

4th Industrial Revolution and Magnetics (3)

Hi-Jung Kim*

Center for Spintronics, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 02792, Korea

(Received 10 October 2017, Received in final form 14 November 2017, Accepted 14 November 2017)

Major history on sciences and technologies of electricity and magnetics from the ancient to present was reviewed briefly. And the impact of magnetic technology on the 2nd and 3rd industrial revolutions has discussed by the application of electro-magnetic interaction. Finally the direction of the future development on magnetic technology was discussed as the 3 application domains of traditional strong sector, major new application and the unknown future sectors.

Keywords : 4th industrial revolution, magnetics, electricity, electro-magnetic interaction, application

4차 산업혁명과 자기학(3)

- 4차 산업혁명과 자기기술 -

김희중*

스핀융합센터, 한국과학기술연구원, 서울시 성북구 화랑로 14길 5, 02792

(2017년 10월 10일 받음, 2017년 11월 14일 최종수정본 받음, 2017년 11월 14일 게재확정)

본고에서는 고대부터 최근까지 등장한 전기 및 자기학과 자기기술의 주요 역사를 간단히 조망하였다. 이후 전기혁명인 2차 산업혁명과 정보혁명인 3차 산업혁명 시대에 전기-자기 상호작용을 활용하여 자기기술이 두 산업혁명에 공헌한 바를 역사적 흐름에 따라가면서 고찰하였다. 향후 자기기술이 어떤 방향으로 발전할 것인지를 예측하기 위해 전력분야와 같은 전통 주력분야 유지, 모터 등과 같은 대세분야 응용 확대 뿐만 아니라 아직 등장하지 않은 미지 유망분야의 창출 등 세 가지영역으로 나누고 각 영역이 4차 산업혁명에 기여할 바를 검토하였다.

주제어 : 4차 산업혁명, 자기학, 전기학, 전기-자기 상호작용, 응용

I. 서 론

2016년 초에 다보스포럼(WEF)은 인공지능과 다른 하드웨어와의 융합, 실제와 가상 세계를 융합함으로써 일어나는 4차 산업혁명이 현존하는 많은 직업들을 없애고 고용을 대폭 감소시키며 경제 사회 문화 등 다방면에 걸쳐 세상을 크게 변화시킬 것이라고 주장하였다[1].

필자는 2017년 한국자기학회지 3호와 4호를 통해 2016년 초부터 회자되고 있는 4차 산업혁명의 정의로부터 미래의 직업 변화 및 고용전망, 세계 각국의 대응정책 등을 2회에 걸쳐 본지에 소개하였다[2, 3].

자기학은 크게 남북 방향의 지향성, 전력의 생성과 변환,

전기-자기 변환현상을 활용한 정보기록, 힘과 전기로의 상호 변환 매개, 각종 자기현상을 활용한 다양한 센서 기능들을 탐구하면서 발전해 왔다. 전기가 주도한 2차 산업혁명, 자기기술이 주도한 3차 산업혁명에서는 자기학이 하드웨어로서 기술 및 산업 혁신에 매우 중요한 역할을 담당하였다.

본고에서는 먼저 자기학의 역사를 개괄적으로 살펴보고, 과거 3차에 걸쳐 일어났던 산업혁명들에서 자기기술이 어떤 역할을 하여 세상을 변화시켰는지를 분석, 정리하였다. 아울러 4차 산업혁명시대에 자기기술이 어떤 중요한 기여를 할 것인지를 생각하여 제안하고자 한다.

II. 과거 산업혁명과 자기기술

1. 전기와 자기의 역사

지금은 자기와 전기의 상호작용을 다루는 전자기학이란 학

문을 통해 전기와 자기의 밀접한 관계를 잘 알고 있지만 19세기 이전까지는 전기와 자기가 전혀 다른 현상으로 이해되고 있었다.

따라서 먼저 전기의 역사에 대해 간단히 살펴보기로 한다. 기원 전 700년 무렵 고대 그리스인들은 이미 전기현상에 대해 알고 있었다고 전해진다. 고대 그리스의 철학자 탈레스는 보석인 호박을 마찰하면 호박에 작은 물체들이 달라붙는 것을 관찰하였다고 한다. 전기를 뜻하는 영어, 'electricity'는 호박을 뜻하는 그리스어에서 나온 것이다. 이 정전기현상은 18세기 후반에 영국의 헨리 캐번디시(Henry Cavendish, 1731~1810)에 의해 체계적으로 밝혀졌다.

당대에 '모든 학자 중에서 가장 부유한 사람이고, 모든 부자 중 가장 학식있는 사람'이란 평을 받고 있고 '은둔의 과학자'로 알려진, 18세기 영국 최고의 과학자인 캐번디시는 생전에 수소의 발견, 지구의 비중 측정, 공기의 구성 측정(질소와 산소의 비), 열 및 용해현상의 연구 등으로 인해 화학자로서 많이 알려졌다. 하지만 캐번디시는 비틀림전자실험을 통해 뉴턴이 구하지 못한 만유인력상수(G)를 측정하였고, 정전기 실험 등 전기현상에 대한 연구도 많이 하였다. 그가 사망한지 약 60년 후에 맥스웰이 정리한 그의 미발표 실험노트에는 축전기 용량, 쿨롱의 법칙 및 오옴의 법칙의 선행 연구결과 등 전기에 관한 혁신적 연구결과들이 다수 기록되어 있었다고 한다.

미국의 벤자민 프랭클린은 1758년 번개가 전기라는 것을 발견하고, 피뢰침을 발명하였다. 그는 전기에는 서로 다른 두 종류의 전하가 있어서 같은 것은 밀쳐내고 다른 것은 끌어당긴다는 것을 알아내었고, 이 두 전하를 양전하와 음전하로 명명하였다.

1780년에서 1800년 사이 전기 분야에서는 여러 가지 중요한 발전이 있었다. 그 중의 하나가 쿨롱 법칙을 발견한 것이었다. 쿨롱 법칙의 발견은 전기학의 발전을 위한 중요한 계기를 제공했다. 실험을 통해 전하 사이에 작용하는 힘에 대한 정량적인 법칙을 알아낸 사람은 프랑스의 토목공학 기술자였던 쿨롱(Charles-Augustin de Coulomb, 1736~1806)이었다. 그는 1777년에 자석을 이용한 나침반에 관한 논문을 과학아카데미에 제출하여 그랑프리를 수상하기도 했다.

1800년 이태리의 과학자 알렉산드로 볼타(Alessandro Volta, 1745~1827)는 황산수용액에 구리막대와 아연막대를 담은 후 두 막대를 금속선으로 이어서 인류 최초로 전기를 발명하였다. 볼타전지는 최초로 양전하에서 음전하로 흐르는 전기의 흐름인 전류를 지속적으로 공급하는 장치였고, 이 볼타전지로 인해 후대의 과학자들은 전기현상에 관한 중요한 실험과 연구를 할 수가 있었다.

전기와 자기는 아주 오래전 기원전부터 알려진 현상이었다.

하지만 이 둘이 사실은 같은 상호 작용이란 것은 19세기에 와서야 밝혀졌다. 1820년 덴마크의 과학자 한스 크리스티안 외르스테드(Oersted)는 전류가 흐르는 도선 가까이 나침반을 두면 나침반의 바늘이 가리키는 방향이 변하는 것을 관찰하고 전류와 자기 사이에 연관이 있음을 밝혀냈다.

프랑스의 과학자 앙드레마리 앙페르(Ampere)는 외르스테드의 논문을 읽고 자신도 같은 실험을 하여 전류가 흐르는 도선에 생기는 자기장의 방향을 관찰하였다. 앙페르는 전류가 오른손의 엄지손가락 방향으로 흐를 때 자기장은 나머지 네 손가락을 말아권 방향으로 형성된다는 것을 밝혔는데, 오른손 엄지를 위로 치켜 든다면 나머지 말아 권 네 손가락은 반시계방향을 나타내게 된다. 이러한 발견은 앙페르의 오른나사 법칙이라는 이름으로 널리 알려지게 되었고, 훗날 수리 모형이 만들어져 앙페르의 회로 법칙이 수립되었다.

1824년 영국의 과학자 윌리엄 스테전은 전류에서 발생하는 자기장을 이용하여 전자석을 만들었다. 스테전이 처음 만든 전자석은 말굽 모양의 철심을 자기 코어로 이용한 것이었다. 스테전은 자기 코어에 굵은 구리 전선을 18번 감아 전자석을 만들었다. 당시에는 오늘날과 같은 절연체가 없었기 때문에 스테전은 구리 도선에 바니시를 발라 절연체로 사용하였다.

전류가 자기장을 만든다는 사실이 알려지자, 자기장에서도 전류를 만들 수 있지 않을까 하는 의문을 갖는 것은 어찌 보면 당연한 것이었다. 1831년 마이클 패러데이(Faraday)는 자석을 도선 가까이에서 움직이면 전류가 생긴다는 것을 밝혀내었다. 패러데이는 영구자석이든 전자석이든 상관없이 자기장을 형성하는 것을 도선 가까이에서 움직이면(즉, 자기장의 변화가 일어나면) 전류가 생긴다는 것을 알아내고 이를 정리하여 패러데이 전자기 유도 법칙을 발표하였다. 자기에서 전기가 유도될 수 있다는 것이 알려지자 이것을 이용한 많은 기술들이 발명되었으며, 대표적으로 니콜라 테슬라(Tesla)는 전자기유도를 이용하여 교류 발전기를 발명하였다.

다음에는 자기에 중점을 두어 자기 역사를 살펴보기로 하자. 인류가 자석을 사용하기 시작한 역사는 확실치 않지만 기원전 7세기 이전의 고대 그리스인들이 소아시아에 있는 Magnesia 지방에서 산출되는 돌이 철을 끌어당기는 것을 발견했다고 알려지고 있다. 중국에서도 기원전 3세기에 저술된 '여씨춘추'에 자석의 존재가 기록되어 있다고 한다.

자석의 원형이 된 것은 자연에 존재하는 산화철(Fe_3O_4 , Magnetite)이며, 당초에는 그 신비한 특성 때문에 그리스에서는 '헤라클레스의 돌'로 불리웠다. 실용적인 면에서 보면 서기 천년 경에 중국 송나라에서 자침이 남북방향을 가리키는 것을 알았으며, 심괄(1031~1095년)이 11세기 후반에 명주실에 자침을 달아매어 물 위에 띄워 지구의 남북극을 가리키는 기구를 고안한 것이 나침반의 원조로 알려져 있다. 본격적인

Table I. History of magnetics.

연 도	주요 내용
기원전	천연자석의 발견
1000년대	나침반의 발명 (중국 명나라 심팔)
1600년	최초의 자기 전문서인 ‘De Magnete’ 저술 (Gilbert, 프랑스)
1700년대 초	인공자석(철강)의 제작
1800년대	전류의 자기작용 (Oersted, Ampere), 자성 분류, Faraday효과 (Faraday), 자기변형 연구 (Joule)
1890년대	Hysteresis 연구 (Ewing), 큐리법칙 (Curie), 강선식 녹음기 (Paulsen)
1900년	무방향성 규소강판 개발 (Hadfield)
1904년	Heusler 합금 개발 (Heusler)
1905년	Paramagnetism 통계역학 (Langevin)
1907년	Molecular Field 이론 (Weiss)
1919년	Barkhausen 효과 (Barkhausen)
1920년	KS 자석 개발 (Honda, Takaki)
1923년	Permalloy 개발 (Arnold, Elmen)
1928년	Exchange Integral (Heisenberg)
1929년	Metal Ferromagnetism (Bloch)
1931년	Magnetic Domain (자구) 관찰 (Bitter)
1932년	Antiferromagnetism (Neel), Magnetic Domain Wall 이론 (Bloch)
1933년	OP자석, 산화물 코어 개발 (Kato 등), MK자석 개발 (Mishima)
1934년	방향성 규소강판 개발 (Goss)
1935년	자구이론 (Landau, Lifshitz), 자계중 냉각효과 (Bozorth, Dilinger)
1936년	Ni의 강자성이론 (Slater), Sendust 개발 (Masumoto), Ferrite (Snoek)
1937년	자기이방성이론 (Van Vleck)
1941년	규칙-불규칙 강자성이론 (Takaki)
1948년	Ferrimagnetism 이론 (Neel)
1951년	자기공명이론 (Kittel 등)
1952년	Ba ferrite 개발 (Went 등)
1955년	유도자기이방성 이론 (Chikazumi 등)
1958년	Mossbauer 효과 (Mossbauer)
1964년	Kondo 효과 (Kondo)
1973년	RE-TM계 자기광학매체 개발 (Chaudhari 등)
1975년	수직자기기록방식 개발 (Iwasaki)
1982년	Nd-Fe-B 소결자석 개발 (Sagawa)
1988년	Fe-Cr 다층박막계 거대자기저항 (GMR) 효과 발견 (Fert 등)
1994년	산화물계 CMR 현상 발견 (진성호 등)
2009년	스핀트랜지스터 구현 (구현철 등)

자기학의 연구는 1600년에 프랑스의 길베르(Gilbert)가 발간한 ‘De Magnete’에 그 때까지의 자기에 관한 여러 설들을 집대성함으로써 시작되었다. 이후 자기학분야의 주요 학술적 연구 및 기술적 개발역사를 정리하여 <Table I>에 나타내었다. 이 표를 개괄적으로 보면 최초의 인공자석은 철강제로서 18세기 초에 만들어졌고, 19세기에는 최근 전자기학의 기초 이론들이 등장하였다. 그리고 20세기 중반까지 다양한 자기학 관련이론들이 다수 제시되었음을 알 수 있을 것이다.

18세기 후반부터 19세기 초반까지 있었던 1차 산업혁명 이전의 대표적인 자기관련 기술제품은 나침반과 철강 인공자석을 들 수 있다. 나침반의 개발로 인해 망망대해나 사막, 오지에서 방향을 알 수가 있었기 때문에 탐험가들에 의한 원양항해나 오지 탐험이 가능해졌고, 이로 인해 15세기의 대항해시대와 이후 전지구 차원의 탐험시대가 열릴 수 있었다.

항상 남북극을 가르키는 나침반은 많은 어린이들의 호기심을

을 자극하여 훌륭한 인재들이 과학자가 되게 하는데 큰 기여를 하였다. 예를 들어 어린 시절 아인슈타인은 누구보다 호기심이 강했는데 그의 호기심을 일깨운 첫 번째 사물이 나침반이었다고 한다. 아무리 흔들어도 오직 남북쪽만을 가리키는 자침은 그에게 평생동안 사물의 배후에 숨겨져 있는 자연의 비밀을 탐구하게 하였다고 한다.

17세기까지 인류는 자기장이 약한 자석 이외에는 만들지 못하였다. 18세기 초에 탄소가 든 철을 가공하면 자석이 된다는 것을 알게되어 인공자석이 개발되었지만 당시에 큰 쓸모는 없었던 듯하다. 이로 인해 자기기술과 학문은 18세기 말부터 19세기 초에 있었던 1차 산업혁명에 별 영향을 주지는 못하였다.

2. 2차 산업혁명과 자기기술

상기에서 살펴본 바와 같이 자기현상은 전기현상과 연결됨

으로써 전자기를 다루는 학문과 기술 양면에서 비약적인 발전을 시작하게 된다. 19세기 초부터 우수한 과학자들에 의해 많은 전자기 실험들이 시행되고 전자기 현상에 관련된 유용한 이론들이 등장하면서 전자기기술은 급속하게 발전하기 시작하였다.

1870년경 에디슨이 발명한 전구를 시작으로 다양한 전기용품제품들이 등장하자 전기를 생성, 보급하기 위한 발전기, 송전 및 변전기구 등과 동력 변환을 위한 모터 등이 속속 개발되었으며 이 때 자기부품재료들이 많이 사용되었다.

현재 인류가 주로 사용하는 전기시스템인 교류전기시스템은 직류시스템을 주장한 에디슨에 맞서서 전기-자기 유도현상을 활용하여 여러 핵심 교류기술들을 개발한 니콜라 테슬라(Nikola Tesla, 1856~1943)의 공이 결정적이었는데 그 내용을 간략하게 살펴보자[4].

1880년대 말 미국에서는 전력의 송배전에 직류를 사용할지 교류를 사용할지에 대해 전문가들의 의견이 양분되어 전력회사나 투자가, 정치가들 사이에 대립이 확대되었다. 이론적으로 보면 직류에 대한 교류의 우위는 확실하였다. 도선에서 전기를 보낼 때 공급되는 전기에너지의 일부는 도선의 저항에 의해 열로 전환된다. 이 에너지손실은 전류의 제곱에 비례하고 전압에는 무관하므로 고전압으로 송전할수록 효율이 높아진다. 교류의 경우는 수요지에서 원거리에서 있는 발전소에서 발전한 전기를 고전압으로 송전해서 이것을 변압기로 강압시켜 가정이나 공장으로 비교적 쉽게 배전할 수 있었다.

하지만 당시 에디슨이 개발한 직류시스템에는 전압을 변화시키는 효과적인 방법이 없어서 저전압으로 송전하는 수 밖에 없었다. 그 결과 직류전력 공급지역은 발전소에서 기껏해야 3 킬로미터 범위로 한정되었다. 이래서는 산골 발전소에서 도시로 송전하는 것이 현실적으로 불가능했다. 그럼에도 에디슨이 직류를 선택한 것은 백열전구를 판매하려면 안정된 전력의 공급이 반드시 필요했기 때문이었다. 송전시스템을 둘러싼 직류진영과 교류진영의 첨예한 대립은 1895년 나이아가라 폭포발전소에 교류시스템의 발전기가 채용됨으로써 교류진영인 테슬라측의 승리로 종결되었다. 에디슨과 테슬라가 개척한 전력사업은 19세기 말에 거대산업으로 발전하였고, 이 전력기술 혁신은 전기를 근간으로 한 2차 산업혁명을 성공적으로 추진할 수 있도록 만들어 주었다.

자기기술 측면에서 전기시스템을 보면 에디슨에 비해 테슬라의 업적이 훨씬 크다고 할 수 있다. 유도자기장의 단위에 가우스(Gauss)와 함께 테슬라(Tesla, 1T = 10,000 Gauss)를 사용하는 것만 보아도 알 수 있다.

다음에는 테슬라가 전자기시스템에 끼친 중대한 업적들을 간단하게 살펴보기로 하자[4]. 알버트 아인슈타인은 테슬라에 대해 ‘어떻게 테슬라가 그런 엄청난 업적을 이루어냈을지를

생각할 때마다 깊은 찬탄을 금할 수 없다’는 말을 할 정도로 테슬라를 칭송하였었다.

1882년 헝가리 부다페스트 전화국에 근무하던 테슬라는 산책 중에 회전자계의 원리를 발견하고 이후 이를 기초로 최초의 실용적인 교류모터(2상 유도모터)를 완성하게 된다. 이 모터를 3상 이상으로 발전시켜 발전기 등 관련기술과 결합해서 체계화한 것이 테슬라의 다상교류시스템이다.

교류모터의 고정자와 회전자에는 연자성재료를 사용하였으며 전기-자기 유도현상으로 회전력을 부여하고 있다. 교류시스템에 사용되는 연자성재료는 직류시스템에 필요한 재료보다 철손이 작은 재료가 필요하게 되므로 19세기 말에는 저철손 자성재료가 연구되어 1900년 Hadfield에 의해 철에 소량의 실리콘을 첨가하여 만든 규소강판이 개발되었다.

교류시스템을 완성한 테슬라는 이후 고주파연구에 몰두하여 수많은 획기적 발명과 발견을 하였다. 고주파 시스템은 인덕턴스를 활용하는 전자기기술제품이다. 고주파 고전압을 발생시키는 테슬라 코일, 전파를 분리하는 동조회로기술, 안테나시스템 등은 무선이나 라디오방송의 기반기술이 되었다. 1943년 미국 최고재판소는 테슬라의 업적을 높이 평가하여 라디오의 발명가가 마르코니(G. Marconi)가 아닌 테슬라라는 것을 인정하였다. 테슬라가 발명한 고주파를 조명에 응용한 방전조명시스템은 형광등과 네온사인의 선구가 되었고, 1898년 메디슨스퀘어기지에서 공개한 무선조종 보트는 현대 원격 무선조종 기술의 선도역할을 하였다.

전구 발명과 비슷한 시기에 벨이 고안한 자석식 전화는 나중에 마르코니가 발명한 무선통신기와 더불어 인류의 통신기술 발전의 선구적 역할을 하였는데 그 전화의 자석과 진동판에는 자성재료가 사용되었다. 통신기술은 2차 산업혁명시기에 나타난 혁신기술로서 현대 모바일시대의 기반기술이 되었다.

근래에 바뀐 전화의 역사를 살펴보면 가장 최초로 전화기를 발명한 개발자로 알렉산더 벨이 아닌 안토니오 무치란 인물이 등장한다. 이태리 출신의 안토니오 무치(Antonio Meucci, 1808~1889)는 중병의 아내와 연락하기 위해 1854년 기계식 전화기를 개발하였다. 그는 전화기 발명으로 1871년~1873년 사이에 최초의 특허를 얻었다. 무치가 250달러의 영구특허를 낼 돈이 없어 고전하는 동안 알렉산더 벨(Alexander Bell, 1847~1922)이 1876년에 ‘소리-공기진동-전기진동의 전신 전달 기구’란 이름으로 전화기의 영구특허를 획득하였다. 무치가 제소를 하여 전화기 특허분쟁이 일어났지만 법원은 무치가 기계식 전화기, 벨은 전기식 전화기 발명이라고 판결하였고, 이 판결로서 무치의 이름은 전화기 역사에서 오랫동안 존재감이 상실되었다. 이로 인해 100년 이상 전화기의 최초 발명자 영예는 벨이 누리게 되었다. 하지만 2002년 미국의회는 전화기의 최초 발명자가 안토니오 무치란 것을 인정하는 결의를 하여 무

치는 사후에 최초 전화기 발명자란 명예 회복을 하였다.

벨의 전기식 전화기는 전자기 유도현상을 이용한 장치였으며, 그 속에는 직류발전기, 연자성재료를 사용하는 철심과 얇은 진동판이 사용되었다. 벨이 만든 전화기회사는 나중에 AT&T라는 거대 통신회사가 되었고, 산하 연구기관인 Bell Lab은 노벨수상자를 10여 명 배출한 세계적 기초과학연구기관으로 명성을 날렸다. 자성재료를 중 매우 유명한 재료인 퍼멀로이(Permalloy)는 1923년 Bell Lab의 엘먼그룹에서 전화기에 사용하려고 개발한 투자율이 높은 자성재료이다.

2차 산업혁명기간 중에 개발된 많은 혁신기술들 중 대표적 혁신기술이 녹음기술이다. 화상을 기록하는 기술인 사진술이 개발된 이후 많은 사람들이 소리를 기록하려는 노력을 하였다. 1857년 레옹 스콧(Leon Scott)의 ‘Phonoautograph’, 1863년 조셉 펜비(Joseph Fenby)의 전자석식 축음기인 ‘Phonograph’의 아이디어 특히, 1877년 샤를 크로스(Charles Cros)의 아이디어인 ‘Paleophone’ 등의 시도가 있었지만 상업화는 하지 못하였다. 결국 1877년 토마스 에디슨이 원통형 구조 위에 얇은 주석박을 감싸놓고 회전시켜 감지한 소리를 바늘로 표현한 후, 재생 때에는 역으로 그 홈을 바늘이 인지하여 진동판을 진동시켜 소리를 재생하는 축음기를 만드는데 성공하였다.

덴마크의 발데마르 포울센(Valdemar Poulsen, 1869~1938)은 1898년 자성을 보유한 강선 또는 강철 리본에 음성을 자기적으로 기록 재생하는 장치인 텔레그래폰(Telegraphone)을 개발하여 20세기 후반의 혁신제품인 테이프 레코더의 기초를 제공하였다. 그는 1900년 이 제품을 파리 만국박람회에 출품하여 대상을 받았다. 이 자기기록기술의 개발에 의해 자기기록매체 및 자기헤드 기술이 등장하였고, 20세기 자기학의 발전에 매우 큰 공헌을 하였다.

3. 3차 산업혁명과 자기기술

‘정보혁명’이라 불리는 3차 산업혁명을 1960년대 말에 미국 국방성에서 개발한 ‘알파넷(ARPANET)’이란 인터넷 등장 이후로 본다면 3차 산업혁명의 기반은 정보통신기술이며, 컴퓨터기술은 3차 산업혁명의 핵심이라 할 수 있다. 다음에는 컴퓨터기술의 주요 개발역사를 간단히 살펴보기로 한다.

2차와 3차 산업혁명의 중간인 20세기 초반에 벌어진 세계 제1차대전과 제2차대전은 과학기술분야는 물론 경제 사회에 많은 변화를 가져왔다. 특히 2차대전 중에 개발이 시작되어 전쟁 직후에 개발된 컴퓨터는 이후 인류사회에 무척 큰 영향을 주었다. 독일 나치정부에 의해 자석식 컴퓨터가 개발된다는 정보를 입수한 미국정부는 진공관을 이용한 컴퓨터 개발에 착수하였다. 진공관식 컴퓨터는 2차대전 종료 후에 개발되었으며 대표적인 진공관식 컴퓨터가 1946년 펜실베이니아대학의 모클리와 에커트가 제작한 에니악(ENIAC)이었다. 이 컴

퓨터는 1955년까지 약 10년간 실용적 계산에 활용되었으며, 현재 워싱턴 스미소니언 박물관에 보관되어 있다.

진공관식 컴퓨터는 진공관 연결선이 너무 많아 복잡하고 덩치가 크고 고장이 잦아 효율적이지 못했다. 이런 약점을 보완하여 개발된 컴퓨터가 자기식 컴퓨터이다. 1957년 미국 IBM사는 자사 컴퓨터 350기종에 RAMAC이라는 24인치 직경의 하드디스크(hard disk)를 사용함으로써 하드디스크 드라이브(HDD)시대를 열었다. 이 HDD는 용량이 5 MB에 불과하고 속도도 느렸지만 이후 수많은 기술개량을 거쳐 현재까지 60년을 사용하고 있는 장수 정보저장장치였다. IBM사는 지금은 반도체가 사용되고 있는 중앙연산장치(CPU)의 핵심제어부품에 자성체인 페라이트 코어를 사용하는 메모리(ferrite core memory)를 개발 채용하여 고속 대용량의 대형 컴퓨터(메인프레임)시대에 최강자로 부상하였다.

1960년대 미국과 소련의 우주개발전쟁이 벌어지면서 미국 우주선을 제어하는 컴퓨터에 사용되는 제어부품으로 자기램(MRAM)이 등장한다. Honeywell사가 제작한 자기램은 연자성체에 가는 구리코일을 감은 전형적인 전자석형태였다. 이 자기램을 상업용 컴퓨터에 활용하려하자 바로 소형화, 집적화란 난제에 부딪혔다. 이를 해결하기 위해서 IBM사 등은 박막자기소자의 개발을 시도하였다. 이 소자는 퍼멀로이박막을 얇은형태로 식각하여 매우 가는 코일을 감는 원리였지만 1960년대 당시에는 퍼멀로이박막을 증착하는 스퍼터링기술의 비싼 가격 및 기술 낙후, 식각의 어려움, 코일 감는데 따른 미세화 곤란 등의 문제에 봉착하였다. 설상가상으로 경쟁부품인 실리콘반도체의 저가격화 성공 및 ‘무어의 법칙’으로 대표되는 눈부신 기술발전으로 인해 대형컴퓨터 CPU 부품으로 사용되는 자기부품들은 1970년대 후반기 이후에 사라지게 된다.

1970년대에 전세계의 선도적 정보기술 대기업들은 미래의 정보기기로 개인용컴퓨터(PC)를 예상하고 치열한 개발경쟁을 벌였다. 이 대기업들 중 PC 기술 개발에서 가장 선도기업은 복사기 전문기업인 제록스(Xerox)사였다. 그렇지만 제록스사조차도 수요자들을 만족시키는 상업용 PC를 제대로 개발하지 못하고 있을 때 혜성같이 등장한 PC 기업이 스티브 잡스, 스티브 워즈니악이 설립한 신생기업 애플(Apple)사였다.

1976년 설립하여 1977년 Apple II를 출시하면서 애플은 PC 시장에 혁명을 일으켰다. 워즈니악이 설계한 Apple II는 모니터, 키보드, 컬러 그래픽, 스피커 그리고 플로피 디스크 드라이브(FDD)로 이루어져 있었다. 초기 부팅과 저장기능은 자기저장장치인 FDD가 담당하였다. 모니터에는 전자총 자석, 자기철드, 새도우마스크 등에 자성재료가 사용되었고, 스피커에도 자석이 사용되었다. 애플사는 1984년 출시한 혁신적 PC인 맥킨토시(Macintosh)에 FDD는 물론 HDD를 추가하여 정보저장용량을 대폭 확대하였고, 마우스와 그래픽 인터페이스

(GUI)를 장착하여 이후 개발된 PC의 기본이 되었다.

정보교환기술은 3차 산업혁명의 다른 축이다. 정보의 연결은 1945년 부시(V. Bush)에 의해 제안된 하이퍼 링크기술인 MEMEX가 시초로 알려져 있다. 1960년대 냉전시대에 양 진영은 많은 군사관련기술을 개발하였는데 1969년 미국 국방성에서 군사적 목적으로 핵공격에서도 살아남을 수 있는 네트워크 구축을 위해 개발했다는 설이 있는 알파넷이 대표적 군사용 정보교환기술이다.

1989년 유럽 원자핵 공동연구소(CERN)의 팀 버너스리(Tim Berners-Lee)는 연구원들간의 정보교환을 편리하게 할 수 있는 문서탐색 기능이 있는 시스템을 개발하였는데 이 기술은 몇 년 후에 WWW(World Wide Web)으로 발전되었다. WWW는 부시의 발상을 인터넷에서 재현한 것으로써 문서에 내장된 링크를 통해 탐색하는 간편한 기능을 가진 웹이다.

3차 산업혁명이 진행된 20세기 후반 내내 오디오 및 비디오 정보를 저장하였던 가장 중요한 정보저장기술이 자기기록 기술이었다. 1950년대에 등장한 자기드럼, 자기디스크, 자기테이프 중 자기디스크는 컴퓨터용의 HDD와 FDD로 전문화하였고, 자기테이프는 오디오, 비디오, 컴퓨터 등 정보저장의 전 영역에서 사용되었다. 폴리에스터의 개발은 자기테이프 기술의 혁신을 제공하여 오디오, VTR, 캠코더, 컴퓨터 백업저장장치에 널리 사용되었다. 1970년대에 벌어졌던 소니의 Betamax와 JVC의 VHS방식의 전쟁이었던 ‘VTR 전쟁’, ‘캠코더전쟁’이 자기 카세트 테이프 저장매체를 둘러싼 대표적인 사건들이었다. 소니가 개발한 워크맨(Walkman)도 한 세대를 풍미했던 휴대형 자기테이프기기였다.

1990년대 이후 정보저장기술의 발전방향이 더욱 고속, 대용량, 소형, 경량, 저전력 등으로 빠르게 변화하면서 2000년을 고비로 정보저장기술의 주류가 아날로그방식에서 디지털

방식으로 바뀌었다. 이로 인해 아날로그식에 적합하였던 자기테이프나 FDD 등은 시장을 잃었고, 그 자리를 반도체가 차지하게 되었다.

반도체는 1965년 무어가 주창한 ‘무어의 법칙’을 기치로 내걸고 인텔이 주도하여 60년 동안 비약적으로 발전하면서 현재 컴퓨터 메인프레임의 CPU, PC의 정보저장장치, 오디오/비디오 기기들에서 자기부품을 대부분 대체하였다. 반도체는 정보처리나 정보저장 기능은 물론이고, 2000년대 들어 고효율 정보표시수단인 모니터, TV도 전자총을 사용하는 튜브형에서 평판형인 LCD, LED로 바뀌었다.

자기기술을 크게 전력용, 정보통신용, 기타 기능용으로 나누어서 분석해 보기로 하자. 높은 전류나 전압을 다루는 전력과 관련된 자기기술은 2차 산업혁명시기에 개발되어 급속하게 발전하였으며, 3차 산업혁명기에도 꾸준히 영역을 넓혀왔다. 미래에도 전력분야는 특별한 경쟁자가 예상되지 않으므로 이 분야 자기기술은 지속적인 발전을 해나갈 것이다.

정보의 처리, 저장, 표시, 통신 기능을 수행하기 위한 용도인 정보통신용 자기기술은 2차 산업혁명과 3차 산업혁명 중간기에 대부분 개발되어 3차 산업혁명 초기인 1960년대~1980년대까지는 관련산업 발전에 선구적 역할을 하였다. 하지만 20세기 말인 1990년대부터 정보통신분야의 대세기술이 아날로그기술에서 디지털기술로 변하면서 자기기술은 점차 반도체기술에 밀려나는 숙명을 겪게 되었다.

각종 물리량의 측정(센서류), 열팽창률이 매우 적은 인바재료, 우주선 위치제어, 자기차폐, 자기분리, 자성유체, 자성반도체 등 특수한 기능에 사용되는 기타 자성재료 및 부품들은 주로 20세기 들어서 등장하였다. 이 영역의 자기기술은 미래에도 현재의 수요를 대체적으로 유지할 것으로 예상된다.

위에 언급한 1~3차 산업혁명까지 자기기술이 주요 혁신제

Table II. Impact of the magnetics on the past industrial revolutions.

혁명 차수	자기학 및 자기기술의 영향
1차	별로 없었음
2차	2차 산업혁명의 주도적 역할 (전기의 생성 및 변환) - 자기학: Faraday 및 Fleming 법칙(전기-자기 변환) - 전기: 발전기(직류 및 교류 발전기, 연철 및 철강자석) - 모터(직류 및 교류모터, 연철 및 철강자석) - 변압기(연철, 규소강판) - 전화: 자석 및 연철 진동판(나중 퍼멀로이판) - 녹음기: 연철 코일 및 판재
3차	3차 산업혁명의 가교역할(아날로그, 디지털정보의 처리, 저장, 표시) - 컴퓨터: 메인프레임의 정보처리(메모리) - 정보저장(자기드럼, 자기테이프, HDD, 박막자기헤드) - 모니터(CRT형): 자석, 색도우마스크, 자기철드 - PC: Apple PC의 기술핵심(FDD, HDD 등) - 녹음기: 오디오 테이프, 자기헤드 - VCR: 비디오 테이프, MIG 헤드

품에 미친 영향을 <Table II>에 나타내었다.

III. 4차 산업혁명과 자기기술의 역할

1. 4차 산업혁명의 특징

4차 산업혁명시대에 자기기술이 어떻게 미래의 주력제품이나 서비스에 응용되어 발전할 것인가를 생각해 보려면 4차 산업혁명의 가치창출 과정을 이해할 필요가 있다. 본고에서는 4차 산업혁명의 혁신패턴이 1차 산업혁명과 매우 유사하다고 분석한 자료[5]를 주축으로 하여 다음에 4차 산업혁명의 특징을 간략히 정리하였다.

영국 경제학자 토마스 맬더스는 ‘인구론’에서 ‘세상의 인구는 기하급수적으로 증가하는 반면에 식량은 산술급수적으로 늘어나기 때문에 인류는 빈곤을 벗어날 수 없다’는 맬더스의 덫(Malthusian Trap)을 주장하였다.

그렇지만 인류를 ‘맬더스의 덫’에서 풀려나게 해준 것은 18세기 후반 영국에서 시작된 1차 산업혁명이었다. 영국에서는 면직물의 핵심기술인 방직기기술과 방직기기술을 인력이 아닌 수력이나 증기기관을 활용하여 고성능의 효율적 생산기술을 개발함으로써 생산성을 수십 배 이상 높일 수 있었기 때문에 세계 최고수준의 생산력을 보유하게 되었다. 면직물 생산을 위해 개발된 제임스 와트의 증기기관은 방직기, 역직기 뿐만 아니라 증기선, 증기기관차 등의 물류혁신을 유도하였다.

면직물산업 전반에 걸친 혁신은 영국의 1차 산업혁명을 성공으로 이끄는 원동력이 되었으며, 이는 ‘원자재-생산-물류-시장’에 이르는 공급망(Supply Chain) 전반의 혁신이었다. 영국은 인도 벵골지역을 식민지화함으로써 값싸고 안정적인 면화 원자재 조달을 가능케 하였고, 방직기와 방직기의 기술혁신에 증기기관을 융합함으로써 생산에도 극적인 혁신이 가능하였다. 증기기관차와 증기선의 발명으로 신속한 대량수송이 가능해져 물류혁신을 이루었으며, 식민지 인도는 영국의 매력적인 상품시장으로 활용되었다.

제임스 와트는 증기기관차나 증기선을 만들지는 않았지만 그가 발명한 분리 응축기 증기기관기술은 방직기, 방직기, 증기기관차, 증기선, 펌프, 공작기계 등 동력이 사용되는 상당수의 기계에 사용되어 생산 뿐만 아니라 교통, 물류, 기계공업 등 산업 전반에 일대 혁신을 일으켰다.

4차 산업혁명은 1차 산업혁명과 기술적 부분에서는 다르지만 많은 부분에서 혁신의 패턴이 평행이론처럼 유사하게 보인다. 정보통신기술(ICT), 플랫폼과 인공지능, 초고속통신과 네트워크, 모바일 등으로 대변되는 4차 산업혁명에서도 공급망 전반에 걸친 혁신은 매우 중요한 패턴이며, 각종 비즈니스와 기술혁신은 이를 바탕으로 일어나고 있다.

전 세계인들은 지금 구글, 애플, 페이스북 등 거대한 글로벌

ICT 기업 제품의 충실한 사용자로 살아가고 있으며, 실시간으로 다량의 개인 데이터를 그들에게 제공하고 있다. 이렇게 수집된 빅 데이터는 플랫폼이란 공장에서 인공지능이라는 사이버 생산기계에 원자재로 사용되고 있으며, 개별 맞춤형서비스라는 제품으로 탄생하게 된다. 이렇게 생산된 서비스는 5G와 같은 초고속 네트워크 상에서 웹과 모바일을 통해 유통된다. 이러한 정보서비스는 국경이나 시간에 구애받지 않고 네트워크만 연결되어 있으면 전 세계로 제공될 수 있다.

하지만 추진방법에서 4차 산업혁명은 1차와 다르다. 1차 산업혁명이 물리력과 착취를 통해 원재료를 확보했던 것과는 달리 4차 산업혁명은 세련되고 매력적인 서비스를 제공함으로써 우호적이고 지속가능한 고객을 확보하고 이들을 대상으로 비즈니스를 수행하고 있다는 점이다. 4차 산업혁명시대의 사용자는 ICT 플랫폼기업들의 서비스를 이용하는 댓가로 자신의 정보를 제공하고 있으며 거부감은 상대적으로 그리 크지 않다. 플랫폼기업들이 사용자에게 SNS, 이메일, 검색, 동영상 등 적절하고 세련된 형태의 맞춤형서비스를 무료 또는 저가에 제공하기 때문이다. 이러한 관계는 특별한 저항없이 사용자의 개인정보가 지속적으로 플랫폼기업에게 공급된다는 특징이 있으며, 4차 산업혁명시대의 원재료라 할 수 있는 데이터가 수집되는 방식이다. 세계적 기업들이 원재료를 확보하기 위해 과거처럼 물리적으로 식민지를 개척하지는 않지만 이미 전세계의 많은 국가들과 네티즌들은 글로벌 ICT 기업의 디지털 식민지가 되고 있다.

공급망 관점에서 보면 1차 산업혁명에서는 생산과 물류분야의 기술이 핵심 원동력이었고, 부가가치 창출의 근원이었다. 반면 4차 산업혁명에서는 원자재와 생산분야의 기술이 핵심 원동력이라 할 수 있으며, 원자재에 해당하는 데이터기술(Data Technology), 생산에 해당하는 인공지능(AI)기술의 확보가 비즈니스의 핵심성공요인으로 작용할 것이다. 이 두 기술을 효율적으로 개발, 활용하기 위해서는 많은 요소기술들이 필요할 것이며 과거 메인프레임 컴퓨터에서 정보의 처리, 저장, 표시의 핵심기술이었던 자기기술은 새로운 패러다임을 찾아 응용할 수 있다면 미래에 중요한 요소기술이 될 수 있을 것이다.

<Fig. 1>에는 지금까지 기술한 1차 산업혁명과 4차 산업혁명의 특징을 원자재, 생산, 물류, 시장 등 네 가지 핵심 공급망으로 정리하여 비교하기 쉽게 그림으로 나타내었다.

2. 유망 직업 및 분야

4차 산업혁명시대의 주력분야로는 하드웨어분야, 소프트웨어콘텐츠분야, 현실-가상 연결분야 등을 들 수 있을 것이다. 이 중 자기기술은 하드웨어분야 및 연결분야와 주로 연관되어 있을 것이다.

자기기술이 미래에 어느 분야에서 주도적 역할을 할 것인

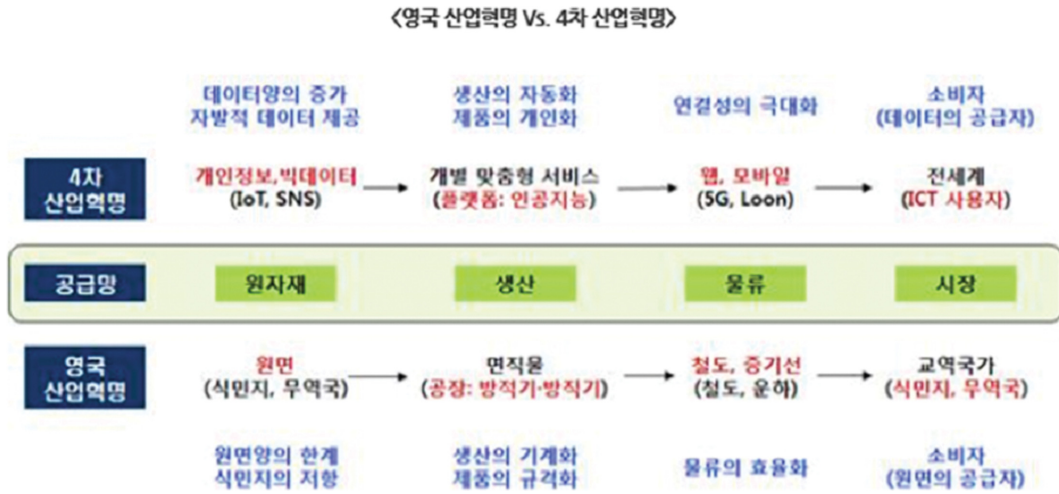


Fig. 1. (Color online) Comparison of the 1st and 4th industrial revolution by the supply flow [5].

가 예상을 할 때 우리는 전통적인 주력분야의 유지, 현재 등 장하기는 하였지만 초기단계로서 미래에 유망한 분야, 그리고 아직 등장하지 않았지만 미래에 창출될 가능성이 높은 분야 등으로 구분하여 분석할 수 있을 것이다. 그리고 당연히 뒤로 갈수록 예측이 어려워질 것이다.

가. 전통적 주력분야 유지

앞의 II장에서 살펴본 바와 같이 자기기술이 현재 대세기술 이면서 미래에도 주도적 역할을 할 것으로 예상되는 분야는 우선 전력관련분야를 들 수가 있을 것이다. 4차 산업혁명시 대에는 지금보다 훨씬 많은 전기를 사용할 전망이므로 전력 분야에 활용되는 자기기술제품들은 미래에도 지속적으로 수요가 많아질 것이다.

발전용으로는 수력, 화력, 풍력, 조력 등 유체의 힘을 전기 로 바꾸는 대형 및 중형 회전기에 규소강판 등 연자성재료들 이 더 많이 이용될 것이다. 자동차, 선박, 항공기 등 내연기 관을 장착한 운송기계에도 전자기 발전기가 계속 사용될 것 이다. 배전 중간에는 여러 용량의 배전용 변압기가 계속 사

용될 것이다.

대형 및 중소형 변압기, 전원변압기, 리액터 자기증폭기, 변 류기, 쇼크, 전자개폐기 등 비교적 큰 전기를 변환하는 용도 에는 연자성재료가 계속 사용될 것이다. 다양한 주파수의 변 성기, 계전기, 자기증폭기, 고주파발생기에도 퍼멀로이 (Permalloy) 같은 연자성재료가 사용될 것이다. 스위칭전원 (SMPS)은 매우 중요한 전자부품인데 앞으로도 여기에는 노 이즈 필터, 변압기, 자기증폭 기포화코어, 스파이크 길러, 쇼 크 코일 등 다양한 자기부품들이 사용될 것이다.

4차 산업혁명시대에 자기기술 중 가장 주목될 분야는 영구 자석을 응용하는 기술일 것이다. 로봇의 구동을 위한 모터 및 액츄에이터로부터 무인자동차 및 전기자동차의 다양한 자기 부품, 드론의 동작모터, 3D 프린터의 모터 등 4차 산업혁명의 주력제품들에는 거의 영구자석을 활용한 자기부품들이 채 용되고 있다. <Table III>에는 영구자석의 현재 응용분야를 나타내었으며 미래에는 더 많은 응용분야가 창출될 것이 확 실하다.

Table III. Applications of permanent magnets.

응용분야	응용 기기
음향기기	스피커, 헤드폰
OA기기 모터	팩시밀리, 프린터, 복사기
영상음향기기 모터	컴팩트 디스크, 디지털 카메라
FA기기용 모터	로봇, NC 공작기계
가전기기용 모터	에어콘, 냉장고, 세탁기
전장기기용 모터	와이퍼, 블로우, 워셔, 스테이터
자석발전기	오토바이, 선박, 농업용 발전기
전기계측기기	전력계, 전류계, 속도계, 심전계, 테스터
제어기기	VCM, 프린터 헤드, 릴레이, 스위치, 셀렉터, 각종 센서
기 타	전자렌지와 스캐터 마그네트론, 복사기 및 인쇄기의 마그네트 롤, 척 및 홀더의 치공구, 자석선별기, 건강기구, 흡착도구 등

지난 50년 동안 가장 큰 부침을 겪은 자기기술분야는 자기 기록기술분야라 할 수 있다. 1947년 미국에서 보자력 230 Oe의 침상형 감마페라이트를 도포시킨 자기테이프가 개발되어 녹음기 및 녹화기(VTR)에 채용됨으로써 기록/재생이 가능한 테이프형 오디오/비디오 시대를 열었다. 1957년에는 IBM에서 HDD를 개발하여 고속이 필요한 컴퓨터의 저장매체 시대도 열렸다. 이후 자기기록매체는 공히 대용량 기록을 목적으로 한 고보자력 매체의 기술개발 경쟁이 치열하게 벌어졌다.

1970년대 초 컬러영상을 기록재생하는 VCR 기술 전쟁이 소니그룹과 마쓰시다그룹간에 벌어졌고, 이는 80년대 초 8mm 캠코더 전쟁으로 이어졌다. 1979년 소니는 공전의 히트를 한 재생전용 녹음기인 워크맨(Walkman)을 시판하여 소형 포터블 녹음기시대를 열었다. 1980년대에 디지털 정보저장을 위해 소니는 광자기술을 활용한 미니디스크(MD)를 선보였고, 오디오용 디지털 콤팩트 카세트(DCC) 자기기술도 1990년대에 개발되었다.

그러나 1990년대에 독일 프라운호퍼연구소에서 개발한 디지털 파일을 활용한 MP3 기술을 오디오에 적용한 MP3 디지털 오디오기기가 등장하면서 오디오시장은 급변하였다. 2000년을 전후하여 한 때 우리나라의 아이리버가 반도체를 채용한 MP3로써 세계시장을 주도한 적도 있었다. 하지만 애플사에 복귀한 스티브 잡스가 2001년 1.5인치 미니 HDD를 저장매체로 채용한 iPod(Classic)을 개발하여 성공함으로써 MP3 주도권은 애플이 장악하게 되었다. 애플은 이후 2004년 1인치 HDD를 채용한 iPod(Mini)를 시판하였는데 이 제품이 애플이 HDD 자기기술을 채용하여 개발한 마지막 iPod 제품이었다.

2005년 애플은 미니 HDD 대신 가격이 비싸고 저장용량도 적었지만 가볍고 전력소모가 적은 반도체 메모리(플래시 메모리)를 채용한 혁신적인 iPod 제품인 iPod(Nano)를 개발 시판하였다. 크기와 외관이 2년 후 등장하는 혁신적 스마트폰인 iPhone 1과 흡사한 이 제품을 개발하면서 잡스는 분명 iPod에 통신기능과 카메라를 장착한 iPhone 개발을 염두에 두었던 것으로 생각된다.

영상저장기술분야를 살펴보면 자기기술은 VCR을 중심으로 하여 좀 더 생명력이 길었다. 하지만 영상의 주도기술 역시 아날로그에서 디지털기술로 변화되고, 사람들이 장치가 가볍고 콤팩트하며 고속 정보 입출력이 가능한 기술제품을 선호하게 되면서 반도체 메모리를 저장매체로 하는 디지털 영상 기록기기가 2000년대에 대세가 되었다. 결국 2010년 이후에는 자기기록기술을 채용한 오디오, 비디오제품은 더 이상 신규 시장에 보이지 않게 되었다.

컴퓨터 정보저장기술은 1970년대까지 자기기록이 주도하였

다. 메인프레임 컴퓨터의 CPU에는 1970년대까지 페라이트 코어메모리, 일시 정보저장은 HDD, 장기 정보저장은 자기테이프가 담당하였다. 하지만 1980년대부터는 CPU의 핵심부품은 모두 반도체로 대체되었다.

1970년대 후반에 등장한 최초의 상업용 PC인 Apple II에는 정보처리를 반도체 RAM이 담당하였고, 부팅과 정보저장은 플로피디스크 드라이브(FDD)가 담당하였다. 1984년 등장한 애플의 맥킨토시 PC에는 CPU에 ROM과 RAM 반도체가 적용되었고, 정보저장은 FDD와 HDD가 담당하였다. 2000년대 들어서면서 저장용량이 적은 FDD가 PC에서 사라졌고, 2010년대에 들어서서는 데스크탑의 경우에는 HDD가 채용되었지만 노트북의 경우에는 HDD 대신 가볍고 콤팩트하며 전력 소모가 적은 반도체 메모리인 SSD로 점차 대체되고 있다. 장기적으로 볼 때는 노트북 PC에서 HDD의 입지 확보는 어려울 전망이다.

정보를 표시하는 디스플레이분야에서도 자기기술이 초창기부터 기술개발을 주도하였다. TV의 브라운관이나 컴퓨터의 모니터에는 오랫동안 영구자석을 채용한 전자총, 튜브의 내부 공간을 외부자장에서 보호하기 위한 자기실드, 픽셀 구현을 위해 작은 구멍을 뚫은 새도우마스크 등이 사용되었다. 특히 선명한 고화질 영상을 구현하기 위해 많은 기술개발이 이루어졌는데 세 개의 전자총을 채용한 소니의 트리니트론방식 TV가 매우 히트한 제품이었다. 새도우마스크의 경우 고화질을 구현하기 위해 1990년경 오랫동안 사용되었던 순철에 가까운 알루미늄 킬드강(AK Steel) 대신 열팽창율이 무척 적은 인바(Invar) 재료를 사용하여 HDTV를 개발하였다. 하지만 지금 튜브형 TV나 모니터는 LCD나 OLED 등을 사용하는 평판디스플레이로 대체되어 거의 생산되지 않고 있다.

나. 최근 대세기술 응용

2000년대 이후 각광을 받고 있거나 최근 등장한 4차 산업혁명의 대세기술이라 할 수 있는 분야들에 응용되는 자기기술들을 예시하여 나타낸 것이 <Table IV>이다. 주요 분야로서는 드론과 같은 무인비행체, 에너지 및 동력, 인공지능, 로봇, 헤드마운트 디스플레이(HMD), 바이오-의료, 핀테크, 3D 프린팅을 들었고, 각 분야의 기능 및 핵심적인 자기기술들을 간단히 예시하였다.

이 표를 보면 전절의 <Table III>에 제시한 응용기기 및 부품들이 많음을 알 수 있는데 모터, 액츄에이터, 발전기, 변압기, 자기센서 등이 대표적이다. 이는 자기기술이 근미래까지도 전력관련, 동력관련, 위치탐색 등의 응용분야에서 강세를 나타내는 것을 의미한다. 그 외에는 자기램(STT-MRAM)과 같이 10여년간 연구개발된 기술이 이제 임메디드 메모리로 시장에 등장하려 하는 부품도 있고, MRI 같은 의료기기나 암치료에 응용되는 자성입자와 같이 성능 개선을 위해 상

Table IV. Major applications of the 4th industrial revolution and the related magnetic technologies.

주요 분야	기능	관련 자기기술 예시
무인 비행체(드론 등)	내비게이션 동력	자기센서(3D) 자기모터, 액츄에이터
에너지 및 동력	전기-자기 변환 무선전력 이송	발전기, 변압기, 모터, 액츄에이터 인덕터
인공지능	정보저장 정보통신 정보감지	MRAM 인덕턴스부품 홀소자, 자기저항소자 등
로봇	내비게이션 구동	자기센서(3D) 자기 액츄에이터
헤드 마운트 디스플레이	가상현실 구현	3D 자기센서
바이오-의료	암 치료 고해상 영상	나노자성입자 MRI, NMR
핀테크	모바일 결제	무선 자기통신(WMC)
3D 프린팅	3차원 구조물 제작	자기 나노입자, 분말

Table V. 6 Major Platforms and the magnetics related future jobs of the 4th industrial revolution.

플랫폼	미래 신산업 및 미래직업	
인간	신산업	차세대 바이오, 새로운 식량, 미래형 섬유/패션, 스마트교육
	미래직업	생체로봇 외과의사, 원격진료 코디네이터, 스마트팜 구축자, 정밀농업 엔지니어, 의류 신발 3D 프린팅 전문가
가정	신산업	지능형 전자, 미래형 유통/물류, 실감형 콘텐츠
	미래직업	스마트센서 개발자, 사물공간 스캐너, 사물인터넷 전문가, 마이크로시스템 엔지니어, VR/AR 전문가, 스마트그리드 엔지니어, 가정एको 컨설턴트
도시	신산업	스마트 시티, 스마트 행정/법률, 스마트 금융, 생활안전
	미래직업	오피스 프로듀서, 환경복원 전문가, 로봇어드바이저 전문가, 스마트 재난대응 전문가, 범죄예방환경 전문가
공장	신산업	스마트 기계, 스마트 엔지니어링, 첨단 에너지
	미래직업	착용로봇 개발자, 기계 언어학자, 인터페이스 컨트롤러, 제조공학기술자, 양자컴퓨터 전문가, 로봇 상담가, 4세대 핵발전 전문가, 양자 컴퓨팅 전문가
이동성	신산업	미래형 자동차, 미래형 선박, 첨단 비행체
	미래직업	무인자동차 엔지니어, 예측수리 엔지니어, 드론 운항관리사, 극초음속 비행기 기술자, 우주선 조종사
첨단소재/ 기술	신산업	지능형 반도체, 차세대 디스플레이, 신철강, 신석유화학, 첨단 S/W
	미래직업	지능형반도체 개발자, 바이오연료 엔지니어, 마이크로 디스플레이 전문가, 투명 디스플레이 기술자, 친환경소재 전문가, 스마트 스토리지 전문가

당한 연구개발이 진행되는 분야들이 있다.

자기학 연구자들이 이 표를 확장하여 자신이 전공하는 분야에 관련된 미시적인 세부 기술표를 작성할 수 있다면 미래에 유망한 연구개발과제를 어렵지 않게 도출할 수 있을 것이다. 이를 위해서는 우선 자기학에 관련된 주요 분야들의 최근 및 미래 동향을 잘 조사 분석하고 예측해야 한다. 이후 그 분야가 필요로 할 창의적이고 유망한 자기기술을 도출할 수 있다면 그 기술은 미래에 연구개발해야 할 자기기술이 될 것이다. 물론 그 미래기술이 창의성은 물론 산업에의 응용가능성도 큰 임팩트있는 기술이라야 혁신적인 자기기술로 부상할 수 있을 것이다.

다음에는 위와 다른 측면으로 전고[3]에서 제시했던 4차 산업혁명의 6대 주요기술과 미래직업을 제시한 표를 자기기술의 응용가능성을 감안하여 다시 분석 정리하여 <Table V>에 나타내었다. 이 표에 제시한 미래직업 중에는 현재의 자기기술과 직접적인 관련이 없어 보일지라도 간접적으로는 관련이 있다고 생각한 직업들도 적시하였다. 예를 들어 스마트 팜 구축자나 정밀농업 엔지니어는 일견해서 자기기술과 관련이 없어 보일 수도 있지만 자기기술이 많이 포함된 로봇이나 드론 등이 핵심역할을 할 것이므로 포함한 것이다.

이렇게 자기기술과는 직접 관련이 없어 보이는 기술들을 잘 분석하여 적용 실마리를 찾을 때 새로운 미래직업을 도출할

수 있을 것이다. 자기기술을 적용할 경우가 기존 다른 기술보다 훨씬 효율적이고 고성능을 구현할 때만이 새로운 자기기술의 응용분야가 생겨나게 된다. 따라서 새로운 연구개발분야를 생각하고 있는 자기학 관련자들은 이런 미지나 미개척 측면이 무엇인지를 심도있게 고민할 필요가 있다.

다. 미지의 유망 자기기술

현재에는 존재하지 않는 미지의 유망기술을 예상하고 예측하는 것은 무척 어려운 일이다. 이 절에서는 미래예측기법의 대표적인 두 방법인 하향식과 상향식 방법으로 구분하여 유망기술을 도출하는 방법을 간단히 소개하고자 한다. 이후 자기학 전공자들이 이 방법들을 확대, 확장하여 자신의 분야에 맞는 자기기술의 도출을 기대한다.

1) 하향식(Top-down) 접근

하향식 접근법은 경제, 사회, 산업, 기술 등과 같은 세상의 큰 변화를 먼저 예측하고, 그 세상 속에 속한 분야들이 큰 변화에 맞추어 어떻게 변화할지를 계속 좁혀가면서 예측하는 방법이다. 20세기에 큰 다국적기업들은 대부분 나름의 미래예측기법을 개발하여 기업의 미래 비즈니스 기획에 활용하였다. 지면관계상 본고에서는 근래에 발간된 최윤식의 ‘2030 대담한 도전’[7]에 소개된 거시적 분석법을 중심으로 기술하였다.

최윤식은 미래산업전쟁에서 승리할 수 있는 전략을 짜기 위해 알아야 할 두 가지 패턴으로 돈의 흐름에 대한 패턴과 신시장에 대한 패턴을 제시하였다. 돈의 흐름은 주로 금융부문을 활용하여 전세계 경제변화 패턴으로 설명하였고, 신시장(신산업)이 형성되는 패턴은 신기술 발명단계, 보조기술 발명단계, 시장 발명단계, 시장 전성기 단계, 새로운 문제단계 등 5단계로 나누어 분석하였다.

이 5단계의 패턴이 진행되면 기존 시장이나 산업의 경계가 파괴되고, 판 전체가 바뀌는데 이 때 주도권을 잡기 위한 전략수립을 위한 첫 번째 작업으로 미래산업을 5개의 공간과 5개의 군으로 나누어 생각하는 방안을 최윤식은 제시하였다. <Table VI>에 최윤식이 제시한 5개의 공간과 5개의 군으로 구성된 매트릭스를 나타내었다. 그는 미래산업의 승부는 가로축에 나타낸 손, 자동차, 몸, 길, 건물의 5개 공간에서 결정될 것이라고 예측하였다. 미래산업에서 융복합을 통한 산업 경계

의 해체와 재구조화의 기본이 되는 5개 공간을 선점하는 자가 미래산업을 선점하게 되며, 공간을 지배하는 자가 미래의 소비자를 지배하게 된다고 주장하였다.

‘손’을 지배하려면 디바이스, 운영체제, 가상 생태계를 주도하는 세 가지 능력을 갖추어야 한다. 1980년대부터 2010년까지 20년 이상 세계 핸드폰시장을 장악했던 노키아사가 2007년 애플사가 개발한 스마트폰(iPhone)에 무력하게 쓰러진 것을 기억하고 있을 것이다. 애플사는 기존 폴더폰을 중심으로 하는 핸드폰 대신 iPhone에 터치패널 등 새 디바이스 및 iOS 운영체제 채용, 앱스토어를 중심으로 한 가상 생태계 구축을 통해 순식간에 핸드폰시장의 판을 바꾼 것이다. iPhone 등장 후 10년이 지난 지금 스마트폰의 기술은 점진적인 변화를 보이고 있다. 따라서 우리나라의 삼성전자가 위의 세 요소들을 만족하는 혁신적 지능폰을 선도적으로 개발할 수 있다면 향후 지능적 모바일 커뮤니티를 장악하고 세계 최고를 계속 구가할 수 있을 것이다.

앞으로 도래할 후기 정보화사회에서는 가상의 학교, 정당, 기업, 시장 등이 ‘3차원 지능적 모바일 네트워크’ 안에서 만들어질 것이다. 현재의 앱스토어나 3차원 커뮤니티는 이 새로운 네트워크의 전조에 해당한다. 최윤식은 미래의 ‘자동차’가 전기자동차 기술과 무인자동차 기술이 결합되면서 이 3차원 지능적 모바일 네트워크의 대표적인 디바이스가 될 것으로 주장하였다. 지금 전세계 자동차기업들이 치열한 기술경쟁을 벌이고 있는 이유가 미래의 새 네트워크 주도권전쟁의 승자가 되기 위한 것이며, 자동차전쟁은 스마트폰전쟁보다 더 크고 치열할 것으로 예상된다.

세 번째 공간은 ‘몸(Human body)’이며 웨어러블 디바이스들이 그 예이다. 네 번째는 ‘길(Way)’이며, 다섯 번째는 ‘건물(집과 사무실)’이다. 이 세 공간은 손과 자동차에 비해 아직 혁신적 동력이 약한 편이다. 하지만 건물의 모습과 역할, 본질이 바뀌면서 건물을 중심으로 직간접적으로 연결된 제품과 서비스의 업도 재규정될 것이다. 길은 도시의 짓줄이고, 도시와 도시를 연결하는 파이프이다. 길은 땅 위에만 있지 않고, 하늘, 바다속, 땅속에도 존재하게 될 것이다. 우주에도 길이 생길 것이고, 현실보다 가상에 더 많은 길이 생길 것이다.

Table VI. Matrix of 5 spaces and 5 groups suggested by Y. S. Choi [7].

	손	자동차	몸	길	건물
하드웨어군(부품/소재)	한, 일, 중, 대만 경쟁	유럽, 일본의 시장 점유	미국기업의 기술 선점		
소프트웨어군	미국기업의 기술 선점				
플랫폼군	미국기업의 시장 선점				
콘텐츠군					
완제품군 (예시)	삼성 선방 (스마트폰)	미, 일, 유럽의 한국 전체 (무인자동차)	(웨어러블기기)		

그리고 미래의 도시는 점차 하나의 컴퓨터처럼 변해갈 것이다.

다음에는 <Table VI>의 세로축에 있는 5개 공간을 채울 유무형의 사물들이며, 최윤식은 그 사물을 하드웨어, 소프트웨어, 플랫폼, 콘텐츠, 완제품 등 5개 군으로 분류하였다. 이 표의 칸 안에 있는 내용은 선점, 점유, 견제 등 우리보다 선진국들의 동향이나 위치를 나타낸 것으로 개발전략을 수립하는데 도움을 주는 것이다.

이 표를 보면 손과 자동차는 상당부분 채워져 있는데 반해 몸, 길, 건물은 대부분 비어있다. 이는 이 분야는 아직 주도적 기술이나 기업이 등장하지 않은 것을 의미하므로 앞으로 한국에게도 이 분야에서 큰 기회가 있다는 것을 시사하고 있다.

자기기술의 대부분은 <Table VI>의 세로축 중 부품 소재가 중심이 된 하드웨어군에 속하게 된다. 스마트폰, 미래자동차, 웨어러블기기 등의 하드웨어는 다음과 같이 열 가지 정도의 공통된 모듈을 가지고 있다. 감각장치, 시각장치, 감지장치, 조향장치, 화면장치, 몸통장치, 동력장치, 동력전달장치, 연료 및 저장장치, 안전 및 안락장치 등 기타 장치가 그 모듈들이다.

하드웨어군은 상기 열 가지 모듈을 만드는데 사용되는 부품과 소재들이다. 예를 들어 감각장치는 감각센서와 동작센서 등으로 나뉘는데 감각센서는 다시 시각, 촉각, 후각, 미각, 청각 센서 등이 있다. 동작센서는 자이로스코프, 가속도, 압력, 초음파, 지자기, GPS 센서 등 다양한 센서들이 있다. 이런 기술은 사물인터넷산업이나 자동차, 로봇산업에서도 핵심부품 기술이다. 이들 센서류에 자기기술을 어떻게 응용할 것인지 찾아낸다면 미래 자기기술과제를 도출하게 되는 것이다.

이런 방식으로 5가지 공간에 활용될 수 있는 다양한 기능을 가진 새로운 자기 부품/소재들에 관한 아이디어, 소재, 공정 등을 탐색하여 개발한다면 자기기술이 4차 산업혁명시대에 핵심 하드웨어를 선점할 수 있게 될 것이다.

2) 상향식(Bottom-up) 접근

현재에는 응용과 별 상관이 없다고 여겨지는 현상과 과학적 이론이나 기초기술을 기반으로 아이디어 창출, 타 기술과의 접목 등을 통해 새로운 응용기술을 개발하는 방법이 상향식 접근법이다. 자기학의 역사에서 남북극을 상시 가리키는 현상을 응용한 나침반, 패러데이법칙 등 전자기학을 응용한 동력변환장치 등이 대표적인 것들이다. 그렇지만 이 접근법은 실제 산업 응용까지 성공확률이 그다지 높지 않고, 체계적으로 시스템화 하기가 곤란해서 지금까지 천재들이나 기발한 발명가의 영역으로 있었다. 그렇지만 우리가 과학기술분야의 선도자(First mover)가 되기 위해서는 이 접근법을 숙지하고 잘 활용할 필요가 있다.

다음에는 에너지기술(ET), 정보기술(IT), 바이오기술(BT)에서 상향식 접근법의 예시를 하나씩만 들어 보도록 한다.

무선통신시대가 되면서 우리 주변공간에는 엄청난 전자파들이 발생하고 있으며, 이 전자파에는 필히 전기에너지가 포함되어 있다. 이렇게 낭비되는 전자파에서 에너지를 포집할 수 있다면 적지 않은 전기에너지를 얻을 수 있을 것이다. 미국 워싱턴대의 시암 골라코타가 착안한 인터넷을 활용해 주변공간에 흩어져 있는 전자파를 전자기기의 에너지원으로 이용하는 기술개발인 ‘전력의 연결성’을 이용한 기술이 이의 대표적인 기술 중 하나이다[8]. 앞으로 통신분야에서 주파수가 높아질수록 발생하는 에너지가 많아질 것이고, 자동차 무선충전기술의 채용확대, IoT 센서들의 급성장, 우주공간에서 만든 전력의 이동 등 새로운 전파에너지들을 활용하는 에너지기술이 필요할 것이다. 이 때 전기-자기변환이나 고주파 응용 등에 자기학과 기술을 접목한다면 새 에너지원의 창출에 큰 기여를 할 것이다.

미래에 가상현실을 이용한 게임이나 전산산업 등에서 필요한 헤드마운트 디스플레이(HMD)의 경우 빠르게 공간 이동을 한다면 큰 부대시설이 필요한 기존 GPS 기능을 활용하기 곤란하다. 이 경우에는 HMD에 3차원 자기센서가 부착되어 활용될 가능성이 큰데 아직은 머리가 어지럽고 고해상도의 가상현실을 구현하기 어렵다. 이 경우에 새로운 자기이론을 응용한 더 혁신적인 자기센서기술을 개발한다면 미래 HMD의 핵심기술을 확보할 수 있을 것이다.

병원에서 신체부분을 고해상도로 보는 데는 큰 덩치의 자기공명장치(MRI)가 많이 사용된다. 이 MRI는 고가, 큰 용적, 긴 측정시간, 소음 등이 문제가 된다. 만약 새로운 자기원리를 활용하여 소형, 저가, 짧은 시간 측정을 할 수 있다면 획기적인 기술이 될 것이다. 큰 자석을 대체한 자기원리를 적용하여 포터블이 가능한 MRI를 만들 수 있다면 더욱 혁신적인 의료기기가 등장할 수도 있다.

1차 산업혁명은 열역학이 발달해서 증기기관을 만들 수 있게 한 ‘증기혁명’, 2차 산업혁명은 19세기 중반에 확립된 전자기학을 기본원리로 한 ‘전기혁명’, 3차 산업혁명은 고체물리학의 대표인 트랜지스터가 컴퓨터와 접목하면서 촉발한 ‘정보혁명’으로 볼 수 있다[9]. 4차 산업혁명의 핵심인 인공지능과 로봇은 첨단 정보통신기술(ICT)과 물리학, 생명과학, 신소재기술 등에 뿌리를 두고 있으며, 아마도 후세에 ‘융합혁명’ 같은 이름으로 불리워지지 않을까 생각된다.

본고에서는 먼저 자기학 및 기술의 전체 역사를 조망한 후 2차 산업혁명과 3차 산업혁명 시대에 자기기술이 이 두 산업혁명에 공헌한 바를 정리하였다. 마지막으로 4차 산업혁명시대에 자기기술이 전통 주력분야 유지, 대세분야 응용, 미지 유망분야 창출 등 세 형태로 산업혁명에 기여할 것으로 예상하였다. 본고가 자기학 연구자들에게 미력하나마 기여하기를 기대하고 싶다.

References

- [1] 'The Future of Jobs', Report of World Economy Forum, Jan. (2016).
- [2] H. J. Kim, J. Korean Magn. Soc. **27**, 104 (2017).
- [3] H. J. Kim, J. Korean Magn. Soc. **27**, 153 (2017).
- [4] M. Shindo, NIKOLA TESLA 1856-1943, Kougakusha, Japan (2002).
- [5] Y. J. Sung, 'Success factor of the 1st and 4th industrial revolutions', GRI Newsletter Vol. 31, August 10 (2017).
- [6] Maeil Business Newspaper, July 30 (2017).
- [7] Y. S. Choi, 2030 Bold Challenge, Knomad, Seoul (2016).
- [8] Korea Economic Daily, Sept. 15 (2017).
- [9] D. C. Kim, Electronic Times, September 28 (2017).