올해의 볼츠만 메달리스트 1: Harry L. Swinney

DOI: 10.3938/PhiT.22.025

이 경 진

Boltzmann Medalist I (year 2013) : Harry L. Swinney

Kyoung Jin LEE

Harry Swinney has led the study of nonlinear dynamics and nonequilibrium pattern formation during the last 40 years. In his early career, through a careful experimental characterization, he demonstrated that a transition to turbulence could arise only after a small number of bifurcations, thus providing the first experimental demonstration of deterministic chaos. This experimental work instigated an explosion of studies among researchers involved in the study of nonlinear phenomena in the 1980's. Moreover, his fascinating discoveries and insights concerning pattern formation in nonlinear chemical reaction diffusion systems caused different fields of science to explore new ground with rigor. Swinney also made important contributions on granular flows, the dynamics of fractures, and anomalous turbulent diffusion in two-dimensional rotating flows. Swinney has consistently proven himself as an international leader in the study of nonlinear processes since the early 1970's. Indeed, he was one of the very first to bridge the gap between dynamical system theory, laboratory experiments and their applications.

본인과 Swinney 교수

본인이 미국 텍사스 대학 물리학과 대학원에 진학한 1987년, Swinney 교수 연구실은 여러 학생 및 방문자들로 늘 붐볐

저자약력

이경진 교수는 1994년 미국 어스틴 텍사스대학에서 Swinney 교수의 지도로 물리학 박사를 받았고, 이후 프린스턴 대학에서 박사후 연구과정(1994-1995)을 거쳐, 1996년부터 현재까지 고려대학교 물리학과 교수로 재직 중이다. (kyoung@korea.ac.kr)

다. 그 당시 혼돈현상으로 대표되는 비선형동역학이 여러 학계의 폭발적 관심을 불러일으켰는데, Swinney 교수는 이 연구 분야의 중요한 한 축이었고, 그가 텍사스 대학 내에 설립한 Center for Nonlinear Dynamics (CNLD) 연구센터는 잘 나가 가는 인기 좋은 곳이었다. 이곳에는, Harry Swinney, Jack Swift, Bill McCormick, Michael Marder를 포함 교수가 4명, 여러 명의 방문교수 및 연구원들, 그리고 학생까지 포함하여 총 30~40명 규모로, 큰 건물(물리학과, Robert Lee Moore Hall)의 한 층을 다 차지하는 넓은 실험실을 운영했다. 또한, CNLD 연구센터는 비선형 동역학과 관련된 여러 수업 과목들을 제공했고, 매주 외부 초청연사 세미나와 빈번하게 그룹 세미나 등이 열려 비선형동역학 연구 및 학술 교류 최고의 모임 장소였다. 본인은 1989년부터 1994년까지 CNLD 소속으로, Swinney 교수의 박사과정 지도를 받았으며, 본인 외에도, 임동건 교수(고려대학교 명예교수), 문성준 박사(Chase Bank), 정성환 박사(Virginia Tech 교수)가 Swinney 교수의 박사학위 지도를 받았다.

Swinney의 배경 및 수상경력

Swinney는 1939년 미국 루이지애나주 Opelousas라는 작은 도시에서, 프랑스계 어머니와 아이리시계 아버지 밑에서 태어났다. 주로 루이지애나 및 테네시 등 남부에서 성장했으며, 대학은 멤피스의 조그만 Rhodes College를 졸업했고, 이후 1968년 Johns Hopkins 대학 물리학과에서 Herman Cummins의 지도로 박사학위를 받았다. 학위과정 당시 주된 연구 내용은 레이저 산란 측정에 기반한 임계현상 및 물성조사였다. 학위 후, Swinney는 Johns Hopkins 대학에서 박사후연구원 과정 2년과 방문연구교수 1년을 마치고, 뉴욕으로 직장을 옮겼다. 뉴욕에서는 뉴욕대학(1971-1973)과 City University of New York (1973-1978)에서 교수로 근무했으며, 1978년 미국 어스틴 소재 텍사스 대학으로 직장을 옮겨 현재까지 물리학과 교수 및 CNLD 연구센터의장으로 근무하고 있으며(그림 1),

Fig. 1. Harry L. Swinney posed in his office (around 1992).

현재까지 36명의 박사학위자를 지도하였다.

중요한 수상기록은 1977년 APS Fellow; 1991년 American Academy of Arts and Sciences, Fellow; 1992년 National Academy of Sciences, Member; 1995년, American Physical Society, Fluid Dynamics Prize; 1999년 American Association for the Advancement of Science, Fellow; 2007년 Jurgen Moser Award of the Society of Industrial and Applied Mathematics; 그리고 2012년 Lewis Fry Richardson Medal, European Geosciences Union 등이 있고, Buenos Aires 대학, Jerusalem의 Hebrew 대학, Rhodes College 등에서 명예 박사학위를 받았다.

Swinney 교수의 연구 업적

1. Couette-Taylor 유체계의 막흐름(turbulence) 전이과정

Johns Hopkins에서의 학위과정 및 초창기 연구원 시절, Swinney는 레이저를 이용하여 상전이 임계현상(critical phenomena)을 연구하였다. 이와 관련 주목받는 연구 결과는, 임계점 근처에서 질서매개변수요동(order parameter fluctuation)의 감쇠율이 Kawaski와 Lo가 제시한 mode-mode coupling 이론에 보편적으로 잘 맞음을, Xe, CO₂, SF₆ 등을 대상으로 확인한 것이었다^[1] (그림 2). 참고로, 임계점 근처에서 SF₆를 대상으로 수행한 Rayleigh linewidth 측정은, Johns Hopkins

Fig. 2. Γ^* (scaled Rayleigh linewidth) as a function of $q\xi$ for several different systems. The curve represents the mode-mode-coupling theory. [Adapted from Ref. 1].

대학에서 당시 Swinney의 지도로 박사 학위 중이던 임동건 교수께서 (2007년 고려대학교 정년퇴임) 수행하였다.^[2] 즉, Swinney 교수의 지도를 받은 1호 박사과정학생이 한국인 임동건 박사님이다.

1975년 뉴욕 City College로 자리를 옮긴 Swinney는, 유체 흐름 패턴의 전이과정에 대한 연구를 시작한다. 즉, 평형-계의 임계현상에서 비평형-계의 불안전성 및 전이현상으로 연구의 지평을 넓힌 셈이다. 이 연구는 당시 Haverford College에서 City College를 방문한 Jerry Gollub과 함께 수행하였는데, 대상은 Couette-Taylor (회전하는 긴 두 실린더 사이에서 흐르는) 유체 흐름이었다. 이 둘은, Swinney 교수의 박사학위 지도교수였던 Herman Cummins가 개발한 “레이저를 이용한 유체의 흐름 속도 측정 기술(laser doppler velocimetry)”을 이용하여,^[3] Couette-Taylor 유체흐름 패턴의 전이과정을 매우 정밀하게 분석하였고, 이를 통하여 유체의 막흐름 전이과정인, 과거 Landau와 Hopf가 제안했던 이론과는 상이하다는 것을 밝혔다.^[5] Landau-Hopf이 제안한 이론에 따르자면, 유체의 막흐름은 관련된 푸리에 모드 수가 점진적으로 증가함에 따라 이루어진다. 반면, Gollub과 Swinney 연구 결과는, 두 개의

REFERENCES

- [1] H. L. Swinney and D. L. Henry, Phys. Rev. A **8**, 2586 (1973).
- [2] T. K. Lim, H. L. Swinney, K. H. Langley and T. A. Kachnowski, Phys. Rev. Lett. **27**, 1776 (1971).
- [3] Y. Yea and H. Z. Cummings, Appl. Phys. Lett. **4**, 176 (1964).
- [4] L. D. Landau, Doklady Akademii Nauk SSSR **44**, 339 (1944).
- [5] J. P. Gollub and H. L. Swinney, Phys. Rev. Lett. **35**, 927 (1975).

Fig. 3. Transition to a turbulent flow with an increasing Reynolds number in a Couette-Taylor system [figure, courtesy of G. Gorman and H. Swinney (1979)].

Fig. 4. Determining Lyapunov exponents from a timeseries with repeated applications of Gram-Schmidt orthonormalization. See Ref. [10] for details.

푸리에 모드 발생 후 바로 막흐름으로 전이됨을 보여준다(그림 3). 이는 Ruelle과 Taken이 제안한 “혼돈으로의 전이 시나리오”와^[6] 부합되는 놀라운 결과였으며, 아마도 Swinney의 가장 대표적인 연구 업적으로, 그가 향후 수행한 많은 비선형-비평형계에 대한 연구들의 시발점이 되었다.

2. 텍사스주립 대학에서의 초기 연구 업적

텍사스주립 대학으로 자리를 옮긴 Swinney 교수는 Couette-Taylor 유체계의 막흐름 전이과정 외에 다양한 비선형 현상들에 대한 연구를 수행한다. 한 대표적인 예가 Belousov-Zhabotinsky 비선형 화학반응이다. Swinney는 Simoyi, Roux 등과 함께 정밀한 화학반응기를 제작하고,^[7] 이 반응기에 입력되는 화학반응 물질의 농도를 체계적으로 조절하며, 혼돈으로의 전이과정을 정밀 분석하였다. 특히, 혼돈의 “이상한 끌개(strange attractor)”의 존재를 실험적으로 확인하였고, 관련된 화학반응이 1-차원 unimodal map으로 기술됨을 보였다.^[8] 이 실험 결과는 Metropolis, Stein, & Stein의 “Universal Sequence of periodic states for 1-dim. unimodal maps” 이론과^[9] 매우 잘 부합되었다. 비선형 화학반응을 이용하여 Swinney가 구현한 이 이상한 끌개는, 실험적으로 밝혀진 이상한 끌개들의 대표적인 예로, 혼돈현상과 관련된 여러 문헌에 등장한다.

혼돈 상태로의 전이과정을 정량화하는데 있어 가장 중요한 수학적 잣대가 Lyapunov 지수이다. 그런데, 실제적인 실험 시계열 데이터를 대상으로, 이를 정량화하는 작업에는, 데이터

노이즈, 제한된 데이터 양, 관련된 끌개의 차원에 대한 정보 부재 등, 여러 제약이 있다. Swinney는 이러한 한계를 극복하며 정확한 Lyapunov 지수를 얻을 수 있는 방법을 Wolf, Swift, Vastano 등과 함께 개발했다.^[10] Gram-Schmidt Orthonormalization을 반복적으로 사용하는 이 전산학적 알고리즘은 1985년에 발표되었는데(그림 4), 현재까지 5,000번 이상 문헌 인용이 되었고, 혼돈현상 관련된 시계열을 분석하는데 있어 하나의 대표적 분석 도구가 되었다.

3. “Turing 패턴”의 실험적 구현

“Turing machine”으로 유명한 전산과학자, 또는 2차 세계대전 당시 암호전문가로 명성이 높았던, Alan Turing은 생물학에 큰 관심을 가졌었다. 특히, 그는 1952년 매우 획기적인 가설을 기반으로 생물의 발달과정에 대한 흥미로운 수학적 모델을 제시하였는데 그 내용을 보면 다음과 같다. 생체의 발달과정을 주관하는 생화학 물질들이 존재하고, 이 물질들은 공간에서 확산되며 비선형적 화학반응을 일으킨다. 이때, Turing은 관련된 생화학 반응물질들의 확산계수 값의 차이가 계에 역학적 불안정성(instability)을 가져올 수 있고, 그 결과로 공간에 정적인 격자무늬 패턴이 생길 수 있다고 제안하였다.^[11] 보통, 분자들의 확산 과정이 계에 존재하는 불균일한 농도 분포를 없애는 방향으로 진행된다는 점을 생각해보면, 확산에 의하여 유발된 불안정성에 기반한 Turing의 이 가설은 매우 획기적인 것이었다.

Belousov-Zhabotinsky(BZ) 화학반응을 대상으로 비선형 화학반응의 불안정성을 연구해오던 Swinney 연구팀은, CIMA로 불리는 또 다른 비선형 화학반응을 특별히 처리된 얇은 polyacrylamide 막에 일으켜, Turing이 이론적으로 제안했던 패턴형성 원리를 세계 최초로 실험실에서 확인하였다^[12](그림 5). 이 실험에서는 요오드 농도의 공간적 분포를 영상화하기 위하여 녹말을 polyacrylamide막에 넣어 사용한다. 이때, 젤

REFERENCES

- [6] J. Guckenheimer, *Dynamical System and Chaos, Lecture Notes in Physics* (Springer Berlin, 1983), Vol. 179, pp. 149-156.
- [7] J.-C. Roux, R. H. Simoyi and H. L. Swinney, *Physica* **8D**, 257 (1983).
- [8] R. H. Simoyi, A. Wolf and H. L. Swinney, *Phys. Rev. Lett.* **49**, 245 (1982).
- [9] N. Metropolis, M. Stein and P. Stein, *J. Comb. Theory, Ser. A* **15**, 25 (1973).
- [10] A. Wolf, J. B. Swift, H. Swinney and J. A. Vastano, *Physica* **16D**, 285 (1985).
- [11] A. Turing, *Phil. Trans. R. Soc. London B* **237**, 37 (1952).
- [12] Q. Ouyang and H. L. Swinney, *Nature* **352**, 610 (1991).

Fig. 5. A hexagonal lattice Turing pattern realized in a CIMA reaction-diffusion system. The dark blue region is high in the concentration of iodine.

내부 폴리머 망에 갇혀서 매우 제한된 움직임만 가질 수 있는 녹말 분자는 색조의 역할 외에 또 다른 중요한 역할이 갖는다 — 요오드는 녹말 분자와 반응 결합하기 때문에, 요오드의 실질적 확산계수가 매우 작아져, Turing 패턴을 유발하는 불안정의 조건이 충족될 수 있다. Swinney 연구진이 얻은 이 결과는 비선형동역학 분야뿐만 아니라, 생물학계에도 큰 파장을 일으켰으며, 이후 실제 여러 생태계의 발달과정에서도 동일한 패턴 형성 원리가 적용됨이 확인되었다.

Swinney 실험실에서 Turing 패턴이 구현될 당시, 본인은 (현재 FIS 화학반응이라 불리는) 새로운 비선형 화학반응을 소재로 비평형 화학패턴을 연구하였다. FIS 화학반응-확산계는 실로 다양한 비평형 패턴을 보여주었다. 예를 들면, bistable 영역의 정적인 라멜라 패턴,^[13] excitable 영역의 나선파, 그리고 자발적으로 끊임없는 복제와 소멸을 반복하는 국소적인 “spot” 패턴을 들 수 있는데,^[13,14] 이 패턴들은 Turing 원리와는 차별화되는 새로운 원리로 형성됨이 밝혀졌다(그림 6). Swinney 실험실에서는 이 외에도, BZ, CIMA, FIS 비선형 화학반응을 이용하여 비평형-패턴 형성 관련 다양한 연구를 수행하며 관련분야를 주도하였다.

4. Granular 패턴, 프렉탈 패턴, 박테리아 군집 패턴

모래더미는 물리학적으로 다루기가 매우 까다로운 대상인데, 그 이유는 모래가 물처럼 흐를 수 있는 유체의 특성과 고체처럼 스스로 형태를 유지할 수 있는 양면성을 가지기 때문이다. Swinney 연구진은 얇은 모래판이, 외부에서 가해진 진동의 진폭과 주파수의 변화에 따라서, 다양한 구조의 비선형 공명 패턴들을 형성될 수 있음을 보여 주목받았다.^[16] 사각, 육각, 마름모, 준주기적 격자, 시공간 혼돈, 국소적인 진동 구조물(oscillons)(그림 7) 등 실로 여러 패턴 상태가 나타날 수 있으며, 실험 및 이론 연구에서는 이들의 형성원리 및 전이과정에

Fig. 6. Self-replicating spots in a model reaction-diffusion system [see Ref. 15 for details].

Fig. 7. Localized non-propagating oscillatory structure observed in a vibrating layer of metal balls.

대한 이해를 추구했다.

Swinney의 비평형 패턴에 대한 연구는 실로 다양한 소재를 대상으로 이루어졌다. Swinney 연구진은 박테리아(*Paenibacillus subtilis*) 군집의 성장과정과 “viscous finger” 형성 패턴에 공통적이며 보편적 특성(universality)이 있음을 밝혔다. 또한, 최근에는 *Bacillus subtilis* 박테리아 군집의 이동성과 관련 매우 흥미로운 연구 결과를 발표하였는데, 이들의 관찰과 분석에 따르면, 유영하는 박테리아 군집은 군무를 보이는 새 떼들처럼 다양한 크기의 무리를 만든다. 이때, 박테리아 무리의 크기 분포가 군집 전체의 밀도와는 무관한 양상을 보인다.^[17] 이 양상

REFERENCES

- [13] K. J. Lee, W. D. McCormick, Q. Ouyang and H. L. Swinney, *Science* **261**, 192 (1993).
- [14] E. Pearson, *Science* **261**, 189 (1993).
- [15] K. J. Lee, W. D. McCormick, J. E. Pearson and H. L. Swinney, *Nature* **369**, 215 (1994).
- [16] P. B. Umbanhowar, F. Melo and H. L. Swinney, *Nature* **382**, 793 (1996).

Fig. 8. Correlation lengths as functions of cluster size L . The dashed green line is that of starlings reported by Cavagna *et al.*

은, 비단 박테리아 군집뿐만 아니라 개체들의 상호작용을 통하여 무리를 만드는 군집에서 나타나는, 보편적인 것으로 매우 흥미롭다(그림 8).

맺는말

대학 진학 당시, 해군사관학교를 우선 지원했던 Swinney 교수는 체구가 왜소하여 불합격이 되었고, Swinney는 일반 대학에 진학해 물리를 전공하게 되었다. 미국한림원 회원이 되었을

당시, Swinney 교수는 대중 연설에서 그것이 본인에게 얼마나 큰 행운이 되었는지 그리고 학생들과의 계속된 연구활동이 본인에게 얼마나 즐거운 것이었는지 언급한 바 있다. 지난 40여 년 동안 Swinney 교수는 실로 폭 넓고 깊이 있는 연구로, 비선형동역학 및 비평형 패턴형성 학문 분야의 발전에 지대한 공헌을 해왔으며, 70이 넘는 고령인 현재도 멈춤 없이 연구활동을 하고 있다. 이 놀라운 에너지는 Swinney 교수의 과학에 대한 열정에 그 근원이 있다. 본인이 텍사스대학에서 박사 학위를 받을 즈음, Swinney 교수에게는 아들과 처를 순차적으로 잃는 엄청난 시련이 있었다. 그러나 이 시련도 Swinney 교수의 열정을 막을 수는 없었다. Swinney는 관련 학계를 이끈 존경받는 작은 거인이다.

끝으로, 본인의 과학적 식견과 경력이 부족하고, 본 원고를 작성하는 데 있어 준비기간이 너무 짧아 Swinney 교수의 연구업적을 제대로 다 설명 못한 것이 아쉽다. 본 원고 내용에 큰 오류가 없기를 바라며, Swinney 교수의 Boltzmann 메달 수상을 진심으로 축하드린다.

REFERENCES

- [17] X. Chen, X. Dong, A. Be'er, H. L. Swinney and H. P. Zhang, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 148101 (2012).