



## 시험도로 계측 결과를 이용한 3차원 콘크리트포장 유한요소해석 결과 검증

### Development of Three-dimensional Finite Element Models for Concrete Pavement of the KHC Test Road

이 동 현\*      김 지 원\*\*      권 순 민\*\*\*      이 재 훈\*\*\*\*  
Lee, Dong Hyun      Kim, Ji Won      Kwon, Soon Min      Lee, Jae Hoon

#### Abstract

The objective of this paper is the establishment of finite element analysis frame work for pavement research. Finite element analysis results simulating various loading experiments are verified with sensor measurements obtained from the KHC Test Road. The accuracy of the finite element analysis can be supported by these efforts so that it helps spread out the finite element analysis to pavement research and design processes. The finite element model used in this research is the full 3D nonlinear model including concrete slab, lean concrete base, subbase, shoulder, dowel, and tie-bar. In order to accomplish the accurate verification, the loading condition and the pavement temperature distribution are exactly simulated with field measured data. The curling behavior and the strain distribution are compared with measured responses from the loading tests with a truck and the FWD. Strain and curling predictions from the concrete slab are matched well with measured responses but the strain prediction from the lean concrete base is not matched with measured response. In addition, the magnitude of permanent curling is evaluated with the finite element analysis.

**Keywords :** KHC test road, FEM, concrete, pavement, slab, curling, strain

#### 요 지

본 연구에서는 시험도로 계측 자료와 유한요소해석 기법을 사용한 구조해석 결과를 비교하여 포장 전반에 걸친 거동을 분석할 수 있는 기반을 마련하는데 목적이 있다. 시험도로와 같이 다양한 하중 재하시험을 통하여 얻은 계측 결과와 유한요소해석 결과를 비교하여 타당성을 입증할 경우, 향후 포장의 구조해석 및 설계 과정에서 유한요소해석 기법의 다양한 응용이 가능하다. 본 연구에서는 슬래브, 린, 보조기층, 길어깨, 다웰 및 타이바가 모두 포함된 3차원 콘크리트 해석 모형을 개발하여 동일 조건의 시험도로 계측값과 비교분석을 실시하였다. 또한, 다양한 온도 조건에서 구조해석을 수행하여 컬링에 의한 슬래브 거동을 파악하였다. 콘크리트포장에서 얻어진 변형률계의 계측 결과들과 유한요소해석에서 얻어진 예측 변형률사이의 오차를 줄이기 위하여 분석 방식은 실제 상황과 유사하게 모사하도록 구현하였으며, 가능하면 변수들을 실제 상황과 일치하도록 변화시켰다. 온도 변화 등 여러 가지 상황을 현장과 동일하게 만든 결과, 유한요소해석에서 예측한 값들이 현장에서 얻은 계측값에 유사하게 접근하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 린층에서는 해석값이 다소 과다하게 발생하여 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 실제 컬링을 모사한 구조해석 결과 계측값과 거의 동일하게 나타났으며, 영구컬링의 존재도 확인할 수 있었다.

**핵심용어 :** 시험도로, 유한요소해석, 콘크리트, 포장, 슬래브, 컬링, 변형률

\* 정회원 · (주)토탈페이브시스템 과장

\*\* 정회원 · (주)토탈페이브시스템 대표이사

\*\*\* 정회원 · 한국도로공사 연구원

\*\*\*\* 정회원 · 한국도로공사 연구원



# 1. 서론

시험도로와 같은 연구시설의 건설과 운영은 상당한 규모의 예산을 필요로 하는 사업으로서 미국 이외의 나라에서는 시도된 바가 없다. 시험도로는 상당히 고가의 연구시설인 만큼, 여기서 얻어진 결과들은 실제 현장의 기후 및 교통량 조건을 가장 완벽하게 반영하는 상당히 값어치 있는 성과라 할 수 있다. 앞으로 두 번 다시 수행하기 어려운 시험도로와 같은 연구 시설을 효율적으로 활용하여 향후 포장 분야의 연구 개발에 기여할 수 있는 방법 중의 하나가 포장의 거동을 상세히 분석할 수 있는 구조해석 기법의 개발이라고 할 수 있다. 구조해석 기법의 신뢰성을 검증할 수 있다면, 해석상으로 다양한 포장체의 거동을 이해할 수 있는 기반을 마련할 수 있기 때문이다.

유한요소해석은 최근 도로포장 분야의 구조해석 방법론으로 다양하게 적용되고 있다. 현재 한국형 설계법, AASHTO 2002와 같은 설계법 개발이나 일리노이 대학, 텍사스 오스틴 대학 등을 중심으로 콘크리트 포장의 피로 수명이나 거동 등을 분석하는데 적극적으로 활용되고 있다<sup>1)8)</sup>. 시험도로와 같이 시공 당시부터 다양한 포장 관련 정보가 축적되어 있는 조건에서 다양한 하중 재하시험을 통하여 얻은 계측 결과와 구조해석 결과를 비교하여 궁극적으로 포장 거동을 예측할 수 있다면 유한요소해석 기법의 다양한 응용이 가능하다. 본 연구에서는 유한요소해석 기법을 적용하여 시험도로 계측 결과를 확장할 수 있는 가능성을 검토하고 향후 연구 방향을 제시하고자 한다. 이를 위해 유한요소해석을 위한 포장 형식별 유한요소 모델 개발론, 포장 층별 물성치 적용 방법, 유한요소해석 결과 비교, 복합적인 결링 등에 대하여 언급하고자 한다. 실측값은 신뢰도가 입증된 변형률계에 국한하여 적용하였고 슬래브내에서는 해석값과 실측값이 상당히 유사하게 나타났다. 따라서 본 연구를 통하여 정립한 콘크리트포장에 대한 해석 방법론을 응용하여 향후 연구로 다양한 하중과 온도 조건에 대

한 해석을 수행하고 있고, 이는 후속 논문으로 빠른 시일내에 제시될 예정이다. 이와 같은 연구 과정을 거쳐 다양한 조건에서의 콘크리트 슬래브 거동을 파악할 수 있다면 피로 모델 개발 및 향후 개발된 신기술 등의 역학적 검증에 활용될 수 있는 것으로 기대한다.

# 2. 유한요소 모델 개발

본 연구를 위하여 사용한 유한요소해석 프로그램은 ABAQUS로서 3차원 비선형 유한요소해석에서 많이 사용되는 범용 프로그램이다. 이 프로그램은 토목에서 기계, 항공, 전자 분야 등 다양한 공학 영역에서 필요한 구조해석을 유한요소해석 기법을 적용하여 구현한 프로그램이다. 이 프로그램은 포장구조해석에 필요한 경계층거동 모사 기법(frictional contact interface)과 포장하부층을 형성하는 입상재료들의 거동을 모사할 수 있는 mohr-coulomb 탄소성(elasto-plastic) 모델 등 다양한 요소들을 포함하고 있어 기존의 다층탄성론(multi-layered elastic solution)을 적용한 프로그램들(Bisar, Chevron, Everstress 등) 보다 훨씬 정확한 해석 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 구조해석은

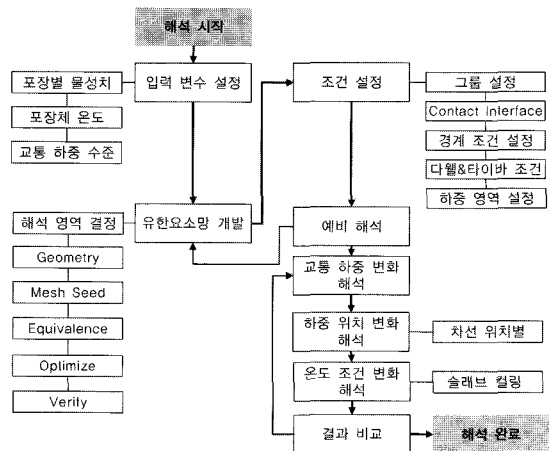


그림 1. 포장층의 차원 유한요소 해석 과정



ABAQUS를 사용하였지만 유한요소망 개발은 보다 활용도 높은 유한요소망 형성(mesh generation) 기능이 있는 프로그램인 patran을 사용하였다.

본 연구에서는 3차원 연속체요소(continuum solid element)를 적용함으로써 포장층별 물성치 적용과 층별 경계조건의 정의로 구분이 가능하다. 그림 1은 유한요소 모델 개발 및 해석 과정을 나타낸 것이다.

콘크리트포장의 해석을 위한 유한요소 모델은 상당히 복잡한 구성 요소를 가진다. 이는 아스팔트포장과 달리 균열 억제를 위한 줄눈이 존재하고, 콘크리트 슬래브와 린콘크리트 층 사이에 분리층이 존재하기 때문이다. 콘크리트포장의 거동을 정확히 모사하기 위해서는 가급적 시험도로 포장단면의 특성과 동일하게 유한요소 모델을 개발할 필요가 있다. 현재 시험도로의 콘크리트포장 구간에는 슬래브 중앙부, 줄눈부, 모서리부, 노견부에 각각 상부, 하부에 변형률계가 기본적으로 매설되어 있다. 그러므로 정확한 유한요소해석 결과를 도출하기 위해서는 변형률계가 매설된 위치에 유한요소의 밀도를 높여서(mesh refinement) 모델을 만들어줄 필요가 있다<sup>8)</sup>. 그러나, 4개 지점에 모두 밀도를 높여서 1개의 모델을 만들 경우 유한요소의 개수(20만 요소 이상 필요)가 너무 많아 현재 PC 수준(CPU 3.0GHz, 메모리 2GB)에서는 해석이 불가능해진다. 그러므로 본 연구 과업에서는 이 4개 지점 중 가장 큰 응력 및 변형률이 유발되는 중앙부와 줄눈부에 대하여만 유한요

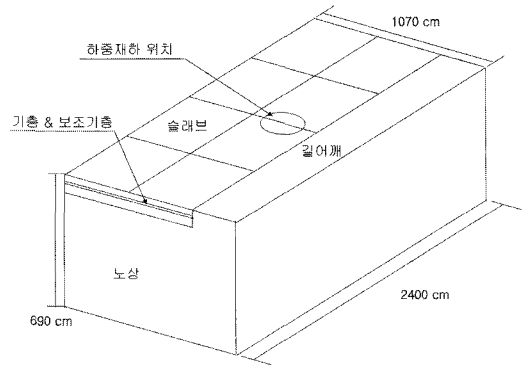


그림 3. 줄눈부 모델 개요

소의 밀도를 각각 높여 모델을 개발하였다. 그림 2, 3은 중앙부 및 줄눈부 유한요소 모델의 개념도이다.

밀도가 높은 하중 재하 지점과 밀도가 낮은 외곽지점을 연결하는 데는 방사형 변환 유한요소망(radially graded transition mesh) 기법을 적용하였다. 하중 재하 지점에서는 하중 1개소(타이어 접지면적) 당 유한요소가 길이와 폭방향으로 각각 최소 3개 이상씩 배치될 수 있도록 유한요소의 밀도를 높였다. 이로써 3차원상에서 하중부분의 슬래브 거동을 매우 정밀하게 해석할 수 있다. 슬래브의 깊이 방향으로 유한요소를 6개 배치하여 깊이 방향으로 발생하는 변화를 분석할 수 있도록 하였다. 여기서 개발한 유한요소 모델은 포장 슬래브 사이에서 발생하는 상호작용의 고려가 가능하도록 교통진행방향으로 슬래브를 3개(중앙부) 또는 4개(줄눈부)까지 포함하도록 개발하였다. convergence study로 모델의 수렴성을 파악하여 모델의 정확성을 검증하였다. 또한, 계측기가 모두 주행차로에 매설된 관계로 길어깨까지 모델을 확장하였다. 이로써 모델의 총 유한요소가 10만개 이하로 구현하여 일반 PC로써 해석가능할 수 있게 함과 동시에 하중 지점의 거동을 파악할 수 있는 모델을 개발하였다. 이와 같은 유한요소 모델은 기본 슬래브인 J2, J5, J8 단면들에 대하여 각각 중앙부와 줄눈부의 총 6개를 개발하였다. 콘크리트 슬래브의 두께는 실측값과 설계값의 편차가 1.5~3.5%로 크지 않아 설계값을 적용하여 모델을 개발하였지

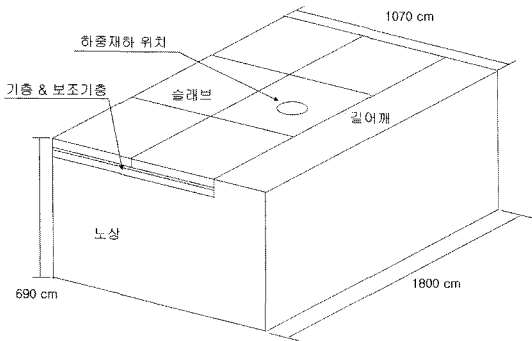


그림 2. 중앙부 모델 개요



만, 린콘크리트층의 두께는 실측값과 설계값의 편차가 10% 이상으로 실측 두께를 반영하여 모델을 보정하였다. 다웰바와 타이바도 하중 분배에 큰 영향을 미치기 때문에 3D Timoshenko Beam Element를 이용하여 실제와 동일하게 모사하였다. 본 해석에서는 현실적인 한계로 인해 정적 하중으로 고려했지만 향후 해석에서는 동적 하중으로 해석도 수행할 예정이다. 포장 슬래브와 린콘크리트층 사이에 설치되는 분리층(plastic sheet)이 유발하는 경계층 거동을 모사하고자 유한요소해석에서 적용하는 기법중의 하나인 접촉면 해석 기법(frictional contact interface algorithm)을 반영하였다<sup>7)</sup>. 이를 통하여 실제 포장체의 거동과 마찬가지로 콘크리트 슬래브와 린콘크리트층 사이의 거동을 분리하였다. 여기서 콘크리트 슬래브와 린콘크리트층간의 마찰계수는 0.1로 가정하였다. 마찰계수를 낮춘 이유는 실제 비닐막으로 린

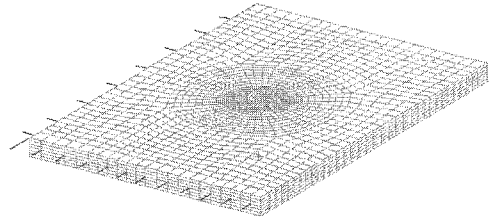


그림 6. 다웰 타이바 포함

층과 슬래브층이 분리(JCP 경우)되어 서로 다른 거동을 하기 때문이다. 위와 같은 과정을 통하여 개발된 유한요소 모델은 그림 4, 5, 6과 같다.

유한요소 모델에 적용된 물성치는 표 1, 2와 같다. 슬래브에 적용된 탄성계수는 시험도로 시공당시 단면별로 제작한 시편에서 실측한 값을 적용하였다. 린콘크리트층의 탄성계수는 현실적으로 각 슬래브별 대표값 측정을 위하여 제작했던 시편들에서 실측된 값들을 평균하여 적용하였다. 동상방지층 및 노상의

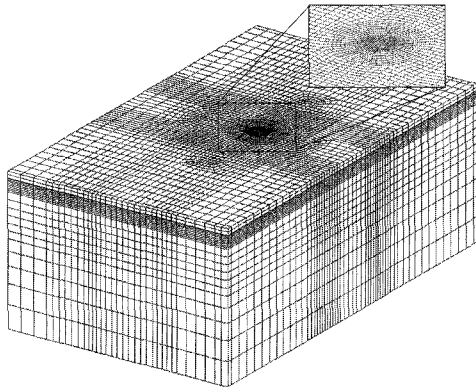


그림 4. 중앙부 유한요소 모델

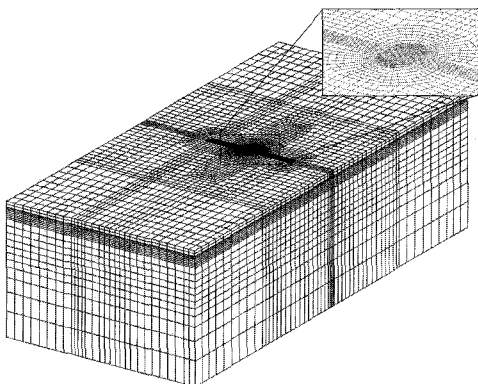


그림 5. 줄눈부 유한요소 모델

표 1. 포장층별 적용 탄성계수

단위: kgf/cm <sup>2</sup>	슬래브			Lean
	J2	J5	J8	
탄성계수	268,388	258,988	304,406	140,613
	동상방지층	노상	길어깨 (아스팔트)	다웰 및 타이바
	3,515	351	21,092	2,109,209

표 2. 포장층별 적용두께

단위:cm	J2			J5		
	설계값	실측값	적용값	설계값	실측값	적용값
슬래브	25	25.87	25	30	30.46	30
Lean	15	17.5	17.5	15	16.8	16.8
동상방지층	50	-	50	45	-	45
	J8					
	설계값	실측값	적용값			
	35	36.2	35			
	15	13.4	13.4			
	40	-	40			



물성치도 재료별 대표값을 사용하였다. 이외에도 슬래브의 온도변화에 따른 컬링을 고려한 해석에서 필요한 콘크리트의 열팽창계수는  $1.02 \times 10^{-6}$ 을 적용했는데, 이는 한국형 포장설계법 개발 연구의 물성성장화 부분에서 시험도로에서 적용된 골재를 사용한 시편으로 측정한 평균값이다<sup>1)</sup>.

그림 7과 그림 8은 J5 단면에서 트럭하중을 정적으로 재하한 경우의 구조해석 결과 예이다. 그림 7은 길이방향의 수직응력 분포로 트럭 하중 재하 위치를 파악할 수 있으며, 그림 8은 이때 횡방향 변형률 분포를 보여주는 등고선도이다.

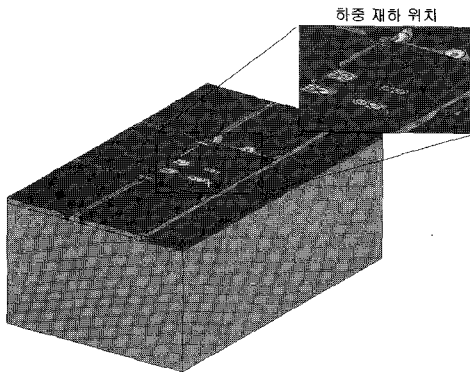


그림 7. J5 단면 하중재하 위치

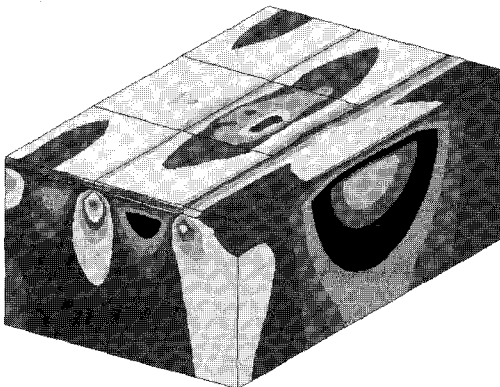


그림 8. J5 단면 횡방향 변형률 분포

### 3. 콘크리트포장 유한요소해석

콘크리트포장에서 얻어진 변형률계의 계측 결과들과 유한요소해석에서 얻어진 예측 변형률을 비교하기 위하여, 다양한 변수들을 가능한 실제 상황과 일치하도록 변화시켰다. 앞서 설명한 바와 같이 포장층의 두께도 설계값과 실측값의 차이가 클 경우에는 실측값을 사용하였고, 컬링을 유발하는 온도변화도 실제로 현장에서 얻어진 온도분포를 적용하였다. 컬링이 발생하는 상황하에서 콘크리트 슬래브의 처짐 형태를 관찰하는 등 초기 계측 결과를 최대한 활용하여 콘크리트포장의 거동을 분석할 수 있는 유한요소해석을 수행했다. 시공초기의 슬래브 상태나 컬링이 전혀 발생하지 않은 온도 조건을 알 수 없기 때문에 본 해석에서는 상대적인 컬링 상태만을 고려할 수밖에 없다. 따라서 슬래브의 컬링을 고려하기 위한 온도 분포는 실제 하중 재하시험이 수행된 당시의 온도분포와 시험 1시간 전의 온도분포에서 발생하는 차이가 컬링을 유발한다고 가정하였다. 이는 초기 영구컬링(permanent curling)을 고려하지 않은 가정으로 슬래브의 컬링 거동을 완벽히 반영한 것은 아니지만 시험 시점 온도 변화에 대한 컬링 거동을 반영한 것이다. 초기 영구컬링은 시공 당시 습도 및 온도 조건에 따라 발생하는 컬링을 의미하며 일반적으로 오목한 형태(negative curling)로 발생하는 것으로 알려져 있다. 영구컬링의 존재 여부는 최근 해외 연구에 의해 밝혀졌으나 아직 어느 정도 발생하는지는 파악되지 않고 있다<sup>6)9)</sup>. 이는 슬래브 양생 초기 당시의 환경적 조건이 요구되기 때문이다. 그림 9에는 J5와 J2 단면에서 실측된 온도 분포와 이를 회귀식으로 재현한 온도 분포가 같이 표시되어 있다. 이는 구조해석에서 적용된 슬래브내의 깊이별 온도( $\Delta T$ ; 시간에 따른 온도변화)이다. 실제로 온도계의 매설 간격은 5cm이지만, 유한요소해석에서 필요한 온도 입력 위치는 절점의 위치로서 온도계의 실측값을 그대로 사용할 수는 없다. 따라서 회귀식을 통해 절점의 위치에서 온도를 예측하여 적용하는 방법을 사용했다.



J8 단면의 경우에는 신뢰성 문제로 그 시간대의 온도변화를 유한요소해석 과정에서 적용하지 않았다. 온도 분포는 그림 9에서 보는 바와 같이 직선이 아니다. 이와 같은 비선형 온도 분포는 콘크리트 슬래브에 와핑 변형(structural warping)을 유발하여 슬래브가 뒤틀리도록 만들고 이에 따른 전단응력을 유발한다.

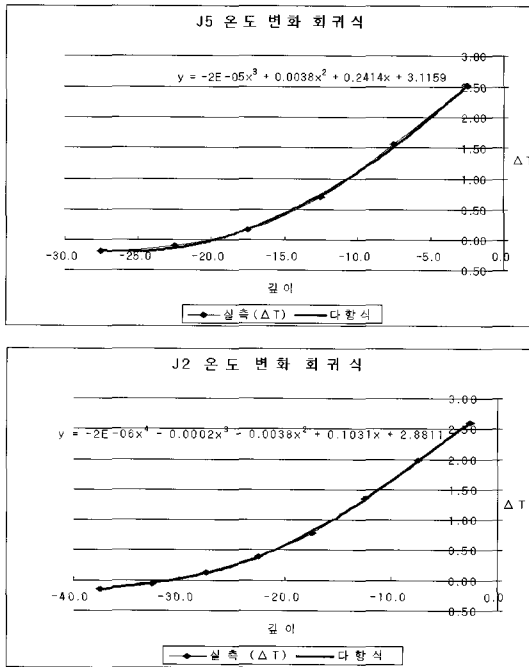


그림 9. 실측 온도와 회귀식을 사용한 온도 추세선

### 3.1 대표단면의 유한요소해석 결과

시험도로 단면 중 J2, J5, J8의 세 단면을 대표단면으로 선정하여 유한요소해석을 수행하였다. 이 세 단면을 선정한 이유는 이 시험도로 슬래브 내부에 3층(J2) 또는 4층(J5, J8)으로 변형률계가 매설되어 있고, 린콘크리트층에도 상하부 두 개층으로 변형률계가 매설되어 깊이 방향으로 변형률의 분포가 확인 가능하기 때문이다. 각 단면에서 중앙부와 줄눈부 변형률계 매설지점 위에 각각 정적 트럭 하중과 FWD 하중이 재하된 상황을 가정하고 유한요소해석을 수행하였다.

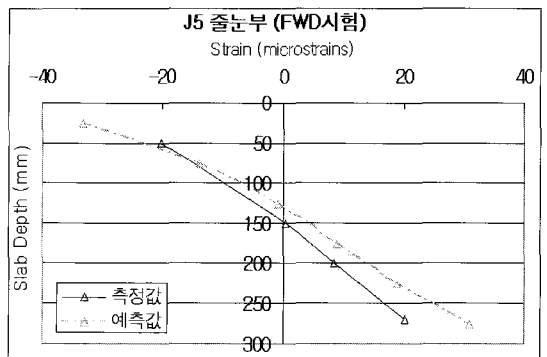
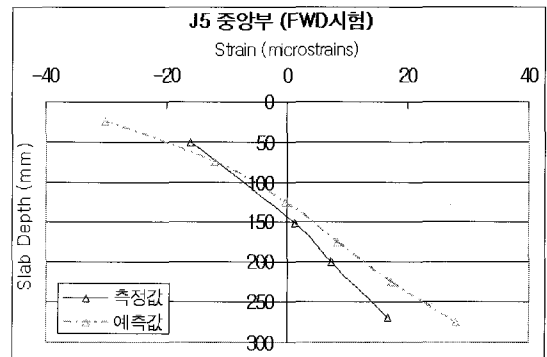
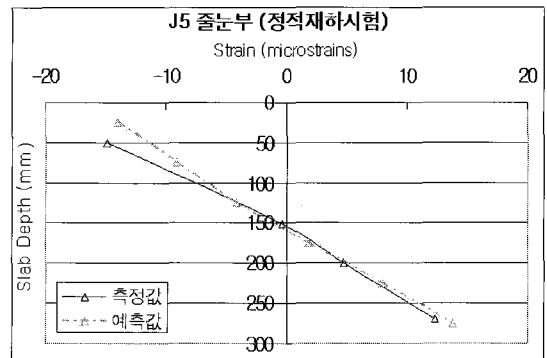
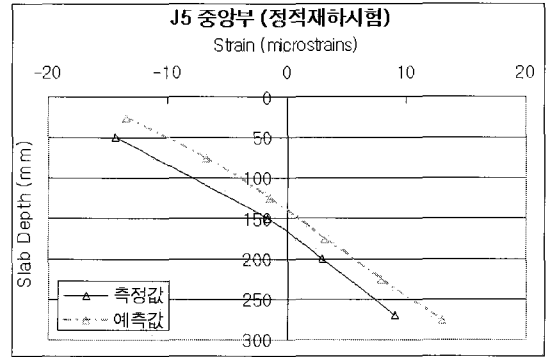


그림 10. J5 단면의 유한요소해석 결과



그림 10은 J5 단면에서의 유한요소해석 결과이다. FWD 하중의 경우는 실제 하중은 동적으로 재하되지만, 재하된 동적하중의 최대값이 정적으로 재하된 상황을 가정하고 해석했다. 중앙부와 줄눈부 정적 및 FWD 하중 상태에서 콘크리트 슬래브의 변형률은 모두 각 측정 지점에서 얻어진 값들은 차이를 나타내지만 깊이방향으로 여러 값들을 이어서 변형률 추세를 그리고 비교할 경우 상당한 유사성을 발견할 수 있다. 중앙부 정적재하시험 결과가 다소 편차가 발생하였는데, 이는 시험 당시 발생한 결링으로 중심축이 이격된 것으로 추측된다.

그림 11은 린콘크리트층의 변형률을 비교한 그래프이다. 린콘크리트층의 경우 예측값과 실측값의 추세선이 보이는 각도의 편차가 슬래브에 비해 컸다. 린콘크리트층은 모두 예측변형률이 계측 변형률보다 크게 발생하였다. 이는 린콘크리트층 및 포장 하부층의 물성치가 대표 값을 사용하게 되어 정확하지 않은데 기인한 오차일 가능성이 크다. 그러나 포장 하부층을 형성하는 입상재료의 특성상 물성치는 함수비, 공용연수, 온도 등에 따라서 수시로 변할 수 있기 때문에 정확한 물성치의 적용은 상당히 해결하기 어려운 문제이다. 본 연구를 통하여도 포장 하부층의 여러 물성치(마찰계수, 포아송비, 층별 탄성계수 등)를 일정 범위내에서 조정하여 변형률의 추세를 맞추고자 노력했으나, 슬래브의 변형률과 동시에 린콘크리트층의 변형률을 실측값과 유사하게 조정하는 것은 어려웠다. 향후 이 부분에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

그림 12는 J2 단면에서 얻어진 중앙부와 줄눈부의 유한요소해석 결과이다. 분석결과는 전반적으로 유사하게 나타났지만 FWD 시험의 경우 슬래브 하부의 예측 변형률이 다소 과대하게 나타난 경향이 있으며, 이는 동적인 충격하중인 FWD 하중을 정적으로 가정하고 해석을 수행하였기 때문에 실측값이 작게 나타나는 것으로 판단된다. 이외의 발생된 오차는 복합적인 결링 거동과 하중 재하 방식 및 하중 위치의 편차에 기인한 것으로 판단된다. 실제 하중 접지면적

과 해석상의 접지면적간에 편차가 있을 경우 변형률이 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 이론적으로 두께가 얇은 J2의 변형률이 J5보다 크게 나타나야하지만 거의 비슷하게 나타났고 줄눈부 FWD의 경우는 오히려 J2의 변형률이 적게 나타났다. 이는

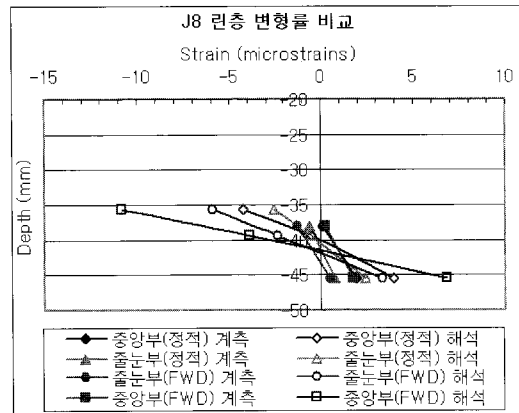
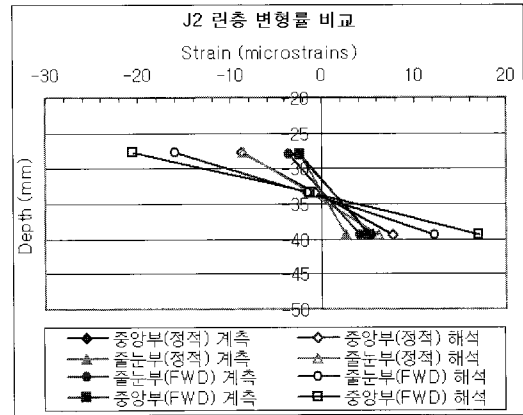
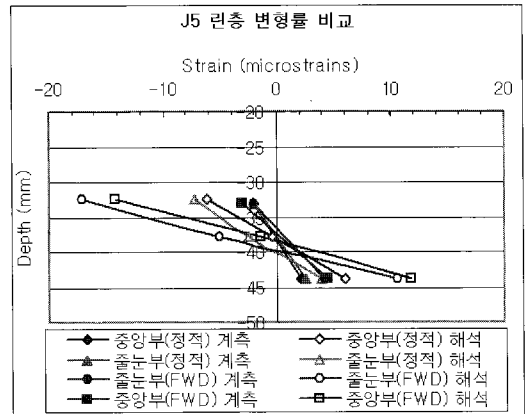


그림 11. 린층 변형률 비교

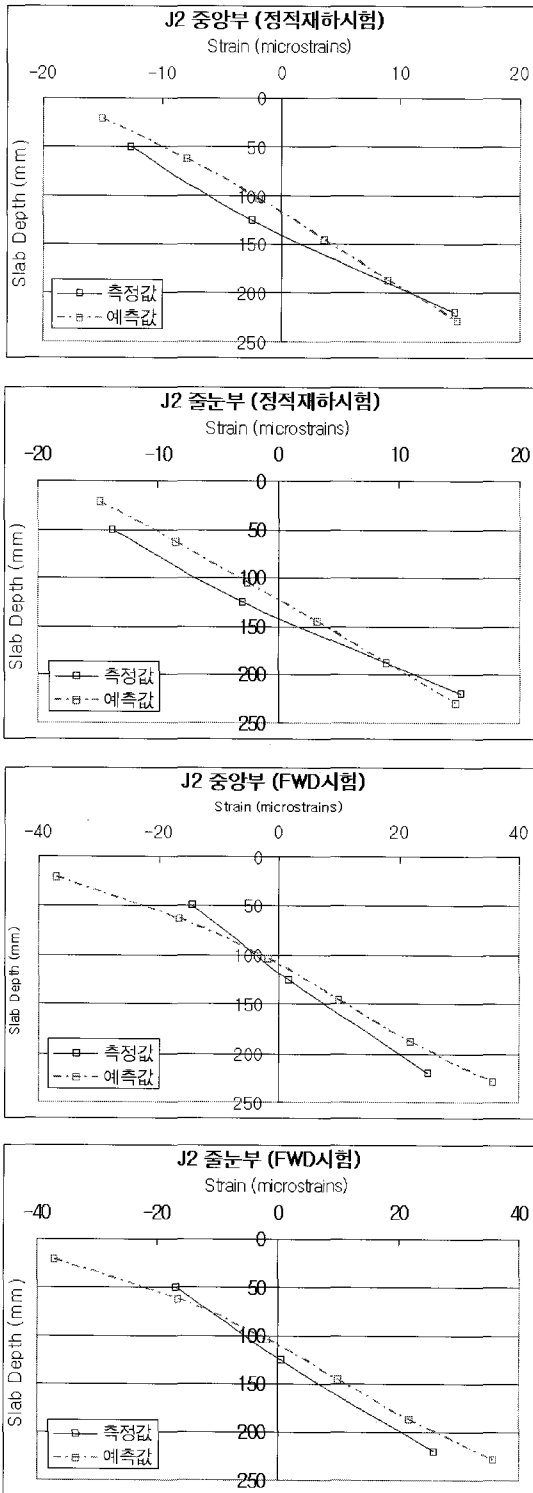


그림 12. J2 단면의 유한요소해석 결과

계측 과정에서 발생하는 오차일 가능성과 슬래브 두께가 가장 얇기 때문에 컬링에 대한 영향을 다른 단면보다 크게 받았을 가능성(같은 온도 조건에서 얇은 슬래브가 더 많이 휜)이 있다. 정확한 원인 분석은 향후 추가 시험 결과와 그 시점의 컬링량 실측 결과가 요구된다.

그림 13은 J8 단면에서 얻어진 중앙부와 줄눈부의 유한요소해석 결과이다. J8은 35cm 두께의 슬래브를 가지는 단면으로 3개의 대표단면 중에서 예측 및 실측 모두 가장 작은 변형률을 보여준다. FWD 하중에서 예측된 변형률과 실측 결과를 보면 추세선이 다른 사례들보다 더 많이 어긋난 것을 알 수 있다. 이는 J8의 경우 실제 슬래브 온도를 적용하지 못했기 때문으로 정확한 컬링 거동을 모사하지 못하여 나타난 결과로 판단된다. J2, J5와는 달리 J8 단면의 경우에는 계측 합체에 설치된 데이터로거가 오작동을 일으켜 온도 계측 결과가 명확하지 않아 다른 시간대나 인접 단면 값을 적용하였다.

유한요소해석 및 계측을 통하여 얻어진 변형률을 추세선으로 나타낸 후 발견할 수 있는 특이사항들은 다음과 같다.

콘크리트 슬래브의 중립축에서 변형률이 0.0이 아니다. 일반적으로 콘크리트 슬래브를 플레이트로 가정할 경우 중립축에서의 변형은 0.0이어야 한다. 또한 압축 변형률과 인장변형률의 최대값이 다르다. 이에 대한 주된 원인은 계측기 위치와 실제 슬래브 두께의 오차와 초기 발생하는 영구컬링(permanent curling)이 포함된 복합적인 컬링 때문으로 판단된다.

100번과 400번 위치의 변형률 값을 비교할 경우 중립축 개념을 적용하여 판단하여야 한다. J2, J5, J8 세가지 단면 모두 100번 고유번호의 변형률계들은 슬래브 상부에서 5cm 아래에, 400번 고유번호의 변형률계들은 슬래브 하부에서 3cm 위에 설치되어 있다. 그러므로 슬래브의 상하부와 이격된 물리적인 거리는 세 개의 단면에서 모두 동일하지만, 중립축으로부터 이격된 비율은 다르다. 그 결과로 J8 단면에



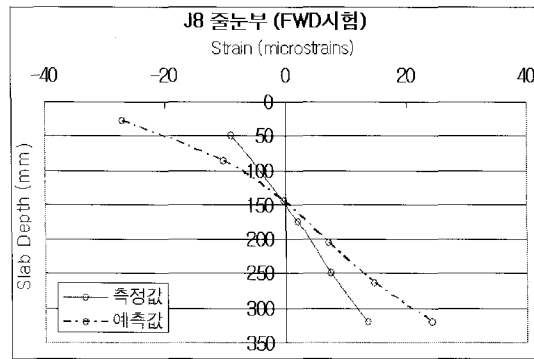
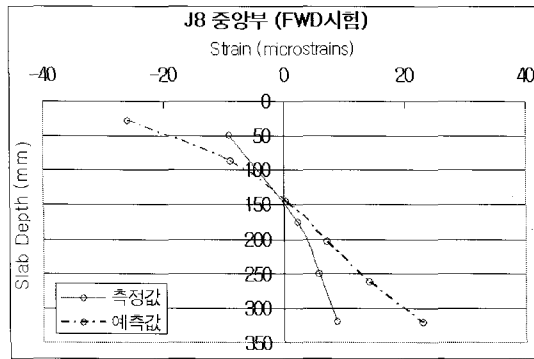
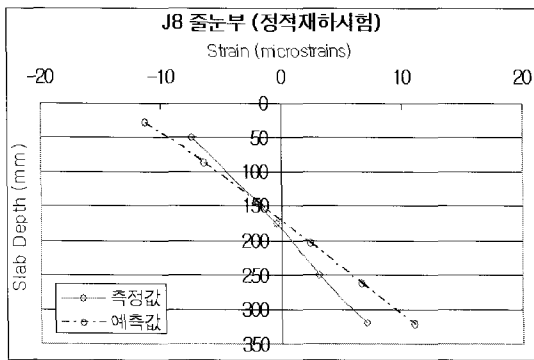
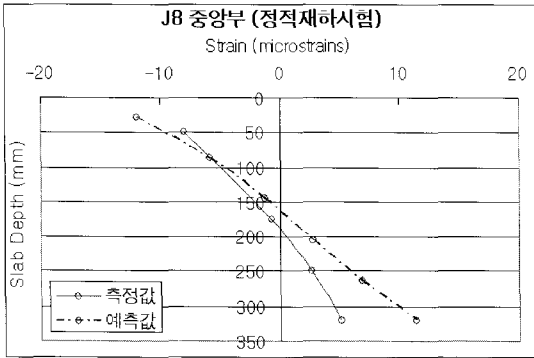


그림 13. J8 단면의 유한요소해석 결과

서는 상대적으로 더 큰 변형률이 계측되고, J2 단면에서는 상대적으로 더 작은 변형률이 계측된다. 변형률 계측값의 절대적인 비교를 원할 경우 슬래브 상하부에서 물리적인 거리를 동일하게 이격시키기 보다는 이격 비율을 조정하여 계측기를 설치하는 것이 필요하다고 결론지을 수 있다. 따라서 현재 시험도로와 같은 계측기 매설 상황에서는 변형률 계측값의 추세선을 통하여 슬래브 상하부의 변형률을 유추하는 방법이 가장 합리적이라고 판단된다.

린콘크리트층의 경우 계측된 변형률이 예측된 변형률보다 항상 더 작은 값을 가진다. 이는 포장하부층 및 린콘크리트층의 강성이 현재 대표 값으로 사용하는 물성치보다 더 크기 때문으로 판단된다. 이는 실제 린층과 슬래브층 사이의 메커니즘, 하부층의 물성, 켈링의 영향에 대해 추가적인 해석을 더 수행한 뒤에 다시 논의해야 할 것이라 사료된다.

### 3.2 슬래브 온도 변화에 의한 켈링 분석

콘크리트포장의 거동을 복잡하게 하는 주요 요인 중의 하나는 켈링(curling)이다. 여기서는 켈링의 원리를 파악하고 구조해석을 통해 인위적으로 모사한 켈링에 하중이 재하되었을 경우 슬래브 거동을 파악한다. 켈링은 슬래브 상하부 사이의 온도 차이에 기인한다. 상부와 하부가 동일한 온도만큼 상승 또는 하강하는 경우에 슬래브는 순수한 길이 변화(pure extension)를 보인다. 그러나 상하부의 온도가 각각 다르게 상승 또는 하강하는 경우에는 슬래브의 끝부분이 위로 상승하거나 아래로 내려가는 켈링이 발생하게 된다. 온도(또는 습도)변화에 의한 켈링의 기본적인 발생 이론은 그림 14와 같다. 켈링 현상은 슬래브 상부의 표면 온도(또는 습도)가 높은 상태에서는 그림과 같이 슬래브 중앙부가 볼록하게 들뜨는 현상(positive curling)이 발생하고 반대로 표면 온도(또는 습도)가 낮은 상태에서는 슬래브가 오목하게 가 장자리가 들뜨는 현상(negative curling)이 발생한다<sup>6)9)</sup>.

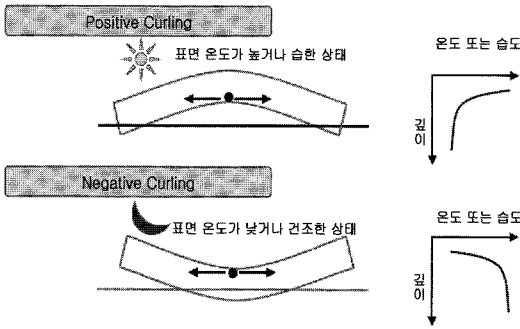


그림 14. 온도(또는 습도) 변화에 의한 컬링 발생 원리

일반적으로 온도 변화에 의한 컬링이 발생하지 않는 상태에서는 콘크리트 슬래브의 변형이 전혀 발생하지 않는 상태를 예상하지만, 실제로 관찰 결과 콘크리트 슬래브는 영구컬링(permanence curling, built-in curling과 같은 개념임)이 발생한 형태로 존재한다는 것이 몇몇 외국의 관찰사례에서 확인되었다. 즉, 온도차에 의한 컬링이외에 초기 슬래브가 양생될 때 건조수축에 의해 가운데가 움푹하게 들어가고 단부와 모서리가 들려올라가는 형태로 굳어지는 현상(negative curling)을 의미한다. 이 현상은 타설 직후에 발생하여 포장의 수명이 다할 때까지 존재한다. 이 영구컬링은 슬래브 거동에 큰 영향을 미치지만 이는 시공 당시 실측된 컬링값과 온도조건에 따라 발생하는 정도가 다른 것으로 알려져 있다<sup>6)</sup>.

영구컬링의 발생 원인은 초기 양생과정에서 콘크리트 슬래브 상층부의 수분 증발량이 하층부에 비하여 여러 원인으로 더 많아지고 이에 따라서 상층부의 건조수축량이 하층부에 비하여 커지기 때문이라고

알려져 있다. 그러나 영구컬링의 크기와 형태는 콘크리트포장의 시공시 태양광선 정도, 기온, 작업성, 풍향, 물성 등 다양한 요인이 복합적으로 작용되어 나타나는 현상이기 때문에 이론적으로 예측하기는 매우 어렵다. 그림 15는 일반적인 영구컬링 거동을 나타내는 그림으로 (A)가 영구컬링이 발생된 상태에서 슬래브 상하부의 온도차이가 없는 상태를 보여주고, (B)는 슬래브 상부의 온도가 하부보다 높아 온도차에 의한 컬링의 크기가 영구컬링의 크기보다 커서 컬링(positive curling)의 방향이 변화된 경우를 보여주며, (C)는 슬래브 상부의 온도가 하부보다 낮은 상황에서 영구컬링과 같은 방향으로 온도 차이에 의한 컬링이 발생하여 컬링의 크기가 오히려 더 커진 경우를 보여준다<sup>3)</sup>.

그림 16, 17은 positive curling과 negative curling을 모사한 해석 결과로 육안으로 컬링 발생 형태를 확인하기 위하여 스케일을 조정하여 나타낸 깊이방향 처짐값이다. 이 경우는 슬래브의 상부와 하부의 온도차( $\Delta T$ )를 각각  $\pm 3$ 도로 설정한 해석결과

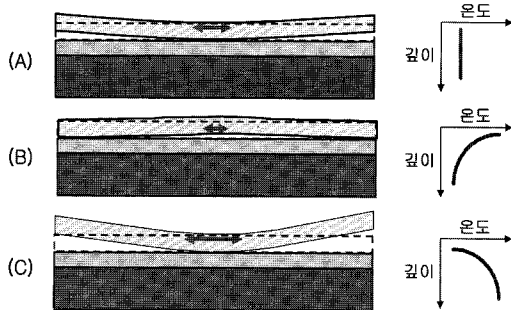


그림 15. 영구컬링을 고려한 복합 컬링 발생

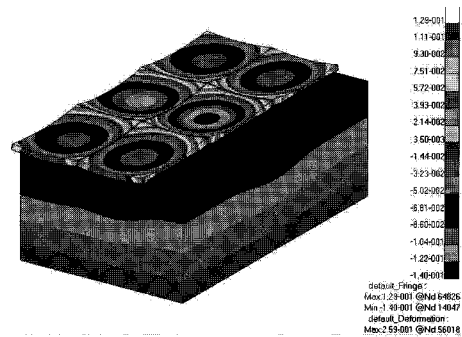


그림 16. negative curling 분석 예

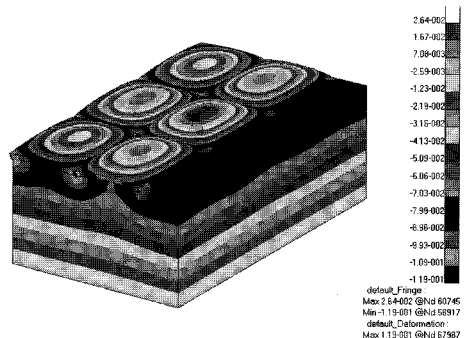


그림 17. positive curling 분석 예



이다. 여기서  $\Delta T$ 가 0보다 작으면 슬래브하부의 온도가 상부에 비해 높은 것이며,  $\Delta T$ 가 0보다 높으면 슬래브상부의 온도가 하부에 비해 높은 것을 의미한다.

실측된 온도 분포에 따라 파악된 컬링 형태는 시험 계속 시간에 따라 다소 차이가 있지만 계속 시간이 낮시간대이기 대부분 슬래브 상부의 온도 변화가 커 슬래브 중앙부가 볼록하게 들뜰 수 있는 positive curling 형태로 나타날 것으로 추측된다. 본 논문에서는 컬링의 발생이 실제로 콘크리트 슬래브의 처짐에 미치는 영향을 관찰하고자 negative 및 positive curling을 모사하는 유한요소해석을 수행하였다. 컬링을 수반한 해석의 경우 하중 재하를 자중, 온도 변화, 교통하중의 3단계로 나누어 구조해석을 진행하였고 그림 18과 같이 슬래브 중앙부에서 교통 진행 방향의 처짐량을 파악하였다.

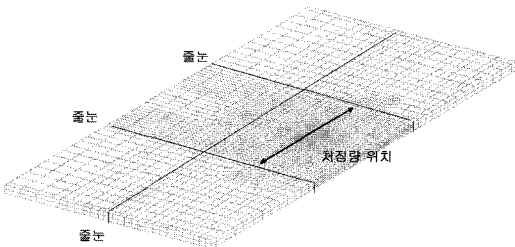


그림 18. 처짐량 파악 위치

컬링이 발생한 상태에서 FWD 하중은 슬래브의 중앙에 재하된 것으로 가정하고 유한요소해석을 수행하였다. 본 사례는 슬래브 상하부의 온도차  $\Delta T$ 가 +3℃인 경우로 슬래브 중앙부가 상승하는 positive

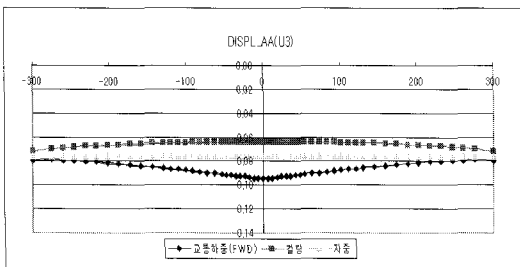


그림 19.  $\Delta T = +3^\circ\text{C}$  컬링에 의하여 발생한 슬래브의 처짐

curling을 모사한 경우이다. 그림 19는 컬링에 의하여 발생한 슬래브의 처짐량 변화를 보여주고 있다. 슬래브의 종방향으로 발생한 처짐을 먼저 관찰하면, 자중에 의한 처짐은 수평 형태로 특이사항이 없다. 그 이후에 컬링이 발생한 경우 0.02cm 가량 슬래브의 가운데 부분이 상승한 것을 알 수 있다. 이는 오후 시간에 컬링이 발생할 경우로 예상되며, 슬래브의 모서리 4곳만이 린콘크리트층에 부착된 상태로 집중적으로 하중을 전달하는 것이다. 이런 경우 상하부의 온도차가 크면 슬래브와 하부층이 물리적으로 분리되지만, 영구컬링이 큰 경우나 온도차가 낮을 경우에는 반드시 물리적인 분리가 발생하지는 않는다. FWD 하중 재하 시 슬래브 자체의 변형이 나타나는 것을 파악할 수 있으며, 이와 같은 경우에는 bottom-up 형태의 균열이 발생할 가능성이 크다.

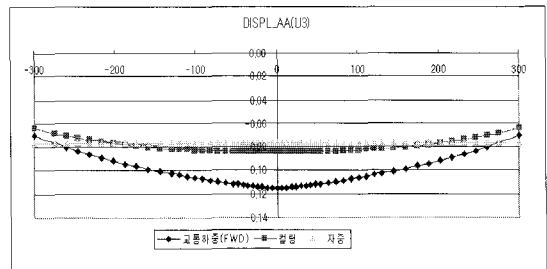


그림 20.  $\Delta T = -3^\circ\text{C}$  컬링에 의하여 발생한 슬래브의 처짐

그림 20은 negative curling인 슬래브 상하부의 온도차  $\Delta T = -3^\circ\text{C}$  컬링 모사 후 FWD 하중을 재하하여 발생한 슬래브의 처짐 추세를 보여준다. +3℃ 컬링의 경우보다 슬래브 중앙부에서 큰 처짐량이 발생하는 것을 알 수 있다. 자중에 의한 처짐 추세선보다 컬링이 발생했을 경우에 슬래브 중앙부에서 0.005cm 가량의 처짐이 더 발생했음을 알 수 있다. 그리고 FWD 하중이 가해진 경우에는 슬래브 중앙부에서 0.03cm 정도의 처짐이 컬링 변형에 더하여 발생한 것을 알 수 있다. 슬래브 전체의 변형이 하향 방향으로 발생하며 가장자리는 미미하게 이격되는 현상이 나타난다. 따라서 bottom-up 형태의 균열이 발생할 가능성이 더욱 커지는 것으로 판단된다. 그러



나 하중이 중앙부가 아니라 양 가장자리 측에서 재하된다면 슬래브 중앙과 가장자리 사이 지점의 슬래브 상부에서 인장 응력이 발생하여 top-down 형태의 균열이 발생할 수 있다. 따라서 슬래브의 균열 발생이 bottom-up인지 top-down인지는 컬링 형태에 따라 큰 영향을 받은 것으로 판단된다.

### 3.3 실측 컬링 모사

여기서는 실측 컬링 계측값을 조사하여 이를 구조 해석을 통해 모사하였다. 실측 컬링값을 동일하게 모사하기 위해 온도 조건을 변화하면서 최대 오차를 줄일 수 있도록 해석을 수행하였다. 이와 같은 해석을 수행하는 목적은 슬래브내에 온도 자료를 통하여 슬래브의 컬링을 예측하는 것은 영구컬링, 열팽창 계수, 계측기의 신뢰도 등 때문에 한계가 있기 때문이다. 따라서 하중 재하 당시 실측된 컬링을 동일하게 구조해석상으로 모사하고 하중을 재하하여 슬래브 거동을 분석하는 방법이 보다 정확도를 높일 수 있기 때문이다. 이와 같은 상관관계를 정립하면 시험도로에 매설된 컬링 계측값만으로 이와 동일한 거동을 구조해석상에서 표현할 수 있기 때문에 다양한 슬래브의 거동을 분석하는데 상당히 유용하게 이용될 수 있다. 본 논문에 적용한 초기 계측값는 컬링 계측 당시의 슬래브 온도 자료에 대한 자료가 미비하고 신뢰도 측면에서도 불안정한 측면이 있어 계측 당시의 슬래브 온도 조건과 비교 분석은 수행하지 않았다. 그러나 최근 실시되고 있는 시험도로 실험에서는 컬링, 변형률, 슬래브 온도가 동시에 측정되고 있기 때문에 이에 대한 비교 분석은 현재 진행 중에 있다.

각 슬래브의 컬링은 조사기간동안 최대 발생량이 아닌 평균 컬링을 모사하였다. 시험 당시의 실측된 컬링값을 적용하여야 하지만 신뢰도 측면에서 컬링 계측 결과가 가장 안정적이며, 일관성 있게 나타난 2003년 계측 결과를 바탕으로 해석을 수행하였다. J2, J5-2, J8 별로(A, B, C 슬래브) 각각 23, 14, 13일간 컬링 값 중 일일별로 최대 발생한 positive/negative

curling 값을 산출하고 이를 평균하여 각 슬래브별로 발생하는 평균 positive/negative curling 값을 산출하였다. 그림 21은 시험도로에 매설된 컬링 계측기 위치를 나타내며, 그림 22는 J2에 컬링 변위량을 계측한 결과로 슬래브 측면(슬래브와 길어깨 사이)에서 일정 간격으로 측정된 슬래브와 기층 사이의 깊이방향 변위량을 표현한 것이다<sup>3)4)</sup>.

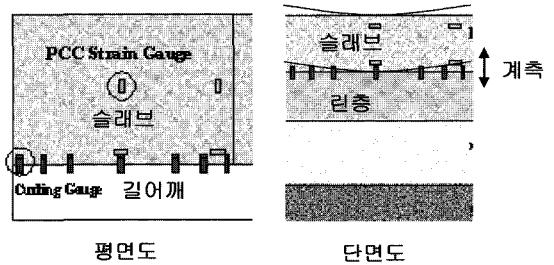


그림 21. 컬링 변위계 계측 매설 상태

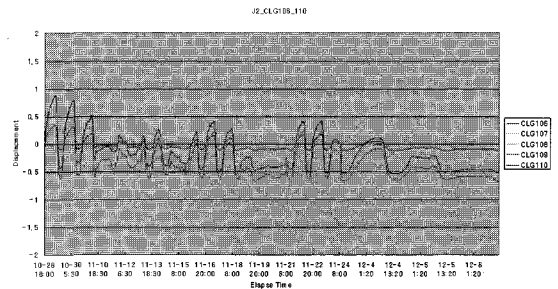


그림 22. 컬링 변위계 계측 예(J2)

초기해석을 통하여 각 두께별로 일정한 온도 하중을 설정하여 컬링 발생량을 산출한 다음 이를 회귀분석하여 어느 정도 수준의 온도 하중을 설정하였을 경우 계측값과 동일하게 컬링이 발생하는지 파악하였다. 실제 컬링 계측값은 하중의 영향과 깊이에 따른 온도차의 크기 때문에 슬래브 두께가 두꺼울수록 작게 나타나, 25cm 슬래브에서 가장 크게 발생되었고 35cm 슬래브에서 가장 작게 발생되었다. 또한 negative curling의 발생량이 positive curling의 발생량에 비해 5배가량 크게 나타났다. 이는 positive curling의 경우 최대 발생 위치(중앙부)가 아닌 슬래브 측면에서 계측하였기 때문이다. 시험도로의 컬링 변위계는 슬래브 측면에 매설되어 있기 때문에



positive curling의 경우 중앙부에서 발생하는 최대 발생 위치에서는 측정이 불가능하다. 따라서 positive curling의 실측값과 해석값 비교는 최대 컬링 발생 지점이 아닌 계측지점의 컬링을 비교하였다.

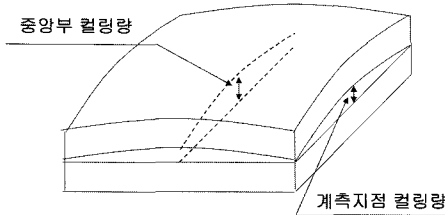


그림 23. positive curling 계측

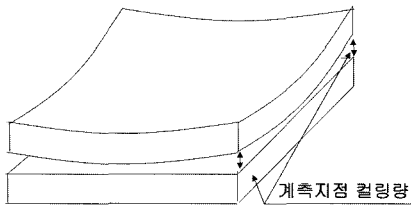


그림 24. negative curling 계측

실측값과 해석값 비교 결과 각 슬래브별로  $\pm 1 \sim 7\%$  정도의 오차(평균 4%)가 발생되어, 본 구조해석 방법론의 타당성을 확인할 수 있었다. 그러나 콘크리트의 경우 일반적인 열팽창 계수의 범위는  $9 \times 10^{-6} \sim 30 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 이지만, 본 해석에서는 평균 예측값  $10.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 를 적용하였기 때문 실제 슬래브의 열팽창 계수가 크다면 실제 온도보다 온도 조건이 크게 설정되었을 가능성도 배제할 수 없다<sup>1)</sup>.

표 3. 컬링 실측값과 해석값 비교

슬래브 두께	J2 (25cm)		J5 (30cm)		J8 (35cm)		
	실측	해석	실측	해석	실측	해석	
positive curling	계측지점	0.148	0.137	0.102	0.103	0.067	0.071
	중앙부		0.476		0.247		0.224
negative curling		0.683	0.671	0.781	0.732	0.500	0.487

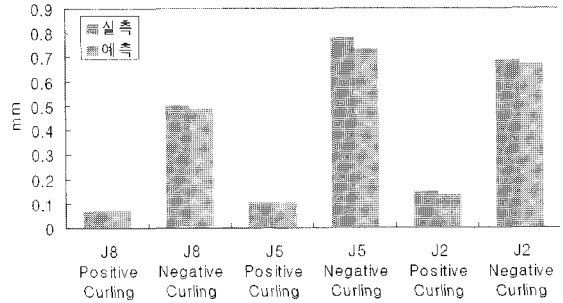


그림 25. 평균 컬링 실측값 및 예측값

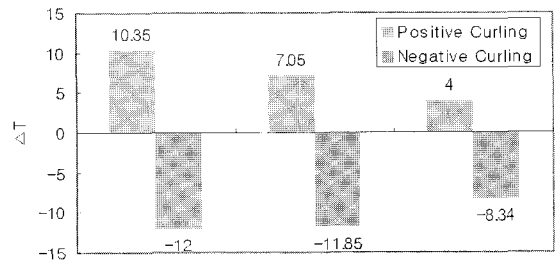


그림 26. 평균 컬링 발생시 슬래브 ΔT

그림 26과 같이 구조해석상에서 negative curling의  $\Delta T$ 가 Positive curling의  $\Delta T$  보다 크게 나타났는데 이는 영구컬링의 영향으로 판단된다. 이들 negative curling과 positive curling 사이에  $\Delta T$ 의 범위는 중간 값은  $-1.8$ 도로 중립인  $\Delta T$ 가 0도일 때에 비해  $-1.8$ 도만큼 negative curling이 존재했음을 의미한다. 이는 슬래브 포설 당시 기온 등의 환경 조건에 의해 형성되었던 영구컬링링 가능성이 매우 높다. 따라서 positive curling보다 negative curling이 높게 나타날 것으로 판단되며, negative curling 시 발생하는 슬래브의 지배 모드인 top-down 방식 균열이 발생될 가능성이 높다는 점을 의미한다. 그러나 negative curling 발생시에는 하부 린층의 중앙부에 모든 하중(슬래브+교통하중)이 집중되기 때문에 슬래브 자체의 변형보다 린층의 처짐으로 이어질 수 있다. 또한, positive curling 발생시에는 네 모서리 지점에서 하중을 분산하여 받아 하부층의 처짐보다는 슬래브 자체의 변형으로 나타낼 수 있다. 이 경우는 negative curling 보다 positive curling 발생이 적더라도 슬래브 자체는 positive curling에 의한



영향을 크게 받을 수 있음을 의미한다. 따라서, 24시간 계측(슬래브 온도 조건 계측 포함)과 슬래브 내에서 발생하는 응력 및 변형률을 분석하여야 보다 정확하게 판단할 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 포장 구조해석을 통하여 콘크리트 포장체가 보여줄 수 있는 거동을 다양하게 분석하였다. 연구 배경은 유한요소해석 결과와 시험도로의 계측 결과를 상호 비교 검증하여 유한요소해석의 신뢰성을 확보할 수 있다면, 계측기가 매설되지 않은 부분들에서 발생하는 포장의 거동을 유한요소해석으로 보완할 수 있고, 향후 연구의 영역을 시험도로에 시공되지 않은 단면 형태까지 확장할 수 있기 때문이다. 따라서 해석값을 시험도로에서 얻어진 변형률계 계측 결과와 비교하여 유한요소해석 결과의 정확성을 검토하였고, 계측 결과가 타당성을 가질 수 있는지의 여부도 판단해 보았다.

- 1) 콘크리트포장의 경우 슬래브에서 발생하는 변형률 분포는 유한요소해석을 통해 얻어진 예측값과 시험도로 현장의 실측값이 상당히 유사하여 보정 계수의 산정이 불필요함을 알 수 있었다. 초기 발생하는 영구컬링(permanent curling)이 포함된 복합적인 컬링을 영향으로 중립축에서 변형률이 0.0으로 나타나지 않았다. 린콘크리트 층의 변형률은 항상 유한요소해석의 예측값이 실측값에 비하여 상당히 크게 나왔다. 다른 층의 물성치를 인위적으로 변화시켜도, 린콘크리트층의 변형률은 현저한 변화를 보이지 않았다. 따라서 향후 이 부분에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.
- 2) positive 및 negative 컬링에 의하여 슬래브의 변형을 유한요소해석으로 모사했다. 컬링에 의한 콘크리트포장의 거동을 해석하기 위하여, 슬래브 상하에서 발생하는 온도 차이를 모사하여 유한요

소해석에 적용할 수 있도록 하였다. 컬링으로 발생하는 슬래브의 거동을 중심선 및 단부를 따라서 발생하는 처짐의 형태로 관찰한 결과, 향후 컬링 계측 결과와 결부하여 컬링 발생시 린콘크리트층과 슬래브의 분리여부 등을 판단할 수 있는 기법이라고 판단된다.

- 3) 각 슬래브별의 실제 컬링량 파악하고 이를 구조해석을 통한 모사(오차±4% 정도)하였다. 비교 분석 결과 모든 슬래브에서 negative curling 발생이 positive curling 발생보다 크게 발생하였고, 이들  $\Delta T$ 의 범위는 중간 값은 -1.8도로 중립인  $\Delta T$ 가 0도일 때에 비해 -1.8도만큼 negative curling이 존재했음을 의미한다. 이는 슬래브 포설 당시에 형성된 영구컬링으로 판단되며, top-down 균열이 보다 지배적으로 발생할 수 있다는 점을 의미한다. 그러나 보다 명확한 메커니즘은 추가적인 연구가 필요한 부분으로서 실제 컬링 계측 결과(24시간)를 고려하여 다각적인 분석이 필요한 부분이다. 온도 조건과 컬링 관련 계측값(변위량, 변형률)을 동시에 측정할 수 있다면 온도 변화에 대한 컬링 거동, top-down 및 bottom-up 균열 메커니즘 파악 등 다양한 후속 연구가 가능할 것으로 판단된다.

본 연구는 3차원 유한요소해석을 시험도로 계측 결과와 결부하여 향후에 다양한 연구를 수행할 수 있는 토대를 만들었다는 점에서 큰 가치를 부여할 수 있다. 좀 더 다양한 연구가 추진되고 이를 통하여 포장의 거동을 이해할 수 있는 토대가 형성되길 바란다. 또한 나아가 향후 콘크리트포장 설계나 유지보수 공법 개발에 큰 도움이 되길 희망한다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국도로공사 도로교통기술원 시험도로운영센터의 연구비 지원으로 이루어졌습니다. 본 논문의 지면을 통하여 감사의 말씀을 전달합니다. 또한 본 논문



에 저자로 이름이 등재되지는 않았지만, 시험도로 현장에서 실질적인 계측 과업을 수행하고 계측 결과를 제공 해준 TM E&C의 임직원 여러분께도 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

김연복 외, 2003, 한국형 포장설계법 개발 및 포장성능 개선방안 연구, 콘크리트포장 설계법 분야, 연구보고서, 건설교통부

김지원 외, 2002, 시험도로의 건설과 운영에 관한 연구, 연구보고서, 한국도로공사, 도로교통기술원

김지원 외, 2004, 시험도로 포장의 거동과 공용성 자료의 보정 및 분석 보고서, 한국도로공사, 도로교통기술원

김형배 외, 2003, 시험도로를 이용한 포장공용성 데이터뱅크 구축 및 포장수명주기비용 절감방안에 관한 연구, 한국도로공사, 도로교통기술원

최준성, 서주원, 김수일, 2004, 온도 및 응력 비선형을 고려한 아스팔트포장 구조해석 모형 개발, 한국도로학회 학술발표회논문집

*Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*, 2004, NCHRP

Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 1998, *ABAQUS Theory manual and users manual*

Kim, Jiwon, 2000, Three-dimensional Nonlinear Finite Element Analysis of Multi-layered System, *Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign*.

Michael I. Darter 외, 2005, *Curing PCCP in California Heat*, Applied Research Associates, Inc

접 수 일 : 2006. 7. 27  
 심 사 일 : 2006. 8. 2  
 심사완료일 : 2007. 1. 5