

환경 감시망구축을 위한 초소형 화학 분석기 제조기술

김기창 캡스트루먼트 대표이사

환경감시망을 구축하자

외국을 여행하면서 인상적인 것 중 하나는 하천 둔치에 설치된 작은 콘크리트 박스이다. 그 옆에는 근처의 고압선에서 220V를 빼오기 위한 보기에도 부담스러운 변압기가 설치되어 있었다. 그 속에는 펌프와 복잡해 보이는 자동 샘플링 장치가 일정한 시간간격으로 하천의 물을 뿑뿑히 늘어선 병에 차례로 담아두고 있다. 주기적으로 병들을 수거해 실험실로 가져가 하천의 오염을 각 시간대 별로 측정하고 환경감시망(Environmental Data management System, EDMS, [Cugley, 1998]에 입력하여 인터넷으로 여러사람에게 서비스 하고 있었다. 이렇게 까지 하며 하천의 수질을 보전하려는 이들의 노력이 놀라왔다.

자 상상의 날개를 펼쳐 낙동강의 모든 교량 중앙 교각에 아주 작은 수질 측정기가 있다고 가정해보자. 그리고 그 측정기가 온도, 습도, 탁도, pH, 용존산소 농도, 전기전도도 및 TN, TP, COD를 측정할 수 있다고 하면 얼마나 재미있겠는가. 더구나 그 측정기는 다리밑의 강물을 뽑아 올려 매 두시간마다 상기 측정값들을 자동으로 갱신할 수 있다고 하자. 한편 상기 컴퓨터 보드에는 전화선이 연결되어 있고 컴퓨터 보드에서 실행되는 운영체제에는 웹서버 기능(HTTP)이 있어 전국의 누구나 이 컴퓨터를 예컨대 <http://www.nakdong1.or.kr>의 주소로 웹 브라우저를 통해 이 측정기에 로그인 할 수 있다고 하자.

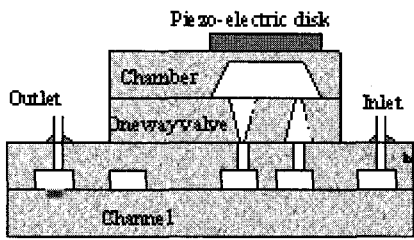
여기서 상상을 멈추고 현실로 돌아가기로 하자. 이러한 환경 측정기는 환경감시망에 관심이 있는 사람이라면 누구나 꿈꾼다. 이른바 드림 시스템일 것이다. 그렇다면 이러한 시스템을 설계하기 위하여 필요한 것을 무엇일까? 기존의 방법으로는 이러한 과제를 해결할 수 없다는 것은 자명하다. 한가지 요소만 측정하려 해도 자동 샘플링/자동 보정기능/자동 세척기 등을 가진 무인 측정기의 크기는 어른 키를 훌쩍 넘어간다. 따라서 상기의 다양한 요소를 모두 측정하려면 교각에 묶어 둔다해도 홍수때 휩쓸려 나갈 것이 자명하다.

문제는 크기 축소이다 - 전자공학에서 배우자

그렇다면 여러 가지 수질 인자를 어떻게 하면 무인으로 현장에서 자동으로 측정할 수 있을까? 먼저 기존 환경 측정기가 실험실이나 공장에서 이러한 인자들을 자동으로 측정할 수 있음은 우리가 잘 알고 있다. 그러나 이러한 시스템이 너무 복잡하고 크기가 커서 현장에는 설치할 수 없다.

결과적으로 크기의 축소 문제가 대두된다. 어떻게 하면 육중한 측정기기를 초소형으로 만들어서 여러 개를 통합해도 현장에 손쉽게 설치할 수 있을 정도로 만들 수 있을까? 이왕이면 대량생산도 가능해서 문제가 생긴 기기들을 통째로 바꾸어도 부담이 없을 정도로 만들 수 있을까?

전자공학의 눈부신 발전으로 그 핵심공정인 반도체(실리콘 웨이퍼) 가공 공정과 인쇄회로기판(Printed Circuit Board, PCB) 공정은 이제 대량생산의 상징으로 자리잡았다. 주로 광식각법(Photolithography)에 의한 이 공정은 대량생산에 적합하므로 전자부품이나 전자 장비는 생산이 쉽고 저렴하여 고장시 통째로 교환할 수 있다. 그렇다면 이러한 공정을 이용하여 화학분석기를 대량으로 찍어낼 수 있을까? 그 대답은 '가능하다' 이다.



최근 반도체 공정이나 PCB공정이 미세 전자회로를 만들어 내는 것 이외에 미세 유체회로를 만들어 내는 데도 사용되고 있다. 1980년 중반에 이미 마이크로 펌프나 마이크로 밸브는 손쉽게 실리콘 웨이퍼를 광식각법으로 만들어 낼 수 있게 되었고(Esashi, 1990) 자세한 리뷰(Review) 논문(Verpoote 외, 1994, Croce, 1995) 등에서 참고할 수 있다.

한편 화학분석기에 사용되는 산화환원전위(ORP)센서나 흡광도 센서(Photometer)등은 썬 필름(Thin Film) 공정이나 광파이버 등으로 어렵잖게 웨이퍼 위에 구현할 수 있다. 그 외에 인젝션 밸브 구조, 반응코일, 바이오센서등 다양한 구조가 이미 실현되었다. 화학 분석기에 필요한 단위소자들이 10여년 간 연구되면서 90년대부터 미세소자들의 통합 집적연구가 시작되었다. 이러한 미세 유체소자들의 체계적인 집적으로 유체회로를 구성하고 화학분석기를 초소형으로 구현하려는 노력은 초소형 '플로우 인젝션 분석기', 초소형 가스크로마토그래피 등 다양한 결과를 얻고 있으며 현재 매우 유망한 분야로 연구가 활발히 진행중이다.

두가지의 유체회로 집적 방법이 있다

전자 산업에서는 적층형 모듈식 집적과 평판형 집적이 오랫동안 사용되어 왔다. 가정용 오디오 처럼 각 기능별로 모듈화하여 같은 크기로 만들고 각 모듈간의 인터페이스를 규정한 다음 차례로 쌓아 올리면 복잡한 기능을 하는 시스템을 체계적으로 만들 수 있으며 유지보수가 쉽다. 한편 PCB 기판처럼 평평한 기판에 회로를 부식법으로 인쇄한 다음 각 단위 전자 소자를 펼쳐 형성하는 기술은 전자 산업에서는 익숙한 집적방법이다.

현재 미세 유체소자들도 이러한 관행에 따라 적층식 구조(Fettinger, 1993)와 평판식 구조(Murakami, 1993)를 동시에 개발해 나가고 있다. 각 방법은 나름대로 장단점이 있다. 적층식 구조는 좀더 복잡한 기능을 수행할 수 있다는 장점이 있는 반면 생산 비용이 높다. 반면에 평판형 구조는 양산이 용이한데 비해 각 단위 유체소자들의 기능이 단순하다.

이직은 시기 상조?

그러나 문제가 있다. 반도체 공정을 이용한 유체 소자의 집적은 아직 초보적인 단계이다. 각 유체소자의 크기가 워낙 작으며 실리콘 웨이퍼의 소모량이 많아 애로를 겪고 있고 특히 조립에서 아직 어려움이 많다는 것이다. 그리하여 지금까지 전자동 pH분석기(Verpoote외, 1994), 포도당 분석기(Murakami, 1993)등 단순한 센서응용 사례 외에는 특별히 상업화 된 것이 없는 실정이다.

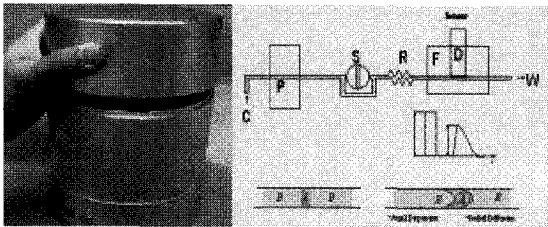
캠스트루먼트사의 대안

캠스트루먼트사는 이러한 문제를 다음과 같이 극복하여 유체소자들을 초소형화하는데 성공했다. 먼저 마이크로 펌프의 크기를 과감하게 키워 손으로 작업할 수 있게 했다(수 mm 이내에서 10-20mm). 제조 공정도 플라스틱 정밀사출로 바꾸어 양산성과 공정의 단순함을 꾀했다. 한편 펌프의 핵심인 다이아 프램이나 체크밸브 구조는 기존 마이크로 펌프와 비슷한 구조를 취하는 대신 액추에이터를 강장한 초소형 모터로 바꾸어 저 소비전력(직류2V) 및

신뢰성(양정 약 1m)을 달성했다(특허등록).

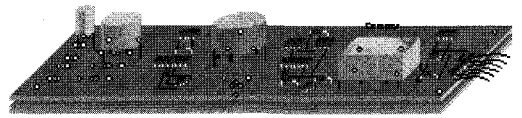
한편 다양한 화학센서를 플로우 셀에 장착하고 마이크로 펌프에 의하여 시료를 이송한 다음 측정 및 센서 보정을 할 수 있는 센서 주변기기들을 개발하여, 현재 전기화학적 센서 및 광학적 센서용 플로우 셀에 대한 노우하우를 가지고 있다.

이에 힘입어 상기 두 가지의 통합 집적회로를 새롭게 고안하여 특허를 출원했다. 첫 번째는 초소형 플라스틱 유체 소자들의 적응형 모듈식 화학분석기이고, 두 번째는 PCB 기판을 이용한 초소형 평판식 유체분석기이다.



적층형 구조를 이용하면 다양한 조합의 화학분석기를 손쉽게 제조할 수 있다. 현재 개발 완료된 모듈은 초소형 시린지 펌프, 초소형 전기화학센서(포텐시오스택) 등 다수이다. 이러한 모듈을 적응하고 인젝션 밸브의 시료주입부에 마이크로 펌프를 3개 설치하여 한 개는 시료샘플링, 두 개는 센서 보정용액 샘플링용으로 사용하면 초소형 자동샘플링/자동보정기능을 갖는 화학분석기를 제작할 수 있다. 그 완성된 시스템의 크기는 50mm×60mm×200mm에 불과하다. 이러한 초소형 시스템은 시료중의 한가지 성분을 측정하므로 여러 가지 성분을 측정하고자 할 때, 이 시스템을 병렬로 늘어 놓아 다성분 측정 시스템을 구성할 수 있다.

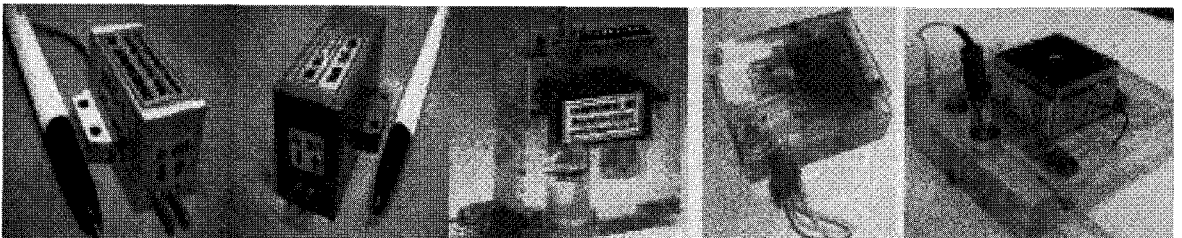
화학분석기를 개발하였다. 기관과 기관 사이에 유체가 흐를 수 있는 통로가 있으며 삽입 고정이 가능한 각 유체 부품은 펌핑, 차단(밸브), 일방향 이송(체크밸브), 센싱(플로우셀) 기능을 수행한다. 유체는 기관 아래로 흐르다가 위로 올라와 각 유체소자에서 해당 조작을 받고 다시 아래로 내려 가는 흐름을 반복한다. 게다가 기관위에 전자회로를 형성할 수 있으므로 별도의 전자회로기관이 필요없이 한 기관에서 화학분석기를 완성할 수 있다. 기관아래로 유체가 흐르고 기관위로 전자가 흐르는 재미있는 PCB 기관인 셈이다.



완벽한 환경측정기를 위하여

초소형화는 궁극적인 목표가 될 수 없다. 중요한 것은 특정 성분 측정을 완벽하게 해내는 시스템 구성인 것이다. 이를 위하여 일반적인 환경분석 실험을 수행해 낼 수 있는 기본적인 유체조작이 미세 유체소자들을 이용하여 대체될 수 있어야 한다. 현재 반도체 공정을 이용한 마이크로 머시닝은 펌프, 밸브, 체크밸브, 센싱 등의 아주 제한된 기능만이 구현되어 있을 뿐이다. 켈스트루먼트사는 적응형 및 평판형 집적시스템에 쉽게 사용될 수 있는 미세 유체소자들을 다양하게 개발해 놓았다.

1. 뷰렛 조작(소량의 액체를 위하여 첨가하는 기능) : 이 조작을 위하여 다이아 프램식 마이크로 정량펌프를 개발하였다. 따라서 한 방울씩 첨가하는 점적조작이 가능하



한편 켈스트루먼트사는 PCB 기판을 이용한 평판형 유체 분석기, 마이크로 펌프, 인젝션 밸브, 적정법이 사용되는 환경측정실험의 초소형 집적시스템

이 가능하게 되었다.

2. 피펫조작(소량의 액체를 위하여 이송하는 기능) : 이 조작을 위하여 마이크로 시린지 펌프를 개발하였다. 따라서 정량의 액체를 정밀하게 취하여 첨가하는 피펫조작이 필요한 실험을 지원할 수 있게 되었다.

3. 페리스탈틱(peristaltic) 펌프 조작(일정한 유속으로 액체를 이송하는 기능) : 상기 마이크로 시린지 펌프에 마이크로 체크밸브를 추가하여, 액체를 자동으로 흡입하고 일정한 속도로 정밀하게 추진할 수 있게 되었기에 연속측정이나 플로우 인젝션 분석기 등의 초소형화가 가능하게 되었다.

4. 인젝션밸브(시료의 일정량을 취하여 유체 흐름사이로 주입하는 기능) : 초소형 전자동 인젝션밸브(전동 구동)를 개발하여 자동으로 시료를 일정량 취한 다음 센서까지 이송할 수 있는 조작의 초소형화를 달성하였다. 이 조작은 화학분석에서 아주 중요한 기능중의 하나로서 당사의 초소형 유체소자중에서 가장 복잡한 구조를 가지고 있다.

5. 플로우셀(시료의 흐름에 센서를 접촉시켜 특정성분을 측정하는 기능) : 적층가능한 평판형 초소형 플로우셀에 전기화학적 또는 광학적 센서를 장착하고 플로우셀의 내부 빈 공간에 고도로 집적된 전자회로를 삽입함으로써 초소형 플로우셀을 개발하였다.

6. 혼합코일(시료와 발색시약을 연속적으로 혼합해 주는 기능) : 적층가능한 평판형 초소형 혼합코일을 개발하여 발색시약을 사용하는 환경분석실험의 초소형화를 가능하게 하였다.

한편 상기 미세 유체소자들은 모두 8비트 마이크로 컴퓨터와 주변회로를 집적하여 내장시켰으므로 별도의 구동 전자회로가 불필요하며 오직 4가닥의 선로(통신 및 전원 공급) 배선만 해주면 된다.

이상으로 단위 실험조작이 어떻게 초소형 유체소자들로 구현될 수 있는가 및 각 초소형 유체소자들을 어떻게 통합할 수 있는가에 대하여 살펴보았다. 현재 센서 및 발색 시약 등의 조합으로 다양한 성분을 측정할 수 있는 초소형 시스템이 완성 또는 개발중에 있다. 현재 개발/평가

중인 것을 보면 pH, 용존산소, 전기전도도, 탁도, 포도당, 산화환원전위 등이 있으며, 향후 기존의 이온선택성 전극을 사용한 다양한 이온 분석기 및 COD 분석기 등이 개발될 예정이다.

현장에 설치하기 위하여

개별 초소형 분석기의 소모전력은 보통 5V, 0.15A(측정시), 20mA(대기시) 수준이다. 따라서 소모전력이 극히 적으므로 배터리나 태양전지로 구동이 가능하므로 현장에 설치하는데 이상적이라고 할 수 있다. 한편 측정기 위치와 강물의 거리가 떨어진 경우 강력한 샘플링 펌프 및 적당한 필터가 필요한 경우도 있을 것이다.

각 측정기에는 제어보드가 내장되어 시간에 따른 자동 측정기능을 지원하며 모뎀을 통해 인터넷 또는 직접 연결로 측정값을 저장 또는 전송할 수 있고 원격 제어도 가능하다.

맺는 말

현재의 환경감시망은 화학분석기가 현장에 설치되어 자동으로 수질측정을 해내지 못하는 한 다른 측정망(예컨대 기상측정망, 전력계통 감시망등)에 비해 원시적인 수준이라 할 수 있다. 그렇다고 환경 분석학자들이 게으른 탓은 절대 아니다. 문제는 화학분석시스템이 손전선의 전류 센서나, 기상측정용 습도, 압력센서에 비해 대단히 복잡하고 또 작게 만들기 어렵다는데 있다. 그러나 완벽한 환경감시망의 구축을 포기할 수는 없는 노릇이다. 환경감시망이 사후약방문이 아니라 사전정보 및 배출 억제 기능을 가지기 위해서는 실시간 측정이 절실하다. 이는 현장설치용 자동 환경 측정기의 개발로만 가능하다. 이 글은 신뢰성있는 현장용 환경 측정기가 낙동강 다리에 설치될 수 있기 위하여 반드시 해결해야할 축소화 기술을 공학적인 측면에서 알아 보았다. 이제 남은 문제는 환경분석기술과 접목하여 믿을 만한 측정기기를 만들어 내는 일이다. 이러한 연구에 환경인여러분의 관심과 지원을 바란다.

상담 및 문의전화 : (02)807-8967