

농업환경 분야에서의 토양 리질리언스와 그 위협 요인

Soil Resilience and Threat Factors Related to Agricultural Environment

김민석¹ · 민현기² · 현승훈³ · 김정규^{3*}

¹고려대학교 오정에코리질리언스연구원 연구교수, ²고려대학교 환경생태공학과 박사과정, ³고려대학교 환경생태공학과 교수

Min-Suk Kim¹, Hyun-Gi Min², Seung-Hun Hyun³ and Jeong-Gyu Kim^{3*}

¹Research Professor, O-Jeong Eco Resilience Institute, Korea University, Seoul 02841, Korea

²Doctoral Student, Division of Environmental Science and Ecological Engineering, College of Life Science and Biotechnology, Korea University, Seoul 02841, Korea

³Professor, Division of Environmental Science and Ecological Engineering, College of Life Science and Biotechnology, Korea University, Seoul 02841, Korea

Received 28 November 2019, revised 29 January 2020, accepted 13 February 2020, published online 31 March 2020

ABSTRACT: Soils are the basis for plant rooting and ecosystem creation, the site of life for humankind, and require much time for their creation, so there will be no disagreement about the importance and necessity of soil conservation and management. Soil resilience is the ability of soils to maintain their original structure and function (resistance and recovery) from various kinds of disturbances, and is an indispensable field of study that prepares for a future with high uncertainty and unpredictability. Therefore, this study summarizes the concept and necessity of soil resilience, which is not yet widely known in Korea, and the contents of previous studies were reviewed. This study was carried out with the aim of contributing to lowering the threshold for entry into resilience research for domestic and foreign researchers who are new to soil resilience. In the first part of this study, we introduced resilience and soil resilience, and in the second part, we summarized the main causes of stress or disturbance that have been studied by many soil resilience researchers. This makes it easy to find the references authors need. It is virtually impossible to find the same soil environment because there is no same area on the earth with all the same rock, climate, human activity, and culture, suggesting that each soil has its own uniqueness. Therefore, the researcher who wants to utilize the results of this study should take into consideration the specificity of the soil and the region to which the soil resilience is introduced, and modify it if necessary. In addition, efforts should be made to strengthen the network of soil resilience researchers to create a basis for sharing and actively utilizing the research results.

KEYWORDS: Disturbance, Resilience, Resistance, Soil, Stress

요약: 토양은 식물들이 뿌리 내려 생태계를 조성할 수 있게 하는 근간이자 인류의 삶의 터전으로, 그 생성에 많은 시간을 필요로 하기 때문에 토양의 보존과 관리가 중요하다. 토양 리질리언스는 다양한 종류의 교란으로부터 토양이 본래의 구조와 기능을 유지하는 능력으로, 불확실성과 예측불가능성이 높은 미래에 대비할 수 있는 연구 분야이다. 따라서 본 연구는 국내에서 아직 널리 알려지지 않은 토양 리질리언스의 개념과 필요성, 그리고 기존에 수행된 국외 연구 내용들을 정리함으로써, 토양 리질리언스를 처음 접하는 국내·외 연구자들에게 리질리언스 연구의 진입 문턱 (threshold)을 낮추는데 기여할 것을 목적으로 수행되었다. 본 연구 전반부에는 리질리언스와 토양 리질리언스에 대해 소개하였으며, 후반부에는 많은 토양 리질리언스 선행 연구들이 관심을 가진 주요 스트레스 원인을 자연적 요인과 인위적 요인으로 구분하여 정리하였다. 지구상에는 모암, 기후, 인간의 활동, 문화가 모두 동일한 지역은 없기 때문에 각 토양마다 고유의 특수성을 갖고 있다. 따라서 본 연구 결과 활용하고자 하는 연구자는 토양 리질리언스를 도입하고자 하는 지역의 특수성을 고려하여 활용해야 할 것이다. 또한 토양 리질리언스 연구자들의 네트워크를 강화하여 연구결과를 공유하고 적극 활용할 수 있는 기반을 만드는 데 노력해야 할 것이다.

핵심어: 교란, 리질리언스, 저항성, 토양, 스트레스

*Corresponding author: lemonkim@korea.ac.kr, ORCID 0000-0002-5734-1311

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

현 세대는 기후 변화, 신용 규제, 대량 정리해고 등과 같은 불확실성과 예측불가능성이 도사리는 시기에 살고 있으며, 이처럼 매우 유동적이고 급변하는 시대에 적응하고 그에 대응할 수 있는 능력을 갖추는 데에 리질리언스(resilience)가 그 원동력이 될 수 있다(Davoudi et al. 2012). 용수철이 돌아오는 것을 의미하는 라틴어 'resi-lire'에서 기원한 리질리언스는, 물리학자들이 용수철의 특성, 재료의 안정성 그리고 외부 충격에 대한 저항성을 설명하기 위해 처음 사용하였다(Davoudi et al. 2012). 1960년대에 리질리언스 개념이 생태학분야에 도입되었고, 1973년 이론 생태학자인 Holling은 생태적 시스템 거동을 리질리언스와 안정성(stability)이라는 두 개의 별개의 특성으로 정의하였다(Holling 1973).

그 후 리질리언스 이론의 확장과 현실 적용, 그리고 설계·관리에서의 활용에 관한 연구들이 진행되면서 공학적 리질리언스와 사회·생태적 리질리언스를 구분하기 시작하였다. 공학적 리질리언스는 Pimm (1984)의 개념을 기반으로 자연재앙이나 사회적 격변과 같은 교란 이후 안정한 상태 또는 평형상태로 되돌아가는 데 소요되는 시간을 리질리언스로 정의하였다. 반면 사회·생태적 리질리언스는 Holling (1986)의 개념을 기반으로, 시스템 구조가 변하기 이전까지 시스템이 흡수할 수 있는 교란을 리질리언스라 정의하였다. 또한 사회·생태적 리질리언스는 시스템이 단 하나의 안정된 상태로 존재하지 않고 다중의 안정된 상태로 존재할 수 있으며, 시스템을 움직이고 변화시킬 수 있는 통제 변수의 수준을 문턱(threshold)이라 하고 그 시스템이 문턱을 넘어서 다른 시스템으로 이동한 경우 문턱을 넘었다 또는 시스템이 체제 변화를 겪었다 라고 표현한다(OJERI 2015).

재난과 관련하여 Timmerman (1981)은 리질리언스를 재해 발생을 흡수하고 복구할 수 있는 능력으로 정의하였고, 최근에는 복합 재난 및 사회·경제·환경에 대한 대응력을 높이며 동시에 신속하게 복구할 수 있는 방안으로 인식하고 있다(Jeon and Byun 2017). 이 외에 심리·의료 분야에서도 리질리언스에 대한 연구가 진행 중이다. Richardson (2002)은 개인이 삶에서 경험하는 역경을 전제로 다시 이전의 삶의 장면 속으로 재통합(reintegration)해가는 과정을 심리학에서의 리질리언스라 정의하며 개인의 스트레스적 역경 속에서 통찰과 성장을 경험하며 리질리언스의 재통합이 진행된다고

주장하였다.

본 연구에서는 앞서 소개한 다양한 리질리언스 분야 가운데 환경, 생태, 농업과 관련한 “토양 리질리언스”에 대해 다룰 것이다. 토양 리질리언스는 현재뿐만 아니라 미래에도 중요한 화두인 기후변화와 식량안보, 지속가능한 농업과도 매우 밀접한 관련이 있는 주제이다. 국외의 경우 1990년대부터 토양의 리질리언스에 대해 관심을 갖기 시작하고 2000년대부터 여러 분야에서 연구를 수행해왔다. 그러나 국내의 경우 일부 토목·지질 분야에서 연약지반의 탄력성에 대한 연구를 제외하면 농업 및 생태와 관련된 토양 리질리언스 연구는 매우 미비한 실정이다. 따라서 본 연구는 리질리언스를 처음 접하거나 생소한 국내·외 연구자들에게 토양 리질리언스를 소개하고 향후 관련 연구를 수행하는 데에 있어 유용한 기초 자료로 활용될 것을 목적으로 수행되었다. 연구분야에 따라 리질리언스를 탄력성, 적응유연성, 회복력, 회복가능성, 회복탄력성 등으로 다양하게 표현하고 있으며, 본 연구에서는 선행 연구에서 사용한 본래의 의미를 최대한 반영하여 표현하기 위하여 ‘리질리언스’라는 용어를 그대로 사용하고자 한다.

2. 토양 리질리언스

2.1 정의

농업, 환경, 생태와 관련한 토양 분야에서 리질리언스는 1970 - 1980년대에 언급되기 시작하였다. Blum and Santelises (1994)은 토양 스트레스(soil stress)와 토양 취약성(soil vulnerability) 등의 용어와 함께 토양 생태학과 지속가능한 토지이용을 중심으로 리질리언스 개념을 토양학에 도입하고자 하였다. Ulrich (1987)는 물질수지(matter balance) 측면에서 육지생태계 교란을 안정성(stability), 탄력성(elasticity), 리질리언스 개념을 이용하여 설명하였다. 그 이후 1990년대 접어들면서 토양 리질리언스 관련 연구가 본격적으로 진행되었다.

Lal (1993)은 토양 리질리언스를 토지이용의 변화나 교란을 받기 이전의 상태로 회복되는 토양의 능력으로 정의하면서, 변화에 저항하는 것이 아니라 초기의 좋은 환경으로 회복되는 고유의 특성이라 주장하였다. 이때 회복은 이력 경로(hysteretic path)를 따를 수 있으며 임계치 이하로 훼손되지 않을 경우에만 회복 가능하고 특

정 기간 내에서만 일어날 수 있다고 하였다. Szabolcs (1994)는 토양 리질리언스를 스트레스 내성 또는 교란 원인을 제거하였을 때 토양이 다시 평형을 유지하려는 전체 과정의 일부이자 토양이 스트레스와 변화를 막을 수 있게 하는 과정이라 정의하였다. Eswaran (1994)은 상당한 힘이 가해지기 이전의 상태 또는 그와 매우 유사한 상태로 되돌아갈 수 있는 시스템의 능력을, Rozanov (1994)는 교란에 의한 변화로부터 저항할 수 있는 토양의 수용력에 대해 각각 토양 리질리언스라 정의한 바 있다. Lal (1997)은 논문을 통해 토양 리질리언스는 인위적 또는 자연적 교란으로부터 저항하고 회복할 수 있는 토양의 능력이라 재정의하고, 동시에 토양 질 (soil quality) 향상과 생물다양성 증가를 위한 토양 리질리언스의 과정 (processes), 요인 (factors), 그리고 원인 (causes)들에 대해 정리하였다. Seybold et al. (1999)은 교란 이후의 토양 회복 능력을 토양 리질리언스로 정의하고 기능과 구조를 나누어 설명하였다. 특히 토양의 기능을 (1) 지속적인 생물활동과 다양성, 생산성; (2) 물과 용질 흐름의 조절과 분배; (3) 유기 및 무기물질의 분해, 완충, 무독화, 안정화; (4) 지구 생물권에서 양분과 기타 요소들의 저장과 순환; (5) 사회경제 구조의 지원과 인간과 관련한 고고학적 유물의 보호 등으로 구분하였다. 그리고 교란에 대한 회복 속도 및 회복 정도가 빠를수록 더 빠른 회복력 (resilient)을 갖는다고 주장하였다. 2000년대 접어들어 이후로는 토양의 교란과 리질리언스를 측정하고 평가하는 실험 연구들이 주를 이루었다. 그 가운데 Bengtsson (2002)은 생물과 생태계에 미치는 교란을 발생 빈도와 공간적 규모에 따라 세 가지로 구분하고 특히 공간적 리질리언스를 강조하기도 하였다.

많은 선행 연구와 문헌들에서 토양 리질리언스를 교란 이전의 상태 또는 최초의 조건으로 돌아가는 것으로 이해하고 해석하려는 경향을 찾아볼 수 있으나, Blanco and Lal (2010)은 실제로 토양 리질리언스가 완벽히 교란 이전의 상태로 돌아가는 것을 항상 의미하는 것은 아니라 설명하였다. 그리고 최근 토양 저하와 기후변화에 대한 관심이 증가하면서 토양 리질리언스 이론 중 토양의 기능 측면에서의 토양 안정성과 생산성의 중요성을 여러 연구자들이 역설하였다 (Vasil'evskaya et al. 2006, Lal 2015, Lorenz and Lal 2015, Olson et al. 2017).

2.2 토양 리질리언스 관련 용어

토양 리질리언스 연구 초기에는 토양의 저항성 (resistance), 탄력성 (elasticity), 진폭 (amplitude), 이력 (hysteresis), 유연성 (malleability) 등 토양 리질리언스와 유사한 의미를 갖는 단어들이 비교되었으며, 그 이후로도 여러 연구자들을 통해 토양 질 (soil quality), 토양 안정성 (soil stability), 토양 지속가능성 (soil sustainability), 토양 회복 (soil recovery)이 설명되어왔다. 토양 리질리언스와 관련된 여러 용어들 중 많은 연구에서 사용하는 용어인 토양 저항성과 토양 질에 대해 알아보고자 한다.

Pimm (1984)은 토양 저항성을 교란으로부터 변화하는 양 (amount) 또는 손상되는 정도라 정의하고 저항성과 리질리언스를 토양 생태계의 안정성을 구성하는 두 가지 요소로 인식하였다. Lal (1997)은 토양 저항성을 이전 상태로부터의 이동 또는 변화에 저항하는 능력이라 정의하였다. 이 외에도 Seybold et al. (1999)은 교란에 따른 변화 없이 토양 시스템이 토양기능을 계속 유지할 수 있는 능력을 저항성이라 보았다. Loreau et al. (2012)은 복원 토양을 대상으로, 복원 이후에 찾아온 교란에 대한 저항도 토양 저항성이라 설명하였다. 최근 Maestas et al. (2016)은 토양 저항성 개념을 확장하여 생태계 저항성을, 교란 이후 외래 생물종의 침입으로부터 변하지 않는 생태계의 능력이라 정의하였다. 여러 연구 내용을 종합해보면 토양의 저항성이란 초기의 토양, 교란된 토양 그리고 복원된 토양이 다양한 형태와 종류의 교란으로부터 토양 본연이 갖고 있던 구조와 기능을 잃거나 변화시키지 않고 버티고 극복할 수 있는 능력 또는 교란에 의한 즉각적인 반응으로 정리할 수 있을 것이다.

토양 리질리언스 연구 초기의 토양 질 용어는, 경제적 재화와 서비스를 생산하고 환경을 조절할 수 있는 토양 능력을 결정하는 토양 고유의 속성 및 특성, 그 과정에 관한 것으로 정의 내려졌다 (Lal 1993, Doran and Parkin 1994, 1996). 특히 토양의 농작물 생산 능력은 현 인류 및 미래 세대의 요구를 충족시킬 수 있는 경제적 재화를 결정하기 때문에 토양 질을 다루는데 있어서 매우 중요히 다루어져 왔다. Papendick and Parr (1992)는 건강하고 영양가 높은 농작물을 생산하고, 토양 침식에 저항하며, 환경적 스트레스가 식물에 미치는 영향을 감소시키는 능력을 토양의 질이라 정의하며 스트레스 저항 의미를 내포시켰다. 그 후 Karlen et al. (1997)

은 자연생태계와 관리된 생태계 경계에서 식물과 동물의 생산성을 유지하고 수질과 대기질을 유지 또는 향상 시키며 인간의 건강과 주거지를 유지하게 하는 특정 토양의 능력을 토양 질이라 정의하였다. 종합해보면, 토양의 질이란 기본적으로 토양의 기능을 중점으로 하며 그 기능에 영향을 미치는 인자들을 확인하고 관리함으로써 농작물과 재화를 생산할 수 있는 능력과 가능성으로 정리할 수 있을 것이다. 또한 토양 질은 용도와 관련한 의사결정에 중요한 지표로 활용될 수 있으며 대상 지역의 특성과 연구 목적에 따라 토양 질을 평가하는 인자의 선택, 분석 및 평가방법이 다양하게 표현되는 특징을 갖고 있다. 더하여 토양 질은 농업 전략의 장기적인 성공의 밑거름으로, 토양 질을 유지하는 것은 자연적인 변화와 토지 용도의 관리 기술 사이에서의 매우 역동적인 작업이라 할 수 있다 (Herrick 2000). 토양 기능의 회복이라는 측면에서 토양 질은 토양 리질리언스와 관련이 있으며, 교란에 의한 토양 기능의 저하라는 측면에서 토양 질은 토양 저항성과 관련이 있다 (Seybold et al. 1999). 그리고 이러한 교란은 자연 내에서 아주 흔하고 어디에나 일어나기 때문에 토양 리질리언스와 토양 저항성은 토양 질의 가장 중요한 기본 요소인 셈이다.

이처럼 여러 연구자들이 사용한 토양 리질리언스 및 관련 용어들에 대한 다양한 해석과 접근들은, 명확하고 통일된 개념을 정립하는 데에 큰 어려움으로 다가오고 있다. 그 결과 리질리언스 개념을 토양학에 도입할 때 생태학자들로부터 ‘주관적 판단’ 및 ‘과학적 단점의 모호화’라는 평가를 받을 수밖에 없었다 (Peter 1991, Blum 1994). 토양은 고상, 액상, 기상 그리고 생물학적 유기 및 무기요소가 공존하는 매우 복잡한 시스템이기 때문에 이 단어를 사용하는 데에 있어 더 신중하기도 하였다 (Blum 1994, Szabolcs 1994). 30년 넘게 진행되어온 토양 리질리언스 이론과 다양한 실내 및 현장 연구들을 통해 우리가 어디까지 와있으며 앞으로 어디로 가야할지 되돌아 볼 필요가 있다. 우선적으로 토양 리질리언스 연구들이 주로 어떠한 스트레스와 교란에 관심을 가져왔는지 정리하고자 한다.

3. 토양 리질리언스의 영향 스트레스

3.1 토양 스트레스의 정의

토양은 자연적 또는 인위적 원인의 스트레스 (stress)

를 끊임없이 맞닥뜨리게 되는데, 이 스트레스라는 용어는 저하, 교란, 동요 등의 단어들과 함께 애매모호하고 일관성 없게 사용되고 있다. 우선 스트레스란 개체 또는 생태계의 생리와 기능에 부정적인 영향을 주는 중요 요인으로, 만성 스트레스 또는 급성 스트레스로 나타날 수 있으며, 하나의 스트레스가 독립적으로 일어나기 보다는 여러 종류가 복합적으로 나타나는 것이 보편적이다 (Archer and Stokes 2000). Lal (1993)은 토양 저하 (soil degradation)를 경제재 (economic goods) 생산과 생태적 기능을 수행하는 토양 고유의 능력의 저하 및 감소로 정의하였다. 토양 교란 (soil disturbance)은 토양의 ‘정상 (normal)’ 상태와 기능으로부터 유의한 변화를 야기하는 모든 사건이라 정의할 수 있으며, 기능의 정상적인 적정 범위를 벗어난다는 의미에서 ‘비정상 (abnormal)’이라 표현할 수 있다 (Forman and Godron 1986, Archer and Stokes 2000). 교란은 바라보는 시각, 시간적 스케일, 종료 시점을 기준으로 장기적 (press) 교란 (e.g., 기후변화, 기후온난화, 독극물 유출, 토양 산성화)과 단기적 (pulse) 교란 (e.g., 토양 밟힘 (답압))으로 나누기도 한다 (White and Pickett 1985, Schaeffer et al. 2016). 동요 (soil perturbation)는 토양 생태계의 구성요소 또는 시스템이 교란에 대하여 기준이 되는 특정 조건에 대한 편차로 나타낼 수 있는 반응을 의미한다 (Rykiel 1985). 종합해보면 토양 시스템에 부정적인 영향을 미치는 다양하고 복잡한 요인들을 스트레스, 스트레스에 의해 토양의 구조와 기능이 변하는 과정과 현상을 교란 및 동요, 그리고 그 결과 토양 시스템의 구조와 기능이 감소한 결과를 저하로 볼 수 있다. 본 연구에서는 앞서 정리한 내용과 용어들 사이의 차이점을 고려하여 단어를 사용할 것이며, 이어 토양 리질리언스 관련 연구들에서 가장 관심 있게 다룬 스트레스 두 가지 분야, (1) 기후변화와 관련한 요인; (2) 인위적인 인간 활동 등에 대해 정리하고자 한다.

3.2 토양 리질리언스 스트레스 중 기후변화 요인

기후변화는 국지적 또는 전지구적으로 온도, 강수 시간, 강우강도, 강우량에 영향을 미치며, 그렇기 때문에 급격한 온도 및 강우 변화에 매우 취약한 지역, 예를 들면 건조 및 반건조 지역을 대상으로 토양 리질리언스를 연구한 사례를 여럿 확인할 수 있다 (Cubasch et al. 2001, Capon and Brock 2006, IPCC 2007, Duniway et

Table 1. Summary of soil resilience studies categorized by environmental factors and related phenomena

Major factors	Phenomena	References
Precipitation	Drought	Orwin and Wardle 2005 Bérard et al. 2011 Hueso et al. 2011 de Vries et al. 2012 Rivest et al. 2013 Liang et al. 2014 Ng et al. 2015 Rivest et al. 2015 Preece and Penuelas 2016 Barba et al. 2016 Zhou et al. 2016
	Burning / Fire	Marafa 2002 Lewis et al. 2010 Kim and Jung 2013
	Flood	Capon and Brock 2006 Rivest et al. 2013 Kerr et al. 2016
	Nutrient availability	Austin and Vitousek 1998 Doudill et al. 1998 Wang et al. 2009 Martínez-García et al. 2017
Temperature	Freezing / Winter	Allen-Morley and Coleman 1989 Anan'eva et al. 1997 Avramides et al. 2009 Mills et al. 2014
	High temperature / Heat	Kuan et al. 2006 Wertz et al. 2007 Griffiths et al. 2008 Chaer et al. 2009 Gregory et al. 2009 Scott et al. 2010 Bérard et al. 2011 Kumar et al. 2014 Fernández-Pascual et al. 2015

al. 2010, Mora and Lázaro 2013, Romero et al. 2014, Ng et al. 2015, Bhattacharyya et al. 2016). 이에 기후 변화와 관련된 주요 토양 리질리언스 연구들을 세부 주제별로 분류해볼 수 있다 (Table 1).

3.2.1 강수 패턴의 변화

3.2.1.1 가뭄과 건조

기후변화는 전지구적 규모의 물수지 (hydrologic budgets)에도 변화를 야기하고, 강수 패턴에 영향을 미쳐 지역별로 가뭄 또는 홍수 빈도를 변화시킨다 (Hansen et al. 2010). 가뭄 (drought)이란 수개월에서 수년에 걸친 정상 이하의 강수량이 특정 육상생태계에서 일어나는 극한 기후 현상으로, 건조지역에서의 영구적인 건조와는 다르게 일시적 건조를 일컫는다 (Dai et al. 2010).

건조는 발생원인, 현상, 기간에 따라 기상학적 가뭄 (meteorological drought), 농업가뭄 (agricultural drought), 수문학적 가뭄 (hydrological drought) 등으로 나눌 수 있다 (Trenberth et al. 1988, Cook et al. 2009).

Hueso et al. (2011)은 반건조 지역에서 기후변화에 따른 장기간의 가뭄이 미생물의 활성과 생장에 어떠한 영향을 미치는지 60일간 실험을 통해 토양수분보유력, 미생물량, 호흡, 효소 활성을 관찰하였고, de Vries et al. (2012)은 세균 및 균류 기반 토양 먹이사슬 시스템에 기반하여 건조와 가뭄이 토양 탄소순환 및 질소순환, 그리고 토양 먹이사슬의 저항성과 리질리언스를 설명하였다. 또한 Liang et al. (2014)은 열대 지역에서 건조에 대한 미생물의 저항과 리질리언스를 세균 및 균류 먹이사슬을 이용하여 설명하였다. Preece and Peñuelas (2016)는 건조가 식물의 뿌리 삼출물 (rhizodeposition)

의 조성과 배출량, 그리고 토양유기물과 토양미생물과의 상호작용에 미치는 영향을 연구함으로써, 일반적인 건조와 극심한 건조를 구분하고 뿌리 삼출물이 건조 스트레스를 극복하고 건조 내성을 결정하는 주요한 요인임을 확인하였다. Barba et al. (2016)은 가뭄으로 인한 나무의 소멸 또는 천이, 그리고 기후가 토양 호흡 및 호흡 구성요소에 미치는 영향을 확인하였다. 탄소와 질소 순환에 있어 거대한 저장고 역할을 하는 산림토양생태계는 기후변화에 따른 강우 패턴의 변이에 영향을 크게 받는 까닭에, 건조에 의한 토착 토양 미생물의 영향이 최근 보고되었다 (Ng et al. 2015, Zhou et al. 2016).

이러한 건조와 가뭄은 수분스트레스를 포함한 다양한 경로를 통해 토양 리질리언스에 영향을 미칠 뿐만 아니라 화재 발생의 빈도와 피해를 증가시키기도 한다 (Stocks et al. 1998). Marafa (2002)는 화재가 토양 화학성 (pH, 유기물, 질소, 치환성양이온 등)에 미치는 영향을, Lewis et al. (2010)은 반건조 초지에서 봄철 화재와 가을철 화재에 따른 식생의 반응을 살펴보았다. Kim and Jung (2013)은 화재에 대한 토양 진드기 (oribatid mite)의 리질리언스에 매우 치명적인 영향을 미치는 것을 확인하고, 화재 이후 토양 진드기의 재구성 (re-organizing phase) 단계에서 중간 정도의 교란 처리구에서 교란이 아예 없거나 교란이 매우 강한 경우보다 더 높은 다양성을 보여주어 중간교란가설 (intermediate disturbance hypothesis)을 뒷받침하는 결과를 보고하였다 (Scheu and Schulz 1996).

3.2.1.2 홍수

건조 및 가뭄과 반대로, 기후변화에 따른 집중 강우 및 홍수 (flood)가 토양 리질리언스에 미치는 영향을 연구한 사례도 있었다. Capon and Brock (2006)은 호주의 건조 범람원에서 발생하는 홍수에 대한 매토종자 (soil seed bank)의 리질리언스를 연구하였다. 매토종자는 토양 속에 매립되어 휴면 중인 종자로, 발아 조건을 갖추었을 때 발아하여 토양 지상부의 식생을 구성하는 잠재력 있는 종자를 뜻하며, 이들은 교란 이후 토착 식물 종을 통한 식생 복원 측면에서 중요한 기능을 수행하게 된다 (Bigwood and Inouye 1988). Rivest et al. (2013)은 혼농임업 (agroforestry)이 관행 농업 시스템보다 홍수에 대한 토양 및 미생물 리질리언스를 갖고 있기 때문에, 밀 생산량이 홍수에 큰 영향을 받지 않음을 보고하였다. 더하여 홍수 교란에 대한 토양 리질리언스

의 반응을 이해하고자 할 때, 기존의 수분보유력 (water holding capacity, WHC)은 한계가 있기 때문에 포화 시 수분보유력의 분석방법, 부피변화, 인장강도, 침식 저항, 수리전도도 등을 고려한 홍수 보유 능력 (flood holding capacity, FHC)을 제안하고 후속 실험 연구들이 진행되어야 함을 역설하였다.

3.2.1.3 강수, 토양수분 그리고 양분유효도

이 외에도 기후변화에 따른 강우 패턴의 변화는 토양 수분뿐만 아니라 토양 중 양분유효도에도 영향을 미치며, 이와 관련하여 Austin and Vitousek (1998)은 하와이 천연 숲을 대상으로 강수량 증가에 따른 토양과 낙엽의 양분을 평가하였다. Doudill et al. (1998)은 식생이 토양 양분의 유실 저감에 유효한 것을 확인하였고, Wang et al. (2009)은 양분의 순환 속도와 패턴을 결정함에 있어 큰 규모에서는 수분 유효도가, 작은 규모에서는 식생의 패치 (patchiness)가 중요한 역할을 하는 것을 보고하였다. Martínez-García et al. (2017)은 토양 내 내생근균이 강한 강우에 의한 인과 질소의 유실을 각각 40%, 50% 감소시키는 것을 확인하고 토양 생태계 리질리언스를 강화할 수 있는 중요한 생물상 요인임을 밝혀냈다.

3.2.2 기온의 변화

3.2.2.1 저온

앞서 기후변화에 따른 강수 패턴의 변화, 가뭄과 홍수가 토양 리질리언스에 미치는 영향과 주요 영향 인자들에 대한 연구를 살펴보았다. 기후변화는 강수 패턴의 변화뿐만 아니라 필연적으로 온도의 변화를 야기하기 때문에 관련 연구들도 여럿 진행되었다. 우선 저온에 의한 동결 (freezing)과 관련된 리질리언스 연구를 살펴보면, Allen-Morley and Coleman (1989)는 박테리아와 선충으로 구성된 3단계의 영양단계 먹이사슬을 대상으로 동결에 의한 토양 생물상의 리질리언스를 확인하였다. Anan'eva et al. (1997)은 동결과 융해 (thawing) 주기가 산림 토양, 초지 토양, 농경지 토양 내 미생물의 활성에 미치는 영향을 확인하였으며, Avramides et al. (2009)은 추운 동결 조건에서 식생의 부재가 토양 미생물의 탄소와 질소 순환에 미치는 영향을 확인하였다. 그리고 Mills et al. (2014)은 아고산대 (sub-alpine)에서 기후변화가 토양의 탄소와 양분 순환에 미치는 영향

을 확인하면서 토양 수분이 온도 변화에 대한 민감도를 유의하게 감소시키는 요인이라 보고하였다.

3.2.2.2 고온

기후변화에 의한 이상 지온 또는 동결에 관한 연구뿐만 아니라 고온이 토양 리질리언스에 미치는 영향에 대한 연구가 더 적극적으로 수행되어 왔다. Kuan et al. (2006)은 온대 고지대 초지 토양에서 미생물 호흡으로 식물잔사의 분해에 따른 탄소의 무기화 반응속도에 고온이 미치는 영향을 확인하였다. Griffiths et al. (2008)과 Gregory et al. (2009)도 동일한 고온 교란을 가한 후 실험을 수행하였으며, 이 연구들은 토양 리질리언스를 생물에 의한 토양의 기능 측면에서 평가하였다는 점에 의의가 있다. Wertz et al. (2007)은 42°C에서 24시간 가열을 통해 토양 microcosms에 교란을 가하고 한 달간 토양 미생물의 다양성과 생태계 안정성 회복을 분석하여 토양 리질리언스를 평가하였다. Kumar et al. (2014)은 토양에 48°C에서 24시간동안 고온 교란을 가한 후 토양의 주요 기능 지표인 토양 호흡과 탈수소효소 활성의 감소 및 회복을 관찰하였으며, Bérard et al. (2011)은 조금 더 높은 50°C의 고온 교란을 짧게는 2일에서 길게는 21일까지 토양에 가하고 그 이후 토양 호흡과 미생물 군집 구조의 변화를 84일까지 관찰하였다. Chaer et al. (2009)은 천연림과 농경지 토양을 대상으로 40 - 70°C 까지 연속적인 고온 교란에 따른 토양 미생물량과 군집구조, 토양 효소의 활성을 분석하여 기능적 측면에서 토양 리질리언스를 비교·평가하였다. Scott et al. (2010)은 건조한 사바나 지역에서 계절에 따른 화재가 매토종자 리질리언스에 미치는 영향을 확인하고자 80°C의 고온과 연기 (smoke)를 45분간 토양에 노출하였다.

지금까지 기후변화가 토양 리질리언스에 영향을 미치는 환경적 요인들에 대한 선행 연구 사례들을 강수와 기온으로 나누어 살펴보았다. 기후변화의 대표 현상인 온난화는 전 지구적으로 수리학적 순환에 영향을 미쳐 지역별로 총 강수량의 증가뿐만 아니라 강우강도와 강우빈도에 까지 변화시키고, 이는 다시 토양의 식물생산량, 식물사체의 분해속도, 토양 미생물활성, 증발산속도에 영향을 주었다. 그리고 일련의 변화들은 토지 이용과 같은 인간의 직접적인 활동에의 변화를 초래하기도 한다 (Nearing et al. 2004). 인구 증가에 따른 도시화

및 토지 이용의 변화는 다시 기후와 토양 환경에 영향을 미쳐 결국 인간의 활동과 환경사이의 상호작용은 끊임없이 현재 진행 중이다 (Dale and Buckner 1997, Kalnay and Cai 2003). 그렇기 때문에 토양 리질리언스에 영향을 미치는 인간의 활동과 관련한 선행연구들을 뒤이어 정리하고자 한다.

3.3 토양 리질리언스 스트레스 중 인위적 활동 요인

토양 리질리언스는 강수와 온도와 같은 환경인자뿐만 아니라 다양한 인간의 활동에 의해서도 영향을 받으며 특히 농업 활동과 관련한 연구가 많이 수행되어왔다. 그 주요 연구 내용은 크게 (1) 토지 이용도와 토양관리 (land-use and management) (2) 토양의 물리적 교란 (physical perturbation), (3) 토양의 화학적 교란 (chemical perturbation) 등으로 나누어 볼 수 있다 (Table 2).

3.3.1 토지이용도와 토양 관리

토지 이용도 변화와 다양한 형태의 농업활동은 단기적으로는 토양 양분과 미생물, 식물, 미소동물상, 먹이사슬 등에 변화를 야기하고, 장기적으로는 토양 구조와 기능, 더 나아가 인근 수계에도 영향을 미쳐 최종적으로 생태계와 토양 리질리언스를 변화시킬 수 있는 생물 물리학적 힘이라 볼 수 있다 (Lal 1997, de Vries et al. 2012).

토양 리질리언스 관점에서 토지 이용도의 변화를 평가한 선행 연구들을 살펴보면, 우선 de Vries et al. (2012)은 초지 (토양 균류 기반의 먹이사슬 시스템)와 집약식 밀 밭 (박테리아 기반 먹이사슬 시스템)을 대상으로 건조에 대응한 먹이사슬의 저항성과 리질리언스를 계산하여 비교·분석하였다. McGovern et al. (2013)은 영국 스노든 산의 고지대 (upland)를 대상으로 1968년과 2008년의 토양 분석 결과의 비교를 통해 토지 이용도 (양의 방목 강도의 변화), 오염물 집적 (산성화의 원인물질인 질소와 황의 배출과 집적량의 변화), 기후변화 (온도 변화)가 토양 화학성의 변화에 미치는 영향과 주요 원인을 알아내고자 하였다. Lorenz and Lal (2015)은 빠른 속도로 진행 중인 도시화에 관심을 갖고, 기존의 농경지 토양이 도시 토양 (urban soil)으로 빠른 속도로 변하는 과정에서 토지 이용도 및 피복 변화를 탄

Table 2. Summary of soil resilience studies categorized by anthropogenic activities

Categories	Activities	References
Land-use and Management	Clear-cuts	Overby et al. 2015
	Conservation agriculture	Lal 2016
	Crop rotation and inoculation	Miethling and Tebbe 2004
	Grazing intensity	Mworia et al. 1997
	Grazing intensity	Doudill et al. 1998
	Land management practice	Mandal et al. 2017
	Land subsidence	Wang et al. 2014
	Land-use and land cover change	Lorenz and Lal 2015
	Land-use change	de Vries et al. 2012
	Land-use change	McGovern et al. 2013
	Land-use change	Ajayi and Horn 2016
	Land-use change	Ayala-Orozco et al. 2017
	Land-use change	Hirsch et al. 2017
	Litter protection	Zhang et al. 2013
	Long-term conservation	de Andrade Bonetti et al. 2017
	Mulching and inter-cropping	Carvalho et al. 2017
	Removal plant carbon	Avramides et al. 2009
	Soil cutting	Lamey et al. 2016
	Soil transplantation	Meola et al. 2014
	Physical perturbation	Burning, mowing, ploughing
Compaction		Tobias et al. 2001
Compaction		Zhang et al. 2005
Compaction		Gregory et al. 2007
Compaction		Arthur et al. 2012
Erosion		Kuske et al. 2012
Irrigation		Carvalho et al. 2017
Municipal sewage		Buondonno et al. 2008
Municipal sewage		Capra et al. 2011
Tillage		Lal 1993
Tillage		Carter et al. 2009
Tillage		Verhulst et al. 2011
Tillage		de Moraes Sa et al. 2014
Tillage		Romero et al. 2014
Tillage		Ajayi and Horn 2016
Treated waste water		del Mar Alguacil et al. 2012
Treated waste water		Frenk et al. 2014
Chemical perturbation	Alkylbenzene	Martínez-Pascual et al. 2015
	Biocide	Kuan et al. 2006
	Biofumigant	Mocali et al. 2015
	Crude oil	Franco et al. 2004
	Fungicide	Howell et al. 2014
	Long-term fertilization	Demkina and Ananeva 1998
	Long-term fertilization	Munkholm et al. 2002
	Long-term fertilization	Hejzman et al. 2014
	Long-term fertilization	Kumar et al. 2014
	Pesticide	Miethling and Tebbe 2004
	Pesticide	Mertens et al. 2007
	Soil disinfection	Wada and Toyota 2007
Soil disinfection	Fujino et al. 2008	

소를 중심으로 정리하였다. 더하여 호주, 캐나다, 중국, 뉴질랜드, 러시아, 영국, 미국 등의 각 나라별 도시 토양

의 무기 및 유기탄소를 비교하였고 탄소 저장고로서의 도시 토양의 능력을 강화시킬 수 있는 방법들을 다각도

(최적의 비료시비와 관계, 공사 이후 새로운 식생 도입, 바이오고형물과 음식폐기물의 활용, 도심 정원에서 유기물시용 등)에서 제시하며 이러한 도시 토양 내 탄소 저장도 도시 생태계의 리질리언스, 기후변화 적응과 완화, 그리고 인간 행복에 필수적이며 도시의 구성원과 지역 전문가, 지방정부 및 비정부기구(non-governmental organization)가 모두 노력해야 함을 강조하였다.

Ajayi and Horn (2016)은 경작지를 초지로 용도를 변경하였을 때 공극, 견지성, 강도 등과 같은 토양의 물리성의 회복이 향상되는 것을 확인하였고, Hirsch et al. (2017)은 휴한지와 경작지와 초지를 각각의 서로 다른 용도로 변경할 때 토양 탄소, 미생물 군집 구조와 활성, 토양 중형 동물들의 변화를 보고하였다. 또한 Ayala-Orozco et al. (2017)도 열대 건조림, 천이 산림 지대, 목초지를 대상으로 목초지로의 용도 변경과 방치에 따른 회복 과정 실험을 통해 토양의 저항성과 회복력을 분석하여 식물 종 풍부도 (plant species richness)가 매우 중요한 요인임을 도출하였다. Mworira et al. (1997)은 방목장에서 어린 암소 (heifers)의 개체 수 조절로 방목 강도를 2년간 조절하며 토양 특성의 변화와 식생의 회복 속도를 분석하였고, Doudill et al. (1998)은 방목지에서 소 (cattle)의 방목에 따른 식생감소 및 분뇨가 토양 중 무기양분 (N, P) 무기화, 유실, 그리고 순환에 미치는 영향을 보고하였다.

그 외에도 반건조지대에서의 토양 침식, 지하수 사용에 의한 지반침하, 토양 이식, 멀칭, 간작, 윤작, 유전자 변형 미생물 접종 등과 같은 다양한 형태의 인간 활동이 토양 리질리언스에 미치는 영향을 확인하는 연구도 수행되었다 (Miethling and Tebbe 2004, Meola et al. 2014, Wang et al. 2014, Larney et al. 2016, Carvalho et al. 2017). de Andrade Bonetti et al. (2017)은 장기간에 걸친 무경운, 작물-가축 혼합시스템 등과 같은 보존 농업체제에서 건조/재습윤 교란에 대하여 토양 내 유기물, 점토함량, 산화철의 존재가 토양 리질리언스에 매우 중요한 인자임을 확인하였고, Hobbs and Govaerts (2008)과 Lal (2016) 또한 기후변화 대응의 일환으로 토양 내 탄소의 저장과 격리에 있어 토양의 이동을 최소화, 합리적수준의 유기질양분을 보유, 실행가능한 수준의 윤작 등의 활동을 포함하는 보존농업의 중요성과 의의를 역설하였다. Mandal et al. (2017)은 인도에서 행해지는 다양한 토지관리 (land management)가 토양 저

하에 미치는 영향을 확인함과 동시에 토양 질 유지를 위해 필요한 토양 유기 탄소의 한계 수준을 계산함으로써 토양 질 지표 (soil quality index, SQI)의 유용성 또한 함께 제시하였다. Avramides et al. (2009)도 와인 밭에서 겨울철 식물체를 제거하였을 때 토양 수 중 용존 유기 물질들의 농도가 급격히 감소하였음에도 미생물 군집은 여전히 활동 중이었으며 특히 자유아미노산들을 빠르게 소비하였다. 그러나 그 이후 4개월 동안 이전 수준까지 빠르게 회복하는 리질리언스를 보여주었다.

3.3.2 토양의 물리적 교란

물리적 교란은 토양 리질리언스 연구 초기부터 지금까지 지속적으로 연구되어온 교란으로, 특히 토양 압밀 (compaction)과 경운 (tillage)과 관련한 연구가 많이 진행되었다. 전세계의 농경지에서 발견되는 대표적인 환경문제인 토양 압밀은 농업의 기계화 및 고도화에 따른 무게 증가가 주된 원인으로, 한 번 압밀된 토양은 경운에 의해 쉽게 복원되기 어렵고 침수 (water logging), 뿌리 성장 저해, 작물 수율 감소 등을 야기하는 것으로 알려져 있다 (Tobias et al. 2011). 특히 심토의 압밀은 일반적인 재배과정을 통해 완화될 수 없어서 더 문제시 되는 주요 관심사항이다 (Jones et al. 2003).

Gregory et al. (2007)은 서로 다른 토성을 갖는 토양에 동일한 강도의 압밀 처리를 한 후 밀 재배를 통해 토양 특성, 토양 수분, 토양 강도, 밀의 생산량, 그리고 토양 미생물 군집 구조의 변화를 16개월간 모니터링하였다. Arthur et al. (2012)은 동일한 점토함량의 토양을 대상으로 유기탄소 함량 (1.0, 1.4, 2.1%)의 차이가 토양 압밀과 리질리언스에 미치는 영향을 보고하였는데, 특히 공기 투과율과 공극비에 대해 토양의 저항성과 리질리언스 사이에 유의한 양의 상관관계를 확인하면서 유기탄소, 유기물의 중요성을 강조하였다. Zhang et al. (2005)은 압밀에 대한 저항성과 토양 구조의 회복력을 평가하기 위해 습윤/건조 순환 횟수에 따른 압밀 실험 (compression test)과 표토를 대상으로 전단 실험 (shear test)을 수행하고 부가적으로 토양의 저항성 및 리질리언스 향상을 목적으로 유기물을 처리하기도 하였다. Tobias et al. (2001)은 굴착기계와 사탕무수확기계가 표토와 심토의 압밀 리질리언스에 미치는 영향을 현장에서 측정하고 모니터링하는 새로운 방법인 large area settlement-meter (LAS-meter) 제시를 통해 기계의 바

귀 하중과 토양 수분이 토양 압밀과 리질리언스에 매우 중요한 요소임을 보고하였다. Kuske et al. (2012)은 추운 건조지역에서 인간의 장기간 도보 (foot trampling) 가 지의류(lichens), 이끼류(mosses), 그리고 시아노박테리아의 핵심종인 *Microcoleus vaginatus*에 치명적인 영향을 주고 토양 침식과 표토 내 탄소, 질소의 함량이 저하되는 것을 보고함으로써 수 십 년간 건조지역 생태계의 기능 대체에 중요한 요소이자 지표인 생물지각(biocrust) 중요성을 강조하였다. 생물지각이란 표토에서 초기 군집인 시아노박테리아에 의해 생성된 다당류(polysaccharides)가 토양 입자를 서로 연결한 생성물을 뜻하며, 생물지각은 건조지역에서 토양의 안정성과 수분보유력을 증가시켜 식물의 발아, 생존, 영양상태를 결정하는 중요한 인자로 인식되고 있다.

지금까지 토양에서 일어나는 대표적인 물리적 교란인 토양 압밀과 그 리질리언스를 측정하고 분석하고 향상시키기 위한 연구들을 살펴보았다. 그 중 경운(tillage)은 농경지에서 압밀 스트레스를 극복하기 위한 기본 작업이자 매우 오래된 농업 활동의 하나로 토양 저하, 토양 질, 토양 리질리언스를 통제하는 역동적인 과정에서 중요한 역할을 하는 요소이다. 경운을 제대로 사용하면 잠재적인 생산성과 유용성을 달성하는데 유용한 도구로 사용될 수 있지만 그렇지 못할 경우에 경운은 토양 구조 파괴와 침식 가속화 양분 순환의 교란을 초래한다(Lal 1993). 적절한 경운은 토양 압밀을 완화하고 토양수의 침투율과 유효토심을 증가시키는 등의 긍정적인 영향(restorative effects)을 주지만, 때로는 토양 침식을 가속화하고 토양 유기물을 분해시키며 토양 생물다양성을 변화시킴으로써 부정적인 영향(degradative effects)을 미치기도 한다. 결국 경운은 토양 안정성, 토양 리질리언스, 그리고 토양 질에 영향을 주어 토양이라는 자원의 지속가능한 이용에 영향을 미치는 중요한 인자라 할 수 있다(Lal 1993).

경운에 의한 농업, 환경의 부정적인 영향을 상쇄하기 위한 연구들 또한 진행되었다. Carter et al. (2009)은 감자 재배지에서 경운의 깊이를 얇게 수행하는 보존경운 처리를 통해 토양유기탄소, 대형 내수성입단, 입자성 탄소 및 입자성 질소의 함량을 보존 및 증가시킬 수 있었으며 토양 미생물량과 활성도 그리고 토양 선충 밀도와 같은 생물학적 지표들도 향상되는 것을 확인하였다. de Moraes Sá et al. (2014)은 무경운(no-till) 농법이 토

양 탄소 역학(soil C dynamic)에 미치는 장기적인 영향을 확인하고자 16년간 일반경운, 축소경운, 간헐적 무경운, 완전 무경운으로 밀, 콩, 옥수수 등 윤작을 진행하며 토양 물리성과 화학성을 분석한 결과, 토양 유기탄소 함량, 이동성 탄소(labile C) 분획 그리고 밀 생산 수율과 밀접한 상호관계가 확인되었다.

Romero et al. (2014)은 아르헨티나의 반건조지대에서 표토가 훼손되고 생산성까지 저하된 토양을 회복시키기 위해 무경운, 윤작, 농장 인클로저(farm enclosure, 초지화)를 도입하였다. Ajayi and Horn (2016)은 오랜 기간 관행 경운과 시비로 저하된 감자, 귀리, 겨울밀 재배지를 초지로 전환하고 동시에 무경운, 무비료, 무재파(no reseeding, no renovation)를 도입하였다. Lewis et al. (2010)은 반건조 지역의 초지를 대상으로 디스크 경운과 함께 화재, 썩어루 방목 등에 의한 복합적인 물리적 교란이 식생 회복에 대한 리질리언스에 미치는 영향을 연구함으로써, 다년생 식생의 비율이 높을 때 교란으로부터 초지 식생의 다양성과 풍부도 회복이 빨랐으며 계절에 따른 기후의 영향도 받는 것을 확인하였다.

3.3.3 토양의 화학적 교란

앞선 정리한 토양 리질리언스에 영향을 미치는 물리적 교란은 인간의 농업, 임업, 축산 활동에 의한 것이 대부분인 것을 확인할 수 있었다. 인간에 의한 화학적 교란 관련 연구들도 위와 크게 다르지 않았으며 그들 중 대표적인 연구주제로 비료의 장기 사용을 들 수 있다(Table 2).

Demkina and Ananeva (1998)는 38년간 장기간 화학비료와 퇴비의 투입, 단일재배 및 윤작이 미생물활성에 미치는 영향을 기질투입 호흡계수를 통해 확인하였으며, 계절과 토양 특성에 영향을 받는 것을 확인하였다. Munkholm et al. (2002)은 장기간의 화학비료와 퇴비시용이 토양의 화학성과 생물학적 특성뿐만 아니라 입단의 강도와 물리적 특성에 미치는 영향을 확인하였다. 비료 무처리구의 경우 토양 유기물과 미생물량 그리고 밀도가 낮았으며, 형성된 입단의 강도는 건조할 때 강하게 나타났다. Hejman et al. (2014)은 63년간 비료를 사용하지 않은 토양을 대상으로 식생 분포와 토양특성을 분석함으로써 식물 체내 인의 재활용 효율이 우점 식물종에 주요한 영향을 미치는 것을 보고하였다.

살생물제(biocide)의 사용은 화학비료와 마찬가지로

로 농업의 생산성 향상을 위해 행해지는 대표적인 인위적 활동이자 화학적 교란이라 할 수 있다. Kuan et al. (2006)은 영국의 생물 다양성 및 생태계 기능 프로그램의 연구지역의 일부인 온대 고지대 초지에서 살생물제인 chlorpyrifos의 처리가 토양 미생물의 열과 중금속 구리 독성에 대한 리질리언스를 확인하였다. 그 결과 살생물제를 처리할 때 열에 대한 미생물 군집의 리질리언스는 대조구 대비 감소하였고, 토양의 탄소 무기화 기능은 구리에 의한 중금속 교란 이후 28일이 지나도 회복되지 않았다. Miethling and Tebbe (2004)와 Mertens et al. (2007)은 살충제 (pesticide)가 토양 리질리언스에 미치는 영향을 확인하기 위하여, microcosms 규모에서 유전자변형 박테리아 제거를 위해 2종류의 살충제 (78% copperoxychloride, glyphosate)를 사용하고 다른 작물과의 윤작도 병행하였다. Howell et al. (2014)은 토양 내 진핵생물과 박테리아 등의 살균제 (fungicide)에 대한 저항성과 리질리언스를 실험하였다. 살균제로 azoxystrobin를 사용한 결과 토양 탈수소효소 활성은 살균제 농도 증가에 따라 감소하였으나 회복되는 모습을 보여주었고 총 미생물량 (total microbial biomass)에는 살균제가 유의한 영향을 미치지 못하였다. 또한 살균제처리에 따라 토양 미생물 군집의 구조가 변하며 살균제 농도 25 mg kg^{-1} 에서 민감하게 반응하였다. 이에, 화학 살충제의 무분별한 사용이 토양 리질리언스에 미치는 악영향을 감소하기 위한 살충제를 대신할 방법의 필요성이 대두되었으며, 대체 방법 중 하나로 생물 훈증 (biofumigant)을 들 수 있다. 생물훈증이란 glucosinolate를 함유하는 식물, 특히 Brassicacea 식물들을 활용하여 병원균과 질병을 억제하는 기술로, Mocali et al. (2015)은 에티오피아겨자 (*Brassica carinata*)의 탈지방종자 (defatted seed meals, DSMs)를 이용하여 친환경 생물제재로서의 적용가능성을 보고하였다.

토양 소독 (soil disinfection)은 토양에 존재하는 병원균을 제어하여 농작물 생산을 증대하기 위한 방법으로 이 때 유용한 미생물도 함께 제거 및 파괴되는 단점을 수반한다 (Nielsen and Yorston 1991). 이에 Wada and Toyota (2007)는 chloropicrin과 sodium methyl dithiocarbamate를 이용한 7일간 소독이 유기물질 (glucose, chitin) 분해 활성과 암모니아 산화 박테리아 수의 저항성과 리질리언스에 미치는 영향을 확인하였다. 그리고 Fujino et al. (2008)은 sodium methyl dithiocarbamate

로 토양을 7일간 소독하고 선충류의 밀도와 유기물 분해 활성을 관측하였다. 그 결과 cellulose 분해 활성과 선충 밀도 모두 각각 75%, 80% 이상 감소하였으며 4주 이후에도 회복되지 않았다. 이를 통해 토양 소독은 토양의 저항성뿐만 아니라 리질리언스에 매우 치명적인 화학적 교란임을 알 수 있었다.

이 외에도 유기오염물질이 토양 미생물의 리질리언스에 미치는 영향을 연구한 사례들도 있었다. Franco et al. (2004)은 원유 (crude oil)에 의한 토양 오염이 미생물량과 활성, 그리고 원유의 분해 능력에 미치는 영향을 토양 특성과 재배 작물의 종류에 따라 확인하고, 토양 리질리언스를 오염 60일 이후의 분해된 정도를 통해 평가하였다. Martínez-Pascual et al. (2015)은 경소수성액체인 alkylbenzene으로 오염된 토양을 복원하기 위해 화학적 산화처리와 토착미생물을 활용한 4주간의 자연저감을 거쳐 미생물 군집 구조와 활성, 미생물 분해에 의한 탄화수소 변화를 관찰하였다. 변형된 펜톤산화반응으로 오염물을 산화시키는 과정에서 초기 토양 미생물 풍부도와 활성이 모두 저하되었으나 일부 미생물 군집에서 리질리언스가 확인되었으며, 최종적으로는 잠재적인 탄화수소 분해능력 (*alkB* 유전자)을 갖고 있는 *Rhodococcus*, *Ochrobactrum*, *Acinetobacter*, *Cupriavidus* 등이 관찰되어 화학적 산화처리와 미생물을 결합한 형태의 복원 가능성을 제시하였다. 최근에는 유기오염물질뿐만 아니라 무기오염물질에 의한 화학사고가 토양 생태 기능에 미치는 영향이 보고되었다. Jeon et al. (2017)은 산업단지에서의 화학물질 누출사고 모의실험을 강산인 HCl과 강염기인 NaOH를 대상으로 수행하였는데, 그 결과 토양의 화학성 뿐만 아니라 토성과 투수성이 변하였다. 또한 토양 생물들에게는 화학물질에 의한 직접적인 독성 및 토양 화학성 변화에 따른 간접적인 독성을 발현하는 것을 보고하며, 화학사고에 의한 환경영향 평가방안이 마련되어야 함을 강조하였다.

지금까지 토양 리질리언스와 관련하여 토양에 행해지는 인간의 활동을 크게 3가지로 나누어 살펴보았다. 인간 활동에 의한 스트레스, 오염물질의 유입, 기후변화와 관련한 연구들이 주를 이루었으며, 토양 리질리언스에 영향을 미치는 주요 핵심 인자를 확인하고 이해하기 위한 노력들이 따르고 있었음을 알 수 있었다.

4. 결론

지각은 지구 전체 부피의 1%도 안 되며, 지각 중에서도 극히 일부분을 토양이 덮고 있다. 토양이 1 cm가 만 들어지기 위해 200년 이상의 매우 긴 시간이 소요되지만 토양이 오염되고 훼손되어 유실되기까지는 시간이 얼마 걸리지 않는다. 토양은 식물들이 뿌리 내려 생태계를 조성할 수 있게 하는 근간이자 인류가 살아가는 삶의 터전이기 때문에 토양의 보존과 관리의 중요성과 필요성에 대해서는 이견이 없다. 토양 리질리언스는 현재와 미래의 중요 화두인 기후변화, 식량안보, 지속가능한 농업과도 매우 밀접한 관련이 있는 주제이다. 현 인류는 매우 유동적이고 급변하는 시기에 놓여 있기 때문에, 토양 환경에 들이닥치는 다양한 종류의 교란으로부터 토양이 본래의 구조와 기능을 유지하는 능력, 즉 저항성과 회복능력을 갖는 것이 중요하다. 토양 리질리언스는 바로 그 원동력이며 그렇기 때문에 불확실성과 예측불가능성이 높은 미래에 대비할 수 있는 필수불가결한 연구 분야이다. 따라서 본 연구는 토양 리질리언스를 처음 접하는 국내·외 연구자들에게 리질리언스 연구의 진입 문턱 (threshold)을 낮추는데 기여할 것을 목적으로, 리질리언스와 토양 리질리언스에 대해 소개하고 선행 토양 리질리언스 연구들이 관심을 갖고 연구해 온 주요 스트레스 또는 교란 원인을 크게 자연적 요인과 인위적 요인으로 나누어 정리하였다. 그러나 국내 농업 환경에의 토양 리질리언스의 실질적인 적용을 위해서는, 토양의 어떠한 물리·화학·생물학적 특성과 지표들이 사용되어왔으며 어떠한 계산식과 통계 처리를 선행 연구들이 활용하였는지 후속 연구를 통한 정리가 필요할 것이다.

사 사

This research was funded by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) [2016R1D1A1B03932877], and partly supported by Korea University.

References

Ajayi, A.E. and Horn, R. 2016. Transformation of ex-arable land to permanent grassland promotes pore rigidity and

- mechanical soil resilience. *Ecological Engineering* 94: 592-598.
- Allen-Morley, C.R. and Coleman, D.C. 1989. Resilience of soil biota in various food webs to freezing perturbations. *The Ecological Society of America* 70(4): 1127-1141.
- Anan'eva, N.D., Blagodatskaya, E.V. and Demkina, T.S. 1997. The effect of drying-moistening and freezing-thawing on soil microbial communities' resilience. *Eurasian Soil Science* 30(9): 1010-1014.
- Archer, S. and Stokes, C. 2000. Stress, disturbances and change in rangeland ecosystems in rangeland desertification. Springer, Dordrecht, Netherland.
- Arthur, E., Schjønning, P., Moldrup, P. and de Jonge, L.W. 2012. Soil resistance and resilience to mechanical stresses for three differently managed sandy loam soils. *Geoderma* 173-174: 50-60.
- Austin, A.T. and Vitousek, P. 1998. Nutrient dynamics on a precipitation gradient in Hawaii. *Oecologia* 113: 519-529.
- Avramides, E.J., Christou, M. and Jones, D.L. 2009. Resilience of soil microbial activity and of amino acid dynamics to the removal of plant carbon inputs during winter. *Scientia Agricola* 66(1): 132-135.
- Ayala-Orozco, B., Gavito, M.E., Mora, F., Siddique, I., Balvanera, P., Jaramillo, V.J., Cotler, H., Romero-Doque, L.P. and Martinez-Meyer, E. 2017. Resilience of soil properties to land-use change in a tropical dry forest ecosystem. *Land Degradation and Development* 29(2): 315-325.
- Barba, J., Yuste, J.C., Poyatos, R., Hanssens, I.A. and Lloret, F. 2016. Strong resilience of soil respiration components to drought-induced die-off resulting in forest secondary succession. *Oecologia* 182(1): 27-41.
- Bengtsson, J. 2002. Disturbance and resilience in soil animal communities. *Eurasian Soil Biology* 38: 119-125.
- Bérard, A., Bouchet, T., Sévenier, G., Pablo, A.L. and Gros, R. 2011. Resilience of soil microbial communities impacted by severe drought and high temperature in the context of Mediterranean heat waves. *Eurasian Soil Science* 47(6): 333-342.
- Bhattacharyya, P.N., Goswami, M.P. and Bhattacharyya, L.H. 2016. Persepctive of beneficial microbes in agriculture under changing climatic scenario: a review. *Journal of Phytology* 8: 26-41.
- Bigwood, D.W. and Inouye, D.W. 1988. Spatial pattern analysis of seed banks: an improved method and optimized sampling. *Ecology* 69: 497-507.
- Blanco, H. and Lal, R. 2010. Soil Resilience and Conservation. In, Balnco, H. and Lal, R. (eds.), Principles of soil conservation and management. Springer, Berlin, Germany. pp. 425-447.
- Blum, W.E.H. and Santelises, A.A. 1994. A concept of

- sustainability and resilience based on soil functions. In, Greenland, D.J. and Szabolcs, I. (eds.), *Soil resilience and sustainable land use*. CAB Int., Wallingford, UK. pp. 535-542.
- Buondonno, A., Capra, G.F., Coppola, E., de Riso, S., Duras, M.G., Selis, G., Vacca, S. and Colella, C. 2008. Comparative resilience of soil and natural zeolite against adverse features of a municipal sewage. A preliminary investigation. *Il Nuovo Cimento B* 123(10): 1435-1447.
- Capon, S.J. and Brock, M.A. 2006. Flooding, soil seed bank dynamics and vegetation resilience of a hydrologically variable desert floodplain. *Freshwater Biology* 51: 206-223.
- Capra, G.F., Buondonno, A., Coppola, E., Duras, M.G., Vacca, S. and Colella, C. 2011. Zeolitized tuffs in pedotechniques to improve soil resilience against the impact of treatment by municipal sewage: balance of nutrient and noxious cations. *Clay Minerals* 46(2): 261-278.
- Carter, M.R., Noronha, C., Peters, R.D. and Kimpinski, J. 2009. Influence of conservation tillage and crop rotation on the resilience of an intensive long-term potato cropping system: restoration of soil biological properties after potato phase. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 133(1-2): 32-39.
- Carvalho, A.A., Silva, T.G.F., Souza, L.S.B., Moura, S.B., Araujo, G.G.L. and Tolêdo, M.P.S. 2017. Soil moisture in forage cactus plantations with improvement practices for their resilience. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 21(7): 481-487.
- Chaer, G., Fernandes, M., Myrold, D. and Bottomley, P. 2009. Comparative resistance and resilience of soil microbial communities and enzyme activities in adjacent native forest and agricultural soils. *Microbial Ecology* 58(2): 414-424.
- Cook, B.I., Miller, R.L. and Seager, R. 2009. Amplification of the north American "Dust Bowl" drought through human induced land degradation. In, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 106(13): 4997-5001.
- Cubasch, U., Meehl, G.A., Boer, G.J., Stouffer, R.J., Dix, M., Noda, A., Senior, C.A., Raper, S. and Yap, K.S. 2001. Projections of future climate changes. In, Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linder, P.J., Dai, X., Maskell, K. and Johnson, C.A. (eds.), *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, UK.
- Dai, Z., Chu, A., Du, J., Stive, M. and Hong, Y. 2010. Assessment of extreme drought and human interference on baseflow of the Yangtze River. *Hydrological Processes* 24(6): 749-757.
- Dale, A.M. and Buckner, R.L. 1997. Selective averaging of rapidly presented individual trials using fMRI. *Hum. Brain Mapp.* 5(5): 329-340.
- Davoudi, S., Shaw, K., Haider, L.J., Quinlan, A.E., Peterson, G.D., Wilkinson, C., Fünfgeld, H., McEvoy, D., Porter, L. and Davoudi, S. 2012. Resilience: A bridging concept or a dead end? "Reframing" Resilience: Challenges for planning theory and practice interacting traps" Resilience assessment of a pasture management system in northern Afghanistan urban resilience: What does it mean in planning practice? Resilience as a useful concept for climate change adaptation? The politics of resilience for planning: A cautionary note. *Planning Theory and Practice* 13(2): 299-333.
- de Andrade Bonetti, J., Anghinoni, I., de Moraes, M.T. and Fink, J.R. 2017. Resilience of soils with different texture, mineralogy and organic matter under long-term conservation systems. *Soil and Tillage Research* 174: 104-112.
- de Moraes Sá, J.C., Tivet, F., Lal, R., Briedis, C., Hartman, D.C., dos Santos, J.Z. and dos Santos, J.B. 2014. Long-term tillage systems impacts on soil C dynamics, soil resilience and agronomic productivity of a Brazilian oxisol. *Soil and Tillage Research* 136: 38-50.
- de Vries, F.T., Liiri, M.E., Björnlund, L., Bowker, M.A., Christensen, S., Setälä, H.M. and Bardgett, R.D. 2012. Land use alters the resistance and resilience of soil food webs to drought. *Nature Climate Change* 2: 276-280.
- del Mar Alguacil, M., Torrecillas, E., Torres, P., García-Orenes, F. and Roldán, A. 2012. Long-term effects of irrigation with waste water on soil AM fungi diversity and microbial activities: the implications for agroecosystem resilience. *Plos One* 7(10). e47680.
- Demkina, T.S. and Ananeva, N.D. 1998. The influence of long-term fertilizer application on the respiration activity and resilience of soil microbial communities. *Eurasian Soil Science* 3(11): 1256-1263.
- Doran, J.W. and Parkin, T.B. 1994. Defining and assessing soil quality. In, Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F. and Stewart, B.F. (eds.), *Defining soil quality for a sustainable environment*, SSSA Special Publication No. 35. SSSA, Madison, WI, USA. pp. 3-21.
- Doran, J.W. and Parkin, T.B. 1996. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In, Doran, J.W. and Jones, A.J. (eds.), *Methods for assessing soil quality*, SSSA Special Publication No. 49. SSSA, Madison, WI, USA. pp. 25-38.
- Doudill, A., Heathwaite, A.L. and Thomas, D.S.G. 1998. Soil water movement and nutrient cycling in semi-arid rangeland: vegetation change and system resilience. *Hydrological Processes*. 14: 443-459.

- Duniway, M.C., Herrick, J.E. and Monger, H.C. 2010. Spatial and temporal variability of plant-available water in calcium carbonate-cemented soils and consequences for arid ecosystem resilience. *Oecologia* 163(1): 215-226.
- Eswaran, H. 1994. Soil resilience and sustainable land management in the context of AGENDA 21, CAB International, Wallingford.
- Fernández-Pascual, E., Jiménez-Alfaro, B., Hájek, M., Díaz, T.E. and Pritchard, H.W. 2015. Soil thermal buffer and regeneration niche may favour calcareous fen resilience to climate change. *Folia Geobotanica* 50(4): 293-301.
- Forman, R.T. and Godron, M.J.J.W. 1986. Landscape ecology, John Wiley & Sons, New York, USA.
- Franco, I., Contin, M., Bragato, G. and De Nobilli, M. 2004. Microbiological resilience of soils contaminated with crude oil. *Geoderma* 121(1-2): 17-30.
- Frenk, S., Hadar, Y. and Minz, D. 2014. Resilience of soil bacterial community to irrigation with water of different qualities under Mediterranean climate. *Environmental Microbiology* 16(2): 559-569.
- Fujino, C., Wada, S., Konoike, T., Toyota, K., Suga, Y. and Ikeda, J.I. 2008. Effect of different organic amendments on the resistance and resilience of the organic matter decomposing ability of soil and the role of aggregated soil structure. *Soil Science and Plant Nutrition* 54(4): 534-542.
- Gregory, A.S., Watts, C.W., Griffiths, B.S., Hallett, P.D., Kuan, H.L. and Whitmore, A.P. 2009. The effect of long-term soil management on the physical and biological resilience of a range of arable and grassland soils in England. *Geoderma* 153(1-2): 172-185.
- Gregory, A.S., Watts, C.W., Whalley, W.R., Kuan, H.L., Griffiths, B.S., Hallett, P.D. and Whitmore, A.P. 2007. Physical resilience of soil to field compaction and the interactions with plant growth and microbial community structure. *Eurasian Journal of Soil Science* 58(6): 1221-1232.
- Griffiths, B.S., Hallett, P.D., Kuan, H.L., Gregory, A.S., Watts, C.W. and Whitmore, A.P. 2008. Functional resilience of soil microbial communities depends on both soil structure and microbial community composition. *Biology and Fertility of Soils* 44(5): 745-754.
- Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M. and Lo, K. 2010. Global surface temperature change. *Reviews of Geophysics* 48(4): 1-29.
- Hejzman, M., Jouany, C., Cruz, P., Morel, C., Stroia, C. and Theau, J.P. 2014. Sub soil P status could explain the absence of resilience in plant species composition of subalpine grassland 63 years after the last fertilizer application. *Scientia Agriculturae Bohemica* 45: 45-84.
- Herrick, J.E. 2000. Soil quality: an indicator of sustainable land management? *Applied Soil Ecology* 15: 75-83.
- Hirsch, P.R., Jhurrea, D., Williams, J.K., Murray, P.J., Scott, T. and Misselbrook, T.H. 2017. Soil resilience and recovery: rapid community responses to management changes. *Plant and Soil* 412(1-2): 283-297.
- Hobbs, P.R. and Govaerts, B. 2008. How conservation agriculture can contribute to buffering climate change. In, Reynolds, M.P. (ed.), *Climate change and crop production*. Cabi, Cambridge, MA, USA. pp. 177-199.
- Holling, C.S. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 4: 1-23.
- Holling, C.S. 1986. The resilience of terrestrial ecosystems: local surprise and global change, p. 292-317. In: Clark, W.C. and Munn, R.E. (eds.), *Sustainable Development of the Biosphere*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Howell, C.C., Hilton, S., Semple, K.T. and Bending, G.D. 2014. Resistance and resilience responses of a range of soil eukaryote and bacterial taxa to fungicide application. *Chemosphere* 112: 194-202.
- Hueso, S., Hernández, T. and García, C. 2011. Resistance and resilience of the soil microbial biomass to severe drought in semiarid soils: the importance of organic amendments *Applied Soil Ecology* 50: 27-36.
- IPCC. 2007. *Climate change 2007: The scientific basis*. Contribution of working group I to the Fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, edited by S. Solomon et al., Cambridge University Press, New York, USA.
- Jeon, E. and Byun, B. 2017. A study on the development and application of community resilience evaluation indicators for responding to climate change. *The Geographical Journal of Korea* 51(1): 47-58.
- Jeon, I., Jung, J.W. and Nam, K. 2017. Changes in soil properties related to soil function due to chemical spills with strong acid and base. *Ecology and Resilient Infrastructure* 4(4): 193-199.
- Jones, R.J.A., Spoor, G. and Thomasson, A.J. 2003. Vulnerability of subsoils in Europe to compaction: a preliminary analysis. *Soil and Tillage Research* 73(1-2): 131-143.
- Kalnay, E. and Cai, M. 2003. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature* 423(6939): 528-531.
- Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F. and Schuman, G.E. 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal* 61(1): 4-10.
- Kerr, H., Johnson, K., Toll, D.G. and Mansfield, F. 2016. Flood holding capacity: a novel concept to evaluate the resilience of amended soils. *Geo-Chicago 2016 (Abstr.)*
- Kim, J.W. and Jung, C. 2013. Ecological resilience of soil oribatid mite communities after the fire disturbance. *Journal of Ecology and Environment* 36(2): 117-123.

- Kuan, H.L., Fenwick, C., Glover, L.A., Griffiths, B.S. and Ritz, K. 2006. Functional resilience of microbial communities from perturbed upland grassland soils to further persistent or transient stresses. *Soil Biology and Biochemistry* 38(8): 2300-2306.
- Kumar, S., Patra, A.K., Singh, D. and Purakayastha, T.J. 2014. Long-term chemical fertilization along with farmyard manure enhances resistance and resilience of soil microbial activity against heat stress. *Journal of Agronomy and Crop Science* 200(2): 156-162.
- Kuske, C.R., Yeager, C.M., Johnson, S., Ticknor, L.O. and Belnap, J. 2012. Response and resilience of soil biocrust bacterial communities to chronic physical disturbance in arid shrublands. *The ISME Journal* 6(4): 886-897.
- Lal, R. 1993. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality and sustainability. *Soil and Tillage Research* 27(1-4): 1-8.
- Lal, R. 1997. Degradation and resilience of soils. *Philosophical Transactions of The Royal Society of London. Series B: Biological Sciences.* 352(1356): 997-1010.
- Lal, R. 2015. Sequestering carbon and increasing productivity by conservation agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation* 70(3): 55-62.
- Lal, R. 2016. Soil health and carbon management. *Food and Energy security* 5(4): 212-222.
- Larney, F.J., Li, L., Janzen, H.H., Angers, D.A. and Olson, B.M. 2016. Soil quality attributes, soil resilience and legacy effects following topsoil removal and one-time amendments. *Canadian Journal of Soil Science* 96(2): 177-190.
- Lewis, T., Reid, N., Clarke, P.J. and Whalley, R.D.B. 2010. Resilience of a high conservation-value, semi-arid grassland on fertile clay soils to burning, mowing and ploughing. *Austral Ecology* 35(4): 464-481.
- Liang, C., Zhu, X., Fu, S., Méndez, A., Gascó, G. and Paz-Ferreiro, J. 2014. Biochar alters the resistance and resilience to drought in a tropical soil. *Environmental Research Letters* 9(6): 1-6.
- Loreau, M., Sapijanskas, J., Isabell, F. and Hector, A. 2012. Niche and fitness differences relate the maintenance of diversity to ecosystem function: comment. *Ecology* 93(6): 1482-1487.
- Lorenz, K. and Lal, R. 2015. Managing soil carbon stocks to enhance the resilience of urban ecosystems. *Carbon Management* 6(1-2): 35-50.
- Maestas, J.D., Campbell, S.B., Chambers, J.C., Pellant, M. and Miller, R.F. 2016. Tapping soil survey information for rapid assessment of Sagebrush ecosystems resilience and resistance. *Rangelands* 38(3): 120-128.
- Mandal, U.K., Sharma, K.L., Venkanna, K., Pushpanjali, Adake, R.V., Masane, R.N., Prasad, J.V.N.S., Venkatesh, G. and Rao, Ch.S. 2017. Sustaining soil quality, resilience and critical carbon level under different cropping systems in semi-arid tropical alfisol soils. *Current Science* 112(9): 1882-1895.
- Marafa, L.M. 2002. Effects and resilience of some soil chemical properties as a result of fire in an urban fringe. *Geography* 87(4): 336-344
- Martínez-García, L.B., De Deyn, G.B., Pugnaire, F.I., Kothamasi, D. and van der Heijden, M.G.A. 2017. Symbiotic soil fungi enhance ecosystem resilience to climate change. *Global Change Biology* 23(12): 5228-5236.
- Martínez-Pascual, E., Grotenhuis, T., Solana, A.M. and Viñas, M. 2015. Coupling chemical oxidation and bio-stimulation: Effects on the natural attenuation capacity and resilience of the native microbial community in alkylbenzene-polluted soil. *Journal of Hazardous Materials* 300(30): 135-143.
- McGovern, S.T., Evans, C.D., Dennis, P., Walmsley, C.A., Turner, A. and McDonald, M.A. 2013. Resilience of upland soils to long term environmental changes. *Geoderma* 197-198: 36-42.
- Meola, M., Lazzaro, A. and Zeuyer, J. 2014. Diversity, resistance and resilience of the bacterial communities at tow alpine glacier forefields after a reciprocal soil transplantation. *Environmental Microbiology* 16(6): 1918-1934.
- Mertens, J., Ruyters, S., Springael, D. and Smolders, E. 2007. Resistance and resilience of zinc tolerant nitrifying communities is unaffected in long-term zinc contaminated soils. *Soil Biology and Biochemistry* 39(7): 1828-1831.
- Miethling, R. and Tebbe, C.C. 2004. Resilience of a soil-established, genetically modified *Sinorhizobium meliloti* inoculant to soil management practices. *Applied Soil Ecology* 25(2): 161-167.
- Mills, R.T.E., Gavazov, K.S., Spiegelberger, T., Johnson, D. and Buttler, A. 2014. Diminished soil functions occur under simulated climate change in a sup-alpine pasture, but heterotrophic temperature sensitivity indicates microbial resilience. *Science of Total Environment* 473-474: 465-472.
- Mocali, S., Landi, S., Curto, G., Dallavalle, E., Infantino, A., Colzi, C., d'Errico, G., D'Avino, L. and Lazzeri, L. 2015. Resilience of soil microbial and nematode communities after biofumugant treatment with defatted seed meals. *Industrial Crops and Products* 75(30): 79-90.
- Mora, J.L. and Lázaro, R. 2013. Evidence of a threshold in soil erodibility generating differences in vegetation development and resilience between two semiarid grasslands. *Journal of Arid Environments* 89: 57-66.
- Munkholm, L.J., Schjøning, P., Debosz, K., Jensen, H.E. and Christensen, B.T. 2002. Aggregate strength and mechanical behaviour of a sandy loam soil under

- long-term fertilization treatments. *Eurasian Journal of Soil Science* 53(1): 129-137.
- Mworia, J.K., Mnene, W.N., Musembi, D.K. and Reid, R.S. 1997. Resilience of soils and vegetation subjected to different grazing intensities in a semi-arid rangeland of Kenya. *African Journal of Range and Forage Science* 14(1): 26-31.
- Nearing, M.A., Pruski, F.F. and O'Neal, M.R. 2004. Expected climate change impacts on soil erosion rates: a review. *Journal of Soil and Water Conservation* 59(1): 43-50.
- Neilsen, G.H. and Yorston, J. 1991. Soil disinfection and monoammonium phosphate fertilization increase precocity of apples on replant problem soils. *American Society for Horticultural Science* 116(4): 651-654.
- Ng, E.L., Patti, A.F., Rose, M.T., Schefe, C.R., Smernik, R.J. and Cavagnaro, T.R. 2015. Do organic inputs alter resistance and resilience of soil microbial community to drying? *Soil Biology and Biochemistry* 81: 58-66.
- OJERI. 2015. Resilience Thinking, Geobook, Seoul, Korea. (in Korean)
- Olson, K.R., Al-Kaisi, M., Lal, R. and Morton, L.W. 2017. Soil ecosystem services and intensified cropping systems. *Journal of Soil and Water Conservation* 72(3): 64-69.
- Orwin, K.H. and Wardle, D.A. 2005. Plant species composition effects on belowground properties and the resistance and resilience of the soil microflora to a drying disturbance. *Plant and Soil* 278: 205-221.
- Overby, S.T., Owen, S.M., Hart, S.C., Neary, D.G. and Johnson, N.C. 2015. Soil microbial community resilience with tree thinning in a 40-year-old experimental ponderosa pine forest. *Applied Soil Ecology* 93: 1-10.
- Peters, R. 1991. Consequences of global warming for biological diversity, Routledge, Chapman and Hall, London, UK.
- Pimm, S.L. 1984. The complexity and stability of ecosystems, *Nature* 307: 321-326.
- Preece, C. and Peñuelas, J. 2016. Rhizodeposition under drought and consequences for soil communities and ecosystem resilience. *Plant and Soil* 409(1-2): 1-17.
- Richardson, G.E. 2002. The metatheory of resilience and resiliency. *Journal of Clinical Psychology* 25: 307-321.
- Rivest, D., Lorente, M., Olivier, A. and Messier, C. 2013. Soil biochemical properties and microbial resilience in agroforestry systems: effects on wheat growth under controlled drought and flooding conditions. *Science of Total Environment* 463-464: 51-60.
- Rivest, D., Paquette, A., Shipley, B., Reich, P.B. and Messier, C. 2015. Tree communities rapidly alter soil microbial resistance and resilience to drought. *Functional Ecology* 29: 570-578.
- Romero, C.M., Abril, A., Noe, L. and Rampoldi, E.A. 2014. Resilience of humification process to evaluate soil recovery in a semiarid agroecosystem of central Argentina. *Spanish Journal of Soil Science* 4(3): 211-224.
- Zozanov, B.G. 1994. Stressed soil systems and soil resilience in drylands. In, *Proceeding of 15th International Congress of Soil Science*, Acapulco, Mexico. pp. 238-245.
- Rykiel, E. Jr. 1985. Towards a definition of ecological disturbance. *Australian Journal of Ecology* 10: 361-365.
- Schaeffer, A., Amelung, W., Hollert, H., Kaestner, M., Kandeler, E., Kruse, J., Miltner, A., Ottermanns, R., Pagel, H., Peth, S., Poll, C., Rambold, G., Schloter, M., Schulz, S., Streck, T. and Roß-Nikoll, M. 2016. The impact of chemical pollution on the resilience of soils under multiple stresses: A conceptual framework for future research. *Science of Total Environment* 568(15): 1076-1085.
- Scheu, S. and Schulz, E. 1996. Secondary succession, soil formation and development of a diverse community of oribatids and saprophagous soil macro-invertebrates. *Biodiversity and Conservation* 5: 235-250.
- Scott, K., Setterfield, S., Douglas, M. and Andersen, A. 2010. Soil seed bank confer resilience to savanna grass-layer plants during seasonal disturbance. *Acta Oecologica* 36(2): 202-210.
- Seybold, C.A., Herrick, J.E. and Brejda, J.J. 1999. Soil resilience: a fundamental component of soil quality. *Soil Science* 164(4): 224-234.
- Stock, B.J., Fosberg, M.A., Lynham, T.J., Mearns, L., Wotton, B.M., Yang, Q., Jin, J.-Z., Lawrence, K., Hartley, G.R., Mason, J.A. and McKenney, D.W. 1998. Climate change and forest fire potential in Russian and Canadian boreal forests. *Climatic Change* 38(1): 1-13.
- Szabolcs, I. 1994. The concept of soil resilience. In, Greenland, D.J. and Szabolcs, I. (eds.), *Soil resilience and sustainable land use*. CAB International, Wallingford, UK. pp. 33-39.
- Timmermann, P. 1981. Vulnerability, resilience and the collapse of society. No. 1 in *Environmental Monograph*, Institute for Environmental Studies, University of Toronto, Toronto, Canada.
- Tobias, S., Hennes, M., Meier, E. and Schulin, R. 2001. Estimating soil resilience to compaction by measuring changes in surface and subsurface levels. *Soil Use and Management* 17(4): 229-234.
- Trenberth, K.E., Branstator, G.W. and Arkin, P.A. 1988. Origins of the 1988 North American drought. *Science* 242(4886): 1640-1645.
- Ulrich, B. 1987. Stability, elasticity, and resilience of terrestrial ecosystems with respect to matter balance. In, Schulze, E.D. and Zwölfer, H. (eds.), *Potentials and limitations of ecosystem analysis*, Springer, Berlin, Germany. pp. 11-49.
- Vasil'evskaya, V.D., Grigor'ev, V.Y. and Pogozeva,

- E.A. 2006. Relationships between soil and vegetation characteristics of tundra ecosystems and their use to assess soil resilience, degradation, and rehabilitation potentials. *Eurasian Soil Science*. 39: 314-323.
- Verhulst, N., Carrillo-Garcia, A., Moeller, C., Trethowan, R., Sayre, K.D. and Govaerts, B. 2011. Conservation agriculture for wheat-based cropping systems under gravity irrigation: increasing resilience through improved soil quality. *Plant and Soil* 240(1-2): 467-479.
- Wada, S. and Toyota, K. 2007. Repeated applications of farmyard manure enhance resistance and resilience of soil biological functions against soil disinfection. *Biology and Fertility of Soil* 43(3): 349-356.
- Wang, L., D'Odorico, P., Manzoni, S., Porporato, A. and Macko, S. 2009. Soil carbon and nitrogen dynamics in southern African savannas: the effect of vegetation-induced patch-scale heterogeneities and large scale rainfall gradients. *Climatic Change* 94(1): 63-76.
- Wang, X., Sun, L., Wang, Z., Liu, C. and Zhang, Y. 2014. An analysis of the resilience capacity of soils in North China: a study on land subsidence treatment. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 73(3): 723-731.
- Wertz, S., Degrange, V., Prosser, J.I., Poly, F., Commeaux, C., Guillaumaud, N. and Le Roux, X. 2007. Decline of soil microbial diversity does not influence the resistance and resilience of key soil microbial functional groups following a model disturbance. *Environmental Microbiology* 9(9): 2211-2219.
- White, P.S. and Pickett, S.T.A. 1985. *Natural disturbance and path dynamics: An introduction*. Academic Press, Inc., Orlando, FL, USA.
- Zhang, B., Horn, R. and Hallett, P.D. 2005. Mechanical resilience of degraded soil amended with organic matter. *Soil Science Society of America Journal* 69(3): 864-871.
- Zhang, B., Wang, H., Yao, S. and Bi, L. 2013. Litter quantity confers soil functional resilience through mediating soil biophysical habitat and microbial community structure on an eroded bare land restored with mono *Pinus massoniana*. *Soil Biology and Biochemistry* 57: 556-567.
- Zhou, X., Fornara, D., Ikenage, M., Akagi, I., Zhang, R. and Jia, Z. 2016. The resilience of microbial community under drying and rewetting cycles of three forest soils. *Frontiers in Microbiology* 7: 1-12.