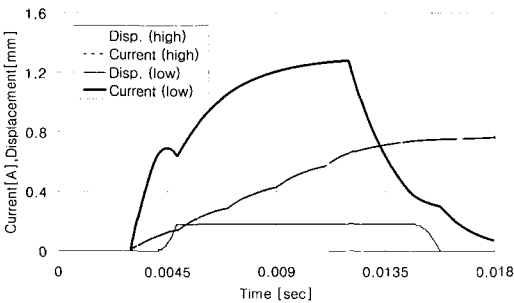


Fig. 1 Current and stroke characteristics vs. PWM control mode

Fig. 2와 같이 3 단계로 구분하여 실시하였다.

제 1단계는 Fig. 2(a)에서 I 로 표시한 구간으로서 솔레노이드에 공급하는 신호를 인가전압, V1에서 기저전압, V0으로 바꾸어 일정 시간동안 공급하는 것이다. 이를 위해서 20kHz의 고주파수 PWM 신호의 듀티비를 0%로 유지한다. 이렇게 하면 휠 실린더에 유량을 공급해주는 밸브는 닫히게 되고 휠 실린더의 압력은 Fig. 2(c)와 같이 그대로 유지하게 된다.

제 2단계는 Fig. 2(a)에서 II로 표시한 구간으로서 솔레노이드 밸브가 작동할 때 발생하는 전류변곡점부근에서 전류를 유지하도록 하여(Fig. 2(b)) 밸브를 서서히 열리도록 작동하는 것이다. 이를 위해서 고주파수의 듀티비를 50% 이하로 낮게 공급하게 된다. 이렇게 되면 휠 실린더의 유량이 공급하게 되어 Fig. 2(c)에서와 같이 휠 실린더의 압력이 서서히 증가하게 된다.

제 3단계는 Fig. 2(a)에서 III으로 표시한 구간으로서 고주파수 PWM 듀티비를 II단계에 비하여 70%이상으로 높게 하여 공급하는 단계이다. 이렇게 하면 Fig. 2(b)와 같이 솔레노이드 밸브의 전류가 공급하는 고주파수의 듀티비에 따라서 완만하게 증가하게 되고 밸브는 서서히 닫혀져서 휠 실린더의 압력은 Fig. 2(c)와 같이 더 이상 증가하지 않게 되는 것이다. 이렇게 제어하면 솔레노이드 밸브의 전류를 완만하게 변화시킬 수 있으므로 저주파수 PWM 제어에서 나타나는 밸브 가동자의 급격한 변동으로 인한 과도한 압력의 상승을 막을 수 있게 된다.

2.2 고주파수 실험 결과

저주파수와 고주파수 PWM 제어를 적용했을 때 발생되

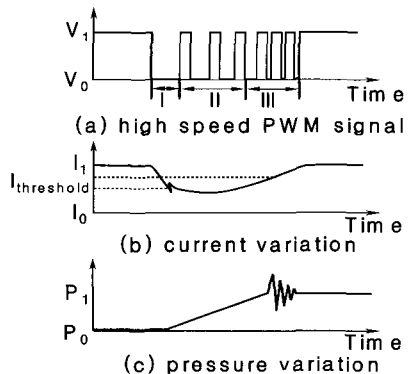


Fig. 2 Principle of high frequency PWM control

는 맥동 현상을 Fig. 3에 비교하였다. 저주파수 PWM 제어에서는 초기 맥동 크기가 20bar 내외로 발생되었으나 고주파수 PWM 제어에서는 맥동 압력이 10bar 내외로서 발생하여 주파수의 변화가 휠 실린더에서 발생하는 맥동 압력 저감에 큰 영향을 끼치는 것을 알 수 있었다.

3. ABS 특성 평가

3.1 제동소음 실험

본 연구에서는 차량용 브레이크 시스템을 대상으로 제동 실린더에서 발생하는 맥동 현상의 제동 소음을 측정하였다. 먼저 솔레노이드 밸브에 인가하는 주파수를 다르게 하였을 때 발생하는 맥동이 제동 소음에 미치는 영향을 계측하기 위하여 100Hz의 저주파수와 20kHz의 고주파수 제어를 각각 인가하여 제동 소음을 측정하였다. 이 때, 유압 모듈레이

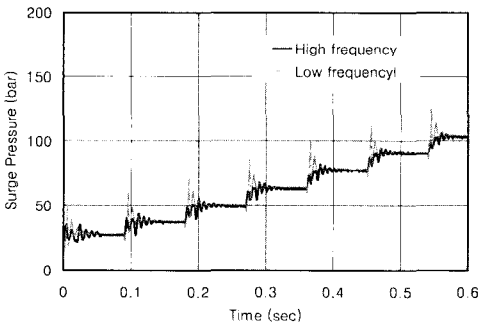


Fig. 3 Surge pressure vs. low and high frequency PWM control

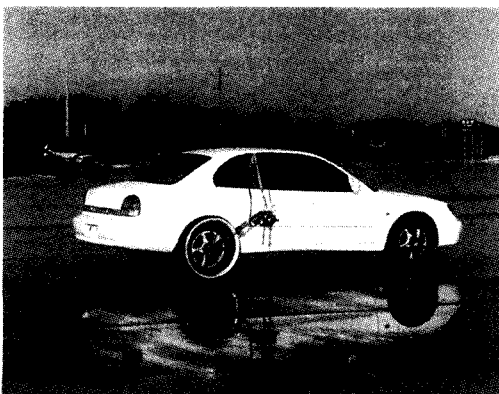


Fig. 4 Testing of braking noise

터에 공급되는 압력은 150bar를 유지하였다.

Fig. 4는 저주파수와 고주파수 PWM 제어를 실시할 때 발생하는 맥동 크기와 제동 소음과의 상관관계를 평가하기 위하여 사용한 배기량 1,800CC의 중형 승용차이다. 위의 실험은 차량을 속도를 60km/h의 정속 주행 상태에서 제동 장치를 급격하게 작동시키면서 제동 소음을 측정하였다. 노면 마찰 계수를 일정하게 하기 위하여 마찰계수 $\mu=0.2$ 인 습윤 타일(wet tile) 조건을 이용하였다. 제동 장치에서 발생하는 소음은 운전자 머리 부위에 마이크를 설치하여 계측하였다. 이 계측된 주행 노이즈는 FFT 분석기를 이용하여 노이즈의 주파수 특성을 분석하였다.

Table 1은 제동 소음에 사용한 실험 장치를 나타내고 있다.

다음으로는 모듈레이터로 공급되는 압력을 가변했을 때 제동 소음에 미치는 영향을 계측하기 위하여 공급 압력을 50, 100, 180bar로 변화시키면서 제동 소음을 측정하였다.

3.2 제동 소음 평가

유압 모듈레이터에 150bar 제동 압력을 부과하고 저주파수와 고주파수 제어를 실시했을 때의 소음 레벨을 Fig. 5에 나타냈다. 저주파수의 평균 소음 레벨의 크기가 고주파수에 비하여 크게 발생되고 있음을 알 수 있다.

제동 장치가 작동할 때 발생하는 소음 경로는 크게 고체를 통하거나 공기 층을 통하여 발생되게 된다. ABS가 작동될 때 발생하는 소음의 대부분은 공기를 통하여 전파되게

Table 1 Specifications of test equipments for the evaluation of noise level

Experimental apparatus	Specification
Generator	Philips PM5139 Operating Freq.: 0.1MHz ~ 20MHz
Impedance network	Rohde & Schwarz ESH3 ~ Z6 - 5uH/50Ω
Receiver	Rohde & Schwarz ESMI - Operating Freq.: 20Hz ~ 20.5GHz
DAQ system	HP 3852A - 8 Slot
Sound meter	Ono Sokki MI-1211 - max. Sound level: 132dB
FFT analyzer	Ono Sokki CF-5220 - Freq. : 10mHz ~ 100kHz
Test vehicle	A차, Exhaust volume : 1,800CC

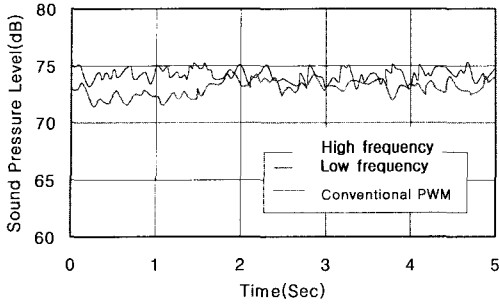


Fig. 5 Noise level at time domain by low and high frequency control

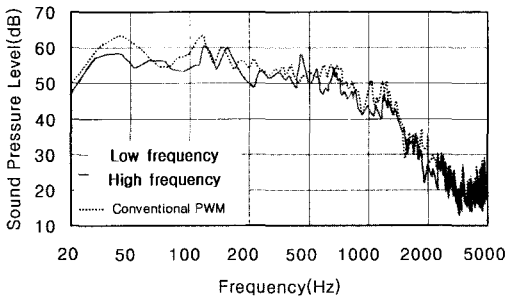


Fig. 6 FFT analysis of brake noise at brake pressure : 150 bar

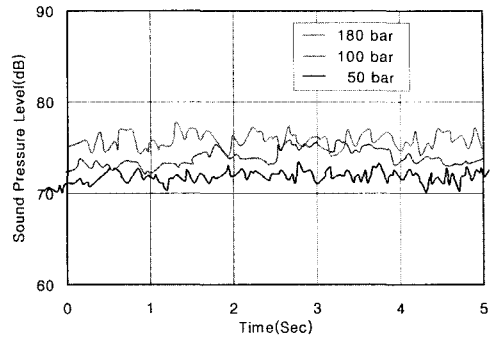


Fig. 7 Noise level at time domain by brake pressure

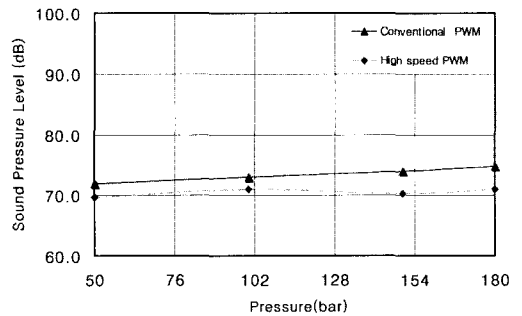


Fig. 8 Average noise level vs. brake pressure

된다. 이 같은 소음은 증압, 유지, 감압으로 대표되는 제동 장치 유압 제어 모드 변경에 따라서 큰 영향을 받게 된다. 그러나 동일한 유압 제어 모드인 경우 유압 모듈레이터에서 발생된 맥동 크기에 많은 영향을 받게 된다. 특히, 유압 모듈레이터에서 발생된 맥동은 유압 배관의 진동과 소음을 유발하여 운전 편리성 향상에 장애 요인으로 작용하게 된다. 위의 Fig. 3에서와 같이 고주파수제어보다 저주파수에서 맥동이 크게 발생하였으므로 저주파수 제어에서는 고주파수 제어에 비하여 평균 소음 레벨이 높게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 6은 저주파수 및 고주파수를 실시할 때 발생하는 제동 소음에 대한 FFT 해석 결과이다. 저주파수 제어는 고주파수 제어에 비하여 평균 소음 레벨이 높게 나타났다.

마스터 실린더에서 공급되는 제동 압력과 발생 소음과의 상관관계를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타냈다. 유압 모듈레이터에서 공급되는 압력이 증가함에 따라서 평균 소음 레벨은 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 이 같은 현상은 마스터 실린더에서 공급되는 압력이 증가함에 따라서 제동 실린더에 공급되는 유체의 충격 에너지가 증가하기 때문이다.

기존 연구 결과⁽²⁻⁴⁾에서 알 수 있듯이 제동 거리 단축은 주로 제동 장치 유압 제어 모드와 시스템 제어 최적화를 통하여 가능하게 된다. 따라서 제동 거리 단축을 위해서는 유압 제어 모드와 시스템 제어의 최적화, 제동 소음 저감을 위해서는 맥동 저감 방안을 통하여 제동 성능 향상을 도모하여야 할 것이다.

3.3 전자파 간섭 실험

솔레노이드 밸브에 대한 주파수 제어를 실시할 때 트랜지스터 구동부에서 발생하는 전자파 간섭(EMI) 측정에 이용한 구성도와 실험 장비를 Fig. 9, Fig. 10에 나타냈다.

DC 전원 발생기에서는 자동차 배터리에서 발생하는 공칭 전압 13.5V를 일정하게 유지시킨다. 전원 안정화 회로(LISN)는 5uH//50Ω로 구성되어 있기 때문에 외부 연계 장비와의 임피던스 매칭을 통하여 발생될 수 있는 전원 노이즈를 소거시킬 수 있다. 이를 통하여 솔레노이드 밸브에 대한 주파수 제어에서 발생하는 순수한 전자파 노이즈를 측정할 수 있게 된다.

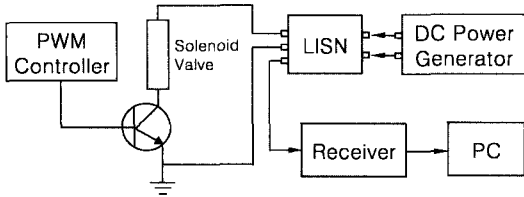


Fig. 9 Schematic diagram for EMI testing

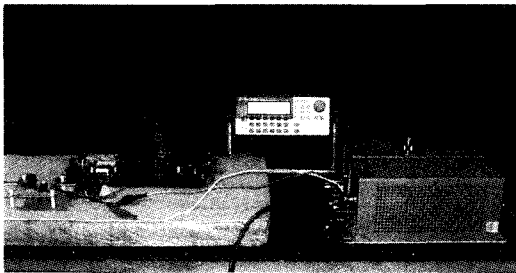


Fig. 10 Testing of EMI noise

전원 안정화 회로의 (+)단자는 솔레노이드 밸브에 (-)단자는 트랜지스터 그라운드에 연결하였다. 이때, 전체 와이어의 길이는 200mm 이하를 유지시켰다. 인가 전원은 DC 13.5V를 이용하였으며 전원 안정화 회로 (+) 단자에서 Load 저항 50Ω을 제거한 후 전자파 노이즈를 리시버에서 측정하였다. 이를 위하여, CISPR 25에 정의된 자동차 전장 부품에 대한 전자파 시험 방법을 기준으로 전원 라인에서 방사되는 전자파 노이즈를 평가하였다. 방사되는 노이즈 평가는 차량 제어 및 제어에 필수적인 기능을 갖는 부품에 적용되는 class 4를 적용하여 실시하였다.

3.4 전자파 간섭 평가

제동 장치 유압 모듈레이터용 솔레노이드 밸브에 대한 저주파수 및 고주파수 제어를 실시했을 때 발생하는 전도성 노이즈를 측정하였다. Fig. 11은 100Hz로 구동하는 저주파수 제어의 측정 결과를 나타낸 것으로서 주파수 2 MHz 이내의 저주파 대역에서는 기준 전자파 노이즈 레벨을 초과하지 않은 것을 알 수 있다. 반면에 Fig. 12는 20kHz로 구동하는 고주파수 제어의 측정결과를 나타낸 것으로서 주파수 1~3MHz 대역에서 기준 전자파 노이즈 레벨을 초과하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 전자파 노이즈와 관련하여 자동차분야에서 문제시키고 있는 것은 고주파 대역에서의 전자파 노이즈이다.

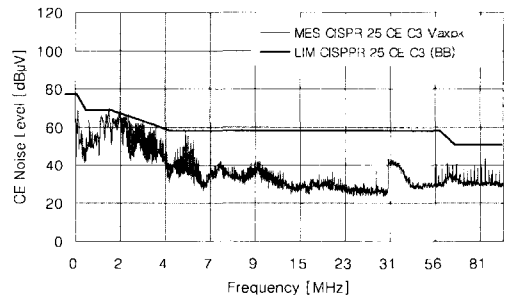


Fig. 11 EMI noise level at conventional frequency control

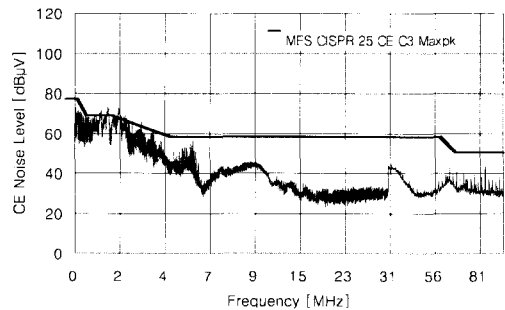


Fig. 12 EMI noise level at high speed frequency control

특히, 저주파 대역에서 저주파수 제어를 실시하면 전자파 노이즈 파형이 저주파 성분을 포함하고 있으나 고주파수 제어에서는 고차의 조화 함수 성분이 포함된 전자파 노이즈가 발생된다. 이는 인덕티브 L과 저항 R로 구성된 솔레노이드 밸브의 유도 부하에 의해서 발생하는 현상이라 생각된다.

이를 통하여, 고주파수 제어에서는 기존 100Hz의 저주파수 제어에 비하여 상대적으로 높은 전도성 노이즈 발생을 확인할 수 있었다. 따라서 고주파수 PWM 제어는 저주파수 PWM 제어에 비하여 고주파 대역에서의 전자파 노이즈가 기준 값을 초과하기 때문에 ABS ECU 하드웨어를 설계할 때, 전자파 노이즈에 대한 대비 설계가 필요함을 알 수 있다.

4. 결론

20kHz 고주파수 PWM 제어를 사용한 ABS의 제동소음 실험과 전자파 간섭실험을 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 고주파수 PWM 제어는 저주파수 제어에 비해서 제동소

음이 현저하게 줄어드는 것을 알 수 있었다.

- (2) 마스터 실린더에서 공급하는 압력이 클수록 제동소음이 크게 발생하므로 제동소음을 줄이기 위해서는 공급압력을 적절하게 조절하여야 한다.
- (3) 고주파수 PWM 제어 ABS는 주파수는 CISPR 25에서 정의하고 있는 전도성의 전자파 간섭 노이즈 레벨을 초과하므로 ECU 하드웨어 설계를 위해서는 전자파대비회로 설계 기술이 필요함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Lee, Y. J., Kim, B. W., and Park, H., 2003, "A Study on Falling Pressure Surge of ABS Using High Frequency PWM Control", *Trans. of KSMTE*, Vol. 12, No. 3, pp. 38 ~ 44.
 - (2) Naito, T., Takeuchi, H., and Kuromitsu, H., 1996, "Development of Four Solenoid ABS", *SAE 960958*, pp. 198 ~ 199.
 - (3) Imoto, Y., 1998, "High-efficiency Brake Pressure Controls in ABS", *SAE 9837427*, pp. 655 ~ 660.
 - (4) Yu, J. H., 1994, "The Vibration of Effective Bulk Modulus with Pressure in Hydraulic Systems", *Trans. of the ASME*, Vol. 116, No. 3, pp. 146 ~ 150.
- (1) Lee, Y. J., Kim, B. W., and Park, H., 2003, "A