

플라즈마 기술의 상업화 사례

<https://doi.org/10.5757/vacmac.5.4.13>

이상원

1. 서론

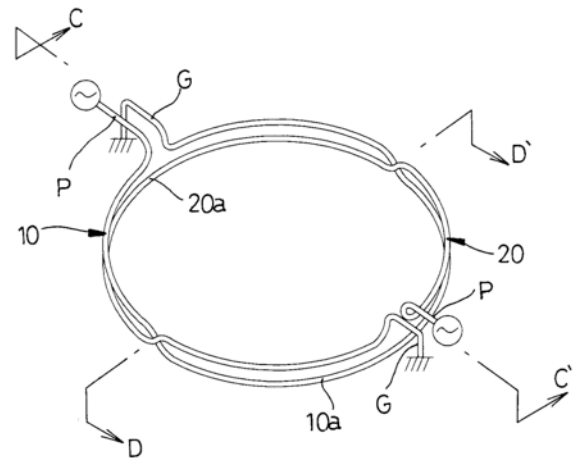
반도체 및 평판 디스플레이 제조 공정에는 플라즈마 기술이 널리 적용되고 있다. 식각 공정과 증착 공정이 대표적인 예이며, 이 외에 챔버 세정, 라디칼 생성과 같은 분야에서도 필수적인 기술이다. 이러한 플라즈마 공정을 수행하기 위해서는 전원공급 장치, ICP 안테나 및 CCP 전극과 같은 플라즈마 발생장치, 그리고 플라즈마의 특성이나 전기적 특성을 측정하기 위한 계측 장치들이 필요하다.

2000년대 초반에 이러한 장치들을 공급하는 국내 회사가 매우 적은 상황이었으며, 대부분 평가 단계에 머무르며 양산 시설에 공급한 사례는 더 적었다. 당시 같은 연구실 동료로 주축으로 회사(플라즈마트)를 창업하여 기술개발을 담당했는데, 각 장치들을 상업화하며 나타났던 문제들과 결과에 대해 공유하고자 한다.

2. 플라즈마 발생장치

그림 1 플라즈마트에서 개발한 ICP 발생 장치. 전기장의 분포를 균일하게 유지하기 위한 병렬구조를 볼 수 있다.

플라즈마를 이용한 박막 공정 장비에서는 플라즈마를 발생시키고 이로부터 발생된 이온이나 활성종을 이용해 공정을 수행한다. 플라즈마 발생장치가 가져야 할 특성은



[Fig. 1] 플라즈마트에서 개발한 ICP 발생 장치. 전기장의 분포를 균일하게 유지하기 위한 병렬구조를 볼 수 있다. [1]

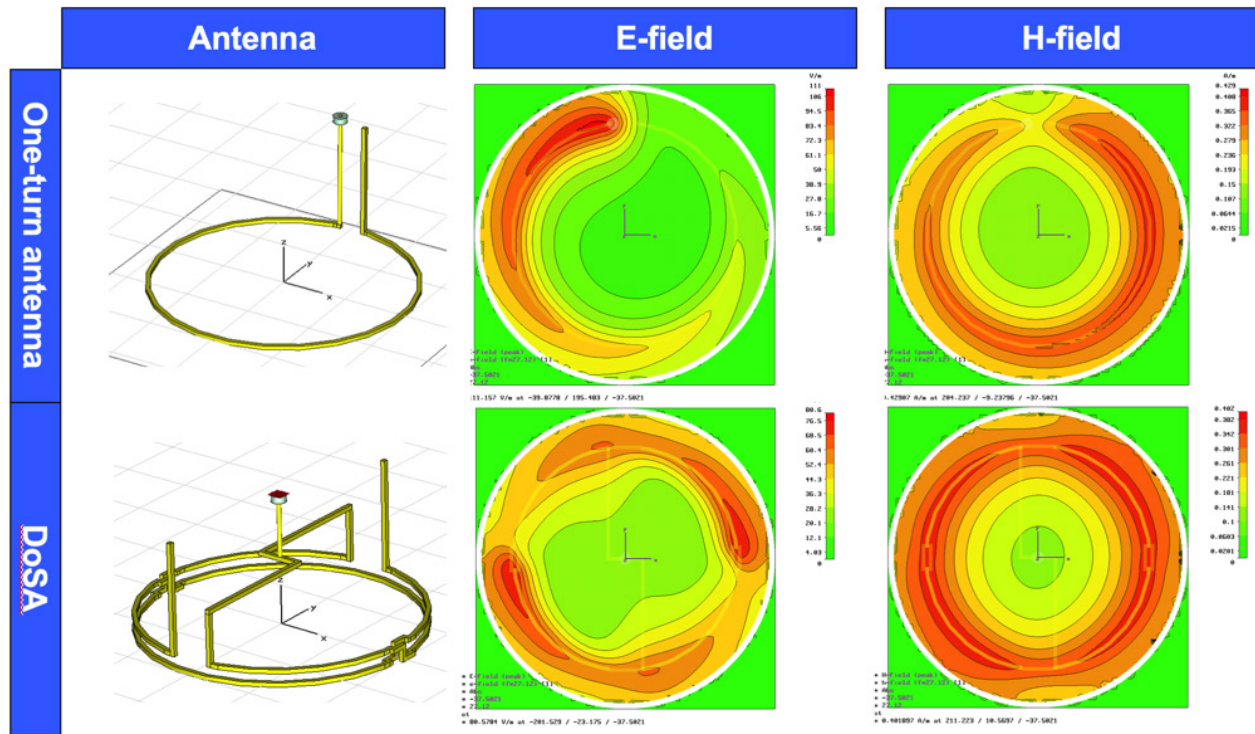
여러가지가 있으나, 당시에는 200 mm 웨이퍼보다 더 넓은 300 mm 웨이퍼 대응용 장비가 막 보급되던 시점이었기 때문에 균일도는 매우 중요한 특성이었다.

특히 ICP장비 개발 의뢰가 많았는데, ICP의 경우 안테나의 전력인가 위치와 접지 위치가 분리되어 있기 때문에 회전방향 대칭성이 확보되지 않아 균일도 확보가 쉽지 않았다. 이를 해결하기 위해 Faraday shield를 사용하거나, 다양한 형상의 안테나가 고안되었으나 국내 장비회사는 이러한 기술을 보유하고 있지 못한 실정이었다.



〈저자 약력〉

2005: KAIST 물리학과, 박사, 플라즈마 물리학 전공
 2002~2015 : (주)플라즈마트, 상무이사(최종), 연구개발 총괄
 2016 : MKS Korea, Director of engineering, MKS Korea power solution group의 연구개발 총괄
 2018~ : (주)이서, 전무, 연구개발 총괄



[Fig. 2] 일반 one-turn antenna와 플라즈마에서 개발한 DoSA의 전자기장 분포 비교. E-field/H-field 모두 균일한 분포를 보인다

플라즈마트에서는 여러 개의 안테나를 병렬로 연결하여 안테나의 전압이 분산되도록 배치한 ICP 안테나를 개발했고 공정장비 회사와 함께 공동개발을 수행했다.

하지만, 다음과 같은 이유로 인해 양산장비까지 이어지는 경우가 매우 드물었다.

(1) 공정 특성과 연계 부족

장비회사와 플라즈마트 모두 플라즈마 발생장치를 하나의 독립된 부품으로 인식하는 경향이 있었다. 하지만 공정장비는 플라즈마 발생장치 외에 수많은 부품들로 구성되며 각 부품들의 작동은 서로 다른 부품들에 영향을 미친다. 이러한 영향을 파악하고 개선을 하기 위해서는 동일한 환경에서 평가/개선이 이루어져야 하는데 비용의 문제, 그리고 서로 다른 회사에서 독립적인 개발이 진행되어 원활한 개발이 진행되기 어려웠다. 특히, 공정에서 사용하는 기체 중에는 반드시 scrubber와 같은 부가 설비가 필요한 경우가 많았으나 당시 플라즈마트의 규모에서 이러한 설비를 갖추기 어려웠기 때문에 주로 Ar과 같은 불활성 기체를 이용하여 평가했으며 당연히 실제 공정의 특성을 반영하기 매우 어려운 실정이었다.

(2) 발생장치가 탑재된 공정장비의 성능

플라즈마 발생장치는 공정장비를 이루는 수많은 부품 중 하나의 구성품이며, 장비는 하드웨어 뿐만 아니라 소프트웨어의 완성도, 유지보수 전략 등 모든 요소가 공정장비의 경쟁력을 결정한다. 플라즈마트의 기술력에도 한계가 있었으나, 2000년대 초기의 장비제조사 역시 ICP를 이용한 공정장비 개발능력에도 한계가 있었고, 당시 양산까지 이루어진 사례가 매우 부족했기 때문에 몇몇 사례를 제외하면 대부분 소량의 평가용 제품만 공급하고 대량 공급으로 이어지지 못했다.

위와 같은 문제로 인해, 플라즈마 발생장치를 부품으로 별도 공급하는 것은 한계가 있다는 점을 인식하여 2000년대 후반 부터는 플라즈마 발생장치 개발 프로젝트를 중단하고 기존 기술의 특허권 실시 또는 양도와 같은 형태로 전환했다.

3. 랑뮈어 프로브

랑뮈어 프로브는 플라즈마에 작은 금속 전극을 삽입하고, 전압-전류 특성을 측정하여 플라즈마 밀도와 전자 온도를 측정하는 장치이다.



[Fig. 3] 플라즈마에서 개발한 더블 랑뮈어 프로브 초기형 사진

당시 해외 생산업체 두 곳에서 판매하고 있었고, 국내에서도 이 제품들을 사용하고 있었다. 꽤 고가의 제품이 었기 때문에 널리 보급되지 못했으며, 그나마 기술지원이 부족했기 때문에 랑뮈어 프로브에 대해 전문적인 지식이 있어야만 제대로 사용할 수 있었다.

플라즈마 발생장치의 개발과정에서 플라즈마 밀도와 온도 측정은 필수였으며 장비제조사를 중심으로 수요가 매우 높았다. 창업 구성원들 대부분이 플라즈마 연구실에서 랑뮈어 프로브를 직접 제작하여 사용한 경험이 풍부했기 때문에 이를 상용 제품을 개발했다.

첫 제품은 더블 랑뮈어 프로브였다. 기존에 상용화된 제품은 모두 싱글 랑뮈어 프로브 기반의 장비였는데, 챔버 내부가 절연된 환경에서는 접지가 명확치 않아 측정이 어려웠다. 대부분의 양산 공정장비는 챔버 내부가 아노다이징 또는 Y2O3와 같은 절연체로 코팅되어 있었기 때문에 동일한 문제를 가지고 있었고, 이러한 환경에서 측정이 수월한 더블 랑뮈어 프로브를 상용화 했다.

개발 후 장비제조사를 중심으로 판매되고, 이후 개발한 싱글 랑뮈어 프로브 제품은 연구소나 학교 위주로 판매가 이루어졌다.

당시 국내 점유율이 꽤 높았으나 판매 이후 여러가지 문제점들이 나타났는데 세부 내용은 다음과 같다.

(1) 시장 크기의 문제

당시 국내 시장점유율이 매우 높았으나 판매 시작 후 2~3년이 지나자 바로 매출이 떨어졌다. 랑뮈어 프로브는 개발을 위해 사용하는 공용장비이기 때문에, 대개 한 회사에서 하나를 구입한다. 즉, 장비제조사에 하나씩 판매하고 나니 더 이상 수요가 없었던 것. 창업 초기에 시장의 요구만 고려하고 시장의 크기를 잘 가늠하지 못했기 때문에 나타난 문제였다.

(2) 공정장비와의 적합성 부족

랑뮈어 프로브는 사용 환경에 따라 측정의 신뢰도에 영향을 많이 받는 장비이다. 탐침에 전압을 인가하고 흐르는 전류를 측정하는 것이 기본이기 때문에, 탐침 표면에 저장체 또는 부도체가 증착되면 측정 신뢰도가 매우 낮아진다. 연구실과 같이 챔버 내부의 접지가 명확하고 아르곤과 같은 불활성 기체를 주로 사용하는 경우는 측정 신뢰도가 높지만, 공정장비와 같이 접지도 불명확하고 반응성 기체를 사용하는 환경에서는 랑뮈어 프로브를 사용하기 어려웠다.

(3) 기술지원 문제

(2) 항에서 언급한 문제로 인해, 사용자로부터의 기술지원 요청 및 불만사항이 증가함에 따라 제품 판매 후 사후 관리 업무가 점점 증가했다.

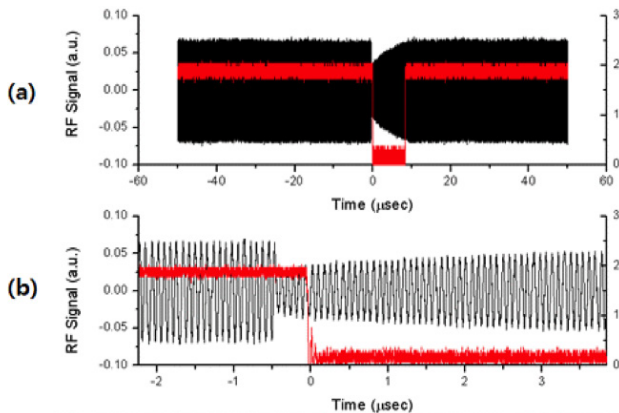
위의 문제들과 함께 몇몇 자재의 경우 추가 확보가 어려운 문제가 겹쳐 결국 단종하게 되었다. 랑뮈어 프로브를 단종하며 그 전까지 검토하던 측정 장비들 역시 상용화를 재검토 했는데 원인은 다음과 같았다.

- 양산 장비에 탑재되지 못하는 측정장비는 시장 규모가 너무 작다
- 장비 제어에 사용되거나, 오류를 검출하기 위한 측정장비는 지속적인 수요가 있다. 이에 반해 오류/특성변화의 주기 파악이 가능한 양을 측정하는 측정기는 양산장비에 탑재하기 어려웠는데, 모든 장비에 탑재할 필요 없이 소수의 장비에만 장착하여 주기성을 파악하고 예방 점검 시점을 예측하기 수월했기 때문이다.

4. 아크 디텍터

랑뮈어 프로브를 통해 측정 장치가 시장성을 가지기 위한 조건을 파악하게 됐으며 그 조건에 부합하는 장치 중 하나가 아크 디텍터였다.

플라즈마를 이용하는 공정장비는 다양한 방식의 전원을 이용하기 때문에 크고 작은 아크 문제들이 있었다. 특히 디스플레이 장치의 경우, 사용 전력이 매우 높아 아크 발생이 매우 빈번했고, 아크 발생으로 인한 지출 비용이 너무 크기 때문에 빠르게 감지해서 사고가 방지하는 솔루션에 대한 수요가 매우 높았다. 또한 한 회사에서 한 두개 구입하던 랑뮈어 프로브와는 달리 생산하는 공정 챔버마



[Fig. 4] (a) 검은색 : 전극의 전압 신호 빨간색 : 아크 검출 신호 (b) (a)를 확대한 그림

다 장착했기 때문에 시장 규모도 컸다.

플라즈마트에서 개발한 아크 디텍터는 RF 전원이 플라즈마 발생장치에 연결되는 부위에 RF 센서를 장착하여 전류와 전압을 측정하고, 아크 발생시 전압이 매우 빠르게 감소하는 특성을 이용했다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 아크가 발생하면 전극의 RF 전압이 급격히 감소하는데, 일반적인 공정변화나 임피던스 정합 시 발생하는 변화보다 더 급격히 변화하기 때문에 아크만 선별적으로 판단할 수 있었다.

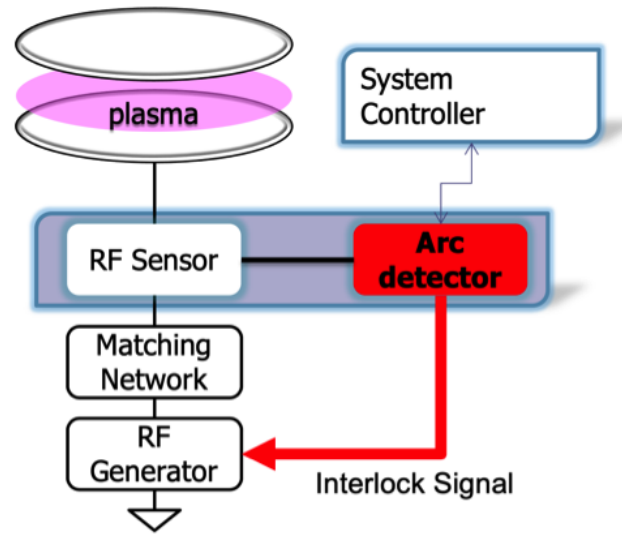
이렇게 아크가 감지되면 그림 5와 같이 RF generator의 인터락 신호와 연계해 RF 전원을 차단하는 기능을 더해서 아크로 인해 전극이나 구조물이 손상되지 않도록 제작했다.

평가 기간 중 아크 감지 후 RF 전원을 자주 차단하자 측정 신뢰도에 대한 의구심이 있었는데, 차단기능이 활성화 했을 때는 전극 손상이 없었으나 차단기능 해제 후 바로 전극이 손상되는 것을 확인되어 아크 디텍터가 정상적으로 작동하는 것을 확인한 사례가 있다. 이후 플라즈마트에서 개발한 제품 중 측정장비로서는 유일하게 양산장비에 탑재되어 디스플레이 생산에 투입됐다.

양산까지 이어진 장비였으나 제품 수명이 길지 않았는데 다음과 같은 문제점이 있었다.

(1) 측정 신뢰도 검증의 어려움

전술한 사례와 같이 차단기능 활성화 시 전극/챔버 손상을 방지하는 것을 확인했으나 문제는 전원 차단 이후 더 정밀한 원인 분석이 어렵다는 점이었다. RF 전원이 차단되면 해당 공정은 중지되고, 공정 중이던 디스플레이



[Fig. 5] 아크 디텍터 활용 예. 전극에 장착된 RF sensor로부터 신호를 측정하여 아크를 검출하고 RF generator의 인터락 신호와 연동하여 전원을 차단한다.

기판은 폐기된다. 이 경우 장비 제조사는 원인 파악 후 패널 생산업체에 보고를 하는 것이 수순이었는데, 아크 디텍터에 세부 분석 기능이 없었기 때문에 원인파악이 어려웠다. 상세한 원인 파악을 하려면 오실로스코프와 같이 상세한 파형 분석 및 저장기능이 탑재되어야 하지만 이 경우 아크 디텍터의 가격이 매우 크게 상승하기 때문에 해당 기능을 탑재할 수 없었다. 아크 발생 시 매번 아크 디텍터의 재검사를 요구 받다보니 이로 인한 서비스 비용이 과다 지출되는 문제가 있었다.

(2) 아크 대응 기능이 내재된 RF 전원장치의 확산

(1)에서 언급한바와 같이 플라즈마트에서 개발한 아크 디텍터는 아크 감지 후 RF 전원을 차단하는 방식으로 운영되었는데, 전극이나 챔버 손상은 방지하지만 공정 진행 중이던 기판은 폐기되는 문제가 있었다. 당시 몇몇 RF 전원장치 제작회사에서는 내부에 아크 감지 기능을 탑재하고, 아크가 발생하려 할 경우 매우 짧은 시간 동안 RF 전력을 낮추고 다시 복구하는 기능을 제공했는데, 이 경우 공정이 중단되지 않아 기판을 폐기할 필요가 없었다. 당시 알려진바로는 이러한 RF 전원장치는 계약관계로 인해 몇몇 소수의 공정장비회사에서만 공급받을 수 있었기 때문에 모든 장비회사가 이 방식을 사용할 수는 없었다. 아크 디텍터 개발 당시에도 이러한 상황은 인지하고 있었기 때문에 한시적으로 판매할 수 있는 제품으로 기획하고 개



[Fig. 6] 플라즈마트에서 개발한 자동 임피던스 정합장치

발했으며 시간이 지난 후에는 추가 판매를 하지 않게 됐다.

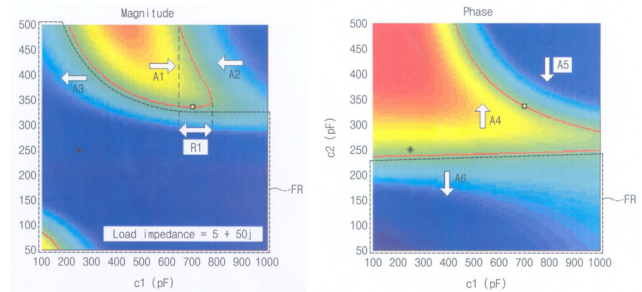
한 때 300 mm 웨이퍼 장비에서 450 mm 웨이퍼 장비로의 전환을 검토하며 그 중간단계로 측정장치와 피드백 공정제어를 적극 활용하는 것을 고려하던 시기가 있었다. 이 경우 측정장치의 시장이 크게 확대될 것으로 예상되어 플라즈마트도 측정 장치에 계속 관심을 갖고 있었으나 기술지원에 많은 자원투입이 필요할 것으로 예측되었고, 새로운 측정장비가 장착되기 보다는 기존에 활용되던 부품에 측정 기능을 강화하는 방향으로 제품개발이 이루어지면서 단독으로 사용되는 측정장비보다는 후술할 임피던스 정합장치 등의 센서 성능을 강화하는 방향으로 개발 역량을 집중하게 되었다.

5. 임피던스 정합장치

그림 6 플라즈마트에서 개발한 자동 임피던스 정합장치
플라즈마트는 초기에 ICP 안테나를 주로 개발 했다. 개발 단계에서는 인적, 물적자원이 많이 투입되기 때문에 양산으로 이어지지 못하면 이익을 내기 어렵다. 당시 공정 장비 회사로부터 지속적인 개발 의뢰는 이어졌으나 양산으로 이어지지 못했기 때문에 매출은 소폭 증가하더라도 이익을 내지 못하는 상태가 이어졌고 회사 전반적으로 아이টে를 재검토하게 되었다.

이에 따라 양산 공급 가능성이 높은 사업 아이টে를 발굴하기 시작했고 그 중 하나로 선정된 것이 임피던스 정합장치였다.

대부분의 플라즈마 발생장치는 RF 전력을 이용하는데, RF 전원장치에서 최초 공급된 전력은 임피던스 정합장치를 거쳐 플라즈마 발생장치로 전달된다. RF 전원장치는 부하 임피던스가 50 옴 일 때 최대 전력을 공급할 수 있으나 플라즈마 발생장치의 임피던스는 공정 조건과 발생



[Fig. 7] 기존의 정합 알고리즘. 병렬 축전용량 C1과 직렬 축전기 용량 C2 좌표계에서 임피던스와 축전용량 변화 방향 (a) Magnitude 신호 (b) Phase 신호 [2]

장치 형상에 따라 제각각으로 변한다.

임피던스 정합장치는 플라즈마 발생장치의 임피던스를 50 옴으로 재 조정하는 역할을 수행하며, 공정 조건에 따라 전기적 특성이 변하더라도 자동으로 임피던스를 조정하여 항상 최대전력 전달을 유지해준다.

플라즈마 발생장치를 개발하며 플라즈마의 전기적 특징에 대해 파악하고 있었고, 타사의 정합장치를 사용하며 정합장치의 한계에 대해서도 인지하고 있던 상태였다. 이러한 배경을 바탕으로 다음의 특징을 갖는 정합장치 개발을 시작했다.

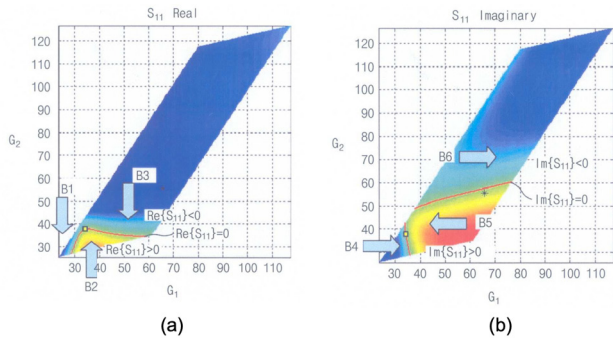
5.1. 정합 안정성 향상

기존에 널리 사용되던 알고리즘은 매치 센서의 위상과 절대값을 이용하여 가변 축전기의 용량을 변경한다. 이때 위상과 절대값이 각각 하나의 축전기 구동만 담당하는데, 초기 조건에 따라 정합위치로 찾아가지 못하는 경우가 있다.

위 그림과 같이 병렬 축전용량 C1을 변화시키면 Magnitude 신호가 0이 되는 지점이 두군데 존재한다. 초기조건이 A1, A2로 표시된 영역에 있을 경우 문제가 없지만, A3로 표시된 영역에 있을 경우에는 정합위치의 반대 방향으로 움직이게 되고 이로 인해 정합이 실패하는 문제가 있다.

플라즈마트에서 개발한 매치는 두개의 축전용량이 중첩된 양을 정의하고, 중첩된 축을 바탕으로 제거 전략을 결정했다.

위 그림은 두 축전기의 중첩된 양을 사용할 경우 각 중첩된 축으로 표시한 임피던스이다. 그림 5와 달리 두개의 해가 존재하지 않고 단일한 해가 존재하기 때문에 높은 수렴성을 갖는다.



[Fig. 8] 플라즈마트에서 개발한 알고리즘. 중첩된 좌표계에서의 임피던스 및 중첩 축전용량의 변화 방향 (a) 실수부 반사계수 (b) 허수부 반사계수 [2]

이 방법은 정합 안정성에도 큰 도움이 되었다. 공정 중 조건이 변했을 때, 기존 알고리즘이 적용된 매치는 임피던스가 불안정 영역으로 향하면 정합위치를 찾지 못하는 경우가 있었으나 플라즈마트에서 개발한 매치는 실패없이 정합위치로 잘 복귀하는 특성을 보였다.

5.2. 정합 경로 조정

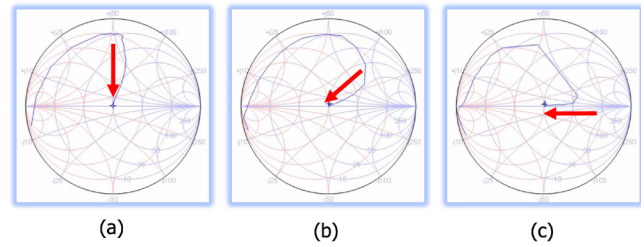
정합이 완료된 상황에서는 RF 전원장치의 부하 임피던스가 50 옴으로 유지되고 안정적인 전력 공급이 가능하나 정합이 완료되지 않은 상황에서는 부하 임피던스가 50 옴이 아닌 다른 값을 갖게 된다. 정합에 이르는 시간은 대부분 수십 msec~ 수초 정도로 전체 공정시간 보다는 매우 짧지만, 이 짧은 시간의 특성이 불안정 할 경우 정합 시간이 일정치 않거나 정합 실패로 이어지는 경우도 있다.

정합장치 단독 문제보다는 플라즈마의 불안정성(음이온 발생 조건 등)과 플라즈마의 전기적 특성 변화에 따른 RF 전원장치의 특성변화가 모두 연관되어 발생되며 RF 전원장치와 정합장치 사이의 케이블 길이도 영향을 미친다.

정합장치와 RF 전원장치 사이의 케이블 길이가 정합 안정성에 영향을 미치는 경우, 정합장치와 전원장치 사이에 연결되는 케이블 길이를 변경할 경우 불안정성이 완화되는 경우가 많은데 공정 조건마다 케이블 길이를 변경하기는 매우 어렵다. 이런 상황에 대처하기 위해 정합경로 조정기능을 개발하여 마치 RF 케이블 길이를 변경한 것과 유사한 효과를 구현했다.

위 그림과 같이 (a)→(b)→(c)로 정합위치로의 접근 방향을 변경할 수 있는데, 접근방향 90도 변경은 케이블의 전기적 길이 $\lambda/8$ 에 해당한다.

이러한 기능들과 함께 전용 설계 소프트웨어를 제작하



[Fig. 9] 정합 경로 전략을 변경할 경우, 스미스 차트 상에 표시되는 정합 경로. (a) 수직 경로 (b) 대각선 경로 (c) 수평 경로

여 여러 엔지니어들이 빠르게 회로 설계 및 수정작업을 할 수 있도록 내부 인프라 강화에도 힘을 썼다. 임피던스 정합장치 개발 후 1여년 간 빠르게 모델을 넓혀가며 장비 회사의 평가를 받았고 이후 플라즈마트의 주 매출원이 되었다.

플라즈마트는 2012년 MKS Instruments에 인수됐는데, 한국 고객 뿐만 아니라 해외 고객을 위한 정합장치 개발을 이어가면서 MKS Instruments의 임피던스 정합기 개발을 전담하고 있다.

6. 맺음말

플라즈마트는 실험실 창업을 통해 대학원생들이 설립한 회사였다. 당시 공동 설립자들은 자신감 충만한 20대 대학원생이었고, 뛰어난 기능과 서비스에만 집중한 나머지 그만큼 중요한 다른 요소들을 간과하는 실수를 범하기도 했다. 앞선 사례에서 언급한 시장성 이외에도, 제조 비용 절감, 일정한 품질 유지, 서비스 대응 용이성과 같은 요소가 양산 제품의 성패에 결정적인 역할을 한다는 것도 체했었다.

플라즈마 기술의 상용화 중 일부분만을 담당했으나, 이 경험이라도 사회진출을 앞둔 학생들에게 조금이나마 도움이 되길 바란다.

References

- [1] 이용관, 이상원, 엄세훈, 회전방향으로 균일한 플라즈마 밀도를 발생시키는 유도결합형 플라즈마 발생장치의 안테나구조, 대한민국 특허 10-0488363, 2015/04/29
- [2] 김재현, 이상원, 이용관, 임피던스 매칭 방법 및 이 방법을 위한 매칭 시스템, 대한민국 특허 10-0870121, 2008/11/18