

하드 디스크 드라이브에서 나이퀴스트 주파수 안의 고조파 외란 보상

Compensation of Harmonic Disturbances within Nyquist Frequency in Hard Disk Drives

서 상 민*
(Sang Min Suh¹)
¹Samsung Electronics

Abstract: This paper describes new harmonic disturbance compensation based on a peak filter array for Hard Disk Drives. Unlike a conventional method, the proposed method does not require any sin/cos functions or tables and reduces effects of all harmonic disturbances within a nyquist frequency. Two factors are introduced to parameterize stability and a gain tune. In addition, it is verified that the order of the proposed filter is minimal. From 600 experimental results, 8.5% performance improvement is achieved.

Keywords: comb filter, hard disk drives, nyquist frequency, peak filter, repeatable runout

I. 서론

하드 디스크 드라이브에서 제거되어야 할 외란은 크게 두 가지로 나뉜다. 하나는, 디스크 표면의 공기에 의한 외란, 외부 충격등과 같은 비주기적 외란(NRRO: Non Repeatable Run Out)이 있고 다른 하나는 디스크의 회전으로 인한 주기적 외란(RRO: Repeatable Run Out)이다. 특히, 이 주기적 외란은 디스크의 초당 회전수를 기반으로 하는 고조파들의 조합이다.

비주기적 외란을 제거하기 위한 방법으로는 외란관측기(DOB: Disturbance Observer)를 이용한 방법[13,14], 대수적인 방법의 루프형성법[6], 그리고 최적 루프형성법[15-17] 등이 있으며, 주기적인 외란을 제거하기 위한 방법으로는 반복제어(ILC: Iterative Learning Control)를 기반으로 하는 방법[4,7,10]이 가장 널리 사용되고 있다. 주기적 외란 제거를 위한 또 다른 방법으로는 적응제어기법을 사용하여 싱글스테이지 액츄에이터(single stage actuator)[9]와 듀얼스테이지 액츄에이터(dual stage actuator)[11]에 적용하여 그 성능을 개선하였다. 또한 멀티레이트(multirate)를 이용한 외란 보상기도 소개되었는데[12], 이는 특히 고주파성분의 주기적 외란을 효과적으로 줄일 수 있었다. 주파수 응답측면에서 볼 때, 비주기적 외란은 넓게 분포되어있고, 주기적 외란은 좁게 분포되어 있음을 고려하여, 가장 최근에는 공진(resonance) 필터형태의 주기적 외란 보상이 제안되었다[8]. 특히 이 논문에선, 서보 대역폭(servo bandwidth)보다 높은 주파수 성분의 외란을 제거하기 위해선, 설계된 필터의 위상을 고려하여야 한다고 제안하였으며, 이를 위하여 민감도함수(sensitivity function)의 벡터 궤적도(vector locus)를 이용하였다.

이 논문은 하드 디스크 드라이브에서 주기적 외란을 제거할 수 있는 새로운 방법을 제시한다. 기존의 방법[4]은 하나

의 주기적인 외란을 제거하기 위하여 sin과 cos값을 이용하여 반복제어를 수행하여야만 하기 때문에 n개의 주기적 외란을 제거하기 위해서는 n개의 반복 제어문을 동시에 수행하여야 했다. 이에 반하여, 이 논문은 그 sin/cos값 없이 하나의 필터를 이용하여, 나이퀴스트 주파수(Nyquist frequency)안의 고주파 주기적 외란의 영향까지도 감쇄시킬 수 있는 방법을 제시한다. 제안하는 방법은 양산중인 하드디스크 드라이브에 적용하여 600회의 실험을 수행하였고, 약 8.5%의 성능향상을 확인하였다.

II. 전 차수 외란 보상기 설계

이 장에서는 제안하는 외란 보상기의 기초가 되는 콤필터(comb filter)에 대하여 설명하고, 이것을 하드디스크의 모든 주기적인 외란에 대응하는 필터가 되기 위한 조건을 제시하며, 그러한 조건을 갖는 필터의 차수를 설계한다. 그 후, 수정된 필터를 이용하여 전 고조파 외란 보상기 설계 방법을 제시한다.

1. 콤(comb) 피크 필터

원래의 콤 필터는 영상 신호와 회도 신호간의 간섭을 제거하기 위하여 설계되었으며[1], 이산시간 공간(discrete time domain)에서의 전달함수는 다음과 같다.

$$F(z) = z^N / (z^N - 1) \quad (1)$$

여기서 z 는 이산시간 복소 변수이고, N 은 필터의 차수를 나타낸다. 그리고 콤필터의 주파수 응답 특성은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} |F(z)| &= \left| z^{-(N/2)} \cdot (z^{(N/2)} - z^{-(N/2)}) \right|^{-1} \\ &= \left| e^{-j\omega T_s N/2} \cdot 2j \cdot \sin(\omega T_s N/2) \right|^{-1} \\ &= \left| 2 \cdot \sin(\omega T_s N/2) \right|^{-1} \end{aligned} \quad (2)$$

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수: 2009. 12. 15., 수정: 2010. 6. 15., 채택확정: 2010. 7. 19.
서상민: 삼성전자 반도체사업부 개발팀(sangmin.suh@samsung.com)

여기서 ω 는 주파수를 나타내고, T_s 는 샘플링 주파수를 나타낸다. 식 (2)를 보면, 분모항이 '0'에 가까워지면 $|F(z)|$ 의 크기는 크게 증가할 것이다. 또한 분모는 \sin 함수로 이루어져 있기 때문에 $|F(z)|$ 의 크기는 주기적으로 변한다는 것을 알 수 있다. 이러한 특징들은 주기적 외란 보상에 이용되며 다음 절에서 자세히 설명된다.

2. 하드 디스크 서보를 위한 피크 필터 설계

Chen[2] 등은 콤펙터가 주기적 외란 보상의 주파수 특성을 갖는다는 것을 처음으로 제시하였다. 그러나 실제 하드 디스크에 적용하기 위한 최소 조건들조차 제시하지 않았고, 안정성 문제에 관해서도 논하거나 검증하지 않았다. 이는 식 (2)가 가지고 있는 문제점 때문인데, 식 (2)의 분모가 실제로 '0'에 너무 가까우면, 실제 시스템은 불안정하게 되기 때문이다.

이 논문에서는 콤펙터가 하드디스크의 주기적 외란 보상에 사용될 수 있는 조건을 제시하며, 그 조건으로부터 콤펙터의 차수를 결정한다. 또한 페루프 시스템의 안정성 문제를 고려한 게인 조절 파라미터를 도입한다.

식 (2)에서 $|F(z)|$ 가 발진하기 위해선 아래와 같은 조건을 만족시켜야 한다.

$$\frac{\omega T_s N}{2} = \pi k \tag{3}$$

여기서 수학적으로 k 는 정수이다. 그러나 ω, T_s, N 모두가 '0'이 아닌 양수이므로, 물리적으로 k 는 양의 정수인 자연수 이어야만 한다. 또한 식 (3)은 $F(z)$ 가 등간격의 주파수마다 발진한다는 것을 보여주고 있다. 즉, $k=1$ 일 때 $F(z)$ 는 첫 번째 발진을 시작하며, 이 주파수를 하드디스크의 첫 번째 주기적 외란 주파수 ($f_{1X_{res}}$) 와 일치시켰을 때, $F(z)$ 는 그 외란의 고조파(harmonics)까지도 보상 할 수 있는 조건을 갖추게 된다. 이러한 조건은 식 (2)에서 ω 을 $f_{1X_{res}}$ 으로 대체함으로써 얻을 수 있고, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \omega T_s N / 2 = \pi \cdot 1 &\Leftrightarrow 2\pi f_{1X_{res}} T_s N / 2 = \pi \\ \Leftrightarrow N = 1 / (f_{1X_{res}} T_s) = f_s / f_{1X_{res}} &\tag{4} \\ = \frac{\text{sector number} \cdot \text{rpm} / 60}{\text{rpm} / 60} = \text{sector number} \end{aligned}$$

여기서 'sector number'는 하드 디스크 드라이브의 위치 정보가 기록된 섹터 수를 나타내며, 'rpm'은 분당 회전수를 의미한다. 즉, 하드 디스크 드라이브에서 주기적 외란 보상이므로 $F(z)$ 의 차수는 오로지 하드 디스크 드라이브 자체의 'sector number'에 의하여 결정된다.

3. 전 고조파 외란 보상이 설계

하드디스크 드라이브의 주기적 외란 보상이므로 동작하기 위한 조건으로써, 앞 절에서 구한 차수와 더불어 다음의 두 가지가 고려되어야 한다. 첫 번째로 모델 불확실성에 관한 안정성 문제이다. 식 (2)에서 볼 수 있듯이, 극점들은 이산시간 공간에서 모두 단위 원(unit circle) 위에 있다. 이는 실질적으로 불안한 시스템을 형성하는 문제점이 있다. 두 번째로는

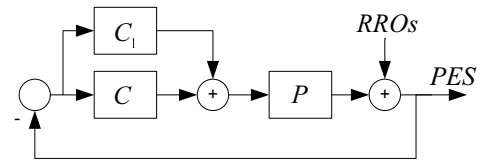


그림 1. 병렬 제어 구조. Fig. 1. Parallel control structure.

앞에서 설계한 피크 필터의 게인을 조절할 수 있어야만 보다 유용한 보상이 된다. 여기서 이러한 두 가지 요구조건을 변수화한 변형된 피크 필터를 제안한다.

$$F(z) = \frac{\beta \cdot z^N}{z^N - \alpha} \tag{5}$$

여기서 α 와 β 는 각각 안정성(stability) 강화와 필터의 게인을 조절하는 변수이고, 그 영역은 $0 < \alpha, \beta < 1$ 이다. α 가 커질수록 안정성문제는 취약해지지만 필터의 피크 게인이 커지면서 주기적 외란 제거 능력은 강해진다. β 는 피크필터의 높이를 조절함으로써 전체적으로 얼마만큼의 외란을 제거할 것인가를 결정한다. 이 두 가지의 변수는 실험적으로 정해지는 값으로, 플랜트의 불확실성의 크기와 밀접한 관련이 있다. 즉, 불확실성이 클수록 α 값은 작아야 한다.

이 논문에서는 주기적 외란 보상을 구성하기 위하여 아래와 같은 병렬 제어 구조를 채용한다.

이 구조의 가장 큰 장점은 전체 페루프 시스템을 두 개의 독립적인 함수로 표현할 수 있다는 것이다[5,6]. 이는 기존 시스템의 특성방정식을 바꾸지 않으면서 부가적인 기능을 추가 할 수 있음을 의미한다. 그림 1에서 P 는 플랜트, C 는 비주기적 외란의 영향을 줄이면서 전체 페루프 시스템을 충분히 안정화시키는 제어기를 나타내며, C_1 은 주기적 외란의 영향을 감쇄시키는 제어기이다. 또한 $RROs$ 는 주기적 외란(repeatable runouts)을 의미하고, 그것에 의한 출력은 PES (position error signal)로 표현된다. 그러면 출력은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} PES &= \frac{1}{1+PC} \cdot \frac{1}{1+(1+PC)^{-1}PC_1} \cdot RROs \\ &= S \cdot S_1 \cdot RROs = S_a \cdot RROs \end{aligned} \tag{6}$$

여기서 S 는 P 와 C 에 의하여만 구성된 민감도 함수이고, S_1 은 추가된 주기적 외란 제거 제어기 C_1 와 플랜트 P , 그리고 이미 설계된 안정화 제어기 C 로 구성된 새로운 함수이다. 그림 1의 주기적 외란들의 영향을 줄이기 위해선, S_1 이 콤펙 피크 필터의 역상을 이루어야 하며, 그렇게 되기 위해선 다음의 식이 만족되어야 한다.

$$\begin{aligned} S_1 &= F^{-1} \\ \Leftrightarrow 1 + (1+PC)^{-1}PC_1 &= F \end{aligned} \tag{7}$$

그러므로 주기적 외란 제어기 C_1 은 다음과 같이 구해진다.

$$C_1 = (F - 1) \cdot ZPET \{ P / (1 + PC) \} \tag{8}$$

여기서 'ZPET'는 제로위상오차제어(zero phase error tracking control)[3]을 의미하며, $P/(1+PC)$ 의 역(inverse)를 효과적으로 구하는데 널리 사용된다.

4. 제어기 차수와 연산 부하에 관한 고찰

하드 디스크 드라이브에서 'sector number'는 일반적으로 큰 정수이다. 이는 식 (8)에서 F 의 차수를 높게 하며 최종적인 제어기 C_1 의 차수를 높인다. 일반적으로, 디지털제어에서 고차제어기는 위상지연을 야기시키며, 최악의 경우 시스템을 불안정하게도 만들기 때문에 고차제어기는 실제로 구현에 있어서 문제가 된다. 그러나 이 논문에서 제안하는 고차제어기는 그 특수한 형태 때문에 연산시간에 큰 부담을 주지 않는다. 문제가 되는 $F-1$ 연산 부분을 따로 계산하면 다음과 같다.

$$F-1 = \frac{(\beta-1) \cdot z^N + \alpha}{z^N - \alpha} \tag{9}$$

위의 식을 보면, 필터의 차수가 비록 N 차라고 하여도, 거의 대부분의 계수들이 '0'이고 단 4개의 계수만 존재한다. 이러한 구조는 디지털 제어기인 마이크로 프로세서가 단 4번의 연산만을 한다는 것을 의미하며 이는 연산에 대한 부담을 거의 주지 않는다.

다음으로 필터의 차수 N 이 나이퀴스트 주파수(nyquist frequency)안의 모든 주기적 외란을 제거하기 위한 최소 차수라는 것을 보인다. 우선 나이퀴스트 주파수안의 주기적 외란의 갯수는 $Nyquist\ freq/f_{1X\ res}$ 이다. 한편 하나의 주기적 외란을 제거하기 위한 대역 저지 필터의 최소 차수는 2차이다. 따라서 나이퀴스트 주파수안의 모든 주기적 외란을 제거하기 위한 대역 저지 필터 형태의 최소 차수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} order &= Nyquist\ freq/f_{1X\ res} \cdot 2 \\ &= (1/2T_s) \cdot (60/rpm) \cdot 2 = f_s/f_{1X\ res} \\ &= sector\ number = N \end{aligned} \tag{10}$$

그러므로 N 차 필터 F 는 나이퀴스트 주파수안의 고조파 외란들을 제거하기 위한 최적화된 차수를 갖는 필터이다.

III. 실험

고차제어기에 대한 우려를 줄이기 위하여, 제안하는 방법을 실제 플랜트에 적용하여 실험으로 검증하였다. 제어 대상은, 분당 회전수(rpm)은 3642, 섹터 수(sector number)는 176인 하드 디스크 드라이브이고, 그 주파수특성은 참고문헌[5]에 나타나 있다. 그리고 플랜트의 첫 번째 주기적 외란은 $f_{1X\ res} = 60.7\text{Hz}$ 에 존재한다.

식 (5)의 필터 F 를 설계하기 위하여, 이 실험에서는 $\alpha = 0.95$, $\beta = 0.98$ 를 사용하였고, 식 (4)에 의하여 필터 $F(z)$ 의 차수는 176차가 된다. 그림 2는 설계된 필터의 주파수 특성인데, 필터의 발진 주파수는 정확히 $f_{1X\ res}$ 의 정수배만큼씩 반복되고 있음을 알 수 있다. 그림 3은 페루프 시스템의 주파수 응답을 보여주고 있는데, 이 그림을 식 (6)과 함께 고려해 본다면, S_1 이 S 를 변경하여 전체 페루프 시스템인 S_0 를 설계하였다는 것을 알 수가 있다[5,6].

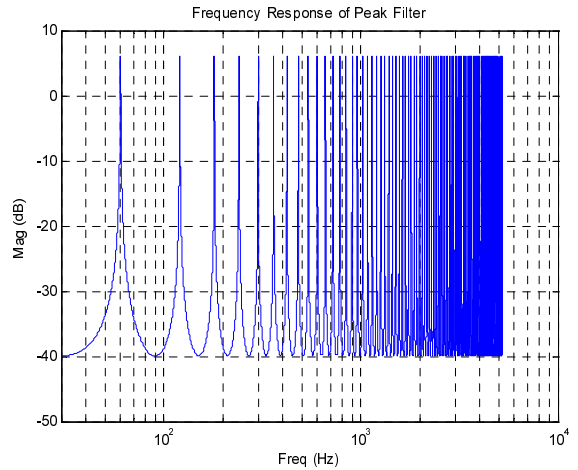


그림 2. $F(z)$ 의 주파수 응답. Fig. 2. Frequency response of $F(z)$.

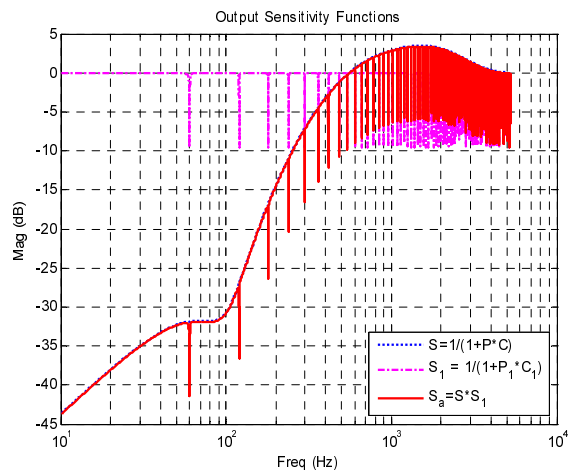


그림 3. 페루프 시스템의 주파수 응답. Fig. 3. Frequency response of closed loop systems.

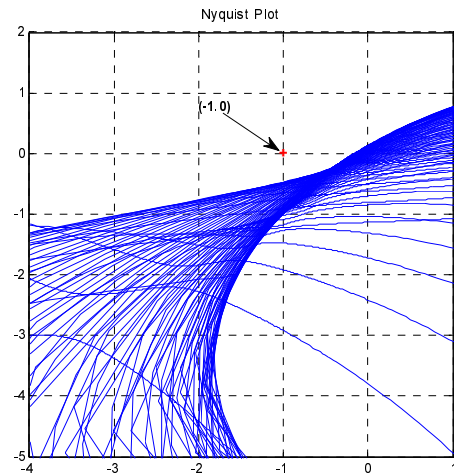


그림 4. 나이퀴스트 선도. Fig. 4. Nyquist plot.

특히 S_1 은 마치 대역 저지 필터(notch filter)들의 직렬조합과도 같은 특성을 보이고 있으며, 이것은 주기적 외란에 대한 영향을 줄이는 역할을 한다.

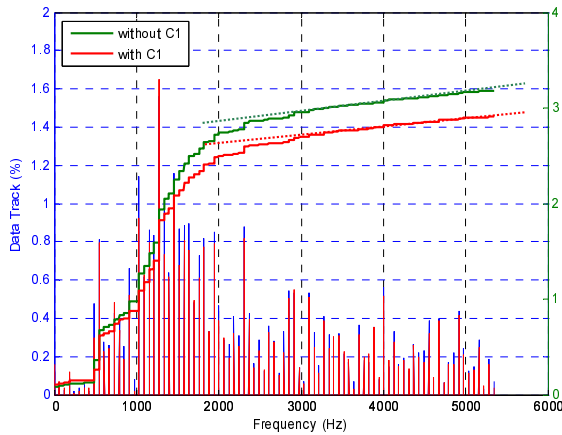


그림 5. 주기적 외란의 PES.
Fig. 5. PES of repeatable runout.

그림 4에서 계루프 전달함수가 $(-1, 0)$ 을 포함하지 않기 때문에 페루프 시스템이 안정함을 알 수 있다. 그림 5는 주기적인 외란에 의한 PES (Position Error Signal) 성분을 측정하여 그 FFT (Fast Fourier Transform)와 그 누적값을 그린 것이다. 이를 위하여 600회의 실험 데이터를 누적하였다. 기본 주파수 ($f_{LX res}$) 외란부터 7차 고조파 외란까지의 응답은 서로 유사한데, 이것은 기존 방법의 주파수 외란 보상기[4]가 1차부터 7차까지 동작하고 있기 때문이다. 8차 고조파 이상의 주파수 영역부터는 C_1 을 사용하였을 때 누적값을 그린 그래프의 기울기가 점점 완만해짐을 알 수 있다. 이는 C_1 의 효과가 나타남을 의미하며, 실제 측정된 누적값은 3.178에서 2.907로 감소하여, 약 8.5%의 성능개선을 검증하였다.

IV. 결론

Sin/cos 연산이 필요 없는 새로운 필터 형태의 주기적 외란 보상기를 제안하였다. 보상기를 위한 필터의 차수는 하드디스크 드라이브의 'sector number'로만 결정되며, 그 차수는 나이퀴스트 주파수 안의 모든 주기적 외란을 보상하는 최소 차수임을 증명하였다. 또한 디지털 제어를 이루는 마이크로 프로세스의 연산부하에 관하여 논하였다. 제안하는 방법은 실제 양산중인 하드 디스크 드라이브에 적용하여 그 유용성을 확인하였다.

참고문헌

[1] G Melchior, "Receiver for PAL color television system," *US Patent US3553353*, 1971.
 [2] YQ. Chen, K. L. Moore, J. Yu, and T. Zhang, "Iterative learning control and repetitive control in hard disk drive industry - a tutorial," *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, vol. 22, no. 4, pp. 325-342, 2008.
 [3] M. Tomizuka, "Zero phase error tracking algorithm for digital control," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 109, pp. 65-68, 1987.
 [4] B. Messner and M. Bodson, "Design of adaptive feedforward controllers using internal model equivalence," *Proc. of the American Control Conference*, Baltimore, MD, pp. 1619-1623, 1994.

[5] S. M. Suh, "Robust control via peak control of sensitivity function," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems* vol. 15, no. 11, pp. 1071-1075, November 2009.
 [6] S. M. Suh, "Discrete-time controller design to attenuate effects of external disturbances," *Microsystem Technologies*, vol. 15, no. 10, pp. 1645-1651, October 2009.
 [7] A. H. Sacks, M. Bodson, and W. Messner, "Advanced methods for repeatable runout compensation," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 31, no. 2, pp. 1031-1036, March 1995.
 [8] T. Atsumi, A. Okuyama, and M. Kobayashi, "Track-following control using resonant filter in hard disk drives," *IEEE Transactions on Mechatronics*, vol. 12, no. 4, pp. 472-479, August 2007.
 [9] J. Levin and P. Ioanoo, "Adaptive mode-suppression and disturbance-rejection scheme with application to disk drives," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 17, no. 3, pp. 620-632, May 2009.
 [10] H. Melkote, Z. Wang, and R. J. McNab, "An iterative learning controller for reduction of repetitive runout in disk drives," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 14, no. 3, pp. 467-473, May 2006.
 [11] J. Zhang, R. Chen, G. Guo, and T.-S. Low, "Modified adaptive feedforward runout compensation for dual-stage servo system," *IEEE Transactions on Mechatronics*, vol. 36, no. 5, pp. 3581-3584, September 2000.
 [12] C. Duan, G. Guo, and T. C. Chong, "Robust periodic disturbance compensation via multirate control," *Asia-Pacific Magnetic Recording Conference*, 2004.
 [13] K. Ohnishi, "A new servo method in mechatronics," *Trans. of Japanese Society of Electrical Engineers*, 107-D, pp. 83-86, 1987.
 [14] T. Semba, "A disturbance observer to suppress vibration effects of a HDD in a disk array system," *Proc. of the American Control Conference*, pp. 1362-1367, 2003.
 [15] S. Boyd, L. E. Ghaoui, E. Feron, and V. Balakrishnan, *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*. Philadelphia, PA: SIAM, 1994.
 [16] C. de Oliveira, J. C. Geromel, and J. Bernussou, "An LMI optimization approach to multiobjective controller design for discrete-time systems," *Proc. 38th Conf. Decision Contr.*, vol. 4, no. 7-10, pp. 3611-3616, 1999.
 [17] S. M. Suh, "Unified H_∞ control to suppress vertices of plant input and output sensitivity functions," *IEEE Control Systems Technology*, vol. 18, no. 4, 2010.



서 상 민

1991년 한양대학교 전자통신공학과(공학사). 1994년 한양대학교 전자통신공학과(공학석사). 2003년 한양대학교 전자통신전과공학과(공학박사). 2003년 한양대 우수 논문상 수상. 1994년~1999년 대우통신연구소 선임연구원. 2003년~현재

삼성전자 수석연구원. 현재 IEEE Control Systems Technology 논문 심사 위원. 관심분야는 제어이론, 선형 행렬 부등식 기반의 최적 제어, 정밀 모터 제어를 위한 임베디드 시스템 설계.