우수저류조 유닛의 하중강도에 대한 모의실험 분석

이상우 · 남동균* · 최중문***

원이세라믹(주) · *한국소방산업기술원 소방산업연구소 · **한중대학교 약재가공학과
(2013. 5. 3. 접수 / 2013. 8. 2. 채택)

Simulation on Loading Strength of Rainwater Storage Tank Unit

Sang-Woo Lee · Dong-Kun Nam* · Jong-Moon Choi***

Attached Institute, Wonlee Ceramic Co. Ltd · *Korea Institute of Fire Industry & Technology

***Department of Korean Medicine & Processing, Hanzhong University

(Received May 3, 2013 / Accepted August 2, 2013)

Abstract : The design of rainwater storage system unit to manufacture its reservoir tank was tried, the simulation to predict of their structural strength was carried out. Rainwater storage system unit should be easy to their machinability, transport and assemble. Especially, their structure was able to secure the water storage space, withstand loads and easily response to pollution. Considering these various requirements, they have to Doria-pillar structure of the Roman architectural style because these designs could disperse the loads which are applied to them. Therefore, the six kinds of models possible were proposed. Several boundary conditions were given to each model. Their structural strength was predicted through the simulation on their stress and the displacement distribution to constant load. From the evaluated data, the structure which has a large pillar in the central of unit and four small pillars each corner was the best.

Key Words : rainwater storage system unit, structural strength, doria-pillar structure, simulation, stress, displacement distribution

1. 서론

급속한 산업화로 인해 전 지구적 환경변화가 발생하면서 국내 기상변화도 가뭄, 국지성폭우, 태풍 등을 동반하는 아열대성 기후로 변화되고 있다¹⁾. 이런 경향성은 앞으로도 계속될 전망이어서 이에 대한 대비가 필요하다. 인류가 문명을 발생하고, 이를 지속시킬 수 있었던 것은 자연과 순응하는 탄력적인 대응자세에 있다. 특히 수자원의 관리는 치세에 가장 큰 덕목이었기 때문에 고대로부터 이에 대해 도시계획적인 접근이 가장 활발하게 진행되었다고 볼 수 있다. 그러나 최근 기후변화 동향은 전술한 바와 같이 연간 강수량은 다소 증가하거나 일정한 수준에 머물러 있으나 하절기라는 일정기간에 강수량이 집중되는 경향을 보이고 있어 체계적인 수자원의 관리에 실패할 경우 경제에 미치는 영향이 크다고 볼 수 있다.

외국에서는 우리보다 앞서 우수에 대한 수질적, 수량적 측면에서 다양한 연구를 진행시켜왔으나 빗물이용에 대한 가이드라인만 가지고 있고, 아직까지 빗물에 대한 수질관리의 명확한 법적규제를 마련해 놓지 못하고 있다. 국내에서도 1990년대 이후부터 우수저류침투기술 및 빗물 재이용기술의 중요성을 인식하고 우수저류침투기술 등에 대한 연구용역이 시작되었다. 이 결과를 바탕으로 늦었지만 빗물저류침투기술 및 현장적용을 위한 가이드라인 등이 작성되었다.

지금까지 수행된 우수저류조에 관련된 연구내용을 살펴

보면 도시지역에 공사비가 저렴한 PN(Plastic Nodular) 빗물저류조를 설치하였을 경우 타 공법에 비해 시공이 간편하고, 유지관리가 편리한 장점과 집중호우 시 우수에 의한 도시 하천의 부하를 감소시킬 수 있고²⁾, 도시우수 저류침투시설 중 저류지, 투수성 포장, 옥상녹화를 EPA SWMM으로 모형화하여 설치비용에 따른 침투유출량 저감효과를 비교분석하거나³⁾, 침투형 우수유출 저감시설에 대한 개선 방법으로 침투-저류시스템을 제안하고, 수리모형 실험에 의해 우수유출 저감효과를 분석한 것⁴⁾이다. 또한 효율적인 우수유출저감 기능을 가진 침투-저류 시스템을 제안하고, 수리모형 실험을 통해 침투-저류 시스템의 저감효과에 대해 연구⁵⁾, 안양천 중상류 유역에 대해 SWAT 모형을 이용하여 우수저류시설에 대한 운영효과를 분석⁶⁾, 방재 및 수자원 재활용을 위해 PC(Precast concrete) 콘크리트 빗물저류조를 개발하여 현장 타설이 아닌 PC 콘크리트 블록을 현장에서 조립하면 시공기간이 대폭 단축되고, 작업 및 주변 환경을 크게 개선시킬 수 있다⁷⁾는 보고들이 있다.

지금까지의 연구결과로 보면 빗물저류시설을 설치했을 때 우수유출 저감효과에 대한 내용이거나 우수유출저감 효과에 대한 실험적인 연구가 주로 이루어졌고, 우수저류시설이 방재 및 수자원활용에 탁월한 효과를 보인다는 연구결과를 나타낸다고 볼 수 있다.

그러나 지금까지 시행된 연구의 대부분은 현장 콘크리트, PC 콘크리트 및 골재를 이용한 저류시설이며 이는 설

*Corresponding Author: Jong-Moon Choi, Tel : +82-10-5678-6291, E-mail: jmhoi@hanzhong.ac.kr
Department of Korea Medicine & Processing, Hanzhong University, 200, Jiyang-gil, Donghae-si, Gangwon-do 240-713, Korea

치 후 공간적 문제와 하중문제에는 제약이 없으나 공정기간이 길고, 경우에 따라서는 기초 토목공사를 필요로 하거나 사후 관리에 어려움이 있으며 시공비가 과다한 문제가 있을 수 있다. 따라서 저렴하면서 시공기간과 기초공사가 불필요하고, 사후관리가 용이한 저류시설을 개발해야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 지금까지 시도되지 않은 방법인 저류조 시설을 만들기 위해 플라스틱 단위셀 형태의 유닛을 제작하고, 이를 서로 연결하여 형성된 공간에 빗물을 저류함으로써 빗물을 저장할 공극률을 최대화 하고, 기타 하중에도 충분히 견딜 수 있는 강도를 가지며 타 공법에 비해 규모도 작고, 토지이용률을 극대화할 수 있는 방안을 개발하고자 하였다. 이를 위해 플라스틱 재질로 만든 단위 셀(유닛)에 대해 6가지 가능한 모델을 설계하고, 각 모델들에 대해 일정한 경계조건을 부가하여 예상되는 일정 하중에 따라 응력분포와 변위분포 변화를 ANSYS 모의실험을 통해 유한요소해석을 실시하였다. 모의실험으로부터 얻어진 모델들의 응력 및 변위분포로부터 기존 제품들에 대비한 장점을 파악한 후 새로운 유형의 저류조 유닛제작에 타당한 디자인을 선택하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1. 우수저류제품 설계

우수저류제품의 단위 유닛은 제작의 편리성 때문에 플라스틱제의 경우 대부분 사출식으로 제조하는 경우가 보편적이다. 따라서 유닛은 생산성, 가공성이 우수해야 한다. 또한 제작 후 시공지에서 조립 등의 작업을 해야 하므로 운반성, 조립성 및 유지보수의 편의성도 가져야 하며, 유닛을 조립하여 구성된 저류조의 내부구조가 충분한 양의 우수를 저장할 수 있는 공극률이 최대이어야 할 뿐만 아니라 단위 유닛 자체가 구조적으로 일정강도에 충분히 견딜 수 있어야 하고, 각종 사후 오염에 능동적으로 대응할 수 있는 형태이어야 한다.

무엇보다 일차적인 설계의 주안점은 단위 유닛의 구조적 강도에 있다. 따라서 지하에 매설된 저수조의 안정성을 유지하는 방법은 유닛의 상단과 하단을 잇는 기둥을 내부에 설치하는 것이다. 따라서 고대 로마의 건축양식인 도리아식으로 연결한다면 유닛 자체에 걸리는 압축강도에 대해 충분히 저항성을 갖기 때문에 이를 기본으로 하는 기초 디자인 시안을 개발하였다.

두 번째로 고려해야 할 사항은 우수저류조 유닛의 제작 용이성이다. 유닛자체의 물성이 플라스틱이고, 이를 제작할 때 사출식으로 제조하기 때문에 사출의 용이성을 고려해야 한다. 따라서 사출의 용이성을 고려하여 기둥의 중간부분이 분리되도록 설계하고, 각각 다른 사출작업을 통해 제작한 후 이를 결합하였다. 또한 상단면과 하단면은 우수가 빠르게 저장공간으로 스며들 수 있도록 하고, 공극률을 최대화 하기 위해 많은 홈을 만들었다.

세 번째로 고려해야 할 점은 재질적 측면이다. 단순 플라스틱으로는 모든 방향으로 하중을 받는 저류조의 특성

상 일정 강도를 유지할 수 있는 재료를 선택해야 한다. 이 목적에 부합되는 것이 별도의 강화제를 첨가한 강화플라스틱을 이용하였다.

네 번째로는 단순히 상부와 하부를 하나의 기둥으로 연결한다면 유닛의 중심부에만 모든 하중이 부과되므로 상하단부의 연결이 끊어질 가능성이 있다. 그런데 저류조에는 본 연구에서 고려하는 유닛을 여러 개 결합하여 사용하므로 디자인, 공극률 및 강도유지를 위해 유닛 내부에 복수이상의 기둥을 추가하였다.

이런 고려를 종합하여 다음과 같이 유닛의 디자인을 제안하였다.

Fig. 1에서 보듯이, 제시된 디자인 모델 1과 2는 로마건축

Fig. 1. Design models of rainwater storage unit.

Fig. 2. Boundary condition of vertical compression test to rainwater storage unit.

양식의 도리아식으로 중심에 굽은 기둥을 설치하고, 외곽에 직경이 작은 4개의 기둥을 배치한 형태를 설계하였고, 모델 3은 직경이 매우 큰 중공축 형태의 기둥을 갖도록 하였다. 모델 4는 유닛의 상단부와 하단부의 면적과 거의 동일한 사각기둥에 원통형태의 공간을 두어 공극률을 최대한으로 한 디자인이며, 모델 5와 6은 유닛의 외곽에만 직경이 작은 기둥이 존재하도록 설계하였다.

2.2. 제안된 유닛 디자인의 유한요소 해석의 경계조건 설정

제시된 각 모델들이 일정 하중에 대해 어떤 응력 및 변위 분포를 나타낼 지에 대한 유한요소 해석을 위해 실험시험 상황을 모사하여 다음과 같은 경계조건을 설정하였다.

실험시험 조건은 Fig. 2에서 보듯이, 저류조 유닛의 연직방향으로 한계하중을 주었을 때 응력분포가 어떻게 배향되는 지 확인하고, 최대 변위를 비교하였고, 응력분포를 통해 응력이 집중된 곳을 취약부분으로 정의하였다. 이에 필요하다면 취약부분에 보강재를 덧댈 수 있도록 하여 6 종류의 모델에 대해 동일한 경계조건을 부과하였다.

2.3. 저류조 유닛모델의 수치해석 이론

본 연구의 목적에 맞는 파괴이론을 선택해야 한다. 일반적으로, 최대 주응력을 기준으로 파괴여부를 판단하는 최대 주응력설은 취성재료에 적합하고, 최대 전단응력 파괴기준과 최대변형에너지 파괴기준은 연성재료에 적합한 이론으로 알려져 있다. 또한 연성재료에 대해서 최대전단응력설은 계산은 간단하지만 주응력과 주응력사이의 경계에서는 해석이 잘 되지 않는 영역이 존재하여 최대변형에너지 파괴기준을 적용하는 것이 더 좋은 결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서 제안한 저류조 유닛은 강화플라스틱을 이용하지만 이는 금속재질에 비해 충분히 연성 재료로 판단할 수 있으므로 이에 대한 유한요소 해석은 최대변형에너지 파괴기준을 이용하여 재료의 파손정도를 예상하는 것이 더 나을 수 있다. 따라서 본 연구의 목적에 부합되는 해석은 최대전단변형 에너지설 또는 von Mises 항복조건이라 부르는 변형에너지 기반 이론을 바탕으로 진행되었다.

한편, 유한요소 해석을 위한 FEM프로그램은 ANSYS를 이용하여 응력분포 및 변형거동을 평가하였다.

2.4. 하중에 관한 안전조건

우수저류제품의 기계적 특성은 지하지반에 설치되므로 토압과 지상 시설물의 연직방향, 수평방향 하중을 견딜 수 있어야 하며, 지진으로 인한 상하진동에 의한 크랙이 발생하지 않아야 한다. 이를 위해 기존 우수저류제품의 사용범위를 산출하기 위해 실시한 기존 시험의 수치를 바탕으로 그림과 같이 3가지 하중에 대한 경계조건을 추정하였다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이, 연직방향의 하중에 대한 해석 경계조건은 실험 시 가했던 최대하중 170.45 kN/m^2 을 연직방향으로 부여하고, 하단부는 모든 방향에 구속하였을 때 우수저류제품이 안전해야 한다.

수평방향의 하중에 대한 경계조건은 실험 시 가하였던 최대하중 119.91 kN/m^2 을 연직방향으로 부여하고, 하단부

Fig. 3. Boundary conditions of load experiment to rainwater storage unit models.

는 모든 방향으로 구속하였을 때 우수저류제품이 안전하여야 한다. 상하방향의 진동에 대한 실험 시 가하였던 하중 80 kN/m^2 , 10.8 kN/m^2 을 1 Hz로 10만회 반복 부여하고, 하단부는 모든 방향으로 구속하였을 때 우수저류제품이 안전해야 한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 모델 1에 대한 해석

모델 1은 하나의 모듈 중심에 직경이 굽은 기둥이 존재하고, 외곽에 직경이 작은 기둥 4개가 상단과 하단부를 연결하는 구조이다. 이 모델에 연직하중 170.45 kN/m^2 을 상단부에 균일하게 공급하였을 때 발생하는 von Mises 응력강도 분포와 변형거동 특성을 검토한 결과 Fig. 4에 나타난 바와 같다.

Fig. 4에서 볼 수 있듯이, 이 모델은 우수저류시스템에 발생하는 von Mises는 비교적 고르게 분포됨을 볼 수 있다. 모듈외곽에 위치한 직경이 작은 4개의 기둥 상하에 있는 기둥보강재의 끝단에서 응력집중 현상이 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 이 부분이 취약하므로 보강재의 형태나 치수를 바꿔서 보강재 끝단에서 발생하는 응력을 고르게 분산시키는 것이 좀 더 안전할 것으로 생각된다. 또한 변위분포 그림에서 보면 중앙의 비교적 큰 직경의 기둥이 있어서 중앙부의 변위가 매우 작은 것을 확인할 수 있었다. 이에 비해 기둥과 기둥사이가 큰 변위량을 갖는 것을 볼 수 있다. 기둥의 보강재에 대한 보강과 함께 최대변위가 일어나는 부분의 형상이나 추가적인 보강재 설치가 필요할 것이다.

Fig. 4. Predictions of von mises stress, fragile site(a) and displacement distribution(b) of model 1.

3.2. 모델 2에 대한 해석

이 모델은 우수저류시스템 모듈에 중심에 직경이 굵은 기둥이 존재하고, 외곽에 직경이 작은 기둥 4개가 상단과 하단부를 연결하는 구조이다. 모델1과 매우 유사한 구조이지만 상단부와 하단부의 보강재가 좀 더 촘촘하게 더 많은 개수가 설치되어있다. 모델1에 적용했던 바와 같이 연직하중 170.45 kN/m^2 를 상단부에 균일하게 공급하였을 때 발생하는 von Mises 응력강도 분포와 변형거동 특성을 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에서 보듯이, 이때 우수저류시스템에 발생하는 von Mises는 비교적 고르게 분포하는 것을 볼 수 있다. 이 모델의 경우 모듈 외곽에 위치한 직경이 작은 4개의 기둥 상하에 있는 기둥 보강재의 끝단에서 응력집중 현상이 발생하는 것을 알 수 있다. 이 부분이 취약하기 때문에 보강재의 형태나 치수를 바꿔서 보강재 끝단에서 발생하는 응력을 고르게 분산시키는 것이 좀 더 안전할 것으로 생각된다. 또한 변위분포 그림을 보면 중앙의 비교적 큰 직경의 기둥이 있어서 중앙부의 변위가 매우 작은 것을 알 수 있었다. 그러나 모델 1과 같이 기둥과 기둥사이가 큰 변위량을 갖는 것을 볼 수 있다. 기둥의 보강재에 대한 보강과 더불어 최대변위가 일어나는 부분의 형상이나 추가적인 보강재 설치 필요할 것이다. 그러나 모델 1에 비해 상단부와 하단부에 더 많은 보강재가 존재해서 변위의 분포가 좀 더 균일해진 것을 확인 할 수 있었다.

3.3. 모델 3에 대한 해석

우수저류시스템의 모듈의 중심에 직경이 굵은 중공축과 같은 형태의 기둥이 한 개가 구조이다. 이 모델에 대해서

Fig. 5. Predictions of von mises stress, fragile site(a) and displacement distribution(b) of model 2.

Fig. 6. Predictions of von mises stress, fragile site(a) and displacement distribution(b) of model 3.

도 다른 모델에 적용시킨 것과 같은 연직하중을 부과했을 때 발생하는 von Mises 응력강도 분포와 변형거동 특성을 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에서 보면, 이때 우수저류시스템에서 발생하는 von Mises가 모델 1 또는 2에 비해 불균일하게 응력이 분포하는 것을 볼 수 있다. 상단부의 물빠짐을 위한 틈새부분에 응력이 집중하는 것으로 보이며 특히, 기둥과 상단부와 하단부 경계에서 응력 집중현상이 심한 것으로 나타났다. 보강재가 편형태가 아닌 좀 더 두툼하고, 형상변화가 적은 보강재로 교체해야 할 것으로 보인다. 그리고 변위 분포 그림을 보면 중앙의 큰 직경의 중공기둥이 있어서 중앙부의 변위는 작은 것으로 확인되었다. 이에 비해 상단부와 하단부의 모서리 부분에서 최대 변위를 갖는다는 점을 알 수 있었다. 모서리 변위가 큰 것은 단일 모듈에서는 중요한 요소는 아니지만 다른 모듈과의 결합을 고려하면 조립이 불가능하거나 고장의 원인이 될 수 있으므로 보강재 또는 조립 시 변형을 막을 수 있는 특수한 연결부재를 추가해야 할 것이다.

3.4. 모델 4에 대한 해석

우수저류시스템 하나의 모듈의 상단부와 하단부의 면적이 거의 동일한 사각기둥에 원통형태의 공간을 둔 구조이다. 역시 같은 연직하중을 부과할 때 발생하는 von Mises 응력강도분포와 변형거동 특성을 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7에서 볼 수 있듯이, 우수저류시스템에 발생하는 von Mises이 전반적으로 균일한 것을 알 수 있다. 그러나 한쪽 방향으로 뚫린 공간으로 인해 응력분포 또한 같은 경향을 가지는 것이 특징이다. 또한 수직하중에도 그 응력의 분

Fig. 7. Predictions of von mises stress, fragile site(a) and displacement distribution(b) of model 4.

Fig. 8. Predictions of von mises stress, fragile site(a) and displacement distribution(b) of model 5.

포가 기둥에도 넓게 응력이 분포하는 것으로 보아 수평하중에 대한 저항력이 다른 모델에 대한 해석에 비해 낮은 것으로 보인다. 그리고 기둥역할을 하는 옆면과 상단부를 연결하는 보강재에서 응력집중 현상이 나타나는 것으로 보아 이 역시 보강재에 대해 형상 및 치수 변화를 꾀해야 할 것이다.

3.5. 모델 5에 대한 해석

우수저류시스템의 하나의 모듈의 직경이 작은 4개의 기둥으로 상단부와 하단부를 연결하는 구조이다. 이 모델에 대해서도 연직하중 170.45 kN/m^2 이 상단부에 균일하게 공급하였을 때 발생하는 von Mises 응력강도 분포와 변형거동 특성을 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8에서 보듯이, 이 모델에 대해서는 우수저류시스템에 발생하는 von Mises 응력이 앞에서 해석되었던 해석 모델들에 비해 불균일한 것을 볼 수 있다. 상단부와 하단부에서도 지역적으로 응력이 분포하는 것을 쉽게 확인 할 수 있으며, 다른 해석 모델에 비해 기둥에 많은 응력이 분포하는 것을 볼 수 있다. 이는 기둥에 많은 응력이 가해지고 있으며, 장기적으로 일정 압력 이상 계속 가해진다면, 기둥에서도 파손이 일어날 수 있음을 예측할 수 있다. 또한 상하진동에 대한 피로파괴도 우려할 수 있다. 그리고 직경이 작은 기둥이 모듈의 중심 가까이에 배치되어 있어 상단부와 하단부의 모서리에서 큰 변형이 일어나고 있음을 확인할 수 있다. 해석모델 3과 마찬가지로 다른 모듈과 결합 시에 모서리의 변형으로 인해 조립이 불가능해지거나 고장의 원인 될 수 있으므로 모서리에서 변형이 적게 일어나도록 보강재를 추가해야 할 것이다.

3.6. 모델 6에 대한 해석

우수저류시스템의 하나의 모듈의 직경이 작은 4개의 기둥으로 상단부와 하단부를 연결하는 구조이다. 다만, 해석모델 5보다 4개의 기둥이 좀 더 외곽에 배치되어 있다. Fig. 9에는 연직하중 170.45 kN/m^2 이 상단부에 균일하게 공급하였을 때 발생하는 von Mises 응력강도 분포와 변형거동 특성을 나타내었다.

이때 우수저류시스템에 발생하는 von Mises 응력이 앞에서 해석되었던 해석 모델들에 비해 불균일한 것을 볼 수 있다. 상단부와 하단부에서도 지역적으로 응력이 분포하는

것을 쉽게 확인 할 수 있으며, 다른 해석모델에 비해 기둥에 많은 응력이 분포하는 것을 볼 수 있다. 기둥에서 발생하는 응력이 해석모델 5보다 더 심한 것을 알 수 있으며, 이는 기둥에서도 파손이 일어날 수 있음을 예측할 수 있다. 또한 상하진동에 대한 피로파괴도 우려할 수 있다. 그러나 기둥이 외곽에 배치되어 있어서 해석모델 5보다는 상단부와 하단부의 모서리에서의 변형이 작은 것을 볼 수 있다. 그러나 그에 비해 기둥의 변형 또한 심해서 기둥의 직경을 크게 변경해서 기둥의 변형을 작게 해야 할 것이다.

3.7. 우수저류시스템의 하중에 대한 해석 결과

우수저류시스템의 하중에 대한 강도를 검토하기 위해 6개의 디자인모델을 선정하여 우수저류시스템에 작용하는 응력분포 및 변형거동 특성을 해석하였다. 유한요소해석 결과에 의하면 보강재의 끝단에서 많은 집중응력이 발생하였으므로, 보강재에 대한 형상 및 치수를 변경하고, 기둥 사이의 간격을 일정하게 하여 응력과 변형거동을 균일하게 분포하도록 설계하는 것이 중요하였다.

모델별 응력 분포의 그림을 비교해 보면, 모델 3~6의 경우에는 응력분포가 불균일한 것을 쉽게 확인 할 수 있다. 즉, 이런 모델들은 특정 지역에 응력이 집중되어 설계 강도보다 낮은 하중에서도 피로파괴의 원인이 될 수 있다. 그러므로 장기간 지하에 매설되어 우수를 관리하는 우수저류시스템엔 적합하지 못한 모델들로 생각된다. 특히, 기둥의 중앙부에도 비교적 심한 응력이 발생한 모델 5와 모델 6의 경우에는, 기둥의 저항력이 강한 수직방향의 하중에 대해서도 응력이 발생하였으므로, 수평방향의 하중이 작용한다면 다른 해석모델에 비해 심각한 안전의 위험에 쉽게 빠지게 될 것이다. 즉, 응력 분포를 통해 모델 1과 모델 2를 우수저류시스템에 적합한 디자인 모델로 추천할 수 있다.

한편 주어진 6가지 유닛 모델들에 대해 일정 하중에 대한 변위거동 및 최대변위량을 비교한다면, 모델 3과 모델 5의 경우 상·하판의 모서리에서 최대변형부가 발생하는 것을 알 수 있다. 게다가 최대변형량도 다른 모델에 비해 약 2~3배 큰 것을 알 수 있다. 그리고 모델 4와 모델 6의 경우는 기둥부에서 최대 변형이 일어나는 것을 알 수 있다. 모델 1과 모델 2의 변위거동에 대한 해석결과도 역시 변형거동의 분포형태는 유사한 것을 알 수 있다. 그러나 우수저류시스템은 같은 하중에 대해 변위량이 적은 것이 우수저류시설의 견고함과 결합상태 유지에 좀 더 안전할 수 있으므로 모델 2의 구조가 제안된 모델 중에 가장 우수하고, 우수저류시스템에 적합한 구조로 판단된다.

지금까지 우수저류시스템의 기계적 특성 해석을 통해 적합한 형상을 선정할 수 있도록 유한요소해석을 하였고, 이를 통해 각 모델에 대한 응력분포와 변형거동을 해석하였다. 수행한 유한요소해석 및 해석경계조건이 실제 실험을 정확하게 모사했는지 확인하고, 기존의 우수저류시설과의 최대변형량을 비교한 내용을 Table 1에 수록하였다.

Table 1에서 보듯이, 이는 저류조에 활용한 유닛의 모델 디자인이 모두 다른 점을 고려한다면 매우 정확하게 유한요소 해석이 수행되었으며 해석의 경계조건 또한 실제실

Fig. 9. Predictions of von mises stress, fragile site(a) and displacement distribution(b) of model 6.

Table 1. Comparison of maximum displacements according to the models.

		Max. displacement(mm)	Height(mm)	Elongation(%)
Rain stadium		10.6	520	-2.92
Model	1	16.05	500	-3.21
	2	15.05	500	-3.01
	3	56.5	500	-11.30
	4	25.3	500	-5.06
	5	41.9	500	-8.38
	6	36.5	500	-7.30

험을 잘 고려했다는 점을 확인할 수 있었다.

기존에 시행되고 있는 우수저류시스템과 유한요소 해석을 통한 결과로부터 도출된 모델 2 유닛의 변위를 비교하면 그 차이가 0.03%로 거의 유사한 성능을 나타내는 것을 확인 할 수 있었다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 유닛의 재료를 부재료를 첨가하여 물성을 강화시킨 강화플라스틱을 사용할 경우 기존 시료에 비해 인장강도가 3배 이상 클 것으로 기대되므로 기존 우수저류시스템보다는 훨씬 강도가 강할 것으로 기대된다. 또한 수직하중에 대한 변위(%)로 가정했고, 기둥이 수직방향으로 세워진 구조이므로 재료의 강도와 형상의 변형거동 역시 선형적이라고 가정할 수 있었다.

3.8. 유한해석 결과로부터 유도되는 예상 성능

본 연구에서 제안된 모델 유닛을 이용하여 우수저류시스템을 제작할 경우 예상되는 성능으로는 우선 연직방향으로 허용응력을 170.45 kN/m²로 설정하여 안전성을 검토했으므로 이에 대한 허용응력은 Table 2에 제시된 바와 같이 예측된다.

한편, 무엇보다 본 연구의 결과 얻어진 유닛구조로 보아 얼마나 많은 우수를 저장할 수 있는 가를 판단하기 위해 공극율을 산출하였다. 이때 저류조의 크기를 (10행 X 10열 X 2단)으로 할 때를 가정하여 계산한 결과 공극율은 약 94%로 산출되었다. 이렇게 공극률이 높아진 이유로는 Fig. 10에 제시된 바와 같이 중앙부에 존재하는 기둥 내에도 공극이 존재하며 외곽에 존재하는 4개 기둥 내에도 공극이 존재하도록 설계했기 때문이다.

본 유닛의 전체 연직방향 및 수평방향에 대한 압축시험 결과는 Table 3과 같이 예상된다.

Table 2. Allowable stress of model 2 unit according to vertical and horizontal direction loads.

Direction	Types	Allowable stress(kN/m ²)	
Vertical	TBSH	170.45	
		General	earthquake
Horizontal	Standard burial method	46.1	75.6
	Deep burial method	61.2	90.2

Fig. 10. Detail design of model 2 unit.

Table 3. The results of compression test for model 2 unit.

Direction	Stress	After the given stress
Vertical	170.45 kN/m ²	0.745%
Horizontal	119.91 kN/m ²	0.641%

Table 4. The results of long term crookedness for model 2 unit.

Direction	Crookedness after 50 years	After the given crookedness
Vertical	0.698 %	0.745%
Horizontal	0.597 %	0.641%

Table 5. The results of fatigue compression test to the unit.

Maximum load 102 kN, Minimum load 10 kN		
Repeat counts	Compressive deformation	Unit state
1	10.2 mm	No distortion
10000	12.1 mm	No distortion
20000	12.8 mm	No distortion
30000	13.4 mm	No distortion
40000	14.6 mm	No distortion
50000	14.8 mm	No distortion
60000	14.6 mm	No distortion
70000	14.8 mm	No distortion
80000	15.2 mm	No distortion
90000	15.6 mm	No distortion
100000	15.8 mm	No distortion
Unload	7.8 mm	No distortion

제시된 압축시험 결과에 따른 장기하중에 대한 저항성은 Table 4와 같이 예상할 수 있다.

또한 유한요소 해석에서 안정조건을 상하방향의 진동에 대한 실험 시 가했던 하중을 80 kN/m^2 , 10.8 kN/m^2 을 1Hz로 10만회 반복 부여하고, 하단부는 모든 방향으로 구속했을 때 안전해야 한다는 조건을 설정하여 해석했으므로 본 유닛의 연직방향 피로압축실험 결과는 Table 5와 같이 계산될 수 있다.

4. 결론

이상과 같이 우수저류시스템에 사용될 단위 셀인 유닛을 디자인한 후 이를 바탕으로 기계적 특성에 대한 유한요소 해석을 통해 여러 가지 구조적 강도를 예측할 수 있는 요소를 점검할 결과 공극률과 생산성, 구조적 강도를 모두 갖춘 유닛 모델을 선정할 수 있었다.

이를 바탕으로 친환경적이고, 수입대체 효과를 갖춘 우수한 저류시스템을 구축할 수 있는 제품 개발이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글: 본 연구는 소방방재청 연구개발사업, 2011년 재난안전기술개발기반 구축사업으로 지원된 연구입니다. 연구비지원에 감사드립니다.

Reference

1) M. Kottek, J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, R. Rubel, "World

map of koppen-Geiger climate classification updated", Meteorol. Z., vol. 15, pp. 259~263, 2006

2) Y. I. Moon, Y. O. Kee, S. K. Yoon, J. W. Moon, "Effect Analysis of Stormwater Reduction in Urban Stream according to Installation of PN Rainwater Storage", Conference of Korean Water Resource Association, p 422, 2011.

3) K. S. Lee, H. S. Kim, S. D. Kim, C. S. Yoo and J. Y. Yoon, "Analysis of Runoff Reduction effect according to Storage and Infiltration Facility in Urban Area", Conference of Korean Society of Water Quality, pp. 403~404, 2007.

4) J. H. Lim, J. W. Song, Y. J. Park, "An Experimental Study on Improvement of the Effect for Runoff Reducing Facilities Using Infiltration", Korean Geo-Environmental Society, vol. 10, no. 4, pp. 5~13, 2009.

5) J. W. Song and J. H. Lim, "An Experimental Study on Runoff Reducing Effect of Infiltration-Storage System due to Rainfall Intensity", Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, vol. 7, no. 4, pp. 85~95, 2007.

6) E. S. Jung, G. S. Lee and M. J. Shin, "Characteristics of Water Quantity and Quality of the Anyangcheon using SWAT Model and Calculation Result of EMC", Korean Society on Water Quality, vol. 22, no. 4, pp. 648~657, 2006.

7) Y. C. Jang, C. H. Cho, O. S. Kim, S. E. Oh, J. K. Lee, "The PC concrete Rainwater Storage Facility development for a prevention of disaster and a water resources re-application", Conference of Korea Water Resources Association, 2005.