

# 공용 중인 TBM(Tunnel Boring Machine) 터널의 비선형 내진성능 평가

최병일<sup>1\*</sup>, 이동하<sup>2</sup>, 정진우<sup>3</sup>, 박시현<sup>4</sup>

## Nonlinear Seismic Performance Evaluation of an Operating TBM(Tunnel Boring Machine) Tunnel

Byoung-Il Choi<sup>1\*</sup>, Dong-Ha Lee<sup>2</sup>, Jin-Woo Jung<sup>3</sup>, Si-Hyun Park<sup>4</sup>

**Abstract:** Recently, the TBM tunnel construction method has been in the spotlight as tunnel excavation under urban areas such as the Metropolitan Rapid Transit (GTX) has been actively carried out. Although the construction cost of the TBM tunnel is high, it is relatively free from noise and vibration compared to the NATM tunnel method, so it is well known to be a suitable construction method for application to the lower part of urban areas. In particular, when the stratum passes through the shallow section, it can have a great impact on existing upper structures and obstacles, so accurate numerical analysis considering various variables is required when designing the TBM tunnel. Unlike other tunnel construction methods, TBM tunnels build linings by assembling factory-made segments. Unlike NATM tunnels, segment lining has connections between segments, so how to the connection status between segments is reflected can have a significant impact on securing the reliability of analysis results. Therefore, in this paper, a segment joint model(Janssen Model) was applied to the lining for seismic analysis of the TBM tunnel, and the tunnel's behavioral characteristics were analyzed after numerical analysis using nonlinear models according to urban railway seismic design standards.

**Keywords:** Segment lining, Janssen model, Nonlinear model, Coupled analysis, Seismic performance evaluation

### 1. 서론

TBM(Tunnel Boring Machine) 터널은 기계화 시공법으로 천공발파(Drilling and Blasting) 터널과 크게 구별되는 굴착공법이다. TBM 터널은 막장 및 측면 굴착면을 방패와 같은 구조물로 지지하며 굴진하는 공법으로 소음에 민감한 도심지 지역 및 하저터널 구간에 적용할 수 있는 효율적이고 안정성이 높은 공법이다. TBM 터널은 Cutter Head가 장착된 Shield-TBM을 발전구에 장착시켜 막장면의 붕괴를 방지하고 Cutter Head의 회전력을 이용하여 굴착 한다. 또한 후통부에 위치한 Erector를 이용하여 콘크리트 Segment를 부착해 Segment를 반력벽으로 이용하여 전진하여 시공하는 공법으로 외부 토압 및 수압을 지지하고, Tail void에 그라우팅을 실시함으로써 지반침하를 최소화 할 수 있다.

국내 TBM 터널 도입은 1980년대부터 이루어졌으나 본격적인 시공은 광주지하철 1호선, 부산지하철 등이 성공적으로 준공되는 2000년대에 들어서이며, 이 시기부터 국내 TBM 시공기술이 정착하게 되고 최근에는 수도권 광역급행철도(GTX) 등 도심지 하부 터널굴착이 활발히 진행됨에 따라 TBM 터널 시공법이 점점 더 각광을 받게 되었다(KTA, 2022). TBM 터널은 국내에서 다수 시공한 NATM 형식의 터널과 달리 라이닝이 세그먼트의 종 횡방향 연결로 이루어져 있다. 공장에서 사전제작된 세그먼트로 현장 조건을 정확히 반영한 TBM 터널 설계를 위해 외부 하중으로부터 세그먼트와 세그먼트의 이음부에 발생하는 회전강성과 세그먼트로 연결된 링간 연결부위에 발생하는 전단강성의 정확한 평가가 중요하다.

TBM 터널의 세그먼트로 이루어진 라이닝 구조해석 방법

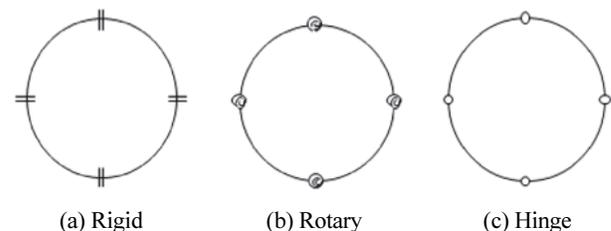


Fig. 1 Structural Model of Segment Lining(Yi and Song, 2024)

<sup>1</sup>정희원, 국토안전관리원 강원지역본부 기반시설안전실 과장, 교신저자

<sup>2</sup>정희원, 국토안전관리원 충청지역본부 기반시설안전실 직원

<sup>3</sup>정희원, 국토안전관리원 영남지역본부 기반시설안전실 팀장

<sup>4</sup>정희원, 국토안전관리원 상생협력실 실장

\*Corresponding author: bichoi@kalis.or.kr

Gangwon office, 4F, 201, Chuncheon-ro, Chuncheon-si. Gangwon-do, 24260, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2024년 11월 30일까지 학회로 보내주시면 2024년 12월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

으로 지반 반력을 스프링 형태로 고려하는 2차원 빔-스프링 모델이 있으며 라이닝 이음부 형상에 따라 강성일체법, 회전스프링법, 힌지법으로 구분할 수 있다. 강성일체법은 콘크리트 인버트형 라이닝 터널과 같은 형태로 세그먼트 이음부를 고려하지 않은 방법으로 회전모멘트가 가장 큰 값이 도출되며, 힌지법은 오히려 모멘트가 힌지 부분에서 상쇄되는 효과로 회전모멘트 값이 가장 작게 도출되는 문제가 있다.

이에 따라 국내에서는 TBM 터널의 회전모멘트 측면에서 중간 값을 얻을 수 있는 회전스프링법을 활용한 2차원 구조해석을 주로 실시하였다. 하지만 최근에는 보다 정확한 수치해석을 위해 세그먼트 연결부위의 회전강성 뿐만 아니라 세그먼트 링 간 전단강성 특성도 함께 고려할 수 있는 2Ring Beam-Spring 모델이 활용되고 있다. 하지만 2Ring Beam-Spring 모델의 경우 Sap2000과 같은 전문 구조해석 프로그램을 활용해야 함으로 수치해석을 위한 모델링 자체도 어렵고 정확한 세그먼트 특성을 반영하지 못할 경우 오히려 잘못된 수치해석 결과가 도출될 수 있어 프로그램 활용 시 주의를 기울여야 한다.

TBM 터널의 수치해석은 세그먼트 간의 연결 상태를 어떻게 반영하는지가 해석결과의 신뢰성 확보에 큰 영향을 미칠 것이며, 이 같은 상황을 인지한 국내외 다수의 연구자들은 보다 정확한 TBM 터널의 수치해석을 위해 노력한 결과 다양한 연구 성과를 거둘 수 있었다.

Choi(2014) 등은 라이닝 이음부 강성계수의 영향 검토를 위해 이음부 강성계수를 이론식을 통해 결정한 후 범위 내에서 강성계수를 변화하며 터널 단면을 Beam-Spring Model (2 Ring)로 가정하여 강성계수가 세그먼트 라이닝 설계에 미치는 영향을 검토하였으며, 결과적으로 강성계수의 크기가 라이닝 설계에 큰 영향을 미치지 않는다는 결론을 도출하였다.

Gharehdash and Barzegar(2014)는 지하철이 지나가는 TBM 터널을 대상으로 지반과 라이닝의 동적거동 특성을 3차원으로 분석하였다. 이때 터널 라이닝 세그먼트 이음부를 고

려한 수치해석 결과와 이음부를 고려하지 않은 경우의 결과를 비교하였다. 수치해석 결과 운영 중인 지하철 열차가 동적 효과를 상당히 유도하는 것을 알 수 있으며, 세그먼트의 이음부를 고려한 해석의 경우 이음부를 고려하지 않은 경우보다 동적 거동 효과가 큰 것을 입증하였다.

Yi and Song(2024)은 토사터널에서 세그먼트 라이닝 연결부 휨 효과를 구현하기 위해 Solid 요소에 Interface를 적용한 수치해석 모델링을 실시하고 라이닝 형태를 강성일체법(NJM)과 BJM(Beam Joint Model)을 구분하여 적용하여 평가하였다. BJM 모델을 적용한 경우 더 큰 변형이 일반적으로 발생되고, 응력은 NJM 모델보다 작은 결과가 나타나는 것을 수치해석을 통해 검증하였다.

이처럼 라이닝 형상, 지반의 상태를 고려한 공용 중인 TBM 터널의 비선형 내진해석은 지반과 세그먼트 라이닝의 일체화된 형태의 연속체 모델로 가정한 수치해석이 중요하다. 이때 세그먼트로 연결된 라이닝을 지반 모델에 직접 모델링하는 방법은 지반해석 프로그램으로도 가능하지만 상당한 난이도가 요구된다. 하지만 최근 기술발달로 상용프로그램에서 TBM 터널 라이닝 연결부 조건을 고려할 수 있는 모델을 지원하여 이를 활용한 수치해석도 가능하게 되었다.

본 연구에서는 도심지역 하저 구간 토사 지반에 건설된 TBM 터널을 대상으로 지반을 연속체모델로 적용한 비선형 내진해석을 수행하였다. TBM 터널 세그먼트 접합부의 비선형 강성 특성을 분석할 수 있는 수치해석 모델(Janssen Model)이 탑재된 상용프로그램을 활용하였으며, 내진해석은 1985년 캐나다 북서 지역인 Nahanni 국립공원 인근 지역에서 발생한 실 지진파를 활용하여 2차원 수치해석을 실시하였다.

## 2. 세그먼트 조인트 모델(Janssen Model)

터널 수치해석을 위해 다양한 상용 프로그램들이 활용되고 있으며 프로그램에 탑재된 수치해석 모델들을 활용하여 2차원·3차원 수치해석을 수행하여 구조물의 안전성을 평가하고 있다. TBM 터널 시공을 위한 설계단계에서의 검토는 대부분 터널굴착 중 터널 주변 지반의 안전성 평가를 위해 3차원 쉘 요소를 이용한 수치해석을 주로 수행하고 있다. 하지만 본 연구의 대상인 공용 중인 TBM 터널의 경우 시공단계에서 발생 가능한 지반의 위험성은 대부분 제거된 상태로 2차원 연속체 모델을 활용한 안전성 평가가 가능하며, 오히려 수치해석 시 세그먼트 연결부위를 어떻게 잘 반영하는 것이 더욱 중요할 것으로 판단된다.

본 연구에서 세그먼트 라이닝에 적용한 Janssen 모델은 비선형 힌지 요소를 사용하여 2차원 세그먼트가 연결된 부위에서 Beam과 Beam 요소를 비선형 특성으로 연결한 복잡한

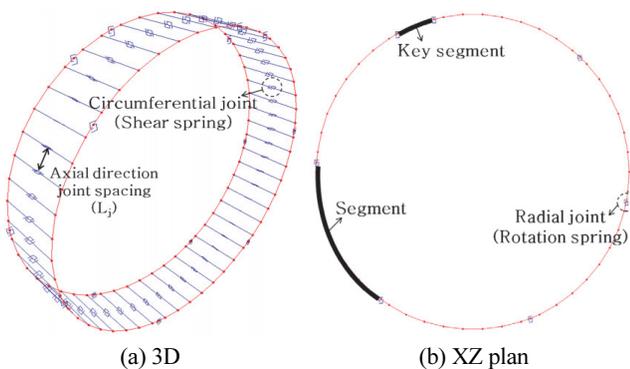


Fig. 2 2 Ring Beam-Spring model(Choi et al., 2014)

거동을 표현할 수 있는 모델이다. 또한 Beam 사이에서 연결된 Hinge 요소들은 각각의 특정 자유도에 대해 결합이 되지 않은 형태로 휨모멘트가 축력 또는 부재력에 의해 크게 영향을 받도록 결합된 형태로 사용할 수 있는 모델이다.

Hinge 요소는 Beam 요소 절점에서 정의될 수 있으며 이 요소는 Node와 Node 사이의 인터페이스 유형으로 정의된다. 요소의 국부좌표계는 Fig. 3과 같이 인접한 Beam 요소로부터 영향을 받게 된다. 이때 비선형 Hinge 거동은 Node 사이의 커플링 없이 각각의 별개의 자유도로 일반화된 응력-변위 관계가 정의되거나, 휨모멘트와 축력을 커플링하는 Janssen 방정식에 따라 정의될 수 있다.

공용중인 TBM터널의 2차원 해석을 위해 세그먼트는



Fig. 3 Beam Hinge Element(Zsoil, 2020)

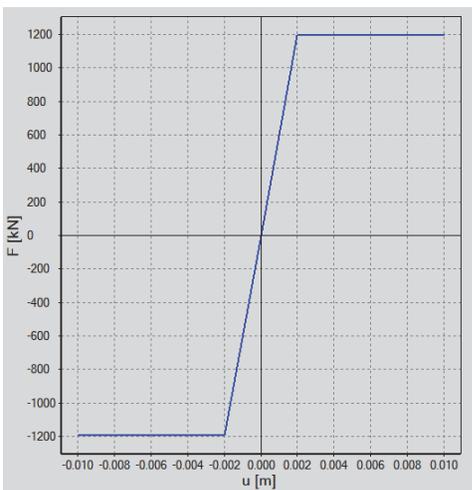


Fig. 4 Shear Hinge

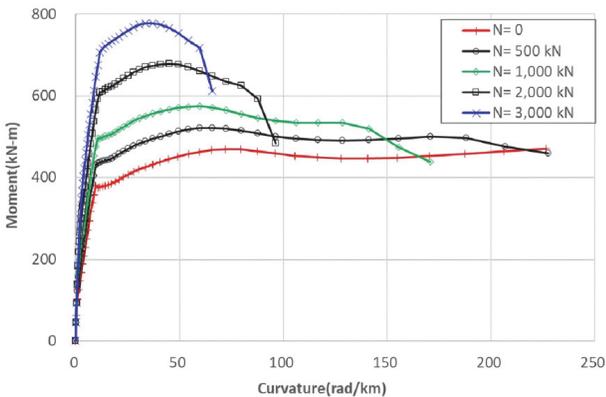


Fig. 5 Janssen Model(Momnet-Curvature)

Beam 요소로 모델링 할 수 있으며 세그먼트 연결부는 Beam 힌지 형태로 모델링이 가능하다. 이때 Beam 힌지는 전단력 및 휨모멘트에 대하여 비선형 강성 특성을 가지며, 휨모멘트 성분에는 Janssen 모델을 적용할 수 있다. 여기서 전단힌지는 Fig. 4와 같이 전단 변위가 2mm를 넘어서면 더 이상의 전단력을 받을 수 없는 항복상태가 되는 조건으로 설정하고 전단력은 체결된 볼트의 전단강도를 최대 1200kN으로 가정하였다. 그리고 회전힌지는 Fig. 5와 같이 Janssen 방정식을 활용한 모멘트-곡률과의 상관관계와 같이 휨강도가 축력에 따라 변형하는 형태를 반영하였다.

TBM 터널 2차원 수치해석 시 휨 강성은 세그먼트 연결부위가 닫힌 경우와 부분적으로 열린 경우를 표현할 수 있으며 연결부위가 부분적으로 열린 경우 연결부위에 균열이 발생한 것으로 판단 가능하다. Janssen 모델의 연결부위 모델링은 비선형 Hinge 모델로 Beam 요소보다 단면이 작은 기하형상으로 가정하여 아래 Fig. 6과 같이 폭 b, 두께 h인 사각형 단면으로 정의 가능하다.

Janssen 모델의 연결부위가 닫힌 경우, 휨모멘트 및 휨강성 공식은 다음과 같이 탄성식으로 나타낼 수 있다.

$$M = k_{el} \Delta \Phi \quad (1)$$

$$k_{el} = Eb \frac{h^2}{12} \quad (2)$$

또한 Janssen 모델의 연결부위가 부분적으로 열린 경우, 휨모멘트 및 휨 강성이 축력에 따라 변화하기 때문에 다음 식과 같이 비선형 특성을 나타낸다.

$$M = 1/6 \frac{(3 |\Delta \phi| Ebb - 2 \sqrt{2} \sqrt{|\Delta \phi| Ebb |N|}) |N| \text{sign}(\Delta \phi)}{|\Delta \phi| Eb} \quad (3)$$

$$k_{el} = 1/6 \frac{N^2 \sqrt{2} h}{|\Delta \phi| \sqrt{|\Delta \phi| Ebb |N|}} \quad (4)$$

여기서, E : 콘크리트 탄성계수

b : 세그먼트 폭

Janssen 모델은 축력의 편심이 허용치를 초과하거나, 휨모

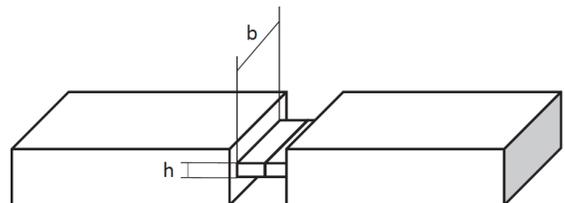


Fig. 6 Cross section of the Janssen model(Zsoil, 2020)

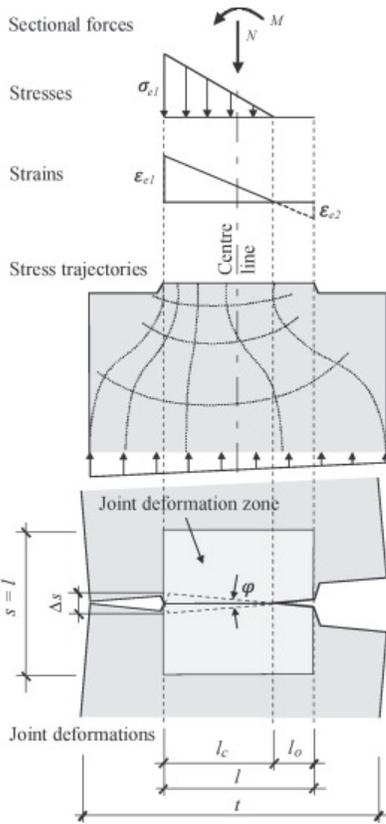


Fig. 7 Stress and Strain Distribution by Joint Open(Zsoil, 2020)

멘트가 허용치를 초과하는 경우, Fig. 7과 같이 연결부위가 부분적으로 열리게 되며 응력분포는 접촉된 부분에 집중하게 되어 파괴 상태에 빠르게 도달하게 된다.

### 3. 수치해석

수치해석에 사용된 프로그램은 터널 시공 현장의 상태를 정확하게 모사할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 지하수의 유동해석과 역학적 계산을 효과적으로 다룰 수 있는 유한요소 해석 프로그램으로 스위스 로잔공대와 ZACE사가 개발한 ZSOIL을 활용하였다. ZSOIL은 2D/3D 고체요소애 HS Model (비선형모델) 및 Mohr-Coulomb Model 등 ULS(극한한계상태) 해석이 가능하고 터널 세그먼트 접속부위 모델링을 위해 선형탄성 Shell요소, Nonlinear Hinge 모델(Janssen Model)이 적용가능하는 등 TBM 터널을 적절히 모사할 수 있는 다양한 수치해석 모델을 탑재하고 있다.

공용 중인 TBM 터널의 비선형 내진해석을 위한 방법으로, 도시철도내진설계기준(MOLIT, 2018) 및 기존시설물(터널)내진 성능평가요령(KALIS, 2020)에서 제시한 비선형 시간이력해석법을 적용하였다. 이때 지반은 지하수위가 존재하는 지반과 세그먼트 라이닝 거동을 정확히 표현할 수 있는 2차원 연속체모

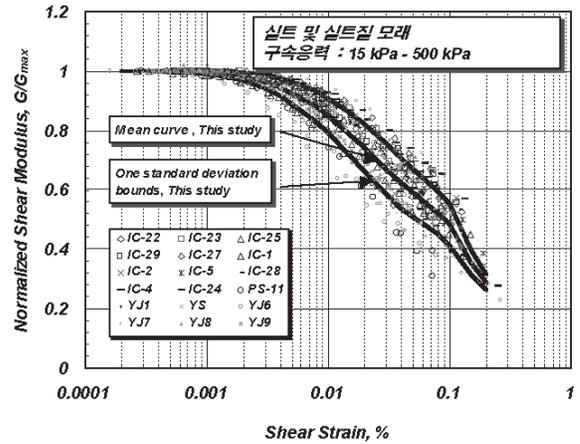


Fig. 8 Silt Sand(Kim and Choo, 2001)

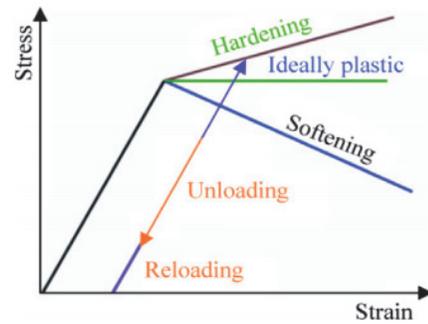


Fig. 9 Idealized Uniaxial Stress-Strain Plots(Pariseau et al., 2018)

델을 활용하였다.

세그먼트 라이닝은 위에서 언급한 Janssen Model을 활용하고, 지반재료를 탄소성 요소로 가정한 연속체 모델의 경우 Mohr-Coulomb 모델과 지반재료 비선형 특성을 고려하기 위해 Fig. 8의 기존 시설물(기초 및 지반) 내진성능 평가요령(KALIS, 2020)에서 제시하는 비선형 동적 변형특성을 참고할 수 있는 실트질 모래는 HS(Harening-Soil) 모델을 적용하였다.

여기서 탄소성은 지반재료의 탄성과 소성 특성을 의미하며, Mohr-Coulomb 모델은 선형탄성(Linear elastic)과 완전소성(Perfectly plastic) 거동을 표현할 수 있는 모델이지만 Fig. 9과 같이 지반의 거동을 선형탄성 형태만으로 표현하는데 한계가 있다.

지반의 축방향 거동에서는 영구변형, 소성경화, 소성연화 및 이력거동 특성 등이 나타나며 이러한 거동을 표현하기 위해서는 변형률 증분 및 응력 증분 등 증분형 변수가 필요하다.

주어진 하중에 대하여 변위가 발생하면 변형률-변위 관계식으로부터 변형률을 구할 수 있다. 변형률을 알고 있으면 임시응력(Trial Stress)을 구할 수 있으며 임시응력이 소성기준을 벗어나면 소성유동법칙에 부합하는 탄소성응력을 산정해야 한다. 탄소성상태를 유발한 하중 증분으로부터 구한 변위

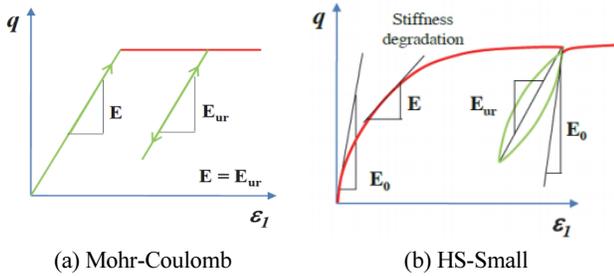


Fig. 10 Comparison of Analysis Model(Rafal OBRZUD, 2011)

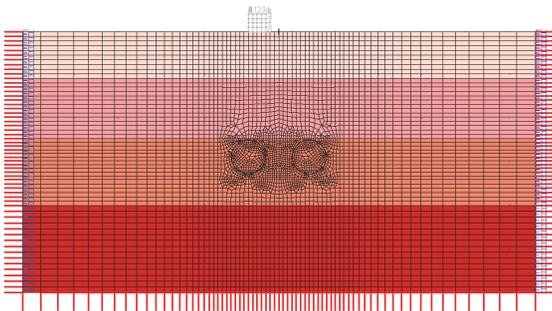


Fig. 11 Analysis section

증분으로부터 변형률 증분(Strain Increment)을 구할 수 있으며, 이때 변형률 증분은 탄성변형률 증분과 소성변형률 증분의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^p \quad (5)$$

여기서,  $\dot{\varepsilon}$  : 변형률 증분

$\dot{\varepsilon}^e$  : 탄성변형률 증분

$\dot{\varepsilon}^p$  : 소성변형률 증분

HS모델은 비선형 탄소성 모델로 Fig. 10(b)와 같이 초기접선탄성계수( $E_0$ ), 제하/재제하 탄성계수( $E_{ur}$ ), 50%  $q_f$ 에서의 할선탄성계수( $E_{50}$ )의 기준값( $E_0^{ref}$ ), 변형률 경계치( $\gamma_{0.7}$ )와 같은 탄소성해석을 위한 변수들을 포함한다(Zsoil, 2020). 이같은 변수들을 이용한 HS 모델은 MC 모델보다 지반의 비선형 거동특성을 정확하게 표현할 수 있는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 지하수위가 존재하는 지반의 지하에 매설된 TBM 터널을 2차원으로 모사하기 위해 두께 32cm를 가진 세그먼트를 균등 분할 조건으로 7개로 나누고 앞서 언급한 세그먼트 조인트모델(Janssen 모델)을 적용하였다. Beam Hinge는 전단힌지와 회전힌지로 정의하고, 전단강도는 전단변위-전단력으로 정의하였다. 여기서 힌지에 적용된 Janssen 모델은 단면적, 탄성특성, 비선형특성으로 정의할 수 있다. Hinge는 세그먼트와 세그먼트 사이에 하나만 존재할 수 있으므로 7개의 Beam Hinge를 적용하였다. TBM 터널은 원형단면이며, 인

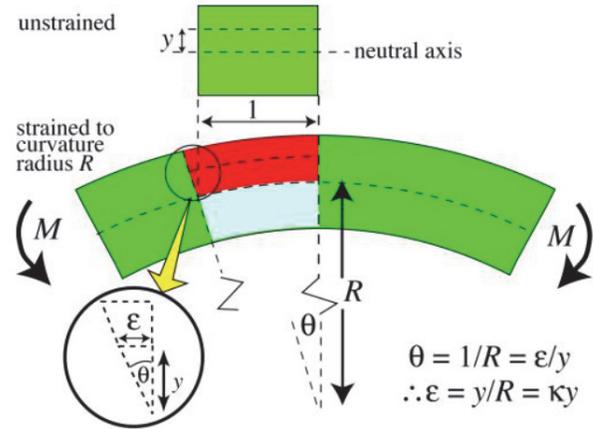


Fig. 12 Relation between the radius of curvature, R, beam curvature,  $\kappa$ , and the strains within a beam subjected to a bending moment

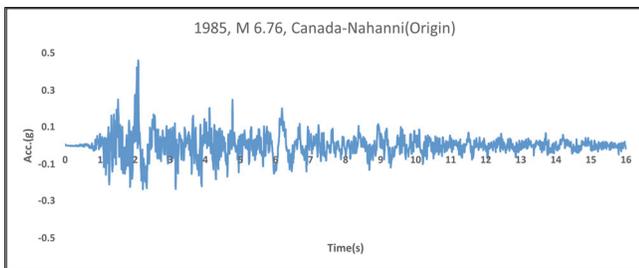
버트 콘크리트는 쉘드 세그먼트에 작용하는 자중으로 작용함과 동시에 콘크리트 강성을 갖는 구조로 모델링하고 지층 조성은 Fig. 11과 같이 모래층, 점토층, 모래층 및 자갈층 순으로 구성하였다. 지하수위는 최상부 지층 1m 하부에 형성하는 것을 가정하고 응력-지하수 연계해석(Fully Coupled Analysis between Displacement and Water Flow)을 통해 응력-간극수 압은 매시간 증분마다 동일한 평형방정식에서 상호작용하게 되며, 동시에 연속방정식에서 지하수 침투해석이 병행되도록 가정하였다. 지반 경계조건으로 바닥은 X, Y축 변위를 고정하고, 내진해석 시 Viscous Boundary를 양쪽 모서리에 적용하여 수평 방향으로 지진파가 반사되는 현상을 방지하였다. 마지막으로 Unloading Function을 이용하여 내진해석 직전단계까지 지점경계에서 반력을 유지시킨 후 내진해석 단계에서 응력경계로 적용하였다.

강도설계법을 통한 해석결과 검토를 위해 압축 측 콘크리트 최대변형률 조건 0.0033의 수치를 활용하여 힌지 부위에 발생한 회전각을 검토하였다. 관련 문헌에 따르면 축 변형률은 라이닝 두께의 50%와 회전각의 곱으로 나타낼 수 있다. 따라서 Fig. 12와 같이 세그먼트 모델링 조건에서의 회전각은 0.2rad까지 허용함을 알 수 있다.

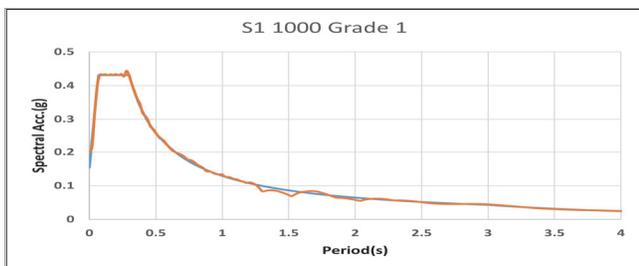
내진해석에 활용한 지진파는 우리나라 지층 조건과 유사한 판내부에서 발생한 지진파를 활용하였다. 1985년 캐나다 북서 지역인 Nahanni 국립공원 인근 지역에서 발생한 실 지진파로 규모(ML) 6.76, 진앙거리 6.52km, PGA(g) 0.489의 지진파다. 수치해석은 서울특별시에 있는 TBM 터널로 가정하고 실 지진파를 활용한 유효수평 지반가속도 0.154g이 붕괴 방지수준의 지진파를 반영하였다. Table 1은 해석을 위해 적용한 지반 및 재료 물성을 나타낸다. 또한 Fig. 13은 실 지진파를 나타내고, Fig. 14는 붕괴 방지수준의 지진파 응답스펙트럼 분석 결과를, Fig. 15는 최종 수치해석에 적용한 지진파를 나타낸다.

**Table 1** Determined Soil and Material properties

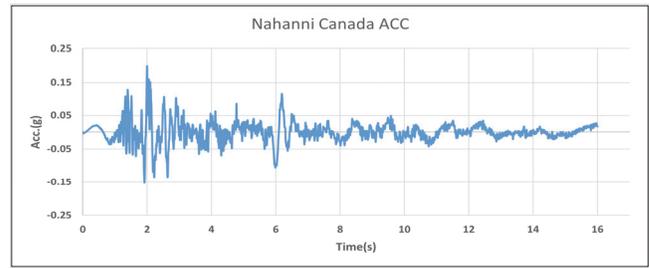
| Division                                  | Sand 1  | Clay  | Sand 2  | Gravel  | Cocrete    | Segment Lining |
|---|---------|-------|---------|---------|------------|----------------|
| Modulus of Elasticity ( $kN/m^2$ )        | 7,000   | 4,000 | 15,000  | 100,000 | 30,000,000 | 30,376,000     |
| Poisson's Ratio                           | 0.37    | 0.4   | 0.36    | 0.32    | 0.2        | 0.2            |
| Unit Weight ( $kN/m^3$ )                  | 18      | 17    | 18      | 20      | 24         | 25             |
| Cohesion ( $kN/m^2$ )                     | 50      | 1,800 | 100     | 200     | 10000      | -              |
| Friction angle ( $^\circ$ )               | 20      | -     | 27      | 35      | 33         | -              |
| Coefficient of Lateral Pressure ( $k_0$ ) | 0.658   | 1     | 0.546   | 0.426   | -          | -              |
| $V_w$                                     | 0.2     | 0.2   | -       | -       | -          | -              |
| $G_0^{ref}$ ( $kN/m^2$ )                  | 115.85  | -     | 134.22  | -       | -          | -              |
| $E_0^{ref}$ ( $kN/m^2$ )                  | 266.455 | -     | 308.706 | -       | -          | -              |
| $E_{ur}^{ref}$ ( $kN/m^2$ )               | 106.582 | -     | 123.482 | -       | -          | -              |
| $E_{50}^{ref}$ ( $kN/m^2$ )               | 35.527  | -     | 41.161  | -       | -          | -              |
| $\gamma_{0.7}$                            | 0.0002  | -     | 0.0002  | -       | -          | -              |
| Void Ratio(e)                             | 0.6     | -     | 0.5     | -       | -          | -              |



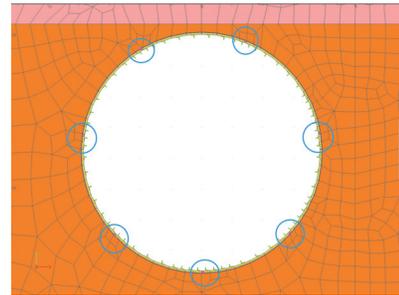
**Fig. 13** Real Earthquake Wave (Nahanni, Canada)



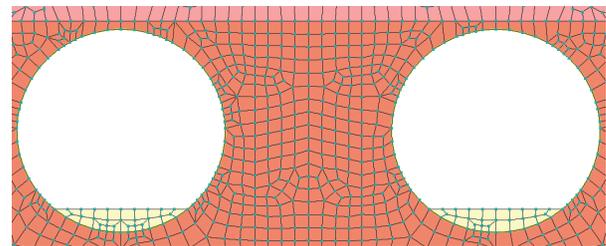
**Fig. 14** Spectrum Match (Nahanni, Canada)



**Fig. 15** Design Earthquake Wave (Nahanni, Canada)



**Fig. 16** Beam Hinge



**Fig. 17** Final Stage of Analysis Section

수치해석은 초기단계, 터널 굴착단계, 라이닝 생성단계 (Beam Hinge 생성포함), 터널 하부 Invert 콘크리트 생성단계, 내진해석 단계로 구분할 수 있다. 세부적으로 응력 및 간극수 압은 초기상태를 구현하기 위한 초기단계를 포함한 5단계로 시공단계를 정의하였으며, 1단계는 초기상태를, 2~4단계는 지하수 해석이 완료된 상태의 간극수압과 응력해석 결과를 확인할 수 있도록 정의하고 마지막 5단계에서는 지진과 영향이 검토 가능하도록 하였다. Fig. 16은 세그먼트 라이닝에 Beam Hinge가 입력된 상태를 나타내며, 그림 Fig. 17은 라이닝 바닥면 하부 콘크리트가 타설된 최종해석단계 단면을 나타낸다.

#### 4. 해석결과

본 연구에서는 도심지 하부 토사층에 건설된 TBM터널을 대상으로 세그먼트 조인트 모델(Janssen Model)을 활용한 응력-지하수 연계해석(Fully Coupled Analysis between Displacement

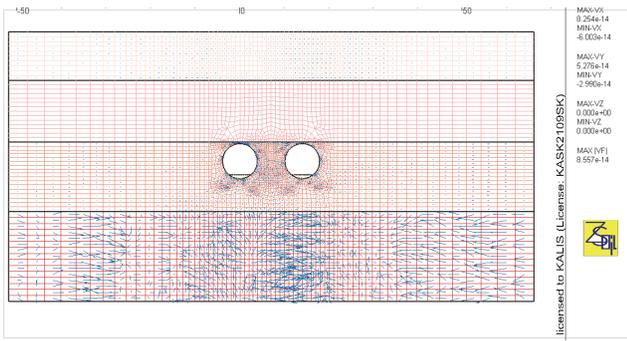


Fig. 18 Fluid Velocities

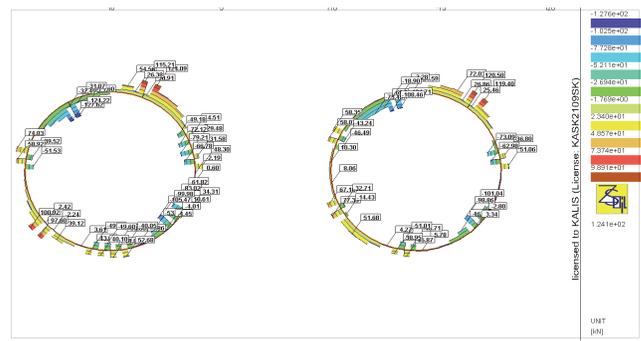


Fig. 22 Shear Force

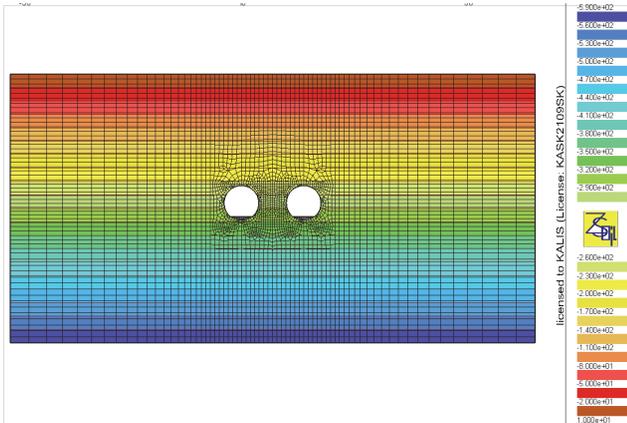


Fig. 19 Pore Pressure

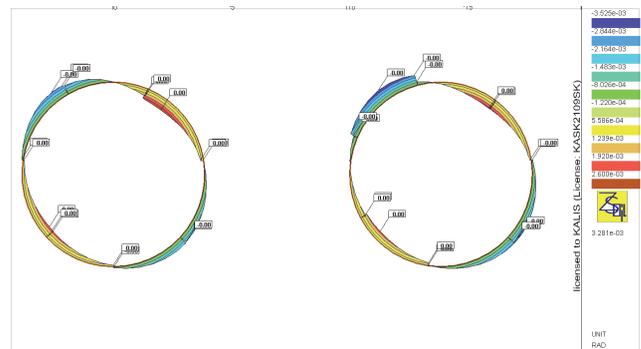


Fig. 23 Rotation Angle

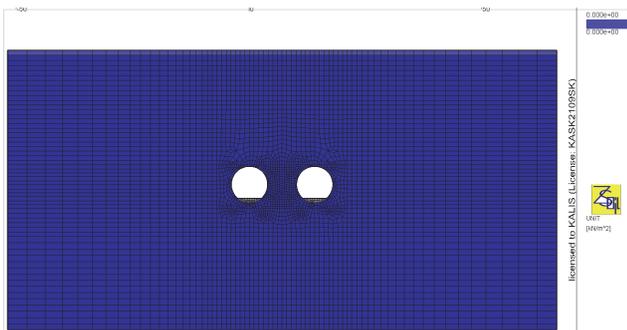


Fig. 20 Groundwater Level

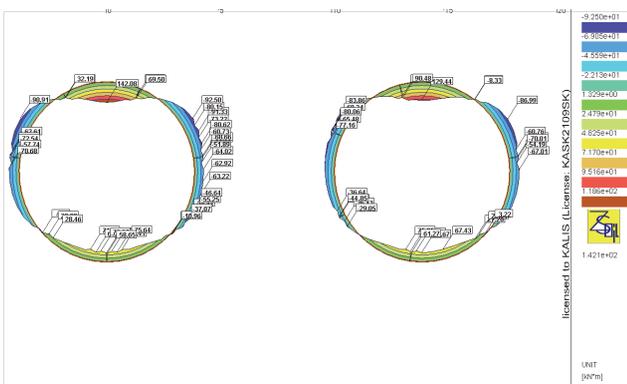


Fig. 21 Bending Moment

and Water Flow)을 통한 비선형 내진성능평가를 수행하고 최종단계에서 수치해석결과를 분석하였다.

수치해석결과 지하수 관련 검토 조건에서는 TBM 터널이 비배수 상태이며, 해석단계 중 터널 자체에 손상이 없어 물의 흐름도 발생되지 않아 특이사항은 도출되지 않았다.

침투해석 결과 Fig. 18과 같이 상대적으로 투수계수가 큰 퇴적자갈층에서 침투 유속이 가장 빠른 것을 확인할 수 있었으며, 터널의 천단 부위에서도 빠른 유속을 관찰할 수 있는데 이는 터널 주변 지층이 모래층이며, 상부에 점토층이 위치하기 때문에 지하수가 통과할 수 있는 통로의 폭이 감소하여 발생하는 현상에 해당된다. 간극수압 분포는 Fig. 19와 같이 하단부로 갈수록 수압이 커지는 것 이외 특이점을 확인할 수 없었으며, 물의 흐름이 없기 때문에 지하수위의 변화도 발생하지 않는 것을 Fig. 20을 통해 확인할 수 있다.

세그먼트 라이닝의 최대 휨모멘트는 Fig. 21과 같이 천단부에서 발생하고 있다. 또한 Beam 힌지 위치에서 다이어그램이 갈라져 있는 것을 확인할 수 있으며, 힌지 위치에서 휨모멘트는 주변 요소에 비해 상대적으로 작은 값이 나타났다. 이는 힌지의 비선형 특성에 해당되며 일정 회전각에서부터 휨모멘트와 휨 강성이 감소하는 Janssen 모델의 특성을 나타내고 있다.

세그먼트 세그먼트간 연결부위 특성을 나타내는 전단강도 검토 결과 Fig. 22와 같이 최대값 약 124KN으로 천단부위 주

변으로 전단력이 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.

터널 세그먼트 라이닝 연결부위 상태를 확인할 수 있는 회전각은 rad 단위로 표시된다. Fig. 23에서 최대 값이 약 0.00328rad으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 관련 이론에서 제시하는 세그먼트 연결부위에서 발생한 콘크리트 세그먼트 연결부위의 회전각 0.02rad에 훨씬 미치지 못하고 있는 것을 확인할 수 있으므로 본 조건에서는 터널 세그먼트 라이닝 연결부위 상태가 굉장히 양호하다고 판단할 수 있다.

## 5. 결 론

전 세계적으로 TBM 터널 시공 사례가 증가추세이며 이에 따른 관련 사고 발생도 증가하고 있다. TBM 터널은 대부분 시공 중에 많은 사고가 발생하고 있으며 원인은 대부분 터널 주위에 형성된 지하수 유출과 관련 있다고 한다. 엔지니어들은 사고예방을 막고 안전한 터널 시공을 위해 지층조건, 지하수위, 주변환경 등 다양한 영향인자를 고려해 최대한 실제 현장과 유사한 조건을 반영한 설계를 수행하고자 노력하고 있을 것이다. 하지만 현실적으로 세그먼트 라이닝 연결조건을 반영한 응력-지하수 연계해석(Fully Coupled Analysis between Displacement and Water Flow)을 수행하기는 쉽지 않은 것이 사실이다.

따라서 본 논문에서는 공용중인 TBM 터널을 대상으로 합리적인 안정성평가 방향을 제시하고자 하였으며 수치해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 비배수터널인 TBM 터널의 지하수 흐름 관련 검토결과 물의 흐름이 없는 정수압 상태에서 지하수위도 초기상태를 그대로 유지하는 것을 알 수 있었으며 이로 인해 지층 상부에서 하부로 내려갈수록 간극수압이 커지는 것을 확인할 수 있었다.
- (2) 라이닝에 발생한 휨모멘트 분석 결과 Janssen 모델을 적용한 연결부위에서 회전모멘트 값이 줄어드는 것을 육안으로 확인할 수 있었으며 최대 휨 모멘트 약 140KN·m로 나타났으며, 세그먼트링 간 이음부위에 발생하는 전단력은 약 124KN으로 라이닝에 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.
- (3) 비선형 내진해석시 라이닝 연결부위 손상을 확인할 수 있는 회전각 검토 결과 시공 초기단계부터 변화가 거의 없었으며 수치는 0.00328rad(0.187°)으로 관련기준에서 제시하는 기준 0.02rad에 근접하지 않으므로 구조물에 손상이 발생하지 않은 것으로 판단하였다.

이상과 같이 본 연구결과에서 나타나듯이 비선형 내진해석시 비배수 터널인 TBM 터널의 경우 세그먼트 라이닝에 손상이 없으면 물의 흐름이 발생하지 않으므로 지하수위 변동에

영향이 없으며, 휨모멘트 등 부재력에도 큰 영향을 받지 않아 안전한 상태를 유지하는 것을 확인할 수 있다. 또한 콘크리트 구조 휨 압축 설계기준(KDS 14 20 20)에서 압축변형률이 0.0033일 때 콘크리트의 파괴상태로 가정하는 수치와 직접 비교 시 수치가 아주 미미한 것으로 나타났으며 또한 모멘트 및 전단력과 같은 부재력 등 구조물 상태를 직접적으로 평가할 수 있는 수치들도 작게 나타남으로 세그먼트 라이닝 연결부위 손상은 없다고 판단할 수 있다.

하지만 실제 터널에서는 방수 처리한 비배수 조건임에도 누수 구간이 존재하는 것이 사실이며 공용중인 터널도 유지관리 미흡으로 누수를 크게 발생시켜 안전상 문제를 발생시킬 수 있을 것이다. 따라서 시설물 관리주체에서는 지하수 흐름 관련 철저한 관리가 필요할 것이며 시설물의 상태를 점검하는 진단업체에서도 합리적인 수치해석을 위해 부단한 노력을 기울여야 할 것이다. 이 같은 현장 상황을 고려해 추후 연구에서는 TBM 터널 라이닝 배면에 공극 발생 시 지하수의 흐름에 의한 세그먼트 라이닝에 미치는 영향을 검토하고자 한다.

## 감사의 글

본 연구는 ‘2024년 분당선 선릉~수서간 분당터널 정밀안전진단 및 성능평가’ 용역의 지원으로 작성하였습니다.

## References

1. Choi, W. Y., Park, J. D., and Lee, S. W. (2014), Influence of the joint stiffness on the segment design, *Journal of the Korean Tunneling and Underground Space Association*, 16(1), 61-72 (in Korean).
2. Gharehdash, S., and Barzegar, M. (2014), Numerical Modeling of the Dynamic Behaviour of Tunnel Lining in Shield Tunneling, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(6), 1626-1636 (in Korean).
3. Kim, D. S., and Choo, Y. W. (2001), Dynamic Deformation Characteristics of Cohesionless Soils in Korea Using Resonant Column Tests, *Journal of Korean Geotechnical Society*, 17(5), 115-128 (in Korean).
4. KISTEC (2020), Seismic Performance Evaluation Guideline for Existing Structures(Foundation and Geotechnical Structures) (in Korean).
5. KISTEC (2020), Seismic Performance Evaluation Guideline for Existing Structures(Tunnel) (in Korean).
6. Korean Tunneling and Underground Space Association (2022), *Advanced TBM tunnelling : theory and practice* (in Korean).
7. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2018), *Earthquake Resistance Design Regulations for Subway Structures* (in Korean).
8. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2022), *KDS 14 20 20* (in Korean).

9. Pariseau, W. G., Lason, M. K., Lawson, H. E., and Tesarik, D. R. (2018), User-friendly finite element design of main entries, barrier pillars, and bleeder entries, *ELSEVIER International Journal of Mining Science and Technology*, 28(1), 3-10.
10. Rafal OBRZUD (2011), The Hardening Soil Model with small strain stiffness.
11. [www.doitpoms.ac.uk/tlplib/beam\\_bending/bend\\_moments.php](http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/beam_bending/bend_moments.php)
12. Yi, G. J., and Song, K. I. (2024), Deformation of segment lining and behavior characteristics of inner steel lining under external loads, *Journal of the Korean Tunneling and Underground Space Association*, 26(3), 255-280 (in Korean).
13. Z-Soil (2020), DATA PREPARATION MANUAL.
14. Z-Soil (2020), THE HARDENING SOIL MODEL – A PRACTICAL GUIDEBOOK.
15. Z-soil (2020), v20.07 x64.

Received : 07/08/2024

Revised : 08/07/2024

Accepted : 08/12/2024

---

**요 지 :** 최근 수도권 광역급행철도(GTX) 등 도심지 하부 터널굴착이 활발히 진행됨에 따라 TBM 터널 시공법이 각광받게 되었다. TBM 터널은 공사비가 비싼 반면 NATM 터널 공법에 비해 상대적으로 소음, 진동에 자유롭기 때문에 기존 도심 하부에 적용하기에 적합한 공법으로 알려져 있다. 특히 지층이 얇은 구간을 통과시 기존 구축된 상부 구조물 및 지장물에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 TBM 터널 설계시 다양한 변수를 고려한 정확한 수치해석이 필요하다. TBM 터널은 다른 터널 시공공법과 달리 공장에서 제작된 세그먼트를 조립해 라이닝을 구축한다. 세그먼트 라이닝은 NATM 터널과 달리 세그먼트간 연결부위가 존재하므로 세그먼트 간의 연결 상태를 어떻게 반영하는지가 해석결과와 신뢰성 확보에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 논문에서는 도심지 토사지반에 건설된 TBM 터널의 내진해석을 위해 라이닝은 세그먼트 조인트 모델 (Janssen Model)을 적용하고, 지반은 도시철도 내진설계기준에 따라 비선형모델을 일부 활용해 수치해석을 수행 후 터널의 거동특성을 분석하였다.

**핵심용어 :** 지하수위, 연계해석, 재료 비선형, 내진성능평가, HS Small strain Stiffness 모델

---