한작지(Korean J. Crop Sci.), 68(4): 276~284(2023)
DOI : https://doi.org/10.7740/kjcs.2023.68.4.276

ISSN 0252-9777(Print)
ISSN 2287-8432(Online)

Original Research Article

질소비료 시비 수준이 벼의 수량 및 수량구성요소에 미치는 영향

김태헌[1,2] · 김석만[1,†]

Effects of Nitrogen Application Levels on Grain Yield and Yield-related Traits of Rice Genetic Resources

Tae-Heon Kim[1,2] and Suk-Man Kim[1,†]

ABSTRACT Nitrogen is a major and essential macronutrient for plant growth and development. However, excessive nitrogen application can lead to ecological pollution or greenhouse gas emissions, consequently resulting in climate change. In this study, we used 153 genetic resources of rice to evaluate the effects of the levels of nitrogen application on grain yield and yield-related traits. Significant differences were noted in the yield and yield-related traits of genetic resources between two nitrogen application levels, namely, 4.5 kg/10a (NN: normal nitrogen condition) and 9.0 kg/10a (LN: low-nitrogen condition). Among the tested traits, days to heading (DTH), clum length (CL), grain yield per plant (GYP), number of panicles per plant (NPP), and number of spikelets per panicle (NSP) decreased by 1.8 to 17.9% when the nitrogen application levels decreased from NN to LN. The 1,000-grain weight (TWG) and percentage of ripened grain (PRG) increased by 2.6 to 11.2% under these conditions. Based on nitrogen application levels, two-way analysis of variance (ANOVA) demonstrated significant differences in GYP, NPP, and PRG but not in NSP and TGW. NPP exhibited negative correlations with NSP (−0.44) and TGW (−0.44), and TGW displayed a negative correlation with PRG (−0.34), whereas, GYP exhibited a positive correlation with PRG (0.37) and NSP (0.38). A similar pattern was recorded under the LN condition. NPP, TGW, and PRG were clustered as PA (principle axis) 1 under the LN condition by factor analysis. NSP and GYP were clustered as PA (principle axis) 2. These results demonstrated NPP and NSP as the primary factors contributing to the decrease in grain yield under LN conditions. In conclusion, we selected eight genetic resources that exhibited higher GYP under both NN and LN conditions with higher NPP or NSP. These genetic resources can be considered valuable breeding materials for the adaptation of plants to nitrogen deficiency.

Keywords : grain yield, nitrogen application levels, rice, yield-related traits

질소는 식물의 생장과 발달에 필요한 주요 대량원소 중 하나이며, 아미노산, 단백질, 핵산, 엽록소 및 식물 호르몬 합성에 필수적이다(Chen & Ma, 2015; Fukushima & Kusano, 2014). 작물 재배 시 토양내 질소가 부족하게 되면 잎이 황화되며 생육이 저조해지고 결과적으로 작물의 수량이 감소하게 된다. 작물재배에 있어서 질소는 작물의 수량성을 확보하기 위한 가장 중요한 요소이며, 지난 50년간 녹색혁명의 발단이 되어 작물생산량 증가에 큰 역할을 하였다(Mulvaney *et al*., 2009; Robertson & Vitousek, 2009; Smil, 2002). 벼는 전 세계 인구의 약 50%가 주식으로 이용하는 세계 3대 작물로 재배 시 많은 양의 질소비료를 요구한다(Van Keulen, 1977). 벼재배는 생육시기에 따라 집중적인 질소비료 투입으로 최대의 수량을 확보하는 것이 특징이며, 특히 가장 최근에 육성된 벼품종은 높은 질소 수준에서 단간, 내도복, 내비성 및 다수성을 목표로 선발되었다(Cho & Koh, 2007; Tong *et al*., 2006; Wei *et al*., 2011). 하지만 이때 투입되는

[1)]경북대학교 생태환경대학 식물자원학과 조교수 (Assistant Professor, Department of Crop Science, College of Ecological and Environmental System, Kyungpook National University, Sangju 37224, Republic of Korea)
[2)]경북대학교 농업과학기술연구소 연구교수 (Research Professor, Institute of Agricultural Science and Technology, Kyungpook National University, Daegu 41566, Republic of Korea)

[†]Corresponding author: Suk-Man Kim; (Phone) +82-54-530-1206; (E-mail) s_kim@knu.ac.kr
<Received 15 November, 2023; Revised 28 November, 2023; Accepted 29 November, 2023>

ⓒ 본 학회지의 저작권은 한국작물학회지에 있으며, 이의 무단전재나 복제를 금합니다.
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.

질소비료는 30~40% 만이 벼가 이용하고 50% 이상이 미생물이 이용하거나 용탈로 인해 유실되는 것으로 추정된다(Cho & Koh, 2007; Hirel *et al*., 2007; Lee *et al*., 2008). 따라서 과도한 질소비료의 시용은 질소이용효율(NUE: nitrogen use efficiency)을 감소시켜 수량의 증가에 도움이 되지 않으며(Huang & Tang, 2010; Tilman *et al*., 2011; Zhang *et al*., 2016), 작물 생산비의 증가뿐만 아니라 수질오염과 온난화가스(GHG: greenhouse gas)인 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O)의 발생으로 환경에 부정적 영향을 미친다(Barton & Colmer, 2006; Fischer *et al*., 2010; Gheysari *et al*., 2009; Schimel, 2000; Smith, 2010). 특히 기후변화 대응이란 전 세계적 아젠다에 동참하는 차원에서 탄소저감 농업의 필요성이 부각되고 있으며, 이런 이유로 질소질 비료의 정량 사용을 넘어서 절감시비를 위한 연구의 필요성까지 요구되는 실정이다(Kim *et al*., 2019; Rogelj *et al*., 2021; Xuejun & Fusuo, 2011). 그러나 질소성분의 갑작스러운 제한은 벼의 기본영양 생장단계를 비롯한 생육 전반에 크고 작은 영향을 미쳐 급격한 생산량의 감소로 이어지게 되는 문제를 야기하게 된다. 질소질 성분 부족은 가장 먼저 엽색변화로 나타나며 이는 광합성 대사와 효율 그리고 대사산물의 전류 등과 같은 매우 복잡한 생리작용과 연결되어 있어 관련 주요 형질을 특정하는 것부터 쉬운 일이 아니다. 따라서 본 연구에서는 다양한 생태형의 벼 유전자원을 이용하여 질소 시비량을 표준시비 기준 50% 감소시킨 조건에서 주요농업형질, 수량 및 수량구성요소를 측정하고 이들의 변화가 수량감소에 어떤 관계를 가지는가에 대한 분석결과를 기술하였다. 더불어 본 연구의 주요 결과인 질소 저감시에도 수량을 안정적으로 확보할 수 있을 것으로 생각되는 유전자원들을 제안하였고, 이들의 유전분석을 통한 특성 개량 및 수량성 증진을 위한 기본 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

재료 및 방법

공시재료

본 연구에서는 질소비료 감비시 엽록소 함량 및 포장특성 변화를 분석하기 위해 벼 유전자원 153점을 식물재료로 이용하였다. 이 집단은 자포니카형 75점, 인디카형 42점, 통일형 24점, 그 외 12점(재래벼 4점, 향미 1점, 잡초벼 1점, 미분류 5점)으로 구성되었다.

시비방법

시험재료는 경북대학교 농업생명대학 부속실험실습포장(경상북도 군위군 효령면)에서 2022년 5월 6일 파종하여 6월 1일에 재식거리 30×15 cm, 주당 1본씩 보비구(NN: normal nitrogen level), 감비구(LN: low nitrogen level)로 나누어 3반복씩 각각 이앙하였다. 질소시비량은 NN은 9.0 kg/10a, LN은 4.5 kg/10a로 하였으며 나머지 인산과, 칼륨은 4.5 kg/10a, 5.7 kg/10a로 동일하였다. 질소는 기비:분얼비:수비를 50:20:30으로 분시하였고, 인산은 전량 기비에, 칼륨은 기비:수비를 70:30 비율로 분시하였다. 기타 재배 관리는 농촌진흥청 표준 재배법(RDA, 2012)에 준하여 실시하였다.

수량 및 수량관련형질 조사

공시된 유전자원에 대한 수량관련 형질로 천립중(TGW: 1,000-grain weight), 수당립수(NSP: number of spikelets per panicle), 등숙율(PRG: percentage of ripened grains) 및 개체수량(GYP: grain yield per plant)을 조사하였다. 성숙기에 질소비료 처리구별로 반복당 3개체를 수확하였으며, TGW는 등숙립 200개의 무게를 3반복으로 측정하여 평균한 값을 천립중으로 환산하여 이용하였다. NSP는 등숙립 200개의 평균 무게에 대한 총 등숙립 무게의 비율을 계산하여 총 등숙립 수를 구한 후 비등숙립 개수와 더하여 조사하였다. PRG는 전체 종자 개수에 대한 등숙립의 백분율로 나타내었다. 유전자원의 GYP는 반복당 3개체씩 총 9회 반복 측정한 종자 무게를 평균하였다. 모든 수량관련 형질 조사는 농업과학기술 연구조사분석기준(RDA, 2012)에 준하여 수행하였다.

주요 농업형질 및 엽색도 조사

시험재료의 주요 농업형질인 출수일수(DTH: days to heading)는 파종일로부터 출수기까지의 일수로 나타내었고, 간장(CL: clum length), 수장(PL: panicle length), 수수(NPP: number of panicles per plant)는 시험구별로 반복당 3개체를 농업과학기술 연구조사 분석 기준에 따라 조사하였다(RDA, 2012). 엽색도는 SPAD-502 plus (Konica Minolta, Japan)를 이용하여 SPAD 값으로 나타냈다. 출수시 14일 후 주간의 지엽 중간 부분을 측정하였고 NN과 LN에서 반복 당 5개체씩, 총 15개체를 시험구별로 각각 조사하였다.

통계 분석

통계 분석은 R (Version 4.2.2, The R Foundation for Statistical Computing Platform)을 이용하였다. *t*-test, correlation, regression, ANOVA test, Scheffe test, factor anlysis 등의 통계분석 방법이 핵심 집단내 및 처리구간 평균 및 분산 등의 조사 통계량을 비교하는데 이용되었다. 통계분석 중 correlation, regression, ANOVA test, Scheffe test, 3D scatter plot 및

Table 1. Major agronomic traits, grain yield, and yield-related traits in the rice core set under different nitrogen application levels.

Trait	Nitrogen levels	Range	Mean±SD	Skew	Kurtosis
DTH (day)	NN	72.7-132.0	97.4±11.5***	0.59	-0.10
	LN	72.0-131.0	95.7±11.0	0.55	-0.09
CL (cm)	NN	67.4-166.7	95.67±23.3***	1.10	0.25
	LN	64.8-154.9	89.4±20.9	1.22	0.58
PL (cm)	NN	16.8-33.0	23.6±3.0***	0.29	0.04
	LN	15.1-30.3	22.8±2.9	0.23	-0.38
NPP	NN	5.6-20.9	12.8±2.7***	0.10	0.41
	LN	4.6-20.2	10.7±2.4	0.36	1.38
NSP	NN	60.6-262.9	133.4±33.6***	1.12	2.55
	LN	68.2-260.4	129.0±30.9	1.34	3.71
TGW (g)	NN	13.7-53.6	26.7±4.8***	2.06	7.52
	LN	13.4-58.8	27.4±5.0	2.45	11.13
PRG (%)	NN	5.5-94.7	72.0±13.1***	-1.31	3.83
	LN	6.1-94.8	80.1±10.7	-2.66	13.55
GYP (g/plant)	NN	19.8-59.2	35.9±7.5***	0.4	0.29
	LN	15.0-44.1	29.4±5.5	-0.01	0.44
SPAD	NN	30.5-55.8	41.6±5.2***	0.37	-0.05
	LN	27.5-52.3	38.7±4.8	0.21	-0.09

NN: normal nitrogen level, LN: low nitrogen level, DTH: days to heading, CL: culm length, PL: panicle length, NPP: number of panicles per plant, NSP: number of spikelets per panicle, TGW: 1,000-grain weight, PRG: percentage of ripened grains, GYP: grain yield per plant, SPAD: soil plant analysis development. *** means significantly different at $p < 0.001$ by *t*-test. In mean ± SD, SD represents the standard deviation of the mean value for each trait in the rice core set.

factor analysis 분석을 위해 corrplot, agricolae, ggplot2, ggpubr, scatterplot3d, psych 및 GPArotation의 R 패키지를 각각 이용하였다.

결과 및 고찰

질소시비 수준에 따른 수량 및 수량구성요소 분석

공시된 유전자원의 질소시비 수준에 따른 GYP는 NN에서 평균 35.9±7.5와 19.8~59.2의 범위를 나타내었으며 LN에서는 평균 29.4±5.5, 범위는 15.0~44.1을 나타내었다(Table 1). 유전자원의 GYP는 LN조건이 NN조건에 비해 17.9% 감소하였으며(Fig. 1) 질소비료 감비시 수량성이 줄어든다고 보고한 연구결과들과 동일하였다(Kim *et al*., 2012; Lin *et al*., 2009; Manzoor *et al*., 2006; Zhou *et al*., 2019). 수량구성요소인 수수와 수당립수는 NN 조건에서 평균 12.8±2.7, 133.4±33.6 그리고 범위는 5.6~20.9, 60.6~262.9를 각각 나타내었다. LN 조건에서는 10.7±2.4, 129.0±30.9의 평균과

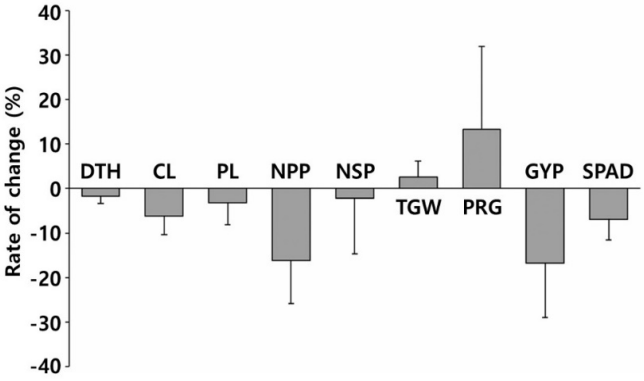

Fig. 1. Rate of change for nine evaluated traits under low nitrogen application level. DTH: days to heading, CL: culm length, PL: panicle length, NPP: number of panicles per plant, NSP: number of spikelets per panicle, TGW: 1,000-grain weight, PRG: percentage of ripened grains, GYP: grain yield per plant, SPAD: soil plant analysis development. Error bars represent the standard deviation (SD) among the rice genetic resources.

Table 2. Analysis of variance for major agronomic traits, grain yield, and yield-related traits.

Analysis of variance	*F*-value								
	DTH	CL	PL	NPP	NSP	TGW	PRG	GYP	SPAD
Nitrogen application levels (N)	1.84^{ns}	9.31^{**}	8.95^{**}	63.02^{***}	1.45^{ns}	1.53^{ns}	38.31^{***}	89.77^{***}	30.81^{***}
Ecotype (E)	4.69^{**}	53.96^{***}	65.47^{***}	18.22^{***}	4.80^{**}	5.43^{**}	11.37^{***}	22.25^{***}	17.41^{***}
N×E	0.04^{ns}	0.13^{ns}	0.24^{ns}	0.18^{ns}	0.45^{ns}	0.07^{ns}	1.86^{ns}	1.55^{ns}	1.28^{ns}

***, **, and ^{ns} mean significantly different at $p < 0.001$, $p < 0.01$, and not significant by two-way ANOVA test, respectively. DTH: days to heading, CL: culm length, PL: panicle length, NPP: number of panicles per plant, NSP: number of spikelets per panicle, TGW: 1,000-grain weight, PRG: percentage of ripened grains, GYP: grain yield per plant, SPAD: soil plant analysis development.

4.6~20.2, 68.2~260.4의 범위를 각각 나타내었다. 수수와 수당립수는 LN 조건에서 16.6%와 3.3%가 감소하였다. 이와는 반대로 TGW와 PRG는 NN조건에서 평균 26.7±4.8 g, 72.0±13.1%였고, LN조건에서는 27.4±5.0 g, 80.1±10.7 %로 나타나 2.6%, 11.2%가 각각 증가하였다. PRG가 LN조건에서 증가한 결과는 Choi *et al*. (2022)이 연차별 실험결과에서 질소시비량이 감소함에 따라 PRG는 증가하였다고 보고한 결과와 유사하였다. 그리고 질소 시비량의 증가에 따라 종자의 등숙이 억제되어 수량과 품질을 저하시킨다고 보고되었다(Zhao *et al*., 2022). 특히 NPP는 LN 조건에서 17.9%로 가장 높은 감소량을 보인 수량구성요소이며 이로 인해 질소비료 감비시 수량성이 감소된 주된 요인으로 판단되며 질소비료 시비량에 따른 수량 및 수량구성요소에 대한 연구결과들과 동일한 양상을 나타내었다(Choi *et al*., 2022; Manzoor *et al*., 2006; Zhou *et al*., 2019). 주요농업형질인 DTH, CL, PL은 NN 조건에서 평균이 각각 97.4±11.5, 95.67±23.3 cm, 23.6±3.0 cm, LN 조건에서는 평균이 각각 95.7±11.0, 89.4±20.9 cm, 22.8±2.9 cm로 1.8~6.6% 감소하였다.

공시된 유전자원의 질소시비 수준에 따른 SPAD 값은 NN에서 평균 41.6±5.2와 30.5~55.8의 범위를 나타내었으며, LN에서는 평균 38.7±4.8, 범위는 27.5~52.3을 나타내었다(Table 1). 유전자원의 SPAD 값은 LN이 NN에 비해 7.0% 수준으로 유의하게 감소함으로써(Fig. 1), 질소 감비시 SPAD값이 유전자원 전반에서 낮아졌음을 확인하였다. 엽색이 옅어지는 변화는 질소감비 시 포장에서 관찰되는 가장 일반적인 표현형적 변화로 광합성효율 저하와 관계 있는 것으로 알려져 있다(Evans, 1989; Field & Mooney, 1986; Reich *et al*., 1999). 일반적으로 식물체 잎의 질소 함량이 증가할수록 광합성 능력은 증가하는 것으로 보고 되었으며(Evans, 1989; Field & Mooney, 1986; Reich *et al*., 1999), SPAD 값이 증가할수록 잎의 질소 함량도 같이 높아지는 것으로 알려져 있다(Wang *et al*., 2014). 특히 벼에서 SPAD 값이 증가함에 따라 광합성 능력과 관련된 Rubisco 효소의 함량, gross photosynthetic rate, maximum quantum yield of PSII (Fv/Fm) 모두 증가하는 것으로 보고되었다(Huang & Peng, 2004; Kato *et al*., 2004; Kumagai *et al*., 2009). 따라서 질소비료 감비시 SPAD값의 감소는 수량구성요소의 감소와 더불어 수량성을 낮추는 원인으로 판단된다. 한편 조사된 모든 형질들은 질소비료 시비 수준의 감소에 따른 변이의 폭이 벼 생태형간에 차이를 나타내었다(data not shown).

질소시비 수준과 벼 생태형에 따른 수량 및 수량구성요소 변화

질소시비 수준과 벼 생태형에 따른 수량 및 수량구성요소의 변이에 대한 유의성을 검정하였다. GYP와 수량구성요소 중 NPP와 PRG만 질소시비 수준에 따라 유의한 차이를 나타내었고, NSP와 TGW는 유의한 차이가 없었다(Table 2). 이 결과로NPP와 PRG는 질소시비 수준에 따라 변이의 수준이 크게 나타나는 형질이며 NSP와 TGW는 상대적으로 변이가 크게 나타나지 않는 형질로 이해된다. 공시된 벼 유전자원은 인디카형, 자포니카형, 통일형 및 그외 생태형으로 이루어져 있으며 조사된 모든 형질에서 변이의 폭이 크게 나타났으며 이에 따라 생태형에 의해 수량 및 수량구성요소에서 유의한 차이가 나타났다. 나머지 조사된 형질중에서 DTH를 제외한 CL, PL 및 SPAD은 질소시비 수준과 생태형에 따라서 유의한 차이를 나타내었다.

수량 및 수량구성요소 간의 상관관계와 수량감소 요인 분석

NN과 LN 조건에서 유전자원의 수량 및 수량구성요소간 상관관계를 분석하였다. 두 질소비료 처리구 모두에서 GYP는 NSP (NN: 0.38, LN: 0.48)와 PRG (NN: 0.37, LN: 0.34) 간에 양의 상관관계를 나타내었다(Fig. 2). 이 결과는 수량

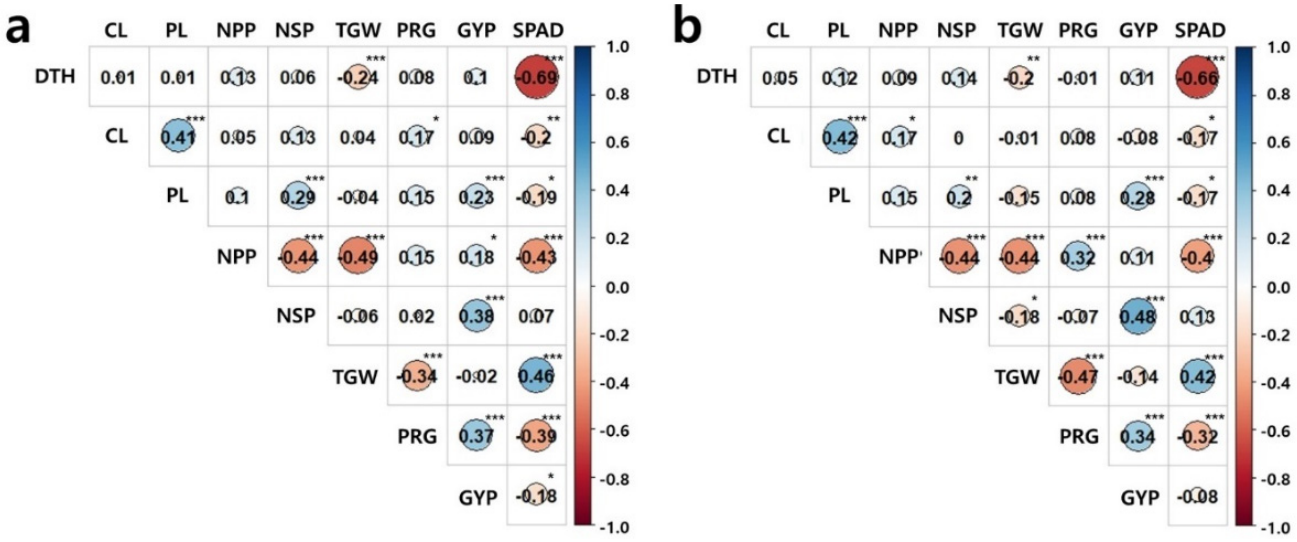

Fig. 2. Correlation coefficiency among nine traits in the rice core set. Normal nitrogen level (a) and low nitrogen level (b). DTH: days to heading, CL: culm length, PL: panicle length, NPP: number of panicles per plant, NSP: number of spikelets per panicle, TGW: 1,000-grain weight, PRG: percentage of ripened grains, GYP: grain yield per plant, SPAD: soil plant analysis development. ***, **, and * mean significantly different at $p < 0.001$, $p < 0.01$, $p < 0.05$, respectively.

Table 3. Factor analysis with orthogonal rotation of nine evaluated traits in the rice core set.

Trait	NN				LN			
	PA1	PA4	PA2	PA3	PA1	PA2	PA4	PA3
DTH	0.94	-0.03	0.09	-0.03	-0.04	0.12	0.94	0.02
CL	0.05	-0.02	-0.02	0.87	0.00	-0.15	0.04	0.87
PL	0.03	0.23	0.09	0.79	0.11	0.29	0.08	0.80
NPP	0.19	0.27	-0.81	0.09	0.71	-0.41	0.14	0.21
NSP	0.08	0.38	0.80	0.16	-0.17	0.91	0.07	0.05
TGW	-0.42	-0.44	0.42	0.10	-0.71	-0.16	-0.29	0.01
PRG	0.12	0.71	-0.20	0.12	0.82	0.12	-0.04	0.00
GYP	0.02	0.80	0.22	0.11	0.39	0.74	-0.02	0.06
SPAD	-0.84	-0.24	0.28	-0.20	-0.40	0.13	-0.82	-0.14
Proportion explained	0.28	0.25	0.25	0.22	0.30	0.25	0.24	0.21
Cumulative proportion	0.28	0.53	0.78	1.00	0.30	0.54	0.79	1.00

NN: normal nitrogen level (9 kg/10a), LN: low nitrogen level (4.5 kg/10a), DTH: days to heading, CL: culm length, PL: panicle length, NPP: number of panicles per plant, NSP: number of spikelets per panicle, TGW: 1,000-grain weight, PRG: percentage of ripened grains, GYP: grain yield per plant, SPAD: soil plant analysis development.

구성요소인 NSP와 PRG가 증가함에 따라 수량을 증가시키는 것으로 이해된다. 한편 수량구성요소인 NPP와 TGW는 NN과 LN 모두에서 GYP와는 상관이 없는 것으로 나타났다. Park *et al*. (2009)은 질소비료 시비량이 9 kg/10a와 6 kg/10a인 두 조건에서 모두 수량과 NPP간에 상관관계가 없다고 보고하였으나, Choi *et al*. (2022)은 수량과 NPP는 유의한 상관관계가 있다고 보고하였다. 본 실험결과 및 보고된 결과가 서로 차이가 나는 원인은 공시된 품종 또는 유전자원의 차이와 연차간 변이 등에 의해 나타나는 것으로 판단된다. 수량구성요소간에는 NN과 LN조건 모두에서 NPP가 NSP (NN: -0.44, LN: -0.44), TGW (NN: -0.49, LN: -0.44)와 음의 상관관계를 보였고 TGW는 PRG (NN: -0.34, LN: -0.47)와 음의 상관관계를 나타냈다(Fig. 2). 이와는 반대로 LN 조건에서만 NPP와 PRG (0.32)가 양의 상관관계

를 나타냈다. Choi *et al*. (2022)은 NPP가 NSP 및 TGW와 음의 상관관계를, Park *et al*. (2009)은 NPP와 PRG가 양의 상관관계를 나타내었다고 보고하여 본 연구결과와 유사한 경향을 보였다. 이 결과를 바탕으로 질소비료 감비시 NPP의 감소는 NSP와 TGW를 증가시키며, 이로 인해 PRG는 감소하는 것으로 판단된다.

SPAD 값은 수량구성요소인 TGW와 양의 상관관계를 보였고 NPP, PRG와는 음의 상관관계를 나타내었다(Fig. 2). 따라서 SPAD 값이 수량구성요소를 예측할 수 있는 지표로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

질소비료 감비시 수량 감소의 요인을 확인하기 위해 NN과 LN 조건의 수량, 수량구성요소 및 주요농업형질인 9개 형질에 대한 요인분석을 실시하였다. 요인분석은 주성분분석법(principle componens analysis)을 사용하여 직교회전(varimax)을 수행하였고 scree test로 총 4개의 PA (principal axis)를 추출하였다. NN 조건에서 PA1은 DTH와 SPAD 가 높은 요인부하량을 보였으며, PA4는 PRG, GYP가 PA2는 NPP, NSP가 높은 요인부하량을 나타내었다(Table 3). 수량 및 수량구성요소간의 관계를 확인하면 PA4는 PRG의 증가가 GYP를 증가시켰으며 PA2 에서는 NPP의 감소가 NSP를 증가시키는 것으로 나타났다. PA1, PA4 및 PA2는 전체 변이의 78%를 설명할 수 있었다. LN 조건에서 PA1은 NPP, TGW, PRG 가 높은 요인부하량을 보였고 NPP의 감소는 TGW를 증가시키고 PRG는 감소시키는 것으로 나타났다. PA2에서는 NSP와 GYP가 높은 요인부하량을 보였으며 NSP의 증가가 GYP를 증가시켰다. PA4에서는 DTH와 SPAD가 음의 관계를 나타내었으며 PA1, PA2 및 PA4는 총 79%의 변이를 설명하였다.

질소시비 수준에 따른 수량 및 수량구성요소의 변이와 이를 통한 통계분석을 통해 질소비료 50% 감비 조건일때 NPP와 NSP의 감소가 수량을 감소시키는 가장 큰 원인이며 이들의 증가를 통해 수량성을 유지할 수 있을것으로 판단된다.

질소비료 감비 조건 적응 유전자원 선발

질소비료 감비 조건에 적응하는 유전자원을 선발하기 위해 질소비료 감비시 감소율이 가장 높아 수량 감소의 가장 큰 요인이 되는 NPP에 대해 벼 생태형별로 NN과 LN 조건을 비교하였다. NN과 LN 모두에서 인디카형이 가장 많은 NSP를 나타내었고 감소율 또한 가장 낮았다(Fig. 3). 벼 생태형 중 인디카형은 자포니카형에 비해 질산태 및 암모늄태 질소를 더 많이 흡수한다고 알려져 있다(Ta & Ohira, 1981). 따라서 LN 조건에서 인디카형 중에 수량 감소의 가장 큰 요인인 NPP또는 NSP가 높고 감소율이 낮게 나타난 유전자원을 선발하였다. NPP와 NSP의 각 기준에 의해 선발된 총 8개 유전자원의 GYP는 NN과 LN조건 모두에서 전체 유전자원의 상위 20%에 해당하였다(Fig. 4). NPP가 높은 수수형에는 CHIEM CHANK, DHARIAL, SPIN MERE 및 YANG-SHA-TSAN이, NSP가 높은 수중형에는 CIHERANG, HSIANG-HA-TSAN, 93-11 및 Tequing이 포함되었다(Table 4). NPP와 NSP는 서로 음의 상관관계(Fig. 2)를 나타내므로 두 수량구성요소 모두를 증가시키는 것은 어려울 것으

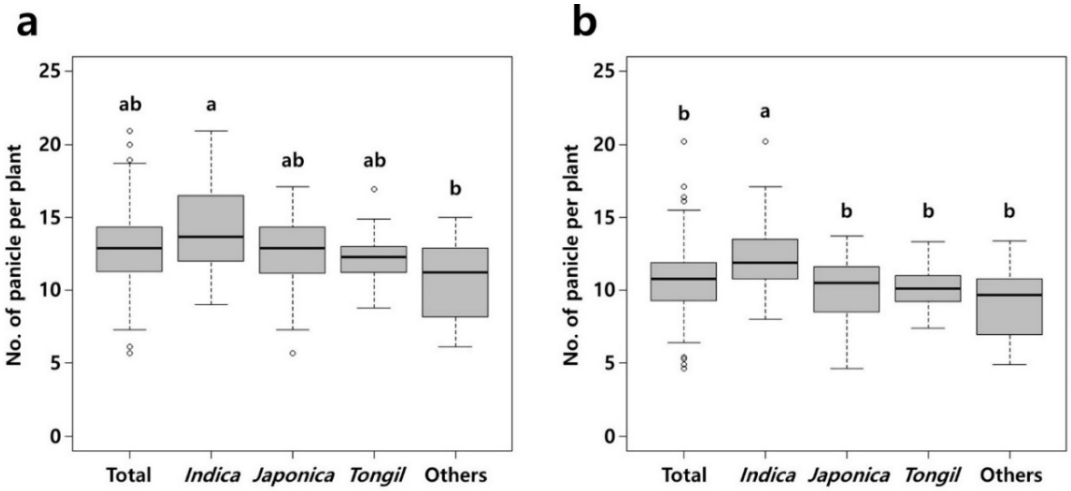

Fig. 3. Number of panicles per plant (NPP) by ecotype in the rice core set under two nitrogen application levels. Normal nitrogen level (9 kg/10a) (a) and low nitrogen level (4.5 kg/10a) (b). Letters refer to one-way ANOVA tests ($p < 0.01$, Scheffe test).

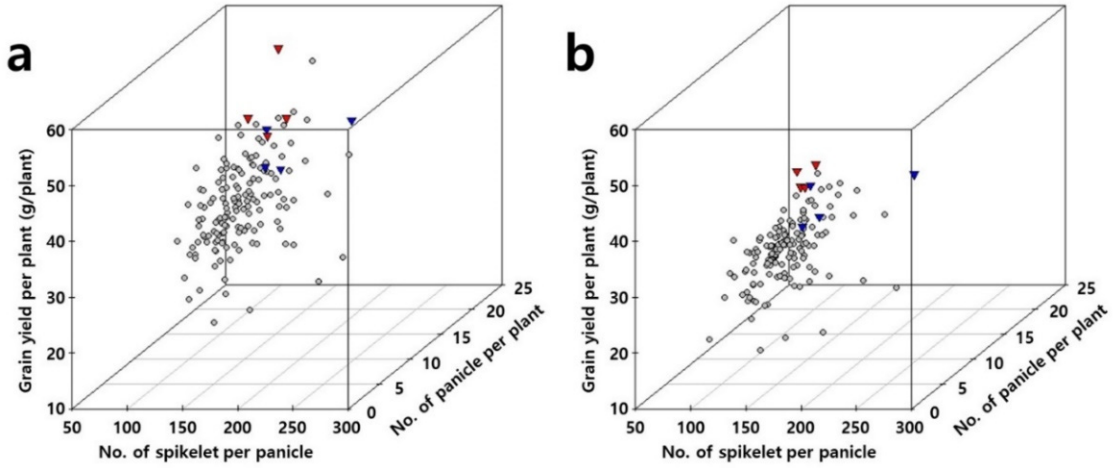

Fig. 4. Three-dimensional scatter plots of grain yield and two yield-related traits, that is, the number of spikelets per panicle (NSP) and number of panicles per plant (NPP) in the rice core set. Red triangles represent the selected genetic resources with higher NPP. Blue triangles represent the selected genetic resources with higher NSP.

Table 4. Selected eight genetic resources in indica ecotype with higher number of panicles per plant (NPP) and number of spikelets per panicle (NSP).

GR	Ecotype	Nitrogen application level	NPP	NSP	GYP	Type
CHIEM CHANK	Indica	NN	18.9^{ns}	121.6*	42.1^{ns}	HP
		LN	17.1	101.1	37.4	
DHARIAL	Indica	NN	17.3**	140.3*	59.2***	
		LN	14.0	121.6	37.3	
SPIN MERE	Indica	NN	20.9^{ns}	92.8^{ns}	43.5*	
		LN	20.2	91.4	31.7	
YANG-SHA-TSAN	Indica	NN	18.3**	142.1^{ns}	45.8^{ns}	
		LN	15.0	129.9	40.4	
CIHERANG	Indica	NN	13.7**	150.0*	47.9***	HS
		LN	11.7	135.9	32.2	
HSIANG-HA-TSAN	Indica	NN	12.0^{ns}	158.2^{ns}	42.6**	
		LN	11.7	151.3	34.0	
93-11	Indica	NN	12.7^{ns}	168.2*	41.6^{ns}	
		LN	11.4	145.1	39.9	
Tequing	Indica	NN	9.0^{ns}	252.8^{ns}	53.7**	
		LN	8.9	252.9	44.1	

NN: normal nitrogen level (9 kg/10a), LN: low nitrogen level (4.5 kg/10a), GR: genetic resource, NPP: number of panicles per plant, NSP: number of spikelets per panicle, GYP: grain yield per plant, HP: selected genetic resources in indica ecotype with higher NPP, HS: selected genetic resources in indica ecotype with higher NSP. ***, **, *, and ns mean significantly different at $p < 0.001$, $p < 0.01$, $p < 0.05$, and not significant by t-test, respectively.

로 판단된다. 따라서 수수형 또는 수중형인 질소비료 감비 적응 품종 육성을 통해 수량성을 유지시킬 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 선발된 8개 유전자원들은 질소비료 감비 시 공시된 유전자원 중에서 수량성이 높게 나타난 자원으로 관련 특성 개량 및 유전자탐색을 위한 육종소재로서 이용될 수 있을 것이다.

적 요

질소비료 감비시 수량 감소의 요인과 관련 특성 개량 및 유전자탐색을 위한 유전자원을 제시하기 위해 153개 벼유전자원에 대한 수량 및 수량구성요소의 변이를 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 공시된 유전자원은 질소비료 시비 수준이 9 kg/10a에서 4.5 kg/10a로 감소하였을 때 수량, 수량구성요소 및 주요 농업형질은 유의한 차이를 나타내었으며, 이중 DTH, CL, PL, GYP, NPP 및 NSP는 1.8~17.9% 감소하였고 나머지 TGW, PRG는 2.6~11.2% 증가하였다.
2. 이원분산분석결과 GYP 및 수량구성요소인 NPP, PRG는 질소비료 시비 수준에 따른 유의성을 보였으나 수량구성요소인 NSP와 TGW는 유의성이 없었다.
3. NN조건에서 NPP는 NSP (-0.44), TGW (-0.49)와 음의 상관관계를 보였고 TGW는 PRG (-0.34)와 음의 상관관계를 나타내었다. 이와는 반대로 GYP는 PRG (0.37)와 NSP (0.38)간에 양의 상관관계를 나타내었다. LN조건에서도 유사한 양상을 나타내었으나 NPP와 PRG (0.32)간에 양의 상관관계가 추가되었다.
4. 질소비료 감비시 수량 감소의 요인을 분석한 결과 LN조건에서 PA1은 NPP, TGW, PRG 가 높은 요인부하량을 보였는데 NPP의 감소는 TGW를 증가시키고 PRG는 감소시켰다. PA2에서는 NSP와 GYP가 높은 요인부하량을 보였고, NSP의 증가가 GYP를 증가시켰다.
5. 질소비료 감비시 NPP가 가장 높고 감소율은 가장 낮은 인디카형 중에서 NPP 또는 NSP가 높은 CHIEM CHANK 외 7개 유전자원을 선발하였다.
6. 이 결과를 바탕으로 질소비료 감비시 수량이 감소하는 가장 큰 요인은 NPP와 NSP의 감소였는데 그 결과 수수형 또는 수중형인 질소비료 감비 적응 품종 육성을 통해 수량성을 유지시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한 선발된 CHIEM CHANK 외 7개 유전자원들은 질소비료 감비 적응 관련 특성 개량 및 유전자탐색을 위한 육종소재로서 이용될 수 있을 것이다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(과제번호: RS-2022-RD 010269)의 지원에 의해 이루어진 것입니다.

인용문헌(REFERENCES)

Barton, L. and T. D. Colmer. 2006. Irrigation and fertiliser strategies for minimising nitrogen leaching from turfgrass. Agric. Water Manag. 80(1-3) : 160-175.

Chen, Z. C. and J. F. Ma. 2015. Improving Nitrogen Use Efficiency in Rice through Enhancing Root Nitrate Uptake Mediated by a Nitrate Transporter, NRT1.1B. Journal of Genetics and Genomics. 42(9) : 463-465.

Cho, Y. I. and H. J. Koh. 2007. Physiological nitrogen use efficiency and agronomic characters of breeding lines in rice. Korean J. Breed. Sci. 39(1) : 33-38.

Choi, J. S., J. Lee, S . Kang, D. W. Lee, W. Yang, S. K. Lee, S. H. Sin, and M. T. Kim. 2022. Response of yield and quality in major domestic rice (*Oryza sativa* L.) varieties according to the nitrogen application levels. Korean J. Crop Sci. 67(4) : 342-361.

Evans, J. R. 1989. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C3 plants. Oecologia. 78(1) : 9-19.

Field, C. and H. A. Mooney. 1986. The photosynthesis－nitrogen relationship in wild plants. In: T Givnish, ed. On the economy of plant form and function. New York, NY, USA: Cambridge University Press. pp. 25-55.

Fischer, G., W. Winiwarter, T. Ermolieva, G. Y. Cao, H. Qui, Z . Klimont, D. Wiberg, and F. Wagner. 2010. Integrated modeling framework for assessment and mitigation of nitrogen pollution from agriculture: Concept and case study for China. Agriculture, Ecosystems and Environment. 136(1-2) : 116-124.

Fukushima, A. and M. Kusano. 2014. A network perspective on nitrogen metabolism from model to crop plants using integrated ‘omics’ approaches. Journal of Experimental Botany. 65(19) : 5619-5630.

Gheysari, M., S. M. Mirlatifi, M. Homaee, M. E. Asadi, and G. Hoogenboom. 2009. Nitrate leaching in a silage maize field under different irrigation and nitrogen fertilizer rates. Agric. Water Manag. 96(6) : 946-954.

Hirel, B., J. Le Gouis, B. Ney, A. Gallais. 2007. The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches. Journal of Experimental Botany. 58(9) : 2369-2387.

Huang, J. and S. Peng. 2004. Comparison and standardization among chlorophyll meters in their readings on rice leaves. Plant Production Science. 7(1) : 97-100.

Huang, Y. and Y. H. Tang. 2010. An estimate of greenhouse gas (N_2O and CO_2) mitigation potential under various scenarios of nitrogen use efficiency in Chinese croplands. Global Change Biol. 16(11) : 2958-2970.

Kato, M., K. Kobayashi, E. Ogiso, and M. Yokoo. 2004. Photosynthesis and dry-matter production during ripening stage in a female-sterile line of rice. Plant Production Science. 7(2) :

184-188.

Kim, G. W., J. Gutierrez-Suson, and P. J. Kim. 2019. Optimum N rate for grain yield coincides with minimum greenhouse gas intensity in flooded rice fields. Field Crops Research. 237 : 23-31.

Kim, Y. D., M. K. Choi, K. D. Lee, M. G. Baek, B. I. Ku, S. G. Kang, H. K. Park, and B. K. Kim. 2012. Growth and yield of rice in levels of nitrogen and water management of reclaimed saline soil in southwestern area. Korean J. Crop Sci. 57(3) : 203-208.

Kumagai, E., A. Araki, and F. Kubota. 2009. Correlation of chlorophyll meter readings with gas exchange and chlorophyll fluorescence in flag leaves of rice (*Oryza sativa* L.) plants. Plant Production Science. 12(1) : 50-53.

Lee, C. H., U. G. Kang, K. D. Park, D. K. Lee, and P. J. Kim. 2008. Long-term fertilization effects on rice productivity and nutrient efficiency in Korean paddy. Journal of Plant Nutrition. 31(8) : 1496-1506.

Lin, X., D. Zhu, H. Chen, S. Cheng, and N. Uphoff. 2009. Effect of plant density and nitrogen fertilizer rates on grain yield and nitrogen uptake of hybrid rice (*Oryza sativa* L.). Journal of Agricultural Biotechnology and Sustainable Development. 1(2) : 44-53.

Manzoor, Z., T. Awan, M. Zahid, and F. Faiz. 2006. Response of rice crop (super basmati) to different nitrogen levels. J Anim. Pl. Sci. 16(1-2) : 52-55.

Mulvaney, R. L., S. A. Khan, and T. R. Ellsworth. 2009. Synthetic Nitrogen Fertilizers Deplete Soil Nitrogen: A Global Dilemma for Sustainable Cereal Production. Journal of Environmental Quality. 38(6) : 2295-2314.

Park, H. K., M. G. Choi, T. S. Park, B. I. Ku, Y. D. Kim, J. K. Ko, W. Y. Choi, and B. K. Kim. 2009. Effect of low nitrogen fertilizer application on growth, yield and quality of rice. Korean J. Intl. Agri. 21(4) : 252-260.

Reich, P. B., D. S. Ellsworth, M. B. Walters, J. M. Vose, C. Gresham, J. C. Volin, and W. D. Bowman. 1999. Generality of leaf trait relationships: a test across six biomes. Ecology. 80(6) : 1955-1969.

Robertson, G. P. and P. M. Vitousek. 2009. Nitrogen in Agriculture: Balancing the Cost of an Essential Resource. Annual Review of Environment and Resources. 34 : 97-125.

Rogelj, J., O. Geden, A. Cowie, and A. Reisinger. 2021. Three ways to improve net-zero emissions targets. Nature. 591(7850) : 365-368.

Rural Development Administration (RDA). 2012. Manual for standard evaluation method in agricultural experiment and research. Suwon, Korea. pp. 78-132.

Schimel, J. 2000. Rice, microbes and methane. Nature. 403(6768) : 375-377.

Smil, V. 2002. Nitrogen and food production: proteins for human diets. AMBIO: A Journal of the Human Environment. 31(2) : 126-131.

Smith, K. A. 2010. Nitrous oxide and climate change. Earthscan: London, UK. 256 p.

Ta, T. C. and K. Ohira. 1981. Effects of various environmental and medium conditions on the response of Indica and Japonica rice plants to ammonium and nitrate nitrogen. Soil Science and Plant Nutrition. 27(3) : 347-355.

Tilman, D., C. Balzer, J. Hill, and B. L. Befort. 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 108(50) : 20260-20264.

Tong, H. H., H. W. Mei, X. Q. Yu, X. Y. Xu, M. S. Li, S. Q. Zhang, and L. J. Luo. 2006. Identification of related QTLs at late developmental stage in rice (*Oryza sativa* L.) under two nitrogen levels. Acta Genetica Sinica. 33(5) : 458-467.

Van Keulen, H. 1977. Nitrogen requirements of rice with special reference to Java. Contrib. Cent. Res. Inst. Agric. Bogor. 30 : 1-67.

Wang, Y., D. Wang, P. Shi, and K. Omasa. 2014. Estimating rice chlorophyll content and leaf nitrogen concentration with a digital still color camera under natural light. Plant Methods. 10 : 1-11.

Wei, D., K. H. Cui, J. F. Pan, G. Y. Ye, J. Xiang, L. X. Nie, and J. L. Huang. 2011. Genetic dissection of grain nitrogen use efficiency and grain yield and their relationship in rice. Field Crops Research. 124(3) : 340-346.

Xuejun, L. and Z. Fusuo. 2011. Nitrogen fertilizer induced greenhouse gas emissions in China. Current Opinion in Environmental Sustainability. 3(5) : 407-413.

Zhang, X. X., X. Xu, Y. L. Liu, J. Y. Wang, and Z. Q. Xiong. 2016. Global warming potential and greenhouse gas intensity in rice agriculture driven by high yields and nitrogen use efficiency. Biogeosciences. 13(9) : 2701-2714.

Zhao, C., G. Liu, Y. Chen, Y. Jiang, Y. Shi, L. Zhao, P. Liao, W. Wang, K. Xu, and Q. Dai. 2022. Excessive nitrogen application leads to lower rice yield and grain quality by inhibiting the grain filling of inferior grains. Agriculture. 12(7) : 962.

Zhou, C., Y. Huang, B. Jia, S. Wang, F. Dou, S. O. P. B. Samonte, K. Chen, and Y. Wang. 2019. Optimization of nitrogen rate and planting density for improving the grain yield of different rice genotypes in northeast China. Agronomy. 9(9) : 555.