

— 최종 보고서 —

사면 태양광 패널 설치로 인한 산사태 방지대책



2013860006 김선엽 2015860021 서상현
2014860047 김한기 2015875025 이현우
2014860037 장진욱

사면태양광 패널설치로 인한 산사태 방지 대책

목차.

1. 개요

2. 경쟁력 분석

3. 개발과제의 기대효과

4. 개념설계안

5. 상세설계안

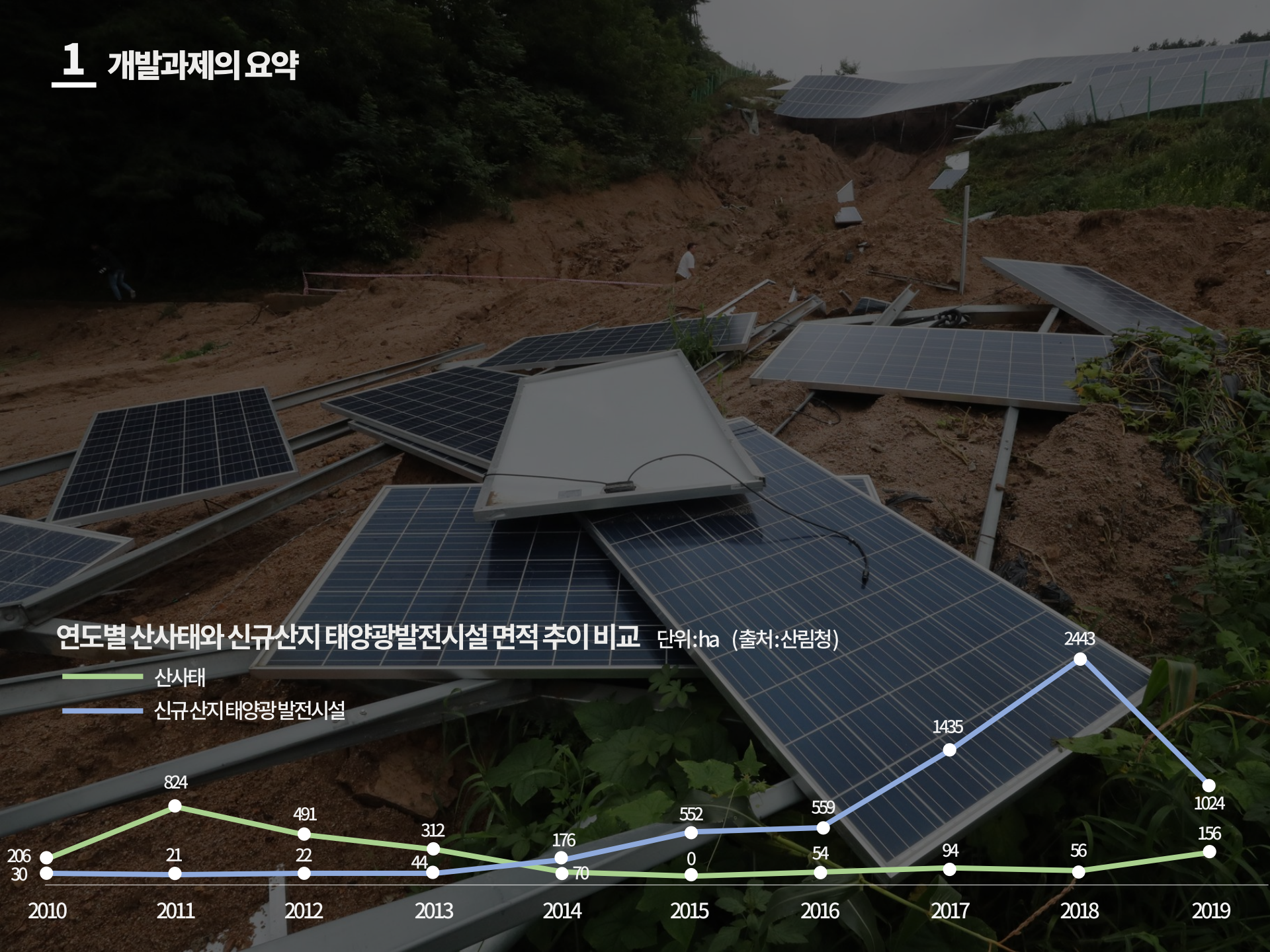
6. 시뮬레이션 및 결론

7. 완료작품의 평가 및 향후계획

1

개요

1 개발과제의 요약



■ 늘어나는 태양광 패널 산지

최근 우리나라는 탈원전의 행보를 이어나가, 산의 수목을 베어낸 자리에 태양광 패널을 설치하는 등 친환경 에너지를 사용하려고 있다. 경사지가 경제성, 통풍, 토지 효율성의 측면에서 태양광 발전 시설을 이용하기에 적지 않은 것은 자명하기 때문이다.

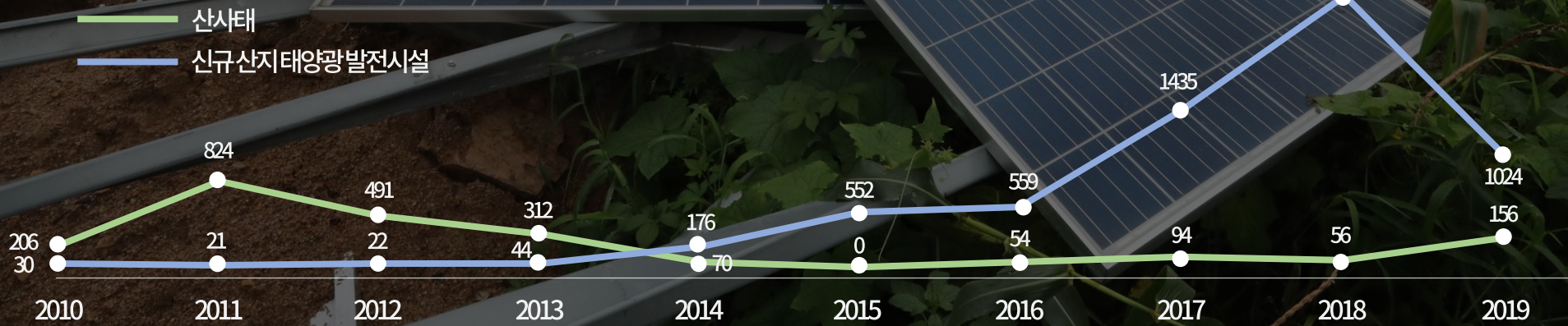
■ 취약해진 지반과 산사태

하지만 수목이 없을 뿐더러, 시공 시에 흐트러진 취약한 지반은, 2020년의 여름의 거센 태풍에 의해 산사태를 유발했고, 심각한 문제점으로 대두되었다. 강수량이 여름에 집중되는 우리나라 기후의 특성상 안정성을 보장해야 하는 것도 또한 중요하다.

■ 이렇다 할 대책이 없는 상황

산사태로 인한 농가 피해와 부서져 사용하지 못하는 폐 태양광 패널 처리 문제 및 다양한 문제가 대두되고 있지만, 정작 기존의 시공 방식이나 구조에 대해선 이렇다 할 논의가 이루어지지 않고 있다. 따라서 사면 태양광 패널 설치로 인해 발생하는 산사태에 대한 방지 대책을 위해 프로젝트를 진행하고자 한다.

연도별 산사태와 신규 산지 태양광 발전 시설 면적 추이 비교 단위: ha (출처: 산림청)



2

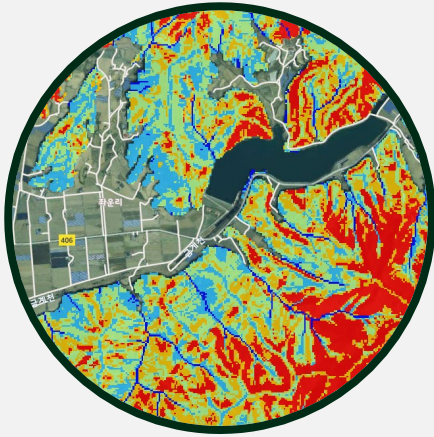
—

경쟁력 분석

2 경쟁력 분석

관련기술및시장

산사태 예보시스템



1. 적색(1등급)-주황색(2등급)-초록색(3등급)-하늘색(4등급)-청색(5등급)으로 위험도를 분류해 지도에 표시, 주변의 마을에게 위험 예측
2. 산사태 발생 메커니즘을 산지가 가진 고유 인자로 위험지도를 제작
3. 임상(숲의 모습), 경급(지름크기), 사면경사, 사면방위, 사면길이, 사면곡률, 모암, 토심, 지형습윤지수(TWI)의 9가지 인자를 사용

산사태 피해 저감 대책



1. 사면안정화기법
: 슛크리트, 록볼트, 와이어매쉬
2. 산지점용허가 기준 강화
3. 큰강우 시 유속저감 및 토석류 쓸림방지
: 사방댐, 석축, 모래주머니, 옹벽
4. 식재관리
침엽수위주의 단순 조림보다 활엽수 식재

패널 설치 가이드라인



1. 태양광발전시설 입지 가이드라인
: 평균경사도/도로로부터 표고 상한제/비오톱등급/보전지역 등을 기준으로 삼고 있다.
2. 일본의 가이드라인
: 재해의 위험이 높은 지역 및 토사 유출로 인한 환경오염 위험이 있는 지역을 제외한다.

■ 산사태 예보시스템

지도 및 예경보시스템을 활용해 피해를 막는 경우도 많지만, 위험도가 표시되어 있지 않거나 낮음으로 분류되어 있음에도 발생하는 산사태로 인해 유명무실하다는 평가가 많으며, 발생 자체를 막기에도 한계를 가지고 있다.

■ 산사태 피해 저감 대책

기존 사면안정화기법은 태양광패널 설치 이후 시공하기에 시공용이성이 뛰어나지 못하다는 단점이 있고, 옹벽의 경우 주동 토압 감소 효과가 있지만, 사면의 경사도 자체를 낮출 수 있다는 문제점이 있다.

■ 패널 설치 가이드라인

기존의 가이드라인은 사면의 경사도 및 고도, 환경성만을 고려하고 있어서 재해 대비의 측면에선 부족함이 있다고 볼 수 있다. 패널 설치 방법 및 사면 배수 처리에도 가이드라인이 필요하다.

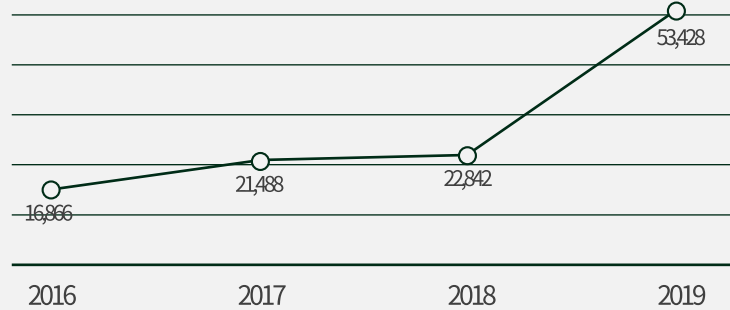
3

개발과제의 기대효과

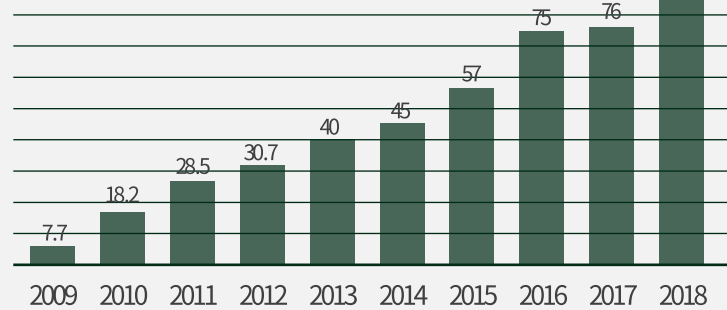
3 개발과제의 기대효과

[1] 국내외 태양광 발전 비율의 증가로 인한 보강대책의 필요성 및 유효성 증가

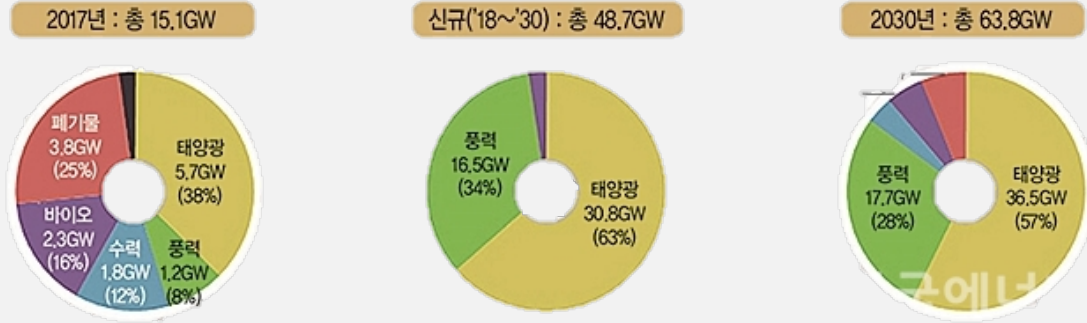
[산사태 피해현황 및 산림분야 총 복구비의 증가] (출처: 산림청) 단위: 백만원



[세계 태양광 시장 규모의 증가] (출처: 수출입은행) 단위: GW



[2030 재생에너지 정책 태양광 비중 증가] (출처: 산업통상자원부)



[2] 사면붕괴로 인해 파괴된 폐 태양광 패널의 감소로 환경파괴 방지

[3] 사면붕괴까지의 시간을 지연시킴으로써 주민 대피 시간 확보 및 농가 피해 감소

■ 점점 늘어갈 태양광 패널 설치 사면

산사태 피해액은 나날이 늘어나고 있고, 국내외 태양광 패널의 시장 규모는 계속 증가하고 있다. 이러한 상황 속에서 보강대책의 필요성은 더욱 대두될 것이고, 본 개발 프로젝트의 유효성 또한 증가된다고 볼 수 있다.

■ 사면붕괴의 감소

사면붕괴 즉 산사태로 인해서, 버려지는 폐 태양광 패널이 감소함으로써 환경파괴를 방지할 수 있고, 극한 강우 상황에서 어쩔 수 없이 사면이 파괴된다고 하더라도, 그 시간이 지연됨에 따라 주민이 대피할 수 있는 시간을 충분히 확보할 수 있다.

4

— 개념설계안

4 개념 설계안

[1] 현재 산지 태양광패널 설치의 문제점

외곽에만 치중된 배수시스템



현재는 발전시설 테두리에만 배수가 되는 '선적'인 배수시스템을 가지고 있다. 어느정도 배수능력은 있겠지만, 사면내의 수분증량증가는 크게 막지 못하고, 이 때문에 지지력을 잃은 사면이 무너지게 된다.

지반에 고정에 급급한 기초



현재 사면태양광 패널은 간단한 기초설치 후 그 위에 모듈을 조립하는 방식이기 때문에 지지력엔 저항할 수 있지만, 우리나라와 같이 하절기에 강우량이 집중되는 경우엔 토사가 쓸려나가면 서사면 전체가 파괴되는 현상이 발생한다.

산림파괴로 인한 산사태 억제효과 감소



현재 사면태양광 패널은 기존의 산림을 벌목한 후 진행되기 때문에 기존 수림의 뿌리가 해왔던 산사태 억제효과(뿌리에 의한 조립입자 탈락방지 및 보강효과)가 약화되고, 결론적으로 사면의 안정도가 강우에 매우 취약하게 된다.

4 개념 설계안

[2] 프로젝트의 3가지 목표설정

강우 시 배수관리

강우에 따른 간극수압 증가 및
수분포화도 상승 속도 저감

주동토압 저감방안

강우에 따른 중량 증가로 인한
산사태 방지를 위한 토압 저하

산사태 방지대책

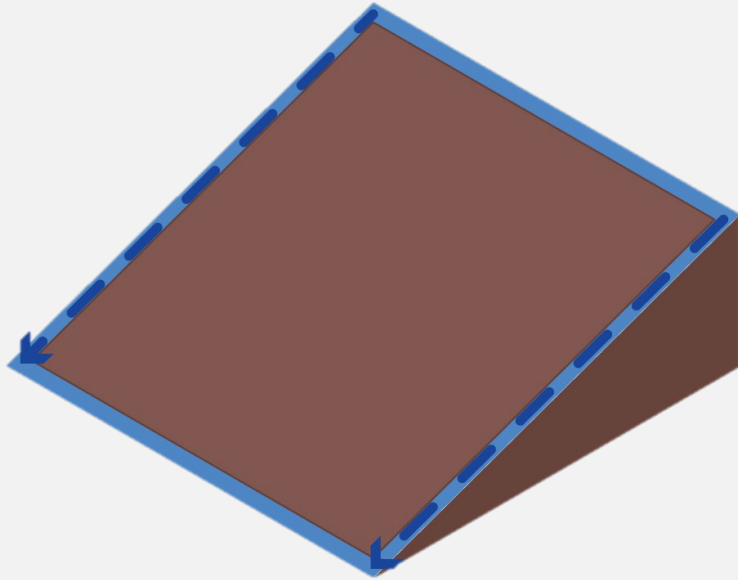
친환경적 보강대책

벌목 후 진행되는 자연 파괴적 특성
친환경적 보강 대책 필요

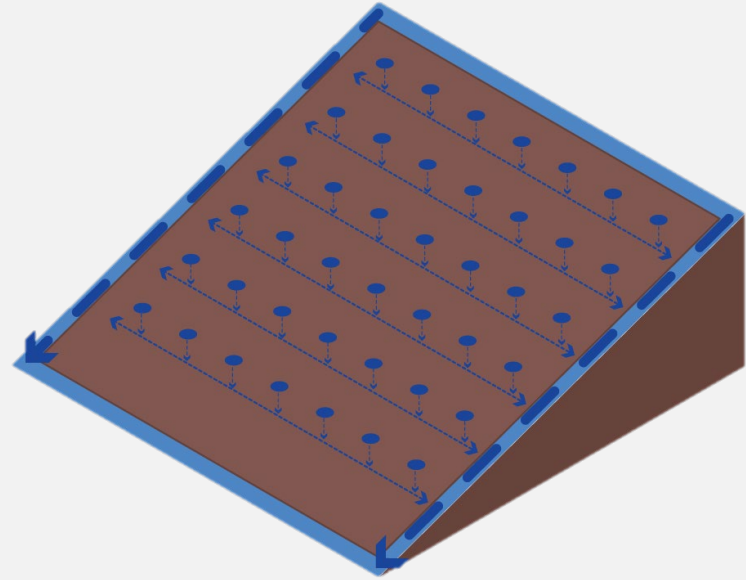
4 개념 설계안

[3] 개념 설계안

1. 포괄적 사면 배수 시스템 도입



기존의 '선적'인 배수시스템

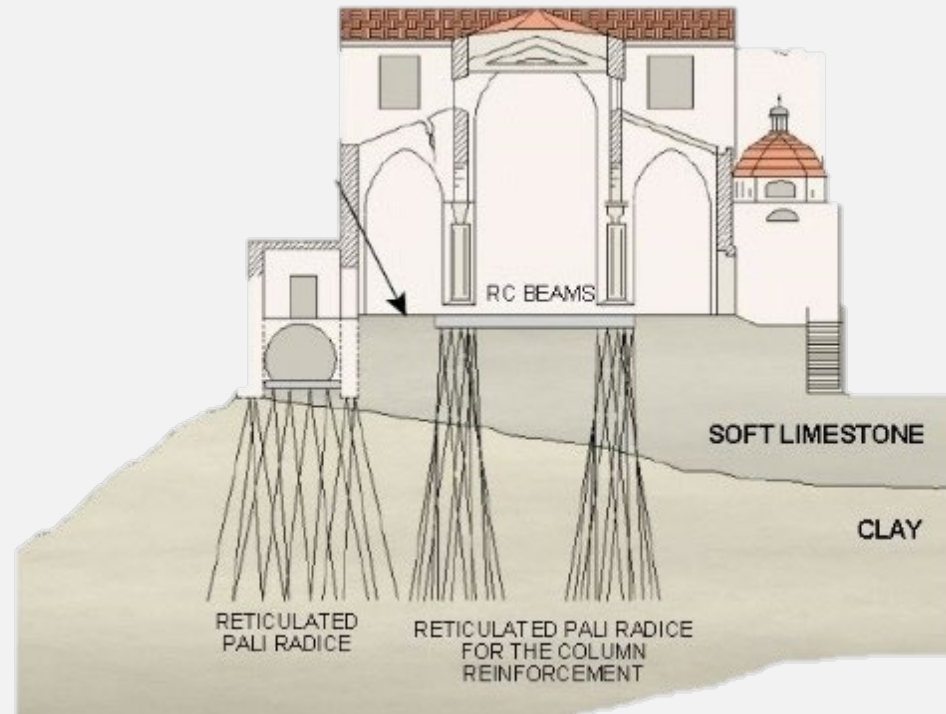


태양광 패널 모듈을 이용한 '면적'인 배수시스템
사면 외곽에 국한된 배수시스템의 사면 중심으로의 확장

4 개념 설계안

[3] 개념 설계안

2. 마이크로파일 도입

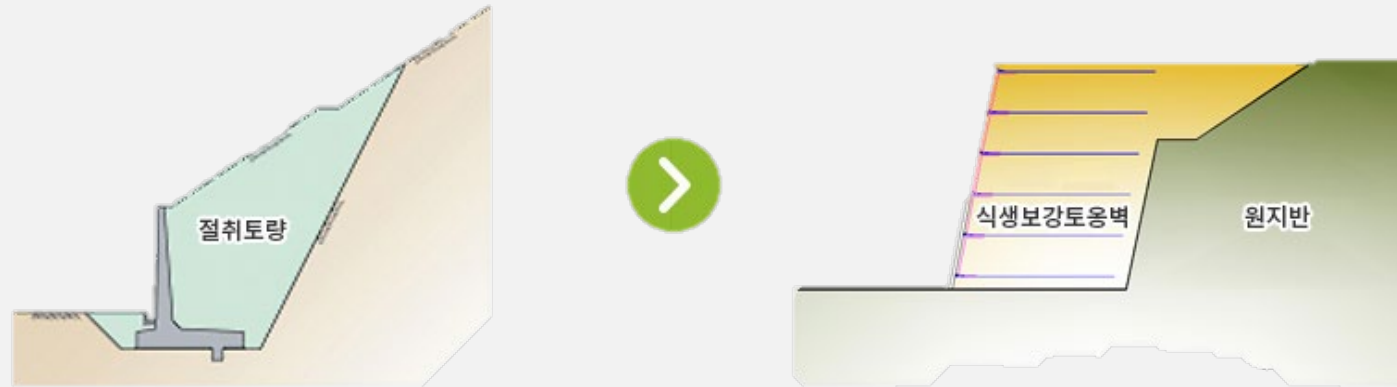


‘뿌리말뚝’을 기원으로 하는 마이크로파일을 태양광 패널 기초에 도입하여, 흙을 잡아두는 등 산사태 억제 효과 강화 (뿌리에 의한 조립입자 탈락 방지 및 보강 효과) 및 토사면의 활동에 대한 저항성을 높이고, 지반을 보강하고자 한다.

4 개념 설계안

[3] 개념설계안

3. 식생 보강토옹벽



사면을 깎아 시공을 하고, 절취된 부분은 옹벽을 설치하여 토사의 유출을 막았다. 또한 기존 옹벽의 경우엔 민둥산이 되어버린 산에 설치된 사면과 마찬가지로 콘크리트 구조물의 차가운 민낯을 보여준다. 이를 식생 보강토 옹벽으로 대체하여 토압에 견딜 수 있도록 개선함과 동시에 친환경성을 고려하고, 미관 개선이 이루어질 것이라 생각한다.

이 방안은 기존 설치지역에 시행하기엔 시공상 어려움이 있기에 신설 지역에 적용하는 방안으로 생각하고 있다.

5

상세설계안

5 상세설계안

[1] 산사태 발생요인 핵심지표 설정

상세설계에 있어, 앞서 제시한 개념설계안의 방지효과를 평가할 수 있는 핵심지표를 우선 설정하고자 했다. 이를 위해 개념 모델은 최대한 현재 태양광패널을 설치하는 사면의 특성을 고려하고자 했고, 산사태 유발요인 (외적요인, 내적요인) 중 무엇을 핵심지표로 선정할지 다음을 논문들을 리서치 했다. (1)김민수, 「강우특성을 활용한 산사태 위험지 평가기법에 대한 연구」, 2012년 2월 (2)오정림, 「산사태 발생 예측을 위한 유발강우기준 연구」, 2013년 8월



강우

산사태를 일으키는 가장 큰 원인으로 꼽을 수 있다.
우리나라는 6-9월에 연강수량의 60%가 집중된다.



고도

국내 산사태 관련 선행 연구에선 특정 고도에서
산사태가 집중되고 그 고도가 200~400m 정도.



경사

경사는 사면의 안정성 해석에서 중요하다.
20~30도 경사에서 산사태 발생 빈도 크다.



지형

지형은 사면의 기하학적 형태를 결정한다.
또한 지표수 및 지하수 이동에 영향을 준다.



지질

기반암의 종류와 절리, 불연속면의 밀도, 풍화도
토질 조건은 흙의 밀도, 투수성, 전단강도 등이 있다.



식생

산사태를 억제하기도, 촉진하기도 한다.
주요 억제 효과는 뿌리에 의한 효과이다.

5 상세설계안

[1] 산사태 발생요인 핵심지표 설정



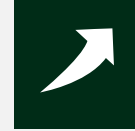
강우

산사태를 일으키는 가장 큰 원인으로 꼽을 수 있다. 우리나라는 6~9월에 연강수량의 60%가 집중된다.



고도

국내 산사태 관련 선행 연구에선 특정 고도에서 산사태가 집중되고 그 고도가 200~400m 정도.



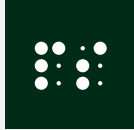
경사

경사는 사면의 안정성 해석에서 중요하다. 20~30도 경사에서 산사태 발생 빈도 크다.



지형

지형은 사면의 기하학적 형태를 결정한다. 또한 지표수 및 지하수 이동에 영향을 준다.



지질

기반암의 종류와 절리, 불연속면의 밀도, 풍화도 토질 조건은 흙의 밀도, 투수성, 전단강도 등이 있다.



식생

산사태를 억제하기도, 촉진하기도 한다. 주요 억제 효과는 뿌리에 의한 효과이다.

(1) 산업자원부_태양광발전시설 입지 가이드라인에 따르면 국내 태양광 패널을 설치할 수 있는 산지의 경사는 15° 이하여야 한다.

>>이에 따라 20°~40° 주로 발생한다고 판단하는 **경사요인은 핵심인자로 고려하기 어렵다.**

(2) 태양광 패널의 설치장소를 특정 지어 어느 지역으로 산정할 수 없기 때문에 지형조건 및 지질 조건을 특정 지을 수 없다.

>>이에 따라 대상지를 15°의 반무한 사면으로 가정하는 것이 적합하고, **고도 특성 및 지형 및 지질 조건이 핵심인자로 적합하지 않다.**

(3) 마지막으로, 태양광패널의 설치 시 식생을 파괴하게 되므로 뿌리효과 등을 기대하기 어렵다.

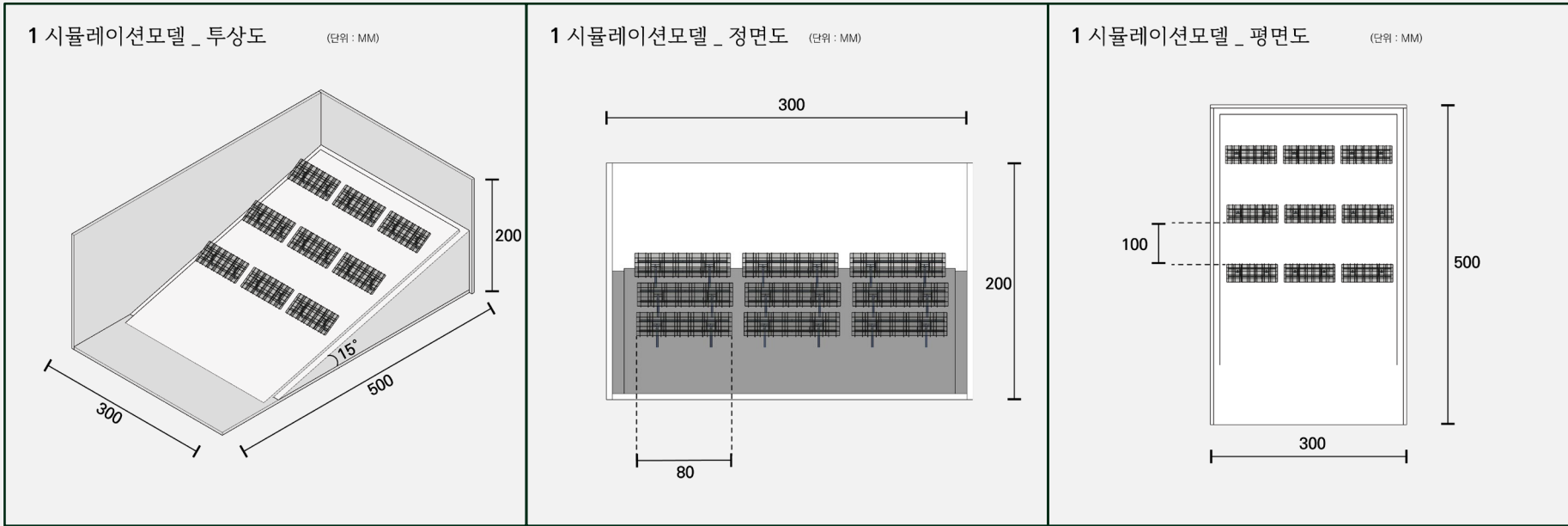
>>이에 따라 **식생 또한 핵심인자로 고려할 수 없다.**

5 상세설계안

[2] 상세설계안



5 상세설계안



사면 모델

(1)사면경사도: 15°

2019년 이후 시공됐거나 시공을 계획중인 태양광발전시설의 시공 시 개선점을 목표로 두었기 때문에 산업통상자원부에서 2019년에 발표한 태양광발전시설 입지 가이드라인의 경사도인 15°를 기준으로 제원을 설정하였다.

(2)사면경사길이: 500mm

2019년까지 누적 태양광발전소 면적 6244ha 이고, 개수 60433개이기에 시설한 개소 평균 1000M²의 면적을 사용하고 있다. 실제 사면 크기는 제작하기 어렵기에 약 1/5000의 축척의 일부부분을 사용하여 실험 모델을 제작하였다.

(3)토사

모형 지반의 토사는 실제 태양광발전소 시공 시의 지반을 고려하여 점착력이 없는 균질한 입경의 표준사를 사용하였고 충분한 다짐을 줘 사면 깊이에 따라 균질한 지반을 형성하였다.

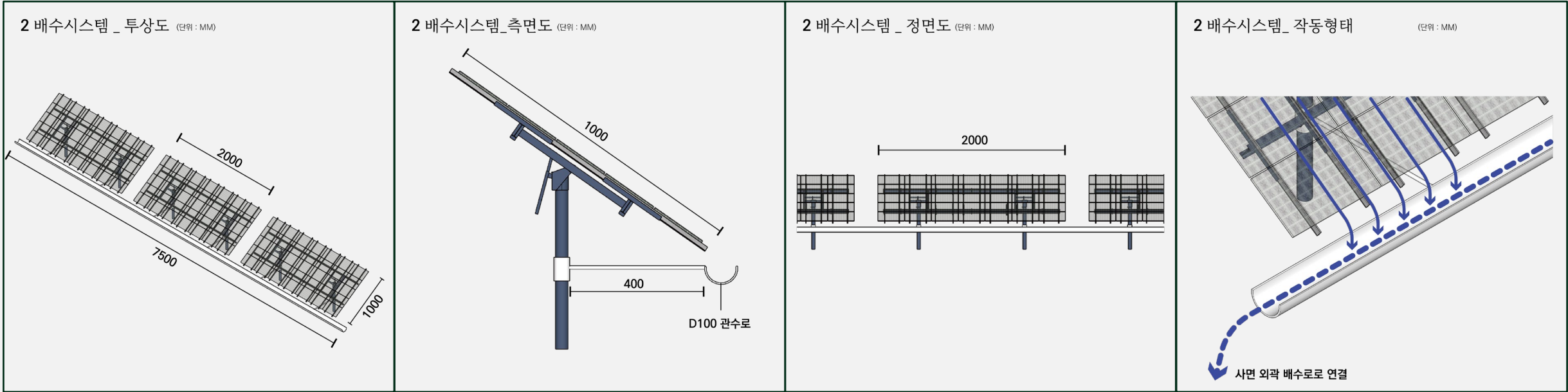
태양광패널 모델

(1)모델규격: 80x40 (단위: mm)

다산에너지의 태양광 패널 규격은 2000x1000으로 2대1 비율인 것을 고려하여 모형 크기는 1/25 scale로 (80x40) 제작하였다. 위 오른쪽 사진의 제원을 참고하여 흑색 포맥스 판을 패널로, 원통형 나무막대를 패널 기둥으로 삼아 모형을 제작하였다.

(2)배치간격: 3행 3열

5 상세설계안



포괄적 사면 배수 시스템

(1) 태양광 패널 모듈 이용 가능 방식

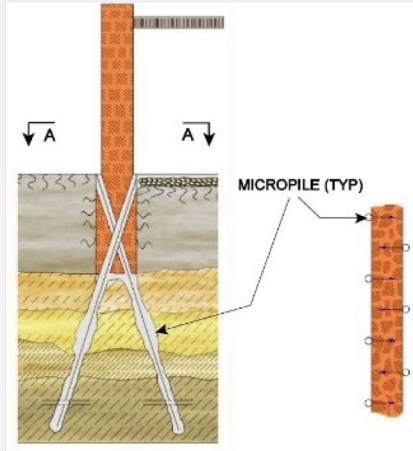
앞으로 설치될 태양광발전시설뿐만 아니라 기존 태양광패널에도 설치할 수 있는 배수시스템 모듈로서 기둥부에 체결하여 사용하는 방식이다.

(2) 2000x1000 (mm) 면적의 패널에 떨어진 강우를 외곽 배수로로 연결

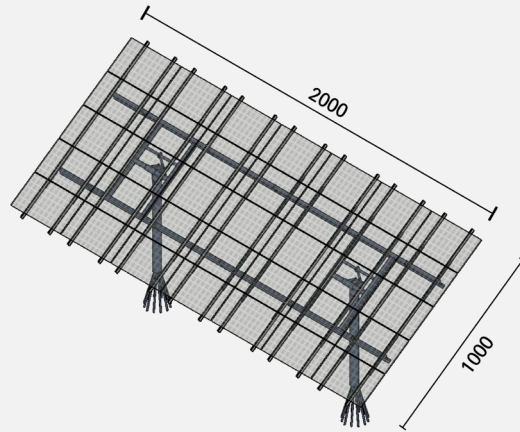
경사진 패널에 떨어진 기존의 강수는 사면으로 바로 흘러 침투되어 사면의 수분포화도를 증가시키기에 기여했다. 이 강수들을 바로 관수로를 따라 외곽부에 설치된 배수로로 떨어지도록 함으로써 산사태 발생을 지연시킬 수 있다.

5 상세설계안

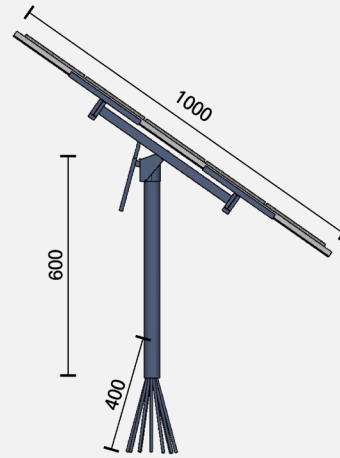
3 마이크로파일_ 개념도



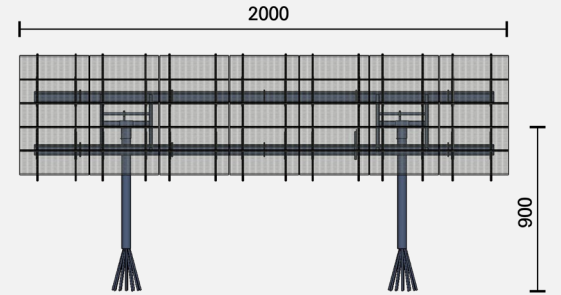
3 마이크로파일 _ 투상도 (단위 : MM)



3 마이크로파일 _ 측면도 (단위 : MM)



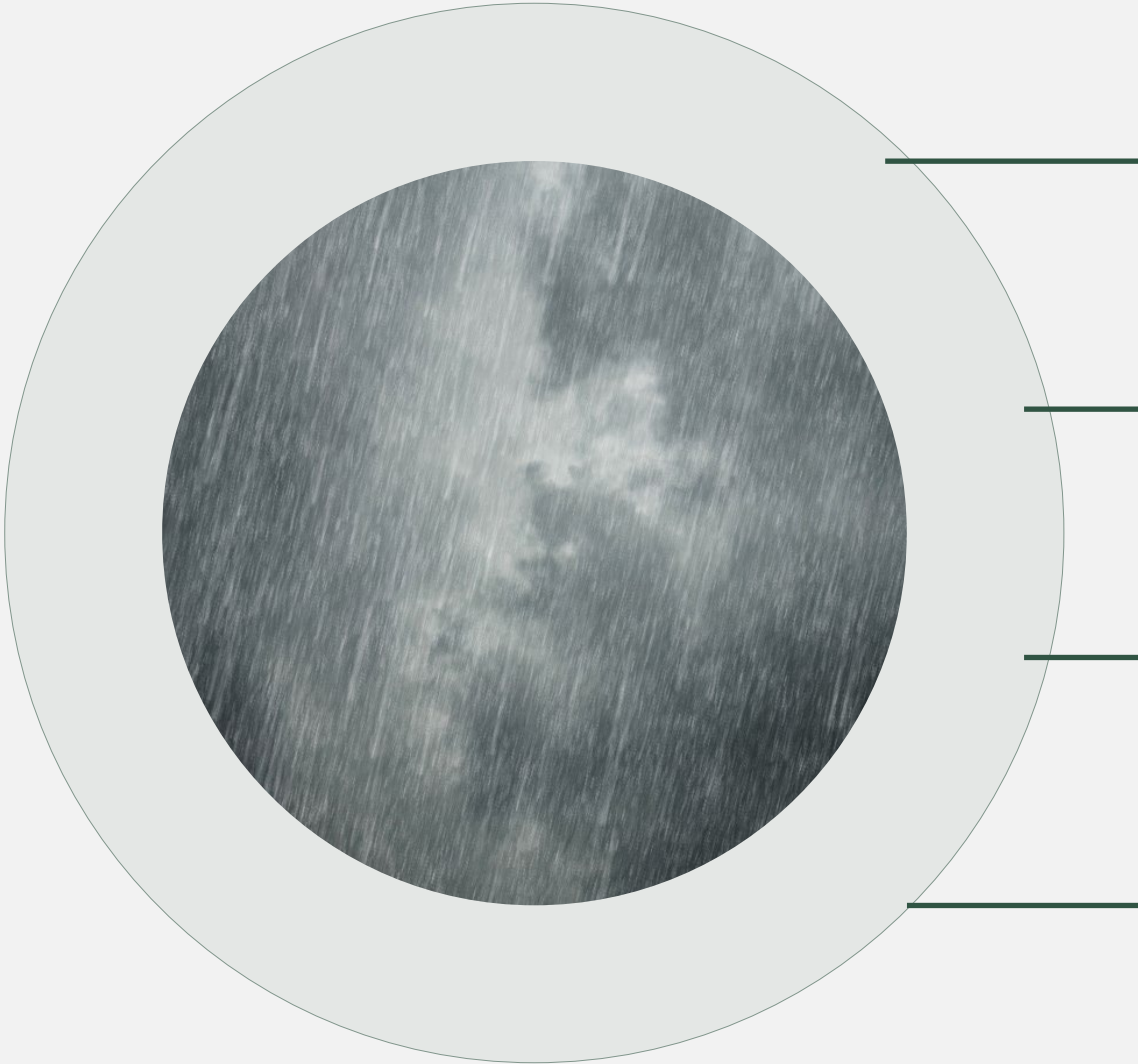
3 마이크로파일 _ 정면도 (단위 : MM)



마이크로파일

(1)태양광패널모듈추가방식

기존의 1자로 50CM가량 그라우팅된말뚝은 지반을 잡아주기에 어려움을 가졌다. 이에 40CM의 가는 형태를 마이크로파일의 개념도에서 보이는 것과 같이 돌려 추가로 시공하는 방식을 취한다. 이에 뿌리말뚝 효과를 얻을 수 있고, 기존보다 더 깊은 관입 깊이를 얻어 안정도에 도움이 될 것으로 예상된다.



시뮬레이션 강우조건

(1) 강우강도

- 호우주의보, 호우경보를 기준으로 실험을 진행하였다.
- 호우주의보: 3시간 강우량이 60mm 이상 or 12시간 강우량이 110mm 이상 예상될 때
- 호우경보: 3시간 강우량이 90mm 이상 or 12시간 강우량이 180mm 이상 예상될 때

(2) 지속시간

- 3시간 동안 물을 분사하기가 어려움이 있어, 1/9로 20분을 기준으로 시뮬레이션을 진행
- 호우주의보의 경우 20분간 6.67mm 호우경보의 경우 20분간 10mm 기준으로 진행

(3) 시뮬레이션 모델

- 강우강도 조절은 분무기의 개수 조절로 진행 호우주의보(2개) 호우경보(4개)
- 분무기 1회 분무량: 0.6ML / 용량: 600ML
- 모델의 제원이 300X500(MM)임을 고려해 보았을 때, 호우주의보는 1.0L, 호우경보는 1.5L의 물을 분사

(4) 시뮬레이션 방향

- “산사태대피 '골든타임'...” “폭우 10시간 안에 집 나서야”, JTBC, 2020.08.13
- 본 시뮬레이션은 제시한 보강대책을 통해 불가피한 사면붕괴가 발생 시 대피시간 확보를 목표로 한다.
- 붕괴시, 혹은 모델 사면의 흙의 변위를 측정하여 최대한 지연될 수 있는 방향을 모색하고자 한다.

6

시뮬레이션 및 결론

6 시뮬레이션 및 결론

시뮬레이션 모델 설정

모델2(실험군)

- 배수시스템의 배수효과를 실험한다.
- 마이크로파일의 지지효과를 실험한다.
- 실험은 호우주의보시와 호우경보시 두 번을 실험
- 600ml 용량의 분무기로 20분간 분무한다.
- 20분내에 사면이 붕괴하면 붕괴시간을 측정
- 20분간 사면이 쓸려 내려오는 변위를 측정

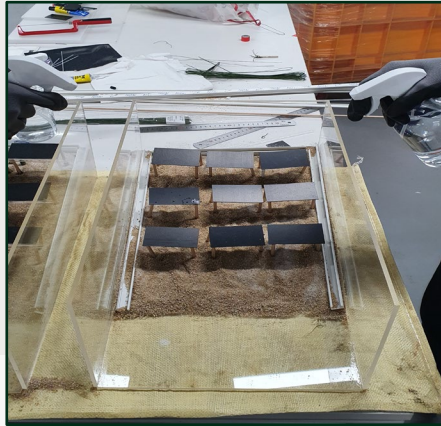


모델1(대조군)

- 현 상황을 대표하는 모델
- 실험군의 보강효과를 확인하기 위해 진행
- 실험은 호우주의보시와 호우경보시 두 번을 실험
- 600ml 용량의 분무기로 20분간 분무한다.
- 20분내에 사면이 붕괴하면 붕괴시간을 측정
- 20분간 사면이 쓸려 내려오는 변위를 측정

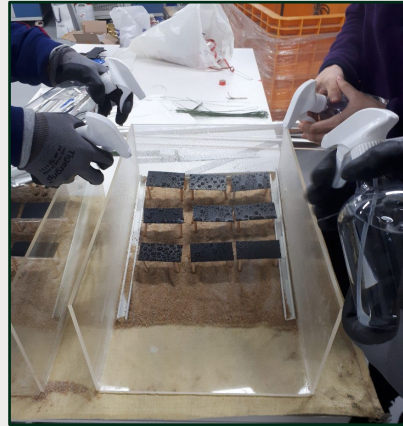
6 시뮬레이션 및 결론

시뮬레이션 모델 및 실행



강우강도 조절

- 호우주의보/경보를 분무기 개수로 구분하여 진행



배수시스템

- 투명원형관을 반으로 잘라 붙여 외곽 배수로에 연결



마이크로파일 모형

- 꽃철사를 사용해 구현했으며, 한 기초당 8마디씩 연결



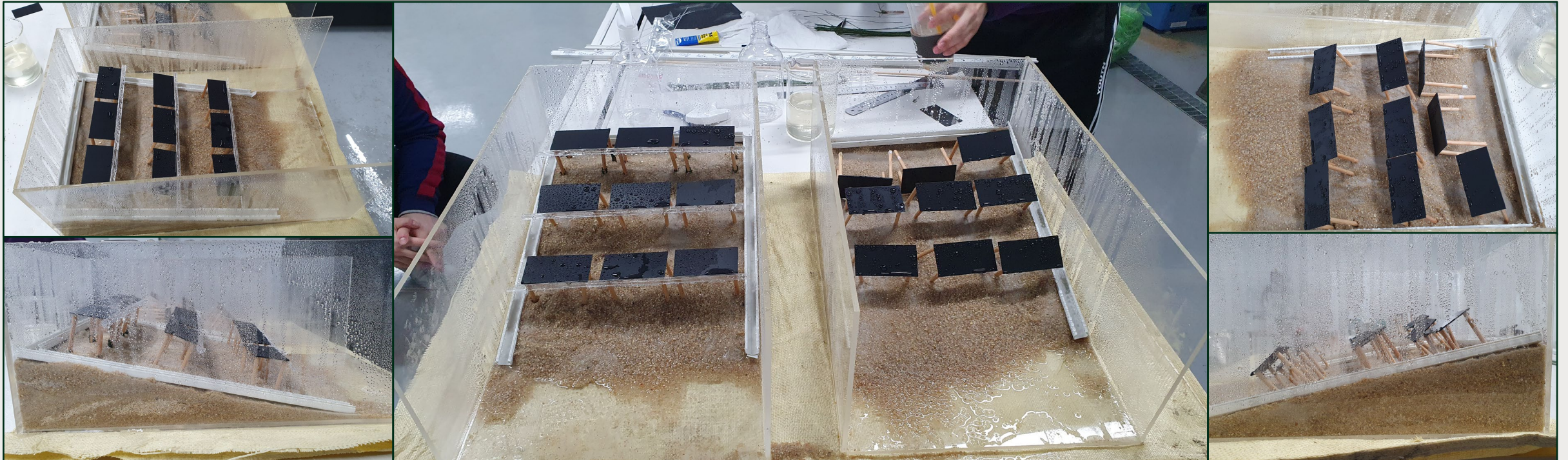
6 시뮬레이션 및 결론

시뮬레이션 결과

	강우강도	지속시간	붕괴시점	흙의변위
대조군_호우주의보	20mm/hr	20분(1L)	16:23	6.2cm
대조군_호우경보	30mm/hr	20분(1.5L)	07:18	8.9cm
실험군_호우주의보	20mm/hr	20분(1L)	붕괴X	3.2cm
실험군_호우경보	30mm/hr	20분(1.5L)	19:20(X에근접)	5.1cm

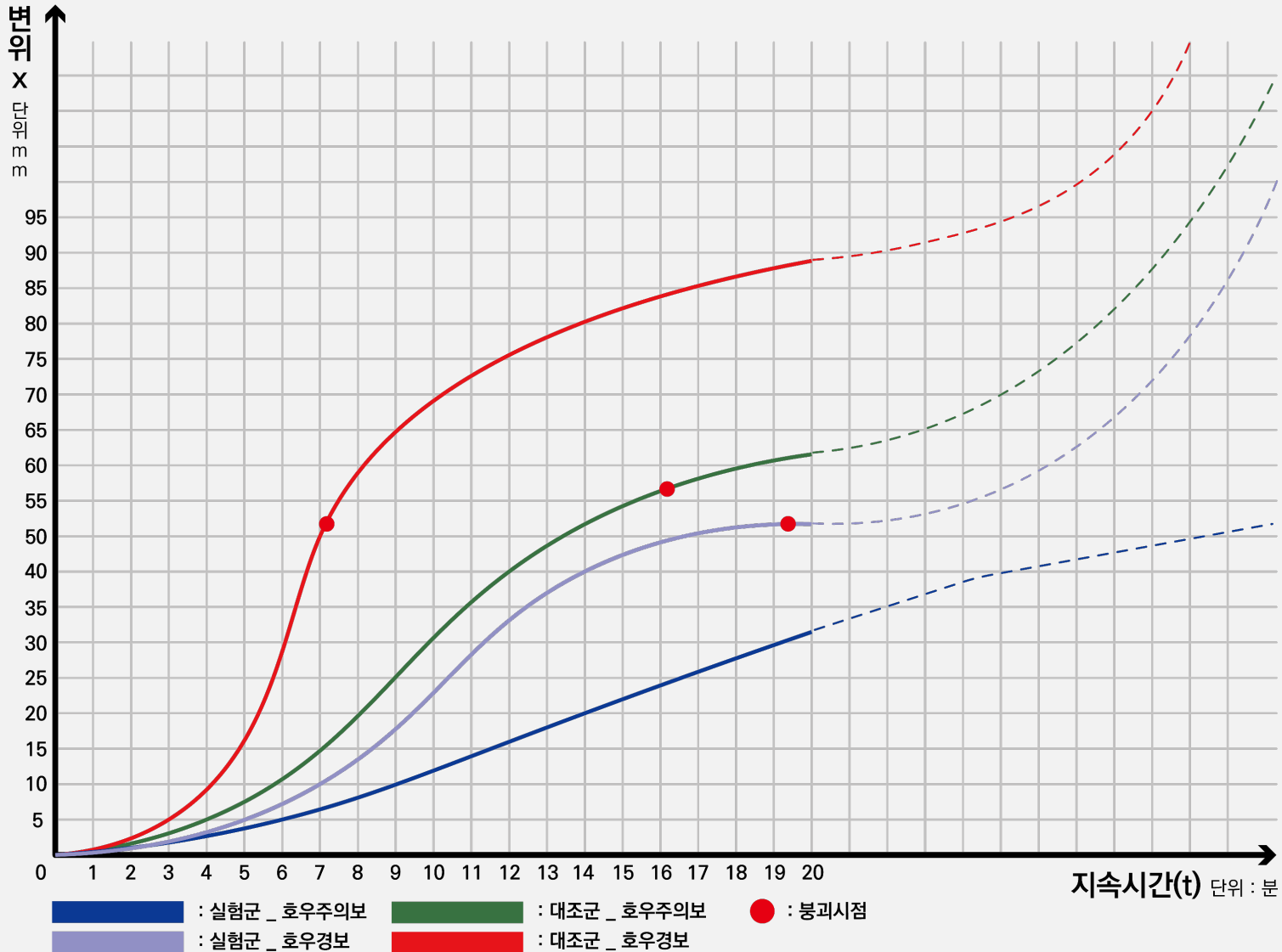
모델2(실험군)

모델1(대조군)



6 시뮬레이션 및 결론

결론



(1) 배수시스템의 경우 강우에 따른 간극수압 증가 및 수분 포화도 상승에 대한 저감 방안이 될 수 있다.

(2) 마이크로파일의 경우 벌목된 식생이 기존에 해왔던 산사태 억제 효과를 대체하여 흙이 무너져 내리는 것을 어느 정도 방지하는 효과를 보여줌을 확인할 수 있다.

7

완료 작품의 평가 및 향후 계획

7 완료작품의 평가 및 향후 계획

평가

본 조는 SOC종합설계를 통하여, 여름철 집중강우에 의한 산사태 문제 그 중에서도 최근 정부정책과 더불어 늘어가고 있는 사면 태양광발전의 문제를 해결하고자 했다.

산사태의 핵심유발요인 중 가장 유효하다 판단했던 강우지표를 중심으로 제품 설계를 진행하였고, 시뮬레이션을 통해 그 유효성을 입증하였다.

아쉬운 점

프로젝트를 진행함에 있어 몇 가지 아쉬운 점은 존재했다. 강우요인 외에도 충분히 고려해볼만한 요소들이 있음에도 시공간적 제약으로 이 요인들을 복합적으로 판단해보지 못한 것이 아쉬웠고, 실제 흙의 거동은 매우 복잡하기 때문에 작은 시뮬레이션으로 정성적 평가를 할 수 없다는 것이 아쉬웠다.

향후 계획

실제 제품단계, 하중에 따른 정성적 평가까지 다다르지 못했지만, 이렇다 할 뚜렷한 대책이 없기에 이대로 두면 내년, 내후년에 같은 피해가 반복되기 때문에 이러한 프로젝트를 진행할 당위성은 마땅하였고, 시뮬레이션 결과 또한 긍정적이었기 때문에 더욱 창의성 있고 현실적인 해결방안이 필요할 것으로 전망된다.

이에, 계속될 피해에 대비하여 실제 사질토 및 점성토, 입도 등 흙의 물성에 따라서 보강방향을 결정하고, 시공 시에 고려할 방식 및 관리방안을 연구하는 것이 앞으로의 계획이다.

감사합니다.

Q&A

