

기후변화가 국내 쌀 생산량에 미치는 영향에 대한 메타분석[†]

신덕하¹ · 이문수² · 박주현³ · 이영섭⁴

^{1,3,4}동국대학교 통계학과 · ²성균관대학교 에너지과학과

접수 2015년 1월 12일, 수정 2015년 1월 23일, 게재확정 2015년 2월 27일

요약

지난 수 십년간 전 지구적인 기후가 극적으로 변화함에 따라 가장 중요한 문제 중 하나로 인식되고 있는 식량 안보에 대하여 기후 변화의 영향을 평가하는 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 본 연구에서는 메타분석을 이용하여 기후변화가 국내 농업에 미치는 영향을 분석하였다. 특히, 국내 농업에서 큰 비중을 차지하는 쌀에 대하여 이산화탄소 농도와 두 적응방안(파종시기 변경과 품종 변경)에 대한 효과를 추정하였다. 관심있는 효과에 대한 요약통계량을 이용하는 기존의 일반적인 메타분석 방법과는 달리, 다양한 온실가스 배출 시나리오와 대순환 모형을 사용하여 쌀 생산량을 예측한 6개의 개별 연구로부터 자료를 통합하여 메타분석을 수행하였다. 모델링 접근법으로써 쌀 생산량의 변화율을 종속변수로 설정하고, 이산화탄소 농도와 적응방안의 주 효과와 상호 작용 효과를 독립변수로 설정하여 회귀 분석 실시하였다. 결과적으로 적응방안이 고려되지 않을 경우 이산화탄소 농도의 증가는 쌀 생산량을 감소시키나, 적응방안이 고려된다면 이산화탄소 농도의 증가는 쌀 생산량을 증가시키는 것으로 나타났다. 추가로 파종시기 변경 방안보다 품종 변경 방안이 쌀 생산량을 더 증가시키는 것을 알 수 있었다. 본 연구 결과는 향후 기후변화 대응책을 수립하는데 정량적 자료로 활용될 것으로 기대된다.

주요용어: 기후변화, 메타분석, 온실가스 배출 시나리오, 회귀분석.

1. 서론

최근 기후변화가 진행됨에 따라 60억 명에 달하는 인구를 먹여 살리는 방안, 즉 식량안보 (food security)에 대한 고민이 증대되고 있으며, 식량안보 관점에서 기후변화는 식량과 관련한 전 부문에 대해 영향을 끼치는 것으로 평가되고 있다 (FAO, 2008). IPCC (intergovernmental panel on climate change) 5차 평가 보고서 (IPCC, 2014)는 기후변화의 영향으로 2030년부터 식량생산이 50%까지 감소하고, 그 이후에는 더 급격하게 줄어드는 반면 식량 수요는 지속적으로 증가할 것으로 전망하였다. 식량생산과 밀접한 관련을 갖는 농업분야에 대해 Kim 등 (2011)은 기후변화가 농업 분야에 미치는 영향을 긍정적인 영향과 부정적인 영향으로 분류하였다. 그러나 기후변화에 의한 농업환경의 변화는 주산지 변동을 야기하여 기존 재배 작물의 생산이 어려워지는 부정적인 측면과 새로운 작물 재배의 기회로 작용할 수 있는 긍정적인 측면을 동시에 지닌다. 따라서 기후변화가 농업 분야에 미치는 전반적인 영향을 단순히 긍정적·부정적으로 구분하는 것은 어렵다고 언급하였다. 이처럼 농업부문은 기후에 민감하게 반응하는 분야로써 기후변화에 따른 긍정적 또는 부정적 영향이 광범위하게 나타남에 따라 기후변화의 영향을 평

[†] 본 연구는 농림축산식품부 생명산업기술개발사업 (과제번호: 312028-2)에 의해 이루어진 것임.

¹ (100-715) 서울시 중구 필동로 1길 30, 동국대학교 통계학과, 석사과정.

² (440-746) 경기도 수원시 장안구 서부로 2066, 성균관대학교 에너지과학과, 박사과정.

³ (100-715) 서울시 중구 필동로 1길 30, 동국대학교 통계학과, 교수.

⁴ 교신저자: (100-715) 서울시 중구 필동로 1길 30, 동국대학교 통계학과, 교수. E-mail: yung@dongguk.edu

가하기 위해 각국의 연구자들은 전 지구적 (global) 규모의 기후변화 영향평가 방법론의 개발과 지역별 특성을 고려한 영향평가 프로젝트를 동시다발적으로 진행하고 있다 (Kim 등, 2012). 수행된 연구들은 향후 농업부문에서 기후변화의 영향력에 대해 평가하고 취약분야를 확인하여 피해를 최소화하는 기후변화 대응책을 수립하는데 기초자료로 활용되고 있다 (IPCC, 2007). 그러나 연구들의 결과가 다양한 형태의 불확실성이 반영되지 못한 한계점을 가지고 있다. 이는 동일한 세부 주제에 대한 여러 연구 결과들을 통합하여 분석하는 방법을 통하여 해결할 수 있으며, 이는 메타분석의 방법론과 같다.

“메타분석”이란 하나의 주제에 대한 여러 연구의 분석 결과들을 분석하는 것 (analysis of analyses)을 의미한다. 즉, 같은 주제를 가진 개별 연구의 결과들을 하나로 통합하여 분석하는 방법으로 각 연구 결과가 통계적인 방법으로 도출된 것이지만, 실험과정에 있어서 작은 실수나 오류에 의한 영향으로 상이한 결과를 보이는 문제점을 보완하기 위해 제시된 통계적 방법이다 (Kim과 Choi, 2012). 메타분석은 각 연구의 결과를 도출하기 위해 사용된 표본을 종합함으로써 더 큰 표본을 가지고 분석하므로 통계적 검정력을 높일 수 있으며, 그 결과 소규모의 개별적인 연구들이 도출하지 못한 유의한 결과를 이끌어 내기도 한다. 또한 메타분석을 통해 연구 방법이나 조건 등 각 연구의 차이를 반영하여 보이고자 하는 요인의 효과를 규명할 수 있다는 장점을 가진다 (Pillemer와 Light, 1980; Jackson, 1980).

그동안 메타분석은 주로 의학 분야와 같은 인류보건 분야에 국한되어 같은 주제를 가지는 실험군과 대조군을 설정하여 수행된 실험 연구를 대상으로 수행되었다. 연구를 통합하기 위하여 효과 크기 (effect size)를 계산하여 결과가 갖는 척도를 통일시키고, 이를 종합함으로써 결론을 도출한다. 최근 국외에서 Challinor 등 (2014)과 Wilcox와 Makowski (2013)에 의해 각 연구의 효과크기를 종합하는 기존의 메타분석과는 달리 각 연구가 갖는 자료를 통합하고, 통합된 자료를 바탕으로 통계적 분석을 실시하는 방식의 메타분석이 수행된 바 있으나, 국내에서 수행된 사례는 전무하다.

본 연구에서는 국내 생산 작물 중 제일 큰 비중을 차지하는 쌀을 대상으로 기후변화에 대해 연구한 논문 및 보고서로부터 자료를 수집하고, 통합하여 회귀분석을 수행하였다. 변수로는 기후변화의 원인으로 알려진 온실가스 중에서 가장 큰 영향을 미치는 이산화탄소의 농도와 기후변화 대응책인 적응방안으로 해마다 최적의 파종일로부터 쌀의 생육을 모의하는 파종시기 변경 방안과 최적의 품종을 선택하여 쌀의 생육을 모의하는 품종 변경 방안의 적용 여부를 고려하였다. 수행된 메타분석 결과들은 기후변화가 미치는 영향과 적응방안의 효과를 정량적으로 제시하여 향후 기후변화 대응책을 수립 및 실행하는데 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

2. 본론

2.1. 연구방법

2.1.1. 자료수집

메타분석에 사용할 자료로 기후변화에 따른 쌀 생산량 변화에 대한 국내 연구들을 수집하기 위해 구글 학술검색 (<http://scholar.google.co.kr/>) 및 학술연구정보서비스 (RISS, <http://www.riss.kr/>) 등에서 “기후변화”와 “쌀 생산량”, 그리고 온실가스 배출 시나리오인 “RCP”와 “SRES” 등의 키워드로 검색하여 27개의 논문 및 보고서를 수집하였다. 그 중 여러 기후 변화 인자 중 연구가 가장 활발하게 진행된 온실가스 배출 시나리오와 작물생육모형을 이용하였으며, 쌀 생산량에 대한 결과 값을 추출할 수 있고, 국내 (남한)의 미래 쌀 생산량 예측한 중복되지 않은 6개의 연구를 Table 2.1과 같이 선정하였다.

2.1.2. 변수 생성 및 전처리

본 연구는 농업 전문가의 의견을 반영하여 온실가스 배출 시나리오와 작물의 생육을 모의할 수 있는

Table 2.1 List of collected studies

Study No.	Author (year)	Title
1	Shin (2013)	Assessment of climate change impact on rice productivity in the Asia-Pacific region
2	Kim, D. J. <i>et al.</i> (2012)	An outlook on cereal grains production in South Korea based on crop growth simulation under the RCP8.5 climate change scenarios
3	Kim, C. G. <i>et al.</i> (2012)	Impacts and countermeasures of climate change on food supply in Korea
4	Lee <i>et al.</i> (2012)	Impacts of climate change on rice production and adaptation method in Korea as evaluated by simulation study
5	Lee (2012)	Analyzing consumptive use of water and yields of paddy rice by climate change scenario and CERES-Rice
6	Kim <i>et al.</i> (2010)	Impacts of climate change on Korean agriculture and its counterstrategies

모형으로부터 산출된 실험 결과를 자료로써 이용하였다. 온실가스 중 이산화탄소에 의한 기후변화의 영향을 분석하기 위해 쌀 생산량의 변화율을 종속변수로, 이산화탄소 농도와 파종시기 변경 여부 및 품종 변경 여부를 독립변수로 선정하였으며, 분석을 위하여 해당 변수들에 대해 다음과 같은 전처리 과정을 수행하였다.

쌀 생산량의 변화율 (y, %)

각 연구의 결과 값은 크게 단위면적당 쌀 생산량 (kg/a)과 기준연도 대비 쌀 생산량의 변화율로 나타나며, 쌀 생산량의 변화율은 일반적으로 식 (2.1)을 통해 구할 수 있다. 대부분 연구에서 결과를 단위면적당 쌀 생산량으로 나타내고 있으나 Shin (2013)의 연구는 쌀 생산량의 변화율로 제시되었으며, 기준연도의 쌀 생산량에 대한 정보가 없다. 따라서 쌀 생산량의 변화율을 쌀 생산량으로 변환할 수 없으므로 쌀 생산량의 변화율을 변수로 설정하였다. 이는 각 연구마다 상이한 기준연도의 쌀 생산량이 미래 쌀 생산량에 대해 미치는 영향을 보정한다. 수집한 개별 연구의 기준연도가 상이하므로 이를 일치시키기 위해 모든 연구의 기준연도를 공통적으로 포함하는 1971년부터 2010년까지를 기준연도 범위로 설정하였다.

$$\text{쌀 생산량의 변화율(\%)} = \frac{\text{미래연도 쌀 생산량} - \text{기준연도 쌀 생산량}}{\text{기준연도 쌀 생산량}} \times 100 \quad (2.1)$$

이산화탄소 농도 (ppm)

본 연구에서 수집하여 사용한 개별 연구들은 기온 및 강수량과 같은 기후변화에 대한 정보를 충분히 제공하지 않아 변수로 사용할 수 없다. 따라서 기후변화의 원인으로 알려진 온실가스 중에서 가장 큰 영향을 미치는 이산화탄소의 농도를 변수로 사용하였다.

일반적으로 온실가스 배출 시나리오는 크게 SRES (special report emission scenario) 시나리오와 RCP (representative concentration pathways) 시나리오로 나뉜다. SRES 시나리오는 미래 사회 구조의 사회경제적 가정에 따라 지역주의를 지향하며 경제 발전을 중시하는 경우의 A2 시나리오, 국제주의를 지향하며 환경과 경제 발전의 균형을 중시하는 경우의 A1B 시나리오, 그리고 국제주의를 지향하여 경제발전보다 환경을 중시하는 B1 시나리오 등이 있다. RCP 시나리오는 기후변화에 대응하여 온실가스 저감 정책이 실현되는 정도에 따라 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우인 RCP8.5 시나리오,

온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현되는 경우인 RCP6.0 시나리오, 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우인 RCP4.5 시나리오, 그리고 인간 활동에 의한 영향을 지구 스스로가 회복 가능한 경우인 RCP2.6 시나리오로 나뉘며, RCP 시나리오의 숫자는 복사강제력을 의미한다.

Table 2.2 Mean concentrations of CO₂ by emission scenarios

year	B1	A1B	A2	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
2010s	400.20	405.73	403.13	401.84	401.20	400.27	403.88
2020s	423.93	436.33	433.10	422.39	424.25	420.13	433.95
2030s	448.53	470.58	468.40	435.97	449.19	440.89	471.13
2040s	473.75	509.00	508.33	441.58	474.94	465.55	517.51
2050s	496.55	549.28	552.85	442.15	498.82	495.80	575.15
2060s	514.53	588.68	603.43	439.39	517.37	532.16	643.98
2070s	528.10	626.90	661.88	434.26	528.04	574.28	721.71
2080s	537.90	663.53	729.88	428.52	532.53	617.02	805.83
2090s	543.15	696.28	808.43	423.20	536.29	654.36	894.91

SRES시나리오의 세부 시나리오별 이산화탄소 농도의 자료는 IPCC 3차 평가보고서 (IPCC, 2001)에서 탄소 순환 모형인 ISAM과 BERN의 결과로 제시된 이산화탄소 농도의 평균을 이용하였다. RCP 시나리오의 세부 시나리오별 이산화탄소 농도 자료는 IPCC 5차 평가 보고서 (IPCC, 2013)에 제시된 자료를 이용하였다. SRES 시나리오와 RCP 시나리오 둘 다 10년 간격으로 농도의 변화가 제시되어 있으나 연구에서 제시한 기간과 차이가 있다. 따라서 10년 사이의 이산화탄소 농도 변화는 선형이라는 가정 하에 연도별 이산화탄소 농도를 계산하고, 각 연구에서 제시하는 기간에 맞게 평균을 구하여 사용하였다. 연도별 이산화탄소 농도의 10년 단위 평균을 Table 2.2에 나타내었다.

적응방안 (adaptation) 적용 여부

기후 변화에 대응하기 위해 여러 적응방안이 존재하지만, 그 중 메타분석에 사용되는 6개의 연구에서 고려된 파종시기 변경 (planting date adjustment; PDA)과 품종 변경 (cultivar adjustment; CA)의 적용 여부를 변수로 사용하였다. 파종시기 변경은 매 해마다 최적의 파종일에 쌀을 재배하는 방안이며, 품종 변경은 매 해마다 최적의 품종을 선택하여 재배하는 방안이다. 해당 적응방안을 적용한 경우 1, 적용하지 않은 경우를 0으로 표시하였고, 농업기술의 발전과 관련된 적응방안이 고려된 연구가 있었으나 해당 자료 수가 적어 분석에서 제외하였다.

연구간 편의를 줄이기 위한 전처리

본 연구는 Table 2.1에 나열된 개별 연구들의 다양한 온실가스 배출 시나리오와 대순환 모형 (general circulation model; GCM)으로부터 생성된 결과를 메타분석의 자료로 사용하였다. 다만 Shin (2013)은 다른 연구에서 사용하지 않은 다양한 GCM까지 고려하였기 때문에 현재 기상청에서 사용 중인 GCM (HadGEM2-AO)과 다른 개별 연구들에서 사용된 GCM (CCCMA)에 대한 자료만을 분석 대상으로 하였다. 재배 품종을 조생종, 중생종, 중만생종으로 구분하여 연구한 Lee 등 (2012)과 Kim 등 (2010)의 경우는 같은 조건에서 품종에 따른 결과 값의 평균을 사용하였으며, 도시별로 결과를 제시한 Lee (2012)와 Kim 등 (2010)의 경우는 1985년에 농촌진흥청에서 제안한 19개 농업기후지대에 따라 분류하고, Lee 등 (2012)이 제안한 구분 기준에 따라 북부, 중부, 남부로 구분하여 평균값을 구하였다. 또한, 대부분의 연구에서 이산화탄소 시비효과의 중요성을 고려하고 있으므로, 이를 고려하지 않은 자료는 분석에서 제외하였다.

Table 2.3 Variable information of collected studies

Study No.	Author (year)	Emission scenario	Adaptation
1	Shin (2013)	RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5	PDA, CA
2	Kim, D. J. <i>et al.</i> (2012)	RCP 8.5, A1B	Non-adaptation
3	Kim, C. G. <i>et al.</i> (2012)	RCP 8.5, A2	Non-adaptation
4	Lee <i>et al.</i> (2012)	A1B	PDA
5	Lee (2012)	A2, A1B, B1	PDA
6	Kim <i>et al.</i> (2010)	A1B	PDA

수집된 개별 연구가 포함하고 있는 온실가스 배출 시나리오와 적응방안 변수에 대한 정보를 Table 2.3에 요약하였으며, 개별 연구로부터 취합한 총 자료의 수는 205개로써 Table 2.4와 같이 자료의 구조를 생성하여 분석에 사용하였다.

Table 2.4 Data structure for analysis

Study No.	obs. No.	CO2	PDA	CA	y
1	1	354.5	0	0	0
	2	422.4	0	0	-4.3
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	55	575.2	1	1	26
	56	805.8	1	1	34.3
2	57	354.5	0	0	0
	58	418.9	0	0	-2.3
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	73	663.5	0	0	-6.7
	74	696.3	0	0	-7.8
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
6	186	354.5	0	0	0
	187	437.5	0	0	-5.1
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	204	549	1	0	8.6
	205	662.2	1	0	11.37

2.1.3. 자료 분석

본 연구의 회귀모형을 이용한 분석에 앞서 자료탐색을 통해 적응방안의 효과를 살펴보았다. 적응방안을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우로 구분하여 그린 자료의 산점도 (Figure 2.1)를 보면 적응방안을 적용했을 경우에 적응방안을 적용하지 않았을 경우보다 쌀 생산량 변화율이 크다는 것을 볼 수 있다.

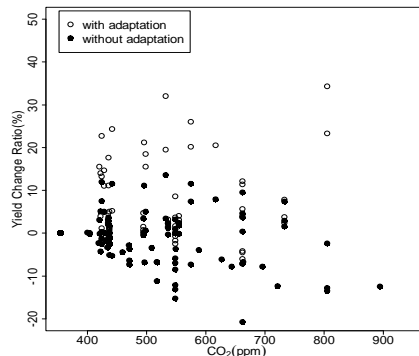


Figure 2.1 Scatter plot of data by adaptation

Figure 2.1의 경우 쌀 생산량의 변화율이 약 -5~15% 구간에서 겹치는 자료가 상당수 존재하여 적응 방안의 효과를 명확히 구분하기 어렵다. Figure 2.2은 0의 변화율을 갖는 기준연도의 자료는 제외하고, 적응방안의 적용 유무에 따라 각 이산화탄소 농도 범주가 갖는 자료의 수에서 음의 변화율을 갖는 자료 수의 비율을 나타내었다. 이산화탄소 농도의 범주는 자료의 수를 고려하여 '399~437', '437~517', '517~575', '575~900'으로 나누었다.

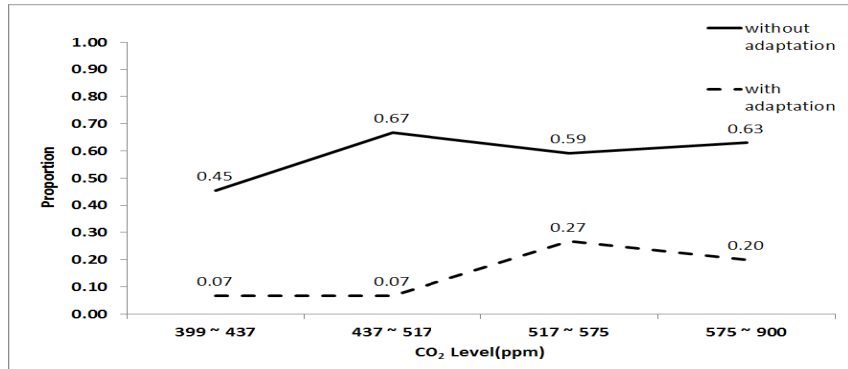


Figure 2.2 Proportion of reduction in yield change ratio over CO₂ concentration level by adaptation

Figure 2.2를 보면 적응방안을 적용하지 않을 경우, 쌀 생산량의 변화율이 감소하는 자료의 비율은 이산화탄소 농도에 따라 약간의 변동성(0.45 0.63)을 보이지만 평균 0.59, 즉 약 60%의 자료가 쌀 생산량이 감소할 것으로 예측한 것을 알 수 있다. 이 경우 증가할 것으로 예측한 자료의 비율은 0.41 (=1-0.59)로써 감소할 것으로 예측한 자료의 비율과의 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 이는 쌀이 밀이나 보리 등과 같은 다른 작물들에 비해 상대적으로 기후변화에 대한 민감도가 낮기 때문이며 (Lobell과 Field, 2007), Kim 등 (2011)이 언급했던 기후변화의 긍정적인 영향이 작용한 결과라고 볼 수 있다. 반면 적응방안을 적용했을 경우 쌀 생산량의 변화율이 감소하는 비율은 평균 0.15로써 15%의 자료가 쌀 생산량이 감소할 것이라고 예측하였다. 따라서 적응방안의 유무에 따라 쌀 생산량의 변화율에서 감소하는 자료의 비율 차이가 크기 때문에 적응방안이 기후변화에 대응하기 위한 방법으로써 효과가 있다고 할 수 있다.

기후변화의 영향과 적응방안의 효과를 정량적으로 알아보기 위해 Table 2.4의 자료에 식 (2.2)의 선형 회귀 모형을 고려하였다. 쌀 생산량의 변화율 (y)을 종속변수로, 기후변화에 대한 변수인 이산화탄소 농도 (CO_2)와 기후변화 대응책인 적응방안 (adaptation) 적용 여부를 방법에 따라 파종시기 변경 여부 (PDA)와 품종 변경 여부 (CA)로 나누어 독립변수로 설정하였다. 또한 적응방안은 기후변화에 대응하기 위한 방법으로써 미래 기후변화의 진행과 관련이 있을 것으로 예상하여 각 적응방안과 이산화탄소 농도의 상호작용을 반영하였다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 CO_2 + \beta_2 I(PDA) + \beta_3 I(CA) \quad (2.2)$$

$$+ \beta_4 CO_2 \times I(PDA) + \beta_5 CO_2 \times I(CA) + \epsilon, \epsilon \sim N(0, \sigma^2)$$

y : 쌀 생산량의 변화율(%)

CO_2 : 이산화탄소 농도(ppm)

$I(PDA)$: 적응 방법 중 파종시기 변경 여부 (적용=1, 미적용 = 0)

$I(CA)$: 적응 방법 중 품종 변경 여부 (적용=1, 미적용 = 0)

Table 2.5는 최대우도 추정법 (maximum likelihood estimation)으로 추정된 회귀 계수를 보여주고 있는데, 선형 회귀 식에서 고려된 이산화탄소 및 적응 방안의 효과는 모두 통계적으로 유의하다 ($\alpha=0.05$)는 것을 알 수 있다. 적응방안의 효과를 쉽게 파악하기 위해 이산화탄소 농도의 증가에 따른 쌀 생산량의 변화율을 그래프로 나타내었다 (Figure 2.3). 적응방안의 적용 없이 기후변화의 영향만 고려할 경우 이산화탄소 농도가 100ppm 증가할 때, 쌀 생산량의 변화율은 약 1.2%씩 감소할 것으로 예상된다. 그러나 이산화탄소 농도 100ppm 증가에 대해서, 적응 방안 중 파종 시기 변경만을 적용할 때는 쌀 생산량의 변화율이 오히려 0.9% 증가하고, 품종 변경만을 적용하면 6.2%, 그리고 둘 다 적용할 때는 8.3% 증가할 것으로 예상된다. 고려된 두 가지 적응 방안은 모두 쌀 생산량을 증가시키는 효과를 가지고 있지만, 그 중 품종 변경이 파종시기 변경보다는 동일한 이산화탄소 변화량에 대해 쌀 생산을 더 크게 증가시킬 수 있음을 보여주고 있다.

Table 2.5 Summary of estimated coefficients by Equation (2.2)

Variable	$\hat{\beta}$	S.E	p-value
intercept	4.942	1.8326	0.0076
CO2	-0.012	0.0036	0.0009
PDA	-7.924	3.5394	0.0263
CA	-21.482	5.2706	<0.0001
CO2×PDA	0.021	0.0069	0.0023
CO2×CA	0.074	0.0109	<0.0001

*Adjusted $R^2=0.5931$

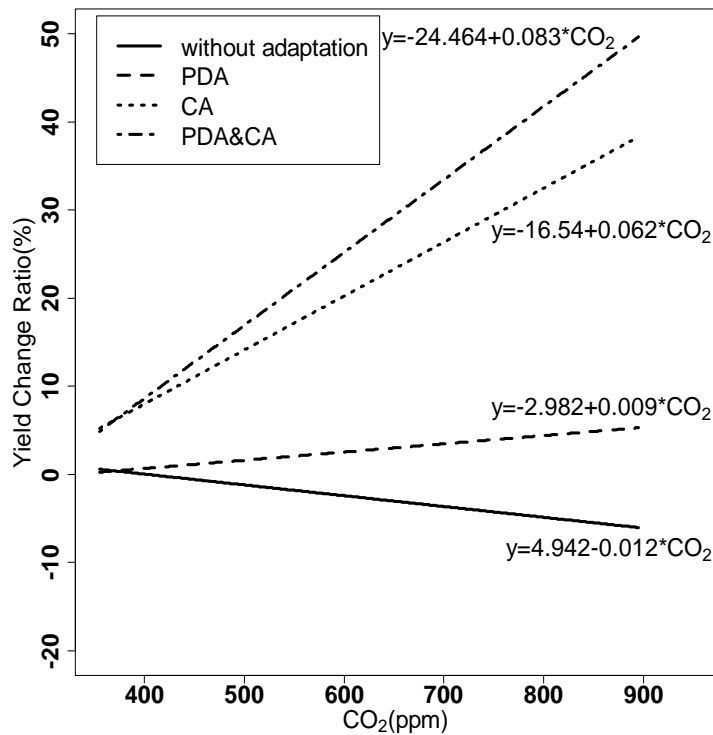


Figure 2.3 Estimated regression lines by adaptation

2.1.2절에서 산출한 연도별 이산화탄소 농도 값을 식 (2.2)의 선형 회귀식에 대입하여 적응방안 적용 여부에 따른 온실가스 배출 시나리오별 쌀 생산량의 변화율이 시간에 따라 어떻게 변하는지 살펴보았다. 각 조건별 시간에 대해 중기적 관점에서 2050년의 예측 값을, 장기적 관점에서 2100년의 예측 값을 선택하여 Table 2.6에 나타내었다.

Table 2.6 Predicted yield change ratio at years 2050 and 2100 under various emission scenarios by adaptation

Emission scenario	Non-adaptation		PDA		CA		PDA&CA	
	2050	2100	2050	2100	2050	2100	2050	2100
B1	-1.00	-1.73	1.48	2.03	13.21	16.85	15.68	20.61
A1B	-1.51	-3.75	1.87	3.58	15.78	26.98	19.16	34.31
A2	-1.51	-5.42	1.87	4.85	15.78	35.30	19.16	45.57
RCP2.6	-0.48	-0.21	1.08	0.88	10.62	9.29	12.18	10.38
RCP4.5	-1.02	-1.65	1.49	1.98	13.30	16.48	15.81	20.10
RCP6.0	-0.91	-3.26	1.41	3.20	12.76	24.51	15.08	30.97
RCP8.5	-1.68	-6.52	2.00	5.69	16.61	40.80	20.28	53.01

적응방안이 적용되지 않은 경우, 기후변화의 영향으로 쌀 생산량이 감소하며, RCP 8.5 시나리오에서 2050년에 1.68%에서 2100년에는 6.52%로 가장 크게 감소할 것으로 예측되었다. 반면 RCP 2.6 시나리오의 경우에는 2050년대에 감소하는 폭이 가장 작게 예측되었으며, 시간이 지날수록 감소하는 폭이 커지는 다른 시나리오와는 달리 2050년에는 0.48% 감소한 것에 비해 2100년에는 보다 작은 0.21% 감소할 것으로 예측되었다.

적응방안이 적용된 경우, 모든 시나리오에서 쌀 생산량이 증가할 것으로 예측되었으나 온실가스 배출 시나리오와 적응방안의 종류에 따라 차이를 보였다. 적응방안의 종류와 관계없이 RCP 8.5 시나리오에서 쌀 생산량이 가장 크게 증가하였으며, RCP 2.6 시나리오에서 가장 작게 증가하였다. 적응방안을 비교했을 때 품종 변경이 파종시기 변경보다 쌀 생산량을 크게 증가시키는 것으로 예측하였다.

온실가스 배출 시나리오에서 가장 큰 변동성을 갖는 시나리오는 RCP 8.5 시나리오 (-6.52~53.01%)이며, 가장 작은 변동성을 갖는 시나리오는 RCP 2.6 시나리오(-0.48~12.18%)인 것으로 나타났다. 또한 모든 온실가스 배출시나리오에 따른 쌀 생산량의 증가 범위에 대해 파종시기 변경 방안의 경우 2050년에는 1.08~2%, 2100년에는 0.88~2%의 범위를 갖는 반면, 품종 변경의 경우 2050년에는 10.62~16.61%, 2100년에는 9.29~40.8%의 범위를 갖는다. 이처럼 시간이 흐를수록 변동성이 증가하며, 온실가스 배출 시나리오의 경우 이산화탄소 농도의 증가폭이 큰 시나리오일수록 큰 변동성을 갖고, 적응방안의 경우 품종변경 방안이 파종시기 변경 방안보다 큰 변동성을 갖고 있음을 알 수 있다.

3. 결론 및 향후과제

기후 변화에 따른 국내 쌀 생산량의 변화에 대한 효과를 보기 위해 본 연구에서는 이산화탄소의 농도를 기후변화의 대표적인 인자로 고려하였다. 또한 기후변화에 대응한 적응방안들 중 품종 변경과 파종시기 변경을 고려하여 쌀 생산량의 변화율에 대한 선형 모형을 적합하였다. 연구 결과, 이산화탄소 농도가 100ppm 증가함에 따라 기준 년도 대비 쌀 생산량이 1.2% 감소할 것으로 예상된다. 반면, 적응방안을 고려할 경우, 파종시기 변경을 적용할 때 0.9%, 품종 변경 적용할 때 6.2%, 두 적응방안을 모두 적용할 때 8.3% 증가하는 것으로 예상된다. 또한 온실가스 배출 시나리오에서 가장 큰 변동성을 갖는 시나리오는 RCP 8.5 시나리오이며, 적응방안의 종류에서 가장 큰 변동성을 갖는 방안은 품종변경 방안인 것으로 나타났다.

기후변화에 대응하여 적응방안이 고려되지 않을 경우에는 쌀 생산량의 감소율을 최소화하기 위하여

풍력과 같은 무공해 에너지 활용 등의 온실가스 배출을 줄이는 방향의 정책이 필요하다. 무공해 에너지를 발전에 이용하는 경우 화석 연료를 대체함으로써 온실가스와 같은 환경오염물질이 배출되지 않기 때문에 공해물질 저감 효과도 매우 크다 (Lee 등, 2013a). 반면, 적응방안을 고려할 경우에는 품종변경 방안이 기후변화 대응책으로써 효율적일 것이다. 국내 쌀 생산량의 변화율에 대하여 이산화탄소 농도는 적응방안을 적용했을 때의 증가율이 적응방안을 적용하지 않았을 경우의 감소율보다 크기 때문에 이산화탄소 농도의 증가는 적응방안의 적용을 통해 쌀 생산량을 증가시킬 수 있는 기회가 될 수 있다.

수정된 모형의 적합도 (수정된 결정계수: 0.5928)가 그리 높지 않았는데, 잔차 분석 결과에서 특이한 형태가 관측되지 않았다. 따라서 적합된 선형모형에서 고려된 효과들이 분석 자료 내에서 쌀 생산 변화율의 전체 변동을 약 59% 정도만 설명할 수 있고 설명되지 않는 변동 부분은 여기서 고려하지 않은 다른 효과들로 설명할 수 있음을 의미한다. 기후변화에 따른 작물 생산량에 대한 메타분석을 수행한 선행 연구들 (Challinor 등, 2014; Wilcox 등, 2013)에서는 기온과 강수량을 이산화탄소와 함께 기후적인 인자로 고려하였다. 본 연구에서도 이와 같은 기후적인 요인들의 존재를 인식하여 모형 개발에 고려하고자 하였으나, 메타분석에 이용된 개별적 연구들에서 기온이나 강수량에 대한 명확한 정보가 제시되지 않았기 때문에 반영하지 못하였다. 향후 국내 기후변화에 따른 농작물의 연구에 있어서 이산화탄소, 기온, 강수량에 대한 정보를 모두 제시하는 연구가 활발히 이루어져야 할 것으로 생각된다. 또한 수집된 각 연구의 결과는 온실가스 배출량에 대한 불확도 (uncertainty)와 같은 다양한 불확실성을 포함한다. 이는 분포에 알맞은 신뢰구간 추정을 이용하여 불확도를 산정하는 등, 불확실성을 줄이는 연구를 수행하여 적용함으로써 정확한 결과를 도출할 필요가 있다 (Lee 등, 2013b). 이처럼 보완된 연구들이 누적될 경우, 추후 동일한 주제의 메타분석에서 기후변화가 쌀 생산량에 미치는 영향을 정량적으로 명확하게 설명할 수 있다. 또한 수집된 연구들로부터 키워드 및 추세를 정성적으로 파악할 수 있는 텍스트 마이닝 기법을 함께 활용한다면 (Bae 등, 2013), 기후변화에 대하여 시간과 장소에 따라 효율적인 적응 및 대응 체계의 연구 개발 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

References

- Bae, K. Y., Park, J., Kim, J. S. and Lee, Y. (2013). Analysis of the abstracts of research articles in food related to climate change using a text-mining algorithm. *Journal of the Korean Data & Information Science Society*, **24**, 1429-1437.
- Challinor, A. J., Watson, J., Lobell, D. B., Howden, S. M., Smith, D. R. and Chhetri, N. (2014). A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature Climate Change*, **4**, 287-291.
- FAO. (2008). *Climate change and food security: A framework document*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- IPCC. (2001). *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, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC. (2007). *Climate change 2007: The physical science basis*, Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC. (2013). *Climate change 2013: The physical science basis*, Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC. (2014). *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. part A : Global and sectoral aspects*, Contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jackson, G. B. (1980). Methods for integrative reviews. *Review of Education Research*, **50**, 438-460.
- Kim, C. G., Jeong, H. K., Han, S. H., Kim, J. S. and Moon, D. H. (2012). *Impacts and countermeasures of climate change on food supply in Korea*, Korea Rural Economic Institute, Seoul, Republic of Korea.

- Kim, C. G., Jeong, H. K., Kim, Y. H., Kim, T. H. and Moon, D. H. (2011). *Strategies for agriculture, food, forestry and fishery industries against climate change*, Korea Rural Economic Institute, Seoul, Republic of Korea.
- Kim, C. G., Lee, S. M., Jeong, H. K., Jang, J. K. and Lee, C. K. (2010). *Impacts of climate change on Korean agriculture and its counterstrategies*, Korea Rural Economic Institute, Seoul, Republic of Korea.
- Kim, D. J., Kim, S. O., Moon, G. H. and Yun, J. I. (2012). An outlook on cereal grains production in south Korea based on crop growth simulation under the RCP8.5 climate change scenarios. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **14**, 132-141.
- Kim, N. J. and Choi, K. H. (2012). Lipid metabolic effects of caffeine using meta-analysis. *Journal of the Korean Data & Information Science Society*, **23**, 649-656.
- Lee, C. G., Kim, J., Shon, J., Yang, W. H., Yoon, Y. H., Choi, K. J. and Kim, K. S. (2012). Impacts of climate change on rice production and adaptation method in Korea as evaluated by simulation study. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **14**, 207-221.
- Lee, T. S. (2012). *Analyzing consumptive use of water and yields of paddy rice by climate change scenario and CERES-Rice*, M. Sc. Thesis, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea.
- Lee, Y., Kim, J., Jang, M., and Kim, H. (2013a). A study on comparing short-term wind power prediction models in Gunsan wind farm. *Journal of the Korean Data & Information Science Society*, **24**, 585-592.
- Lee, Y., Kim, H., Son, D. K., and Lee, J. (2013b). Estimation of confidence interval in exponential distribution for the greenhouse gas inventory uncertainty by the simulation study. *Journal of the Korean Data & Information Science Society*, **24**, 825-833.
- Lobell, D. B. and Field, C. B. (2007). Global scale climatecrop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters*, **2**, 014002.
- Pillemer, D. B. and Light, R. T. (1980). Synthesizing outcomes: How to use research evidence from many studies. *Harvard Educational Review*, **40**, 176-195.
- Shin, Y. H. (2013). *Assessment of climate change impact on rice productivity in the asia-pacific region*, APEC Climate Center, Busan, Republic of Korea.
- Wilcox, J. and Makowski, D. (2013). A meta-analysis of the predicted effects of climate change on wheat yields using simulation studies. *Field Crops Research*, **156**, 180-190.

A meta analysis of the climate change impact on rice yield in South Korea[†]

Deok Ha Shin¹ · Mun Su Lee² · Ju-Hyun Park³ · Yung-Seop Lee⁴

^{1,3,4}Department of Statistics, Dongguk University

²Department of Energy Science, Sungkyunkwan University

Received 12 January 2015, revised 23 January 2015, accepted 27 February 2015

Abstract

As the global climate has dramatically changed over the past decades, there has been active research on evaluating its effects on food security, which has been recognized as one of the most important issues in the field. In this study, we analyzed the impact of the climate change on the Korean agriculture using meta-analysis methods. Especially, our research focus is on estimating the effect of CO₂ concentration and two adaptations (planting-date and cultivar adjustments) on rice that accounts for a larger proportion of the Korean domestic agriculture. Unlike traditional general meta-analysis methods that use summary statistics of effects of interest, meta analysis specific to the agriculture literature was conducted by integrating the data on rice yield that were generated under various CO₂ emission scenarios and general circulating models of the 6 collected individual studies. As a modeling approach, the rice yield change ratio was set as the dependent variable and the main and interaction effects of CO₂ concentration and adaptation were considered as independent variables in a regression model. As a result, CO₂ is estimated to have opposite effects on rice yield depending on whether any of the two adaptations is applied or not; decreasing effect without adaptation and increasing effect with adaptation. In addition, it turns out that the cultivar adjustment has a higher increasing effect on rice yield than the planting-date adjustment. The results of the study are expected to be used as basic quantitative data for establishing responsive policies to the future climate changes.

Keywords: Climate change, greenhouse gas emission scenario, meta analysis, regression analysis.

[†] This research was supported by Bio-industry Technology Development Program, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (Project No. 312028-2)

¹ Graduate student, Department of Statistics, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea.

² Graduate student, Department of Energy Science, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea.

³ Professor, Department of Statistics, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea.

⁴ Corresponding author: Professor, Department of Statistics, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea.
Email: yung@dongguk.edu