

법씨의 규산코팅방법에 따른 이용특성과 육묘효과

강양순^{1,†} · 김완중² · 황덕상³ · 김희규⁴

Methods of Application and Beneficial Effects of Silicate-Coating Rice Seeds

Yang-Soon Kang^{1,†}, Wan Joong Kim², Duck Sang Hwang³, and Hee Kyu Kim⁴

ABSTRACT A new silicate coating technology was developed which reduces the impact of dust and loosening during seeding compared to existing silicate-coatings (Seed/Si/Zeolite), and therefore can lower the production costs of rice cultivation. In this method, 100 g of rice seed is coated with 18 mL of liquid silicic acid and then dressed with a mixture containing 80 g of dolomite and 5 g of iron. To determine the most effective method of application and ensure that seedlings developed healthily, a series of experiments were carried out. Infected seeds scattered in seedling boxes and pots (soil and hydroponic) were coated dry, without disinfection. In comparison to the seed which were not treated with the silicate-coating, the new seed (A) were 1.84 times heavier in weight, and were also improved in terms of coating strength and coating color. Compared to the seedlings grown from the non-coated seed, those grown from the new silicate-coated seed were of significantly higher quality (weight/length) and had erect, dark greenish leaves, which are ideal plant characteristics. This was most likely due to increased silicate uptake. The symptoms of bakanae disease in the non-coated seed peaked after 38 days to 54.2%, whereas the control value was 68.8% in the new silicate-coated seed (A). In the infected seedlings grown from the new silicate-coated rice seed, subnormal macro-conidia, namely, a sickle shape spore without a septum; a straight oblong shape spore without a septum and with a thick cell wall; and inter-septal necrosis of a normal spore were detected. It is believed that the strong alkalinity of silicic acid have acted as unfavorable conditions for pathogenicity. In seedlings grown from the new silicate coated rice seed under hydroponic conditions without nutrients, normal root activity and growth was maintained without leaf senescence. Therefore, it was possible to reduce the rate of fertilization. In the future, a new silicate-coated rice seed was required for the study of minimal nutrition for anti-aging of seedlings.

Keywords : bakanae disease, leaf senescence, seedling quality, silicate-coated rice seed, silicified cell

우리 농업총생산액에서 단일품목으로는 쌀이 21.9%로 절대적 우위를 차지하는데 수익성은 매년 떨어지고, 쌀 소비량도 70년대의 절반 이하로 쌀 전업농의 소득보전에 위협이 되고 있다. 그 동안 국내 쌀 산업 보전을 위하여 지켜오던 개도국 지위도 포기해야만 하는 처지이다. 게다가 쌀 소비자들의 식품안전성 요구와 지구환경보호 차원에서 비

료와 농약 등 화학물질의 최소화로 친환경벼농사는 물론 수익도 높여야하는 2중 부담을 갖고 있다. 이를 극복하기 위해서 '90년도 초반부터 연구 개발된 직파재배(Choi, 1994)는 현재까지도 기술보급 저해요소가 해소되지 못하고 있다. 정부는 2030년까지 온실가스 160만 톤 감축목표 중 벼농사 자동화에서 농업분야의 7.9%에 해당되는 최소경운 이양농

¹⁾새턴바이오텍(주) 기업부설 작물수용성규산연구소 연구소장 (Chief, R & D Center, Saturn Bio Tec Co., Ltd., Hoengsoeng 25209, Republic of Korea)

²⁾새턴바이오텍(주) 기업부설 작물수용성규산연구소 기술이사 (Technical Director, R & D Center, Saturn Bio Tec Co., Ltd., Hoengsoeng 25209, Republic of Korea)

³⁾새턴바이오텍(주) 기업부설 작물수용성규산연구소 생산차장 (Production Manager, R & D Center, Saturn Bio Tec Co., Ltd., Hoengsoeng 25209, Republic of Korea)

⁴⁾경상대학교 식물학과 명예교수 (Emeritus Professor, Department of Plant Medicine, Gyeongsang National University, Chinju 52858, Republic of Korea)

[†]Corresponding author: Yang-Soon Kang; (Phone) +82-33-344-1451; (E-mail) kysbaoro@naver.com

<Received 18 November, 2019; Revised 21 December, 2019; Accepted 18 January, 2020>

법기술 도입을 적극 추진 중에 있다. 이로서 벼농사 노동력도 동시에 5%를 절감할 수 있게 된다. 최근에는 드론의 다양한 기능으로 농업적 이용이 활발해짐으로서 온실가스 감축과 아울러 획기적인 노동력 절감이 가능한 벼 직파재배의 보급저해요인을 해소시킬 수 있는 유리한 여건이 되고 있다. 직파재배에서 문제시 되는 새 피해와 발아저조 및 종자전염병 방제를 위한 연구로 일본에서는 법씨철분코팅 직파재배가 이루어졌다(Inoue *et al.*, 2009; Miyagawa *et al.*, 2013; Yamauchi *et al.*, 2017). 한국에서는 규산코팅법씨로 직파재배와 기계이앙용 상자육묘에서 철분코팅법씨에서와 같은 효과는 물론 규산시비효과와 벼키다리병 경감을 동시에 추구할 수 있는 기술(Kang *et al.*, 2014; Kang *et al.*, 2016; Kang *et al.*, 2017a, 2017b)이 개발되었다. 특히 벼 키다리병은 벼 출수기에 영화 내부로 침입하여 종자에 보균상태로 있어 감염여부를 알 수 없으므로 저항성품종(Hur *et al.*, 2016) 선택은 물론 약제나 온탕침법 등 종자소독이 필수적이다(Shin *et al.*, 2014). 감염종자는 육묘 중에 발병되어 조기고사 하지만 살아남은 이병묘와 보균건전묘 및 정상묘들이 함께 본답이앙 후 고온기로 접어들면 대 발생으로 큰 피해를 내는 세계 3대 병해이다(Gupta *et al.*, 2015). 철분코팅은 국내 및 일본 수입재료로 직파재배에 이용되고 있다. 규산코팅제품은 국내생산으로 직파재배에서나 기계이앙용 상자육묘에서 종자소독 없이 마른종자로도 건묘육성과 입고병이나 키다리병 경감 및 규산시비효과로 농가에 이용되고 있다(Kang *et al.*, 2016; Kang *et al.*, 2017a). 특히 정부 공급 가용성규산의 시용노동력 부담을 획기적으로 줄이고 관주와 엽면시비가 가능토록 개발 보급된 수용성규산에 이어 종자에 직접시비하는 규산코팅기술은 민간기업에서 생산하는 제품이 시판되고 있다. 그러나 코팅강도가 약하여 직파재배에서 파종 시에 코팅파우더가 날리고 담수 후에 쉽게 풀어지는 결함이 있다.

본 연구에서는 기존 법씨규산코팅기술의 단점보완과 육묘효과 증진을 위하여 개발된 신규 규산코팅법씨의 이용

특성과 건묘육성 및 벼 키다리병 경감 효과 등이 검토되었다.

재료 및 방법

시험 종자는 벼키다리병에 감수성인 백운찰벼와 중도저항성인 메벼인 삼광벼(Lee *et al.*, 2011)로서 전자는 전년도 농가포장에서 채종한 감염 종자이었고 후자는 소독된 보급종자 이었다.

코팅소재는 벼농사에서 가장 많이 요구되는 수용성 액상규산(25%)을 코팅바인더로 하였고 종자피복용 분말로서 Zeolite, Dolomite를 코팅파우더로, 철분과 Cement는 코팅경화제로 이용되었다.

코팅방법은 직파면적 300평(10a)당 종자 5 kg을 기준으로 민간기업에서 생산된 “새빛코팅제”의 매뉴얼을 참조하였다. 코팅순서는 액상규산을 기반으로 한 새빛바인더 18 ml를 종자 100 g에 교반하여 해당피복재의 용량을 고르게 뿌려서 수작업으로 피복되었다. 신규 규산코팅법씨 A와 C의 Dolomite는 한국산이었고 B와 D는 베트남 수입산이었다(Table 1).

시험방법은 처리별로 작성된 코팅법씨를 이용 특성조사와 상자육묘시험 및 Pot 수경시험으로 실시되었다.

규산코팅법씨의 조제특성

코팅소재로 쓰인 코팅바인더(수용성 규산)와 코팅파우더로서 코팅피복재(Zeolite, Dolomite) 및 코팅경화제(철, 시멘트)의 이용특성 조사는 pH (1:5)와 용적무게(W/V)를 측정하였다. 기존 규산코팅법씨 작성용 코팅바인더 “규산”과 코팅파우더 “Zeolite”는 시판용 “새빛코팅제”를 이용하였다. 신규 규산코팅법씨용으로 칼슘과 마그네슘으로 조성된 코팅피복재 Dolomite는 국내산과 베트남 수입산을, 철은 시판용 분말을, Ca/Mg/Si으로 이루어진 시멘트는 시판용 포트랜드 시멘트를 이용하였다. 처리별 규산코팅법씨는 코

Table 1. Composition of coating powders applied to rice seed coated with water-soluble silicate.

Coating methods	Seed (g)	Silicic acid (ml)	Coating powder (g)			
			Zeolite	Dolomite	Iron	Cement
Seed alone	100	-	-	-	-	-
Seed coated (Old)	100	18	50	-	-	-
New seed coated (A)	100	18	-	80	5	-
" (B)	100	18	-	80	5	-
" (C)	100	18	-	80	-	5
" (D)	100	18	-	80	-	5

팅법씨무게, 잔분량, 코팅율, 코팅강도 및 코팅 색택으로 나타내었다. 코팅강도는 피복 경화속도와 피복 거칠기 등 피복 상태와 코팅마모성 및 코팅폴립성 등의 견고도를 달관과 필링으로 판단하였다.

상자육묘

벼키다리병 이병성 품종 “백운찰벼”를 이용한 규산코팅법씨를 기계이앙용 육묘상자에 중묘 파종적량인 120 g 기준으로 상자당 2 처리씩 완전임의배치 단반복으로 파종되었다. 파종 후 출아상태, 묘소질, 엽색도, 엽신 규화세포수, 토양산도 및 벼키다리병 발병조사가 이루어졌다. 묘 생육 조사는 육묘상자의 양 가변부와 중앙부 3지점으로 반복하였고 엽색도는 KONICA MIMNOLTA 일본산 SPAD를 이용하여 상위 완전전개엽의 중앙부위에서 측정 하여 SPAD치로 나타내었다. 규화세포수 조사는 Safranin-phenol법(NICS, RDA & INIA, Uruguay, 2005)으로 제3본엽의 중앙부에 분포된 규질화 세포(아령세포, 규산세포 및 규산체)를 검경하고 광학현미경 160배율에서 시야당 규산체 분포수로 나타내었다. 벼키다리병 발병조사는 상자육묘 전 개체를 대상으로 생육진전에 따라 다양한 발병증상 중에서 위조나 고사되는 발병개체(Ou, 1987)를 매번 제거하면서 8회 전수조사 하였다. 방제가는 1-(코팅법씨 발병률/무코팅법씨 발병률)×100으로 환산하였다. 발병묘의 병원포자 분포조사는 slide glass에 증류수 1방울(0.1 ml)을 떨어뜨리고 줄기의 기부조직을 이개서 적셔낸 후 광학현미경 640배율로 검경하였다.

수경 Pot I

상자육묘와 동시에 동일처리로 300 ml 투명플라스틱 컵당 코팅법씨 20립씩 넣고 영양 결제된 수돗물을 100 ml 채워서

시험 중 발아력, 물의 탁도, 잔류물의 pH, 엽색도 및 묘소질 등을 조사하였다. 발아속도지수는 파종부터 발아 완료되는 후 5일까지 매일 발아개체를 조사하여 $PI = \sum[(T-t_i+1)n_i]$ 공식(PI: 발아속도지수, T: 총조사일수, t_i : 치상후 조사일수, n_i : 조사당일의 발아수)으로 계산하였다. 종자의 이유기에 해당되는 파종 후 14일에는 신선한 수돗물로 갈아주었고 27일까지 생육을 진전시켜 묘의 생육량과 엽의 노화척도로서 엽색도를 SPAD기로 측정하였다.

수경 Pot II

벼키다리병 이병성인 찰벼품종 “백운찰”을 종자소독 없이 마른상태로 코팅된 “신규 규산코팅법씨 A”의 상자육묘와 수경 Pot I에서 가장 우수했던 육묘효과를 명확히 하기 위하여 종자조건을 달리하여 종자 소독된 보급종 메벼품종 “삼광벼”에서 검토되었다. 무코팅, 기존 규산코팅, 신규 규산코팅법씨를 작성하여 150 ml 플라스틱 용기에 컵당 30립씩 넣고 영양결제 수돗물을 100 ml 채워서 수경시험 I에서와 같은 방법으로 실시하였다. 파종 후 7일 간격으로 코팅 퍼짐성 및 출아상태, 묘의 뿌리활력과 묘의 생장 및 엽의 노화를 사진으로 나타내었다. 파종 후 21일에는 신선한 수돗물로 갈고 6일간 관리하였다. 뿌리의 산화력(Armstrong, 1967; Yoshida, 1981)은 뿌리표면에 부착된 이산화철 착색정도로 달관조사 하였고 엽의 노화(Yoshida, 1981)는 SPAD치로 생육량은 키로 나타내었다.

결과 및 고찰

코팅소재와 신규 규산코팅법씨의 이용특성

Table 2에서와 같이 기존 규산코팅법씨의 코팅강도와 새 피복 회피성을 높이기 위하여 코팅바인더로 사용된 규산은

Table 2. Characteristics of the coating binder, coating powder and coating enhancer used as coating materials for the silicate-coated rice seed.

Coating materials	pH (1:5)	Degree of powder	Color	Bulk density (Wt./Vol.)
Coating binder				
- Silicic acid	11.0	-	none	1.4
Coating powder				
- Zeolite	8.10	120 mesh	slight brown	0.8
- Dolomite				
(Korea product)	8.22	100 "	whitish	1.8
(Vietnam product)	7.88	50 "	gray	1.5
Coating enhancer				
- Iron	9.3	80 "	black	3.7
- Cement	11.8	100 "	dark gray	1.6

25% 수용성 액상으로 무색이고 강알칼리로서 1.4의 가비중을 보였다. 신규 코팅피복재 Dolomite와 코팅경화재 철과 시멘트는 기존의 피복재 Zeolite 0.8보다 가비중이 1.5~3.7로 현저히 높아서 코팅법씨의 중량감을 갖게 하고 외관과 색깔을 종자와 달리하여 새의 공격으로부터 회피될 수 있는 특성으로 나타났다.

다양한 코팅소재들로 조합된 신규 규산코팅법씨들의 무게, 잔분량, 코팅색도 및 코팅강도 등의 특성을 기존 규산코팅법씨와 비교하여 보면 Table 3과 같다. 코팅바인더 규산으로 코팅파우더인 Dolomite와 철분을 종피에 피복시킨 신규 규산코팅법씨(A와 B) 그리고 Dolomite와 시멘트로 피복된 신규 규산코팅법씨(C와 D)에서는 모든 특성이 기존 코팅방법보다 크게 개선되었다. 철분결합코팅(A와 B)은 짙은 검정색으로 매끈하게 코팅강도가 증가되었고 시멘트결합코팅(C와 D)은 빠른 경화속도로 코팅종피가 모나고 거칠게 코팅강도가 증진되었다. 모두 코팅두께나 코팅강도 및 수분 흡수 시 견고성 개선으로 새 피해 회피성이나 낙중 시 토양부착, 종자소독 및 묘 생장 등 직파적성과 상자육묘에 유리한 특성으로 나타났다.

기존 규산코팅법씨와 같이 새로이 개발된 4종의 규산코팅법씨를 활용하여 기계이양용 상자육묘에서 묘의 생육상

태와 규산흡수 및 벼키다리병 발생 등에 대한 육묘효과가 검토되었다. 동시에 영양이 결핍된 수돗물조건에서 법씨 발아 및 묘의 생리활성도 검토되었다.

육묘효과

규산코팅법씨의 벼키다리병 등 종자소독효과와 건묘육성효과를 명확히 하기 위하여 이병성품종의 감염보균종자를 채종, 종자소독 없이 마른상태로 코팅하여 발병을 유도하고 육묘환경을 불량하게 육묘한 결과는 Table 4와 Fig. 1과 같았다. 33일간 육묘된 상토의 pH는 무코팅법씨의 6.73에 비하면 기존 규산코팅법씨에서 7.33, 신규 규산코팅법씨들에서는 7.52~7.62로 코팅소재들의 알칼리 특성이 나타났다. 무코팅법씨에서 자란 묘는 키가 크면서 엽은 엷색에 엽신 규화세포 형성이 미미하여(Table 4, Fig. 1①B) 늘어지는 초형으로 거의 전 개체가 마치 벼키다리병 증상처럼 길게 신장되었다(Table 4, Fig. 1①). 반면에 규산코팅으로 자란 묘는 다소 키가 작고 엷색이 짙으며 엽신 중 규화세포 밀도가 현저히 높아서 잎이 직립되는 군락구조를 보였다(Table 4, Fig. 1②~⑥). 또한 묘의 생육량(생체중, 건물중)도 유의하게 높았고 키에 대한 생체중 비율로 나타난 묘의 충실도(묘소질)로 보아 건묘 육성효과가 뚜렷하였다. 신규

Table 3. Weight, falling powder, coating color and coating strength of rice seed coated with different silicate coating materials.

Treatment	Weight (g)	Falling powder (g)	Coating Color	Coating* strength
Seed alone	100	-	yellowish	-
Seed coated (Old)	143.4	20.8	slight gray	++
New seed coated (A)	184.4	10.7	dark-brown	+++
" (B)	183.8	11.8	black	++++
" (C)	189.4	7.0	slight black	+++
" (D)	192.6	8.2	dark brown	++++

* ++: moderate, +++: moderate strong, ++++: strong

Table 4. Effect of seed silicate coating on the soil pH and growth of 33-day-old seedlings.

Treatment	Soil pH (1:5)	Ht. (cm)	No. of Silica body	SPAD value	Weight. (mg/seedl.)		Seedling quality (mg/cm×100)
					Fresh	Dry	
Seed alone	6.93	19.1 b*	0.5 [†]	18.1 a*	51.1 a*	8.3	28.2
Seed coated (exist)	7.33	17.8 a	8.4	20.6 b	58.7 b	10.1	33.0
New seed coated (A)	7.52	17.6 a	15.9	22.8 b	67.6 c	10.8	38.4
" (B)	7.54	17.3 a	15.3	22.2 b	65.0 c	10.3	38.5
" (C)	7.62	16.9 a	13.5	21.6 b	59.1 b	10.1	35.6
" (D)	7.53	16.8 a	5.6	21.4 b	56.6 b	9.9	34.5

[†]: no. of silica bodies per eye view at 160 magnification.

*: marks in each column followed by the same letter are not significantly different according to Duncan's multiple test at P<0.05.

규산코팅법씨(A와 B)에서는 엽신에 집적된 규산체 수, 엽 색도, 생육량 및 묘소질 등 모든 특성이 가장 우수한 것으로 나타났다. 특히 기동세포에 집적된 규산체(Fig. 1③C)와 관다발에 위치하는 아령형 규산세포(Fig. 1③A)들이 현저하게 많이 분포되어 코팅으로 규산공급이 효과적임을 알 수 있었다. Ma & Takahashi (2002)는 엽신중 규화세포수와 규산함량 관계에서 기동세포에 집적된 많은 규산체가 보이면 10.5%, 관다발에 규산세포가 보이면 4.07% 그리고 규화세포(규산세포와 규산체)가 거의 안보이면 0.11%로 판단하였다. 이와 비교하면 신규 규산코팅법씨의 규화세포의 분포상태로 보아 10% 이상의 규산흡수로 판단되었다. 규

산코팅법씨의 많은 규산흡수는 묘의 엽신 직립화(Cock & Yoshida, 1970; Yoshida, 1975; Kang, 1981; Kang, 1985; Sanster & Hodson, 1986)로 인하여 엽록소 파괴로 노화를 촉진시키는 에틸렌호르몬(Baardseth & Elbe, 1989; Marie *et al.*, 2017)의 생성을 억제(Kays & Pallas, 1980; Hays, 1981; Kang, 1981; Kang, 1985)시킴으로서 엽 노화 없이 생육량이 증가된 것으로 판단되었다.

벼키다리병 경감효과

육묘 중 발생양상을 보면 Fig. 2와 같이 모든 처리에서 파종 후 20일부터 열린 엽색으로 엽병이 길어지고 키가 크면서 엽신이 늘어지는 전형적인 병증(Ou, 1985)이 나타나고

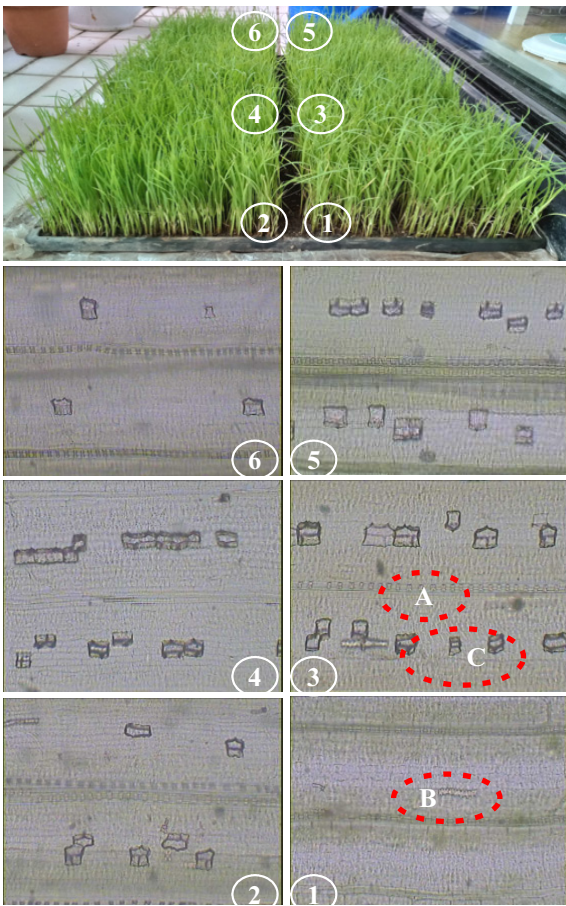


Fig. 1. Effect of seed silicate coating on plant type and distribution of silicified cells formed in the third leaf of 33-day-old seedlings.

- †A: dumbbell-shape cell located on vascular bundle
- B: silica cell located on vein
- C: silica body accumulated in bulliform cell
- ①: seed alone ②: seed coated (Si/zeolite: old)
- ③: seed coated (Si/Kr.dol/Fe) ④: seed coated (Si/Vn.dol/Fe)
- ⑤: seed coated (Si/Kr.dol/Ce.) ⑥: seed coated (Si/Vn.dol/Ce.)

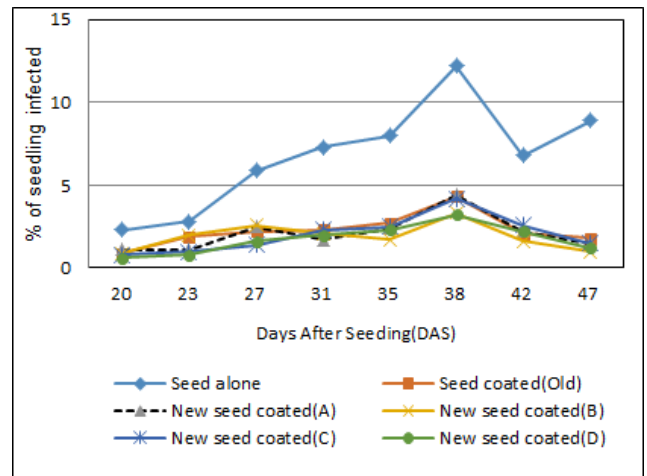


Fig. 2. Effect of seed silicate coating on seasonal prevalence of bakanae disease (caused by *Gibberella fujikuroi*) compared to a control (no silicate coating).

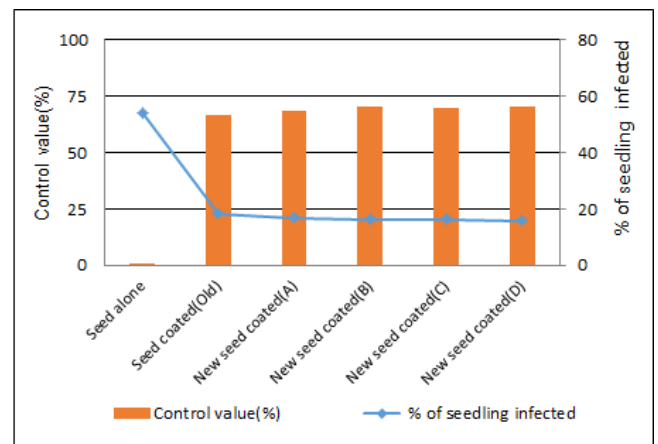


Fig. 3. Comparison of control value and percentage of diseased seedlings, in seedlings grown from different silicate coated seeds.

신엽 추출 없이 고사되는 개체가 대부분을 차지하였다(Ou, 1987; Kang *et al.*, 2017a). 고온기로 들면서 발병이 진전되어 파종 후 38일에 정점을 이루다가 47일까지도 3.0~8.9%의 높은 발병률을 계속 보여 이후에도 육묘 중 외관상 건전묘로 보일지라도 보균상태로 남을 가능성이 있었다. 규산코팅법씨에서는 47일간의 육묘기간을 통하여 무코팅법씨에서 발병률 54.2%에 대한 68.8-70.7%의 방제가로 발병경감 효과가 크게 나타났다(Fig. 2, Fig. 3). 코팅방법 간 발병률은 기존 코팅법씨 18.2%보다 신규코팅에서 15.9~16.9%로 다소 낮았고 신규코팅 간에는 경미한 차이를 보여 기존

코팅파우더 Zeolite를 신규 코팅 피복재(Dolomite)와 경화재(iron)로 대체 가능할 것으로 판단되었다.

발병 진전이 peak 이었던 파종 후 38일 무코팅법씨와 코팅법씨에서 자란 감염묘의 병원포자 분포와 활력상태를 보면 Fig. 4에서와 같다. 극심한 발병으로 자란 무코팅법씨의 이병묘에서는 좋은 서식환경에서 무성생식으로 활발하게 증식되는 소형포자와 중형포자가 주로 산재되어 있었다(Fig. 4①B,C). 그리고 불량환경에서 살아남기 위하여 유성생식(Choi, 2009)으로 증식시킬 3개의 격막을 갖는 낫 모양의 전형적인 완전 대형포자(Ou, 1985; Saremi & Farrokhi, 2004)도 간혹 검정되었다(Fig. 4①A, ②A). 반면에 규산코팅법씨(Fig. 4②~⑥)에서는 활동성인 소포자나 중형포자의 분포 밀도가 낮았고 다양한 형태의 비정상형 대형포자가 드물게 관찰되었다. 그들은 격막이 없는 초생달형 대형포자(Fig. 4②a, ③a), 격막이 없고 세포막이 두터운 장방형 대형포자(Fig. 4④b) 그리고 세포 양단조직이나 격막 간 세포조직이 허물어져 사멸되는 대형포자(Fig. 4⑤c, ⑥d) 등이 포착되었다. 이것은 Kang *et al.* (2016, 2017a, 2017b)이 보고한 기존 규산코팅법씨에서 세포분열을 유도하는 격막이 없고 불량환경에서 적응하려고 두터운 세포막을 갖는 이상 대형포자의 출현과 동일하였다. 규산코팅법씨에서 대형포자의 이상 형태나 사멸증상은 병원포자의 발육과 증식을 억제시킬 수 있는 코팅기능이 불량서식환경으로 작용되었을 것으로 판단되었다. 전보(Kang *et al.*, 2016, 2017a)에서 기존 규산코팅법씨의 종자소독과 베키다리병 경감효과는 코팅으로 두터운 종피피복층을 갖게 하여 토양전염이나 종자전염으로 접촉감염을 줄일 수 있었다. 또한 호산성인 베키다리병원균의 탄소영양원이 되는 종피인 왕겨(Ramesh, *et al.*, 2014)에 강알칼리성 규산을 흡착시켜 호기성인 키다리병원균이 다공성 피복층으로 유인되면 영양부족으로 증식을 억제시킬 수 있을 것으로 보고되었다.

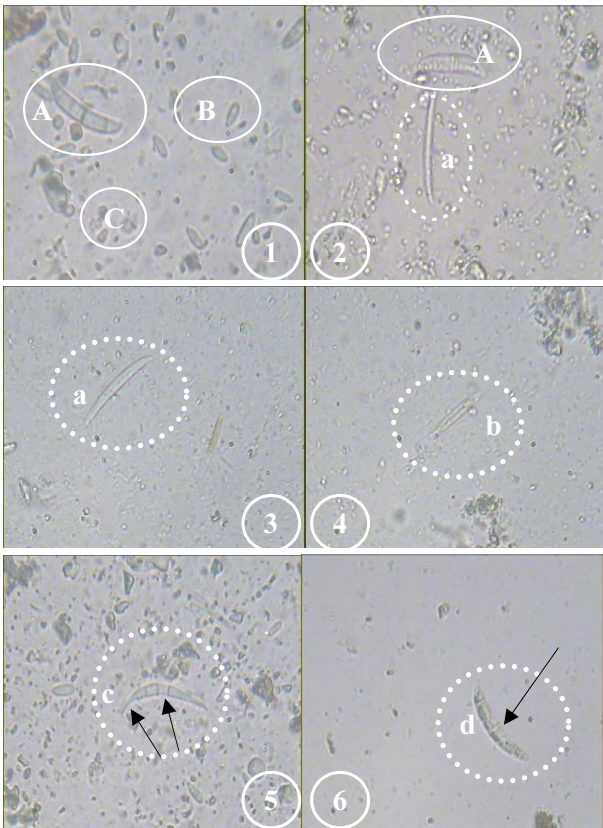


Fig. 4. Distribution of typical healthy macro-conidia (①A, ②A) with sickle shape and three septa and micro-conidia (①B, ①C); undeveloped abnormal macro-conidia without intact septum (②a, ③a), thickened cell walls and a straight oblong shape without intact septum (④b); and inactive, abnormal macro-conidia with a dead cell in the tip tissue (⑤c) and center cell (⑥c); caused by *Gibberella fujikuroi*, in the fresh tissue of 38-day-old infected rice seedlings grown from non-coated (①) vs. coated seeds (②~⑥). Images are shown at 640 magnification.

- ①: seed alone ②: seed coated (si/zeolite: old)
- ③: seed coated (Si/Kr.dol/Fe) ④: seed coated (Si/Vn.dol/Fe)
- ⑤: seed coated (Si/Kr.dol/Ce.) ⑥: seed coated (Si/Vn.dol/Ce.)

법씨 발아 및 묘 생리활성

영양이 결제된 수경조건에서 법씨 자체영양이 거의 고갈되는 파종 후 14일(Yoshida, 1973)과 묘 자체 광합성 의존으로 성장하는 파종 후 27일에 무코팅법씨와 규산코팅법씨에 대한 발아특성과 묘의 생육을 검토한 결과는 Table 5와 Fig. 5와 같다. 법씨의 발아율은 무코팅법씨 94.3%, 규산코팅법씨 93.0~94.7%로서 경미한 차이를 보였다. 규산코팅법씨들에서 파종 후 3일 발아시작에서 5일 완료까지 5일간의 발아속도는 법씨코팅으로 현저히 촉진되었다. 파종 후 14일 동안 생육한 묘의 키, 뿌리길이, 엽색도로 나타낸 SPAD치 그리고 잔류 수경용액의 pH와 탁도 등 모든 특성이 무

Table 5. Effect of seed (water-soluble silicate) coating treatment on seed germination, promptness index (of seed germination), water quality and growth of 14-day-old seedlings grown in a tap water culture without nutrients.

Treatment	Germination		Plant height (cm)	Root (cm)	SPAD value	Water pH	Water* turgidity
	%	Promptness index (%)					
Seed alone	94.3	29	5.5	2.8	14.3 a**	5.86	+
Seed coated (Old)	94.0	32	7.2	4.5	16.4 b	6.13	++
New seed coated A	93.7	34	8.0	6.4	17.2 c	6.61	+++
" B	93.0	37	8.3	7.3	17.1 c	6.30	++
" C	93.3	35	7.5	5.2	16.6 bc	7.21	+++
" D	94.7	36	7.4	4.0	16.3 b	6.79	++

* : + (clear), ++ (moderate), +++ (turbid)

** : marks in each column followed by the same letter are not significantly different according to Duncan's multiple test at $P<0.05$.



①	②	③	④	⑤	⑥
8.7	13.6	15.3	14.8	11.7	10.2
Plant height (cm)					
7.6	16.3	18.4	17.9	11.5	11.3
Leaf color (SPAD value)					

Fig. 5. Effect of seed coating treatment (water-soluble silicate and dolomite/iron complex powder) on plant height and leaf color of 27-day-old seedlings grown in a tap water culture without nutrients.

- ①: seed alone ②: seed coated (si/zeolite: old)
- ③: seed coated (Si/Kr.dol/Fe) ④: seed coated (Si/Vn.dol/Fe)
- ⑤: seed coated (Si/Kr.dol/Ce.) ⑥: seed coated (Si/Vn.dol/Ce.)

코팅법씨에서 보다 현저히 증가되었다(Table 5). 또한 기존 규산코팅법씨에서 보다 피복재 Dolomite와 코팅경화제인 철분 및 시멘트로 코팅된 법씨들에서 모든 특성이 토경조건인 상자육묘에서와 거의 같은 경향으로 나타났다. 다만 상자육묘에서 나타나던 벚키다리병은 전연 발생되지 않았다. 이것은 이병성 품종의 감염보균종자를 종자소독 없는 발병 유도조건일지라도 혐기조건인 수경육묘에서는 호기성인 키다리병원균의 특성이 억제되었을 것으로 보였다.

그리고 무코팅법씨에서는 엽의 노화가 급속히 진전되면서 키와 뿌리의 생육이 정체상태에 이르렀다. 반면에 철분 조합 규산코팅법씨(A와 B)에서는 기존 규산코팅법씨보다 우수한 것으로 나타났으나 시멘트조합 규산코팅법씨(C와 D)에서는 생육량이나 엽색도가 다소 떨어졌다(Fig. 5). 이는 호기성이고 pH 완충력이 큰 토경조건에서와는 달리 혐기성이고 영양 무공급상태의 수경조건에서는 시멘트의 알칼린 독성에 기인되었을 것으로 보였다.

이상의 상자육묘와 영양이 결제된 수돗물 육묘의 양 조건에서 생육형질이 가장 우수하였던 종자/규산/Dolomite/철분으로 조합된 신규 규산코팅법씨(A)의 생육특성을 명확히 하고자 종자 소독된 보급종 삼광벼에 대한 코팅반응이 육묘단계별로 검토되었다(Fig. 6).

신규 규산코팅법씨(A)에서는 무코팅법씨에서와 기존코팅법씨에서 보다 파종 후 7일까지 종피색이 진하게 검고 코팅재의 종피부착이 양호하여 외관상 새 피해우려가 적을 것으로 판단되었다. 법씨코팅으로 파종 후 7일째 발아와 발아속도 촉진으로 성장속도가 빨랐던(Table 5) 것이 재확인되었다(Fig. 6).

육묘 중 법씨의 영양이 고갈되는 이유기경인 파종 후 14일째 무코팅법씨에서는 엽색이 질소 결핍 증상으로 얼어지고 최종 미전개엽의 발육이 정체되었다. 반면에 코팅법씨에서는 특이하게도 낚시 바늘처럼 둥글게 휘어진 발육과정을 보이면서 짙은 녹색으로 경과되어 엽 신장이 촉진되는 현상으로 나타났다. 특히 Dolomite/철분함유 신규 규산코팅 A에서 영양공급 없이도 자체광합성만으로도 짙은 엽색이 주목되어 급후 묘 영양생리적인 구멍이 요구되었다.

파종 후 21일째 모든 처리에서 엽색이 얼어지는 질소결핍증상이 나타나기 시작하였다. 무코팅법씨에서는 급격한

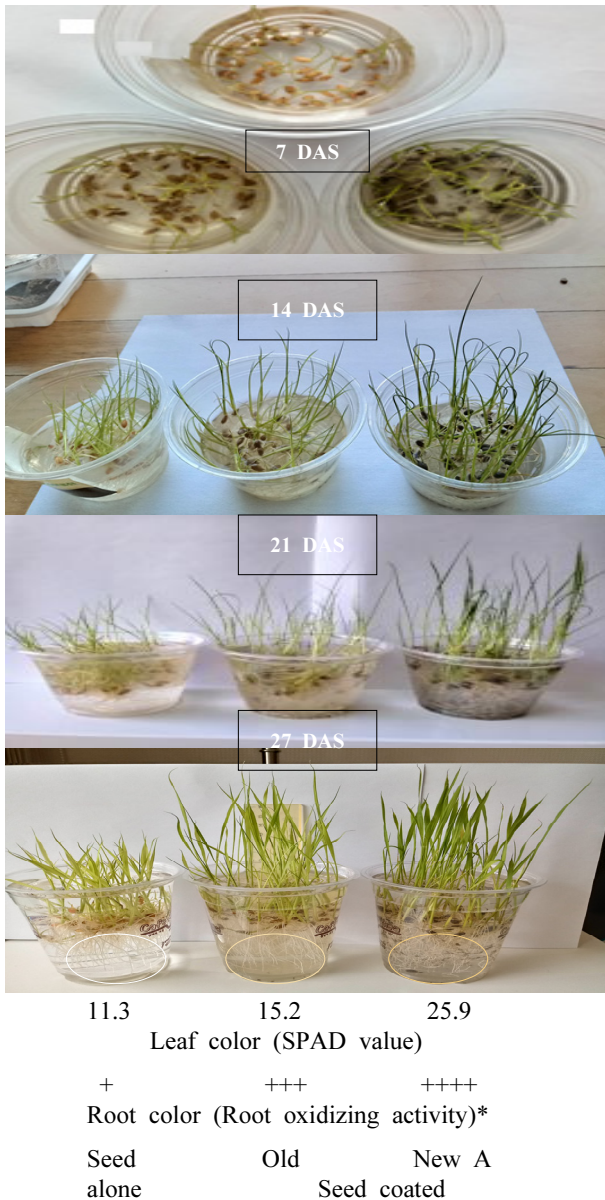


Fig. 6. Effect of seed coating treatment (water-soluble silicate and dolomite/iron complex powder) on leaf senescence, root oxidizing activity and growth of 27-day-old seedlings grown in a tap water culture without nutrients

* +: whitish, +++: brownish, +++++: dark brownish

엽색 퇴화와 엽맥백화를 보이면서 최종 완전전개엽의 신장이 차엽을 벗어나지 못하는 묘 생육정체 현상이 뚜렷하였다. 기존 규산코팅법씨에서도 약간의 엽록소 퇴화와 더불어 생육정체가 시작된 반면에 신규 규산코팅법씨(A)에서는 하위엽에서 상위엽으로 이동되는 질소결핍 초기증상은 약간 있었으나 엽신 신장은 지속되었다.

21일간 종자/코팅재 분해물과 묘 대사산물의 뿌리배출로

pH와 탁도 변화로 탁해진 용액을(Table 5) 신선한 수돗물로 교체하여 6일간 묘를 회복시켜 27일간 노화된 뿌리의 활력과 묘 생장을 진단하였다. 무코팅법씨에서는 종자양분으로 살아가는 어린묘의 활력 있는 백색뿌리에서 독립영양으로 뿌리활력을 높일 수 있는 연갈색 산화철피복 뿌리(Yoshida, 1975a)로의 전환 없이 백색상태로 머물러 묘의 생장정체에서 고사단계에 이르렀다. 반면에 신규 규산코팅법씨 A에서는 건전한 뿌리발육과 외관상 정상생육이 오래 지속되었다. 이는 코팅법씨의 규산, Zeolite, Dolomite, 철 및 시멘트 등 코팅재의 자체영양 공급으로 묘의 뿌리활력, 엽신노화억제 및 광합성 등 생리활성에 기여되었을 것으로 판단되었다. Kang (1985), Kang & Jung (2002)의 보고에서 규산은 벼 생육에서 근산화력 증진, 호흡저하, 엽신 직립화와 광합성 촉진 및 엽록소를 파괴하는 성장억제호르몬 에틸렌(Baardseth & Elbe, 1989) 생성억제로 엽신 노화를 막아낸다. 또한 규산은 에너지합성장소인 엽록체와 미토콘드리아에 존재하면서 인산대체기능(Alyoshine *et al.*, 1985, 1988, 1989)과 환경 스트레스에 대한 저항성(Kang & Park, 1999, 2001; Marie *et al.*, 2017), 철, 망간 등 독성금속의 생리장애 경감으로 뿌리의 활력을 증진시키는(Oertli & Jacobson 1960) 등으로 모든 코팅법씨에서 육묘효과가 복합적으로 나타날 것으로 본다. 또한 코팅파우더 Dolomite는 Ca/Mg의 공급원이 되어 엽록체 핵심원소로 광합성 활성화와 엽 노화 경감에 규산과 더불어 상승적으로 기여될 것이다. 코팅피복재 철분은 뿌리표면을 피막으로 형성하여 근산화력을 높여 뿌리노화를 막는 기능(Oertli & Jacobson, 1960; Ma & Takahashi, 2002)으로 규산과 Dolomite와 더불어 상승적으로 육묘효과에 기여되었을 것으로 판단되었다. 이상의 결과를 종합하여 보면 규산/Dolomite/철의 조합으로 구성된 신규 규산코팅법씨에서 장기 영양결제에도 육묘 중 뿌리활력이나 엽의 노화 없이 정상생육이 지속되는 것으로 보아 육묘시비량 절감 가능성도 보였다. 금후 묘의 노화경감을 위한 최소 영양공급 연구가 요구되었다.

적 요

벼 직파재배나 육묘에서 종자소독, 병충해방제, 시비 등에 요구되는 생산비절감기술로 개발된 기존 규산코팅법씨(규산/Zeolite)의 단점 보완으로 신규 규산코팅기술이 개발되었다. 신규 규산코팅법씨의 제조 및 이용특성과 육묘상자에서 건묘육성 및 벼 키다리병 경감효과를 명확하게 하기 위하여 벼 키다리병 이병성 감염종자를 소독 없이 마른 상태로 코팅한 법씨와 중도저항성 소독된 보급종자를 마른

상태로 코팅한 볍씨를 토경조건과 수경조건에서 시험이 수행되었다.

1. 신규 규산코팅볍씨는 종자 100 g에 코팅 바인더 점액성 수용성규산 18 ml을 충분히 묻히고 거기에 Dolomite 80 g/철 5 g의 혼합분말을 고루 뿌려서 코팅되었다.
2. 신규 규산코팅볍씨의 특성은 종자무게의 1.84배이었고 중량, 코팅강도와 코팅색택 등이 기존 규산코팅볍씨보다 훨씬 개선되었다.
3. 신규 규산코팅볍씨의 묘는 무코팅볍씨에서 자란 묘의 연한 엽색과늘어지는 초형에 비하여 짙은 엽색(SPAD치)으로 직립되었고 엽신의 규질화가 현저히 높았으며 묘소 질(w/cm)은 유의하게 증가되었다. 특히 생육량과 엽색도는 토경조건에서 보다 영양이 결핍된 수경조건에서 뚜렷하였다.
4. 47일간 육묘 중 벼 키다리병 발생은 파종 후 38일에 peak를 보였고 무코팅볍씨 발병률 54.2%에 비하여 신규 규산코팅에서는 68.8~70.7%의 방제가를 나타내었다. 이상을 종합하여 보면 벼농사에서 가장 많이 요구되는 규산질 비료를 Dolomite와 철분으로 종피에 코팅시켜서 만든 신규 규산코팅볍씨로 종자소독, 건묘육성 및 벼 키다리병 경감 효과 등은 친환경 저비용과 안전 쌀 생산에 크게 기여되리라 본다. 또한 장기 영양결제에도 육묘 중 뿌리 활력이나 엽의 노화 없이 정상생육이 지속되어 육묘시비량 절감 가능성도 보였고 금후 묘의 노화경감을 위한 최소 영양공급 연구가 요구되었다.

인용문헌(REFERENCES)

- Alyoshin, N. E., E. R. Alyoshin, and E. P. Alyoshin. 1985. Si content in the DNA of rice. Doklady Vaskhnil N 3. : 14-15.
- Alyoshin, N. E., E. R. Alyoshin, E. V. Lebedev, and E. P. Alyoshin. 1988. Influence of silicon and the antagonists on rice Mitochondria. International Rice Research Newsletter (IRRN) 13(3) : 9-10.
- Alyoshin, N. E., E. R. Avakyan, E. V. Lebedev, and E. P. Alyoshin. 1989. Silicon content of chloroplast and aleurone. Soviet Agricultural Sciences 2 : 19-21.
- Armstrong, W. 1967. The oxidizing activity of roots in waterlogged soils. Physiol. Plant 20 : 920-926.
- Baardseth, P. and Von Elbe J. H. 1989. Effect of ethylene, free fatty acid, and some enzyme systems on chlorophyll degradation. J. Food Sci. 54 : 1361-1363.
- Choi, D. H. 1994. Determination of critical early seeding date for seedling emergence in dry-seeded rice based on statistical analysis of daily mean air temperature in Korea. Korean J. Crop Sci. 39(5) : 437-443.
- Choi, H. W., J. M. Kim, S. K. Hong, W. G. Kim, S. C. Chun, and S. H. Yu, 2009. Mating types and optimum culture conditions for sexual state formation of *Fusarium fujikuroi* isolates. Mycobiology 37 : 247-250.
- Cock, J. and S. Yoshida. 1970. An assessment of the effects of silicate application on rice by a simulation method. Soil Sci. Plant Nutr. 16(5) : 212-214.
- Gupta, A. K., I. S. Solanki, B. M. Bashyal, Y. Singh, and K. Srivastava. 2015. Bakanae disease of rice - An emerging disease in Asia. J. of Animal. Plant Science 25(6) : 1499-1514.
- Hayes, A. B. 1981. The interaction of auxin and ethylene in the maintenance of leaf blade form in *Phaseolus vulgaris* L. Var. Pinto. Amer. J. Bot. 68(6) : 733-740.
- Hur, Y. J., S. B. Lee, D. G. Shin, T. H. Kim, J. H. Cho, S. I. Han, S. H. Oh, J. Y. Lee, Y. B. Son, J. H. Lee, T. M. Kwon, and D. S. Park. 2016. Screening of rice germ-plasm for bakanae disease resistance in rice. The Korean J. Breed. Sci. 48(1) : 22-28.
- Inoue, H., M. Yamauchi, and H. Yanauchi. 2009. Control of seed borne disease of rice [*Oryza sativa*] seedling by coating seed with iron. Japanese J. of Phytopathology 75(3) : 164-169.
- Kang, Y. K. 1981. Silicon influence on physiological activities in rice. Ph.D. Thesis, Arkansas University. 84p.
- Kang, Y. S. 1985. The influences of silicon on growth of rice plant. Res. Rept. RDA (P.M & U) 27(1) : 57-72.
- Kang, Y. S. and J. W. Park. 1999. Influences of silicon on the control of temperature and induction of electronic voltages in rice plant tissues. Proceeding of the 1st international silicon in agriculture conference on Sep. 26-30, 1999, in Florida, USA. pp. 35-36.
- Kang, Y. S. and J. W. Park. 2001. Influences of silicon on the control of temperature and induction of electronic voltages in rice plant tissues. In: Silicon in agriculture, Elsevier Science, Netherland. pp. 386-387.
- Kang, Y. S. and Y. T. Jung. 2002. Research on agricultural utilization of silicon in Korea progress and prospects. Proceeding of the 2nd international silicon in agriculture conference on Aug. 22-26. 2002 in Tsuruoka, Japan. pp. 262-265.
- Kang, Y. S., W. J. Kim, Y. J. Kim, K. H. Jung, and U. S. Choi. 2014. Control of bakanae disease (*Gibberella fujikuroi*) by rice seed coated with silicate in wet direct seeding. Advanced crop science research young scientist. Korean J. Crop Sci. p. 24.
- Kang, Y. S., W. J. Kim, Y. J. Kim, K. H. Jung, and U. S. Choi. 2016. Bakanae disease reduction effect by use of silicate coated seed in wet direct-seeded rice. Korean J. Crop Sci. 61(1) : 9-16.
- Kang, Y. S., W. J. Kim, and J. H. Roh. 2017a. Effect of silicate-coated rice seed on healthy seedling development and bakanae disease reduction when raising rice in seed boxes. Korean J.

- Crop Sci. 62(1) : 1-8.
- Kang, Y. S., W. J. Kim, H. K. Kim, and M. S. Cho. 2017b. Effect of silicate-coated rice seed on bakanae disease (*Gibberella fujikuroi*) reduction in the rice cultivation. Proceeding of Global Conference on Plant Science and Molecular Biology (GPMB) on Sep.11-13, 2017, in Valencia, Spain. pp. 150-151.
- Kays, s. J. and J. E. Pallas Jr. 1980. Inhibition of photosynthesis by ethylene. Nature 285 : 51-52.
- Lee, Y. H., M. J. Lee, H. W. Choi, S. T. Kim, J. W. Park, I. S. Myung, K. S. Park, and S. W. Lee. 2011. Development of *in vitro* seedling method for selection of resistant rice against bakanae disease. Res. Plant Disease 17(3) : 288-294.
- Ma, J. F., Y. Miyake, and E. Takahashi, 2001. Silicon as a beneficial element for rice plants. Elsevier Science pp. 17-39.
- Ma, J. F. and E. Takahashi. 2002. Soil, fertilizer, and plant research in Japan. Elsevier Science pp. 100-106.
- Marie Luyckx, Jean-Francois Hansman, Stanley Lutts, and Gea Guerrie. 2017. Silicon and plants: Current knowledge and technological perspectives. Front Plant Sci. 8 : 411.
- Miyagawa, H., M. Yamauchi, and H. Inoue. 2013. The control of seed borne disease of rice seedling by iron coating seeds in a mass production machine. Ann. Rept. Kansai Pl. Prat.55: 23-30.
- NICS, R.D.A. / INIA, Uruguay. 2005. Safranin-phenol method for detection of silicified cells in rice tissues. Manual for physiological studies of rice associated with the cold injury in Uruguay. NICS, R.D.A. pp. 78-80.
- Oertli, J. J. and L. Jacobson. 1960. Some quantitative considerations in iron nutrient of higher plants. Plant Physiol. 35: 683-688.
- Ou, S. H. 1985. Rice disease. CAB international commonwealth mycological Institute. Kew, Surrey, UK. The Cambrian News Ltd., pp. 268, 301-302.
- Ou, S. H. 1987. Rice disease. CAB international commonwealth mycological institute. Kew, Surrey, UK. p. 256.
- Ramesh, S., Y. T. Swati, J. shaily, and K. G. Raveesh. 2014. Effect of different cultural condition on the growth of *Fusarium moniliforme* causing bakanae disease. European J. of Molecular Biotec. 4(2) : 95-100.
- Sanster, A. G. and M. J. Hodson. 1986. Silica in higher plants. In: Evered, D. and O'Connor, M., Silicon biochemistry, Ciba Found Symp. 121, Wiley, Chichester, UK. pp. 90-111.
- Saremi, H. and F. Farrokhi. 2004. Study on bakanae disease of rice and evaluation of cultivar in Gilan and Zanjan provinces, Iran Proc. Fourth International Iran and Russia Conference pp. 358-364.
- Shin, D. B., J. D. Goh, B. C. Lee, I. J. Kang, and H. W. Kang. 2014. Use of sodium hypochlorite for the control bakanae disease in rice. J. Korean Society of Plant Pathology 20(4) : 259-263.
- Yamauchi, M. 2017. A review of iron-coating technology to stabilize rice direct seeding onto puddled soil. Agronomy Journal 109(3) : 739-749.
- Yoshida, S. 1973. Effect of temperature on growth of the rice plant (*Oryzae sativa*, L) in a controlled environment. Soil. Sci. Plant Nutr. 19 : 299-310.
- Yoshida, S. 1975. The physiology of silicon in rice. Food. Fert. Technol. Cent. ASPAC, Taiwan, Ext. Bull. 25: 1-23.
- Yoshida, S. 1981. Fundamentals of rice crop science. IRRI. pp. 58, 115, 177-181.