

카오스 이론을 이용한 2상 유동 해석

論文
56P-1-5

A Review on Two-Phase Flow Analysis using Chaos Theory

權 正 泰^{*} · 權 寧 哲^{**} · 金 景 敏[†]
(Jeong-Tae Kwon · Young-Chul Kwon · Kyoung-Min Kim)

Abstract – This article presents a review on chaos analysis of two-phase flow. Chaos theory has recently been applied to two-phase flow analysis, and it gives promising measures to quantitatively identify two-phase flow patterns and pool boiling behaviors. But, consistency of the calculated chaotic measures were not completely confirmed yet. More experimental data are requested for chaos analysis of two-phase flow. Also, chaos analysis methodology should be developed by experimental verification.

Key Words : Chaos, Two-phase flow, Pool boiling

1. 서 론

기체-액체 2상유동은 유체유동 및 열적 특성에 따라 매우 복잡한 거동을 보인다. 이러한 복잡한 거동은 두 상간의 운동량 및 열에너지의 변환으로 인해 다양한 유동양식을 유발하게 되고 이로 인해 압력강하, 기공율 및 열전달계수 등의 주요 관심변수들이 유동양식에 크게 의존하게 된다. 이러한 복잡성은 두 상간의 비선형적인 상호작용에 의해 더욱 예측하기 어려운 형태로 발전되어간다. 본 논문에서는 이러한 비선형적 거동을 보이는 2상유동에서 최근 조심스럽게 시도되고 있는 프랙탈(fractal) 개념 및 카오스 이론(chaos theory)에 대한 연구동향을 정리해보고자 한다. 특히, 2상유동의 유동양식(flow pattern) 판별과 관련한 카오스 해석과 수조비등(pool boiling)에서의 카오스 해석을 중심으로 살펴보자 한다. 또한 이러한 해석의 가능성 및 문제점을 제기함으로써 향후 카오스이론의 2상유동 해석에의 적용에 도움이 되고자 한다.

2. 본 론

2.1 카오스 이론의 개요

Ilya Progogine은 그의 저서 혼돈으로부터의 질서(Order out of Chaos)[1]에서 종래의 선형적 해석을 기본으로 하는

과학은 사실상 비선형적 자연의 극히 일부만을 제대로 다룰 수 있다고 말함으로써 그 동안 비선형적 성질은 선형적 현상의 극히 예외적인 부분에 지나지 않는다는 생각을 정면으로 반박하였다. Jacques Monod는 생물계의 진화와 관련하여 미시적인 교란(우연)이 거시적인 질서(필연)로 이행된다고 하는 개념을 제시하였다[2]. 카오스에 대한 정의 및 개념, 생물 복잡계에서의 적용, 카오스이론을 유체혼합에 적용, 그리고 경제학 및 금융공학에 적용하는 등의 내용은 기계저널에 국내 카오스 관련학자들에 의하여 소개된 바 있다[3].

James Gleick은 그의 저서 카오스(Chaos: Making a New Science)[4]에서 카오스이론의 발전과정을 다양한 인물중심으로 묘사하면서 위상전위 및 상변화 현상에서의 특이성, 즉 주기배가(period doubling) 및 카오스로의 전이과정에 대한 연구를 소개하고 있다. 기본적으로, 카오스란 겉으로 보아서는 무질서 또는 무작위(random)하게 보이는 비선형계의 현상이지만 그 속에는 거대질서가 숨어있는 결정론적(deterministic) 현상을 의미한다. 이러한 거대 질서를 파악하게 되면 장기적인 예측은 불가능하다 하더라도 단기예측은 가능하게 된다. 또한 어떤 현상이 기존의 선형해석으로는 무작위인지 카오스적인지 알 수 없는 경우에도 비선형해석 또는 카오스 해석을 수행하면 그 현상의 카오스적 질서를 확인할 수 있는 것이다.

2.2 카오스 해석 과정[5,6]

어떠한 물리현상, 혹은 공학적 현상으로부터 측정 데이터가 시계열(time series)의 형태로 얻어졌을 경우 이러한 데이터로부터 현상을 해석하고자 할 때 가장 먼저 이 현상이 선형계인지 비선형계인지를 판단해야 할 것이다. 계가 선형적인 경우는 잘 정립된 선형분석방식에 따라 주로 스펙트럼 분석(spectral analysis)을 수행함으로써 특성을 파악하게 된다. 계가 비선형적인 경우는 소위 위상공간(phase space)을

^{*} 교신저자, 正會員 : 全南大 工大 電氣半導體工學科 副教授
E-mail : kkm@chonnam.ac.kr

* 準會員 : 湖西大 工大 機械工學科 助教授, 主著者

** 準會員 : 鮑文大 工大 機械工學科 副教授

接受日字 : 2006年 10月 25日

最終完了 : 2006年 11月 21日

재구성(reconstruction)하여 카오스 특성을 조사한다. 이를 위해 적절한 매립차원(embedding dimension)과 쳐짐 시간(time delay)을 구해야 한다. 매립차원과 쳐짐 시간이 구해지면 이를 이용하여 위상공간을 재구성할 수 있다. 그러면 재구성된 위상공간 내에 보통 끌개(attractor)가 얻어질 수 있으며 이로부터 상관차원(correlation dimension), Lyapunov 지수, Kolmogorov-Sinai entropy 등 계의 카오스 특성을 나타내는 정량적인 값 등을 얻게 되고 이를 이용하여 제 현상의 비선형적 특성을 해석할 수 있게 된다.

Fig. 1을 보면, 두 가지의 시계열이 모두 무작위(random)하게 보이지만 위상공간으로 변환하여 보면 하나는 거대질서가 나타나는 카오스 특성을 보이고, 다른 하나는 여전히 무작위하게 나타나는 계임을 알 수 있다.

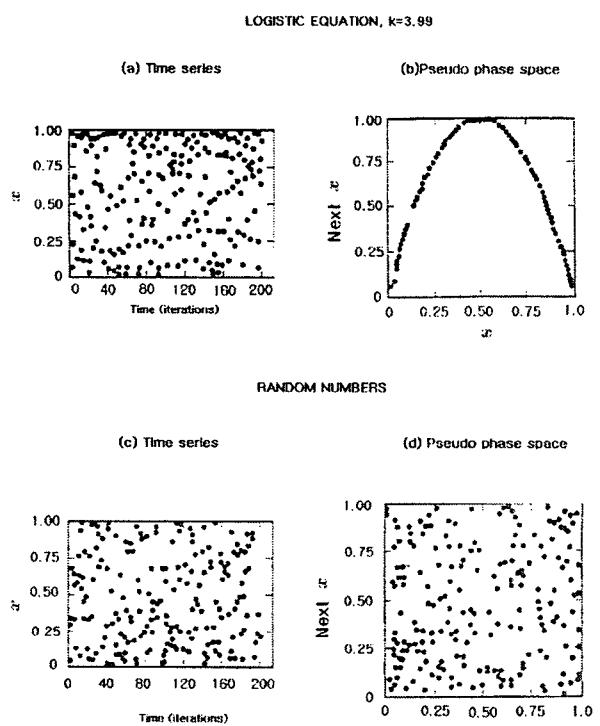


그림 1 카오스 데이터와 랜덤 데이터의 시계열 및 위상공간 비교

Fig. 1 A comparison of typical phase space plots between chaotic data and random data[6].

2.3 주요한 카오스 해석변수들

2.3.1 프랙탈차원(fractal dimension)

관측계에 대한 시계열이 얻어졌을 때 이 시계열이 무작위하게 보일 경우 순수 무작위(random)한 것인지 아니면 결정론적 특성(카오스)이 숨어있는 것인지를 알기 위해 시계열로부터 위상공간을 재구성하면 보통은 끌개(attractor)가 나타난다. 즉, 일종의 변환을 시도하는 것이다. 이렇게 재구성된 끌개의 차원을 검토해 보는 것이 주요 카오스 해석과정 중 하나이다. 이러한 끌개의 차원은 정수가 아닐 수 도 있으며, 이렇게 정수차원이 아닌 끌개를 이상한 끌개(strange

attractor)라고 하며, 이와 같이 확대된 개념의 차원을 프랙탈차원이라 한다. 이와 같은 프랙탈 차원은 카오스 계의 복잡성의 정도를 나타낸다고 할 수 있겠다. 이러한 프랙탈 차원의 종류는 여러 가지가 있는데 대표적인 것으로는 용량차원(capacity dimension), 상관차원(correlation dimension), 정보차원(information dimension) 등이 있다[7]. 이중 상관차원은 실험데이터 및 고차원의 동력학계에 적합하고 계산이 상대적으로 쉬워 많이 사용되고 있다.

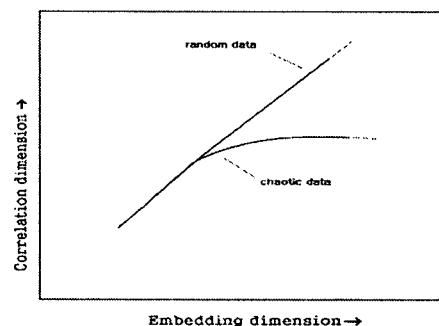


그림 2 매립차원의 증가에 따른 상관차원 변화 특성

Fig. 2 Theoretical behavior of correlation dimension with increase in embedding dimension[6].

Fig. 2는 매립차원을 증가시켜가면서 구하는 상관차원을 두 가지 데이터; 무작위 데이터와 카오스 데이터에 대하여 그려 본 것이다. 계가 무작위한 경우에는 매립차원을 늘려도 상관차원이 어떤 값으로 수렴하지 않으나, 계가 카오스인 경우에는 매립차원이 증가해가면서 해당하는 상관차원이 포화되는 특성이 있다. 하지만 주의해야 할 것은 무작위 계인 경우에도 자료수가 작을 경우에는 상관차원의 포화경향이 있다는 점이다.

2.3.2 Lyapunov 지수

카오스 특성 중 하나인 초기조건에의 민감성을 알 수 있는 지수로서 초기의 인접한 두 점이 시간에 따라 발산해나가는 정도를 의미하는 지수이다[6]~[7]. 즉, 초기에 ε 만큼 떨어져 있는 두 점이 n 스텝 후에 지수적으로 얼마나 떨어지게 되는가 하는 것으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon(n) \approx \varepsilon e^{\lambda n} \quad (1)$$

여기에서 지수 λ 를 Lyapunov 지수라 한다. 만약 λ 가 음수이면 처음에 약간 떨어져 있던 두 점은 수렴해 갈 것이고, λ 가 양수이면 발산해 가므로 초기조건에 민감하게 되는 것이며 카오스 특성을 갖는다고 할 수 있다.

2.3.3 Kolmogorov-Sinai 엔트로피

엔트로피는 여러 가지의 의미로 사용된다. 무질서, 확률, 어떤 분포의 균질성, 불확실성, 무작위성, 비예측성, 다양성, 정보 등 여러 가지로 해석이 가능하다. 엔트로피는 항상 양의 값을 가지므로 그 자체로는 카오스와 관련을 맺지는 못

하지만, 카오스를 규정하는데 있어서는 엔트로피 율(entropy rate) 즉, 시간이 국한으로 가고 관찰하는 최소단위(box size)가 무한소로 갈 때의 단위 시간당 평균 엔트로피로 정의되는 Kolmogorov-Sinai (K-S) 엔트로피 H_{KS} 가 유용하다. 즉, K-S 엔트로피는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다[7].

$$H_{KS} = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \lim_{t \rightarrow \infty} (H_t - H_{t-1}) \quad (2)$$

여기에서 H_t 는 시간 t 에서의 엔트로피를 나타낸다. 따라서, 이렇게 정의된 K-S 엔트로피가 0인 동력학계는 결정론적 계(deterministic system)이고, 양의 값을 갖게 되면 카오스 계이며 이 값이 클수록 더욱 카오스적이라 할 수 있겠다. 또한, 이 값이 무한대이면 무작위(random)과정으로 볼 수 있다.

3. 2상유동의 카오스 해석

3.1 2상유동양식의 정량적 판별에 적용

서론에서 논한 바와 같이 2상유동의 압력강하 및 열전달 특성은 유동양식에 민감하게 의존하므로 유동양식을 바르게 판별하는 문제는 2상유동 연구의 큰 이슈 중의 하나이다. 유동양식은 주로 육안관찰 및 사진촬영 등의 전통적인 방법에서 이들의 약점인 정량성을 확보하기 위한 방법으로 발전해 나가고 있다. 즉, 정압 측정법, 압력강하 측정법, 전기전도도 측정법, X-선 감쇠법 등이 있다[8]. 또한 커패시턴스 기법을 이용하여 기공을 측정 및 유동양식 판별을 시도한 경우도 있다[9]. 이러한 정량적인 방법들은 주로 power spectral analysis와 같은 선형해석을 주로 사용해 왔다. 최근에 이르러 프랙탈 기법[10]이나 카오스 해석[11]~[12]등의 비선형 해석의 연구결과가 간간이 소개되고 있다. Cai et al.[11]는 작은 단면적을 갖는 수평 사각유로(19.05×3.18 mm)에서 플러그(plug) 유동, 슬러그(slug)유동, 그리고 환상(annular)유동을 구현하여 각 유동에서의 압력신호의 시계열을 분석하여 상관차원을 구하였다.

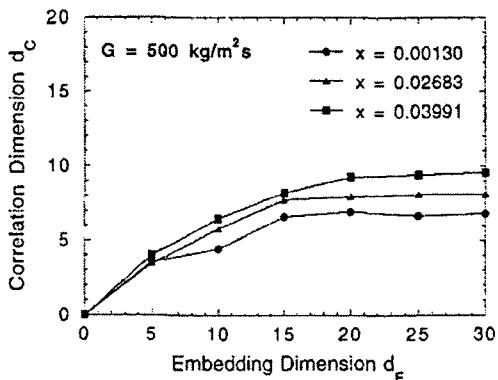


그림 3 플러그, 슬러그 및 환상 유동에 대한 매립차원과 상관차원 관계

Fig. 3 Correlation dimension versus embedding dimension for plug, slug, and annular flows[11].

Fig. 3에 매립차원을 증가시키면서 구한 상관차원이다. 각각의 경우에 데이터 수는 65,000개를 취하였다. 이 결과 그 랙프에서 알 수 있는 바와 같이 매립차원이 증가함에 따라 상관차원이 어떤 일정한 값으로 수렴하므로 카오스계로 볼 수 있으며 플러그, 슬러그, 환상유동으로 갈수록 상관차원이 커짐을 알 수 있다. 이것은 유동의 복잡성이 이러한 방향으로 커지고 있음을 말하는 것이다. 또한 Fig. 4에는 건도의 변화에 따라 각 유동 내에서도 상관차원이 달라짐을 보여주고 있다.

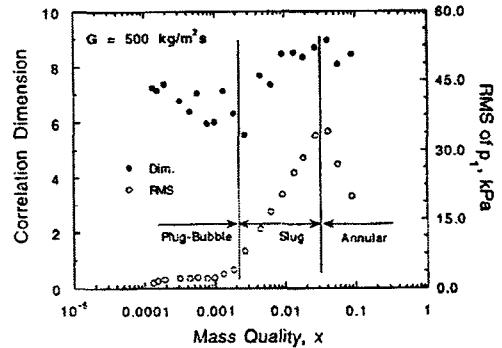


그림 4 건도의 변화에 따른 상관차원 및 압력의 평균값 변화

Fig. 4 Correlation dimension and RMS of pressure versus mass quality[11].

Ito et al.[12]는 물-공기의 수직관(19mm)내 2상유동실험을 수행하여 기포유동(bubble flow), 슬러그유동(slug flow), 처연유동(churn flow), 그리고 환상유동(annular flow)에서의 차압데이터로부터 카오스해석을 수행하였다. Fig. 5는 카오스해석을 통해 구한 Lyapunov 지수를 나타내고 있다. 이러한 정량적인 지수와 유동양식과의 상관관계는 아직은 명확하게 규명되고 있지는 못하나 더욱 많은 정밀한 실험 및 카오스해석의 방법론의 개선을 통해 향후 매우 발전적인 결과를 볼 수 있을 것으로 사료된다.

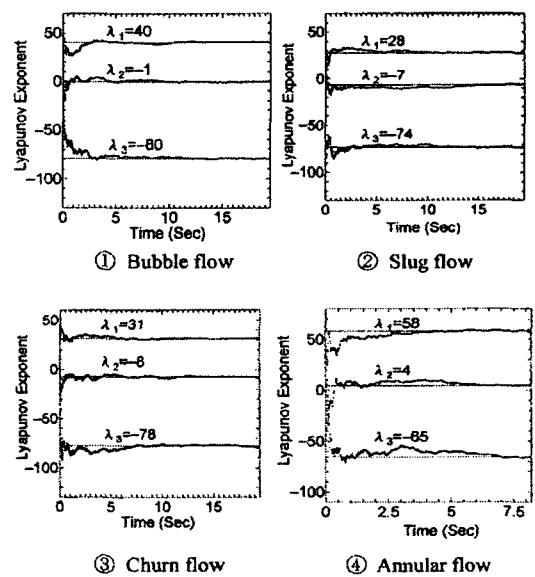


그림 5 Lyapunov 지수 분포

Fig. 5 Lyapunov spectrum[12].

3.2 수조비등(pool boiling) 현상의 해석

Takagi and Shoji[13]는 작은 단일 캐버티에서의 기포발생의 거동을 이해하기 위하여 온도의 시계열을 구하고 이로부터 비선형해석을 수행하였다. 즉, 얇은 구리판위에 직경이 대략 $50\sim100\mu\text{m}$ 인 몇 가지 형상의 작은 캐버티를 가공하여 캐버티 부분을 레이저로 국부가열하면서 기포를 발생시키면서 온도를 측정하였다. 측정된 온도 시계열로부터 위상공간을 재구성하고 상관차원 및 Lyapunov 지수 등을 구하고 카오스 특성해석을 시도하였다. 또한, Shoji[14]는 비등현상에 관한 review article에서 비등현상 모델링이 현상을 설명하는데 있어서 한계를 보이는 이유 중 하나로서 비등시의 비선형성을 거론하면서 이러한 비선형적 특성 해석의 중요성을 논하였다. 수조비등에서의 비선형특성 혹은 카오스특성에 대한 연구는 매우 미미한 실정이어서 위의 실험 및 해석에 대한 평가는 차후의 연구자의 몫으로 남아 있다. 하지만 기존의 선형해석으로서는 분석할 수 없었던 특성을 카오스해석을 통하여 해석할 수 있는 가능성을 확인했다는 점에서 매우 유용한 연구결과라 할 수 있겠다.

4. 결 론

본 논문에서는 카오스 이론을 이용한 시계열의 해석과정을 간단히 살펴보았으며, 2상유동의 카오스해석의 가능성을 살펴보았다. 2상유동양식의 판별과 관련해서는 유동양식에 따라 상관차원, Lyapunov 지수, 그리고 K-S 엔트로피 등을 구함으로써 정량적인 판별기법에 활용될 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 수조비등에서의 온도의 시계열 데이터로부터 비등의 카오스 특성이 있음을 알 수 있었으며, 이때에도 정량적 지수 등을 계산해 볼 수 있었다. 하지만, 이러한 정량적인 값들이 과연 2상유동의 다양한 조건에 대해서 일관성 있는 값을 보이는지는 아직 불분명하다. 왜냐하면 이와 같은 카오스 지수들은 데이터의 수, 끝개의 재구성결과 등에 따라 달라질 수 있기 때문이다. 따라서 이러한 카오스 해석 변수들의 2상유동 적용을 위해서는 체계적인 실험변수를 더욱 다양한 조건에서 구하여 축적할 필요가 있을 것이다. 또한 이와 병행하여 카오스 해석변수를 구하는 알고리즘 개발에도 더 많은 관심이 요구된다고 하겠다.

2상유동 해석과 관련하여 특별히 점검해봐야 될 것으로 판단되는 것으로는;

- (1) 2상유동변수의 시계열의 데이터 수가 카오스 해석변수에 미치는 영향,
- (2) 잡음이 포함된 실제 측정된 시계열 데이터가 다양한 2상유동의 조건에 대해서도 일관성 있는 카오스 특성 해석이 어느 정도의 신뢰도 범위 내에서 가능한지 여부,
- (3) 기존의 선형해석에서 해석할 수 없었던 특성을 분석하여 무엇을 새롭게 밝힐 수 있는지, 그리고 이로부터 새로운 2상유동의 해석모델을 제안 할 수 있는지 등을 들 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2001년도 학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다. (KRF-2001-002-E00193)

참 고 문 헌

- [1] I. Prigogine, I. Stengers, 혼돈으로부터의 질서 (Order out of Chaos), 고려원 미디어, 1989 (신국조 번역, 1993)
- [2] J. Monod, 우연과 필연 (Chance and Necessity), 삼성출판사, 1970 (김용준 번역, 1990).
- [3] 이상훈, 한승기, 황육렬-권태현, 김승환, Chaos (테마기획), 기계저널, 4월호, 2002.
- [4] J. Gleick, 카오스 (Chaos: Making a New Science), 동우사, 1987 (박배식, 성하운 번역, 1993).
- [5] 김상락, 비선형 시계열 분석과 예측, 경기대학교, 1997.
- [6] G. P. Williams, Chaos theory tamed, Joseph Henry Press, 1997.
- [7] Baker, G. L. and Gollub, J. P., Chaotic dynamics: an introduction, Cambridge University Press, 1990.
- [8] Delhay, J. M., "Multiphase instrumentation and experimental techniques", Multiphase Science and Technology (eds. Hewitt, G. F., Delhay, J. M. and Zuber, N.), Vol. 5, pp. 65-84. 1990.
- [9] Kwon, J. T., Kim, M. H., Lee, M. R., Oh, S. Y. and Lee, H. K., "Void-fraction measurement and flow pattern identification by capacitance method", Proceedings of the SAREK '93 Summer Annual Conference, pp. 16-22. 1993.
- [10] Franca, F., Acikgoz, M., Lahey, R. T. and Clausse, A., "The use of fractal techniques for flow regime identification", International Journal of Multiphase Flow, Vol. 17, No. 4, pp. 545-552. 1991.
- [11] Cai, Y., Wambsganss, M. W. and Jendrzejczyk, J. A., "Application of chaos theory in identification of two-phase flow patterns and transitions in a small, horizontal, rectangular channel", Journal of Fluids Engineering, Vol. 118, pp. 383-390. 1996.
- [12] Ito, K., Shoji, M. and Fukuda, K., "Chaotic identification of gas-liquid two-phase flow pattern in a vertical pipe", Proceedings of 4th JSME-KSME Thermal Engineering Conference, Vol. 1, pp. 759-763. 2000.
- [13] Takagi, Y. and Shoji, M., "Bubbling features from a single artificial cavity", Proceedings of the 4th JSME-KSME Thermal Engineering Conference, Vol. 1, pp. 421-426. 2000.
- [14] Shoji M., "Boiling chaos and modeling", Proceedings of 11th International Heat Transfer Conference, Vol. 1, pp. 3-21. 1998.

저자 소개



권정태 (權正泰)

1988년 서울대 기계공학과 졸업. 1993년,
1999년 포스텍(포항공대) 기계공학과 대학
원 석사 박사. 2003~2004년 일본 Kyushu
University Post-Doc.. 현재 호서대학교 공
과대학 기계공학과 조교수

Tel : 041-540-5803

Fax : 041)540-5808

E-mail : jtkwon@office.hoseo.ac.kr



권영철 (權寧哲)

1989년 부산대 기계공학과 졸업. 1991년,
1996년 포스텍(포항공대) 기계공학과 대학
원 석사 박사. 현재 선문대학교 공과대학
기계공학과 부교수

Tel : 041-530-2396

Fax : 041-530-2981

E-mail : yckweon1@sunmoon.ac.kr



김경민 (金景敏)

1988년 고려대 전기공학과 졸업. 1991년,
1996년 동 대학원 석사 박사. 2002~2003
년 캐나다 CENPARMI 방문교수. 현재 전
남대학교 공학대학 전자통신전기공학부 부
교수

Tel : 061-659-3316

Fax : 061-659-3319

E-mail : kkm@chonnam.ac.kr