

# 구조해석을 통한 터널내 줄눈 콘크리트 포장의 거동분석

## Evaluation of Behavior of Jointed Concrete Pavement Considering Temperature Condition in a Tunnel by Finite Element Method

|       |               |   |
|-------|---------------|---|
| 류 성우  | Ryu, Sung Woo | 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 경영전략연구실 선임연구원 · 교신저자 (E-mail : htsrsw@gmail.com) |
| 박 준 영 | Park JunYoung | 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 포장연구실 선임연구원 (E-mail : parkjvel@ex.co.kr)         |
| 김 형 배 | Kim, HyungBae | 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 포장연구실 수석연구원 (E-mail : kimhyun3@ex.co.kr)         |
| 이 재 훈 | Lee, Jaehoon  | 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 포장연구실 책임연구원 (E-mail : ranian74@ex.co.kr)         |
| 조 윤 호 | Cho, Yoon-Ho  | 정회원 · 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수 (E-mail : yhcho@cau.ac.kr)                |

### ABSTRACT

**PURPOSES :** The behavior of a concrete pavement in a tunnel was investigated, based on temperature data obtained from the field and FEM analysis.

**METHODS :** The concrete pavement in a tunnel was evaluated via two methods. First, temperature data was collected in air and inside the concrete pavement both outside and inside the tunnel. Second, FEM analysis was used to evaluate the stress condition associated with the slab thickness, joint spacing, dowel, and rock foundation, based on temperature data from the field.

**RESULTS :** Temperature monitoring revealed that the temperature change in the tunnel was lower and more stable than that outside the tunnel. Furthermore, the temperature difference between the top and bottom of the slab was lower inside the tunnel than outside. FEM analysis showed that, in many cases, the stress in the concrete pavement in the tunnel was lower than that outside the tunnel.

**CONCLUSIONS :** Temperature monitoring and the behavior of the concrete pavement in the tunnel revealed that, from an environmental point of view, the condition in the tunnel is advantageous to that outside the tunnel. The behavior in the tunnel was significantly less extreme, and therefore the concrete pavement in the tunnel could be designed more economically, than that outside the tunnel.

### Keywords

tunnel, concrete pavement, temperature, FEM analysis

Corresponding Author : Ryu, SungWoo, Senior Researcher  
Korea Expressway Corporation Research Institute, 208-96, Dongbu-daero  
922beon-gil, Dongtan-myeon, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, 18489, Korea  
Tel : +82.54.8111.4337 Fax : +82.54.811.4309  
E-mail : htsrsw@gmail.com

International Journal of Highway Engineering

http://www.ksre.or.kr/

ISSN 1738-7159 (print)

ISSN 2287-3678 (Online)

Received Nov. 25, 2015 Revised Nov. 27, 2015 Accepted Mar. 04, 2016

## 1. 연구배경

우리나라에는 국토의 70% 이상이 산지로 되어 있어 2014년 현재 고속도로에 설치된 터널은 총 793개소, 연장 621km에 달한다. 이 중 한국도로공사가 관리하고 있는 터널은 587개소, 연장 446km이며 향후 신규 고속도로 건설 시, 터널 구간은 더욱 증가할 것으로 예상된다(통계청, 2014).

일반적으로 터널 내부 환경은 터널 외부보다 상대적으로 콘크리트 포장에 유리한 조건에 있다. 실제 한국도로공사에서 수행한 “콘크리트 포장 장수명화를 위한 선진 시공기술 개발”에서 산인터널 내 환경조건을 현장 조사한 결과, Fig. 1과 같이 터널 내부는 외부에 비해 상대습도가 높고, 일교차가 크지 않았다(한국도로공사, 2013). 일일 온도 변화는 터널 입구에서 5.5℃, 터널 내부에서

0~1℃로 본선구간의 10% 수준이며, 일일 상대습도 변화는 터널 입구에서 60%, 터널 내부에서 15~20% 로 본선구간의 25% 수준이었다. 또한 터널외부와 달리 내부는 우천 시 강우의 영향과 겨울철 동상의 영향도 적게 받는다. 따라서, 터널내 시멘트 콘크리트 포장에 가해지는 환경 조건은 본선구간에 비해 가혹하지 않다고 할 수 있다. 이와 같이 터널내 콘크리트 포장은 구조적 거동 및 공용성 측면에서 본선 포장보다 유리하지만 동상방지층 15~45cm, 린콘크리트 15cm, 콘크리트 슬래브 28~30cm의 획일적인 단면 및 재료들로 설계되고 있다. 또한 동일한 줄눈 간격, 하중전달장치 및 줄눈 채움재를 시공하고 있어 이에 대한 검토가 필요하다.

본 연구에서는 터널내 콘크리트 포장의 거동 및 파손의 주된 요인인 환경하중에 대한 영향을 검토하기 위해 터널 내부와 외부의 온도 분포 특성을 계측 및 분석하였다. 또한 유한요소 모형을 개발하여 계측한 온도 데이터를 입력하여 다양한 변수에 대한 거동을 분석하였다.

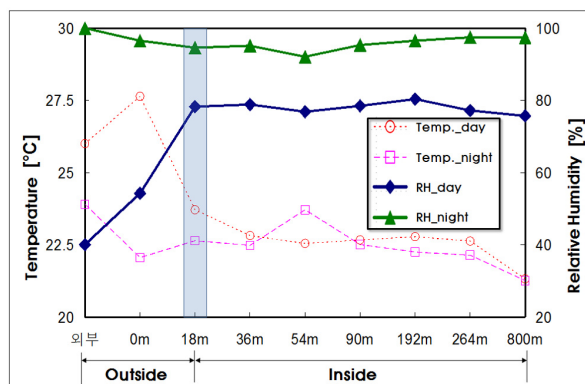


Fig. 1 Environmental Characteristics of San-In Tunnel (KEC, 2013)

## 2. 터널 내외부 대기 및 슬래브 내 온도 조사 및 분석

터널 내부와 외부의 대기 및 슬래브 내 온도 특성을 살펴보기 위해 대상 터널을 선정하였다. 대상 터널은 교통차단이 가능한 터널 위주로 고려하였으며, Table 1은 선정된 터널의 기본 정보를 나타낸 표이다. 대기온도를 측정하기 위하여 센서를 설치하였다. 터널 내부는 터널 입구로부터 약 150m 정도 이격된 위치를 선정하였으며, 이는 한국도로공사에서 수행한 “콘크리트 포장 장수명화를 위한 선진 시공기술 개발”에서 터널내 온습도 변화가 터널 입구에서부터 감소하여 약 50m 정도의 깊이에서부터는 일정하게 유지되는 것에 근거하여 안정적인 깊이를 고려하여 결정하였다(한국도로공사, 2013). 설치 높이는

콘크리트 포장면에서 약 1.5m 상단 벽면에 설치하였고 터널 벽면 청소 시 센서의 파손을 방지하기 위하여 보호캡을 설치하였다. 터널 외부에는 그늘이 진 나무에 1.5m 이상의 높이에 설치하였다. Fig. 2(a)는 대기온도를 측정하기 위한 센서와 설치 모습을 나타낸 그림이다. 대기온도와 함께 슬래브 내부의 온도를 측정하기 위해 Fig. 2(b)와 같이 아이버튼이 삽입된 프리캐스트 콘크리트 봉을 미리 제작하였다. 이는 현장에서 온도 센서를 각 깊이 별로 설치할 때 소요되는 시간을 단축시키기 위해서이다. 28cm의 콘크리트 봉에 상하부 1cm 이격하여 아이버튼 온도계를 설치하였다. 슬래브 단부에서 30cm 이격된 거리에 천공을 한 후 센서가 설치된 콘크리트 봉을 삽입하고 초속경 그라우트를 채우는 방법으로 진행하였다. 온도 측정은 여름철인 2014년 7월 23일부터 2014년 8월 20일까지 수행하였다.

Table 1. Tunnel Information

|   | Highway name               | Tunnel       | Length (m) | Construction year | Traffic (AADT) |
|---|----------------------------|--------------|------------|-------------------|----------------|
| 1 | Nam-Hae (33k)              | Jang-Heung 1 | 380        | 2012              | 24,312         |
| 2 | Soon-Chung~Wan-Joo(90,70k) | Kwan-Chon 2  | 420        | 2010              | 9,469          |
| 3 | Dong-Hae(23,9k)            | Kang-Leung 4 | 960        | 2004              | 13,585         |



(a) Air Temp.

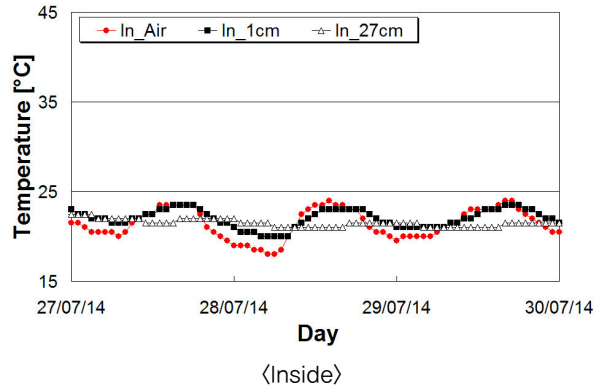
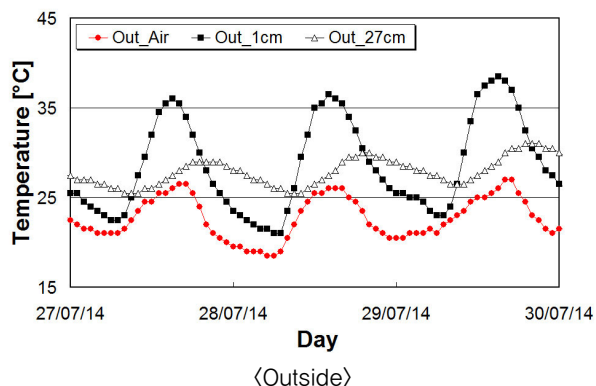


(b) Slab Temp.

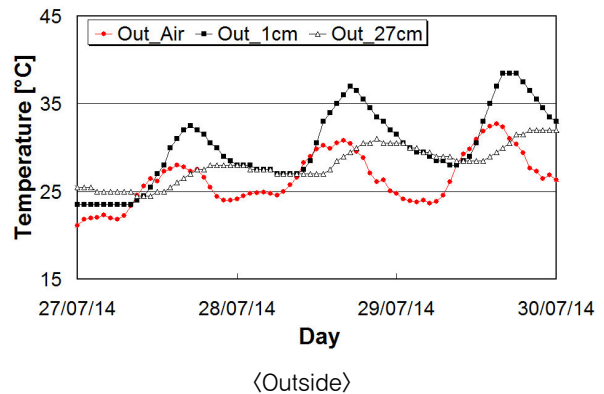
Fig. 2 Installation of Thermal Sensors at Outside and Inside of Tunnel

Fig. 3은 각 터널들의 외부와 내부(150m)의 대기 및 포장체 온도를 나타낸 그래프이다. Fig. 3(a)에 나타난 강릉4터널의 외부 온도 측정 결과를 살펴보면, 7월 28일 터널 외부의 경우 대기의 최대 및 최소 온도는 각각 18.5℃와 26℃였으며, 슬래브의 1cm와 27cm 깊이에서의 최대, 최소 온도도 각각 21℃와 36.5℃, 25.5℃와 30℃였다. 슬래브 1cm 깊이에서의 포장체 온도가 대기 온도보다 높았으며, 온도차이 또한 컸다. 하지만 슬래브 27cm 깊이에서의 온도는 대기보다 더 높았으나, 온도 변화는 더 적었다. 슬래브 1cm 깊이의 온도 대비 27cm 깊이에서의 온도변화는 3배 이상 적었다. 동일한 날짜의 강릉4터널 내부의 온도 측정 결과를 분석한 결과가 Fig. 3(a)의 아래와 같다. 대기의 최대 및 최소 온도는 각각 18℃와 24℃였으며, 슬래브의 1cm와 27cm 깊이에서의 최대, 최소 온도도 각각 20℃와 23℃, 21℃와 21.5℃였다. 전체적으로 대기 온도변화는 약 6℃였으나, 슬래브의 상부와 하부에서의 온도변화는 매우 미미하였다. Fig. 3(b)와 (c)는 장흥1터널과 관촌2터널에 대해 동일한 분석을 한 결과로, 각 터널별로 온도 차이가 있으나, 터널 내부의 온도변화가 터널 외부보다 더 안정적이어서 콘크리트 포장에 유리한 것을 알 수 있었다.

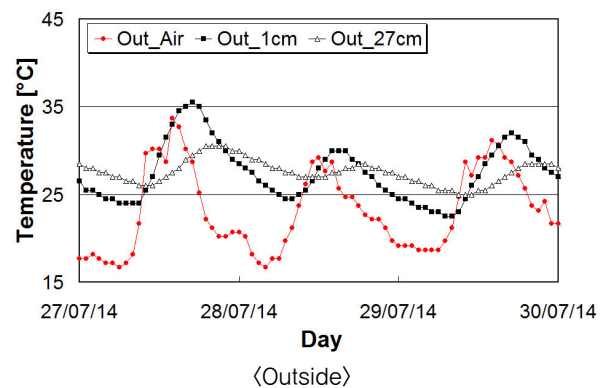
국내의 콘크리트 포장 설계법에서는 콘크리트 슬래브의 상하부 온도에 의해 발생하는 켈링 응력만을 고려하고 있기 때문에 이를 검토하기 위해 슬래브 깊이 1cm와 27cm의 온도차이를 비교하였다. Fig. 3(d)는 그 결과를 도시한 것으로서 측정기간 동안 최대의 온도차이를 각 터널별로 분석한 결과이다. 여기서, 터널 외부의 최대 상하부 온도차이의 경우를 살펴보면, 낮시간 동안에 발생하는 하향켈링(CD)의 온도차는 강릉4터널에서 13℃로 가장 컸으며, 다음으로 장흥1터널, 관촌터널 순으로 나타났다. 밤시간 동안에 발생하는 상향켈링(CU)의 경우도 하향켈링과 유사한 순서였다. 하지만 터널 내부의 경우는 터널 위치에 상관없이 하향켈링의 온도차는 3.5~4.5℃, 터널 내부의 경우는 -2.0~-3.0℃였다. 전



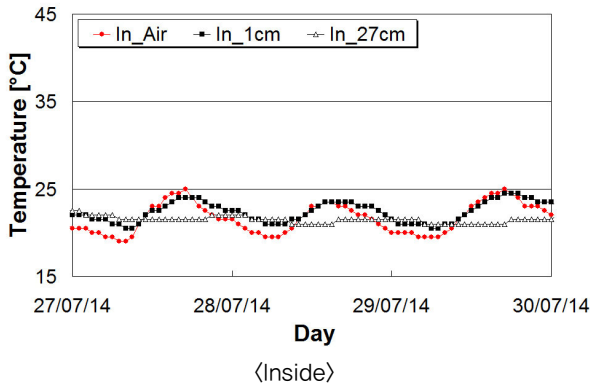
(a) Air and Slab Temperature Inside and Outside of Kang-Leung 4 Tunnel



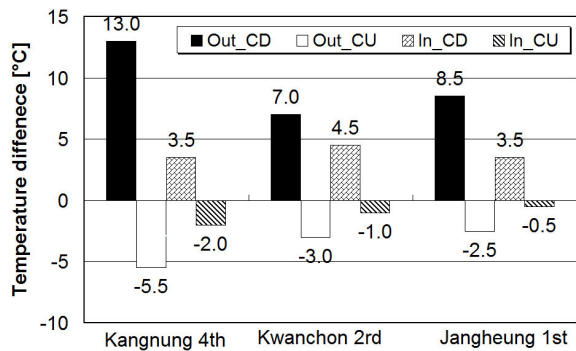
(b) Air and Slab Temperature Inside and Outside of Jang-Heung 1 Tunnel



(Figs. Continued)



(c) Air and Slab Temperature Inside and Outside of Kwan-Chon 2 Tunnel



\*CD : Curling down, CU : Curling up

(d) Maximum Temperature Difference between Top and Bottom at Each Tunnel

Fig. 3 Air and Slab Temperature Inside and Outside of Tunnel

체적으로 터널 내부의 슬래브의 컬링응력을 유발하는 상하부 온도차가 더 적어 발생하는 응력수준이 낮아 파손 발생 가능성이 더 낮은 것으로 나타났다.

### 3. 유한요소 모형 개발

터널내 환경에 대한 콘크리트 포장의 영향을 검토하기 위해 ABAQUS를 이용하여 다양한 변수에 대한 구조해석

Table 2. Input Values for FEM Analysis

| Variable                        | Value            |
|---------------------------------|------------------|
| Slab elastic modulus/nu         | 28,000MPa, 0.18  |
| Lean base E/nu                  | 15,000MPa, 0.2   |
| Subgrade E/nu                   | 262MPa, 0.3      |
| Rock base E/nu                  | 15,000MPa, 0.2   |
| Dowel/Tie bar diameter          | 32, 16mm         |
| Dowel/Tie bar E, nu             | 200,000MPa, 0.26 |
| Dowel-slab support modulus(Tie) | 12,800(1,000)MPa |

을 실시하였다(Simulia, 2010). Table 2는 본 논문에서 적용한 각 재료들의 대표적인 물성값을 정리한 것이다.

우선 모형에 적합한 요소의 크기에 대해 검토하였다. 경우에 따라 컴퓨터 용량의 제한으로 작업을 수행할 수 없거나 시간상 불리한 점이 많아지므로, 적절한 요소 크기를 결정하는 작업이 필요하다. 적정 요소 크기를 선정하기 위해 가로 및 세로방향으로 요소의 크기를 25mm, 50mm, 75mm, 100mm로 순차적으로 변화시켜 그 결과 값을 살펴보았으며, 이를 통해 최적의 요소 크기를 결정하였다. 요소 크기에 따른 해석의 정확도는 슬래브 하부의 주응력을 기준으로 설정하였다. 해석 모형은 단일 슬래브의 하부를 스프링으로 구성하였으며, 슬래브에 대한 경계조건은 적용하지 않았다. 교통하중에 의한 응력의 비교는 200mm×200mm의 재하면적에 98kN의 하중을 중앙부에 적용한 경우이며, Ever-FE 결과와 Westergaard가 제시한 해석해의 결과를 비교하였다. 요소 크기에 따른 응력 차이에 대한 분석결과는 Table 3과 같다. 요소크기가 25mm일 때, ABAQUS 모형을 통한 분석결과가 Ever-FE 해석결과와 Westergaard가 제시한 해석해와 약 90% 정도 일치한 것으로 나타났다(University of Washington and the Washington DOT, 2003; Westergaard., 1926). 환경하중에 의한 주응력은 모형의 해석결과와 Ever-FE, 그리고 Bradburry식 계산 결과와 비교하였으며, 슬래브 표면과 하부의 온도  $\Delta T$ 를 5~20°C

Table 3. Stress Difference Depending on Element Size

| Mesh size | Max principal stress |         |             | Accuracy |             |
|-----------|----------------------|---------|-------------|----------|-------------|
|           | ABAQUS               | Ever-FE | Westergaard | Ever-FE  | Westergaard |
| 100       | 1,396                | 1.95    | 2.01        | 71.59    | 69.45       |
| 75        | 1,435                | 1.95    | 2.01        | 73.59    | 71.39       |
| 50        | 1,62                 | 2.013   | 2.01        | 80.48    | 80.60       |
| 25        | 1,805                | 2.02    | 2.01        | 89.36    | 89.80       |

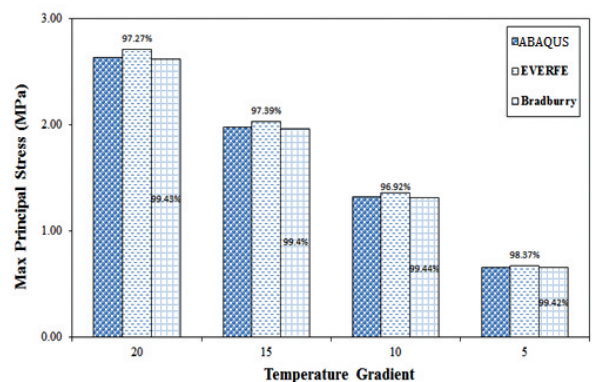


Fig. 4 Accuracy of FEM Model for Temperature Loading

로 설정하였다(Bradbury, 1938). Fig. 4는 해석 방법 간의 분석결과와의 차이를 보여주고 있으며, 95% 이상 일치한 것으로 나타났다.

다음으로 해석의 효율을 높이기 위해서 매쉬 생성 방법에 따른 온도 및 교통하중에 의한 응력 차이를 비교하였다. 매쉬 생성 방법은 등간격 매쉬와 두 개 비대칭 매쉬를 사용하였다. 킬링 조건에 따라서 하중 적용위치에 따른 최대 응력이 발생하는 위치가 달라지기 때문에 하중 적용 위치에 대해서 집중적으로 매쉬를 생성하였다. 비대칭 매쉬 (1)은 하향킬링 시에 단윤 단축이 슬래브 중앙에 적용할 경우에 해당하고, 비대칭 매쉬 (2)는 상향킬링 시에 단윤 단축과 복륜 복축이 슬래브에 적용할 경우이다. Table 4는 매쉬 생성 방법에 따른 응력의 결과를 요약하였다. 세 가지 방법 모두 Bradburry식을 통한 응력 계산 결과와 약 95%의 유사성이 나타났고, 등간격 매쉬에 비해 비대칭 매쉬 (1)와 비대칭 매쉬 (2)의 해석시간을 각각 50%와 70% 단축할 수 있는 것으로 나타났다.

Table 4. Stress Difference Depending on How to Make Mesh

| Type of model       | Stress (MPa) | % to bradburry | Time    | Elements | % of element |
|---------------------|--------------|----------------|---------|----------|--------------|
| Equidistant size    | 1.318        | 96.91          | 1 day   | 385,400  | 100%         |
| Mesh refinement (1) | 1.386        | 94.56          | 4 hours | 202,052  | 52%          |
| Mesh refinement (2) | 1.369        | 95.73          | 4 hours | 118,980  | 31%          |

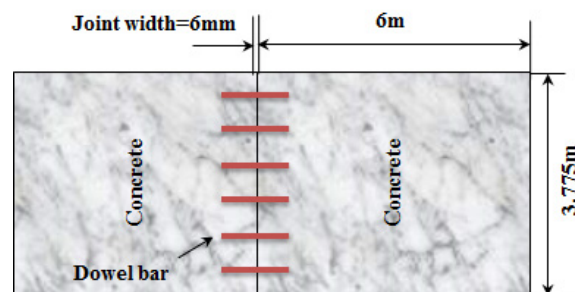
다음으로 하부층의 모델링 방법에 대해 검토하였다. 터널 내 콘크리트 포장의 단면은 일반 토공부와 차이가 있다. 일반 토공부는 콘크리트 슬래브, 린 콘크리트 기층, 입상재료 보조기층(동상방지층), 노상으로 구성된다. 암반을 굴착한 터널의 경우 하부의 지지력이 크고 용출수가 발생하므로, 터널 포장단면은 콘크리트 슬래브 밑에 시멘트 안정처리 필터층을 두어 구조적인 안정과 용출수의 배수를 용이하게 한다. 터널의 시공특성상 암반층의 표면은 굴곡이 심하여 암반요철조정층(요철층, 레벨층)을 두어 암반층의 평탄성을 맞춘다. 터널 내외부의 콘크리트 포장 모형을 구성하기 위해서 결정된 최적의 요소 크기를 이용해 단계별(2 Layer~4 Layer)로 하부 단면을 추가하여 ABAQUS 해석모형을 구성하였다. 또한 Ever-FE에서 산정된 주응력과 휨인장 응력을 비교하여 최종의 콘크리트 포장 FEM 해석모형을 구축하였다. 구조해석 모형은 2 Layer(Concrete + Lean), 3 Layer(Concrete + Lean + Subgrade), 4 Layer(Concrete + Lean +

Subgrade+ Rock)로 모사하였다. 모형은 노상 위의 다층 포장 시스템으로 가정하였고, 콘크리트 슬래브의 두께는 0.3m, 린(Lean) 콘크리트 0.15m, 골재 기층 0.1m, 그리고 암반층 깊이 1.0m으로 정의하였다. 콘크리트 슬래브의 하부와 린(Lean) 콘크리트 상부 사이의 상호작용을 검토하기 위해 콘크리트 슬래브의 자체 중량을 고려하였다. 이는 콘크리트 재료의 일반적인 단위중량 ( $2,400\text{kg/m}^3$ )을 사용하였다.

모형 구성에 따른 하중 위치별 응력 차이는 Table 5와 같이 4 Layer(Concrete + Lean + Subgrade+ Rock) 모형이 Ever-FE와 가장 근접한 결과를 나타내는 것을 확인하였다. 이를 통해 줄눈 콘크리트 포장에 대한 최종 3D 모형은 Fig. 5와 같이 두개의 슬래브로 구성하였다. 슬래브의 크기는  $3.375\text{m} \times 6\text{m} \times 0.28\text{m}$ 이며, 줄눈 폭은 6mm이다. 다웰바는 0.3m의 간격으로 배치하였고, 길이는 0.5m, 직경은 0.032m이다. 줄눈 부에 총 12개 다웰바를 배치하였다. 3D 모형에서 X좌표는 가로 줄눈 방향, Y좌표는 세로줄눈 방향과 일치하며 Z좌표는 슬래브의 깊이를 나타낸다. Fig. 5(b)는 3D 모형의 경계 조건을 나타낸 것이다. 3D 모형의 경계 조건은 실제 포장 거동과 근접하도록 각 방향으로 구조물의 움직임을 제한하는 롤러로 정의하였다. 층간의 부착은 General Contact를 사용하였으며, 마찰계수는 1.5로 설정하였다. 터널 내 포장 구조물의 상태를 모사하기 위해 슬래브의 측면을 고정시켰다.

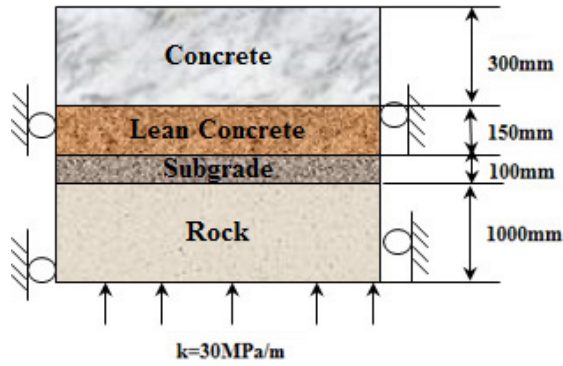
Table 5. Stress Difference Depending on Models

| Layer | Center       |        |       | Corner       |        |       | Edge         |        |       |
|-------|--------------|--------|-------|--------------|--------|-------|--------------|--------|-------|
|       | Stress (MPa) | Accur  | acy   | Stress (MPa) | Accur  | acy   | Stress (MPa) | Accur  | acy   |
|       | Ever-FE      | ABAQUS | %     | Ever-FE      | ABAQUS | %     | Ever-FE      | ABAQUS | %     |
| 1     | 2.08         | 1.85   | 92.04 | 2.84         | 1.93   | 67.78 | 3.90         | 3.18   | 81.46 |
| 2     | 0.63         | 0.71   | 88.68 | 1.07         | 0.97   | 90.25 | 1.15         | 1.36   | 84.87 |
| 3     | 0.63         | 0.71   | 87.74 | 1.84         | 2.39   | 77.08 | 1.13         | 1.05   | 93.33 |
| 4     | 0.40         | 0.39   | 98.10 | 0.62         | 0.57   | 93.17 | 1.13         | 1.13   | 99.91 |

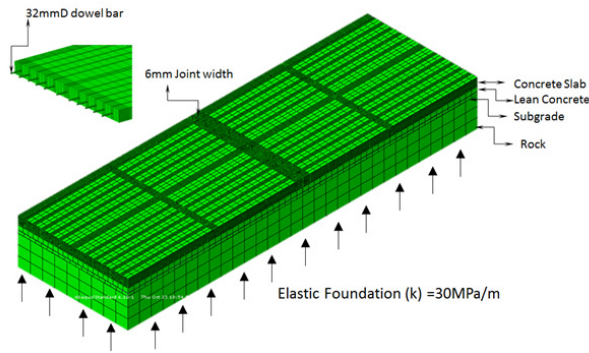


(a) Plan View of FEM Model

<Figs. Continued>



(b) Geometric Structure and Boundary Condition of FEM Model



(c) Meshing of FEM Model

Fig. 5 3D FEM Model

이렇게 개발된 구조해석 모형을 Ever-FE 모형과 비교하였다. 해석 조건은 Table 6과 같이 터널 내 포장에 대해서 분석해 보았다. 터널 내 포장의 지반 특성을 반영하여 Rock Foundation을 모사하였고, 온도 조건은  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 로 적용하였다. 슬래브에 발생하는 최대응력은 하중의 위치와 온도분포에 따라 달라지는데 교통하중의 적용은 상향컬링과 하향컬링을 구분하여 다르게 적용하였다. Table 7은 ABAQUS 모형 해석결과와 Ever-FE에서의 해석 결과를 요약한 것이다. 교통하중만을 고려할 경우, Ever-FE에서의 해석 결과 기준으로 ABAQUS 모형의 해석 결과가 90% 이상의 유사성을 보였고, 온도하중과 교통하중을 같이 고려했을 경우, 95%의 유사성을 보여주었다.

Table 6. Analysis Condition for Concrete Pavement in Tunnel

|                     | Analysis condition                                  |
|---------------------|---|
| Foundation          | Rock foundation                                     |
| Temperature loading | $\Delta T = \pm 10$                                 |
| Boundary condition  | Two side fixed                                      |
| Traffic loading     | 98kN (Single axle-Sing tire, Single axle-Dual tire) |

Table 7. Comparison of Ever-Fe and ABAQUS

| Loading                 | Loading condition     | Ever-FE(MPa) | ABAQUS (MPa) | Accuracy (%) |
|-------------------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
| Traffic                 | Single axle-Sing tire | 0.45         | 0.41         | 90.0%        |
|                         | Single axle-Dual tire | 0.4          | 0.37         | 92.5%        |
| Environmental & traffic | Single axle-Sing tire | 2.01         | 2.12         | 95.0         |
|                         | Single axle-Dual tire | 2.11         | 2.19         | 96.3%        |

## 4. 터널내 포장 특성을 고려한 구조해석

### 4.1. 슬래브 두께에 따른 응력

슬래브 두께에 따른 변수는 Table 8에 나타나고 있다. 터널 내 포장 슬래브 두께에 따른 응력 차이는 30cm, 26cm, 24cm 총 3개 변수를 고려하였다. 교통하중은 터널부와 토공부 구분 없이 컬링 조건에만 따라 다르게 적용하였다. 터널 외부에서 실제 관측한 슬래브의 온도차는  $\Delta T$ 의 (+)의 최대 관측치가  $7^{\circ}\text{C}$  이상으로 나타났다. 반면 터널 내부에서는  $\Delta T$ 의 (+)의 최대 관측치가  $5^{\circ}\text{C}$  이하로 나타남으로 터널 외부의 측정치보다 70~80%정도 낮게 나타났다.  $\Delta T$ 의 (-)값에서도 유사한 경향이 나타났기 때문에 터널 내부와 외부 슬래브의 온도차의 입력값은 각각  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 과  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 를 사용하였다.

Table 8. Input Values for Slab Thickness of Inside and Outside Tunnel

|                | Inside tunnel                  | Outside tunnel |
|----------------|--------------------------------|----------------|
| Thickness      | 24cm, 26cm, 30cm               | 30cm           |
| $\Delta T$     | $\pm 5$                        | $\pm 10$       |
| Curling down   | Single axle-Single tire (98KN) |                |
| Curling up     | Dual axle-Dual tire (150KN)    |                |
| Joint spacing  | 6m                             |                |
| Dowel bars     | 12                             |                |
| Rock base E/nu | 15,000MPa                      | n/a            |

Fig. 6은 슬래브 두께에 따른 하부 최대 인장응력의 변화를 보여주고 있다. 터널 내부 포장의 슬래브 두께가 얇아질수록 최대 인장응력의 크기 또한 증가하는 경향을 나타내었다. 두께의 변화에 대해서는 슬래브 두께가 24cm인 경우에 최대 인장응력이 상향컬링의 경우 1.31MPa, 하향컬링의 경우 1.64MPa로 가장 크게 나타났으며, 토공부 단면 최대 인장응력의 약 40% 수준밖에 되지 않았다. 따라서, 터널 내 콘크리트 슬래브 두께를 감소하여도 구조적인 문제가 발생하지 않을 것으로 판단된다.

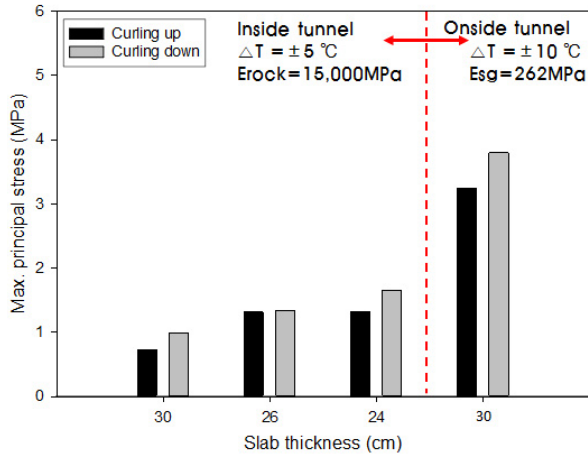


Fig. 6 Analysis Result for Slab Thickness

## 4.2. 줄눈간격에 따른 응력

줄눈 콘크리트 포장이 환경하중의 영향으로 팽창과 추축을 수용함으로써 시공과정에서 팽창과 추축에 의하여 발생하는 응력의 완화 및 불규칙 균열을 예방할 목적으로 일정한 간격으로 횡방향 줄눈을 설치하게 된다. 이러한 줄눈 간격은 건조수축, 슬래브의 두께와 슬래브 깊이에 따른 온도 분포 등 인자에 좌우된다. 줄눈 간격에 대한 해석은 터널부 포장에 대해서만 실시하였고, 환경하중만을 고려하였다. 해석에 적용된 입력값은 Table 9와 같다. 해석 모형은 4 Layer system에 2개 슬래브로 구

Table 9. Input Values for Joint Spacing of Inside and Outside Tunnel

|                | Inside tunnel |
|----------------|---------------|
| Thickness      | 24cm          |
| 2×ΔT           | ±5, ±10, ±15  |
| Joint spacing  | 6m, 8m        |
| Dowel bars     | 12            |
| Rock base E/nu | 15,000MPa     |

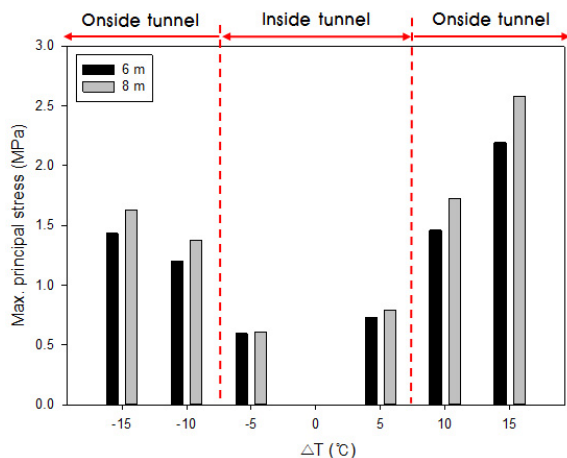


Fig. 7 Analysis Result for Joint Spacing

성하였다. 슬래브의 두께는 24cm를 사용하였고, 온도 하중은 ±5, ±10, ±15°C 6개 변수를 고려하였다. 줄눈 간격은 6m, 8m 두 개 변수를 선정하였다. Fig. 7은 줄눈 간격에 따른 포장의 최대 인장응력 해석결과를 보여주고 있다. 줄눈 간격이 증가함에 따라 슬래브의 최대 인장응력이 증가하였지만, 터널 내부에서는 상향컬링과 하향컬링 시 ±5°C의 온도 변화로 인해 줄눈간격과 상관없이 응력이 1MPa 이하로 나타내는 것을 확인하였다.

## 4.3. 다웰바 설치에 따른 응력

다웰바는 횡방향 줄눈부에 설치하는 하중전달장치이다. 본 논문에서는 ABAQUS를 이용하여 온도분포 및 다웰바 설치에 따른 거동을 분석하였다. 이때 다웰바 설치 목적이 차량하중에 의한 하중전달이기 때문에 줄눈부에 98kN의 단축단륜의 하중이 재하된 경우로 가정하여 해석을 하였으며, 환경하중에 대한 고려는 없었다. 차축의 Wandering에 영향을 파악하기 위해서 슬래브 중앙에서부터 50mm 간격으로 이동하면서 총 4개의 경우에 대해서 평가한 결과, 하중이 다웰바 사이에 적용되었을 때 콘크리트 슬래브 하부에서 최대 응력이 발생하였다. 따라서, 본 해석에서는 다웰바 사이에 하중이 재하된 조건을 적용하였다. Table 10은 다웰바 설치 개수에 따른 응력 변화 평가 변수를 보여주고 있다. 터널부 포장 다웰바의 삽입은 휠패스 구간 위주로 0, 7, 9, 12 개 총 네 개 변수를 선정하였다.

Table 10. Input Values for Dowel Bar of Inside and Outside Tunnel

|                 | Inside tunnel                  | Outside tunnel |
|-----------------|--------------------------------|----------------|
| Thickness       | 24cm, 26cm, 28cm, 30cm         | 30cm           |
| ΔT              | n/a                            | n/a            |
| Traffic loading | Single axle-Single tire (98KN) |                |
| Joint spacing   | 8m                             | 6m             |
| Dowel bars      | 0, 7, 9, 12                    | 12             |
| Rock base E/nu  | 15,000MPa                      | n/a            |

해석 결과를 정리한 것이 Fig. 8이다. 분석 결과에서 알 수 있듯이 터널 내부에 다웰바가 설치된 경우에는 개수에 따른 응력과 처짐량의 차이는 크지 않았다. Table 11은 다웰바를 12개 설치한 토공부를 100%라 가정했을 때 각 변수별 결과를 백분율로 나타낸 것이다. 다웰바가 설치되지 않을 경우에도 12개 설치되었을 때와의 응력 차이는 약 0.1MPa밖에 나타나지 않았다. 토공부 포장에서는 약 1.39MPa의 응력이 나타나, 터널 내부 포장에서 다웰바(7개, 9개, 12개)가 설치된 경우에 비해 각

각 27%, 30%, 34% 정도 응력이 높았다. 처짐량의 차이는 다웰바 삽입 개수와 상관없이 토공부 포장에서 약 10% 정도 높게 나타났고, 터널 내부에 다웰바를 설치하지 않을 경우에 비해 약 4% 높게 나타났다. LTE를 비교한 결과, 토공부와 다웰바가 설치되는 터널부 포장과 유사하게 나타났으며, 다웰바를 설치하지 않을 경우에 비해서는 약 20% 높게 평가되었다.

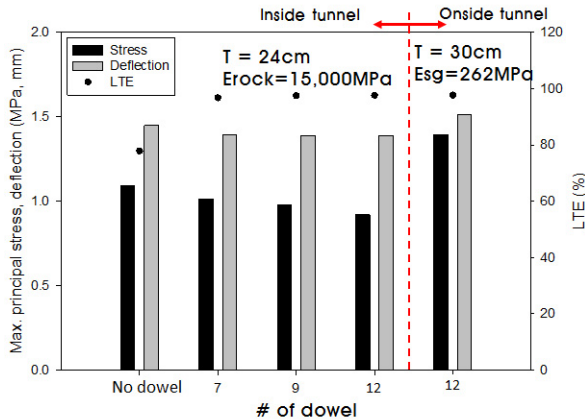


Fig. 8 Analysis Result for Dowel Bar

Table 11. Comparison of Analysis Result for Dowel Bar

|                       | Max. Stress | Deflection | LTE    |
|-----------------------|-------------|------------|--------|
| No dowel              | 78.5%       | 95.6%      | 79.7%  |
| 7                     | 72.6%       | 92.0%      | 99.1%  |
| 9                     | 70.2%       | 91.7%      | 99.8%  |
| 12                    | 66.0%       | 91.6%      | 99.9%  |
| Ref. (Outside tunnel) | 100.0%      | 100.0%     | 100.0% |

#### 4.4. 암반층 물성에 따른 응력

터널부의 암반층의 물성은 암중에 따라 달라진다. 터널 내부 암반층 물성이 터널 내부 콘크리트 포장 슬래브의 한계 응력에 대한 영향을 평가하기 위해서 암질의 종류를 hard rock, soft rock, weathered rock 및 highly weathered rock 네 가지 종류로 구분하여 평가하였다. 암중에 해당하는 물성치는 손무락이 암반의 탄성계수 추정 수치해석에서 사용한 물성치를 사용하였다(손무락 et al, 2013). Table 12는 암반층 물성에 따른 응력 변화 평가 변수를 보여주고 있다. 터널 내부 포장의 두께는 24cm, 줄눈 간격은 8m를 사용하였다. 터널 내부와 외부에서의 온도 하중은 각각  $\pm 5$ ,  $\pm 10^\circ\text{C}$ 를 사용하였고, 교통하중은 동일하게 적용하였다.

해석 결과를 정리한 것이 Fig. 9이다. 암반의 탄성계수가 증가할수록 슬래브의 최대 인장응력이 감소하는 경향이 나타났다. 하부지반이 hard rock(10,000MPa)로 되

어 있을 경우와 highly weathered rock(100MPa)로 되어 있을 경우에 비하면 슬래브의 최대 인장응력의 차이가 12%정도 되지만, 절대값으로 평가했을 때 불과 0.4MPa 밖에 차이가 나지 않았다. 이러한 결과로 터널 내부 암중에 따른 슬래브 응력차이에 대한 영향은 미미하다는 것을 알 수 있다.

Table 12. Input Values for Modulus of Rock Foundation

|                | Inside tunnel                 | Outside tunnel |
|----------------|-------------------------------|----------------|
| Thickness      | 24cm                          | 30cm           |
| $\Delta T$     | -5                            | -10            |
| Curling down   | Single axle-Single tire(98KN) |                |
| Curling up     | Dual axle-Dual tire(150KN)    |                |
| Joint spacing  | 8m                            | 6m             |
| Dowel bars     | 12                            |                |
| Rock base E/nu | 100, 1000, 15,000, 100,000MPa | n/a            |

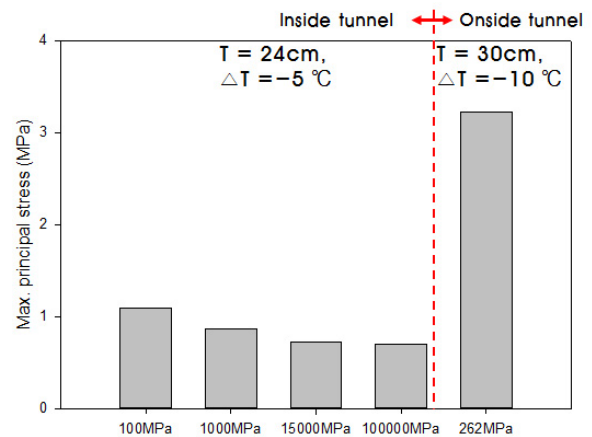


Fig. 9 Analysis Result for Modulus of Rock Foundation

## 5. 결론

본 논문에서는 일반 토공부보다 환경적으로 유리한 터널내 콘크리트 포장의 온도 분포 특성을 검토하였다. 터널내 온도조사 결과, 깊이에 따른 온도 프로파일이 비선형이라 할지라도 그 영향이 상대적으로 미미하기 때문에 상부와 하부의 온도차를 선형으로 가정하여 입력하였다. 또한, ABAQUS를 이용하여 구조해석 모형을 만들어 다양한 조건에 대한 거동분석을 수행하였다. 그 결과, 포장의 단면 축소, 줄눈 간격 확장, 다웰바 설치 여부, 암반층 물성이 콘크리트 슬래브의 한계 응력(critical stress)에 대한 영향을 검토하여 각 변수 별 터널내 포장 시스템 최적화의 가능성을 확인하였다. 일련의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.



1. 터널 내부에서는 상향컬링과 하향컬링 시  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 의 온도 변화를 나타내었으며, 이와 같은 온도조건에서 슬래브 두께에 따른 최대 인장응력의 차이는 크게 발생하지 않았고, 슬래브 두께가 24cm일 경우, 상향컬링과 하향컬링이 각각 1.31MPa, 1.64MPa로 분석되어 토공부 상향컬링과 하향컬링( $\pm 10^{\circ}\text{C}$ ) 시의 발생한 응력에 비해 60~80% 낮은 것으로 확인되었다.
2. 줄눈 간격에 대한 해석 결과, 각 조건별로 큰 차이가 발생하지 않았다. 즉, 슬래브 상하단의 온도차가 적어 줄눈 간격을 6m에서 8m까지 확장하여도 구조적인 문제가 발생하지 않는 것을 의미하다.
3. 터널 내부 다웰바가 설치된 경우에는 개수에 따른 응력과 처짐량의 차이는 크지 않았다. 다웰바가 설치되지 않을 경우에도 12개 설치되었을 때와의 응력차이는 약 0.1MPa밖에 나타나지 않았다. 토공부 포장에서는 약 1.39MPa의 응력이 나타나, 터널 내부 포장에서 다웰바가 설치된 경우에 비해 응력이 약 30% 높았다. 처짐량의 차이는 다웰바 삽입 개수와 상관없이 토공부 포장에서 약 10% 정도 높게 나타났다.
4. 암반의 물성에 따른 슬래브 응력에 대한 평가에서는 탄성계수가 증가할수록 슬래브의 최대 인장응력이 감소하는 경향을 나타냈다. 하부지반이 hard rock 이 highly weathered rock(100MPa)에 비해 슬래브의 최대 인장응력이 불과 0.4MPa밖에 차이가 나지 않음으로 암중에 따른 슬래브 응력차이에 대한 영향은 미미하다는 것을 알 수 있다.

전체적으로 현장조사 및 구조해석 모형으로 터널내 줄눈 콘크리트 포장의 거동에 대한 분석 결과, 터널 외

부에 비해 터널 내부의 환경하중이 크지 않기 때문에 터널내 콘크리트 포장의 두께를 감소시킬 수 있으며, 승차감 불량 및 내구성 문제가 발생하는 줄눈을 더 긴 간격으로 설치할 수 있는 것을 확인하였다. 하중전달 장치를 생략할 경우가 응력이 더 높았기 때문에 이를 생략하는 것은 신중을 기해야 할 것이며, 터널 하부의 암중 영향이 크지 않았기 때문에 암중의 물성을 세부적으로 구분하지 않아도 될 것으로 판단되었다. 이러한 전체적인 연구를 종합하여 향후 터널내 줄눈 콘크리트 포장 설계를 개선할 필요가 있는 것으로 나타났으나, 현재 콘크리트 포장이 직면하고 있는 문제점을 해결하기 위해 필요한 것인가에 대한 많은 의견들을 수렴하여 조율할 필요가 있을 것이다.

## REFERENCES

- Bradbury R.D., "Reinforced Concrete Pavements", Wire Reinforcement Institute. Washington, D.C., 1938.
- Korean Expressway Corporation, "Development of New Technologies for Long-Life Concrete Pavement", 2013.
- Simulia, "Abaqus 6.10 - Analysis User's Manual, Vol. 4 : Elements", 2010.
- Son, Moo-Rak, Lee, WonKee, "Study on Numerical Analysis of Estimating Elastic Modulus in Rockmass with a Consideration of Rock and Joint Characteristics", Korean Society of Civil Engineers, Vol.-33, No.1, 2013.
- Statistics Korea, <http://www.index.go.kr/potal/main/PotalMain.do>, 2014.
- University of Washington and the Washington State Department of Transportation, "Ever-FE V1.01 User'S Manual", 2003.
- Westergaard, H.M., "Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis Public Roads", Vol. 7, no. 2, 1926.