21세기 과학, 카오스(CHAOS)

朴培植

인류는 자연에 대한 원초적 호기심을 품고 살아간다. 이러한 호기심에 기인한 인간의 자연탐구 노력은 오늘날의 자연과학, 20세기 후반의 눈부신 과학기술 문명을 낳았다. 태초의 사람들이 품을 수 있었던 자연에 대한 호기심의 하나는 자기자신의 생명현상 나아가 생명의 기원이 아닐까? 생명의 기원은 무엇이며 어떻게 하여 이 세상에 태어났을까 하는 의문은 누구나 품었을 자연스런 의문이다. 이 의문에 답을 구하려는 탐구노력은 인류의 역사를 통해 면면이 이어져 내려와 생명과학으로 체계를 갖추어 발전하고 있다.

17세기 후반에야 자연과학 기술되기 시작

또한 밤하늘의 움직이는 별을 보고 우주의 광대함에 압도되어 인간의 왜소함을 절감하며 절대자를 숭배하고 그들이 지배하는 우주의 구조와 기원에 대한 의구심을 해소하려는 노력은 오늘날의 우주론으로 체계화되어 발전하고 있다.

천상의 대상에서 관심을 돌리면 일상생활에서 접하게 되는 지상의 모든 물질과 이들 물질을 구성하는 요소는 무엇이며 어떻게 구성되어 있을까 하는 의문을 품지 않을 수 없었을 것이다. 물질을 구성하는 기본입자가 무엇일까 하는 궁금증을 해소하려는 인간의 노력은 오늘날 입자물리학으로 체계화되어 발전하고 있다.

인간이 태초로부터 품어온 가장 기본적인 세 가지 자연과학적 호기심은 긴 역사를 통한 줄기찬 탐구노력으로 자연과학이

체계화되어 여러 분야로 분화되어 발전하여 오는 원동력이 되었지만 여전히 충족되지 않은 호기심으로 남아있다.

지난 과학사를 더듬어 볼 때, 합리적인 과학적 사고력은 정말 놀라운 자연과학의 발전을 가져왔다. 화석학적인 인류의 역사는 백만 년이 넘는다고 한다. 이 긴 인류의 역사에서 기록을 남기기 시작한 인류의 역사는 수천 년에 지나지 않으며, 문명을 이루며 살아오는 기간에 과학기술의 발달을 더듬어 보면 합리적 사고에 기인한 눈부신 발전은 수백 년에 지나지 않는다고 생각된다.

중세의 절대권력이 지배하던 암흑기를 지나 문예부흥기와 계몽사상 시대를 지나며 합리적 사고방식이 자유롭게 표출되기 시작하면서 수학을 언어로 한 자연과학이 기술되기 시작한 시기는 17세기 후반으로, 이때부터 오늘날의 과학기술 문명을 태동할 씨앗이 굳건히 뿌리를 내렸다고 하겠다. 종래의 정성적 과학은 뉴턴과 라플라스와 같은 위대한 과학자들의 노력으로 수학을 언어로 한 정량적 과학으로 발전하였다. 정확한 측정과 이를 기초로 한 정확한 미래예측은 결정론(determinism)적 과학관을 견지하도록 하였으며, 이러한 결정론적 가치관은 무질서하고 복잡해 보이는 대상을 회피하고 단순하고 규칙적인 운동을 보이는 대상에 관심을 갖는 환원주의(reductionism)의 과학을 발전시켰다.

"하느님은 주사위 놀이(예측불가능한 시행)를 하는가? (Does God Play Dice?)"

이 말은 아인슈타인이 물리학자 막스 본(Max Born)에게 보낸 편지중의 한 귀절을 역설적으로 표현한 말이다. 아인슈타인은 편지에서 다음과 같이 기술하고 있다.

> 당신은 주사위놀이를 하는 하느님을 믿겠지만, 나는 객관적으로 존재하는 세상의 완벽한 법칙과 질서를 믿습니다. 나는 심오한 사고를 통하여 자연계에 내재한 법칙과 질서를 파악하려 노력하고 있습니다…….

아인슈타인은 우주가 우연성이 철저히 배제된 완벽한 법칙과 질서에 따라 운동한다는 확고한 결정론(determinism)적 자연관을 견지했다. 모든 측정 가능한 물리량은 양자역학적 확률분포에 의한 기대값으로 나타나며 상태에 대한 정확한 정보는 불확정성 원리(uncertainty principle)에 의한 제한을 받고 있음을 이해하면서도 측정의 조그만 오차는 결과에도 조그만 오차를 초래한다는 선형해석법의 사고방식에 사로잡혀 20세기 대다수의 과학자들은 결정론적 자연관을 견지하고 있다. 이러한 결정론은 바로 현대과학의 탄생과정에서 선형방정식으로 자연현상을 기술하여 해석하려는 노력의 산물이다. 그러나 오늘날의 카오스 과학자들은 다음과 같이 확신에 찬 대답을 한다.

> 하느님은 우주를 가지고 주사위 놀이를 하고 있다. 그러나 하느님의 주사위는 어떤 의도가 실린 주사위이다. 이제 물리학의

목성의 대흥반 주위 대기의 난류

주된 관심은 주사위가 어떤 규칙들에 의해 의도가 실려 있는가 하는 문제와, 인류는 그 법칙들을 어떻게 이용할 수 있는가를 탐구하는 일이다.

'카오스(chaos)'란 그리스의 발음이며 영어로는 '케이오스'라 발음되는, 우리말로 '혼돈'이란 뜻의 단어다. 불과 20여년 전만 해도 카오스는 다음과 같은 사전적인 뜻을 갖는 추상명사였다.

카오스(chaos) :
(1) 질서가 있는 우주 이전에 존재했다고 생각되는 질서가 없고 형체가 없는 물질.
(2) 완전한 무질서. 뒤엉켜 갈피를 잡을 수 없는 상태.

위의 설명(1)은 구약성서의 창세기편에 "땅은 모양을 갖추지 않고 아무 것도 생기지 않았으며, 어둠이 깊은 물위를 뒤덮고 있다"라는 천지창조 이전의 상태를 설명하는 말이다. 설명(2)는 흔히들 일상생활에서 보고 겪게 되는 복잡하여 갈피를 잡을 수 없는 상태를 얘기하는 추상적 설명이다.

요크 교수에 의해 처음 사용된 '카오스'

카오스란 단어는 1970년대를 지나면서 새로운 과학적 의미를 갖게 되었다. 1975년 매릴랜드대학교 수학과 교수인 요크(James A Yorke)가 처음으로 과학(수학) 용어로 카오스(chaos)란 말을 사용하면서 종래의 사전적 의미에 새로운 과학적 개념을 갖는 과학용어로 거듭나게 되었다. 이 새로운 개념을 간명하게 정리하면 다음과 같다.

(3) (과학) 결정론적인 비선형계에서 나타나는 불규칙하고 예측 불가능한 현상 (운동).

수천 년을 지나는 동안 인류의 자연현상을 기술하고, 분석하며, 예측할 수 있고, 이용할 수 있는 많은 규칙성이 자연현상에 내재되어 있음을 깨닫게 되었다. 하지만, 이러한 노력을 계속하는 동안 자연현상을 파악하는 인간의 사고는 우물안에 갇혀 있는 것은 아닐까?

즉, 카오스 과학은 복잡하고 무작위적으로 보이는 현상에 내재된, 선형과학적 방법으로는 파악되지 않는 질서를 찾아내어 이해하려는 과학적 노력이다. 다시 말해 무질서 속의 질서(order within disorder)를 파악하려는 과학이다.

수천 년을 지나는 동안 인류의 자연현상을 기술하고, 분석하며, 예측할 수 있고, 이용할 수 있는 많은 규칙성이 자연현상에 내재되어 있음을 깨닫게 되었다. 하지만, 이러한 노력을 계속하는 동안 자연현상을 파악하는 인간의 사고는 우물안에 갇혀 있는 것은 아닐까?

무질서 속의 질서

중세의 절대적인 가치관이 뒤로 물러서고 합리적 사고방식이 활짝 꽃피던 17세기, 자연과학은 뉴턴과 동시대 과학자들이 물체의 운동을 미분방정식을 도입하여 정량적으로 표현하게 되면서, 강력한 과학의 언어로 등장한 수학의 대두로 과학자들은 모든 운동을 미분방정식으로 표현하여 방정식의 해를 구하여 운동을 이해하려는 노력을 기울여 왔다. 물체가 주어진 운동방정식에 근거한 완벽한 법칙과 질서에 따라 운동하여 어느 한 순간의 상태를 알면 과거와 미래를 정확히 알 수 있다는 결정론적 과학은 뉴턴역학의 산물이자 선형과학의 진수이다. 라플라스는 현재의 모든 상태를 알면 앞으로 전개될 우주의 모든 일을 알 수 있다고 확언했다.

실제 자연계에서 발견되는 운동을 표현하는 방정식은, 0과 1사이의 임의의 수를 택할 때 그 수가 유리수일 확률은 0%이며 무리수일 확률이 100%이듯이, 비선형식일 확률이 100%이며 선형식으로 표현되는 운동은 거의 일어나지 않는다. 비선형 미분방정식으로 표현되는 동력학계에서는 운동방정식이 아주 간단한 형태일지라도 계의 매개변수(계를 규정하는 외적인 조건)가 변함에 따라 규칙적인 운동(regular behavior)에서 카오스 운동(chaotic behavior)으로 발달하는 경우가 전형적으로 나타난다.

비선형 운동방정식은 특수한 경우가 아니면 해(연필과 종이로 계산되는 일정한 형태의 함수로 표현되는 해)를 구할 수가 없다. 따라서 근사법에 의하여 비선형 방정식을 선형 방정식으로 변형하여 문제를 해결하려는 노력을 지난 300여 년간 기울

여 왔다. 이러한 노력의 결과로 복잡한 전체를 부분으로 나누어 해결하려는 환원주의(reductionism)가 자연과학계를 지배하여 왔으며, 선형성의 산물인 결정론(determinism)적 사고체계는 우연성의 과학(카오스 과학)이 들어설 틈을 허용하지 않았다. 과학자들은 알게 모르게 비선형 방정식으로 표현되는 자연현상을 근사화한 선형 방정식의 해법으로 이해하려는 결정론적 사고의 우물안에서 학문적 노력을 계속해 왔다. 선형 방정식에 익숙한 스승은 제자들을 선형 방정식에 익숙한 과학자로 길들여 오는 악순환이 계속되어 왔다.

컴퓨터로 드러나는 비선형의 속성

그러나, 선형 방정식의 해법에 의한 비선형 방정식의 해석은 근본적으로 비선형 방정식이 내포하고 있는 비선형성을 간과하는 우를 범하고 있음이 학문의 역사에서 간간이 지적되어 왔지만, 선형해법에 익숙한 과학자들의 견고한 우물벽과 비선형 방정식이 내포하는 해석적 난해성에 부닥쳐 질식되곤 하였다. 난해한 비선형의 속성은 금세기 후반 눈부신 컴퓨터의 발달에 힘입어 서서히 그 모습을 드러내게 되었다.

비선형 방정식은 간단한 형태일지라도 연필과 종이로 그 해를 구할 수 없는 경우가 일반적이다. 따라서 금세기 후반 컴퓨터를 이용한 수치해석적 방법과 그래픽 기능의 발달로 비선형 방정식이 내포한 해의 속성을 어느 정도 파악할 수 있게 되었다. 즉, 비선형 방정식을 근사화하여 선형 방정식의 해법으로 해를 파악하는 것이 아니라, 비선형 방정식 자체의 해를 직접 수치해석적 방법으로 구하여 근사화 과정에서 잃어버리게 된 정보를 놓치지 않고 파악할 수 있게 된 것이다.

결정론적 카오스

비선형계가 내포하고 있는 비선형성에 기인하여 현재 우리가 알고 있는 계의 정보가 본질적으로 내포하고 있는 작은 오차가 지수함수적으로 증폭되어 긴 시간이 흐름에 따라 쓸모가 없는, 의미가 없는 정보가 된다. 중국 양자강가에서 노니는 나비 한 마리가 날개짓을 하여 수천만리 떨어져 있는 뉴욕시에 폭풍우를 유발할 수도 있다는 '나비효과(butterfly effect)'를 1962년 MIT의 기상학과 교수 로렌츠가 초보적인 컴퓨터를 사용하여 공기의 대류운동을 나타내는 간단한 비선형식을 계산하던 중 우연히 발견함에 따라, 황량한 사막과 같은 토양에 조그만 혼돈과학의 겨자씨가 파종되었다.

이후 다양한 분야의 과학자들이 간단한 비선형계에서 종래의 선형적 근사방식으로는 전혀 예상하지 않았던 카오스 현상을 발견하게 되었다. 따라서 계를 나타내는 비선형 운동방정식에 기인하여 나타나는 혼돈현상을 결정론적 카오스(deterministic chaos)라 부르게 되었으며, 수없이 많은 알맹이로 구성되는 기체나 액체의 입자들이 무작위성에 기인하여 보이는 운동과 같은 카오스 현상을 복잡성의 과학

(science of complexity)이라 불러 카오스 과학의 두 가지 주된 관심분야를 이룬다. 카오스 과학은 혼돈현상에 내재된 규칙성을 파악하여 그 원인을 규명하고 순치하여 자연현상을 보다 적절히 파악하고자 하는 노력의 산물이다.

가전제품에 응용되는 카오스

카오스 과학은 그동안 선형과학적 방법이 응용되어 부분적 성공을 거두었으나 비선형성에 기인한 미제로 남아 있는 제 문제의 해결에 크게 응용될 가능성을 보인다. 최근 가전제품 회사에서 카오스 이론을 응용하여 세탁조 내의 수류를 최적화한 카오스 수류를 구현하여 세탁물의 엉킴을 크게 개선한 제품을 판매하고 있으며, 또 다른 회사에서는 카오스 발진회로를 개발하여 유해전자파의 발생을 현저히 줄인 카오스 스탠드를 시장에 내놓았고, 또 다른 곳에서는 카오스 선풍기를 개발하였다는 발표가 있었다. 일본에서는 카오스 이론을 응용한 로보트가 개발되었으며 광범위한 카오스 칩의 응용성을 연구하고 있다. 아직까지 카오스의 응용은 초보적인 수준의 단계지만 앞으로 우리의 일상생활에 얼마나 큰 변화를 가져올지 한 단면을 시사한다 하겠다.

카오스 과학은 자연의 기본적인 진리를 추구하는 물리학의 제 분야에서 나타나는 동력학 문제뿐 아니라 일기예보, 지진의 발생과 분포, 천체의 구조와 운동, 엘니뇨 현상을 일으키는 해류의 분석, 로보트나 인공위성의 적절한 제어, 정보통신의 화상압축, 암호해독, 원유 채굴량의 극대화, 생체리듬을 이용한 건강진단, 뇌파의 분석을 통한 정신병 현상의 규명, 심전도를 분석한 심장마비의 원인규명 및 예방, 카오스 신경회로망, 생태계의 변화와 전염병의 예방, 질병의 치료의학 등에 이용될 수 있다. 이공학 분야뿐 아니라 폭동과 같은 집단행동의 분석, 경제지표와 주식의 가격변동 예측, 선거 및 정치적 동향 예측, 교통체증의 해소방안, 언어의 분석, 카오스적 화음을 이용한 음악, 카오스를 응용한 미술 등등 인문·사회과학과 예술에까지 이루 헤아릴 수 없는 다양한 분야에서 놀라운 성과를 가져오지 않을까 기대된다.

카오스 과학 앞서는 나라가 선진국

과학기술은 20세기에 접어들어 상대론과 양자역학의 대두로 큰 발전을 거듭하여 오늘날의 첨단과학 시대를 구가하고 있다. 혼돈과학의 출현으로 우리는 또 한 번의 과학혁명을, 자연현상을 이해하는 큰 사고의 전환을 가져올 고동소리가 울려퍼지고 있음을 목격하고 있다. 1970년대를 전후해 새로운 학문의 영역으로 떠오른 카오스 과학(chaos)은 지난 20여 년간 눈부신 발전을 거듭하여 이공학 분야는 물론이고 인문사회과학의 제 분야에까지 저변확대가 이루어지고 있다. 다시 말해 카오스 과학은 운동방정식이 내포하는 비선형성에 기인한 카오스 현상을 규명하고, 종래의 선형방정식으로 기술된 선형과학이 응용된 모든 학문분야에 새로운

비선형 과학은 이제 겨우 태동단계에 있으므로 앞으로 많은 젊은 과학자들의 노력을 통하여 21세기 과학의 주류를 형성하며 무궁무진한 미지의 진리를 인류에게 펼쳐 보일 것이다. 다음 세기에는 카오스 과학에서 앞서는 국가가 과학기술 선진국이 되리라는 예측을 많은 석학들이 하고 있다.

지평선을 열게 될 것이다. 카오스 과학은 지난 20여 년간 꾸준히 발전되어 왔지만 아직 태동단계로 폭넓은 기초적 연구가 광범위하게 요구된다. 뉴턴 이래로 선형 과학이 끊임없이 발전되어 300여 년이 지난 오늘날 눈부신 과학문명을 이루었다. 이에 비추어 비선형 과학은 이제 겨우 태동단계에 있으므로 앞으로 많은 젊은 과학자들의 노력을 통하여 21세기 과학의 주류를 형성하며 무궁무진한 미지의 진리를 인류에게 펼쳐 보일 것이다. 다음 세기에는 카오스 과학에서 앞서는 국가가 과학기술 선진국이 되리라는 예측을 많은 석학들이 하고 있다.

우리나라의 젊은이들이 적극적 관심을 가지고 노력을 경주하면 21세기의 과학기술 문명은 그들이 창조하게 될 것이다. 야망과 용기를 가진 우리의 젊은이들이 지금 이 분야에 장래를 건다면 다음 세기에는 우리도 과학기술의 선진국으로 어깨를 나란히 하지 않을까? 희망을 갖고 부딪쳐 보자.

하느님은 어떻게 주사위놀이를 하는가? (How does God play dice?)

끝으로 한마디 부연하고자 한다. 카오스에 대한 연구는 여러 선진국에서 1970년대와 1980년대 초에 본격적인 연구가 시작되어, 국가적 재정지원을 받는 연구센터가 여러 곳에 전략적으로 설립되어 상당한 수준의 연구성과를 거두고 있다. 일본은 1980년도 초반부터 국제적 학술회의를 주최하여 왔으며, 중국도 1980년도 중반 이론물리센터를 중심으로 활발한 연구를 추진하고 있다. 우리는 이제야 카오스에 눈을 뜨려 하고 있다. 하루속히 카오스의 가능성을 인식하여 적절한 대책을 세워야 할 것이다. 적절한 연구환경만 조성된다면 타 분야와 비교하여 학문적 깊이가 깊지 않으므로 상당한 수준의 연구성과를 거둘 수 있을 것이다. 과학기술의 미래에 대한 적절한 대책이 아쉽다.