



고흡수성 수지 처리에 따른 토양 수분 함량과 배수 특성 변화

Changes in Soil Water Content and Drainage Characteristics with Superabsorbent Polymers Amendment

윤태강* · 손영환**,† · 박재성* · 김동근*

Yun, Tae-Kang · Son, Young-Hwan · Park, Jae-Sung · Kim, Dong-Geun

Abstract

Superabsorbent Polymers (SAPs) are hydrophilic synthetic polymers which could absorb water by hundreds of their own weight. They are used for multiple purpose including hygienic goods, soil conditioners, and hospital supplies. It is necessary to investigate the standard of their use including the amendment rate for soil application in agricultural fields. It is also important to understand their effects on the soil water content and engineering characteristics. The objective of this study is to find the water absorbing capacity and reusability of SAPs, and the characteristics of water release and effect of them on soil water content and engineering characteristics. In the result, SAPs per unit weight (1 g) used for this research could absorb about 200 g of water in max. The water absorbing capacity decreased after SAPs were used repeatedly. Released water of SAPs could provide the soils with about 9 % of the soil water content. Soil water content increased with decreasing distance from the SAPs. The distance of release was spreaded out with increasing water absorbed of SAPs. Finally, when a drainage and the capacity of soil water content were considered, it is recommended to amend the SAPs with soil by less than 0.25 %.

Keywords: Superabsorbent Polymers; Soil water content; Water absorbing capacity; Water release

1. 서론

고흡수성 수지 (Superabsorbent Polymers, SAPs)는 자체 중량의 수백 배에 해당하는 수분을 흡수할 수 있는 합성 고분자 물질이다. 고흡수성 수지는 1980년 미국 농무부 소속 한 연구소에서 옥수수 녹말의 복합구조에 대한 연구 중 녹말에 폴리락타이드를 사슬을 길게 접합시키는 방법을 통해 개발되었다 (Cha et al., 2012). 과거에 제조되었던 흡수성 수지는 수분 흡수율이 떨어지고 입자간 구조 내의 수분흡수능이 저조하였으며 생분해가 되지 않아 위생 용품 및 원예용 토양보수제 등에 사용하기에 부적절하였다 (KAERI, 2015). 그러나 최근 다양한 연구 및 기술 개발을 통해 높은 수분흡수능 및 생분해능이 향상되어 효율성, 환경 안정성 등이 개선된 고흡수

성 수지가 개발되었다 (KAERI, 2015).

고흡수성 수지는 일회용 기저귀, 여성용 생리용품 등의 위생용품 산업에서 활발히 사용되고 있다. 농업 및 원예 분야에서도 우수한 보수력과 수분 흡수 시 부피 팽창에 의한 경운 효과 등 발작물의 관개 효율성 증대를 위해 사용되고 있다. 뿐만 아니라 시설재배지에서의 배지 단위의 작물 생육 시에도 이용되고 있다. 다른 산업 분야에서는 위생매트, 파프제 및 창상보호제와 같은 병원용품, 냉팩, 온팩 및 방향소취제와 같은 화장품, 콘크리트 흡입제, 지주제 및 흡수성 마대와 같은 토목용 자재, 인공눈, 유수분리제, 흡수성 섬유와 같은 특수한 용도 등으로도 이용되고 있다 (KAERI, 2015). 또한 현재 세계 각지에 사막화가 진행된 지역에서 산림녹화 사업 등에 활용되고 있으며 이외에도 다양한 분야에서 고흡수성 수지의 사용이 활발히 이루어지고 있다 (Kyung et al., 2006).

고흡수성 수지는 일반적으로 토양 수분 함량을 증가시키고 토양 표면에서의 증발산량을 감소시키는 역할을 한다 (Akhter et al., 2004; EI-Hady and Wanas, 2006; Sarvas et al., 2007; Sivapalan et al., 2001). 또한 토양구조를 안정시키고 토양 내 영양물질의 잔류율을 향상시킨다 (Adams and Lockaby, 1987; Sivapalan et al., 2001). 이와 같이 토양의 물리성을 개선하는 토양 보수제 역할로서 고흡수성 수지가 이용되고 있다.

지구온난화로 인한 기온 상승은 수자원의 변화 및 작물 생

* Graduate student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

** Associate professor, Department of Rural Systems Engineering and Research Institute for Agriculture & Life Sciences, Seoul National University

† Corresponding author

Tel.: +81-2-880-4585 Fax: +81-2-873-2087

E-mail: syh86@snu.ac.kr

Received: April 23, 2016

Revised: May 9, 2016

Accepted: May 10, 2016

육에 직접적인 영향을 미치므로 발작물에 대한 관개용수량 및 관개방법 등 관개 효율성을 높이기 위한 연구는 지속적으로 수행되어왔다 (Nam et al., 2014; Choi et al., 2012). 고흡수성 수지에 대한 농업 분야에서의 기존 연구는 고흡수성 수지의 자체 개발 및 기존 수지와의 비교, 수분흡수능에 대한 검증 그리고 작물 생장에 미치는 영향이 주를 이루었다 (Ahn and Yoon, 2014; Kim et al., 2015; Kim et al., 2013; Bakass et al., 2000; Yang et al., 2014). 더불어 이온의 침투압, 고분자 전해질의 친수성, 가교 밀도와 같이 고흡수성 수지의 수분 흡수능에 대한 화학적인 기작에 의해 고흡수성 수지의 특성을 연구하였다 (Ahn et al., 1999). 하지만 실제 고흡수성 수지를 사용할 때 수분 흡수 및 건조에 따른 수분흡수능에 대한 연구는 부족한 실정이다. 또한 실제 수분을 흡수한 고흡수성 수지가 토양 수분 함량에 얼마나 영향을 미치는지에 대한 정량적인 기초 자료는 부족하며 고흡수성 수지의 재사용 여부와 이때의 수분 흡수능이 동일한지에 대한 검증이 필요하다.

흡수된 수분에 의하여 고흡수성 수지 표면의 점착성 (Stickiness)이 증가하고 입자간의 비가역적 응집 (Irreversible agglomeration)이 발생하기 때문에 (Lee et al., 2015) 실제 현장에서 혼합하여 사용 시 고흡수성 수지의 혼합율에 대한 기준이 필요하다. 또한 수분 방출에 대한 영향 범위, 배수성 등 실질적인 고려 사항에 대한 기초 연구는 미비한 실정이며 이에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 고흡수성 수지의 친수성에 대해 분석하고 이를 바탕으로 재사용성에 대한 검증을 실시하였다. 또한 토양 수분 함량에 대한 영향 및 수분 방출 거리에 대해서 분석하였으며 효율적인 혼합율에 대한 기준을 제시하였다.

II. 재료 및 방법

1. 재료

가. 고흡수성 수지

본 연구에서 사용된 고흡수성 수지는 현재 국내 L사에서 판매하고 있는 아크릴산 중합체, 나트륨염 (Sodium Polyacrylate) 을 사용하였다. 고흡수성 수지는 수분을 흡수하기 전에 백색 분말 형태이며 수분을 흡수한 뒤는 젤 형태로 변화하면서 부피가 급격하게 팽창하는 특성을 가지고 있다 (Photo 1).

Fig. 1은 수분 조건에 따른 고흡수성 수지의 물리적 상태 변화에 대한 모식도이다. 고흡수성 수지의 입경은 150~850 μm 에 해당되며 흰색의 분말 형태이다. 고흡수성 수지에 수분을 첨가할 시 급격히 부피가 팽창되는데 이때의 상태를 Swollen state라 한다. 고흡수성 수지는 일반적인 친수성 물질보다 수

분 흡수량이 큰 고분자이다. 수용성 고분자 사이를 가교시킴으로 3차원 그물 구조를 가지면서 다량의 친수기를 가지고 있는 고분자로 수불용성과 친수성을 동시에 가지고 있다.

반대로 외부압력, 외기 등에 의해 고흡수성 수지에 흡수된 수분을 제거하면 입자간 그물 구조가 Collapsed state로 변화한다. 이러한 고흡수성 수지의 팽윤 특성은 입자간 가교 밀도, 고흡수성 수지의 화학적 구조 그리고 흡수된 액체의 pH, 온도, 이온 농도 등에 따라 변화한다.

Fig. 2는 분말 형태의 고흡수성 수지와 수분을 흡수한 젤 형태의 모습을 도립형 광학현미경 (Inverted Light Microscope) 을 이용하여 60 배 확대한 사진이다. 고흡수성 수지 입자가 수분을 흡수하여 부피가 팽창하고 젤 형태로 변화하였다.

사용된 고흡수성 수지의 물질 특성은 Table 1과 같다. 현재 판매되고 있는 고흡수성 수지 중에서 대표적으로 사용되고 있는 것이 아크릴산을 가교제로 하는 아크릴산 중합체, 나트륨염 (Sodium Polyacrylate)이며 다양한 산업 분야에서 널리 이용되고 있다. 본 연구에 사용된 고흡수성 수지는 흰색 고체 형태의 powder이며 화학적 안정성 및 반응성의 경우 상온, 상

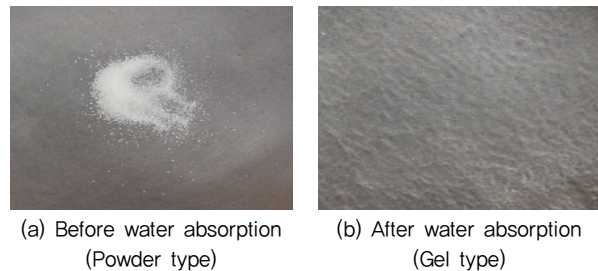


Photo 1 SAPs (Superabsorbent Polymers)

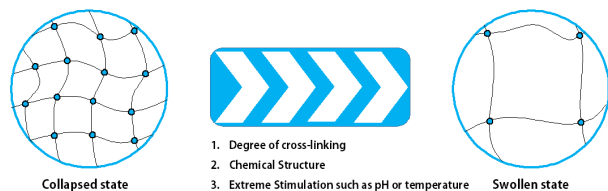


Fig. 1 Schematic diagram of SAPs in collapsed and swollen state (Siriwatwechakul, 2010)

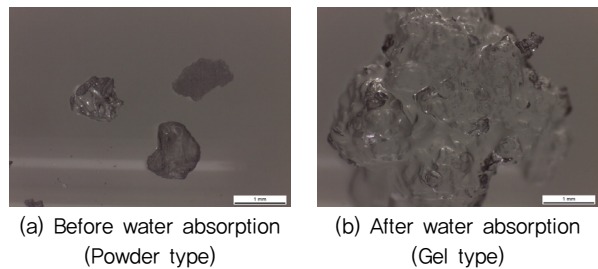


Fig. 2 Image of Inverted Light Microscope ($\times 60$)

압조건에서 안정하며 (KOSHA, 2010), 환경부고시 제2014-237호 유해화학물질 관리법에 따라 유해성 심사를 받은 안전한 화학물질이다 (NIER, 2016).

나. 공시 토양

사용된 토양 시료는 서울시 안암동 지역에서 채취한 화강풍화토로 4.75 mm 체 통과 시료를 사용하였다. 시료의 물리적 특성은 Table 2와 같다. KS F 2302 기준에 따라 입도 분석을 하였으며 통일분류법 상으로 Well-graded sand with silt (SW-SM)으로 분류되었으며, 입도 분포 곡선은 Fig. 3과 같다.

2. 실험방법

가. 고흡수성 수지의 친수성 평가

1) 수분 흡수 특성

Photo 2와 같이 고흡수성 수지 1, 2, 3 g을 넣은 부직포를 수

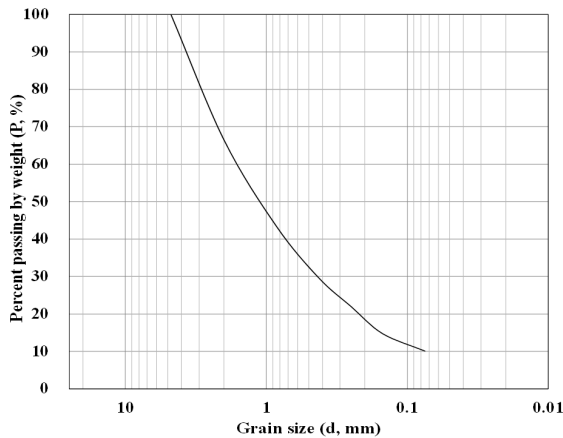


Fig. 3 Grain size distribution of the weathered soil

은 13.7 °C, pH 6.7의 수조에 수침시켰다. 식 (1)과 같이 고흡수성 수지의 수분흡수능 (Water holding ratio)이라 정의하였고, 팽윤된 고흡수성 수지의 중량을 건조된 고흡수성 수지의 중량으로 나누어 나타냈다. 이때 측정 전 상온에서 동일하게 10분간 방치하여 부직포 표면의 수분을 제거한 후 측정하였다. 이후 수분 흡수능의 변화가 미미할 때 고흡수성 수지의 수분 흡수력이 포화에 도달했다고 판단하였으며, 이때의 수분 흡수능을 고흡수성 수지 1 g당 흡수할 수 있는 최대 수분 양으로 정의하였다.

$$\text{Water holding ratio (g/g)} = \frac{W_2}{W_1} \quad (1)$$

where as, W_1 = Dried weight of SAPs (g)

W_2 = Swollen weight of SAPs (g)

2) 건조에 따른 수분 증발 특성

고흡수성 수지 1, 2, 3 g을 넣은 부직포를 수분 흡수량이 포화에 도달할 때까지 2시간 동안 팽윤시킨 후 상온에서 자연

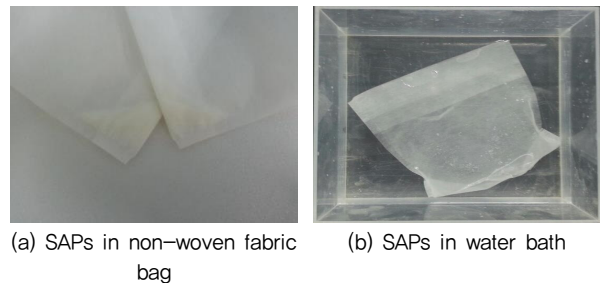


Photo 2 Test for measuring the water absorbing capacity of SAPs

Table 1 Properties of SAPs (NIER, 2016)

Chemical name	Molecular formula	Particle size (μ m)	Particle shape / type	Specific gravity	pH	Decomposition temperature (°C)
Sodium polyacrylate	(C ₃ H ₃ O ₂) _n ·Na	150~850	Random/Powder	1,11	5,5~6,5 (at 5,0 g/L 0,9 % NaCl)	288

Table 2 Physical properties of the weathered soil

G _s ^a	Passing size 0.075 mm (%)	D ₁₀ ^b (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	C _u ^c	C _c ^d	LL ^e	PL ^f	USCS ^g
2,64	10,10	0,075	0,44	1,60	21,28	1,62	NP	NP	SW-SM

※ ^a G_s : Specific gravity, ^b D_x : Particle size of x % Finer

※ ^c C_u : Coefficient of uniformity, ^d C_c : Coefficient of curvature

※ ^e LL : Liquid limit, ^f PL : Plastic limit, ^g USCS : Unified soil classification system

건조한 경우와 50 °C 온도로 Drying oven에서 인위적으로 건조한 경우를 나누어 실험하였다. 50 °C로 건조한 이유는 실제 기온보다 극심한 조건을 부여하기 위해서였고 이 후 수분을 흡수하기 전 고흡수성 수지의 자체 중량으로 감소할 때까지 측정하였으며 고흡수성 수지의 건조 중량 대비 수분 보유량으로 나타냈다.

3) 건조 후 고흡수성 수지의 수분 재흡수 특성

고흡수성 수지를 넣은 부직포를 수분 흡수력이 포화에 도달할 때까지 팽윤시킨 후 50 °C 온도로 Drying oven에서 인위적으로 건조하여 분말 상태였던 고흡수성 수지의 자체 중량까지 건조시켰다. 이 후 앞선 과정과 동일하게 반복하여 고흡수성 수지를 팽윤시켰다. 이 Cycle을 여러 번 반복하여 수분이 증발한 고흡수성 수지의 재사용 가능성을 확인하였다. Fig. 4는 수분 재흡수 특성을 검증하기 위한 실험의 모식도이다.

나. 토양 내에서 고흡수성 수지의 수분 방출 특성

1) 포화도에 따른 토양 수분 함량

고흡수성 수지의 수분 방출 특성 실험의 모식도는 Fig. 5와 같다. 팽윤된 고흡수성 수지에 흡수된 수분이 근접한 토양에 전달되는 정도를 파악하기 위해 가로 50 cm, 세로 35 cm Pan에 깊이 2 cm로 완전 건조된 화강풍화토를 포설하고 각 지점마다 직경 3 cm 크기의 Hole에 팽윤된 고흡수성 수지를 넣었다. 이 때 고흡수성 수지 자체가 흡수한 수분만을 적용하기 위해서 상기 실험과 동일하게 10 분간 상온에서 방치하여 표면의 수분을 제거하였다.

실온에서 고흡수성 수지 주변부로 확산되는 수분을 측정

하기 위해 시간 경과에 따라 고흡수성 수지 반경 5, 10, 15, 20 mm 거리의 지점에서 각 채취한 토양의 수분 함량을 측정하였다. 또한 고흡수성 수지가 수분을 최대 흡수했을 때 포화도 100 %로 정의하고 75 %, 50 %인 고흡수성 수지에 대해서도 동일하게 실험을 진행했다. 실험 조건은 Table 3과 같다.

2) 포화도에 따른 수분 방출 거리

고흡수성 수지에 흡수된 수분이 토양에 미치는 영향 거리를 파악하고자 50 cm 높이에서 시간 경과에 따라 사진을 촬영하였다. 이를 MediaCybernetics 社의 Image-pro plus 6.0 프로그램을 이용하여 Fig. 6과 같이 촬영된 사진 상의 Pixel 당 거리 (1 pixel = 0.1852 mm)를 각 지점마다 측정하였고 이 때 사방으로 방출된 거리의 평균값으로 표현하였다.

다. 혼합율에 따른 배수 및 팽윤 특성

고흡수성 수지의 혼합율에 따라 배수 특성과 부피 팽창을 확인하기 위해 Table 4와 같은 조건으로 고흡수성 수지의 혼합율을 달리한 혼합 시료를 Photo 3과 같이 성형하였다.

고흡수성 수지의 혼합율은 기존 연구들을 참고하여 1.0 % 이하로 결정하였으며 0.2 %씩 간격으로 혼합하였다. 화강풍

Table 3 Conditions for the test of measuring the soil water content

Saturation (%)	SAPs		Measurement		Air condition	
	Swollen SAPs (g)	Diameter (cm)	Number of measure	Radius (mm)	Temp. (°C)	RH (%)
100	9.0 ± 1.0	3	12	5	14.5	37
75				10		
				15		
50				20		

Cycle of water absorption and drying

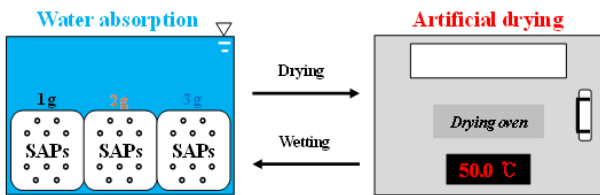


Fig. 4 Schematic diagram of the test for reusability of SAPs

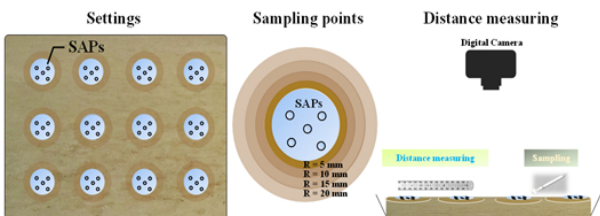


Fig. 5 Schematic diagram for the test of water release

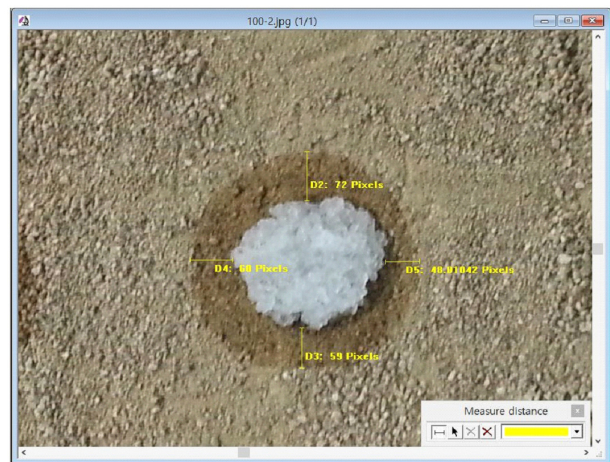


Fig. 6 Image of water release by Image-pro plus 6.0

Table 4 Conditions of the test for drainage and swelling with SAPs mixing ratio

Diameter (cm)	Height (cm)	γ_d (kN/m ³)	Wt of soil (g)	Mixing ratio of SAPs (%)	Wt of water (g)
5	15	17.17	500.69	0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0	196.35

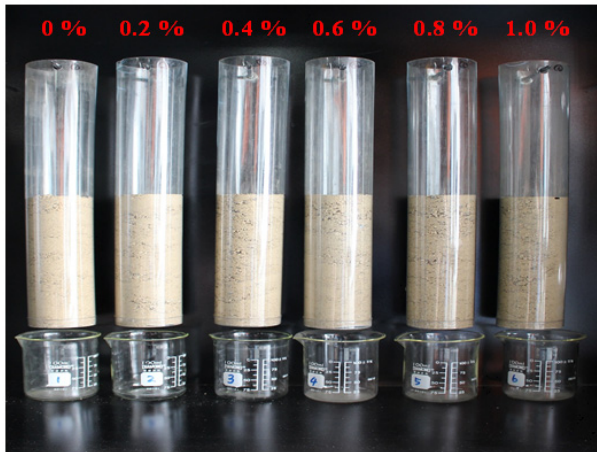


Photo 3 Test equipment for drainage and swelling as mixing ratio

화토와 고흡수성 수지의 혼합 시료를 직경 5 cm, 높이 40 cm PVC 재질의 통에 성형하였다. 혼합 시료는 15 cm 높이에 화강풍화토의 최대건조단위중량 19.03 kN/m³의 90%에 해당되는 17.17 kN/m³ 건조단위중량으로 제작하였다. 그리고 하부에 배수 조건을 구현하기 위해서 통 하단부에 2.5 mm 직경의 구멍을 2 mm 간격으로 천공하고, 시료의 유실을 막기 위해 내측에 Filter paper를 부착하였다. 투입된 물의 양은 100 mm 강우가 발생했을 때의 양, 총 196.35 g을 초기에 각 혼합 시료에 동일하게 투입하였다.

투입된 물의 양 대비 배수된 양을 배수율(Drained ratio)로 정의하였으며 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다. 그리고 팽윤 특성의 경우 수분을 흡수한 혼합 시료의 부피 변화를 토대로 건조단위중량(γ_d , kN/m³)으로 나타냈다.

$$\text{Drained ratio (\%)} = \frac{W_D}{W_I} \times 100 \quad (2)$$

where as, W_D = Weight of drained water (g)
 W_I = Weight of irrigated water (g)

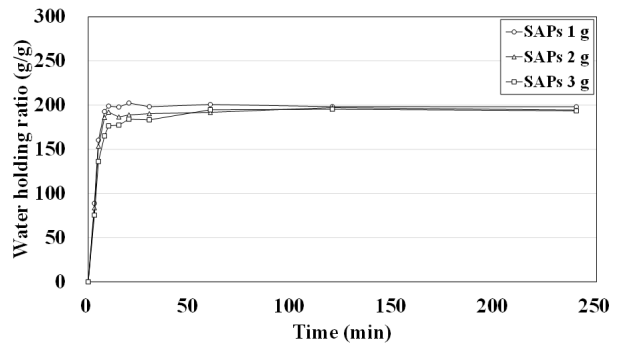


Fig. 7 Water holding ratio of SAPs per unit weight

III. 결과 및 고찰

1. 고흡수성 수지의 친수성 평가

가. 수분 흡수 특성

고흡수성 수지 무게(1, 2, 3 g)와 상관없이 고흡수성 수지 1 g 당 최대 수분 흡수량은 약 200 g에 수렴하였고, 고흡수성 수지의 양에 따라 수렴되는 시간은 1 g은 약 8 분, 2, 3 g은 약 120 분으로 나타났다(Fig. 7). 공통적으로 수침 후 5 분 내에서의 수분흡수능은 크게 차이를 보이지 않았다. 그러나 다량의 고흡수성 수지가 응집되어 있을 경우 수분을 흡수할 수 있는 비표면적이 감소하고 이에 팽윤됨에 따라 최대 수분 흡수량으로 도달하는 시점이 연장되는 것으로 판단되었다. 수침 후 수분 흡수량이 변하지 않는 것으로 판단할 때 최대 수분 흡수량은 약 200 g인 것으로 판단되었다.

나. 건조에 따른 수분 증발 특성

자연 건조의 경우 약 550 시간(약 23일)이 경과한 후 고흡수성 수지 1 g이 흡수했던 수분이 대부분 건조되었다. 동일한 시간이 경과한 후 2, 3 g은 건조가 완료되지 않았으며 시간에 따른 두 조건의 경향은 유사하였다. 반면 50 °C 온도에서 인위 건조를 한 경우 고흡수성 수지 1 g은 약 24 시간, 2 g은 약 32 시간, 3 g은 약 42 시간이 경과한 후 흡수했던 수분이 모두 건조되었다(Fig. 8).

공통적으로 자연 건조 조건과 인위 건조 조건에서 흡수된 수분 양의 감소 추세는 고흡수성 수지의 자체 중량에 따라 상이하였다. 이는 Fig. 7의 결과와 동일한 이유로 판단되었다. Powder 형태의 고흡수성 수지가 수분을 흡수하며 Hydrogel 형태로 변화한 후 건조시킬 때 고흡수성 수지의 중량에 따른 비표면적의 차이 및 입자간 비가역적 응집에 의한 것으로 판단되었다.

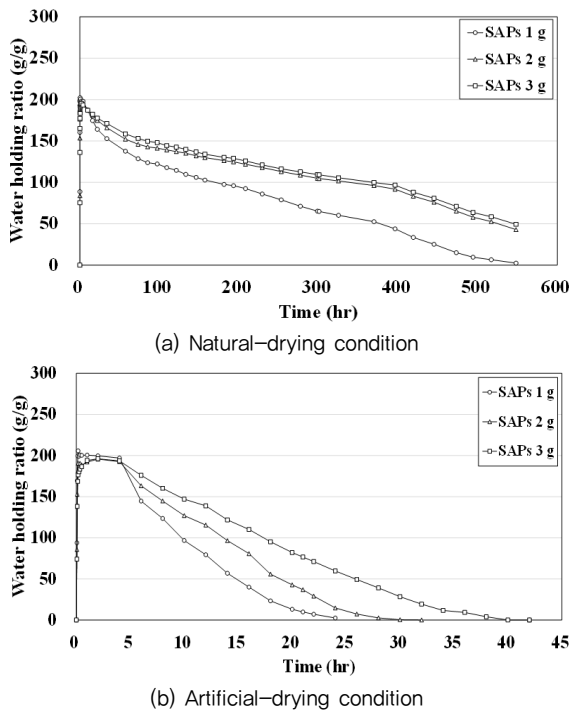


Fig. 8 Water holding ratio of SAPs per unit weight

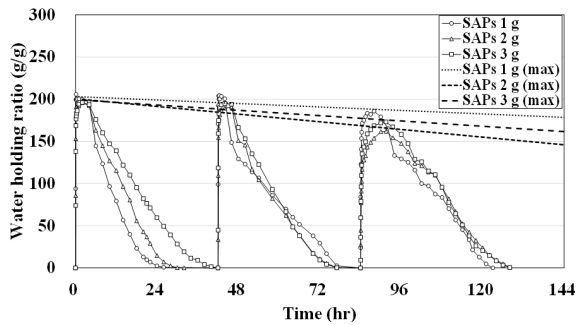


Fig. 9 Change of water holding ratio as swelling and drying cycles

Table 5 Maximum water holding ratio per unit weight of SAPs

Case	Water holding ratio at max (g/g)			Percent of decreasing (%)
	1 st cycle	2 nd cycle	3 rd cycle	
SAPs 1 g	200.58	200.21	185.88	7.33
SAPs 2 g	195.76	190.94	161.94	19.26
SAPs 3 g	196.03	193.31	172.98	13.76

Table 6 Equations of maximum water holding ratio

Case	Equation	Correlation coefficient (R ²)
SAPs 1 g	$y = -0.17x + 203.07$	0.92
SAPs 2 g	$y = -0.38x + 200.52$	0.95
SAPs 3 g	$y = -0.26x + 199.38$	0.95

다. 건조에 따른 수분 재흡수 특성

고흡수성 수지를 대상으로 수분흡수 건조-재흡수 과정을 3회 반복한 후 고흡수성 수지 1 g 당 최대 수분 흡수량은 고흡수성 수지 1 g은 약 7.33 %, 2 g은 약 19.26 %, 3 g은 약 13.76 % 감소하였다(Fig. 9 and Table 5). 이는 재사용 시 최대 수분 흡수량이 감소하며 고흡수성 수지가 응집된 상태로 수분 흡수를 반복하면 입자의 친수성능의 감소 및 가교제의 변이 등 화학적 변화에 의해 고흡수성 수지 1 g 당 최대 수분 흡수량이 감소하는 것으로 판단되었다.

이에 대한 각 고흡수성 수지의 중량 조건 별 고흡수성 수지 1 g 당 최대 수분 흡수량의 경향을 수식으로 표현하였다(Table 6). 추후 실험을 연속적으로 진행하여 고흡수성 수지의 재사용 횟수 및 수분흡수능의 감소 추이에 대하여 확인해야 한다. 결과적으로 실제 토양에 고흡수성 수지를 이용할 때 보수 효과의 향상을 위해서 고르게 혼합시키는 것이 효율적인 것으로 판단되며 재사용 시 그 효과가 뚜렷한 차이를 보이는 것으로 판단되었다.

2. 고흡수성 수지의 토양 내 수분 방출 특성

가. 포화도에 따른 토양 수분 함량

고흡수성 수지와 근접할수록 토양 수분 함량이 높은 것으로 나타났다(Fig. 10). 포화도 100 %의 경우 인접한 토양 수분 함량이 최대 9 % 가량을 나타냈다. 또한 포화도가 높을수록, 고흡수성 수지가 흡수한 수분 양이 최대일수록 인접한 토양에 방출하는 수분 양이 증가했다. 포화도 75 %, 50 %의 경우 100 %에 비해 근접한 토양에 미치는 영향이 전체적으로 미미했으며 실질적으로 반경 5 mm 이상의 경우 고흡수성 수지가 흡수한 수분의 영향을 받지 못하는 것으로 나타났다. 이는 지속적이고 효과적인 수분 공급 측면에서 고려해봤을 때 고흡수성 수지를 혼합한 토양에 관개 시 고흡수성 수지의 수분 흡수량을 최대로 충족시킬수록 이후 관개량, 관개 주기 등의 측면에서 효과를 극대화시킬 수 있을 것으로 판단되었다.

반면 공통적으로 포화도와 무관하게 시간 경과에 따라 고흡수성 수지에 인접한 토양의 수분 함량은 인접하지 않은 곳에 비해 상대적으로 일정 수준으로 지속되는 것을 확인하였으며 48 시간 경과 후에도 1.5~2.0 % 가량 유지되는 것으로 확인하였다. 이는 표면 증발에 의해 토양 수분 함량이 감소함에도 불구하고 고흡수성 수지가 비교적 지속적으로 수분을 방출하는 것으로 판단되었다.

나. 포화도에 따른 수분 방출 거리

포화도가 높을수록 고흡수성 수지의 수분 방출 거리는 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 11). 그리고 전체적으로 3 시간

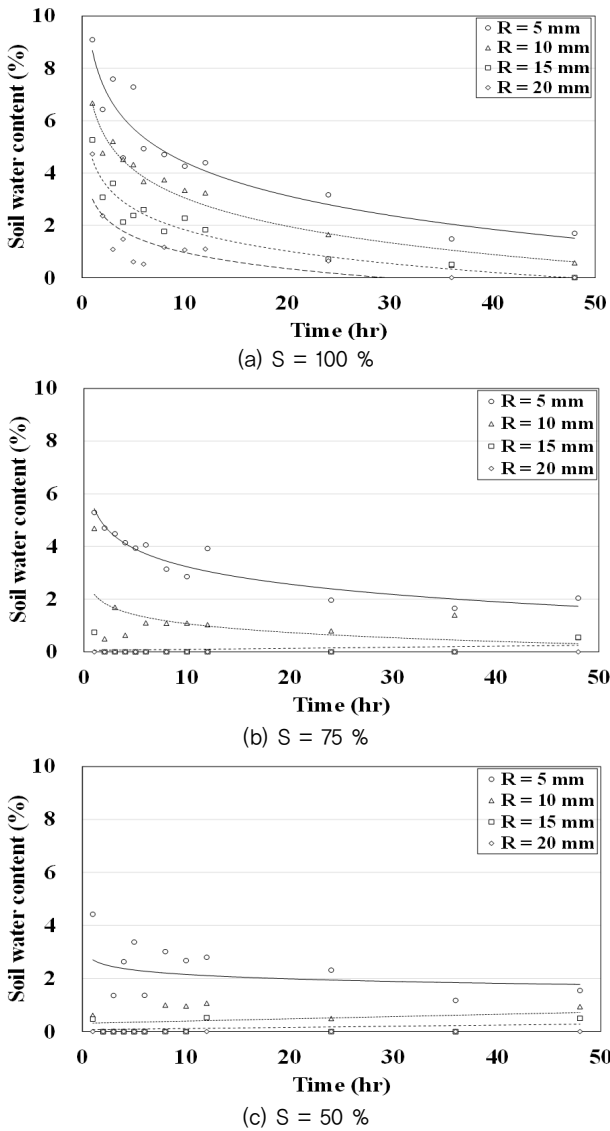


Fig. 10 Soil water content of soil amended with swollen SAPs (S : Saturation of SAPs)

이후의 측정값이 표면 증발에 의해 감소한 것으로 볼 때 실제 최대 수분 방출 거리는 3 시간 경과 시의 측정된 거리임을 알 수 있었다. 이에 포화도에 따른 수분 방출 특성 결과는 Table 7 과 같다. 포화도 100 %에서 11.55 mm, 75 %에서 3.69 mm, 50 %에서 2.55 mm인 것으로 나타났다. 포화도 75 %, 50 %의 경우 수분 방출 거리가 큰 차이가 없었지만 포화도 100 %일 때 수분 방출 거리가 크게 증가하였다. 고흡수성 수지의 면적 대비 수분 방출 영역을 비율로 나타내면 포화도 100 %는 0.92, 75 %는 0.26 50 %는 0.18인 것으로 나타났다. 이에 따라 고흡수성 수지가 최대 수분을 흡수하였을 때 수분 방출 양, 토양 내 영향 범위 측면에서 효과적인 것으로 판단되었다.

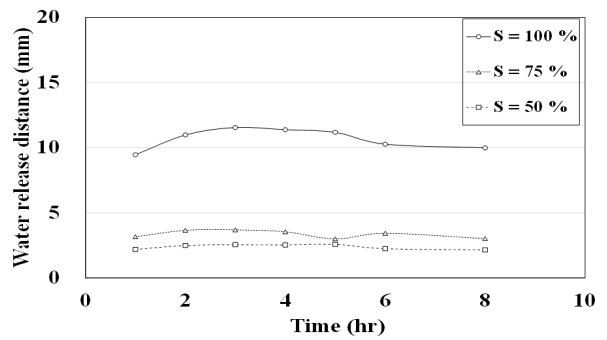


Fig. 11 Distance of water release at soil amended with swollen SAPs

Table 7 Results for the test of water release as saturation

Saturation (%)	Distance (mm)	Released area (mm ²)	Ratio of release
100	11,55	649,06	0,92
75	3,69	184,58	0,26
50	2,55	125,27	0,18

3. 혼합물에 따른 배수 및 팽윤 특성

가. 혼합물에 따른 토양 배수 특성

24 시간 경과 후 0.6 % 이상의 혼합 시료에서는 배수가 종료되지 않았다 (Photo 4). 이에 고흡수성 수지의 혼합율이 일정 값 이상이면 원활한 배수에 방해가 되는 것으로 판단되었다. 따라서 배수가 불량한 0.6 % 이상의 혼합율은 제외하고 0.4 % 이하의 혼합율에 대하여 0.05 % 간격으로 0.0 ~ 0.4 % 의 9가지 경우에 대하여 분석하였다.

고흡수성 수지 혼합율 0.0 ~ 0.4 %에 따른 배수 특성 실험 결과 혼합율이 증가할수록 배수율이 감소하였다 (Fig. 12). 이는 배수된 물을 제외한 나머지 양을 흙 내부의 고흡수성 수지가 흡수한 것으로 판단되었다. 강우, 관개 등의 수분 공급이 발생하였을 때 토양 내로 물이 침투되는 동안 고흡수성 수지가 수분을 흡수하기 때문에 토양 하부로 자연 배수되는 물을 포집하는 역할을 한다. 따라서 토양 내 고흡수성 수지를 혼합 시 토양 수분 함량을 증가시키는 순기능을 하는 것으로 판단 되었다.

그러나 고흡수성 수지를 혼합하지 않은 시료는 2 시간 전 후로 투입 양 대비 약 60 %의 물이 배수가 되는데 비해 혼합한 시료는 대부분 12 시간을 전 후로 배수가 완료되었다. 이는 초기의 토양 수분 함량이 약 40 %에서 48 시간 경과 후 고흡수성 수지를 혼합하지 않은 시료의 토양 수분 함량은 12.74 %, 고흡수성 수지를 혼합한 경우는 15.34 ~ 29.28 %을 나타냈다. 이에 고흡수성 수지를 혼합했을 때 토양 내 수분흡수능이

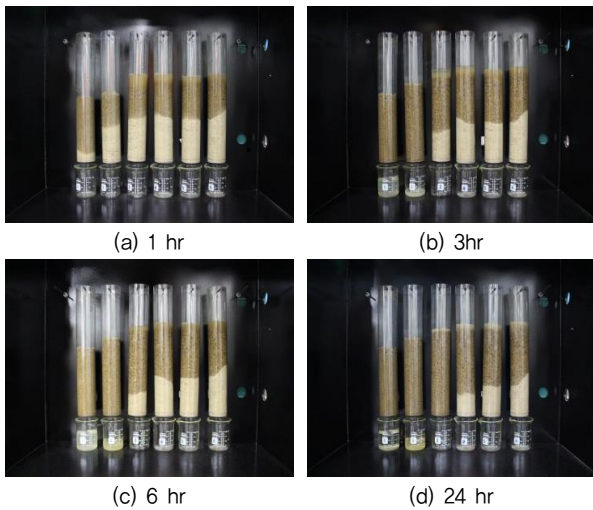


Photo 4 Drained state as mixing ratio of SAPs (Mixing ratio : 0.0 ~ 1.0 %, 0.2 % steps)

실제 1.2~2.3 배 증가하는 것으로 판단되었다. 고흡수성 수지가 토양 수분 함량을 증가시키지만 고흡수성 수지의 양을 증가시키면 배수 문제를 유발할 수 있다.

혼합율 0.25 % 이하의 경우 4 시간 경과 시 투입된 물의 약 30~60 %가 배수된 것에 비해 0.30 % 이상 혼합한 시료는 약 3.5~6.0 %만이 배수되었다. 고흡수성 수지 혼합량의 미소한 차이로 인해 배수성에 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 토양 수분 함량이 높다고 무조건 토양에 이로운 것은 아니다. 작물을 위한 물 관리 측면에서 배수는 농경지의 침수나 과잉수분에 의한 피해를 방지하고 작물의 정상적인 생육을 위하여 과잉수분을 제거해야하기 때문이다 (NIAS, 2007). 따라서 배수성 및 토양 수분흡수능 등을 고려하였을 때 고흡수성 수지를 0.25 % 이하로 혼합하여 사용하는 것이 효율적인 것으로 판단되었다.

나. 혼합율에 따른 팽윤 특성

초기 건조단위중량이 17.17 kN/m³에 비해 혼합 시료의 배수 완료 시점인 24 시간 경과 후 혼합율 0.05 %는 약 14.90 kN/m³, 혼합율 0.25 %는 약 13.34 kN/m³으로 약 13 ~ 22 % 가량 건조단위중량이 감소하는 것으로 나타났다 (Fig. 13). 이는 과채류, 엽채류, 단근채, 장근채 등의 표토심에서의 단위중량 12.26~13.24 kN/m³ (Cho et al., 2012)와 비교해보면 유의 수준이라 판단할 수 있다. 따라서 배수성능, 토양 수분흡수능, 건조단위중량 등을 고려하여 0.25 % 이하로 고흡수성 수지를 혼합하여 사용하는 것이 효율적이라고 판단되었다.

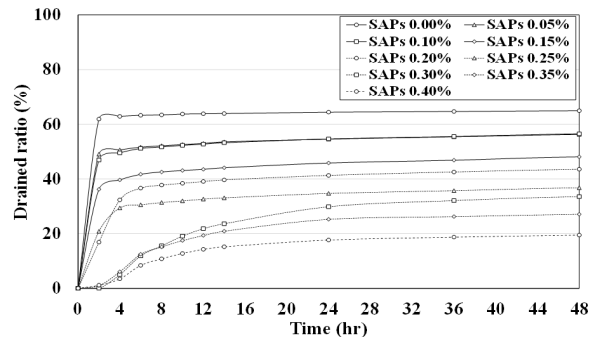


Fig. 12 Drained ratio as mixing ratio of SAPs

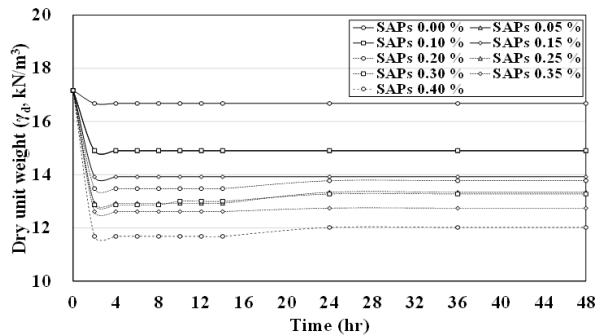


Fig. 13 Dry unit weight as mixing ratio of SAPs

IV. 요약 및 결론

본 연구는 고흡수성 수지의 수분 흡수, 증발 및 재흡수 특성을 파악하고 이를 바탕으로 재사용성에 대한 검증을 실시하였다. 또한 토양 수분 함량에 대한 영향 및 수분 방출 거리에 대해서 분석하였으며 효율적인 혼합율에 대한 기준을 제시하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구에서 사용된 고흡수성 수지인 아크릴산 중합체, 나트륨염의 경우 최대 수분 흡수량은 고흡수성 수지 1 g 당 약 200 g이며 최대 수분 흡수량에 도달하는 시간은 1 g 기준 약 8 분으로 나타났다.
2. 최대로 팽윤된 고흡수성 수지 1 g을 각각 자연 건조 조건과 50 °C의 인위 건조 조건에서 건조 시 자연 건조 조건은 약 550 시간 (약 23 일), 인위 건조 조건은 약 24 시간 후에 모두 증발하였다. 이는 고흡수성 수지 중량에 따라 비표면적의 차이, 비가역적 응집 등에 의한 차이로 판단되었다.
3. 고흡수성 수지를 3 회 재흡수 반복 후, 고흡수성 수지 1 g 당 최대 수분 흡수량은 고흡수성 수지 1 g은 약 7.33 %, 고흡수성 수지 2 g은 약 19.26 %, 고흡수성 수지 3 g은 약 13.76 % 감소하였다. 고흡수성 수지 재사용 시 최대 수분 흡수 능력이 감소하는 것으로 나타났다. 또한 고흡수성 수지의 중량

- 이 증가할수록 재흡수 과정에서 최대 수분 흡수량이 감소하는 것으로 나타났기 때문에 실제 토양에 적용 시 고르게 분포할 수 있도록 혼합하는 것이 중요하다고 판단되었다.
4. 포화도 100 %의 경우 인접한 토양 수분 함량이 최대 9 % 가량을 나타냈다. 포화도 75 %, 50 %의 경우 100 %에 비해 근접한 토양에 미치는 영향이 전체적으로 미미했다. 즉, 근접한 토양일수록, 포화도가 높을수록 수분 방출 양과 최대 수분 방출 거리는 증가했다. 그러나 48 시간 경과 후에도 고흡수성 수지와 근접한 토양에서 약 1.5 ~ 2.0 %의 토양 수분이 존재하는 것으로 보아 지속적인 수분 방출이 이루어지는 것으로 판단되었다.
 5. 고흡수성 수지의 최대 수분 방출 거리는 포화도 100 %에서 11.55 mm, 75 %에서 3.69 mm, 50 %에서 2.55 mm인 것으로 나타났다. 고흡수성 수지의 면적 대비 수분 방출 영역을 비율로 나타내면 포화도 100 %는 0.92, 75 %는 0.26 50 %는 0.18인 것으로 나타났다.
 6. 고흡수성 수지를 0.25 % 이하로 혼합했을 때 배수는 12 시간 전후로 완료되는 것으로 나타났으며 48 시간 경과 후 고흡수성 수지를 혼합하지 않은 경우 보다 토양 수분 함량이 1.2~2.3 배 증가한 것으로 나타났다. 또한 부피 팽창에 따른 건조단위중량은 약 13~22 % 감소하지만 대표적인 발작물의 단위중량과 유의 수준으로 나타났다. 따라서 배수성능, 토양 수분흡수능, 건조단위중량 등을 고려하여 0.25 % 이하로 고흡수성 수지를 혼합하여 사용하는 것이 적절하다고 판단되었다.
 7. 본 연구의 결과를 통하여 고흡수성 수지를 실제 토양에 사용할 때 기초 자료로 활용할 수 있을 것이다. 추후 가뭄 시 관개주기, 관개량 등의 개선을 위해 고흡수성 수지 처리에 따른 밭 토양에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2015년도 농림축산식품부 농생명산업기술개발사업(114147-3) 및 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2014R1A2A1A11051680).

REFERENCES

1. Adams, J. C., and B. G. Lockaby, 1987. Commercial Produced Super Absorbent Material Increases Water-holding Capacity of Soil Medium. *Tree Planters Notes* 38: 24-25.
2. Akhter, J., K. Mahmood, K. A. Malik, A. Mardan, M. Ahmad, and M. M. Iqbal, 2004. Effects of Hydrogel Amendment on Water Storage of Sandy Loam and Loam Soils and Grainling Growth of Barley, Wheat and Chickpea. *Plant Soil Environment* 50: 463-469.
3. Ahn, K. D., and M. J. Yoon, 2014. Preparation and Characterization of Bead Type Superabsorbent Resin. *The Polymer Society of Korea* 38(6): 760-766 (in Korean).
4. An, J. S., and K. J. Yoon, 1999. Application of Superabsorbent Polymers to Soil. *Polymer Science and Technology*, ed. D. W. Son, 10(2): 215-223. Seoul, Korea.: TKSP.
5. Bakass, M., A. Mokhlisse, and M. Lallemand, 2000. Absorption and Desorption of Liquid Water by a Superabsorbent Polymer: Effect of Polymer in the Drying of the Soil and the Quality of Certain Plants. *Journal of Applied Polymer Science* 83: 234-243.
6. Cha, G. C., J. S. Song, and S. M. Lee, 2012. Study on the Characteristics of the Absorbency Silicone by Super Absorbent Polymers. *Elastomers and Composites* 47(2): 141-147 (in Korean).
7. Cho, H. R., Y.S. Zhang, K.H. Han, H.J. Cho, J.H. Ryu, K.Y. Jung, K.R. Cho, A.S. Ro, S.J. Lim, S.C. Choi, J.I. Lee, W.K. Lee, B.K. Ahn, B.H. Kim, C.Y. Kim, J.H. Park, S.H. Hyun, 2012. Soil Physical Properties of Arable Land by Land Use Across the Country. *Korean Society of Soil Sciences and Fertilizer* 45(3): 344-352 (in Korean).
8. Choi, S. K., J. Y. Choi, W. H. Nam, S. O. Hur, H. J. Kim, S. O. Chung, K. H. Han, 2012. Uniformity Assessment of Soil Moisture Redistribution for Drip Irrigation. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(3): 19-28 (in Korean).
9. El-Hady, O. A., and S. A. Wanas, 2006. Water and Fertilizer Use Efficiency by Cucumber Grown under Stress on Sandy Soil Treated with Acrylamide Hydrogels. *J. Applied Sciences Res* 2: 1293-1297.
10. Kang, P. H., 2015. 2015 Technical Descriptions of Commercialization Promising Technology; The production of Environment-friendly Superabsorbent Polymers, 3-4. KAERI. Daejeon, Korea: *Korea Atomic Energy Research Institute*.
11. Kim, J. H., D. K. Oh, and Y. H. Yoon, 2013. Effects of Super Absorbent Polymer on the Growth of Vine Plants. *Journal of Environmental Science International* 22(7): 801-810 (in Korean).
12. Kim, M. Y., Y. H. Choi, S. B. Lee, H. J. Kim, S. H. Kim, Y. J. Kim, 2015. Polyacrylamide, Its Beneficial Application of Soil Erosion Control from Sloped Agricultural Fields.

- Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(5): 123-128 (in Korean).
13. Kim, S. W., 2015. Effect of Combination Treatment of Soil Bacteria, Rockwool and Super Absorbent Polymer on the Growth of Crop. Ph.D. diss., ChunCheon, Korea.: Kangwon National University (in Korea).
 14. Korea Occupational Safety & Health Agency, 2010. Material Safety Data Sheet. Seoul, Korea.
 15. Kyung, J. H., W. S. Son, N. J. Noh, M. J. Yi, C. Y. Lee, and H. J. Youn, 2006. Articles : Changes in Growth and Nutrient Contents of Populus Alba Var. Pyramidalis Teated with Fertilizers and Absorbents in an Arid Region of China. *J. Korean Forest Society* 95(6): 751-758 (in Korean).
 16. Lee, S. M., Y. S. Kim, K. S. Oh, Y. I. Yang, and Y. H. Kim, 2015. High Absorbent Resin and Method for Preparing of Same, 10-2015-0064712.
 17. Nam, W. H., E. M. Hong, M. W. Jang, J. Y. Choi, 2014. Projection of Consumptive Use and Irrigation Water for Major Upland Crops using Soil Moisture Model under Climate Change. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(5): 77-87 (in Korean).
 18. National Institute of Agricultural Sciences, 2007. The Technology of Water Management to Upland Crops for Effective Utilization of Agricultural Water, 25. Jeonbuk, Jeonju, Korea.
 19. National Institute of Environmental Research, 2016. International Chemical Safety Cards. Gwacheon, Gyeonggi, Korea.
 20. Sarvas, M., P. Pavlenda, and E. Takacova, 2007. Effect of Hydrogel Application on Survival and Growth of Pine Grainling in Reclamations. *J. Forest Sci* 53: 204-209.
 21. Siriwatwechakul, W., J. Siramanont, and W. VichitVadakan, 2010. Superabsorbent Polymer Structures. *International RILEM Conference on Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete*, 253-262. Lyngby, Danmark.: RILEM.
 22. Sivapalan, S., 2001. Effect of a Polymer on Growth and Yiled of Soybeans (Glycine Max) Grown in a Coarse Textured Soil. *Irrigation 2001 Regional Conference*, 93-99. Toowoomba, Queensland, Australia.: IAA.
 23. Yang, L., Y. Yang, Z. Chen, C. Guo, and S. Li, 2014. Influence of Super Absorbent Polymer on Soil Water Retention, Seed Germination and Plant Survivals for Rocky Slopes Eco-engineering. *Ecological Engineering* 62: 27-32.