

소특집 : 모터설계 기술

가전제품용 BLDC 전동기의 설계기술

안준호*, 조관열**

(LG전자 디지털 어플라이언스 연구소 *선연, **책연)

1. 서론

본 고에서는 가전제품중 에어컨의 압축기 구동용 영구자석 전동기의 설계 및 제어기술에 관하여 기술하고자 한다. 에어컨 압축기(compressor)에 적용된 전동기는 정속으로 운전되는 단상 유도전동기에서 가변속제어가 가능한 인버터 구동 3상 유도전동기 및 고효율의 영구자석형 전동기로 발전해 왔다. 에어컨의 부하에 적절한 냉력을 제어함으로써 소비전력을 저감하고 급속 냉난방으로 사용자에게 편의성을 제공하기 위해 압축기를 구동하는 전동기의 속도를 제어하여 운전범위를 확대할 필요성이 생겼다. 그리하여 먼저 인버터 구동 3상 유도전동기를 적용하였으나 저속에서 효율이 낮은 단점이 있어서 일본에서 1980년대 초에 영구자석을 이용한 BLDC (Brushless DC) 전동기를 적용하기 시작하였다. 이때의 BLDC 전동기는 영구자석이 회전자 표면에 부착된 영구자석 표면부착형 BLDC 전동기가 주로 적용되었다.

그림 1은 유도전동기와 BLDC 전동기의 구조를, 그림 2는 운전 주파수별 효율을 나타낸다. 그러나 영구자석 표면부착형 회전자는 영구자석의 이탈방지를 위한 장치(can)가 필요하고 여기서 발생하는 와류손(eddy current loss)에 의해 전동기 효율이 저하되고 제조공정이 복잡해진다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 최근에 영구자석을 회전자 내부에 삽입하는 영구자석 매입형 BLDC 전동기를 적용하게 되었다. 영구자석 매입형 BLDC 전동기는 영구자석 이탈방지 장치가 필요 없고 영구자석 토크(magnetic torque) 외에 릴럭턴스 토크(reluctance torque)를 이용할 수 있어 제조공정 및 전동기 효율측면에서 유리한 구조이다. 영구자석 매입형 BLDC 전동기에 주로 사용되고 있는 영구자석은 희토류계열의 NdFeB와 Ferrite 자석으로 영구자석의 매입형태에 따라 다양한 회전자 구조가 가능하다. 그림 3은 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 다양한 회전자 구조를 나타낸다.

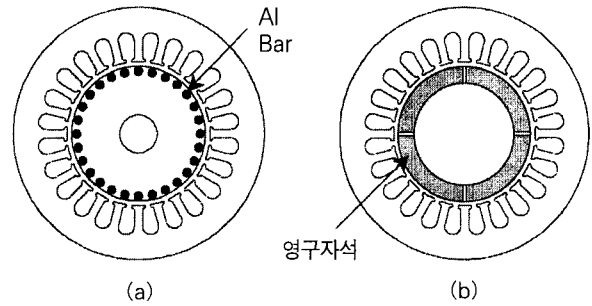


그림 1. 전동기 구조
(a) 유도전동기
(b) 영구자석 표면부착형 BLDC 전동기

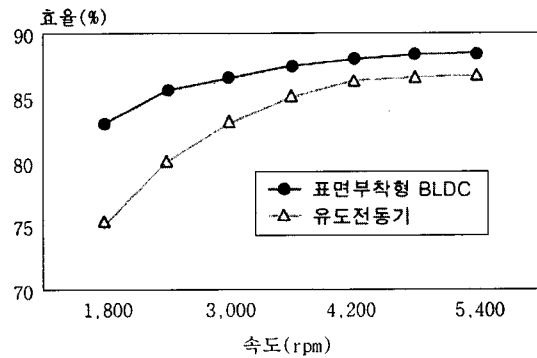


그림 2. 유도전동기 및 영구자석 표면부착형 BLDC 전동기 효율비교

최근에는 저속시 효율을 높이고 동손(copper loss)을 줄이기 위해 고정자 구조도 그림 4와 같이 분포권(distributed winding) 방식에서 코일 피치(pitch)가 작은 집중권(concentrated winding) 방식의 구조가 적용되고 있다. 집중권 방식은 분포권 방식에 비해 소음, 진동 측면에서는 불리하지만 동손을 저감하여 효율을 높일 수 있고 분포권 방식의 고정자 구조에 비해 제조공정이 단순하므로 제조원가를 절감

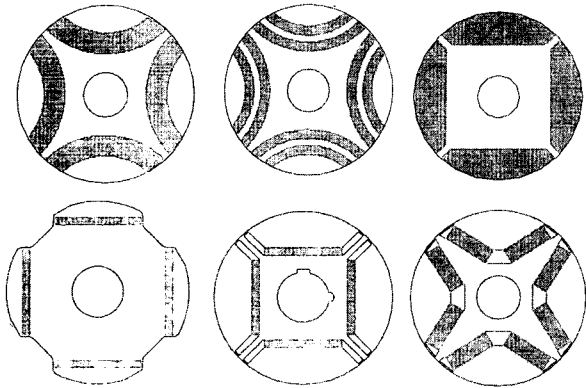


그림 3. 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 회전자 구조

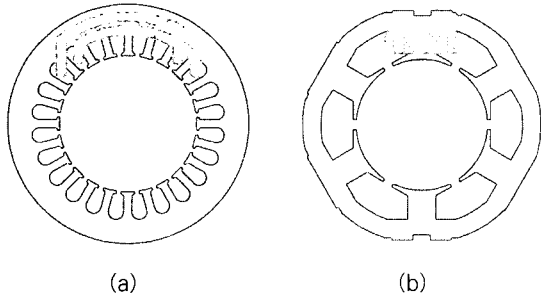


그림 4. 고정자 구조비교
(a) 분포권 방식, (b) 집중권 방식

할 수 있다. 따라서 본 고에서는 압축기용 집중권 방식의 영구자석 전동기의 설계 및 영구자석 착자방법에 대해 논하고자 한다.

2. 집중권 BLDC 전동기 설계

2.1 압축기의 부하토크 특성

가정용 에어컨에 적용되는 압축기는 1피스톤 로타리 (single piston rotary), 2피스톤 로타리, 스크롤(scroll) 방식의 압축기가 주로 사용되고 있고 각각의 압축기의 1회전 당 부하토크 특성은 그림 5와 같이 나타난다. 동일한 용량에 대하여 압축기 형태에 따라 압축방식의 차이로 인하여 토크 맥동(torque ripple)은 크게 차이가 발생하므로 전동기 설계 시에 반영할 부하토크는 1주기 평균토크를 기준으로 한다. 실제 운전시 전동기에서 발생해야 할 토크는 압축기의 흡입 압력, 토출압력 및 압축실 부피에 따라 다르게 나타나므로 모터 설계시에는 이런 조건들을 고려하여 부하토크를 산정하고 그로부터 적절한 전동기의 외경(outer diameter)를 설정한다.

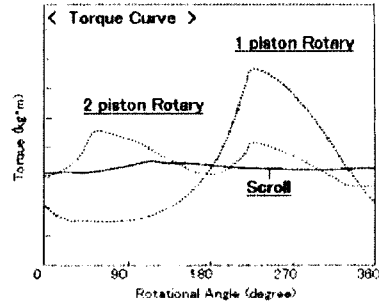


그림 5. 압축기의 부하토크 특성

2.2 압축기용 전동기의 설계 Flow

압축기용 모터의 경우 일반적인 모터 설계방법과 큰 차이는 없으나 그림 6과 같이 7단계로 나누어 생각할 수 있다.

1단계는 전동기 설계에 필요한 여러가지 조건들을 설정하는 단계로 부하조건, 고정자 및 회전자 형상 제약조건, 구동

<p>1단계 : 설계사양, 제한조건 설정</p> <ul style="list-style-type: none"> · 속도-토크 영역, DC link 전압 · 구동방식 : 구형파전류, 정현파전류 등 · 고정자 외경(압축기 frame size)
<p>2단계 : Steel 재질선정</p> <ul style="list-style-type: none"> · Core 재질 : Si-steel 종류 및 두께 · 영구자석 종류 : Ferrite, NdFeB
<p>3단계 : 회전자 구조</p> <ul style="list-style-type: none"> · 회전자 외경, 적층길이 · 영구자석 삽입부 구조 · 영구자석 형상 및 치수
<p>4단계 : 고정자 구조</p> <ul style="list-style-type: none"> · 고정자 내경, slot수 · Yoke부 치수, 고정자 외곽형상 · Teeth 두께, Slot부 형상 및 치수
<p>5단계 : 권선(winding)</p> <ul style="list-style-type: none"> · 도체 선경 및 턴수(No. turn)
<p>6단계 : 영구자석 감자 안전성 판별</p> <ul style="list-style-type: none"> · 감자 안전전류 계산
<p>7단계 : 특성 계산</p> <ul style="list-style-type: none"> · 전동기 상수(저항, 인덕턴스, 유기전압상수) · 전기적 특성계산 : 전류, 손실, 효율 · 토크리플 : 코깅(cogging) 토크

그림 6. 압축기용 BLDC 전동기 설계 flow

방식등을 결정한다. 특히 전동기의 구동방식에 따라 전동기의 특성에는 차이가 많고, 압축기 내부에는 회전자 위치검출용 센서를 사용하기 어려운 환경이므로 센서리스(sensorless) 제어방식을 적용하여야 한다. 센서리스 제어방식에 따라 유기전압에 대한 전류의 위상각, 즉 진상각(lead angle)의 크기에 제약조건이 있을 수 있으므로 전동기 특성 계산시 반영해야 한다. 2단계에서는 전동기에 적용할 silicon steel 및 영구자석의 재질을 선정한다. 사용할 재질에 따라 압축기의 주 운전영역에서의 효율 및 재료비의 변화가 크므로 전동기의 요구사양에 따라 사용할 재질을 선정한다. 일반적으로 silicon steel의 두께(lamination)는 0.5mm를 사용하고 있으나 고속운전시 철손을 줄이기 위해서는 0.35mm를 사용한다. 고효율 및 전동기 size를 줄이기 위해서는 에너지 밀도가 높은 희토류 계열의 NdFeB 영구자석을 사용한다. 3단계에서 6단계까지는 통상의 BLDC 전동기 설계과정과 유사하다. 압축기용 전동기에서 특히 고려할 사항은 압축기 셸(shell)과 전동기의 고정자 외곽 사이에 냉매 및 오일(oil)이 통과할 수 있는 유로 면적을 확보해야 하므로 고정자 구조 설계시 고려해야 한다. 또한 영구자석 감자 안전전류는 과부하 운전조건보다는 전동기의 초기 기동시 전류를 고려하여 영구자석의 안전성을 확보해야 한다. 7단계에서는 설계된 전동기의 제반특성을 계산하여 성능을 예측한다. 전기적 특성계산시 전동기의 구동방식, 회전자 구조, 센서리스 제어방식의 조합을 고려하여 전동기의 효율성능을 예측해야 한다. 효율성능이 만족되면 기본설계가 완성되고 소음 및 진동에 영향을 주는 코깅토크(cogging torque) 및 토크맥동을 최소화할 수 있도록 고정자의 teeth 형상, 영구자석 삽입부 구조등의 세부적인 형상설계를 진행하여 설계를 완료한다.

2.3 BLDC 전동기의 효율특성 비교

그림 7은 최근 압축기용으로 적용이 확대되고 있는 집중권 방식과 기존의 분포권 방식의 BLDC 전동기의 형상을 나타내고 표 1은 각각의 방식에 따른 전동기의 사양을 나타낸다. 그림 8은 일반적인 구형파(square wave) 전류구동의 120도 통전방식을 나타낸다.

그림 9는 120도 구형파 전류방식의 상전류 진상각(lead angle)이 전기각 25도인 경우 부하토크 20kgfcm에서의 운전 속도별 집중권 및 분포권 방식의 전동기 효율 및 손실을 나타낸다. 집중권 방식이 분포권 방식에 비해 저속에서 1.0 ~ 1.5% 정도 효율이 높고 고속시는 효율차가 0.5% 이내로 줄어든다. 이는 손실비교에 나타난 바와 같이 집중권과 분포권의 철손은 유사하나 집중권의 동손이 분포권에 비해 5 ~ 6W 정도 일정하게 작으므로 파워(power)가 작은 저속영역에서는 효율이 많이 발생하고 파워가 큰 고속영역에서는 상대적으로 효율차가 작게 나타난다.

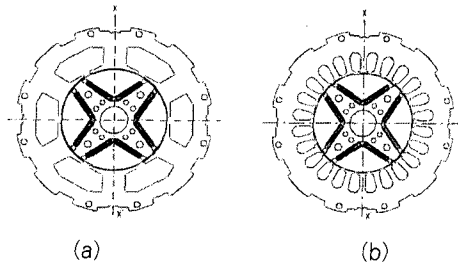


그림 7. 전동기 고정자 및 회전자 형상 (a) 집중권, (b) 분포권

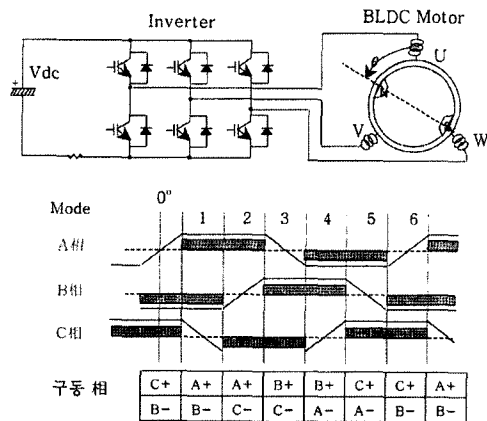


그림 8. BLDC 전동기 구동방식

표 1 전동기 사양 비교

항목	집중권	분포권
고정자 slot수	6	24
회전자 극수	4	
영구자석 재질	NdFeB	
Silicon steel 재질	0.35mm / S09	
1상당 turn수	120	124
1상당 저항(Ω)	0.29	0.45
유기전압(V) @ 3600rpm	108	109

2.4 BLDC 전동기의 코깅토크 저감

집중권 방식은 분포권 방식에 비해 효율특성 및 제조공정 측면에서는 유리하지만 소음 및 진동측면에서는 불리하다. 이는 분포권의 경우 고정자 teeth의 수가 많으므로 자속(flux)이 고정자 teeth에 고르게 분산되는 반면 집중권 방식에서는 고정자 teeth의 수가 적어 자속이 고정자 teeth에 집중됨으로써 고정자의 변형(deformation)이 크기 때문이다.

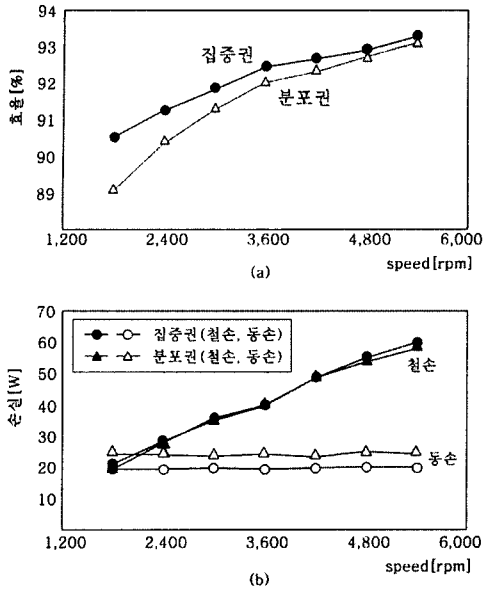


그림 9. 집중권 및 분포권방식의 효율 및 손실비교 (a) 효율, (b) 손실

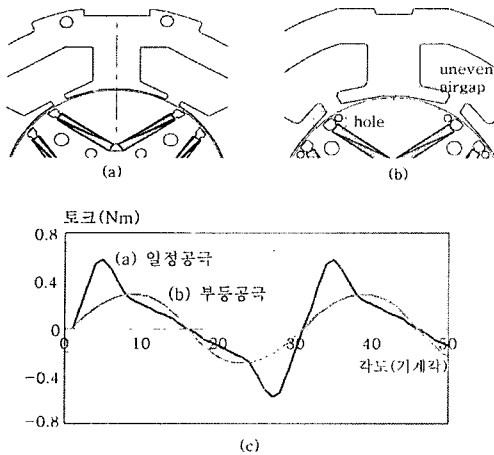


그림 10. 공극형상에 따른 코깅토크 비교 (a) 일정공극, (b) 부등공극, (c) 코깅토크

이러한 집중권 방식의 소음/진동을 줄이기 위해서는 코깅토크의 저감이 필요하다. 그림 10은 공극(air-gap)이 일정한 기준의 방식과 코깅토크를 줄이기 위한 부등 공극 방식의 고정자 구조 및 코깅토크를 나타낸다. 그림 10(b)의 부등공극 방식은 고정자 teeth 끝단부에서 공극을 증가시키고 회전자 자속벽(flux barrier)에 구멍(hole)을 형성함으로써 코깅토크를 저감할 수 있다. 그림 10(c)는 코깅토크의 파형을 나타낸다.

2.5 BLDC 전동기의 착자방법

압축기용 BLDC 전동기는 회전자내의 영구자석을 착자한 후 압축기내에 조립하는 것은 조립공정상 복잡하다. 따라서 통상의 방법처럼 착자요크(yoke)를 이용한 착자방법을 사용하기 어렵고 압축기내에 전동기를 조립한 후 전동기 권선을 이용한 권선착자 방법, 즉 고정자를 착자요크로 이용하는 방법을 사용한다. 권선착자 방법은 그림 11 및 그림 12에 나타난 바와 같이 전동기 3상의 권선을 기준이 되는 하나의 상(U상)을 하나의 단자로 하고, 나머지 두상(V, W상)을 하나로 묶어서 하나의 단자로 하여 두개의 단자로 결선한다. 회전자 위치는 자극의 중심이 기준이 되는 상(U상) 코일의 중심과 일치하도록 하고 회전자가 움직이지 않도록 고정시킨다. 그리고 나서 착자기 전원에 단자를 결선한 후 착자기의 충전전압과 콘덴서(condensor) 용량을 결정한 후 전원을 인가한다. 그림 11은 분포권 방식의 착자시 영구자석의 위치 및 전원 결선방법이다. 분포권 방식의 경우 착자전원 인가시 영구자석을 자화시키기 위한 착자 자계가 대칭으로 균일하게 분포되므로 1번의 착자로 영구자석의 자화 과정이 끝난다. 그러나 집중권 방식의 경우에는 영구자석을 자화시키기 위한 착자 자계가 대칭으로 분포되지 않으므로 기준이 되는 상(U상) 코일과 일치한 자극은 자화가 완전히 이루어지지만 그렇지 않은 다른 자극은 완전 자화가 이루어지지 않는다. 따라서 집중권 방식의 경우에는 그림12와 같이 2회 자화 과정을 거쳐야 한다. 먼저 그림 12(a)와 같이 고정자와 회전자 위치를 맞춘 후 리드선 단자를 착자용 전원에 접속하여 전원을 인가하면 1회 자화 과정이 끝나고, 그 상태에서 회전자의 위치를 전기각으로 180도 회전시켜 리드선 단자의 전원 극성이 바뀌도록 결선을 변경한 후 전원을 인가하여 2회 자화 과정을 거치면 집중권 방식의 BLDC 전동기의 자화 과정이 완료된다.

착자 또는 자화 과정이 완료된 후 자화상태의 확인은 회전자를 회전시켜서 고정자 권선에 유기되는 전압의 크기 및 파형을 측정하여 자화상태를 확인한다. 그리고 자화상태, 즉 착자율은 착자기 전원의 전압에 따라 착자율이 달라지므로 전압이 높으면 착자에는 유리하지만 코일의 절연파괴, 코일의

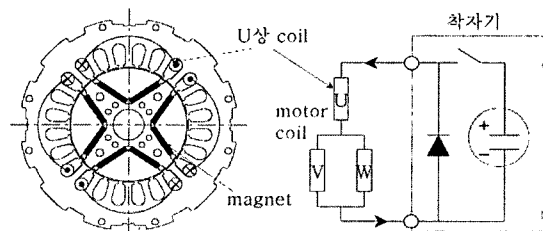


그림 11. 분포권 방식의 권선착자 개념도

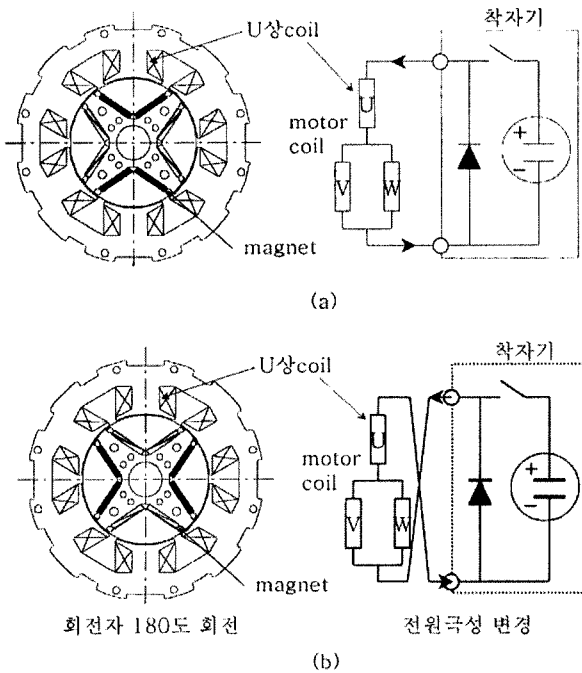


그림 12. 집중권 방식의 권선착자 개념도
 (a) 제1 착자시 영구자석 위치 및 결선
 (b) 제2 착자시 영구자석 위치 및 결선

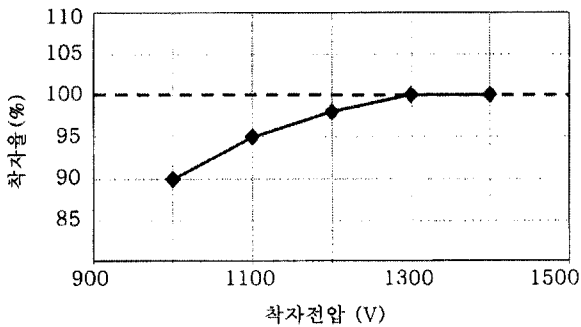


그림 13. 착자전압에 따른 착자율

변형 등의 문제가 있으므로 전압기준은 다음과 같이 결정한다. 착자 요크를 이용하여 회전자의 영구자석을 자화시켰을 경우 유기전압을 100%로 했을 때, 권선착자로 자화시켰을 경우 동일한 조건에서 유기전압을 비교하여 100%가 되는 최소전압을 착자전원의 전압으로 선정한다. 그림 13은 착자전압과 착자율의 관계를 나타낸다. 여기서 전원의 콘덴서 용량은 1500 μ F이다. 그림 13에 나타난 바와 같이 착자전압에 따라 권선착자시 착자율이 나타날 경우 착자전압은 1300V로 한다.

4. 결 론

본 고에서는 에어컨 압축기에 사용되고 있는 BLDC 전동기의 특성 및 설계기술에 대해 고찰하였다. 근래 고효율 및 제조원가 저감을 위하여 적용이 확대되고 있는 영구자석 매입형 회전자와 집중권 방식의 고정자 권선방식으로 구성된 BLDC 전동기의 특성, 설계과정 및 고려할 사항등에 대해 검토하였다. 또한 압축기에 적용하기 위한 권선착자시 분포권 방식과 집중권 방식의 착자공정에 대한 고찰하였다.

참 고 문 헌

- [1] 武田洋次, 松井信行, 森本茂雄, 本田幸夫, 埋磁石同期モータの設計と制御, Ohmsha, 2001.
- [2] Toshiba, "省Energy의 徹底," Nekkei Mechanical, No. 558, pp. 41~43, 2001.
- [3] H. Murakami, H. Ito, Y. Asano, K. Narazaki, and S. Hasegawa, "Highly efficient double layer IPM(interior permanent magnet) motor", Matsushita Technical Journal Vol. 44, No. 2, pp. 149~154, 1998.
- [4] M. Takada, "Noise reduction by drive control for brushless DC motors", Matsushita Technical Journal Vol. 44, No. 2, pp. 218~223, 1998.

<저 자 소 개>



안준호(安竣浩)

1967년 12월 12일 생. 1991년 서울대 전기공학과 졸업(학사). 1993년 동 대학원 졸업(석사). 1993년 ~ 현재 LG 전자(주) 디지털 어플라이언스 연구소 선임연구원.



조관열(趙官烈)

1963년 2월 20일 생. 1986년 서울대 전기공학과 졸업(학사). 1988년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 졸업(공학박). 1993년 ~ 현재 LG 전자(주) 디지털 어플라이언스 연구소 책임연구원. 당 학회 편집위원.