

접촉 거동을 고려한 TSL(Thin Spray-on Liner)의 수치해석 연구

이철호^{1*} · 장수호² · 이기철³ · 김동욱⁴

¹정회원, 한국건설기술연구원 지반연구소 전임연구원

²정회원, 한국건설기술연구원 지반연구소 연구위원

³비회원, 인천대학교 건설환경공학과 석사과정

⁴비회원, 인천대학교 건설환경공학과 조교수

Numerical study on contact behavior of TSL (Thin Spray-on Liner)

Chulho Lee^{1*}, Soo-Ho Chang², Kicheol Lee³, Dongwook Kim⁴

¹Research Specialist, Geotechnical Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

³Graduate Student, Dept. of Civil and Environment Engineering, Incheon National University

⁴Assistant Professor, Dept. of Civil and Environment Engineering, Incheon National University

ABSTRACT: A TSL (Thin Spray-on Liner) which consists of polymers has a higher initial strength, faster construction time and higher waterproofing performance than the conventional cementitious shotcrete. Main supporting mechanism of TSL is the adhesion and tensile strength which is distinct from the conventional shotcrete. Even though highly in demand due to its outstanding characteristics, TSL is not yet well-known support material. In this study, to evaluate contact behavior of TSL, numerical analysis was performed with comparing result from laboratory tests. From the analysis, cohesive behavior at the contact surface between TSL and rock can be evaluated by using combination of cohesive and the damage model. In addition, results show that the cohesive stiffness controlled slope between force and displacement, the fracture energy controlled level of force at the contact.

Keywords: Thin spray-on liner, Contact behavior, numerical analysis, cohesive model

초 록: TSL(Thin Spray-on Liner)는 폴리머로 구성된 재료로 기존 시멘트계 슛크리트에 비해 높은 초기 강도와 시공성, 방수기능이 특징이다. TSL이 슛크리트에 비해 가장 큰 차이점은 재료의 인장력과 점착력으로 하중을 지지하는 것이다. 최근 TSL의 우수한 특성으로 인해 TSL에 대한 수요가 늘어나고 있으나 아직까지 국내에 TSL의 재료적 특성이나 평가방법이 잘 알려지지 않았다. 본 연구에서는 TSL의 특성 중 접촉면의 거동을 실내시험과 수치해석 방법을 사용하여 분석하였다. 해석결과 TSL과 암석 모델 사이의 접촉면에 점착모델과 손상 기준을 함께 적용하여 TSL의 접촉 거동을 적절히 모사할 수 있었다. 또한 접촉면의 강성이 TSL 접촉면의 초기 하중-변위 관계를 설명하여 손상 에너지가 접촉면의 수렴 수준을 결정하였다.

주요어: 박층 뿔칠 라이너, 접촉 거동, 수치해석, 점착 모델

1. 서 론

세계적으로 슛크리트는 터널, 지하공간 및 사면에 서 주시보재로서 활용되고 있다. 1910년대에 건설

스�크리트가 최초로 개발된 이래로, 1990년대 들어서 친환경적이고 성능이 우수한 알칼리프리계 급결제와 높은 감수효과를 나타내는 고성능 감수제가 개발되는 등 슛크리트의 성능은 지속적으로 향상되고 있다 (Clements, 2002). 그러나 지반조건이 불리한 경우 슛크리트의 시공량이 증가하고, 시공시 발생하는 10% 내외의 리바운드, 다량의 분진 및 낮은 부착강도

*Corresponding author: Chulho Lee
E-mail: chlee@kict.re.kr

Received October 27; Revised November 11;
Accepted November 13

로 인해 이를 대체할 수 있는 새로운 지보재 개발이 요구되고 있다. 이러한 이유로 최근 박층 뿜칠 라이너 (Thin Spray-on Liner, 이하 TSL)가 지보 및 차수의 복합기능을 발휘할 수 있는 지보재로 주목받고 있다 (Robert, 2001). Fig. 1은 TSL의 시공과정과 시공이 완료된 벽면의 모습이다.

TSL의 시공 두께는 3~5 mm이며 최대 10 mm 미만으로 슛크리트와 비교할 때 시공 두께가 상대적으로 얇은 것이 특징이다(EFNARC, 2008). 또한, 슛크리트에 비해 신속한 타설이 가능하고 높은 초기 안정성으로 인해 슛크리트와 철망을 대체하면서 낙반사고를 방지할 수 있고 방수성능과 주입성능이 우수하여 지하수 유입을 방지하고 암반을 보강할 수 있는 효과를 가지고 있다. 그러나 슛크리트와 같이 주로 압축력을 받는 아치거동 구조체로 사용하기에는 두께가 얇기 때문에 TSL을 적용하기는 어렵다(Povin et al., 2004). 따라서 슛크리트나 라이닝과 같이 압축력을 받는 구조체와 함께 사용하거나 보강이 추가로 필요한 벽면에 타설하여 사용하는 것이 재료의 특성에 맞는 적용방법으로 판단된다.

TSL의 지보 성능을 평가하기 위한 가장 명확한 방법은 현장 및 실험실 규모의 시험을 통해 특성을 파악하는 것이다(Tannant, 2001). TSL의 역학적 특성을 평가하기 위한 다양한 시험 방법들이 제시되고 있지만, EFNARC (2008)에서는 두 가지 종류의 시험법을 표준으로 제시하고 있다. 기존 연구(Chang et al., 2015)에서는 혼합방식과 성분이 상이한 해외의

두 가지 TSL 시료(시료 M, 시료 T)에 대해, EFNARC (2008)에서 제시하고 있는 TSL 지지력 평가와 직접인장시험, 일축압축 강도를 수행한 바 있다.

Shin et al. (2009)은 터널에 설치된 슛크리트의 파괴거동에 대한 수치해석 연구에서 슛크리트의 부착력을 지보능력의 중요한 요소로 고려하였다. TSL은 부착력과 인장력으로 하중을 지지하는 재료로서 TSL도 벽면에 대한 부착력이 중요하게 다뤄진다. 따라서, 본 연구에서는 TSL 재료의 물리적 특성을 수치해석 방법으로 도출하여 TSL 부착성능 평가를 위한 접촉거동 연구를 수행하였다. TSL의 재료적 특성과 접촉 특성 분석은 직접인장시험과 EFNARC (2008)에서 제시한 시험 결과를 토대로 수행되었다. 해석에서는 TSL의 재료구성과 인장 특성을 반영하여 인장 모델은 Plastic 모델이 사용되었으며 접촉면 거동에는 점착 (cohesive) 모델과 손상(damage) 모델이 사용되었다.

2. TSL의 재료 특성

본 연구에 고려한 TSL 재료는 폴리머 함유량에 따라 2가지를 사용하였으며 편의상 재료 M과 T로 구분하였다. 2가지 재료에 대한 성분 구성과 인장시험 결과는 기존 연구(Chang et al., 2015)에서 수행한 바 있다. 재료 T는 폴리머의 함유율이 30% 이하이고 재료 M은 재료 T에 비해 상대적으로 폴리머의 함유율이 높은 30% 정도이다. EFNARC (2008)의 표준시험은 크게 TSL의 인장 성능과 전단 성능을 평가하는



Fig. 1. Construction procedure of TSL (Saydam, 2008)

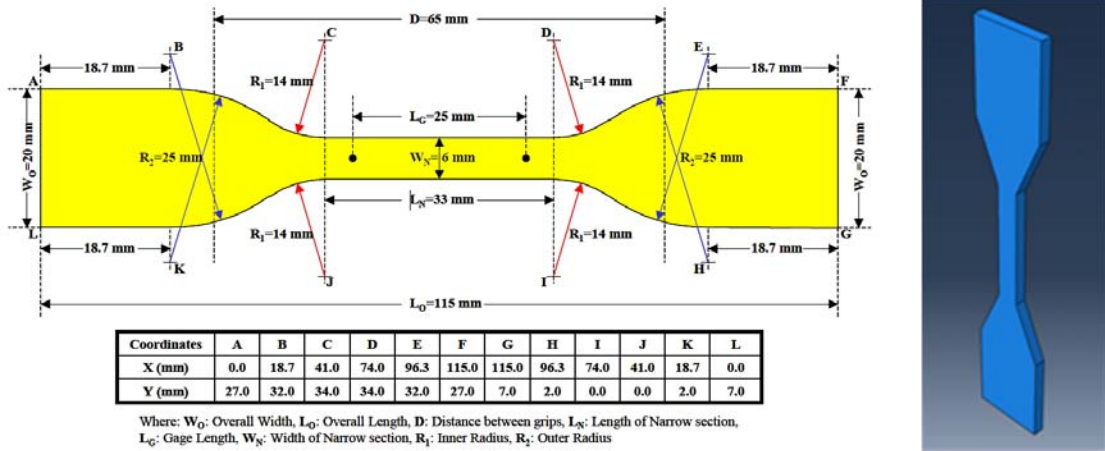


Fig. 2. Standard size for tension test according to ASTM D638(Type IV) and numerical model

방법이다. 인장 시험은 ASTM D638 (Type IV)을 준용 하였으며 Fig. 2는 시편의 크기와 해석 모델을 나타내 고 Fig. 3은 인장강도 시험을 수행하는 모습이다. 인장 시험에 사용된 TSL 시편의 두께는 3 mm이다.

해석에는 TSL과 같이 인장율이 큰 재료에 적합한 Plastic 재료 모델이 사용되었다. Plastic 재료 모델에 서 사용되는 응력과 변형율은 인장에 따른 재료의 길이 변화를 고려할 수 있도록 true stress (σ_T)와 strain (ϵ_T)을 사용하며 이는 다음 식 (1)과 (2)와 같이 정의 된다.

$$\sigma_T = \frac{\sigma'_T}{(1 - \nu' \epsilon'_T)^2} \quad (1)$$

$$\epsilon_T = \ln(1 + \epsilon'_T) \quad (2)$$

여기서, σ'_T 는 nominal stress, ν' 는 nominal Poisson's ratio, ϵ'_T 는 nominal strain 이다.

Fig. 4는 인장시험 결과와 수치해석을 통해 획득한 TSL 재료 M과 T에 대한 해석결과를 비교한 그림이다. 그림에서 나타나듯이 TSL은 초기 탄성구간의 변형이 대략 0.5% 변형률까지 나타나다가 이후 연성(ductile) 재료의 특성을 보인다. 기존 연구(Chang et al., 2015) 의 결과에서, 28일에서의 평균인장강도는 재료 T와



Fig. 3. Tension test for TSL (Chang et al., 2015)

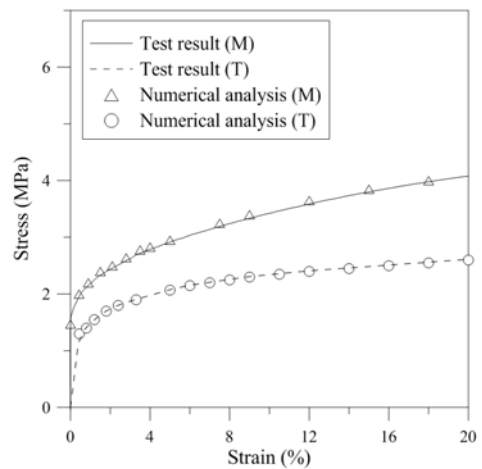


Fig. 4. Comparison with test result and numerical analysis

재료 M에서 순서대로 3.24 MPa, 4.82 MPa로 폴리머의 함유량이 상대적으로 높은 재료 M이 약간 높은 것으로 나타났으며 폴리머의 함유량이 상대적으로 낮은 재료 T에서 인장율이 큰 것으로 나타났다. 해석 결과로 나타난 재료 M과 T의 탄성계수는 각각 434 MPa, 291 MPa 이다.

해석 결과, 연구에서 사용한 Plastic 모델은 이러한 TSL의 재료적 특성을 잘 묘사할 수 있는 것으로 나타났다. Ahn (2011)은 TSL이 부착된 터널 라이닝의 화재 시 온도 변화에 대해 연구를 한 바 있으며 여기에서 TSL의 평균 탄성계수는 100 MPa 이고 항복 시 인장강도는 4~6 MPa 범위를 갖는다고 제시한 바 있다. 본 연구에서 사용된 TSL 재료는 기존 연구에 비해 상대적으로 탄성계수가 크고 항복 시 인장강도는 유사한 것으로 나타났다.

3. TSL의 선형블록지지시험

TSL의 역학적 특성을 평가하기 위한 다양한 시험 방법들이 제시 및 시도되고 있지만, EFNARC (2008)에서 제시한 시험방법들 외에 표준화된 시험방법은 없으며 관련 시험결과들도 좀처럼 공개되지 않고 있다(Chang et al., 2015). EFNARC (2008)에서는 TSL의 지지력을 평가하기 위한 시험방법으로 선형블록지지시험(Linear Block Support Test, LBS)과 비중첩전단시험(Gap Shear Load Test, GSL)을 제시하고 있다. 이 중 선형블록지지시험은 볼트로 고정된 블록사이에서 블록에 하중이 가해져 TSL과 블록 사이에서 부착 파괴가 발생하는 현상을 묘사하는 시험이다. Fig. 5는 TSL의 선형블록지지시험의 개략도이다.

Fig. 6은 EFNARC (2008)에서 제시한 LBS 시험에서 재령 28일 재료에 대한 결과를 대표적으로 나타냈다. 재료 M의 경우가 부착파괴에 대한 저항성이 상대적으로 큰 것으로 나타났는데 이는 부착력을 결정하

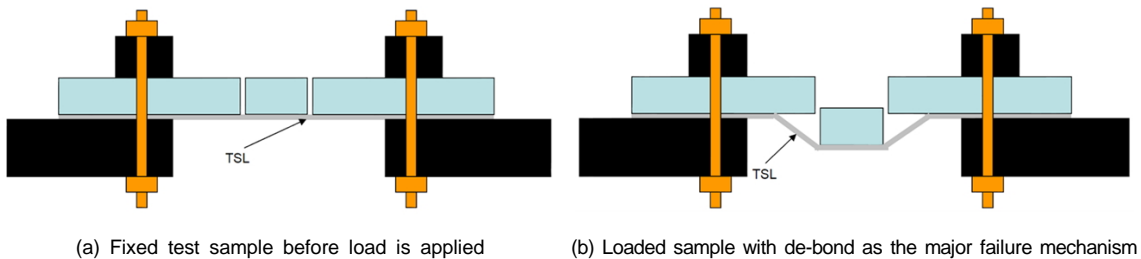


Fig. 5. Setup for TSL Linear Block Support Test (Chang et al., 2015)

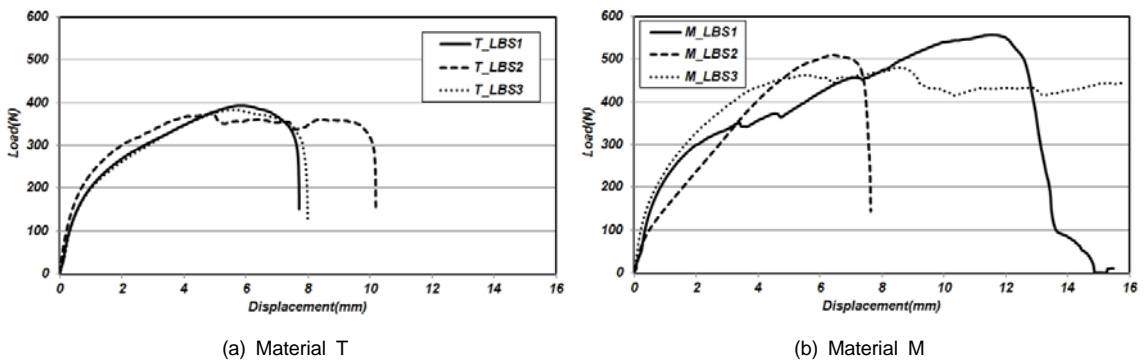


Fig. 6. LBS Test results (Chang et al., 2015)

는 폴리머 함량이 재료 T에 비해 상대적으로 높기 때문인 것으로 보인다. 재료 M의 부착파괴의 강도나 변위면에서 모두 재료 T보다 높은 것으로 나타났다. 재료 T의 경우, 400 N 내외에서 부착파괴가 크게 발생하였고 재료 M의 경우 대략 500 N 내외에서 부착파괴가 크게 발생한 것을 알 수 있다. 재료 T의 평균 최대 하중은 384.6 N이고 이때 변위는 평균 6.14 mm였다. 재료 M의 평균 최대 하중은 이보다 큰 515.5 N이고 이때 변위는 평균 8.86 mm로 나타났다. 수치해석에서는 평균 변위와 평균 최대 하중 크기를 보이는 T_LBS1과 M_LBS3이 사용되었다(Fig. 6).

4. 수치해석을 이용한 TSL의 접촉 거동 분석

4.1 접촉 모델

수치해석을 이용하여 TSL의 접촉 거동을 분석하는 것은 향후 TSL의 구조물 적용 시 TSL로 인한 구조적 안정성 해석 등에 사용될 수 있는 TSL의 접촉 특성을 고려하기 위해서이다. 수치해석에서 사용할 TSL의 재료의 물리적 특성은 2절에서 언급한 인장시험 결과를 모사하여 분석되었다(Fig. 4). 재료의 물리적 특성을 적용하여 TSL과 암석과의 접촉 특성을 모델링하고 최종적으로 접촉 거동에 대한 물리적 특성을 파악하고자 하였다. 해석에는 범용 해석 프로그램인 Abaqus가 사용되었다.

Abaqus에서 정의하는 접촉면의 점착거동은 대부분 Camanho et al. (2003)에 의해 유도된 관계식들이다. 점착 모델은 종속(slave) 절점들에 작용하는 접촉면 응력이 점착 파괴 기준에 도달할 때 지배(master) 절점에서 분리되는 모델이다. 이 때 분리된 접촉면에서의 지배 절점과 종속(slave) 절점간의 관통은 접촉 조건에 의해 허용되지 않으며 분리된 접촉면에는 마찰력만 작용하는 것으로 간주된다(Michael and Michael, 2012). 일반적으로 점착 모델에는 접촉면의

분리와 이에 대응하는 힘 사이의 관계인 traction-separation (t - δ) 관계가 정의되는데(Hyun et al., 2013) 이러한 관계 중 선형탄성 모델(linear elastic traction-separation)은 다음 식 (3)과 같이 정의된다.

$$t = \begin{pmatrix} t_s \\ t_t \\ t_n \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} K_s & 0 & 0 \\ 0 & K_t & 0 \\ 0 & 0 & K_n \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} \delta_s \\ \delta_t \\ \delta_n \end{Bmatrix} = K\delta \quad (3)$$

여기서, traction (t)은 점착 강성(K)과 변위(δ)의 곱으로 정의되며 첨자 s, t, n 은 각각 접촉면 좌표계에서의 전단방향과 수직 요소를 나타낸다. 본 연구에서는 점착 강성이 같은 등방성 점착거동(isotropic cohesive behavior)을 고려하였다. 이 때 접촉면에서의 접촉변위는 접촉면에 정의된 주중 절점간의 수직방향과 전단 방향에 대해서 정의된다.

TSL의 접촉 거동 모사에는 점착(cohesion) 모델과 접촉면의 분리 기준으로 접촉면의 손상(damage) 기준이 사용되었다(Abaqus, 2010). 일반적인 접촉 모델로 사용되는 ‘HARD contact’ 모델은 접촉면에서의 관통(penetration)을 최소화하며 접촉면에서의 관통에 의한 인장 전이는 허용하지 않는 모델(Stefan et al., 2008)이지만, 본 연구에서 사용된 TSL은 부착력에 의존하는 재료이므로 해석 모델에서 관통은 허용하지 않고 오직 점착력에 의해 부착력이 제거되도록 모델링하였다. 이를 위해 TSL과 암석과의 부착력이 일정 수준에 도달하면 소멸되도록 손상 모델을 함께 적용하였다.

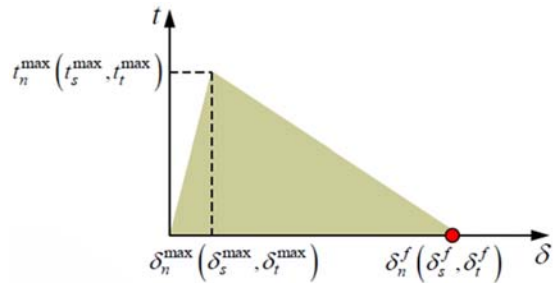


Fig. 7. Traction-separation relationship of cohesive and damage contact model (Abaqus, 2011)

일반적으로 접촉에 대한 손상 모델은 손상의 생성 (initiation)과 진행(evolution)을 구분하여 정의한다. Fig. 7은 접촉면의 점착과 손상 모델에 대한 개념도이다. 점착 모델에서 접촉면에서의 최대 응력(t^{max})이 접촉 분리 최대 하중(δ^{max})에 도달하면 손상이 발생하기 시작하여 접촉면의 응력이 점점 감소하게 되고 최종적(δ')으로 파괴가 발생하여 접촉면이 완전히 분리되도록 한다. 여기서 최대 응력을 정의하는 방법에 따라 손상 모델을 적용하는 방법이 달라진다. 본 연구에서는 접촉면의 최대 수직 응력을 기준으로 사용하였다.

4.2 해석 모델

Fig. 8은 해석에 사용된 선형블록지지시험의 기하학적 조건을 나타낸다. TSL해석모델은 3차원으로 모델링 되었으며 실내실험에서 사용된 암석 블록의 크기인 4×4×3 cm를 기준으로 사용하였다. LBS 실험 조건이 중앙 암석 블록을 중심으로 대칭 조건이기 때문에 해석의 효율을 위해 해석 모델은 대칭조건을 사용하여 모델링하였다. 암석 블록과 암석 블록 사이의 간격은 실험에서와 같이 3 mm로 적용하였으며 끝단은 고정단 경계조건을 적용하였다. 선형블록지지 시험에서 하중이 가해지는 중앙의 암석 블록은 해석에서 모델링하지 않는 대신에 TSL면에 직접 하중이 가해지는 것으로 모델링하였으며 이때 하중을 받는 부분의 TSL은 해석시간 동안 동일한 변위가 발생하도록 하였다. 이는 선형블록지지시험에서는 중앙 암석

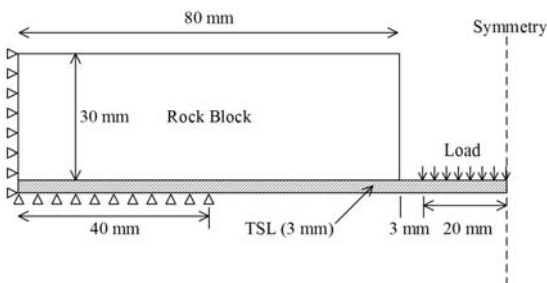


Fig. 8. Geometric condition of numerical analysis

블록 하단에 부착된 TSL은 암석 블록에 의해 고정되기 때문이다. 실내실험 결과에서 획득한 하중은 해석 모델에서 하중이 가해진 면의 반력을 환산하여 비교하였으며 변위는 하중이 가해진 면의 평균 수직변위를 사용하였다. TSL의 점착 모델은 고정단에서 40 mm 거리부터 80 mm 지점의 접촉면에 부여하였으며 고정단에 40 mm 거리까지는 해석결과에 영향을 주지 않도록 완전부착을 적용하였다. 해석초기에 40 mm에서 80 mm 까지 암석과 TSL이 접촉된 면은 초기 접촉 조건(initial contact condition)을 부여하여 적용하여 TSL이 초기에 접촉한 면에서 탈락된 이후에는 오직 압축하중만 고려되도록 하였다.

Fig. 9는 해석에 사용된 수치해석 격자의 모습을 나타낸다. 해석을 통해 TSL과 암석 사이의 접촉에 대한 거동만을 얻어내기 위해 해석에 사용된 암석 블록은 해석에 큰 영향을 주지 않도록 강성이 큰 탄성체로 고려하였다. 해석에 사용된 요소는 C3D8R으로 총 5448개가 사용되었다. 정의된 접촉면에 의해 TSL과 암석 블록 사이의 하중이 전달되므로 접촉 조건을 사용할 경우 격자의 크기가 같지 않아도 되기 때문에

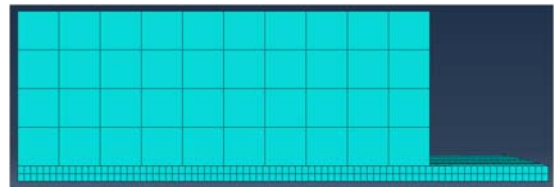


Fig. 9. 3D Mesh of numerical analysis

Table 1. Material property and contact condition

Property	Value
Density	1,070 kg/m ³
Elastic modulus	291 MPa (T), 434 MPa (M)
Poisson's ratio	0.3
Material Model	Plastic
Cohesive stiffness	variable
Maximum nominal stress at damage initiation	variable
Damage evolution method	Fracturing energy

암석 블록의 격자는 TSL 격자에 비해 상대적으로 크게 모델링하여 해석의 효율을 높였다.

해석에 사용된 재료의 주요 물성과 접촉 조건은 아래 Table 1과 같다. 해석을 통해 점착 강성과 손상 계수들을 획득하는 방식으로 해석을 진행하였으며 점착 성능을 나타내는 강성과 손상 계수들이 TSL의 부착면을 해석하기 위한 주요 인자로 고려되었다.

4.3 해석 결과

TSL과 시험체 블록 사이의 점착 특성은 접촉면에 하중이 발생하는 부분과 접촉이 떨어지면서 발생하는 점착력 부분으로 나눌 수 있다. 해석에서는 이러한 점착의 특성을 고려하여 TSL의 점착 특성을 파악하였다. Fig. 10은 TSL이 암석 블록에서 접촉이 이탈되는 모습을 나타낸 것으로 접촉면에 정의된 점착 특성에 의해 접촉면의 손상에 도달하기 전에는 접촉 상태를 유지하다가 손상이 시작되면서 점착 접촉이 떨어지는 모습을 볼 수 있다. 그림에서는 해석 모델의 수직변위를 나타낸다. 대칭 조건과 하중 조건에 의해 중앙부 TSL의 수직변위는 하중이 적용되는 면에서 동일하게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11~13은 TSL과 암석 접촉면에 정의된 점착 강성, 손상 시점, 접촉면 탈락에 필요한 총 에너지 변화에 따른 해석결과의 차이를 보여준다. Fig. 11에

서 나타나듯이 점착 강성이 클수록 해석 모델에서 나타나는 하중 변위 관계의 기울기가 증가하고 낮을수록 감소하는 것을 볼 수 있다. 하지만 수치해석 결과나 선형블록지지시험 결과로 나타나는 하중 변위 관계는 하중 증가에 따른 TSL 재료 자체 변위와 접촉면에서의 점착 강성, 손상에 의해 정의된 접촉의 점진적인 변화 양상이 종합되어 나타나게 되며 이러한 관계가 최종적으로 그림과 같은 하중 변위 관계로 나타난다. 따라서, 1개의 선형블록지지시험을 통해 이러한 각 영향요소를 개별적으로 확인하는 것은 어렵기 때문에 해석에서도 하중에 의한 변위를 중심으로 검토하되 입력된 물성의 영향을 각각 평가하는 방식으로 해석을 진행하였다. 재료 M에 대한 선형블록지지시험에서는 수직변위가 7 mm인 부근에서 TSL이 암석 블록에서 이탈하여 하중이 급감하는 것으로 나타나지만 해석에서는 접촉면의 이탈이 급격히 발생하지 않기 때문에 실험결과와의 비교를 위해 재료 T와 M에서 최대 하중에서의 변위인 6.0 mm와 6.5 mm를 각각 수직변위 기준으로 검토하였다.

Fig. 12는 점착 강성과 손상 에너지가 같을 때, 접촉면의 손상이 시작되는 최대 응력에 따른 변화 양상을 나타낸다. 그림에서 나타나듯이 손상 응력의 시점에 따라 변위 증가 형태가 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 입력된 점착 강성이 같기 때문에 초기 하중 변위 관계는 유사하게 진행되다가 일정 수준 이상에서 손상 시작 시점에 따라 결과가 다르게 나타난다. 정의된 손상 시작 시점의 최대 응력이 낮을수록 접촉면의 파괴가 상대적으로 낮은 수준의 하중에서 시작하는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 점착 강성과 접촉면 손상 시작의 수준이 같을 때, 접촉면 탈락에 필요한 총 손상 에너지에 따른 변화 양상을 나타낸다. 그림에서 나타나듯이 필요한 손상 에너지의 크기가 클수록 접촉면 이탈에 필요한 하중이 증가하는 것을 볼 수 있다. 필요한 총 손상 에너지에 따라 접촉면의 하중 변위 곡선의 수렴점 수준도 달라졌다. 또한, 필요한 총 손상 에너지

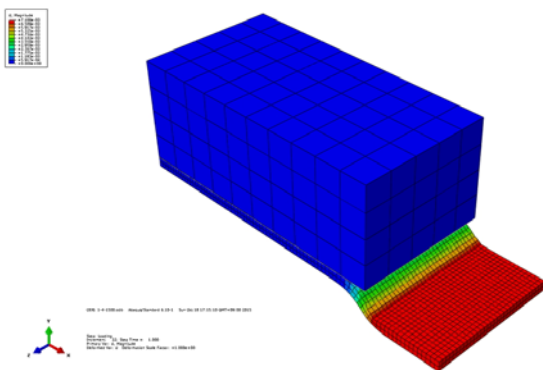
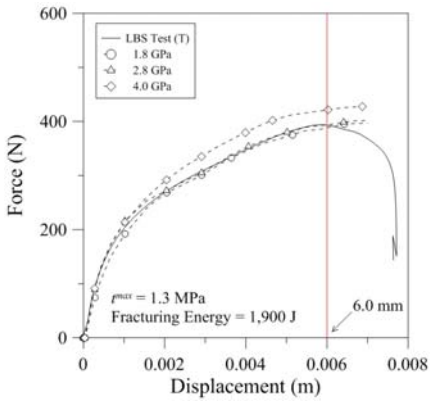
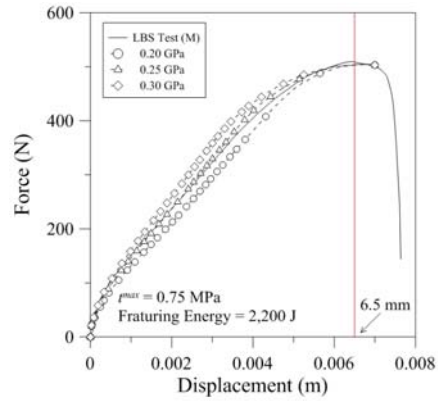


Fig. 10. Vertical displacement from numerical analysis

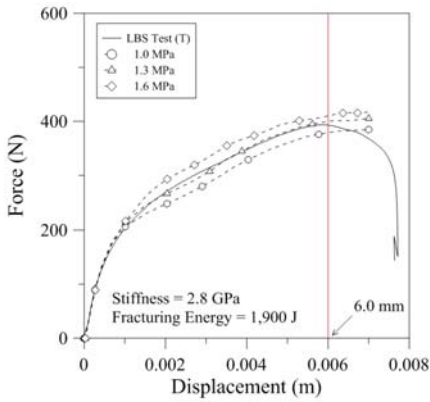


(a) Material T

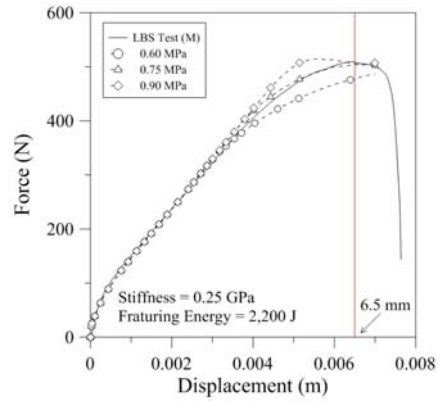


(b) Material M

Fig. 11. Analysis result depending on cohesive stiffness at contact surface

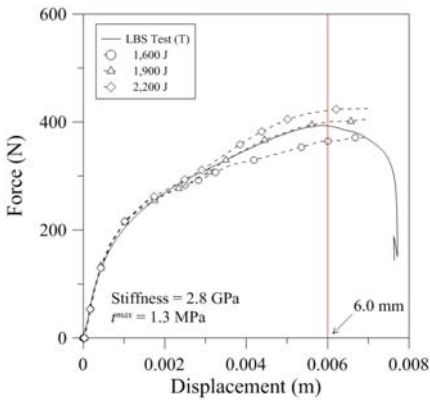


(a) Material T

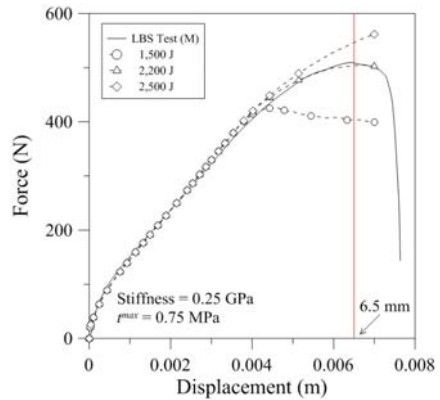


(b) Material M

Fig. 12. Analysis result depending on the maximum stress of damage initiation



(a) Material T



(b) Material M

Fig. 13. Analysis result depending on fracturing energy

의 크기에 따라 하중변위 곡선의 수렴 형태가 달라지는 것을 알 수 있다.

대체로 정의된 접촉의 손상에 따라 해석에서 사용된 구조 전체 접촉이 완전히 분리되는 시점이 달라지고 접촉의 변화 양상에 대한 정의에 따라 접촉이 분리되는 시점에서의 힘의 크기가 달라지는 것을 알 수 있다. 해석결과를 종합하여 연구에서 사용된 TSL 재료에 가장 적합한 접촉 특성은 다음 Table 2와 같이 정리할 수 있다. 이러한 접촉면의 특성은 TSL 재료의 구성 성분의 차이에 기인한 것으로 보이며 폴리머 함유량이 높은 재료 M(Chang et al., 2015)이 접촉면의 강성과 손상이 시작되는 최대 응력이 낮지만 접촉면 탈락에 필요한 에너지의 양은 재료 T에 비해 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 즉, 폴리머의 함유량이 높을수록(재료 M) 접촉면 강성의 기울기와 손상이 시작되는 최대 응력이 수준이 낮지만 접촉면의 완전 탈락에 필요한 총 에너지가 크기 때문에 접촉면 최대 응력 도달하여 손상이 시작된 이후의 손상의 진행을 나타내는 접촉면의 traction-separation 관계가 재료 T에 비해 상대적으로 완만한 기울기를 보이는 것으로 나타났다(Fig. 7 참조). 재료 M이 재료적인 강성과 부착면의 최대 하중이 상대적으로 높으나 접촉면의 특성에서는 재료적인 특성과는 다르게 나타난 것을 알 수 있다. 선형블록지시시험의 초기 하중 변위 관계는 점착 강성에 의해 결정되고 이후 진행 형태는 손상 시작 응력에 의해 나타나며 마지막으로 손상 에너지에 의해 최종 하중 수렴 구간이 결정되므로 향후 TSL의 선형블록지시시험을 통한 접촉면 특성 해석은 이러한 해석 순서로 진행하면서 접촉 특성을 결정하는 것이 적절하다고 판단된다.

Table 2. Contact property of Material M and T

Contact property	Material M	Material T
Cohesive stiffness (GPa)	0.25 GPa	2.8 GPa
Maximum nominal stress at damage initiation (MPa)	0.75 MPa	1.3 MPa
Fracturing Energy (J)	2,200 J	1,900 J

5. 결론

본 연구에서는 TSL의 구조물 적용 시 구조적 안정성 해석을 위한 TSL의 접촉 거동을 수치해석 방법으로 분석하였다. 연구를 통해 TSL의 접촉 특성을 수치화할 수 있었으며 결론을 정리하면 다음과 같다.

1. TSL의 인장 시험 모사를 통해 TSL의 재료적 특성을 정의할 수 있었으며 Plastic 재료 모델이 TSL의 재료적 특성을 가장 적절히 모사할 수 있는 것으로 나타났다.
2. 선형연구로 수행된 선형블록지시시험을 수치해석 방법으로 모사하기 위해 해석 모델의 접촉면에 점착 모델과 손상 기준을 적용하였으며 TSL의 접촉면 거동은 연구에서 사용한 모델을 사용하여 선형블록지시시험 결과와 유사한 결과를 도출할 수 있었다.
3. 접촉면에 정의된 점착 강성은 TSL의 초기 하중 변위 관계를 설명하며 손상 기준으로 하중에 따른 접촉면의 변화 양상을 수치할 수 있었다. TSL 재료 M의 점착 강성과 최대 손상 시작 응력, 손상 에너지는 각각 0.25 GPa, 0.75 MPa, 2,200 J로 평가되었으며 재료 T는 2.8 GPa, 1.3 MPa, 1,900 J로 평가되었다. 폴리머의 함유량이 상대적으로 높은 재료 M이 접촉면의 강성과 최대 손상 시작 응력이 낮으나 접촉면 손상이 시작된 이후 진행되는 구간에서 접촉면의 traction-separation 관계가 재료 T에 비해 상대적으로 완만한 기울기를 보이는 것으로 나타나 접촉면 파괴에 소요되는 총 에너지의 크기가 큰 것으로 나타났다.
4. 수치해석을 통해 폴리머의 함유량이 높을수록 부착력이 증가하는 경향과 동일한 해석결과를 얻을 수 있었다. 연구를 통해 TSL의 점착면의 거동을 해석하기 위해서는 점착 강성, 최대 손상 시작 응력, 접촉면 파괴에 필요한 총 손상 에너지를 순서대로 고려하면서 해석을 수행하는 것이 TSL 접촉 거동 해석에 가장 적절할 것으로 판단된다. 향후 TSL

재료의 폴리머 함유량에 따른 접촉 특성을 본 연구에서 수행한 해석 방법을 통해 정량적으로 제시할 수 있을 것으로 판단되며 TSL이 시공된 벽면의 부착력을 고려한 해석에도 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 “운용 중 공간확장이 가능한 지하 굴착 및 안정화 기술 개발”의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. Abaqus (2010), Analysis user's manual, Ver. 6.10, Providence (RI, USA): Dassault Systemes Simulia Corp.
2. Ahn, T. (2011), Thermal and Mechanical Studies of Thin Spray On Liner (TSL) for Concrete Tunnel Linings, PhD Thesis, The University of Western Ontario, London, Ontario, Canada.
3. ASTM (2010), Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, D638-10.
4. Camanho, P.P., Davila, C.G., Moura, M.F. (2003), “Numerical simulation of mixed-mode progressive delamination in composite materials”, *J of Colloid Interface Sci*, Vol. 249, Issue 2002, pp. 62-77.
5. Chang, S., Lee, G-P., Han, J-T., Park, Y-T. (2015), “Development of a powder-type thin spray-on liner and its performance evaluation at different curing ages”, *Tunnel & Underground Space*, Vol. 25, No. 3, pp. 293-302 (in Korean).
6. Clements, M.J. (2002), “The future of fibre reinforced sprayed concrete”, *Proc. the 4th Int. Symp. on Sprayed Concrete*, Norwegian Concrete Association, pp. 73-81.
7. EFNARC (2008), Specification and Guidelines on Thin Spray-on Liners for Mining and Tunnelling.
8. Hyun, C.H., Lee, J.H., Lee, H., Kim, D.H., Hahn J. H. (2013), “Analysis of cracking characteristics with indenter geometry using cohesive zone model”, *Transactions of the Korea Society of Mechanical Engineers - A*, Vol. 32, Issue 12, pp. 1453-1463.
9. Michael A. Minnicino, Michael H. Santare (2012), “Modeling the progressive damage of the micro-droplet test using contact surfaces with cohesive behavior”, *Composites Science and Technology*, Vol. 72, Issue 16, pp. 2024-2031.
10. Povin, Y., Stacey, D., Hadjigeorgiou, J., Yilmaz, H. (2004), Part 1: Thin Spray-on Liners(TSLs)-A Quick Reference Guide, *Surface Support in Mining*, Y. Povin, D. Stacey and J. Hadjigeorgiou (eds), Australian Centre for Geomechanics, pp. 3-43.
11. Roberts, R. (2001), Time to look below the surface of membranes, *Australian Mining Monthly*, August, pp. 62-63.
12. Saydam, S. (2008), Ground Control - Use of Liner Support in Mining, Presentation file, MINE4300 - GEOTECHNICAL ENGINEERING, School of Mining Engineering, University of New South Wales.
13. Shin, H., Shin, D., Bae, G., Kim, D. (2009), “Numerical study on failure mechanism of tunnel shotcrete lining”, *Tunnel & Underground Space*, Vol. 10, No. 7, pp. 167-177 (in Korean).
14. Stefan, I., Tomas, G., Lucie, H., Zoran, A. (2008), “The use of finite element analysis to model bone-implant contact with basal implants, *Oral Surgery*”, *Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, Vol. 106, Issue 1, July 2008, pp. 39-48.
15. Tannant, D.D. (2001), Thin Spray-on Liners for Underground Rock Support, *Proceedings of the 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey - IMCET 2001*, pp. 57-73.