



점적관개용 디스크 여과기의 디스크 홈 단면 형상에 따른 수두 손실 특성 분석

Analysis of Disk Filter Head Losses due to the Shapes of Disk Grooves in Drip Irrigation System

정승연* · 최 원** · 최진용**,+ · 김마가* · 이윤희*

Jung, Seung-Yeon · Choi, Won · Choi, Jin-Yong · Kim, Maga · Lee, Yoonhee

Abstract

Drip irrigation system is a low energy cost method which can efficiently save and supply water by dropping water slowly on the crop's root zone during crop growth. In the drip irrigation system, disk filters take an important role to physically remove impurity (inorganic and suspended organic) particles present in agricultural water which can cause emitter clogging. For the purpose, both top-and-bottom surfaces of the disk are grooved in micron size flowing from outside to inside. However, many congested flow paths in disk filter media incur higher head loss of inflow water resulting in relatively decreasing velocities depending on operation time than sand and mesh filters. Therefore, it is important to optimize the structure of disk filter in micro irrigation system. The head loss of disk filter media takes also charge of more than 60 % of total head loss in whole disk filter. This study is to find the appropriate cross-sectional shape of the disk groove to minimize the head loss by executing the experiment. The experiment used three disk filters that have similar filter body but have a half-elliptic and two kinds of triangular cross sections. The experimental results showed that the disk filter with half-elliptic cross sections of disk grooves have less head loss than the disk filter with regular triangular one.

Keywords: Drip irrigation; disk filter; head loss; shape of disk groove

1. 서 론

점적 관개 시스템은 점적호스 및 점적 테이프를 설치하여 원하는 위치에 점적기(Emitter)를 배치하고 관개용수를 작물의 근 구역에 필요 수량을 공급하는 관개 방법이다(Nam et al., 2012). 점적관개는 밭 또는 시설 재배지에서 주로 시행되는 관개 방법 중의 하나로(Lee et al., 1998), 관개 자동화를 시행할 때 효율이 가장 높다(Kim et al., 1991). 점적 관개 시스템의 동력원으로는 펌프를 사용하며, 이용하는 관개시설의 규모에 따라 적합한 성능을 가진 펌프를 선택한다. 점적관개용수로 물탱크에 저장된 물 또는 지하수를 사용한다. 지하수의 경우, 관정을 설치하여 이용하며 설치비용이 크지만, 강수 또는 물의 저장량이 부족할 때도 점적관개를 할 수 있다는 장점이 있다.

관개용수로 사용되는 물에는 부유물질 등이 존재한다. 논 관수로 관개는 용수로 말단에서 눈에 바로 물을 공급하기 때

문에 관수로의 말단이 관개용수 속의 부유물질에 막히지 않는다. 하지만 밭 또는 시설재배지에서의 점적 관개 시스템에는 안에 미세통로를 가지는 점적기가 있어 부유물질에 의해 내부 통로가 막혀 물이 작물에 제대로 공급되지 않는 막힘(Clogging) 현상이 발생할 위험이 있다. 이를 예방하기 위해 관개용수가 이미터에 도달하기 전에 이미터 내부를 막을 수 있는 크기의 입자들을 여과 시설을 이용하여 미리 제거해야 한다. 여과 시설의 주요 장치로는 여과기가 있으며, 여러 여과기를 함께 연결하여 점적 관개에 이용하기도 한다. 여과기는 점적관개 뿐만 아니라 다른 시설관개에서도 필수적으로 사용하며, 보통 시행하는 관개 시스템에 따라 막힘의 원인이 되는 입자의 최소 크기가 달라, 여과기를 선택적으로 사용한다. 예를 들어 스프링클러 등과 같은 시설 관개에서도 여과기가 필요하지만, 일반적으로 점적관개에서 사용하는 여과기보다 목표로 하는 여과 입자의 입경 크기가 더 크다. 또한 점적관개에서 여과기를 통해 Clogging 현상을 예방하는 것은 이미터의 정비 횟수를 줄여 점적 관개 시스템의 유지비용을 절감하고 이미터 관리에 필요한 시간을 크게 줄여주는 효과를 보인다.

관개용수가 여과기를 통과하면서 발생하는 수두 손실은 일반적으로 전체 점적 관개 시스템 수두 손실의 40% 이상을 차지한다(Wu et al., 2014). 여과기에서 발생하는 수두 손실은 여과재 자체에서 발생하는 수두 손실과 여과재 내부에 간

* Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

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

+ Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4583 Fax: +82-2-873-2083

E-mail: iamchoi@snu.ac.kr

Received: November 3, 2017

Revised: December 15, 2017

Accepted: December 22, 2017

힌 부유물질들에 의해 증가한 수두 손실로 나뉜다. 여과기를 장기적으로 사용할 경우, 여과재 내부에 부유물질이 과도하게 쌓이게 되며, 여과기에 걸리는 압력이 점차 증가한다. 따라서 적절한 시기에 여과재 또는 여과기 자체를 교체 또는 세척하여 여과기의 막힘 현상의 원인이 되는 부유물질들을 제거해야 한다. 또한, 여과기에서 발생하는 수두 손실이 지나치게 증가하여 점적관개의 효율이 떨어지는 것을 막을 수 있는 적절한 관리가 필요하다.

점적관개에 이용되는 여과기 중 디스크 여과기는 얇은 원통형 디스크가 여러 장 쌓인 형태의 여과재를 가지고 있다. 디스크 여과기의 여과재 내부는 디스크 표면상의 홈들로 인해 복잡한 구조로 형성되며, 이는 관개용수 속 부유물질들을 효과적으로 여과할 수 있도록 한다 (Capra and Sciocolone, 2004; Puig-Bargués et al., 2005a, 2005b). 하지만 디스크 여과기의 복잡한 여과재 내부 구조는 수두 손실이 다른 여과기들에 비해 높아지도록 하는 주요한 원인이 되고 있다 (Tajrishy et al., 1994; Puig-Bargués et al., 2003; Duran-Ros et al., 2009).

디스크 여과기에서의 수두 손실은 주로 여과재에 의해 약 60% 이상이 발생한다 (Wu et al., 2014). 따라서 수두 손실에 영향을 주는 디스크의 구조 변수들에 대하여 분석하고, 이를 기반으로 수두 손실 관계식을 산정하려는 연구들이 진행되어 왔다. Yurden et al. (2008)은 디스크 여과기의 입·출구 관의 지름, 여과기 디스크의 내·외경, 여과기 몸체의 유효 길이 등과 같은 전체 구조물에 대한 변수들을 도입하였으며, 정수에서의 디스크 여과기 수두 손실 계산 모델을 제안하였다. Demir et al. (2009)은 금속 재질의 디스크 여과기들에 대하여 수두 손실을 측정하고 비교하였으며, 디스크 여과기와 홈의 형태가 수두 손실에 영향을 주며, 디스크 홈이 곡선 형태일 때 직선 형태일 때보다 수두 손실이 더 낮게 산정되는 것을 확인하였다. Duran-Ros et al. (2010)은 디스크 여과기의 수두 손실 관계식을 산정하는 데에 관개용수의 TSS (total suspended solids) 농도, 밀도 및 동점성계수와 여과기 입·출구 관의 직경을 변수로 사용하였다. Yurden et al. (2010)은 이후 연구에서 디스크 여과기에서의 수두 손실에 영향을 주는 주요 요소에 여과기 몸체의 구조적 매개 변수뿐만 아니라, 여과재의 물리적 매개 변수, 여과되는 액체의 매개 변수들 또한 포함하여 수두 손실 관계식의 산정에 적용하였다. Wu et al. (2014)의 연구에서는 이전의 연구에서 여과기의 수리학적 성능에 디스크 안에서의 유로, 즉 디스크 홈의 영향을 고려하지 않았기에 홈의 바깥쪽과 안쪽의 폭과 깊이를 수두손실 계산식의 변수로 추가하여 디스크 여과기 수두 손실 계산식을 차원 분석 기법을 기반으로 제안하였다.

앞서 살펴본 대부분의 연구들은 디스크나 챔버의 외부 (물리적인) 치수를 바탕으로 연구가 진행되었다. 하지만 수두 손실의 주요 원인은 관개수(水)가 디스크를 통과할 때, 홈의 단면 급 확대 및 급 축소, 홈의 크기 및 형상, 홈 표면과 관개수(水)와의 마찰이다. 따라서 본 연구는 주요 수두 손실을 발생시키는 디스크 홈의 구조에 따른 정량적인 평가를 진행해 보았다. 실험대상 여과기는 우리나라에서 대표적으로 사용되며 입·출구관의 직경이 동일한 3가지 종류의 일반형 디스크 여과기를 선택하였다. 여과기에서의 압력 손실과 여과기를 통과하는 유량을 정밀하게 측정할 수 있는 실험 장치를 통해 디스크 여과기에서의 유량과 압력 수두 손실의 관계를 구하고, 디스크의 형상 차이와 압력 수두 손실 차이의 관계를 분석하여 디스크 홈 단면의 형상이 수두 손실의 변화에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 디스크 여과기의 특성 및 구조

점적관개 시스템에 사용되는 여과기는 스크린, 디스크, 모래 등의 여과재에 따라 구분할 수 있다. 디스크 여과기의 경우 1960년대부터 이스라엘에서 점적관개를 시작하면서 여과 장치에 사용되기 시작하였다 (Alhands and Prochaska, 1996). 디스크 여과기의 여과재는 표면에 홈이 나 있는 얇은 디스크를 여러 장 겹쳐 쌓아 내부가 뚫린 원기둥 모양을 이루고 있으며, 원기둥의 바깥쪽에서 안쪽으로 디스크의 홈을 통해 관개용수가 지나가게 되어 있다. 또한, 각 홈은 디스크 표면을 따라 디스크 중심을 향하는 방향과 일정한 각도를 이루도록 배치되어 있다. 디스크가 서로 겹쳐질 경우 홈과 홈이 서로 교차하면서 그물과 비슷한 형상의 복잡한 유로를 가지는 수로로 변한다. 이러한 특성은 여과기가 디스크를 통과하는 물속의 다양한 부유 입자들을 디스크 내부에 효과적으로 붙잡아 두도록 하는 데 주요한 역할을 하고 있다 (Capra and Sciocolone, 2004; Puig-Bargués et al., 2005a, 2005b).

디스크 여과기의 입·출구관 직경이 동일한 Arkal의 2" Dual Manual 디스크 여과기, 한슬테크의 2" SAFE 디스크 여과기, 남경정공의 2" Alpha Q 디스크 여과기를 본 연구의 대상 디스크 여과기로 결정하였으며 실제 모습은 Fig. 1과 같다. 국내의 시설 농가에서는 주로 시스템을 구성하는 연결 관의 직경이 2"인 점적관개 시설을 주로 이용하고 있기에 연구 대상으로 입·출구관이 2"인 디스크 여과기를 선택하였다. 이 중 전 세계적으로 가장 많이 판매되는 이스라엘 제품인 Arkal의 2" Dual Manual 디스크 여과기, 국내 회사 중 디스크 여과기를

자체적으로 생산하여 판매하는 한슬테크의 2" SAFE 디스크 여과기 및 남경의 2" Alpha Q 디스크 여과기가 본 연구의 시험 대상으로 선정되었다.

일반적으로 디스크 여과기 제품은 자사에서 수두 손실 그래프를 제공한다. 하지만 Arkal 여과기만 수리특성을 제공하고 있으며, 한슬테크와 남경의 경우는 제공하지 않고 있다. 또한 수리특성을 테스트하기 위한 장치가 변동이 있을 경우에는, 동일한 디스크 여과기의 수리특성도 변동되어 측정될 가능성이 있다. 따라서 동일한 조건에서 회사 별 디스크 특성을 비교하고자 수두손실 테스트 기계를 제작하게 되었다. 디스크 형상 정보는 회사에서 구체적으로 제공되지 않기에 직접 측정하였으며, 디스크 홈 단면 형상의 경우에는 FESEM (Field-Emission Scanning Electron Microscope)을 사용하여 측정하여 연구에 이용하였다.

본 연구에서 사용한 각 여과기별 디스크의 모습은 Fig. 2와 같다. 한슬테크 여과기 디스크의 경우, 홈이 있는 부분과 홈이

없는 부분으로 나뉘어져 있다. 홈의 경사방향은 Arkal의 경우만 한슬테크, 남경과 반대이다. 홈 단면 형상을 제외한 세 디스크 여과기의 디스크 치수는 Table 1과 같다. Arkal의 디스크는 전체 디스크 장수, 홈의 길이가 세 디스크 중 가장 크다. 디스크 외경과 내경, 디스크 두께, 디스크 한 장의 홈 개수, 홈의 각도의 경우에는 Arkal의 디스크가 세 디스크 중 가장 작다.

디스크 표면에 있는 홈의 단면 형상의 치수를 측정하기 위해 SIGMA사의 FESEM을 이용하여 Arkal, 한슬테크, 남경 디스크 여과기의 디스크 홈 정면 방향을 100배 확대 배율로 촬영하였다. 100배로 촬영된 디스크 홈 단면 사진을 통해, 디스크 홈의 바깥쪽과 안쪽 단면의 형태를 확인하였으며, 촬영한 사진에서 나타나는 홈 단면의 너비 및 높이 등을 측정하여, 디스크 홈 단면의 면적 및 둘레를 계산할 수 있는 측정값으로 사용하였다. 각각의 디스크 홈 단면을 촬영할 때는 시료를 2개씩 준비하여 바깥쪽과 안쪽을 모두 촬영하고 그 평균값을 홈의 대표 치수로 사용하였다.



Fig. 1 Selected commercial disk filters for experiment

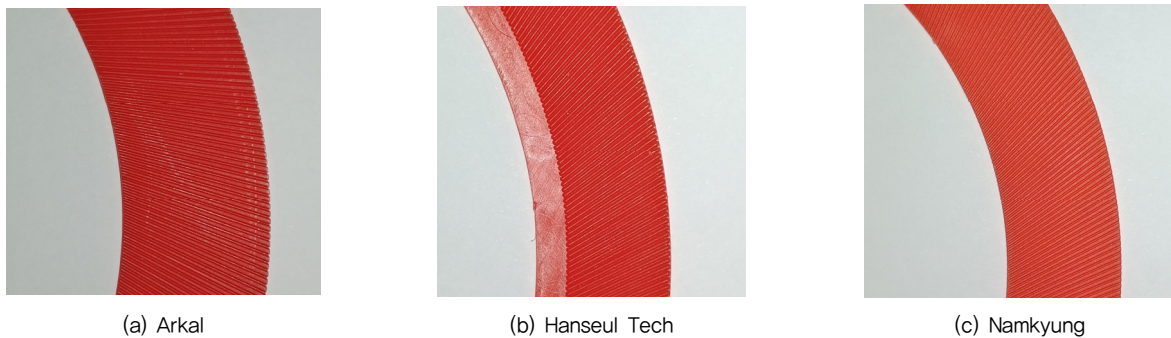


Fig. 2 Shapes of disk grooves

Table 1 Disk specifications

Disk	Arkal	Hanseul Tech	Nankyung
Stacked number	280	190	240
Outer diameter (mm)	115	130	117.5
Inner diameter (mm)	85	108	91
Thickness (mm)	0.95	1.2	1.1
Number of grooves on one side	480	600	518
Number of grooves in a disk filter	268,800	273,600	248,640
Length of grooves (mm)	15.70	11.70	14.76
Angle of grooves (°)	14.69	18.08	22.78

2. 디스크 여과기의 수두 손실 인자

디스크 여과기의 성능에는 입·출구관의 내경, 여과 성능, 최대 작동 압력, 여과 면적, 여과기 몸체의 치수, 수두 손실 등이 영향을 미친다. 이 중 수두 손실은 유량 (Q , m^3/h)에 따른 압력 수두 손실 (ΔH , bar)로 표시되며 일반적으로 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\Delta H = kQ^n \quad (1)$$

k 와 n 은 디스크 여과기의 여러 구조적 변수들에 따라 결정되는 값들이다. 구조적 변수에는 입출구관 직경, 여과재 길이, 디스크 내·외경 및 두께, 디스크 홈 너비 및 깊이 등이 있다 (Wu et al., 2014). 여과 크기는 디스크가 여과할 수 있는 부유물의 최소 입경을 말한다. 디스크 여과기 제조회사들은 여과 입자의 크기 별 디스크를 제작하여 각 디스크들은 하나의 디스크 여과기에서 서로 호환된다. 디스크의 입자 크기 별 수두 손실 그래프는 log-log 그래프에서 직선의 형태로 표시된다. 기존 디스크 여과기 제품의 수두 손실 그래프에 따르면 디스크의 여과 크기가 클수록 k 값과 n 값은 감소하는 경향을 보인다. 같은 회사의 디스크의 여과 크기가 증가할 때 디스크의 홈 개수는 적어지도록 되어있으며, 이에 따라 수두 손실은 디스크 홈의 단면적의 증가뿐만 아니라 디스크 홈의 개수의 감소에도 영향을 받는다고 판단할 수 있다.

디스크 여과기 내부에서 디스크로 물이 유입될 때 상대적으로 좁은 디스크 홈으로 물이 유입되면서 단면 급 축소 수두 손실이 홈별로 발생하고, 홈 내부에서는 디스크 표면과의 마찰 수두 손실이 발생하며, 홈을 통과하여 디스크 내부로 빠져나올 때는 단면 급 확대 수두 손실이 발생한다. 단면 급 축소 및 급 확대 수두 손실의 경우, 여과 면적 (여과재 바깥쪽과 안쪽의 옆면 넓이)에 비해 그 비율이 상당히 낮아 고려대상에서 제외하였다.

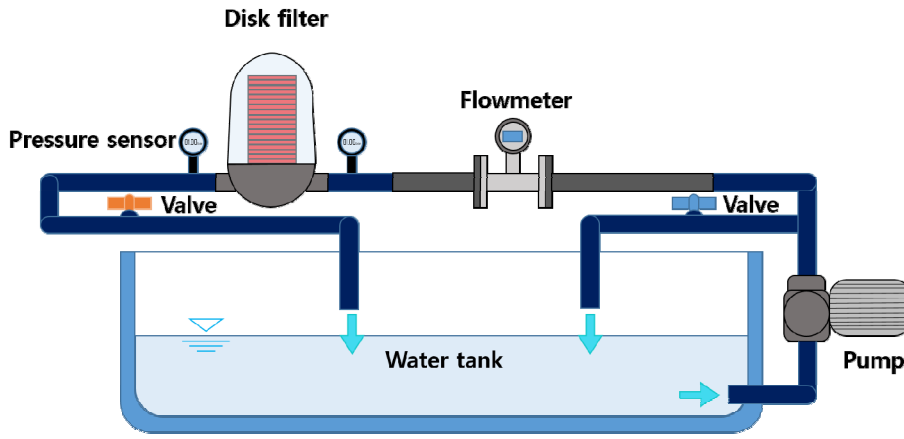
디스크 표면의 홈 하나를 따로 떼어서 그 홈에서 발생하는 수두 손실을 살펴보았다. 상술한 것과 마찬가지로 홈 하나에서도 유입 및 유출 수두 손실 (ΔH_{in} , ΔH_{out})과 마찰 수두 손실 (ΔH_f)이 발생한다. 이때, 홈 내부가 층류 상태라면 마찰 손실 계수가 홈 내부 유속에 반비례하여 다음과 같은 관계를 만족한다.

$$\Delta H_{in} \propto 1/A^2, \Delta H_{out} \propto 1/A^2, \Delta H_f \propto 1/A \quad (2)$$

이때 각 수두 손실에서 홈 단면의 넓이와 동수반경에 따라 나눠서 분석하면, 홈 단면의 면적이 같을 때는 마찰 수두 손실의 차이가 전체 수두 손실의 차이를, 홈 단면의 동수반경이 같을 때는 유입 및 유출 수두 손실의 차이가 전체 수두 손실의 차이를 불러오는 것을 알 수 있다. 예를 들어 타원형 단면은 삼각형 단면과 단면적이 같을 때 동수반경이 더 크므로 같은 홈 길이를 가질 때 유입 및 유출 수두 손실은 동일하고 마찰 수두 손실은 더 작은 값을 가지게 된다. 반대로 타원형 단면과 삼각형 단면의 동수반경이 같을 때 단면적이 더 작으므로 유입 및 유출 수두 손실을 더 큰 값을 가지게 되는 것이다.

3. 디스크 여과기의 수두 손실 측정 장치

실험 장치는 Fig. 3 (a)과 같이 물통, 연결파이프, 펌프, 컨트롤러박스, 유량계, 압력계, 여과기, 밸브로 구성된다. 물통은 가로 110 cm, 세로 70 cm, 높이 60 cm의 내부 공간을 가지고 있다. Fig. 3 (b)에서 물통 하단의 연결 관은 배수관이며, 물통 좌측 및 상부에는 철제 지지대를 설치하였다. 연결 파이프의 경우 점적관개 현장에서 주로 사용되는 치수와 같은 2"의 직경을 가진 제품으로 PVC를 사용하였다. 펌프 스펙의 경우, Table 2에 요약하였다. 유량계의 경우 터빈 형식의 디지털 유량계로, $0.001 m^3/h$ 의 정밀도를 가지고 있다. 유체를 안정적으로 유입시키고 난류 및 계측치의 불안정을 최소화하기 위해 제품 지



(a) Schematic diagram



(b) Installation

Fig. 3 Equipment for head loss test

Table 2 Pump specifications for head loss test

Model	PH-1588W		
Type	Fluid pump	Diameter	0.4 m
Pump capacity	70 L/min	Suction height	8 m
Minimum height	0.5 m	Pumping height	55 m

침서에 따라 유량계의 입구 지름을 기준으로 유량계 전후로 10배, 5배 길이의 직관을 확보하여 설치하였다. 압력계의 경우 0.01 bar의 정밀도를 가진 디지털 압력계를 사용하였다.

4. 디스크 여과기의 수두 손실 측정 방법

물통 내부의 물의 높이는 실험 장치를 가동했을 때 펌프 내부를 만관으로 유지하는 물의 최소 높이인 약 30 cm 만큼 채워서 실험을 진행하였다. 실험은 유입 부 쪽의 밸브는 완전히 닫고 유출 부 쪽의 밸브는 완전히 열려있는 것을 초기 상태로 하였다. 초기 상태에서 물이 디스크 여과기를 통과하기 전·후의 압력과 통과하는 유량을 측정하고, 이후 유출 부 쪽의 밸브를 조금씩 닫으면서 압력계의 압력 값을 약 0.5 bar 씩 증가시킬 때마다 압력과 유량 측정을 반복하였다. 측정

데이터의 경우, 설치된 두 압력계와 유량계에 연결된 데이터 로거를 통해 자동으로 기록되도록 하였다. 측정을 진행한 각각의 지점에 대하여 10 개의 데이터를 선택하여, 그 평균값을 해당 지점의 대푯값으로 사용하였다. 실험 장치에 4~6 bar 이상의 고압이 가해질 때, 측정계를 포함하여 실험 장치의 진동이 극심하여, 압력 측정값이 급격하게 불안정해졌고, 대표 측정값의 신뢰성이 매우 떨어지는 것으로 판단하여, 실험 결과에는 반영하지 않았다.

III. 결과 및 고찰

1. 디스크 여과기별 디스크 치수 분석

Table 3은 FESEM을 이용하여, 100배율로 촬영한 세 가지 여과기의 디스크 홈 단면 사진들을 나타내고, 사진에서 나타

난 각각의 디스크 홈 단면의 수치를 나타낸 것이다. Fig. 4는 각각의 디스크 홈 단면의 모양을 사진에서 나타난 수치의 평균값을 바탕으로 도식화하였다. 홈의 단면의 형상은 Arkal과 한슬테크가 삼각형, 남경은 타원형으로 확인되었다. 삼각형 형태의 홈의 단면의 너비, 높이, 너비에 대한 높이의 비율이 모두 한슬테크 쪽이 Arkal 쪽보다 크게 측정되었다. 홈의 단면의 넓이는 남경에서 가장 작았고, 한슬테크에서 가장 넓었다. 삼각형 단면의 경우 내접한 원의 직경이 디스크의 여과 크기라고 할 수 있으며, 남경의 타원형 단면에서는 단면의 폭의 절반이 높이보다 크므로 단면의 높이가 디스크의 여과 크기라고 할 수 있다. 이에 따라 디스크의 여과 크기는 남경의 디스크에서 가장 작고, 한슬테크의 디스크에서 가장 크다고 할 수 있다. 따라서 같은 시간 동안 같은 관개용수로 디스크 여과기를 사용할 경우, 남경 디스크는 더 많은 부유물질을 함유하고 있다고 할 수 있다. 또, 관개용수 내 부유물질 농도가 평소보

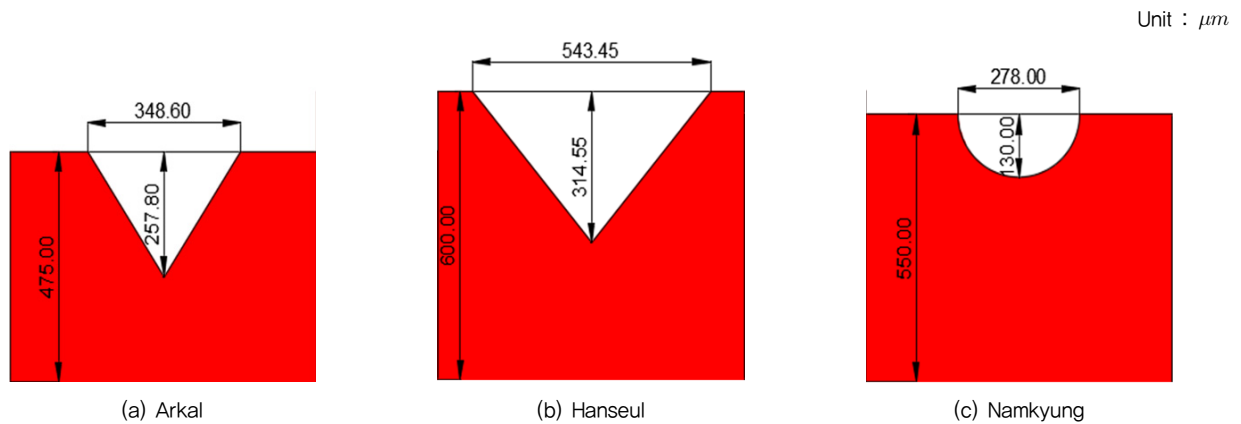


Fig. 4 Cross-sections of disk grooves

Table 3 FESEM images of disk grooves at 100X

Filter		Arkal	Hanseul Tech	Namkyung
Groove cross-sections	Outside			
	Inside			
Width of groove (μm)		348.60	543.45	278.00
Depth of groove (μm)		257.80	314.55	130.00

다 더 높을 때도 안정적으로 여과가 진행된다는 장점을 가진다고 할 수 있다.

2. 디스크 여과기별 수두 손실 분석

Arkal 2" Dual Manual 디스크 여과기, 한슬테크 2" SAFE 디스크 여과기, 그리고 남경 2" 디스크 여과기에 대하여 수두 손실 실험의 결과는 Table 4와 같다. 각각의 디스크 여과기에서 나타난 최대 유량은 약 7 m³/h로 세 여과기에서 모두 비슷하게 나타나며, 펌프가 낼 수 있는 최대 유량이라고 할 수 있다. 수두 손실 값은 유입 부 쪽의 압력계와 유출 부 쪽의 압력계의 압력 차이로 계산하였다. 실험 결과 세 가지 여과기에서 수두 손실은 0~0.07 bar 범위의 값을 가졌다.

Fig. 5는 Arkal 2" Dual Manual 디스크 여과기, 한슬테크 2" SAFE 디스크 여과기, 남경 2" Alpha Q 디스크 여과기의 수두 손실 실험 결과를 그래프에 표시한 것으로, 거듭제곱 형태의 추세선도 함께 표시하였다.

실험 데이터를 통해 얻은 각 디스크 여과기에서의 유량(Q, m³/h)과 압력 수두 손실(ΔH, bar)의 관계식과 결정계수는

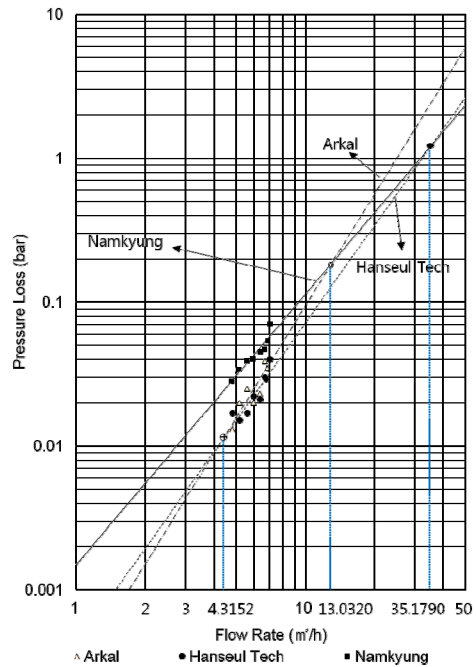


Fig. 5 Head loss chart of disk filters

Table 4 Relationship of head loss and flow rate

Type	Pressure before passing through disk filter (bar)	Pressure after passing through disk filter (bar)	Flow rate (m ³ /h)	Head loss (bar)
Arkal	0,990	0,950	6,996	0,040
	1,505	1,470	6,816	0,035
	2,008	1,969	6,634	0,039
	2,505	2,482	6,306	0,023
	2,985	2,965	5,962	0,020
	3,501	3,476	5,559	0,025
	3,998	3,978	5,158	0,020
	4,498	4,485	4,791	0,013
Hanseul Tech	0,990	0,950	6,988	0,040
	1,501	1,472	6,742	0,029
	1,998	1,968	6,655	0,030
	2,498	2,477	6,334	0,021
	3,011	2,989	5,956	0,022
	3,496	3,479	5,572	0,017
	3,997	3,982	5,168	0,015
	4,494	4,477	4,796	0,017
Nam kyung	1,030	1,100	7,035	0,070
	1,512	1,566	6,863	0,054
	2,024	2,071	6,639	0,047
	2,471	2,516	6,349	0,045
	3,037	3,077	5,904	0,040
	3,503	3,542	5,538	0,039
	4,008	4,042	5,137	0,034
	4,501	4,529	4,766	0,028

(3), (4), (5)와 같다.

$$\text{Arkal: } \Delta H = 2.5546 \times 10^{-4} \times Q^{2.5678}, R^2 = 0.8149 \quad (3)$$

$$\text{한슬테크: } \Delta H = 4.1141 \times 10^{-4} \times Q^{2.2419}, R^2 = 0.8019 \quad (4)$$

$$\text{남경: } \Delta H = 14.9682 \times 10^{-4} \times Q^{1.8792}, R^2 = 0.8967 \quad (5)$$

실험에서 측정된 유량 범위인 약 4.7~7.0 m³/h에서는 남경의 디스크 여과기가 가장 수두 손실이 크다. Arkal 2" Dual Manual 디스크 여과기 제품설명서에서 제공하는 권장 유량인 12~25 m³/h 범위 중 13.0320 m³/h 미만에서는 남경, Arkal, 한슬테크 순으로 수두 손실이 크며, 13.0320 m³/h 이상부터는 Arkal, 남경, 한슬테크 순으로 수두 손실이 큰 것을 확인할 수 있었다. 이러한 수두 손실의 차이는 디스크 홈 단면적의 차이가 가장 영향이 큰 것으로 확인되며, 모든 유량 값에서 수두 손실의 크

기 차이가 일정하게 나타나지 않는 것은 그 외의 다른 디스크 치수들의 영향으로 판단된다. 실험 장치에서 사용한 펌프는 국내 농가에서 점적 관개에 주로 쓰이는 펌프이므로, 이 펌프가 나타내는 유량의 범위인 4~7 m³/h에서는 수두 손실의 측면에서 한슬테크의 여과기를 선택하는 것이 타당하다. 또한 해외 여과기인 Arkal 여과기의 유량 사용범위인 12~25 m³/h에서도 한슬테크의 여과기가 가장 적절하다.

3. 디스크 여과기별 홈 내부의 Reynolds 수 분석

디스크 여과기의 디스크 홈 하나에서의 흐름을 확인하기 위해 Reynolds 수를 검토하였다. 임의의 디스크에서 홈 내부의 흐름에 대한 Reynolds 수를 검토하기 위해 디스크 여과기를 통과하는 유량은 여과기 내부의 모든 디스크 홈에 균등 분배되며, 각 홈 내부의 물의 흐름은 독립적인 해석이 가능하다는 가정을 하였다. 이를 통해 얻어진 홈 하나의 유량, 홈의 치

Table 5 Reynolds numbers of waters passing through disk grooves

Type	Total flow (m ³ /h)	Groove flow rate (cm ³ /h)	Average groove cross-section area (10 ⁻² mm ²)	Average flow velocity in a groove (cm/s)	Hydraulic diameter (mm)	Reynolds number
Arkal	4,791	17,824	4,494	11,019	0,185	20,255
	5,158	19,189	4,494	11,863	0,185	21,806
	5,559	20,679	4,494	12,783	0,185	23,499
	5,962	22,180	4,494	13,711	0,185	25,204
	6,306	23,461	4,494	14,503	0,185	26,660
	6,634	24,681	4,494	15,257	0,185	28,046
	6,816	25,358	4,494	15,676	0,185	28,815
Hanseul Tech	6,996	26,026	4,494	16,089	0,185	29,575
	4,796	21,036	8,547	6,836	0,249	16,883
	5,168	22,667	8,547	7,367	0,249	18,192
	5,572	24,438	8,547	7,942	0,249	19,614
	5,956	26,122	8,547	8,490	0,249	20,965
	6,334	27,779	8,547	9,028	0,249	22,295
	6,655	29,188	8,547	9,486	0,249	23,426
Namkyung	6,742	29,572	8,547	9,611	0,249	23,734
	6,988	30,648	8,547	9,960	0,249	24,598
	4,766	19,168	2,838	18,758	0,162	30,185
	5,137	20,662	2,838	20,220	0,162	32,538
	5,538	22,273	2,838	21,797	0,162	35,075
	5,904	23,746	2,838	23,238	0,162	37,394
	6,349	25,536	2,838	24,990	0,162	40,213
6,639	26,700	2,838	26,130	0,162	42,047	
6,863	27,601	2,838	27,012	0,162	43,466	
7,035	28,293	2,838	27,689	0,162	44,555	

수를 바탕으로 각 디스크 홈에서의 Reynolds 수를 Table 5와 같이 계산하였다. 홈 내부의 평균 속도는 홈을 지나는 유량과 홈의 단면적으로부터 계산하고, 물의 동점성계수는 20 °C에서의 값을 사용하였다.

Table 5에서 계산된 Reynolds 수는 모두 2,100보다 낮으며, 홈 하나를 지나는 용수의 흐름은 층류로 나타났다. 따라서 일반적인 디스크 여과기의 유량 사용 범위에서는 3가지 여과기의 디스크 홈 내부를 통과하는 물의 흐름이 모두 층류를 나타낼 것을 확인할 수 있었다. 계산 결과 Arkal에서는 약 1,848.011 cm³/h, 한슬테크에서는 약 2,616.517 cm³/h, 남경에서는 약 1,333.522 cm³/h 이하의 유량이 홈을 통과할 경우, 홈 내부의 흐름이 층류로 나타났다. 여과기 사용 유량 범위인 12~25 m³/h에서, 디스크 홈 개수를 고정하고 디스크 장수만을 변경

했을 시 Arkal은 15개, 한슬테크는 9개, 남경은 20개 이상의 디스크에서 층류를 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

4. 디스크 여과기별 홈 수두 손실 분석

위아래 두 디스크가 붙어있을 때, 표면의 홈들이 교차하면서 형성되는 망 형태의 지점에서 내부 수로 흐름은 실제적으로 난류 형태를 보일 것이다. 하지만, 일반적인 여과기의 사용 유량 범위에서는 내부 유속이 매우 느리기 때문에 전체적인 흐름은 난류보다는 층류에 가깝다고 가정할 수 있다. 따라서 전체 수두 손실에서 여과재에 존재하는 전체 홈의 개수로 나눠서 홈 하나에서의 수두 손실을 계산하였다. 따라서 Fig. 4에서 얻었던 각 디스크 여과기별 수두 손실 관계식을 이용하여, 홈 하나에서의 유량-수두 손실 관계식을 구하면 (6), (7), (8)과 같다.

Table 6 Head losses of disk grooves under the same cross-section conditions

Type	Total flow (m ³ /h)	Groove flow rate (cm ³ /h)	Head loss in a groove (10 ⁻⁷ bar)			
			Same depth	Same area	Same hydraulic diameter	Same perimeter
Arkal	5	18,6012	19,9399	6,2701	1,1736	3,1655
	10	37,2024	118,2247	37,1754	6,9585	18,7685
	15	55,8036	334,8692	105,2985	19,7099	53,1614
	20	74,4048	700,9590	220,4143	41,2575	111,2791
	25	93,0060	1,243,1914	390,9175	73,1725	197,3599
	30	111,6071	1,985,4522	624,3191	116,8610	315,1958
	35	130,2083	2,949,6147	927,4969	173,6103	468,2591
	40	148,8095	4,156,0132	1,306,8450	244,6173	659,7781
	45	167,4107	5,623,7535	1,768,3712	331,0065	892,7857
	50	186,0119	7,370,9298	2,317,7652	433,8429	1,170,1546
Hanseul Tech	5	21,9298	34,9931	93,3078	4,5437	13,6728
	10	43,8596	165,5226	441,3596	21,4926	64,6742
	15	65,7895	410,8030	1,095,3905	53,3414	160,5121
	20	87,7193	782,9461	2,087,6960	101,6629	305,9187
	25	109,6491	1,291,1984	3,442,9314	167,6578	504,5070
	30	131,5789	1,943,1585	5,181,3583	252,3127	759,2458
	35	153,5088	2,745,3343	7,320,3295	356,4725	1,072,6782
	40	175,4386	3,703,4503	9,875,1093	480,8807	1,447,0406
	45	197,3684	4,822,6373	12,859,3788	626,2034	1,884,3379
	50	219,2982	6,107,5585	16,285,5724	793,0461	2,386,3923
Namkyung	5	20,1094	1,2390	1,2390	1,2390	1,2390
	10	40,2188	4,5578	4,5578	4,5578	4,5578
	15	60,3282	9,7646	9,7646	9,7646	9,7646
	20	80,4376	16,7662	16,7662	16,7662	16,7662
	25	100,5470	25,5002	25,5002	25,5002	25,5002
	30	120,6564	35,9200	35,9200	35,9200	35,9200
	35	140,7658	47,9888	47,9888	47,9888	47,9888
	40	160,8752	61,6759	61,6759	61,6759	61,6759
	45	180,9846	76,9554	76,9554	76,9554	76,9554
	50	201,0940	93,8047	93,8047	93,8047	93,8047

Arkal: $h_p = 9.5037 \times 10^{-10} \times Q^{2.5678}$ (6)

한슬테크: $h_p = 18.0443 \times 10^{-10} \times Q^{2.2419}$ (7)

남경: $h_p = 60.2003 \times 10^{-10} \times Q^{1.8792}$ (8)

홈에서의 평균 유속은 홈의 유량과 비례하고 홈의 단면적과 반비례한다. 유량-수두손실 관계식의 지수가 홈의 단면적에 영향을 받지 않는다고 가정한다면, 여과기별 홈 단면적과 수두 손실의 관계는 (9), (10), (11)과 같이 나타낼 수 있다.

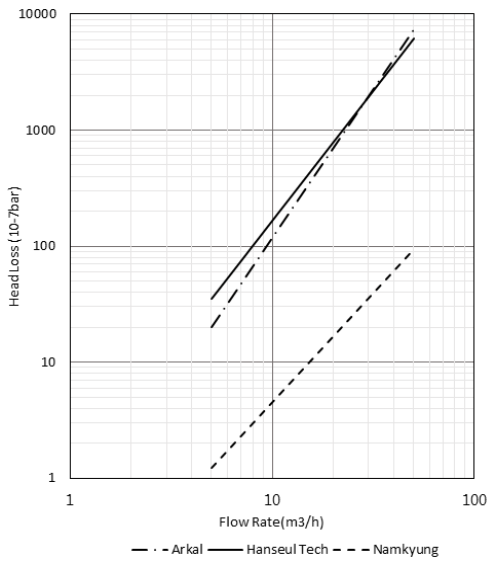
Arkal: $h_p \propto 1/A^{2.5678}$ (9)

한슬테크: $h_p \propto 1/A^{2.2419}$ (10)

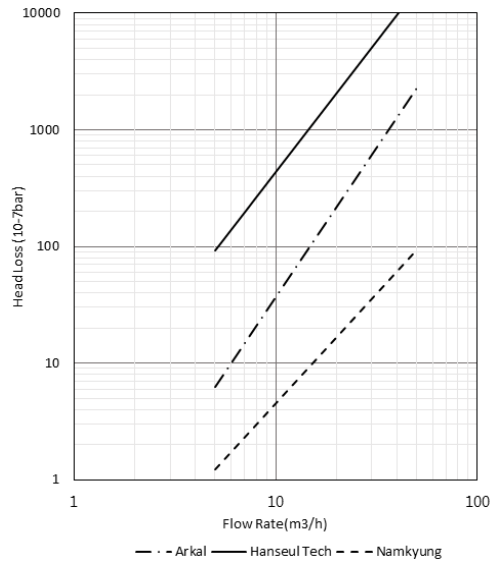
남경: $h_p \propto 1/A^{1.8792}$ (11)

홈 단면의 높이, 넓이, 수리학적 직경, 둘레를 남경과 같게 바꿨을 때의 변화율을 바탕으로 Arkal과 한슬테크의 홈 수두 손실 값을 환산하였고, 그 결과는 Table 6과 같다.

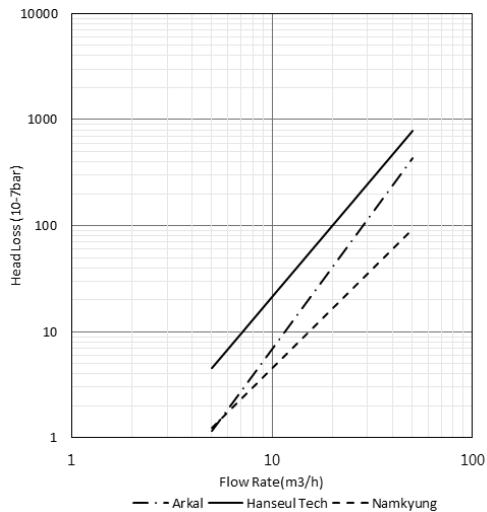
Table 6의 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 한슬테크의 경우에 수두 손실이 가장 높으며, 남경의 경우에 수두 손실이 가장 낮은 경향을 보였다. 이는 Fig. 5의 디스크 여과기에서 수두 손실과는 다른 양상이었으며, 등가 단면으로 치환 시에는 타원형을 갖는 남경 디스크가 가장 유리하게 나타났다.



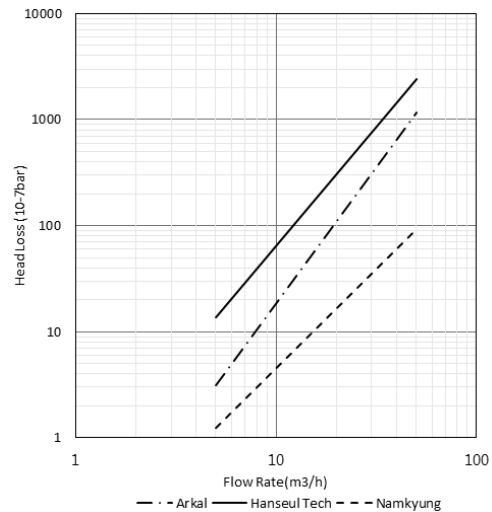
(a) Same depth



(b) Same area



(c) Same hydraulic diameter



(d) Same perimeter

Fig. 6 Head losses of disk grooves under the same cross-section conditions

Fig. 6 (a)에서는 디스크 홈 단면의 높이가 같을 경우, 타원형의 단면적이 삼각형의 단면적보다 2배 이상 컸다. 이 경우에 단면 둘레가 약 1.6배 더 길어서 마찰수두 손실이 더 높게 나올 수도 있지만 단면적이 수두 손실에 주는 영향이 더 커서 남경의 수두 손실이 더 낮게 나타나는 것으로 판단된다. Fig. 6 (b)에서는 디스크 홈의 단면적이 같을 경우, 타원형의 단면의 둘레가 삼각형의 단면의 둘레보다 짧아진다. 이 경우에 디스크 여과재 내부에서의 마찰 수두 손실이 감소하는 효과가 생기며, 이것이 반영되어 남경 수두 손실이 낮게 나타나는 것으로 판단된다. Fig. 6 (d)에서는 단면 둘레가 같을 경우, 타원형의 단면의 면적은 삼각형의 단면의 면적보다 더 크며, 유입 수두 손실이 감소하여 남경의 수두 손실이 낮게 나타나는 것으로 판단된다. Fig. 6 (c)에서는 디스크 홈 단면의 수리학적 직경이 같을 경우, 타원형의 단면적이 삼각형의 단면적보다 더 작지만 홈의 둘레 또한 삼각형의 둘레보다 더 작다. 남경의 수두 손실은 여전히 더 낮게 나타났으며, 한슬테크 단면을 기준으로 단면적이 약 0.78배 정도 작은 것보다, 단면의 둘레가 약 0.78배 정도 작은 것이 수두 손실에 더 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

종합적으로 홈 단면의 형상이 수두 손실에 미치는 영향을 비교하면, 타원형이 삼각형보다 디스크 홈에서의 수두 손실이 더 적게 나타나며, 이는 단면의 둘레가 삼각형보다 상대적으로 더 작기에 나타나는 현상으로 판단할 수 있다. 따라서 디스크 홈 단면에 대해서는 남경의 디스크 여과기가 수두 손실 측면에서 가장 효율이 좋은 제품이라고 할 수 있다. Arkal과 한슬테크의 경우를 비교하면, 두 디스크 여과기에서 모두 삼각형 형태의 디스크 홈 단면을 가지며, 삼각형의 폭과 높이의 비율이 서로 다르다. 디스크 홈 단면의 폭이 더 큰 비율을 가지는 한슬테크에서 수두 손실이 Arkal에서보다 더 높게 나타나므로, 삼각형 형태의 홈 단면에서 홈 단면 높이에 대한 홈 단면 폭의 비율이 더 클수록 홈 수두 손실이 더 커지는 경향을 가진다고 할 수 있다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 점적관개용 디스크 여과기의 디스크에 따른 수두 손실 변화를 측정하였고, 수두 손실의 변화에 대한 원인을 분석하였으며, 이를 개선하는 방법에 대하여 고찰하고자 하였다.

세 개의 서로 다른 회사의 점적관개용 디스크 여과기인 Arkal 2" Dual Manual, 한슬테크 2" SAFE, 남경 Alpha Q를 대상으로 디스크 표면의 고배율 촬영과 수두 손실 실험을 실시하여 각 디스크 여과기의 디스크 형상 분석과 수두 손실 분석을 진행하였다. 디스크 고배율 촬영은 FESEM을 이용하여 100배율로 확대하여 관찰하였으며, Arkal과 한슬테크의 디스크 홈은 삼각형의 단면을, 남경에서는 타원형의 단면을 가지고 있음

을 확인하였다. 전 세계적으로 가장 많이 판매되는 Arkal 디스크의 경우 다른 디스크와 비교하여 수두 손실을 증가시킬 수 있는 항목(전체 디스크 장수는 가장 많으며, 홈의 길이는 가장 길며, 디스크 내·외경, 두께 및 디스크 한 장의 홈 개수는 가장 작음)은 상대적으로 많았으며, 수두 손실을 감소시킬 수 있는 항목(홈 각도는 가장 작음)도 있기 때문에 Arkal 디스크가 수두 손실의 감소에 최적화된 디스크 설계라 하기는 어렵다.

디스크 여과기의 수두 손실 실험에서는 실제 점적 관개 시스템과 유사한 실험 장치를 제작하여 진행하였으며, 각각의 여과기에 대한 유량-수두 손실 관계식을 유도하였다. 유량이 4.3152~35.1790 m³/h 범위일 때, 한슬테크의 여과기 수두 손실이 가장 적었으며, 남경의 여과기 수두 손실은 13.0320 m³/h 이상일 때 Arkal의 수두 손실보다 적었다. Arkal과 한슬테크의 제품 매뉴얼에서 제공하는 디스크 여과기 사용 유량 범위인 12~25 m³/h에서 남경 여과기는 Arkal 여과기보다 수두 손실이 적지만, 한슬테크 여과기보다는 높은 것을 알 수 있다. 따라서 우리나라에서 관개용수를 사용할 경우, 한슬테크의 여과기의 수두 손실이 가장 낮으므로, 점적관개 시스템에 사용하기에 가장 적절한 디스크로 판단된다.

하지만 남경 디스크의 경우 홈 크기가 다른 디스크들의 절반 정도로 작기 때문에 수두 손실이 상대적으로 더 큰 것은 당연한 결과이다. 이와는 다르게 남경 디스크의 작은 홈 치수는 부유물질 제거 기능을 매우 증대시킬 것으로 보인다. 따라서 디스크 홈 단면 크기가 아닌 형태가 수두 손실에 주는 영향을 분석하기 위해서 각 회사 디스크 홈 단면 크기를 등가의 크기로 변환하고, 수리학적인 공식을 이용하여, 상대적인 수두 손실을 재계산해 보았다. 먼저, 수두 손실을 계산하기 위해서는 홈에서의 흐름이 층류인지 난류인지 판단이 필요하다. 위·아래로 디스크의 홈이 격자 형태로 만나서 발생하는 와류 구간은 디스크 여과기의 수두 손실에 영향을 미치기 때문에 가정에서 출발하였다. 계산 결과 디스크 홈 한 개당 수리 흐름은 Reynolds 수가 매우 작은 층류 형태를 보였다. 따라서 관수로의 마찰 수두 손실을 결정할 수 있다. 각 디스크에 대하여 홈의 단면적, 높이, 동수반경, 둘레를 동일하게 조정하였을 때, 디스크 홈 수두 손실이 모든 구간에서 확연히 낮게 관찰되는 경우는 남경 디스크로, 디스크의 홈 형태가 삼각형인 타 회사와 달리 남경 디스크의 홈 형태는 타원형이었다. 따라서 디스크 홈을 설계할 때는, 삼각형보다는 타원형의 홈 단면을 선택하는 것이 디스크 여과기의 수두 손실을 최소화하는 방안이라 할 수 있다. 만일 부득이하게 삼각형 형태의 홈 단면으로 설계할 경우에는 최대한 타원의 형태에 가깝게 형태를 유지하는 방안이 수두 손실을 최소화하는 데에 유리할 것으로 보인다. 다만, 본 연구의 경우 삼각형과 타원형의 디스크 홈 단면만이 대상이기 때문에, 다양한 형태의 디스크 홈 단면에 대한 수두 손실 분석

을 진행하고자 하는 경우, 새로운 디스크의 제작이 필요하다. 하지만 얇은 디스크 제작을 포함하는 실험방법은 많은 시간과 비용이 소모되기 때문에, 3D 모델링과 전산유체역학을 도입하여 수두 손실 값을 간접적으로 평가하는 방법을 추천한다.

감사의 글

본 연구는 농림수산물부의 재원으로 농림수산물기술 기획평가원의 첨단생산기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음 (315058-03-3-WT031).

REFERENCES

- Alhands, M. N., and J. F. Pranchaska, 1996. Disc filtration: something old, something new. In Proc. the American Filtration and Separation Society Meeting, 496-500. Valley Forge, VA, Northport, Alabama.: AFS.
- Benham, B. L., and B. B. Ros, 2002. Filtration, treatment, and maintenance considerations for micro-irrigation systems. Virginia Cooperative Extension, 442-757.
- Capra, A., and B. Scicolone, 2004. Emitter and filter tests for wastewater reuse by drip irrigation. *Agricultural water management* 68(2): 135-149. doi:10.1016/j.agwat.2004.03.005.
- Demir, V., H. Yurdem, A. Yazgi, and A. Değirmencioğlu, 2009. Determination of the head losses in metal body disc filters used in drip irrigation systems. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 33(3): 219-229. doi:10.3906/tar-0811-1.
- Duran-Ros, M., J. Puig-Bargues, G. Arbat, J. Barragan, and F. R. de Cartagena, 2009. Effect of filter, emitter and location on clogging when using effluents. *Agricultural Water Management* 96(1): 67-79. doi:10.1016/j.agwat.2008.06.005.
- Duran-Ros, M., G. Arbat, J. Barragan, F. R. de Cartagena, and J. Puig-Bargues, 2010. Assessment of head loss equations developed with dimensional analysis for micro irrigation filters using effluents. *Biosystems Engineering* 106(4): 521-526. doi:10.1016/j.biosystemseng.2010.06.001.
- Kim, C. S., J. H. Kim, S. H. Go, and G. H. Lee, 1991. Studies on the cucumber cultivation by automatic irrigation system in the greenhouse. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 33(1): 89-99 (in Korean).
- Kim, H. J., D. W. Son, S. O. Hur, M. Y. Roh, K. Y. Jung, J. M. Park, J. Y. Rhee, and D. H. Lee, 2009. Comparison of wetting and drying characteristics in differently textured soils under drip irrigation. *Journal of Bio-Environment Control* 18(4): 309-315 (in Korean).
- Hassanli, A. M., M. A. Ebrahimzadeh, and S. Beecham, 2009. The effects of irrigation methods with effluent and irrigation scheduling on water use efficiency and corn yields in an arid region. *Agricultural Water Management* 96(1): 93-99. doi: 10.1016/j.agwat.2008.07.004.
- Lee, N. H., H. C. Hwang, S. W. Nam, S. G. Hong, and W. J. Jeon, 1998. A study on the utilization of irrigation systems for greenhouse farming. *Journal of the Korean Society of Rural Planning* 4(2): 37-45 (in Korean).
- Liu, G., H. Jiang, D. Liao, and Y. Deng, 2017. Comparative experiments on the technological performance of disc filters. In Proc. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 207(1): p. 012066. IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/207/1/012066.
- Nam, W. H., J. Y. Choi, S. K. Choi, E. M. Hong, S. H. Jeon, and S. O. Hur, 2012. Discharge uniformity and performance assessment of drip irrigation system. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(4): 29-38 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2012.54.4.029.
- Puig-Bargues, J., G. Arbat, J. Barragan, and F. R. de Cartagena, 2005. Effluent particle removal by microirrigation system filters. *Spanish Journal of Agricultural Research* 3(2): 182-191. doi: 10.5424/sjar/2005032-139.
- Puig-Bargues, J., J. Barragan, and F. R. de Cartagena, 2005. Development of equations for calculating the head loss in effluent filtration in microirrigation systems using dimensional analysis. *Biosystems Engineering* 92(3): 383-390. doi:10.1016/j.biosystemseng.2005.07.009.
- Ribeiro, T. A. P., J. E. S. Paterniani, R. P. D. S. Airoid, and M. J. M. D. Silva, 2004. Water quality and head loss in irrigation filters. *Scientia Agricola* 61(6): 563-572. doi:10.1590/S0103-90162004000600001.
- Sivanappan, R. K., 1994. Prospects of micro-irrigation in India. *Irrigation and Drainage System* 8(1): 49-58. doi:10.1007/BF00880798.
- Tajrishy, M. A., D. J. Hills, and G. Tchobanoglous, 1994. Pretreatment of secondary effluent for drip irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 120(4): 716-731. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(1994)120:4(716).
- Wu, W., W. Chen, H. Liu, S. Yin, and Y. Niu, 2014. A new model for head loss assessment of screen filters developed with dimensional analysis in drip irrigation systems. *Irrigation and Drainage* 63(4): 523-531. doi:10.1002/ird.1846.
- Wu, W., W. Chen, H. Liu, S. Yin, Z. Bao, and Y. Niu, 2014. A dimensional analysis model for the calculation of head loss due to disc filters in drip irrigation systems. *Irrigation and Drainage* 63(3): 349-358. doi:10.1002/ird.1814.
- Yurdem, H., V. Demir, and A. Değirmencioğlu, 2008. Development of a mathematical model to predict head losses from disc filters in drip irrigation systems using dimensional analysis. *Biosystems Engineering* 100(1): 14-23. doi:10.1016/j.biosystemseng.2008.01.003.
- Yurdem, H., V. Demir, and A. Değirmencioğlu, 2010. Development of a mathematical model to predict clean water head losses in hydrocyclone filters in drip irrigation systems using dimensional analysis. *Biosystems Engineering* 105(4): 495-506. doi:10.1016/j.biosystemseng.2010.02.001.