

Research Article



CrossMark

Open Access

생산함수를 이용한 농업용수 관개량과 벼 생산성간 관계 평가

허승오^{1*}, 최순균¹, 엽소진¹, 홍성창¹, 최동호²

¹농촌진흥청 국립농업과학원 농업환경부 기후변화생태과, ²전라남도 환경산업진흥원 연구개발사업부

Relationship Assessment on Amount of Irrigation Water & Productivity of Rice by Production Function

Seung-Oh Hur^{1*}, Soonkun Choi¹, Sojin Yeop¹, Seong-Chang Hong¹, and Dongho Choi² (¹Climate Change & Agroecology Division, Department of Agricultural Environment, National Academy of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea, ²Division of Research and Development Business, Jeollanam-do Environmental Industries Promotion Institute, Gangjin 59205, Korea)

Received: 31 July 2019/ Revised: 9 August 2019/ Accepted: 29 August 2019

Copyright © 2019 The Korean Society of Environmental Agriculture

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.

ORCID

Seung-Oh Hur

<https://orcid.org/0000-0001-5388-9657>

Abstract

BACKGROUND: Production function gives the equation that shows the relationship between the quantities of productive factors used and the amount of product obtained, and can answer a variety of questions. This study was carried out to evaluate the relationship between irrigation water used for rice production and rice productivity by the production function which shows the mathematical relation between input and output.

METHODS AND RESULTS: The statistical data on rice production and on the amount of irrigation water were used for the production function analysis. The analysis period was separated for 1966-1981 and 1982-2011, based on goal's change on agriculture from 'increasing food' to 'complex farming'. The relation between irrigation and yield considering production function is a short-term production function both before and after 1982. These results can be expressed by the sigmoid relation. When comparing the graphs of the two analyzed periods, there are differences in quantity between the maximum point and the minimum point during the same analysis period, which can be called an

'Irrigation Effect' by the difference of irrigation, and 'Technical Effect' by the difference by inputs like as fertilizers etc.

CONCLUSION: The results could be useful as information for assessing the relationship between agricultural water and the productivity of rice and predicting rice productivity by irrigation water in Korea.

Key words: Irrigation amount, Irrigation effect, Production function, Rice productivity, Technical effect

서론

국토교통부 제4차 수자원장기종합계획 제3차 수정계획에 따르면 우리나라에서 수자원 사용량으로 살펴보면 농업용수의 비율이 약 41%를 차지하며, 한정된 수자원의 효율적 활용을 수자원 정책의 한 방향으로 끌고 가고 있다. 농업분야에서 이러한 기조는 지속적으로 이루어져 왔는데, 농업용수의 효율적 사용 또는 절약에 중점을 두는 한편, 기술적인 부분에서 운영·관리의 효율화, 수요량·공급량의 정확한 평가 등을 통해 농업 수자원의 효율성을 증진시키고자 하였으며(Kim *et al.*, 2003; Nam *et al.*, 2013; Hong *et al.*, 2014), 경제·정책적 부분에서는 수리권 조정·확립이나 생산비용·투입비용 등의 검토를 통해 생산효율성을 증가시키고자 하였다(Kwon *et al.*, 2009; Kim, 2011, 2018). 그러나, 이러한 연구결과에서는 농업용수 관개량과 벼 생산성에 대한 관계가 구체적으

*Corresponding author: Seung-Oh Hur
Phone: +82-63-238-2500; Fax: +82-63-238-3823;
E-mail: soilssohur@korea.kr

로 제시되어 있지 않다.

기상, 토양, 노동, 품종, 병해충 등 여러 가지 요인이 생산성에 영향을 미치므로 작물별 생산성이나 생산효율성을 평가할 때 이들 요인을 모두 포함하여 평가해야 하지만 평가에 필요한 요인들이 동시에 조사된 통계자료는 없다(Han, 2016). 생산함수는 주어진 생산요소들의 투입량과 이러한 생산요소들을 가지고 최대 생산할 수 있는 재화와 생산량의 관계를 나타내는 함수로서 생산요소의 투입과 산출 간에 존재하는 일정한 기술적 관계를 표현한다(Debertin, 2012). 여기서 생산요소란 생산물을 생산하기 위하여 투입되는 모든 것을 말하며, 벼 생산을 위해 투입되는 수자원, 비료, 에너지 등이 포함된다(Han, 2016). 생산함수는 생산량에 영향을 미치는 투입요소에 대한 평가가 가능한데, 기후변화나 기술적 혁신, 정부규제 등의 생산에 대한 충격이 긍정적이면 생산량 증대에 영향을 주고 부정적이면 생산량 감소에 영향을 줄 수 있다. 따라서, 생산함수를 이용하면 농업용수 사용의 궁극적 행위인 관계와 생산량의 관계를 기술진보적 측면에서 평가할 수 있으며, 이를 통해 농업용수의 생산효율성을 판단할 수 있을 것이다.

본 연구는 통계청의 벼 생산량 자료와 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 농업용수 사용량 자료를 기반으로 하여, 생산요소의 투입·산출 간의 관계를 나타내는 생산함수를 이용해 관계를 통한 농업용수 사용과 벼 생산성간의 관계를 평가하고자 하였다.

재료 및 방법

생산함수 분석모형

생산함수는 Cobb과 Douglas (1928)가 제시한 동차함수를 기원으로 하며, Translog 생산함수(Christensen et al., 1973), 맘퀴스트 생산함수(Malmquist, 1953) 등으로 다양하게 분화되고 발전되어 왔다. 또한 생산함수는 생산요소의 가변성을 기준으로 단기(Short-run) 생산함수, 장기(Long-run) 생산함수로 구분이 되어 지며, 시간 개념이 아니라 고정요소의 존재여부에 따라 구분하는 것으로서, 단기생산함수는 하나의 요소를, 장기생산함수는 투입된 요소 모두를 변화시킨다. 생산요소의 투입을 늘리면 생산은 증가하지만 증가폭은 점점 줄어들어 한계 생산에 다가가게 된다. 이를 수확체감의 법칙이라고 하며, 농업생산은 수확체감의 법칙을 따른다. 단기생산함수도 수확체감의 법칙을 따른다. 따라서, 본 연구에서는 벼 생산에 영향을 미치는 기상·시비·관계 등 다양한 요소들 중에서 논벼와 밭벼를 구분할 수 있는 관계를 통한 농업용수 공급을 가변투입요소로 설정하고 기상·시비 등은 고정요소로 선정하는 단기 생산함수를 활용하였다.

농업생산에 있어 단기생산함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = f(W) \tag{1}$$

여기서, Q는 총 생산량(TP, Total Product)을 나타내며,

W는 가변 투입요소인 관계량을 나타내며, 생산성에 영향을 주는 고정투입요소는 함수의 변화에 대해 영향을 미치지 못하므로 수식에 포함시키지 않았다. 단기생산함수에서 평균생산량(AP, Average Product)은 총생산량 곡선 상의 한 점에서 원점에 연결한 직선의 기울기(Fig. 1, \overline{OA})를 의미하며, 투입된 농업용수량의 단위당 생산량을 의미하므로 식(1)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$AP_W = \frac{Q}{W} = \frac{TP}{W} \tag{2}$$

식(2)의 평균생산량이 수확체감의 법칙에 따라 한계생산(MP, Marginal Product)에 다다르면 총 생산량의 변화분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$MP_W = \frac{\Delta Q(= \Delta TP)}{\Delta W} = \frac{f(W+\Delta W) - f(W)}{\Delta W} = \lim_{\Delta W \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta W} = \frac{dQ}{dW} \tag{3}$$

식(3)에서 확인할 수 있는 것은 TP가 증가하면 MP는 0보다 크며, TP가 극대이면 MP=0이 되며, TP가 감소하면 MP는 0보다 작아진다.

단기생산함수에서 식(1), (2), (3)을 그림으로 표현하면 아래와 같이 나타낼 수 있다. 점 A에서는 AP가 극대가 되며, 이 점에서는 MP와 AP가 일치하며, A 이후 MP가 점점 감소하여 B에서는 0이 되며, B 이후는 MP가 0보다 작아지는 것을 나타내고 있다.

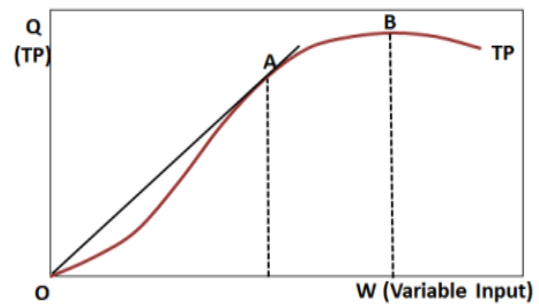


Fig. 1. Graph for Total Product.

분석에 사용된 통계자료

본 연구에서는 수확체감의 법칙을 따르는 단기생산함수를 고려하였으므로, 벼의 생산량과 농업용수 관계량에 대한 통계 자료를 사용하였다. 단기생산함수를 고려한 이유는 수확체감의 법칙을 따르는 것도 있지만, 벼의 생산량에 영향을 미치는 비료투입량이나 노동, 자본 등에 관한 국가적 통계자료가 없어서이기도 하다.

분석에 이용된 산출요소인 벼 생산량 자료는 통계청의 국가 통계포털(KOSIS, Korean Statistical Information Service) 및 농림축산식품부에서 제공하고 있는 1966년부터 2011년까지의 10 a당 벼 생산량(조곡) 자료를 사용하였으며, 가변요소로서 생산요소인 벼 생산을 위한 농업용수 관계량 자료는 국

토교통부의 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하고 있는 유효강수량 및 유효우량을 포함한 농업용수량 중에서 논에 공급된 농업용수 관개량 정보를 대상으로 하였다(Table 1). 논벼 생산함수 분석을 위해서는 유효우량을 제외한 관개량을 생산요소로 하였으며, 밭벼를 위한 농업용수 관개량 자료는 별도의 관개가 없다고 가정하고 유효우량을 밭벼 생산을 위한 생산요소로 가정하였다. 분석기간은 1966-1981,

1982-2011년으로 구분을 하였는데, 이러한 구분은 농업생산 정책에 있어 큰 전기가 마련되었던 시기를 기점으로 하고자 하였다. 우리나라는 1962년부터 5년마다 경제사회발전 5개년 계획을 작성하였는데, 제4차(1977-1981)까지 농정의 목표였던 식량증산에서 복합영농으로 전환된 시기가 제5차 경제사회발전 5개년 계획(1982-1986)부터였기에 1982년을 분석 기준으로 정하였다.

Table 1. Yield of paddy land & upland rice by irrigation amount & effective rainfall

Year	Water consumption including effective rainfall (mm)	Effective rainfall (mm)	Annual yield of rice (kg/10a)	
			Paddy land	Upland
1966	1,591	548	347	164
1967	1,644	381	319	109
1968	1,610	354	302	132
1969	1,590	614	365	167
1970	1,526	692	355	177
1971	1,594	622	363	193
1972	1,617	598	359	192
1973	1,727	378	386	197
1974	1,623	536	406	198
1975	1,645	604	416	226
1976	1,624	428	466	203
1977	1,698	304	531	200
1978	1,631	501	510	181
1979	1,565	704	488	326
1980	1,485	734	321	174
1981	1,601	567	447	217
1982	1,678	297	618	289
1983	1,613	583	622	279
1984	1,614	603	649	262
1985	1,621	611	636	286
1986	1,576	603	638	274
1987	1,527	738	602	311
1988	1,667	339	656	303
1989	1,589	650	645	326
1990	1,599	694	621	328
1991	1,578	613	604	322
1992	1,681	442	628	309
1993	1,491	646	564	308
1994	1,788	310	619	282
1995	1,658	393	605	277
1996	1,620	430	679	254
1997	1,679	457	695	379
1998	1,570	666	642	443
1999	1,587	623	664	433
2000	1,574	614	675	414
2001	1,720	392	693	330
2002	1,598	560	639	348
2003	1,454	833	609	341
2004	1,612	563	679	323
2005	1,593	592	661	374
2006	1,540	580	664	312
2007	1,490	646	630	340
2008	1,624	451	694	340
2009	1,630	393	706	375
2010	1,536	563	653	351
2011	1,554	560	659	349

결과 및 고찰

농업용수 사용량과 벼 생산량 특성

분석기간 동안 벼에 대한 농업용수 사용량을 살펴보면 1982년 이전에 논벼에 대한 관개량은 평균적으로 유효우량을 포함할 경우 1,611 mm가 소비 되었고, 유효우량을 제외하고 소비수량만을 판단하였을 경우에는 1,075 mm로 발벼에 이용된 유효우량 535 mm의 2배가 관개되었다. 1982년 이후에는 평균적인 소비수량은 1982년 이전과 비슷한데, 유효우량을 제외한 논에 관개된 양은 약 20 mm가 감소되었으나 발벼의 관개량으로 산정된 유효우량은 13 mm 정도가 증가된 것으로 나타났다. 전체적으로 논벼의 소비수량이 발벼에 이용된 유효우량보다 약 2배가 많았다(Table 2).

분석기간 동안의 벼 생산량은 논벼의 경우에는 1982년 이전에는 10 a당 평균 399 kg으로 발벼의 평균수량인 191 kg 보다 2.14배의 수량성을 나타냈으며, 1982년 이후에는 10 a당 논벼 수량은 평균 645 kg으로 발벼의 329 kg보다 1.96배의 수량성을 보였다. 1982년 이전과 이후를 비교하였을 경우에는 논벼는 약 1.6배, 발벼는 약 1.7배가 증수되었다. Table 2에서 1982년 이전과 이후의 관개량에 차이가 없는 것과는 달리 수량에 차이를 나타내고 있는 것은 관개를 제외한 다른 기술들의 발달이 영향을 주었다고 판단할 수 있다. Yeon 등 (2007)에 따르면 화학비료 50년 연용 시험에서 무비구와 3요소 시험구의 수량차이는 품종별로 21-38 % 차이가 나는데, 이는 무비구와 3요소 시험구 모두 동일한 관개를 실시하므로 관개를 제외한 농업자재(비료) 투입이 수량증가에 영향을 주었다는 근거가 될 수 있다.

생산함수를 고려한 관개와 생산량과의 관계

생산함수를 이용한 쌀 생산의 효율성 분석에 사용된 자료들은 종속변수로 쌀 생산량이나 생산비를 활용하였고, 독립변수는 재배면적, 노동시간, 비료나 농약과 같은 농자재 투입비용, 투입량, 자본 등이 활용되었다(Lee, 2000; Park and Ahn, 2002; Kang and Park, 2005; Lee, 2011; Kang, 2013). 대부분의 연구결과를 쌀을 생산함에 있어 비효율성이 존재함을 설명하고 있고, 생산량이나 생산비는 재배면적이 큰 영향을 나타내는 것으로 해석하고 있지만 생산성에 큰 영향을 미친다고 판단되고 있는 인자 중의 하나인 관개(량)에 대해서는 언급이 없다. 본 연구에서는 논에서는 유효우량을 제외한 소비수량을, 밭에서는 유효우량을 관개량으로 산정하였다. 관개량과 생산량 자료들을 활용해 분석한 결과 단기생산함수로 1982년 이전 관개량과 벼의 생산량을 살펴보면 전형적인 수확체감의 법칙을 따르고 있음을 알 수 있다(Fig. 2). 관개량이 증가하면서 수량이 향상되었으며, 일정수량부터는 관개량이 증가하더라도 수량이 증가하지 않는 양상을 보여주고 있다. 수량 증가가 더 이루어지지 않는 지점은 단기생산함수에서 AP가 극대가 되는 지점이며, MP와 AP가 같으면서 MP가 0이 되는 지점이다. 1982년 이후의 관개량과 생산량의 관계도 1982년 이전처럼 수확체감의 법칙을 따르고 있으며, 시그모이드(Sigmoid) 형태의 그래프를 나타내고 있어 AP와 MP에 대한 분석이 동일해진다. 다만 각 지점에서의 수량과 관개량이 다르다. 이 그래프를(Fig. 2) 통해 살펴본 관개량과 생산량과의 관계는 결정계수(R^2)가 1982년 이전은 0.7747, 1982년 이후는 0.8595이고 p값이 0.001보다 작아 통계적으로도 유의한 것을 알 수 있다.

Table 2. Statistical data on consumptive water use for rice cultivation during analysis period

Classification		Including effective rainfall	Excluding effective rainfall	Effective rainfall
Before 1982	Ave. Consumptive Water Use (mm)	1,611	1,075	535
	STD*	58	182	133
After 1982	Ave. Consumptive Water Use (mm)	1,602	1,054	548
	STD	70	192	130

* STD: Standard Deviation

Table 3. Statistical data on yield of rice during analysis period

Classification		Paddy Rice	Upland Rice
Before 1982	Average Yield (kg/10a)	399	191
	STD*	71	47
After 1982	Average Yield (kg/10a)	645	329
	STD	33	48

* STD: Standard Deviation

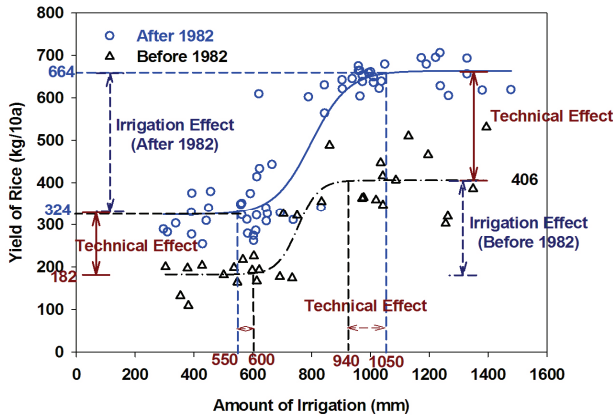


Fig. 2. Relation on yield of rice and amount of irrigation.

이러한 결과를 종합해 보면 관개량에 대한 벼 생산성 관계는 생산함수로서의 특징을 나타내고 있으며 이러한 관계는 다음과 같은 관계식으로 요약할 수 있다.

$$f(x) = y_0 + \frac{a}{1 + e^{-(\frac{x - x_0}{b})}} \quad (4)$$

여기서, 1982년 이전의 y_0 는 182.2359, x_0 는 753.8708, a 는 223.6584, b 는 35.2536을 나타냈고, 1982년 이후는 y_0 는 323.9188, x_0 는 798.3525, a 는 339.6837, b 는 63.3009의 값을 보였다.

동일한 분석기간 동안 극대지점과 극소지점의 수량차이는 1982년 이전에는 10 a당 224 kg, 1982년 이후에는 340 kg을 보여주고 있다. 이러한 차이에서 극대지점은 논벼이고 극소지점은 밭벼로 해석 가능하고, 투입요소인 관개로 인한 차이라고 판단할 수 있으며, 관개효과(Irrigation effect)라고 부를 수 있다. 분석기간 간의(1982년 이전과 이후) 변화와 차이를 살펴보면 극소지점에서는 10 a당 142 kg, 극대지점에서

는 258 kg의 차이를 보여주고 있으며(Table 4), 이러한 차이는 품종개발이나 농자재 투입 등 다른 재배기술 개발에 의한 변화로 판단할 수 있다. 또한, 1982년 이후가 생산적인 측면에서는 기술적인 진보를 더 이루었다고 판단할 수 있으며, 이것을 기술적 효과(Technical effect)라고 부를 수 있다. 이러한 결과는 Kim 등(2011)의 비료장기연용 시험에서, 비료를 주지 않고 관개만 실시된 무비구의 수량이 368 kg으로 본 연구에서 관개효과라 불리는 수량차이 340 kg (1982년 이후)과 비슷한 수량을 보여주고 있으며, 3요소와 볏짚을 사용한 시험구는 604 kg으로 관개만 실시된 무비구 대비 236 kg의 수량이 증수하여 본 연구에서 논벼의 기술적 효과로 인한 수량차이인 258 kg과 유사한 수량차이를 나타내고 있다. 이러한 결과는 관개효과와 기술적 효과의 효용성을 부여하는 연구결과로 판단된다.

또한, 동일한 분석기간에 있어서의 관개량 차이를 살펴보면, 1982년 이전에는 최대지점과 최소지점에서의 차이가 340 mm이고, 1982년 이후에는 500 mm를 나타내고 있다(Table 5). 두 분석시기 간 차이는 1982년 이후가 160 mm가 더 넓어진 것을 알 수 있다, 이것은 벼의 관개수에 대한 수용성이 향상되었다는 것을 의미하며, 이러한 차이는 육종기술의 진보가 뒷받침 되었다고 판단할 수 있다.

Note

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement

This study was supported by the Rural Development Administration under the “Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development” (Project No. PJ01343501).

Table 4. Yield gap to technical and irrigation effect by production function

Classification	Technical Effect		Irrigation Effect	
	Paddy Rice	Upland Rice	After 1982	Before 1982
Yield Gap (kg·10a-1)	258	142	340	224

Table 5. Difference of irrigation amount by production function

Classification	After 1982		Before 1982	
	Max.	Min.	Max.	Min.
Amount of irrigation (mm)	1,050	550	940	600
Difference of Max. & Min. (mm)	500		340	
Difference of Before & After 1982 (mm)	160 (Max. 110 + Min. 50)			

References

- Christen, L. R., Jorgenson, D. W., & Lau, L. J. (1973). Transcendental logarithmic production frontiers. *The Review of Economics and Statistics*, 55(1), 28-45.
- Cobb, C. W., & Douglas, P. H. (1928). A Theory of Production. *The American Economic Review*, 18(1), 139-165.
- Debertin, D. L. (2012). *Agricultural production economics*, p. 14, Second Edition. University of Kentucky, USA.
- Han, S. H. (2016). A study of building rice crop yield forecasting model. *Journal of Agriculture & Life Science*, 50(3), 219-229.
- Hong, E. M., Nam, W. H., Choi, J. Y., & Kim, J. T. (2014). Evaluation of water supply adequacy using real-time water level monitoring system in paddy irrigation canals. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 56(4), 1-8.
- Kang, C. Y., & Park, H. T. (2005). An analysis of efficiency of environmentally-friendly rice production. *Rural Economy*, 28(4), 19-32.
- Kang, H. J. (2013). Analysis of productive efficiency and economic feasibility of range on multi cultivation. *Rural Economy*, 36(4), 73-92.
- Kim, H. J., Kim, C. G., & Kim, S. (2003). Assessment of water management efficiencies for irrigation pumping stations in the Han river and Nakdong river basins. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers*, 45(1), 23-32.
- Kim, H. S. (2011). The actual condition and improvement plan of agricultural water right management. *Journal of Water Policy & Economy*, 18, 61-76.
- Kim, H. S. (2018). Tasks and main issues for completing unification of water management –Focusing on agricultural water sector. *Journal of Water Policy & Economy*, 31, 29-49.
- Kim, M. S., Kim, Y. H., Hyun, B. K., Yang, J. E., Zhang, Y. S., Yun, H. B., Sonn, Y. K., Lee, Y. J., & Ha, S. K. (2011). Rice yield and changes of available silicate in paddy soils from long-term application of chemical fertilizers and soil amendments. *Korean Journal of Soil Science & Fertilizer*, 44(6), 1118-1123.
- Kwon, O. S., Lee, T. H., & Heo, J. H. (2009). Valuation of irrigation water: A chance-constrained programming approach. *Journal of Korea Water Resources Association*, 42(4), 281-295.
- Lee, B. K. (2000). Determinants of technical efficiency in the Korean rice industry. *Korea Journal of Agricultural Management and Policy*, 27(3), 1-17.
- Lee, M. H. (2011). Estimating of rice production function using panel data. *Sogang Economic Papers*, 40(1), 107-131.
- Malmquist, S. (1953). Index Numbers and Indifference Surface. *Trabajos de Estadística*, 4, 209-242.
- Nam, W. H., Choi, J. Y., Hong, E. M., & Kim, J. T. (2013). Assessment of irrigation efficiencies using smart water management. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 55(4), 45-53.
- Park, J. E., & Ahn, I. C. (2002). Stochastic frontier production function analysis on the technical efficiency of Korean rice farming. *Journal of Chungbuk Development Review*, 13(2), 123-143.
- Yeon, B. Y., Kwak, H. K., Song, Y. S., Jun, H. J., & Kim, C. H. (2007). Changes in rice yield and soil properties under continued application of chemical fertilizer for 50 years in paddy soil. *Korean Journal of Soil Science & Fertilizer*, 40(6), 482-487.