

ReSEAT 프로그램

R&D 성공 실패사례 메시지

기초를 탄탄히



Contents



- ▶ 1:29:300의 법칙을 잊지 말자, 1
- ▶ 문제의 답은 현장에 있다, 6
- ▶ 실수는 방심할 때 일어난다, 12
- ▶ 실험하기 전 꼭 챙겨야 하는 것들, 17
- ▶ 안전사고를 예방하려면, 아는 길도 물어서 가라, 23
- ▶ 연구 개발, 적어도 10년은 인내하라, 28
- ▶ 이 빠진 데이터의 유혹, 33
- ▶ 처음으로 돌아가면 문제의 실마리가 보인다, 38
- ▶ 21세기 기술 전쟁의 갑옷 '특허', 45
- ▶ 기초가 연구 개발의 기본이다, 51
- ▶ 백금도가니 파손의 원인은 '기본의 부재'다, 57
- ▶ 비용과 시간 VS 기술의 완전성, 우선순위는?, 64
- ▶ 세계 최초 개발 제품의 수출 성공을 눈앞에서 놓치다, 73
- ▶ 소프트웨어 중심의 연구가 새로운 답이다, 79
- ▶ 하나를 보면 열을 아는 지혜가 필요하다, 85
- ▶ 알루미늄/세라믹 복합재료를 균열 없이 열간압연 할 수 있는 방법은?, 91
- ▶ 어려울수록 기본으로 돌아가라, 96

기초를 탄탄히

- ▶ 기초가 탄탄하면 어떤 문제도 극복할 수 있다 | 100
- ▶ 유리 용해로에서 발생한 난제를 해결하다 | 106
- ▶ 이중 오리피스(관)를 이용한 이음새 없는 캡슐 | 112
- ▶ 자외선 차단용 녹색(Green) 유리병 개발 | 116
- ▶ 제품을 만들기 전에 모든 재료의 특성을 파악하라 | 123
- ▶ 지금의 방법이 최선인가? | 130
- ▶ 특정 전문가 그룹에 독점된 연구개발의 문제점 | 136
- ▶ 폭발물 연구 30년, 아쉬움이 남는 기억들(0908) | 142
- ▶ 수돗물 바이러스 사건을 겪으며 얻은 것들 | 148



1:29:300의 법칙을 잊지 말자

 ReSEAT 전문연구위원 김용환

유 리 제조 공장에서는 항상 크고 작은 사고가 발생한다. 현장에서 기름과 가스 등을 많이 사용하다보니 특히, 화재와 화상에 대한 사고가 많이 일어난다.

나 역시 20년 정도 유리 제조 공장에 근무하면서 여러 가지 고온 작업 중 일어난 사고를 많이 겪어보았다. 그 중 가장 기억에 남는 사고는 유리 서냉로 폭발로 인해 사람이 다쳤던 일이었다. 나는 세라믹스를 전공한 후 병 유리 제조 공장의 실험실, 현장부서, 기술부 등에서 오랫동안 근무를 하며 다양한 경험을 하게 되었다.

유리 산업은 에너지를 다량 소비하는 대표적인 업종 중의 하나이다. 유리 제품 생산프로세스는 원료→혼합→용융→성형→서냉→가공→검사→포장 단계를 거치게 된다. 유리 공장에서 가장 에너지를 많이 사용하는 부분은 용해로이며, 대략 전체공장의 60~70%를 차지하고 있다. 용해로에서 용해된 유리는 유리 성형에 적합하도록 온도로 점도를 조정하여 성형기에서 제품을 만든다. 최근 제병기는 성능이 향상되어 작은 용량의 병은 1분에 200개 이상을 성형할 수 있다. 성형된 고온의 병은 서냉로(annealing lehr / furnace)에서 일정한 온도 곡선으로 열처리를 하게 된다. 공장에는 용해로 다음에 2~3개의 제병기가 있고, 이 기계와 동일한 수의 서냉로가 있다.

유리 성형 공정 중에서 유리가 상온까지 냉각되어 고화되면 유리의 내부에 열적 응력(스트레인: thermal strain)이 발생한다. 그래서 일부 섬유 유리나 작은 관 유리를 제외하고는 반드시 유리 성형 후 서냉 온도에서 열처리를 하고 천천히 냉각시켜야 한다. 이 과정을 유리의 서냉(annealing)이라 부르며, 이 공정을 열처리하는 설비를 ‘서냉로’라고 부른다. 대부분 열을 이용해서 제조하는 제품은 응력을 제거하기 위해 열처리를 해야 하고, 산업에 따라서 열처리로, 어닐링로, 소둔로 등으로 부르고 있는데, 유리공학이나 유리산업에서는 ‘서냉로’라고 통칭한다.

유리는 기물이 크고, 두께가 두꺼울수록 내부와 외부의 온도 차이가 커서 서냉이 어렵다. 불균일한 스트레인이 많이 있는 유리는 열적으로도 약하고 파손되기 쉽다. 한 예로, 성형기에서 나온 제품의 결점을 빨리

분석하기 위해 서냉로를 거치지 않은 상태에서 생산 사무실로 가지고 오는 경우가 있다. 두께가 얇은 병과 달리 기물이 두꺼운 재떨이 같은 제품은 좀 시간이 지나면 굉장한 큰 소리를 내면서 터진다. 이 경우 유리 파편에 사람이 다칠 수도 있다. 이런 이유로 제병기에서 생산된 유리를 서냉시키지 않으면 제품으로 사용할 수 없다.

성형 작업 중에 발생한 응력은 유리가 점성 유동을 일으키는 온도까지 가열하게 되면 자연스럽게 제거된다. 가열 온도가 높을수록 유동성이 커지기 때문에 스트레인 제거 속도가 빨라지지만, 유리 제품의 형태가 변형될 정도로 온도를 높이면 안 된다. 그래서 서냉에는 적당한 온도 한계가 있다. 이를 서냉 온도의 상한 또는 서냉 온도라고 부른다. 서냉 온도는 보통 15분 안에 응력이 소멸된다. 한 편, 다시 온도를 내려도 스트레인이 생길 가능성이 없는 온도도 있다. 이를 서냉 온도의 하한이라 하며, 스트레인 온도라고 한다.

제병기 뒤에 설치되어 있는 서냉로는 길이가 약 30미터 폭은 3미터 정도의 긴 터널 형태이며, 벨트 컨베이어가 설치되어 연속적으로 운전을 하게 되어 있다. 서냉 공정은 제품의 온도를 서냉 온도까지 올리는 가열 부분과 스트레인 온도까지 내린 후에 상온으로 냉각하는 온도 곡선으로 운전된다. 자동 유리병 공장의 제병기에서 생산되는 유리병은 컨베이어에서 스택커로 서냉로 내부로 일정하게 투입한다. 이때, 가열된 제품의 온도가 상당히 높기 때문에 서냉로의 온도 관리 시엔 작은 에너지를 사용해도 된다. 비슷한 형태의 인쇄 소부로는 열원으로 전기도 사용하나, 이 시절의 병 유리 공장은 주로 경유나 가스를 사용했다.

실제 서냉로의 온도는 500~550℃로, 약 2시간 동안 열처리를 한다. 가열 부분은 앞부분에서 약 10미터 정도이고, 뒷부분은 대부분 온도를 관리 곡선에 적합하게 내리는 역할을 한다. 따라서 가열 부분에만 버너가 2~3개 서냉로의 양편에 설치되어 있다. 서냉로 온도는 생산 제품을 변경하지 않으면 거의 일정하게 유지한다. 그러나 제품이 변경되거나, 장시간 제품생산이 중단되는 경우는 에너지 절감을 위해 온도를 내려놓았다가 제품 생산에 맞추어 다시 올린다.

내가 근무하던 유리 회사는 지방에 3개의 공장이 있었다. 이 중 전라도에 있던 공장에서 서냉로가 폭발하는 바람에, 사람 한 명이 사망하는 사고가 발생했다. 이 당시 기술부 차장이었던 나는 직원 2명과 함께 사고 조사와 대책을 보고하는 업무를 맡게 되었다. 폭발 사고는 버너가 설치된 가열부에서 발생했다. 발생 원인은 가열부에 있던 가스에 의한 폭발이다. 사고가 일어났던 유리 공장은 3교대 작업을 하고 있었고, 서냉로 관리자 역시 변경된 적이 없었다. 사고 당시 현장 정황을 조사해보니, 내가 겪었던 두 번의 현장 폭발 사고와 비슷했다.

서냉로에서 연소가 계속 진행된다면 문제가 없지만, 연소가 중단되면 가장 위험해진다. 연소가 중단된 상황에서 액체나 가스가 가열부에 들어가게 되면, 이 연료가 전부 가스화 되어 내부에 가득 차게 된다. 이때, 교대 근무자가 이 사실을 모르고 다시 버너에 불을 점화해서 순간적으로 가스가 폭발한 것이다. 연소 공학에서는 가연성 기체와 공기의 혼합 가스가 밀폐 용기 안에 있을 때 점화되면 연소가 폭발적으로 일어나는데, 예혼합연소의 경우에 밀폐된 용기로 역화가 일어나면

폭발 위험성이 크다. 이것을 많은 양의 가연성 기체와 산소가 혼합되어 일시에 폭발적인 연소 현상을 일으키는 비정상연소라고 한다.

이 사고로 버너 부분의 홀에서 화염과 기름도 누출되어 관리자가 심한 화상을 입고 사망하는 사고가 발생했다. 이 사고는 운전 매뉴얼과 안전 교육 관리자의 관리 소홀로 인해 발생한 것이었다. 사고 후, 회사는 서냉로 운전 매뉴얼을 보완했고, 버너 시스템도 개선했다. 그 뒤로는 서냉로 폭발 사고가 일어나지 않았다고 한다.

실패학이라는 학문 중에 하인리히 법칙이라는 것이 있다. 다른 이름으로는 1:29:300 법칙이라고도 부른다. 이 법칙은 큰 재해와 중간 재해, 가벼운 재해의 발생 비율이 1:29:300 정도라는 이야기다. 한 번의 큰 사고가 발생하는 원인은 우연이 아니라 300번의 경미한 사고들의 반복하면서 발생한다는 뜻이다.

우리는 누구나 실수를 하고, 또 반복한다. 그래서 실패를 통해 다시 배우고 같은 일을 반복하지 않는 자세가 매우 중요하다. 실패를 통해서 배우는 학문인 실패학이 선진국에서는 과학 기술의 한 분야로 다뤄지고 있지만, 국내에는 아직 생소한 분야로 취급되고 있어 이 점이 아쉽다. 위험 요소가 많은 분야의 연구를 할 땐 늘 실패와 실수에 예민하게 경계해야 한다. 현장에서 고되게 연구하고 있는 후학들이 부디 1:29:300의 법칙을 잊지 않았으면 한다.



문제의 답은 현장에 있다

 ReSEAT 전문연구위원 강두철

연구 개발을 한 지 30여 년, 다양한 직장에서 다양한 제품 기술 개발 업무를 보며 각종 기술적인 문제들을 접할 기회가 많았다. 개중엔 운 좋게 해결한 경우도 꽤 있다. 직장을 이리저리 옮겨 다니다 보니 한 가지 분야의 전문성은 떨어져도 레이더, 자동제어 시스템, 보조기억장치, 멀티미디어기기, 소형 가전 등 광범위한 전자 기술 경험을 습득할 수 있었다.

대기업 연구소에서 근무하던 시절이었다. 어느 날, 연구소 텔렉스로 한 통의 연락이 왔다. 아직 팩스가 상용화되기 전이라 원거리 문자 전송은 주로 텔렉스를 사용했다. 서울 본사의 영업 부서에서 온 연락이었는데, 우리 연구소에 기술 지원을 긴급 요청하는 내용이었다.

얼마 전 관공서에 대형 시스템을 도입했는데, 관제소와 원격지 간의 데이터 통신 문제가 발생하면서 골머리를 앓고 있다는 것이다. 연락을 받았던 소장 말에 의하면, 문제가 생긴 지 상당 기간이 지났으며 이미 여러 전문가들의 손을 거쳐 우리 연구소까지 요청이 온 것이라고 했다. 병으로 치면 가능 병원마다 의사가 혀를 내두르는 상황과 비슷했다. 동네 병원에서 못 고치는 병이면 대학 병원으로 가듯, 아마 영업 부서도 시간이 지날수록 경력이 많고 유능한 사람을 찾았을 것이다. 그런 그들이 여러 전문가를 거치고 거쳐, 마지막으로 지목한 사람이 나왔다. 정말 의아한 일이었다.

당시 나는 주임 연구원이긴 했지만, 근무 기간이 얼마 되지 않은 상태였고 경력 면에서도 이 연구소에 오기 전 정부 출연 연구소에서 근무했던 경력이 전부였다. 전문가란 이름이 붙고 안 붙는 기준이 애매하다지만, 당시의 나에게 붙기엔 무리가 있었다.

대체 본사 영업부에서 어떻게 나를 지목했는지 예상이 가지 않았다. 내가 데이터 모뎀을 개발했던 경험이 있다는 걸 알았던 걸까? 아니면 누군가 추천을 했을까? 내부에서 서로 미루다가 나에게 온 걸까? 어쨌든, 어떤 이유든 간에 내가 쉽게 해결할 수 있는 문제가 아닐 것 같다는 느낌이 들었다. 연구소장도 나와 비슷한 생각인지 ‘해결 할 수 있겠나?’라고 먼저 물어왔다. 사실, 망신을 당할 수도 있겠다고 생각했지만 해보지도 않고 비겁하게 포기할 수는 없는 노릇이었다. 매사에 적극적인 성격은 아니었지만 호기심이 강한 탓에, 어떤 문제인지도 잘 모르면서 일단 궁금한 마음에 “어떤 문제인지 구체적으로 알지도 못

하는데 어떻게 해결 여부를 알겠습니까? 그래도 대외적으로 지원 요청이 왔으니 일단 현장에 가보고 원인이라도 파악해 보겠습니다.” 라고 대답 해버렸다.

다음 날 오전에 부산으로 내려가는 기차를 탔다. 가는 동안, 곧 마주하게 될 문제를 생각하니 궁금증과 걱정이 밀려왔다. 알고 있는 것이라곤 데이터 통신이 간혹 두절된다는 간단한 증상정도였다. 딱히 희귀한 증상이 아니었기 때문에, 예상 원인이 수 만 가지나 되었다. 그렇다면 원인을 파악할 방법은 어떻게 찾을 것인가? 이것 역시 경우의 수가 많았다. 그래도 일단 현장에 도착하면, (지금의 생각이 바뀔지 어떨지 알 수 없었지만) 장비 교체 테스트를 통해 문제의 윤곽을 잡을 수 있지 않을까하는 생각이 들었다. 그렇게 여러 생각을 떠안고 현장에 도착했다. 현장 담당자는 내게 상황을 구체적으로 설명을 해주었는데, 시스템을 설치한 뒤에 시험 운용 과정에서 통신 문제가 발생했다고 한다. 전문가의 자문도 받고 관련 부품 교체를 여러 차례 시도도 해봤지만 해결될 기미가 보이지 않는다고 했다.

그렇다면 교체했던 부품 자체엔 별다른 문제가 없을 것이란 생각이 들었다. 부품 불량을 제외하고, 끊김 현상을 일으키는 원인이 또 뭐가 있을까? 나는 일단 담당자에게 “회로도를 좀 봐야 할 것 같습니다.” 라고 대답했다. 회로도를 펼쳐 놓고 파형 측정 장치인 오실로스코프를 이용하여 통신관련 테스트 포인트의 파형을 관찰했다. 통신회로의 송수신 신호와 제어신호 등을 관찰하면서 문제가 무엇인가를 찾아내기

위함이었다. 통신 오류가 발생할 때 송수신 신호가 비정상적으로 끊기는 현상을 종종 보였지만, 역시 원인을 파악할 수는 없었다.

시스템에서 요구하는 인터페이스 규격과 사용한 데이터 모뎀의 규격이 안 맞거나, 통신 선로 상의 특성 문제 등 여러 가지 원인을 생각해봤다. 오류가 발생하는 원인을 알아내기 위해, 한동안 통신 선로에 송수신 파형을 관찰하면서 통신 오류가 발생할 때 어떤 변화 일어나는 지를 지켜보며 통신 오류 원인을 탐구했다. 시험 결과, 전송 데이터의 길이가 일정 이상인 경우에 간헐적으로 전송 오류가 발생하는 것으로 파악됐다. 데이터 모뎀의 송수신 신호의 전송 타이밍과 시스템의 인터페이스관련 문제라고 판단되었다. 송신 수신 신호 발생 및 대기 타이밍 회로를 추가하여 조정한 결과 통신오류 문제가 해결되고 시스템은 안정적으로 작동하기 시작했다.

문제가 해결 되자, 본사 영업 부서는 물론이고 관공서의 관계자들 모두가 몹시 기뻐했다. 서울에서 부산까지 장거리임에도 한달음에 달려와 문제를 빠르게 해결해준 것에 대해 기관장으로부터 과분한 찬사까지 들었다. 얼마 후, 전례 없이 본사 영업부 주최로 연구소 팀장급 이상을 대상으로 한 격려회식까지 마련됐었다.

자문을 해줬던 다른 전문가들보다 내 기술력이 뛰어나서 문제를 해결할 수 있었던 게 아니라고 생각한다. 물론, 내가 데이터 모뎀을 활용했던 경험이나 통신기 설계 관련 연구 경험, 혹은 보유하고 있던 관련 특허 등이 당시 문제 해결에 도움이 되었을 수는 있다. 하지만

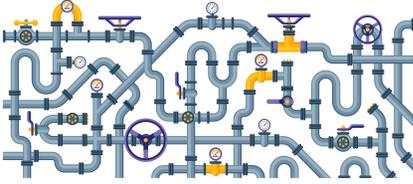
결정적인 해결책은, 개인의 경험이나 지식수준이 아니라 현장에 가서 오실로스코프로 파형을 직접 관찰했던 것이었다. 이론에 단련된 사람들은 상황을 보자마자 간파하려드는 습관이 있다. 선부른 간파는 해결해야 하는 대상은 뒷전으로 두고, 온전히 자신의 머릿속에서만 문제의 원인과 해결책을 펼치기 마련이다.

아마 나 이전에 자문을 했던 전문가들 역시 그랬을 것이다. 누구라도 나처럼 현장에서 직접 회로도를 펼쳐놓고 실제 신호 파형을 측정해 보았다면, 문제의 원인을 파악할 수도 있었을 것이다. 물론, 통신 오류가 간헐적으로 발생했기 때문에 쉽지 않았을 일이었지만.

이처럼 어떤 사건이나 문제를 해결할 때, 현장 정보는 필수적이다. 사람이 아는 게 많아지면 직접 보지 않고도 확신하는 경우가 늘어난다. 예를 들어, 누군가가 수박의 속 색깔에 대해서 물었을 때 수박을 먹어본 적이 있는 사람은 수박 속을 보지 않고도 자신 있게 ‘빨간색’이라고 말한다. 수박을 처음 본 사람만이 수박을 직접 반으로 갈라 색깔을 확인할 것이다. 수박 속이 빨강지 않은 경우는 극히 드물겠지만, 만에 하나 그 수박의 속이 파랗거나 노랗다면?

정답은 수박을 직접 갈라본 사람이 맞히는 것이다. 이론이 중요하지 않다는 이야기를 하려는 건 아니다. 이론이란, 수박을 자르지 않고도 그 속이 빨간 색이라는 것을 아는 것이다. 과학자라면, 자르지 않은 수박의 속을 누가 뭐래도 미지의 대상으로 인식해야 한다. 짐작은 할 수 있을지언정, 확신을 할 수 있는 근거는 어디에도 없다. 우리는

언제나 수많은 이론을 머릿속에 가지고 사례를 접한다. 우리가 가진 지식이 편견이 되어 진실을 가리게 해서는 안 된다. 신대륙을 발견한 것은 이론이 아니라, 탐험가의 발이었다.



실수는 방심할 때 일어난다



ReSEAT 전문연구위원 이태호

새로운 연구 과제를 수행할 때, 예전에 사용한 적이 있거나 유사한 소재와 방법, 모양 등을 다시 다루게 되는 경우가 종종 있다. 익숙한 연구를 하다 보면 어렵지 않게 느껴지기 마련인데, 아무래도 새로운 연구보다는 관심이나 호기심이 덜하다보니 소홀해지기 쉽다. 새로운 노즐 목 재료를 사용해 개발하던 때의 일이다. 우선 노즐 목이란 무엇인지부터 간단히 설명해보겠다.

연소관은 고온 고압의 연소 가스가 축 방향으로 흘러나가면서 압력이 유지되어야 하는 것이 개발의 기본적인 요구 조건이다. 그리고 이 연소관의 구조에서 가장 중요한 것은 축 방향으로 흐르는 연소 가스가 고온 고압이므로 접촉하는 부위의 표면이 깎여나가는 삭마 현상이 발생

한다. 연소관의 연소실 압력은 노즐 목의 직경과 매우 밀접한 관계가 있는데 삭마 현상으로 노즐 목이 넓어지면 연소실의 압력이 떨어지고 원하는 추력도 나오지 않는다.

이런 이유로, 원하는 성능을 얻기 위해서는 연소관의 형상에서 노즐 목 직경이 중요한 역할을 하는 것이다. 우리가 개발하려는 연소관의 노즐은 일반적으로 직경이 큰 부위부터 시작해 노즐 목이라 칭하는 작은 직경을 지나 다시 커지는 축소-확대 형태의 모양으로 이루어져 있다. 이런 형상을 가지고 있기 때문에, 고온과 고압의 가스가 흐른다면 이 가스와 접촉하는 노즐 내벽은 당연히 고열 때문에 녹아내리거나 변질이 되고 동시에 빠르게 깎인다.

그렇기에 이 노즐 내벽에 내열재를 사용해서 외벽으로부터 전달되는 열을 막아주어야 하는 것이다. 노즐 목은 가급적 원형을 유지해주는 것이 바람직한데, 노즐의 구조 상 노즐 목에서 가장 침식이 커진다. 해서, 노즐 목은 내열성도 좋고 기계적 침식인 삭마에도 잘 견디는 소재가 필요하다. 이에 비해, 가느다란 노즐 목 전반부나 다시 커지는 노즐 목 후반부는 열전달만 잘 막아주면 되는데 이런 이유로 노즐 위치에 따라 부위마다 다른 소재를 사용한다.

노즐 목이 연소 시간 동안 삭마로 인해 변하게 되면, 예상치 못하게 추력이 변하게 될 때가 있는데 이 문제의 발단이 항상 연소관의 노즐 목 때문이라고 치부하기 쉽다. 이는 항상 연구원들에게 신경 쓰이고 골치 아픈 문제였다. 이런 이유로 우리는 노즐 목 소재로 우수한 평가를

받은 그라파이트를 선정해 성능을 평가했다. 기대를 한 몸에 받은 그라파이트 노즐 목이 연소 후 얼마나 삭마되었는지 연구팀 모두 궁금해 했다. 모든 연구 개발이 그렇듯, 처음 시험을 하게 되면 어떤 결과가 나올지 기대와 흥분이 교차되는 것이 연구원들의 일반적인 감정일 것이다. 마치 아이의 순산을 기다리는 부모의 심정 같다고 할까?

항상 그렇듯 연소 시험은 늘 나를 긴장하게 한다. 특히, 처음 개발한 부품이 포함되어 있을 때는 그 부품의 성능에 온 신경이 집중되어서 다른 것에는 별로 눈과 귀가 가지 않는다. 가슴 떨리는 연소 시험이 끝난 후, 처음 개발한 그라파이트 노즐 목을 분해해보니 직경이 거의 변하지 않았다. 야 됐다! 얼굴에 미소가 흐르고 저절로 목소리가 커지는 것을 그 누가 막을까?

소기의 목적이 무사히 달성되어 콧노래가 절로 나온다. 이 기분 그대로, 나머지 분석을 위해 노즐 확대부와 축소부를 포함해 노즐 목 뒤쪽의 부품들을 모두 조사했다. 예상대로 노즐 목 그라파이트 내열재와 접촉되는 출소부 및 확대부의 내열재에는 삭마가 됐고, 특히 확대 연결부 초입에서 노즐 목 소재와 확대부의 소재 내 삭마성 차이로 일종의 홈처럼 패인 삭마가 보였다. 그래도 노즐 목에 사용한 그라파이트가 역할을 잘 해주었다는 생각에 쾌감을 느끼며 시험을 마무리했다. 얼마 후, 다른 기술 평가를 위해 지난번과 똑같은 연소 시험을 했다. 이미 지난 시험에서 좋은 결과가 있었기에 느긋한 마음으로 관찰하고 있는데, 시험이 거의 끝나가고 있는 순간 무엇인가 시뻔건

덩어리가 노즐을 빠져 나가는 게 보였다. 불길한 예감이 들었다. 불덩이가 빠져나가다니? 불덩이의 정체는 대체 뭐지?

시험이 끝나고, 걱정되는 마음으로 시험 물을 분해해 조사했다. 그런데 이게 웬일인가?! 그라파이트 노즐 목이 없어졌다. 빠져 나간 불덩이는 노즐 목이었던 것이다. 어떻게 이런 일 있을 수 있나? 시험으로 입증된 성능을 자랑스러워한 게 얼마 되지 않았는데 말이다. 망연 자실이라는 말은 이럴 때 사용하는 말이구나 싶었다. 첫 시험 때는 노즐 목이 거의 삭마가 되지 않은 채로 원형을 유지하고 있었는데, 왜 오늘 시험에서는 노즐 목이 빠져 버렸을까? 알 수 없는 노릇이다.

마음을 가다듬고 지난 시험 전후 연소관의 실태부터 세세히 분석한 후, 이번에 빠져버린 노즐 목을 분해해보니 폐놀 부품의 내열재가 깎여 직경이 노즐 목 부품 외경과 유사한 상태가 되었다. 확대부 내열재가 노즐 목 재료를 지탱하지 못하고 유속에 밀려 노즐 목이 빠지는 상황이 일어난 것이다. 어처구니없는 실수였다. 지난 번, 시험 결과를 분석하면서 문제가 된 부분의 삭마가 심했던 것을 알고 있었음에도 새로 개발한 그라파이트 노즐 목 성능에 고조되어 건성으로 다음 시험에 임한 것이었다. 그리고 노즐 목 외경을 크게 해서 확대 연결부에 지탱될 수 있도록 췌기 턱 형태로 만들어서 유속에 밀리더라도 턱이 노즐 목을 막아줘야 하는데, 이런 것을 전혀 감안하지 않은 기본적 실수도 문제였다.

노즐 목 이외의 다른 내열재는 유사한 개발품의 개발 과정을 거쳐

봤으니 안심하고, 새로운 것에만 관심을 기울인 방심에서 비롯된 실수였다. 연구 개발에서 어느 것 하나도 방심해선 안 된다는 것을 알려준 사건이었다. 시험 결과를 조금 더 자세히 분석하고 살펴봤다면 충분히 예방할 수 있었을 텐데...

시험 자료의 분석이 얼마나 중요한 지도 깨달았다. 이 사건 후 선배 연구원이 연소 시험 참관은 무엇 때문에 하는 것인지, 시험 후 분석은 왜 하는지 내게 물어본 적이 있었다. 대답을 할 수가 없었다. 연구원들은 무에서 유를 창조한다는 자부심을 가지고 일하지만, 동시에 늘 새로운 것에만 관심을 갖게 되는 통념이 자리하고 있기도 하다. 그러기에 연구원들에게는 흔하지만 절대 잊지 말아야 할 말이 있다. ‘실수는 방심할 때 일어난다.’



실험하기 전 꼭 챙겨야 하는 것들

 ReSEAT 전문연구위원 김봉수

대 학원 박사 과정 1학기를 시작할 무렵, 지도교수의 제안으로 1년 동안 진행하는 외부 연구 과제에 참여하게 되었다. 사실상 석사 과정을 마치자마자 참여하게 된 프로젝트였기 때문에 설레는 마음과 지도교수의 기대에 부응하겠다는 의지로 열심히 실험에 몰두하기 시작했다.

처음으로 맡은 연구 과제는 미생물 중 하나인 곰팡이 아스페르길루스에서 나오는 효소 셀룰라아제를 순수분리 정제하여, 효소의 특성을 알아보는 실험이었다. 효소를 순수분리하기 위해서는 미생물 배양조건

실험 단계부터 철저히 거쳐야 생산된 배양액에서 많은 효소를 얻을 수 있다. 그렇게 얻은 효소를 순수분리 정제해야 실험 다음 단계로 넘어가 효소의 특성을 알아볼 수 있는데 가장 어려웠던 부분이 효소를 순수분리 정제하는 과정이었다. 이 때 몇 번이나 실수를 반복했는지 모른다.

효소 단백질을 순수분리하기 위해선 분획수집기라는 장비가 꼭 필요한데, 다른 실험실 구석에 처박혀 있던 이 장비를 작동시키려면 내 힘이 필요했다. 말이 반자동 시스템이지, 사실상 수동으로 작동해야 했던 것. 그나마 그 방법도 알지 못해서 장비 설명서를 정독하고 나서야 제대로 장비를 쓸 수 있었다.

먼저, 유리로 된 칼럼을 세우기 위해 굵은 집게가 달린 철제 스탠드를 구했다. 칼럼을 철제 스탠드에 고정시키고 분획수집기 위에 설치했다.

이걸로 장비 세팅은 완료!

이제 본격적으로 효소 분해를 시작해볼까?

일반적으로 효소 단백질 분리 과정은 1차적으로 배양액에 있는 단백질을 농축하기 위해 황산암모늄을 넣고 투석막을 통해 탈염 과정을 거친다. 그럼 조효소를 얻을 수 있다. 그 다음 이 농축된 조효소를 칼럼 속으로 넣어 버퍼로 흘러 보내면 단백질이 이온교환수지를 통과하면서 분리되는 것이다.

여기까지는 별 탈 없이 순조롭게 진행되었다. 문제는 이온교환수지를 통과해야 하는 조효소액이 흘러나오지 못하고 그대로 머물러 있는 것이었다. 이 부분에서 계속 실패의 쓴맛을 봐야했다. 다른 논문을 찾아 봐도 이온교환수지의 전처리 과정에서 반복되어 나타나는 문제점을 알아낼 수 없었다. 논문에는 알칼리 용액과 산성 용액으로 처리하는 과정만 설명되어 있었다.

논문에 나온 방법대로 전처리 과정을 거쳤는데 계속 같은 문제가 발생했기 때문에 실험 첫 단계에서 실수가 있던 건 아닐까 생각했다. 그래서 미생물 배양부터 1차 조효소액을 만드는 과정으로 돌아가 처음부터 다시 실험을 진행했다. 하지만 결과는 마찬가지였다. 거듭 실패를 반복했다.

도대체 뭐가 문제인 걸까. 좌절감에 빠진 나는 다시 실험을 준비하기 위해 시약들을 하나씩 정리하기 시작했다. 그 순간 시약의 유효기간이 눈에 확 띄었다. 단백질 분획에서 많이 사용하는 시약 종류인 이온수지(DEAE-셀룰로우스) 시약의 유효기간이 상당 기간 지나있었던 것! 순간 아차 싶었다. 시약장에 들어있는 시약들을 꺼내 쓰는 동안 단 한 번도 생각하지 못했던 부분에 문제가 있던 것이다. 아뿔싸!

넘어진 김에 쉬어간다고, 시약들의 유효기간을 체크하면서 시그마 책을 펼치고 각 시약의 특성들까지 일일이 살펴봤다. 순간 궁금증 하나가 떠올랐다. 단백질 순수분리 과정에서 왜 이온교환수지 시약이 필요한 걸까? 이미 몇 차례나 실험을 한 뒤에 이런 궁금증이 생기다니,

생화학 책을 꺼내보면서 스스로 부끄럽고 한심하단 생각이 들었다. 처음부터 꼼꼼히 살폈다면 실패를 경험하지 않을 수도 있었다.

시약에 대해 알아본 결과, 고체 분말상태인 이온교환수지 시약은 반드시 알칼리 용액과 산성 용액으로 번갈아가며 전처리 과정을 거쳐야 한다. 이 과정을 몇 번을 반복해야 이온수지가 겔 상태로 잘 유지가 될 수 있다. 마지막으로 증류수에서 이온수지를 평정시킨 후 상태를 확인하기 위해선 이온수지 시약의 알갱이 구멍이 현미경으로 볼 때 완전히 동그란 모양으로 나와야 한다.

이 사실들을 알게 되기까지 오랜 시간이 걸렸고, 실험에 실패한 이유를 찾을 수 있었다. 첫 번째 이유는 두 말할 필요 없이 유효기간이 지난 시약을 사용한 것이었다. 두 번째 이유는 이온교환수지의 전처리 과정과 증류수로 평정시키는 과정을 단 1회만 진행한 것. 그리고 이온수지에 단백질이 통과할 수 있는 구멍이 균일하게 만들어졌는지 현미경으로 확인하는 작업조차 하지 않았기 때문이다.

그렇게 했으니 칼럼 속 이온수지에 부은 조효소 용액이 충분한 전처리 과정을 거치지 못한 상태의 이온교환수지와 엉기면서 더 딱딱한 상태로 변했고, 그 상태에선 효소 단백질이 칼럼 속 이온교환수지를 통과하지 못하니 실험이 정상적으로 진행될 리가 없던 것이다. 실패한 원인을 파악하고 새로운 시약을 구입하는 것부터 시작해서 제대로 된 실험을 해내는 데까지 꼬박 6개월이 걸렸다. 반년의 시간 동안 실패를 거듭하면서도 포기하지 않고, 누군가는 미련하게 생각할 정도로 실패를

반복하면서도 실험을 계속 했다. 처음부터 꼼꼼하게 살폈다면 1개월이면 끝날 실험이었을 텐데 말이다.

이 전에는 이렇게까지 오랜 시간동안 문제점을 끌어안고 가는 일이 없었다. 대학원 선배와 공동으로 연구를 진행했을 뿐만 아니라 난이도가 높은 실험이 아니었고, 모르는 부분이 있다면 선배에게 바로 조언을 구할 수 있었기 때문이다.

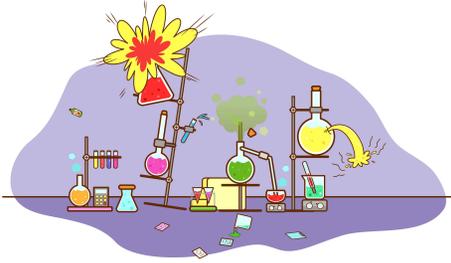
그러나 이번 실험은 달랐다. 함께 실험을 진행한 선배가 없었기 때문에 어떻게든 외부에 도움의 손길을 뻗지 않고 혼자서 해결하겠다는 고집이 실험 진행을 더디게 만든 것이다. 사실 난 생화학 수업은 한번도 들어본 적이 없다. 미생물학에만 치우쳐 다른 과목은 등한시 했고, 생화학은 어려웠기 때문에 수강 신청을 시도조차 안 했다. 그래서 실험 매뉴얼을 작성하면서 여러 논문을 참고했는데, 그 중 두 개 정도의 참고 문헌만 가지고 매뉴얼을 작성한 게 화근이 될 거라고 누가 예상했겠는가.

사람마다 다르겠지만 시약의 전처리 과정은 전공자라면 기초라고 생각하기 때문에 논문에 상세하게 기술하지 않는 경우도 많다. 그리고 초반에 실험 매뉴얼을 준비하는 과정에서 시약에 대한 기초부터 탄탄하게 공부했다라면 실패 가능성은 더 줄어들지 않았을까 생각한다. 예상보다 긴 시간이었지만 그래도 제 날짜에 맞춰 실험을 끝낼 수 있던 것은 기적이라고 생각한다. 물론 포기하지 않고 끝까지 해내리라 마음

먹었던 나의 의지도 칭찬해주고 싶다. 그 후로 실험실에서 진행되는 효소 순수분리 정제 실험은 내가 도맡아 하게 되었다.

최근 2년 전, 지방의 모 대학 내 한 벤처 기업인의 초청을 받아 단백질 순수분리에 관한 멘토링을 해준 적이 있다. 이때 수많은 우여곡절 끝에 성공했던 나의 프로젝트를 떠올리며 열정을 가지고 이틀간 멘토링을 했던 기억이 있다. 그 때 강조했던 건 이 내용들이다. 물론, 앞으로 이 같은 연구를 진행할 새내기 연구원들도 참고했으면 한다.

가장 중요한 건, 실험을 진행하기 전 어떤 반응이 왜 일어나는지 과학적 원리에 대한 기초를 반드시 확인하라는 점이다. 다음은 문제 해결이 더딜 땐, 선배나 지도 교수에게 적극적으로 조언을 구할 것을 추천한다. 이것이 가장 빠른 지름길이 될 수 있다. 그리고 저명한 논문을 참고하되, 유사한 논문을 최대한 활용해서 내용 분석을 하길 바란다. 마지막으로 중요한 건, 실험에 사용하는 모든 시약의 상태 및 유효기간을 잘 확인하는 것이다. 아무리 숨씨 좋은 요리사라 해도 상한 재료를 가지고 맛있는 일품요리를 만드는 건 힘들지 않을까.



안전사고를 예방하려면, 아는 길도 물어서 가라

 ReSEAT 전문연구위원 김유상

도 금 작업 공정에서 발생하는 육가 크롬은 신체 장기에 천공을 만들거나, 암을 발생시키는 유독 물질로 알려져 있다. 크롬 도금 제품 생산 현장에서는 작업자나 환경 관리자가 정기적으로 유해물질관리 교육을 받기 때문에 안전사고에 대응할 수 있다. 하지만 일반적인 양극산화 표면처리 현장에서는 크롬도금액을 사용하지 않을 뿐 아니라 육가 크롬에 대한 이론이나 실무 지식이 미흡하다. 더구나 습식 방법으로 착색이나 표면 처리 제품을 개발하고자 할 때, 염료나 약품을 많이 사용하기 때문에 기본 원리는 물론 사용 약품의 특성에 관한 올바른 사전 이해가 필요하다.

내가 반월공단 K사의 연구소장으로 근무할 때, 욕가 크롬액이 누출되어 발생한 안전사고를 슬기롭게 대처한 일이 있었다. 당시 K사는 알루미늄 휴대폰 케이스를 생산해서 L사와 S사에 납품하고 있었다. 추석 휴무 때, 영업부 Y대리로부터 크롬 도금액이 누출되고 있으니 즉시 실험실로 와서 조치해달라는 호출이 왔다. 인천 계산동에서 반월공단 원시동까지 차량으로 1시간 정도, 가속 페달을 밟고 급히 30분 만에 현장으로 달려갔다.

약품 누출 사고 현장에 도착해서 실험실에 가보니 초록색의 욕가 크롬 도금액이 에폭시 바닥에 줄줄 흘러내리고 있었다. 추석 휴무라 당직자 한명을 제외하고는 아무도 출근하지 않았다. 당직자 Y대리는 플라스틱 쓰레받기로 욕가 크롬 원액을 떠서 플라스틱 세숫대야에 담았다. 하지만 용액이 닿자마자 세숫대야가 녹아버리고 말았다. 허둥지둥 바닥 청소용 밀대를 들고 와서 바닥을 닦았다. 진한 녹색의 욕가 크롬액은 물과 더욱더 강렬하게 반응했다. 고무장갑으로 욕가 크롬액을 퍼담다가 고무장갑도 녹아 버렸다.

당시 나는 중소기업연수원에서 유독물질 취급에 대한 교육을 받은 적이 있었다. 그때 배운 내용을 기억하고, 모래와 벽돌을 찾아오라고 지시했다. 하지만 K사에는 모래와 벽돌도 비치되어 있지 않았다. 주위를 두리번거리며 건조된 흙을 발견해 겨우 대처할 수 있었다. 건조된 흙을 에폭시 바닥에 뿌리자, 욕가 크롬이 흙에 흡수되기 시작했다. 그렇게 무사히 약품 누출 응급처치가 끝났다. 욕가 크롬 누출 사고는 고무호스가 녹아내린 것이 원인이었다. 실험실 내부 2미터

상부에 욕가 크롬 탱크가 설치되어 있었는데, 가늘고 긴 고무호스가 욕가 크롬을 공급하는데 사용되었다. 하지만 이날 출근한 당직자는 고무가 욕가 크롬에 녹는다는 사실을 알지 못한 것이었다.

이후, 금속 티타늄 튜브로 교체했고 욕가 크롬 누출 사고를 막을 수 있었다. 크롬은 금속이나 플라스틱 표면에 미려함을 주기 위한 장식용이나 유압 실린더의 내마모성을 목적으로 사용된다. 크롬산 처리는 항공기 부품이나 스폿 용접 부품, 볼트나 너트로 조립된 부품에 사용된다. 욕가 크롬은 삼가 크롬보다 색조가 부드럽고 옅은 파스텔, 예나멜과 같은 컬러를 띤다. 욕가 크롬이 함유된 크롬산을 사용하면 피막이 얇아도 내식성이 뛰어나기 때문에 도장하지용으로도 사용할 수 있다.

크롬산을 사용해 작업할 때 생산 현장에서 가장 중요한 것은, 욕가 크롬이 누출되지 않도록 유독 약품의 대처법을 올바르게 알고 작업에 임해야 할 것을 반복 강조하고 싶다. 욕가 크롬 누액 사고는 욕가 크롬에 대한 지식과 취급 경험이 부족한데서 초래된 사고다. 그러니 표면처리 제품을 제조하는 업무를 할 때, 항상 욕가 크롬에 대한 약품의 특성을 올바르게 이해하고 누액 시 대처할 수 있는 지식을 반드시 갖춰야 한다.

K사의 경우, 개발하고자 하는 품목이 알루미늄에 한정되어 있다 보니 욕가 크롬의 특성과 누출 시 대처방법, 취급방법이 부족했다. 만약 5톤 용량의 6가 크롬 약품탱크 튜브가 완전히 파열됐고 물이라도 닿았다면,

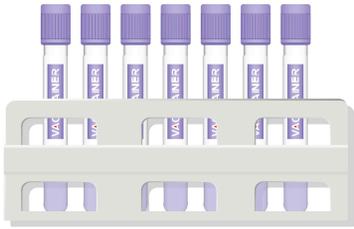
수십억대의 기기가 과열되고 약품 탱크가 폭발하는 대형 사고로 이어졌을 것이다. 화공약품 누액 시, 119 소방서에 연락해서는 안 된다. 당직 당직자가 부른 소방대원들이 물을 뿌리자 욱가 크롬이 더욱 격렬히 반응하며 사고를 키웠기 때문이다.

이와 유사한 실패 사고 경험이 또 하나 있다. 유명 S대학에서 기계 공학을 전공한 전무이사가 있었다. 그는 기계에는 능숙했으나 약품에 관한 지식이 부족했다. 욱가크롬 약품 탱크 누출 사고 현장을 보고 “야! 총무과장, 뭐해! 빨리 119소방서에 연락하지 않고!!” 고래고래 소리 질러 야단을 쳤다. 10분이 지나자 소방차가 도착했고 회사 정문에서 50m떨어진 욱가 크롬 탱크를 향해 물을 뿌리기 시작했다. 누출된 욱가 크롬이 물에 닿자 더욱 맹렬히 반응하며 부식되어갔고, 흰 연기가 하늘로 치솟았다.

욕가 크롬은 현관, 실험실 바닥까지 침투해 고가의 현미경과 컴퓨터, 전자저울 뿐만 아니라 정밀 측정실, 항온항습실의 고가 기기들도 부식시켜 버렸다. 이 사고로 인해 기기 손실액만 무려 5억에 달했다. 나는 아직도 이때 겪었던 욱가 크롬 사고를 생각하면 치가 떨린다. 욱가 크롬이나 이외 약품 누출에 대한 사고 방지를 위해서는 현장에 반드시 모래나 벽돌, 모래주머니, 방화사, 방화 삼을 구비해놓고 있어야 한다.

마지막으로 반드시 경험이 많은 선배에게 자문을 받거나, 교육, 자료 등을 통해 약품 취급 방법을 배워야 사고를 예방할 수 있다는 것을 강조하고 싶다. 사고는 언제 어느 때, 누구에게나 닥칠 수 있는 일이다.

사람이 하는 일은 완벽이란 없다고 생각해야 한다. 위험 현장에서 일하는 후배 연구원들이라면 ‘아는 길도 물어서 가라는 말’을 꼭 잊지 않았으면 한다.



연구 개발, 적어도 10년은 인내하라.



ReSEAT 전문연구위원 김학주

연구 개발에서는 참신한 아이디어나 의욕 또는 기술적 타당성만 가지고 성공하는 것이 아니고 최고경영자부터 연구실 무자에 이르는 끈질긴 인내와 신념이 중요하다고 생각한다. 내가 근무했던 회사의 경영방침은 “돌다리를 두들겨보고도 건너지 않는다.”는 우스갯소리가 나올 정도로 신중함을 중요시하는 곳이었다. 매년 이익이나 성과를 내야 하는 기업 현실에도 불구하고 가능성이 있는 사업이라면 실패와 격려를 아끼지 않으며 기다려 주었다. 어떤 연구 과제의 경우는 10년 넘게 장기간의 연구개발을 수행하도록 지원해주기도 했다.

그러던 중 현업을 중심으로 제품 차별화와 용도 개발연구를 추진하던 연구소는 회사의 기존 사업과는 별개로 위탁연구 결과를 사업화하게 되었다. 무적성(無滴性)필름, 진공 채혈관 및 새로운 개념의 의약을 개발하는 과제였는데, 이 중 무적성(無滴性)필름, 진공 채혈관 개발은 파일럿 양산까지 수행하게 되어 사내에 깊은 관심을 받았지만 타당성 평가, 즉 연구 관리가 미흡하여 중도에 그만두고 말았다. 한편, 의약 사업의 진출을 위한 생분해성 고분자 개발이나 필요한 양의 약물을 효율적으로 전달할 수 있도록 설계한 제형인 DDS(약물전달 시스템)의 개발은 회사와 연구원들의 인내와 신념으로 이룬 신제품으로, 비교적 합리적인 연구관리 체제 하에 이루어진 성과라고 자부한다.

무적성 필름은 온실을 만드는 폴리에틸렌 필름(PE)에 관한 연구로, PE필름 자체는 투명하지만 친수성이 부족해서 내부의 물이 증발하면 표면에 물방울이 맺히면서 햇빛을 차단해 온실효과를 떨어뜨린다. 특히, 이런 현상은 온실이 필요한 겨울의 경우 더욱 두드러진다. 물방울이 맺히지 않도록 제조한 무적성 PE필름을 농업용으로 온실에 적용한다면, 햇빛의 강도가 큰 중동 지역 같은 경우는 바닷물 담수화로도 활용도 할 수도 있어 수출 수요가 엄청날 것으로 예상했다.

우리는 정부 출연 연구소의 연구를 기반으로 개발에 착수하여 약 2년 후 파일럿플랜트를 제작한 뒤 폭 2m 정도의 PE필름을 코로나 방전 처리하고 친수성을 부여하는데 성공했다. 하지만 원료인 PE필름을 자체 생산하는 것은 별개의 사업으로 진행해야 하는 문제와 상업생산 되는

8m의 광폭 PE필름을 구입하여 친수성을 부여하는 일은 양산화가 거의 불가능하다는 문제로 연구를 중단하고 말았다. 나중에 알게 된 사실은, 추운 기후의 유럽 온실 시스템은 우리와는 달리 거의 반영구적으로 유리온실을 만들어 온실재배를 하고 있었으며, 일본의 경우는 친수성이 PE필름보다는 양호한 폴리염화비닐(PVC) 필름을 온실 필름용 소재를 사용하고 있었다는 것이다. 무적성 필름 개발은 아이디어만 가지고 기술과 사업 타당성을 충분히 검토하지 못해 실패한 사례였다.

진공 채혈관 연구는 회사를 떠난 지금까지, 후회스러운 사례로 기억에 남는다. 진공채혈관은 유리나 플라스틱 재질의 투명한 튜브로 채혈을 용이하고 위생적으로 하기 위해 만들어진다. 임상검사는 혈액을 사용하지만, 검체 채취는 검사 전에 오류에 영향을 줄 수 있는 중요한 행위로, 혈액을 채취하고 보관하는 채혈관은 정확한 검사를 위해 기본 조건이다.

채혈관은 각종 시약과 젤 등을 미리 충전하고 채혈 량에 따라 진공을 설정해 밀봉한 일회용 채혈기이다, 현재도 국내 진공 채혈관 시장은 미국·독일·오스트리아·중국 등 외국 제품이 주를 이루고 있는 중이다. 지금은 대부분 플라스틱으로 만든 진공 채혈관을 사용하지만 당시만 해도 유리로 된 주사기로 채취했는데, 에이즈 감염의 심각성이 사회적으로 확산되었던 80년 대 말에는 혈액을 채취하는 기구의 유리가 파손되면서 감염되는 사고를 막기 위해 안전한 소재의 채혈관 개발이 필요하게 되었다. 같은 시기, 회사에서는 이제 막 PET용기 사업에 진출하던 때였는데 마침 PET 용기를 찍어내는 패리슨(parison/예비

성형품)이 채혈관의 형태와 유사하니 이것을 이용해 국산 PET 진공 채혈관으로 만들자는 아이디어를 내놓았다. 우리는 PET 공중합체를 합성, 성형 연구를 통해 성형성, 가스차단성, 투명성 및 혈액적합성 등 다양한 연구를 수행했고 국내는 물론 일본에도 특허를 출원했다.

결과부터 말하자면, 상품화에 실패하고 말았다. 이유는 간단했다. 고분자의 특성과 의료기기에 관해 조금이라도 이해하고 있었다면 알았을, 아주 기초적인 문제를 간과했기 때문이다. PET는 폴리스티렌(PS) 등 다른 고분자에 비해 비중이 크고 무거운데다 가격도 비쌌다. 게다가 용점이 높아 성형이 어렵고 투명성도 떨어져 채혈관 소재로는 적합하지 않았다. 기초적인 오류를 파악하지 못하고 아이디어와 의욕만으로 개발에 착수하는 실수를 했다. 단기과제로 진행한 덕분에 더 이상의 예산, 자원 낭비가 없었다는 것이 그나마 다행이라면 다행이었다. 그렇다고 아주 손해만 본 것은 아니었다. 연구 관리의 부재에서 출발한 실패였기에 과제 선정부터 면밀하게 검토하는 것이 필요하다는 교훈을 깨달을 수 있었기 때문이다.

실패가 있으면 성공도 있는 법이다. 연구소는 몇 번의 실패를 교훈으로 삼고, 신 사업 개발 연구에 더욱 인내와 신념을 갖고 일을 하게 되었다. 10년 간 국내외 저명 학자들을 고문으로 초빙하여 나름대로 연구 관리 체제를 구축하는 한편, 1990년 전후 쯤 사업구조의 고도화를 위해 고부가가치 첨단 산업에 진출하기로 결정하고 의약연구소를 설립했다. 동시에 본사에 의약사업팀을 신설하고 의약산업에 진출하기도 했다. 당시 나는 의약연구소의 책임을 맡게 되어, 새로운 개념의 신약인

DDS(약물전달 시스템)의 개발을 주도하게 되었다. 새로운 개념의 신약인 DDS는 생체이용률이 낮거나 약물이 너무 서서히 흡수되거나 지나치게 빨리 체외로 소실되는 경우, 약물의 방출속도를 늦춰서 문제점을 줄이기 위해 설계된 제형이다.

그 외에 금연 보조제, 여성·남성 호르몬 등을 약물로 만들어 피부에 투여하는 경피 투여제 등을 시작으로 표적지향 항암제를 개발해 신사업에 진출하고 신제품 출시를 단축할 수 있게 되었다. 하지만 이렇게 의약 사업에 진출하기까지 20여 년 동안 인내와 싸우며 집념의 시간이 필요했다. 신사업 진출에는 전사적인 연구체제 구축이 선행되어야 한다는 것을 이런 인내의 시간을 통해 얻게 되었다.

1세대에서 4세대에 이르기까지, 여전히 대부분의 사람들은 연구 개발이 황금알을 낳는 거위나 무에서 유를 창조하는 일이라 기대하고 있다. 하지만 겪어온 시간을 되돌아봤을 때, 연구 개발은 제아무리 뛰어난 아이디어와 기술을 갖추고 있을 지라도 그 결과가 성공할지 실패할지는 아무도 장담할 수 없다고 생각한다. 그만큼 불확실한 가능성에 매달려야 하는 일이 바로 연구 개발이라고 본다. 그렇기 때문에 더더욱 연구 관리의 중요성을 강조하고 싶다. 연구 개발의 성공을 좌우하는 중요한 요소는 첫째, 연구 개발에 종사하는 사람의 기술력과 끈기. 둘째, 경영진의 인내와 신념. 셋째, 리스크를 줄이기 위해 원칙을 정해놓고 목표를 관리하는 것이다. 10년을 인내하는 마음으로 돌다리를 두들겨 보며 연구하자. 그렇게 인내하다보면 어느 날, 그 돌다리가 나를 성공의 문 앞으로 안내해 줄 테니 말이다.

두드렸다. 상담실 조교인 김 선생님이 학생들을 맞아 방문 목적과 이름, 학과 등 몇 가지를 묻고 난 다음, 학생들이 갖고 온 설문 조사 계획서를 읽었다. 다 읽고 난 김 선생님은 설문 조사를 한 이유를 학생들에게 물어 보았다. 학생들은 관광 과목 리포트용으로 만들었다는 대답을 하며, 여론조사론 혹은 설문조사법에 대하여 한 강좌도 들어본 적이 없다고 말했다. 스마트 폰에서 얻은 지식으로 설문지 문항 작성 작업을 했다는 것이다. 정말 대단하고 용기 있는 학생들이 아닌가!

“학부를 다니는 비전공 학생들이 스스로 배우고 이를 확인하고자 통계전문 상담실로 찾아 온 것은 정말 장한 일이다”라고 김 선생님은 학생들을 칭찬하고, 한 시간 이상 공들여 그들에게 관광실태 현장 조사를 좀 더 잘 할 수 있는 설문 문항 작성법과 데이터를 엑셀로 통계 정보 그림 처리하는 방법까지 사례를 들어가며 설명해주었다.

학생들을 보낸 김 선생님은 여느 때와 마찬가지로 문을 잠그고 퇴근했다. 이내 상담실에는 적막감이 흘렀다. 대학 건물 복도에 발자국 소리와 학생들의 말소리가 잦아들고 날이 어둑해지자, 24시간 돌아가는 컴퓨터 서버의 열기를 식히려는 “윙”거리는 팬 소리만이 상담실 한 구석을 차지하고 있다.

수요일 오후는 통계학 전공인 대학원생들이 상담실에 모여 봉사하는 무료로 통계 상담 하는 봉사활동 시간이다. 5월이나 10월 경, 특히 많은 학생들이 붐빈다. 이맘때는 학부 학생들이 학기말 과제를 제출할 때이기도 하다. 여름방학이나 겨울 방학이 되면 통계학 비전공 대학원

생들이 상담실의 주요 고객이 되고 드물게 행정 부서나 회사원들이 찾아오는 경우도 있다.

공표된 국가 통계 혹은 사회적으로 관심을 일으킨 여론 조사를 분석하기도 하는데, 통계상담실 한 구석에는 세월과 함께 각종 상담 자료들이 비닐 파일로 가지런히 정리되어 있다. 학생들은 사례 상담 훈련을 통해, 그동안 배운 통계 데이터 지식을 적용해보는 훈련을 하며 모자라는 지식에 대한 열정을 가지게 된다. IMF 사태를 막 겪었던 2000년 초반만 해도 전반적으로 통계에 대한 지식이 많이 부족했다. 심지어 1985년부터 1995년 사이 인문학의 한 연구 분야에서는 생산된 통계의 95% 정도가 통계의 오용 혹은 남용하는 수준으로 조사된 바도 있었다. 통계를 자신의 연구 목적에 부합하도록 데이터를 조작하는 사례도 있었다. 학생들은 사례 연구를 통하여 통계 남용과 오용 사실을 연구하게 되었다.

‘통계는 새빨간 거짓말’이라고 말한 어느 영국 수상의 일화는 정부 정책 책임자의 무지에서부터 비롯된 것이다. 정부의 공식 통계가 휴지 조각이 되지 않기 위해서, 독일의 통계청은 연방 중앙은행과 함께 독립하기도 했다. 선진국에서는 국가 통계 생산과 공표를 권력에서 자유로운 독립 기관에서 다루도록 하고 있다. 국가 통계 정책이 독립적인 이유는 국가 권력에 대한 균형과 견제를 유지하고자 했던 서구의 역사적 산물이다.

며칠 후, 조교 김 선생님이 출근하자 상담실은 평소와 같이 하루

일과가 시작되었다. 첫 번째 일과로 며칠 전 학생들이 조사해 온 ‘경주 관광 데이터 파일’을 검토해 보았다. 관광객 190여 명의 레코드 파일에는 인구 항목 3종류, 설문 항목 20 여 개가 하나도 빠짐없이 가지런하게 정리되어 있었다. 김 선생님은 대학원 연구생들에게 상담 의뢰를 한 학부 조사원들이 어떻게 자료를 조사하였는지 상세하게 물어보라는 숙제를 내었다. 상담을 받으러 온 학생들은 “200명 응답자를 채울 때까지 조사를 하려고 했지만, 관광객 가운데 일정이 바빠서 응답을 안 해준 이들의 데이터는 조사원들이 대신 기재했다.”는 대답을 했다.

설문 조사에서 가장 어려운 점은 무 응답자가 너무 많다는 것이다. 보통의 경우, 표본 응답률이 20%를 넘기도 힘들다. 또, 응답을 하더라도 모든 설문 문항에 응답을 하지 않거나 방어 기제가 작용할 수 있는 설문 문항에는 거짓 응답을 하는 경우도 많다. 이러한 거짓 데이터를 제거하고 나니, 총 78명의 응답 데이터를 얻을 수 있었다. 34% 응답률을 가진 데이터를 통계 분석한 뒤에야 학생들은 제대로 된 보고서를 낼 수 있게 되었고, 데이터의 신뢰성과 타당성을 깨닫게 되었다.

최근의 살충제 계란 파동에서도 알 수 있듯이 데이터 생산자나 혹은 통계 공표자들이 데이터를 자신들의 입맛에 맞게 마음대로 변형하려는 등 개인적 혹은 조직적인 욕심을 가지고 데이터를 다루게 되면 결과적으로 엉터리 통계를 발표하게 된다. 과거의 외환 통화 통계 왜곡 발표가 있었던 1997년 IMF 사태나 줄기세포 영상 데이터를 조작한 황우석 사건 등의 사태에서 알 수 있듯이, 데이터 왜곡은 국가와 온

국민이 큰 충격과 경제적 어려움에 처하게 하거나 국가와 조직의 발전 시계를 몇 년이나 뒤로 되돌려 놓을 수도 있다.

기업의 연구 개발 실험 데이터 역시 시간에 쫓겨 목표 결과를 얻을 수 없게 되면, 연구원들은 데이터 왜곡해서라도 원하는 결과로 바꿔놓고 싶은 심리적 유혹을 느낀다. 해서, 최근 10년 간 각종 국가 R&D 사업 결과 보고서 심사에서는 데이터의 허용 오차와 오차 범위를 중요하게 본다.

나의 경험 상, 중소기업 현장에서는 숙련된 연구 실험 장비 전문가나 전문 데이터 분석가들을 찾아보기 힘들었다. 중소기업에서는 설계 혹은 생산품 데이터 처리를 처음부터 다방면의 통계 전문가 혹은 데이터 전문가와 상의하여 기초적 데이터 수집 및 통계를 잘 정리하는 것만으로도 기업에 이득이 되는 결과를 얻을 수 있다. 일부 데이터를 부풀리거나 줄이는 왜곡 데이터보다는 차라리 조사나 실험에서 발생하는 오류가 있는 이 빠진 데이터야말로 기업이나 조직의 문제 해결을 할 수 있는 신뢰성 있는 좋은 데이터라고 할 수 있다.



처음으로 돌아가면 문제의 실마리가 보인다



ReSEAT 전문연구위원 변선호

세계적으로 육군의 야외훈련에 필요한 통신선인 군용전화선의 수요는 매우 많았다. 그래서 1970년대 초, 국내 굴지의 화학회사는 군용전화선의 개발에 뛰어들었다. 당시 엘리트 화공 전문가들이 이 개발에 참여하였으나, 고가의 나일론 원료를 가지고 천문학적인 스크랩¹⁾만 만들어내고 포기했다는 소문이 돌았다.

본인은 화학공학을 전공하고 G전선회사 공채1기로 입사한 뒤 서독 정부의 초청으로 기술 훈련을 받은 적이 있다. 당시 Hoechst사에서

1) 스크랩: 제품 폐물

군용전화선 제조 기술의 어려움에 대한 이야기를 들었다. 제조 기술의 본거지라는 일본도 이를 개발할 때 엄청난 고생을 겪었고, 개발 후 생산 시에도 불량률이 높아 상당히 골치가 아팠다고 한다.

따라서 전선공업에 종사하는 화공 기술자에게 군용전화선의 생산은 반드시 정복해야 할 대상이라고 생각하고, 그때부터 전선피복용 나일론 압출 관련 자료를 모으고 공부하기 시작했다. 지금까지 전선 제조 시, 절연체로 사용하던 폴리에틸렌(PE)이나 PVC와 같은 통상의 상용 플라스틱을 압출 가공하는 것보다 나일론 압출 가공 작업이 더 어려운 이유를 알게 되었다. 온도가 조금만 변해도 나일론은 용융점도가 급격하게 변하기 때문이다.

미군 규격에 의한 이 군용전화선의 구조는 간단하였다. 동선과 강선의 동심 연선 도체 위에 압출²⁾ 피복된 PE 절연체가 있고, 외피는 나일론으로 된 구조였다. 가장 신경 써야 할 부분은 나일론 외피의 기계적 강인성과 마모에 대한 저항이었다. 거친 야외지형에서 전선을 끌고 다니며 포설하기 때문에, 이 과정에서 도체 위에 피복된 약한 물성의 PE 절연체를 보호하기 위해서다. 이는 충분히 충족시킬 수 있었다. 다만, 나일론의 최대 약점인 높은 수분 흡수율에 대한 대책이 필요했는데 건조 조건을 신중하게 정할 필요가 있었다.

어느 날은 공장장의 호출을 받았다. 약 2개월 후에 육군본부 두

2) 압출: 수지를 스크루와 원통형 금속 벽 사이에서 스크루 회전에 의한 압력과 열로 연속 용융시켜 밀어냄

장성이 공장을 방문한다는 것이다. 방문 목적은 우리 회사가 군용 전화선을 생산할 수 있는지 없는지 현장을 확인하기 위한 것이라고 했다. 당시 군용 수요는 많았지만 국산품이 없던 상황에서 우리 회사의 경쟁업체가 납품을 시작한 것과 관련이 있던 걸로 기억된다.

군 시방서를 구해 동료와 함께 생산 기술 연구를 시작했다. 시방서에 지정된 나일론은 비싸기로 유명한 미국회사의 제품이었다. 나일론 성형 압출용 스크류와 외피 압출용 공구의 설계 및 제작은 절연용 방식과 다른 기술을 적용했다. 이것이 전체 개발의 핵심 기술이었다.

개발 과정은 문제 해결의 연속이었다. 동선과 강선과는 다른 기계적 물성을 가진 선재의 연선 등 도체 제조 시 발생할 문제를 해결하는데 수일이 걸렸다. 박막의 나일론 두께 탓에, 니플 제조도 무수히 실패하여 특수 구조 및 특수 재료로 바뀌가며 수차례 시도하였다. 뿐만 아니라 압출성형 스크류도 몇 개나 부러뜨렸다. 점점 자신이 없었다. 상용 고분자와 완전히 다른 압출 기술이었다. 최종 시행착오 끝에 드디어 나일론 압출에 성공했다. 흑색 PE 절연체 위에 나일론이 밀착해 윤기를 내며 피복되었다. 두 눈을 의심하였다. 육군본부 팀의 공장 방문 예정일을 하루 남겨둔 시점이었다. 이런 일을 두고 기적이라고 하는구나 싶었다. 정말 아슬아슬했다.

드디어 방문 당일이 되었다. 육군본부 장군들이 확인하고 싶어 하는 공정은 군용전화선 시제품 제조 공정 중 나일론 외피를 입히는 두 번째 압출 공정일 것으로 추측 됐다. 나일론 압출이 가장 어렵고 문제가 생길

가능성이 높은 작업이라는 정보를 미리 알고 있다는 정보도 있었다. 마침내 두 장군이 우리 회사를 방문하여 나일론 압출 피복 현장을 보게 되었다. 반짝반짝 광택을 내며 나일론 외피가 깔끔하게 피복 되었다. 손으로 구부리거나 비틀어도 외피는 제대로 밀착되어 있음을 확인할 수 있었다. 두 장군의 얼굴에서 흡족해 보이는 표정을 읽을 수 있었다. 첫 번째 공정이나 세 번째 공정은 궁금해 하지도 않는 눈치였다.

좋은 결과에 자신감을 얻은 공장장은 수급에 마음이 바쁜 두 장군과 마주앉아 당일 414마일의 3개월 내 납품계약을 성사시켰다. 40년이 지난 지금도 당시의 수량은 잊히지 않았다. 여하튼 그렇게 쉽고 멋있게 나일론 압출에 성공하리라고는 생각지도 못했다. 이토록 간단한 제품 개발에 실패한 국내 화학 대기업들을 떠올리며 살짝 우쭐한 기분이 들기도 했다.

본격적으로 동료들과 함께 제조 과정에 돌입했다. 그런데 이게 웬 일인가! 나일론 피복 후 2주일 정도가 지나자 윤기가 흐르던 나일론 외피가 PE 절연체로부터 누렇게 들뜨기 시작했다. 나일론 외피가 흑색 절연체에 밀착되었을 때는 검게 보이지만 들뜨니 나일론의 자연색 빛깔이 드러났다. 그때 바라본 동료들의 얼굴도 모두 누렇게 떠있었다. 당황한 기색을 감추지 못한 것이다. 아마 내 얼굴도 똑같이 누렇게 떴을 것이다.

이 날 이후로, 나일론 외피가 들뜨는 원인을 찾아 개선하기 위한 지옥의 날들이 시작되었다. 우선 지정된 나일론은 압출 특성이 개선된

나일론 610 계통이라고 추정되는데, 흡수율은 나일론6이나 나일론66의 약 1/2 정도로 많이 개선되어있다. 그러나 대기 중에서 PE 흡수율이 약 20배에 달하기 때문에 이에 대한 최적의 건조법이 필요하다. 나일론 외피 압출 시 절연체 위에 가해지는 용융 외피 압력의 증대(밀착)를 위한 압출방식의 재검토가 필요한 상황이었다. 따라서 나일론 외피 압출 시 외피 바로 밑에 있는 PE층의 예열 방법이 중요한 검토 대상이었다.

예열 방법을 하나하나를 검토하여 시간 경과에 따른 나일론 외피 들뜸 여부를 검사하는데 상당한 시간이 걸렸다. 철야는 일상이 되었다. 조건을 바꿔가며 시험했지만 예정된 납기의 두 배의 시간이 흐를 때까지 해결하지 못했다. 다들 포기하는 지경에 이르렀다. 공정 인자를 아무리 바꾸어도 피복 직후는 제대로 밀착되는데, 시간이 지날수록 들뜸 현상이 일어났기 때문이다. 그 비싼 나일론 수입품이 폐기물이 되어 산처럼 창고에 쌓여 사표 낼 염치도 없었다. 곳곳에 놓인 보빈에 감겨있는 균용전화선에서 누렇게 들뜬 나일론 피복이 보였다. 모두 정신을 차리지 못하고, 자포자기 심정으로 회사의 조치에 따르자는 분위기였다.

그로부터 며칠 후, 본인의 책임을 통감하며 정신을 차릴 수밖에 없었다. 냉철하게 처음으로 돌아가 기본 개념부터 재검토에 착수했다. 동시에 밀착을 위한 다른 방법도 찾아보았다. 표면에 화학적 작용기 없는 PE는 나일론과 화학적으로 계면에서 서로 밀착하기 어려웠다. 이러한 경우 중간층을 넣어 양쪽과 잘 붙게 할 수 있는 화학적 방법이 있다. 그러나 이 중간층은 전기적 특성에 악영향을 주기 때문에 통신

케이블에는 사용될 수 없었다. 따라서 PE, 나일론 두 가지만 가지고 계면이 밀착되게 하는 방법이 최선이었다. 이를 위해 화학적으로 안정된 고분자인 PE 표면을 산화시킬 정도로 강렬한 불꽃 등에 의해 열처리 하는 방법이 동원돼야 했다. 열처리를 통해 표면에 작용기를 부여해 나일론 표면과 밀착시키는 것이다. 나일론 피복 시 물 냉각도 검토 대상이 되었다.

그러나 최종적으로 가장 중요한 것은 공정관리의 개선이었다. 합격 여부를 생산과 동시에 즉시 파악하는 것이다. 들뜸 현상을 손으로 비틀어 보는 검사 방법보다는 혹독하지만 보다 손쉬운 밀착성 점검 방법을 찾는 것이다. 그렇게 해서 들뜸 현상이 나타나는 기간을 단축해 공정 조건을 즉시 조정해야 했다. 이제 이 방법을 찾아내는 건 나의 몫이었다. 동료들과 현장에서 동고동락하며 여러 가지 검사 방법을 검토한 끝에 드디어 최적의 방법을 찾아냈다.

이렇게 쉽고 간단한 검사 방법을 왜 이제야 알게 된 걸까. 자괴감이 하늘을 찢었다. 그러나 나름대로 다행이라는 생각도 들었다. 이 검사법은 워낙 혹독한 방법이므로 이 검사에서 합격하면 아무리 시간이 지나도 들뜸 현상은 일어나지 않는다는 사실을 품질보증부에서 반복 확인 하였다. 팀장을 잘못 만나 고생만 잔뜩 한 채 실망에 빠져 있던 동료 들의 얼굴에 비로소 화색이 돌았다. 다시 조직 내에 생기가 돌고 활기를 띄기 시작했다. 조직 내에서 책임자의 역할이 얼마나 크고 중요한지 재차 통감한 순간이었다.

매우 효과적이고 손쉬운 이 즉석 검사법은 실제 작업자가 공정관리에서 손쉽게 합격 여부를 확인할 수 있다는 것을 의미한다. 비로소 공정관리에서 품질이 100% 확인된 제품만 다음 공정으로 넘어갈 수 있게 되었다. 이제 완전합격품만 생산해낼 수 있게 된 것이다. 이에 G사는 세계적으로 품질관리에 악명이 높은 군용전화선을 최고의 품질과 경제성으로 세상에 등장 시킬 수 있었다. 이로 인해 한국은 세계 최대 수출국의 대열에 오르게 되었다.

우리가 군용전화선을 개발해낸 이후로도 혁신적인 생산방법과 나일론 재료의 보완에 대한 지속적인 연구를 진행했다. 실전의 실패 경험으로 큰 깨달음을 얻은 본인은 당년 회사 목표인 전년도 불량률 50% 절감을 달성한 유일한 부서장이 되었다. 전 임원의 기립 박수를 받았던 그 날의 기억은 잊을 수 없는 기억으로 남아있다.

어떤 일을 수행할 때 반드시 기술적인 어려움에 맞닥뜨리기 마련이다. 어떤 수단과 방법을 동원해도 해결이 안 되는 경우라도 포기하는 대신 처음으로 되돌아가보자. 기본으로 돌아가 처음부터 차근차근 되짚어보면 반드시 문제를 해결할 수 있는 실마리를 얻을 수 있다고 생각한다. 본인도 생산과장 초년에 이를 몸소 체험해 일생일대의 위기를 극복할 수 있었다.



21세기 기술 전쟁의 갑옷 ‘특허’

 ReSEAT 전문연구위원 박세환

특허청에 출원된 모든 특허(patent)는 기 출원된 특허와 동일하거나 유사한 종래 기술이 존재하는 지를 파악하는 선행기술조사(Technology information search¹⁾)를 시행한다. 특허 심사의 질적 향상과 심사 기간을 단축하기 위해서다. 심사관은 이 조사 결과를 토대로 출원 특허의 등록 여부를 판단한다. 대형 국가 R&BD 과제를 신청할 때도 관련 기술 분야의 선행기술조사 보고

1) 선행기술조사는 출원된 특허의 신규성이나 진보성 등 특허요건을 심사하기 위해 관련된 선행 기술(특허, 논문 등)을 검색하는 것이다. 특허법 제36조의 선출원 및 제29조 제3항의 확대된 선출원의 검색도 포함된다. 특허청 심사관은 선행기술조사 업무를 외부 전문기관에 의뢰할 수 있다.

서를 첨부하도록 의무화되어 있는데, 연구 개발의 중복 투자를 방지하고, 연구 개발 결과가 특허로 등록되었을 때 유사 기술과 특허 침해 분쟁 등을 사전에 예방하기 위한 목적이 있다.

특허청에서는 2005년 처음으로 민간 기업에 선행 기술 조사 업무를 의뢰했다. 당시 나는 특허 로펌 그룹(특허 출원 및 법적 대응&특허 조사/분석&학술연구용역 업무 등)의 대표 변리사에게 스카우트 제의를 받고 업무 총괄 PM(Project Manager)을 맡아 선행기술조사 사업을 착수하게 되었다. 먼저 특허청 선행기술조사업무 지정 기관으로 선정 받는 일이 급선무였다. 당시 특허 로펌 그룹의 경영진(변리사그룹 포함)과 한 달 동안 수많은 전략 회의를 거쳐서 특허청에 서류를 제출한 뒤 선행기술조사업무 지정기관으로 선정을 받게 되었다. 서류 준비 과정에서부터 지정을 받기까지 많은 난관이 있었다.

일단 첫 째로 특허청으로부터 선행기술조사업무 지정 기관을 선정 받기 위한 경쟁이 치열하였다. 우리 특허 로펌 그룹은 변리사 그룹을 포함해 40여명의 전문 인력으로 구성된 소규모 연구소였다. 당시 경쟁사 중에는 특허청의 자회사 격인 공기업, 특허DB까지 보유하고 수년간 전후방 특허 업무를 수행해온 기업, 기타 특허 출원 및 분쟁 대응 등 기본적인 특허 업무를 수행하는 다수의 기업들이 있었다. 이들에 비해 특허 조사와 분석을 위해 창업한 지 고작 1년 정도 된 우리 그룹은 여러 면에서 경쟁력이 약해보였다.

이를 보완하기 위해 우리 특허 로펌 그룹은 그동안 출원한 특허의

높은 등록률을 강조했다. 당시 국내 특허 등록률은 71.7%였다. 이에 비해 우리 특허 로펌 그룹의 등록률은 약 95%에 가까운 매우 높은 등록률을 보유했다. 특허청 관계자로부터 출원 업무(특허명세서 작성이나 보정 등)를 가장 충실하게 해왔다는 점을 인정받을 수 있었다. 두 번째 커다란 난관은 특허 조사/분석 전문 인력을 확보하는 것이었다. 당시 전문 인력들은 대부분 전기 전자 및 정보통신 등 주로 ICT 관련 전공자들로 구성되어 있었다. 그러나 선행 기술 조사 업무가 ICT 분야만 있겠는가? 기계, 화학/생명, 에너지, 환경/건설 등 다양한 기술 분야의 특허들이 출원되고 있어 이들 출원 특허에 대한 선행기술 조사 업무를 수행할 수 있어야만 지정을 받을 수 있는 상황이었다. 우리는 경영진과 논의해 다양한 전공 분야의 전문 인력 20여명을 채용했다.

나는 약 한 달 동안 신입 연구원들에게 매일 5~6시간씩 특허법과 특허 업무 및 선행 기술 조사의 이론과 실무 교육을 가르쳤다. 그 결과 특허청의 선행기술조사 업무 능력평가에서 당당히 1위를 차지하는 보람을 맛보았다. 우리는 이런 노력으로 선행기술조사업무 지정 기관에 선정 됐다. 대학에 오랜 기간 재직했던 나에게 특허 관련 업무는 다소 생소했다. 지정 기관에 선정된 후부터 특허법을 기본으로 한 특허 업무의 제반 절차를 이해하기 위해 노력했다. 특허 업무를 총괄하기 위해서 특허 출원 관련 업무는 물론 특허침해분쟁 대응(특허소송 등), 특허 권리 분석 등 주변 업무에 대한 깊은 이해가 필요했다. 20여명의 신입 연구원들을 교육할 때는 마치 다시 대학 교단에 선 듯한 느낌을 받았다. 이 교육을 통해 나 역시 산업을 바라보는 안목을 갖추게 되었다.

나는 1년 동안 1,500여건의 선행기술조사 보고서를 작성했는데, 보고서 1건을 작성하기 위해서는 유/무료 특허DB에 접속해 전 세계 주요국에 출원/등록된 선행특허를 검색해야 한다. 이외에도 출원 국가가 지정되어 있을 때는 해당 국가의 특허DB를 검색하기도 한다. 검색 결과 유사기술이 검색되지 않으면 추가적으로 Web of Science/Science Direct 등 웹 사이트에서 관련 논문을 검색해 출원 특허와 유사한 문헌(article)을 찾아내어 특허성 유무를 판단한다. 이때 한국과학기술정보연구원(KISTI)의 NDSL 같은 과학기술정보DB를 적극 활용하기도 했다. 그러니까 보고서 1건을 작성하기 위해 20여개 이상의 참고 문헌을 살펴보는 셈이다.

이 업무를 통해 대량의 국·영문 참고문헌을 속독하여 핵심을 빨리 파악하는 나름대로의 실력을 터득하게 됐다. 선행기술조사 업무총괄 PM의 역할은 단지 조사 업무 총괄만이 아니었다. 보고서 작성뿐만 아니라 수석팀장으로서 연구원들의 선행기술조사보고서를 검토하는 역할도 만만치 않은 일이었다. ICT 분야는 문제가 없었지만 비ICT 분야의 보고서를 검수하기 위해 기계, 화학, 에너지, 환경/건설 등 다양한 분야의 기초학문을 공부하는 일도 소홀히 할 수 없었다.

월 말에 수백여건의 선행기술조사 보고서와 전자과일(CD)을 특허청 담당 심사관들에게 납품하고 나면 한달 업무가 마무리 되었다. 그런데 여기서 끝이 아니다. 납품 보고서에 대한 심사관들의 질문과 재검토 요청 등 잔여 업무가 남아 있었다. 수석 팀장과 변리사들은 매일 야근을 해야 했다. 힘은 들었지만 덕분에 선행기술조사를 포함한 특허 조사/

분석 및 학술연구용역 업무를 통해 글로벌 산업 동향과 기술 시장의 트렌드를 바라보는 안목을 가질 수 있었다. 이후 기술/시장조사 전문 연구소로 옮겨 관련 학술연구 용역을 수행할 때도 이런 경험이 큰 도움이 되었다.

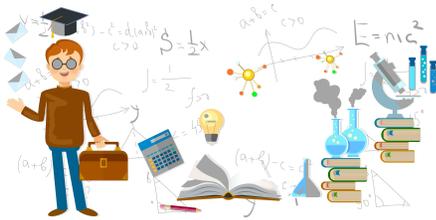
내가 특허 로펌 그룹에 다닐 때만 해도 국내 특허 등록률은 71.7% (2007년 기준)로 상당히 높은 편이었다. 이후 2015년에는 등록률이 47.7%에 불과했다. 과학 기술 분야의 신기술 개발이 그만큼 어려워지고 있다는 반증이었다.

위낙 유사 기술들이 많다보니 기업들은 기 개발된 기술의 단점을 개선한 회피기술(틈새기술) 개발에 주력하고 있다. 기업의 자산인 지적권을 확보하기 위해 BM특허²⁾를 확보하는 데 집중하고 있다. 특허 산업에서 꼭 지적해야 할 문제가 있다. 바로 특허 괴물이다. 산업계의 관심이 높은 첨단 기술을 특정 기업이 독점하는 일을 방지하기 위해서는 정책적인 지원이 필요하다고 본다. 이 특허 괴물의 문제는 핵심 기술만 지재권화 하는 것이 아니라 사업화 가능성이 매우 희박한 주변 기술까지 모두 선점하는 것이다. 이렇게 되면 특허 권리 기간인 20년 동안 동일 업계의 출원인들은 특허 출원을 못하게 되고 기술 개발과 시장 진출이 막힌다. 이렇게 기술 시장을 독점한 특허 괴물은 경쟁자가 없기 때문에 핵심 기술의 개선이나 발전이 더뎠고 결국 피해는 소비자에게 돌아간다.

2) 영업방법(BM : Business Method) 특허는 사업아이디어를 컴퓨터, 인터넷 등의 정보통신 기술을 이용하여 구현한 새로운 비즈니스를 의미하며, BM발명이 특허심사를 거쳐 등록되면 BM특허가 된다.

대표적인 사례 중 하나가 ‘3D 프린팅’ 기술이다. 이 경우 특허 권리 기간이 만료된 후에 획기적으로 개선된 특허 기술들이 봇물처럼 쏟아지면서 제조업 분야의 혁신을 가져오는 계기를 만들었다. 국내의 경우도 예외는 아니다. 시장성이 높은 첨단 미래 유망 기술들은 대부분 대기업들이 독점하고 있어 중소기업의 기술 시장 진출 활로를 가로막는 경우가 있다. 해서, 정부 주도로 대기업의 보유 특허 중 사업화가 되지 못한 특허 권리는 무상으로 중소기업에 양도할 것을 권장하고 있는 중이다.

오늘날 특허 기술 없이 기업을 운영하는 것은 마치 맨몸으로 악어 농장에 뛰어드는 것과 같다고 할 정도다. 그만큼 특허 기술은 기업의 생명과 같은 것이며 특허를 통해 기술의 가치가 발휘됨으로써 기술 사업화로 나아가는 것이다. 21세기의 특허 기술은 이제 필수 전략이다.



기초가 연구 개발의 기본이다

 ReSEAT 전문연구위원 성용길

미 국 유학 중 경험했던 R&D에 관한 이야기다. 1975년 봄, 나는 미국 유타 대학교 유학길에 올랐다. 그리고 그 대학 대학원 재료공학과 생체재료 연구실에서 안드라테 교수의 지도 아래 박사과정을 시작했다. 연구팀에 합류한 초기엔 매주 목요일 아침 일찍 시작되는 세미나에 참석하여 분위기를 익혔다. 한 주 간 연구한 내용을 발표하고 지도 교수와 함께 토론하는 세미나였다. 한국에서는 볼 수 없었던 분위기와 활발한 토론이었다.

당시 안드라테 지도교수는 미국국립보건원(NIH)의 대형 “친수성 하이드로 겔(Hydrogel)의 연구 프로젝트”를 가지고 계셨다. 교수, 연구원, 포스 닥, 대학원생들과 연구팀을 구성해 생체 재료를 집중적

으로 연구 개발하고 있었다. 안드라데 교수는 연구를 위해 유럽에 자주 출장을 다니셨다. 친수성 고분자에 관한 하이드로 겔 연구가 유럽에서 더욱 활발히 진행되었기 때문이다.

달 착륙 선점을 두고 미국과 러시아가 치열한 경쟁을 벌이던 때이었던 만큼, 전 세계가 경쟁적으로 새로운 첨단 과학 연구를 시도하고 있었다. 미국은 인간 중심의 생체 재료 과학을 개척하기 위해 뜨거운 경쟁을 펼치고자 했다. 유타대학교는 미국 내 다른 대학들에 비해 생체 재료 및 의공학과의 일찍 창설되었는데, 의과 대학과 공과대학, 이과 대학들이 공동으로 참여해 연구팀이 구성되어 국가의 대형 프로젝트를 전개했고, 나도 이 연구에 참여했다. 생체재료에 관한 하이드로 겔 연구를 집중적으로 시작하면서, 학술 논문과 특허 문헌들을 100여 편 넘게 심층 분석하고, 세부적인 연구 계획을 세웠다.

가장 먼저 기초 연구를 시작해야 했는데, 친수성 고분자와 물 분자 사이의 상호작용을 이해하기 위해서였다. 친수성 고분자에는 여러 종류가 있다. 이 중 친수성 폴리(하이드록시 에틸 메타클리레이트)와 가교제를 특별히 선정해 연구를 시작했다. 콘택트렌즈의 주재료인 2-하이드록시 에틸 메타클리레이트, 2,3-디하이드록시프로필 메타클리레이트, 에틸렌 디-메틸메타클리레이트, 테트라에틸렌 디에틸 메타클리레이트 등을 바탕으로 각종 수화 겔을 만들어 연구시료를 완성했고, 이 기본 시료들이 물속에서 얼마나 팽윤될 수 있는지 정량 평가하고 하이드로 겔 속에 있는 물 분자와 친수성 고분자 사이에 상호작용이

어떤지, 이 가운데 물질들이 어떤 상태로 존재하는지 등을 탐구하기로 했다.

우리 인체의 수분 함량은 약 65%고 이 중 혈액 속에 약 95% 이상의 물이 포함되어 있으며, 그 물들은 세포와 조직 속에도 상당량 들어 있다. 인체의 손상된 조직이나 기관을 대체할 새로운 조직과 기관은 생체재료를 통해 만드는데, 이 생체재료는 반드시 물을 함유하고 있어야 한다. 인체 조직과 접촉하는 새 조직의 수분 함량이 많아야 부작용을 줄이고 잘 적응할 수 있기 때문이다. 그래야 생체 적합성이 좋고 유화 되어 부작용이 나타나지 않기 때문이다.

생체재료 실험을 위한 첫 연구 관문은 친수성 고분자와 물 분자 사이의 상호작용 현상을 규명하는 일이었다. 여기에 사용할 물은 최소한 3차 증류수와 같은 순수한 물이어야 한다. 순수한 물을 얻기 위해 미리포아 큐 정수기 장치를 통과한 물을 몇 번이고 증류하며 실패한 고생은 지금도 잊을 수가 없다. 정밀한 실험이 이렇게 작은 일까지 세심하게 신경 써야하는 일일 줄이야. 한국에서 공부할 때는 정말 미처 몰랐던 일이었다. 그래도 시설 좋은 미국 대학의 연구실에서는 적극적으로 노력만 하면 해결이 가능했으니 행운이었다고 생각한다.

다음 단계는 펄스-NMR의 실험 장치 설치와 측정법을 익히는 일이었다. 펄스-NMR 실험 장치는 일반 분광기와는 달리 핵자기공명현상을 이용해서 펄스를 찍고, 그 펄스-스펙트럼으로부터 프로톤(H1)과 주변의 친수성 고분자 사슬에 있는 프로톤들과의 상호작용을 측정해 내는

장치다. 다행이 이 펄스-NMR 장치가 연구실에 설치되어 있어 편하게 스핀-래티스 이완 시간(T1)과 스핀-스핀 이완 시간(T2)를 측정하는 연구를 했다. 거의 한 해 동안 이 펄스-NMR 실험장치에 죽기 살기로 매달리며 실험으로부터 얻은 자료 데이터(T1, T2)를 분석하고 검토해 그래프를 만들었다.

그 결과 다른 연구자들이 얻은 실험 데이터보다 더 자세한 자료와 이전에 나타나지 않은 곡선과 변곡점이 나타나는 것을 발견했다. 참 신기한 결과였다. 몇 번이고 재차 검토 한 뒤 결과를 지도 교수에게 보고하고 매주 목요일 아침에 열리는 세미나에서도 발표를 했다. 크나큰 성공이었다. 비교적 좋은 평가를 받은 연구 결과를 토대로 본격적인 연구를 시작했다.

그 다음 과제는 열역학적인 새로운 접근 방식의 열분석 기법을 사용해 친수성 하이드록시 에틸 메타클리레이트와 물 분자의 상호 작용을 알아내는 일이었다. 먼저 열분석 기법에 맞는 시료의 알루미늄 셀을 구입해 각종 시료를 만들고 시간에 따른 온도 상승 커브를 실험 실측해 흡열-발열 곡선을 얻어야 했다. 순수 고분자 상태를 관찰하는 것은 하이드로 겔 상태의 시료 상에서 관찰하는 것과 큰 차이가 있었다. 이들을 체계적으로 측정 정리해 종합 검토를 했는데, 언제 해가 뜨고 밤이 오는 지모를 정도로 재미있게 실험을 진행하였다. 이렇게 해서 얻은 펄스-NMR 측정 결과와 DSC실험 결과들을 비교하고 검토하는 작업을 종합해서 마지막에 논문을 완성했다. 이 논문은 SCI급 학술지, 미국고분자학회지에 투고해 채택 통과되었다.

국제 학술지에 출판된 논문을 처음 받아본 순간은 미국에 와서 한 일 중 가장 보람되고 기쁜 추억이었다. 한층 더 높아진 연구 의욕으로 친수성 메타클릴레이트 고분자들에 대한 물 분자들과의 흡착과 흡수성에 관한 실험을 시작했다. 각각 친수성 겔의 물 분자 활동도를 측정하고, 안더슨의 보완 BET 이론식과 헤일우드-호로빈의 이론식을 다시 해석해 보완하였다. 다행히 실험 결과와 이론적 해석이 일치했고, DSC 결과와 펄스-NMR 결과와도 일치했다.

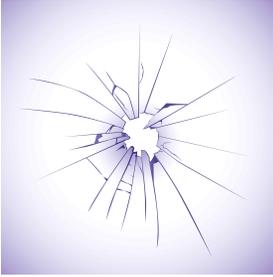
종합적으로 얻은 실험 결과는 친수성 고분자와 수화 겔 내에 네 가지 상태의 물 분자가 존재한다는 결론에 도달했다. 이 연구 결과는 현재 생체재료 연구와 히드로겔 연구의 기본 데이터로 활용되고 있으며, 생체 적합성을 갖는 친수성 고분자를 만들어 수화 겔 형태의 DDS와 콘택트 렌즈에 적용하는데 과학적 근거로 사용되고 있다. 이 결과를 대학원 전체 세미나에서 발표했다. 안드라데 지도교수는 크게 만족해하시며 국제 학술지에 논문을 투고해보라는 제안을 했다. 그렇게 해서 완성된 논문을 투고했고, 심사에 통과해 채택되었다. 계속 연이은 논문출판은 연구의 희열을 맛보게 해주었다.

미국 대학에서 박사학위 과정을 하면서 얻은 좋은 경험이었다. 그 경험들 중에서도 꼭 알아둬야 할 일은, 첫째는 코스워크에서 기본에 철저해야 된다는 점이다. 기초가 제대로 되어 있지 않으면 그 경쟁에서 따라 잡을 수가 없다. 특히 대학원 과정에서 기본 필수과목들은 코어(core) 코스라고 해서 반드시 우수한 성적을 따야 한다. 더욱이 장학금을 받으려면 기본이 강해야 한다. 그런 다음에는 논문의 창의성과 체계적인

학위논문의 작성이다. 학위논문은 가능하면 국제학회에서 발표하여 논문의 수준과 질의 평가를 개관적으로 인정받아야 한다. 그래야만 5인의 심사위원으로 구성되는 박사학위 논문 심사위원들의 평가를 높일 수 있다. 이런 사실을 국내 대학에 있을 때는 전혀 몰랐었다. 실력이 없거나 훈련을 덜 받은 상태로 미국에 유학가게 되면 죽도록 고생만 하고 실패할 확률이 높다는 것을 알아둬야 한다.

한국에서 따뜻한 밥을 먹고, 일가친척 친지 부모님들의 사랑을 많이 받고 있을 때 정신 차리고 열심히 기본 공부를 잘 닦아둬야 한다는 것을 후배들에게 꼭 알려주고 싶다. 박사학위를 얻으려고 유학을 간다면 밤낮으로 열심히 공부를 해서 우수한 성적을 얻어야 하고, 창의적인 아이디어를 내서 우수한 논문을 써야한다. 여기에도 인내와 끈기가 필요하다. 처음엔 워낙 고생을 하다 보니 내가 왜 이런 고생을 사서 하나 싶은 마음에 유학 온 것을 후회하기도 하지만, 학위를 얻고 나서는 “참 잘 왔구나!”, “이젠 나도 해냈다!” 하는 자신감이 생긴다. 고국에 있는 부모님과 가족들에게도 면목이 선다. 또한 젊어서 고생은 사서도 한다는 옛말을 음미할 수도 있다.

도무지 끝나지 않을 것 같던 고생스러운 미국 유학 시절을 견뎌내고 나니, 어느 새 국제적으로 인정받는 박사이자 학자가 되었다는 자부심에 마음이 든든하고 힘이 생겼다. 나도 이제 어서 고국에 돌아가 훌륭한 후배들을 가르치며 보람되게 살자고 다짐하던 때가 엇그제 같다. 지나고 보니 이제는 그 열정이나 인내력에 감사할 뿐이다. 기초는 모든 연구 개발의 기본이다! 이것만을 기억하면 스스로 성공할 수 있다고 믿는다.



백금도가니 파손의 원인은 ‘기본의 부재’다

 ReSEAT 전문연구위원 김용환

원료의 습식 분석이나 높은 순도가 요구되는 유리 용융과 무기 재료 제품에는 백금도가니가 반드시 필요하다. 백금도가니는 일반적인 자재도가니나 내화물 재질의 도가니에 비해 상당히 고가다. 워낙 가격이 비싸다보니 주의해서 사용하게 되는데, 기본적인 사용법을 잘 몰라 파손시키는 경우가 종종 있다. 나 역시 백금도가니를 사용해서 유리를 용융하며 도가니를 파손 시켰던 경험이 있고, 연구실이나 대학에서 학생들이 백금도가니 사용 지식을 잘 몰라서 파손시키는 모습도 여러 번 보았다. 나는 첫 직장인 국립공업연구소에서 요업과 유리실의 연구생으로 일을 시작했는데,

연구소 유리실 업무는 크게 두 가지였다. 하나는 관련 제품의 규격 시험에서 시험 성적을 발급하는 것과 연구 과제를 수행하는 것이다. 대개 연구 과제는 실에 1~2개 정도가 예산에 따라서 배정되었다. 1970년 당시 유리실의 과제는 2개였으며, 하나는 결정화 유리 와 연삭제용 바인더를 개발하는 것이었다.

결정화 유리는 비정질의 유리 내에 결정질을 분산시켜 세라믹스와 같은 효과를 내는 기술이며, 1960년대 미국 Corning사의 Stooky 박사에 의해 연구되었다. 이 유리는 유리 조성 중에 결정을 형성하는 결정핵 형성제를 넣어 유리를 제조한 뒤, 열처리를 통해 유리 내에 미세 결정을 석출시켜 만든다. 결정화 유리는 비정질인 유리와 달리 내부가 결정으로 이루어져 내열성이 우수하며, 세라믹스와 거의 유사한 특성을 가지고 있다.

나는 상사 연구사와 함께 결정화 유리에 대한 연구를 하게 되었다. 그 당시 연구소의 소성설비인 실험로는 SiC 발열체를 사용하는 것이 가장 온도를 높이 올릴 수 있는 방법이었으나, 결정화 유리의 제조 조건 온도인 1600℃ 이상은 무리가 있었다. 결국 우리는 유리 용융의 실험로나 도가니에 대한 새로운 방안을 마련해야 했다. 도가니는 백금도가니를 사용하고, 로는 내화도 실험실에서 용융하기로 결정하고 유리 용융 준비를 했다. 연구사가 본부에서 70ml 정도 용량의 백금도가니를 빌려왔는데, 일반적으로 실험실에서 분석용으로 사용하는 30ml 보다 무척 큰 제품이었다. 용융 시에 가스염이 직접 백금도가니에 닿으면 국부적인 온도 상승으로 도가니가 파손될 위험이 있어, 큰 일반 내화물

도가니에 산화알루미나 분말을 깔고 그 위에 도가니를 넣어서 불꽃이 직접 백금도가니에 닿지 않도록 한 뒤 용융 실험을 했다. 이처럼 까다로운 절차에도 불구하고 백금도가니를 사용해야 하는 이유는 유리 용융 시에 불순물이 혼입되는 것을 방지해주기 때문이다.

우리는 온도가 1700℃ 이상 올라가지 않도록 최대한 조심하면서 용융 작업을 실시했다. 그런데 매햄사, 용융 실험 도중 큰 사고가 발생하고 말았다. 백금도가니 안에 용융된 유리가 거의 없고, 도가니가 침식되어 유리물이 모두 밑으로 흘러내리고만 것이다. 깜짝 놀란 유리실 연구원들은 원인이 무엇인지 다급하게 찾았고, 용융 온도가 너무 높아서 백금도가니가 파손된 것으로 추측했다. 하지만 연구사와 나는 자세한 원인을 조사해보지도 않은 채, 급한 마음에 다시 백금도가니 사용을 신청해서 재차 용융 실험을 했다.

역시나 첫 실험처럼 백금도가니가 침식되어 파손되었다. 도가니의 바닥 부분이 침식되고 구멍이 뚫려서 재사용이 불가능할 정도로 심각한 상태였다. 백금도가니 파손에 대한 보고서와 파손 백금도가니를 제출하고, 사고를 마무리 지었다. 실험 당시 파손된 백금도가니 가격은 확실히 모르지만, 아마도 13평 아파트 값 정도가 아니었을까 싶다. 백금도가니로 결정화 유리 용융 작업을 하는 일은 위험이 크다보니, 알루미나 도가니를 수입해서 실험을 했다. 상사 연구사도 나도 당시엔 사고의 원인을 끝까지 알아내지 못했지만, 이후 유리 산업 분야에서 오래 일을 하면서 결정화 유리를 제조하기 위해 결정핵 성분으로 첨가한 리튬산화물이 고온에서 백금도가니를 침식한 중요한 원인이었다는

사실을 뒤늦게야 알게 되었다.

그 후, 2년이 지나 나는 유리 제조 회사에 입사해서 실험 연구과의 실무 작업을 하게 되었다. 실험실에서는 유리와 규사 등의 원료를 습식으로 분석했다. 여기에도 30ml 백금도가니를 이용해서 우선 시료를 용융한 후에 계통적으로 성분을 분석했다. 3개의 백금도가니를 소중하게 관리하기 위해, 세척한 뒤 데시케이트에 넣어놓고 퇴근 할 때는 금고에 특별히 보관했다. 경험이 많은 실험실이나 연구소에서는 백금도가니 사용에 대한 지식이 많아 실수를 별로 하지 않는다. 고가인 백금도가니가 만능이 아니라는 것을 알고 있기 때문이다. 나는 2001년부터 세라믹스 관련 학과가 있는 여러 대학에서 세라믹스 관련 여러 과목을 강의하게 되었다. 그 중에서 한 대학의 유리 연구 실험실을 지원하게 되었다.

내가 오랫동안 실험실에서 근무한 경험을 활용해서 학과에 습식 분석을 할 수 있는 실험실 설비를 설치해주고 운영을 지도했다. 세라믹 원료나 제품의 습식분석은 우선 시료를 용융하여 액체로 만들고 계통적으로 성분을 분석하게 된다. 여기서 용융 시에 백금도가니를 사용하게 된다. 용융은 전기로를 사용하거나, 버너를 이용하여 직접 녹인다.

분석 업무는 학과의 대학원생이 전담했지만, 2년이면 졸업을 하니 연속적으로 분석 기술이 전수가 되지 않아 어려움이 많았다. 게다가 직장과 달리 학생들의 책임의식이 낮다보니 분석용 설비나 백금도가니가 관리도 어려웠다.

특히, 고가인 백금도가니를 퇴근 후에 그냥 방치하는데다 세척과 보관조차 하지 않고 있었다. 또 다른 문제는 분석과 유리 용융을 같은 백금도가니를 사용하여 실험하는 것이다. 대부분 실험실에서 사용 중에 발생하는 백금도가니 문제는 침식과 파손이나 변형되는 것이다. 일반적으로 유리를 제조하기 위해 백금도가니를 사용하게 되면 유리가 내벽이나 넘쳐서 외벽에 부착하게 된다. 이를 불산 등으로 제거하려고 해도 잘 안 되면 힘으로 제거하는 경우도 있는데, 자칫 잘못했다간 백금도가니가 찌그러지거나 파손되기 십상이다.

백금도가니의 윗부분은 매우 얇아서, 사용할 때 세심한 주의가 필요하다. 고온 용융 시에 백금도가니를 실험실용 집게로 잡을 때 너무 힘을 가하면 변형된다. 백금도가니는 약간 모양이 변하거나 표면이 매끄럽지 못한 것은 폐기 처리 하지 말고 전문적인 수리 업체에 의뢰하면 어느 정도 수리가 가능하다.

여기서 백금도가니를 사용해서 유리를 용융하는 경우, 중요한 팁이 있다. 백금도가니를 사용해서 유리를 용융하는 경우 원료를 2~3번에 나누어 투입해야 한다. 만약 한 번에 원료를 넣으면 용융이 느리거나, 모두 넘치게 될 수 있다. 따라서 처음 투입 할 경우, 도가니의 절반 이하만 원료를 투입하고 어느 정도 녹았을 때 다시 원료를 넣어야 넘치지 않고 용융도 잘 된다. 이 방법은 제조 현장에서도 동일하다. 일반적으로 전기로에서 유리를 용융하면 용융 시에 가스가 발생하여 발열체를 부식시킨다. 따라서 발열체의 수명을 단축시키고, 용융 시에

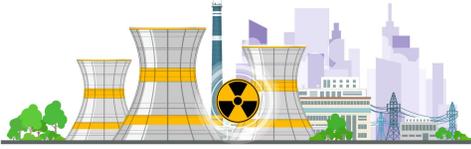
오염을 발생시킬 수 있어 항상 주의가 필요하다. 또한 용융 시에 도가니에서 유리가 넘치게 되면 이 유리성분이 계속적으로 전기로 바닥의 내화물을 침식하게 된다.

용융 시에 백금도가니에 부착된 유리물을 물리적으로 제거하려하지 말고, 내화물 위에 받침대를 만들고 백금도가니를 거꾸로 올려놓고 온도를 올리면 내부의 유리가 모두 아래로 흐르게 되어 백금도가니를 깨끗하게 고온세척을 할 수 있다. 이때 밑에는 유리물이 전기로 바닥에 닿지 않도록 품질이 높은 규사나 산화알루미늄 분말을 깔아야 한다.

백금도가니 사용 시에 중요한 주의 사항을 정리하자면, 우선 백금도가니는 버너를 사용해서 고온에서 재료 용융에 많이 사용한다. 이 경우 산화 상태를 유지해야 한다. 산소가 부족해서 환원 분위가 되면 표면에 탄화물이 생성될 수 있고, 백금도가니 표면이 변색되어 수명을 단축시킨다. 또, 필요 이상으로 고온에서 가열하면 결정이 성장해서 균열의 원인이 되기도 한다. 특히 탄산리튬이 포함된 성분을 용해하는 경우, 낮은 온도에서도 백금을 심하게 손상시킨다. 백금은 텔루르, 셀렌, 인, 주석 등의 물질을 가열하면 쉽게 결합할 수 있다. 그리고 1000℃ 이상에서 산화납이나 산화철에 의해 침식된다. 가열된 백금도가니를 다룰 때는 백금을 사용한 집계를 사용하고, 사용하는 내화물은 고순도의 알루미나 또는 지르코니아를 사용하는 것이 좋다.

백금도가니는 무기원료 분석이나 유리용융 실험에서는 꼭 필요한 기구다. 그러나 대부분 백금도가니의 기본 지식에 대해 잘 모르는

이들이 많다. 일반 대학 실험실의 허술한 관리 문제라던가, 세라믹 분야의 연구 전문가나 교수들조차 유리 용융의 실패 예를 질문하는 모습들이 그 반증이다. 백금도가니를 이용해서 분석 업무나 유리 용융을 하는 경우, 무엇보다 중요한 것은 백금 제품 사용 시 주의 사항을 기본적으로 숙지하는 것이다. 70년대에 무려 13평 아파트 한 채 값과 비슷한 고가의 백금도가니를 두 번이나 파손시킨 ‘기본의 부재’는 연구에서 기본이 얼마나 중요한 조건인지 깨닫게 해준 경험이었다.



비용과 시간 VS 기술의 완전성, 우선순위는?



ReSEAT 전문연구위원 김영철

공학은 과학적, 경제적, 사회적 원리와 실용적 지식을 활용해 새로운 제품을 만드는 것이다. 또한, 원인과 이유를 깊게 탐구하는 자연과학과는 다르게 목표 성과를 달성하기 위해 뚜렷한 목적을 가지고 임한다. 그리고 안정성과 경제성이란 실용적 관점에서, ‘만약에, 그렇지 않다면?’ 의문을 항상 가진 채 시스템을 평가하며 완전성을 구현해야 하는 점도 중요하다.

1990년대 초부터 정부사업인 고속로 기술개발이 시작되자, 나를 포함해 구성된 연구개발팀은 장기목표로 2011년까지 혁신 설계개념의

소규모 고속로를 건설하는 계획을 세웠다. 가장 먼저 착수한 작업은 앞으로 개발해야 할 고속로 시스템의 기본개념을 정하는 것이었다. 이를 위해서, 고속로 시스템을 공학적 관점에서 평가하며 목표 달성이 가능하고 안전성과 경제적 관점에서 우수한 시스템을 완성해야 했다. 사실 우리 연구팀이 고속로 시스템의 기본개념을 개발하기 시작했을 때, 이미 해외에서는 고속로 기술이 완성단계에 도달해 있었다.

미래기술인 고속로는 원자력 시장에 앞으로 큰 영향을 미칠 것이라 전망하고 있었기 때문에, 국가별로 앞선 기술을 선점하기 위한 많은 노력들이 있었다. 해외 각국마다 비교 우위에 설 수 있는 기술과 시스템을 고민하며 치열한 경쟁을 벌였는데, 기술 수준이나 안전성 경제적 측면에서 가장 앞서있다고 평가받은 프랑스의 고속로 시스템을 수렴하는 걸로 의견이 기울어졌다. 프랑스가 개발하고 있던 고속로 시스템의 가장 큰 특징은 첫째, 열전달특성이 매우 우수하고 액체금속임에도 수력학적 특성이 좋은 소듐을 냉각재로 선택한 점이었고 둘째는 노심핵연료의 주변을 통과하면서 열을 전달받는 소듐 냉각재의 일부가 방사성화 되는데, 이 방사성 소듐과 접촉하게 되는 모든 주요 기기들(소듐 펌프, 열교환기 등)을 하나의 거대한 원자로용기 속에 내장해 격리함으로써 안전성을 확보하고 경제성을 개선할 수 있는 풀형(pool) 시스템을 채택하고 있다는 점이였다.

우리도 프랑스처럼 시스템의 기본개념을 쉽게 결정할 수는 있었지만, 사정이 조금 달랐기에 실행하진 못했다. 고속로를 개발해 온 국가들은 막대한 투자를 통해 실험용 고속로에서 중소형 원형고속로, 대형 고속로

까지 개발 단계를 차례대로 밟아오고 있었지만, 우리는 이제 막 시작하는 단계였기 때문에 처음부터 대규모 투자가 필요한 대형 고속로를 개발하는 것은 힘들었다. 그렇다고 선진국의 개발 역사를 처음부터 되풀이 할 수도 없었다. 후발주자인 만큼 경쟁력 있는 참신한 시스템을 개발하는 것 또한 중요했다.

그래서 우리는 시스템 공학의 관점에서 ‘만약에, 그렇지 않다면?’이란 가정 하에 고속로 시스템의 모든 것을 새롭게 검토하고 더 우수한 것을 찾아보기로 했다. 대규모 투자가 어려운 여건이니, 혁신적인 개념의 소규모 고속로 시스템으로도 대형 시스템과 나란히 경쟁할 수 있는 지 가능성을 알아보는 일도 함께 하기로 했다.

사실, 고속로 시스템은 어떤 냉각재를 채택하느냐에 따라 기본개념에 큰 영향을 미친다. 이것은 고속로의 고유특성과 관련이 있는데, 고속로 핵연료는 고농축이라서 기존 경수로 원전에 비해 핵연료 부피가 훨씬 작지만 핵연료 원소의 양은 비슷하거나 오히려 더 많기 때문이다. 결과적으로 훨씬 작은 부피에서 더 많은 열을 뽑아내야 하므로 냉각재의 열수력학적 특성이 기존 원전에 비해 몇 배는 더 우수해야 했다. 고속로 시스템의 기본개념을 정하기 위해서는 우선 냉각재를 선정하고 여기에 적합한 시스템 형태를 만들어야 한다. 그런데 고속로에 가장 많이 사용하고 있는 소듐 냉각재의 경우 안전성과 경제적인 면에서 여러 가지 논란이 있기 때문에, 더 우수한 냉각재와 시스템 형태를 찾을 수 있는지 재점검할 필요가 있었다.

그렇게 고속로 기본개념을 찾는 일이 시작되었다. 우선, 냉각재의 종류와 각 냉각재별 시스템의 가장 바람직한 형태를 모델로 만들어 정성적인 비교를 하고 실제 계산체제를 이용해서 정량적인 분석을 하는 일부터 했다. 고속로 냉각재의 첫 후보는 수력학적 특성이 좋고 핵연료와 접촉해도 방사성화가 덜 되는 가스 냉각재였다. 가스 냉각재로는 공기, 이산화탄소, 질소, 헬륨 등을 연구했는데 영국, 프랑스, 독일 등의 유럽 국가들이 고속로 개발 초기단계에서 후보로 손꼽은 것들이었다.

유럽은 가스냉각 원자로를 개발한 경험이 있기 때문에 고속로에도 이를 적용하길 희망했다. 그런데 당초 유럽의 가스냉각로의 개발 목적은 플루토늄 생산이었다. 그 배경에는 미국이 있었다. 미국은 우라늄-235 농축시설을 통해 개발한 핵무기로 2차 세계대전을 종식시켰고, 이로 인해 전 세계의 핵 주도권을 잡을 수 있었다. 유럽은 막대한 투자비가 소요되지만 경제적 효용성은 낮은 우라늄 농축시설을 개발하기보다, 원자로에서 플루토늄을 생산함으로써 효율적으로 핵무기를 개발하고자 했다.

이후 유럽은 천연우라늄 핵연료와 가스냉각 원자로를 개발해서 플루토늄을 생산하게 되었고, 당초의 목적을 달성한 후에는 이를 더욱 발전시켜 고속로 개발에도 가스 냉각재를 적용하고 싶어 했다. 고속로는 고속 중성자의 강한 에너지를 되도록 빼앗기지 않고 유지하는 것이 중요하다. 반면에 가스는 단위 부피당 질량이 적기 때문에, 중성자와 충돌하면서 에너지를 크게 빼앗는 물리적 특성이 있다. 중성자와의 충돌 확률이 낮고 만약 충돌하더라도 중성자를 흡수하지 않기 위해 에너지를

적게 빼앗는 물질이 고속로의 냉각재로서 유리하지만, 반대로 가스 냉각재는 에너지를 많이 빼앗는다는 문제점이 있었다.

원자로에서 냉각재의 역할은 노심핵연료에서 생산된 열을 뽑아내어 발전시설로 전달하는 것이므로 열전달특성이 우수해야 한다. 특히 고속로는 물 냉각재의 경수로 원전에 비해 핵연료 농축도가 4~5배나 높아서, 목표하는 경제적 규모를 달성하기 위해서라도 열전달특성이 기존 경수로 원전의 물 냉각재보다 몇 배 이상 높아야 한다. 이런 요소들을 모두 고려해서 공기, 질소, 이산화탄소, 헬륨 등 여러 가지 종류의 가스 냉각재를 종합적으로 검토했다.

그 결과 헬륨이 가장 적합하다는 결론을 내렸다. 중성자를 흡수하지 않으면서 충돌 확률이 낮고, 방사성 원소로 전환되지도 않기 때문이다. 헬륨은 원소 중에서 끓는점이 (-269°C)이 가장 낮고 기체 상태로만 존재한다. 또한, 화학원소 중에서 반응성이 가장 낮은 불활성기체이고 우주에서 수소 다음으로 흔한 원소다. 게다가 천연가스에서 추출해 생산하는 공정이 확보되어 있어 공급이 수월하다는 장점도 있다. 반면, 기체 상태인 헬륨은 액체 상태의 유체에 비해 부피가 크고 열전달 특성이 훨씬 낮다는 단점이 있다.

이로 인해 시스템 측면에서 원자로 부피와 냉각재 펌프 용량이 커지기 때문에 경제적으로는 불리한데다, 가장 가벼운 원소(원자량 4) 중 하나로 고속 중성자와 충돌해 에너지를 크게 빼앗기까지 한다. 우리 연구팀이 다양한 시스템 모델을 사용해 분석한 결과, 원자로 부피가

기존 원전에 비해 60%까지 증가했다. 그만큼 건설비용도 증가한다는 뜻이기도 해서 소규모 고속로 개발을 추진하고 있는 우리로서는 채택하기 어려워 보였다. 우리의 냉각재 개발 방향은 열전달특성이 우수한 금속계열의 냉각재를 찾는 것으로 바뀌었다.

고속로의 냉각재로 사용되는 액체금속 후보로는 소듐, 칼륨, 납 또는 납-비스무트 공융체 등이 있다. 납 또는 납-비스무트는 구조선이 원자력 잠수함용 고속로에 사용하던 것으로, 냉각재 강제구동 시 순환 펌프가 없어도 자연 순환을 통해 원자로 열을 뽑아낼 수 있을 정도로 열전달특성이 우수하다는 큰 장점이 있다. 또한 끓는점(납 1,749℃, 비스무트 1,560℃)이 높아 운전 안전성이 높고 물이나 공기와 반응하지 않아 다른 안전장비 없이 고속로 시스템을 단순화할 수 있다.

반면 몇 가지 해결해야 하는 문제가 있는데, 높은 용융점 때문에 운전 중 고체화 되는 현상과 구조재를 부식시키는 위험성이다. 특히, 비스무트-209 원소는 휘발성이고 높은 방사능을 띄는 특성이 있어 더욱 철저한 안전대책이 필요하다. 납 및 납-비스무트 냉각재의 소형 고속로를 독자 개발하려면 상당한 투자비용과 시간이 필요한데, 당시 우리의 여건으로는 어려운 일이어서 결국 포기하고 말았다.

또 다른 방법으로 소듐 냉각재 또는 소듐-칼륨 합금 냉각재를 사용하는 것이 있는데, 소듐과 칼륨의 핵적 특성은 큰 차이가 없다. 강한 반응성을 보이는 소듐은 금속임에도 단일원소 물질로는 존재하지 않고 대부분 소금이나 탄산나트륨 등의 화합물로 존재하며, 암염이나 바닷물의

전기분해를 통해 생산된다. 용융점이 98℃로 낮기 때문에 액체로 사용하는 것이 어렵지 않고 끓는점도 883℃로 상당히 높아 500℃ 이상의 고온으로 운전되는 고속로에 사용하여도 운전 안전성이 우수한데 열전달특성이 매우 높다는 장점이 있다. 반면, 물과 격렬히 반응하고 중성자를 흡수해 쉽게 방사성화 된다는 단점도 있다.

소듐-칼륨 합금은 주로 실험용 원자로에서 사용되었다. 칼륨은 백색의 알칼리 금속으로, 녹는점은 약 63℃, 끓는점은 759℃다. 공기 중에서 열은 보라색의 불꽃 반응을 한다. 소듐-칼륨 합금은 녹는점이 영하 11℃(칼륨 78% 경우)까지 내려가므로 상온에서도 액체 상태가 가능하다. 그러나 열전달 특성이 소듐의 1/3밖에 되지 않고 공기나 물과의 반응성이 너무 높아 상용 고속로의 냉각재로 사용하기에는 불리했다.

결론적으로 우리는, 다양한 냉각재와 다양한 시스템 형태를 모델로 해서 고속로 시스템의 기본개념을 비교 검토했지만 결국 세계적으로 많이들 기술개발 하고 있는 소듐 냉각재 관련 풀형 시스템을 선택할 수밖에 없었다. 이런 결론을 내린 또 다른 이유로는, 고속로 기술개발이 완성단계로 접어 들어가고 있고 곧 상용화가 될 것이란 전망이 있었기 때문에 우리도 빨리 기술개발을 해야 한다는 조바심이 포함되어 있었다. 혁신적인 시스템을 독자 개발해서 경제성과 안전성이란 두 마리 토끼를 동시에 잡는 것은 생각 이상으로 어려운 일이었다.

되돌아보니, 정부를 설득하고자 했던 의지와 역량이 당시 우리 연구팀에게 부족한 것도 실패의 원인이었다는 생각이 든다. 이후 우리나라는

소듐 냉각재와 관련 풀형 시스템을 기반으로 고속로 기술을 개발해오고 있다. 원자로 시스템을 설계하고 소듐 냉각재 순환회로를 축소 모의한 실험장치를 건설하는 등 고속로 시스템 기술을 착실하게 축적해왔기 때문에 선진국 수준으로 올라섰다는 평가를 받는 중이다. 하지만 역시 공학시스템 개발은 완전성이 중요하다고 생각한다.

그동안 소듐 냉각재의 고속로 시스템은 세계적으로 크고 작은 화재 사고들이 빈발하였다. 해서, 프랑스와 일본을 비롯한 여러 국가들은 기존 프로젝트를 포기하거나 무기한 연기하고 있다고 한다. 이런 문제의 돌파구를 마련하기 위해 우리나라를 포함한 원자력 선진국들은 완전한 안전성, 지속 가능성, 비교 우위의 경제성, 핵확산 저항성이 담보되는 제 4세대 고속로를 공동 개발하고 있다. 제 4세대 고속로는 소듐 냉각재뿐만 아니라 납 냉각재, 헬륨 냉각재 및 관련 원자로 시스템도 다시 검토되고 있다.

고속로 냉각재 관련 시스템 개발의 추세는 가스에서 소듐으로, 다시 납으로, 그리고 장기적인 관점에서 다시 가스가 고려되는 과정을 거쳐 여러 기술들이 혼재된 상태로 진행되고 있다. 이런 복잡한 과정을 거치게 된 이유는, 완전한 시스템이 개발될 때까지 기다리지 못하고 비용과 시간을 줄이기 위해 조급하게 개발을 끝내려는 욕심 때문이었다고 생각한다. 우리 연구팀의 작업 결과가 공학적 측면에서 부족했던 것도 이 같은 이유였다는 것을 깨닫고 많이 반성했다.

고속로뿐만 아니라 대규모 공학시스템을 개발할 때, 연구자에게 가장 필요한 덕목은 안전성과 경제성을 모두 충족할 수 있는 시스템을 개발할 때까지 기다릴 줄 아는 자세다.



세계 최초 개발 제품의 수출 성공을 눈앞에서 놓치다

 ReSEAT 전문연구위원 심현보

혼 자서 조용한 음악을 듣고 싶을 때, 사람들은 헤드폰을 찾게 된다. 헤드폰을 끼게 되면 주위 사람들에게 방해를 주지 않고 조용히 음악을 들을 수 있을 뿐 아니라 주위의 소음으로부터도 자유로울 수 있다. 이러한 장점에도 불구하고 헤드폰은 선이 있어야 하고, 또 오디오 본체에 이 선을 연결해야만 사용할 수 있는 불편한 점이 있다.

1989년 일본 SONY에서 획기적으로 세계 최초로 적외선을 이용한 무선헤드폰을 출시했다. SONY의 무선 헤드폰은 적외선에 음을 실어

전달하는 방식으로, 깨끗한 음질과 동시에 세계 최초라는 타이틀 때문에 세계 시장에서 큰 주목을 받았다. 그러나 중간에 장애물이 있거나 본체(Audio, TV 등의 음원)와의 방향이 다르면 송수신상의 장애가 발생하는 단점이 있었다. 또, 송수신간의 거리가 조금 멀어지면 빛의 퍼짐 현상 때문에 음이 전달되지 않는 등 불편한 점이 많았다. 이것은 TV 리모컨을 사용할 때 앞에 장애물이 가려지거나 방향이 다르면 작동하지 않는 것과 같은 이치이다.

나는 SONY사의 적외선 무선 헤드폰을 보며, 어떻게 하면 이런 문제점을 해결할 수 있을까?하는 생각에 몰두했다. 그러다 무선 주파수를 사용해 무선헤드폰을 만들면 이러한 문제점을 해결할 수 있지 않을까 하는 생각이 떠올랐다. 이것이 세계 최초 RF 무선 헤드폰의 태어나게 된 계기다. 나는 개발 팀을 꾸리고 RF를 이용한 무선 헤드폰 개발에 착수했다. 가장 먼저 결정해야 할 사항은 송수신에 사용할 주파수 선정이었다. 주파수는 일반인들이 사용할 수 있는 공용 주파수대와 정부에서 승인을 받아야 하는 특수 주파수대가 있었다. 국내에서 허가를 받지 않고 누구나 사용할 수 있는 주파수대는 49Mhz대였다. 내수용으로는 49Mhz대를 사용하기로 하고, 공용 주파수로 36.5~37.5Mhz대가 많은 유럽 등 해외 많은 국가들은 37Mhz대를 개발하기로 했다. 처음엔 R-L-C(저항-코일-콘덴서)를 이용한 방식으로 송·수신 주파수를 발생시키는 방식을 채택하고, 주파수를 생성하는 회로를 구성해서 개발 착수 8개월 만에 송신기와 수신기 개발을 완성했다.

이렇게 탄생한 세계 최초 무선 주파수 무선 헤드폰의 샘플을 들고,

우리는 의기양양하게 바이어들과 상담했다. 그런데 상담 중, 송수기의 주파수가 주변 환경(온도, 송신기 설치 위치 및 수신기의 사용하는 장소)에 따라서 주파수가 변하는 문제점이 발생하고 말았다. 당시 중소기업이었던 우리 회사는 챔버 등의 테스트 장비를 구비하지 못한 이유로 송수신기의 핫 테스트 등의 파이널 테스트를 소홀히 했고, 이 때문에 주파수가 변하는 문제점을 사전에 탐지 못한 크나큰 실수를 범한 것이다.

상담이 잘 되어가던 도중에 발생한 문제였기에, 우리 회사는 패닉 상태에 빠지고 말았다. 서둘러 수정진동자(Crystal)로 주파수를 생성시키는 회로로 바꾸어 개발을 다시 시작했고, 3개월 만에 송·수신기의 주파수가 변하지 않는 시스템을 만들어 냈다. 그런데 여기서 또 다른 문제가 발생했다. 수정진동자는 주파수를 변하게 하진 않으나, 공용 주파수를 사용하기 때문에 일반 생활 무전기, 어린아이들의 무선조정 자동차, 장난감 등 여러 가지 장비들의 주파수 간섭이나 주변에 철재가 있을 때 헤드폰에 잡음이 많이 발생하는 것이었다. SONY의 적외선 무선 헤드폰과 비교해서 RF를 이용한 헤드폰은 송수신기 간의 거리 문제와 1층에서 2~3층간에도 음이 전달되는 문제는 해결 되었으나 잡음 때문에 음질에서 현저히 떨어지는 문제에 봉착하게 된 것이다.

1~2개월 간 잡음을 해결하기 위해 몰두한 결과, 작은 쉘드 케이스를 만들어 송·수신기 각각의 안테나를 제외한 전자파의 영향을 받는 전자보드를 이 쉘드 케이스에 넣은 다음, 사출물 케이스 넣는 방법을 찾아내어 문제를 해결했다. 이렇게 힘들게 만든 제품을 가지고 당시

국내 오디오 업계에서 상위의 위치를 점하고 있던 I사와 L사 그리고 S전자를 찾아 갔다. 세 회사 모두 큰 관심을 표하며 거래 의사를 밝혀, 1년 동안 밤잠을 설쳐가며 고생한 보답을 받는 기쁨을 맛볼 수 있었다. 세 회사 모두 독점적인 판매권을 요청하는 바람에 이 중에서 한 회사를 선택하는 권한을 누리게 된 기쁨 또한 무척 컸다. 1차 주문에 대한 수량은 I사가 제일 많았지만, 몇 주 동안 심사숙고한 끝에 전자업계에서 세계적인 기업인 S전자와 국내 영업권에 대한 독점 계약을 체결하고 OEM으로 국내 판매를 시작했다.

S전자를 선택한 이유는 국내에서의 판매량이 조금 적더라도 해외 판매 시 S전자가 국내에서 이 제품을 OEM으로 판매하고 있다는 S전자의 네임밸류를 활용하고 싶은 욕심에서였다. 대다수의 해외 바이어가 회사 규모면에서 S전자보다 큰 기업이 없고 S전자의 기업 이미지가 훨씬 더 우위에 있었다. 이런 계산이 들어맞아, 해외 바이어 상담 시 국내에서 S전자가 이 제품을 시판하고 있다는 얘기를 하며 국내 판매 제품을 보여주면 수월하게 판매 계약을 체결할 수 있었다. 이후 전자 제품 기술 관련 잡지인 아시안 소스의 인터뷰를 통해 제품에 대한 인지도를 높이고, 단독 주택이 많은 독일에서는 바이어가 TV광고를 하는 등 판매에 전력을 다해 약 4,000만\$ 정도 수출을 하는 쾌거를 이루었다.

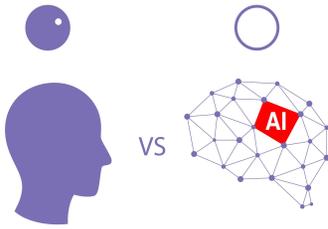
우리는 여기서 더 나아가, 저주파 대역의 헤드폰을 수출하며 고주파 대역의 900Mhz대 제품의 개발에 착수했다. 저주파 대역에 비해 900Mhz대는 송수신간의 거리가 거의 두 배 정도로 늘어나고, 주파수

대역폭이 넓어 음질을 높일 수 있었다. 그런데 이 과정에서 커다란 실수를 해버리고 말았다.

저주파를 이용한 헤드폰의 특허를 가지고 있기 때문에, 900Mhz대 헤드폰의 개발에만 신경을 쓰고 특허 출원에 대해서는 신경을 쓰지 못한 크나큰 실수를 하고만 것이다. 개발을 끝내고 특허 출원을 검토하는 동안, 미국의 Recoton사가 먼저 900Mhz대의 무선 헤드폰에 대한 특허를 등록했다는 정보를 입수했다. 국제 변호사와 변리사를 만나 저주파대 무선헤드폰 특허와 그간의 실적, 아시안 소스 기사 등 관련 자료를 놓고 대책을 협의하니 소송을 진행하자고 한다. 급한 마음에 앞뒤 가리지 않고 소송을 하기로 계약하고 미국을 방문하는 등 많은 돈을 투자했다. 하지만 조그만 중소기업이 미국의 법정에서 미국 기업을 상대로 소송을 진행한다는 것이 얼마나 어려운 일인지만 절감했을 뿐, 소송에 패하고 말았다.

그렇게 900Mhz 무선헤드폰의 대미 수출 길은 막히고 아주 소량만을 유럽 시장에 수출하게 되었고 결국은 생산을 중단했다. 세계 최초 RF 무선헤드폰 및 무선 스피커 개발의 성공을 바탕으로, 1억 달러 이상의 수출을 목표로 야심차게 개발을 시작해서 성공했지만 특허 출원을 소홀히 한 대가로 개발한 시스템을 폐기 처분해야 해야만 하는 참담한 실패를 경험했다. 그 후로 어떤 프로젝트 개발을 검토할 때면 관련 특허와 연구 논문 등에 대한 사전 조사를 습관적으로 광범위하게, 그리고 디테일하게 검토하는 버릇이 생긴 것이 소득이라면 소득이다.

만약 몇 개월만 일찍 특허에 관심을 가졌다면, 회사와 나의 운명이 또 다른 방향으로 흘렀을지도 모른다는 생각이 이따금 떠오르며 씩씩한 미소를 짓게 된다.



소프트웨어 중심의 연구가 새로운 답이다

 ReSEAT 전문연구위원 박정화

인 간과 알파고의 바둑 대결에서 이세돌 9단이 1승 4패로 패하며, 컴퓨터의 놀라운 발전에 사람들의 관심이 모아졌다. 멀지 않은 미래에 인간의 일을 대신할 컴퓨터의 등장을 두고 갑론을박이 이어지고, 이 가운데에 IBM에서 개발한 왓슨 컴퓨터가 의학 분야에 적용되어 암 진단 및 치료법 등에 쓰일 것이라는 기사가 세간의 화제를 모았다. 이때, 이들 컴퓨터의 소프트웨어가 인공지능이라는 사실도 함께 알려지면서 소프트웨어의 관심이 높아졌다.

소프트웨어는 과학과 기술 분야에 특히 필요하다. 새로운 공학 현상을

해석하고 이해할 때, 물리학 수식으로 표현하고 컴퓨터 소프트웨어를 사용하여 해석하면 빠르고 정확하게 해답을 구할 수 있기 때문이다. 80년대엔 실험적인 연구 방법에 밀려 소프트웨어를 사용한 연구가 환영받지 못했는데, 내가 BFC (Body Fitted Coordinate)를 이용해 관내 원형 입자의 주위에 흐르는 유체 흐름을 컴퓨터 시뮬레이션으로 구현한 때가 이 무렵이었다.

BFC는 자연적인 형태를 유지하는 상태에서 수치 해석을 하고 원하는 해답을 구하는 방식이다. 대학생이 사용하는 수준의 일반적인 수치 해석 소프트웨어보다 조금 더 진보된 방법이다. 다행히 BFC의 Fortran 원시 프로그램을 인쇄된 형태로 구할 수 있었고, 이를 편집기에 입력해서 Cyber 컴퓨터로 프로그램을 정비했다. 처음 시도하다보니 정비 과정에서 오류도 많았고, 시행착오도 많았다. 특히, 수학적 모델로 유도한 후 알고리즘에 맞게 프로그램이 짜여 있는 지 일일이 확인하는 작업이 쉽지 않았다. 이 작업을 수행하며 수치 해석에 대한 특성, 연산 순서, 제약 조건 및 경계 조건 등 심도 있는 방법을 생각하고 습득하게 되었다. Cyber 컴퓨터는 유로로 사용하기 때문에, 프로그램을 운영하는 비용이 많이 들었고 나중에는 중지하게 될 상황까지 왔다.

나는 하는 수 없이 당시 처음 나온 조립식 386 PC를 구입했다. 이 PC로 한 개의 조건을 계산하는 데는 약 20시간 이상이 소요됐는데, 아마 현재 사용하는 개인용 PC의 작업 속도 기준으로 계산하자면 1시간 이내로 소요될 것이다. BFC에 의한 유체역학 시뮬레이션을 마무리 할 즈음, 고준위 방사성 폐기물 처분 연구에 참여하게 되었다.

우리나라의 고준위 방사성 폐기물의 발생 추이를 볼 때, 멀지 않은 미래에 방사성 폐기물 처분 기술이 필요해질 것으로 예상되었다. 이를 감안해, 2000년대 초반부터 한국 원자력 연구원에서는 고준위 방사성 폐기물의 심지층 처분 연구를 수행하게 되었다. 한국형 고준위 방사성 폐기물 심지층 처분 시스템의 개념은 모암을 화강암으로 정하고, 지상에서부터 수평 500m 깊이의 터널을 굴착한 뒤 터널 바닥에 일정한 간격으로 처분공을 굴착했다. 이 처분공은 경수로 사용 후 핵연료 4개 집합체를 채운 직경 약 1m, 높이 약 4.5m의 원통형 처분 용기를 넣고 암반과 처분공 사이에 벤토나이트 블록을 채워 처분 용기에 대한 기계적 완충 및 지하수 유입을 지연시키는 역할을 하도록 했다. 처분 용기의 내부는 주철로 제작하고 부식을 방지하기 위해 외부를 5cm 두께의 구리로 감쌌다.

처분 용기 내부에는 고준위 방사성 핵종이 붕괴하며 계속 열이 발생하게 되고, 이 열은 처분 용기와 모암을 통해 주위로 분산되고, 500m의 지하에서 수압으로 인해 유입된 지하수는 벤토나이트 블록과 모암을 통해 처분 용기로 들어간다. 처분 용기와 모암은 벤토나이트의 팽윤압 및 열팽창 등에 의해 응력을 받게 된다. 이런 복잡한 현상이 일어나는 동시에 만약 처분 용기가 부식되면 핵종이 지하수에 용해되어 외부로 흘러나오는 상황이 발생하게 되는데, 이런 현상을 감안해 열 해석을 위한 모델링을 수행했다.

그 당시 사용한 전산 코드는 ABAQUS 5.8 버전이었다. ABAQUS는 유한요소법으로 해석하는 전산 소프트웨어로 이에 맞는 모델링을 해야

한다. 그래서 전 처리 과정을 진행하기 위해서는 첫 째, 계산 정의구역을 설정하기 둘 째, 사용할 요소의 형태를 정의하기 셋째, 요소의 기하학적 형상 즉 길이, 면적 등을 정의하기 넷째, 요소의 연결성 즉 요소 망을 형성하기 다섯 째, 경계 조건을 설정하기 이렇게 5단계를 거친다. 500m 깊이의 처분 용기를 중심으로 계산 모델을 만들어야 하는데, 그물처럼 생긴 격자를 생성해서 수치 해석을 해야 한다.

이때, 특성상 각점에서 구하는 해답을 찾기 위해 격자의 길이를 결정을 해야 한다. 그래서 처분 용기 주위에는 격자 길이를 짧게 해서 격자 간격이 조밀해지도록 하고, 처분 용기에서 멀어지는 쪽은 격자 길이를 길게 만들어 격자 간격이 넓어지도록 하는 방법을 썼다. 이 방법으로 계산 영역을 만들어 열의 이동으로 인한 온도 분포를 구하는 데는 문제가 없었다.

지금은 버전 6.6에 ABAQUS/CAE가 결합되어 있어 격자를 만드는 작업이 쉽지만, 당시만 해도 수작업으로 해야 했다. 열 해석은 다른 전산 소프트웨어로도 가능하다. 하지만 앞에서 서술한 것처럼, 열의 이동과 함께 지하수가 이동하면서 벤토나이트가 물과 열에 의해 팽창하는 현상들이 함께 일어나기 때문에 열-수리-역학이 서로 영향을 주는 현상을 시뮬레이션 해야 했다.

열과 지하수 이동 및 벤토나이트 팽창에 의한 응력과 변형률을 각각 독립적으로 해석하는 것은 이들에 적합한 전산 소프트웨어를 선택해서 계산하면 된다. 하지만 이 중 둘 또는 셋 모두가 서로 영향을 주는

현상을 해석할 수 있는 소프트웨어는 제한적이다. 열 해석을 위한 프로그램으로 ABAQUS를 선정한 이유는 이와 같은 현상도 함께 해석할 수 있는지를 검토하기 위해서였다. 이 프로그램은 지하수 이동과 역학적 변형에 관해선 어느 정도 해석이 가능했지만, 열의 이동으로 인해 벤토나이트가 건조해지는 현상과 지하수가 이동해 물로 포화시키는 현상이 결합되면 많은 제약이 생긴다.

한 예로, 지하수가 확산 과정을 통해 이동하는 경우 이를 해석하기 위해서 원시 프로그램(source program)을 편집할 필요가 있다는 결론을 얻었다면 이와 같은 상용 코드는 원시 프로그램에 접근할 수 없어 불가능하다. 해서, 건조한 벤토나이트의 흡수현상을 통해 물의 이동을 해석하는 것으로 마무리 했다.

현재는 구조 역학, 동력학, 물질 이동 등 각 분야의 특성에 맞는 상용 전산 소프트웨어가 다양하게 존재한다. 그래서 현장에서 발생하는 문제는 소프트웨어를 이용해 해석하는 경우가 대부분이고, 코드 매뉴얼과 예제의 해석 절차에 많이 의존 한다. 그러나 앞에서 서술한 것처럼 수치 해석 절차를 철저히 분석할 것을 권장하고 싶다. 즉, 현상에서 물리적 내용을 수학적 방법으로 표현해야 한다. 수학 방정식의 해답을 얻기 위해 여러 조건을 가정하고 수치 해석이 필요하면 수치 해석 식을 유도 해야 한다.

유도한 수치 해석 식을 어떤 상용 전산 소프트웨어가 잘 수용할 수 있을 지 또는 어느 정도 수준에서 수용되는 지 등을 검토해 전산 소프트

웨어를 선정해야 하는데, 상당히 귀찮은 작업이긴 하지만 정확성과 한계성 검토, 오류 수정에 꼭 필요하다. 개인적으로 현재 학생들이 작업의 효율성을 위해 상용 전산 소프트웨어에 의존하는 일은 바람직하다고 생각한다. 하드웨어 중심의 교육과 연구에서 소프트웨어 중심의 교육 및 연구로 시대가 바뀌어가는 만큼, 더 나은 연구와 기술 개발의 발전을 위해 소프트웨어 논리와 구조에 대한 철저한 학습과 능력을 길러야 한다.



하나를 보면 열을 아는 지혜가 필요하다



ReSEAT 전문연구위원 최영욱

198년 봄, 필자는 조미식품가공 전문회사인 TK주식회사의 연구개발실장으로 부임하여 라면 건더기스프의 연구개발에 매진하고 있었다. 어느 날은 대표이사과 함께 일본 아사히식품회사로 출장을 갔는데, 건더기스프 소재로 청경채 가공품을 수출해 달라는 주문을 받았다. 나의 주요 업무 목표는 건더기스프 소재 신제품 개발이었기 때문에, 새로운 형태의 건더기스프 신제품 개발에 있어서 더없이 좋은 기회라고 생각했다. 책임지고 해보겠다는 말에 대표이사도 흔쾌히 일본 측의 제안을 수락했다.

당시 국내에서 유통되는 라면에 들어있는 스프는 분말스프 뿐이었다. 반면 일본의 라면은 당근이나 파, 시금치, 청경채, 노자와나(야택채), 양배추, 김, 고추, 표고버섯, 미역, 새우 등을 칩 상태로 절단하여 건조 가공한 후레이크(flake)를 혼합한 건더기 스프가 함께 유통되고 있었다. 건더기 스프는 소비자의 시각적인 식감 자극과 동시에 채소의 비타민, 미네랄, 식이섬유 등 영양성분도 함께 섭취할 수 있는 기능을 한다. 처음엔 컵라면에 먼저 채택되었다가 봉지라면에도 별첨으로 들어가 라면시장을 증대시킨 요인이 되기도 했다.

청경채는 십자화과에 속하는 채소이다. 성장과 크기는 배추와 시금치의 중간 정도로, 잎은 넓고 두터우며 진한 녹색이고 잎줄기의 색깔이 녹색을 띠고 있어 청경채라 불린다. 청경채에는 칼륨, 아연, 구리, 셀레늄 등 미네랄과 비타민 C, 비타민 K, 비타민 B₆, 비오틴, 엽산 등 비타민류가 많아 다른 잎채소에 비해 우수한 영양성분을 함유하고 있다. 또한 시원한 맛에 즙이 많아 중국이나 일본에서 고급채소 요리에 사용되고 있었지만, 당시 국내에서는 재배나 유통이 되지 않는 채소였다.

일본에서 가져 온 샘플과 제조공정서, 품질규격서를 첨부해 ‘채소가공품 제 1호 수출 계획 품의서’를 작성해 대표이사의 결재를 받았다. 농산물의 건조가공 설비는 이미 갖추어져 있는 상태였다. 그래서 그때 까지만 해도 일부 공정만 추가해 일본에서 요구한 제조공정서의 공정 조건과 품질규격에 맞추기만 되는 비교적 간단한 가공제품으로 생각하고 있었다. 또한 수출식품을 실제 가공해보면서 선진 농산물 가공 기술을 배워 익힌다면, 다양한 신소재 개발로 회사의 매출증대에 큰

전환점이 될 것으로 기대했다. 회사에서도 수출식품 가공은 처음이었다.

청경채 원료는 국내에서 생산되지 않았기 때문에, 근교의 농업전문 대학에 시험재배를 의뢰했다. 그 결과 국내에서도 재배 가능성이 있다는 사실을 확인하고, 경남 울주군 고속도로 인근에 있는 한 독농가에 계약 재배를 위탁하여 공급받았다. 공장에서는 생산라인을 전처리-세척-살균-브렌칭-냉각-절단-열풍건조-입도분리-선별-이화학 검사-포장의 가공공정으로 재배치해 실제 생산에 들어갔다. 첫날 생산 루트의 검사 단계에서 청경채 후레이크의 분석 결과, 미생물 규격에서 대장균 검사에서 '불검출'으로서 만족하였으나, 일반세균 총균수 1×10^3 이하를 초과하여 부적합 판정이 나왔다. 선적 예정일을 일주일 남겨둔 시점이었기 때문에, 단시간 해결대책으로 자외선 살균법을 추가로 채택할 수밖에 없었다. 연속건조기의 상단에 자외선등을 설치하고, 연구실 직원들을 총동원하여 밤새도록 청경채 후레이크를 얇게 펴서 컨베이어에 소량씩 투입했다. 이렇게 자외선 조사 작업을 2회 반복 실시한 끝에, 미생물 분석에서 기준 규격에 적합하다는 판정이 나왔다. 다음 날부터 시작되는 작업의 마지막 공정에 자외선 살균 공정을 추가하기로 했다.

한편, 일반세균의 총균수 초과 원인에 대한 추적조사를 실시했다. 전처리 공정에서 원료 다듬기 이후 뿌리 부분을 제거해 세척조에 투입 하는데, 뿌리와 내부 속잎이 완전히 분리되도록 칼질이 되지 않았다는 사실을 확인했다. 속잎 사이에 남은 흙이나 이물질 때문에 세척이나 차아염소산나트륨의 살균 공정에서 효과가 미흡했던 것으로 분석됐다. 경험부족에서 발생한 실수를 찾아내고, 전처리 작업자는 물론 전 공정의

담당자를 대상으로 기술교육과 위생교육을 실시했다. 그리고 세척조 1대를 추가 배치하고, 차아염소산나트륨이 일정량씩 투입되도록 장치를 개선하였다. 그 결과, 미생물 품질규격을 달성해 전력비와 작업인력이 많이 소요되는 자외선 살균기를 도입하지 않고도, 컨테이너 한 대 분량의 수출 물량을 성공적으로 출하했다.

최초 수출 작업을 완료하고, 선적 후 원가계산이 이루어졌다. 그런데 수출 금액에 비해 본전은커녕 거의 2배에 달하는 손실이 발생했다. 청경채의 원료단가는 단일 거래선에 의한 계약재배였고, 공급자 입장에서 봐도 한정된 계약물량 외 다른 소비처가 아직 없으므로 시장이 형성되지 않아 시금치 등 일반 엽경채류 채소보다는 훨씬 비쌀 수밖에 없었다. 또한 먼 곳에서 운송하기 때문에 운송비 등의 일반관리비도 50% 이상 높은 가격이어서 일반 채소로 자리 잡기까지는 특수한 가격으로 구입하는 방법뿐이었다. 첫 생산이었기에 손실금액은 시험연구비로 처리하기로 했다. 그러나 시험연구치고는 너무 많은 손실이었다.

반면 일본의 거래처에서는 품질에 만족하여 재 발주를 위해 생산능력(CAPA)과 수출물량 규모를 타진해 왔다. 그러나 당사 입장에서는 원활한 원료 공급으로 공정이 안정화되더라도 원료 원가를 낮추는 것은 20~30% 수준만 가능하다고 판단했다. 거래처의 수출단가를 50% 인상하더라도 감당할 수 없는 원가구조임을 깨닫고, 이를 해결하기 위해선 2년 이상의 시간이 필요하다고 판단돼 더 이상 발주를 받을 수 없었다. 향후 수출 거래선 확보와 수출상품으로 발전시키기 위한 수출상품 제1호

제품은 원료 공급처와 안정적인 공급물량이 확보되지 않는 상태에서는 발주를 받으면 안 된다는 값비싼 교훈을 얻는데 그쳐야 했다.

신제품 개발과 생산 공장 경영의 기본 요소는 4M으로 Man(인력), Machine(기계 설비), Material(원료), Method(기술)이 포함된다. 이 중에서 원료 공급처와 공급량, 원료 원가 등 원료관련 요소를 사전에 충분히 검토하지 않은 채 신제품을 정식 생산에 투입한 결과는 결국 기업의 궁극적 목표인 부가가치 창출을 보장할 수 없다는 것을 실감하게 되었다. ‘생산’이란, 앞서 말한 4M을 관리하여 성과지표로 QCD [품질(Quality), 비용(Cost), 납기(Delivery)]를 달성하는 것이다. QCD의 목표를 실현시키는 생산관리의 본질에 대해 몸소 체험을 통해 깨닫게 되었다.

수출 전담부서가 없는 중소기업이었지만, 당시 연구개발 부서에 수출 업무 전권을 위임해준 최고 경영자에게 면목이 없었다. 이러한 실패에도 불구하고 오히려 격려를 해주신 최고 경영자에 대한 고마움과 존경하는 마음은 지금도 잊지 않고 있다.

회사는 이를 계기로 전 종업원이 건더기스프 가공 기술을 터득하게 되었다. 이를 바탕으로 다양한 건더기 소재를 개발해 라면의 건더기스프를 대형 거래선에 공급할 수 있었다. 해외에서도 물량공급처를 발굴하여 국내공급은 물론 수출 상품으로 발전시키는데도 성공했다. 현재 당사는 라면의 건더기스프는 물론 분말스프, 액상스프 등 스프류

생산에서 국내 최대의 생산규모와 매출액 규모를 가진 회사로 성장하였다.

청경채는 국내 최초로 제주도에서 재배되기 시작해 현재는 우리 밥상의 조미채소로 정착하게 되었다. 비록 청경채 후레이크 제1호 수출은 시험 재배-시험 생산-시험 수출로 끝나며 쓰라린 교훈을 남겼지만, 국내 농업과 식품산업에 적게나마 기여하게 된 동기가 되었음에 자부심을 갖고 있다.

기업은 부가가치를 창출하는 활동을 해야 한다는 기업경영의 기본 자세를 체득하고, 이를 교훈삼아 과학적 관리에 의한 성과거양으로 당사의 공장장을 거쳐 타사의 CEO로서 정년을 넘기면서 근무할 수 있었다.



알루미늄/세라믹 복합재료를 균열 없이 열간압연 할 수 있는 방법은?

 ReSEAT 전문연구위원 김정태

금 속을 바탕으로 하고 세라믹 입자를 섞어 만든 복합재료는 뛰어난 기계적 성질 및 내마모성 등 우수한 특성을 가지고 있어, 통상 금속만으로 제조된 재료에 비교해 높은 잠재력을 가진 재료다. 이 복합 재료의 성능을 최대한 활용하고 특성을 잘 이해하기 위해서는 최적의 제조 기술 연구가 필수적이다.

알루미늄 분말을 이용한 세라믹 복합 재료는 비중에 비교해 높은 강도를 보이며 여러 가지 우수한 기계적 특성을 가지고 있기 때문에,

주목받고 있다. 분말 야금 방법으로, 세라믹을 금속 분말에 혼합해서 제조하는 복합 재료는 세라믹이 주로 입자 형태로 되어 있다. 알루미늄 합금은 통상 고온 가열-급냉-시효 처리를 해서 금속 내에 미세한 제 2의 상이 석출하도록 하여 강도를 강화시킬 수 있는 재료이기 때문에, 가벼우면서 높은 강도를 요구하는 구조물에 널리 사용되는 매우 흥미로운 재료이다.

내가 참여했던 연구는 1980년대 중반 미국의 세계적인 알루미늄 제조사인 ALCOA의 지원으로 수행한 알루미늄/세라믹 복합재료 특성 연구 프로젝트였다. 알루미늄과 세라믹간의 열팽창계수 차이에 의한 석출경화형 알루미늄 합금의 기지에서 일어날 수 있는 야금학적 특성을 연구하는데 고밀도 복합재료를 얻는 것이 매우 중요하며 이를 위해서는 알루미늄 기지와 세라믹 입자간 계면에 기공이나 간극이 없는 계면 형성이 중요했다.

그러나 기존의 고온에서 정수압 상태에서 소결시키는, 이른바 열간정수압소결 만으로는 필요한 재료를 얻는데 한계가 있었다. 알루미늄 합금을 바탕으로 하는 세라믹 복합 재료는 고용열처리 후 석출경화 시효 처리 과정에서 알루미늄 기지의 성질이 상당히 바뀌는 특징이 있다. 이러한 현상은 세라믹 입자 강화가 고온에서 열처리 후 빠르게 냉각할 때 알루미늄 합금과 세라믹 간의 열팽창계수 차이에 의한 응력 발생으로 알루미늄 기지에 생성되는 전위(dislocation)와 잔류응력(residual stress) 때문인 것으로 알려져 있다.

이와 같은 조직 변화는 알루미늄 기지에 생성되는 석출물의 핵생성과 성장을 촉진시킨다. 이렇게 세라믹 입자강화에 따른 전위생성과 잔류 응력 발생이 석출경화 시효 속도의 촉진 이유임을 설명하고 있지만 이를 정량적으로 시스템적으로 연구한 보고는 많지 않았다. 그 이유는 특히 알루미늄과 세라믹 간의 계면에 빈 기공이나 어떠한 공간이 없는 고밀도 복합재료를 제조하는 것이 종래의 분말야금 방법으로는 한계가 있기 때문이다.

본 자료에서는 고밀도 알루미늄/세라믹 복합재료 제조하는 데 있어 비교적 경제적인 방법인 열간압연을 추가적으로 실시하여 균열(crack) 발생 없이 고밀도 복합재료를 제조할 수 있는가를 보여주고자 한다. 통상 분말야금에 의한 알루미늄 합금 기지에 SiC 세라믹 입자를 강화시킬 때는 혼합된 복합재료 분말 시편을 정수압이 걸리는 유체 속에 넣고 고압과 고온을 가하는 소위 열간정수합소결 방법을 이용하여 소결한다. 그러나 이 공법만으로는 알루미늄/SiC 복합재료를 기공 없이 제조하는 데 한계가 있다.

따라서 고밀도 복합재료를 얻기 위해서는 경제적인 추가 공정이 필요하였다. 산업체에서 손쉽게 접근할 수 있는 경제적인 방법으로, 열간압연을 추가적으로 실시하는 방법을 생각할 수 있다. 그러나 열간정수합소결된 복합재료를 열간압연하면 압연되는 판 형태의 시편 가장자리에 균열이 발생해서 압연처리가 어렵게 된다. 이런 이유로 우리는 균열 발생을 극복하는 경제적인 시편 제조 방법을 찾기 위해 연구를 시작했다.

시편제조 방법을 소개하자면, 이미 합금 처리된 2024 알루미늄합금 분말을 SiC 세라믹과 잘 혼합한 후 높은 압력(3000psi)의 정수압조건에서 고온에서 소결시키는 소위 열간정수압소결 방식으로 소결체를 얻는다. 이 소결체를 구리 튜브 속에 진공상태를 유지하면서 봉입하여 열간압연 시 구리 튜브가 균열이 발생하는 것을 억제하는 역할을 하도록 하자는 것이다.

소결된 소재는 혹시나 구리 튜브와 복합 재료 간에 발생할 수 있는 어떤 반응도 일어나지 않도록 알루미늄 박막으로 싸서 진공 분위기의 구리 튜브에 봉입한 후 열간압연을 위하여 고온으로 가열한다. 이때 가열 온도를 약간의 액체상이 존재하도록 설정하면 열간압연 후 고밀도 소재를 얻는 데 도움이 된다. 이러한 방법으로 균열 발생을 감싸고 있는 구리 튜브에 의해 억제시켜 열간압연을 가능케 하는 것이다.

이렇게 제조된 시편은 기공이 거의 없는, 특히 알루미늄 기지와 SiC 간의 계면이 거의 완전히 붙어있는 상태를 유지하게 한다. 이러한 계면 상태는 알루미늄과 SiC 간의 열팽창계수 차이에 의한 고온열처리 후 급랭 처리 시 발생하는 열응력(thermal stress)이 계면에서 알루미늄 기지에 손실 없이 전달되게 하는 데 매우 중요하다.

열간압연된 알루미늄 합금과 SiC 세라믹 복합재료를 고온열처리 후 급랭시킨 다음, 투과전자현미경 시편을 제작해서 세라믹 주위의 알루미늄 기지에 전위발생을 관찰해 보면 이러한 예측이 잘 증명된다. 실제로 직경이 $7.4\mu\text{m}$ 인 SiC 세라믹 입자 주위의 알루미늄 기지에서

생기는 전위 발생 상태를 보면, 알루미늄과 SiC 간의 열팽창계수 차이로 야기된 열응력이 알루미늄 합금의 탄성변형 한계를 넘어 항복 응력보다 높아져 전위를 발생시키면서 일종의 소성이완이 일어나는 것을 확인할 수 있다.

이 결과는 열간압연을 통하여 고밀도 복합 재료를 제조할 수 있어, 알루미늄과 SiC 계면 상태가 발생한 열응력이 금속기지에 거의 손실 없이 전달하는 데 충분할 정도인 것을 증명한다.

이 방법을 통해 고밀도 알루미늄/SiC 복합재료를 얻을 수 있었고, 이런 계면 상태는 알루미늄과 SiC 간의 큰 열팽창계수 차이에 의해 발생한 열응력이 손실 없이 금속 기지에 전달되도록 하는데 중요한 역할을 한다. 또한 이 열응력이 금속기지의 항복응력 이상에 이르게 되어 전위 발생이 일어나면서 소성이완이 일어나는 것을 실험적으로 잘 증명하게 하는 데 큰 기여를 했다. 이러한 전위생성은 후속의 시효 열처리 과정에서 석출물의 석출과 성장속도를 촉진하는 것도 관찰할 수 있었다. 이렇게 알루미늄/세라믹 복합 재료의 야금학적 특성을 이해 하는데 큰 기여를 한 시편 제조 방법을 제시한 것이다.

연구 개발 과정에서 연구 목적에 맞는 시료를 준비하는 것은 연구 성패를 가늠하는 매우 중요한 부분이다. 경제적인 제조법을 찾기 위해 많은 시행착오를 거쳤지만, 실험 결과의 명확한 해석을 이끄는 데 큰 기여를 했다고 생각한다.



어려울수록 기본으로 돌아가라

 ReSEAT 전문연구위원 김유상

나는 대학을 졸업한 후 경남 창원외 M사 생산부 주철과에 입사해서 원가관리를 하며 기술 개발, 품질관리 실험실 관리를 담당했다. 이 시절, 쇳물 제품을 생산하면서 겪었던 사례를 이야기 하고 싶다.

1986년 3월, 나는 회사에서 주물 생산 제품의 불량 원인을 찾아내고 해결 해 주는 일을 도맡아하면서 동시에 이란과 사우디아라비아, 이라크에 송유관과 수도관을 대량 생산해서 수출하는 일을 했다. 이외 자동차나 산업용 주철과 주강 제품의 자동화 생산 기술을 개발해 금속을 녹여 자동차 브레이크나 엔진, 건설용 부품, 컨테이너용 부품, 특수강 부품의 열처리를 담당하기도 했다. 내가 입사할 당시엔 철강

선두 업체인 경북 포항의 P사에 3개월짜리 어음을 지불해서 구입할 정도로 선철이 귀했다. (선철은 모든 주물의 기본이 되는 철로, 순도가 무척 중요하다.) 수출 산업 발전에 힘입어 자동차 수요가 급증하면서 대량 생산 기술 개발도 진행되었는데, 우리 회사는 독일에 자동화 쇳물 제조 설비를 주문했고 국내 H 정공, K 산업, D 자동차사로부터 자동차 주물 부품을 대량 생산해 달라는 요청을 받았다.

기본의 사형 구조에서는 별 문제가 되지 않지만, 금형 라인에서 쇳물을 냉각 하는 과정 중 문제가 발생했다. 쇳물이 부족해 보충 주입 하는 바람에 층이 발생하는데다 금형 표면에 쇳물이 늘어붙는 것이었다. 자동라인 금형이라 설비는 멈추지 않고 연속적으로 이동했다. 쇳막대로 엔진 제품을 금형으로부터 탈리시켜 꺼내려고 했지만, 쇳물이 금형에 늘어붙어 있어서 떼어낼 수 없었다. 해서, 나는 이 늘어붙은 엔진 제품을 금형에서 어떻게 하면 효과적으로 떼어낼 수 있을까에 대해 연구를 시작했다.

먼저 자동화 금형 구조 설비를 가동하기 전, 미리 금형을 예열하고 쇳물을 받아 이동시킨 뒤 주입했다. 하지만 쇳물은 또 금형에 늘어붙어 버렸다. 눈물 나는 허탈감을 느꼈다. 쓰라린 마음에 포장마차에서 소주도 한 잔 했다. 다음날 다시 설비를 가동시키고, 24시간 동안 균일한 농도를 유지한 약품을 금형에 도포하고 예열한 후 뜨거운 쇳물을 부었다. 약품의 pH를 7.5 ± 0.5 로 유지하고 침전 유무를 눈으로 확인한 후, 쇳물을 부어넣는 작업을 계속했다. 쇳물이 응고한 후, 막대로써 제품을 떨궜다. 떨궜던 엔진 부품 1개의 무게는 200Kg으로

상당히 무거웠다. 금형 표면에 칠한 약품은 금형표면을 미끄럽게 하는 윤활 작용을 하면서 쇳물과의 마찰을 줄이는 역할을 했다. 약품이 늘어붙는 현상을 해결해주며, 생산 작업자에게 경각심을 일깨우고 많은 교훈을 가져다주었다.

평생 금속 재료와 함께 살아온 나는 생산 현장에서 많은 기술을 터득하고 연구했다. 10톤 용량의 쇳물이 금형에 늘어붙어 꺼낼 수 없었던 현장의 문제점을 약품 이용한 발상으로 해결할 수 있었다. 쇳물 용해 생산부 직원들에게 약품의 특성과 개념을 이해시킨 후 쇳물을 공급해, 자동차 부품 생산에 걸림돌이 되어왔던 생산 현장의 애로사항을 말끔히 해소할 수 있었다. 현재 쇳물을 녹여 부어 제조하는 생산 현장 설비는 대형화되어가고 있는데다 고도로 제어된 기계와 작업자가 함께하고 있다. 쇳물을 다루는 위험한 생산 현장에서는 작업자 개인의 실패를 탓하지 않고 관리자의 탓으로 책임을 돌리려는 풍조가 일고 있다. 이런 이유로 쇳물이나 도금, 열처리 현장에 위험을 체험할 수 있는 설비를 설치할 것을 권하고 싶다.

최근, 해외에서도 예기치 못하는 돌발사고, 우연의 상황이나 피해자의 행동에 관해 많은 위험과 실패 사례가 소개되고 있다. 실패학·위험학의 권위자인 어느 교수는 “예기치 못한 못한 돌발사고 현장에서는 인간과 기계의 역할 분담이 크게 변할 수 있다.”는 명언을 토대로 작업할 때 이상이 발생할 때에는 기계를 정지시켜야 한다. 공동으로 작업을 할 때에는 신호를 확인하여야 한다. 설비를 수리할 때에는 스위치를 끄고 모르는 것은 손을 대지 말아야 한다. 상기와 같이 필자는 쇳물을 공급

하는 금속기술자나 작업자에게 약품 사용은 필수적이라 알려주고 생산을 관리할 수 있도록 기술을 지원해 주었다. 쇳물 늘어붙음 문제점을 해결하며 자동차 엔진 제품을 자동화 설비로 대량 생산해 고객사에 공급할 수 있었고 연간 10억 원의 원가 절감도 달성할 수 있었다. 생산 현장에서 겪은 실패를 통해 깨달은 것은 ‘어려울수록 기본으로 돌아가라’는 교훈이었다. 쇳물 제품을 생산하는 현장 작업자에게 가장 전하고 싶은 이야기이기도 하다.



기초가 탄탄하면 어떤 문제도 극복할 수 있다

 ReSEAT 전문연구위원 유호천

상 ·하수도용, 건축물 배관용, 공업용수용, 폐수 및 해수용으로 많이 사용되는 강관은 경제적인 방법인 전기저항용접에 의해서 제작되므로 전봉강관이라고 한다. 그런데 이 강관은 사용 도중에 배관매설지역에서 용접부를 따라 국부적으로 도랑형태의 구상부식 혹은 홈부식이라고 하는 부식이 조기에 발생하면서 누출에 의한 손실 및 보수비가 필요한 경우가 종종 발생했다. 심한 경우에는 화재 및 가스폭발로 인한 사고발생으로 심각한 사회적 문제를 일으키고 있었다. 이에 대비해 용접부의 내식성이 뛰어난 새로운 저합금 내부식성 강재의 개발이 강하게 요구되었기 때문에, 조기에 구상부식이 일어나지 않는 전봉강관용 소재를 개발하기 위

한 연구를 시작하게 되었다.

연구를 시작하기 전, 전봉강관의 구상부식성을 억제하기 위한 제조 기술과 구체적인 방법을 알아보기 시작했다. 관련 문헌들을 검토하고 연구해야 할 방향을 설정했다. 필요한 연구내용을 일단 백지 위에 하나씩 써내려갔다. 1년이라는 짧은 기간 내에 완수한다는 것이 불가능 할 정도로 많고 복잡한 연구내용이 종이를 채웠다. 욕심을 버리고 선택과 집중이 필요한 순간이었다. 몇 가지를 겨우 추려내 하나하나 예상 결과까지 간단히 정리했다. 그리고 본격적으로 실험 준비에 돌입했다.

용접부의 내부식성이 우수한 전봉강관을 개발하기 위한 첫 번째 단계에 들어갔다. 합금원소를 변화시킨 강종들을 용해해 진공용해로에 넣어 강괴로 제조했다. 그리고 열간압연하여 시험편을 만들어냈다. 처음엔 전기저항 용접으로 강관을 만들려고 했지만 큰 난관에 부딪혔다. 전기저항용접 장치가 너무 커서 작은 시험편을 도저히 용접할 수 없다는 작업자의 판단 때문이었다. 허탈한 기분이 들었다. 연구를 시작하기 전부터 포기할 순 없으니 반드시 용접을 진행해 시험편을 만들어야 했다. 하지만 해당 용접기로는 도저히 작업이 불가능한 상황이었다. 다른 용접 방법을 고민하면서 한 달 정도의 시간이 흘렀다.

그러던 어느 날 갑자기 아이디어가 떠올랐다. 현장에서 생산되는 대형 열연코일에 이 작은 시험편을 붙이면 어떨까? 용접작업자에게 이 계획을 설명하니 가능한 작업이라는 답변을 들었다. 바로 실행에 옮겼다. 커다란 열연코일에 작은 시험편을 붙이는 작업은 치수를 재는 게

까다로워 애를 먹었지만 두 차례의 시행착오 끝에 성공할 수 있었다. 한 달 간의 마음고생 끝에 이룬 성과라 이루 말할 수 없는 기쁨을 느꼈다. 이로 인해 대형 전기저항용접기에 대한 활용도를 증가시키는 성과도 있었기 때문에 이후 다른 연구과제에서도 활용할 수 있었다.

곧이어 0.5N HCl-3.5% NaCl 용액에 담가둔 후 모재와 용접부의 부식성을 측정하였다. 짧은 시간보다 긴 시간을 담가두는 것이 제조조건 변화에 따른 미세한 차이를 더 확실하게 알 수 있을 것 같아서 이 과정은 넉넉한 일정으로 진행했다. 처음에는 매일매일 점검했다. 며칠이 지나도 부식이 일어나지 않아 점검하러 들르는 날이 며칠에서 일주일 간격으로 늘어났다. 출장과 다른 업무처리로 인해 열흘 넘게 현장에 가보지 못한 적도 있었다. 어느 날, 시험현장에서 시험편의 부식상태를 점검하고 아연실색하고 말았다. 용접부의 형태를 볼 수 없을 정도로 부식이 너무 많이 진행된 것이다. 절반 이상은 육안으로 봐도 정량 평가가 불가능한 수준이었다. 나머지도 자세히 살펴보니 도저히 정량 평가는 불가능했다. 처음부터 다시 시작할 수밖에 없었다. 이번에는 부식이 너무 많이 진행하지 않도록 부식이 임박한 시점부터는 매일 정해진 시간에 점검을 진행했다. 이번엔 정량평가를 진행하기 적합한 상태로 만드는데 성공했다. 다행스럽게도 부식성의 정도를 정확히 파악할 수 있었다.

부식시험 후에 연구결과를 보고, 처음에 계획한 예상결과와 일치하는지 일일이 검토를 진행했다. 그리고 다음과 같은 연구 성과가 확인되었다.

첫째, 용접시험편의 부식실험에서는 부식의 진행 상황을 놓치면서 1차 실험은 실패 했다. 하지만 재실험을 시도한 결과, 정확한 부식평가 방법과 시험편 인출시기를 파악할 수 있었다.

둘째, 경도가 높은 탄화물의 양을 줄이기 위해 탄소함량을 0.01~0.035% 범위로 줄인 결과, 제관 시 용접-급랭에 의해서도 용접부의 급랭조직이 발생되지 않았다. 그래서 국부적인 전위의 상이와 이로 인해 기인되는 흠부식의 발생을 억제할 수 있었다. 또한 페라이트 단상의 전봉강관은 흠부식의 원인이 되는 결정립 크기의 차이를 균일하게 작게 만들어, 충분한 내부식성을 보증하게 하였다.

셋째, 종래의 탄소강을 소재로 하는 페라이트+펄라이트 조직의 전봉강관에 비교하면 강도는 떨어지는 편이다. 하지만 높은 강도가 필요없는 배관용으로는 충분히 사용이 가능하고, 특히 가공성이 우수하다는 장점이 있다. 강도가 저하된 만큼 Cu의 첨가와 Cr 혹은 Mo+W를 첨가한 것이 보충효과가 있었다. 이 중 Nb, V, B이 가장 효과적이라는 걸 알 수 있었다. 원소들을 첨가하면, 경도의 증가시키지 않아도 조직을 미세화 시킬 수 있다. 하지만 실제 제조단계에서는 기계적 성질과 판매가를 고려해 적절한 원소를 선별해 첨가해야 한다.

넷째, 압연으로 길게 늘어난 MnS의 유해한 작용은 Ca첨가로 개재물을 구상화시킨다. 하지만 Ca의 경우 용해주조 과정에서 적중률에 대한 편차가 심하게 나타나 연구를 진행하는데 어려움이 많았다.

다섯째, 열연강판에 황의 함량을 낮추는 실험을 고려해 보았다. 하지만 실제 생산에는 황의 함량을 0.005% 이하로 낮추는 것은 가능해도, 실험에서는 황의 함량을 단계적으로 낮추다가며 강괴를 제작하는 것은 불가능했다. 그 이유는, 황 이외에도 다수의 다른 원소들의 영향으로 정확한 황의 함량을 조절할 수 없기 때문이다. 제조상의 오차로 인해 결과를 정량적으로 파악하는 것도 불가능했다. 그래서 이 실험은 연구 도중 포기하였다.

여섯째, 용접 후에 노멀라이징 열처리, 혹은 담금질 템퍼링 열처리를 통해 조직을 개선할 시킬 수 있다는 생각을 했었다. 용접부와 모재부의 조직 및 경도를 균일하게 만들기로 했다. 용접제관 후에 관 전체를 노멀라이징 열처리하면 용접부 조직 및 경도를 바꿀 수 있을 것으로 기대하였다. 노멀라이징 열처리는 1톤당 만원이라는 제조비용이 들어간다. 하지만 조직과 경도를 균일화 시킬 수 있다면 수명연장까지 기대할 수 있기 때문에 충분히 승산이 있다고 생각했다. 하지만 제조비용이 많이 들어가면 판매가도 상승하기 때문에 열처리 유무는 제조 단계에서 선택할 사항으로 남겨두었다. 반면, 담금질과 템퍼링 열처리는 현실적으로 제조상의 번거로움과 높은 제조비용이 예상되어 현실성이 없다고 판단해 중도 포기하게 되었다.

이러한 대형 연구 과제를 맡아 성공적으로 마무리 할 수 있었다. 본인의 용접부 내부식성이 보증된 전기저항용접 배관의 자체개발로 인하여 상하수도용, 건축물 배관용, 공업용수용, 폐수 및 해수용 배관의

내구상부식성을 향상시켜 수요확대 및 품질보증에 기여할 수 있었다고 생각한다. 하지만 그와 동시에 많은 것을 느낄 수 있었다. 실험을 시작하기 전 자료조사를 진행하면서 내가 설정한 여러 가지 연구과제에 대한 모든 답은 이미 정해졌다고 생각했다. 하지만 막상 연구가 시작되니 예상치 못한 문제들이 발생했다. 그래서 계획을 중단하고 다른 방안을 찾는 등 많은 우여곡절을 겪어야 했다. 이 과정에서 처음에 생각한 예상결과와 최종결과가 다른 경우도 있었다. 하지만 여러 시행착오를 거치면서 초기의 연구계획을 초안으로 삼아, 최종 결과와 비교하며 잘못된 부분을 수정해나가는 과정에서 많은 것을 배웠다. 항상 예상 결과와 비교하며 그 원인을 분석하고, 새로운 방안을 떠올리는 과정은 연구 능력을 향상시키는데 도움이 된다는 교훈을 얻었다. 그리고 문헌조사에 충분한 시간을 투자하면 연구를 빠른 속도로 진행할 수 있을 뿐만 아니라 보다 정확한 연구결과를 얻을 수 있다는 걸 깨닫게 되는 계기가 되었다.



유리 용해로에서 발생한 난제를 해결하다

 ReSEAT 전문연구위원 김용환

유리는 생활용 용기, 건축, 정보통신용 기기 등 다양한 첨단 분야에 쓰이고 있으며, 그 종류는 수 없이 많다. 일반인은 별 문제없이 유리 제품을 사용하고 있지만, 유리 전문가의 눈으로는 유리 제품의 여러 결점을 잘 찾아낼 수 있다. 유리의 결점은 크게 원료의 용융과 제품을 성형하는 공정에서 발생하는 것으로 구분할 수 있으며, 그 종류도 수백 가지 이상이다. 그 중에서 가장 많이 발생하는 결점이 용융 시에 발생하는 돌(stone), 기포(seed)이다. 이 결점은 용해로에서 발생하기 때문에 한번 시작되면 며칠씩 계속된다. 돌과 기포의 종류가 많은 만큼 발생 원인도 다양하

다.

나는 1970년도 썸 병 유리를 제조하는 회사에 입사했는데, 이 회사는 설비를 확충해서 서울과 지방 3곳에 공장을 두고 각종 병 유리, 식기 및 크리스털 유리를 생산했다. 유리 용해로에서는 크고 작은 결점이 항상 발생하기 마련이지만, 이 같은 현상이 계속되면 생산 손실 등 큰 문제가 발생한다. 유리 용해로에서 발생하는 기포와 돌은 육안으로 판별이 되며, 제품 검사 과정에서 선별하게 된다. 70년대 말에 경기도에 있는 지방 공장의 용해로에서 돌이 한 달 정도 발생하면서 기포발생도 늘어나고 있었다. 회사에서는 이를 해결하기 위해 기술부 지원을 결정했고, 그 당시 기술부 차장이었던 내가 배치와 용해로 담당을 선발해서 팀을 구성하고 지방 공장으로 지원을 나가게 되었다.

일반적으로 유리 제품 생산 프로세스는 원료저장→혼합→용융→성형→서냉→가공→검사의 과정을 통해 출하한다. 전체 공장의 60~70% 정도의 에너지를 용해로에서 사용해야 하며, 이는 유리 공장에서 가장 중요한 설비다. 여기서 품질이 좋은 유리가 생산되어야 우수한 제품을 생산할 수 있다. 전 세계에서 생산하는 약 85% 이상의 유리가 소다석회 유리이고, 대표적인 제품이 관유리와 병 유리다. 소다석회유리는 이름 그대로, 소다(Na_2CO_3)-석회(CaCO_3)-규산(SiO_2)의 3가지 원료로 구성되어 있다. 즉 주원료로 소다회, 석회석, 규사 또는 규석을 사용하며 여기에 소량의 청등제와 착색제 등을 첨가하면 원하는 유리가 제조된다.

병 유리 공장의 용해로는 엔드포트 형태이며, 용량이 100~150일/톤 정도로 작은 편에 속한다. 현재 병 유리 제조에 사용하는 용해로는 많이

발전해서 환경 문제와 생산 증가를 고려해서 전기를 겸용하거나, 공기 대신 산소를 사용하는 용해로도 가동되고 있다. 그 당시 용해로는 벙커-C유를 사용하며, 온도는 대략 1600°C 정도에서 작업을 하고 있었다. 실제 유리 품질은 디스플레이용 유리, 판유리, 병 유리 순으로 품질에 차이가 있으며, 이 중에서는 병 유리 품질이 가장 낮다. 병 유리는 사용에 지장이 없는 정도의 결점을 가지고 있어도, 제품의 규격 범위 이내라면 합격시켜 출하하게 된다.

그러나 현지 공장에 가보니 상황이 심각했다. 대부분 병이 제조되어 생산 라인을 통과하는 도중, 사람과 일부 기계를 사용해 검사를 하는데, 당시만 해도 기포나 돌 등의 검사는 사람이 담당했다. 생산하는 제품은 갈색의 맥주병이었는데, 돌이 너무 많이 발생해서 검사가 거의 어려운 상황이었다. 공장 관리자와 스텝들은 퇴근도 하지 않고 공장에서 문제를 해결하기 위해 노력하고 있었다. 우리는 그간 공장 직원들이 실시했던 조치와 결과를 다시 검토했다. 유리 용해로는 사람의 장기 중 위와 같아서, 좋은 음식을 먹으면 소화가 잘되지만 잘못 먹으면 탈이 나게 된다. 용해로도 한번 배탈이 나면 대개 몇 일간 계속되는 것이 일반적이고 이후에 안정이 된다. 용해로에서 문제가 발생하는 원인은 주로 원료와 원료 혼합에 있으며, 이를 공장에서는 미스 배치라고 부른다.

유리 원료는 규사, 석회석, 소다회가 쓰이고, 대개 규사 성분이 70%, 소다회 성분이 14%, 석회석 성분이 12% 정도다. 이 중에서 소다회는 합성 원료라서 큰 문제가 없다. 하지만 규사와 석회석은 천연 원료이기 때문에, 산지에 따라 약간의 품질 차이가 있다. 특히, 규사는

바다 모래라 입도나 성분이 일정한 편이지만 석회석은 광산에서 원광을 채취하고 공장에서 분쇄하여 입도를 규격에 맞게 조정하여 제조한다. 따라서 원료는 석회석에서 문제를 일으킬 확률이 높게 된다. 그 당시는 파유리 첨가율이 30~40% 정도였지만, 현재는 80% 수준으로 병유리의 재활용이 높은 편이라, 에너지도 많이 절감되고 생 원료의 사용비율도 크게 줄었다.

기술부 지원팀도 현장에서 퇴근 없이 철야 근무에 돌입했다. 결점에서 가장 문제가 되는 것은 돌이었다. 워낙 발생하는 양이 많은데다, 발생된 돌이 포함된 제품은 파유리로도 재사용이 어렵다. 한번 돌이 되면, 다시 용해로에 넣어도 용해되지 않기 때문이다.

돌의 발생 원인은 미 용융된 원료나 용해로 내화물 침식에서 발생한다. 그러나 내화물은 장시간 발생하는 경우가 드물다. 이런 이유로 가장 의심이 되는 원인은 원료인 규사와 석회석의 문제였다. 결점 발생이 너무 오래 지속 되다보니, 핵심 인력은 모두 지쳐있었지만 하루 제품 생산 손실 비용이 약 2천만 원 정도로 막대한데다 납기일을 맞춰야 하는 문제가 걸려 있으니 이 비상사태를 하루 빨리 해결해야 했다.

품질 관리 활동이 활발한 시기였기 때문에 분임조 활동, 제안, 문제 해결에 대한 프로세스 등의 품질 관리 기법을 활용하고 있었다. 하지만 지금과 같이 돌 분석에 광학 장비를 사용하거나 기포 내의 가스 분석 등은 실험 설비가 없어 정밀 분석은 어려웠다. 단지 실험실에 편광

현경이 있어, 돌의 결정학적인 분석은 가능했다. 대부분 돌이 발생하면 원료, 원료 배치의 혼합 상태, 용해로 온도나 용출량 등을 검토하게 된다. 우리 팀이 조사한 결과 큰 문제점을 발견하지 못했다. 장기적으로 돌이 발생하는 것은 용해로의 내화물에 원인이 아니고 원료에 의한 것으로 보고 원료를 다시 점검하게 되었다. 그러나 입고되는 원료의 검수 결과에서는 성분이나 입도에서 이상을 발견할 수 없었다.

나는 원료를 다시 점검하기로 하고, 규사와 석회석 광산의 현지답사를 기술부 담당 임원에게 요청해서 허락을 받고 출장을 하게 되었다. 한 사람은 원산도의 규사 광산으로, 나는 전라도의 석회석 광산과 분쇄 공장으로 답사를 가기로 했다. 나는 그간 유리 공장의 원료확보를 위한 광산 개발에 참여해서 광산에 대한 경험을 많이 가지고 있었다. 이미 가동 중인 광산이었지만, 처음 개발 답사하는 것처럼 만반의 준비를 했다. 준비물은 나침반, 루페, 지질 탐사용 해머, 시료봉투, 지적도, 사진기 등을 준비했다. 때는 여름 장마철이라 비가 많이 내리고 있었다. 안내를 받아 광산에 도착하니 놀라움을 금치 못했다. 어떻게 이런 광산에서 나오는 제품을 사용했는지 도대체 이해가 되지 않았다.

석회석은 우리나라에 많은 매장량을 가지고 있고, 주로 시멘트 원료로 사용되고 있는 광물이다. 석회석 광산은 대부분 산 전체가 동일함 암석을 이루고 있다. 그러나 답사한 광산은 편석을 이루고 있었다. 즉, 석회석과 규암 암석이 맥으로 섞여서 나오고 있으며 이를 선별하고 분쇄하여 제품을 생산하고 있었던 것이다. 석회석 광산은 전체가 같은 광석으로 되어 있어야 하는데, 이렇게 광산이 편석으로 되어 있어

원석을 선별하게 되면 품질이 균일한 원료를 생산할 수 없다. 광산 업주는 여러 가지 이유를 설명했지만, 규사와 석회석 광산 답사를 많이 다녀본 나의 눈으로는 도저히 납득할 수 없었다.

광산을 다녀본 사람이라면, 이 광산의 광구 광상 형태만 보아도 사용하기 부적합하다는 것을 알 수 있을 정도였기 때문이다. 다음날, 나는 공장에 복귀해서 광산의 시료까지 분석할 필요 없이 석회석을 변경하고 그 뒤 돌 발생이 해결된다면, 광산을 바로 바꿔야 한다고 보고했다. 문제가 된 광산이 아닌 다른 광산에서 생산되는 석회석으로 변경하고 3일 후, 돌 발생이 완전히 줄었고 일주일 뒤에는 정상적인 상태가 되었다. 원료와 광산을 변경하는 것은 여러 이해관계가 얽혀있는 일이라 위험이 따르는 결정이었다. 업체로부터 큰 비난을 받았지만 내 소신은 확고했고, 다행히 문제를 해결할 수 있었다. 한 달 동안 현장을 괴롭혔던 돌 발생의 문제는 석회석의 품질과 입도가 원인이었다.

미량이었지만, 석회석에 규석질 원료가 포함되어 있었기 때문이다. 규사 입도는 바다 모래를 그대로 사용한다. 그러나 석회석 입도는 모래보다 굵은 좁쌀 정도의 크기로 약 1.2mm정도라서 큰 규석질이 포함된 원료가 용융되지 않아 돌이 발생한 것이었다. 이 일을 통해, 나는 현장 확인이 중요하다는 것을 다시 한 번 크게 실감했다. 유리 용해로는 고온에서 작업을 하기 때문에 다양한 결점이 발생해도, 직접 눈으로 볼 수 없으니 문제 해결이 어렵고 용해로의 크기에 따라서 시간이 오래 걸릴 수 있다. 그러니 작업 시 공정 체크 리스트만 들여다보지 않고, 현장 확인을 우선 시 해야 하는 것이 중요하다는 사실을 강조

하고 싶다.



이중 오리피스(관)를 이용한 이음새 없는 캡슐

 ReSEAT 전문연구위원 고종성

주 변 환경에 영향을 받는 것은 무엇이든지 주변으로부터 격리를 하는 것이 일반적이다. 차단은 좋은 의미에서는 악으로부터 선을 보호하기 위한 것이다. 천연물은 식품과 화장품, 의약에 사용되며 대부분이 화학 구조적으로 이중결합, 즉 불포화결합을 갖는다. 불포화결합을 갖는다는 것은 공기 중의 산소와 결합하여 산화하여 변질될 수 있는 것을 의미한다. 마요네즈를 그릇에 담아 식탁에 두면 얼마 안가 백색이 누렇게 변하는 것도 마요네즈 성분 중의 불포화화합물이 산화하고 있는 것을 의미한다. 마요네즈는 포도씨 기름, 대두유, 카놀라 기름과 같은 불포화 기름이 계란과 혼

합된 것으로 대기 중 산소에 의해 산화되어 변색되는 것이다. 이를 방지하려면 식품을 대기 중의 산소로부터 차단하는 기체차단성 포장 재료를 이용한 차단과 식품을 캡슐화하는 방법이 있다.

의약품이나 건강식품의 산화 방지를 위해 주변 환경 중의 산소로부터 보호하는 방법 중에 소프트 캡슐 제품이 있다. 가장 일반적인 소프트 캡슐은 젤라틴을 벽재로 한 캡슐로 젤라틴, 글리세린, 색소의 수용액으로 만든 젤라틴 시트를 평판법이나 로타리법을 이용하여 만든다. 일반적인 캡슐제법은 이음매가 있어 외관상 좋지 않다. 우리 연구진은 천연 불포화화합물이 주성분인 이음새가 없는 아름다운 캡슐을 만들고자 했다. 중심 관을 둘러싼 동심원의 이중 주변 관을, 오리피스에서는 중심 관에 불포화 유성 내용물을, 주변 관에는 벽재물질 수용액을 동시에 토출시키면 오리피스 출구에서 벽재물질 수용액의 표면 장력으로 중심관의 유성 내용물을 둘러 싸 구형의 심레스 캡슐이 되고 이를 경화조에 떨어뜨리면 이음새 없는 구형 캡슐이 된다.

이음새 없는 캡슐의 벽재로는 미역의 끈적이는 성분인 알긴산나트륨과 다시마에서 얻은 한천이 있다. 나는 피부 활성 물질을 내용물로 함유하고, 벽재를 알긴산나트륨 수용액으로 해서 이중 오리피스에서 나오는 액적을 염화칼슘 수용액에 떨어뜨려 경화했다. 알긴산은 1가 음이온인데, 2가 양이온인 칼슘이온과 만나면 알긴산 고분자 사슬 사이에 칼슘 이온을 사이로 한 그물 구조가 되어 물에 녹지 않는 경화된 구형 캡슐이 된다. 소비자가 캡슐을 손으로 눌러서 터뜨리면 속에 든 화장품 성분이 나오게 되는데, 칼슘이온으로 경화한 것은 터뜨리는데 힘이

들었다. 이런 이유로 칼슘이온을 알루미늄 이온으로 바꾸었다. 유성 화장품의 내용물을 감싼 알긴산 나트륨 수용액으로 만든 벽재의 액적을 염화알루미늄 수용액에 떨어뜨렸고, 벽재 속 알긴산이 3가 양이온 알루미늄에 의해 그물 구조가 되어 물에 녹지 않고 이음새가 없는 캡슐이 되었다. 이를 터뜨려보니 칼슘이온으로 만든 것보다 훨씬 쉽게 터졌다. 우리는 이것을 상품화 시켜 특허까지 받아냈다.

이후, 소비자들이 더욱 쉽게 터지는 캡슐을 원하자 알긴산나트륨을 알루미늄이온으로 경화하는 방법 대신 한천 수용액을 벽재로 사용하는 방법을 시도해보기로 했다. 한천 수용액이 고온에서는 졸이 되고, 저온에서는 겔이 되는 졸-겔 현상을 이용한 방법이었다. 한천 수용액은 60~80℃에서 녹아 흐름성이 있고 그 보다 낮은 온도에서는 굳는 특징이 있다. 온도에 따라 흐르거나 굳는 한천 수용액은 80℃에 맞춰 이중 오리피스(관)의 주변 관에, 화장품 유성 성분은 중심관으로 유동하도록 하여 중심관, 주변관의 이중 오리피스 출구에서 토출시키면 화장품 유성성분이 중심에 있고 이를 둘러싼 한천 캡슐의 액적이 되고 이 액적을 차가운 유동 파라핀에 떨어뜨리면 이음새 없는 구형 캡슐이 된다. 소비자가 사용할 때, 알긴산을 알루미늄 이온으로 굳힌 것보다 고온의 한천 수용액 벽재를 낮은 온도로 굳힌 캡슐이 더욱 잘 터져서 사용감이 좋아지도록 느끼게 했다.

이처럼 고분자의 가공 방법에 따라 분자간력이 다르고 캡슐 제조 시 가압 붕괴성이 다르기 때문에, 소비자가 느끼는 사용감이 달라질

수 있다. 해서, 소재를 이용한 제품 개발을 할 때는 연구 개발자가 사용할 소재의 물성, 소재 수용액의 유동특성, 고분자 수용액의 가교 및 경화, 소재의 소비자 사용감 등 동시에 넓은 스펙트럼의 전문 지식을 갖춰 개발에 임해야 한다.



제품 제조에는 기술 이론이 중요하다

 ReSEAT 전문연구위원 김용환

유리를 만들 수 있는 원소는 약 90개 이상이며, 따라서 조성으로는 수많은 종류의 유리를 만들 수 있다. 그러나 세계에서 제조되는 유리의 약 80~85%는 소다석회유리이며, 주원료는 규사(SiO_2), 석회석(CaCO_3), 소다회(Na_2CO_3)로 판유리와 병유리가 여기에 속한다. 내가 유리 분야를 전공하게 된 것은 국내에 유일하였던 요업과에 입학한 것이 계기가 되었다. 그리고 졸업 후에 국립공업연구소 요업과 유리실을 거쳐서 병 유리 공장에 입사한 것이 50년간 세라믹스 산업분야에서 일을 할 수 있는 계기가 되었다. 또한 현장 경험은 나중에 학위 취득을 위한 공부와 대학에서 세라믹스 관련 과목을 강의하는데 큰 도움이 되었다.

나는 1970년에 당시 국내에서 가장 현대적 설비를 가지고 있던 영등포의 유리 회사에 입사했으며, 공장에는 60톤 규모의 탱크 용해로 3기가 있었다. 57년에 설립된 이 유리 회사는, 국내 최초로 유리 탱크 용해로와 자동 제병기로 병 유리를 생산하고 있었다. 70년대 국내의 병 유리 공장에서 생산하는 제품은 음료, 주류, 약품 종류의 병이 대부분이었다. 생산하는 유리의 색은 유리 공학 전문용어로 갈색 유리, 청색 유리, 녹색 유리뿐이었으며, 무색 유리는 70년대 중반부터 개발되었다.

유리의 색은 컬러별로 규격이 있고, 주로 명도와 주파장, 자극순도로 규정된다. 예를 들어, 명도는 0~100의 범위에서 밝기가 어느 정도 인가를 나타내는 수치이고 갈색(amber) 유리는 약 20~30이어야 한다. 또, 유리의 색은 판매하는 제품의 마케팅이나 내용물과 관계가 있다. 예로, 맥주병이나 약병이 갈색인 이유는 자외선을 차단하기 위해서다. 내가 입사한 회사는 비타민이 함유된 음료수 병을 제작했는데, 녹색 유리병을 제약 회사에서 수주 받아 생산했다.

병의 모양, 구조, 색상 등을 설계한 후 생산을 순조롭게 진행하고 1차 납품을 완료하던 어느 날, 병 속의 내용물이 변질됐다는 클레임을 받게 되었다. 음료 제품은 대부분 상자에 넣어 실외에 두고 판매를 하고 있던 시절이었다. 그러나 내용물이 변질된 이유는 햇빛 때문이었을 확률이 높았고, 현장 조사 결과 실제로 내용물의 색이 탁하게 변질되어 있었다. 어느 정도인지 모르겠지만, 내용물에 비타민 C가 포함되어 있는 것이 확실하다고 판단되었다. 1차 납품된 백만 개의 유리병이

모두 반쯤되자 회사에 비상이 걸렸고, 자외선을 차단하는 기능을 가진 녹색 유리 제품을 생산하는 것이 시급한 과제가 되었다.

회사는 영업, 생산, 연구과 직원들이 모여서 연속적인 대책 회의를 했다. 자외선 차단을 하는 방법으로 갈색 유리병을 사용하는 것이 있었지만, 음료수의 색이 노란색이었기에 갈색 병에 포장하는 것은 업체에서 수용하지 않았다. 결국, 녹색으로 자외선을 차단하는 방법을 찾는 수밖에 없었다. 지금은 코팅이나 필름으로 자외선 차단이나 상품 디자인을 하는 기술이 흔하지만, 그 당시만 해도 그런 기술이 없었다. 따라서 유리 소지 자체로 자외선을 차단하는 방법을 찾아야만 했고, 내가 속해 있는 실험 연구과에서 문제를 해결해야 하는 상황이었다. 우리 과는 주로 원료 개발과 제품의 물성 측정, 화학적 분석을 하고 있었다. 연구를 해본 석박사급의 인력이 없었고, 그나마 연구개발 업무에 경험이 있는 사람은 연구소에서 과제에 참여 했던 내가 유일했다.

그 당시 회사에는 일부 전공 서적 이외는 기술 정보를 얻을 수 있는 자료들이 없었다. 유일하게 기술 정보를 수집할 수 있는 곳이 지금의 한국과학기술정보연구원 뿐이었다. 그러나 이곳도 설립이 되지 얼마 되지 않아서, 많은 정보를 가지고 있지도 않았다. 게다가 지금처럼 인터넷이나 문헌 데이터베이스가 없던 시절이어서 모든 자료를 오프라인에서 직접 정보를 검색해서 찾아야했다. 관련 잡지나 특허 등도 열람실에서 대출을 받아서 보기 때문에 하루에 볼 수 있는 양이 매우 제한적이었다. 약 일주일 이상을 정보 검색에 매달린 결과, 다행히 일본

특히 기술 중 자외선을 차단 기능이 있는 녹색 유리와 무색유리 제조 기술을 발견할 수 있었다.

자료 분석결과, 녹색 유리에서 자외선을 차단하는 기술의 핵심은 녹색을 나타내는 착색제인 크롬이 6가(Cr^{6+}) 형태로 유리 내에 존재해야 자외선 차단이 가능하다는 것이었다. 따라서 착색제인 크롬산화물 원료와 산화제를 선정하는 것이 중요했다. 원료 가격을 고려한 착색제로 중크롬산칼리($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)를, 산화제로는 초석을 이용하기로 했다. 이를 위해서 유리조성에 적합한 10여개의 배합비를 구하고 용융시험을 시작했다.

유리에 크롬을 사용하여 녹색 병을 제조하면 크롬은 주로 3가(Cr^{3+}) 형태로 존재하며, 지금의 사이다병과 같은 녹색이 된다. 자외선 차단이 되는 크롬 6가로 만들기 위해서는 유리를 제조하기 위한 원료에 산화제를 다량 사용하고, 용해로의 분위기도 산화로 맞춰야 한다. 착색유리 제조에서는 원료인 착색제도 중요하지만, 용해로의 분위기 따라서 색이 변화하거나 아예 착색이 안 되는 경우도 있다.

따라서 용해로 연소에서 분위기를 착색에 적합하게 산화, 환원, 중성염으로 조절해야 한다. 연구하기 위한 유리 용융 실험로는 가스과 고압공기가 필요해서 실험실이 아닌 현장에 설치했다. 실험용 가스로는 직접 설계해서 제작했다. 주로 프로판가스와 고압 공기를 사용하는 실험로는 500ml 실험용 도가니 3개가 들어가는 용적이며, 온도는 2시간 내에 1600℃를 올리는 연소 기술을 가지고 있었다. 현장 실험실에서

진행하는 용융 실험은 하루에 2번 정도 가능하며, 용융과 기포 제거를 통해 벌크 유리를 만드는데 최소 6시간 정도가 소요된다. 용융 실험에서 자외선이 차단되는 유리를 제조할 수 있었다. 이를 기본으로 실제 용해로에 생산할 유리의 배합 비율을 구하고 제품 생산을 시작했다.

자외선 차단용 녹색 유리를 제조하기 위한 원료는 기본적인 소다석회 유리 조성에 크롬을 6가로 하기 위한 다량의 산화제가 첨가된다. 용해로의 연소 분위기는 가능한 산화 상태로 하고, 산화제는 제품의 자외선 차단상태를 분석하면서 조절했다. 자외선 차단은 쉽게 성공을 했지만, 제품 생산에서 유리 용융에 문제가 발생하기 시작했다. 유리에 작은 기포와 큰 기포가 다량 발생해서 유리 제품을 생산할 수 없었고, 그 외 돌과 소지가 불균일한 결점이 계속 발생했다. 이 문제는 약 3주 동안 계속되었고, 이로 인해 하루 60톤의 제품 손실이 발생해서 회사는 초비상 상태가 되었다.

문제 해결을 위해, 현장을 제외하고 생산 본부의 직원의 대부분은 철야를 해야 했다. 실험 연구과 직원도 모두 매일 밤을 지새웠다. 유리 공장에서는 대부분 기포가 발생하면 기본 대책의 하나가 용해로 온도를 올리고 유리소지가 용해로에 오래 머무르도록 용출량을 줄이는 조치를 취한다. 70년대 초의 용해로는 내화물의 품질이 낮아 수명이 약 4년 정도였다. 기포발생과 유리의 소지 불균일 등을 해결하기 위해 용해로 온도를 올려야 했으나, 용해로의 온도를 1600℃ 이상으로 올리는 것은 큰 사고를 불러올 수 있어 용해과에서 난색을 보였고, 문제 해결은 더 어려워지고 있었다.

그러던 어느 날, 나는 유리 공학 핸드북에서 유리 컬러에 의해 온도가 떨어지는 구배를 보게 되었다. 자외선 차단용 유리도 열전도가 낮아 용해로의 하부로 온도가 전달되기 어렵기 때문에 용융이 잘 안 되는 것으로 판단했다. 나는 역으로 유리가 저온에서 용융이 되도록 유리 조성을 변경하는 방법을 제안했고, 용제인 소다회 사용량을 증가 시키기로 했다. 소다회는 합성 원료로 가격이 높고, 유리의 화학적 내구성 때문에 너무 많이 사용할 수 없었다. 유리병은 외관 등의 치수와 열 충격, 내압, 내알칼리성 등이 KS 규격에 적합해야 한다. 하지만 소다회를 추가할수록 유리의 내알칼리성이 약하게 되어 규격을 벗어날 수 있다.

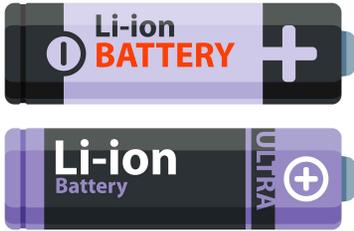
상당한 양의 소다회를 추가하여, 점차적으로 유리의 연화점을 720℃에서 700℃로 20℃내려 용융이 잘 되게 한 결과 기포와 용해로의 용융 상태가 정상으로 되었고, 자외선 차단에 성공할 수 있었다. 이 문제를 해결하기까지 약 3주가 걸렸다. 며칠씩 밤을 새우고 책상 위에서 쪽잠을 자며 문제를 해결하는 동안, 많은 스트레스를 받았다. 현장 제품의 투과율을 수시로 분석하다보니 나중에는 유리의 색만 보아도 녹색 유리가 자외선이 차단되는지 안 되는지 알 수 있었다. 얼마나 고생했는지 시간이 많이 흐른 지금도 녹색 유리를 보면 자외선 차단 여부를 판단할 자신이 있다.

지금처럼 제조 설비나 실험 기기가 부족한 시절에는 유리 용융 실험을 위해 실험로를 제작해서 스스로 해결해야 했다. 이렇게 유리의 기본 기술을 이해할 수 있었기에, 자료나 문헌을 구하기 어려워도

문제를 해결할 수 있었다. 이 경험을 통해 깨달은 3가지가 있다. 먼저, 기술 문헌 등에서는 하나의 그림이나 도표를 자세히 분석하는 습관이 중요하다. 제대로 습득한 기술 이론은 문제가 닥쳤을 때 가장 쉽게 해결할 수 있는 열쇠이자 발전의 계단 되어 준다.

두 번째는 용해로는 처음부터 제조하고자 하는 유리의 종류나 조성에 맞춰 설계해야 한다는 것이다. 용해로 설비가 온도를 충분히 올릴 수 없거나 도가니에서 유리를 용해하는 경우, 용해 온도에 적합하도록 유리의 조성을 조정해야만 유리 용융이 가능하게 된다. 무조건 유리의 기본 조성을 유지하려고 하면, 용해로가 용해 능력이 부족한 경우에 유리를 용융할 수 없게 될 수 있다. 마지막으로, 문제는 스스로 해결해야 한다는 것이다. 이 글을 쓰면서, 오랜만에 지난 특허를 찾아보았다.

80년대 말에 등록된 외국 특허 중 내가 겪은 문제와 똑같은 내용이 있었다. 여기에는 자외선 차단용 유리 생산에는 산화제를 다량 사용하기 때문에 작은 기포가 발생해서 용해로 온도를 올리거나, 용출량을 줄여야 한다는 것이다. 나의 경험과 기술 이론이 정확했던 것이다. 스스로 문제를 해결하고자 공부하고 움직인 덕분에 한 눈으로도 녹색 유리병의 차단 여부를 알게 될 만큼 발전할 수 있었다. 이것이 후배 연구원들에게 알려주고 싶은 3가지 교훈이다.



제품을 만들기 전에 모든 재료의 특성을 파악하라

 ReSEAT 전문연구위원 장윤한

2000년대에 들어서면서 휴대폰, 노트북 등의 고용량화에 따른 리튬이온 이차전지 업체 간의 기술경쟁이 심화되었다. 당시의 기준 모델인 18650의 원통형 전지 용량은 2,000mAh 였는데, 전자기기 업체들의 지속적인 고용량 요구가 이어지면서 2003년경엔 2,200mAh, 그 이듬해는 2,400mAh, 2,600mAh 수준의 전지들이 서로 경쟁하듯 쏟아져 나왔다. 1991년 소니가 해당 전지를 최초 상품화 했을 당시 1,000mAh 수준이던 용량이 같은 체적에서 2배를 훌쩍 넘어선 것이다.

특히 노트북에 들어가는 리튬이온 원통형 전지는 고용량화에 대한 요구가 더욱 빗발치는 상황이었다. 업체의 요구에 발맞추기 위해 전지 업체들은 경쟁적으로 고용량 전지를 만드는데 총력을 기울이고 있었다. 우리 업체도 마찬가지로 고용량화를 추진하던 중 생산라인이 가동을 멈추는 사태가 발생했다. 당시 필자는 제품개발 뿐만 아니라 제조기술 공정 품질 등 모든 기술을 총괄하여 담당하고 있었기 때문에, 사내에서 공정 불량 발생에 대한 보고를 가장 먼저 전해 들었다.

제조과정 중, 불량률 30% 이상의 전압불량이 발생해 전지 양산라인이 전면중단 된 것이다. 리튬이차전지는 수리하여 재생 할 수 없는 제품이기 때문에 불량제품 외부유출을 막기 위해 불량전지를 포함해 비슷한 시점에 생산된 전지들을 전량 폐기처분해야 하는 불상사가 일어났다. 이로 인해 회사는 엄청난 경제적인 손실을 입고 대혼란에 빠져야 했다.

이 불량은 OCV(Open circuit voltage)불량으로 충전된 전지에 부하를 걸어주지 않고 방치해 둔 상태에서 표준 전지와와의 전압차이가 발생하는 것을 말한다. 전지를 어떤 기기에 연결하여 실제 사용하는 상태에서의 전압인 CCV(Cross circuit voltage)와 반대되는 개념이다. 리튬이온 이차전지 제조 공정에서는 각종 화학재료나 부품들로 제조하여 완성된 전지를 자동으로 전수검사를 하고 있다. 일정기간 상온 방치하거나 특정 온도에서 방치 후 전압상태와 저항 등의 데이터를 기록하고, 다량의 전지들에 대한 통계적 처리에 의해 양품과 불량을 분류시킨다.

리튬이온전지에서 OCV 불량은 거의 대부분이 금속이물질이 전지내로 혼입이 되어 양극과 음극사이에 있는 절연체인 세퍼레이터를 뚫고 쇼트되면서 발생한다. 따라서 공정상 금속이물질이 들어갈 수 있는 곳들을 샅샅이 조사하기 시작했다. 전지의 이물질은 마이크론 단위의 크기로 육안으로는 확인이 불가능하다. 그래서 전자 광학 현미경인 SEM(Scanning Electron Microscope)과 금속 성분을 분석하기 위한 질량분석기 ICP(Ion chromatography-mass spectrometry)등 첨단 분석 기기들이 사용되었다. 하지만 해체된 전지를 사내와 국내분석기관에 의뢰해 분석을 진행해도 문제점이 발견되지 않아 난항을 겪었다.

그런데, 전혀 예상치 못한 보고를 받게 되었다. 이물질이 아닌 2%미만으로 소량 첨가하는 도전제가 의심이 간다는 보고였다. 이 문제는 이전까지 용량이 낮은 전지를 생산할 때 전혀 발생하지 않았던 문제로 고용량의 전지를 만들면서 발생한 문제였다. 리튬이온 전지의 양극활물질은 그라파이트 등 카본계를 사용하는 음극활물질과 달리 전도성이 없다. 그래서 집전체인 알루미늄 포일 위에 코팅을 해서 부착시켜야 한다. 부착을 위해 NMP등의 용매로 바인더를 녹인 용액으로 슬러리를 만들 때, 고체인 양극활물질과 도전제를 넣어 섞어주면 도전제에 의한 전도 네트워크가 형성된다. 당시 도전제는 유럽 제품을 쓰고 있었으며, 단순히 전도성을 부여하는 목적으로 사용했기 때문에 가격 대비 도전성이 우수하면 합격점이었다. 전극 설계시 고밀도화를 위해 도전제를 소량만 첨가하는 수준으로 사용하였기 때문에 품질상 큰 영향을 미치지 않을 것이라고 생각한 것이다. 최소량의 도전제로 고성능 전지를 개발하면 된다는 설계적인 관점으로만 생각한 결과였다.

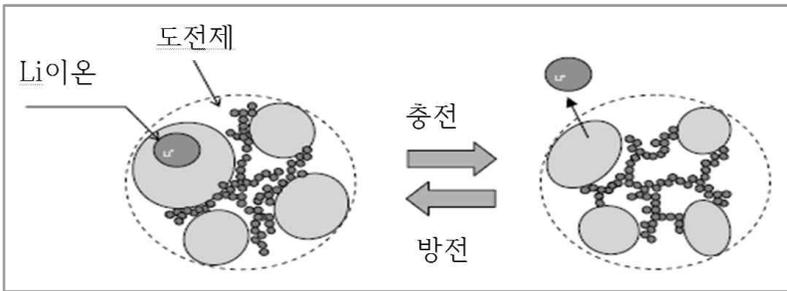
양산에 착수한 후로도 몇 년 동안 전혀 문제가 발생하지 않았기 때문에, 도전제 자체에 대한 연구는 진행한 적이 없었다. 도전제에 대해 국내 및 해외 유명 분석 기관에도 의뢰하였지만 결과는 마찬가지로였다. 이렇다 할 명료한 답변은 없었으나 유기 이물에 의한 문제 발생 가능성을 언급했기 때문에 공급업체가 있는 유럽으로 기술자들을 파견하였다. 또한, 도전제 제조과정 중 연소온도 3,000도 부근에서 온도 조건을 변화시켜 유기이물을 태워보려는 실험도 했지만 문제는 좀처럼 해결되지 않았다. 난항은 계속되어 생산라인이 중단된 상태로 수개월의 시간이 흘러가고 있었다.

그러나 이번 사태를 통해 도전제에 대한 조사를 진행해보니, 우리가 사용한 도전제가 일차전지인 건전지에 들어가는 도전제와 유사한 제품이라는 사실을 알게 되었다. 또한 보관환경과 상태도 좋지 않았으며, 일본에서는 건전지용 외에는 우리가 사용하는 제품과 같은 도전제를 사용하는 회사가 전혀 없다는 사실도 추가로 알게 되었다.

우리보다 이차전지에 대한 경험이 많은 일본회사들은 도전제 자체의 연구뿐만 아니라 전극을 만들 때 혼합하는 여러 재료들과의 상관관계 연구, 그리고 믹싱 등 제조 공법에 대한 연구들을 많이 하였다는 것을 알게 되었다. 특히, 도전제가 단순 첨가제가 아닌 전지 성능 전반에 폭 넓게 영향을 미치는 아주 중요한 요소라는 사실도 깨닫는 계기가 되었다.

과거부터 현재까지도 양극활물질은 리튬이 포함된 산화물을 주로

사용하고, 음극활물질에는 흑연, 하드 카본 등의 탄소 재료를 주로 사용하고 있다. 여기에서 사용되는 도전제는 크게 두 가지 기능을 하고 있었다. 세라믹 재료인 양극활물질은 전도성이 거의 없기 때문에 전도성 부여를 위해 도전제가 첨가된다. 이 외에, 쇠사슬같이 연결된 구조를 가진 도전제는 활물질 간에 중개하는 역할로 존재하기 때문에 Li이온의 출입에 의한 활물질의 체적 변화를 완충하는 작용을 한다. 이로써 충·방전이 반복되어도 전극의 형상이 유지되면서 전도 네트워크가 확보되기 때문에, 결과적으로 사이클 수명이 긴 이차전지가 될 수 있도록 도전제가 보조 역할을 하고 있는 것이다. 이 모습을 도식적으로 <그림 1>에서 나타내었다. 쇠사슬 같이 연결된 구조의 도전제가 완충재 역할을 하고 있기 때문에, 충·방전 반복에 의해 활물질의 부피 변화가 있어도 전도 경로가 유지되고 있는 모습을 나타내고 있다.



▶그림 1 충·방전시 Li이온과 도전제의 전도 네트워크 유지 상태

현재 양극활물질로 이용되고 있는 리튬 화합 산화물은 전도성이 결여되어있기 때문에 단독으로는 저항이 높아 Li이온이 이동하기 어렵다. 따라서 양극활물질에 도전제를 첨가하면 내부 저항이 낮아져 전지의

용량이 개선된다. 하지만 일정량 이상 첨가하면 반대로 용량이 저하된다. 즉, 전지의 용량은 활물질의 질량으로 결정되기 때문에 최적의 첨가량으로 도전제 사용량을 최소화시켜야 하는 것이다.

결국은 일본 전지업체들이 사용하고 있는 카본 블랙의 종류들을 단독 혹은 혼합해, 완성된 전지들에 대한 실험을 병행하였다. 그 결과, OCV불량을 획기적으로 개선시킬 수 있는 도전제와 전해액 첨가제를 발견할 수 있었다. 그래서 당시 생산기종의 모든 전지에 대한 도전제 및 전해액 사양을 바꾸고 신기종 개발에는 새로운 재료를 사용하도록 지시했던 기억이 아직도 생생하게 남아있다.

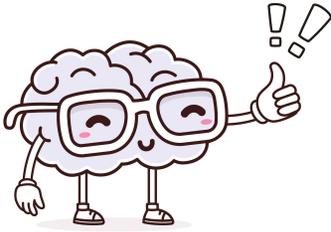
단순 첨가제나 활물질의 보조 재료로 인식하고 있던 도전제가 전지 용량 및 그 품질 산포 그리고 출력특성, 전지 사이클 수명 등 전지의 모든 특성을 결정짓는 중요한 기능성 재료라는 것을 뒤늦게 알게 되었다. 고밀도 전극에 의한 도전제의 안전성 품질문제에 대한 실험이나 조사·연구가 전혀 없는 상태에서 설계를 진행했기 때문에 피해를 입은 것이다. 그래서 전지 개발 및 생산할 때 관련된 다른 재료와 부품들과 연계된 기술개발도 중요하다는 교훈을 얻었다.

이차전지 사업에서는 일본기업들보다 후발주자였지만, 경험부족으로 발생했던 도전제로 인한 OCV불량 문제를 해결해 나간 과정에서 배운 게 있다. 일본과 같은 선도 기업들의 기술동향을 면밀하게 파악해야 한다는 것이다. 우스갯소리를 하자면, 심지어 어떤 도전제를 사용하고 있는지도... 현재까지도 리튬이온전지는 끊임없이 기술적으로

진보하고 있기 때문에 새로운 재료의 개발과 선택은 언제나 중요한 과제이다.

최근 들어, 도전제의 사이즈가 점점 나노화 되면서 소량으로 활물질 사이에서 전도 네트워크를 형성하기 위해서는 균일한 혼련 작업과 분산 기술 등 제조기술에 대한 연구의 중요성도 부각되면서 나노 물질을 섞을 수 있는 설비를 사용하기 시작했다. 그리고 현재 전극의 고밀도화에 의해 전도성이 떨어지는 문제나 새로운 음극재료인 실리콘 계와 같이 팽창이 심한 재료에 대한 도전제나 바인더 연구들이 활발하게 이루어지고 있는 상황이다.

향후, 전기자동차 같이 고출력을 요구하는 경우의 리튬이온 이차 전지는 활물질의 입경도 작아지는 경향으로 갈 것으로 예상된다. 리튬 대용량이나 높은 파워가 기대되는 리튬이온 이차전지 등과 같이 전지의 성능을 더욱 향상시키기 위해서는 활물질, 도전제, 결합재(바인더)와의 조합, 또는 전극 합제 및 슬러리 제조에 대한 프로세스 기술을 포함한 전지 전체로서의 최적화 및 재료연구가 필요하다. 그리고 새로운 도전제나 활물질, 바인더들과의 혼합 법등과 같이 재료뿐만 아니라 제조 프로세스의 연구에 대한 중요성을 인식해야 할 것이다. 새로운 기술을 받아들이지 않거나 연구를 게을리 한다면, 기업은 경쟁력을 잃고 도태될 수 있다는 점을 기억해야 한다.



지금의 방법이 최선인가?

 ReSEAT 전문연구위원 강두철

지금은 개인용 컴퓨터의 이동식 기억장치로 CD-ROM 드라이브나 USB 메모리를 주로 사용하지만 80년대 후반부터 90년대까지는 FDD (Floppy Disk Drive)의 사용률이 압도적으로 높았다.

1960년대 후반 테이프 드라이브 대체용으로 만들어진 FDD의 구조는 크게 헤드 케리지 구동 메카니즘과 전자 제어 회로로 나뉜다. 헤드 케리지 구동 메카니즘은 스피들 모터와 스테퍼 모터 등으로 구성되어 있다. FDD의 구성은 간단하지만 일반 전자제품과 달리 기계적인 부분이 혼합된 메카트로닉스 제품이라 부품 제조가 까다로우며 동시에 품질의 균등함이 매우 중요한 제품이다. 일본 기업 연수 중 만났던 한

과장급 엔지니어는 FDD의 핵심 기계부품을 제작하기 위해 수도 없이 시행착오를 겪었고, 20년이 넘도록 개발과 생산에 참여했지만 여전히 개선할 점이 많다고 토로하기도 했다.

FDD를 최초로 개발한 건 미국의 IBM이었으나, 80년대 후반에 와선 소니, 마쓰시다, 도시바, 히다치, NEC 등 일본 업체에서만 개발 생산하고 있었다. 전 세계의 모든 PC제조 업체들이 일본으로부터 FDD를 공급받는 상황인 것이다. 나는 일본 FDD 개발/생산업체에서 기술 연수를 받으며 부품의 품질 관리, 제품의 시험평가, 에이징 등 전 생산 및 품질 관리 과정을 지켜보았다. 기술이 확실히 국내 수준보다 훨씬 앞서 있었기에 격차를 단기간에 좁히기는 무척 힘들 것이라는 생각이 들었다. 당시에는 국내 대부분의 전자 산업이 일본보다 10년 이상 뒤지고 있던 평가를 받고 있었고, 특히 FDD와 같은 메카트로닉스 제품에 있어서 그 수준차가 더 크다고 생각했었다. 때문에 지금 우리나라가 반도체 메모리 같은 일부 전자산업 분야에서 일본을 앞지르고 있는 것을 보면 신기한 기분이 들 정도다.

내가 FDD개발에 참여한 시기는 80년대 후반, 직장생활 8년차에 선임 연구원으로 재직할 때였다. FDD자체가 양산제품이다 보니, 제품 연구 개발 업무 뿐 아니라 생산 기술, 품질 관리, 영업 지원 등 여러 이유로 프로젝트에 참여하는 부서와 인원이 대규모로 편성 되었다. 때문에 문제가 발생할 때마다 공동 대책 회의를 열어 각 부서 별로 의견이나 요구 사항을 나누다보면 종종 갈등을 빚곤 했다.

당시 오셨던 말 중에 기억에 남는 말이 몇 가지 있는데, 영업 측에서 “생산 원가는 낮추고 품질은 선진제품 만큼 올려야 매출목표를 달성할 수 있다.”고 하면 생산 측에서는, “무슨 예술작품이라도 만드는가? 어린 아이라도 만들 수 있도록 생산이 쉽게 설계해 달라.”고 대답하고 또 이를 들은 개발 측에서는 “원가랑 품질을 다 잡으면 누가 못 파나. 움직이지 않는 전화기 생산과 FDD를 어떻게 비교하나.”라며 팽팽하게 대답했다.

내 전공이 전자 공학이다 보니, 개발 초기에는 FDD전자회로 위주로 성능 개선 개발 업무를 진행했고, 기계 전공 연구원들은 아예 다른 팀에 소속되어 있었다. FDD를 개발하는 업무에 본격적으로 착수하고 제일 먼저 실행한 것은, 일본 선진 제품들의 성능 비교 평가였다. 선진업체는 많았고, 샘플을 구하는 건 어렵지 않았다. 덕분에 샘플들을 마음껏 해체하고 분석하며, 개발 과정의 시행착오를 줄이고 더 나은 방법을 연구할 수 있었다. 일이었지만, 한편으론 순수하게 한 명의 공학자로서 즐거움을 느낄 수 있는 시간이었다.

특히, 공개된 기술 자료에선 접하기 어려운 최신 전문 지식이나 숨겨진 노하우를 눈으로 보고 생각해서 터득 할 수 있었던 것이 가장 즐거웠다. 누군가가 보기 좋게 정리해 놓은 자료를 보고 쉽게 무언가를 배울 때와는 차원이 다른 희열을 느꼈다. 마치 호기심으로 장난감을 해체하는 어린 아이의 기분과 비슷하다고 할까? 우습게 들릴 수도 있지만, 사실 그렇지 않은가. 어른이 된 후엔 아이들처럼 단순한 호기심으로 완제품을 분해하는 일은 드문 일이니 말이다. 웬만큼 용기가 있지

않고서야 힘든 일이다.

그런데 딱히 용기를 낼 필요도 없이 마음껏 분해할 수 있는 기회가 생겼으니, 시켜서 하는 일이란 것도 잊을 만큼 집중해서 파고들었던 기억이 난다. 개인적인 성취감이 있으니 업무를 하는데 큰 힘을 실어 주었고, 결과적으로 제품 설계 과정에서 아이디어를 내는데도 좋은 영향을 미쳤다.

그렇게 처음 제작에 성공했던 FDD 샘플은 일본 제품들과 비교해 보았을 때, 성능 면에선 별 차이가 없었지만 디스켓 특성에 따라 너무 민감하게 반응했다. 게다가 타 FDD와의 호환성도 부족했다. 양산 목표는 달성조차 못했고, 제작되는 샘플마다 성능 편차가 널뛰기를 했다. 처음엔 이런 문제점들을 회로 부분을 최적화해서 해결하려고 애썼지만, 개별 샘플 별로 생기는 성능 차이는 여전히 좁히기 어려웠다.

이 후, 전자회로와 메카니즘을 서로 교환 테스트하는 과정에서 메카니즘마다 테스트 결과가 크게 다르게 나타나는 사실을 알게 되었다. 샘플 간 성능 차이를 유발하는 원인이 메카니즘에 있을 거란 짐작이 가능했지만, 측정 데이터가 없으니 확신할 수도 없는 상태였다. 한마디로 심증만 있고 물증이 없었던 것이다.

원인을 확실히 해야 개선을 할 텐데, 다른 부서가 메카니즘 개발을 담당하고 있는 상황에서 단순히 짐작만으로 문제를 제시하고 개선을 요구할 수는 없는 노릇이었다. 그래서 나름대로 메카니즘 측정 방법을 고민하던 중, FDD시험기의 전면 판넬에 명시는 되어있지만 전혀

실행이 안 되고 있는 시험 항목이 있단 걸 알아냈다. 시험기 관련 기술 자료와 매뉴얼을 확인해 보니 이것들은 펌웨어 업그레이드를 해야 실행되는 기능이었던 것이다. 이후, 업그레이드 펌웨어 ROM을 교체 하여 그 메카니즘 시험 기능을 실행할 수 있었다.

측정한 결과들을 근거로 FDD기구 팀에 메카니즘 성능 개선을 요구 하고 생산과정에 메카니즘 측정 항목을 추가해 품질관리를 강화하도록 조치했다. 기구 팀의 반발이 있긴 했지만, 메카니즘 품질 개선 작업이 본격적으로 추진되었고, 본래 분리되어 있던 기구 팀은 FDD 개발팀으로 통합되었다. 기계 담당 연구원들이 수개월 동안 FDD 시험 기를 사용하며 메카니즘의 성능을 높였다. 생산 과정에서도 불량 부품을 효과적으로 선별할 수 있는 기구를 제작해서 활용하도록 한 결과, 메카니즘 품질이 크게 향상되었다. 또한 전자 부문에서도 자기 헤드의 분능 특성 차에 의한 성능 저하 문제, 재생 필터의 전자 부품에 의한 오류 문제 해결 등 성능 개선을 위해 노력했으며, 결국 메카니즘과 전자 회로의 성능 개선과 품질 안정화가 이루어졌다.

제품 자체만 두고 보면 매우 성공적인 결과를 이뤘지만, 시장 진출은 만만치 않았다. 수년 간 일본이 FDD 시장의 주도권을 압도적으로 쥐고 있는 상황에서, 제품 인지도가 낮은 국산 FDD의 해외 진출 가능성은 희박해보였다. 더군다나 모터, LSI 등 FDD의 주요 핵심 부품을 수입 해서 생산해야하는 상황이라 가격 경쟁력 확보도 쉽지가 않았다. 이런 악조건 속에서 국내 PC제조업체에 납품하는 걸 시작으로, 동남아 등지로의 해외수출까지 이뤄내는 데엔 부단한 노력이 필요했다. FDD

제작과 납품, 수출 이 모든 것이 국내에선 최초의 일이었다.

타 직장으로 이직을 하게 되면서 FDD와 무관한 업무를 하게 된지 10여년 후, 우연하게 FDD산업의 퇴출 소식을 접하고 착잡한 심정으로 과거 FDD 개발 시절을 돌아보는 순간이 있었다. 당시 제품경쟁력 강화를 위해 다방면으로 노력했었고 후발업체의 제품으로 해외수출까지 착수했으니 개발 목표는 달성했다고 할 수는 있지만 제품 스펙을 겨우 만족하는 수준으로 개선을 중단하거나 개선을 시도하지 않았던 부분들이 있었다. 예를 들어, 이미 출시된 FDD가 PC의 사용 조건에 따라 접속 오류를 일으키기도 했고, 어떤 PC에서는 전원 공급 장치에서 나온 전자파의 영향으로 FDD성능이 급격히 떨어지기도 해서 뒤늦게 마그네틱 헤드를 전자파 차폐하는 방법으로 해결한 경우도 있었다.

조금의 여유만 있었다더라도 제품 출시 이전에 미리 대비할 수 있는 상황이었다. 다양한 PC에 연동 시험을 통해서 문제를 사전에 파악하고 좀 더 적극적으로 조치할 수 있었던 부분인데 뭐가 그리 급했는지 당시엔 그렇게 할 생각을 못했다. 제품이나 기술의 연구 개발 할 때는, 당장의 시급한 문제로 다소 여유가 없다하더라도 가끔씩은 현재의 개발 방향이 적합한지, 지금보다 효과적인 방법이 없을지, 또 간과한 문제들은 없는지 순간순간 되돌아보는 자세가 필요하다.



특정 전문가 그룹에 독점된 연구개발의 문제점

 ReSEAT 전문연구위원 김영철

인 생은 처음 생각했던 대로 흘러가는 경우가 별로 없는 것 같다. 처음에 계획을 잘 세웠더라도 도중에 뜻하지 않은 변화나 사건들이 일어나 바뀌는 경우가 많다. 되돌아보면 나의 연구개발 인생도 마찬가지였다. 그중에서 어찌 보면 나에게 행운이랄 수 있는 사건 하나를 얘기하면서 느꼈던 ‘연구자들이 가져야 할 올바른 연구 자세’에 대해 말해보고 싶다.

핵연료가 되는 우라늄 광산은 석유 광산만큼 세계 특정 지역에 몰려 있고, 우라늄을 채굴, 가공하여 핵연료로 공급할 수 있는 국가도 몇몇

국가로 제한되어 있다. 국제정치 및 경제학적 요인들이 복잡하게 얽혀 있기 때문이다. 예를 들면, 핵연료 원소인 우라늄-235 농축기술은 곧바로 핵폭탄 기술로 전용될 수 있어 쉽사리 기술 개발에 나서지 못한다. 현재 국제 정치에서 벗어나 있는 북한이 핵폭탄과 미사일을 개발하여 미국과 우리나라를 위협하고 있지만 무역과 경제 및 국제 정치 때문에 우리나라가 즉각 대응하기 어려운 점도 이 때문이다. 기술이 없어서 당하는 것이 아니다. 1980년대에는 세계 핵연료 공급을 주도하던 미국과 구소련뿐만 아니라 프랑스, 영국, 독일, 일본, 인도 등 원자력을 사용하는 대부분의 국가들이 전략 차원에서 고속로 기술을 개발하고 있었다.

우리나라는 이제 막 원자력을 이용하고 있는 상황으로, 에너지 기술을 자립할 수 있도록 고속로 기술을 개발하길 원하고 있었다. 당시 고속로 기술이 가장 앞서고 있던 나라는 1934년 줄리오 큐리 부부가 인공 방사능을 발견한 프랑스였는데, 제 2차 세계 대전 후 미국과 구소련이 세계 원전 공급의 주도권을 잡자, 자존심을 걸고 차세대 원전기술인 고속로 개발을 시작했다. 그 과정에서 프랑스는 우리나라를 미래의 고속로 시장으로 여기고 기술 훈련 및 기술전수 요청에 응해주었다. 고속로 기술의 기본특성을 파악할 수 있는 노심 핵 설계, 열수력 설계, 소듐냉각재 취급기술을 익힐 것을 권유하면서 우리나라 연구원 5명이 1년 동안 연구 현장을 연구할 수 있도록 했다.

당시 한국원자력연구원의 5년째 신참 연구원이었던 나도 노심 핵 설계 담당요원으로 선발돼, 프랑스로 파견되었다. 6개월간의 언어

연수를 거친 후, 고속로 연구개발의 총본산이며 프랑스 남부지역에 위치한 Cadarache 연구소로 배치될 수 있었고, 당시 프랑스에서 건설 중이었던 상용규모 실증로인 Super-Phenix(120만 kW) 고속로의 설계 기준사고 외 중대사고³⁾ 분석에 참여하게 되었다. 첫 임무는 Super-Phenix의 노심 중대사고 분석 코드로 개발된 SURDYN을 활용하여 가상의 노심 용융사고를 분석한 후 결과를 내리는 것이었다. 원전의 가상 중대사고는 만약에 발생하게 되면 그 피해가 막대해질 수밖에 없기 때문에 설계단계에서부터 상상할 수 있는 최악의 상황들을 거듭 거듭 가정하여 분석하고 있었다.

Super-Phenix 노심중대사고는 이상 현상이나 사건사고가 겹치면서 노심출력이 급격히 높아지는 사고로부터 시작된다. 출력이 높아진 상태에서 여러 가지 물리화학적 사고들이 또다시 중첩해서 일어나면 노심 출력이 급등하는 사고로 이어지는데, 그러면 노심 내 일부영역의 온도가 수천도 이상이 되어 핵연료와 노심물질이 국부적으로 녹아내리면서 조그만 핵연료혼합물 덩어리가 되는 사고로 발전한다. 고속로의 경우에는 부분적인 사고까지는 안전대책이 마련되어 있지만, 만약에 사고가 수습되지 않고 우연한 사고들이 계속 발생하면 노심의 상당부분이 크게 녹아내리면서 한 곳으로 모이게 되고 커다란 핵연료혼합물 덩어리가 된다. 그러면 핵연료혼합물 덩어리의 크기가 핵분열반응 임계수치⁴⁾를

3) 설계기준사고: 발생 가능성이 매우 낮은 최악의 사고에 대해서도 원전의 설계단계부터 이를 미리 반영하기 위해 설정하는 가상 사고이다. 이 사고가 발생하여도 사고를 신속히 수습하고 안전을 관리할 수 있도록 조치가 취해진다. “설계기준 외 중대사고”는 설계기준사고를 초과할 수 있는 가상의 사고이며 원자로 노심의 손상까지도 일으킬 수 있다.

4) 임계수치 이상에서는 핵분열반응이 기하급수적으로 증가하여 출력도 기하급수적으로 증가

넘어설 가능성이 발생하게 되는데, 이때는 핵분열반응을 제어할 아무런 방법이 없기 때문에 엄청난 양의 에너지 분출로 발전할 수 있고, 결과적으로 원전 중대사고가 발생하게 된다.

내 주요 업무는 용융 핵연료혼합물 덩어리의 크기와 핵분열반응 임계수치를 판단하는 것이었는데, 여기에는 핵연료혼합물 덩어리의 크기, 밀도, 원소 구성, 온도 등 사고단계별 입력수치를 준비하는 것이 중요했다. 다양한 상황과 다양한 사고의 노심임계 여부를 분석하면서 고속로 노심특성을 파악해가던 어느 날, 물리적 상식 측면에서 아주 이상한 점을 발견하게 되었다. 수천도 이상의 고온에서 일차 용융된 핵연료혼합물은 노심 내 액체물질이 급속히 기화 팽창할 때 고체용융물도 함께 노심 외부로 흩어지게 되는데, 일정시간이 지나 온도가 내려가게 되면 열역학적으로 다시 수백 기압의 응축압력을 받으면서 노심 중앙으로 응축하게 된다. 이때 SURDYN 계산코드는 용융 핵연료혼합물의 부피가 압력에 정비례하여 줄어드는 것으로 가정하고 있었다. 이는 어느 수준의 압력까지는 물리적으로 정당화될 수 있다.

그러나 수백 또는 수천 기압의 초고압으로 응축될 때에는 물질 자체가 지닌 분자력, 원자력 및 원자핵력 때문에 언제까지나 압력에 정비례하여 부피가 줄어들 수는 없다. 그런데 Super-Phenix의 노심 중대사고는 실제로 수백 기압 이상을 다루고 있었던 것이다. 만약 그렇다면 응축압력의 크기에 따라 용융 핵연료혼합물 덩어리가 압축

한다.

되는 실제 크기는 SURDYN의 계산결과와 크게 달라질 수 있고, 이것은 Super-Phenix 설계 정당성에 큰 문제가 될 수 있는 사항이었다. 이런 의문을 고속로 안전성 분석팀장에게 알렸더니, 그는 크게 당황 하면서 긴급하게 분석팀 전체회의를 소집했고 고속로 연구개발 책임자에게도 알렸다. 일주일쯤 지난 후, 안전성 분석팀장이 나를 찾아왔다. 그는 내 지적이 옳았고, 현재 이를 바로잡을 수 있는 대책을 마련 중 이라고 알려주었다.

그 후 나의 연구실에는 그동안 한 번도 본적이 없는 나이 많은 연구원들이 너도나도 찾아와, 당신은 천재라는 등 한국인은 모두 물리적 수준이 높으냐는 등 칭찬들을 늘어놓았다. 칭찬을 받은 것은 좋았으나, 이후부터 당황스러운 상황이 이어졌다. 사건(?)이후, 안전성 분석팀장을 비롯하여 아무도 내게 다른 일거리를 주지 않는 것이었다. 내가 기술 훈련을 받아야 하는 수준이 아니라는 것이 이유였다. 나는 초보 연구원에 불과하고 고속로 기술을 익혀야만 한국에 돌아갈 수 있다고 읊소해도 소용이 없었다.

그렇게 무료하게 지내기를 한 달 반, 나의 훈련을 책임지던 안전성 분석팀장이 나를 고속로 노심개발 책임자에게 데려다주면서 공부와 연구를 계속할 수 있도록 도와주었다. 노심개발 책임자는 나에게 프랑스 정부장학금과 고속로 노물리 공부를 할 수 있는 대학교수도 소개해 주었다. 그렇게 우여곡절 끝에 나는 3년간 더 Cadarache 연구소와 프랑스 공과대학에서 고속로 기술개발에 종사할 수 있었다.

나는 이 사건을 계기로, 연구자들이 가져야 하는 마음가짐을 깨닫게 되었다. 당시 노심 중대사고를 담당하던 프랑스 연구진들은 10년, 20년씩 경력들을 쌓은 베테랑들이었다. 그런데 초급 연구원조차 알아차릴 수 있었던 문제를 왜 발견하지 못했던 걸까? 당시 프랑스에서는 특정 전문가 그룹이 최신 기술개발을 할 수 있도록 독점하고 있었다. 때문에, 기술 유출을 우려하여 전문가 그룹 내에서만 연구결과와 정보가 공유되고 있었다. 이들은 장기간 같은 팀으로 활동하면서 서로에 대해 너무나 잘 알고 있으니 결과를 되돌아볼 필요가 없었던 것이다.

우리나라 역시 일부 전문가 팀에게 독점된 연구개발 과제가 많을 것이라고 생각한다. 오래 쌓아올린 팀워크와 기술은 분명 연구개발을 수월하게 만드는 좋은 조건이다. 하지만, 여러 가지 변수나 사고를 감지할 수 있는 감각이 무뎌지기 쉽다. 과학자는 연구개발을 하는 동안 벌어질 수 있는 위험성을 늘 경계해야 한다. 새로운 분야에 뛰어드는 후배 과학자들에게 전하고 싶은 말은, 때론 너무 많이 아는 전문가의 눈이 초보자의 눈보다 흐릴 수도 있다는 것이다.



폭발물 연구 30년, 아쉬움이 남는 기억들

 ReSEAT 전문연구위원 송소영

1970년대 이전만 해도 물리학 전공자들에게 직장이란 대학 교수직 아니면 중·고등학교 교사가 대부분이었다. 그나마 그 일자리도 졸업자 수에 비하면 턱없이 부족하게 느껴질 정도였다.

심지어 내가 석사 과정에서 전공한 분야는 아미노산의 분자 구조를 해석하는 과정이었는데, 당시엔 전공과 관련된 직장을 얻는 게 하늘의 별따기처럼 느껴졌다. 그래서 내가 대학교를 다니는 동안 주변에선 졸업 후 진로에 대해 나보다 더 많은 걱정을 해줄 정도였다.

그러나 다행인 것은 70년대에 들어서면서 정부에선 경제 개발을 위해 이공계 연구소를 많이 설립하기 시작했고, 나는 운 좋게도 대학원 석사 과정까지 마친 후 바로 한 연구소의 입소 시험을 볼 수 있었다. 하지만 내가 입소 시험을 마칠 때까지 어떤 일을 하게 될지 전혀 알지 못했다. 앞서 말했던 것처럼 내 전공은 썩 대중적이진 않아보였고, 입소 시험을 보기로 한 연구소가 내 고향인 대전으로 이전을 앞두고 있던 사실 때문에 평생 이 연구소에 뿌를 묻고 싶다는 생각뿐이었다.

내가 폭발물 연구 부서에 배치돼 앞으로 폭발 실험을 포함한 연구 개발을 수행해야 한다는 사실을 알게 된 건, 모든 입소 절차를 마치고 담당 실장님과 면담을 할 때였다. 내 전공을 고집한 건 아니었지만 전혀 예상치 못한 분야였기 때문에 사실 많이 당황스러웠다. 하지만 힘들게 구한 일자리였고, 나에게 주어진 운명을 받아들여야 했다. 그 운명을 받아들였기 때문에 연구의 목표 달성을 위해 약간의 위험도 감수해야 했다.

실제로 지하 폭발 효과를 분석하는 실험을 진행 한 적이 있었는데, 많은 양의 폭발물을 지하에 설치하고 흙으로 덮는 과정에서 ‘만약 이게 지금 폭발한다면...’ 이라는 상상과 함께 간담이 서늘해진 적도 있다. 폭발 실험 당시 예측했던 것보다 폭발이 크게 일어나서 흙과 암석 파편이 계속 요원들 쪽으로 날아가면서 그들의 이름을 외치며 애가 타기도 했고, 폭발이 끝난 후에도 만약의 사태에 대비해 긴장의 끈을 놓을 수 없는 일이 비일비재했다.

크고 작은 위험을 감수하면서도 연구 목표를 이루기 위해선 앞만 보고 달려야 했다. 이렇게 목표 달성에만 심혈을 기울이다보니 많은 예산을 들여 실험을 수행하더라도 당장 눈앞의 결과에만 집중했기 때문에 후속 처리에는 소홀해지면서 아쉬웠던 경험도 있다. 시간이 많이 필요하더라도 실험 결과에 대해 논리적으로 철저히 분석하고, 내용을 체계적으로 정리하는 작업이 필요하다. 시간이 흐른 뒤에 비슷한 실험을 진행할 때 실수를 반복하는 일이 없도록 하기 위해서다. 하지만 난 이런 후반 작업에 게을렀고, 논문 발표나 지적재산권 처리 등 후반 업무를 진행할 때는 바쁘다는 핑계로 차일피일 미루다 기한을 놓치거나 그냥 넘겨 버린 경우도 많았다.

폭발물에 대해 많은 지식이 없던 젊은 연구원 시절, 폭발 속도를 측정하는 장치를 개발하는 프로젝트에 참여한 적이 있다. 논문과 관련 서적 등 문헌 조사를 통해 아주 간단한 방식으로 개발이 가능하다는 판단을 했고, 외국저널에 나와 있는 내용대로 실험을 준비했다.

두 개의 평행한 에나멜선을 붙여서 만든 센서를 폭발물 속에 일정한 거리를 두고 설치하고, ‘크로노미터’라는 정밀 시계의 스타트 단자와 스톱 단자에 각각 연결해준다. 그 다음 센서가 설치된 위치까지 폭발이 진행되는 순간, 두 에나멜선 사이의 저항이 크게 낮아지면서 짧은 순간 동안 전류가 흐르게 되는데 이 현상을 이용해 폭발이 어느 위치까지 진행되었는지 감지할 수 있는 것이다. 즉, 두 단자를 통과하는데 걸리는 시간과 센서 사이의 거리를 계산해 폭발 속도가 측정되는 원리이다.

우리가 미리 예측한 결과로는 수십 마이크로 초의 시간이 측정될 거라고 생각했다. 결과는 수 나노 초의 측정값이 나타났다. 우리가 기대한 것보다 만 배나 빠른 속도가 측정된 것이다. 같은 실험을 반복 하였으나 이번엔 계측 값이 전혀 나타나지 않거나 수십 나노 초 이내의 값이 일정치 않게 나타났다. 시간 측정 장치를 바꾸기도 하고, 에나멜 선의 끝을 벗기거나 꼬아서 설치를 해보아도 아무런 효과가 없었다.

스타트 단자와 스톱 단자에 거의 동시에 신호가 도달하는 것을 봤을 때, 폭발과보다 훨씬 빠른 무언가가 영향을 주고 있는 것이었다. 과연 폭발과보다 빠른 그 존재는 뭐란 말인가. 며칠을 밤잠을 못 이루고 고민에 빠졌다. 문헌을 아무리 찾아봐도 뚜렷한 실마리를 찾을 수 없어 답답한 날들이 계속 되었다.

우리의 실험에서 남들과 다른 점은 무엇인지 생각해 보았다. 우리는 폭발물이 폭발을 시작하도록 맨 처음 에너지를 공급하는 기폭관에 의도적으로 매우 높은 전압을 걸어주고 있다는 사실이 떠올랐다. 기폭관의 작동시간과 그 편차를 줄일 필요가 있을 때는 통상적인 경우보다 높은 전압을 걸어 기폭관을 작동시키는데, 이때 전자과 잡음에 의해 크로노미터가 작동한 것이라고 추정했다. 전자과 잡음이 발생할 수 있는 곳은 높은 전압에 의해 폭발을 시작하는 기폭관 밖에 없었다.

기폭관의 전압을 통상적인 수준으로 낮추자 센서는 정상적으로 작동 되었다. 낮은 전압에서는 기폭관의 열선이 가열되면서 그 열에 의해 기폭관 내에 있는 화약이 폭발하지만, 높은 전압에서는 열선 자체가

폭발하면서 플라즈마 상태가 되어 강한 전자파가 발생하는 것으로 확인되었다.

우리는 높은 전압을 공급하면서 폭발시험을 해야 하는 경우가 많기 때문에, 높은 전압에서도 작동이 가능한 폭발과 감지 센서를 개발하기로 결정했다. 물리학을 전공한 내 머리로 생각해 낼 수 있는 모든 아이디어를 떠올렸다. 그 결과, 전자파를 막기 위해선 금속으로 둘러싸야 한다는 결론에 도달했다. 전자파 잡음의 침투를 막기 위해 에나멜선을 금속튜브 속에 넣어 동축형 센서를 만들고 동축 전송선과 연결했다. 펄스 신호 발생 회로는 금속 케이스 속에 배치했다. 실험 결과 고전압 발파 시에도 폭발속도를 안정적으로 측정할 수 있었으며 프로젝트는 성공적으로 마무리 됐다.

우여곡절을 거쳐 개발된 측정 장치는 다양한 폭발물의 특성을 정밀 분석하는데 많은 기여를 했다. 하지만 뿌듯함도 잠시였다. 개발이 완료된 후 몇 년이 지나 아쉬운 소식을 접하게 됐다. 한 외국 회사에서 우리가 개발한 센서와 거의 동일한 센서를 만들어 판매하고 있는 안내 책자를 입수한 것이다. 이번 프로젝트에서도 목표 달성에만 집착한 결과, 후속 업무는 신경 쓸 겨를도 없이 다음 프로젝트에 돌입한 것이 원인이었다. 개발이 완료되면 특허 등록 검토 등 후속 조치를 해야 우리의 개발 내용에 대한 소유권을 주장할 수 있는데 이번에도 그 기회를 놓쳐 버린 탓에 소유권을 주장할 형편이 아니었다.

‘앞만 보고 달린다’라는 전투적인 연구 자세의 허점이 드러난 것이다.

30여년을 앞만 보고 달린 덕분에 우여곡절을 거치면서도 여러 가지 연구 개발을 성공적으로 마칠 수 있었지만, 후속 처리가 부실한 탓에 연구 결과의 활용도를 떨어뜨린 일은 여전히 아쉬운 마음을 갖게 한다. 앞으로 연구 개발 분야에 발을 들이는 후배 연구원들은 프로젝트에 성공한 후에, 특허 등록 등 후속 업무까지 꼼꼼히 마무리하길 바란다. 앞만 보고 달리는 자세도 필요하지만, 미래를 길게 내다보고 주변도 살피며 차근차근 나아가라고 전하고 싶다.



수돗물 바이러스 사건을 겪으며 얻은 것들

 ReSEAT 전문연구위원 신영오

1999년 어느 날, S대학 G교수의 발표로 인해 국내 언론이 떠들썩했다. G교수가 발표한 내용은, 서울시 수돗물에 무균성 뇌수막염 바이러스가 오염되어 있다는 것이다. 국내 언론사는 이 같은 내용을 연일 대서특필하였다. G교수의 발표가 사실이라면 시민들은 당장 세수와 샤워도 못할 정도로 심각한 사태가 발생한 것이다. 당연히 국민들과 수돗물 담당 기관, 그리고 학계까지 크게 반응했다. 필자는 바이러스를 전공했기 때문에 발표 내용의 과학적 진실 여부에 관심을 갖게 되었다. 수돗물 생산 기관에서는 문제를 제기한 G 교수를 고발하고, 시장은 이를 반복하는 듯 정신없는 날들이 이어졌다. 이해당사자인 서울시는 물론이

고 환경부까지 날벼락을 맞은 상황이라 관계직원들이 연일 국회의 상임위원회에 불려나갔다. 필자도 바이러스 전문가로 해당 위원회에 참석해 자정이 넘도록 의견을 제시했다.

환경부는 대한바이러스학회에 과학적 진실 규명을 위한 협조를 요청하였다. 학회에서는 관련 위원회를 구성하고 차기회장인 필자가 책임을 맡도록 했다. 위원회에서는 진실 규명을 위해 미국, 일본 등 선진국의 물 바이러스 실험 관련 규정을 확보하고 내용을 분석했다. 이들 시험 관련 규정 중에서 미국 환경보호청의 규정이 매우 구체적이고 사업 취지에도 부합되었기 때문에 미국의 규정을 기반으로 한 시안을 만들어 환경부에 추천하였다.

환경부는 관련 규정을 신설하고 2001년경 시행에 들어갔다. 이 규정의 주요 골자는 수돗물을 생산하는 기관은 정기적으로 원수와 정수에 대해서 바이러스 검사를 수행하여야 하며 모든 검사는 일정 기준을 갖춘 인가실험실에서만 수행하도록 했다. 과학 실험에는 정확한 실험 방법을 수행할 수 있는 능력을 가진 전문가만 참가하는 것이 중요하다. 수립된 규정의 내용은 이런 조건을 요구했다.

첫째, 실험을 수행할 실험 요원의 자격을 국제 기준에 맞게 전문적인 바이러스학자로 한정하였다. 예를 들면 생태학이나, 환경학을 전공하는 사람이 바이러스 실험을 수행하는 것을 금지하는 것이다. 살아 있는 바이러스를 정확하게 측정하고 분석하는 작업은 매우 전문적인 기술이다. 그렇기 때문에 타 분야의 전공자가 시험하는 경우 발생할 수 있는

오류의 가능성을 배제하기 위한 결정이다. 또한 분석책임자 이외에, 분석자 및 채수자 모두에게 일정 자격을 갖추도록 해 정확한 실험이 이루어질 수 있도록 규정했다.

두 번째, 바이러스 실험을 위하여 국제 기준에 맞는 실험실 시설 기준을 두었다. 실험실 시설이나 환경에 문제가 있는 경우, 이는 실험자의 개인 능력만으로는 외부로부터 바이러스 오염을 방지하기 어렵기 때문이다. 기준 이하의 오염 가능성이 있는 실험실에서 중합효소연쇄 반응시험(PCR)¹⁾이라는 핵산 시험을 수행하게 되면 시험자의 손이나 주변 환경에서 온 바이러스로 인하여 음성 시료가 양성으로 판정될 가능성도 있기 때문이다. 참고로 외국에서는 PCR 시험을 수행할 때 각 단계마다 3개의 분리된 구역에서 시험을 수행하고, 각 구역에 있는 전용 기구들을 사용해야 한다.

세 번째는 원수와 정수의 양, 실험의 횟수 그리고 사용하는 세포의 수를 충분히 정하도록 규정해 의의 있는 실험이 되도록 했다. 수돗물 바이러스 시험 결과에 신뢰를 주기 위해서 충분한 수량을 확보에 실험을 진행하도록 했다.

마지막으로 1년에 한 번은 정기적으로 실험 수행 능력, 장비 및 시설 그리고 검사 내용을 평가받도록 하였다. 이 같은 기준에 따라서 사업 초기에는 약 7개의 실험실이 인가를 받았으며 이후에 4개 정도의

1) 중합효소연쇄반응(polymerase chain reaction, PCR), 대상 DNA를 증폭시켜서 검사하는 방법으로서 가장 감도감도가 높으나 동시에 위양성(시료에 바이러스가 없으면서 양성으로 검사될 가능성)이 있다.

실험실이 추가된 것으로 알려졌다.

필자는 강원대학교 미생물학 실험실을 보수하고 인원을 보강해 인가 기관 책임자가 되었다. 그리고 동료 연구원들을 지도하며 증식하는 바이러스 측정사업에 참여하였다. 사실 이 시험들은 학술적인 부분 보다는 정확성을 다루는 기술의 문제이기도 하다. 그런데도 필자가 이 사업에 참여한 것은 병원성 바이러스를 전공한 사람으로서 국내의 실태가 궁극했기 때문이었다. 사업의 수행 중, 우리 실험실 연구원들에게는 물론이고, 다른 실험실에 평가를 나갈 때마다 바이러스 실험의 요체를 가르치기 위해 애썼다. 평가 문항에는 언제나 바이러스 입자 수 계산법을 출제하였다. 정답을 제시하지 못한 분석가에게는 당황스러운 일이었겠지만, 필자의 의도는 기회가 닿을 때마다 바이러스학의 진수를 가르치고 싶은 마음이었다.

필자는 매우 운 좋게도 1970년대 초에 세계보건기구 훈련생으로 호주, 일본, 미국 등의 국가 대표 바이러스 실험실에서 들어가 선진국의 바이러스 실험기법을 체득했다. 또한 세계보건기구는 당시 장기 교육의 지원을 금했던 지침을 깨고 해외에서 2년 과정의 미생물학 학위 취득을 받을 수 있도록 지원을 아끼지 않았다.

이제 이 기술을 국가를 위하여 사용할 때가 왔다고 생각했다. 모든 바이러스 실험에서는 철저하게 대조군을 두었으며 양성 대조에 들어가는 바이러스 수를 낮게 정한 이유를 설명하였다. 이 사업에 참여한 실험실 평가를 위하여 국내의 많은 전문 바이러스학자들이 동원되었으며 많은 예산이 투입되었다.

인가 실험실 제도가 도입된 지 10년이 되던 해, 우리 실험실과 타 기관의 평가를 종합해 수돗물 바이러스 오염에 대해 이 같은 결론을 얻을 수 있었다. 10여 년 간 많은 수의 원수와 수돗물 정수에 대하여 여러 기관이 시험을 진행한 결과, 수돗물 제조에 사용되는 원수에서는 매우 드물게 기준치 이상의 병원성 바이러스가 확인되었다. 그러나 수돗물 원료인 정수에서는 바이러스가 확인되지 않았다. 하지만 원수의 바이러스 상태에 따라 정수의 바이러스 오염 가능성도 완전히 배제할 수 없기 때문에 원수와 정수에 대한 바이러스 모니터링은 계속되어야 한다는 것이다.

이제 와서 필자가 이 사업에 대해서 자세하게 기술하는 것은 그 당시에 제기된 ‘서울시 수돗물의 바이러스 오염’에 대한 진실 여부를 규명하려는 것이 아니다. 그 당시의 조건과 실험 재료에서는 바이러스 오염에 대한 진실 규명이 불가능하였으며, 이 사건을 계기로 수행되기 시작한 수돗물 바이러스 검사 사업은 그 자체로 대단히 중요한 의미를 갖고 있다. 당시 사업을 수행하면서 얻은 몇 가지 체험과 식견을 이 분야에서 일하는 젊은 연구자 혹은 종사자들에게 전해주고 싶었기 때문이다.

이 사업을 통해 다른 과학 분야처럼 바이러스학 분야에서도 실험의 기본 기법을 철저히 익히는 것이 중요하다는 사실을 다시 한 번 깨닫게 되었다. 수돗물 바이러스 업무에서 핵심 기술이 되는 세포배양에 실패해 오염된 세포를 다루는 경우를 보았다. 바이러스 핵산 시험을

진행할 때 시험 지침서의 원칙에 따라 수행하지 않으면 당연히 수많은 오류가 뒤따른다. 또한 올바르게 않은 방법으로 시험을 수행하고 논문을 발표하는 경우, 시간이 지나면 언젠가는 오류가 발견될 가능성이 매우 높다. 연구자의 연구 결과에 대한 신뢰성이 의심되는 순간, 그간 쌓아온 모든 업적은 사망선고를 받게 된다. 단 하나의 과제에 문제가 있더라도, 그 연구자와 관련된 모든 실험 결과에 대한 의심이 생길 수밖에 없다. 수돗물 바이러스 사건도 근본적으로는 기본 실험 기법의 미비에서 왔을 가능성이 있음을 지적하고 싶다. 앞으로 다시는 이와 같은 사건이 일어나지 않기를 바라는 마음이 간절하다.

따라서 선진국의 바이러스 실험에서는 유난히 정확한 실험기법을 요구한다. 이는 오류의 가능성이 그만큼 높다는 것을 반증하기도 한다. 따라서 바이러스 실험 결과에 대해서는 정도관리라는 개념이 도입되어 실험 결과를 확인하는 체제가 이행되고 있다. 젊은 바이오분야 연구자들이 기본 실험 기법을 익히지 않고 바이오 기업이나 공공 기관에 진출하는 경우, 그 피해와 부작용은 상상을 초월할 수 있다. 바이오제품의 경우, 실험의 기본 기법이 부족하면 검정 과정에서 불합격이란 손실이 이어지는 경우가 허다하다. 실험 기법이 부족한 실험 결과에 근거한 정책 수립은 엄청난 예산 낭비는 물론 선량한 국민에게 경제적, 정신적 손해를 끼칠 수 있다. 이는 결국 국가적인 손실로 이어지기 때문에 경각심을 가질 필요가 있다는 사실을 모든 연구자들이 기억해주길 바라며 글을 마무리 한다.