

# E = mc<sup>2</sup> 등식에서 광속 제공의 뜻은?

주 승 환\*  
고려공업검사(주) 연구소장



머리말

운동 에너지의 양을 나타낼 때 움직일 물체의 속도 제곱(v<sup>2</sup>)은 뉴턴 역학의 핵심을 이룬다.

“수의 제공”이란 개념은 고대부터 있어왔다. 정사각형의 벽에 작은 크기의 모자이크로 칸을 메운다고 치자. 가로줄에 10 개의 모자이크로, 그리고 세로줄에도 10 개

의 모자이크로 채운다면 벽에 채울 총 모자이크 수효는 10의 2 배수, 20이 아닌, 10의 제곱수인 100개가 된다. 고대 사람들은 제곱수의 아이디어를 다른 일에서도 편리하게 응용할 수 있었다.

지금 우리 중성자의 물질과의 작용 온지름넓이(단면적)의 단위는 반(10-24cm<sup>2</sup>)을 쓴다. 중성자의 운동 에너지는 선속이지만 원자핵과 흡수될 확률은 넓이 단위가 쓰인다.

과학사를 읽다보면 과학기술의 위대한 발견들이 눈에 많이 띈다. 아인슈타인(Albert Einstein)이 발견한 특수 상대성이론도 그들 중의 하나다.

물리학에서 ‘기적의 해(annus mirabilis)’로 불리는 1905년에 발표된 ‘에너지 등가 원리’가 바로

그것이다.

지난 20세기 한 세기에 과학계를 뒤흔들어 놓았던 그 원리는 단 하나의 수식으로 나타낸다. “물질은 에너지다”를 수학적식으로 나타내면, E = mc<sup>2</sup> (E; 에너지, m; 물질의 질량, c; 광속)이다. 우리 총 에너지 소비의 42%를 차지하는 원자력 발전의 밑바탕엔 그 등식이 자리 잡고 있다.

제2차 세계대전 때, 미국은 ‘맨해튼 프로젝트’란 군사 비밀 사업으로 우라늄 그리고 플루토늄의 분열핵폭탄을 만들어 일본에 떨어트렸다. 그 후, 미·소 양쪽은 핵을 배경으로 냉전 시대를 열면서 그런대로 세계 평화는 잘 유지돼 왔다. 북한의 핵실험도 그 등식에 뿌리를 두고 핵을 개발하면서 한반도의 안전을 뒤흔들어 놓았다.

\* 한양대 원자력공학과 졸업, 한양대 산업대학원 금속공학과 석사, 한양대 대학원 원자력공학과 박사, 과학기술처 국립지질조사소 광업연구사, 미국지질조사소 암석년령측정기술 연수(테버), 서독연방지구과학연구소 객원연구원(하노버), 한국자원연구소(현 한국지질자원연구원) 책임연구원, (주)세안기술 연구소장, 고려공업검사(주) 연구소장(1999~)

궁금증

누구나 아인슈타인의 에너지 등가 공식에서 왜 하필이면 광속의 제곱( $c^2$ )을 썼던 것인지 궁금해 할 것이다. 그 동안 필자는 과학사의 문헌을 뒤져도 신통한 설명을 찾을 못했다.

지금까지 문헌을 뒤져 얻게 된 지식을 바탕으로, 아인슈타인은 볼츠만의 ‘가스(기체) 운동론’에서 그런 힌트를 얻게 된 것은 아니었을까 짐작할 뿐이다. 물론 그런 생각은 한참 된 엉뚱한 생각일 수도 있을 것이다.

필자는 대학에서 아인슈타인이 불속 던져놓았던 에너지 등가 원리를 처음 알게 되었다. 정지된 질량이란 개념도, 그리고 빛의 빠르기인 광속의 제곱( $c^2$ )이 에너지로 변하는 것도 배웠다. 그땐 아무 생각 없이 그 공식을 그대로 암기해서 시험을 보았고 좋은 점수를 받기도 했다.

그 때는 아인슈타인의 질량-에너지 등가 공식에 담겨진 물리적인 뜻을 깊게 생각보진 않았다. 등가 공식뿐만 아니다. 대개의 일반 물리학에서 다른 공식들도 그랬다.

머릿속에 담고 이들의 문리(사물의 현상을 깨달아 알아낼 힘)를 터워나갈 깊이 있는 개념들은 대체로 필자에겐 사치로 여겨졌다. 지금처럼 인터넷 정보망도 없었다. 학교 등록금도 어렵게 마련해야 했다. 교재도 못 살 처지에 참고서를 산다는 생각은 분에 넘치는 사

치였다.

요즘 뒤늦게 아인슈타인의 질량-에너지 등가 공식에 흥미를 가지고 접근했다. 거기엔 빛의 제공으로 된 ‘환산 인자’를 물질의 질량에 곱하면 신통하게 바로 에너지 단위로 바뀐다.

자세히 살펴보면, 미터 단위계를 이룬 기본 단위 7개 중, 3개를 한꺼번에 녹여 만든 하나의 통일된 에너지 단위가 된다. 이것은 아인슈타인이 이룩한 기적 같은 업적이다.

예컨대, ‘무게(kg)’, 그리고 ‘거리(m)’에 ‘시간(s)’을 나눈 몫(거리/시간)의 제공으로 된 단위, 이들의 기본 차원들은 전혀 성질이 서로 다른 별개의 것이지만, 서로 곱해서 신비롭게도 통일된 하나의 에너지 차원(물리량)으로 바뀐다.

그 핵심은 ‘광속의 제곱’이 에너지의 양을 셈하는 데 한 ‘환산 인자’ 구실을 하게 된다. 일 세기 전, 아인슈타인은 그것으로 1905년을 ‘기적의 해’로 바꿔놓았다.

필자는 본지에 양동봉 원장이 내놓은 ‘제로존 이론’을 소개하였다.([원자력산업], 2007/11, 12월호) 거기엔 ‘숫자 단위계’란 새로운 개념을 도입하고 있다. 기존의 미터 단위계를 이룬 7개의 단위들을 한데 뭉뚱그려 수치화시켜버렸다. 복잡하기 이를 데 없는 물리량들을 단순한 수치로 디지털화해 놓은 것이다.

어느 누구도 시도해보지 않았던

새로운 발상이었다. 그의 ‘숫자 단위계’는 아인슈타인의 질량-에너지 등가 공식처럼, 기초과학의 대혁명으로 이어질지 그 길은 이제 막 답사하려는 처녀림이다. 한민족의 자존심이 새겨진 새 단위계를 세계 표준으로 채택할 세기가 도래할 것인지 흥미롭다.

에밀리 뒤 사틀레(Chatelet) 논문

1749년 9월 1일, 프랑스인 에밀리 뒤 사틀레(Emile du Chatelet)는 왕립 도서관 감독에게 연구 논문이 담긴 한 서류 꾸러미를 보냈다. 그녀는 그 후, 일주일 만에 산후의 바이러스 감염으로 숨을 거둔다. 그 당시는 산모의 출산은 사형 선고나 다름없었다. 소독 기술, 약품도 없었다.

그녀는 출산일이 다가오자 서둘러 그동안 정리해뒀던 연구 서류를 보냈다.『자연과의 수학적 원리』란 책은 그녀의 사후에 발간된다. 거기에는 운동 에너지의 개념들이 잘 묘사된 것으로 알려진다.

그때, ‘vis viva(비스 바이버)’ 낱말을 처음 쓴 라이프니츠, 그리고 뉴턴의 운동 에너지 개념의 두 주장들은 서로 달랐다. 움직이는 물체의 ‘속도 제곱’에 관한 논리적 바탕은 두 주장자들 사이에서 논란거리가 된다.

뉴턴은 운동 에너지를 질량(kg)에 속도를 곱하는(지금의 운동량: mv, 개념)을 주장하였지만, 라이프니츠는 속도 제곱(mv<sup>2</sup>)을 주장

하게 된다. 그녀의 연구 논문은 라이프니츠의 논리에 따르게 된다.

다음 세기에 접어들면서 영국의 마이클 패러데이(Michael Faraday)는 그녀의 주장을 계승하여 발전시켰다. 많은 과학자들이 이에 호응하면서 ‘속도 제곱’이 운동 에너지의 한 ‘환산 인자’로서 자리를 잡게 되었다.

패러데이는 자력선을 연구하다가 전기 ‘에너지 보존 원리’ 개념에 한발 다가선다. 어떤 에너지든지, 비록 형태는 다를지라도 에너지가 한 일의 양의 합이 같음을 알게 된다.

아인슈타인의 ‘광속 제곱’은 150년 전에 있었던 과학계의 분위기를 되살려낼 듯 20세기 초엽에 다시 등장하게 된다. 그의 질량-에너지 등가 원리는 한 세기 동안 과학기술을 변혁시켜놓았다.

### 운동 에너지의 속도 제곱 첫 실험

1740년 말경, 사틀레 그리고 그녀 동료들은 네덜란드 출신 과학자인 빌헬름 스토라베잔데가 했던 실험에 주목하였다. 거기서 운동 에너지는 움직이는 물체의 ‘속도 제곱’에 비례한다는 결정적인 실험 증거물을 찾아낸다.

아주 부드러운 진흙판을 마련하고, 무거운 추를 떨어뜨리는 실험이었다. 뉴턴 그리고 라이프니츠가 서로 다르게 주장해 오던 운동 에너지의 양을 측정해내는 실험이었다. 쓰인 추는 같은 것이며 떨어뜨

릴 속도만 다르게 했을 뿐이다. 그리고 그저 그 진흙 판때기에 꽂히는 깊이를 재본 실험이었다. 식은 죽 먹기보다도 쉬운 착상이었다.

놀랍게도 그 깊이는 추가 떨어지는 속도가 아닌 속도의 제곱에 비례했다. 라이프니츠의 주장은 의심의 의지가 없었다. 사틀레는 그 실험 사실을 근거로 그녀의 논문에서 그 증거물을 바탕으로 라이프니츠의 손을 들어주게 된다.

유의할 점은 라이프니츠의 vis viva는 실험 데이터를 뒷받침하여 유추한 것은 아니었다. 논리적 사고를 바탕으로 주장한 이론이었을 뿐이다. 그 자신도 실험을 통해 증거물을 내놓질 못했다. 간단한 실험으로 그 일을 증명하는 것은 누구나 할 수 있는 것은 아닐 것이다. 초심리 과학(occult)이 발동해야 되는 일이다.

유레카 아르키메데스의 통찰력도 그 중에 하나이다. 자신의 몸을 욕조의 물에 담가 넘쳐나는 물의 양을 보고 금으로 만든 왕관의 금 순도를 밝혀내 목숨을 구했다는 유명한 일화가 전해온다.

### 볼츠만의 ‘가스 운동론’

‘원자론’은 기원전부터 학자들 사이에서 논쟁이 돼오고 있었다. 18세기에 볼츠만(Ludwig E. Boltzmann)의 ‘가스 운동론’은 물질이 원자로 이뤄진 것임을 실험을 통해 그 실체를 알게 된 주된 원리였다. 볼츠만은 아인슈타인보

다는 한발 앞선 세대였다.

가스는 작은 알갱이(원자)들이 텅 빈 공간에 무수히 모여진 상태이고, 우린 그것들을 대표하는 말로, ‘기체’ 혹은 ‘공기’라고도 한다. 그 공기 온도의 실체는 바로 거기(계)에 들어있는 무수한 알갱이들이 제멋대로 움직이는 ‘운동의 힘(에너지)’로 버틴다.

온도가 올라가면 알갱이들의 움직임도 빨라진다. 반대로 알갱이들이 빠르게 움직이면 계의 온도가 올라간다.

이런 자연 현상을 물리적으로 표현하면, 한 계의 온도(열에너지)는 거기 들어있는 알갱이들이 제멋대로 자유로이 움직이는 개별 속도 성분을 합친 ‘평균 속도 제곱’에 비례한다(워터스톤의 주장; “제로존 이론(II)”, 주승환, 『원자력산업』 2007/11). 맥스웰-볼츠만의 식은 바로 그런 바탕에서 발견된 것이다.

물질이 움직일 때 생기는 ‘힘(에너지)’을 나타낼 ‘속도의 제곱’ 개념은 아리스토텔레스(Aristoteles)의 동역학(力學)엔 없었다. 영국의 토마스 브래드워딘(Thomas Bradwardine(1290?-1349년)은 아리스토텔레스의 역학에 도전했다. 그는 가톨릭 성직자이면서 과학자로서 ‘비레론’을 주장했다.

그는 물체를 움직일 힘(운동 에너지)은 그 물체를 움직일 “속도의 제곱에 비례”한다는 획기적인 아이디어를 내놓았다. 당시는 수학에

서 지수 함수가 없었던 때로 알려진다. 그때까지는 ‘에너지(W.J. M. 랭킨이 처음 씀)’의 개념도 없었고, 대신 ‘힘’이 ‘운동 에너지’를 대신하고 있었다.

**vis viva(운동 에너지) 개념 등장**

16~17세기 동안 동역학은 열 현상에 집중되었다. 그 열풍은 17세기 말까지 이어져오다가 18세기부터 에너지 보존 법칙의 개념이 화두가 된다. 그 이전에는 ‘일’이란 개념이 동역학의 주류였다.

앞서 얘기한, 라이프니츠(Gotfried Wilhelm Leibniz)는 18세기 벽두에 vis viva(활력; 라틴어, 지금의 운동 에너지)이란 낱말을 만들어 일의 단위 개념으로 삼아 동역학의 힘을 정량적으로 다루게 된다.

그리고 vis viva는 보존된다는 ‘동역학의 정리(定理)’를 주창했다. 그것의 양은 질량(m)에 속도(v)의 제곱을 곱한 것( $mv^2$ )이다 (지금의 운동 에너지인  $1/2mv^2$ 의 두 배와 같음. 이 정리는 ‘에너지 보존원리’의 한 특수한 경우로 나중에 밝혀짐). 이 낱말은 이후, 근 100년 동안 동역학의 기본 정리로 활용된다.

물리학에서 에너지 개념은 1840년대부터 일기 시작했다. ‘에너지 보존 원리’가 바로 그 뿌리다. ‘패러다임(paradigm)’의 주창자로 우리에게 잘 알려진 토마스 S. 쿤(Thomas S. Kuhn)은 그의

저서『The Structure of Scientific Revolution』(Chicago, 1962)에서 에너지 보존의 원리는 지역이 서로 각기 다른 과학자 그룹들인 12명의 과학자들에 의해서 동시에 주창된 사실을 소개한다.

그는 그런 현상을 ‘동시 발견(simultaneous discovery) 현상’의 대표적인 사례로 꼽았다. ‘에너지 보존 원리’는 고전물리학의 시작이었다. 우린 그 원리를 헤르만 헬름홀츠(Herman von Helmholtz)가 정립한 것으로 알고 있다. 하지만 그는 ‘12명’의 과학자들 중 한 명이면서 그 원리를 정리했을 뿐이다.

**광속 제곱( $c^2$ )의 의문?**

위의 사료들을 살펴보면, 아인슈타인의 질량-에너지 등가 원리는 볼츠만이 주창한 가스 운동론에 그 바탕 개념을 둔 것으로 의심하게 된다. 볼츠만은 우주 중력장의 영향을 받는 한 ‘닫힌 계(closed system)’를 염두에 두고 그의 논리를 전개시켰다.

그런 계 안에 갇힌 가스 알갱이들이 갖는 평균 운동 속도의 제곱은 그 계의 온도(열에너지) 그리고 그 계의 벽면이 받을 속 압력에 비례하는 것임을 밝혀낸 것이다.

필자의 견해로는 아인슈타인은 볼츠만의 한 닫힌 계의 생각과 엇비슷하게, 물질계를 원자들의 한 집단으로 삼았을 것으로 생각된다. 그리고 그 계를 이룰 개별 원자의

모양새를 한 작은 우주로 봤을 것이다.

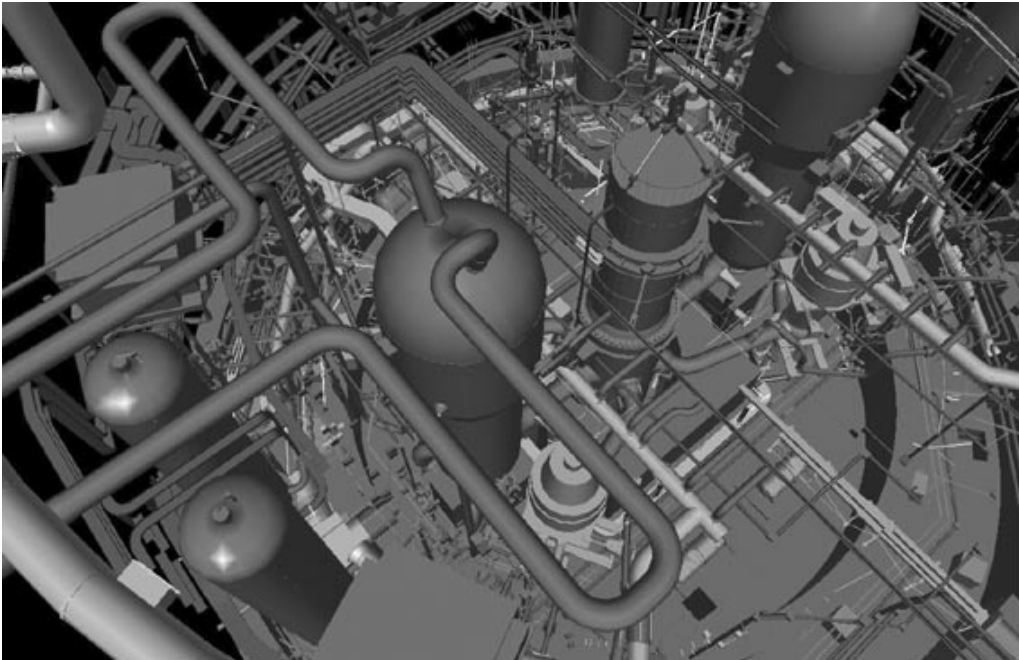
그렇다면 개별 원자 각각을 이룬 물질 알갱이들의 전체 에너지들의 균형은 원자핵을 중심으로 주위를 빛의 속도로 회전하는 전자들이 만들어낸 쿨롱장에 묶여 원자의 본바탕 에너지가 균형을 이뤄야 한다.

필자는 이런 현상을 물질의 ‘평형 에너지 상태’(제로존 이론(II), 『원자력산업』 2007/12월호)라고 정의한 적이 있다. 이런 상태는 물질들의 자연 그대로의 완전하고 안정된 모습일 것이다. 화학에서는 ‘에너지 준위의 바닥 상태’란 말을 쓰기도 한다.

외부의 한 요인으로 원자가 가진 고유한 에너지의 평형이 깨진다면, 원자핵 속엔 당연히 에너지의 불균형이 일어나 핵자들의 운동 에너지가 발동되면서 그 계의 평형 에너지 상태를 유지하게 될 것이다.

원자의 구조는 쿨롱장이란 특수한 장력 속의 운동이다. 그러므로 핵자들이나 거기서 나오는 알갱이들은 빛의 속력으로 움직이게 된다. 자연 법칙의 하나인 운동 에너지는 ‘광속의 제곱( $c^2$ )’일 수밖에 없는 달리 대안은 없을 것으로 보인다.

아인슈타인의 광속 제곱( $c^2$ )의 아이디어는 그런 에너지 상태가 유지되는 것을 전제로 한다. 쿨롱장 안에서 어떤 에너지의 변화는 구성 요소들인 알갱이들의 붕괴나



원자의 구조는 쿨롱장이란 특수한 장력 속의 운동이다. 그러므로 핵자들이나 거기서 나오는 알갱이들은 빛의 속력으로 움직이게 된다. 자연 법칙의 하나인 운동 에너지는 광속의 제곱(c<sup>2</sup>)일 수밖에 없는 달리 대안은 없을 것으로 보인다. 아인슈타인의 광속 제곱(c<sup>2</sup>)의 아이디어는 그런 에너지 상태가 유지되는 것을 전제로 한다.

분열하는 방식의 한 운동에너지로 충당하는 것으로 의심된다. 질량 - 에너지 등가 원리에서 볼츠만의 가스 운동론의 것과 다른 점은 광속(c)이 아닌, 분자의 속력(v)으로 나타난 표현만이 서로 다를 뿐이다.

#### 원자력에서 'vis viva'의 위력

아인슈타인이 발견해낸 질량-에너지 등가 공식은 어떤 요술의 도구에 속하는 것인지 한번 어렵으로 짐작해 본다. 머리글에서는 원자력의 대강을 얘기하고 있다. 원자력을 쉽게 이해하는 데는 에너지 등가 식이 아주 요긴한 툴이 된다.

원자력이라면, 우선 머리에 떠올리는 것은 방사선일 것이다. 그것들의 종류엔 여러 가지가 있다. 태양빛의 자외선이나 강력한 에너지를 가진 고주파인 전자기파들도 포함된다.

여기서는 원자핵을 이룬 물질에 한정하여 vis viva의 개념으로 쉽게 잡힐 한 그림을 그려본다.

원자핵을 이룬 알갱이들은 알파, 베타 그리고 감마선으로 쪼개져 나온다. 그런 개별 알갱이들의 운동 에너지는 기껏해야 수백 메브(MeV; 다음 블로그 '주송환마당'/원자력세상보기(32) 참조, 그런 에너지 정도는 먼지와 같은 모래 한 알을 들썩일 정도의 힘)에 지나지 않을 것이다.

하지만, 핵이 두 쪽으로 갈라질 경우엔 얘기가 달라진다. 그 규모는 엄청난 것이다. 물 단위의 원자들이 움직이는 대변혁이 일어난다.

우라늄-235의 일 몰(mol) 속에 들어있는 원자의 수효는 아보가드로의 수( $6.0221415 \times 10^{23}$ )로 나타낸다. 이런 수효에 수 MeV의 에너지를 곱한다면 그 에너지의 세기가 얼마인지 상상을 넘어선 가공할 운동 에너지로 바뀐다.

같은 원자력일지라도 이런 에너지의 잣대를 대고 '약력' 그리고 '강력'으로 나뉜다. 즉, 보통 개별 방사선의 에너지는 약력에 해당하지만, 원자핵의 분열은 강력으로 분류한다. ☯