

수치해석을 이용한 초탄성 재료 기반 면진라이닝의 거동 규명

안성권^{1*} · 이희업² · 박정준¹ · 이지원³

¹정회원, 한국철도기술연구원 첨단궤도토목본부 선임연구원

²비회원, 한국철도기술연구원 첨단궤도토목본부 수석연구원

³비회원, 한국철도기술연구원 첨단궤도토목본부 실습생

Numerical approach to elucidate the behavior of seismic lining adopting hyperelastic material model

Sung Kwon Ahn^{1*} · Hee Up Lee² · Jeongjun Park¹ · Jiwon Lee³

¹Senior Researcher, Advanced Rail & Civil Division, Korea Railroad Research Institute

²Head Researcher, Advanced Rail & Civil Division, Korea Railroad Research Institute

³Trainee Student, Advanced Rail & Civil Division, Korea Railroad Research Institute

*Corresponding Author : Sung Kwon Ahn, ska977@krii.re.kr

Abstract

Considering the continuing discussion about the Korea-Japan undersea tunnel, it is necessary to conduct a scientific investigation into tunnel deformation associated with large ground movements at fault. This paper presents findings obtained from numerical experiments to investigate a seismic lining that adopts rubber-like material. We utilized the user material subroutine to obtain the deformation gradient of the hyperelastic material. Additionally, polar decomposition is used to analyze the results, where the data is displayed on a series of two-dimensional planes using the principal direction, which facilitates a better insight into the deformation. Tunnel engineers could refer to this paper for the procedure to investigate the deformation of hyperelastic material.

Keywords: Deformation gradient, Polar decomposition, User material subroutine, Undersea tunnel, Hyperelastic material

초 록

지속해서 논의 중인 한일 해저터널 건설과 관련해 단층대에서 일어날 것으로 예상되는 대규모 지반 변위에 따른 터널의 변형에 대한 연구가 필요하다. 이 연구는 고무 재료 기반 면진라이닝에 관한 수치해석 결과를 제시한다. 변형 구배를 산정하기 위해 사용자 정의 서브루틴을 이용했다. 또한 극 분해를 통해 데이터를 분석하였으며, 주 신축 방향으로 정렬된 여러 평면 좌표계를 이용해 데이터를 도시하여 재료 변형에 대한 심층적인

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
25(6)495-507(2023)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2023.25.6.495>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received October 23, 2023

Revised November 7, 2023

Accepted November 8, 2023



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2023, Korean Tunnelling and Underground Space Association

이해를 얻을 수 있었다. 터널 기술자는 초탄성 재료의 변형 관련 연구에 이 연구를 참고할 수 있다.

주요어: 변형 구배, 극 분해, 사용자 재료 서브루틴, 해저 터널, 초탄성 재료

1. 서론

터널경로 결정은 지반의 역학적 특성, 지하수 흐름, 그리고 주변 지형과의 상호작용과 같은 다양한 기술적 요인들을 종합적으로 평가해야 하므로 복잡한 과정을 거친다. 이상적으로는 시공이 어려운 지반을 회피하여 노선을 설정하는 것이 바람직하나, 사회적 또는 경제적 이유로 쉽지 않을 수 있다. 대표적인 예로 20세기 초에 처음 제안되어 아직도 지속해서 논의 중인 한일 해저터널이 있다(The Dong-a Ilbo, 2010). 이 프로젝트는 한국과 일본 두 나라를 해저에 터널을 시공해 연결하는 것이다. 제안된 터널의 경로는 과거 여러 차례 지진을 일으킨 단층대를 통과한다(Kim et al., 2008). 따라서 해저터널 프로젝트를 성공적으로 완수하기 위해서는 단층에 따른 지진 위험을 감안해 관련 분야에 관한 연구개발이 필수적으로 선행되어야 한다. 특히, 단층 파쇄대 등에서 발생할 것으로 예상되는 대변위에 대응할 수 있는 특별한 터널 라이닝에 관한 연구가 요구되었다(MOLIT, 2018).

Table 1에 주요 면진라이닝 기술에 관해 요약하였다. 실제 운용 중인 터널에 적용된 사례로는 이탈리아와 일본 기술이 있다. 이탈리아 제품은 그리스 데살로니카 메트로에 적용되었고(Lunardi et al., 2017) 일본 제품은 터키 유라시아 터널에 적용되었다(Fig. 1). 라이닝에 유연성을 부여하기 위해 스프링이나 댐퍼가 사용되었다. 스프링을

Table 1. World's seismic lining

Country		Italia	Japan	This research
Application examples		Thessaloniki metro	Urasia tunnel	Not applicable
Key features		Spring	Damper	Hyperelastic material
Tensile/comp. capacity	mm	18.5	75	To be determined
Shear capacity	mm	30	50	To be determined

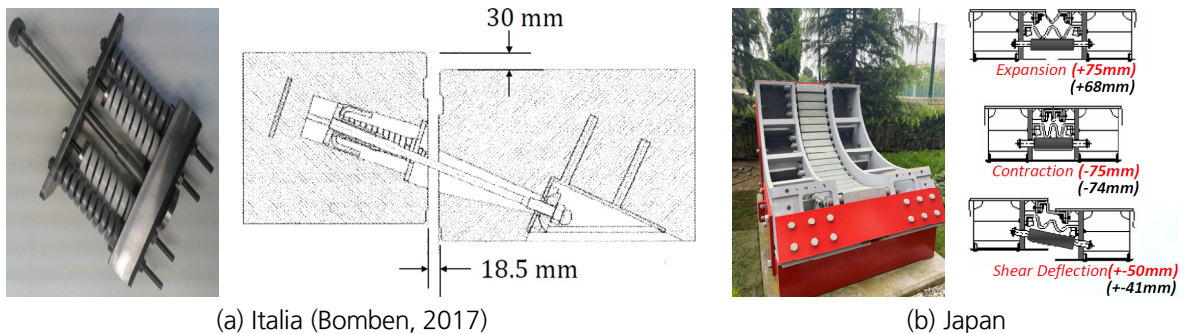


Fig. 1. Seismic lining

적용한 이탈리아 기술은 18.5~30 mm의 변위가 가능하고 댐퍼를 적용한 일본 제품은 50~75 mm의 변위가 가능한 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 유연성 부여를 위해 속이 빈 단면을 가진 고무 재료를 적용했다(Fig. 2). 이를 통해 인장 및 압축 등 터널 축 변위뿐만 아니라 전단 변위에 대해서도 유연히 대응할 수 있을 것으로 판단했다(Fig. 3). 국내 면진라이닝 관련 연구는 초창기로 아직은 개념 설계 수준에 그치고 있다(MOLIT, 2018). 본 연구에서 우리는 초탄성 재료를 적용한 면진라이닝 안에 대한 수치해석적 검토를 수행한 과정과 결과를 수록하였다.

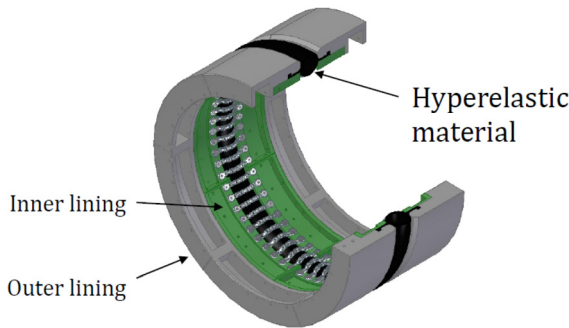


Fig. 2. Seismic lining using rubberlike material

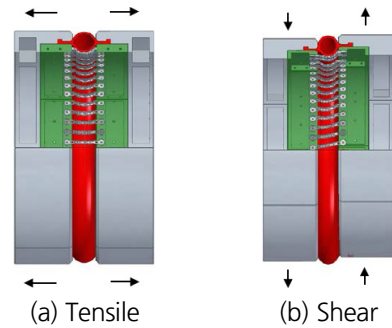


Fig. 3. Deformation of seismic lining

2. 수치해석

2.1 해석방법

수치해석에 Neo-Hookean 모델을 사용하였다(식(1)). 이 모델은 초탄성 모델 중 하나로 20% 이하의 작은 변형률 범위에서 재료의 거동을 합리적으로 모사한다고 알려져 있다(Kossa et al., 2023). 여기서 C_{10} 은 전단 탄성 계수에 비례하고 D_1 은 체적 탄성 계수에 반비례하므로 식(1)의 첫 번째 항은 형태 변화와 관련이 있고 두 번째 항은 부피 변화와 관련이 있다. 초탄성 재료란 큰 변형률에서도 탄성 거동을 보이는 고무와 같은 소재를 말한다. 비선형적인 응력-변형률 응답을 보이고 충격 시 에너지를 효과적으로 흡수하고 분산시키는 특징이 있다.

Table 2는 본 연구에서 사용한 파라미터를 보여준다. 실물 고무 시편을 이용한 인장시험 등을 통해 파라미터를 구하는 것이 일반적이지만 본 연구는 설계 단계이기 때문에 문헌을 참고하여 가정치를 적용했다. 우리가 사용한 파라미터는 전단 탄성계수 1.5 MPa, 부피 탄성계수 51.1 MPa, 포와송 비 0.490으로 환산된다(Dassault Systèmes, 2006).

$$U = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2 \quad (1)$$

where, U : strain energy

C_{10} : deviatoric parameter

D_1 : volumetric parameter

\bar{I}_1 : first strain invariant

J : volume strain

Table 2. Parameters adopted for Neo-Hookean model

C_{10}	D_1
0.752	0.026

범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 및 UMAT 서브루틴(User Material Subroutine)을 사용했다. UMAT 서브루틴의 주요 목적은 ABAQUS가 다루지 않는 재료 모델을 구현하는 것이지만 본 연구에서는 Neo-Hookean 모델을 구현하고 구현한 모델로부터 변형 구배(Deformation gradient)를 산정하기 위해 서브루틴을 사용했다. ABAQUS가 기본적으로 제공하는 Neo-Hookean 모델을 사용할 경우 변형 구배를 원본 데이터의 형태로 제공받지 못하기 때문이다. 서브루틴에 사용한 구성방정식과 강성행렬은 식 (2), 식 (3)과 같다(Sun et al., 2008).

$$\boldsymbol{\sigma} = \frac{2}{J} C_{10} \left(\bar{\mathbf{B}} - \frac{1}{3} \text{trace}(\bar{\mathbf{B}}) \mathbf{I} \right) + \frac{2}{D_1} (J - 1) \mathbf{I} \quad (2)$$

where, $\boldsymbol{\sigma}$: stress

$\bar{\mathbf{B}}$: deviatoric left Cauchy-Green deformation tensor

$$C_{ijkl} = \frac{2}{J} C_{10} \left[\frac{1}{2} (\delta_{ik} \bar{B}_{jl} + \bar{B}_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \bar{B}_{jk} + \bar{B}_{il} \delta_{jk}) - \frac{2}{3} (\delta_{ij} \bar{B}_{kl} + \bar{B}_{ij} \delta_{kl}) + \frac{2}{9} \delta_{ij} \delta_{kl} \bar{B}_{mm} \right] + \frac{2}{D_1} (2J - 1) \delta_{ij} \delta_{kl} \quad (3)$$

where, C : component of stiffness matrix

δ : Kronecker delta

\bar{B} : component of left Cauchy-Green strain tensor

연속체 역학에서 변형 구배는 물질의 변형에 관한 정보를 담은 핵심 텐서로 변위장의 공간 미분을 나타내며 물질의 입자가 얼마나 움직였는지 및 얼마나 변형되었는지에 대한 척도를 제공한다.

Fig. 4는 입체 요소를 이용해 모델링한 초탄성 재료의 형상과 치수를 보여준다. 초탄성 재료는 자전거바퀴 형상으로 지름이 0.9 m인 원형의 중공 단면이 사용되었다. Fig. 4(b)에 변형 구배 분석이 이루어진 위치가 표시되었다.

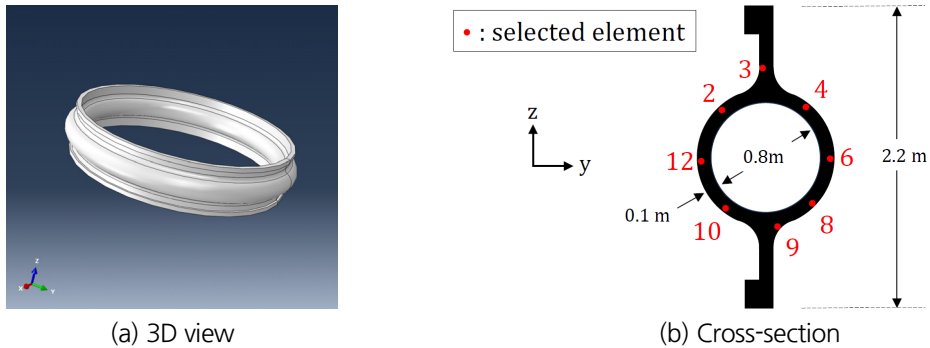


Fig. 4. Hyperelastic component

수치해석의 신뢰도를 검증하기 위해 UMAT 서브루틴을 이용한 해석결과를 ABAQUS 해석결과와 비교했다 (Fig. 5). Fig. 5는 Elements 3 (Fig. 4(b))에서의 응력-변형률 커브로 두 수치해석의 결과가 동일함을 보여주고 있다.

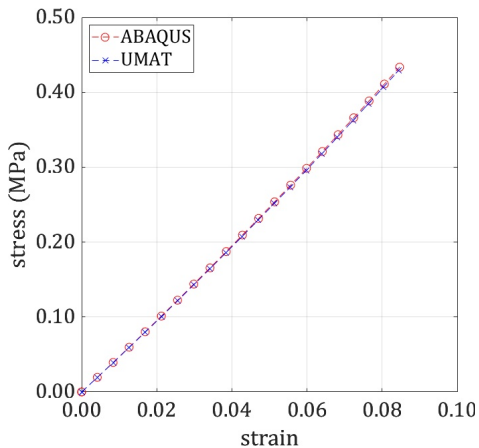


Fig. 5. Stress-strain plots for Element 3

지반의 변위로 인해 면진라이닝이 압축될 때 초탄성 재료의 거동을 모사하기 위해 강체 패널(Rigid panel)이 초탄성 재료의 상하부에 맞닿도록 모델링하고 상부 패널에 0.4 m의 변위를 적용함으로써 초탄성 재료가 위에서

아래로 눌러도록 하였다(Fig. 6). 패널의 변위는 허용하되 변형은 허용하지 않기 위해 물성 적용이 필요하지 않은 이산 강체(Discrete rigid part)를 적용했다.

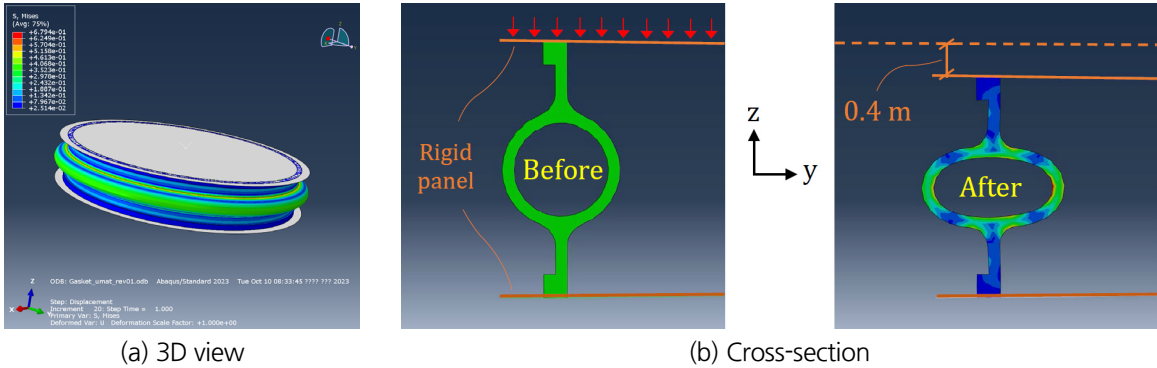


Fig. 6. Deformation of seismic joint subjected to compression

초탄성 재료에는 변형이 가능한 입체 요소(C3D8)를 사용하였고 강체 패널에는 변형이 불가능한 입체 요소(R3D4)를 사용하였다. C3D8은 3차원 연속체 모델링에 사용되는 노드가 8개인 직육면체 형태의 요소이고, R3D4는 3차원 강체 모델링에 사용되는 노드가 4개인 사각형 요소이다. 초탄성 재료와 강체 패널의 접속부는 타이 구속조건(Tie constraint)을 이용해 연결하였다. 해석 시간은 1초였다.

2.2 해석결과

수치해석을 통해 구한 변형 구배를 Fig. 7에 도시했다. 변형 구배 분석이 이루어진 지점은 초탄성 재료의 원형 부 둘레를 따라 총 8곳으로 Elements 2~12로 명명하였다(Fig. 4(b)). 해석에 사용했던 좌표계를 그대로 사용했기 때문에 z 축(수직축)이 압축 변위가 가해진 방향이 된다.

파선으로 이루어진 도형은 단위 길이를 가진 정육면체로서 변형이 발생하기 이전 초탄성 재료의 형상을 나타낸다. 음영을 띠는 도형은 앞서 언급한 단위 정육면체의 각 꼭짓점을 변형 구배를 이용해 선형 변환해 얻은 도형으로 변형이 발생한 이후 재료의 형상을 보여준다. 변형 구배는 공간 상에서 한 점의 위치를 의미하는 벡터에 대한 선형 변환이므로 그대로 적용할 경우 이 한 점의 이동만 보여주는 것에 불과해 변형 구배가 의미하는 물질체 변형의 양태를 쉽게 파악하기 어렵다. 따라서 변형 구배를 입체적으로 도시하기 위해 해당 위치를 에워싼 8개의 점을 꼭짓점으로 하는 길이가 1인 정육면체(큐브)를 구성하고 각 꼭짓점에 변형 구배를 적용함으로써 부피를 가진 요소가 어떻게 변형되는지 시각화했다.

Fig. 7에서 주목할 점은 y 및 z 축 상에 위치한 요소(Elements 3, 6, 9, 12)에서는 회전이 거의 없었으며 이를 제외한 나머지 대각방향에 위치한 요소(Elements 2, 4, 8, 10)에서는 두드러질 정도의 회전이 있었다는 점이다. 예를

들어, 좌상단 대각방향에 위치한 요소(Element 2)의 경우 x 축을 중심으로 시계 방향으로 회전했으며 우상단 대각 방향에 위치한 요소(Element 4)는 반시계 방향으로 회전하였다. 이것은 초탄성 재료가 $+z$ 축 방향에서 $-z$ 축 방향으로 가해진 변위로 인해 찌그러져 타원 형상으로 변형되면서 상단 대각방향에 위치한 Elements 2와 Element 4 가 서로 반대되는 방향으로 회전했다는 사실을 시사한다. 하단 대각방향에 위치한 요소도 비슷한 양상을 보였다.

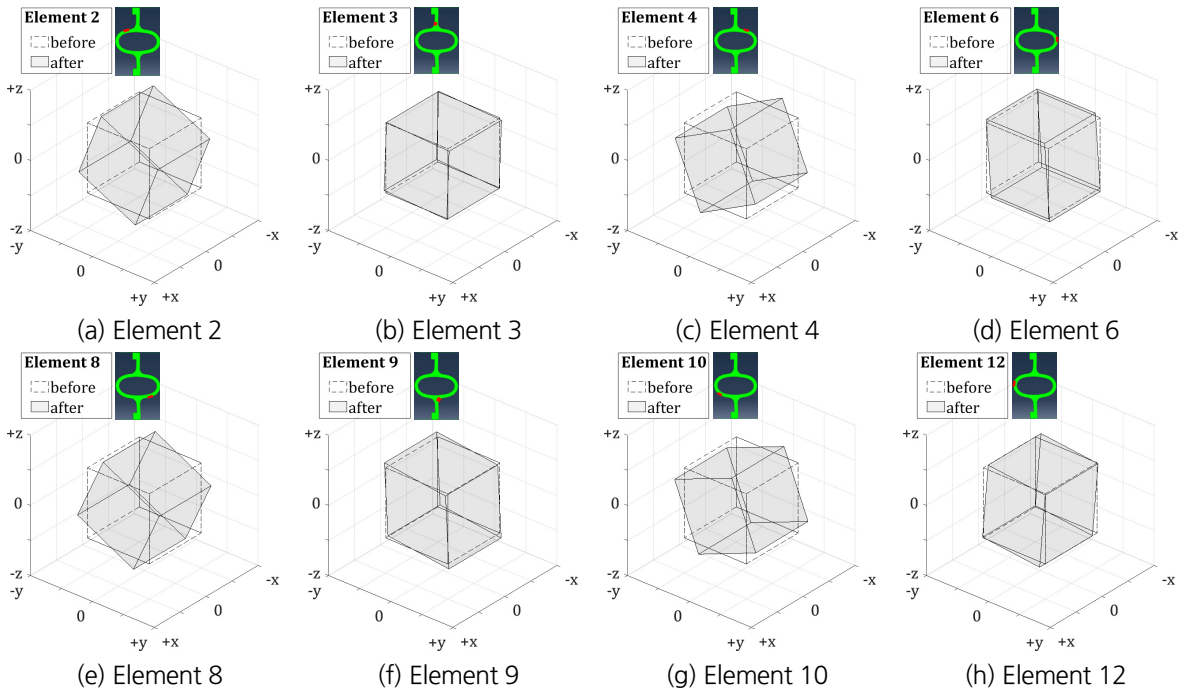


Fig. 7. Deformation gradient

2.3 극분해

수치해석을 통해 추출한 변형 구배 데이터를 심층 분석하기 위해 극분해를 이용하였다. 극분해란 복잡한 행렬 변환을 회전(Rotation) 및 신축(Stretch) 등 두 개의 개념적으로 더 단순한 변환으로 분리하는 것이다. 극분해로 변형 구배를 회전 행렬과 신축 행렬의 곱으로 분해하는 것은 변형 구배를 통한 선형 변환을 기하학적으로 명확히 이해하는 데 도움이 된다. 여기서 회전이란 물체의 방향은 바뀌지만 모양이나 크기는 변하지 않는 것을 의미하며 신축이란 물체가 회전 없이 특정 방향으로 늘어나거나 줄어드는 것을 나타낸다. 극분해를 통해 우리는 회전과 신축을 포함한 전체 변형의 영향으로부터 순수 신축 변형의 영향을 분리할 수 있으며, 이를 통해 응력-변형을 관계를 분석하고 재료의 파손을 예측함으로써 특정 부하 조건에 견딜 수 있는 제품이나 구조물을 설계할 수 있다.

극 분해는 회전과 신축을 적용하는 순서에 따라 왼쪽 분해와 오른쪽 분해로 구분된다. 본 연구에서는 신축 이전에 회전을 적용하는 왼쪽 분해를 이용했다. 신축 텐서의 고유값과 고유벡터는 변형의 양과 방향에 대한 정보를 제공한다(Abeyaratne, 1988).

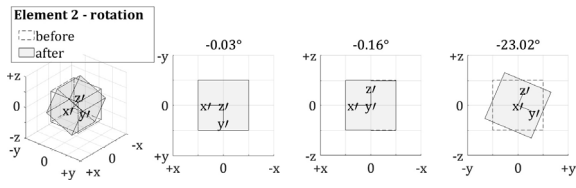
먼저 습득한 큐브의 변형 구배를 회전 텐서와 신축 텐서로 분해하였다(Figs. 8~13). Figs. 8~13(a)에는 극 분해에 따른 회전 텐서를 도시하였다. Figs. 8~13(b)에는 신축 텐서의 방향을 도시했고, Figs. 8~13(c)에는 신축 텐서의 크기를 도시했다. 이해를 돕기 위해 입체 좌표계 뿐만 아니라 평면 좌표계도 사용하였다.

Figs. 8~13(a)에서 파선은 회전 이전을 나타내며 음영은 회전 이후를 나타낸다. 음(-)의 부호는 단위 큐브가 시계 방향으로 회전했음을 의미하며 양(+)의 회전은 반시계 방향으로 회전했음을 의미한다. 예를 들어 Fig. 8(a)는 Element 2가 x 축을 중심으로 시계 방향으로 23.02° 회전했으며 y 및 z 축으로는 거의 회전하지 않았음을 보여준다. 여기에 표기된 $x'y'z'$ 좌표계는 회전 이후 단위 큐브가 정렬한 축으로 이루어진 좌표계이다.

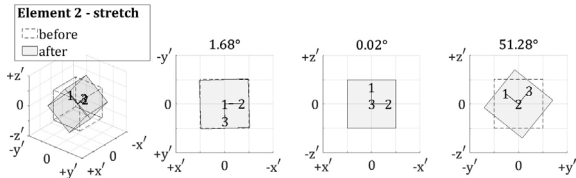
Figs. 8~13(b)에서 음영은 주 신축(Principal stretch)이 일어나는 방향으로 신축 텐서의 고유벡터와 같다. 주 신축은 해당 지점에서 발생하는 최대 및 최소 신축값을 나타낸다. 여기서 파선으로 이루어진 큐브는 Figs. 8~13(a)에 도시된 음영을 띠는 큐브와 동일하다. $x'y'z'$ 좌표계를 이용했으므로 Figs. 8~13(b)는 극 분해에 따른 회전과는 별개로 발생한 주 신축 방향을 보여주는 것이다. 따라서 원래 수치해석이 이루어진 xyz 좌표계에서 주 신축 방향을 찾기 위해서는 회전 텐서와 신축 텐서를 종합해 살펴보아야 한다. 예를 들어, Element 2의 경우 앞에서 살펴본 바와 같이 회전 텐서를 통해 x 축을 중심으로 -23.02° 회전했고(Fig. 8(a)) 신축 텐서의 주 신축 방향은 $+51.28^\circ$ 이므로(Fig. 8(b)) 최종적으로 주 신축이 일어난 방향은 xyz 좌표계에서 $+28.26^\circ$ (반시계 방향)임을 알 수 있었다. 여기에 표기된 123 좌표계는 주 신축 방향으로 이루어진 좌표계이다.

Figs. 8~13(c)에 주 신축의 크기를 123 좌표계를 이용해 도시하였다. 음영을 띠는 큐브는 주 신축이 일어난 이후를 나타내며 파선으로 이루어진 큐브는 Figs. 8~13(b)에 도시된 음영을 띠는 큐브와 동일한 큐브로 신축 이전을 나타낸다. 주 신축(λ) 이 1보다 크면 인장을 받아 해당 축의 방향으로 늘어난 것이고 1보다 작으면 압축을 받아 줄어든 것이다. 예를 들어 Element 2의 경우(Fig. 8(c)) 1축 방향으로 약 2.8% ($\lambda_1 = 1.028$) 늘어났고 3축 방향으로 약 3.0% ($\lambda_3 = 0.970$) 줄어들었다. Fig. 8(a)~8(c)를 이용한 종합적인 분석을 통해 우리는 초탄성 재료의 좌상단 대각방향에 위치한 요소(Element 2)가 방사 방향(radial direction)으로 늘어났고 접선 방향(tangential direction)으로 줄어들었음을 알 수 있었다. 또한 이와 유사한 현상이 우상단 대각방향에 위치한 Element 4 (Fig. 10)와 우하단 대각방향에 위치한 Element 8 (Fig. 12)에서도 발생한 것을 확인할 수 있다.

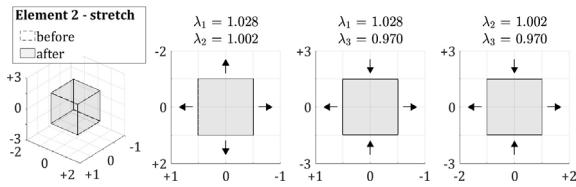
한편, 12시 방향에 위치한 Element 3의 경우(Fig. 9) 회전이 거의 없고 주 신축 방향(1축)이 86.71° 로 y' 및 y 축의 방향과 유사하므로 이 요소는 접선 방향으로 늘어났고 방사 방향으로 줄어들었다. 이는 앞서 살펴보았던 대각방향에 위치한 요소에서 관찰된 양상과 반대이다. 9시 방향에 위치한 Element 12의 경우(Fig. 13) 회전이 없으며 주 신축 방향이 평면에서 2.17° 로 z' 및 z 축의 방향과 유사하므로 이 요소도 접선 방향으로 늘어났고 방사 방향으로 줄어들었다. 3시 방향에 위치한 Element 6 (Fig. 11) 도 이와 유사한 양상을 보였다.



(a)

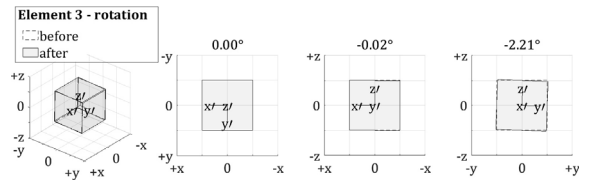


(b)

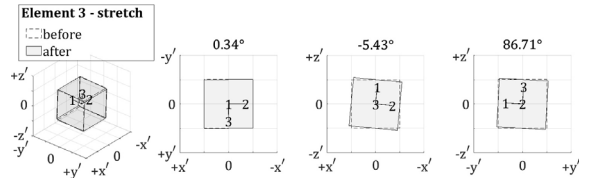


(c)

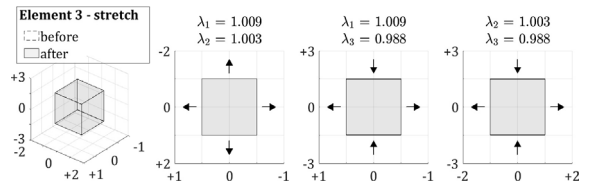
Fig. 8. Analysis - Element 2



(a)

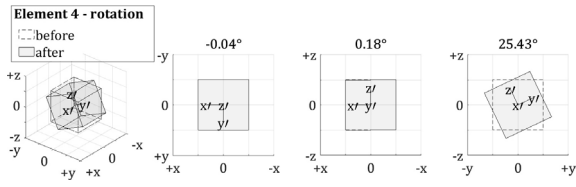


(b)

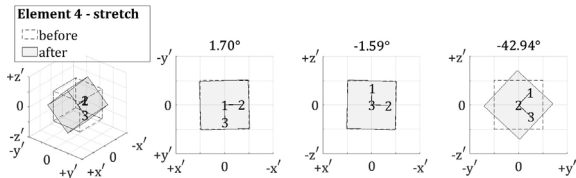


(c)

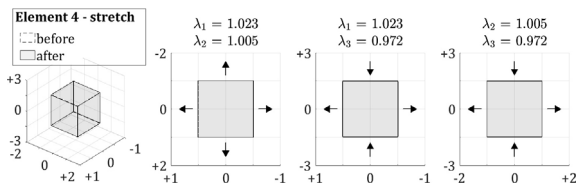
Fig. 9. Analysis - Element 3



(a)

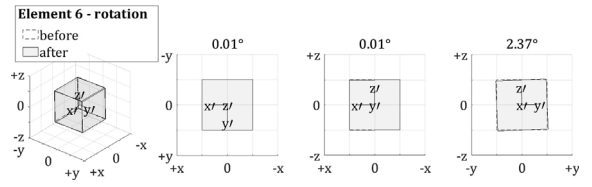


(b)

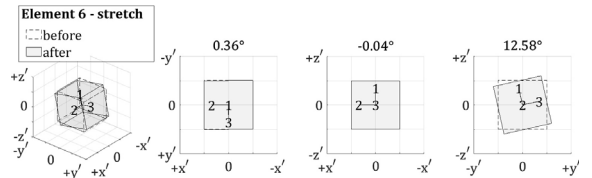


(c)

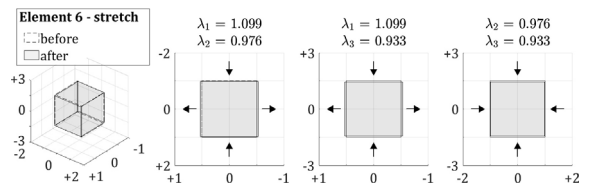
Fig. 10. Analysis - Element 4



(a)



(b)



(c)

Fig. 11. Analysis - Element 6

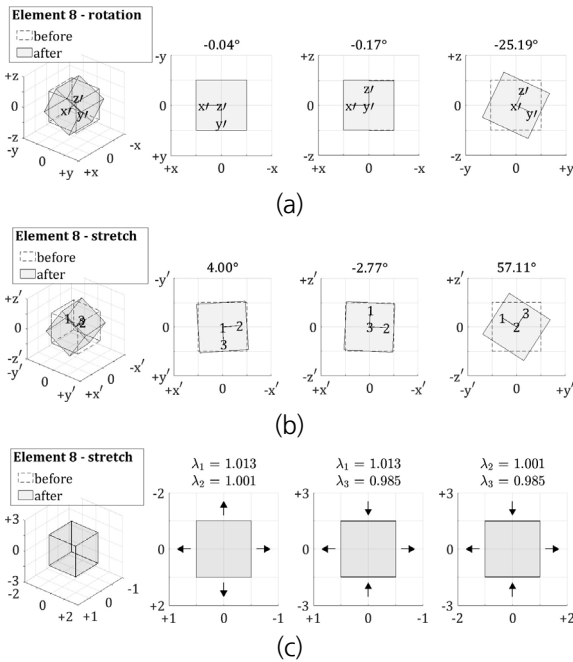


Fig. 12. Analysis - Element 8

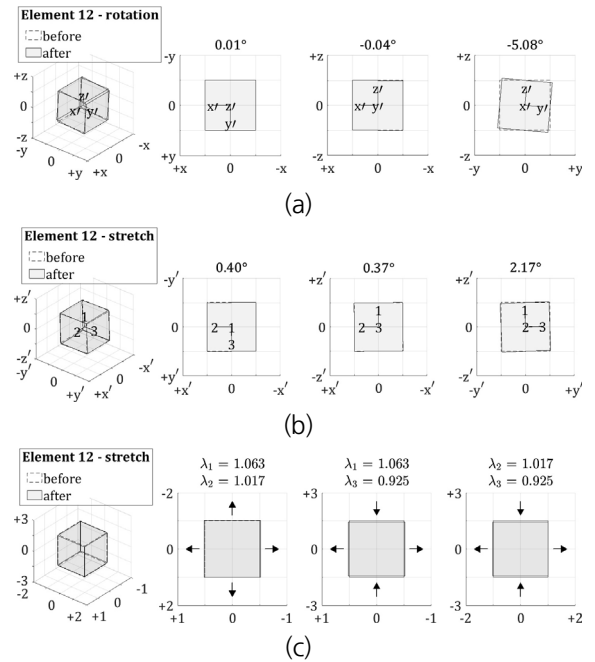


Fig. 13. Analysis - Element 12

3. 고찰

대륙을 연결하는 해저터널은 깊은 바다를 통과하는 구간이 반드시 존재하므로 터널에 고수압이 작용할 경우에 대비한 방수에 관한 연구가 필수적으로 수행되어야 한다. 이 논문에서 제안한 면진라이닝 안은 고무 재료를 이용하므로 지반 변위 발생 시 고무 재료의 변형에 따른 방수 성능을 검증하기 위해서는 원심모형실험장치 및 진동대 등을 이용한 실물 실험 및 이를 뒷받침할 수치해석적 검토가 요구된다. 고무 재료는 거의 비압축성(Near-incompressible)이지만 완전한 비압축성은 아니며 주변의 온도나 압력 변화에 따른 부피 변화 가능성도 완전히 배제할 수 없다(Wood and Martin, 1964). 특히 터널의 분절 이음에 적용되는 가스켓과 같이 구속된 조건에서 압축하중을 받는 경우 신뢰성 있는 해석결과를 얻기 위해서는 부피 변화에 관한 적절한 모사가 무엇보다 중요하다. 이러한 측면에서 변형 구배를 이용해 재료 입자의 변형 방향 및 정도를 면밀히 파악하는 본 연구의 방법론은 의미를 가진다. 따라서 재료의 변형에 따른 방수 성능 규명에도 본 연구에서 사용한 해석 및 분석 방법을 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

이 연구에서 우리는 범용 유한요소해석 소프트웨어가 제공하는 초탄성 모델을 이용해 고무 재료로 구성된 해저터널용 면진라이닝에 관한 수치해석을 수행하고 그 결과를 분석했다. 여기에서 우리는 소프트웨어가 제공하는 가공된 결과치를 그대로 사용하기 보다는 재료 변형에 관한 근본적인 분석을 수행하기 위해 서브루틴을 이용해 변형 구배를 추출하였다. 본 연구의 범위는 극 분해를 통한 재료의 변형 현상 규명에 그치고 있지만 추가적인 분

석을 통해 여러 가지 물리량을 산정할 수 있다. 예를 들어, 시간 증분 데이터와 변형 구배 데이터를 함께 이용해 속도 구배를 산정할 수 있다(Li et al., 2004). 속도 구배는 물체가 공간 좌표에서 시간 흐름에 따라 어떻게 변화하는지에 관한 정보를 제공한다. 우리는 속도 구배를 변형률 성분과 회전 성분으로 손쉽게 분해할 수 있다(Abeyaratne, 1988). 변형률 성분은 요소가 얼마나 빠르게 늘어나거나 줄어드는지에 관한 정보를 제공하며, 회전 성분은 요소가 얼마나 빠르게 회전하는지에 관한 정보를 제공한다. 따라서 동 분야에 관심이 있는 연구자는 본 연구를 참고해 변형 구배를 추출하고 초탄성 재료의 거동과 관련된 여러 가지 파라미터를 직접 산정할 수 있다. 응력 및 변형률 등 초탄성 해석과 연관된 모든 물리량이 변형 구배에서 파생되기 때문이다. 이를 통해 소프트웨어가 제공하는 기존의 데이터에 관한 검증은 물론 이에 대한 더욱 심도 깊은 분석도 가능할 것으로 판단된다.

변형 구배는 재료의 입자가 어떻게 움직이고 재배열되는지에 대한 본질을 포착하는 연속체 역학 이론의 핵심적인 개념 중 하나이다. 우리가 본 연구에서 사용한 Neo-Hookean 모델 등 초탄성 모델은 변형 구배에서 파생된 여러 가지 물리량을 이용해 응력과 변형률을 산정하므로 초탄성 모델을 이용해 고무 재료의 거동을 파악하기 위해서는 변형 구배에 관한 깊은 이해가 필요하다. 이를 위해 우리는 본 연구에서 극 분해를 이용해 변형 구배 데이터를 회전 텐서와 신축 텐서로 분리하였고, 특히, 신축 텐서의 방향과 크기를 분리해 주 신축 방향으로 이루어진 평면 좌표계에 도시함으로써 현상을 단순화시켜 표현하였다. 이를 통해 재료의 입자가 소정의 위치에서 어떤 방향으로 얼마나 늘어나거나 줄어들었는지 명확히 파악할 수 있었다. 본 연구에서는 압축 변위에 따른 변형 현상을 분석하는데 그치고 있지만 인장 및 전단 등 여러 가지 변위 조건을 이용한 수치해석 연구에 본 연구에서 사용한 분석 방법을 준용할 수 있다.

4. 결론

이 연구에서 우리는 중공 단면의 초탄성 재료를 적용한 면진라이닝의 거동을 규명하기 위해 범용 유한요소해석 소프트웨어를 이용해 수치해석을 실시해 지반의 변위로 인해 면진라이닝이 압축될 때의 거동을 모사했다. 변형 구배를 추출하기 위해 UMAT 서브루틴을 사용했으며 추출한 데이터를 심층 분석하기 위해 극 분해를 이용해 변형 구배를 회전 성분과 신축 성분으로 분리했다. 본 연구의 주요 결론은 아래와 같다.

1. UMAT 서브루틴을 이용한 해석결과와 ABAQUS 해석결과를 비교 분석한 결과 서로 일치했으므로 Neo-Hookean 모델 구현을 위해 사용한 구성방정식과 강성행렬이 적확했다.
2. 극 분해를 이용한 변형 구배 분석을 통해 면진라이닝에 적용된 초탄성 재료의 입자가 소정의 위치에서 얼마나 회전했고 어느 방향으로 얼마만큼 늘어나거나 줄어들었는지 정량적인 파악이 가능했다. 특히, 회전 변환과 신축 변환을 분리함으로써 강체 회전으로부터 오는 영향을 배제한 신축 변환에 따른 재료의 변형을 독립적으로 분석할 수 있었다.
3. 초탄성 이론에 등장하는 모든 물리량은 변형 구배에서 파생되기 때문에 본 연구가 제안하는 방법을 이용해

속도 구배 및 변형률 등 주요 물리량을 직접 산정하고 소프트웨어의 해석결과와 비교 분석함으로써 수치해석의 신뢰도를 검증하는 데 사용할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 한국철도기술연구원 기본사업(대륙간 연결을 위한 해저철도 핵심기술 개발, PK2304A2)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

저자 기여도

안성권은 데이터 수집 및 원고 작성을 하였고, 이희업은 연구 개념 및 설계를 하였고, 박정준은 데이터 분석을 하였고, 이지원은 데이터 정리를 하였다.

References

1. Abeyaratne, R. (1988), Lecture Notes on the Mechanics of Elastic Solids - Volume 2. Continuum mechanics (version 1.0), Massachusetts Institute of Technology, pp. 32-36.
2. Bomben, G. (2017), Anti-seismic joint for joining concrete quoins, International Publication No. WO 2017/203390 A1, World Intellectual Property Organization, pp. 1-22.
3. Dassault Systèmes (2006), Abaqus theory manual (version 6.6), <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/stm/default.htm?startat=ch04s06ath123.html> (October 5, 2023).
4. Kim, H.G., Song, C.W., Kim, J.S., Son, M., Kim, I.S. (2008), “Tertiary geological structures and deformation history of the Southern Tsushima Island, Japan”, Journal of the Geological Society of Korea, Vol. 44, No. 2, pp. 175-198.
5. Kossa, A., Valentine, M.T., McMeeking, R.M. (2023), Analysis of the compressible, isotropic, neo-Hookean hyperelastic model, *Meccanica*, Vol. 58, pp. 217-232.
6. Li, S., Beyerlein, I.J., Necker, C.T., Alexander, D.J., Bourke, M. (2004), “Heterogeneity of deformation texture in equal channel angular extrusion of copper”, *Acta Materialia*, Vol. 52, No. 16, pp. 4859-4875.
7. Lunardi, P., Cassani, G., Canzoneri, A., Carriero, F., Bomben, G. (2017), “Passage of a precast segmental lining tunnel through an active fault - Special segments and details - Thessaloniki metro”, Proceedings of the World Tunnel Congress, Bergen, Norway, pp. 1-10.
8. MOLIT (2018), ‘Extra-long span (min. 50km)’ and ‘High water pressure (min. 20bar)’ subsea tunnel, Final Report, R&D/18SCIP-B066321-06, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp. 101-131.
9. Sun, W., Chaikof, E.L., Levenston, M.E. (2008), “Numerical approximation of tangent moduli for finite element implementations of nonlinear hyperelastic material models”, *Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 130, No. 6, 061003.

10. The Dong-a Ilbo (2010), The economic benefits of the Korea-Japan underwater tunnel exceeds 70 trillion won, <https://www.donga.com/news/Society/article/all/20101015/31883284/1> (October 5, 2023).
11. Wood, L.A., Martin, G.M. (1964), "Compressibility of Natural Rubber at Pressures Below 500 kg/cm²", *Journal of Research of the National Bureau of Standards, Section A: Physics and Chemistry*, Vol. 68A, No. 3, pp. 259-268.