



소규모 밭 관개용수 확보를 위한 소류천 빗물 집수장치의 현장 평가

On-site Evaluation of Rainwater Harvesting Device for Securing Irrigation Water in Small Fields

최용훈* · 김영진*[†] · 김민영* · 전종길*

Choi, Yonghun · Kim, Youngjin · Kim, Minyoung · Jeon, Jonggil

Abstract

A rainwater harvesting device was developed for runoff flow harvesting in a small stream or channel and its performance was evaluated in small fields. The rainwater harvesting device has slits on its side of cylindrical volume in 15 cm diameter and 70 cm length, which is designed to increase its water flow harvesting capacity. The maximum collectable water quantity was about 0.0022 ton/sec (130 L/min). Rainwater harvesting device were installed in two locations (P1, P2). P1 is a point for rainfall runoff flow harvesting. P2 is a point for ordinary flow harvesting. During this study, total rainfall depth was 334.5 mm. Runoff of 1,722 ton and 7,984 ton occurred in P1 and P2, and 273 ton and 125 ton were collected by this rainwater harvesting device. Harvesting efficiency was calculated as 15.85 % and 1.57 % in P1 and P2. Clogging of screen filter media in the cylinder due to soil and suspended solids has lowered the harvesting efficiency. However, it was possible to harvest 30 ton/month of rainwater harvesting and it is expected that it will help to solve short-term water shortage.

Keywords: Harvesting efficiency; rainwater harvesting device; water shortage

1. 서 론

우리나라는 여름철에 집중된 강우와 반도라는 지형적 특성으로 대수층이 발달하지 못하여 가뭄에 취약하다. 1990년대 이후 관개 기술의 발달, 댐 및 저수지와 같은 수자원 시설 확보 등 여러 가지 가뭄에 대한 방안이 활용되었으나, 가뭄에 대한 경각심 부족과 지역단위 수자원의 불균형 그리고 지속적인 가뭄 정책의 미흡 등으로 여전히 가뭄에 대한 피해가 발생하고 있다 (Kim et al., 2015).

특히 2015년 가뭄에 의한 피해는 매우 심각한 수준이었다. 5월에서 9월까지 강수량이 전국 평균 548.6 mm로써 평년을 기준으로 53.8 % 적은 것으로 조사되었다. 남부지역을 제외한 대부분의 농경지에서 물 부족으로 인한 농작물 피해가 발생하였다. 총 가뭄피해 면적이 7,513 ha로써 이 가운데 논밭 마름 면적은 2,977 ha, 밭작물 시들 면적은 4,536 ha로 조사되었다 (KMA, 2015). 논에 비하여 밭의 피해 규모가 큰 원인은 관개시설 보급률의 차이에서 볼 수 있다. 관개시설이 보급된

수리답 비율은 2014년 기준 80.6 %에 이르고 있으며 (KRC, 2016), 밭의 경우 2014년을 기준으로 관개전 비율은 18 %에 불과하다 (MAFRA, 2015).

또한 우리나라의 용수 이용현황에서 농업용수가 차지하는 부분은 136억 톤으로 전체 239억 톤의 57 %로 매우 높은 비중을 차지하고 있다. 농업용수의 80 %가 논에서 이용되고 있고, 밭에서 이용되는 용수는 18 %로 논에 비해 상대적으로 가뭄에 불리한 구조이다 (MOLIT, 2016). 용수 공급이 어려운 지역에서 밭작물을 재배하는 경우 주로 관정을 이용한 지하수가 관개 공급원으로 사용되고 있기 때문에 특별한 관개 대책을 세우기가 어려워 가뭄에 취약할 수 밖에 없다.

2015년 가뭄피해를 계기로 농림수산식품부는 당해부터 농업, 농촌부문 가뭄대응 종합대책의 일환으로 가뭄상습지역 발용수 공급, 관정 및 발용수 체계적 관리강화, 천수답의 발전 환 유도, 산간 및 오지지역 용수 공급 대책 등의 가뭄 대책을 발표하였으며, 관개전 보급률을 2014년 기준 18 % 수준에서 2030년 30 %까지 향상하는 것을 목표로 하고 있다 (MAFRA, 2015). 반면, 현재의 기술로 관개시설을 보급하면 경제성 확보를 위해 10~30 ha의 크기로 밭을 집단화해야 하지만, 집단화가 가능한 밭의 면적이 14~23 % 수준으로 조사되고 있다 (Kim and Chae, 2014). 따라서 소규모 필지에 산재되어 있는 나머지 밭에 대한 가뭄대응 용수확보 방안을 연구할 필요가 있다. 또한 관련 정책의 대부분이 용수 공급에 초점에 맞추어져 있기 때문에 대체 수자원을 개발하고, 보관하는 연구도 함

* Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Science, Rural Development Administration

† Corresponding author

Tel.: +82-63-238-4159 Fax: +82-63-238-4145

E-mail: mukta73@korea.kr

Received: October 23, 2017

Revised: November 22, 2017

Accepted: November 22, 2017

계 이루어질 필요가 있다. 다양한 분야에서 다양한 방법으로 빗물을 집수하고, 저장하는 기술을 연구하고 있다.

빗물 관리 시설의 용량 결정 등에 필요한 지붕면 누적유출용적을 예측하기 위한 경험식이 개발되었으며 (Kim et al., 2009), 자연형 지하 저류조 및 침투시설 등 저류 시설에 대한 내구성과 환경성 평가 등을 수행한 연구도 진행되었다 (Song et al., 2009). 또한 오수정화시설을 초기우수 저류시설로 재활용하는 가능성을 평가하였으며 (Jung et al., 2014), 빗물 재활용을 위한 하이브리드 우수처리장치가 개발되었다 (Jung and Lee, 2017). 오스트레일리아에서는 빗물의 50%를 농업에 재활용하는 등 선진국을 중심으로 빗물의 농업적 이용이 연구되고 있지만 (Eo and Lee, 2012), 우리나라에서 빗물을 농업용으로 활용하는 연구는 제주도 지역의 시설하우스와 관련된 연구 (Park and Koh, 2006; Youn et al., 2016), 온실 시설물의 저수조 용량을 산정하는 연구 (Seo and Gu, 2016) 등 주로 시설 하우스와 관련된 연구로 국한되어 있다. Jun et al. (2013)은 강원도 태백시를 중심으로 가뭄시 고랭지 농업의 피해를 저감하기 위한 방법으로 소규모 빗물 이용시설의 적용 가능성을 평가하였으나, 빗물 집수와 관련된 부분은 크게 언급되지는 않았다. 이렇듯 대부분 지붕면을 통해 유출되는 빗물을 저장하고 활용하는 방법에 대한 연구에 초점이 맞추어져 있어, 빗물을 집수하는 방법에 관련된 연구는 크게 부각되고 있지 않다.

본 연구에서는 약 10 a 크기의 소규모 밭에서 사용할 수 있는 대체 농업용수를 확보하기 위하여 강우시 발생하는 지표 유출수를 자연 소류천 또는 배수로에서 포집할 수 있는 집수장치를 개발하고, 수리실험과 현장 적용 시험을 통해 집수 성능을 평가하였다.

II. 연구방법

1. 빗물 집수장치의 설계

빗물 집수장치는 상시흐름이 있거나, 간헐적으로 유출이 발생하는 소류천이나 배수로 등에서 흐르는 물의 운동에너지

및 위치에너지를 이용하여, 동력원 없이 효율적으로 물을 모으기 위하여 고안한 장치이다. Fig. 1과 같이 150 mm × 700 mm (용량 12.4 L)의 크기를 갖는 원통형 장치의 측면에 홈을 내어 통수능력을 증가시키는 구조로 설계하였으며, 외부 충격에 튼튼하고 녹이 슬지 않도록 스테인리스로 제작하였다.

집수장치를 통해 물이 유입되는 과정에서 나뭇잎과 같은 비교적 크기가 큰 부유물질들을 분리하기 위하여 집수장치 내부에 투수성이 뛰어난 소재를 필터로 사용하였다. 본 연구에서 사용한 필터의 재질은 시중에서 쉽게 구입할 수 있는 공조장치 여과필터 (흰색 부직포)이며, 120 cm × 50 cm의 크기로 재단해 집수 장치에 원형으로 말아서 삽입하였다.

2. 빗물 집수 한계값 (Limit inflows) 산정

빗물 집수장치로 접근하는 유체의 유량에 따라 장치가 집수할 수 있는 유량의 범위가 변화하기 때문에 빗물 집수장치가 가진 한계 능력 (최대 집수능)을 확인 할 필요가 있다고 판단하였다. 빗물 집수 한계값 산정 시험은 인위적으로 유량을 조절할 수 있는 인공수로에서 유량을 단계적으로 변화시켜 집수되는 양이 변화하지 않는 유량을 빗물 집수 한계값으로 산정하였다.

시험에 사용한 인공수로 (Waterway)는 길이 5 m, 높이 0.5 m, 폭 0.5 m의 크기이며, 투명한 PVC 재질로 제작하였다. 수로 전단부의 물이 유입되는 유입부 (Flow in)에는 폭 25 cm의 직사각형 칼날 위어 (Sharp-edged rectangular weir)를 설치하여 Francis 공식으로 유입 유량을 산정하였다 (Lyu et al., 2007). 유입 유량은 0.0013 ton/sec를 기준으로 하여 0.0002~0.0003 ton/sec 단위로 증가시키며 단계적으로 시험을 수행하였다. 수로 말단부에는 높이 조절이 가능한 직사각형 위어 (Rectangular weir)를 설치하여 수로내부의 수위를 조절할 수 있도록 하였고, 본 연구에서는 빗물 집수 장치의 현장 설치와 동일한 조건인 15 cm 높이로 시험하였다. 직사각형 위어의 1 m 앞쪽에 빗물 집수 장치를 설치하여 집수되는 유량을 측정하였다 (Fig. 2).

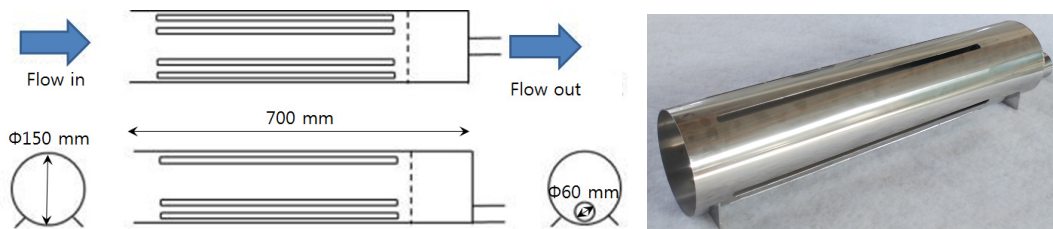


Fig. 1 Design and making of rainwater harvesting device

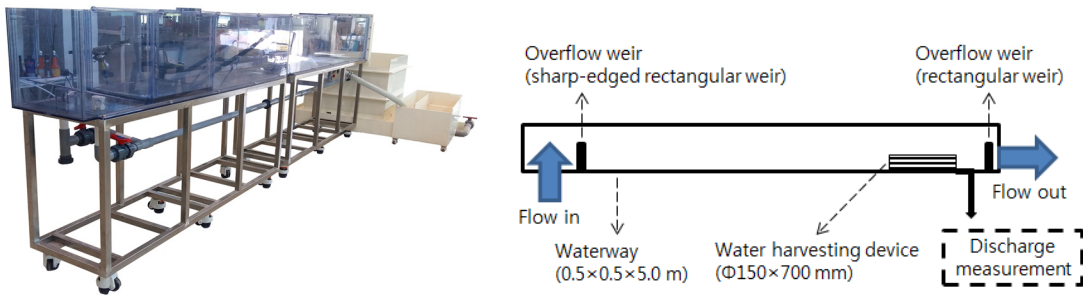


Fig. 2 Actual picture and diagram of the test channel

3. 빗물 집수 현장 시험

현장시험은 전라북도 장수군 노하리에 위치한 계곡의 상류 (P1)와 하류 (P2)에 빗물 집수장치를 설치하고, 2015년 8월 5일부터 11월 15일까지 강우량과 유출량 그리고 집수량을 관측하였다 (Fig. 3). P1은 강우시에만 간헐적으로 유출이 발생하는 지점이고, P2는 지속적으로 물이 흐르는 지역으로 선정하였다. 유출량의 관측을 위해 V-notch Flume을 설치하였으며, 부자식 수위계 (Thalimedes, OTT, Germany)로 10분 간격으로 수위를 연속 측정하여 유량으로 환산하였다. 빗물 집수장치를 통해 유입된 물의 양은 집수장치와 연결된 파이프의 말단부에 수도계량기 (50 mm)를 설치하여 관측하였으며, 자기유량계를 설치하여 강우량을 측정하였다. 빗물 집수 장치로 유입되는 배수구역은 ArcGIS 9.1 (USA, ESRI) 프로그램과 10 m × 10 m의 격자 사이즈를 갖는 수치표고모델 (Digital Elevation Model, DEM)을 사용하였으며, P1과 P2의 배수면적은 5.45 ha와 7.81 ha로 산정되었다.

빗물 집수 장치의 현장 설치는 수로 바닥에 접하도록 거치하고, 후면에 높이 150 mm의 월류둑 (Weir)을 조성하여 흐르는 물의 양에 관계없이 빗물 집수장치가 물속에 잠기도록 하였다. 월류둑은 현장에서 쉽게 구할 수 있는 돌과 흙을 쌓아서 만들었으며, 비닐로 피복하여 월류둑의 틈사이로 물이 유출

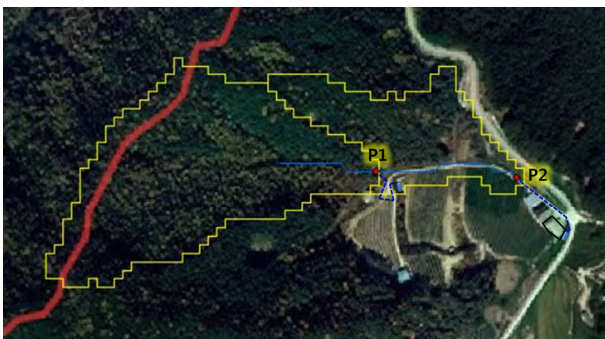


Fig. 3 Monitoring locations (P1, P2) and drainage areas

되지 않도록 처리하였다 (Fig. 4).

빗물 집수 효과 (Rainwater harvesting effect, RHE)는 강우 발생시 모니터링 지점으로 발생하는 총 집수량 (Rainwater harvesting amount, RHA)을 총 유출량 (Total runoff, TR)으로 나누어 식 (1)과 같이 산정하였다.

$$RHE (\%) = \frac{\text{Rainwater harvesting amount (m}^3\text{)}}{\text{Total runoff (m}^3\text{)}} \times 100 \quad (1)$$

또한 인공 수로 시험으로 도출된 빗물 집수 한계값을 고려하여 최대 집수 가능량 (Maximum available amount)을 산정

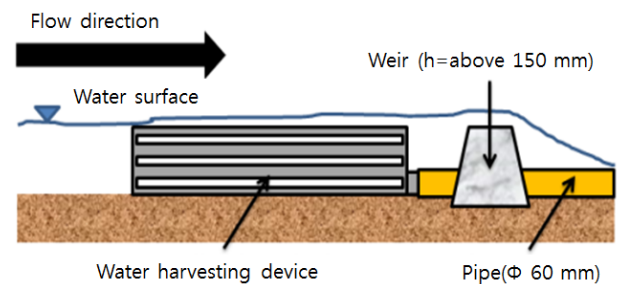


Fig. 4 Installation of rainwater harvesting device

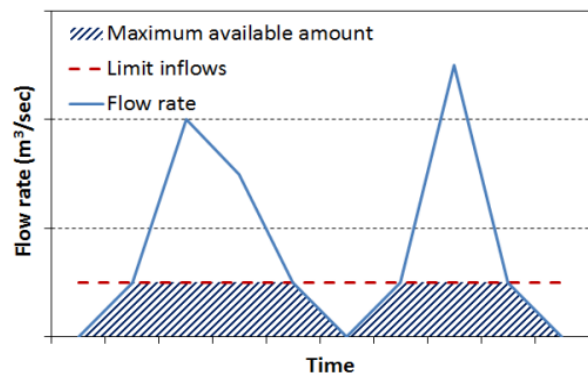


Fig. 5 Example of Calculating maximum available amount

하였다 (Fig. 5). 최대 집수 가능량을 고려한 빗물 집수 효과 (Rainwater harvesting effect by limit inflows, RHELI)는 총 집수량을 최대 집수 가능량으로 나누어 집수 장치의 효과를 식 (2)와 같이 산정하였다.

$$RHELI (\%) = \frac{\text{Rainwater harvesting amount (m}^3\text{)}}{\text{Maximum available amount (m}^3\text{)}} \times 100 \quad (2)$$

III. 결과 및 분석

1. 빗물 집수 장치의 한계값 산정

집수장치의 크기를 고려하여 수위 조절 위어의 높이를 15 cm로 고정하고, 인공 수로의 유량을 증가시키며 빗물 집수 장치의 유입량을 산정하였다. 유입유량이 증가함에 따라 인공 수로의 수위는 증가하였으나, 유입유량이 0.0022 ton/sec 이하에서는 모두 빗물 집수장치로 유입되었고, 0.0024 ton/sec 이상의 유량을 기준으로 수위 조절 위어를 넘어가는 흐름이 생기기 시작하였다. 따라서 집수장치 (용량: 12.4 L)의 한계값을 0.0022 ton/sec로 적용하였다 (Fig. 6). 0.0022 ton/sec 이하에서 수위 조절 위어를 넘어가지 않아 100 %의 효율이 산정되어야 하지만 유량을 측정하는 과정에서 발생한 인위적인 오차에 의해 1:1 직선에 일치하지 않는 것으로 판단된다.

그러나 장치가 설치되는 현장에서는 부유물질 등이 포함된 유출수가 발생하기 때문에 집수장치의 한계값은 시간이 지날수록 낮아질 것으로 판단된다. 본 연구에서는 필터를 한 달에 한번 교체하는 방법으로 필터의 유지관리를 진행하였다. 따라서 필터의 성능저하 및 유지관리 기간에 관한 정량적

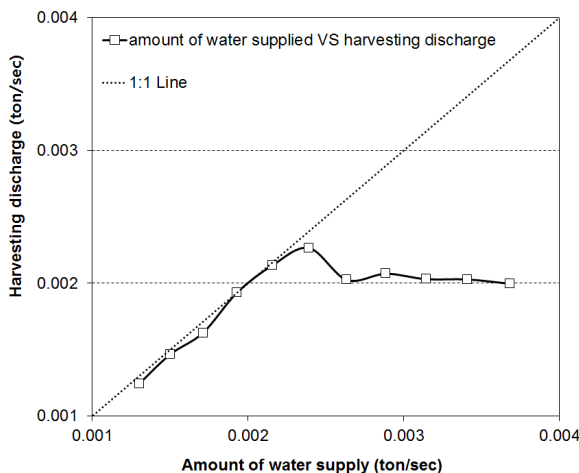


Fig. 6 Harvesting discharge according to amount of water supply rainwater harvesting device

인 값을 제공하기 위해서는 추가적인 실험이 필요할 것으로 사료된다.

2. 현장 적용 시험

연구기간동안의 총 강우량은 334.5 mm가 발생하였고, P1 지점에서는 총 1,722 ton의 유출이 발생하였고, 집수량은 총 273 ton으로 빗물 집수 효과는 15.85 %로 산정되었다. P2 지점에서는 총 7,984 ton의 유출이 발생하였고, 총 125 ton의 빗물이 집수되어 1.57 %의 빗물 집수 효과가 나타났다. 최대 집수 가능량을 고려한 집수효율 (RHELI)도 17.64 %와 2.12 %로 빗물 집수 효과 (RHE)와 비교하여 큰 차이가 나타나지는 않았다 (Table 1). 이는 P1과 P2지점의 평균 유출량은 0.0004 ton/sec와 0.0014 ton/sec로 대부분의 유출이 최대 집수 가능량을 초과하지 않았기 때문인 것으로 나타났다. 또한 최대 집수 가능량의 80 % 이상이 빗물 집수 장치로 유입되지 않는다는 것을 의미한다. 원인은 유출수와 함께 유입되는 토사 등의 부유물질이 빗물 집수 장치의 유입부를 막아 통수 능력을 저하시켜, 빗물 집수가 원활히 이루어지지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 높은 효율을 갖기 위해서는 장치의 유지 관리가 반드시 필요하다는 것을 의미한다.

또한 P2지점보다 P1지점의 빗물 집수량은 약 2.2배, 빗물 집수 효과가 약 15.5 % 높게 나타났다. 이는 P1지점은 강우시에만 간헐적으로 유출이 발생하는 반면 P2지점에서는 평상시에도 지속적으로 물의 흐름이 있어 부유물질의 유입이 많아 빗물 집수 장치의 필터가 더 쉽게 막히기 때문인 것으로 판단된다. 또한 유출수와 함께 발생하는 토사입자의 크기 또는 배수구역의 토성 등에 따라 집수효율이 달라질 수 있기 때문에 사용자가 희망하는 집수량 및 효율을 얻기 위해서는 빗물 집수 장치의 필터 교환 시기 및 관리 방법 등이 현장 및 배후지 조건에 따라 달라져야 할 것으로 사료되었다.

연구지역의 집수량을 평가하면, 강우 발생 빈도와 강우량 그리고 배수면적에 따라 다르겠지만 월평균 약 30~80 ton의 물을 저장 및 활용 할 수 있다는 것을 보여주며, 단기적인 가뭄을 해결하는 대안으로 이용 될 수 있을 것으로 기대 할 수 있

Table 1 Result of rainwater harvesting monitoring

Location	TR (m ³)	RHA (m ³)	RHE (%)	RHELI (%)
P1	1,722	273	15.85	17.64
P2	7,984	125	1.57	2.12

* TR: Total runoff
 RHA: Rainwater harvesting amount
 RHE: Rainwater harvesting effect
 RHELI: Rainwater harvesting effect by limit inflows

Table 2 Calculate the minimum irrigation requirement for a week (ton/10 a)

Step of plant growth	Bare soil	Covered soil (vinyl and rice straw)	Agricultural water requirement by irrigation method from covered soil	
			Furrow irrigation (Efficiency: 60 %)	Drip irrigation (Efficiency: 90 %)
Seedling stage	16	4	7	5
Growing peak period	22	19	32	22

다. 또한 유지관리 노력에 따라 현재의 집수 효율보다 높은 집수가 가능할 수 있다는 점과 낮은 집수 효율에도 약 100 ton 이상의 집수가 가능하다는 점을 고려할 때 빗물 집수 장치의 현장 적용이 가능할 것으로 판단된다.

시들을 피해방지를 위한 최소 관수량 및 관수주기는 관개 방법(점적, 살수, 고랑 관개 등)과 재배 작물 종류 등에 따라 차이가 있지만 가뭄에 민감한 생육단계(유묘기, 개화-결실기)에서 주별 최소 물 필요량은 10 a의 면적에 4 ton~32 ton의 용수가 필요하다(Table 2; RDA, 2017). 본 연구의 결과와 같이 약 30 ton의 물을 저장하면 유묘기(Seedling stage)에 약 2주~6주동안 활용할 수 있는 관개량으로써 토양수분함량이 작물의 생육을 저해할 수 있는 위조점 이하로 내려가는 것을 방지하고, 작물의 온전한 생육을 위한 단기적인 관개 대책의 일환으로 활용할 수 있을 것이다.

IV. 요약 및 결론

빗물을 대체수자원으로 활용하기 위하여 빗물 집수 장치를 개발하고, 산간 소류천에 설치하여 현장 적용성을 평가하였다. 빗물 집수 장치를 통해 집수된 월 평균 용량은 약 30 ton으로 나타났으며, 면적 10 a 규모의 밭에서 단기적인 물부족을 해소하기 위한 관개용수로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

강우 유출수와 함께 발생하는 토사에 의한 빗물 집수 장치의 유입부 막힘 등의 현상으로 집수율은 20% 이하로 나타났고, 집수 효율을 높이기 위해서는 여과 부직포 교환 및 퇴적 토사의 제거와 같은 주기적인 유지관리가 필요할 것으로 판단된다. 또한 토사가 적게 퇴적되는 구조로 개선하는 추가적인 연구를 통해 유지관리에 대한 빈도와 노력이 최소화 될 필요가 있다.

1 ha의 면적에 떨어지는 1 mm의 강우를 50%만 포집해도 5 ton의 관개용수를 확보할 수 있다. 하지만 현재까지 빗물을 집수하여 농업용수로 활용하는 지역은 매우 한정적이다. 현장에 적용한 빗물 집수 장치는 대체 수자원을 확보할 수 있는 좋은 기술이라고 판단되며, 현재의 집수 효율을 향상시키기 위한 추가적인 연구는 필요할 것으로 판단된다. 또한 빗물 집

수 장치의 성능은 물 부족을 대비하고자 하는 농업인의 의지에 따라 결정될 수 있으므로 농업인에 대한 홍보와 교육이 함께 필요할 것으로 사료된다.

현재 제안된 빗물 집수 장치의 현장 활용은 충분히 가능할 것으로 판단되며, 향후 농업부문의 물 부족을 작게나마 해소할 수 있는 하나의 방법으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(세부과제번호: PJ012686022017)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

1. Eo D.S. and K.Y. Lee, 2012. Agricultural water resources and world food security. *World Agriculture*, 146: 1-16 (in Korean).
2. Jeong, S.I., H.J. Park, B.C. Kim, B.S. Park, and B.G. Kim, 2014. A study on reusability of septic tanks as first flush storage tanks. *Journal of Korean Society of Environmental Technology*, 15(1): 25-32 (in Korean).
3. Jun, K.W., C.D. Jang, S.K. Jung, and B.H. Jun, 2013. The application of small scale rainwater harvesting system for securing water of highland agriculture. *Journal of Crisisonomy*, 9(8): 139-150 (in Korean).
4. Jung, Y.T. and J.J. Yee, 2017. The study on the development and evaluation of hybrid rainwater treatment facility for the rainwater recycling. *Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea*, 19(5): 115-120 (in Korean).
5. Kim, H.S. and G.S. Chae, 2014. Measures to expand the improvement of dry-field farming infrastructures, *Journal of Korea Rural Economic Institute* P197, pp.60-70 (in Korean).
6. Kim, T.W. and D.H. Park, 2015. Extreme drought response and improvement - focusing on 2015 drought. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 63(9): 25-35 (in Korean).
7. Kim, Y.J., M.Y. Han, Y.H. Kim, and J.S. Mun, 2009. An experimental runoff formula in building roof area for on-site

- rainwater management. *Journal of Korea Water Resources Association*, 42(2): 171-176. doi:10.3741/JKWRA.2009.42.2.171 (in Korean).
8. Korea Meteorological Administration (KMA), 2015. Abnormal climate report. pp.36-42. Seoul, Korea (in Korean).
 9. Korea Rural Community Corporation (KRC), 2016. Statistical yearbook of land and water development for agriculture 2015. pp.30-31. Ansan-si, Korea (in Korean).
 10. Lyu, H.J., J.H. Kim, B.H. Lee, W.H. Lee, I.S. Jang, B.K. and Hwang, 2007. *Hydraulics*. Donghwa Technology, Paju-si, Korea (in Korean).
 11. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), 2015. Comprehensive countermeasure against drought in agriculture and rural areas. Press release, 2015. 12. 01. Sejong-si, Korea (in Korean).
 12. Ministry of land, Infrastructure and Transport (MOLIT), 2016. Statistical analysis of water resource in South Korea, pp.250-278. Sejong-si, Korea (in Korean).
 13. Park, W.B. and G.W. Koh, 2006. Management system for rainwater use and activation in Jeju. *Journal of Geoenvironmental Engineerin*, 7(2): 21-27 (in Korean).
 14. Rural development administration (RDA), 2017. Weekly agricultural information 2017-26, <http://www.nongsaro.go.kr>.
 15. Seo, C.J. and J.G. Gu. 2016. Volume estimation method for greenhouse rainwater tank, *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 24(2): 31-39 (in Korean).
 16. Song, J.J., C.I. Son, J.E. Lee, J.M. Lee, K.J. Shin, and J.Y. Kim, 2009. A study on the recycle of rainfall to use by underflow facilities, *Journal of The Society for Environmental Technology in Korea*, 10(4): 209-295 (in Korean).
 17. Youn, J.E., Y.K. Baik, and T.S. Lim, 2016. Survey and improvement plan research on the use status of rainwater storage facilities of the agricultural farms in Jeju - for farmers who installed rainwater utilization facilities in Jeju. *Journal of The Korean Society of Living Environmental System*, 23(6): 776-786. doi:10.21086/ksles.2016.12.23.6.776 (in Korean).