



# 가전기기용 BLDC Motor의 저소음화 기술 (Cogging Torque를 중심으로)

신 현 정\*, 안 준 호\*, 홍 석 중\*\*

(\* LG전자(주)생활시스템연구소 주임연구원, \*\* 동 연구소 책임연구원)

## 1. 서 론

최근에 생활문화의 향상과 함께 가전기기가 급속도로 보급되고 있으며 직장을 가진 주부의 증가, 독신자의 증가와 더불어 가전기기(세탁기, 냉장고)들을 밤 또는 이른 아침에 사용하는 빈도가 점차 증가하고 있다. 또한 생활의 질적향상과 더불어 쾌적한 환경이 강하게 요구되어져 가전제품의 정음화에 대한 관심이 고조되고 있으며 성능, 디자인과 함께 상품의 가치를 평가하는 하나의 중요한 척도가 되고 있다. 특히 가전기기의 주류를 차지하는 세탁기, 냉장고, 청소기, 에어컨 등은 저소음화의 경향이 뚜렷하게 나타나고 있으며 이에 대한 대책으로 진동, 소음원이 되고있는 Actuator (Motor)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

현재, 가전기기의 Actuator로 널리 사용되고 있는 유도전동기 및 정류자전동기는 가변속 및 저진동 저소음화에 한계가 있어 이에 대한 방안으로 일반적으로 구조가 간단하고 제반 특성이 우수한 BLDC Motor에 대한 가전기기의 적용이 점차 확대되어 지고 있다.

그러나 BLDC Motor의 단순한 적용은 전술한 특징점을 살리지 못하는 결과를 초래하게 된다. 즉 BLDC Motor는 가변속, 고효율화에는 유리하나 필연적으로 발생하는 Cogging Torque Ripple 및 운전조건의 변화에 따른 회전수 증대는 정음화에 오히려 불리하게 작용하므로 이에 대한 대책이 요구되고 있다.

## 2. 본 론

BLDC Motor의 소음원은 공기원인소음(Air Borne Noise)과 구조원인소음(Structure Borne Noise) 또는 전자기적소음(Magnetic Noise) 및 기계적소음(Mechanical Noise)등으로 대별할 수 있다. 일반적으로 Motor의 소음을 개선하는 방법은 구조공진, 주로 Stator Core, 축계의 공진 회피설계

등을 위한 Mode해석이 행해 지고 있고 따라서 이를 개선하기 위해서는 구조변경이 필연적으로 발생되며 어느 경우에는 적용이 불가능하여 소음저감효과도 크게 나타나지 않는 경우가 많다. 그러나 소음원(Noise Resource)을 저감하는 것은 효과도 매우 크며 특별히 구조변경이 필요하지 않는 경우가 많다. 따라서 본고에서는 BLDC Motor의 소음원 및 자기진동원의 하나인 Cogging Torque 저감을 통한 소음저감에 관하여 언급하고자 한다.

### 2.1 BLDC Motor의 개요

BLDC(Brushless Direct Current)Motor는 종래의 DC Motor에서 Rotor의 권선에 순차적으로 전압을 흘려 주도록 하는 기계적인 정류자(Commutator)가 요구되어 지지 않는 Brush가 없는 DC Motor이다. 종래의 DC Motor는 상권선을 위에서 언급한 정류자에 의하여 기계적으로 Commutating 하는데 반하여 BLDC Motor는 위치센서를 이용하여 회전자의 위치를 감지하고 고정자 상권선의 적당한 위치에서 파워스위칭소자를 이용하여 Commutating시켜 준다.

BLDC Motor는 구조적으로 회전자에 영구자석이 부착되어 있으며 자극의 위치를 감지할 수 있는 Hall소자 또는 Photo센서 등으로 구성되며 위치검출회로부 및 Commutating 수단을 포함하여 Motor에 전원을 공급하는 구동부를 가지는 것을 특징으로 한다.

BLDC Motor는 Rotor의 회전방식에 따라 Outer Rotor형, Inner Rotor형 등이 있고 Air Gap의 형태에 따라 Radial Gap형, Axial Gap형 등으로 대별된다.

### 2.2 BLDC Motor 소음원의 분류

Motor에 진동·소음원을 야기시키는 기계적, 전자기적 소음원은 다음과 같다. 먼저 전자기적 요인에 기인된 소음, 진동원은 Stator 전류에 의하여 발생하는 자속과 Rotor여진에 의하여 발생하는 자속과의 상호작용시 발생하는 Mutual

Torque Ripple, Commutation Torque Ripple, Switching Torque Ripple등이 이에 해당된다. 또한 Stator Teeth 또는 Poles과 같은 자기이방성 구조와 상호작용하여 발생하는 Reluctant Torque Ripple이 있으며 이는 이후에 주로 언급하게 될 Cogging(Detent) Torque Ripple이 그 일이다. 기타 자기포화화 관련된 Torque Ripple 및 Air Gap 길이의 불평형으로 인하여 반경방향 성분의 가진력을 주는 Magnetic Radial(Attraction) Force에 의한 가진력 등이 있으며 기계적요인에 기인된 소음·진동원은 회전자의 Unbalance에 의한 기계적인 가진력(Static, Dynamic), 영구자석편의 Gap부의 통풍음, 고정자 Slot 통풍음, 베어링마찰음등이 있다.

### 2.3 소음에 영향을 주는 설계인자

2.2절에서 언급한 소음원들에 영향을 주는 인자들은 다음과 같다.

#### Motor설계와 관련된 인자

- Slotted or Toothless
- 극수,
- 상수
- Back emf 형상
- Flat 또는 Long Type

#### 전자기적요인과 관련된 인자

- Induction 또는 mmf Space Harmonics
- 자기포화 및 철손

#### 구동회로부와 관련된 인자

- Stator Current Waveform
- Motor에 공급하는 전압의 형태
- Switching 형태 및 주파수
- 상전압, 전류의 불평형
- 위치 검출신호의 검출오차(기하학적, 신호처리오차)

### 2.4 소음원의 저감절차

실험적 접근을 통한 BLDC Motor의 저소음화 절차는 다음과 같다. 먼저 저감하고자 하는 Motor의 소음파형을 주파수 분석을 통하여 전기적 주파수(기계적 회전수)에 대한 주소음주파수 및 소음값과의 관계를 파악한다, 또한 소음값에 비례하여 증감하는 전술한 소음원들의 변화 등을 종합적으로 고찰하여 근접한 소음의 원인을 추정한다. 이를 토대로 범위가 압축된 소음원에 대하여 영향분석실험을 하게 되는데 이 실험은 추정된 소음원들 가운데 Motor의 소음발생에 기여도가 큰 인자를 색출하기 위한 실험이며 구조 및 전기적특성에 영향을 주지 않는 범위 내에서 하게 된다.

도출된 인자는 집중적으로 그것의 크기와 주파수 및 다른 인자들과의 관계를 분석하고 그것들을 변화시켜 가면서 소음추이를 분석하는 규명실험을 실시하게 된다. 다루어

기법을 이때 적용하면 매우 효과적이다.

주소음원으로 인자가 확정되면 소음원저감을 위해 인자의 특성에 따라인자의 최적값을 설정하고 해석 및 설계를 하게 되며 최종적으로 검증실험을 통해 주소음원 및 소음저감효과를 검증하게 된다.

## 2.5 Cogging Torque Ripple 저감사례

### 2.5.1 Cogging Torque와 BLDC Motor의 소음

Motor의 종류, 구동방식에 따라 다르지만 경험적으로 볼 때 BLDC Motor 소음원으로 나타나는 것은 전술한 다양한 소음원들 중에 Cogging Torque에 의한 소음과 스위칭 전류에 의한 코일의 가진, Commutating에 의한 소음이 주요인이 된다.

구동회로부의 Power Switching에 의한 소음은 Power소자를 Transister(2 ~ 3KHz)보다는 MOS FET를 사용하여 Switching 주파수를 15(KHz)이상으로 올려 청감을 떨어뜨리는 방법을 이용하여 Switching소음을 저감한다. Commutating Torque Ripple은 2상도통 구동방식을 적용시 발생하며 전기적주파수의 6배의 주파수를 기본파로 하여 고정자를 가진시킨다. 이것은 Motor의 전기적 Parameter 및 Switching Topology와 깊은 관련이 있으며 후술될 Cogging Torque Ripple과도 밀접한 관계를 가지고 있어 이에 대한 적절한 선정이 요구된다.

Cogging Torque Ripple은 BLDC Motor에서 필연적으로 발생하는 것으로서 최근 Motor의 고효율화를 목적으로 고에너지적(BHmax)을 가진 영구자석을 채용하는 경우가 많은데 이때 에너지적에 비례하여 Cogging Torque의 크기가 커지기 때문에 그 중요성이 더욱 더 높아지고 있다. 또한 비교적 저주파이기 때문에 Motor가 취부되는 가전기기등의 진동·소음원으로 작용하고 있어 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

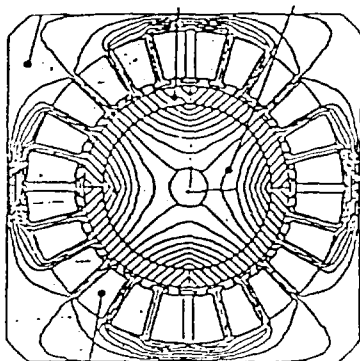
Cogging Torque는 Stator Teeth를 가진시켜 소음을 유발하게 하는 것으로서 알려져 있고 전원을 인가하지 않은 상태에서 회전하는 경우에도 발생하기 때문에 타소음과 분별을 가능하게 하는 진동, 소음원이며 비교적 소음저감에 기여도가 커서 기대이상 큰 효과를 볼 수 있다.

### 2.5.2 Cogging Torque의 발생원리

Cogging Torque는 영구자석이 부착된 Rotor에 의하여 공극중에 비교적 저차의 고조파 자속밀도와 Stator 철심 Slot의 상호작용(자기회로의 Permeance가 공극의 위치에 따라 일정하지 않음)에 의하여 발생하는 것이다.

따라서 고정자에 전류를 흘리지 않아도 외부에서 고정자를 회전시키는 경우 회전자(고정자) 발생하는 Torque를 말하며 평균 Torque는 영(Zero)이 되기 때문에 동력을 발생시키는 유효성분은 되지 못하고 Torque Ripple, Speed ripple 및 진동, 소음의 원인이 되며 일반적으로 Motor의 정격 Torque의 약 10(%) 정도의 크기를 갖는 것으로 알려져 있다. 그림1.1, 1.2는 유한요소해석에 의한 자속밀도분포

Stator core 영구자석 Rotor Core



Slot

그림 1.1. 자속밀도분포

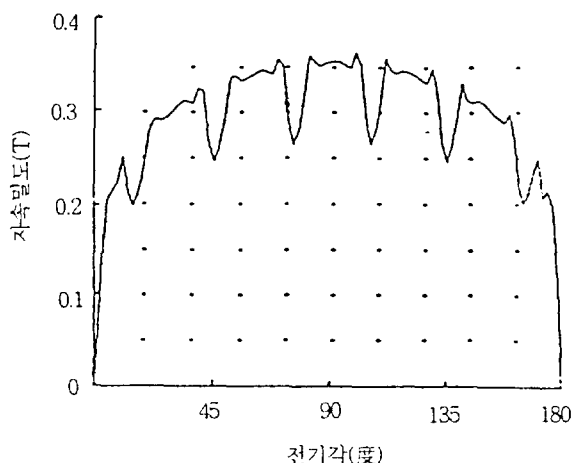


그림 1.2. 공극자속밀도 분포

와 공극 자속밀도 분포를 나타낸 그림이다.

### 2.5.3 Cogging Torque의 해석

Cogging Torque의 크기 및 주기는 소음의 원인이 된다. 따라서 이것에 대한 해석이 매우 중요하다. 일반적으로 Cogging Torque의 반복주기는 Permeance법으로 해석하여 그 결과를 이용하여 전자계 유한요소해석에 적용하여 Cogging Torque의 크기를 해석하고 저감설계를 실행한다.

#### 2.5.3.1 Permeance법에 의한 Cogging Torque해석

전동기 자기회로의 퍼미언스는 일반적으로 (1) 고정자 및 회전자의 슬롯수 및 형상, (2) 계철의 자기저항, (3) 자기포화, (4) 스큐(skew), (5) 단부효과 등에 따라 결정된다.

전동기의 공극 Permeance는

$$\lambda = \sum_{n=1}^{\infty} \lambda_n \cos n\nu_0 \quad (1)$$

여기서,  $n$ 은 정수,  $\nu = 2\pi/T_1$ ,  $T_1$ 는 치(teeth)의 주기이다 회전자의 영구자석 기자력은

$$F = \sum_{m=1}^{\infty} F_m \cos [ m \mu (\theta - \beta) ] \quad (2)$$

이다

여기서,  $m$ 은 정수,  $\mu = 2\pi/T_2$ ,  $T_2$ 는 자석의 주기이다. 공극 자속밀도는

$$B = F\lambda \quad (3)$$

이고 공극에 저장된 에너지는

$$W_m = \int \frac{B^2}{2\mu_0} dv \quad (4)$$

이다. 그러므로 Rotor에 발생하는 Cogging Torque는

$$\begin{aligned} T &= -\frac{\partial W}{\partial \beta} \\ &= -\frac{1}{\mu_0} \int F\lambda \frac{\partial F}{\partial \beta} \lambda dv \\ &= -\frac{1}{\mu_0} \int \sum_{m=1}^{\infty} F_m \cos [ m\mu(\theta - \beta) ] \\ &\quad \times \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_n \cos n\nu\theta \\ &\quad \times \sum_{m'=0}^{\infty} m' \mu F_{m'} \sin [ m' \mu (\theta - \beta) ] \\ &\quad \times \sum_{n'=0}^{\infty} \lambda_{n'} \cos n' \nu \theta \\ &= -\frac{1}{8\mu_0} \int \left[ \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m'=1}^{\infty} \sum_{n'=0}^{\infty} F_m \lambda_n \right. \\ &\quad \left. F_{m'} \mu \lambda_{n'} \sin [ [ (m' \mu \pm n' \nu) \pm (m\mu \pm n\nu) ] \theta \right. \\ &\quad \left. - (m' \mu \pm m\mu) \beta \right] dv \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)에서 Cogging Torque  $T$ 가 존재하는 경우는

$$\begin{aligned} (m' \mu \pm n' \nu) \pm (m\mu \pm n\nu) &= 0 \\ \mu(m' \pm m) &= \pm \nu(n' \pm n) \end{aligned} \quad (6)$$

이다.

식(6)이 성립하는 경우 식(5)는

$$T = \frac{1}{8\mu_0} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m'=1}^{\infty} \sum_{n'=0}^{\infty} F_m \lambda_n F_{m'} \mu \lambda_{n'} \sin [ \mu(m' \pm m)\beta ] \quad (7)$$

가 된다.

#### 2.5.3.2 전자계 유한요소법에 의한 Cogging Torque의 해석

Permeance법에 의하여 계산되어진 Cogging 주기를 이용하여 Stator에 대한 Rotor의 상대위치를 변화시키면서 각각의 위치에 대하여 Cogging Torque를 계산해 낸다. 그림 2

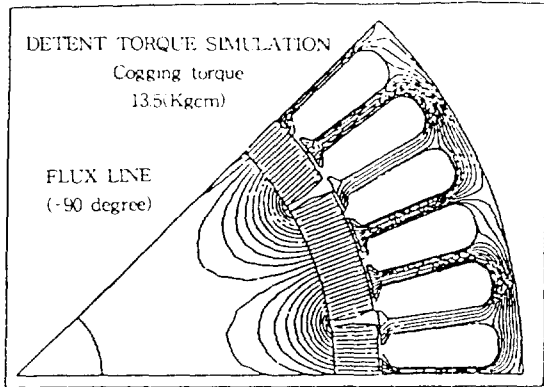


그림 2 자속밀도 분포

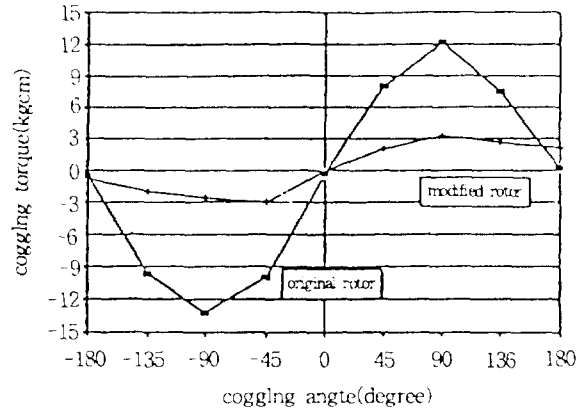


그림 3. Cogging Torque 해석결과

는 Surface Mounted형의 BLDC Motor의 자속밀도 분포를 해석한 결과이다. 다음절에 이 해석 Model의 Magnet의 형상을 변경하여 Cogging Torque를 저감한 것을 보여 줄 것이다.

### 2.5.4 Cogging Torque 저감방안

Cogging torque를 저감하기 위한 방안은 다음과 같다.

- Magnet Staggering
- Stator Skewing
- Magnet Arc Width 조정 또는 Edge의 부분 Cutting

Cogging Toque를 줄이는 방법은 위에 언급한 것 처럼 다양하나 Cogging Toque에 위상차를 갖게 하여 서로 상쇄시켜 그 크기를 줄인다는 개념에서 서로 같은 것이다. 예를 들면 Magnet Staggering하는 방법을 적용할때 Magnet를 두 조각으로 나누어 Cogging Torque주기의 180도 위상차가 생기도록 한다면 Cogging Torque는 완전히 상쇄될 것이며, 이 개념을 좀 더 확대하면 Stator Skewing이 되는 것이다.

그러나 위의 두가지 방법은 생산공정상 난점이 있고 개발의 어려움등 많은 문제점을 가지고 있으나 Magnet Edge를 깎거나 Arc폭을 조정하는 방법은 개발이 용이하고 생산공정상의 문제도 없어 많이 적용하고 있다.

### 2.5.5 Magnet Edge Cutting에 의한 Cogging Torque의 저감

그림 4는 전자계유한요소법을 이용하여 Cogging Torque를 저감하기 위한 시료를 해석한 결과이다. 그림에서 나타난 것 같이 해석시료는 Cogging Torque를 줄이기 위하여 Magnet Segment(1극)의 양측면을 소요의 형상으로 Cutting 하였다.

해석결과는 Rotor가 Stator의 임의의 위치에 있을 때의 자속밀도분포를 나타낸 것이다. 또한 그림 3에 Cogging Torque의 한 주기에서 대하여 Torque를 계산한 결과를 Cogging각도에 대하여 나타내었다.

그림 3에 나타난 것 같이 Magnet를 Cutting한 시료(Modified Motor)는 Cutting 하지 않은 시료(Original Rotor)

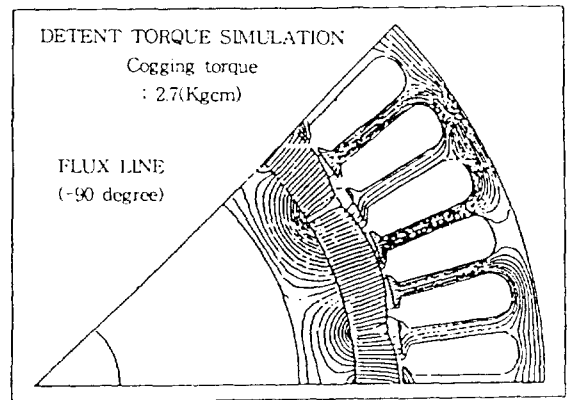


그림 4 개선된 Motor의 자속밀도분포

에 비하여 Cogging Torque를 25(%)로 줄었음을 알 수 있다.

### 2.6 Cogging Torque의 계측시스템

Cogging Torque를 측정하는 Dynamometer System은 시험 Motor를 구동하는 Stepping Motor와 Resolution이 우수한 Incremental Encoder와 Torque Transducer 및 신호분석 시스템으로 구성되어 있다. 측정은 시스템에 의한 관성이 계측에 미치는 영향을 극소화하고 미소 각변위에 대하여 측정하기 위하여 부하측 Motor를 초저속으로 구동시켜 이때 발생하는 Toque Transducer의 신호를 분석하여 그 크기와 기본파 및 Harmonics 주파수성분을 구해 낼 수 있다.

### 2.7 Cogging Toque의 크기와 소음파형

Cogging Toque Ripple은 Stator Core Teeth를 가진시켜 Motor의 진동·소음에 영향을 주게 된다. 아래의 그림 5, 6은 Cogging Torque의 크기에 따른(그림 3 참조) Motor의 소음주파수 분석결과이며 저감하기 전과 비교하여 Cogging

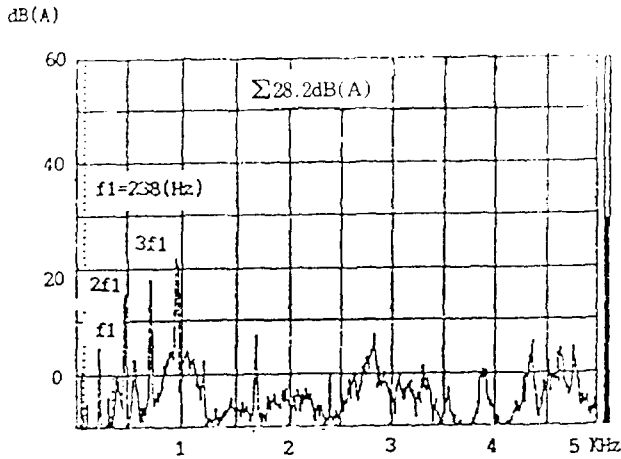


그림 5 Cogging Torque 저감전의 소음 주파수분석

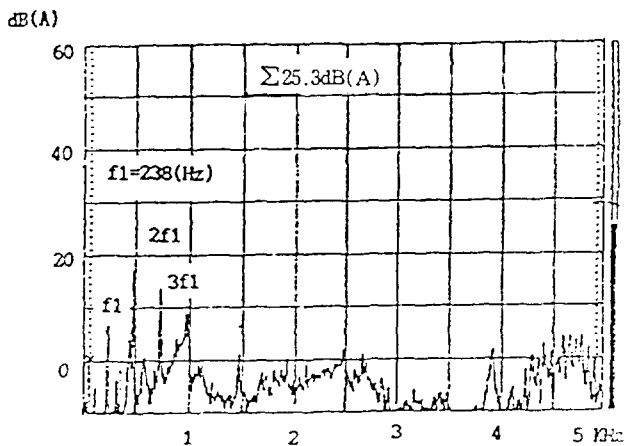


그림 6 Cogging Torque 저감후의 소음 주파수분석

Torque를 약 25(%)로 감소했을 때의 소음을 비교한 결과이다. 소음주파수 분석 결과로부터 Cogging Torque의 크기(Amplitude)가 상대적으로 큰 경우 Motor의 소음에 기여하는 바가 커서 소음저감 효과를 볼 수 있음을 알 수 있다.

### 3. 결 론

적용 제품의 가격이 상승되는 과제를 안고 있는 BLDC Motor는 일반적으로 저소음 및 고효율, 가변속제어의 용이성 등 우수한 성능을 가지고 있어 소비자의 요구에 적합하므로 앞으로 가전기기 분야의 적용이 점차 확대될 전망이다. 그러나 정음화를 목적으로 가전기기에 적용하는 BLDC Motor는 앞서 언급한 정음화를 위한 과제 및 Motor에 기인하는 System 소음에 관한 고찰이 선행되어야 그 본래의 목적에 맞는 우수한 특성을 구현할 수 있음을 간과하지 않아야 하며 앞으로 이 분야에 관한 연구가 활발히 진행되어

기술적, 경제적 경쟁력을 가진 BLDC Motor의 개발이 이루어 지길 기대한다.

### 참 고 문 헌

- [1] Touzhu Li & Gordon Slemon, "Reduction of Cogging Torque in Permanent magnet Motors, IEEE Magnetics Trans. VOL. 24, NO.6, November, 1988
- [2] T. Kenjo S. Nagamori, "Permanent Magnet and Brushless DC Motors", 1984.
- [3] Toru Hirose, "家電機器의 騒音의 現狀과 그의 對策", National Technical Report, Vol. 35, No. 5, PP 83 ~ 90, Oct. 1989.

### 저 자 소 개



#### 신현정(申鉉定)

1962년 7월 27일생. 1988년 2월 인하대 공대 기계공학과 졸업. 현재 LG 전자 구로 생활시스템(연) 주임연구원



#### 안준호(安竣浩)

1967년 12월 12일생. 1991년 2월 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 LG 전자 구로 생활시스템(연) 주임연구원.



#### 홍석중(洪碩鍾)

1952년 3월 11일생. 1978년 2월 부산대 공대 전기공학과 졸업. 현재 LG 전자 구로 생활시스템(연) 책임연구원.