「한국 시스템다이내믹스 연구」 제14권 제2호(2013. 7) : 5-30

시스템의 회복성에 대한 이론적 검토와 시스템 다이내믹스 방법론의 적용*

Considering the Concept of Resilience toward Applying to System Dynamics Approach

전대욱**
Jeon, Dae Uk

Abstract

The concept of resilience in complex and adaptive socio-economic systems, has been a buzz word in international societies and academies related to policy makers for sustainable development since some years ago. This paper deals with an application of the resilient concept, which has been told since the last some decades in the field of ecology and applied system sciences, to social science especially in system dynamics. First the author introduces the concept of equilibrium stability and resilience in simple dynamic models, and moreover provides the behavioral characteristics and examples of system resilience in terms of system dynamics. The concept of resilience in structural perspectives are also discussed with the topics of panarchy and adaptive renewal cycles, etc.

Keywords: 비선형 복잡계, 동적 균형, 안정성, 회복성 혹은 회복가능성, 적응적 재생주기 (nonlinear & complex systems, dynamic equilibrium, stability, resilience, adaptive renewal cycles)

* 본 논문은 2013년 한국지방행정연구원 기본과제의 일부 내용을 발췌하여 작성함

** 경영학 박사, 한국지방행정연구원 수석연구원(dujeon@krila.re.kr)

Ⅰ. 서론: 회복성 개념의 대두와 시스템다이내믹스 접근의 의의

최근의 대형재난과 각종 안전사고는 Ulrich Beck의 '위험사회(Risk Society)' 논의(홍성태, 2006)에 대한 신빙성을 가중시킨다. 산업과 과학기술의 발전은 불확실하며 예기치 못한 부작용으로서 미증유의 위험을 드러내고, 이러한 위험은 과거와 달리 한번 타격을 입히고 지나가는 것이 아니라 생활 속에 상존하며 불확실한 위해를 가한다(지행연, 2013). 과거 어쩌다가 한번씩 발생하는 대형재난이 인간생활과 시스템에 대한 외생변수로 취급되었다면, 21세기의 위험과 위기는 어디까지가 자연적이며 어디까지가 인위적인지 그 구분을 어렵게 하는 복합적・연쇄적 현상(WEF, 2013)이자, 인간의 사회경제적 시스템에 상존하는 동태적인 속성(Turner II et al., 2003; 유가영, 2008)을 지니고 있다.

인간의 사회경제적 시스템과 상호작용하는 위험이나 위기[1]는 그 시스템의 외생변수로 보기보다는 상호작용하는 시스템 내의 중요한 변수로 인식해야 한다(전대욱 외, 2013). 위험이나 위기를 분석대상 내에 포함된 시스템 내부의 구성인자로 볼 때, 이러한 위해요인에 대한 완화나 적응 등을 포함한 회복성의 제고전략은 위기에 대한 대응논리의 핵심이다(Fussel & Klein, 2006). 즉, 사회경제 시스템이 이러한 위험과 위기를 극복할 수 있는가는 위험요인에 대한 완화(mitigation), 충격에 대한 시스템의 민감도(sensitivity), 흡수력(absorbability)과 유연성(flexibility) 혹은 탄력성(elasticity), 위기 이후의 변화에 대한 적응력(adaptability) 등이 요구된다(Walker et al., 2004; Grimm & Calabrese, 2011). 결국 시스템이 위험과 위기로부터의 충격에서 지속가능하기 위해서는 총체적인 역량이 요구되는데, 이러한 역량을 시스템의 회복력 혹은 회복성(resilience)이라 볼 수 있다.

사회경제적 시스템에 대한 회복성(resilience) 제고전략의 개념화는 위기관리에 대한 초기의 문헌들(Wildavsky, 1988; 최병선, 1994)부터 제시된 바 있다. 다가오는 위기에 대한 예측이 어렵고 위기에 대한 대응방법 역시 알려지지 않은 경우에는 예방전략(prevention strategy) 보다 회복전략(resilience strategy)이 더 유효함이 입증되었다. 이러한 이론의 기원으로서 시스템의 '리질리언스(resilience)'는 20세기 중반 이후 생태계의 건전성을 논하는 생물수학(biomathematics) 분야의 응용수학자(Holling, 1973)에 의해 최초로 제시된 개념이다. 이후 시스템 이론의 학제간 적용과 더불어 공학, 경제학, 심리학 등 다양한 분야에서 그 개념이 차용되고 확산되었다(Folke et al., 2010, 2002; Gunderson, 2000).

한편 실제적인 관점에서는 최근 몇 년간 기후변화와 이로 인한 대형재난의 사례와 개연

1) 예컨대 화석연료의 사용에 의한 기후변화의 문제나, 혹은 과거 도시계획의 원칙상 격리되었던 산업위험시설물들이 도시가 팽창하면서 도심 속에 위치하게 되었거나, 혹은 박근혜 정부에서 근절을 천명한 4대 사회악과 같은 생활안전 위험을 들 수 있다.

성에 대한 확신이 커지면서, 그 불확실한 미래에 대한 적절한 대응전략으로 사회경제 시스템의 회복성(resilience)을 제고시키려는 전략이 전세계적으로 정책입안자들과 학자들 사이에서 회자되고 있다(ICELI, 2007). 특히 20세기 후반 이후, 위기의 강도와 빈도가 커지면서 국가 및 지역사회 대응역량의 한계를 드러내고, 결과적으로 물리적인 관점의 예방적 조치로부터 사회경제 시스템의 다양한 에이전트와 이해당사자간 네트워킹과 협력, 거버넌스를 통한 대응이 새로운 화두로 떠올랐다(Walker et al., 2002). 회복성 제고전략은 이러한 물리적인 예방 및 대응능력을 넘어서 본질적인 완화와 협력에 의한 대응, 적응을 포함한 새로운 위기관리 패러다임으로서 융합행정의 측면에서 새로운 담론으로 자리잡고 있다(Wilding, 2011; Morrow, 2008; Willbanks, 2008). 기후변화에 대한 지방정부의 대응과 관련되어 지난 2007년부터 「UN재난경감전략기구(UNISDR)」와 「이클레이-지속가능성을 위한 세계 지방정부(ICLEI)」 등에서 주도하는 국제포럼과 캠페인(UNISDR, 2012), 다양한 세계적인 연구기관의 보고서(Jha et al., 2013; WEF, 2013; Maguire & Cartwright, 2008)와 지속가능한 도시발전 계획에의 적용(FEE, 2013; Tyler & Moench, 2012; Fontanals et al., 2012; NYS 2100 Commission, 2012; UK DEFRA, 2011) 등은 이와 같은 흐름의 일환으로 볼 수 있다.

상기와 같은 국제적 흐름과 달리, 우리나라에서는 이론적으로나 실제적으로 아직은 이러한 개념에 대한 소개 단계에 그치고 있고 이론적인 개념으로서의 정립도 미흡하다. 최근 심리학 등 일부 학문분야를 중심으로 관련 개념이 도입되고, 지역사회의 기후변화대응 및 안전사회론이 확산되면서 '리질리언스(resilience)'를 '회복력', '복구력' 혹은 '회복탄(력)성' 등으로 직역하면서 관련 개념이 소개(정지범 외, 2009; 김현주, 2012; 전대욱, 최인수, 2013)되었다. 물론 이와 같은 직역은 리질리언스의 개념을 정확히 포착하지 못하므로, 본 연구에서는 시스템 다이내믹스의 이론적 관점에서 시스템의 외부교란(disturbances) 혹은 시스템 구조에 기인한 위기에 대한 시스템의 구조적, 행태적 속성으로서 리질리언스(resilience)를 '회복성'으로 칭하고자 한다.[2)]

회복성(resilience)에 대한 개념의 도입이 더딘 이유 중의 하나는 전술한 바와 같은 융합적 관점의 접근(Grimm, 2011; Folke, 2006)이기 때문이다. 시스템 이론과 생태학에서 출발한 리질리언스의 개념이 공학과 사회과학으로 확장되었지만, 적응적 복잡계를 전제로 한 시스템적 사고와 동태적 진화과정에 대한 이해를 바탕으로 한 회복성의 개념이 융합적 관점에

2) 한편 보다 실제적이고 지속가능성에 대한 보다 확장적・구체적 정책전략 혹은 이를 대체하는 새로운 발전패러다임으로서의 의미를 논할 때에는 이를 '회복가능성'으로 칭하는 것이 바람직하다. 리질리언스에 대한 호칭은 다양한 의도를 지닐 수 있지만, 다만 본 논문은 시스템 다이내믹스를 활용한 초기의 논의로서 리질리언스를 '회복성'으로 통칭한다.

서 논의되고 정책적으로 적용되기에 아직 우리나라의 학제간 연구의 수준은 높지 않다. 주어진 인과구조의 틀 내에서 현상을 설명하려는 기존의 환원주의적 방법론으로는, 피드백이 풍부한 시스템의 구조와 복잡성으로 인해 발생되는 시스템의 행태와 리질리언스라는 속성(Gunderson & Holling, 2002)을 이해하고 적용하기에는 많은 무리가 존재한다.

따라서 회복성과 같은 시스템의 속성과 그에 기인한 행태적 논의를 위해서는 시스템 다이내믹스 연구자들의 역할이 중요하다. 본질적으로 회복성(resilience)은 동적 균형(dynamic equilibrium or steady states)을 형성하는 동역학 작용이나, 혹은 외부교란(disturbances)에 의해 일시적으로 균형에서 이탈한 시스템이 균형으로 회복 혹은 목표값으로 접근하는 행태(goal-seeking behavior)를 의미한다(Senge, 1990; Sternman, 2000: 111-114). 또한 시스템 이론에서 동적 균형의 안정성은 시스템 다이내믹스에서 풍부한 음의 피드백 루프(balancing loops)로 이루어진 시스템 구조를 의미한다(전대욱, 정회성, 2010). 따라서 회복성은 시스템의 동태적 행태에 대한 구조적 탐색에 관한 접근체계로서 시스템 다이내믹스의 연구자들에게 일차적인 관심사일 수 밖에 없고, 시스템이 균형상태(steady state)에 도달하는 본원적 메커니즘을 규명하는 시스템 다이내믹스는 회복성을 이해하고 응용할 수 있는 우선적인 접근방법이 될 수 있다.

따라서 본 연구는 회복성(resilience)의 개념과 발전과정을 리뷰하고 시스템 다이내믹스의 관점에서의 적용에 대해 논의함으로써, 한국시스템다이내믹스학회에 소속된 연구자들이 회복성의 개념을 응용하는 데에 기여하고자 하는 의도로 추진되었다. 시스템 다이내믹스 연구자들은 복잡계와 적응적 진화과정에 대한 이해는 물론 동시에 사회과학적이며 정책적인 연구를 수행하는 융합적 관점의 연구자들로서, 경제, 사회, 정치, 환경, 도시, 정책 등이 링크된 복잡계의 회복성에 대한 '시스템 사고(system thinking)'를 통해 회복성을 증가시키는 기제와 정책을 탐구할 수 있다. 시스템 사고의 하위 개념으로서 이와 같은 '회복가능한 사고(resilience thinking)'를 통해 우리 사회의 불확실한 변화에 대한 적응적 진화전략을 수립하고 추진하는 데에 또한 기여할 수 있다(Folke, 2010).

이상과 같이 본 연구는 이와 같은 회복성(resilience)의 개념을 시스템 다이내믹스의 이론적 관점에서 정의하고 실제적인 관점에서 재조명하는 시도를 우선적인 목적으로 한다. 회복성의 개념은 다양한 학문분야에서 응용되고 발전되어 왔지만, 본 연구에서는 그 원형이라고 할 수 있는 시스템 이론과 융합학적인 관점에서 개념적 발전과정을 소개하고, 시스템 다이내믹스의 관점에서 이러한 개념과 논의를 해석하고자 한다. 이러한 과정은 융합학의 한 분야에 자리잡고 있는 시스템 다이내믹스의 이론적인 진보와 학제간 연구에서 제시된 최신 이론의 적용, 아울러 실제적이며 정책적인 시스템 다이내믹스의 활용 측면에서도 매우 유용하다.

Ⅱ. 공학적 회복성(Engineering Resilience)과 시스템 다이내믹스

앞서 밝힌 바와 같이 회복성의 개념은 생태계의 연구자들에게서 처음 출발했는데, 예컨대 “생태계에서 산불 등과 같은 외생적 충격이 도래할 때 생태계는 회복가능한가?”와 같은 연구문제를 중심으로 논의되어 왔다. 산불과 같은 시스템 외부의 충격은 상당수의 생물종 개체군이 급감하면서 시스템의 기능적 저하가 발생하게 된다. 이를 회복하는 데에는 일정 시간이 필요하거나 혹은 종다양성이 크게 훼손되는 경우 종전과 같은 상태로 회복불가능한 경우도 발생한다. 또한 회복시간이 긴 경우 산불의 발생주기 등에 따라 회복이 불가능할 수도 있다(Baek, 2008).

시스템 다이내믹스(System Dynamics)의 관점에서 이를 본다면 다음과 같은 해석이 가능하다. 우선, 시스템이 어떤 동적 균형상태(dynamic equilibrium 혹은 an attractor)에 머물 때, 이는 시스템 내의 균형 피드백루프(balancing feedback loop)가 작용한 결과이다. 균형루프는 시스템이 항상 일정수준(steady-states)에 머무르게 하는 항상성(homeostasis)의 근원이 되는 역학작용이다. 상기 생태계의 예에서 산불은 먹이사슬 상의 종들의 개체수를 줄이는 충격을 통해 개체수를 일정수준으로 유지시켜주는 동적 균형상태를 이탈하게 한다. 이 경우 산불발생지에서 동식물이 원래대로 서식하는 수준으로 회복하는 데에는 수십년에서 수백년 정도의 긴 시간이 걸린다.

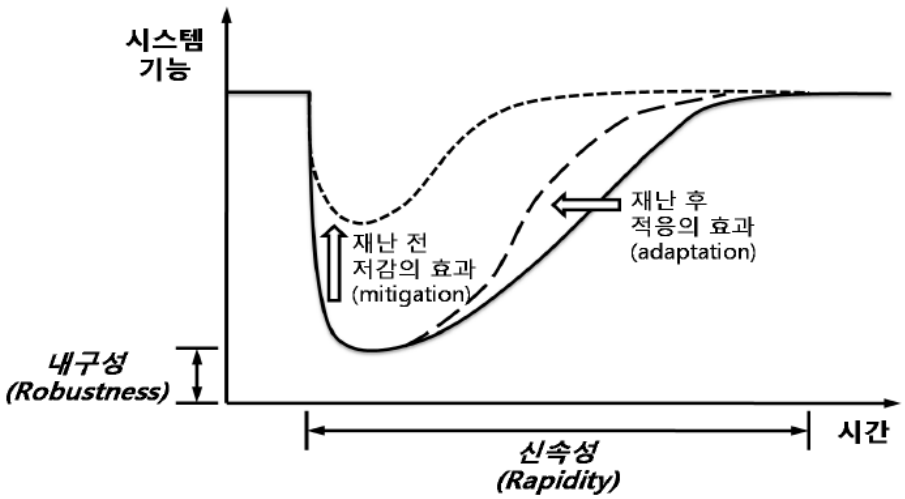
생태계의 경우 고립된 지역이 아니라면 개체군의 이동과 전파로 인해 인근 생태계로부터의 이전(migration)에 의해 원래 균형상태로의 회복이 가능할 것이다(전대욱, 김도훈, 2011). 다만 산불의 면적(번지는 정도) 혹은 습도, 목질 등의 자연조건과 취약성은 충격의 크기를 결정하는 요인이 된다. 어쨌든 시스템 내에 풍부한 균형루프가 존재한다면 균형으로부터 이탈한 시스템 상태를 원상태로 회복시킬 수 있고, 이 때 균형루프의 존재는 시스템의 회복성에 대한 필요조건으로 해석할 수 있다. 일반적인 시스템에서는 이러한 시스템의 속성을 외부충격에 대한 ‘저항성(resistance)’ 혹은 ‘내구성(robustness)’으로 표현(WEF, 2013)하며, 이러한 속성은 시스템 회복성의 하위개념으로 이해할 수 있다.

반면 시스템이 큰 충격을 받을 때 원래 균형상태로 복귀(bouncing back)되지 않고 붕괴된다면, 이는 강화 피드백루프(reinforcing feedback loop)가 작용하기 때문이다. 예컨대, 강화루프는 초기조건의 민감한 차이를 증폭시켜 돌이킬 수 없는 큰 차이를 발생시키는 경로의존성(path-dependency)이나 나비효과(butterfly-effect)와 같이 균형으로부터 이탈시킨 작용을 가속화시킨다(최창현, 2000). 따라서 시스템 회복가능성을 보장하기 위해서는, 시스템내 역학

작용에 있어서 강화작용(루프) 보다 균형작용(루프)들이 진화단계(dynamic phase)의 전 기간 동안 '지배적 작용 혹은 루프(dominant feedback loops)'로 작동해야 한다(전대욱, 김도훈, 2011). 예컨대 생물종의 '다양성(diversity)'과 같은 속성들은 생태시스템의 균형작용을 배가시켜 회복가능성을 높여 준다. 따라서 시스템이 회복가능(혹은 지속가능)하려면 사회경제적 시스템 등에서도 다양성의 확보가 매우 중요하다(WEF, 2013).

회복성을 설명하기 위한 시스템 다이내믹스의 또 다른 관점은, 균형으로부터 도달하는 동태적 경로(trajectory)와 이를 결정짓는 시차(time delay)이다. 충격과 기능저하를 빨리 감지하고 이를 균형작용으로 연결시키는 행위까지의 시차는 균형으로의 회복속도를 결정짓는다(Sternman, 2000: 114-118). 즉 충격과 기능저하에 대한 즉각적 모니터링과 손상부문의 빠른 복구는 원래의 기능적 균형으로 회복하는 시간을 줄인다.

따라서 시스템의 회복가능성을 측정하는 가장 손쉬운 방법은 '충격시점부터 원래의 균형으로 회복하는 시간(return time)'을 통해 측정이 가능하다([그림 1] 참조). 예컨대 특정기능을 담당하는 하위시스템들을 모듈화(modularity) 하는 것은 시스템의 공학적 신뢰성(reliability)을 높이고, 이러한 복구시차를 앞당겨서 균형으로의 빠른 회복을 가능하게 한다. 또한 시스템 내에 평상시 필요없다고 생각하는 잉여자원(excess capacity)들은 위기상황에서 더 이상 쓸 수 없는 기능들을 대체하는 데에 유용하다. 따라서 이러한 '중첩성(redundancy)' 혹은 '가외성(excessiveness)' 역시 시스템의 회복성을 결정하는 하위 속성으로서 생각할 수 있다(Martin-Breen & Anderies, 2011; WEF, 2013).



[그림 1] 공학적 회복가능성(engineering resilience)의 개념과 측정

자료: McDaniels et al. (2008) 및 김현주(2012)

이상과 같이 회복성의 개념과 측정에 있어서 '회복속도'를 중심으로 접근하는 것을 '공학적 회복성(engineering resilience)'이라 칭한다(Folke, 2006). 균형상태(equilibrium or steady state)에 있던 시스템이 섭동(perturbations) 혹은 외부교란(disturbances)에 의해 균형이 일시적으로 깨질 때 이에 대한 회복시간으로 회복성을 정의한 초기 생태학자들의 정의(Holling, 1973)가 그 기원이다. 이러한 개념의 회복성은 단순기능을 수행하는 어떠한 단위시스템을 전제로 한 경우 이해가 용이하다. 실제로 공학 분야에서 단순기능을 수행하는 시스템(single-function system) 혹은 객체(object)들의 경우 이러한 회복가능성의 측정수단이 활용될 수 있다. [그림 1]은 자연재난에 대해 도시기능의 피해를 기능별 혹은 미시적으로 보았을 때의 회복성을 묘사한 것이다.

요컨대 이러한 공학적 회복성은 균형루프가 전제된 '내구성'있는 시스템에서 '회복속도' 혹은 '신속성'으로 표현된다(Pimm, 1991). 즉 공학적 회복성은 동역학 체계의 반응속도로 측정하므로 시스템의 행태적인 관점이라고 할 수 있으며, 아울러 회복시간 혹은 균형회복 경로를 앞당기기 위해서는 즉각적인 모니터링 등 대응체계, 모듈화나 잉여자원의 가외성 등이 중요한 정책수단으로 제시된다. 또한 균형루프, 즉 분권화되고 다양화된 에이전트들의 네트워킹 시스템 등 내구성있는 시스템은 회복가능성과 회복속도를 더욱 앞당기게 할 수 있는 정책수단으로 이해될 수 있다.

Ⅲ. 회복가능한 시스템의 속성: 균형해의 안정성에 관한 논의

지금까지 살펴본 공학적인 개념의 회복성은 시스템이 균형으로 회복하지 못하지만 여전히 바람직한 기능을 수행하는 경우 의미가 퇴색된다. 이때 "단지 시스템이 회복가능하지 못하다"라고만 표현할 것인가를 두고 여러 가지 문제가 제기될 수 있다. 예컨대, 산불이 난 생태계에서 산불의 충격이 한참 지난 이후 어떤 생태계가 복원되긴 하였는데, 생물의 종류나 개체수의 균형이 산불이전의 생태계와는 다른 모습으로 복원된 경우는 어떻게 보아야 할 것인가? 물론 이와 같은 상황 역시 시스템은 회복성을 가진다고 보아야 할 것이다(Peterson et al., 1998; Folke et al., 2004). 왜냐하면, 충격으로 인해 균형에서 이탈한 시스템의 상태는 전과는 다른 새로운 균형점을 형성한 것에 불과할 뿐 충격으로부터 생태적 기능을 회복한 것에는 변함이 없기 때문이다.

공학적 회복성은 단일기능의 상대적으로 단순한 시스템을 가정하고 있으므로, 동역학 작용으로 볼 때도 소수의 피드백루프만이 존재하고 1~2개의 균형루프가 전체 시간영역(time domain)에서 지배적이다. 시스템의 동적 균형점(attractor 혹은 equilibrium state)은 단일 균

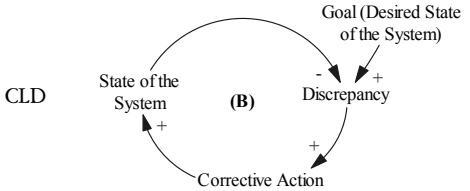
형점(single stability)으로서 항상성(homeostasis)이 존재한다. 그러나 다소 복잡한 비선형 동역학 시스템(complex dynamic systems)에서는 동적 균형상태가 복수개 존재(multiple steady-states)하는 경우가 발생한다(Grimm & Calabrese, 2011; Ludwig et al., 1997). 이 경우 기존 균형점을 이탈시킨 충격은 시스템의 상태를 기존 균형으로 복귀시키지 못하고 새로운 균형점으로 이끈다.

1. 단순한 시스템에서의 안정성과 회복성

이러한 단순하고 복잡한 시스템의 균형과 안정성에 대한 논의는 회복성을 이해하는 데에 중요한 단초를 제공한다. 즉, [그림 2a] 및 [그림 2b]에 나타난 목표값 접근행태와 같은 간단한 시스템으로부터 균형의 안정성(stability)에 대한 논의를 시작함으로써 회복성(resilience)의 논의를 점차로 복잡한 시스템으로 확장해 보자.

우선 [그림 2a]의 목표값 접근행태를 볼 때, 균형점 X = a 에 도달해 있는 시스템이 외부충격을 받아 목표값에 미달된 X < a 로 되었다고 가정해 보자. 이 경우 a - X 는 양의 값을 갖게 되어, 즉 dX/dt > 0 이므로 X는 목표값을 향해 증가하게 된다. X > a 인 경우라면 dX/dt < 0 이므로, X는 목표값을 향해 감소한다. 즉 목표값은 안정적 균형(stable equilibrium)으로서 항상 이를 균형을 유지하려는 균형루프의 작용을 받는다. 이와 같은 균형의 안정성(stability)이 확보되어 있는 경우라면, 즉 균형루프가 지배적으로 작용한다면 시스템은 회복가능하다.

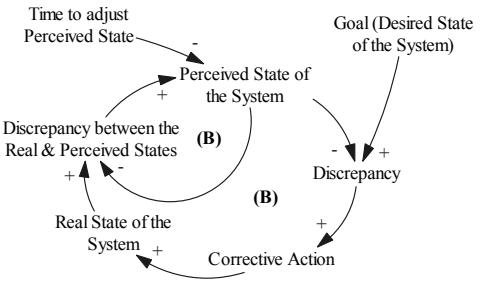
반면, [그림 2b]와 같이 시간지연 효과가 있는 경우라면, dX/dt 및 dY/dt 에 대한 균형근방의 진행방향의 선형근사 테스트(야코비 편미분 행렬의 아이겐 밸류 테스트)를 통해 균



수리모형 $\frac{dX}{dt} = a - X$

동적균형 $\frac{dX}{dt} = 0$ where $X = a$

[그림 2a] 목표값 접근행태



$\frac{dX}{dt} = a - Y, \quad \frac{dY}{dt} = \frac{X - Y}{b}$

$\frac{dX}{dt} = \frac{dY}{dt} = 0$ where $X = Y = a$

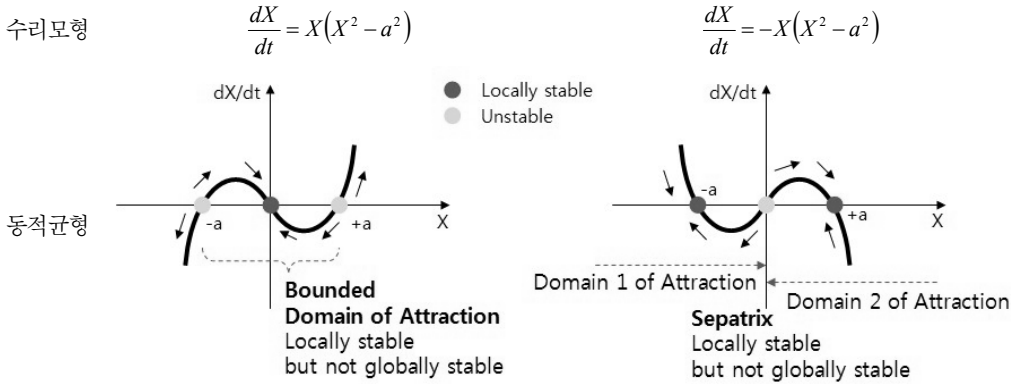
[그림 2b] 시간지연 포함 목표값 접근행태

형의 안정성을 파악할 수 있다(Izhikevich, 2007; Goncalves, 2009). 이미 결과는 널리 알려져 있듯이, 시간지연 효과 b 가 작은 경우 균형에 수렴하나 큰 경우 균형으로부터 발산진동하게 된다. 부연하자면, 이러한 균형점은 시간지연 효과(time delay parameter)가 크지 않다면 안정적(stable) 균형이며, 그렇지 않다면 불안정적(unstable) 균형이다. 비어게임(beer game)에서 유통시스템의 시간지연 효과가 큰 경우 충격에 시스템은 불안정적이다(Senge, 1990). 즉 이 경우, 시간지연 효과는 원래의 균형으로 회복시키느냐 아니면 발산시키느냐를 결정하는 인자가 되며, 시간지연 효과가 큰 경우 회복속도는 무한대가 되어 회복가능하지 않다. 이러한 단순한 시스템(simple systems)의 균형에 대한 안정성(stability)은 공학적 회복성을 측정하는 기준이 된다.

2. 복잡한 시스템에서의 안정성과 회복성

그러나, 복수의 균형이 존재하는 시스템에서는 균형의 안정성에 따라 시스템의 회복성에 대한 측정은 복잡해진다. 우선 [그림 3a] 및 [그림 3b]와 같이 분기현상(bifurcation)을 야기시키는 단순한 형태의 시스템에서 분기된 복수균형들의 안정성을 논함으로써 회복성에 대해 논해보자.

[그림 3a]에서, 세 개의 균형점을 볼 수 있다. 이 중 2개의 균형점은 불안정한 균형점이며 가운데 균형점은 안정적이다. 이 안정적 균형점에 시스템이 머물다가, 미세한 외부충격으로 인해 시스템 변수 X가 개구간 (- a, a) 범위 내에서 균형을 이탈했다고 가정해 보자. X가 0보다 작은 범위에 있으면 dX/dt > 0 이므로 X가 증가되며, 반대로 X가 0보다 큰 범위에 있으면 dX/dt < 0 이므로 X가 감소한다. 즉, 최소한 구간 (- a, a) 범위 내에서는 국



[그림 3a] 복수균형(Bifurcation) #1 [그림 3b] 복수균형(Bifurcation) #2

자료원: Ludwig et al. (1997)

지적으로 안정적(locally stable)이며, 이 구간은 균형으로 수렴시키는 일정부문의 영역(bounded domain of attraction)이다(Ludwig et al., 1997). 이 영역을 구분하는 것은 불안정한(unstable) 두 개의 균형점으로, 새로운 균형점으로 전이시켜 원상회복을 불가능하게 만드는 임계치로 볼 수 있다.

반면 [그림 3b]에서와 같이 두 개의 안정적 균형점과 한 개의 불안정적 균형점을 갖는 경우를 가정해 보자. 만약 시스템 상태 X가 불안정적 균형점인 0에 있다고 가정할 때, 미세한 충격이 와서 상태 X가 약간만 흔들려도 상태는 두 개의 국지적으로 안정적(locally stable)인 균형점인 －a 혹은 +a 로 끌리게 된다. 균형 수렴영역(domain of attraction)은 두 개로 나뉘게 되며, 이 때 수렴영역을 둘로 나누는 0과 같은 점은 분기점(sepatrix)이라 칭하며(Ludwig et al., 1997), 마찬가지로 새로운 균형점으로 전이 및 원상회복을 불가능하게 하는 임계치로 볼 수 있다.

이러한 비선형 시스템에서는 공학적 회복성의 개념을 적용하기에 다소 난점이 존재한다. [그림 3a]에 제시된 시스템은 수렴영역이 제한적(bounded)이고 [그림 3b]에 제시된 시스템도 수렴영역이 둘로 나뉘어져 있으므로, 시스템 외부의 큰 충격으로 인해 시스템 상태변수 X가 수렴영역의 임계치를 벗어나는 경우, 시스템은 원래의 균형으로 복귀하지 못하고 새로운 균형으로 전이한다. 이 때, 전술한 것처럼 새로운 균형을 형성하는 것을 회복가능한 수준으로 볼 수 있다면, 단순한 원래 균형으로의 회복속도로 회복성을 정의하고 측정하는 것은 무리가 있다. 즉 보다 복잡한 시스템에서의 복수균형간 전이현상을 포함한 새로운 회복성에 대한 정의가 필요하다.

Ⅳ. 생태적 회복성과 적응적 복잡계에서의 회복성에 대한 이론적 검토

1. 생태적 회복성에서의 이력현상과 다중안정성

회복성의 연구를 주도했던 생태시스템론자들이 고민했던 복잡계에서의 생태적 회복성(Folke et al., 2010, 2002)을 논하기 위하여, 조금 더 복잡한 생태계 시스템의 예를 들어본다. ‘이중 안정성(bi-stability)’라고 불리우는 가문비 싹벌레(spruce budworm) 생태계 모델의 예(Ludwig et al., 1978)를 단순화시키고 시스템 다이내믹스 학회원들에 익숙한 형태의 시스템으로 바꾼 결과는 [그림 4]와 같다. 그림에서 피식량 결정식(Holling’s Type III functional response)은 개체밀도가 높아지는 경우(모델에서는 반포화율 a가 높이지는 경우) 포식자로부

터 종내 협력 등으로 인해 피식률이 낮아지는 경우를 상정한 모델이다(Dawes & Souza, 2013).

이 때, R = r・a/b, Q = K/a 로 치환하고, 동적 균형점들의 안정성을 보기 위한 '안정성 경관도(stability landscape)'[3]를 도출한 결과는 그림 4의 하단에 제시되어 있다. 이는 가문비 나무가 증감하는 상황을 가정한 결과이다. 즉, 숲이 우거지면서 싹벌레의 먹이인 나뭇잎이 증가함에 따라 한계용량 K와 함께 반포화율 a가 점차로 증가하는 상황, 즉 Q는 고정되었으나, R은 증가한다는 가정이다. 경관도에는 반포화율의 증가와 관련된 R의 변화에 따른 세 종류의 싹벌레의 개체밀도 X의 동적 균형점이 제시되어 있다. 아래와 위의 두 실선은 안정적 균형(stable equilibrium)을 의미하며, 가운데의 점선은 불안정적 균형(unstable equilibrium)을 의미한다.

이러한 안정성 경관도를 기초로 생태계의 변화에 대한 시스템 사고의 결과는 다음과 같다. R이 R_1보다 약간 낮은 점에서 증가하기 시작하면 균형점은 아래쪽의 실선을 따라 이동한다. 이때 계속 증가하여 R_2를 상회하면 균형점은 아래쪽의 실선에서 위쪽의 실선으로 갑자기 증가하게 된다. R_2 근방에서, 싹벌레의 개체밀도 X가 불연속적으로 증가하는 구간이 존재한다. 반대의 경우를 생각해 보면, R_2 보다 큰 R 값을 가질 때에는 R값이 감소하면서 위쪽의 실선을 따라 움직이나, 계속 감소하여 R_1보다 더 낮아지게 되면 갑자기 아래쪽의 균형점으로 전이하게 된다. 이 때 개체수는 급감한다.

중요한 것은 구간 (R_1, R_2)에서는 증가할 때 경로와 감소할 때 경로가 다르다는 점이다. 혹은 구간 내에서 증감을 멈춘다면, 증감이전의 균형점과 다른 균형점을 형성하게 된다. 이와 같이 시스템의 복잡성으로 인해 특정 시스템 상태의 영역에서 이중 안정해를 갖는 현상을 이력현상(hysteresis)이라고 칭한다(Scheffer et al., 2001). 4.2에서 다룬 단순한 형태의 비선형 모델에서, 외부충격 등으로 인한 파라메터의 변화(예: a=0 → a>0)로 균형점이 갈라지는 카오스 행태(chaotic behavior)로서의 분기현상(bifurcation)을 '안정성의 약한 손실(soft loss of stability)'로 본다면, 이와 같은 시스템 복잡성으로 인한 다중안정성은 '안정성의 강한 손실(hard loss of stability)에 해당한다(Ludwig et al., 1997).

이러한 비선형 시스템에서의 회복성을 논하기 위해 보다 넓은 시스템 총합적 관점에서 변화를 가정해 보자. 위 모델은 싹벌레의 개체밀도 변화에 대한 시스템이었으나, 장기적인 관점에서 싹벌레와 나무를 동시에 고려한 시스템 사고의 결과는 다음과 같다. 나무의 증가로 인한 완만한 싹벌레의 증가가, R_2를 지나면서 돌연 급격히 증가하게 된다. 급격한 증가는 다시 나무의 감소를 야시기키고, 개체밀도가 급격히 늘어난 상태에서 나무가 빠르게 감

3) Peterson et al. (1998) 및 Folke et al. (2004) 참조.

수리 모형

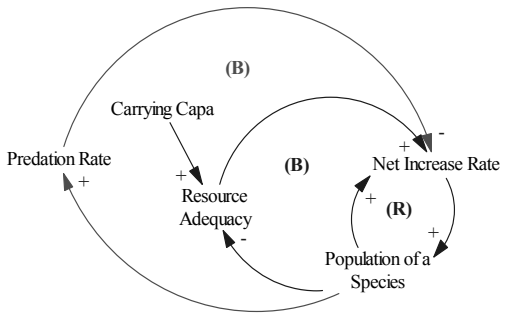
$$\frac{dX}{dt} = rX\left(1-\frac{X}{K}\right) - b\frac{X^2}{a^2+X^2}$$

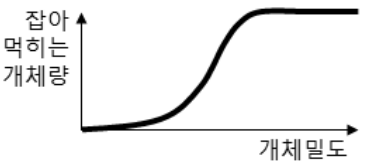
[참고] 첫 번째 항은 통상적 S 곡선, 두 번째 항은 피식량을 의미함

X: 싹벌레(budworm)의 개체밀도
r: 순성장률(net intrinsic growth rate)
K: 한계용량(carrying capacity)
b: 최대피식률(max predation rate)
a: 반포화율(semi-saturation rate)

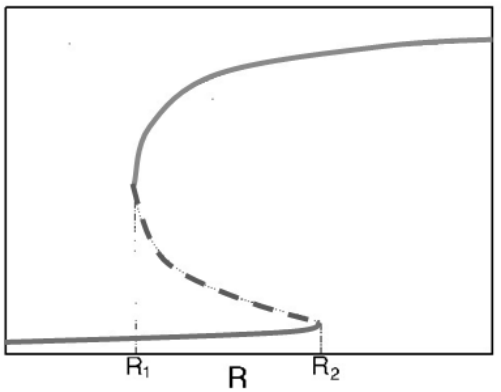
※ 단, 여기서 피식량 (predation rate)은 다음과 같은 Holling의 피식관계식 III형(Type III functional response)으로서 다음과 같은 그래프 함수와 동일함.

CLD 및 기타





안정성 경관도



실선: locally stable equilibrium의 궤적

점선: Unstable equilibrium의 궤적

[그림 4] 이중안정성(multi-stability)을 보이는 생태계 모델

자료원: Ludwig et al. (1997)

소해도 개체밀도는 이력현상에 의해 완만히 감소한다. 나무의 감소속도는 빨라지게 되고, 다시 R_1보다 작아지게 되면 싹벌레가 급격히 감소하는 주기를 형성한다.

이러한 복잡계를 전제로 한 회복성은 단순히 공학적인 관점에서 일률적으로 정의하고 측정하기 어렵다는 사실을 일깨우고 있다. 싹벌레의 개체밀도 관리라는 단기적 입장에서 보면 불연속적인 증가와 감소로 인한 회복성의 상실로 볼 수 있으나, 반대로 나무를 동시에 고려한 장기간의 생태계의 지속가능성의 측면에서는 회복성이 있다고 볼 수 있다. 요컨대 이력현상과 같은 다중안정성을 내포한 더욱 복잡한 시스템에서의 회복성은, 시스템 총체적인 관점과 다양한 충격과 변화에 대한 보다 적응적인 관점에서 논할 필요가 있음을 알 수 있다. 이러한 흐름 하에, 회복성의 개념에 대한 논의는 생태계 뿐만아니라 인간의 사회

시스템과 생태적인 상호작용을 포함한 논의로 확장된다. '적응적 복잡계(complex and adaptive systems)'[4]에서의 회복성에 대한 논의는 다음 장에 제시된다.

2. 적응적 복잡계에서의 회복성(resilience in complex and adaptive systems)

전 장에서 논한 바와 같은 복잡계에서 균형의 다중 안정성(multi-stability)과 시스템 외부 충격에 따른 균형전이와 같은 현상을 '균형레짐의 변화(shift of an equilibrium regime)'로 정의한다(Folke et al., 2004). 정책학이나 행정학에서 흔히 쓰이는 '레짐(regime)'과 마찬가지의 의미로서, 시스템과 다이내믹스의 관점에서 '균형 레짐'은 수학적인 개념을 차용하여 하나의 동적 균형을 형성하는 시스템의 구조와 파라메터 등을 의미한다. 외부충격이 닥치는 경우, 그 충격의 크기에 따라 원래의 균형을 형성하던 시스템의 조건들의 변화(특히 시스템의 전과 달라진 파라미터 등)로 인해 새로운 균형점으로 전이하는 것을 '균형레짐의 변화'로 볼 수 있다.

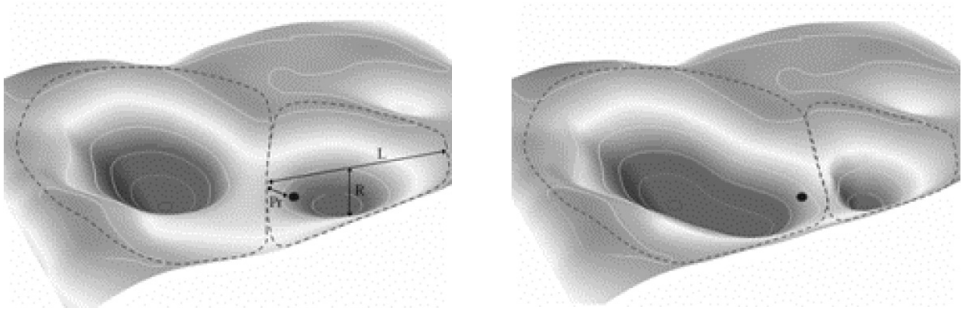
[그림 5]와 같이 균형레짐의 변화(5a→5b)를 설명하는 안정성 경관지도(stability landscape)[5]를 가정해보자. 우선, 공학적 회복성인 회복속도(return time)는 [그림 5a]에서는 세 가지 요인으로 제시된다. 균형레짐 변화 전의 회복성은 결국 기존의 균형으로 복귀하는 것으로서, 이를 결정하는 요인은 1) 융통성(Latitude: 임계점, 즉 수렴영역의 경계를 벗어나 회복불가능 직전까지의 시스템 변화범위), 2) 저항성(Resistence: 시스템 변화가능성, 충격으로부터 현 상태가 요동칠 가능성), 3) 불안정성(Precariousness: 수렴영역의 경계를 벗어날 개연성, 경계로부터의 거리)이다(Walker et al., 2004).

[그림 5a]의 경관지도를 흙으로 만든 지형이라고 생각해보자. 현재 점으로 표시된 곳에 공이 위치한다고 친다면, 이 공은 오른쪽 구멍으로 빠질 것이며 시간이 지나면 구멍의 제일 깊은 곳(attractor)에 정지할 것이다. 그러나 이 때 이 공간을 심하게 흔들어보자. 흔드는 힘이 크지 않다면 요동치다가 여전히 오른쪽 구멍에 다시 빠질 것이다. 반면 흔드는 힘이 매우 커서 공이 오른쪽 구멍에서 빠져나와 왼쪽 구멍으로 빠지는 영역으로 넘어오거나, 심지어는 흔드는 힘이 너무 쎄서 지형이 변하는 경우([그림 5a]에서 [그림 5b]로 변화), 공은 왼쪽 구멍의 제일 깊은 곳(another equilibrium or attractor)에 정지할 것이다. 이러한 큰 충격이 오는 경우 공은 여태까지 경험하지 못한 새로운 길을 따라가면서 새로운 균형으로 접어든다.

---

4) Mitleton-Kelly (2003) 참조.

5) 그림과 같은 3차원 안정성 경관지도는 2차원 상태공간(2-dimensional state space: 2개의 상태변수로 이루어진 시스템)의 동적 균형(attractor or dynamic equilibrium)으로의 수렴궤적에 관한 위상공간(phase portrait)의 입체적 표현으로서, 이러한 표현방법은 균형 수렴영역(basins of attraction)이나 그 경계를 선명하게 표현한다는 장점을 지닌다.



〈5a〉 충격 이전의 균형레짐. 여기서 점으로 표현된 현 상태에서 우측의 균형점으로 끌림. 이 때 회복성은 수렴영역의 범위(L: 현 균형을 중심으로 한 융통성), 균형으로 끌어당기는 힘(R: 균형이탈에 대한 저항성), 현 상태에서 새로운 균형으로 이탈할 위험성(Pr: 불안정성)에 의해 결정

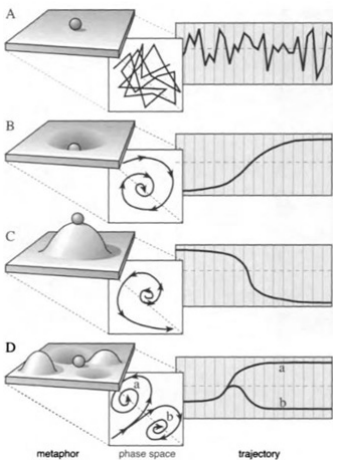
〈5b〉 충격이 발생으로 인해 시스템 조건들의 변화가 새로운 균형레짐을 형성하는 경우. 좌측의 수렴영역은 확대된 반면 우측의 영역은 축소됨에 따라, 점으로 표현된 현 상태가 충격 이전과 같다고 하더라도 종전과 같은 우측의 균형으로 회복하지 않고 좌측의 새로운 균형으로 전이

자료원: Walker et al. (2004)

[그림 5] 두 개의 '균형 수렴영역(basins of attraction)'을 지닌 시스템에서 충격으로 인해 발생하는 균형레짐의 변화 (L=Latitude 융통성, R=Resistance 저항성, Pr=Precariousness 불안정성)

[그림 6]과 〈표 1〉은 '자연계에 대한 4가지 상이한 해석(4 myths of nature)'으로서, 주어진 시스템(여기서는 자연계)을 복수의 균형점이 존재하는 비선형적이며 적응적인 복잡계(Nature Resilient & Evolving)로 인식할 때, 시스템은 진화과정을 거치면서 임계점(threshold)을 넘어 급격한 균형점의 가역적·비가역적 변화를 초래함을 전제한다. 이러한 변화가 한 번에 끝나지 않고 지속적으로 발생된다면 우선적으로 적응(adaptation)이 요구되며, 아울러 변화로 인해 시스템의 여러 가지 조건들이 기존의 시스템을 지속시키기 어렵다면 새로운 시스템을 창출하는 전환(transformation)이 요구된다(Gunderson et al., 2002).

따라서 상기와 같은 동태적으로 진화하며 새로운 균형으로 변화하는 적응적 복잡계(adaptive & complex systems)의 회복성은, 〈표 1〉에서 제시한 것과 같이 조직적인 적응능력(adaptive capacity) 혹은 필요시 전환능력(transformability)을 의미한다(Folke et al., 2010, 2002). 단순한 시스템에서 내구성과 대응을 통한 복구역량이 회복성의 핵심요인인 반면, 적응적 복잡계에서는 "시스템이 얼마나 자기조직화(self-organization)를 통해 대응할 수 있는가", 즉 "시스템이 자기조직화를 통한 학습(learning)과 혁신(innovation)을 창출하고, 새로운 변화에 대한 적응력(adaptative capacity)과 유연성(flexibility)을 갖추고 이를 얼마나 제고시킬 수 있는가" 등이 적응과 전환을 이끄는 회복성으로 요약된다. 이러한 논지는 Ostrom(2009)의 노벨 경제학상 수상논문 '경제 거버넌스 구축을 통한 공유지의 관리에 대한 이론'과 일



[그림 6] 자연계에 대한 4가지 해석 (좌=metaphor 안정성 경관지도, 중=phase space 상태공간 변화궤적, 우=trajectory 시간축에서 상태변수 변화궤적)

〈표 1〉 좌측 [그림 6]의 자연계에 대한 4가지 해석의 특징과 파생논리

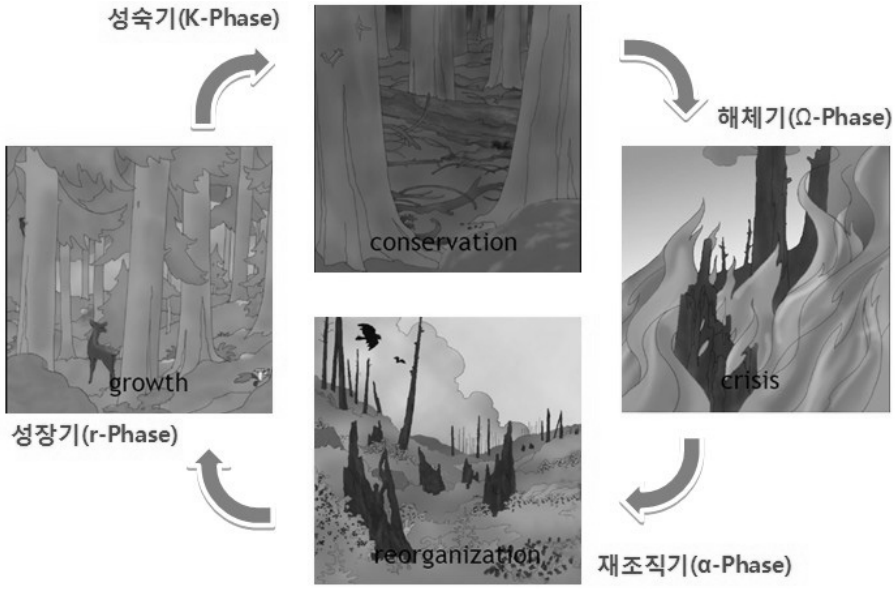
	Stability	Processes	Politics	Consequence
A. Nature Flat	none	stochas-tic	random	trial and error
B. Nature Balanced	Globally stable	negative feedback	optimizer or return to equil-ibrium	pathology of surprise
C. Nature Anarchic	Globally unstable	positive feedback	Precaut-ionary principle	status quo
D. Nature Resilient	multiple stable states	exogenous input and internal feedback	maintain variabilty	recovery at local scales or adaptation; structural surprise
↓				
D. Nature Evolving	shifting stability land-scape	multiple scales and discon-tinuous structu-re	flexible and actively adaptive, probing	active learning and new institutions

자료원: Gunderson et al. (2002: 11-12)

맥상통한다.

Ⅴ. 적응적 복잡계의 회복성 모델: 적응적 재생주기론과 범계성

아울러 생태학자와 시스템론자, 사회과학자들의 최신 융합적 논의의 결과물들에 대해 설명하고자 한다. 융합론자들은 회복성을 설명하는 새로운 모델로서 '적응적 재생주기(adaptive renewal cycles)'를 주창하고 있으며, 적응적 복잡계의 내외부의 위계간 통합적 모델로서 '범계성(Panarchy: pan+hierarchy)'을 설명하고 있다(Berkes et al., 2003; Walker et al., 2004). 그러나 범계성과 적응적 재생주기는, 아직까지 검증된 이론이라기 보다는 사회생태적 진화과정과 회복성에 대한 휴리스틱(heuristic) 혹은 비유적 모델(analogy)에 가깝다(지행연, 2013). 그러나 본 모델은 적응적 복잡계에서의 사회생태적인 재생주기와 회복성의



[그림 7] 숲 생태계의 순환과정으로서 적응적 재생주기(adaptive renewal cycles)

자료원: Peterson (2011)에서 재구성

개념을 정확히 제시하고 또한 현실적인 설명력도 매우 높다고 볼 수 있다는 의의를 지닌다.

우선, '적응적 재생주기'는 [그림 7]과 같이 적응적 복잡계로서 생태계의 흥망성쇠(흥망성쇠)에 관한 주기적 순환모델을 의미한다. 이 시스템의 물질・에너지 및 영양분의 순환의 측면에서 본다면, 생태계에서 숲이 자라나는 초기의 성장단계(r-phase: exploitation phase, period of exponential change)에서 숲의 영양분과 에너지를 차기하기 위한 생물종간의 경쟁이 이루어진다. 이러한 경쟁의 결과 특정 생물종이 숲의 지배적 종으로 등장하게 되면서 숲의 생태계가 성숙단계(K-phase: conservation phase, growing stasis and rigidity)로 접어든다.

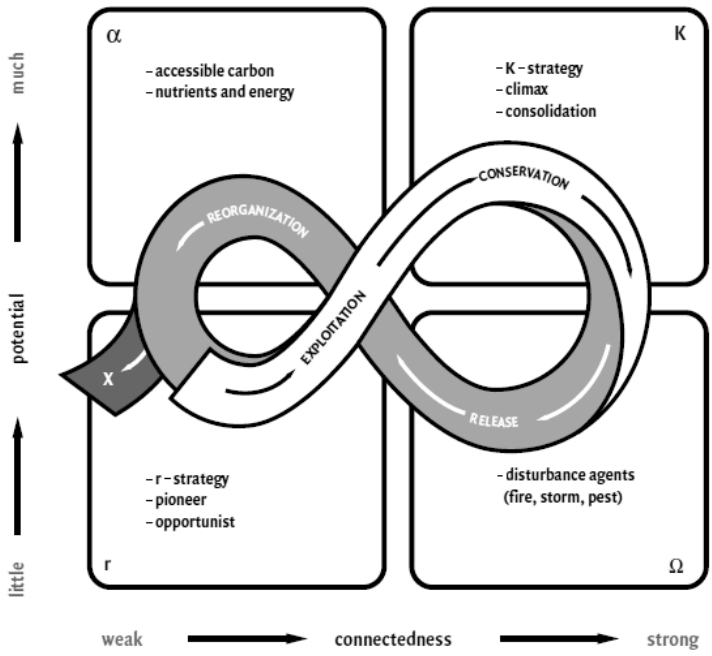
숲의 에너지와 영양분에 대한 과잉조직화가 초기의 풍부한 생물종 다양성은 외부의 충격으로부터 비교적 강한 반면, 노후화된 고목으로 빽빽한 숲의 생태계에서는 영양분의 독점과 과잉조직화, 생물종의 다양성이 감소[6]되면서 산불이나 병충해 등 외부의 충격에 약하게 되고 붕괴를 초래한다. 해체기(Ω-phase: release phase, re-adjustment and collapse periods)에서는 붕괴된 숲의 영양분과 에너지는 다시 땅으로 흩어지게 되고, 새로운 생물종이 진화・유입되기 시작하면서 창조적 대안이 창출되는 재조직기(α-phase: re-organization or

6) 예컨대 소나무의 경우 타 식물을 주변에서 자라나지 못하게 하는 타감작용(allelopathy)으로 인해 소나무가 빽빽한 숲에서는 생물종 다양성이 훼손된다(Stamp, 2003)

renewal periods)를 맞는다.

이러한 순환과정을 전순환 루프(front loop)와 후순환 루프(back loop)로 구분하고, 잠재성(potential: 실행가능한 대안의 풍부함) 및 연결성(connectedness: 시스템이 그 자신의 밀도를 통제할 수 있는 정도)의 축에서 설명한 것이 적응적 재생주기 모델이다(Berkes et al., 2003). [그림 8]에서 전순환 루프는 S성장과 같은 성장기(r-phase)와 성숙기(K-phase)를, 후순환 루프는 해체기(Ω-phase)와 재조직기(α-phase)를 의미한다. 전순환 루프에서는 빠르게 성장하며 잠재성 혹은 창조성이 증가하나, 과잉연결 혹은 과잉조직화로 인하여 다양성이 훼손되면서 잠재성 혹은 창조성이 저하되기 시작한다. 그 결과로 외부충격에 약해지게 되고 결국 해체기로 진입한다.

성숙기에서 성장기까지 전순환 루프의 시스템적 특징은 스피드, 효율성, 경쟁, 합병 등을 들 수 있는 반면, 해체기부터 재조직기까지 후순환 루프에서 강조되는 덕목은 창조성(creativeness)과 기억(memory)이라고 할 수 있다. 새로운 질서를 창출하는 대안의 창조는, 우선 해체된 에이전트들의 자기조직화(self-organizing)을 통한 학습(learning)과 참신함(novelty)의 창출, 그리고 창조적 파괴(creative destruction)이며, 동시에 이러한 창조적 대안을 실현시키기 위해서는 과거 전순환 루프, 즉 성장기와 성숙기의 조직화에 대한 경험과



[그림 8] 적응적 재생주기(adaptive renewal cycles)

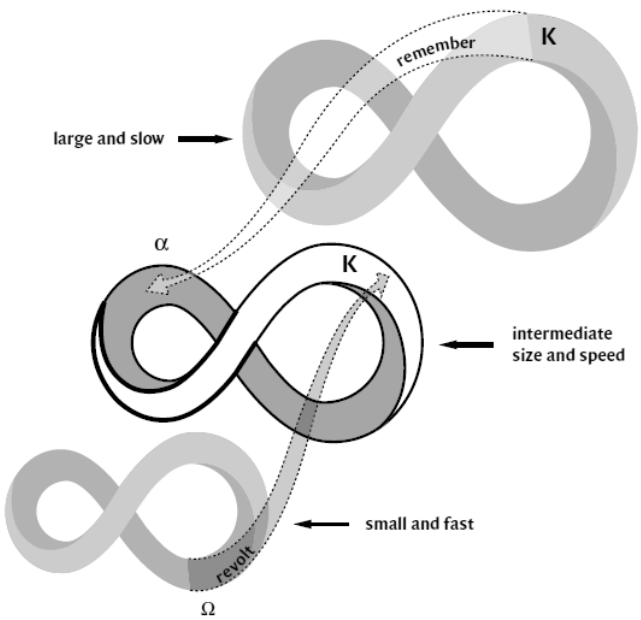
자료원: Berkes et al. (2003)

기억(memory)이 양자를 동시에 필요로 한다.

시스템의 회복성은 이러한 적응적 재생주기를 결정하는 핵심적인 시스템의 속성으로 볼 수 있다(Berkes et al., 2003). 전순환 루프에서의 빠르게 성장하고 연결성이 극대화되면서 계의 조직화가 진행되면, 효율성이 극대화되고 유연성이나 다양성, 가외성이 상실되면서 점차로 회복성은 감소하게 된다. 반대로 후순환 루프에서는 해체기 이후 회복성이 증가되거나 혹은 회복가능한 시스템에서 자기조직화와 창조적 대안의 창출을 통해 새로운 주기를 창출한다. 일부 문헌(Martin & Sunley, 2011)에서는 시스템의 회복성이 적응적 재생주기에 대한 선행지표로 해석되기도 한다.

한편 [그림 9]는 이러한 적응적 재생주기가 발생하는 위계간 연계모델(nested model across scales)을 제시하고 있다. [그림 8]과 같은 적응적 재생주기 모델이, 실제로 숲의 생태계와 같은 자연계에서 수십년 혹은 수백년의 긴 기간 동안 발생하는 반면, 숲의 생태계를 구성하는 보다 미시적인 수준의 하위 생태계에서는 보다 짧고 빠르게 진행된다. 숲보다 큰 상위 생태계에서의 변화는 마찬가지로 숲의 변화보다 더 길고 더 느리게 진행된다.

그러나 이러한 위계간 주기변화는 때때로 상하위의 위계에 있는 복잡계와의 상호작용을 통해 영향을 받을 수 있다. 예컨대 하위 계의 해체기 상황이 상위 계의 후순환 루프를 가속화시키는 '혁명(revolt)'이나 반대로 상위 계의 성숙기 상황이 하위 계의 전순환 루프를



[그림 9] 직전후 수준을 포함(nested across scale)한 적응적 재생주기

자료원: Berkes et al. (2003)

가속화시키는 '경험(remember)' 등의 작용은 위계간 상호작용을 전제로 한다. 복잡계의 적응적 재생주기는 이러한 위계통합적인 '범계성(panarchy: pan+archy)'의 속성을 지니고 있으며, 복잡계의 회복성은 이러한 범계적 상호작용을 전제로 한다(Folke et al., 2010, 2002; Walker et al., 2004).

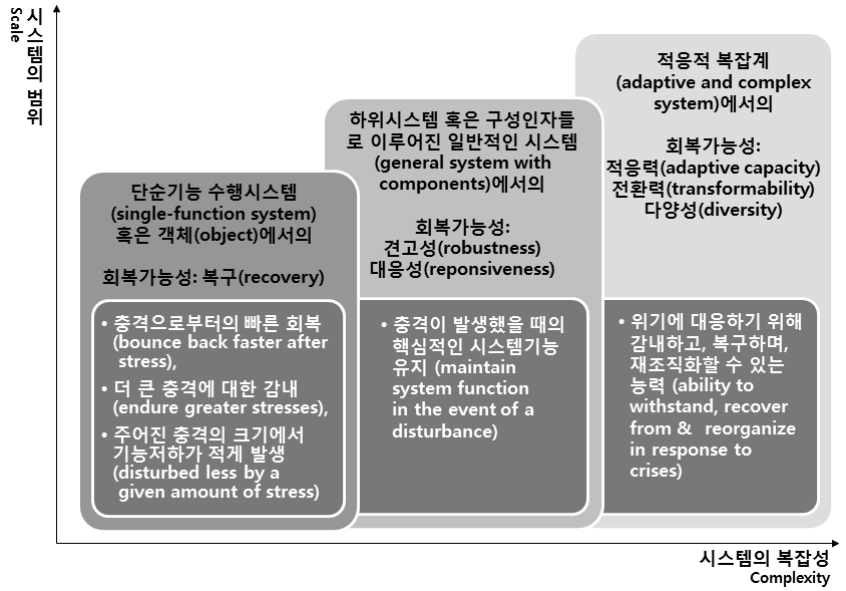
상기와 같은 적응적 재생주기 모델의 시사점은, 첫째 적응적 복잡계에서 회복성의 의미와 중요성을 이해하게 한다는 점에서 의미를 지닌다. 회복성은 적응적 재생주기라는 시스템의 장기적 동역학 과정을 결정짓는다. 둘째, 적응적 복잡계에서 전순환 루프를 확장하고 성장을 지속시키기 위해서는 회복성의 제고가 필요하다는 정책적 시사점을 알 수 있다. 이를 위해서는 시스템을 고정적으로 이해하고 최적화된 일정수준을 유지시키려는 기존의 '딱딱한 관리(hard management)'로부터 보다 '부드러운 관리(soft mangement)'로 전환해야 한다(Gunderson et al., 2002; Peterson, 2011).

즉, 기존의 선형적인 시스템에서 추진하던 효율적・착취적 전략보다는 보다 현상에 대한 적응적 전략으로의 전환이나, 시스템의 유연성과 다양성, 사회생태적 경험과 새로운 창의성이 발현되도록 하는 정책이 요구된다. 국지적인 최적화(local optimazation)를 위한 효율성의 추구 보다는 일정 정도의 다양성과 가외성(redundancy)을 확보하는 것이 급변하는 상황에 대한 대응과 창조적 대안의 창출에 유효하다는 점이 강조된다.

Ⅵ. 결 론

본 논문은 시스템의 중요한 속성으로 회복성에 대하여 단순한 시스템부터 적응적 복잡계까지 다양한 대상에 따라 달라지는 개념과 이론들을 정리하였다. 단일기능을 수행하는 단순한 시스템에 관한 협의의 회복성에 대한 개념으로서 회복속도 중심의 공학적 회복성(engineering resilience)에 대해 우선적으로 검토하였다. 또한 시스템 다이내믹스의 관점에서 선형 및 비선형 시스템에서의 균형회복 메커니즘을 중심으로 안정성(stability)에 초점을 둔 회복성에 대해 논의하였고, 아울러 특정 생태계 모델을 예시로 제시하며 다중안정성(multi-stability)이 관찰되는 보다 복잡한 비선형 시스템에서의 균형레짐의 변화와 회복성을 살펴보았다. 마지막으로 다양한 위계를 포함한 적응적 복잡계에서의 휴리스틱 모델로서 재생주기론을 검토하면서 회복성에 대한 적응적 복잡계의 속성과 정책적 방향에 대해서도 제시하고자 하였다.

본 논문의 연구과정에서 검토해 본 결과에 따르면 시스템의 회복성은 그 대상이 되는 시스템에 따라 개념적으로 달리 적용될 수 있다는 것이다(Martin-Breen & Anderies, 2011;



[그림 10] 시스템의 범위 및 복잡성에 따른 회복가능성의 개념에 대한 확장

자료원: Martin-Breen & Anderies (2011) 및 WEF(2013: 37)에서 재구성

WEF, 2013: 37). [그림 10]은 이와 같이 시스템의 회복성을 논함에 있어서 범위(scale) 및 복잡성(complexity)에 따라 개념적 특성이 달라지는 내용을 요약한 것이다. 그림에서, 단순한 시스템에서의 회복성은 균형 회복에 관한 시스템 행태적 특징을 중심으로 묘사하였으나, 복잡한 시스템으로 가면서 점차로 외부충격에 대한 시스템의 구조적 견고성과 유연성으로 확장된다.

또한 〈표 2〉는 [그림 10]의 개념적 확장에 대해 보다 이론적인 관점에서 차이를 제시하고 있다. 표에서 공학적 회복성으로 출발한 개념과 이론은, 생태적 혹은 사회적 회복성으로 확장되면서 다중안정성과 균형레짐의 변화 상황에서의 시스템의 기능유지로 확장되었다. 또한 적응적 복잡계에서는 새로운 균형에서의 적응과 새로운 균형으로의 재생에 관한 공진화 과정의 핵심요인으로서 회복성이 확장된다.

시스템의 회복성은 이상과 같이 융합학적인 관점에서 제시되었고, 시스템의 구조적 특성에 관한 담론으로서 시스템 다이내믹스의 연구자들과 밀접한 관련을 지니고 있다. 시스템 다이내믹스의 시스템 구조에 대한 탐색과 시스템 행태에 대한 시스템 사고의 일환으로서, 우리를 둘러싸고 있는 사회경제 및 생태적 시스템에 대한 '회복가능한 사고(resilient thinking)'가 필요하다. 본 논문은 이를 위한 리뷰 페이퍼로서의 의의를 가지고 있으며, 시스템 이론과 시스템 다이내믹스의 이론적 측면에서의 회복성에 대한 이해를 중심으로 구성되었다.

〈표 2〉 시스템의 범위 및 복잡성에 따른 회복가능성의 개념에 대한 확장

관련개념	특징(characteristics)	초점(focus)	배경(context)
공학적 회복가능성 (engineering resilience)	균형으로의 회복시간(return time) 효율성(efficiency)	균형으로 복귀(recovery) 충격에 대한 균형 유지(constancy)	동적 균형점 근방의 안정성(vicinity of a stable equil.)
복잡계에서의 생태적 회복가능성 (ecological or social resilience)	충격완화 역량 (buffer capacity) 충격에 대한 내성 (withstand shock) 핵심기능 유지 (maintain function)	균형지속성・시간 (persistence) 시스템 견고성 (robustness) 균형레짐의 변화 (regime shift of equilibrium)	복수개의 동적 균형과 안정성 (multi-stability & equilibria) 동적 균형점들의 안정성 경관지도 (stability landscapes)
적응적 복잡계에서의 사회생태적 회복가능성 (social - ecological resilience)	충격과의 상호작용 (interplay disturbance) 재조직화 (reorganization) 지속화(sustaining) 및 진화(developing)	적응력(adaptive capacity) 전환력(transformability) 학습(learning)과 혁신(innovation)	외생충격과 내부작용의 동역학 및 피드백 (integrated system feedback), 범계적・동태적 상호작용(cross-scale dynamic interactions)

자료원: Folke et al. (2010)에서 재구성

본 논문의 서두에 제시된 실제적이며 정책적인 측면에서의 회복성에 대한 개념이해와 응용은 후속연구로 남기고자 한다.

【참고문헌】

김현주. (2012).「지역사회 방재리질리언스 프레임워크 개발」. 19면. 국립방재연구원.

유가영. (2008).「기후변화 취약성 평가지표의 개발 및 도입방안」. 한국환경정책평가연구원.

전대욱・최인수. (2013). "신정부 생활안전 국정과제의 성공적 추진전략". 「박근혜정부 지방국정과제의 성공적 추진 전략 세미나 발표자료집」. 한국프레스센터 국제회의장, 2013. 5. 21. 한국지방행정연구원・서울신문사: 29-56.

전대욱・김도훈. (2011). "제주도 노루의 개체수 관리를 위한 확장적 피식-포식모형의 적용에 관한 연구",『한국시스템다이내믹스연구』 12(2): 95-126.

전대욱・정회성. (2010). "동적 균형상태를 중심으로 본 금강 지천의 참게자원 분석",『한국시스템다이내믹스연구』 11(1): 27-63.

정지범・이재열・김은성 외 4인.「재난에 강한 사회시스템 구축」. 한국행정연구원 사회위험・안전관리 연구총서 09-34-04. 파주: 법문사.

지행연(한국지방행정연구원) 리질리언스 연구팀. (2013).「회복가능성(Resilience)에 기초한 지역사회 및 주민생활 안전정책의 시론적 연구」.『KRILA FOCUS』 제58호, 2013. 4.

최병선. (1994). "위험문제의 특성과 전략적 대응".『한국행정연구』 3(4): 27-49.

최창현. (2000). "복잡성이론의 조직관리적 적용가능성 탐색".『한국행정학보』 33(4): 19-38.

Anderies, J., M. Janssen, B. Walker. (2002). "Grazing Management, Resilience, and the Dynamics of a Fire-driven Rangeland System," *Ecosystems* 5: 23-44.

Baek, H. (2008). "Dynamics of an Impulsive Food Chain System with a Lotka-Volterra Functional Response." *J. KSIAM (the Korean Society for Ind. and Applied Mathematics)* 12(3): 139-151.

Beck, U. (1997).『위험사회(Risikogesellschaft): 새로운 근대(성)을 향하여』. 홍성태 역. 2006. 도서출판 새물결.

Berkes, F., J. Colding, C. Folke, (2003). "*Navigating Social-Ecological Systems : Building Resilience for Complexity and Change*." Cambridge, UK: Cambridge university press.

Dawes, J., M. Souza. (2013). "A derivation of Holling's type I, II and III functional responses in predator-prey systems," *Journal of Theoretical Biology* 327: 11-22.

FEE (Frontier Economics Europe). (2013). "*The Economics of Climate Resilience CA0401: Synthesis Report*," London, UK: Dept. of Environment, London, UK: Food and Rural Affairs, United Kingdom.

Folke, C., S. Carpenter, B. Walker, M. Scheffer, T. Chapin, J. Rockstrom. (2010). "Resilience Thinking: Integrating Resilience, Adaptability and Transformability," *Ecology and Society* [online] 15(4): Art. 20. Available from http://www.ecologyandsociety.org/vol15/iss4/art20/

Folke, C. (2006). "Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses." *Global Environmental Change* 16: 253-267.

Folke, C., S. Carpenter, B. Walker, M. Scheffer, T. Elmqvist L. Gunderson, C. S. Holling. (2004). "Regime Shifts, Resilience, and Biodiversity in Ecosystem Management." *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 35: 557-581.

Folke, C., S. Carpenter, T. Elmqvist, L. Gunderson, C. S. Holling, B. Walker. (2002). "Resilience and Sustainable Development: Building Adaptive Capacity in a World of Transformations." *Ambio* 31 (5): 437-440.

Fontanals, L., J. Tricas, J. Sempere, I. Fontanals. (2012). "*Improving the Resilience of Cities: Industrial Knowledge Applied to City Management*." Barcelona, Spain: OptiCits, IQS.

Fussel, H., R. Klein. (2006). "Climate Change Vulnerability Assessments: An Evolution of Conceptual Thinking." *Climatic Change* 75(3): 301-329.

Goncalves, P. (2009). "Behavior modes, pathways and overall trajectories: eigenvector and eigenvalue analysis of dynamic systems," *System Dynamics Review* 25: 35-62.

Grimm, V. and J. Calabrese. (2011). "What is Resilience? A Short Introduction," in G. Deffuant & M. Gilbert's Ed., *Viability and Resilience of Complex Systems: Concepts, Methods and Case Studies from Ecology and Society*. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers. pp. 3-16.

Gunderson, L. (2000). "Ecological Resilience - In Theory and Application." *Annual Review of Ecology & Systematics* 31: 425.

Gunderson L., and C. Holling, (2002). "*Panarchy: Understanding Transformation in Human and Natural Systems.*" Washington D. C.: Island Press.

Holling, C.S. (1973). "Resilience and stability of ecological systems." *Annual Review of Ecology and Systematics* 4: 1-23.

ICLEI. (2007). "*Resilient Communities & Cities Initiative*." Bonn Germany: ICLEI (International Council for Local Environmental Initiatives) - Local Governments for Sustainability.

Izhikevich, E. (2007). "Equilibrium," *Scholarpedia,* 2(10): 2014. doi:10.4249/scholar pedia.2014. Avail. from http://www.scholarpedia.org/article/Equilibrium.

Jha, A., T. Miner, and Z. Stanton-Geddes. (2013). "*Building Urban Resilience: Principles, Tools, and Practice*." Washington D. C.: World Bank.

Ludwig, D., B. Walker, and C. S. Holling. (1997). "Sustainability, stability, and resilience." *Conservation Ecology* [online] 1(1): art. 7. Available from http://www.consecol.org/vol1/iss1/art7/

Ludwig, D., D. Jones, and C. S. Holling. (1978). "Qualitative analysis of insect outbreak systems: the spruce budworm and the forest." *Journal of Animal Ecology* 47: 315-332.

Maguire, B., S. Cartwright. (2008). "*Assessing a community's capacity to manage change: A resilience approach to social assessment.*" Commonwealth of Australia 2008, Bureau of Rural Science, Government of Austraila.

Martin-Breen, P., J. Anderies. (2011). "*Resilience: A Literature Review*." New York, NY: The Rockefeller Foundation.

Martin, R., P. Sunley. (2011). "*Conceptualizing Cluster Evolution: Beyond the Life-Cycle Model?*". Papers in Evolutionary Economic Geography (#11.12), Urban and Regional Research Center, Utrecht University. Avail. from http://econ.geo.uu.nl/peeg/peeg.html

McDaniels, T., S. Chang, D. Cole, J. Mikawoz, and H. Longstaff. (2008). "Fostering Resilience to Extreme Events within Infrastructure Systems : Characterizing Decision Contexts for Mitigation and Adaptation." *Global Environmental Change* 18: 310-318.

Mitleton-Kelly E. (2003). "*Complex Systems and Evolutionary Perspectives on Organisations*," Bingley, UK: Emerald Group Publishing Limited.

Morrow, B. (2008). "*Community Resilience: A Social Justice Perspective.*" CARRI (Community and Regional Resilience Initiative) Research Report 4, Oak Ridge, TN: CARRI. On May 6, 2013, Avai. from http://www.resilientus.org/library/FINAL_MORROW_9-25-08_1223482348.pdf

NYS 2100 Commission. (2012). "*Recommendations to Improve the Strength and Resilience of the Empire State's Infrastructure*." NY: NYS 2100 Commission.

Ostrom, E. (2009). "A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems." *Science* 325(5939): 419-422.

Peterson, G., C. R. Allen, C. S. Holling. (1998). "Ecological Resilience, Biodiversity, and Scale." *Ecosystems* 1 (1): 6-18.

Peterson, G. (2011). "Resilience: Change, Persistence and Renewal," *Seminar on Resilience, Water, & Foresight*. Montpellier, France: Agropolis International, Jan. 2011

Pimm, S. L. (1991). "*The balance of nature?*" University of Chicago Press, Chicago, Illinois, USA.

Scheffer, M., S. Carpenter, J. Foley, C. Folke, B. Walker. (2001). "Catastrophic shifts in ecosystems," *NATURE* 413: 591-596.

Senge, P. (1990). "*The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organization*," New York: Doubleday Currency.

Stamp, N. (2003). "Out of the quagmire of plant defense hypotheses," *The Quarterly Review of Biology* 78(1): 23-55.

Sternman, J. (2000). "*Busines Dynamics: System Thinking and Modeling for a Complex World*," Boston, MA: Irwin McGraw-Hill.

Turner II, B., R. Kasperson, P. Matson, J. McCarthy, R. Corell, L. Christensen, N. Eckley, J. Kasperson, A. Luers, M. Martello, C. Polsky, A. Pulsipher, and A. Schillerb. (2008). "A framework for vulnerability analysis in sustainability science." *Proc. Natl. Acad. Sci*. USA, 2003 July 8; 100(14): 8074-8079.

Tyler, S., and M. Moench. (2012). "A framework for urban climate resilience, *Climate and Development*, 4(4): 311-326.

UK DEFRA (Dept. of Environment, Food and Rural Affairs). (2011). "*Climate Resilient Infrastructure: Preparing for a Changing Climate*," Secretary of State for Environment, London, UK: Food and Rural Affairs by Command of Her Majesty, United Kingdom.

UNISDR (UN Office for Disaster Risk Reduction). (2012). "*Making Cities Resilient Report 2012: My city is getting ready! A Global Snapshot of How Local Governments Reduce Disaster Risk*." Geneva, Switzerland: UNISDR. Avail. from http://www.unisdr.org/campaign/resilientcities

Walker, B., C. Holling, S. Carpenter, and A. Kinzig. (2004). "Resilience, Adaptability and Transformability in Social-ecological Systems." *Ecology and Society* 9(2): art. 5. Avai. from http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5

Walker, B., S. Carpenter, J. Anderies, N. Abel, G. Cumming, M. Janssen, L. Lebel, J. Norberg, G. Peterson, R. Pritchard, (2002). "Resilience Management in Social-ecological Systems: a Working Hypothesis for a Participatory Approach." *Conservation Ecology* [online] 6 (1): art. 14. Available from http://www.ecologyandsociety.org/vol6/iss1/art14/

Wilbanks, T. (2008). "*Enhancing the Resilience of Communities to Natural and Other Hazards: What We Know and What We Can Do*." Natural Hazards Observer. May 2008.

Wilding, N. (2011). "*Exploring Community Resilience in Times of Rapid Change*," Dunfermline, UK: Fiery Spirits Community of Practice & Carnegie UK Trust.

WEF. (2013). "Special Report: Building National Resilience to Global Risks." *Global Risks 2013: Eighth Edition*: 36-44. Geneva, Switzerland: World Economic Forum.

Wildavsky, A. (1988). "*Searching for Safety*." New Brunswick: Transaction Books.

▶ 접수일 : 2013. 6. 30. / 게재확정일 : 2013. 7. 31.