

유도용해로 인버터 기술

유 효 열, 심 은 용, 정 대 환, 김 상 중, 강 재 봉
(다원시스 연구소)

1. 서론

유도용해로는 전동발전기를 사용한 방식이 처음 선을 보인 이후 철강 산업과 기계 산업의 발달에 따른 수요 증가와 대용량 SCR의 개발로 인하여 본격적으로 보급되기 시작하였다. 기술의 발달에 따라 용해로의 방식도 전동발전기, 상용주파수의 저주파 유도로, 채널로에서 사용이 편리하고 에너지 밀도가 높은 중주파(180~3KHz) 유도로 방식으로 변천되었다.

선진 설비 제작 사에서는 10MW, 20톤 이상의 용해설비도 제작되고 있다. 선진국에서는 산업의 무게 중심이 IT기반의 지식산업으로 옮겨감에 따라 용해로 설비의 신규수요도 중국, 인도를 비롯한 공업화가 급격히 진행되고 있는 신흥공업국으로 옮겨가고 있다.

국내는 1980년대 자동차 및 조선업의 급격한 발전과 호황에 힘입어 유도용해로의 수요가 폭발적으로 증가함에 따라 외국설비들이 대거 국내시장에 도입되었고 국내에도 부리전기와 같은 제법 규모 있는 업체가 생겨나 1MW, 3톤 로까지 상용화되는 단계에 이르렀었다. 그러나 95년 이후 경제성장의 둔화에 따른 수요 감소와 뒤이은 외환위기를 거치면서 주요 설비 제작업체가 대부분 문을 닫게 되었다. 2000년 이후 다원시스, 피에스텍과 같은 업체들이 앞선 전력전자 기술을 바탕으로 유도용해로 시장에 진출하면서 국내의 유도용해로 기술은 새로운 전기를 맞고 있다.

한편 국내 주조산업은 560여 개 제조업체가 연간 168만 톤(3조 7,000억원)을 생산하는 세계 11위 생산국으로서 약 10만여 명이 가까운 인력이 직, 간접적으로 종사하고 있고 약 1000대 가량의 유도용해로가 보급되어 있다. 국내의 주조산

업 역시 3D 산업으로 인식되어 인력수급의 어려움을 겪고 있으며 이 때문에 업체가 점차 통합, 대형화되고 있고 수요 설비도 1MW급 이상의 대형으로 옮겨가고 있다. 또한 에너지 절감, 깨끗한 작업 환경에 대한 요구와 화석연료의 사용규제, 화석 연료비 상승 등으로 인하여 대형 유도용해로 설비 수요는 당분간 지속될 전망이다.

유도용해 설비는 크게 인버터, 로체, 냉각장치로 구성된다. 로체와 냉각장치에는 큰 기술적인 난관은 없어 보인다. 그러나 인버터는 제작과 운용과정에서 익혀야 할 경험적인 지식들이 많이 요구된다. 다행히 국내에는 외국의 대형 유도용해 설비를 설치하고 보수해 온 오랜 경험을 가진 인력이 다수 있으며 국내의 앞선 전력전자기술과 이들 인력을 잘 활용하면 단기간에 선진기술을 습득하는 것은 그리 어렵지 않을 것으로 판단된다.

본 논문에서는 유도용해로용 인버터 기술을 주제로 관점에서 분류하고 비교할 것이며 최근 들어 시도되고 있는 인버터 기술들을 소개하고자 한다.

2. 본론

2.1 용해로 부하의 이해

그림 1은 유도용해로의 구조를 보여준다. 용해될 금속은 내화물로 둘러싸여 있고 내화물 밖에는 가열코일이 원통 주위를 따라 솔레노이드 형태로 감겨있다. 가열코일은 동 파이프 모양을 하고 있으며 내부에 냉각수를 흘려서 코일 자체에서 발생하는 도통손실에 의한 열과 용융금속으로부터 내화재를 통하여 전달되는 열을 식히도록 되어있다. 가열코일에 교류전류

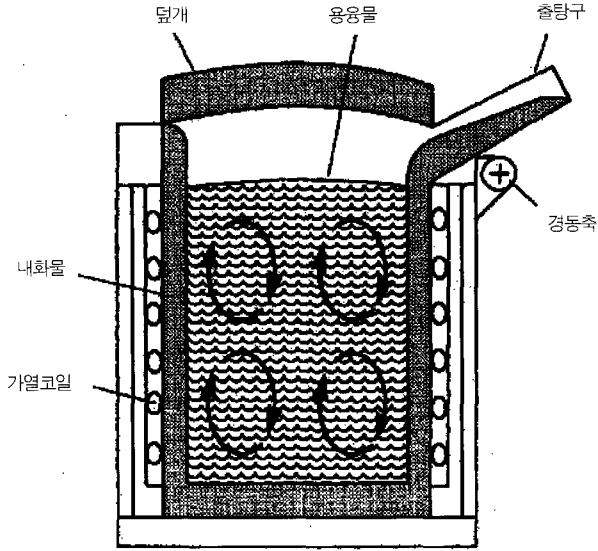


그림 1 유도용해로의 구조

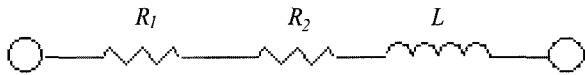


그림 2 유도용해로의 간략화 된 등가회로

를 돌리면 변압기 원리에 의하여 내부 금속의 원주방향 표면에 전류가 유도되고 이 전류가 용해될 금속에 직접 흘러 열을 발생하게 된다. 일반적인 변압기와 달리 유도용해로는 2차가 단락된 변압기라 할 수 있으며 공심변압기로서 자화전류가 크고 1차 축과 2차 축간의 누설 인덕턴스가 큰 변압기라고 할 수 있다. 누설 인덕턴스는 가열코일과 내부 금속 사이에 내화물로 채워지는 공간으로 인하여 발생하는 것으로서 불가피한 것이다. 가열코일 단자에서 바라본 전기적인 특성은 그림 2와 같이 인덕턴스와 저항이 직렬로 연결된 Q(Quality Factor)가 5에서 12사이의 부하로 보인다. R_1 은 가열코일의 자체 저항이며 R_2 는 용해될 금속의 등가 저항이다. 처음 장입 시에는 블록형태의 선철 혹은 부정형의 금속 덩어리를 장입하게 되므로 금속 덩어리끼리의 접촉 저항으로 인하여 등가저항이 커져 Q값이 최소치가 되며 완전히 녹았을 경우 10~12정도의 값이 된다. 또 Q값은 철보다는 비철일 경우가 더 크고, 로의 내부를 완전히 채우지 않는 경우가 완전히 채운 경우보다 더 크게 된다. Q값이 클수록 같은 전력을 공급하는데 더 많은 전류를 필요로 하게 되며 따라서 효율은 떨어지게 된다.

2.2 유도용해로용 인버터 방식

부하의 Q값이 크다는 것은 로체 부하의 역률이 낮다는 것을 뜻한다. 따라서 역률 보상용 공진 콘덴서를 부하와 직렬

혹은 병렬로 연결하여 인버터의 부담을 줄여 줄 필요가 있다. 대용량 용해로용 인버터는 인버터부와 역률보상용 공진 콘덴서 및 부하와의 연결방식에 따라 크게 병렬공진 방식과 직렬공진방식으로 나눌 수 있다.

2.2.1 병렬공진 방식

(가) SCR 병렬공진 방식

병렬공진 방식은 그림 3에 도시한 바와 같이 인버터와 부하코일, 공진 콘덴서가 병렬로 연결 되어 있다. 인버터는 공

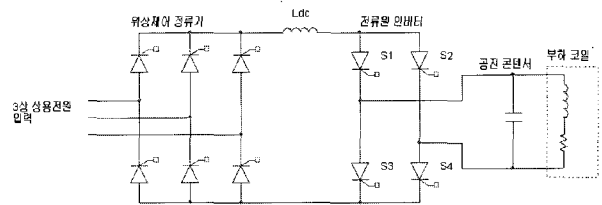


그림 3 SCR 병렬공진 방식의 주회로

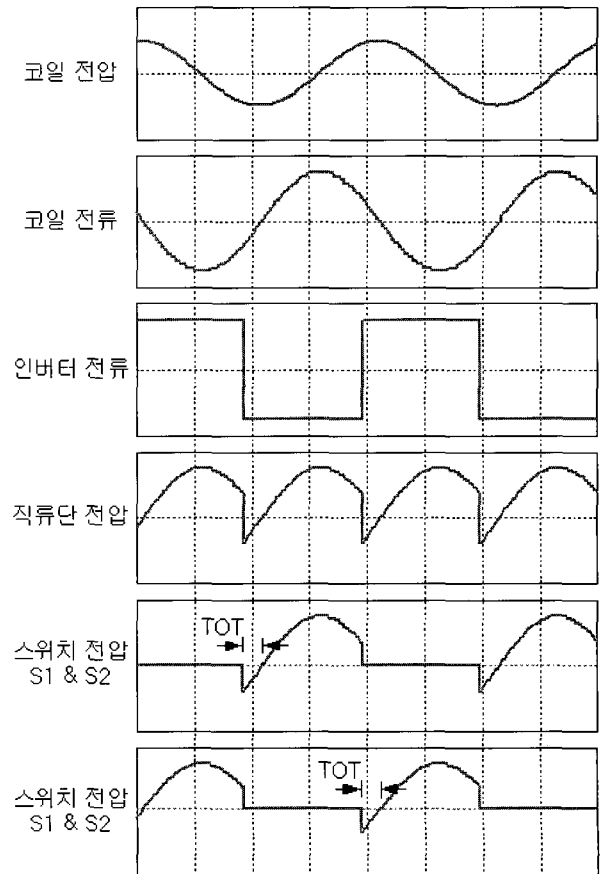


그림 4 SCR 병렬공진 방식의 파형

진 콘덴서에 병렬로 연결되므로 전류원의 형태이어야 한다. 따라서 3상 상용전원을 SCR을 사용하는 위상제어 정류기를 통하여 정류한 후 비교적 큰 직류 리액터(Ldc)를 사용하여 직류 전류원을 만들고 이를 다시 전류원 인버터를 사용하여 교류 전류원을 만들어 부하에 공급하는 구조로 되어 있다. 그림 4는 각 부 파형을 보여준다. TOT(Turn-Off-Time) 시간은 전류가 흐르던 SCR이 꺼져서 역저지 능력을 회복하기 위하여 필요한 시간이며 이 값이 소자에서 요구되는 시간보다 짧을 경우 꺼져야 할 SCR이 꺼지지 않는 문제가 발생할 수 있다. 용해로용 인버터는 통상 3 KHz를 넘지 않지만 10 KHz까지는 SCR을 사용할 수 있다. SCR을 인버터에 사용하는 경우에는 병렬공진 부하의 공진 주파수보다 높은 주파수에서 운전되어야만 부하 공진에 의하여 SCR이 스스로 꺼질 수 있다. 그림 4에 보인 바와 같이 인버터 출력전압(1번째 파형)이 정현파인 반면 인버터의 출력전류(2번째 파형)는 방형파이고 인버터 전류는 부하 코일과 공진 콘덴서사이를 흐르는 전류의 약 1/Q배가 된다. 직류 리액터 후단인 직류단 전압(4번째 파형)은 TOT가 0이라면 정현파를 정류한 것과 같은 모양이 되며 TOT시간동안 즉, 스위칭 시점부터 출력전압이 0점을 지날 때까지 (-)전압을 갖게 되어 SCR이 꺼질 수 있게 된다. 전력의 조절은 입력단의 위상제어 정류기의 도통각을 제어하여 직류 리액터에 흐르는 전류를 조절함으로써 이루어진다. 출력 전력이 최대가 아닐 때는 인버터의 주파수를 제한된 범위 내에서 변화시켜 입력 측의 역률을 다소 개선할 수 있다. SCR에 인가되는 최대 전압은 출력 전압과 같다. 따라서 SCR의 전압 부담을 줄이기 위하여 직렬공진의 경우보다 부하전압은 낮고 전류는 커져 공진 탱크와 부하간 거리가 길 경우 버스바의 도통손실이 커진다. 이러한 손실을 줄이기 위하여 대형 설비에서는 공진 콘덴서를 전원 장치 패널과 분리하여 로케 가까이 별도로 설치하기도 한다. SCR로 인버터를 구성 할 경우 별도의 시동용 SCR과 콘덴서가 있어서 기동 시에 초기발진을 시킨 후 인버터 SCR이 동작하기 시작한다. 역률 면에서 보면 입력 측에 위상제어기를 사용하기 때문에 전 용해과정 동안 역률을 높게 유지하는 것이 불가능하다. 역률 보상기를 설치하여 역률을 개선하더라도 용해 과정에서 역률이 변하기 때문에 간단한 역률개선용 콘덴서로는 역률보상이 어려우며 수시로 역률 보상 콘덴서의 탭을 변경하는 방식이나 인버터를 사용하는 역률보상기가 필요하다. 병렬공진 방식의 최대 장점은 반도체 소자에 공진 전류의 1/Q 만큼의 전류만 흐르게 되므로 가격 면에서 직렬공진 방식에 비하여 유리하다. 그러나 역률 보상기를 포함할 경우에는 병렬공진 방식이 가격 면에서 유리하다고는 할 수는 없다. 위상 제어 정류기와 인버터 사이에는 크기가 크고 무거운 직류 리액터를 필요로 하는 것도 단점으로 지적된다.

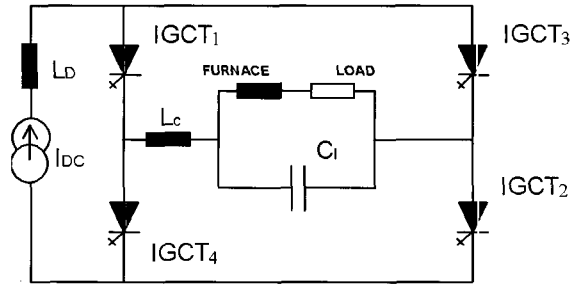


그림 5 IGCT를 이용한 병렬공진 인버터

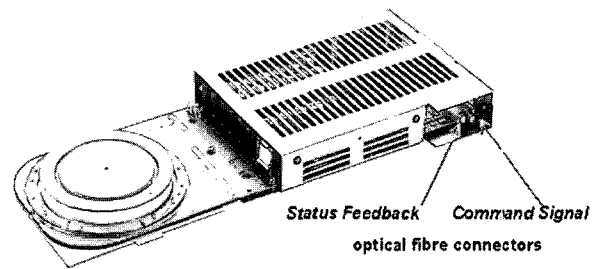


그림 6 IGCT의 외관(ABB 반도체)

(나) IGCT 병렬공진 방식

앞에서 지적한 바와 같이 SCR을 사용한 병렬공진 인버터는 고속 SCR의 내압 때문에 부하의 전압을 크게 할 수 없다. 비교적 최근에 개발된 ABB사의 IGCT는 강제 소호 소자로서 이를 이용하여 병렬공진 방식의 인버터를 구성할 경우 시동 장치가 필요 없게 되고 내전압이 6000 V까지 상용화되어 있어 부하전압을 직렬공진 방식만큼 높일 수 있어 병렬공진 방식의 스위칭 소자로서 적당하다. IGCT는 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

- TOT 시간의 제약이 없다
- 스위칭 손실이 적다(IGBT보다 작다)
- 도통손실이 적다
- 내전압이 크다(~6000V)
- 게이트 드라이버가 같이 공급된다

2.2.2 직렬공진 방식

(가) SCR 직렬공진 방식

직렬공진 방식은 그림 7에 나타낸 바와 같이 직류 평활용 콘덴서가 있고 그 후단에 전압원 인버터가 있으며 공진 회로가 인버터와 직렬로 연결되어 있는 것이 특징이다. 인버터에 사용되는 소자로는 고속 SCR이 사용된다. SCR이 사용될 수 있는 이유는 인버터를 공진 주파수보다 낮은 주파수에서 운전할 경우 직렬공진에 의하여 전류가 역으로 흘러 SCR이 꺼질 수 있기 때문이다. SCR은 비교적 높은 전압과 전류를 스

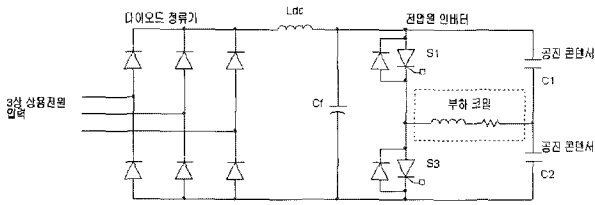


그림 7 SCR 직렬공진 인버터 주회로

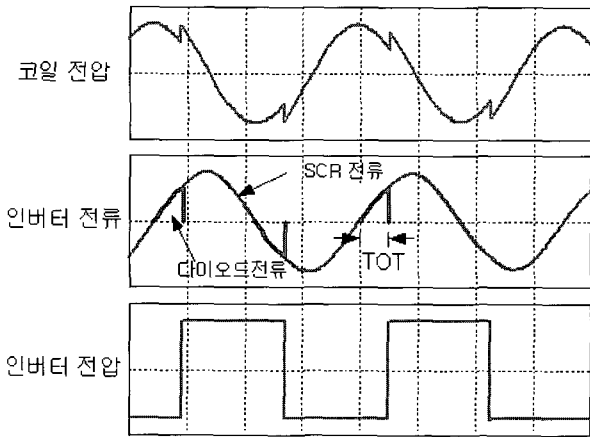


그림 8 SCR 직렬공진 인버터 파형

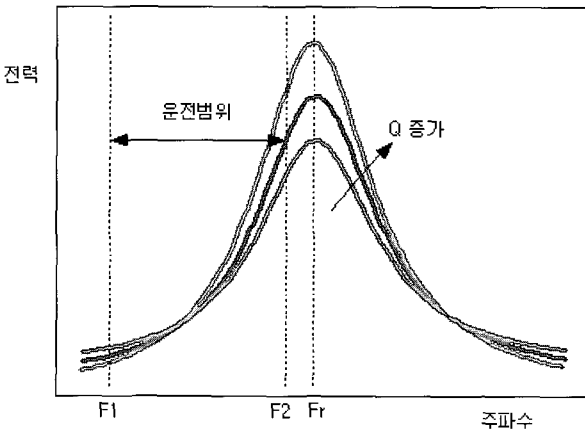


그림 9 주파수와 전력과의 관계

위칭할 수 있기 때문에 대용량에 적합하다. SCR을 사용하여 인버터를 구현할 경우 병렬공진에서와 마찬가지로 SCR이 역전압 저지 능력을 갖기 위해서 TOT(Turn-Off Time)가 필요하며 만일 TOT가 요구되는 값보다 짧을 경우 인버터의 SCR이 둘 다 켜지는 암 단락이 일어난다. TOT시간은 또한 SCR에 역병렬로 연결된 다이오드로 전류가 흐르는 시간이다. 처

음 용해 물을 장입하면 금속 덩어리들의 접촉저항 때문에 등가저항이 커지게 된다. 이 때 그림 9에서 운전주파수가 F_r 에 근접해도 전력이 설정 치에 못 미칠 경우 TOT가 짧아진다. 일반적으로 SCR의 용량이 커질수록 요구되는 TOT시간은 길어진다. 따라서 동작주파수가 낮은 대용량에서는 요구되는 TOT가 긴 대용량 SCR을 사용하는 것이 가능하다. 통상 그림 7과 같이 인버터는 Half Bridge 형태로 구성되는데 이는 직렬공진 특성상 부하전압이 Q배 크게 증폭되어 공진 회로에 작은 전압이 인가되어도 부하에는 충분한 전압이 발생하기 때문이다. 그림 7에서 두개의 공진 콘덴서는 부하 측에서 볼 때 병렬로 보이며 부하의 한쪽에 연결된 공진 콘덴서 중간점 전압은 직류전압보다 큰 전압으로 공진한다. 그림 9는 주파수와 출력 전력과의 관계를 보여준다. 운전주파수가 낮을 때는 전력이 적으며 공진 주파수에 근접할수록 증가한다. 제어기는 사용자가 요구하는 전력이 되도록 스스로 운전 주파수를 변경한다. 이를 De-tuning제어라 하는데 주파수만으로도 전력의 범위를 거의 0부터 100%까지 조절하는 것이 가능하기 때문에 입력 측 정류기는 위상제어가 필요 없고 따라서 97%(변압기의 누설 인덕턴스와 배선 인덕턴스 때문에 100%가 안 된다)정도의 고 역률을 얻을 수 있다. 직렬공진에서는 그림 8에서 보는바와 같이 병렬공진의 경우와는 반대로 인버터 전류는 정현파이며 인버터전압은 방형파가 된다. 부하 전류가 모두 SCR을 통하여 흐르는 것이 최대 단점이며 충분한 전류를 흘릴 수 있도록 여러 개의 SCR을 병렬로 연결하여 사용한다.

(나) IGBT 직렬공진 방식

최근 들어 대용량 IGBT가 개발되면서 이를 이용한 인버터도 제작되고 있다. 그림 10은 2400A급 대용량 IGBT를 사용하여 구성된 인버터이다. 인버터의 전류부담을 줄이기 위하여 2개의 H-bridge로 구성되었고 부하와의 임피던스 정합과 병렬연결을 위하여 절연변압기를 사용하였으며 두개의 인버터의 균일한 전류부담을 위하여 전류평형용 변압기를 사용하였다. 인버터의 전류부담을 줄이고 전류가 0인 시점에서 스위칭함으로써 스위칭 손실을 줄이기 위해 인버터는 항상 공진 주파수에서 동작하며 전력 조절은 입력단의 위상제어 정류기로 직류전압을 가변함으로써 이루어진다. 이 방식은 SCR을

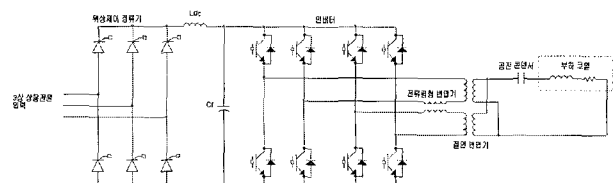


그림 10 IGBT를 이용한 직렬공진 방식 주회로

사용하는 인버터에 비하여 각 종 스너버 회로가 대폭 간소화 되었지만 정격에 해당하는 고주파 절연 변압기가 필요하다는 것과 위상 제어를 사용하여 역률이 낮다는 것이 단점이다.

3. 결론

현재까지는 유도 용해로용 인버터에는 고속 SCR을 사용하는 직렬공진 방식과 병렬공진 방식이 주를 이루고 있다. 두 방식 모두 장점과 단점을 가지고 있으나 역률과 그에 따른 전기요금을 감안하면 직렬공진 방식은 인버터 가격은 다소 높아지나 역률이 높아 운용 시 전기료 비용이 적게 드는 반면 병렬공진 방식은 인버터 가격은 저렴한 대신 역률이 낮아 전기료 비용이 많이 든다. 따라서 선진국일수록 직렬공진 방식을 선호하는 편이다. 현재는 대용량의 반도체 소자가 과거보다는 비교적 저렴한 가격에 공급되고 있어 인버터 가격이 전체 설비 비에서 차지하는 비중이 낮아졌고 역률 보상장치를 포함하면 병렬공진 방식이 가격에서 절대적으로 유리하지는 않다. 최근 들어 IGBT나 IGCT와 같은 강제 소호능력이 있는 대용량 소자들이 개발되면서 이를 유도용해로용 인버터에 적용하는 것이 시도되고 있지만 SCR을 사용하는 방식에 비하여 절대적인 장점이 부족하여 당분간 SCR을 대체하기는 어려울 것으로 전망된다. □

참고 문헌

- [1] Chester A. Tudbury, "Basics of Induction Heating", vol.1, 1960.
- [2] S. Zinn and S. L. Semiatin, "Elements of Induction Heating", Electric Power Research Institute, Inc., 1988.
- [3] M.G. Lozinskii, "Industrial Application of Induction Heating", Pergamon Press, 1969.
- [4] Bendaas, M.L., Ferrieux, J.P., Rognon, J.P., "Modelling and control of power supplies for induction heating", Power Electronics and Applications, vol.4, pp. 27-34, 1993.
- [5] 김봉완, 이계완, "유도로의 주철용해에 있어서 에너지 절감", 구조공학회지 제11권 제1호, 1991.
- [6] 유효열, 심은용, 정대환, 강재봉, 강호현, 김왕래, "2500kW 유도용해용 직렬공진형 인버터 개발", 2005 하기 전력전자학술대회 논문집, pp. 366-369.

《제 자 소개》



유효열(柳孝烈)

1989년 한양대 전자공학과 졸업. 1991년 KAIST 전기 및 전자공학과 석사. 1995년 KAIST 전기 및 전자공학과 박사. 1995년 ~1998년 대우중공업 철도차량연구소 선임연구원. 1998년~현재 (주)다원시스 연구소장.



심은용(沈銀用)

1990년 한양대 전기공학과 졸업. 1992년 동대학원 전기공학과 석사. 1992년~1998년 대우중공업 철도차량연구소 주임연구원. 1998년~현재 (주)다원시스 수석연구원.



정대환(鄭大煥)

1994년 수원과학대학 전자과 졸업. 1994년 ~1996년 청계기전 주임연구원. 2005년 한국산업기술대 전자공학과 졸업. 1996년~현재 (주)다원시스 선임연구원.



김상중(金相中)

1993년 동양공전 전자과 졸업. 1993~1998년 코오롱엔지니어링 주임연구원. 2004년 한국산업기술대 전자공학과 졸업. 1998년~현재 (주)다원시스 선임연구원.



강재봉(姜載鳳)

2000년 동아대 전기전자컴퓨터공학부 졸업. 2000년~현재 (주)다원시스 주임연구원.