

No-till Farming System: Research Direction and Outlook in Korea

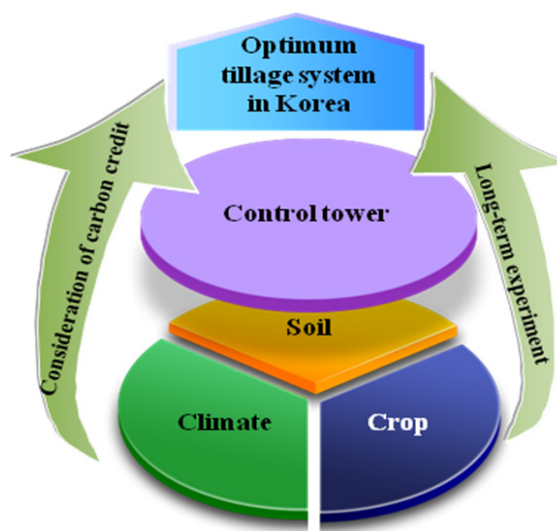
Hang-Won Kang*, Min-Tae Kim, Kwang Seop Kim, Weon-Tai Jeon, Jin-Hee Ryu, and Ki-Yeong Seong

Crop Environment Division, National Institute of Crop Science, RDA, Suwon 441-857, Korea

(Received: May 10 2013, Accepted: May 21 2013)

No-till farming system has been extensively studied all over the world as the effective method for maintaining the soil fertility. The general advantages of this system have been well known for reducing the labor, fuel, machinery, and irrigation cost as well as for increasing the soil quality through soil aggregation, water infiltration, microbial population and etc. Recently, it becomes more popular with the increase of interest on sustainable agriculture, especially because of its higher carbon sequestration potential compared to conventional tillage. Crop residue management should be essentially included to look forward to achieving the positive effect on reduction of greenhouse gas. Nonetheless, there are also negative opinions on effect of no-till farming system. For example, some researchers reported that soil physical properties were not improved by no-till under certain soil and climatic conditions. This means no-till farming systems were strongly affected by the soil characters and climatic conditions. Therefore, the researches to meet the specific-regional characters are greatly needed in order for no-till farming system to successfully settle in Korea. The objective of the review article is to present the future direction and perspective on no-till farming system in Korea. For this purpose, we summarized the results of domestic and foreign researches about no-till farming system until now. Specifically, the chapter on foreign research consisted of four parts: positive and negative effects, the effect in paddy soil, and latest research direction (2012-2013) of no-till farming systems. Whereas, review for domestic researches was divided into two main parts: paddy and upland soils. In the final chapter, the priorities for the optimum conservation tillage in Korea were discussed and proposed through the previous researches.

Key words: No-till, Conservation tillage, Soil quality, Sustainable agriculture



Strategic approach for establishment of the optimum tillage system in Korea

*Corresponding author : +82312906770, Fax: +82312906773, Email: kanghw@korea.kr

서 언

인류가 농경을 시작한 이후, 토지의 첫 번째 목표는 안정된 식량 확보를 위한 공간의 제공이며, 그 중심은 비옥한 토양이다. 과거 비옥한 토양의 척도는 식물에 대한 양분공급 능력과 관련된 화학적 측면에 관심을 두고 진행되었다. 그러나 현재에는 화학적인 측면뿐만 아니라 토양의 구조 등과 관련된 물리적 측면, 미생물 종류와 활성 등과 같은 생물학적 측면까지도 포함한 장기적 관점에서 토양의 질 (quality)을 평가하고 있다 (Doran, 2002; Tilman et al., 2002). 더욱이 21세기 농업은 토양 자체의 건전성은 물론 지구 생태계까지도 고려하는 지속가능한 농법을 요구하고 있다 (Doran, 2002; Tilman et al., 2002).

무경운 재배 (no-till farming systems)는 토양의 질을 향상시킬 수 있으며, 탄소격리 등을 통한 온실가스의 저장고로서의 역할이 부각되면서 최근에 각광을 받고 있다. 관련 연구 역시 전 세계적으로 광범위하게 진행되고 있다. 매년 다량의 관련 연구결과가 쏟아져 나오고 있지만, 관련 국내 연구는 양과 질적인 면에서 외국과 비교했을 때 빈약할 뿐만 아니라 논에서 무경운 재배에 한정되어 있다. 비록 일부 밭작물과 시설재배지에 대한 연구가 있지만 관련 연구는 단편적이며, 연구결과에 대한 체계적인 분석과 논의 또한 미미한 실정이다.

본 논문에서는 현대적 의미에서 무경운 재배의 역사를 간략히 살펴보고 국내외에서 진행되고 있는 관련 연구 경향을 통해 국내에서 지향해야 할 무경운 재배 연구방향에 대해 논의하고자 한다. 이에 따라 국내 연구동향은 논과 밭 토양으로 나누어 최근 연구 결과, 특징 및 한계에 대해 살펴보았다. 국외 무경운 재배에서는 긍정적 견해와 부정적 견해로 나누어 그 연구 결과를 정리하였으며, 특히 논에서의 무경운 재배 국외사례를 살펴봄으로써 국내의 논 무경운 재배와 차이점을 살펴 보았다. 이를 통해 국내의 무경운 재배가 지향해야 할 방향을 찾고자 하였다.

무경운 재배의 개념과 역사

남아메리카 안데스지방의 잉카제국, 고대 이집트 등 토착 농경문화에서 막대기로 땅에 구멍을 뚫고, 씨앗을 심고, 밭로 덮는 작업을 무경운 재배의 시작으로 보기도 한다 (Derpsch, 2004). 그러나 이런 방식은 현대적 무경운 재배 개념이 도입되기 전의 것으로, 농업생산성을 위한 근대화되고 기계화된 시대의 무경운 재배와는 거리가 있다. 근대의 기계화된 농업체계에서 무경운 재배는 오랜 기간 동안 시도되었지만, 본격적인 무경운 재배는 광엽잡초 제거제 2,4-D가 개발된 1940년 이후이며, 1955년 파라쿼트 (paraquat)의 개발은 미국, 영국 등에서 강화된 무경운 재배를 가능케 하

였다. 미국 켄터키주의 Young 형제는 기계화된 작업 시스템에서 작물생산에 무경운 재배를 사용한 첫 번째 농부로 알려져 있다. 이후 수확 후 즉시 파종할 수 있는 기계의 도입으로 1967년 밀과 콩의 윤작 작부체계에 무경운 재배가 도입되었다 (Derpsch, 2004).

서구에서 무경운 재배는 토양 침식의 방지라는 개념에서 시작되었다고 할 수 있다. 즉, 토양의 침식은 문명의 존망과 직접적으로 연결되어 있고, 토양은 식물에 의해 보호되고 있으며, 농업을 포함한 인간 활동은 이들을 교란시킨다는 것이다. 20세기의 폭발적인 인구증가에 따른 다수확을 위한 집약적 농지관리는 많은 국가에서 토양 침식의 가속화를 유발시켰다. 구미에서 발달한 무경운 재배는 토양 침식 방지를 위한 여러 방안들 중 물과 바람으로부터 토양을 보호할 수 있는 가장 효과적인 방법의 하나로 인식되어 진행되었다 (Lal et al., 2007; WASWC, 2008).

무경운 재배는 흔히 보존경운 (conservation tillage)과 혼용되어 사용되기도 한다. 그러나 엄밀한 의미에서 보존경운과 무경운은 구분된다 (Fig. 1). 보존경운은 토양의 표면에 식물잔사를 얼마나 피복시키는가에 주안점을 둔 반면, 무경운은 기계투입에 의한 토양교란의 여부에 그 무게의 중심을 두고 있다 (FAO, 2008). Phillips and Young (1973)은 종자를 덮기 위한 최소한의 토양교란 이외의 일체의 경운을 허용하지 않는 작물 재배방법을 무경운 재배라는 정의하기도 하였다. 그러나 대부분의 무경운 재배는 식물잔사를 걷어내지 않기 때문에 보존경운과 혼용되어 사용되는 것이 일반적이다. 이러한 무경운 재배의 면적은 미국 (2,650만/ha), 아르헨티나 (2,555만/ha), 브라질 (2,550만/ha), 호주 (1,700만/ha), 및 캐나다 (1,659만/ha)의 순으로 주로 아메리카 대륙에 집중되어 있다 (Table 1). 세계적으로 진행되고 있는 무경운 재배지의 면적은 2012년 기준으로 약 1억 2,700만

Table 1. General overview of conservation agriculture/no-tillage adoption. * (Unit: 1,000 ha)

Country	Conservation agriculture area (year)
United States of America	26,500 (2007)
Argentina	25,553 (2009)
Brazil	25,502 (2006)
Australia	17,000 (2008)
Canada	16,590 (2011)
Russian Federation	4,500 (2011)
China	3,100 (2011)
Paraguay	2,400 (2008)
Kazakhstan	1,600 (2011)
Others (Estimated)	5,159
Total	127,904

*FAO, 2012

/ha 이상인 것으로 추정되고 있다 (FAO, 2012). 한편, 토양의 침식을 방지하기 위한 방법으로 부분 혹은 축소경운 (reduced tillage)이 이용되기도 한다.

국외 연구동향

무경운 재배와 관련된 연구는 전 세계적으로 다양하면서도 광범위하게 시행되고 있다. 따라서 매년 관련 연구 결과도 엄청나게 나오고 있는데, 주 연구 방향은 생산, 환경 및 경제적 측면의 세 가지로 단순화시킬 수 있다. 본 장에서는 이러한 무경운 재배에 대한 긍정적 견해와 부정적 견해를 소개 하고자 한다. 또한 외국의 논문에서의 무경운 재배 사례와 최근에 진행되고 있는 국외 연구를 살펴 보았다.

긍정적 측면: 무경운 재배는 토양비옥도를 위한 최선의 선택이다 관행적인 경운재배와 비교했을 때, 무경운 재배의 장점은 장기적 측면에서 생산성 증가, 토양 보수력 및 수분 침투성 증가, 토양다짐 감소, 토양생물 증가, CO₂ 휘산 방지 및 탄소 격리, 노동력 절감, 시간 절약, 화석 연료 사용 감소 등이다. 현재 진행되고 있는 대부분의 연구 또한 이들 범주 속에서 진행되고 있다 (DeFelice et al., 2006; Lankoski et al., 2004; Soane et al., 2012)

Lankoski et al. (2004)은 호밀을 토양피복으로 이용한 무경운 재배 (토성: silt clay)에서 관행 재배보다 높은 수확량 및 토양다짐 감소, 수분 보유력 증가 등의 효과를 가진다고 하였다. Gonzalez-Chavez et al. (2010)은 25년간 수수와 콩을 윤작으로 재배한 토양에서 무경운 재배는 관행 경운재배에 비해 토양 탄소격리에 효과를 가진다고 보고하였으며, Ussir et al. (2009)은 옥수수 재배 연작지의 무경운 재배 (약 20년) 토양에서 경운 (chisel till과 moldboard plow till) 재배 토양과 비교했을 때, 온실가스 (N₂O, CH₄)의 배출이 50% 경감했다고 보고하였다. 한편 중국의 반건조지대의 봄밀과 완두의 윤작재배 (약 10년)에서 무경운 재배에 의해 토양 입단 및 수분 보유력이 늘어났으며, 장기재배에 따라 수확량도 증가하였으나, 전작물의 그루터기를 남겨놓지 않은 무경운 재배에서 그 수확량이 최저가 되었다는 보고도 있다 (Huang et al., 2008).

부정적 측면: 무경운 재배는 지역적 한계를 가진다

무경운 재배는 토양, 지리, 및 기후의 환경적 요소는 물론 재배방법에 크게 영향을 받기 때문에 성공적으로 무경운 재배가 정착하기 위해서는 이러한 요소를 반드시 고려해야 한다 (Table 2). Morris et al. (2010)은 작은 단위의 농지, 작물과 축산이 혼합된 농지에서는 여전히 경운 재배가 매력적이며, 넓은 경작지에서는 무경운 재배가 적당하고, 특정지역에서는 경운 재배와 무경운 재배의 중간적인 형태 즉 경운강도를 조절하는 것이 이익이 될 수 있다고 주장하였다. 다음은 무경운 재배의 효과가 미약하거나 혹은 없다는 여러 연구 사례이다.

Nicou et al. (1993)은 서아프리카 반건조지대 (30년간 시험)에서는 무경운과 최소경운 재배에서 만족할만한 효과를 나타내지 못한 반면, 경운재배 시 토양 물리적 성질과 작물 생산량이 늘어났다고 보고하였다. Dominguez et al. (2010)은 아르헨티나에서 무경운 재배 (10년 정도)의 경우 천연 목초지에 비해 토양 pH와 유기물 함량은 줄어들고 토양압밀은 늘어났다고 보고하고 있다. 또한 화학합성 농업자재 (화학농약, 화학비료 등)의 사용은 토양 대형동물 개체수를 줄여 유기물 분해에 심각한 악영향을 주고 있다고 언급하였다. 비록 이 연구의 경우 비교대상이 천연 목초지라는 한계가 있지만 무경운 재배의 난제인 잡초방제를 위해 제초제의 사용이 불가피할 경우 고찰해 볼 수 있는 연구 사례이다. Angers et al. (1997) 등은 옥수수 및 곡물을 11년간 재배한 토양에서 무경운 재배와 경운 재배 (chisel plowing과 moldboard plowing) 처리한 결과, 작물수확량은 물론 탄소격리 효과가 미미하다고 보고하였다. 다만 표면에 가까운 토양에서 C와 N의 양이 무경운 재배에서 상대적으로 많았다면서 위치의 특이성에 대해 언급하였다. 무경운 재배에 의한 토양 유기탄소 저장량 향상은 여전히 논쟁의 대상이며, 이에 대한 연구 또한 진행 상태이다 (Blanco-Canqui et al., 2011). 약 10년간 무경운, 축소경운, 관행적인 경운을 한 토양으로부터 N₂O 휘산에 관한 연구에서 Sheehy et al. (2013)은 무경운 재배에서 더 많은 양의 N₂O 가 휘산되었다고 보고하였다.

이러한 논문들은 무경운 재배가 효과를 보기 위해서는 작물 잔사를 멀칭, 피복작물과의 윤작재배, 비료처리 혹은 수확 시 농기계 작업의 최소라는 전제 조건을 충족시켜야 한다고 주장하고 있다. 또한 무경운 재배가 실질적 효과를

Table 2. Factors related to the sustainable uptake in no-till farming system.*

Crop	Soil	Climate	Environmental
Yield and quality	Structure responses	Water deficit/excess	Erosion and runoff
Economic acceptability	Biological response	Climate change	Pollution of water courses
Crop suitability	Quality of drainage	Seasonal variability	Greenhouse gas emissions
Herbicide efficiency	Soil suitability	Growing season	Overall climate forcing
	Soil protection regulations		

*Soane et al., 2012.

얻기 위해서는 토양과 기후조건이 우선적으로 고려되어야 할 사항이라고 보고하고 있다.

논에서 무경운 재배: 외국사례 Hignight et al. (2008)은 미국 알칸소주에서 벼와 콩의 윤작재배에서 경운과 무경운 재배 시 경제적 이익에 대해 보고하였는데, 9년 전체의 평균 수확량은 비록 경운재배에서 약간 높았지만 (유의성의 차이는 없음), 5년 이후에는 무경운 재배에서 수확량이 더 많아졌다고 보고하고 있다. 또한 경제적인 효과 역시 무경운 재배에서 더 크다고 보고하였다. Jat et al. (2009a)은 벼와 밀의 윤작재배 (인도)에서 무경운 장기재배 시험의 4년차 중간 결과에서, 무경운 재배의 생산성과 이익에 대하여 보고하였다. 이들의 결과에 따르면 무경운 재배에서 더 높은 수확량을 보였으며, 더욱이 시간의 경과에 따라 쌀과 밀 생산량이 점진적으로 향상되었다고 보고하였다. 한편 이들 연구의 특징은 모심는 방법 (이앙, 직파), 작물잔사 유무, 담수상태 등 다양한 실험구의 배치에 있다. 국내 재배 조건과 유사한 아시아에서 진행된 논 무경운 재배 연구 방향은 국내와 유사하다. 즉 무경운 재배 시 물이용 효율, 수확량, 토양 물리성 변화, 피복작물 멀칭 효과, 메탄가스 발생량 등을 조사하였다. 그러나 이들 연구는 주로 단기 재배에 한정되어 있다는 단점을 가진다 (Cho et al., 2003; Jat et al., 2009b; Li et al., 2011).

최신 연구동향 (2012-2013) 무경운 재배가 광범위하게 적용되기 위해서는 영농체제와 기후 등의 지역적인 특성을 반드시 고려하여야 한다. 최근 진행된 대부분의 연구 결과에서도 특정 토양, 기후 및 작물에 대한 무경운 재배의 효과에 집중되어 있다. 또 다른 한 방향이 경운에 따른 효과를 파악하기 위해 한 장소에서 장기적이고 종합적으로 진행하고 있다는 점이다.

Toliver et al. (2012)은 경운재배에서 무경운 재배 전환 시 영향을 미치는 인자 (지역적 위치, 강수량, 토성, 전환시간)를 442개 지역 (경운과 무경운 각각)과 6가지 곡물에 대한 수량으로 평가하였다. 사탕수수과 밀의 평균 수확량은 무경운 재배에서 더욱 증가하였다. 그러나 콩과 밀 재배에서 사질토양은 무경운 재배 시 수확량이 낮아지는 위험성을 내포하고 있다고 보고하고 있다. 따라서 무경운 재배 전환 시 토양과 기후 등을 고려한 전환이 필요하다고 역설하고 있다. Mikha et al. (2013)은 밀 윤작 재배지 (wheat-fallow rotation)에서 39년간 4가지 경운강도 [관행경운 (conventional tillage, CT), 쟁기경운 (moldboard plow, MP), 축소경운 (reduced tillage, RT), 무경운 (no-tillage, NT)]에 따른 토양유기탄소 (SOC), 유기탄소 분획, 입자성 유기물 (particulate organic matter, POM) 및 입단크기 분배 (wet aggregate-size distribution)를 조사하였고 보존경운 재배는 토양의 질과

탄소 저장에 효과가 있다고 보고하였다. Kahlon et al. (2013)은 미 중부 오하이오주에서 20년 이상 된 토양에서 경운방법 (no-till, ridge till, plow till)과 피복정도에 따른 토양의 물리성, 탄소격리, 수분전달능력에 대해 조사하였다. 그 결과 무경운 재배에서 그 능력이 향상되었다고 보고하고 있지만, 이 연구에서 주목할 만한 사항은 경운과 피복의 전환은 토양과 지역적 특이성을 가진다는 것이다. Karlen et al. (2013)은 장기재배 [옥수수와 콩 윤작 (32년), 옥수수 연작 재배 (27년)]지에서 경운방법 (moldboard plow, chisel plow, spring disk, ride-tillage 및 no-tillage)에 따른 생산성, 토양비옥도 및 경제성을 분석하여 정량화하였다. 생산성은 수확량으로, 토양 비옥도는 깊이 [0-15, 15-30, 30-60 및 60-90 (cm)]에 따른 가밀도, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, EC, pH, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn 및 Zn 함량을 조사하였다. 또한 생산은 30년 동안 3단계로 [설립 (establishment), 유지 (maintenance) 및 강화/회복 (intensification/recovery) 단계] 나누어 분석하였다. 수확량에서는 무경운 재배가 경운 재배에 비해 조금 작게 나타났지만 큰 차이가 없다고 보고하였다. 그러나 경제성 분석에 따르면 순이익은 모든 작부체계에서 무경운 재배에서 높았으며, 더욱이 9년간의 소득과 수확을 분석한 결과, 옥수수-콩 윤작에서 옥수수 연작보다 2배 정도 이익이 있다고 보고하고 있다. 따라서 건전한 영양관리와 윤작방식을 통해 재배하면, 무경운 재배와 경운 재배간의 수량 차이는 최소화될 수 있을 것이라고 보고하고 있다.

국내 연구동향

쌀을 주식으로 이용하고 있는 국내의 사정을 반영하듯 대다수 국내 연구는 벼 재배 시 무경운 재배에 대한 평가에 집중되어 있다. 이러한 연구 중 국내 학술지에 출간된 논문을 내용별로 보면, 무경운 벼 재배 시 잡초 발생량 (Chung et al., 2000; Hong and Lee 2011; Kim et al., 2002; Kuk et al., 2002; Seong et al., 2012), 토양이화학성 (Hong et al., 2003; Jeong et al., 2001; Lee et al., 2010; Yoo et al., 1997), 메탄 발생량 (Ko et al., 2002), 생육과 미질에 미치는 영향 (Lee, 2010a; Lee et al., 2007) 및 작부체계 (Lee, 2010b.) 등으로 나눌 수 있다.

밭 토양에서 무경운 재배 관련 연구는 옥수수 재배가 다소 이루어지고 있으며 (Choi et al., 2011; Kim et al., 2011a), 콩 및 녹비작물 관한 논문도 일부 있다 (Jang et al., 2002; Lee et al., 2011a; Lim et al., 2012). 그리고 일부 시설재배지에서 무경운 재배의 효과에 관한 연구도 진행 중이다 (Yang et al., 2011a). 한편 고랭지에서 경사지 토양 유실 방지에 초점을 둔 피복작물을 포함하는 부분경운 재배에 관한 연구도 진행되고 있다.

논에서의 무경운 재배 국내에서는 1980년대 말부터 벼농사의 농업노동력 대체 및 국제경쟁력 강화를 위한 생력화 노력의 일환으로 기계이양재배, 직파재배, 최소경운, 무경운 재배 등에 대한 연구가 시작되었는데, 초기 무경운 재배 연구는 논에서의 기술 적용 가능성을 검토하는 수준이었다 (Kim et al., 1991; Hur, 1993). 1990년대 중반까지 벼 무경운 재배에 관한 연구는 주로 생육, 수량, 토양 이화학적 변화에 중점을 두고 수행되었는데, 무경운 재배의 경제성 및 적정 경운 연한을 설정하는 등 벼의 안정적 생산기술 정착을 위한 무경운 재배 관련 연구가 계속되었다 (Hong et al., 1996; Kim et al., 1991; Kim et al., 1992; Kim et al., 1996; Kim et al., 1997; Kwon et al., 1997; Park et al., 1996).

1997년 친환경농산물 인증제도가 도입되어 유기농산물의 생산 및 소비가 급증하면서 농가소득 유지를 위해 친환경 유기재배가 유망한 농법으로 떠오르게 되고, 저탄소 녹색성장 이 정부 정책으로 제시되면서 고품질 농산물 생산과 친환경적 작물생산기술이라는 측면에서 무경운 재배 연구 사례가 늘어났다 (Lee, 2010a; Lee, 2010b). 윤작체계와 피복작물을 이용한 벼 재배기술 연구, 무경운 재배의 경제성 분석, 미생물 생태 분석 등 다양한 방면에서 연구가 진행되고 있으며 (Hong et al., 2011; Lee et al., 2011b; Son and Lee, 2011), 무경운 재배이력이 늘어나면서 일부 지역에서는 10년 이상 장기 무경운 재배포장에서의 실험도 이루어지고 있다. 2008년 저탄소 녹색성장 국가비전 선포에 이어 2010년 저탄소 녹색성장 기본법이 제정되고 2020년까지 온실가스 감축목표 (농림어업부문 5.2%)가 할당되면서, 최근에는 농업부문의 온실가스 저감을 위해 무경운 논토양이 온실가스 발생에 미치는 영향에 관한 연구도 다수 수행되고 있는 중이다 (Ko et al., 2002).

Kim et al. (1991)은 1987년부터 4년간 콤바인으로 벼짚을 절단하면서 수확한 논에서 무경운 기계이양 가능성을 검토하였는데, 실험 결과 무경운 논이 경운 논에 비해 토양유기물 함량과 인산 및 칼슘 함량이 많아지는 경향이었고, 4년간의 쌀 수량은 무경운 논과 경운 논이 같은 수준이었다고 보고하였다. Hur (1993)는 미사질 식토, 사양토, 미사질 양토의 3개 포장에서 경운방법별 벼 수량과 토양특성을 조사하였다. 그 결과 무경운구의 수량감소는 경운기 경운+로타리구에 비하여 사양토에서 18%, 미사질식토에서 7%, 미사질양토에서 1% 감소되었지만 무경운에 의한 입단 파괴가 적었음을 보고하였다. Park et al. (1996)은 무경운 기계이양, 무경운 무논골뿌림, 무경운 표면조파, 무경운 산파, 경운 기계이양 등 5가지의 재배방식간의 벼 생육 및 수량성의 차이를 비교, 검토한 결과 토양 경도와 가비중은 무경운 재배에서 높았고 공극율은 경운 재배가 무경운 재배보다 높게 나타났다고 보고하였다. 한편, 잡초 발생량은 무경운 재배

에서 보다 많았으며, 쌀 수량은 경운 기계이양 > 무경운 이양 > 무경운 무논골뿌림 > 무경운 표면조파 > 무경운 산파의 순이었다. Lee et al. (1997)은 이양 전 토양경도가 매년 경운 > 격년경운 > 연속무경운 순으로 높았으며, 이양재배 시 무경운 논이 독새풀의 영향으로 경운 논에 비해 결주가 많고 초기생육도 다소 부진했다고 보고하였다. 경운구가 무경운구에 비해 출수가 2~3일 빨랐고 수수도 다소 많은 경향으로 나타나, 생육과 수량성을 감안한 적정 무경운 한계 연한은 격년경운 또는 2년무경운/1년경운이라고 제안하였다. Ko et al. (2002)은 논토양에서 경운 및 무경운재배 시 메탄 배출 양상에 대해 조사하였다. 그 결과 중묘이양 재배 시 무경운 재배구에서 경운 재배구에 비해 26.6%의 메탄 배출 저감효과를 나타낸 반면, 건답직파 재배 시 무경운이 경운에 비해 메탄배출이 11.2% 증가하였다고 보고하였다.

밭에서의 무경운 재배 밭작물의 무경운 재배에 관한 연구는 1990년대 중반 생력화를 통한 생산비 절감을 위해 콩에 대하여 농촌진흥청에서 무경운 재배 기술을 연구한 사례가 있으며, 이후 옥수수에 대한 연구가 여러 차례 이루어진 바 있다 (Lee, 2003; Seo and Lee, 1998). 최근에는 유기재배 농가를 대상으로 생산비 절감과 합리적인 토양관리기술 개발을 위하여 시설토양 재배작물인 고추, 멜론, 수박 등 다양한 작목을 대상으로 무경운 재배 방식을 시험 중이다 (Won et al., 2012; Yang et al., 2011b). 축산분야에서도 유기농법으로 축산물을 생산하는 친환경 축산에 대한 관심이 높아지고 있는데, 이를 위한 사료작물로 수수, 귀리 등 화본과 사료작물에 대한 무경운 재배 연구가 수행된 바 있으며, 사일리지용 옥수수나 이탈리안 라이그라스 등에 대한 무경운 재배 연구도 진행되고 있는 상황이다 (Kim et al., 2006; Kim et al., 2008; Kim et al., 2009). 논외의 경우와 마찬가지로, 최근에는 기후변화와 관련하여 무경운 밭작물 재배 조건이 온실가스 발생에 미치는 영향에 관한 연구 (Kim et al., 2011b; Lee et al., 2012)가 진행되고 있다.

Seo and Lee (1998)은 동계 두과작물인 헤어리베치와 화본과작물인 옥수수를 결합한 작부체계에 대한 연구에서 헤어리베치 이용 시 토양 유실방지 및 잡초방제 등의 효과를 기대할 수 있지만, 토양 중 무기태 질소의 일시적 감소로 인해 옥수수의 초기생육이 나빠질 수 있으므로 옥수수 파종 시 헤어리베치에 의해 무기화될 수 있는 질소를 제외한 나머지 질소를 기비로 사용하는 것이 좋을 것이라고 제시하였다. Lee et al. (2012)은 고추의 무경운 재배에 따른 탄소저감효과 분석에 관한 연구에서 무경운을 이용한 고추재배는 관행 고추재배 방식과 비교하여 58%의 온실가스 저감 효과를 갖는다고 보고하였으며, 무경운 재배방식의 토양관리시간이 흐를수록 탄소격리효과 (carbon sequestration effect)가 높아지는 특징이 있으므로 연속적인 무경운 재배

를 수행할 경우 지속적인 탄소저감 효과가 기대된다고 언급하였다. 일부에서는 시설재배지 고추의 무경운 재배에 대한 시험 재배를 통해 고추의 수량이 무경운 재배에서 경운재배 대비 10% 정도 증수되었고, 생산비 절감 효과는 무경운 재배가 52% 정도 높게 나타났다는 보고도 있다.

국내 연구의 특징 국내 무경운 재배 연구의 특징은 외국과 비교했을 때, 재배기간 중 담수상태를 요구하는 벼에 대한 무경운 재배 적용에 큰 비중을 두고 있다는 점이다. 그러나 일부 연구를 제외하고는 대부분 5년 이하의 단기재배에서 무경운 재배의 특성을 조사한 것으로 (Hong et al., 2003), 이들의 결과가 신뢰성을 얻기 위해서는 외국에서처럼 최소 10년 이상의 장기재배가 필요할 것으로 판단된다. 한편 Hong et al. (2003)의 연구에서 15년 이상 무경운 재배한 논에서 쌀 수량과 도정형질이 경운재배와 비교했을 때 유의적인 차이가 없다고 보고되었는데, 이 결과로 보아 논에서도 노동력 절감의 효과가 있기 때문에 무경운 재배가 충분히 가능할 것으로 판단된다.

밭 토양에서 무경운 재배와 관련된 연구는 그 수가 한정되어 있으며, 지역 단위로 산발적으로 이루어지고 있다. 더욱이 이러한 연구 또한 대부분 단기적 재배기간 내에 무경운 재배의 효과를 평가하고자 했다. 국내에서 이루어지는 무경운 재배의 특이한 점은 시설재배지에서 그 효과에 대한 검증이다. 비록 시설재배지에서 무경운 재배의 효과가 일부 보고되고 있으나, 재배 연수가 짧을 뿐만 아니라 학문적으로 완전히 검증되지 않은 조사 차원의 보고서가 다수를 차지하는 한계가 있다.

한편, 국내 무경운 재배 연구는 초기에 농촌 노동력의 감소에 대처하고 농산물 시장 개방에 따른 국제 경쟁력을 강화하기 위한 생력화를 통한 생산비 절감에 중점을 두고 진행되었다. 최근에는 환경친화형 지속농업에 대한 연구의 일환으로 유기농업과 결합하여 작부체계 및 고품질 농산물 생산에 대한 연구가 다양하게 수행되고 있다. 기후변화와 관련하여 재배 조건이 온실가스 발생에 미치는 영향에 관한 연구가 많이 이루어지고 있는 것 또한 최근의 연구 경향 중 하나이다.

국내 연구의 한계 국내 무경운 재배는 비록 그 연구에서 긍정적인 결과를 제시하고는 있지만 단기적 관점에서 접근한 관계로 지속적인 효과에 대해선 의문을 가질 수 밖에 없다. 또한 무경운 재배가 주로 벼에 한정되어 있으며, 밭작물의 경우 제한된 작목과 지역 등 단발적인 조사에만 치우치고 있다. 즉 경운 재배에서 무경운 재배로 전환 시 수익성을 담보할 수 있는 다양한 방법의 경운체계에 관한 연구가 선행되지 않았다. 또한, 다양한 작목에서 무경운 재배의 효과가 미미한 실정이다. 무엇보다 국내에서는 무경운 재배에

대한 학술적 개념의 결여가 가장 큰 문제점으로 지적된다. 이러한 상황의 단적인 예가 국내 무경운 재배면적에 대한 공식적인 수치조차 확보되어 있지 않다는 점이다.

국내 연구 방향에 대한 제언

지속가능한 농업은 21세기 농업의 화두이다. 그러나 국내 농업여건은 녹록치 않다. 농촌의 노동인력 감소는 가속화 되고 있고, 온실가스 저감을 위한 환경보호와 식량의 안정적 확보라는 생산성을 동시에 추구해야 하는 어려움에 직면해 있다. 무경운 재배는 이러한 다양한 요구를 충족시킬 수 있는 대안으로 큰 관심을 받고 있다. 그러나 국내의 관련 연구는 대다수가 단편적, 산발적, 지엽적으로 이루어져 실제 농업전반에 적용되기에는 그 근거 자료가 부족한 실정이다. 무엇보다 무경운 재배에 관한 학술적이고 명시화된 개념 정리가 우선되어야 할 것으로 판단된다. 연구자들 사이에 그리고 실제 재배활동에 참여하는 농가들 사이에 무경운 재배의 정의에 대한 보편적인 공감대가 형성되고 난 후, 국가적인 큰 틀에서 종합적이고 체계적인 관련 연구가 진행될 수 있다.

무경운 재배는 토양과 기후 등 지역적 특성을 고려한 것으로 한 가지 특정 연구결과가 모든 지역에 반영될 수 없다. 따라서 국내 적용 시에도 이러한 지역적 특성을 고려한 체계적 연구가 필요할 것으로 판단된다. 비록 경남농업기술원에서 20년 이상된 무경운 벼 재배 연구가 진행되고 있으나, 무경운 재배 효과에 대한 평가와 관련된 대부분의 국내연구는 단기 재배시험에 한정되어 있다. 실제 단기 재배시험의 가치도 존재하지만 이러한 단기재배 연구결과는 장기재배 연구 (10년 이상) 안에서 평가될 때 진정한 가치를 가질 수 있다 (Richter et al., 2007). 더욱이 자연환경을 기반으로 하고 있는 농업은 10년 이상 동일한 환경이 조성될 때 진정한 의미의 환경평가가 가능하며, 경제적 분석도 무경운 재배가 완전히 정착된 이후에 실질적 분석이 가능할 것으로 판단된다. 모든 경운재배 농경지를 일시에 무경운 재배 농경지로 전환할 수는 없으므로 생산성에 영향을 미칠 수 있는 인자 (기후, 토성, 전환기간 등)를 고려하여 특정 지역에서 특정 작물을 무경운 재배로 전환하였을 때 수익성을 보장할 수 있는가에 대한 통계에 기반을 둔 연구 또한 이루어져야 한다.

무경운 재배가 성공적으로 이루어지기 위해서 고려되어야 할 사항 중의 하나가 잡초관리이다. 특히 친환경 농업에서 화학합성농약을 사용하지 않고 잡초를 관리해야 할 경우 노동력과 경제성에 큰 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 무경운 재배에서 윤작, 피복작물, 물 관리, 혼파재배와 같은 잡초 종합방제 (Integrated weed management)에 관한 심도 있는 연구도 수행되어야 한다. 무경운 재배가 성공적으로

수행되기 위해서는 건전한 영양관리가 필수적이며, 이를 위해 대부분의 무경운 재배 연구에서는 윤작을 장려하고 있다. 따라서 최적의 작부체계 구성은 잡초방제와 작물의 건전한 영양관리를 위해서 반드시 수행되어야 할 연구이다.

무경운 재배의 또 다른 핵심 중의 하나는 전작물의 잔사를 토양에 남겨둔다는 것이다. 그러나 너무 많은 식물잔사가 표면에 남을 경우 논에서 뜬모 혹은 유기물 과량으로 인한 환원상태 발생과 같은 문제점이 발생할 수 있으므로 이에 대한 양적 균형에 관한 연구도 진행 되어야 한다.

정부는 저탄소 녹색성장 비전 선포 (2008. 6)를 필두로 2012년 현재 온실가스 배출권 할당 및 거래에 관한 법률을 제정하여 국가 차원에서 온실가스 저감정책을 수립하여 진행 중이며, 농업부문에서는 2020년까지 온실가스 5.2% 저감을 목표로 하고 있다. 이러한 국가적 온실가스 저감정책에 부합할 수 있는 농업부문의 가장 강력한 실행방법 중의 하나가 무경운 혹은 부분경운 재배이다. Ko et al. (2012)의

기온의 상승에 따른 작물 수확량 예측 결과는 이 사실을 잘 보여주고 있다. 그들의 연구결과에 따르면 무경운 재배를 제외한 타 작부체계에서는 작물 수확량에 심각한 감소를 가져왔다고 보고하고 있다. 이러한 무경운 혹은 부분경운 재배에 의한 온실가스 저감효과에 대한 평가 또한 연구되어야 할 분야이다. 따라서 이들 평가기관과 연계한 연구 및 향후 농가에 도입되었을 때 저탄소농축산물 인증제를 통한 감축제도 도입과 같은 정책도 병행되어 추진되어야 한다.

경운체계는 크게 관행경운, 부분/축소경운 및 무경운 재배의 세 가지로 구분할 수 있다 (Fig. 1). 그러나 무경운 재배는 지역적 특성에 크게 영향을 받기 때문에 국내에 적용 가능한 보존경운 방법이 되기 위해서는 경운강도를 세분화시켜 연구할 필요가 있는 것으로 판단된다. 즉, 경작지별, 작물별 경운 강도에 따른 최적의 경운시스템을 구축한다면, 경제성과 환경보전을 동시에 고려할 수 있을 것으로 판단된다.

이상에서 제시한 연구방향은 경운과 무경운 재배의 큰 범위 내에서 경제적 효과 (수확량, 투입물량 등)와 환경적 효과 (유기물 보존, 온실가스 절감, 토양유실 방지 등)를 동시에 고려한 최적의 경운 시스템 (한국형 보존경운)을 지역별, 경작지별, 작물별로 연구하여 통합적인 국가적 데이터베이스를 구축하는 것으로 요약할 수 있다. 그러나 이러한 연구는 장기적이면서도 종합적이고 전국 단위의 연구이므로 한 지역 혹은 기관 단위에서 해결할 수 있는 것이 아니며, 또한 각 지역과 대학 연구 기관의 도움 없이는 가능하지도 않다. 따라서 이러한 연구를 진행하고 관리할 수 있는 국가연구기관 즉, 정부의 적극적인 노력이 필요하다. 더욱이 이 역할을 수행할 수 있는 연구 기관은 연구의 특성상 작물, 토양, 기후 등을 포괄적으로 아우를 수 있어야 한다.

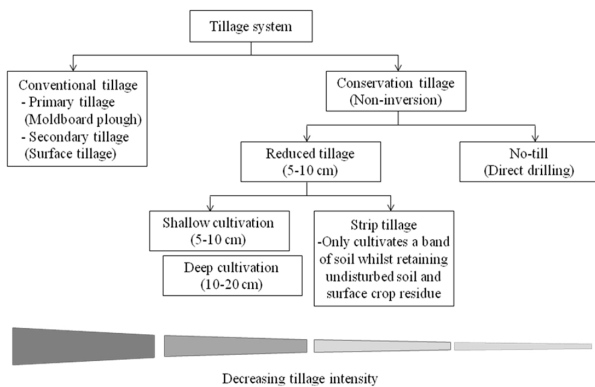


Fig. 1. Classification of tillage systems in relation to tillage intensity (adapted from Morris et al., 2010).

References

Angers, D.A. M.A. Bolinder, M.R. Carter, C.F. Drury, B.C. Liang, R.P. Voroney, R.R. Simard, R.G. Donald, R.P. Beyaert, and J. Martel. 1997. Impact of tillage practices on organic carbon and nitrogen storage in cool, humid soils of eastern Canada. *Soil Till. Res.*, 41:191-201.

Blanco-Canqui, H., A.J. Schlegel, and W.F. Heer. 2011. Soil-profile distribution of carbon and associated properties in no-till along a precipitation gradient in the central Great Plains. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 144:107-116.

Cho, Y.S., K. Hidaka, and T. Mineta. 2003. Evaluation of white clover and rye grown in rotation with no-tilled rice. *Field Crop. Res.*, 83:237-250.

Choi, B.S., C.G. Kim, K.Y. Seong, D.Y. Song, W.T. Jeon, H.S. Cho, K.H. Jeong, and U.G. Kang. 2011. Change of weed community in no-till corn with legume cover crops as living mulch. *Kor. J. Weed Sci.*, 31:34-40.

Chung, N.J., Y.H. Yoon, C.K. Kim, and Y.-S. Kang. 2000.

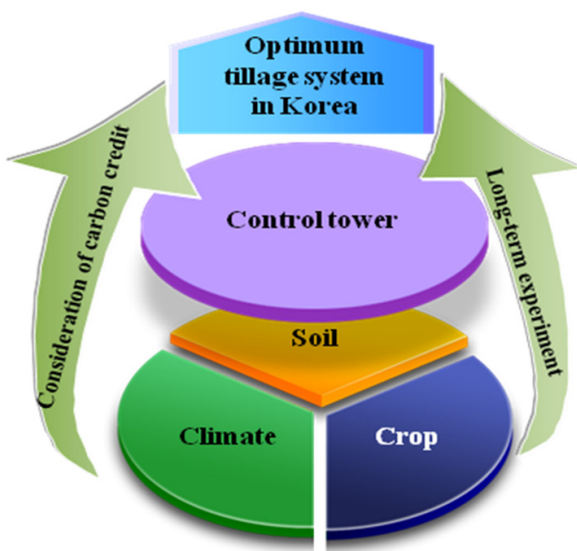


Fig. 2. Strategic approach for establishment of the optimum tillage system in Korea.

- Weedy rice control by no-tillage direct seeding on flooded paddy field. *Korean J. Crop Sci.*, 45:195-198.
- DeFelice, M.S., P.R. Carter and S.B. Mitchell. 2006. Influence of tillage on corn and soybean yield in the United States and Canada. Online, doi:10.1094/CM-2006-0626-01-RS
- Derpsch, R., 2004. History of crop production with and without Tillage. Leading edge, *The Journal of No-Till Agriculture*, published by no-till on the Plains Inc., Wamego KS, 3:150-154.
- Doran, J.W. 2002. Soil health and global sustainability: translating science into practice. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 88:119-127.
- FAO, 2008. What is conservation agriculture. in: conservation agriculture website of FAO, <http://www.fao.org/ag/ca/1a.html>.
- FAO, 2012, Conservation agriculture adoption worldwide website of FAO, <http://www.fao.org/ag/ca/6c.html>.
- González-Chávez, M.C.A., G.A. Aitkenhead-Peterson, T.J. Gentry, D. Zuberer, F. Hons, and R. Loeppert. 2010. Soil microbial community, C, N, and P responses to long-term tillage and crop rotation. *Soil. Till. Res.*, 106:285-293.
- Hignight, J., B. Watkins, and M. Anders. 2008. Economic benefits of no-till in a rice-soybean rotation. *Agriculture and Natural Resources*, FSA38, online available (http://www.uaex.edu/Other_Areas/publications/PDF/FSA-38.pdf)
- Hong, K.P., J.Y. Kim, D.J. Kang, W.K. Shin, and Z.R. Choe. 1996. Varietal differences on growth characteristics of direct-sown rice under no-tillage paddy field. *Korean J. Crop Sci.*, 41:551-557.
- Hong, K.P., Y.G. Kim, W.K. Jung, G.M. Shon, G.W. Song, Y.J. Choi, and Z.R. Choe. 2003. Changes in physicochemical properties of soil, yield, and milling quality of rice grown under the long-term no-till rice system. *Korean J. Crop Sci.*, 48:196-199.
- Hong, K.P. and Y.H. Lee. 2011. Impacts of flooding depths on weed occurrence and yield in no-tillage paddy field covered with chinese milk vetch. *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 44:178-180.
- Huang, G.B., R.Z. Zhang, G.D. Lic, L.L. Li, and K.Y. Chan, D.P. Heenan and W. Chen. 2008. Productivity and sustainability of a spring wheat-field pea rotation in a semi-arid environment under conventional and conservation tillage systems. *Field Crop. Res.*, 107:43-55.
- Hur, B.K. 1993. Effect of tillage methods on rice yield and soil properties under different soil textures. *Korean J. Crop Sci.*, 38:290-295.
- Jat, R.K., R. Gopal, R. Gupta R, and M.L. Jat. 2009a. Double no-till in a rice-wheat rotation under eastern Gangestic plains of South Asia: medium-term effects on productivity and profitability. Published by ACIAR (<http://aciarc.gov.au/>)
- Jat, M.L., M.K. Gathala, J.K. Ladha, Y.S. Saharawat, A.S. Jat, Vipin Kumar, S.K. Sharma, V. Kumar, and Raj Gupta. 2009b. Evaluation of precision land leveling and double zero-till systems in the rice-wheat rotation: Water use, productivity, profitability and soil physical properties. *Soil. Till. Res.*, 105:112-121.
- Jang, Y.J., C.B. Park, Y.G. Choi, P.J. Park, and S.S. Han. 2002. Studies on no-tillage cultivation system of soybean. *Journal of agricultural, life and environmental sciences*, 24:17-27.
- Jeong, J.H., B.W. Sin, and C.H. Yoo. 2001. Effect of milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) on the physico-chemical properties and rice yield in the paddy soil of rice no-tillage seeding. *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 34:117-121.
- Kahlon, M.S. R. Lal, and M. Ann-Varughese. 2013. Twenty two years of tillage and mulching impacts on soil physical characteristics and carbon sequestration in Central Ohio. *Soil. Till. Res.*, 126:151-158.
- Karlen, D.L., J.L. Kovar, C.A. cambardella, and T.S. Colvin. 2013. Thirty-year tillage effects on crop yield and soil fertility indicators. *Soil. Till. Res.*, 130:24-41.
- Kim, C.G., H.S. Cho, W.T. Jeon, K.Y. Seong, K.H. Jeong, B.S. Choi, and Y.S. Cho. 2011a. Effects of planting density and fertilizer level on corn growth and yield for bio-energy production in no-till cultivation with hairy vetch cut mulching. *Korean J. Intl. Agri.*, 23:51-56.
- Kim, J.D., C.H. Kwon, Y.H. Gu, and M.S. Shin. 2008. Effect of tillage system on the forage production and soil characteristics of silage corn. *J. Kor. Grassl. Forage Sci.*, 28(4):307-314.
- Kim, J.D., S.G. Kim, S.H. Chae, and C.H. Kwon. 2006. Effect of livestock manure and chemical fertilizer on the forage yield and quality of oat at no-till cropping system. *J. Kor. Grassl. Forage Sci.*, 26(3):127-132.
- Kim, J.D., S.J. Abuel, G.H. Jeon, and C.H. Kwon. 2009. Effect of tillage system and fertilizer type on the forage yield and quality of italian ryegrass. *J. Kor. Grassl. Forage Sci.*, 29(4):313-320.
- Kim, J.Y., K.P. Hong, D.J. Kang, W.K. Shin, and Z.R. Choe. 1997. Effects of direct sowing on the growth and seedling stand of rice in no-tillage paddy rice system. *Korean J. Crop Sci.*, 42:106-107.
- Kim, J.Y., K.P. Hong, H.S. Lee, and Y.S. Lee. 1992. Studies on zero-tillage in rice II. Effect of nitrogen fertilizer application on the rice growth and soil physicochemical characteristics. *Korean J. Crop Sci.*, 37:94-95, (Abstr.)
- Kim, J.Y., H.R. Shin, G.M. Son, K.B. Choi, and Y.S. Lee. 1991. Studies on zero-tillage in rice (*oriza sativa* L.) Influences on the rice growth and soil physicochemical characteristics by machine-transplanting under zero tillage. *Korean J. Crop Sci.*, 36:78-79 (Abstr.)
- Kim, G.Y., H.C. Jeong, K.M. Shim, S.B. Lee, and D.B. Lee. 2011b. Evaluation of N₂O emissions with different growing periods (Spring and Autumn Seasons), tillage and no tillage conditions in a chinese cabbage field. *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 44(6):1239-1244.

- Kim, S.S., M.G. Choi, H.G. Park, C.H. Yoo, and S.Y. Lee. 1996. Effect of nitrogen split application on growth and grain yield at no-tillage transplanting of infant rice seedling. *Korean J. Crop Sci.*, 41:698-703.
- Kim, S.Y., B.C. Moon, S.T. Park, S.O. Shin, S.J. Yang, and S.C. Kim. 2002. Control of water foxtail (*Aleopecurus aequalis* var. *amurensis* Ohwi.) and weedy rice (*Oryza sativa* L.) by paraquat and glyphosate in no-tillage dry seeded rice. *Kor. J. Weed Sci.*, 22:343-349.
- Ko, J., L.R. Ahuja, S.A. Saseendran, T.R. Green, L. Ma. D.C. Nielsen, and C.L. Walthall. 2012. Climate change impacts on dryland cropping systems in the Central Great Plains, USA. *Climatic Change*, 111:445-472.
- Ko, J.Y., J.S. Lee, M.T. Kim, H.W. Kang, U.G. Kang, D.C. Lee, Y.G. Shin, K.Y. Kim, and K.B. Lee. 2002. Effects of cultural practices on methane emission in tillage and no-tillage practice from rice paddy fields. *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 35:216-222.
- Kuk, Y.I., O.D. Kwon, and I.B. Im. 2002. Weed occurrence, growth and yield of rice transplanted with 10-day-old seedlings in tillage and no-tillage paddy fields. *Kor. J. Weed Sci.*, 22:154-162.
- Kwon, O.D., H.R. Shin, S.W. Kim, and T.D. Park. 1997. Rice growth and yield by the cultural years in no-tillage field. *Korean J. Crop Sci.*, 42:96-97.
- Lal, R., D.C. Reicosky, and J.D. Hanson. 2007. Evolution of plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil. Till. Res.*, 93:1-12.
- Lankoski, J., M. Ollikainen, and P. Uusitalo. 2004. No-till technology: Benefits to farmers and the environment? Disc. Pap. 1. Univ. of Helsinki. Helsinki, Finland.
- Lee, B.J., Z.R. Choi, S.H. Oh, J.H. Kim, S.Y. Kim, and J.W. Ahn. 2007. Characteristics of growth of Korean native rice cultivars under the no-till rice-vetch cropping system. *Korean J. Intl. Agri.*, 19:279-284.
- Lee, M.H. 2003. Response of yields and major characters of waxy corn hybrids under no-tillage practice. *Korean J Organic Agri.*, 11:80-89.
- Lee, G.Z., Y.S. Choi, S.K. Yang, J.H. Lee, and S.Y. Yoon. 2012. Analysis of consumption of homemade organically processed food analysis of the carbon emission reduction effect from no-tillage in pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivation. *Korean J Organic Agri.*, 20:503-518.
- Lee, S.B., K.M. Cho, J.H. Ryu, S.G. Cho, T.S. Kim, and K.J. Kim. 2011a. Effects of tillage methods and application levels of livestock compost and liquid fertilizer on yield of whole crop barley and subsequent soil quality. *Korean J. Intl. Agri.*, 23:179-184.
- Lee, W.H., C.D. Choi, C.R. Kim, and B.S. Choi. 1997. Growth characteristics of no-tillage culture in rice. *Korean J. Crop Sci.*, 42:104-105.
- Lee, Y.H. 2010a. Rice growth and grain quality in no-till and organic farming paddy field as affected by different rice cultivars. *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 43:209-216.
- Lee, Y.H. 2010b. Evaluation of no-tillage rice cover crop cropping systems for organic farming. *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 43:200-208.
- Lee, Y.H., B.K. Ahn, and J.H. Lee. 2010. Effects of rice straw application and green manuring on selected soil physical properties and microbial biomass carbon in no-till paddy field. *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 43:105-112.
- Lee, Y.H., B.K. Ahn, and Y.S. Kwak. 2011b. Impacts of organic farming system on the soil microbial ecology in no-till paddy. *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 44:814-818.
- Li, D., M. Liu, Y. Cheng, D. Wang, J. Qin, J. Jiao, H. Li, and F. Hu. 2011. Methane emissions from double-rice cropping system under conventional and no tillage in southeast China. *Soil. Till. Res.*, 113:77-81.
- Lim, J.E., S.S. Lee, S.H. Jeong, B.M. Lee, Y.H. Lee, Y.B. Choi, and Y.S. Ok. 2012. Effects of green manure incorporation method on soil physicochemical properties. *Journal of agricultural, life and environmental sciences*, 24:1-7.
- Mikha M.M., M.F. Vigil, and J.G. Benjamin 2013. Long-term tillage impacts on soil aggregation and carbon dynamics under wheat-fallow in the Central Great Plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 77:594-605.
- Morris, N.L., P.C.H. Miller, J.H. Orson, and R.J. Froud-Williams. 2010. The adoption of non-inversion tillage systems in the United Kingdom and the agronomic impact on soil, crops and the environment—A review. *Soil. Till. Res.*, 108:1-15.
- Nicou, R., Charreau, C. Charreau, and J.L. Chopart. 1993. Tillage and soil physical properties in semi-arid West Africa. *Soil. Till. Res.*, 27:125-147.
- Park, H.K., S.S. Kim, N.H. Back, S.J. Suk, G.H. Park, and S.Y. Lee. 1996. Rice growth and yield at different cultural methods under no-tillage condition, *Korean J. Crop Sci.*, 41:420-428.
- Phillips, S.H. and H.M. Young. 1973. No-tillage farming. Reimann associates, INC., Milwaukee, Wisconsin.
- Richter, D.D., M.A. Callahan, D.S. Powlson, and P. Smith. 2007. long-term soil experiments: keys to managing earth's rapidly changing ecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71:266-279.
- Seo, J.H. and H.J. Lee. 1998. Study on no-tillage silage corn production with legume hairy vetch (*Vicia Villosa* Roth) cover II. Changes of yield and nitrogen uptake of corn by N fertilizer and hairy vetch cover. *J. Kor. Grassl. Forage Sci.*, 18(2):123-128.
- Seong, K.Y., T.S. Park, H.S. Cho, M.C. Seo, and W.T. Jeon. 2012. Weed occurrence according to the density of water foxtail in no-tillage seeding rice paddy fields. *Korean J. Weed Sci.*, 32(3):280-284.
- Sheehy, J., J. Six, L. Alakukku, and K. Regina. 2013. Fluxes of nitrous oxide in tilled and no-tilled boreal arable soils. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 164:190-199.

- Soane, B.D., B.C. Ball, J. Arvidsson, G. Basch, F. Moreno, and J. Roger-Estrade. 2012. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil. Till. Res.*, 118:66-87.
- Son, D. and Y.-H. Lee. 2011. Effects of no-tillage rice cover crop cropping systems on rice root growth. *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 44:375-379.
- Tilman D., K.G. Cassman, P.A. Matson, R. Naylor, and S. Polasky. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418:671-677.
- Toliver, D.K., J.A. Larson, R.K. Roberts, B.C. English, D.G. De La Torre Ugarte, T.O. West. 2012. Effects of no-till on yields as influenced by crop and environmental factors. *Agron. J.*, 104:530-541.
- Ussiri, D.A.N., R. Lal, and M.K. Jarecki, 2009, Nitrous oxide and methane emissions from long-term tillage under a continuous corn cropping system in Ohio. *Soil. Till. Res.*, 104:247-255.
- WASWC. 2008. Special publication No.3, Editors Tom Goddard, Michale A. Zoebisch, Yantai Gan, Wyn Ellis, Alex Watson, Samran Sombatpait.
- Won, J.G., K.S. Jang, J.E. Hwang, O.H. Kwon, T.Y. Kwon, and J.R. Cho. 2012. Effect of tillage and no-tillage of winter green manure crops on yield of red pepper in plastic film house. *Weed Turf. Sci.*, 1(4):18-23.
- Yang, S.K., Y.W. Seo, B.H. Kim, B.K. Sohn, C.D. Wee, J.H. Lee, W.J. Jung, and R.D. Park. 2011a. Characteristics of spore density and colonization pattern of arbuscular mycorrhizal fungi on the no-tillage soil under greenhouse condition. *Korean J Organic Agri.*, 19:343-355.
- Yang, S.K., Y.W. Seo, Y.S. Kim, S.K. Kim, K.H. Lim, K.J. Choi, J.H. Lee, and W.J. Jung. 2011b. Changes of pepper yield and chemical properties of soil in the application of different green manure crops and no-tillage organic cultivation. *Korean J Organic Agri.*, 19:255-272.
- Yoo, C.H., B.W. Shin, J.H. Jeong, S.S. Han, S.J. Kim, and S.S. Han. 1997. Changes of soil physico-chemical properties under different tillages of paddy soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 30:140-145.