

Research Article

우리나라 남부해안지역에서 이탈리아 라이그라스에 대한 계절적 기후시나리오 간 수량비교 시뮬레이션

김문주¹, 성경일^{2*}

¹강원대학교 동물생명과학연구소

²강원대학교 동물생명과학대학

Yield Comparison Simulation between Seasonal Climatic Scenarios for Italian Ryegrass (*Lolium Multiflorum* Lam.) in Southern Coastal Regions of Korea

Moonju Kim¹ and Kyung Il Sung^{2*}

¹Institute of Animal Life Science, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

²Department of Animal Life Science, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

ABSTRACT

This study was carried out to compare the DMY (dry matter yield) of IRG (Italian ryegrass) in the southern coastal regions of Korea due to seasonal climate scenarios such as the Kaul-Changma (late monsoon) in autumn, extreme winter cold, and drought in the next spring. The IRG data (n = 203) were collected from various Reports for Collaborative Research Program to Develop New Cultivars of Summer Crops in Jeju, 203 Namwon, and Yeungam from the Rural Development Administration - (en DASH). In order to define the seasonal climate scenarios, climate variables including temperature, humidity, wind, sunshine were used by collected from the Korean Meteorological Administration. The discriminant analysis based on 5% significance level was performed to distinguish normal and abnormal climate scenarios. Furthermore, the DMY comparison was simulated based on the information of sample distribution of IRG. As a result, in the southern coastal regions, only the impact of next spring drought on DMY of IRG was critical. Although the severe winter cold was clearly classified from the normal, there was no difference in DMY. Thus, the DMY comparison was simulated only for the next spring drought. Under the yield comparison simulation, DMY (kg/ha) in the normal and drought was 14,743.83 and 12,707.97 respectively. It implies that the expected damage caused by the spring drought was about 2,000 kg/ha. Furthermore, the predicted DMY of spring drought was wider and slower than that of normal, indicating on high variability. This study is meaningful in confirming the predictive DMY damage and its possibility by spring drought for IRG via statistical simulation considering seasonal climate scenarios.

(Key words: Abnormal climate, Dry matter yield, Italian ryegrass, Southern coastal region, Yield comparison simulation)

I. 서론

최근 기후가 불안정해지고 변동이 점차 심해지는 상황에서 농업과 축산업은 새로운 문제에 직면하고 있다. 특히 사료작물은 시설재배 작물과 달리 저온 및 고온 스트레스와 같은 환경 변화에 취약할 가능성이 높다(Hatfield et al., 2011). 우리나라에서 이탈리아 라이그라스(IRG: Italian ryegrass, *Lolium multiflorum* Lam.)는 사료가치가 높아 남부지역부터 중부지역까지 널리 재배되는 대표 동계사료작물이다(Sung et al., 2012). 특히 동아시아에서 IRG는 주로 하계작물인 벼와 함께 이모작(rice-IRG crops

rotation system)으로 재배되고 있다(Ishii et al., 2005). 우리나라 남부해안 및 도서지역에 포함되는 제주는 월동에 가장 유리한 조건을 지니고 있고 동계사료작물의 재배에 우수한 환경조건을 가진다(Park et al., 2008). 그러므로 남부해안지역에서 IRG 재배는 벼농사를 주요 소득원으로 하는 농가 입장에서 부수적 소득원으로서 중요한 역할을 할 수 있다. 특히 우리나라의 기후변화는 세계 평균 수준보다 더 심각한 것으로 나타났다(Chung et al., 2007; Hong et al., 2014). 한국 기후변화 평가보고서 2020 (Lee et al., 2020)에 따르면, 21세기 말 우리나라 기후대가 아열대성으로 변화함에 따라 재배적기와 적지, 생산성과 품질, 병해충 및 잡

*Corresponding author: Kyung Il Sung, Department of Animal Life Science, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea, Tel: +82-33-250-8625, Fax: +82-33-242-4540, E-mail: kisung@kangwon.ac.kr

초 발생 등 농업분야의 변화가 가속화될 것으로 전망된다. 또한 기후변화, 이상기후 및 기후이벤트에 의한 사료작물의 수량피해를 과소평가한다면 사료생산에 부정적인 영향을 미치고 그에 따라 육류 및 우유와 같은 동물성 제품의 안정적인 생산에 악영향을 미칠 것으로 우려된다. 그러므로 우리나라에서 기후 조건을 고려한 동계사료작물에 대한 수량 예측은 학술뿐 아니라 산업적인 면에서도 중요하다.

일반적으로 IRG는 주로 가을에 파종하여 이듬해 봄에 수확한다. IRG의 생장단계는 생장 및 발육이 이루어지는 가을과 이듬해 봄, 그리고 생존을 결정하는 월동으로 구분할 수 있다. Kim et al. (2014)은 생장기간을 가을생장기, 월동기 및 이듬해 봄 생장기로 구분하여 기후변수가 수량에 미치는 수량예측모형을 구축하였다. Kim and Sung (2021)은 IRG 수량에 영향을 미치는 기후이벤트를 정의하기 위해 계절을 고려하였다. 첫째, 가을생장기의 기후이벤트는 저온을 유발하는 가을장마였다. 최근 지구온난화로 여름 기온이 상승하고 하절기가 길어짐에 따라 작물의 성장 및 발육에 불리한 저온이 발생할 가능성은 줄어들 것으로 보고되고 있다 (Pachauri et al., 2014). 그러나 여름장마 뿐 아니라 늦은 장마(가을장마, ACM: autumn changma)의 빈도 및 강도가 증가하는 경향도 보고되고 있다(Chen et al., 2004). 이는 가을장마 후 IRG 파종시기 기후의 불안정성이 높아지며 이는 저온현상을 발생시킬 것으로 생각하였다. 또한 가을장마가 길게 지속되는 경우, 늦은 벚짐 수거에 의해 IRG 파종이 늦어지거나 파종, 경운 및 로터리 등 기계를 이용한 작업이 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 단기간 기후이벤트로 저온현상을 유발할 수 있는 가을장마를 고려하였다. 둘째, 월동기 기후이벤트는 혹한(SWC: severe winter cold)을 고려하였다. 왜냐하면 IRG는 내한성 품종 개발이 중요한 정도로 내한성이 약하고(Jang et al., 2011), SWC은 IRG의 사료가치에 영향을 미치기 때문이다(Kobayashi et al., 2008). 특히 최근 지구 온난화는 북극 해빙과 관련되어 동아시아의 겨울을 더 춥게 만드는 경향이 있는 것으로 보고되고 있어(Min et al., 2015) SWC의 중요성은 점점 높아질 것은 자명하다. 마지막으로 이듬해 봄 생장기의 기후이벤트는 봄 가뭄(NSD: next spring drought)이었다. 일반적으로 NSD은 단기적으로 발생하는 기후이벤트와 달리 장기적으로 발생하는 경우 피해가 큰 기후이벤트로 알려져 있다. 특히 적설량이 낮은 건조한 겨울에 이어 NSD가 겹치는 경우 피해는 상당히 크다(Lee et al., 2012). Kim et al. (2011)은 2000년 초반부터 가뭄의 양극화는 장기뿐 아니라 단기적으로도 중요한 기후현상으로 보고하였다. 또한 가뭄은 10년 이상 지속될 수 있고 기후변화 중 극단적인 가뭄에 대한 대비를 중요한 미래 대응 전략으로 보고하였다(Kim et al., 2020). 그러므로 본 연구에서 NSD가 월동 후 생장 및 발육이 왕성하게 이루어지는 봄에 발생 가능한 기후이벤트로 선택되었다.

일반적으로 고품질 사료를 생산하기 위해서는 생산 관리 및 사료 수급계획이 필요하고 이러한 계획에는 사료작물에 대한 수량 예측이 요구되고 있다(Mkhabela et al., 2011). 특히 우리나라는 사료 자급률에 비해 해외 의존도가 높아 기후변화, 자연재해, 시장의 급변 등 외부적 충격으로부터 탄력성 재고를 위해 안정적인 사료작물의 확보가 시급하다(Peng et al., 2017). 사료작물 수량예측을 위해 국내외에서 다양한 방법이 시도되고 있다. 기후를 기반으로 생산량을 예측하는 모형으로 DSSAT-CSM (Decision Support System for Agrotechnology Transfer - Cropping System Model)이 대표적이다(Jones et al., 2003). Peng et al. (2017)은 우리나라의 지역에 따라 기후가 다른 점을 고려하여 지역별 IRG 수량을 예측하였다. 그 결과 수량은 제주를 기준으로 위도가 높을수록, 해안지역보다 내륙지역에서 높게 나타났다. IRG의 예측수량과 기후의 정보를 효과적으로 보여주기 위해 Kim et al. (2017)은 주요재배지역을 중심으로 대한민국 지도에 예측수량을 맵핑하였다. 한편, 온도, 습도 및 강수 등 기후는 상호간에 독립적이지 않다. 기후 간 연관성을 반영하기 위해 Kim et al. (2014)은 처음으로 IRG에 대해 기후-수량 네트워크를 구축하여 효과를 추정한 결과, 수량에 대한 중요도는 월동기, 이듬해 봄 생장기 및 가을생장기 순으로 나타났다. 기후-수량 네트워크를 기반으로 토양물리성을 추가한 기후-토양-수량 네트워크(Kim et al., 2019) 및 재배지형태를 고려한 재배관리-기후-수량 네트워크(Kim and Sung, 2019)가 구축되었다. 그러나 상기의 연구들은 수량예측을 위해 정상적인 기후만 고려하였기 때문에 정상수준을 벗어나는 기후를 무시하는 한계가 있었다. 그러므로 본 연구는 이상기상을 야기하는 기후이벤트를 고려한 기후시나리오를 생성하여 기후이벤트 발생에 의한 효과를 확인하고자 하였다.

최근 기후변화 및 이상기후를 고려한 수량예측에서 이상기후는 급변하는 환경 속에서 정상기후보다 발생빈도가 상대적으로 낮지만 영향력은 점차 커지는 경향이다(Pachauri et al., 2014). 특히, 동아시아에 한파 발생경향이 두드러지고 있다(Min et al., 2015). 이러한 급격한 변화 때문에 기후변화 및 이상기후 조건에서 사료작물의 수량예측모형을 구축하는 것은 쉽지 않다. Kim and Sung (2021)은 우리나라에서 계절별 기후이벤트를 선정하여 IRG 수량을 비교하였지만 작은 표본 크기 때문에 기후이벤트에 의해 발생하는 피해 수량을 일반화가 어려웠고 기후이벤트에 의한 피해수량의 가능성도 확인할 수 없었다. 이를 해결하기 위한 방법으로 통계적 시뮬레이션은 다양한 조건을 가정한 가상사료(artificial data)를 기반으로 특정 시나리오 하에서 경험적 결과에 대해 다양한 실험이 가능하다(Morris et al., 2019). 본 연구에서 통계적 시뮬레이션은 수량예측뿐만 아니라 특정 예측값의 확률도 계산하기 때문에 예측수량에 대한 가능성도 가능해 볼 수 있는 장점이 있다.

그러므로 본 연구는 대표적인 계절별 기후이벤트로 ACM, SWC 및 NSD 발생에 따른 IRG 수량 차이 및 그 가능성을 확인할 목적으로 통계적 시뮬레이션을 수행하였다.

II. 재료 및 방법

1. 자료 수집 및 변수 생성

기후-IRG 데이터베이스는 작물정보와 기상정보로 구성되었다. 작물정보(n = 1,107)는 1993년부터 2013년까지 농촌진흥청의 지역적응시험 결과보고서로부터 건물수량(DMY: dry matter yield, kg/ha), 파종일, 수확일, 재배연도 및 재배지역을 포함하였다. 기상정보는 기상청의 기상정보시스템으로부터 일평균온도, 상대습도, 강수량, 평균풍속 및 일조시간을 포함하였다. 작물정보와 기상정보는 수집 후 매칭, 오류수정 및 분류를 통해 가공되었다. 여기서 매칭은 연도 및 재배지역을 기준으로 기상대의 기후정보를 조회함과 동시에 파종일과 수확일을 기준으로 기후변수생성을 병행하였다. 오류수정은 오기(miswritten), 중복(overlapped) 및 오산(miscalculated) 등을 수정하였다. 마지막으로 지역은 온도를 기준으로 남한지역 분류한 Ko et al. (2006)의 결과를 참고하여 표본크기가 10보다 큰 제주(33° 52'N, 126° 53' E, n = 135), 남원(35° 65'N, 127° 52' E, n = 41) 및 영암(34° 64'N, 126° 78' E, n = 27)을 선별하였다. 그 결과 203점의 기후-IRG 자료가 기후 시나리오 생성, DMY 예측모델링 및 수량비교 시뮬레이션에 사용되었다.

IRG의 DMY 예측모델링 및 시뮬레이션에 사용된 기상변수는 가을, 겨울 및 이듬해 봄으로 구분한 평균온도(MT: mean temperature, °C), 최고온도(HT: high temperature, °C), 최저온도(LT: low temperature, °C), 상대습도(RH: relative humidity, %), 누적강수량(AP: accumulated precipitation, mm), 평균풍속(W: wind speed, m/s) 및 일조시간(SD: sunshine duration, h)이었다. 여기서 가을, 겨울 및 이듬해 봄은 분기를 기준으로 각각 파종일부터 11월 30일까지, 12월 01일부터 2월 28일까지, 3월부터 수확일까지 기간으로 정의하였다. IRG의 성장 및 발육에 온도의 효과는 타 기상변수보다 큰 편으로 나타났다(Peng et al., 2017). 단 본 연구에서 MT, HT 및 LT는 모두 온도와 관련이 많아 각 계절에서 수량과 연관성이 높게 나타난 변수만 선별하였다. 적정온도를 조건으로 강수가 온도를 통해 IRG 수량에 미치는 간접효과도 중요하였다(Kim et al., 2019).

본 연구에서 기후시나리오는 IRG 수량에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 기후이벤트를 각 계절별로 선택하였다. 조건으로 IRG의 성장과 월동을 반영할 수 있는 계절별 기후이벤트를 중점

적으로 고려하였다. 계절별로 IRG의 성장 및 발육에 유리한 정상 기후 시나리오(NCS: normal climate scenario)는 대조군으로 정하여 계절별 기후이벤트(ACM, SWC 및 NSD)가 발생하여 성장 및 발육에 불리한 경우를 이상기후 시나리오로 설정하였다. 여기서 이상기후는 계절별로 나타나는 기상변수의 특성을 고려하여 통계적 분석방법을 사용하여 계량화 및 정의를 하였다.

2. 통계적 분석방법

본 연구에서는 IRG의 DMY에 영향을 미치는 계절별 기후이벤트를 고려한 시나리오를 계량화하기 위해 판별분석을, 수량예측모델은 회귀분석을, 기후시나리오 간 수량비교는 시뮬레이션을 통해 각각 수행하였다. 첫째, 판별분석에서 집단 분류는 기상변수를 기반으로 유클리드 거리가 가장 먼 두 집단으로 나누는 방법을 이용하였다(Johnson and Wichern, 2002). 계절별 정상과 이상 기후 시나리오는 판별함수에 의한 집단의 중심위치와 발생빈도를 나타내는 집단의 표본크기를 기반으로 구분하였다. 둘째, 수량예측모델링에서 기상변수 및 DMY는 각각 설명변수 및 반응변수로 입력하였고 변수선택은 단계적 선택법을 이용하였다. 마지막으로 시뮬레이션에 사용한 가상 자료는 표본크기와 동일한 가상자료에 계절별 기후 시나리오의 최소 조합 수를 고려하여 50,000점(3가지 계절, 2가지 시나리오, 5가지 기상변수; $3 \times 2 \times 2^5$)을 생성하였다. 여기서 통계분석은 5% 유의수준 하에서 SPSS 24.0 (IBM Corp. Chicago)을 시뮬레이션 및 시각화는 R 4.0.5를 각각 이용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 남부해안지역의 기후 시나리오의 정의 및 계량화

남부해안지역의 월별 기상변수를 살펴보면(Table 1), 1월 및 2월의 MT (°C)는 각각 8.5 및 9.6로, LT (°C)는 각각 3.5와 3.8로 나타났다. 이는 남부해안지역의 MT가 동계작물의 IRG의 기본온도인 5°C(Moot et al., 2000; Kim and Sung, 2021)보다 높아 월동에 큰 어려움은 없지만 LT를 고려하면 월동이 어려운 조건도 존재하는 것을 의미한다. Sung and Kim (2020)은 남부지역의 기온이 한파 발생 시 평균적으로 -3°C에서 0°C이고, 제주 지역은 영상인 것으로 보고하였다. 그러므로 남부해안지역에서 SWC가 빈번하게 발생하진 않지만 SWC에 대한 가설은 확인할 필요가 있었다. 한편 9월 AP는 209.7 mm로 가을장마가 나타났지만 MT 및 LT가 23.1 및 20.6으로 저온현상까지 이어질 가능성에 대해서는 회의적이었다. 반면에 중부내륙지역에서는 가을철 저온현상이 뚜렷하게 나타났다(Kim and Sung, 2021). 그러므로 남부해안지

Table 1. Characteristics of seasonal climatic variables in the southern coastal regions of Korea (Namwon, Jeju and Yeongam)

Seasons	Month	MT (°C)	HT (°C)	LT (°C)	RH (%)	AP (mm)	WS (m/s)	SD (h)
Autumn	9	23.1	25.9	20.6	74.1	209.7	3.0	164.3
	10	18.3	21.4	15.3	67.2	78.6	3.2	178.4
	11	13.0	16.1	10.0	65.7	68.6	3.6	125.2
Winter	12	8.1	10.9	5.4	65.4	51.9	4.3	82.0
	1	6.0	8.5	3.5	65.6	64.6	4.3	70.8
	2	6.7	9.6	3.8	65.1	62.9	4.0	104.1
Spring	3	9.5	12.9	6.3	64.9	91.7	3.8	160.6
	4	14.0	17.7	10.5	66.7	88.0	3.4	196.0
	5	18.0	21.7	14.7	70.3	103.1	3.0	212.1

MT: mean temperature, HT: high temperature, LT: low temperature, RH: relative humidity, AP: accumulated precipitation, WS: wind speed, SD: sunshine duration.

역에서 ACM에 의해 DMY 피해를 나타내는지 확인할 필요가 있었다. 또한 4월 AP는 88.0 mm로 월동 후 증가하는 강수의 추세가 역전되는 시기로 이듬해 NSD의 효과도 고려해 볼 충분한 근거가 있는 것으로 생각하였다. 요약하자면, 본 연구의 가설은 다음과 같다.

- 첫째, 계절별 이상기후인 ACM, SWC 및 NDS가 남부해안지역에서 뚜렷한가.
 - 둘째, 계절에 따라 정상 및 이상기후 간 IRG의 DMY 차이를 야기하는가.
 - 셋째, 빈도가 낮은 이상기후의 결과가 일반화 가능한가.
- 먼저 ACM, SWC 및 NDS에 대한 정의와 계량화를 위해 판별

분석을 실시하였다(Table 2). 그 결과, 가을에서 집단 2가 집단 1에 비해 빈도가 낮고 AP가 206.77로 높아 이상기후의 특성을 보였지만 판별함수가 명확하지 않았다($p=0.66$). 그러므로 ACM은 명확하게 두드러지지 않는 시나리오로 판단하였다. 반면에 겨울 및 이듬해 봄에서는 각각 판별함수에 의해 두 집단으로 뚜렷하게 구분되었다($p<0.05$). 겨울의 경우, 집단 2가 집단 1에 비해 상대적으로 MT 및 RH가 낮고 WS가 높았다. 봄에는 집단 1의 AP가 집단 2의 AP보다 1.97배가 높은 것이 두드러졌다. 또한 발생 빈도를 고려하면 상대적으로 빈도가 낮은 집단 2를 이상기후로 정의하였다. 이러한 결과는 제주를 대상으로 주성분 분석을 통해 이상기후 시나리오를 연구한 선행연구(Kim and Sung, 2021)의 결과와 크게 다르지 않았다. 또한 남부해안지역인 남원과 영암에 대한 자료의 추가에 의한 기후의 동질성은 거의 변화가 없는 것으로

Table 2. Seasonal climatic scenarios by discriminant analyzing for Italian ryegrass in the southern coastal regions of Korea (Namwon, Jeju and Yeongam)

Climates	Autumn		Winter		Spring	
	Group 1 (n = 162)	Group 2 (n = 41)	Group 1 (n = 184)	Group 2 (n = 19)	Group 1 (n = 115)	Group 2 (n = 88)
MT	18.06	17.57	7.54	6.33	14.27	13.37
HT	19.52	18.91	8.64	7.83	14.95	14.93
LT	17.58	16.33	5.51	6.00	6.00	5.58
RH	70.71	64.10	68.13	62.13	61.79	71.11
AP	92.27	206.77	44.57	78.26	147.35	74.90
WS	3.64	3.10	4.01	4.84	3.64	3.10
SD	181.01	149.71	73.27	101.87	176.60	204.30
Wilks' λ^1 (p-value)	0.66 ($p=0.06$)		0.41 ($p<0.01$)		0.29 ($p<0.01$)	

MT: mean temperature, HT: high temperature, LT: low temperature, RH: relative humidity, AP: accumulated precipitation, WS: wind speed, SD: sunshine duration.

¹Wilks' λ closer to 1 means there is no difference between groups.

로 판단하였다.

이상의 생성된 이상기후 시나리오가 정상기후로부터 명확하게 구분된다고 해서 IRG의 DMY에 유효한 시나리오임을 의미하는 것은 아니었다. 그러므로 SWC 및 NSD가 IRG의 DMY에 미치는 시나리오인지 확인하기 위해 정상 시나리오로부터 DMY 차이를 t-검정을 통해 확인하였다(Table 3). 그 결과, 겨울에서 NCS와 SWC 간 DMY 차이는 뚜렷하지 않은 반면($p=0.61$), 봄의 NCS 및 NSD의 DMY (kg/ha)는 각각 15,394.27 및 12,688.87로 NSD에 의한 IRG의 DMY는 2,705.40 kg/ha 감소하는 것으로 나타났다($p<0.05$). 이는 남부해안지역에서 SWC와 NSD가 각각 겨울과 이듬해 봄 생장기에 발생하는 뚜렷한 이상기후지만 NSD만이 DMY의 차이로 반영되는 치명적인 이상기후임을 의미한다. 일반적으로 IRG의 생육 특성은 다른 동계사료작물인 호밀 및 청보리에 비해 내습성은 강한 반면 내건성 및 내한성이 약한 것으로 알려져 있다(Jang et al., 2011). 비록 IRG의 내한성이 약한 편이지만 남부해안지역에서는 그 특성이 두드러지지 않는 것으로 사료된다. 한편, NSD에 의한 DMY 피해는 2,705 kg/ha로 나타나 IRG의 약한 내건성을 감안하면 피해에 대해 주의가 필요할 것

로 사료된다. 이는 Kim and Sung(2021)이 추정했던 제주지역만 한정했던 NSD의 피해(2,061 kg/ha) 보다 큰 차이였다. 그러나 이러한 차이에 대해 추가된 한반도 내 남부해안지역에 의한 결과로 판단할 근거가 없었다. 오히려 68점의 남부해안지역 자료로부터 NSD는 빈도가 5만 증가하고 나머지 63점은 모두 NCS로 분류되었고, NCS에서 DMY (kg/ha)가 14,749에서 15,394로 증가하였다. 그러므로 NSD 보다 IRG의 성장 및 발육에 유리한 조건의 NCS가 추가됨에 따라 NCS에서 IRG의 DMY가 더 커지게 된 것으로 판단하였다. 이러한 경향은 SWC에서도 나타났다. 이처럼 이상기후의 케이스는 자료가 축적되어도 쉽게 증가하지 않기 때문에 실제 발생빈도에 의존하여 DMY 피해를 추정하기는 쉽지 않았다.

2. 남부해안지역의 기후 시나리오 하에서 IRG의 DMY 비교 시뮬레이션

NCS 및 NSD 하에서 기상변수가 DMY에 미치는 효과를 기반으로 모델링을 수행하였다(Fig. 1). 여기서 모델링을 위한 정규성

Table 3. Yield comparison of Italian ryegrass between normal climate scenario (NCS) and seasonal abnormal climate scenarios in the southern coastal regions of Korea (Namwon, Jeju and Yeongam)

Seasons	Climatic scenarios	N	Dry matter yield (kg/ha)		t (p-value)
			Mean	SE	
Autumn			There was no abnormal scenario.		
Winter	NCS	184	13,243.70	1,697.91	0.69 ($p=0.28$)
	SWC	19	12,144.56	438.82	
Spring	NCS	115	15,394.27	613.40	2.43 ($p<0.05$)
	NSD	88	12,688.87	575.27	

SE: standard error, SWC: severe winter cold, NSD: next spring drought.

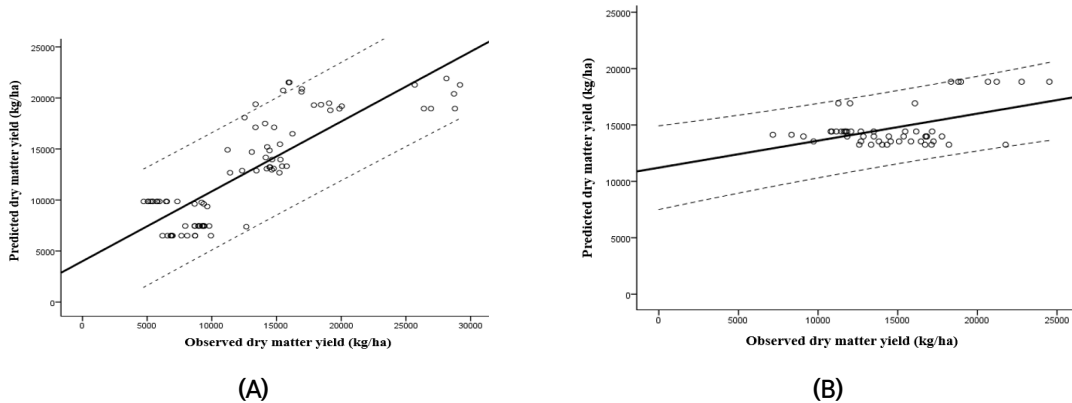


Fig. 1. Scatter plots of observed and expected dry matter yields of Italian ryegrass by yield modeling between normal climate scenario (NCS) and next spring drought (NSD) in the southern coastal regions of Korea (Namwon, Jeju and Yeongam): (A) NCS ($R^2 = 0.68$), (B) NSD ($R^2 = 0.24$).

가정을 확인한 결과, 전체자료에서는 Kolmogorov-Smirnov (KS) 방법에서 정규성을 만족하는 것으로 나타났지만($p=0.07$), Shapiro-Wilk (SW) 방법에서는 만족시키지 못하였다($p<0.05$). 그러나 이상기후가 극단적인 분포를 따르는 것을 감안하여 정상기후만 고려한 결과, 두 가지 방법에서 모두 정규성가정을 만족하는 것을 확인하였다(KS's $p=0.20$, SW's $p=0.46$). 모델링 결과, 효과적인 기상변수는 NCS에서 SD, RH, WS 및 AP가, NDS에서 AP만 각각 선별되었다. 이는 NCS에서는 다양한 기상변수들이 DMY에 영향을 미치는 반면 NSD에서는 AP만 효과적인 것을 의미한다. 또한 NCS에서는 관측 DMY와 기대 DMY가 대각선을 중심으로 위치한 것에 반하여 NSD에서는 덜 기울어진 실선 위에 나타났다. 이는 NSD에서 수량예측모델링에 효과적인 변수가 부족함을 의미한다. 물론 NSD에서 고려한 기상변수의 효과가 통계적으로 유의하지 않음이 DMY에 효과가 없음을 의미하진 않는다. NSD가 이미 온도가 높고 강수량이 부족한 가뭄이 전제된 시나리오이기 때문에 DMY에 가장 중요한 AP만 선별된 것으로 판단하였다.

DMY에 대한 결정력을 반영하는 모형 적합도(R^2)는 NCS 및 NSD에서 각각 0.68 및 0.24로 나타났다. 이는 IRG의 성장 및 발육의 최종 결과인 DMY가 이듬해 봄의 다양한 기상변수에 의해 NCS에서는 68%, NSD 하에서는 단지 강수에 의해 24% 결정되는 것을 의미한다. 추가로 모든 계절의 기상변수를 고려하면 NCS 및 NSD 하에서 R^2 은 0.95 및 0.38로 증가하는 것을 확인하였다. 정리하면, DMY의 전체를 100%로 가정할 때 전체 성장기간의 기후는 95%를, 그 중 봄의 기후는 68% 기여하였다. 이는 기후의 중요도가 대부분을 차지하고 토양 및 재배 관리와 같은 다른 요인의 중요도가 5%에 불과한 것처럼 해석될 여지가 있다. 그러나 본 연구에서 토양물리성은 제한된 지역에 의해 변화가 크지 않은 특성을 고려하면 그 효과가 거의 반영되지 못한 상태임을 감안해야 한다. 또한 각 실험은 역시 단일 기관에서 동일 목적

하에서 적정 재배관리에 의해 수행되므로 기후 외 요인의 영향이 상대적으로 낮게 반영될 수밖에 없음을 감안해야 한다. 한편 남부해안지역의 정상 시나리오 하에서 전체 결정력(0.95) 중 봄의 기상변수의 결정력(0.68)은 71.58% 수준으로 월동 후 성장 및 발육에 양호한 기후라면 IRG의 높은 DMY에 대한 가능성을 확인하였다. Kim et al. (2015)은 남부지역의 논에서 높은 수량과 사료 가치를 확보하기 위해 IRG의 봄파종은 2월말에 가능한 것으로 보고하였다.

한편, NSD의 상대적으로 낮은 R^2 는 재배에 불리한 다양한 요인이 복합적으로 관여하므로 명확한 해석이 쉽지 않다. 왜냐하면 가뭄의 시기, 지속기간 및 강도 등 가뭄 자체의 특성뿐 아니라 가뭄에 대응하는 관수 및 그에 따른 배수 등 재배관리 및 토양 관련 요인의 효과도 매우 중요하기 때문이다(Iglesias et al., 1996; Nielsen et al., 2005). 그러므로 NSD에서 DMY 예측을 위한 변수로 AP를 제외한 MT, HT, LT, RH, WS 및 SD는 연관성이 낮은 것으로 판단하였다. 그럼에도 불구하고 봄 가뭄 하에서 강수의 중요성을 고려하면 AP의 기여도가 38%인 것은 적절한 수준인 것으로 생각하였다. 또한 남부해안지역의 NSD 하에서 전체 계절의 기상변수의 결정력(0.38) 중 봄의 기상변수의 결정력(0.24)은 63.15%로 나타났다. 이는 NCS에서는 다양한 기상변수가 DMY에 복합적으로 영향을 미치지만 NSD에서는 AP에 의해 DMY가 크게 결정되는 것을 의미한다.

NCS 및 NSD 하에서 시뮬레이션에 사용된 기상자료에 포함된 기상변수 MT, RH, WS, AP 및 SD는 Fig. 2와 같은 표본 정보를 기반으로 생성되었다. 여기서 표본 정보는 각 변수의 중심위치 및 산포를 고려하여 추출하였다. 여기서 시뮬레이션은 IRG 자료의 1점이 단일 연도의 재배실험임을 참작하면 50,000번의 재배실험과 같다. 시뮬레이션을 수행한 결과, 예측 DMY에 대한 누적 확률은 Fig. 3과 같았다. 누적 확률의 상승폭과 상승 형태가 바뀌는

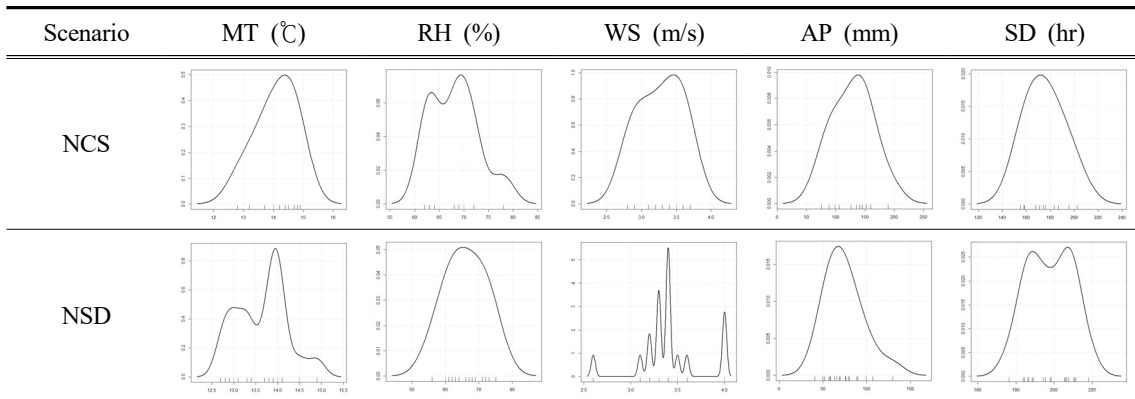


Fig. 2. Distribution of climatic variables to simulate yield comparison between NCS and NSD for Italian ryegrass in the southern coastal regions of Korea (Namwon, Jeju and Yeongam). MT: mean temperature, RH: relative humidity, AP: accumulated precipitation, WS: wind speed, SD: sunshine duration, NCS: normal climate scenario, NSD: next spring drought.

Impact of Seasonal Climatic Events on Italian Ryegrass Yield

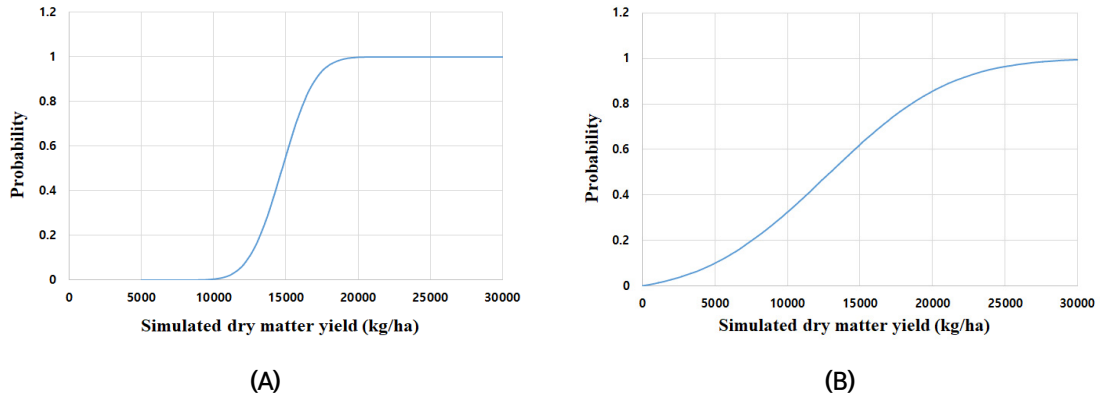


Fig. 3. Cumulative distribution function of predicted dry matter yield of Italian ryegrass under the normal climate scenario (A) and next spring drought (B) in the southern coastal regions of Korea (Namwon, Jeju and Yeongam).

Table 4. Difference in simulated dry matter yield of Italian ryegrass between normal climate scenario (NCS) and next spring drought (NSD) by simulation in the southern coastal regions of Korea (Namwon, Jeju and Yeongam)

Scenarios	Dry matter yield (kg/ha)		t	DF	p-value
	Mean	SE			
NCS	14,743.83	8.15	65.07	57,241.51	<0.01
NSD	12,707.97	30.21			

SE: standard error, DF: degree of freedom.

변곡점을 중심으로 살펴보면, DMY의 상승폭은 NCS에서 NSD 보다 급격한 것으로 나타났다. NCS에서 급격한 상승이 일어나는 구간은 대략 13,000~18,000 kg/ha로, 변곡점은 15,000 kg/ha로 나타났다. 이는 NCS 하에서 안정적이고 균일한 DMY의 확보가 가능한 것을 의미한다. 한편 NSD에서 예측 DMY의 분포는 0~28,000 kg/ha 구간으로 넓고 완만하게 나타났지만, 확률이 급격하게 증가하는 구간은 대략 0~15,000 kg/ha 구간에서 나타났다. 또한 수확 가능성이 가장 높은 변곡점은 13,000 kg/ha이었다. 이는 NSD에서 시뮬레이션에 반영된 기후의 기여도가 AP에만 의존할 뿐 아니라 AP의 분포가 오른쪽으로 기울어져 상대적으로 작은 AP가 많고 큰 AP가 적은 특성이 반영된 결과로 생각하였다. 그러므로 NSD에서 보인 넓은 예측 DMY 구간과 완만한 확률 상승은 가뭄에 의해 재배 실패 가능성부터 관수를 통한 정상 수준의 DMY 수확 가능성까지 다른 요인에 의한 변화를 폭넓게 반영하는 것으로 추측된다.

시뮬레이션을 기반으로 NCS 및 NSD 간 DMY를 비교한 결과 (Table 4), DMY (kg/ha)는 각각 14,743.83 및 12,707.97로 차이는 2,035.86이었다($p < 0.05$). 여기서 예측 DMY 차이는 표본의 DMY 차이보다 작게 예측되었는데, 이는 NSD의 시뮬레이션 단계에서 예측 DMY의 구간이 넓고 확률이 완만하게 증가하는 특성이 반영된 결과였다. 또한 NSD에서 소수의 극단적인 케이스에 의한 왜곡이 시뮬레이션에서는 감쇄된 것으로 생각하였다. Kim

and Sung (2021)은 전국적인 봄 가뭄에 대한 피해를 강조하였고, 특히 2005년 이후 증가하는 NSD에 대해 ‘새로운 정상(new normal)’을 언급하였다. 본 연구에서도 남부해안지역의 NSD의 발생빈도가 다른 이상기후의 발생빈도보다 높고, 제주지역에서 한반도의 남부해안지역이 추가되었음에도 NSD의 특성과 NSD에 의한 DMY 피해는 비슷하였다. 그러나 본 연구의 시뮬레이션이 연도에 따른 변화를 고려한 것은 아니므로 최근 추세를 확인하는 것은 어려웠다. 또한 이듬해 봄의 NCS는 월동 후 IRG의 성장 및 발육에 유리한 온도와 풍부한 강수를 기반으로 정의하였기 때문에 봄에 발생할 수 있는 다른 이상기후를 간과했을 수 있다. 그럼에도 본 연구는 우리나라 남부해안 및 도서지역에서 IRG에 대해 계절별 이상기후에 의한 예측 DMY 피해와 가능성을 통계적 시뮬레이션을 통해 확인한 점에서 의의가 있다. 이러한 시뮬레이션은 보다 치명적이고 발생빈도가 적은 기후시나리오에 더 효과적일 것으로 기대하므로 향후 중부내륙지역 및 강원산간 지역을 대상으로 극단/이상기후 및 기후이벤트 등을 고려한 DMY 비교 시뮬레이션을 수행할 계획이다.

IV. 결론

본 연구는 우리나라의 남부해안지역에서 IRG의 DMY에 영향을 미칠 것으로 예상되는 계절별 기후이벤트(가을장마, 혹한 및 봄 가뭄)와 정상기후 간 수량을 비교하는 시물레이션을 수행하였다. 먼저 계절별 기후이벤트가 정상기후로부터 명확하게 구분되는지를 확인한 결과, 가을장마는 분류되지 않았고 월동기 및 이듬해 봄 성장기에는 혹한 및 가뭄이 각각 뚜렷하게 나타났다. 그러나 혹한의 경우 IRG의 DMY 차이가 혹한과 정상 간에 나타나지 않아 남부해안지역이 혹한은 낮은 빈도로 발생은 하지만 IRG 생존을 위협하거나 수량에 피해를 주는 정도는 아닌 것으로 생각하였다. 한편, 봄 가뭄과 정상 간 DMY의 차이는 2,035 kg/ha로 봄 가뭄 발생에 의한 IRG의 DMY 피해는 2,000 kg/ha 정도로 판단하였다. 여기서 내건성이 약한 IRG는 가뭄에 취약한 편인데, 실제 재배환경에서 가뭄 발생에 따른 관수 효과를 감안하면 본 연구의 피해수치는 과소 추정되었을 가능성이 높다.

V. 요약

본 연구는 우리나라의 남부해안지역에서 가을장마, 혹한 및 봄 가뭄과 같은 계절적 기후시나리오 간 이탈리아 라이그라스(IRG: Italian ryegrass)의 건물수량(DMY: dry matter yield)을 비교하기 위해 수행하였다. 남부해안지역의 IRG 자료(n = 203)는 1993년부터 2013년까지 농촌진흥청이 제주, 남원 및 영암에서 수행한 신품종 지역적응시험 결과보고서로부터 수집되었다. 계절적 기후 시나리오를 정의하기 위해 기상청으로부터 온도, 습도, 바람 등과 같은 기상정보를 사용하였다. 정상과 이상기후 시나리오를 구분하기 위해 5% 유의수준에서 판별분석을 수행하였다. 또한 IRG 수량비교는 표본분포의 정보를 기반으로 통계적 시물레이션을 수행하였다. 그 결과, 남부해안지역에서 봄 가뭄에 의한 DMY 차이만 뚜렷하게 나타났다. 혹한은 정상으로부터 분명하게 구분되었지만, DMY 차이는 나타나지 않았다. 따라서 DMY 비교는 봄 가뭄에 대해서만 시물레이션을 수행하였다. 그 결과, 정상 및 봄 가뭄 하에서 DMY (kg/ha)은 각각 14,743.83 및 12,707.97로 봄 가뭄 발생에 의한 예상피해는 약 2,000 kg/ha로 나타났다. 또한 봄 가뭄 하에서 예측 DMY는 정상시나리오에 비해 넓고 느리게 증가하여 변동성이 큰 것을 확인하였다. 본 연구는 계절별 기후 시나리오를 고려한 통계적 시물레이션을 통해 봄 가뭄에 의한 IRG의 DMY 피해 및 가능성을 확인한 것에 의의가 있다.

VI. 사사

본 논문은 과학기술정보통신부가 지원하는 한국연구재단을 통한 신진연구 프로그램의 지원에 의해 이루어졌습니다(NRF-2020R1C1C1004618).

VII. REFERENCES

- Chen, T.C., Wang, S.Y., Huang, W.R. and Yen, M.C. 2004. Variation of the East Asian summer monsoon rainfall. *Journal of Climate*. 17(4):744-762.
- Chung, C.H. 2007. Vegetation response to climate change on Jeju Island, South Korea, during the last deglaciation based on pollen record. *Geosciences Journal*. 11(2):147-155.
- Hatfield, J.L., Boote, K.J., Kimball, B.A., Ziska, L.H., Izaurralde, R.C., Ort, D., Thomson, A.M. and Wolfe, D. 2011. Climate impacts on agriculture: Implications for crop production. *USDA Agricultural Research Service*. 103(2):351-370.
- Hong, J.H., Kim, S.K., Kim, D.G., Hong, S.C., Lee, J.B., Moon, K.J., Cha, J.S., Hong, J.S., Ma, Y.I., Kim, S.Y., Jung, H.C. and Choi, Y.E. 2014. Korean climate change assessment report 2014. *Korean National Institute of Environment Research*. Incheon. pp. 1-45.
- Iglesias, A., Erda, L. and Rosenzweig, C. 1996. Climate change in Asia: A review of the vulnerability and adaptation of crop production. *Climate Change Vulnerability and Adaptation in Asia and the Pacific, Manila*. pp. 13-27.
- Ishii, Y., Mukhtar, M., Idota, S. and Fukuyama, K. 2005. Rotational grazing system for beef cows on dwarf napiergrass pasture oversown with Italian ryegrass for 2 years after establishment. *Grassland Science*. 51(3):223-234.
- Jang, W.K., Lim, Y.C., Choi, K.J., Kim, K.Y., Ji, H.J. and Kim, J.K. 2011. Manual of new varieties and cultivation utilization for Italian ryegrass. *Rural Development Administration [RDA], Sanggoksa, Cheonan*. pp. 1-305.
- Johnson, R.A. and Wichern, D.W. 2002. *Applied multivariate statistical analysis (Vol. 5, No. 8)*. Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall. pp. 575-670.
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijssman, A.J. and Ritchie, J.T. 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*. 18(3-4):235-265.
- Kim, D.W., Byun, H.R., Choi, K.S. and Oh, S.B. 2011. A spatiotemporal analysis of historical droughts in Korea. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 50(9):1895-1912.

Impact of Seasonal Climatic Events on Italian Ryegrass Yield

- Kim, H.S., Jeon, G.I., Lee, J.J., Lee, Y.S. and Kim, M.H. 2020. Establishing a drought management system with the region and the people. *Water for Future*. 53(12):8-15.
- Kim, K.S., Lee, S.K., Choi, Y.S., Park, D.H., Ji, H.J., Jung, J.S. and Kim, W.H. 2015. Effect of seeding date and varieties of italian ryegrass on forage yield and quality of early spring-seeded at paddy field in southern region. *Journal of the Korean Society of Grassland and Forage Science*. 35(1):50-56.
- Kim, M. and Sung, K. 2019. Comparison of causality of temperature and precipitation on Italian ryegrass (*Lolium Multiflorum* Lam.) yield between cultivation fields via multi-group structural equation model analysis in the Republic of Korea. *Agriculture*. 9(12):254.
- Kim, M. and Sung, K. 2021. Impact of abnormal climate events on the production of Italian ryegrass as a season in Korea. *Journal of Animal Science and Technology*. 63(1):77-90.
- Kim, M., Oh, S.M., Kim, J.Y., Lee, B.H., Peng, J., Kim, S.C., Chemere, B., Nejad, J.G., Kim, K.D., Jo, M.H., Kim, B.W. and Sung, K.I. 2017. Prediction of the Italian ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) yield via climate big data and geographic information system in Republic of Korea. *Journal of the Korean Society of Grassland and Forage Science*. 37(2):145-153.
- Kim, M., Peng, J.L. and Sung, K. 2019. Causality between climatic and soil factors on Italian ryegrass yield in paddy field via climate and soil big data. *Journal of Animal Science and Technology*. 61(6):324-332.
- Kim, M., Sung, K.I. and Kim, Y.J. 2014. Analysis of climate effects on Italian ryegrass yield via structural equation model. *The Korean Journal of Applied Statistics*. 27(7):1187-1196.
- Ko, J.W., Baek, H.J., Kwon, W.T. and Park, J.Y. 2006. The characteristics of spatial distribution of temperature and regionalization in Korea. *Journal of Climate Research*. 1:3-14.
- Kobayashi, H., Takahashi, Y., Matsumoto, K. and Nishiguchi, Y. 2008. Changes in nutritive value of italian ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) during overwintering period. *Plant Production Science*. 11(2):228-231.
- Lee, B.Y., Kim, Y.Y., Kim, D.S. and Kim, K.S. 2020. Korea climate change evaluation report 2020–Influence and adaptation to climate change. Chapter 5. *Agriculture*. Ministry of Environment, Sejong. pp. 149-181. ISBN: 978-89-93652-58-1
- Lee, J.H., Seo, J.W. and Kim, C.J. 2012. Analysis on trends, periodicities and frequencies of Korean drought using drought indices. *Journal of Korea Water Resources Association*. 45:75-89.
- Min, S.K., Son, S.W., Seo, K.H., Kug, J.S., An, S.I., Choi, Y.S., Jeong, J.H., Kim, B.M., Kim, J.W., Kim, Y.H., Lee J.Y. and Lee, M.I. 2015. Changes in weather and climate extremes over Korea and possible causes: A review. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*. 51(2):103-121.
- Mkhabela, M.S., Bullock, P., Raj, S., Wang, S. and Yang, Y. 2011. Crop yield forecasting on the Canadian Prairies using MODIS NDVI data. *Agricultural and Forest Meteorology*. 151(3):385-393.
- Moot, D.J., Scott, W.R., Roy, A.M. and Nicholls, A.C. 2000. Base temperature and thermal time requirements for germination and emergence of temperate pasture species. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 43(1):15-25.
- Morris, T.P., White, I.R. and Crowther, M.J. 2019. Using simulation studies to evaluate statistical methods. *Statistics in Medicine*. 38(11):2074-2102.
- Nielsen, D.C., Unger, P.W. and Miller, P.R. 2005. Efficient water use in dryland cropping systems in the great plains. *Agronomy Journal*. 97(2):364-372.
- Pachauri, R.K., Allen, M.R., Barros, V.R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., ... and Van Ypersele, J.P. 2014. Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Genova. pp. 151.
- Park, H.S., Hwang, K.J., Park, N.G., Choi, G.J., Lee, J.K., Cheon, D.W. and Ko, M.S. 2008. Comparison of forage production and feed value of winter forage crops in Jeju. *Journal of the Korean Society of Grassland and Forage Science*. 28(3):215-220.
- Peng, J., Kim, M., Kim, Y., Jo, M., Kim, B., Sung, K. and Lv, S. 2017. Constructing Italian ryegrass yield prediction model based on climatic data by locations in South Korea. *Grassland Science*. 63(3):184-195.
- Sung, H.J. and Kim, B.M. 2020. Regional characteristics of cold surges over the South Korea. *Atmosphere*. 30(3):249-256.
- Sung, K.I., Nejad, J.G., Song, Y.H., Kim, S.Y., Lee, B.H. and Kim, W.H. 2012. A comparison of feeding whole crop barley mixed with Italian ryegrass silage versus tall fescue hay for Holstein growing cattle. XVI. 508.

(Received : January 21, 2022 | Revised : February 16, 2022 | Accepted : February 17, 2022)