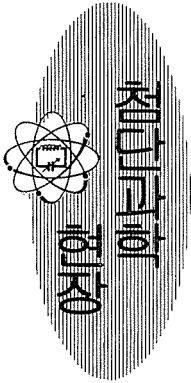
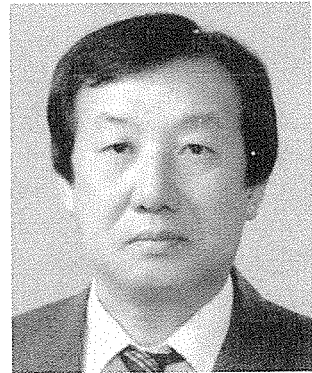


축구공답은 새로운 異色탄소분자

버키볼 신폴



최근 세계 화학계를 휩쓸고 있는 「버키볼」 연구붐으로 이색적인 이 탄소분자(탄소 60)에 관한 논문은 매 13시간마다 한편 꼴로 연간 7백여건의 논문이 쏟아져 나오고 있다. 전문가들 중에는 특별한 성질을 가진 이 탄소가 장치 수퍼로켓연료와 새로운 암치료제에서 21세기의 새로운 플라스틱, 털같이 가벼운 배터리, 마이크로베어링 그리고 새로운 종류의 컴퓨터칩에 이르기까지 거의 모든 분야로 응용의 날개를 펼쳐 나갈 것이라고 기대를 걸고 있는 사람이 많다.



현 원 복
(과학저널리스트)

85년 英 크로토 · 스몰리팀 첫발견

6각형 · 5각형 모양

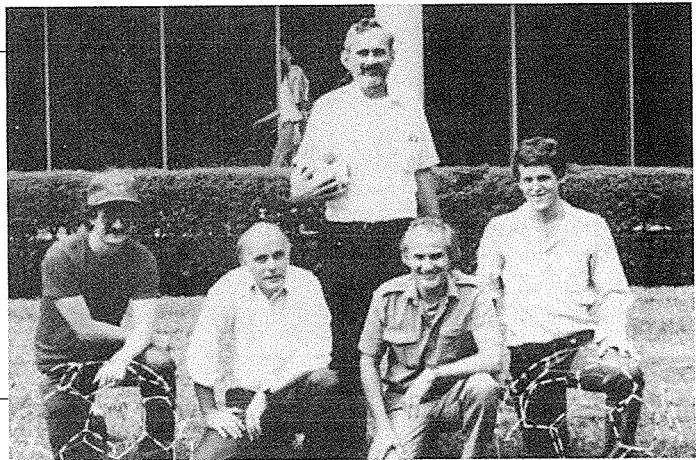
1985년 영국 서섹스대학의 해리 크로토와 미국 라이스대학의 리차드 스몰리 교수팀이 버키볼의 구조를 처음 발견(별칭: 버키볼은 어떻게 발견되었나)한 이래 7년의 세월이 흘렀으나 이 연구가 제대로 오른 것은 1991년 미국 애리조나주 터스콘에서 세계 최초의 버키볼생산시설이 문을 열고서 부터다.

이리하여 세계화학자들과 재료과학자들은 비교적 싼값(그램당 1천달러)으로 누구나 쉽게 연구용으로 버키볼을 입수할 수 있게 되자 너도나도 이 연구에 뛰어 들었다.

지금까지 알려진 두가지의 탄소 동소체중에서 흑연분자는 탄소원자들이 마치 지붕티일처럼 납작하게 퍼져서 6각형을 이루고 있고 다이아몬드분자는 탄소원자들이 피라미트모양을 하고 있는데 비해 버키볼은 탄소분자 60개가 마치 축구공모양을 하고 있다.

이 원자들은 20개의 6각형과 12개의 5각형을 이루면서 축구공모양의 구형구조를 만들어

◇ 버키볼 연구팀: 켈(왼쪽)
서 있는 사람과(오른쪽)
원좌부터) 오트(앞줄)
스몰리, 크로토, 허스



1953년 미국의 전위파 건축가인 버크민스터 풀러가 설계한 지오데식돔과 닮았다고 해서 「버크민스터 풀러렌스(약칭 버키볼)」라는 이름을 붙였다.

그러나 높은 출력의 레이저로 빨리 움직이는 탄소의 증기를 낚아 채는 크로토와 스몰리의 방법으로서 많은 양을 생산할 수 없어 버키볼연

구는 당분간 실험실내의 호기심을 돋우는 수준에서 벗어날 수 없었다.

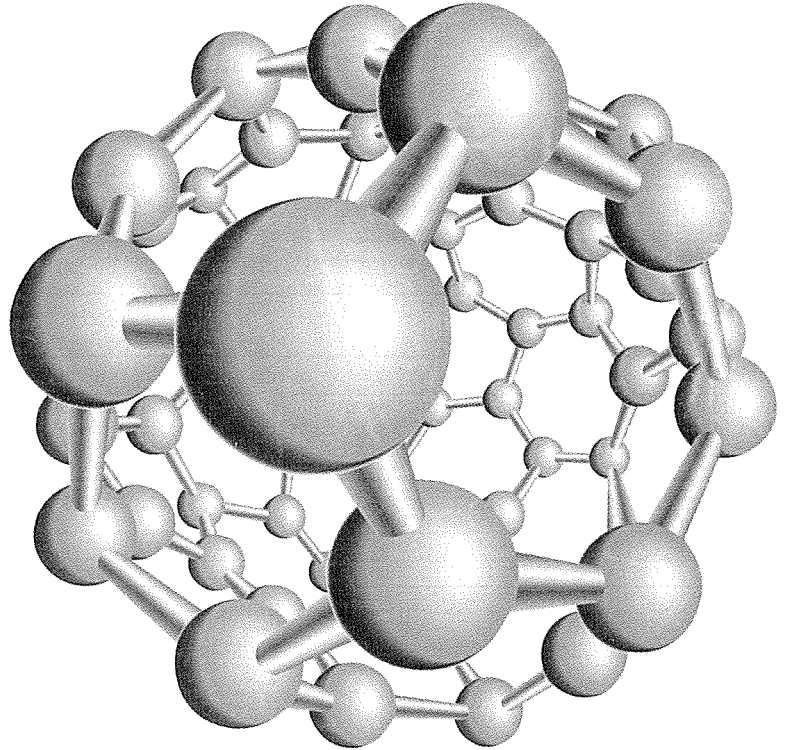
1990년 독일 하이델베르크 막스플랑크연구소의 윌프강 그렛체머와 미국 애리조나대학의 도널드 허프먼은 흑연과 전기만 가지고 버키볼의 양산방법을 발견하면서 많은 과학자들이 이 연구에 참여할 수 있는 길이 열리게 되었다.

다양한 화합물

당초 버키볼은 너무나 안정된 분자이기 때문에 다른 물질과는 반응할 수 없는 것으로 생각되었다. 그러나 최근 화학자들은 버키볼 속에 여분의 탄소나 또는 질소원자를 슬쩍 넣어 새로운 소재를 만들기 위한 말뚝으로 이용할 수 있는 방법을 알아냈다. 이들은 이 여분의 탄소원자로부터 돌출한 2개의 귀모양을 가진 「버니볼」을 만들었다.

이로써 「폴러렌」에 바탕을 둔 착화합물인 「폴레오리드」를 만드는 길을 열어 주었다. 벤젠의 탄소고리는 플라스틱에서 약쪽에 이르기까지 6백만종 이상의 화합물의 구조블록 구실을 하고 있으나 벤젠의 입체편인 버키볼로부터는 수백만종의 화합물을 만들 수 있을 뿐 아니라 하나 하나 요구하는 특성을 갖게 할 수도 있을 것이라고 애리조나대학 물리학자 로우엘 램은 말하고 있다.

이미 여러 과학자들은 버키볼이 가장 촉망을 받을 분야는 전자공학으로 전망하고 있다. 버키볼내부로 어떤 원자를 넣는가에 따라서 이 분자에 전기가 조금 또는 많이 통하게 할 수도 있고 전혀 통하지 않게 할 수도 있다. 스물리는 버키



◇탄소 60(버키볼)분자의 구조모델

수퍼로켓 연료와 암 치료제에서 털실같은 배터리 · 신형칩도 기대 13시간마다 한편꼴 논문 쏟아져

볼이 다른 분자나 또는 원자로 「미취」 되었기 때문에 「도피볼」이라고 부르고 있다. 1991년 미국 전화전신회사(AT&T)의 벨연구소 과학자들은 버키볼을 칼륨으로 미취시킨 결과 이 분자는 섭씨 영하 2백도에서 아무 저항없이 전기를 운반할 수 있는 초전도체가 된다는 것을 발견했다. 스물리는 우라늄을 내포한 폴러렌을 만들었는가 하면 버키볼의 탄소원자를 보론원자로 바꿔치기해 보기도 했다.

새로운 용도

그러나 스물리는 이런 「도피볼」이 어떤 곳에 쓰일 것인지 밝히지 않고 있으나 일부 도피볼은 컴퓨터칩에 사용되는 실리콘과 닮아서 반도체처럼 행동한다. 또 벨연구소가 개발한 도피볼처럼 초전도체로서 아무 저항없이 전기를 실어 나를 수 있는 전선을 만들 수도 있을 것이다.

1991년 영국과학자들은 탄소 한개가 불소 한개를 짝으로 가지는 탄소 60분자를 만들었다.

탄소와 불소는 함께 테프론을 만들기 때문에 이런 영국의 연구결과는 완전한 윤활제 또는 불베어링구실을 할 테프론 볼에 대한 기대를 부풀게 하고 있다. 이 미세한 불베어링은 21세기에 전개될 마이크로기계의 세계로 훌륭하게 진입할 수 있을 것이다. 버키볼은 나노미터(10억분의 m)크기밖에 안되기 때문에 나노미터크기의 모터나 로봇의 세계에서 중요한 역할을 할 것으로 기대하고 있다.

요즘 많은 연구소들이 새로운 암치료제개발에 열을 올리고 있으나 버키볼도 이 대열에 동참하게 될 것이다. 그중의 한가지 아이디어는 버키볼에 항체를 코팅한 뒤 표적이 되는 기관으로 보내서 종양세포를 찢어 버리는데 사용할 수 있다는 것이다. 그 방법은 우선 버키볼에 종양세포의 항체를 부착하면 이 항체는 버키볼을 종양까지 인도해 준다. 이때 매우 얇은 광섬유케이

불을 통해 빛을 버키볼에게 비취 준다. 버키볼은 이 빛을 흡수하여 에너지를 얻게 된다. 에너지를 얻은 버키볼속으로 산소를 주입하여 남은 에너지를 흡수한다. 이렇게 고도로 활성화된 산소는 중앙세포를 갈기갈기 찢어 버린다는 것이다.

버키볼의 사촌들

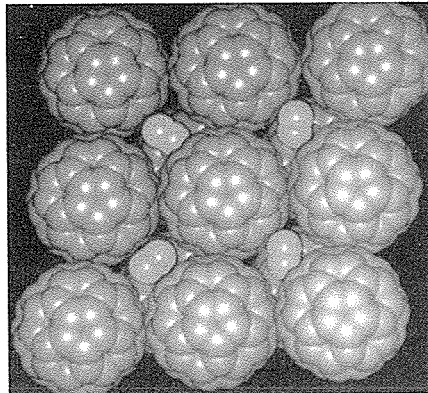
탄소 60은 스몰리 등이 발견한 풀러렌이지만 이 탄소분자는 자기보다 큰 사촌들을 많이 갖고 있다는 것이 밝혀지고 있다. 탄소분자는 구형으로 휘어지기 위해서는 정확히 12개의 5각형을 가져야 한다. 그러나 안정된 분자를 만들기 위해서는 이 5각형중 어느 하나도 다른 5각형과 접촉할 수 없고 대신 6각형 옆에 자리해야 한다. 이런 스펙트럼을 충족시키는 가장 작은 분자가 20개의 6각형을 가진 탄소 60의 버키볼이다.

그러나 가장 많은 촉망을 받는 분자는 공모양을 하고 있지 않다. 만약에 흑연이 공대신 튜브 모양을 한다면 이것은 「버키튜브」를 이룬다. 흑연섬유보다 1천분의 1이나 얇은 버키튜브는 지금까지 알려진 것 중에서 가장 강력한 섬유가 될 것이며 와이어드 만들 수 있을 것이다. 미국 해군연구소의 이론화학자 카터 화이트는 이 와이어가 구리처럼 훌륭한 금속도체라고 말하고 있다.

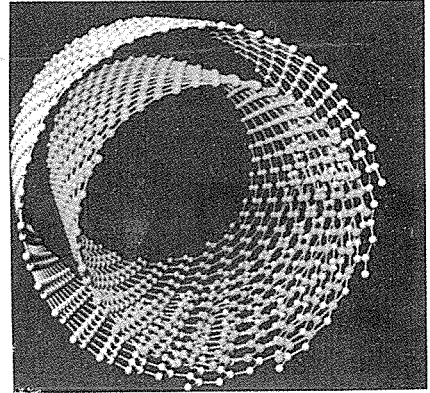
1991년 일본NEC사의 이이지마 스미오가 발견한 버키튜브는 가장 강력한 재료가 될 잠재력을 보유하고 있다고 애리조나대학의 램 교수는 말하고 있다. 다만 한가지 걸림돌은 연구자들이 아직도 한개의 버키튜브도 만들 수 없다는 점이다.

최근 미국 샌디어국립연구소 과학자들은 버키볼 결정에서 분자와 분자 사이에 기체를 가둬 둘 수 있다는 새로운 사실을 발견했다. 이런 성질을 이용하여 산소와 같은 기체를 저장하는 한편 버키볼의 옅은 층을 이용하여 천연가스로부터 질소나 그밖의 오염물질을 제거하는데 이용할 수도 있을 것이다. 샌디어연구팀은 버키볼필터를 만들어 가스분리장치에 사용할 계획이다.

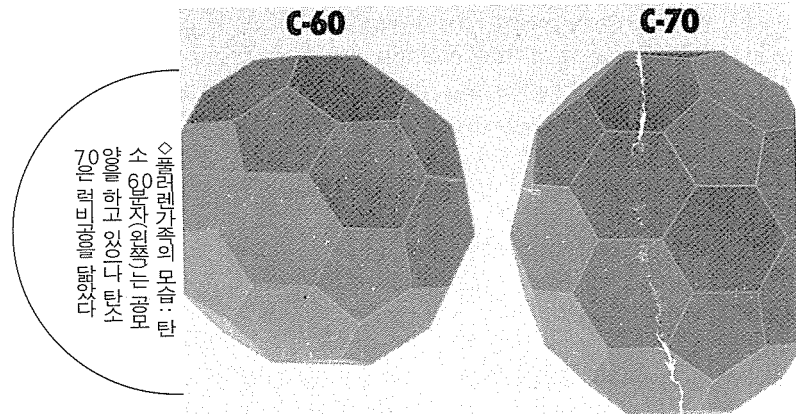
1992년 3월에는 휴즈연구소 과학자들이 버키볼과 탄소원자 70개의 분자가 다른 화합물에서



◇버키볼의 결정은 가스를 저장하거나 또는 분리하는데 쓰일 것이다. 이 컴퓨터 그래픽은 버키볼분자(녹색)사이 공간속에 갇힌 산소분자(빨간색)를 보여 주고 있다.



◇가장 강력한 섬유로서 촉망을 받게 될 버키튜브



◇풀러렌가족의 모듬탄소 60원형중 가장 안정된 분자 70이 탄소 60에 비해서

녹아 빛에 대해 뛰어난 반응을 보인다는 것을 알게 되었다. 이것은 광정보처리에 이용할 수 있다. 또 듀퐁중양연구소는 폴리머에 버키볼을 첨가하면 빛에 노출될 때만 전기가 통하는 훌륭한 광전도체를 얻게 되었다. 이것은 전자영상을 만드는 장치에 사용된다. 과학자들은 현재는 불가능한 적외선부분에서 가동할 수 있는 광전도체도 만들 수 있게 되기를 기대하고 있다.

슈퍼강철의 등장

버키볼을 이용한 첫번째 제품이 최근 선을 보였다. 미국 노스 캐롤라이너주 찰럿의 마이크로 메트 테크놀로지사는 버키볼을 이용하여 다이아몬드를 만드는 과정에서 현재의 최고품 특수강보다 4배나 닳지않는 강철을 생산하는 방법을 발견했다고 발표했다. 「론다이크」라는 이름을

붙인 이 강철(생산가 1kg당 50센트)은 베어링, 밸브, 절삭공구와 같이 딱딱하되 유연성이 있고, 잘 닳지 않는 성질이 필요한 제품소재로 이용할 수 있으며 보다 가볍고 강력하다는 장점이 있어 빌딩과 같은 대형 강철구조물의 빔으로도 사용될 전망이다. 이런 소재로 만든 면도날은 좀체로 닳지 않는다. 더욱이 다른 첨단소재기술과는 달리 이 공정은 확장하기 쉽기 때문에 오늘날의 중소제조공장들은 시설을 거의 개선하지 않고도 「론다이크」를 생산할 수 있다는 주장이다. 그래서 덤으로 얻은 이 초특수강제법은 다이아몬드제법보다 더 뜨거운 관심을 모으고 있다.

속이 텅빈 축구공모양의 버키볼을 금속과 섞으면 이상한 현상이 일어난다. 버키볼속에 갇힌 철의 원자는 나선모양의 끈처럼 연결된 뒤 서로

꼬여 합치면서 케이블같은 구조를 만드는데 바로 이 작은 분자케이블이 단단하되 유연한 특성을 제공한다.

떨어지는 값

버키볼값은 아직도 그램당 1천달러나 하기 때문에 버키볼로 다이아몬드를 만들 수 있어도 채산은 맞지 않는다. 그러나 오늘날 버키볼의 값

이 비싸다고 해서 앞으로 번져나갈 응용의 길을 막지는 않을 것이다. 현재의 값은 대체로 엄청난 연구개발비를 반영한 것이며 또 수요가 공급을 훨씬 웃돌기 때문이다. 독일의 크렛체머와 함께 버키볼 양산의 길을 연 애리조나대학의 허프맨은 플러렌을 만들 원료는 얼마든지 있기 때문에 누구든지 원한다면 이제는 메가톤양으로도 생산할 수 있다고 말하고 있다.

가장 비용이 많이 드는 것은 전력인데 만약에 산업계가 대량의 버키볼을 필요로 한다면 과연 드당 1달러의 비용을 들여서 알루미늄처럼 싸게 공급하는 날이 멀지 않았다고 주장하고 있다.

그런데 1992년 7월 10일자 종합과학지 「사이언스」에서 애리조나주립대학의 피터부세크와 세메온 치퍼스키(전 러시아과학아카데미회원), 그리고 오크리지 미국립연구소의 로버트 헤티치는

버키볼은 어떻게 발견되었나

버키볼은 전형적인 과학협력으로 탄생했다. 영국 브라이턴의 서섹스대학 분광학 전문가인 크로토(Harry Kroto)는 이 실험에서 추진력의 역할을 했고 미국 휴스턴의 라이스대학 화학자인 스몰리(Richard Smalley)는 이 실험을 수행한 기계를 창조했다. 그러나 크로토의 열의와 끈기가 없었다면 이런 협력은 이루어지지 못했을 것이다.

새로운 장치

1984년 봄 크로토는 미국 텍사스주 오스틴에서 열린 분자구조에 관한 회의에 참석하여 오랜 친구인 라이스대학의 분광학전문가 로버트 컬(Robert Curl)을 만났다. 컬은 지난 10년간 탄소의 긴 사슬을 이루고 있는 별사이 공간의 분자연구에 몰두하고 있었다. 한편 컬은 스몰리와 함께 원자들의 작은 클러스터(무리)를 만들면서 연구중이었다. 이때 컬은 크로토에게 스몰리와 그의 제자인 히스(Jim Heath)와 오브라이언(Sean O'Brien)이 설계한 기계 장치에 대해 설명했다. 이야기를 들은 크로토는 오랜 꿈이 이제야 실현될 것 같은 감이 들었다.

컬은 크로토와 함께 휴스턴으로 돌아가서 스몰리에게 소개하고 연구실을 보여주었다. 스몰리의 기계장치를 본 크로토는 흥분하게 되었다. 레이저-초음속 클러스터 빔장치라는 이름의 이 기계는 레이저와 불활성가스의 초음속분출구로 구성되어 있었다. 이때 스몰리와 컬은 이 기계장치를 이용하여 실리콘과 같은 반도체원소로부터 원자클러스터를 만들고

있었으나 크로토는 이 기계를 사용하여 거대한 별들로부터 불어오는 탄소가 풍부한 바람속에서 형성된다고 생각되는 탄소고리를 찾는 길을 열어 줄 것 같다는 생각이 들었다. 그러나 당시 스몰리와 컬은 반도체연구에 깊이 관여하고 있었기 때문에 크로토의 탄소의 공동연구제의를 받아 들일 수 없었다.

1985년 8월 스몰리는 크로토의 제의를 수락하기로 했다. 컬이 전화로 초청의 뜻을 비치자 크로토는 서둘러 짐을 챙긴 뒤 다음 비행편을 탔다. 크로토가 휴스턴에 도착한 4일 뒤인 1985년 9월 1일 탄소실험은 개시되었다. 히스와 오브라이언은 기계를 돌리고 크로토는 실험방향을 제시했다.

붉은 거성 근처의 조건을 다시 창출하기 위해 이들은 수소, 질소와 그밖의 원소로 된 대기속에서 탄소를 증발시켰다. 우선 레이저를 이용하여 초고열로 가열한 탄소증기를 거의 초음속에 가까운 속도로 부는 불활성가스 헬륨필속에 흡수시켰다. 이 헬륨가스는 탄소증기를 냉각하여 작은 클러스터로 응고시켰다. 헬륨이 팽창하여 대형 진공실로 들어 갈 때 형성된 탄소클러스터는

가속되어 초음속가스제트를 형성하여 질량분석계로 보내졌다. 이곳에서 클러스터는 다른 레이저 필스로 이온화되었는데 클러스터에서 전자를 떼어버려 양전하를 가진 클러스터가 남게 된다. 다음은 강력한 정전장(靜電場)이 이 클러스터를 긴 비행관 속으로 밀어 넣어 덩치가 큰 클러스터일수록 더 빨리 달리게 만들었다. 비행관 끝에 있는 탐지기는 이온의 도착을 감지할 수 있어 관속의 비행시간으로부터 그 크기를 추정하게 된다.

이상한 「봉우리」

실험을 시작한 뒤 1주일만에 이들은 증기속에 형성된 작은(12개 원자 또는 그 이하)탄소분자들에 관한 완전한 세트의 데이터를 모으는데 성공했고 그중에서 크로토의 탄소고리들도 발견했다. 그러나 그중에서 가장 중요한 발견은 증기속에 형성된 분자의 질량을 기록한 질량분석계에 나타난 이상한 피크(최대치)였다. 1985년 9월4일 연구팀이 처음 발견한 이 피크는 정확하게 60개 탄소원자의 집합체에 해당하는 분자량 720을 가르키고 있었다. 이보다 질량이 많은 탄소 70에 해당하는 피크도 나타났다. 이 시점부터 실험의 초점은 당초 크로토가 설정한 것과는 다른 방향으로 전환하게 되었다.

탄소의 동소체는 종래의 석묵과 다이아몬드 외에도 제3의 형태가 존재한다고 추정해 왔었다. 1966년(존스(David Johns)는 영국의 과학지 「뉴 사이언티스트」에 익명으로 5각형과 6각형의 패턴으로 배열할 수 있다면 탄소원자들이 서로 낮은 밀도의 구형으로 결합할 수 있다고 비쳤다. 1970년대초에는 일본과 소련의 과학자

러시아 페테르부르크 북동 약 3백km 지점의 호수지대의 소도시 순기부근 석탄암에서 천연의 버키볼과 그 사촌뻘이 되는 럭비볼모양을 한 탄소원자 70개의 탄소분자를 발견했다고 보고하고 있다.

스위스병정의 칼

버키볼의 탁월성을 이데텐 「스위스제 군용

칼」로 비유하는 사람도 있다. 천재적인 엔지니어가 설계한 듯 완벽하기 이를데 없는 이 분자는 크리스마스 트리처럼 온갖 기능을 가진 다른 원자나 분자집단을 주렁주렁 매달아서 미래의 새로운 소재의 가족을 형성할지 모른다.

그러나 오늘날 눈부신 속도로 전개되고 있는 버키볼분야의 연구중에서 어떤 것이 불발탄으로 끝날지 또는 천만금의 행운을 가져다 줄 것인지

또는 노벨상을 안겨 줄 것인지 현재로서는 전혀 가늠할 방법이 없다. 다만 지금 알려지고 있거나 예측하고 있거나 또는 소문으로 나돌고 있는 일들은 불과 몇달이 지나면 이미 낡은 지식이나 쓸모없는 것이 되어버릴 가능성도 적지 않을 것 같다.

들은 탄소원자들이 구형으로 집합할 수 있는 여러 방법중의 하나는 「풀러렌」구조일 것으로 내다 보았다. 미국에서는 캘리포니아대학의 화학자 채프먼(Orville L. Chapman)이 분자를 합성하려고 시도한 일이 있었다.

스몰리그룹은 처음에는 샘플표면에서 나온 일종의 석목판이 기계속으로 날아와서 덩어리진 것이라고 생각했다. 아무튼 대학원생인 히스와 오브라이언은 주말을 꼬박새워 탄소 60의 특성을 밝히는 실험을 한 결과 9월9일 월요일 아침 이 분자가 터무니 없을 정도로 안정되어 있다는 사실을 밝혔다. 연구팀은 이들의 보고를 토대로 탄소 60이 다른 분자와 반응을 하지 않는 구조를 가졌다는 것은 벤젠과는 달리 수소 도움없이 자체 원자만으로 결합되었다는 것을 의미하는 것이라고 생각했다.

이들은 탄소 60의 구조로서 두가지 후보를 도마위에 올려 놓았다. 그중 하나는 석목과 비슷한 6각형의 탄소판을 뭉친 평평한 모델이었고 다른 하나는 탄소조각들이 닫힌 우리속을 감아 올라간 모양의 구형모델이었다.

그러나 이들은 석목판처럼 납작한 6각형판은 감기지 않는다는 것을 알게 되었다. 그래서 닫힌 우리의 모델이 대상으로 남게 되었다.

엑스포-67의 돔

연구팀의 토론에는 버크민스터 풀러(미국의 저명한 설계사·건축가 1895-1983)의 구상형 돔이 도입되었다. 그런데 결국 풀러의 돔이 탄소 60의 구조를 밝히는데 결정적인 공헌을 했다는 점에서 요즘 그런 아이디어를 누가 먼저 제기했는가 하는 문제를 놓고 크로토와 스몰리

간에 첨예하게 의견이 대립되어 있다. 크로토의 주장은 평소 여가를 그래픽예술에 심취하고 있고 한때 풀러와 함께 연구할까 마음먹은 일까지 있었기 때문에 그가 돔구조를 소개한 것은 매우 자연스러운 일이었다고 주장하고 있다. 그는 자기 아이들을 위해 5각형과 6각형의 마분지로 구형돔을 만들어 주었다는 이야기도 했다. 더욱이 그는 몬트리얼에서 열린 「엑스포-67」에서의 구상형돔의 모습에 감명을 받고 그 인상을 18년이 지난 뒤에도 생생하게 기억하고 있었다는 것이다. 크로토는 스몰리가 언급한 닭장모양은 6각형만으로 되어있는데 대해 그는 6각형과 5각형으로 된 구형이 되어야 한다는 점을 강조했다고 주장하고 있다.

그러나 크로토가 열쇠가 되는 개념을 제시했다고 해도 누군가가 이런 구조가 실제로 유효하다는 것을 보여주어야 했다. 대학원생 히스는 집으로 돌아가서 부인과 함께 「거미 베어」라는 씹는 사탕 60개를 이쑤시개로 연결하여 이 모델을 만들려고 했으나 실패했다.

한편 스몰리는 집에서 퍼스널 컴퓨터로 탄소 60의 구조를 그려보려고 했으나 마음대로 되지 않아 곧 포기하고 쉬운 방법인 가위와 종이 그리고 테이프를 사용하기로 했다. 그는 우선 6각형의 종이를 모체로 하여 그 가장자리에 2번째 각형종이를 테이프 붙였다. 다음 3번째 종이를 붙일 때는 가장자리가 약간 겹치게 해서 곡면을 만들 수 있었다. 4번째 종이도 가장자리의 접촉면이 약간 겹치게했더니 셀러드용 사발과 닮은 구조물이 되기 시작했다. 그런데 5번째 종이를 붙였을 때 6번째의 6각형 종이가 들어 갈 충분한 공간이 없다는 것을 알

게 되었다.

이때 밤은 이미 자정이 넘었다. 스몰리는 침실로 가는 대신 주방으로 들어가 맥주 한 잔을 마시기 시작했다. 그는 불현듯 크로토가 아이들의 구형돔을 만들 때 5각형 조각도 포함되었다고 한 말이 떠올랐다. 그는 다시 서재로 돌아가서 5각형 종이를 만들어 그 주변에 6각형 조각을 붙이기 시작했다. 이번에는 가장자리를 겹치지 않아도 자동적으로 사발모양이 되었다. 이렇게 해서 만든 반구(半球)에는 정확하게 30개의 정점이 나타났다. 스몰리는 다시 또 하나의 반구를 만들어 이 두개의 반구를 결합함으로써 마침내 탄소60의 구조모델을 완성하게 된 것이다.

이튿날 아침 스몰리는 사무실에 모인 연구팀 앞에서 종이를 만든 탄소 60모델을 커피테이블위에 살짝 던져 보였다. 탄소 60은 건축가 버크민스터 풀러의 이름을 따서 「버크민스터 풀러렌(약칭 버키볼)」이라고 정식 명명되었다.

그러나 1986년 3월 크로토와 스몰리간의 감정은 마침내 금이 가고 말았다.

크로토는 라이스대학의 우주물리학그룹에 대한 연설에서 스스로 「아이디어맨」으로 자처하고 라이스대학 연구팀은 기술적인 도움을 주었을 뿐이라고 비꼴다. 이리하여 1987년 4월 크로토는 라이스대학에 대한 8번의 성공적인 방문을 끝으로 협력은 종식되었다. 오늘날 많은 화학자들에게 기술적인 가능성의 상징처럼 된 탄소 60분자는 또 과학자간의 협력의 힘이 얼마나 위대하다는 것과 함께 협력에는 위기가 수반하기 쉽다는 하나의 대표적인 사례가 되었다.