

전자제어식 주차 브레이크(EPB) 시스템의 제어기 설계

이두호*, 이충우**, 정한별*, 정정주***, 손영섭****, 윤팔주****
 한양대학교 전기공학과*, 한양대학교 전자통신전파공학과**, 한양대학교 전기제어생체공학부***, (주) 만도****

Controller Design for Electric Parking Brake(EPB) System

Doo Ho Lee*, Choong Woo Lee**, Han Byul Chung*, Chung Choo Chung***, Young Seop Son****, Paljoo Yoon****
 Division of Electrical and Computer Engineering, Hanyang University*, **, Division of Electrical and Biomedical Engineering,
 Hanyang University***, MANDO Corporation Central R&D Center****

Abstract - 본 논문에서는 차량용 전자제어식 주차 브레이크(Electric Parking Brake, EPB) 시스템 제어에 효과적인 제어기를 논의한다. 이를 위하여 EPB 시스템의 동작 요건과 고유 특성을 고려하여 제어 사양을 정하고 이를 만족시키는 세 가지 제어기(Bang-bang, 선형 P, 비선형 P 제어기)를 제안한다. 또한 제안된 제어기들의 특성 및 성능을 과도응답과 간인성 측면에서 분석하였다. 이를 위해 EPB 시스템을 주파수 영역과 시간 영역에서 모델링하고, 설계된 제어기들의 성능을 모의실험을 통해 비교, 검증한다.

1. 서 론

전자제어식 주차 브레이크(Electric Parking Brake, 이하 EPB) 시스템은 주차용 핸드 브레이크 시스템의 제어 입력을 운전자의 힘에서 전기 모터의 힘으로 대체한 시스템이다.

EPB 시스템은 전기 공급이 끊긴 후에도 제동력을 유지해야 하는 시스템이기 때문에 스크류와 너트 구조의 기계적 체결을 이용하여 제동력을 발생시키고 있다. 따라서 기계적인 체결이 정상적으로 이루어지기 위해서는 스크류의 회전 방향이 동작 중에 바뀌지 않도록 제어되는 것이 중요하다.

한편, EPB 시스템은 제동력을 가할수록 기계 시스템의 반발력도 증가하는 구조이기 때문에 목표치까지 제동력을 증가시키기 위해 선형 적분제어 등이 요구된다. 그러나 적분 제어기는 적분 값이 축적되기 때문에 모터를 역회전시켜 브레이크가 풀리게 될 우려가 있다.

따라서 본 논문은 EPB 시스템에 적합한 제어기로 Bang-bang 제어기, 선형 P 제어기와 비선형 P 제어기를 제안한다. Bang-bang 제어기는 에러에 따라 무한대의 간인, 선형 P 제어기는 유한 상수 간인 그리고 비선형 P 제어기는 에러의 크기에 따라 변하는 간인을 적용하여 되먹이는 제어기이다.

각 제어기를 EPB 시스템에 적용하여 과도응답 측면과 간인성 측면에서 그 특성과 성능을 비교 분석한다. 이를 위해 EPB 시스템을 주파수영역과 시간영역에서 Type I 시스템으로 모델링하였다. 분석한 결과 비선형 P 제어기가 가장 우수한 특성을 보였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2.1절에서는 EPB 시스템을 모델링하고, 2.2절에서는 EPB의 제어 사양을 제시하고, Bang-bang 제어기, 선형 P 제어기와 비선형 P 제어기를 설계하고 각 제어기의 예상되는 특성과 성능에 대하여 분석한다. 2.3절에서는 모의실험을 통하여 이를 검증하고 3절에서 결론을 맺는다.

2. 본 론

2.1 EPB 시스템 모델링

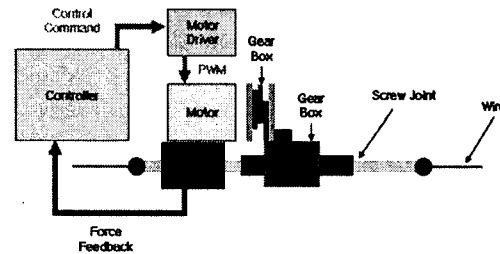
EPB 시스템은 기존의 수동 주차 브레이크 시스템의 구조와 같이 와이어를 당겨 제동력을 제어한다. EPB 시스템의 구조는 그림 1과 같다. 시스템은 DC 모터, 기어박스, 스크류/너트, 전류 센서, 훌 센서, 가속도 센서, 제어부로 구성된다.

EPB 시스템의 동작순서는 다음과 같다. 운전자가 EPB 시스템을 작동시키면, 제어부에서는 차량의 무게 정보와 가속도 센서를 통해 계산한 노면의 기울기 정보를 바탕으로 와이어 장력의 목표치를 결정한다. 훌 센서를 이용하여 와이어 장력의 크기를 측정하고 목표치와 비교한다. 모터 드라이버를 통하여 목표 힘을 발생시킨다.

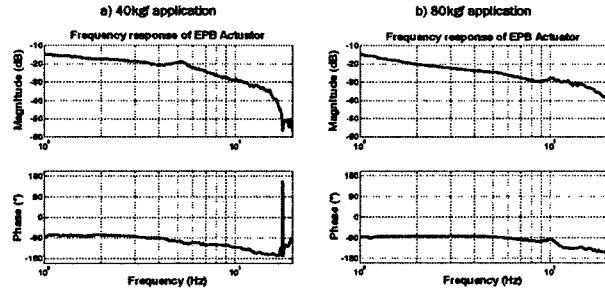
2.1.1 DSA를 이용한 주파수 영역 선형 모델 근사화

와이어가 당겨짐에 따라 스크류 기어의 마찰력 크기가 변하고, 이로 인해 에너지 전달 효율이 변한다. 따라서 Load Force가 40kgf, 80kgf인 경우에 대하여 각각 응답을 측정하였다.

그림 2의 a)와 b)는 각각 와이어 장력을 40kgf와 80kgf로 유지시키면서 DSA를 이용하여 측정한 시스템의 주파수 응답이다.



〈그림 1〉 전자제어식 주차 브레이크 시스템 구성 개념도



〈그림 2〉 전자제어식 주차 브레이크 시스템 주파수 응답

EPB 시스템은 에너지를 와이어 등에 축적하는 Type I 시스템이기 때문에 각각의 곡선에 근사적으로 일치하는 전달함수를 아래와 같이 구하였다. 수식 (1), (2)는 각각 40kgf, 80kgf로 출력을 유지하면서 측정한 경우에 해당한다. 스크류에서 마찰에 의한 에너지 손실이 전체 응답의 DC 간인 감소로 나타났다.

$$G_{40}(s) = \frac{85.8831}{s(s+60.06)} \quad (1)$$

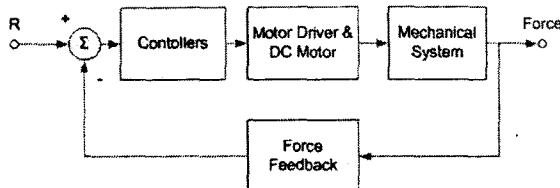
$$G_{80}(s) = \frac{72}{s(s+60)} \quad (2)$$

2.1.2 Modelica를 이용한 시간 영역 비선형 모델링

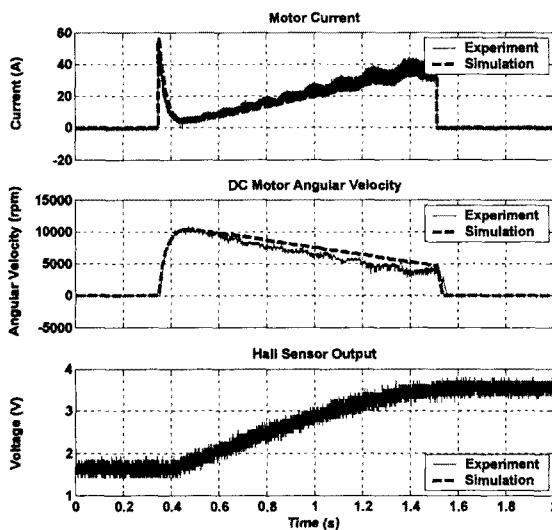
EPB 시스템은 스크류에서 발생하는 마찰력으로 제동력을 발생시키고 있다. 스크류의 회전방향이 바뀔 때 마찰력의 방향과 크기도 변하게 된다. 이 때 마찰력의 크기 변화가 모델링되어야 스크류의 체결을 모델링할 수 있다. 따라서 스크류 기어의 마찰력을 포함하는 시간 영역 비선형 모델을 설계, 검증하였다.

전체 시스템을 그림 3과 같이 표현하였다. 제어기와 모터 드라이버, DC 모터의 전기적 특성과 전달상수는 Simulink 환경에서 모델링하였고, 이후 기계 시스템은 Dymola에서 모델링되었다.

그림 4는 EPB 시스템의 비선형 모델링 검증이다. 전반적인 응답 특성은 큰 차이 없이 유사하게 나타나는 것을 확인하였다. 그림 4의 (b)는 회전수를 훌 센서를 이용하여 측정한 후 미분하여 구한 근사 과정이다. 또한, 모터의 전류 과정에서 보이는 약 6kHz의 진동 성분은 모터 슬롯의 형상을 따라 자속밀도의 변화로 인한 전류 리플과 기계적 진동을 나타낸다[1].



〈그림 3〉 시뮬레이터 블록 다이어그램



〈그림 4〉 전자제어식 주차 브레이크 시스템 비선형 모델링 검증

2.2 제어기 설계

2.2.1 EPB 시스템 제어기의 요건

EPB 시스템에서 요구하는 제어기의 특성은 다음과 같다. 첫째, EPB 시스템은 주차 후 전력 공급이 끊겨도 기계적 체결에 의해 제동력을 유지해야 하기 때문에, 스크류 너트 구조의 체결력을 통해 제동력을 발생시킨다. 따라서 체결이 효과적으로 이루어지기 위해서는 모터의 회전 방향이 동작 중에 바뀌지 않아야 하므로 오버슈트가 발생하지 않아야 한다.

둘째, 제어 목표치의 범위가 크다. EPB 시스템이 발생시켜야 하는 제동력은 차량 무게와 주차 시 노면 기울기 등에 의해 크게 가변적이다. 모든 경우에 다른 EPB 시스템이 설계될 수 없으므로 제어기를 통해 해결되어야 한다.

셋째, 소음은 기계적인 진동으로 야기되기 때문에, 기계시스템이 급격하게 움직이지 않도록 설계하는 것이 필요하다. 그러므로 설계된 제어기는 모터의 각속도를 작게 유지해야 한다.

요약하면, EPB 시스템의 제어 사양은 다음과 같다. 오버슈트 0%, 목표치 힘 80~120kgf, 정상상태 에러 $\pm 5\text{kgf}$ 이내, 정착 시간 1.5초 이내 등이다. 이를 위해 Bang-bang 제어기, 선형 P제어기와 비선형 P 제어기를 적용하였다.

2.2.2 Bang-bang 제어기

Bang-bang 제어기(3)는 에러의 크기가 0보다 크면 최대값을 내보내고, 0보다 작으면 최소값을 내보낸다.

$$u = \begin{cases} u_{\max}, e > 0 \\ u_{\min}, e < 0 \end{cases} \quad (3)$$

EPB 시스템은 제어 입력이 제거되면, 큰 마찰력에 의해 빠르게 감속되어 체결이 이루어지는 시스템이기 때문에 Bang-bang 제어기를 이용하는 것이 옹답속도 면에서 가장 우수하다. 그러나 Bang-bang 제어기는 시스템의 고주파 모드를 가진하는 경향이 있기 때문에 동작 시 소음이 크게 발생할 수 있다[2].

2.2.3 선형 P 제어기

선형 P 제어기(4)는 에러에 선형 계인 K_p 를 곱하여 출력하는 제어기이다. 모터의 회전 방향이 바뀌는 것을 방지하기 위해 u_{\min} 이하로는 제어 출력이 나가지 않도록 제한한다.

$$u = \begin{cases} K_p e, e \geq 0 \\ u_{\min}, e < 0 \end{cases} \quad (4)$$

에러의 부호가 바뀔 때, 제어기 출력이 최대값에서 즉시 최소값으로 바뀌

는 Bang-bang 제어기에 비해 제어기 출력이 연속적으로 변하기 때문에 제어기 출력의 주파수 성분을 상대적으로 낮게 유지할 수 있다.

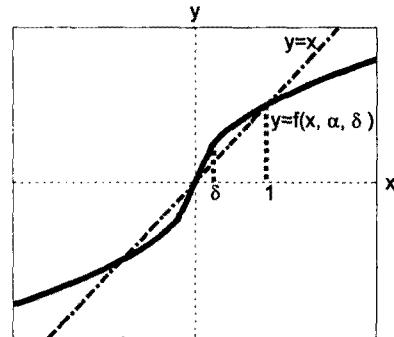
그러나 EPB 시스템은 Type I 시스템으로 선형 P 제어기는 항상 정상 상태 에러를 갖게 된다. 게다가, 목표치에다가갈수록 마찰력에 의한 외란 힘이 증가하게 되므로 정상상태 에러 문제는 더 심화된다. 이를 막기 위해서는 선형 계인 K_p 를 증가시켜야만 한다. 하지만 이는 다시 제어기 출력의 고주파 성분을 증가시켜 Bang-bang 제어기의 제어기 출력 특성에 가까워진다.

2.2.4 비선형 P 제어기

비선형 P 제어기(5)는 J. Han이 제안한 제어기로 제어입력 e 를 비선형 함수(6)로 매핑시킨 후 선형 계인 K_p 를 곱하여 출력하는 제어기이다[3]. 모터의 회전 방향이 바뀌는 것을 방지하기 위해 u_{\min} 이하로는 제어 출력이 나가지 않도록 제한한다.

$$u = \begin{cases} K_p f(e, \alpha_p, \delta_p), e \geq 0 \\ u_{\min}, e < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$y = f(x, \alpha, \delta) = \begin{cases} |x|^\alpha \text{sign}(x), & \text{when } |x| > \delta \\ \delta^{1-\alpha} x, & \text{when } |x| \leq \delta \end{cases} \quad (6)$$



〈그림 5〉 비선형 P 제어기의 비선형 함수

그림 5에서 비선형 함수 f 와 $y = x$ 의 크기를 비교하였다. 비선형 함수 f 는 $y = x$ 에 비하여 x 가 1보다 작을 때는 함수 값이 상대적으로 크고, 1보다 클 때는 함수 값이 상대적으로 작다. 따라서 비선형 P 제어기는 선형 P 제어기에 비하여 에러가 작을 때 보다 큰 출력을 낸다. 이는 상대적으로 큰 계인의 선형 P 제어기로 동작한다고 볼 수 있으므로 정상상태 에러가 줄어들 것으로 예상된다.

2.2.5 제어기 성능 비교

2.2.5.1 오버슈트 축면

스크류 마찰계수에서 유도한 마찰각 ρ 이 스크류 나선각 β 보다 크게 유지된다면 외부에서 힘을 주지 않는 한 스크류의 역회전은 발생하지 않는다[4]. 따라서 세 가지 제어기가 모두 제어 출력을 항상 0 이상으로 제한하여 오버슈트가 발생하지 않는 구조이다.

2.2.5.2 정상상태 에러 축면

EPB 시스템은 목표치 힘 부근에서 떨링이 크게 증가하므로 정상상태 에러를 줄이기 위해서는 목표치 힘 부근에서 큰 계인을 가져야만 한다. 따라서 목표치 힘 부근에서 큰 계인을 갖는 순서, Bang-bang, 비선형 P, 선형 P 제어기 순으로 정상상태 에러의 크기가 작다.

2.2.5.3 응답속도 축면

응답속도는 제어기들 간에 큰 차이가 없다. 약 80% 이상의 동작 시간동안 제어 출력은 폭화 상태를 유지하고 있다. 즉 시스템은 가능한 최대속도로 동작하다가 목표치 부근에서만 제어기의 제어를 받는다. 따라서 제어기가 바뀌더라도 응답시간이 크게 단축되는 것을 기대할 수 없다.

2.2.5.4 저소음 관점

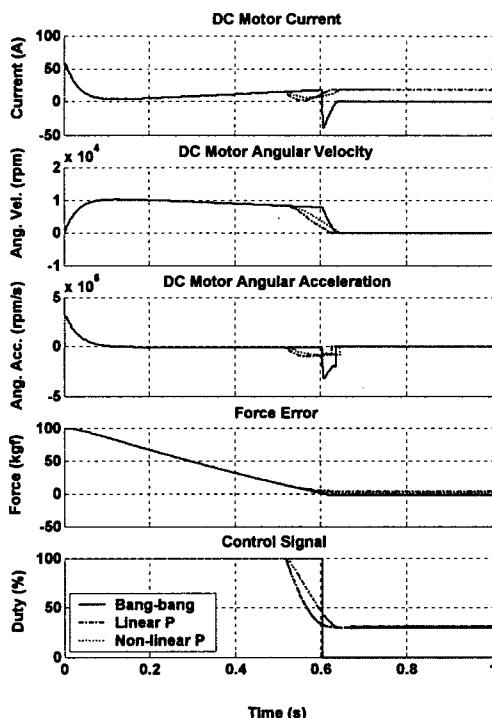
기계적인 시스템의 소음(acoustic noise) 발생 원인은 기계적인 진동이다[5]. 기계요소는 그 형상과 재질에 따른 고유진동수를 갖고 있기 때문에 이를 가진하게 되면 소음이 증폭된다. 따라서 모터의 가속도의 주파수 성분을 낮은 주파수로 유지시키면 소음 발생을 억제하는 데에 유리하다. 모의실험 결과에 따르면 모터의 가속도의 주파수 성분이 가장 낮은 제어기는 비선형 P 제어기인 것으로 나타났다.

2.2.5.6 간인설 축면

시스템에 불확실성이 존재할 때 발생할 수 있는 네 가지 시나리오를 다음과 같이 고려하였다. (1) 모터/기어박스의 효율의 전 속도영역에서 10% 이상 감소 (2) 모터 잠자(demagnetization)로 인한 전달 상수의 감소 (3) 스크류 마찰계수의 증가 (4) 기회 등의 영향으로 인한 와이어 특성 변화. 이는 시나리오에 따른 결과를 통하여 2.3절에서 비교하였다.

2.3 모의실험 결과

그림 6에서 목표치 힘이 100kgf일 때 세 가지 제어기를 적용한 시뮬레이션 결과를 보였다.

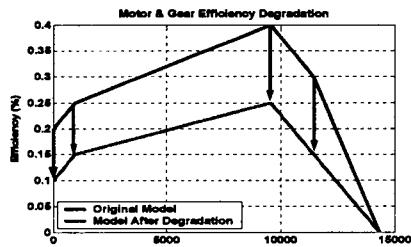


〈그림 6〉 시뮬레이션 결과 비교

제어 출력은 2.2.5.1절에서 예상한 것과 같이 모든 제어기에 대해서 오버슈트가 발생하지 않았다. 정상상태 에러는 Bang-bang 제어기는 -2.11kgf 로 목표치 힘을 지나쳐서 멈추었으며, 선형 P 제어기는 3.906kgf , 비선형 P 제어기는 1.058kgf 의 정상상태 에러를 가졌다. 응답속도는 대부분의 시간동안 최대 출력으로 동작하기 때문에 0.05초 이내에서 큰 차이가 없었다. 모터의 회전 가속도 파형을 보면 Bang-bang 제어기는 최대치가 $30\text{k rpm}/\text{s}$ 인 날카로운 파형인 반면, 선형 P 제어기는 최대치가 $10\text{k rpm}/\text{s}$, 비선형 P 제어기는 최대치가 $6\text{k rpm}/\text{s}$ 인 등원 파형으로 Bang-bang 제어기에 비하여 최대치가 더 작고 주파수 성분도 낮다. 동작이 멈춘 후에도 모터 전류가 0이 되지 않는 것은 기계적 마찰에 의해 스크류가 체결되었기 때문이다. 실제 구현에서는 동작이 완료된 후, 전류를 끊어주어 해결하도록 한다.

다음은 제어기의 장인 성능을 평가하여 보았다.

(1) 모터/기어박스 효율의 전 속도영역에서 10% 감소



〈그림 7〉 모터 / 기어박스 흐름 각소

모터 효율 감소는 그림 7에 보인 것과 같다. 전 속도 영역에서 효율이 10%에서 15% 감소되었다. 그림 8은 이에 따른 각 제어기의 성능을 보여준다. 경상상태 에리는 Bang-bang: -0.788kgf , 선형 P: 7.013kgf , 비선형 P: 4.62kgf 로 비선형 P 제어기가 Bang-bang 제어기와 허용범위 내에 들었다.

감소하였는데 이것은 모터의 출력이 감소하였기 때문이다. 따라서 모터/기어박스의 효율이 더 작아지게 되면 선형 P, Bang-bang, 비선형 P 제어기 순으로 허용 오차 범위를 벗어나게 될 것이므로, 모터/기어박스 효율 감소에 대하여 비선형 P 제어기가 가장 강인함을 알 수 있다.

(2) 모터 감자(demagnetization)로 인한 전달 상수의 감소

그림 9에서 모터의 갑자 또는 모터 전달 상수의 오차로 인한 불확실성에 대한 제어기의 성능을 모의실험을 통하여 비교하였다. 모터 전달 상수는 $0.011\text{N}\cdot\text{m}/\text{A}$ 에서 $0.010\text{N}\cdot\text{m}/\text{A}$ 로 감소되었다. 정상상태 에러는 Bang-bang: -3.307kkgf , 선형 P: 2.53kkgf , 비선형 P: -0.02516kkgf 로 선형 P 제어기를 제외하고 모두 목표치를 지나쳐서 범주었으나 허용범위 안에 있다. 변화 경향을 살펴보면, 불확실성을 적용하기 전에 비하여 결과 힘의 크기가 증가하였는데 이것은 모터의 속도가 증가하였기 때문이다. 따라서 전달 상수가 더 작아지게 되면 Bang-bang, 비선형 P, 선형 P 제어기 순으로 허용 오차 범위를 벗어나게 될 것이므로, 모터 전달상수 변화에 대하여 선형 P 제어기가 가장 임의함을 알 수 있다.

(3) 스크류 마찰계수의 증가

그림 10은 스크류 표면의 마찰계수를 0.176에서 0.2로 증가시켰을 때의 모의실험 결과이다. 정상상태 에러는 Bang-bang: -1.904kgf, 선형 P: 4.321kgf, 비선형 P: 1.461kgf로 모두 허용범위 안에 있다. 변화 경향을 살펴보면, 불확실성을 적용하기 전에 비하여 결과 힘의 크기가 감소하였는데 이것은 모터의 회전력을 방해하는 힘이 증가하였기 때문이다. 따라서 스크류 마찰계수가 더 커지게 되면 선형 P, 비선형 P, Bang-bang 제어기 순으로 허용 오차 범위를 벗어나게 된다. 이에 따라, 스크류 마찰계수의 증가에 대하여 Bang-bang 제어기가 가장 강의함을 알 수 있다.

(4) 기후 등의 영향으로 인한 와이어 특성 변화

그럼 11은 와이어의 탄성계수를 13kgf/mm 에서 10kgf/mm 로 감소시켰을 때의 모의실험 결과이다. 정상상태 에러는 Bang-bang: -1.64kgf , 선형 P: 4.566kgf , 비선형 P: 1.62kgf 로 모두 허용범위 안에 있다. 변화 경향을 살펴보면, 불확실성을 적용하기 전에 비하여 결과 힘의 크기가 증가하였는데 이것은 모터의 회전을 방해하는 힘이 감소하였기 때문이다. 따라서 와이어의 탄성계수가 더 작아지게 되면 Bang-bang, 선형 P, 비선형 P 제어기 순으로 허용 오차 범위를 벗어나게 된다. 그러므로 와이어의 탄성계수 감소에 대하여 비선형 P 제어기가 가장 강한 힘을 알 수 있다.

4가지 분석 결과를 표 1에 정리하였다. 각각의 경우에 대하여 가장 우수한 결과는 ✓ 표시 3개, 그 다음은 2개, 가장 취약한 결과는 1개로 표시하였다.

제어기	(1)	(2)	(3)	(4)
Bang-bang	✓✓	✓	✓✓✓	✓
선형 P	✓	✓✓✓	✓	✓✓
비선형 P	✓✓✓	✓✓	✓✓	✓✓✓

〈표 1〉 강일성 시뮬레이션 결과 비교

표 1에 따라 비선형 P 제어기가 타 제어기에 비하여 전반적으로 강인한 성능을 보인다.

3. 결론

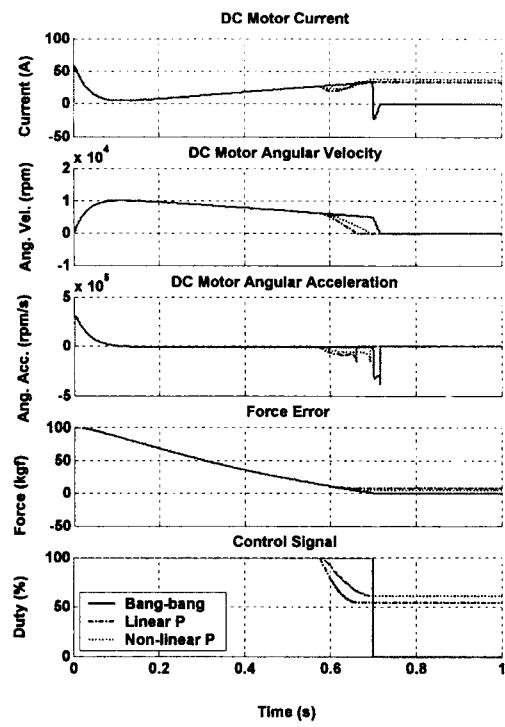
본 논문은 EPB 시스템을 소개하고 이에 적합한 제어기를 제안하여 그 특성을 비교, 분석한다. 이를 위하여 EPB 시스템을 주파수 영역과 시간 영역에서 모델링하고 시스템의 동작 요건에 부합하는 제어 목표를 제시하고, 이에 부합하는 세 가지 제어기(Bang-bang, 선형 P, 비선형 P 제어기)를 소개한다. 각 제어기의 특성을 EPB 시스템 관점에서 분석하고 시뮬레이션 결과를 통하여 비선형 P 제어기가 가장 우수한 것을 확인하였다.

감사의 글

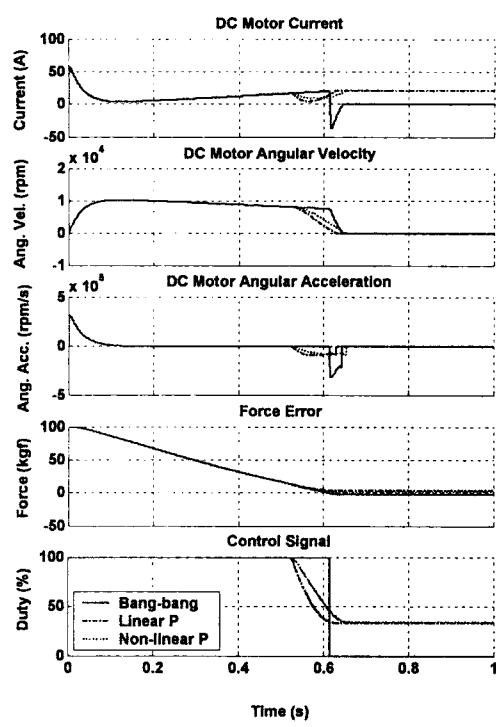
본 논문은 부품·소재 기술 개발 사업(과제번호: 0401-DB2-012) 지원으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

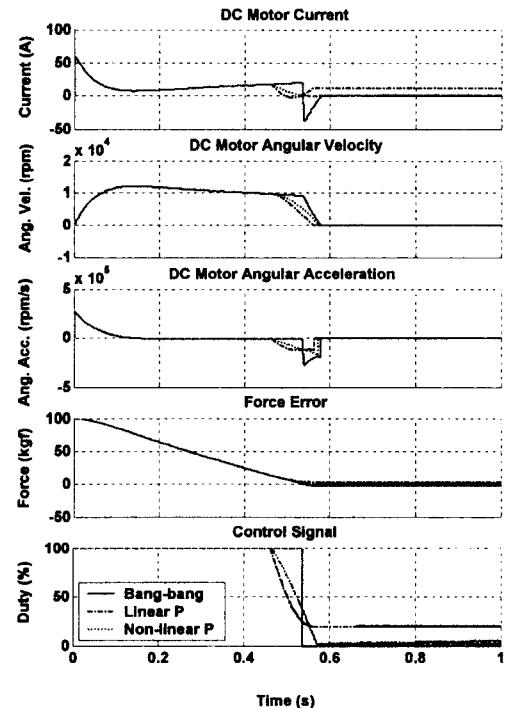
- [1] A. Consoli, G. Bottiglieri, R. Letor, R. Ruggeri, A. Testa, and S. De Caro, "Sensorless position control of DC actuators for automotive applications," Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE, pp.1217-1224, 2004.
 - [2] Tan, Wang and Hang, "Advances in PID Control", Springer, 1999
 - [3] Zhiqiang Gao, Yi Huang, Jingjing Han, "An Alternative Paradigm For Control System Design", the 40th IEEE Conference on Decision and Control, December 2001
 - [4] R. C. Juvinall, K. M. Marshek, "Fundamentals of Machine Component Design", 3rd. Edition John Wiley & Sons Inc., 2000
 - [5] M. P. Norton, "Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers", Cambridge University Press 1989



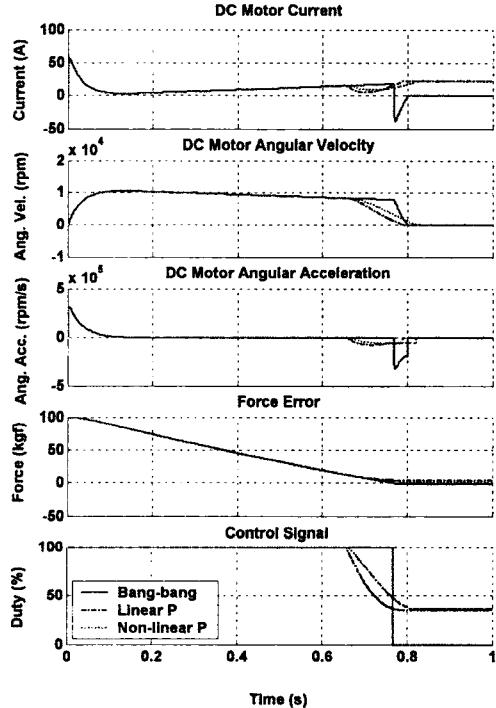
〈그림 8〉 모터 / 기어박스 흐울 감소 시 시뮬레이션 결과 비교



〈그림 10〉 스크류 마찰계수의 증가 시 시뮬레이션 결과 비교



〈그림 9〉 모터 전달 상수 감소 시 시뮬레이션 결과 비교



〈그림 11〉 와이어의 특성 변화 시 시뮬레이션 결과 비교