

# Clamshell공법의 사면 보강 기능 연구



조 영 훈

(주)신성엔지니어링  
지반사업본부 부사장  
(mi6618@chol.com)



박 용 수

(주)신성엔지니어링  
지반사업본부 대리

## 1. 서론

본 크램셸(Clamshell) 공법은 2010년 자연생태복원 및 사면 녹화공사의 품질을 향상시키기 위하여 개발된 공법으로 식생 기반재에 폐조개껍질에 함유된 이온 성분을 첨가하여 하수슬러지나 정수슬러지 등이 포함된 퇴비류를 배제함으로써 2차 환경오염의 문제가 없고 충분한 칼슘을 공급하여 식물의 생육이 원활하게 이루어지도록 하는 시공 방법이다.

당초 본 공법은 조기 발아 효과 및 2~3년 경과후 식물의 고사로 인한 비탈면 황폐화 현상을 방지하기 위하여 소성 가공체 형태의 겔타입(Gel-type) 단립구조인 이온을 활용한 부착증진 효과 및 장기적인 순환 시스템구성을 목표로 사면 보호공법으로 활용하였다. 이러한 식생기반재가 원지반에 확실하게 밀착될 경우 자체의 강도 및 원지반과의 부착력을 통하여 지반내에 구속압을 발생시켜 보강효과를 기대할 수 있는 것으로 판단된다. 또한 이들 구속압을 활용하면 사면 안정을

위한 보강력을 일으켜 사면 보강 수량을 다소 절감할 수 있을 것으로 판단하여 이들 크램셸(Clamshell) 공법의 구속압효과를 보강력의 일원으로 적용할 수 있도록 검토하였으며 보강 및 보호공법으로 적용하여 경제적이고 안정된 사면을 유지하고자 본 연구를 수행하였다.

## 2. 크램셸(Clamshell) 공법의 특징

크램셸(Clamshell) 공법은 인공토양, 천연고분자수지, 천연섬유 네트를 이용한 식생정착망, 폐조개껍데기를 이용한 발아보조재로 구성된 사면녹화 공법의 일종으로 개발된 공법이다.

본공법의 특성은 식물의 발아와 생육에 필수적인 칼슘이 식물에게 지속적으로 공급될 수 있도록  $Ca^{+}$ 이온을 소성 가공하여 발아보조재로 활용하였으며, 원지반의 요철이 있어도 겔타입(Gel-type)의 단립구조로

서 침투가 용이하고 부착력이 양호하다는 특성이 있다. 버려지는 조개껍질을 재활용하여 폐자원을 활용할 수 있도록 하였고 모든 재료가 천연 물질로 구성되어 있다는 특성이 있다.

본 공법에 적용되는 폐조개껍질은 순수한 파쇄 분말만을 적용할 수도 있으나 분말에 황토를 혼합하고 이를 고온 소성 성형을 하여 고온 소성 다공질체의 형태로 만들어 인공토양에 혼합한다. 이때 소성 성형시의 온도는 약 700°C ~ 1000°C이며 이렇게 다공질체 형태로 만들어진 것에 인공토양을 혼합하게 되면 단순히 폐조개껍질을 파쇄한 경우에 비하여 수분을 더욱 많이 함유하게 되어 건조한 시기에 사용할 경우 식물의 발아 등에 유리하게 작용하는 장점이 있다.

즉 미세기공이 형성되어 이온교환에 의한 흡착 능력과 모세관 응축에 의한 흡착 능력이 증가하게 되고 높은 비표면적을 가지게 됨으로써 수분 함유 능력이 향상되는 것이다.

또한 고온소성과정을 거치게 되는 폐조개껍질은 기름 유출사고 등으로 인하여 발생하는 폐조개껍질을 사용하더라도 남아있는 기름성분이 고온 소성 과정에서 제거되고 칼슘은 잔존하게 되므로 오염된 폐조개껍질도 재활용할 수 있게 되는 장점이 있으며 폐조개껍질에 황토를 혼합하게 되면 황토에 의해 원적외선이 방출되고 수질 정화 및 뿌리썩음을 예방하는 등의 효과도 기대할 수 있다.

폐조개껍질을 이용한 다공질 소성체의 전자현미경 관찰 결과는 다음(Fig. 1)과 같다.

본 크램셸(Clamshell) 공법의 특성을 요약하면 각각 다음과 같다.

- 1) 이온화된 Ca성분이 식물성장에 영양분 지속 공급
- 2) 조기 발아효과
- 3) 칼슘(Ca) 성분함유로 산성화 방지
- 4) 겔타입(Gel-type) 단립구조로 침투력, 부착력 양호
- 5) 자체 하중 감소로 탈락을 저하
- 6) 자생초본류, 목본류, 향토야생화등 자연상태 복원가능
- 7) 침출수 등에 의한 2차 환경오염 방지
- 8) 폐조개껍질의 재활용
- 9) 토사층 및 풍화토층에서 구속압효과
- 10) 네일(Nailing) 등 보강수량 감소효과
- 11) 필요시 슛크리트(Shotcrete)와 병행 수행가능

### 3. 보강기능의 검토

본 크램셸(Clamshell) 공법의 물리적 역학적 특성을 파악하기 위하여 일반 녹색공법에 사용되는 시료와 크램셸(Clamshell) 시료에 대하여 일축압축강도 시험을 실시하였으며 그 결과는 다음(Table. 1)과 같다.

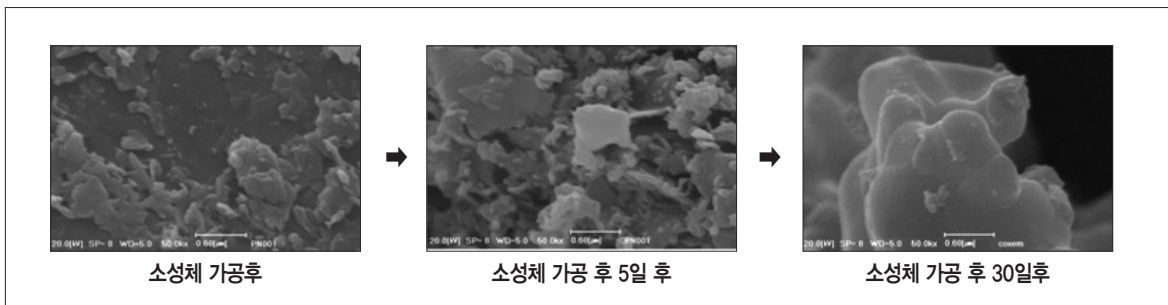


Fig.1 The results of electron microscope observation for Clamshell materials

Table 1. Comparison between two methods from uniaxial compressive strength test

구분	변형계수	일축압축강도
크램셸(Clamshell)	825.5kPa	46.3kPa
일반 녹생토 공법 (Soil seed spray)	305.0kPa	22.6kPa

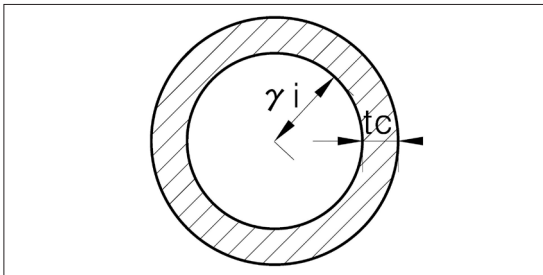


Fig.2 Feature of pressure

크램셸(Clamshell) 시공 후 표면에 미치는 최대 지지력(Maximum support pressure)를 산출하면

$$P = \frac{\sigma_c}{2} \left[ 1 - \frac{(\gamma_i - t_c)^2}{\gamma_i^2} \right] \text{에서}$$

$$\sigma_c = 0.46 \text{ kg/cm}^2$$

$$\gamma_i = 100 \text{ cm}$$

$$t_c = 10 \text{ cm} \text{ 이면}$$

$$P = \frac{0.46}{2} \left[ 1 - \frac{(100 - 10)^2}{100^2} \right]$$

$$= 0.23 \times \left( 1 - \frac{8100}{10000} \right)$$

$$= 0.23 \times 0.19 = 0.0437 \text{ kg/cm}^2 = 0.4 \text{ tonf/m}^2$$

가 된다

이 때 활동력(Sliding force)는

$$SF = 1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 2.0 \text{ T/m}^3 \times \mu(0.2) \times \sin 45^\circ$$

$$(1:1 \text{ 경사시}) \text{가 되고}$$

$$= 0.28 \text{ tonf/m}^2$$

최대지지력(Maximum support pressure) P>SF가 되어 사면의 안정성을 유지할 수 있는 구속압이 확보 되는 것으로 판단된다.

물론 이때, 경사도가 60(1:0.57)일 경우는 SF값이 다소 증가되어 SF' = 1 m x 1 m x 1 m x 2.0 tonf/m<sup>2</sup>

$$\times \mu(0.2) \times \sin 60^\circ \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = 0.34 \text{ 가 되고 취약부}$$

(Weak zone)의 범위에 따라, μ의 값에 따라 활동력(Sliding force)가 증가되어 산출된 구속압 0.4tonf/m<sup>3</sup>를 초과하는 경우도 발생할 수 있으나 어느 정도의 보강효과가 있음을 확인할 수 있는 것으로 판단된다.

즉, 본 크램셸(Clamshell) 공법은 취약부(Weak zone)이 1m이하 정도이고, 사면의 다짐이 양호하게 이루어졌을 경우 활동력(Sliding force)에 대항할 수 있는 최소한의 구속압 효과를 얻을 수 있는 것으로 판단된다. 녹화공법으로 조기녹화 및 장기적인 영양공급으로 자연 친화적인 효과를 얻을 수 있을 뿐 아니라 일반 녹생토에 비하여 침투력 및 부착력이 양호하고 또한 자체의 강도를 추가로 확보할 수 있는 바, 일부 보강의 효과를 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

#### 4. 현장 적용 사례

본 공법에 대한 현장 적용 사례는 경상북도에서 발주한 OO지역 도로공사에서 적용하였다. 당초 본 지역 사면은 설계시 상부로부터 토사, 리핑암, 발파암으로 구성되어 부분적인 네일(Nailing)보강 및 녹화공법으로 설계가 완료된 상태에서 시공중 사면 절취 작업 결과 전체사면이 토사 및 풍화대층으로 구성된 것으로 확인되었다.

이들 지반조성의 변화에 따라 사면안정공법을 재검토한 결과 상부토사 및 풍화대 층의 넓이가 약 7,000m<sup>2</sup>에 달하였고 이들 사면의 안정성 확보를 위하여 2m간격의 네일(Nailing)보강이 요구되는 것으로 파악되어 약 1,700개의 네일(Nailing)보강을 검토하였다.

이 때 네일(Nailing)보강 소요 예산은 1,700 x 500,000 = 850,000,000원이 필요하였고 네일(Nailing)보강 후 이들 사면에 대한 녹화공법은 추가로 요구되는 실정이었다.

따라서 이들 보강소요예산을 절감하기 위하여 크램셸(Clamshell)공법을 적용하여 각각 대표사면을 분석한 결과 별도의 네일(Nailing)보강공법을 적용하지

않아도 기준 안전율 F.S=1.2이상을 확보하는 것으로 판단되어 전체사면을 네일(Nailing)보강 없이 크램셸(Clamshell) 시공만으로 안정성을 확보하도록 조치하였다.

본 연구에서는 0000 국도건설공사 2공구의 대표 사면으로 STA. 1+760지점을 설정하여 Talren 프로그램으로 분석하였으며 결과는 다음(Fig. 3, Table. 2,

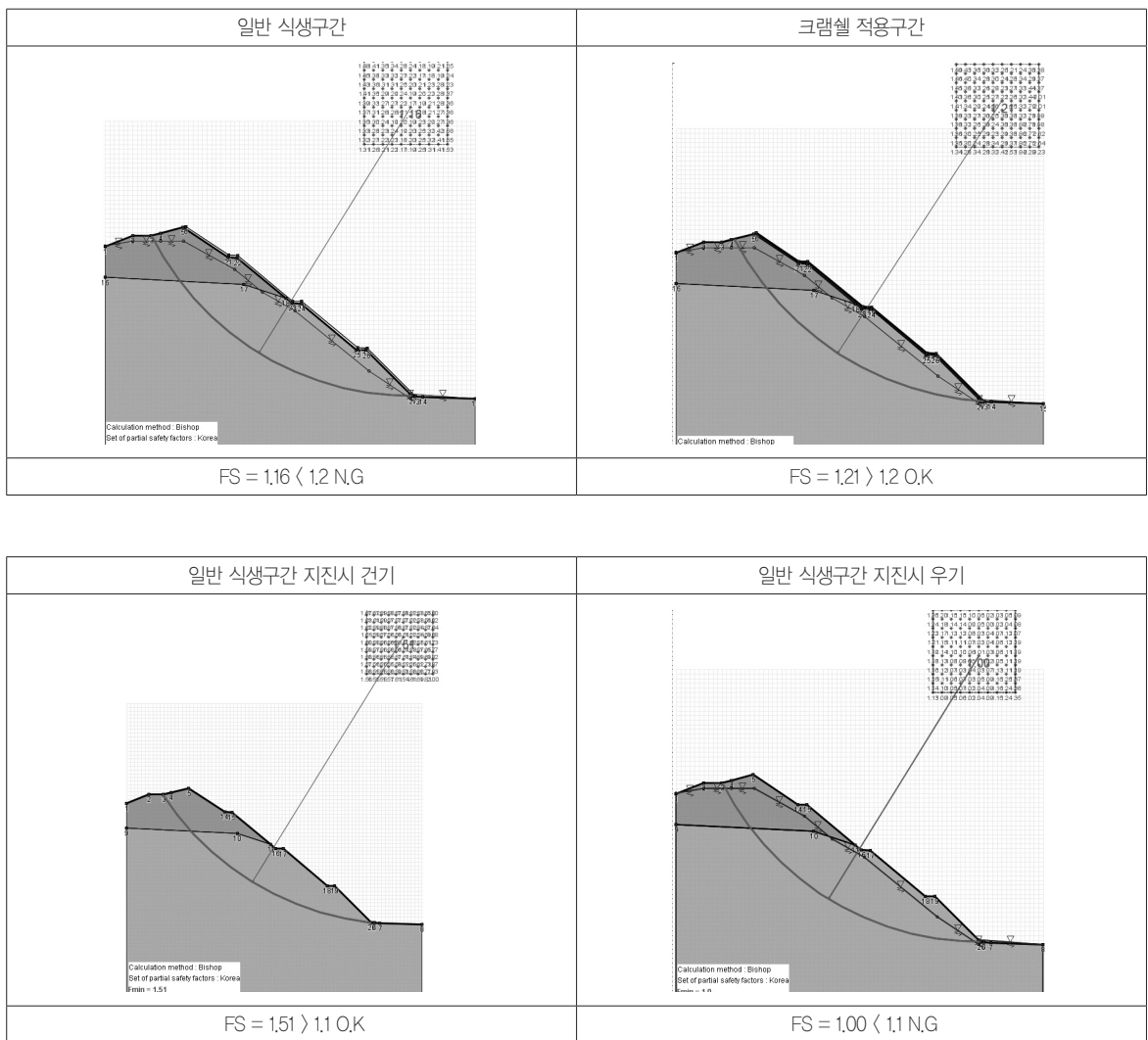


Fig.3 Comparison between Clamshell and Noksaengto(soil seed spray)-adopted slope analysis from Talren4

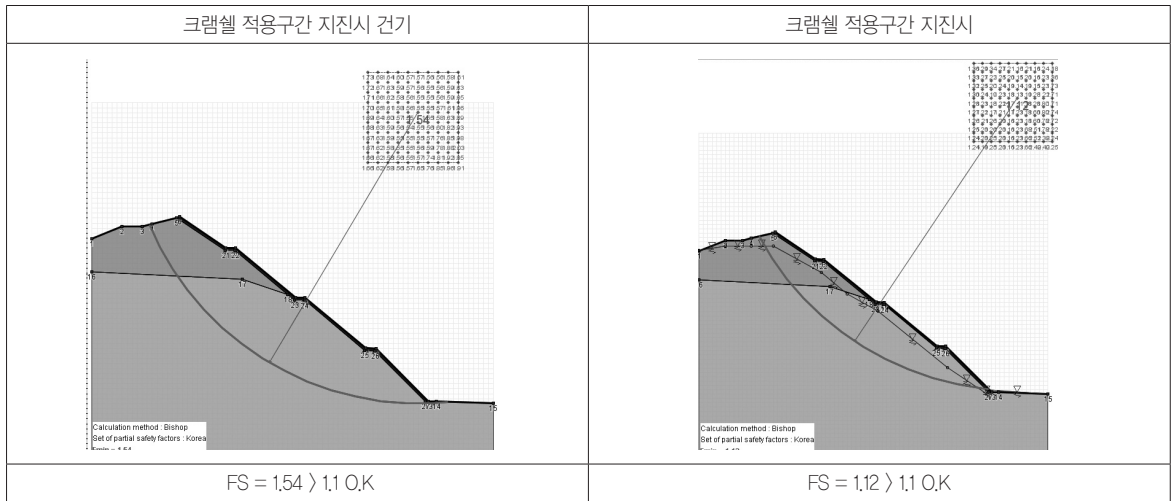


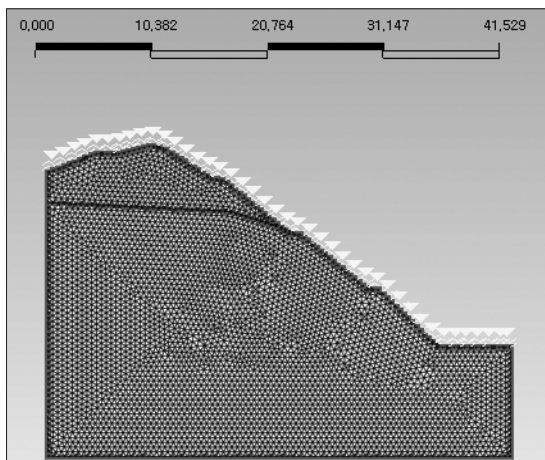
Fig.3 Comparison between Clamshell and Noksaengto(soil seed spray)-adopted slope analysis from Talren4 (계속)

Table 2. Noksaengto(soil seed spray)-adopted slope method results from Talren4 program analysis

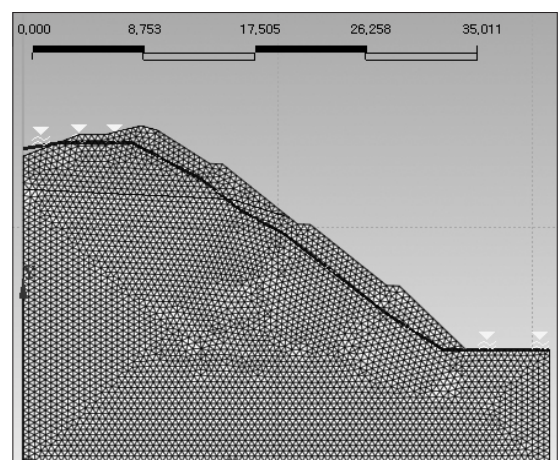
구분	안전율	결과
우기시	FS=1.16(1.2)	N.G
지진시(건기)	FS=1.51(1.1)	O.K
지진시(우기)	FS=1.0(1.1)	N.G

Table 3. Clamshell slope method results from Talren4 program analysis

구분	안전율	결과
우기시	FS=1.21(1.2)	O.K
지진시(건기)	FS=1.54(1.1)	O.K
지진시(우기)	FS=1.12(1.1)	O.K



일반 녹생구간-미다스 모델링



크램셸 적용구간-미다스 모델링

Fig.4 Clamshell and Noksaengto(soil seed spray)-adopted slope modeling for MIDAS GTS

3)과 같다.

Fig. 3 및 Table. 2~3에서 나타난 바와 같이 일반 녹생토를 적용한 경우 우기시 NG가 발생 하였으나 크램셸(Clamshell)공법 적용시 우기시 및 지진시 모두 OK가 산출됨을 알수 있다.

즉 크램셸(Clamshell) 공법 적용시 동일한 조건하에서 안전율이 0.1 정도 증가함을 확인하였고, 또한 이들 크램셸(Clamshell) 공법의 보강효과를 확인하기 위하여 0000 국도건설공사 2공구의 STA. 1+760지점에 대하여 MIDAS Modelling (GTS3.0 ver.)에 의한 해석을 수행하였으며 해석 모델링 및 해석결과는 다음 (Fig.4~5, Table. 4~5)와 같다.

Table 4. Noksaengto(soil seed spray)-adopted slope method results from MIDAS program analysis

구분	안전율
변위량	282mm
전단응력	9.58tonf/m <sup>2</sup>

Table 5. Clamshell slope method results from MIDAS program analysis

구분	안전율
변위량	6,8mm
전단응력	2,28tonf/m <sup>2</sup>

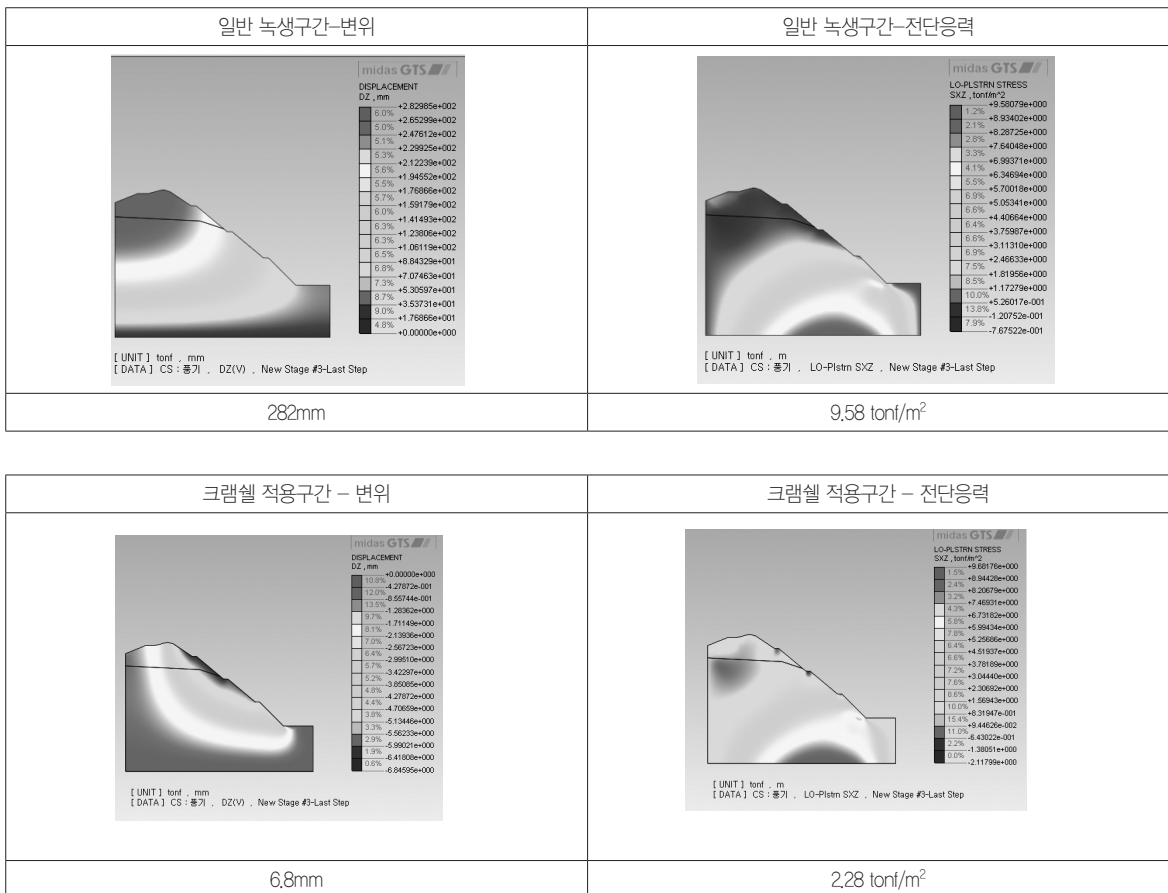


Fig.5 Comparison between Clamshell and Noksaengto(soil seed spray)-adopted slope analysis from MIDAS

일반 녹생토를 적용한 경우 변위량은 282mm, 전단 응력은 9.58tonf/m<sup>2</sup>이 발생하였으나 본 공법 적용시, 변위량은 6.8mm, 전단응력 2.28tonf/m<sup>2</sup>으로 현저히 감소됨을 확인 하였다.

이를 통하여 크랩셸(Clamshell) 녹화공법은 보강 기능이 있는 것으로 판단되었으며 결론적으로 본 지역은 사면의 지반조건이 당초 예상치 않은 토사층 및 풍화암층으로 구성되었기에 이들 사면의 안정성 확보를 위하여 구배를 상당히 완화하거나 또는 추가적인 보강공이 필요한 상태였으나 녹화공법으로 크랩셸(Clamshell)공법을 적용하여 안정성을 확보할 수 있는 것으로 판단되었다.

## 5. 향후 활용방안

앞서 언급한 바와 같이 크랩셸(Clamshell)공법은 폐조개껍질을 함유하여 소성가공을 통한 지속적인 영양공급효과 및 조기발아 등 녹화에 필요한 필요조건을 확보하고 있으며 아울러 자체적인 강도 및 부착효과 등으로 빔(Beam) 요소의 보강기능을 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

향후 사면 안정공법 적용시, 특히 토사층 및 풍화암층이 다소 깊게 분포된 경우, 사면의 경사를 충분히 완화시켜 안정성을 확보할 부지의 여유가 없을 때에는 네일(Nailing)등의 보강공법을 적용하여야 하며 때로는 옹벽공 등을 별도로 설치하는 등 예기치 않은 보강공의 증가가 요구될 것으로 생각된다.

이 때 사면녹화공법으로 일반 녹생토가 아닌 크랩셸(Clamshell)녹화 공법을 적용하면 자체적인 보강기능을 발휘할 수 있기에 보강공의 수량을 감소 또는 제거할 수 있는 이점을 기대할 수 있다고 판단된다.

또한 크랩셸(Clamshell) 공법만으로 보강기능을 확보할 수 없는 경우 슛크리트(Shotcrete) 공법과 크랩셸(Clamshell) 공법을 병행하여 적용할 경우 우수한 보강효과를 증대시킬 수 있으며 아울러 녹화 효과를

확보할 수 있는 이점이 있다고 판단된다.

또한 현장여건에 따라 활동력(Sliding force)에 대한 보강효과를 충분히 확보할 수 있도록 본 크랩셸(Clamshell) 공법의 적용범위, 또는 슛크리트(Shotcrete)와 병행 할 수 있는 범위 등을 조절 가능할 것으로 판단된다.

## 6. 결론

크랩셸(Clamshell) 공법은 2010년 개발된 사면 녹화공법으로 식생 기반재에 폐조개껍질에 함유된 이온성분을 첨가하여 조기발아효과 및 지속적인 영양공급 효과를 발휘할 수 있는 친환경공법의 일원이다.

이들 공법은 일반 녹생토공법에 비하여 경제성이 있으며, 그 침투효과 및 부착효과가 탁월하여 자체적인 구속압 효과를 발휘할 수 있는 것으로 판단하여 이들 시료에 대한 시험 및 시공후의 최대지지력(Maximum support pressure)을 산출하였고, 또한 Talren, MIDAS GTS 프로그램을 이용하여 실제 현장에서 적용한 결과를 종합 분석한 결과 사면내 보강효과를 일부 발휘할 수 있는 것으로 판단하여 이들 보강기능에 대한 연구를 추가로 수행하였다.

이들 보강기능에 대한 연구결과를 종합하여 요약하면 다음과 같다

- 1) 식생기반재에 이온을 소성가공한 상태의 성분을 첨가함으로써 조기 발아효과 및 장기적인 영양공급 효과를 발휘할 수 있음.
- 2) 겔타입(Gel-type) 상태의 단립구조로서 지반에의 침투성 및 부착력이 양호하여 전체적인 구속압 효과를 발휘할 수 있음.
- 3) 자체의 강도가 일반 녹생토의 2배 이상의 강도를 보임. 일축압축강도=46.3kPa
- 4) 크랩셸(Clamshell) T=10cm 적용시 최대지지력(Maximum support pressure)은 약 0.4tonf/m<sup>2</sup>를 발휘할 수 있음.

- 5) 이들 자체강도 및 시공후 발휘되는 최대지지력 (Maximum support pressure)에 의해 자체적인 보강기능이 기대됨.
- 6) 실제 현장에서 적용한 결과 (OO지역의 대표단면 참조) 일반녹생토 적용시 FS=1.16으로 NG이나 크램셸(Clamshell) 녹화공법 적용시 FS=1.21로 OK됨으로서 보강기능을 확인하였음.
- 7) MIDAS GTS3.0을 이용한 변위량 및 전단응력 산출결과 크램셸(Clamshell) 녹화공법 적용시 변위량 및 전단 응력이 상당히 감소됨을 확인하였음.
- 8) 향후 활용방안으로 특히 토사층 및 풍화암층이 깊게 분포된 경우 Clamshell 녹화공법을 적용할 경우 보강기능을 확보할 수 있으며 활동력(Sliding force)이 상당히 증가하여 네일링(Nailing)등 추가의 보강공법이 필요한 경우에는 쏫크리트(Shotcrete) 공법을 대상(Strip)으로 병행 적용할 경우 충분한 보강효과를 확보할 수 있는 것으로 판단되며, 추가의 보강공 (Nailing, 옹벽 등)에 비하여 경제적인 효과 또한 기대할 수 있는 것으로 판단됨.
- 9) 결론적으로 본 크램셸(Clamshell) 공법은 일반 녹생공법에 비하여 조기발아효과 및 장기적인 영양공급효과를 발휘할 수 있으며 아울러 자체적인 강도 및 구속압 효과를 활용하여 추가의 보강기능을 확보함을 확인하였으며, 향후 사면보호 및 보강공법으로 활용할 수 있는 경제적이고 친환경적인 공법인 것으로 판단하였다.

## 참고 문헌

1. Brady, B.H.G., Brown, Edwin T. (2004), Rock Mechanics(For Underground Mining), Kluwer Academic Pub, pp. 260-291
2. F.G.Bell (1983), Fundamentals of Engineering geology, Butterworth pp.165-210, pp. 528-554
3. ZARUBA & MENCL (1976), Engineering Geology, Elsevier Scientific Pub pp.163-202, pp.310-341
4. ZDENEK BAZANT (1979), Methods of foundation Engineering, Trade Cloth, pp.40-42
5. 국토해양부, 기술지도서60.62 암석과 암반, pp. 17-35
6. 석탄사업 합리화 사업단 (1997), 폐광지역 지반침하 메카니즘 및 침하방지 공법에 관한 연구, 한국광해관리공단, pp.3-67, pp.108-162
7. 한국도로공사 (2011), 고속도로 터널설계 실무자료집, 한국도로공사, pp.109-127 pp.213-228
8. 한국터널공학회 (2010), 터널 붕괴 사례집 (Case Histories Of Tunnel Collapse), 씨아이알, pp.20-42 pp.67-165