



유한 요소법을 이용한 줄눈 콘크리트 포장 응력식 개발

Development of Stress Equations of Jointed Concrete Pavement using Finite Element Method

정길수*
Jung, Kil Su

김인태**
Kim, In Tai

류성우***
Ryu, Sung Woo

조윤호****
Cho, Yoon Ho

Abstract

A pavement structure analysis model plays a very important role which can correlate input variables to performance models. In this research, a standard shell element model was developed by use of the ABAQUS program so that behaviors of concrete pavements be analyzed. The model was verified in terms of its accuracy by way of comparing the results to those gathered from closed-form Solutions, the Everfe program, and the ABAQUS program with a solid model. Many input variables were analyzed in the model, and the results were stored in a database. Based on the SPSS program, stress equations with respect to temperature and curling effects were developed. All models gave over 0.90 of R2 value except the case considering top-down curling (R2=0.86)

Keywords : shell , ABAQUS, stress equation, temperature stress, bottom-up stress, top-down stress, traffic stress

요 지

한국형 포장 콘크리트에 있어 구조해석은 다양한 입력변수와 공용성 모형을 연결해주는 중간 매개체 역할을 하고 있어 그 중요도가 매우 크다. 본 연구에서는 ABAQUS 구조해석 프로그램을 Shell요소를 이용하여 콘크리트 포장의 거동을 분석할 수 있는 구조해석 기본 모형을 구축하였다. 이 모형을 Closed-Form Solution과 정확성이 검증된 Everfe 프로그램, 그리고 Solid 요소 모형과 비교하여 정확도를 검증하였다. 기본 Shell 모형을 이용하여 다양한 변수에 대한 구조해석을 수행하였으며 그 결과를 DB화 하였다. SPSS 통계 프로그램과 해석 결과를 바탕으로 회귀식을 개발하였으며 온도 응력, 상향 응력, 하향 응력을 산정할 수 있는 응력식을 제안하였다.

핵심용어 : 셸 요소, ABAQUS, 응력식, 온도 응력식, 하향 응력, 상향 응력, 교통 응력

* SK 건설 토목기술팀· 02-816-0251 (E-mail : ungiloo@hotmail.com)
 ** 정회원· 명지대학교 교통공학과 조교수· 031-330-6505 (E-mail : kit1998@hotmail.com)
 *** 정회원· 중앙대학교 건설환경공학과 박사과정· 02-816-0251 (E-mail : htsrsw@naver.com)
 **** 정회원· 중앙대학교 건설환경공학과 정교수· 02-816-0251 (E-mail : yhcho@cau.ac.kr)



1. 서론

유한요소법(FEM)은 연속체로 정의되는 복잡한 형상을 유한요소라는 간단한 기하형상의 집합으로 이산시킨 후, 하중과 구속조건을 적절하게 고려하여 거동분석을 위한 방정식을 구하고 이 방정식을 풀어 연속체의 반응을 근사적으로 해석하는 방법이다. 특히 응력-변형률 관계의 비선형성과 동적 특성 및 크리프 현상과 같은 시간 의존성을 고려할 수 있는 장점이 있다. 유한요소법은 1940년대에 항공기 구조해석의 탄성체 문제를 풀이하는 과정에서 처음으로 나타났으며, 1950년대에 강성행렬이 유도되면서 급속히 체계화되었다.

콘크리트 포장에서의 유한요소해석은 1960년대부터 연구가 진행되었으며 1977년 일리노이대학에서 유한요소개념을 도입한 최초의 콘크리트 포장 구조해석 프로그램인 ILLISLAB이 개발되었다. 그 후 WESLIQID, JSLAB, KENSLABS, Everfe 등 다양한 프로그램들이 개발되어 사용 중이다. 최근에는 ABAQUS, SAP, ANSYS 등 유한요소법을 활용한 많은 범용 프로그램들이 개발되어 콘크리트 포장의 구조해석에 많이 사용되고 있다.(중양대학교, 2005)

2. 연구 수행 목적 및 내용

현재 국내에는 외국의 EVERFE나 ILLISLAB같은 콘크리트 포장 해석 전문 프로그램은 없는 상태이다. 그렇지만 범용 유한요소 해석 프로그램 중 하나인 ABAQUS를 이용하여 포장을 해석할 수 있다. ABAQUS 프로그램은 토목분야를 포함한 다양한 분야에 사용되고 있는 정확도가 높은 유한요소 해석 프로그램이다. 본 논문에서는 ABAQUS를 이용하여 줄눈 콘크리트 포장의 환경에 대한 영향을 반영할 수 있는 모형을 개발하였다.

기존의 연구 결과를 통하여 합리적이라고 판단되는 모형인 하부 스프링 Shell모형, 하부 Foundation Shell모형, 3차원 하부 스프링 모형, 3

차원 하부 Solid모형을 구성하여 각각의 장단점을 분석한 후 온도, 하중 등 다양한 환경에 대한 영향을 평가하였다. 다양한 모형에 대하여 일반적인 물성값을 이용하여 줄눈 콘크리트 포장을 평가하는데 적합한 모형을 선정 후 Closed-Form solution과의 온도 및 교통하중에 대한 결과를 비교하고, 콘크리트 포장 유한요소 프로그램 중 하나인 EVERFE3.22를 이용하여 개발된 모형의 해석결과와 비교하여 검증하였다. 마지막으로 줄눈 콘크리트 포장의 다양한 변수를 이용하여 다양한 경우에 대한 분석을 실시하여 회귀식을 도출하였다.

3. 줄눈 콘크리트 포장 Shell 모형의 구성

줄눈 콘크리트를 유한요소를 사용하여 해석하는 모형에는 여러 가지가 있다. 하지만 다양한 경우에 대한 해석을 수행하여 결과를 비교 분석해야 하는 시간적 제약 때문에 본 연구에서는 Shell 모형을 이용하여 분석하였다.

<그림 1>은 Shell을 이용한 3차원 모형을 나타내고 있다. Shell 요소는 상대적으로 두께가 길이 방향에 비하여 얇을 경우 사용한다(ABAQUS Manual). 하부층을 묘사하는 방법에 따라 Shell요소를 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 일반적으로 ABAQUS상에서 지반을 묘사하는 요소로 지정해 놓은 요소인 Foundation요소를 사용하는 모형과, 스프링으로 묘사하는 모형으로 나눌 수 있다. Foundation요소를 사용할 경우 지반의 강성치를 정의 할 수 있으며 일반적인 흙의 메커니즘을 따라서 활동하게 된다. Spring요소로 노상을 묘사할 경우에도 강성치로 정의할 수 있다. 차이점은 스프링 요소를 사용할 경우 메쉬의 세분화 과정에 따른 스프링 계수를 설정하는 것이 어렵다. 때문에 같은 계산을 요구할 경우 비슷한 정확도에서 시간이 많이 걸릴 수 있다.

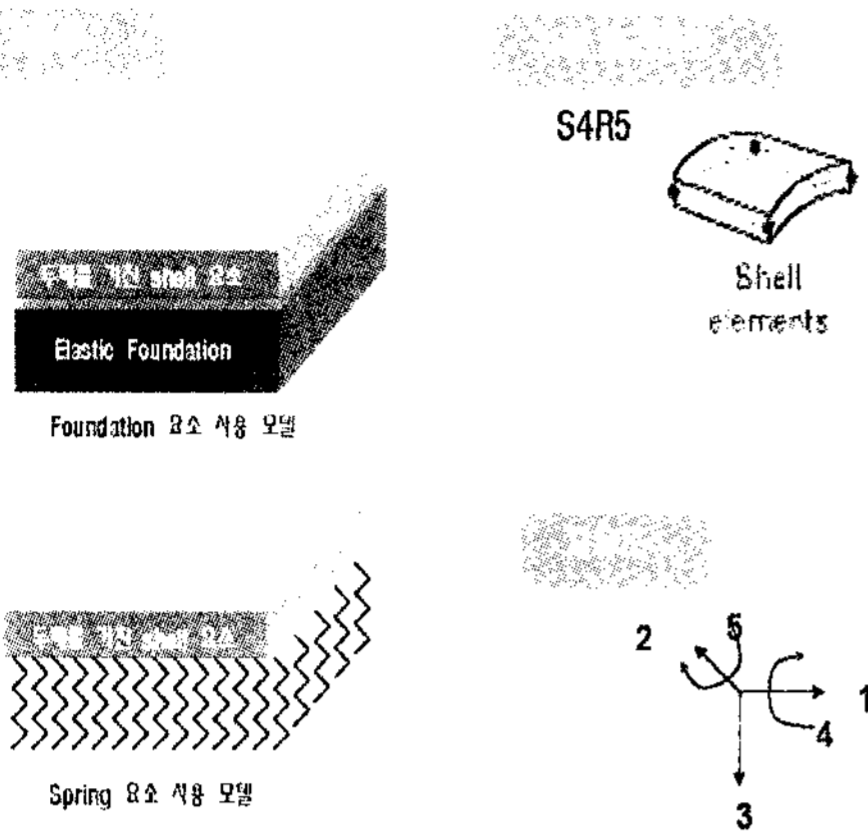


그림 1. Shell을 이용한 3차원 모형

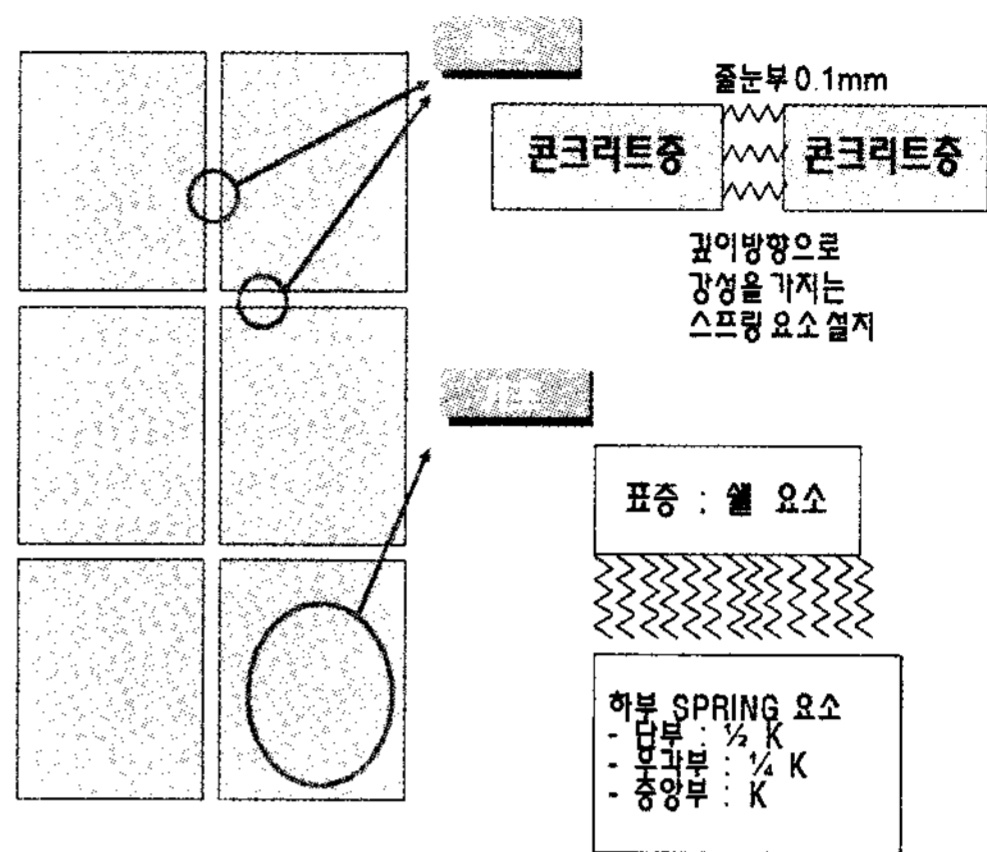


그림 2. 줄눈 콘크리트의 Shell 모형

하지만 Foundation 요소의 경우 하부와 상부층의 부착정도를 나타낼 수 없이 단순히 ABAQUS 상에서 지정된 값만 사용할 수 있는 반면에 Spring 요소를 사용할 경우 이에 대하여 깊이방향을 제외한 방향의 강성치를 조정함으로써 축방향에 대한 저항성을 정의할 수 있다. 분석에 사용되는 요소는 S4R5이다. S4R5 요소는 4개의 노드를 가지며, 각각의 노드에 대하여 5개의 자유도를 가지는 요소이다.

Shell 요소를 사용한 모형의 경우 상대적으로 Solid 요소를 사용한 3차원 모형에 비하여 상대적으로 빠른 해석의 장점이 있는 반면에 하부구조의 세밀한 묘사가 어렵기 때문에 일반적으로 하부구조의 강성을 아는 경우의 콘크리트 포장만 해석이 가능하며, 새로운 물질로 하부구조를 구성하였을 때 적용하기는 어려운 면이 있다.

<그림 2>는 줄눈 콘크리트 포장 해석 모형의 구성을 나타내고 있다. Shell 요소를 모델에 사용하였으며 줄눈 부에는 LTE(Load Transfer Efficiency : 이후 LTE)에 따른 영향을 분석하기 위하여 깊이방향으로 강성을 가지는 스프링 요소를 설치하여 스프링 강성치에 따라 LTE의 값을 조정할 수 있도록 하였다. 하부구조는 스프링 요소로 구성하여 스프링 강성치를 변화시켜 기초 지지력 계수를 표현하였다.

3.1. 슬래브 하부의 교통 하중 응력 모형

3.1.1. 하중위치에 따른 응력 분석

<그림 3>은 콘크리트 슬래브 위에 하중이 놓일 가능성이 있는 교통하중의 위치 및 그에 따른 최대 하부 응력값에 대한 그림이다. 1번과 2번 그림의 경우 교통하중의 위치에 따른 최대응력의 변화를 나타내고 있다. 트럭의 후륜 하중이 중앙부에 올수록 응력이 커짐을 알 수 있다. 3번 경우가 가장 큰 하부응력을 나타냈다. 3번의 경우 타이어 2개로 10ton의 하중을 분배하는 형태이며, 듀얼타이어의 경우 2개의 타이어에 하중이 분산되기 때문에 듀얼 타이어 싱글축보다는 싱글타이어 싱글축에서 더 큰 응력이 발생하였다. 이는 그림 3번과 11번을 비교하면 알 수 있다. 3, 4, 5번을 비교해보면 줄눈부에서 하중이 멀어질수록 응력이 줄어드는 것으로 나타났다. 슬래브 하부에 대하여 최대 응력이 발생하는 교통하중의 위치를 판단한 결과 3번의 경우가 가장 큰 응력값을 가지는 것으로 나타났다. 즉, 듀얼 타이어 싱글축, 듀얼 타이어 탠덤축, 싱글 타이어 싱글축 등에 대하여 같은 축응력에 대하여 가장 큰 응력을 가지는 경우는 싱글타이어 싱글 축으로 판단할 수 있으며 각 타이어 모두 슬래브 중앙에 위치할 경우 가장 큰 응력을 발생시키는 것으로 나타났다.

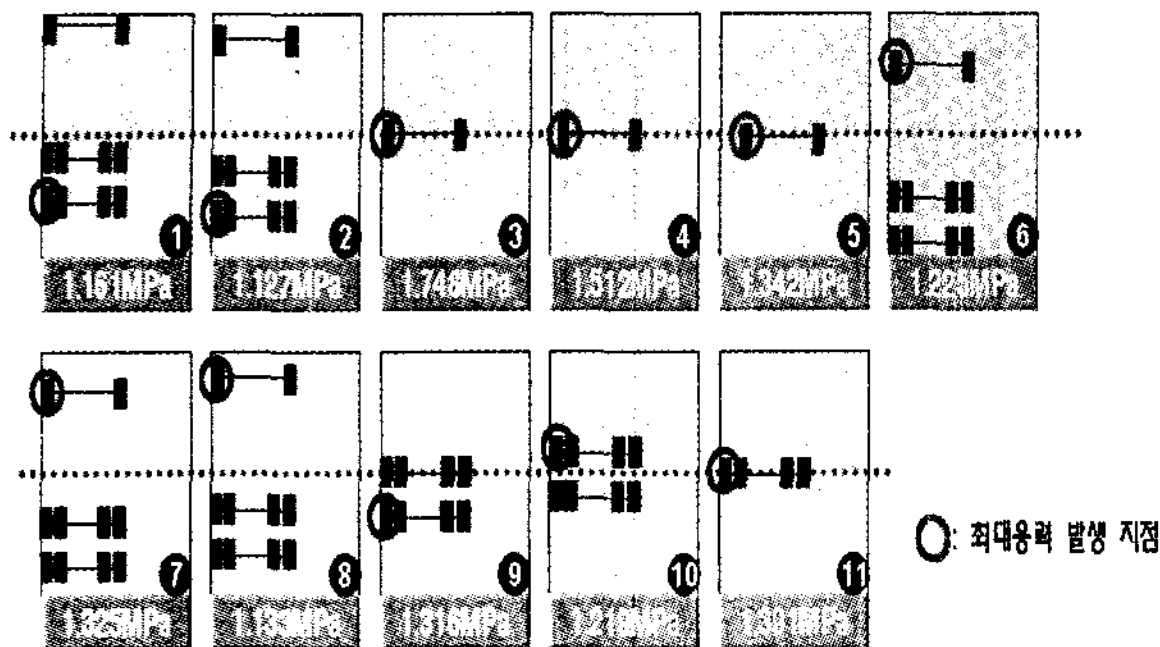


그림 3. 교통하중의 위치에 따른 최대응력 값

3.1.2. 슬래브 길이 및 LTE에 따른 영향 분석

보통 줄눈 콘크리트 포장의 경우 국내는 슬래브 크기가 6m정도이다. 슬래브 폭은 동일하게 3.6m로 고정하고 길이를 4m, 6m, 8m로 변화시켜 이에 따른 영향을 살펴보았다. 하중의 위치의 경우 하중의 위치 분석 시에 가장 큰 응력이 발생하였던 3번의 경우를 두고 계산하였다. 그 결과 <그림 4>의 좌측 그림과 같이 슬래브 길이 변화에 따라 교통 하중에 의한 하부응력에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

<그림 4>의 우측 그림은 LTE의 영향에 따른 슬래브 길이별 하부 응력의 최대값을 나타내고 있다. 슬래브 길이가 4m정도일 경우 LTE에 따라 다소 차이가 있지만 큰 영향을 미치지 않는 것으로 알 수 있다. 또한 다웰바를 사용하는 일반적인 콘크리트 포장의 경우 LTE의 값이 70%이상으로 측정되기 때문에 LTE에 대한 영향은 무시할 만한 수준이라고 할 수 있다.

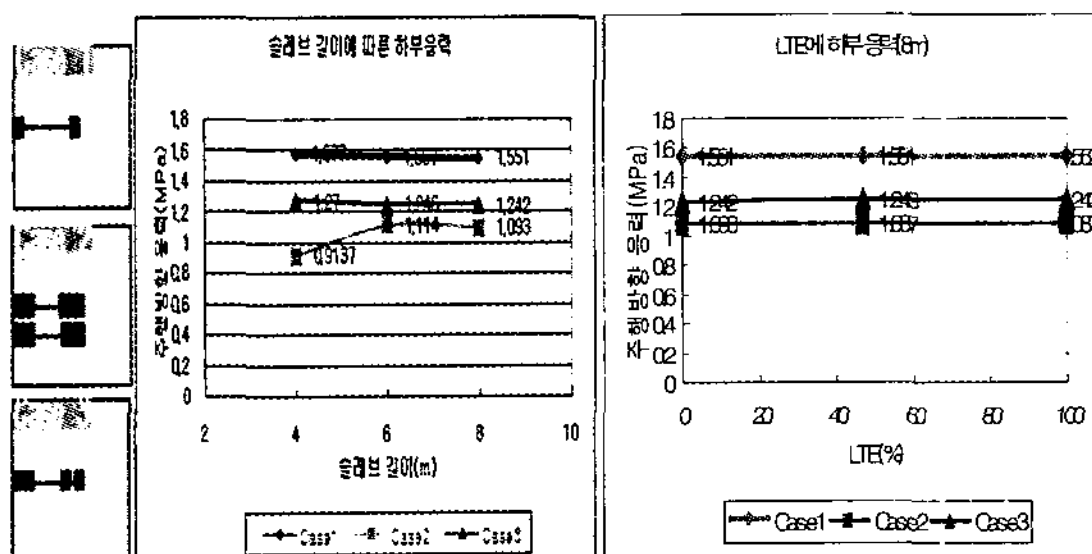


그림 4. 슬래브 길이 및 LTE 에 따른 하부 응력

3.1.3. 교통 하중에 따른 응력 분석

국내의 교통 축하중의 제한은 10톤이지만, 고속도로를 제외하고는 과적차량의 단속이 미비한 관계로 10톤을 넘는 차량도 다수 다니게 된다. 때문에 축하중 5톤, 10톤, 15톤에 대하여 계산한 결과, 교통 하중 크기가 변할수록 이에 따라 선형적으로 하부응력이 변화하였다.

3.2. 슬래브 상부의 교통 응력모형

3.2.1. 슬래브 상부 최대 응력 지점 선정

(가) 교통하중의 종류에 따른 최대 상부 응력
슬래브 상부에 최대 응력이 발생하는 지점을 선정하기 위하여 교통하중의 여러 조합을 이용하였다. 전축과 후축의 거리는 차량의 종류에 따라 다양하다. 축거리가 3.2m부터 한 개의 슬래브에 모두 재하되는 거리인 5.8m까지 분석하였다.

<그림 5>는 다양한 교통하중이 재하된 상태에서 발생하는 최대 응력을 분석한 값이다. 1번부터 4번 경우까지 분석결과 축간거리는 응력을 분석하는데 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 축간거리가 짧을수록 큰 응력이 발생하였지만 최대 거리에 비하여 큰 차이는 나타나지 않았다. 축이 3개인 곳에서 큰 응력이 발생하였으며 축이 2개로 줄어드는 5번 경우는 응력이 다소 줄어드는 것으로 나타났다. 6번과 7번의 경우 싱글타이어 싱글축 두개 및 듀얼타이어 싱글축 두개가 1.2m, 3.2m의 축간거리로 위치하는 차량에 대하여 분석하였다. 그 결과 다른 경우에 비하여 작은 응력을 나타냈다. 8번의 경우는 길어깨로부터 일정거리 떨어진 교통하중에 대하여 분석한 결과 다소 적은 응력을 나타냈다.

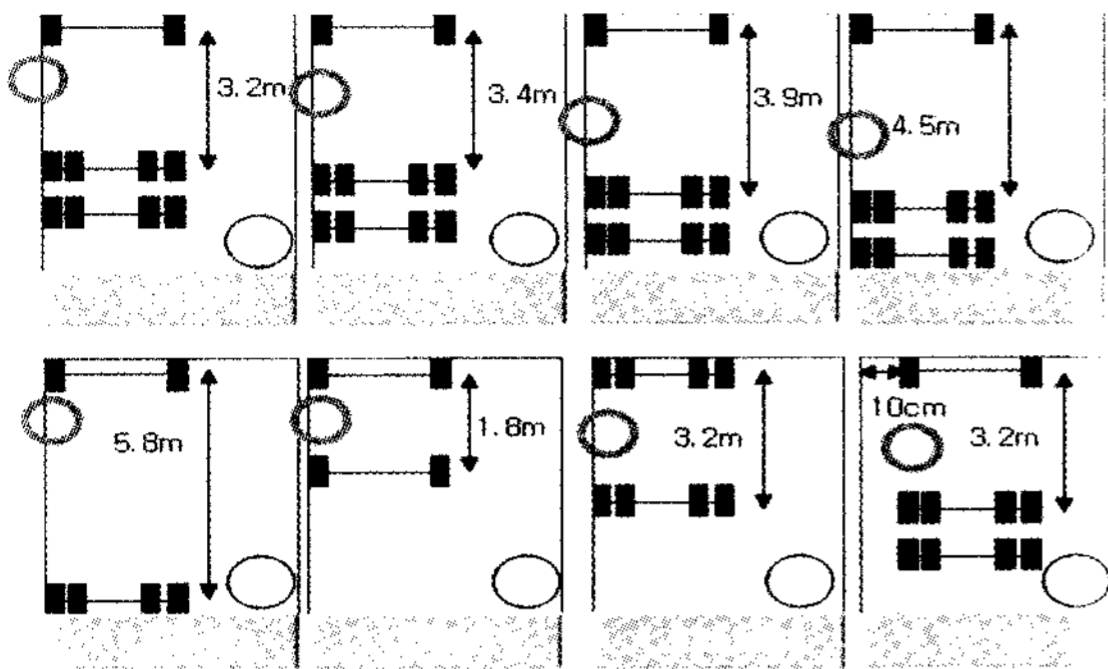


그림 5. 최대 상부 응력 분석을 위한 교통하중 위치 선정 및 최대응력 발생 지점

(나) 교통하중의 위치에 따른 최대 상부 응력

온도하중에 의하여 슬래브 상부에 최대 응력이 발생하는 시점은 저녁부터 새벽 시간대이다. 이 시간에는 슬래브 상부는 하부에 비하여 온도가 더 낮게 되어 수축하고 하부는 온도가 높아 팽창하게 된다. 이 때 자중의 영향으로 상부에는 인장응력이 발생하게 되고 동시에 교통하중이 슬래브 중앙의 사이에 위치하게 되면 슬래브 중앙부에 최대 인장 응력이 발생한다. 이렇듯 슬래브 상부에 발생하는 최대 응력은 교통하중과 온도의 영향을 동시에 고려해야한다. 분석에 사용된 교통하중은 축하중 10톤, 싱글타이어 싱글축과 탠덤축과의 축거 3.2m, 온도는 슬래브 상하부 온도차를 10도로 설정하여 계산하였다.

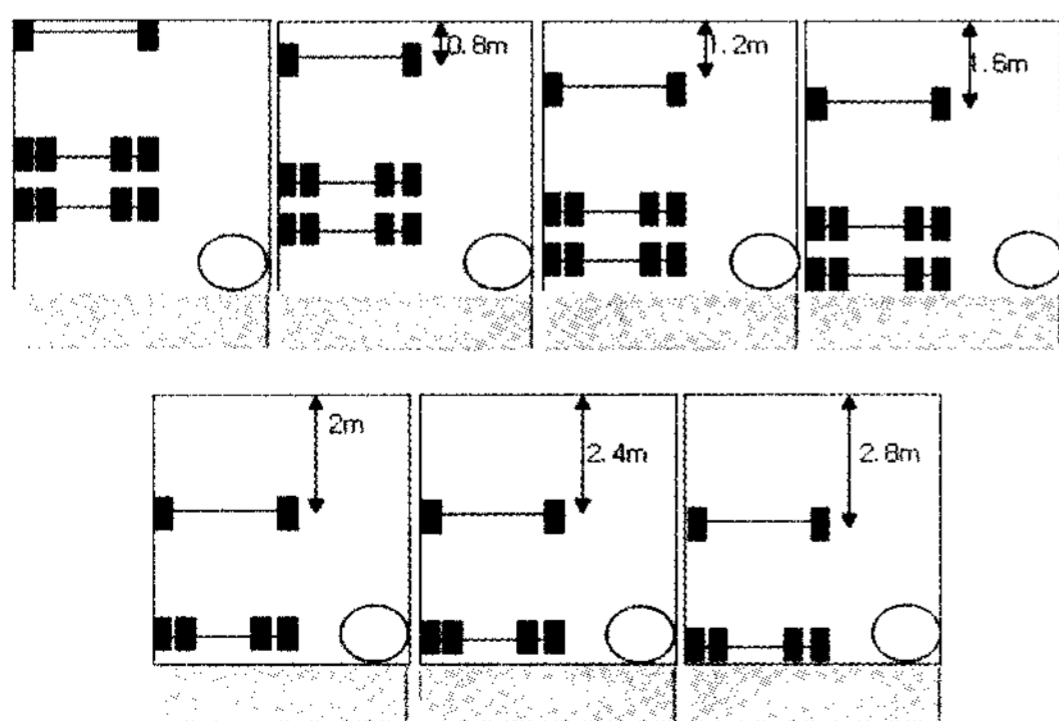


그림 6. 교통하중 위치에 따른 상부응력

<그림 6>은 교통하중의 위치를 다양하게 변경

하여 각각에 대한 상부의 최대응력을 계산할 때 사용한 하중의 위치 및 최대응력 분석 결과를 보여준다. 계산 결과 4번의 위치에 하중이 있을 경우에 가장 큰 응력이 발생하는 것으로 나타났지만, 1~4번의 경우 모두 오차범위 10%이내였다. 상부 응력의 최대 응력값은 하부 최대 응력의 약 70%정도 수준인 것으로 나타났다.

(다) 슬래브의 길이 및 LTE의 영향

하부에 발생하는 응력의 경우는 슬래브의 길이와 상관없이 비슷한 응력값을 가지게 되지만 상부에 교통하중으로 인하여 작용하는 응력의 경우 하중 재하점에 따라 발생하는 복합 거동에 인하여 슬래브의 길이가 길어질수록 상부에 작용하는 응력이 작아지게 된다. <그림 7>은 슬래브의 길이에 따른 교통하중의 영향을 나타내고 있다.

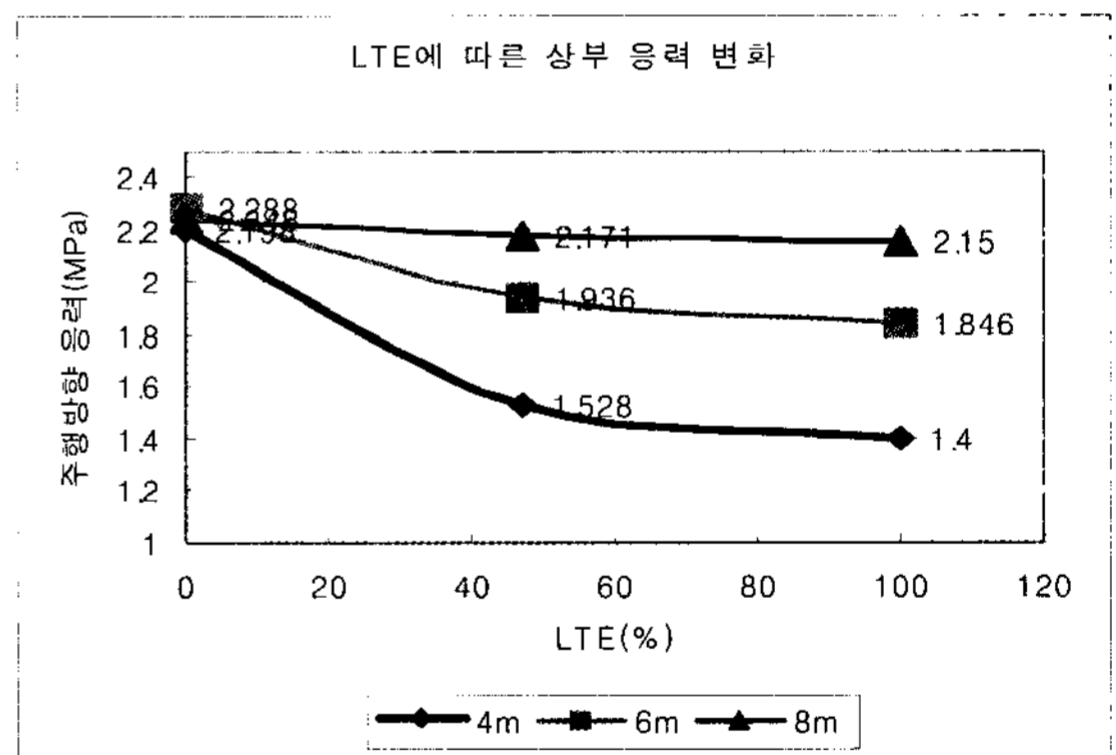


그림 7. 슬래브 길이 및 LTE에 따른 상부응력 변화

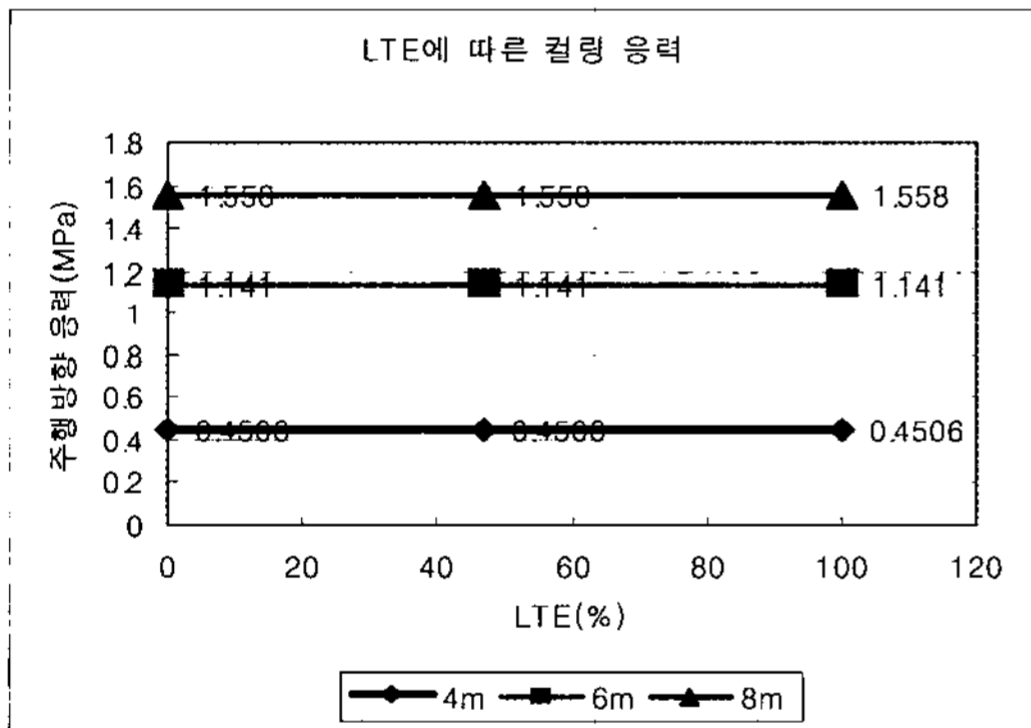
교통하중은 슬래브 길이 4m일 경우 슬래브의 양 끝에 위치하는 것으로 분석하였으며, 6m와 8m슬래브에 대해서는 슬래브의 중앙부에 축거 3.2m의 교통하중이 위치하는 것으로 분석하였다. 온도하중과 합쳐질 경우 중앙부에 교통하중이 재하될 때 가장 큰 상부응력이 발생하기 때문이다.

<그림 7>을 LTE 변화에 따라 분석하면 일반적인 다웰바를 설치한 줄눈 콘크리트의 경우 LTE의 값이 70% 이상을 나타내기 때문에 70~100%의 LTE에 따른 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

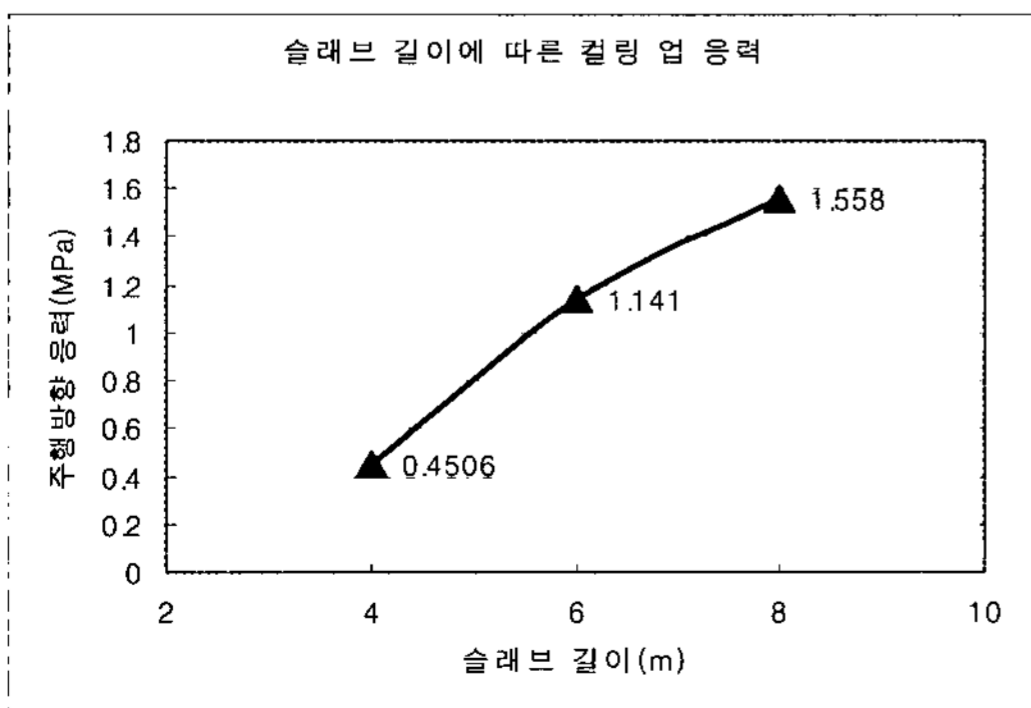


3.3. 온도 하중에 대한 영향 분석

온도 하중에 대한 분석을 하기에 앞서서 LTE의 영향에 따른 온도하중의 영향을 분석하였다. Shell 요소에 선형 스프링이 연결된 모형은 온도 차이의 절대값이 같다면 컬링 업되었을 때와 컬링 다운되었을 때의 응력이 동일하다. 따라서 상하부 온도 차이를 10도로 설정하여 온도구배가 0.3°C/cm로 설정하여 계산하였다. 해석 결과, 슬래브 모두 최대값은 동일한 값이 슬래브의 중앙부 양 끝에 발생한다. <그림 8>은 4, 6, 8m 슬래브에 대하여 LTE를 변화시켜 그 결과를 계산한 결과이다. LTE 값에 관계없이 컬링응력은 항상 일정한 값을 나타내었다. 즉, LTE값과 컬링응력 값은 무관하다는 것을 알 수 있다.



<그림 8> LTE에 따른 컬링 응력



<그림 9> 슬래브 길이에 따른 컬링 응력

<그림 9>는 슬래브 길이에 따른 컬링 응력을 나타내고 있다. 슬래브 길이가 길어질수록 컬링응력이 커지는 것을 알 수 있다. 4m슬래브와 동일 조건을 가진 8m슬래브의 경우 컬링응력이 3배 이상 크게 나타남을 알 수 있다. 때문에 줄눈 간격을 작게 할수록 컬링응력이 줄어들게 되는 것을 알 수 있다.

또한 슬래브 상하부의 온도 차이를 5도, 10도, 15도로 변화시켜 계산한 결과, 상하부 온도차이가 적을 경우 슬래브 길이는 응력값에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 계산되었다. 그렇지만 상하부 온도차이가 커지면 커질수록 선형으로 증가하기 때문에 8m의 경우 4m슬래브에 비하여 최대 응력값이 약 4배정도 커지는 경우도 있었다.

3.4 Tensionless 스프링을 이용한 교통하중과 온도하중의 해석

최대응력 발생지점을 구하기 위하여 온도하중과 교통하중을 조합할 필요가 있다. 온도하중과 교통하중이 조합될 경우 포장 슬래브 내부의 응력이 더 커질 수도 있기 때문이다. 따라서 교통 축하중 크기를 10톤, 온도구배를 상하부 온도차이를 ±10도°C로 설정하여 이를 동시에 유한요소해석에 적용하여 응력을 비교하였다. 일반적으로 Tensionless 스프링을 이용하여 포장 구조를 해석하는 것이 실제를 보다 정확히 모사할 수 있기 때문에 이를 근거로 평가하였다.

<그림 11>은 기초를 Tensionless 스프링과 일반 선형 스프링을 사용하여 해석하였을 때 얻어진 결과값을 줄눈부로부터 0~600cm까지의 응력 분포에 대해 도시화 것이다. Tensionless 스프링을 이용하여 교통과 온도를 각각 계산하여 더한 값(Tensionless 스프링값)은 교통과 온도를 동시에 재하하여 해석하는 값(Tensionless FEM : 현실적인 하중재하상태)에 비해 저평가 되는 경향이 있다. 하지만 Linear 스프링을 이용하여 교통하중과 온도하중을 각각 계산하여 더한 결과와 비교를 할 경우 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 수치상으로

도 교통하중이 10톤, 온도하중이 10도일 경우 약 99.98%의 정확도를 보였다. 때문에 온도하중과 교통하중을 각각 계산한 후 이를 더한다면 같이 계산하는 결과와 동일한 결과를 얻을 수 있으며, 이 값을 사용하여 해석 할 경우 콘크리트 슬래브의 거동을 분석하는 데 필요한 경우의 수를 상당히 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

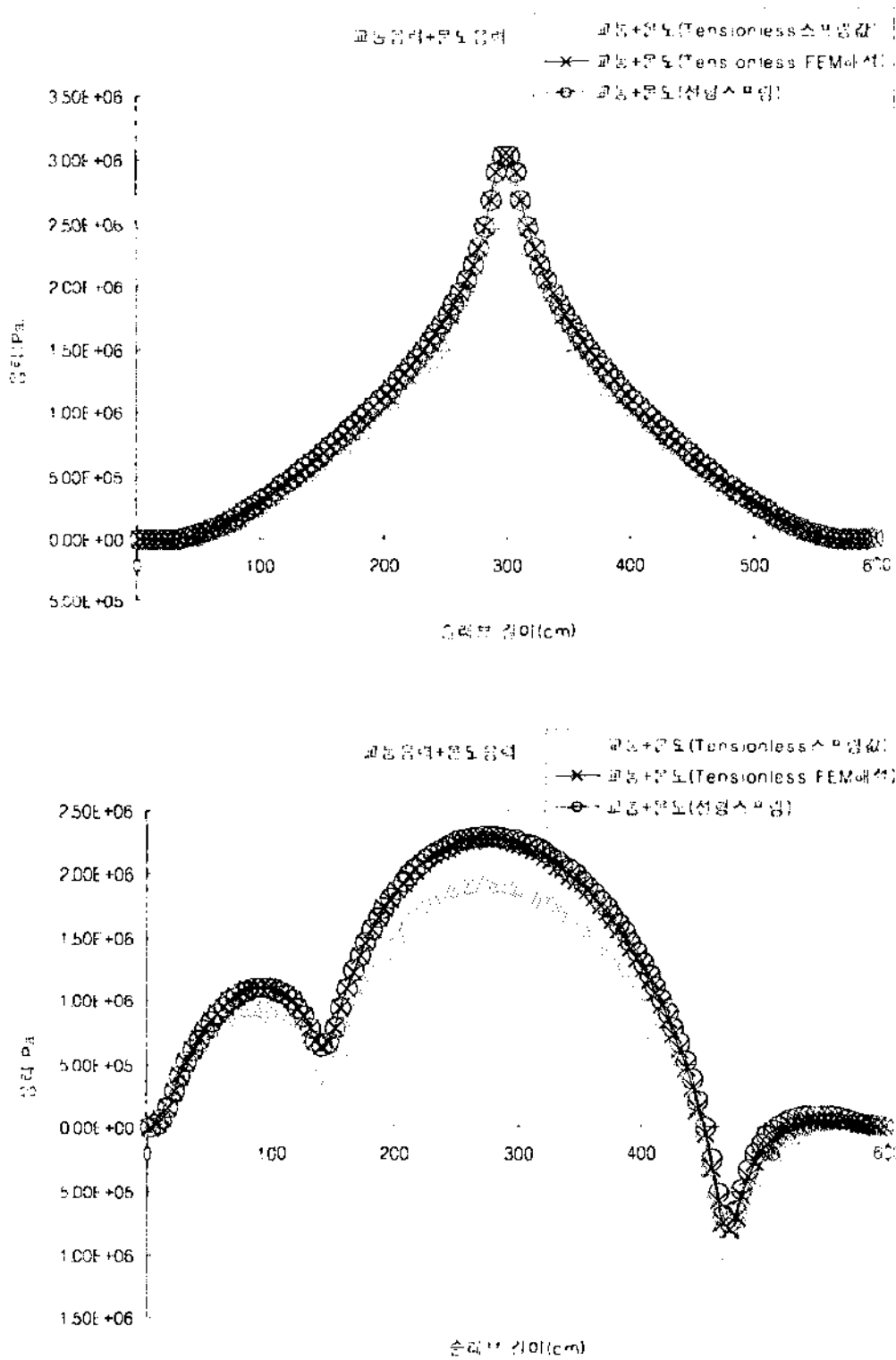


그림 11. Tensionless 와 Linear 스프링 해석 결과 값의 비교 (좌 : 컬링 다운, 우 : 컬링 업)

4. 모형의 비교 및 검증

4.1. Closed-form Solution과의 비교

기존의 Closed-form Solution과 비교를 통하여 본 연구를 통하여 개발하는 모형의 정확도를 판단하였다. Closed-form Solution의 경우 하부응력을

구하는 공식만 있기 때문에 하부응력을 본 연구에서 제시한 모형에서 예측한 결과와 Closed-form Solution의 계산 결과를 비교하여 모형의 정확도를 검증하였다.

4.1.1. 교통 하중 비교

교통 하중 관련된 Closed-form Solution에는 여러 방법들이 있다. 그 중 최근에도 단부응력 해석에 많이 사용되고 있는 Ioannides 공식은 1985년 유한요소법을 이용하여 계산한 결과를 바탕으로 Westergaard식을 수정하여 <식 1>을 개발하였다.(Yang H. Huang, 2004) 줄눈부에서 하중이 재하되는 응력의 경우 단부응력이라고 할 수 있기 때문에 Ioannides가 제안한 식과 비교하였다.

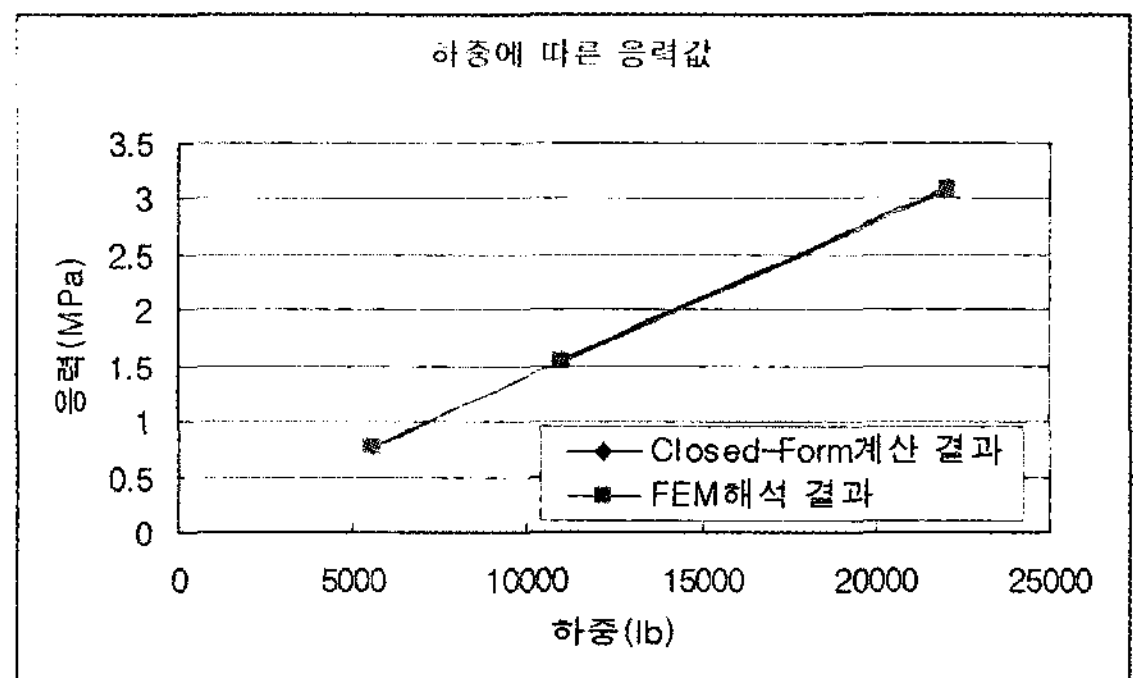
$$\sigma = \frac{0.803P}{h^2} \left[4 \log\left(\frac{l}{a}\right) + 0.666\left(\frac{a}{l}\right) - 0.034 \right]$$

$$\Delta = \frac{0.431P}{kl^2} \left\{ 1 - 0.82\left(\frac{a}{l}\right) \right\}$$

(식 1)

여기서, P=하중(lb), a=하중 반경(in)

$$h = \text{슬래브 두께(in)}, l = \left[\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k} \right]^{0.25}$$



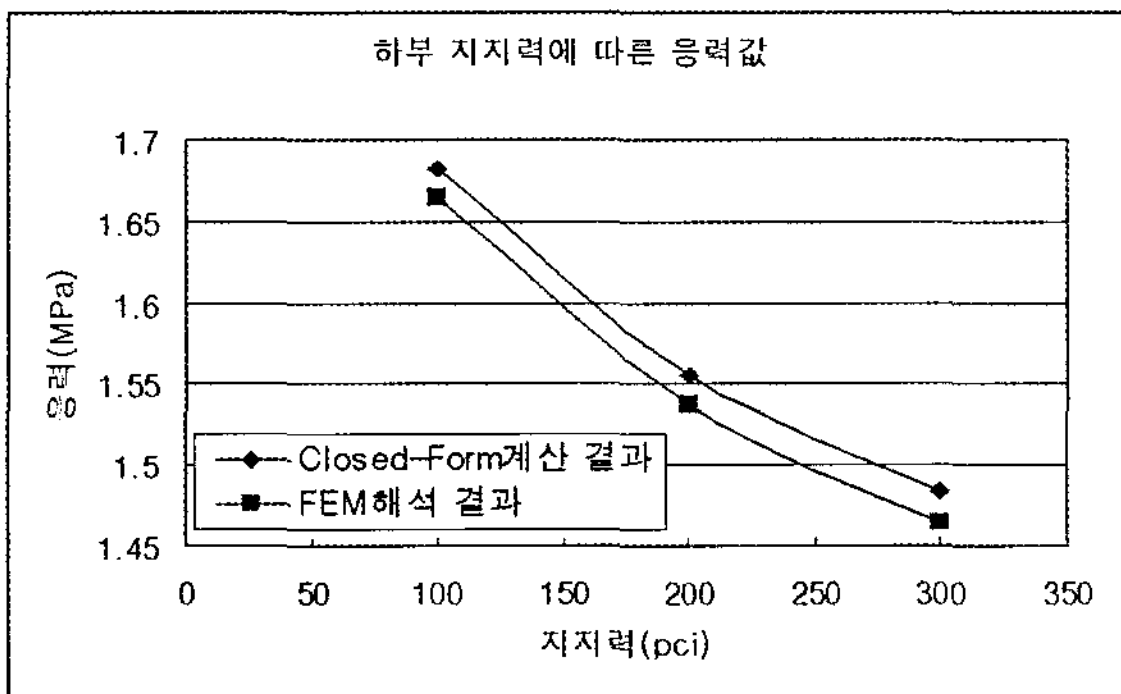
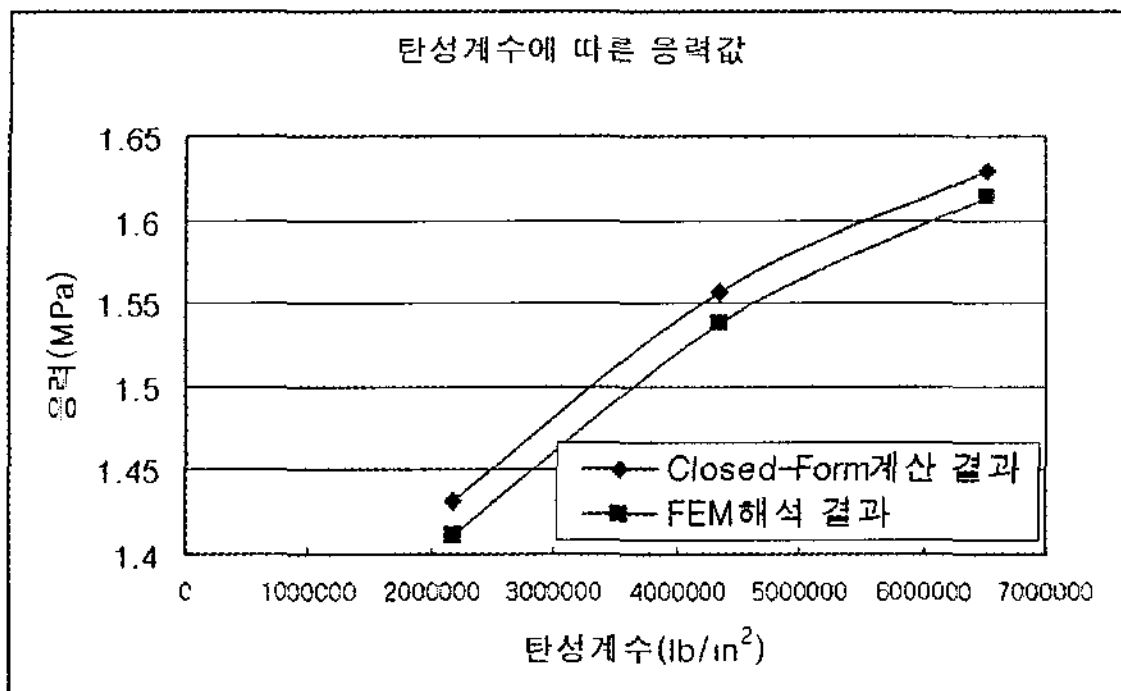


그림 12. Closed-Form Solution과 유한요소해석 결과의 비교(하중, 탄성계수, 하부지지력)

하중반경은 유한요소해석에는 정사각형으로 해석을 하기 때문에 이를 원으로 변형하여 동일한 해석이 되도록 변환하였다. <그림 12>는 Closed-Form Solution과 유한요소해석으로 예측된 응력값을 비교한 것이다. 하중, 탄성계수, 하부지지력 계수를 변화시켜 그 결과를 비교하였다. 비교한 결과 유한요소 해석법을 이용하여 예측한 응력값이 Closed-Form Solution에 비하여 다소 작게 계산되었으나 그 값은 Closed-Form Solution의 계산값을 기준으로 98%범위 내에 있는 것으로 나타났다. 교통하중에 대하여 해석할 경우 Closed-Form Solution과 2%정도의 차이가 있는 것으로 나타났다.

4.1.2. 온도 하중 비교

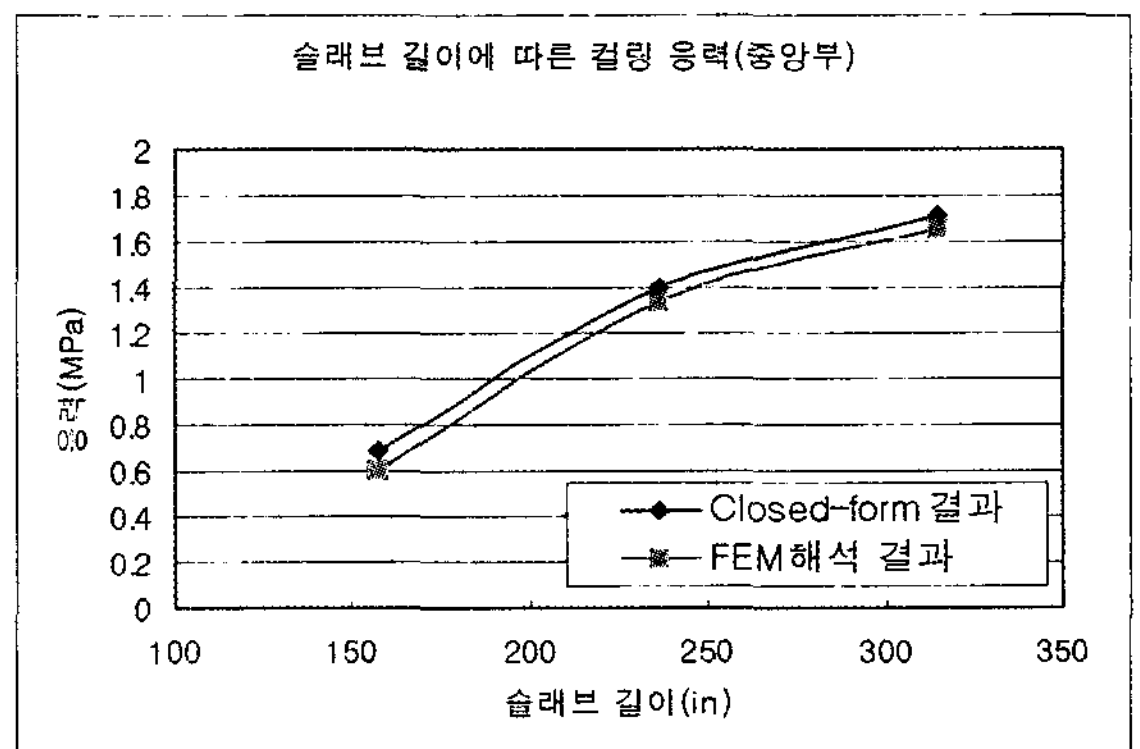
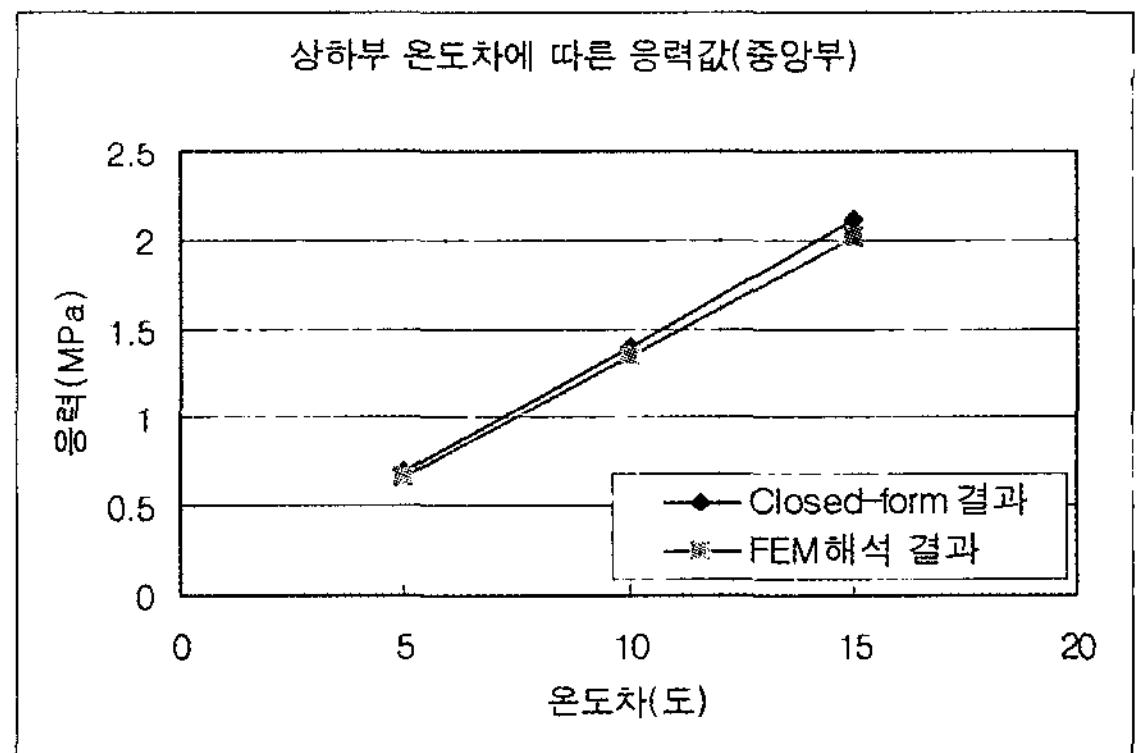
Closed-Form Solution 공식 중 환경하중을 반영하여 해석할 수 있는 공식으로 Bradbury가 제안한 식이 있다. 이 식을 이용하여 슬래브 상하부의 온

도차이가 발생할 경우에 대하여 발생하는 응력을 계산할 수 있다. <표 1>은 Bradbury의 콘크리트 상하부 온도차로 발생하는 응력을 계산하는 Closed-Form Solution을 나타내고 있다. (Yang H. Huang, 2004)

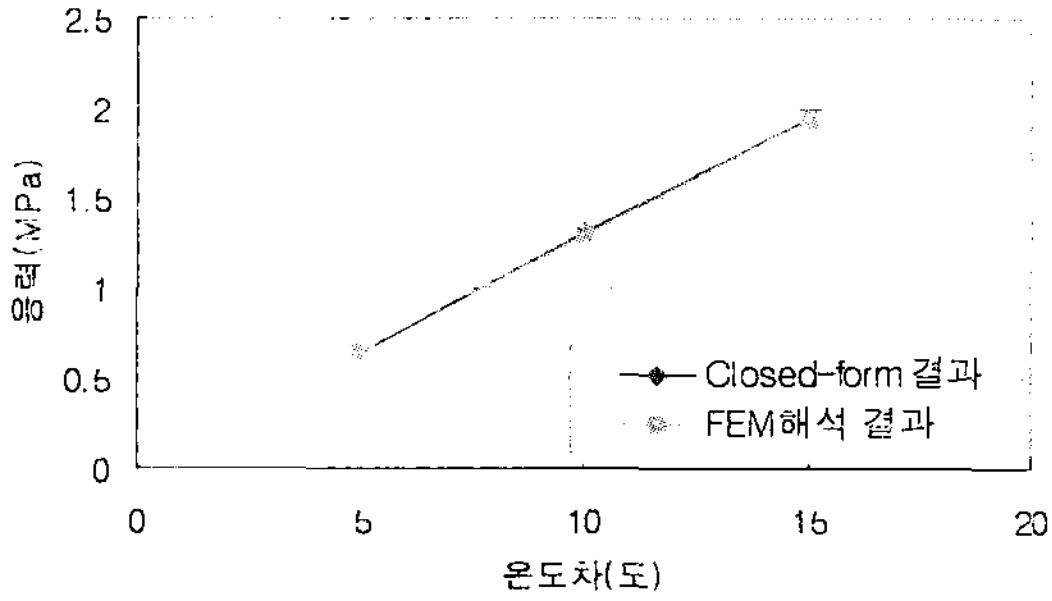
표 1. Bradbury 응력 계산식

응력 항목	식
x축 방향 내부 응력식	$\sigma_x = \frac{E\alpha_t \Delta t}{2(1-\nu^2)} (C_x + \nu C_y)$
y축 방향 내부 응력식	$\sigma_y = \frac{E\alpha_t \Delta t}{2(1-\nu^2)} (C_y + \nu C_x)$
단부 응력식	$\sigma = \frac{CE\alpha_t \Delta t}{2}$

* E : 탄성계수, α_t : 열팽창계수, ν : 포아손비, C_x, C_y : Bradbury 계수



상하부 온도차에 따른 응력값(edge부)



슬래브 길이에 따른 커플링 응력(edge부)

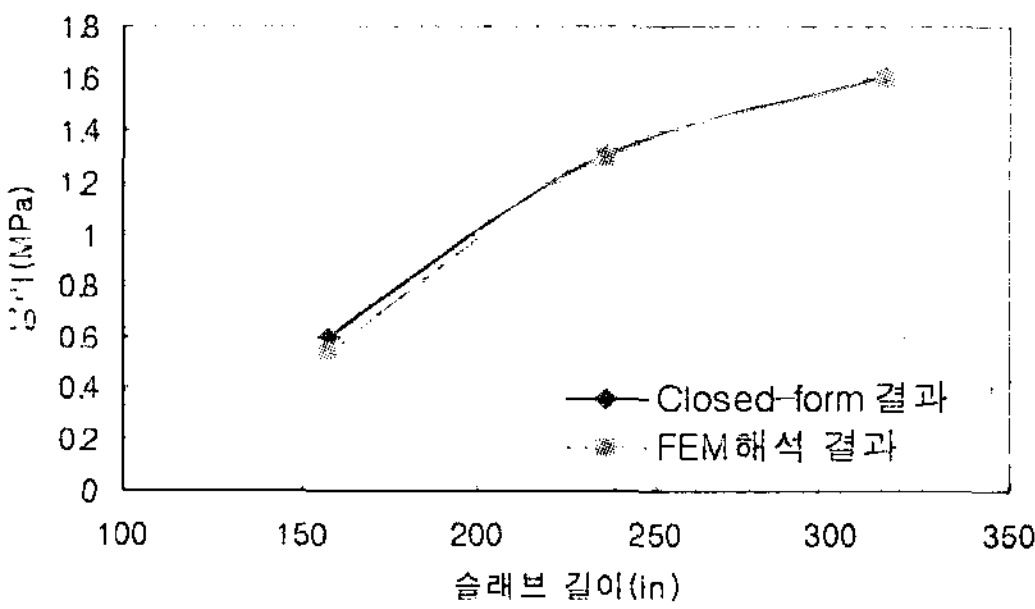


그림 12. Closed-Form Solution결과와 FEM해석 결과의 비교

<그림 12>에서 알 수 있듯이 온도에 따른 영향을 Closed-Form Solution과 FEM해석 결과를 비교한 그래프이다. Closed-Form Solution과 FEM해석 결과의 편차가 크지 않음을 나타내고 있다.

4.2. Solid 모형과의 비교

Shell 요소보다 정확한 해석 결과를 도출하는 Solid 요소와 그 결과를 비교하였다.

4.2.1. 교통하중의 영향 비교

교통하중에 의하여 발생하는 응력의 크기를 비교하기 위하여 필요한 하중의 위치는 포장 슬래브 하부에서 발생하는 응력값을 비교하여 최대 응력을 발생하는 위치로 결정하였다. 우선 하부에 응력

이 최대로 발생하는 지점에 대하여 비교하였으며 재하된 축의 윤거리는 1.8m로 설정하였다.

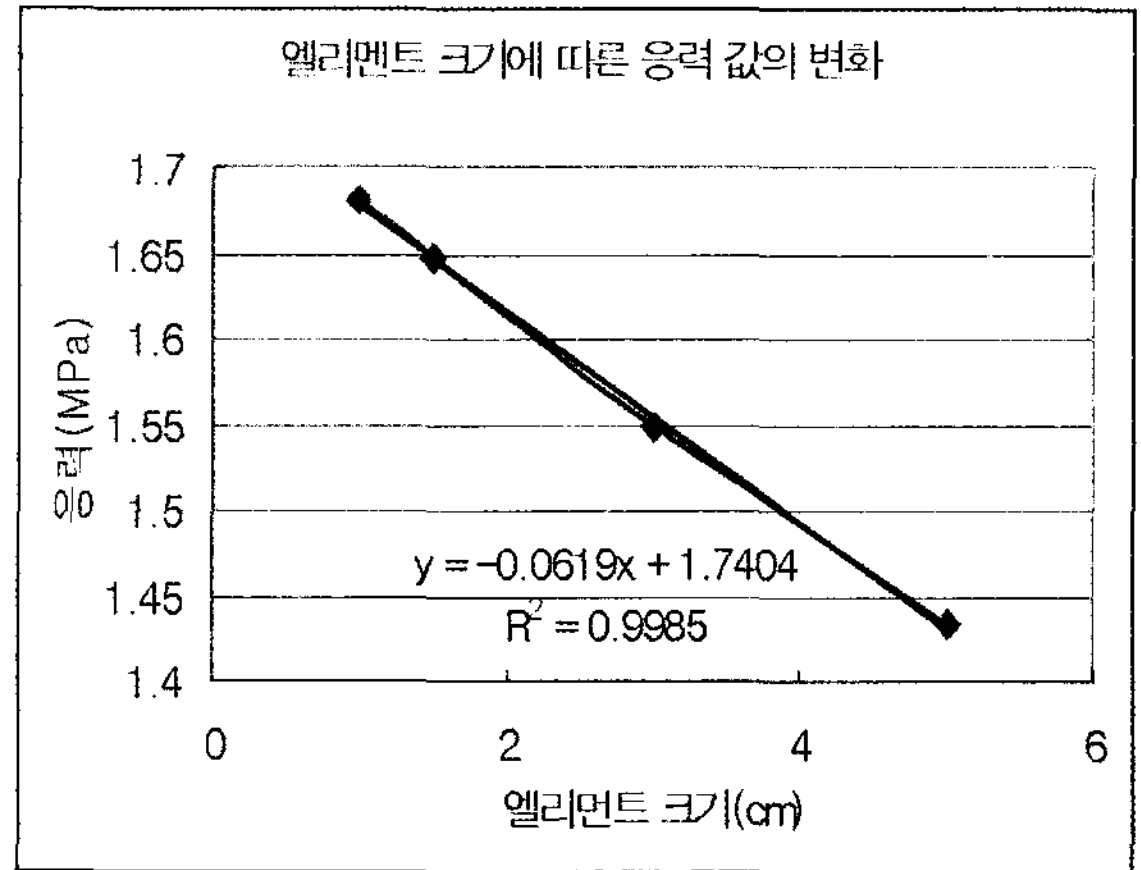


그림 13. 요소 크기에 따른 응력값의 변화

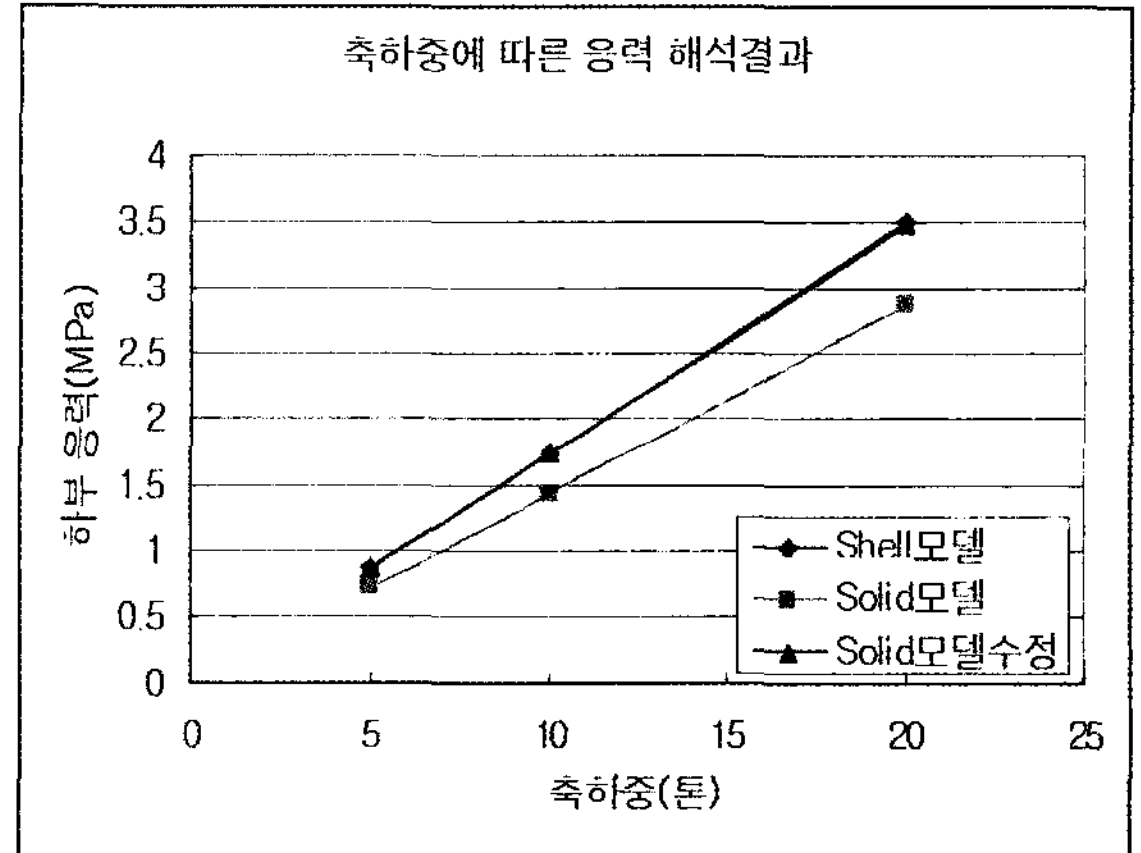


그림 14. 축하중에 따른 응력 해석 결과 비교

<그림 13>은 3D모형에 10톤 축하중을 재하하는 것을 가정하고 깊이 방향으로 메쉬의 크기를 변화시켜 최대 응력을 계산한 것이다. 깊이방향의 요소 크기가 줄어들수록 응력의 결과 값은 선형적으로 커지는 것으로 나타났다. 이를 회귀식으로 변환하여 요소 크기와 응력간의 관계를 도출할 수 있다. 계산한 회귀식을 이용하여 요소 크기가 0에 가깝다면 10톤 축하중으로 인하여 콘크리트 하부에 생기는 응력은 1.7404MPa이라는 것을 알 수 있다.



축하중 10톤일 경우 깊이방향으로 5cm크기의 요소를 사용하여 해석한 결과값이 1.214배를 하면 회귀식에서 추론한 값인 1.7404MPa의 결과를 얻을 수 있다. 같은 방법으로 축하중 5톤, 20톤이 재하될 경우에 대하여 각각 1.214배를 곱해주면 각각에 대하여 보정된 값을 계산할 수 있다. <그림 14>는 Shell 모형과 Solid모형 그리고 Solid수정모형에 대한 값을 비교한 그래프이다. Solid모형을 바탕으로 보정한 값은 Shell모형의 결과와 거의 일치하는 것으로 나타났다.

4.2.2. 온도구배에 따른 영향 비교

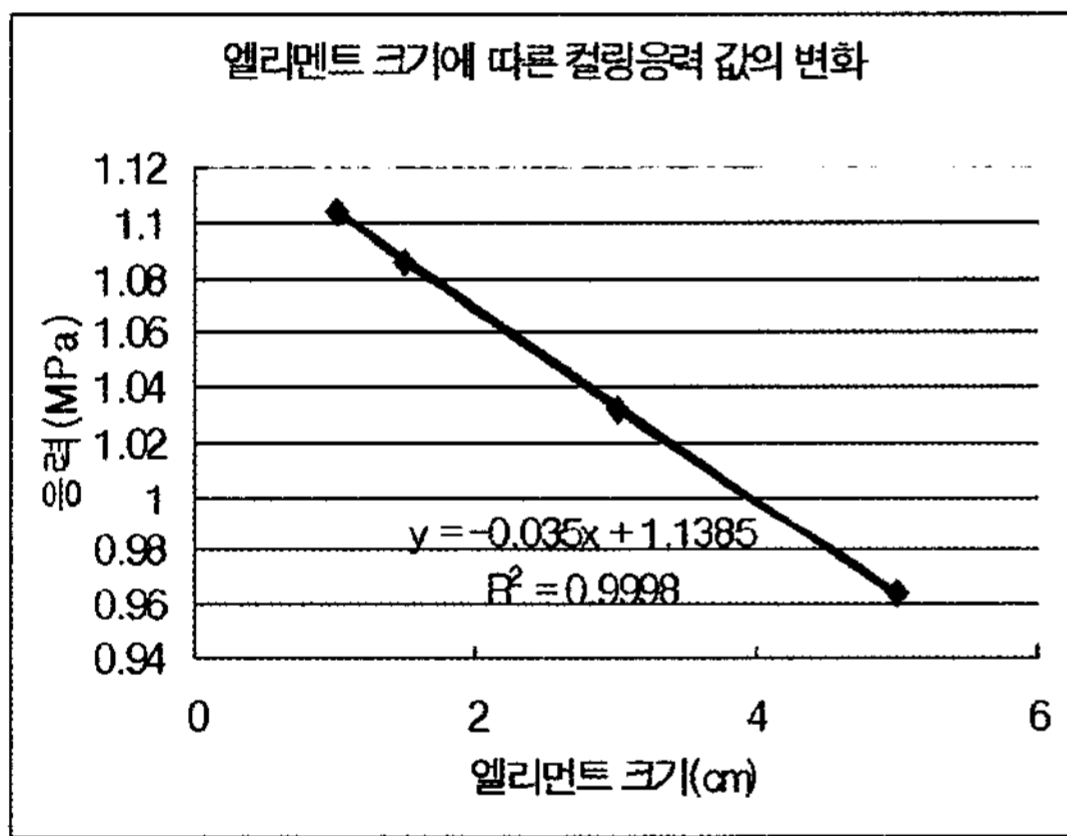


그림 15. 요소 크기에 따른 컬링응력값의 변화

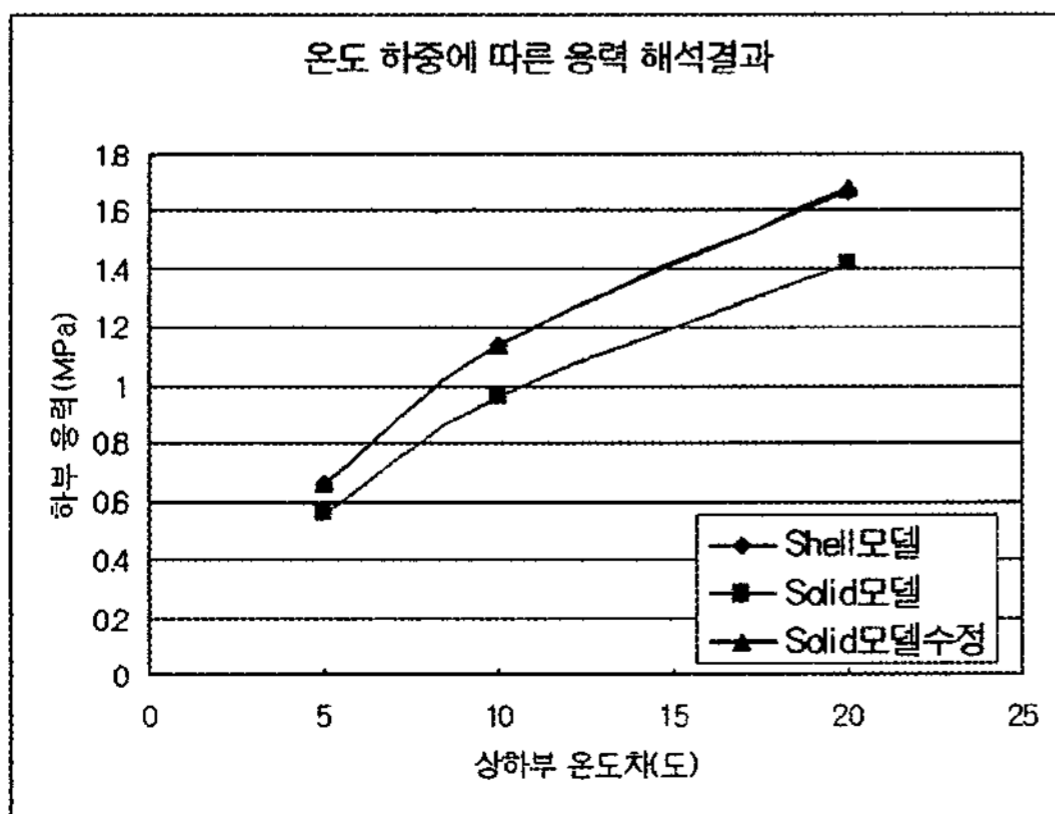


그림 16. 온도하중에 따른 응력 해석 결과 비교

Shell 요소를 사용하는 모형과 Solid 요소를 사용하는 모형에서 발생하는 온도하중의 영향을 비교하기 위하여 컬링 다운된 상황으로 설정하였고, 해석에 사용한 물성값은 교통하중의 분석과 동일하게 설정하였다. 온도 차이는 슬래브 상하부 5도, 10도, 20도로 설정하여 그 값을 Shell모형과 비교하였다.

교통하중의 보정법과 같은 방법으로 <그림 15>처럼 깊이 방향의 요소크기가 무한히 작다고 가정하여 결과값을 보정하였다. 슬래브 온도 차이가 10도일 경우 깊이방향으로 5cm크기의 요소를 사용하여 해석한 최대 응력값에서 1.181배를 하면 회귀식에서 추정된 값인 1.1385MPa의 결과를 얻을 수 있다. 같은 방법으로 슬래브 상하부 온도차이가 10도, 20도일 경우 경우에 대하여 각각 1.181배를 곱하여 10도, 20도의 경우에 대하여 보정된 값을 계산하였다. <그림 16>은 셸모형과 Solid모형 그리고 Solid수정모형에 대한 값을 비교한 그래프이다. Solid모형에서 보정한 최대응력 값은 Shell모형의 결과와 거의 일치하는 것으로 나타났다.

4.3. EverFE 2.24 결과와 비교

EverFE는 줄눈 콘크리트 포장의 해석을 위하여 워싱턴 대학에서 개발하고 워싱턴주 교통국에서 사용하는 3D 유한요소 프로그램이다. EverFE는 이미 다른 프로그램과의 비교를 통하여 검증은 마친 상태이며 신뢰할 수 있는 프로그램으로 판단되어 Shell 모형과 비교하였다. 해석에 사용한 물성값은 앞서 적용한 Closde-Form Solution의 값과 동일하게 적용하였다. 동일 물성값에서 축하중을 5톤, 10톤, 15톤으로 변화시켜 하부에 발생하는 최대 응력 값을 비교하였으며, 컬링 다운된 상태를 가정하여 슬래브 상하부 온도차를 5도, 10도, 20도로 변화시켜 온도로 발생하는 응력값으로 Shell모형과 EverFE 모형을 비교하였다.

<그림 17>은 축하중의 변화에 따른 슬래브 하부에 발생하는 최대응력값의 비교를, <그림 18>은 슬래브 상하부 온도차에 따른 ABAQUS모형과 EverFE모형을 서로 비교한 값이다. 비교 결과 축

하중에 따른 응력값의 차이는 20톤을 축하중으로 설정하였을 경우 최대 0.12MPa의 차이를 나타냈으며 온도로 발생하는 응력의 경우 0.16MPa의 차이를 나타냈다. 두 모형에서의 최대 오차는 서로 비교하였을 경우 10%미만으로 나타났다.

축하중에 따른 응력 해석결과

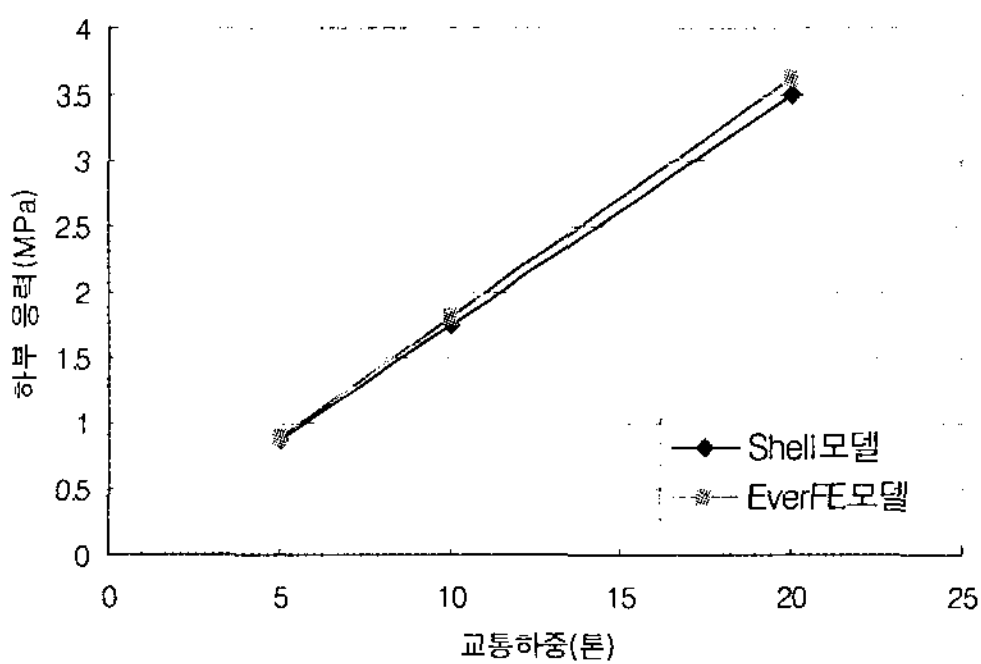


그림 17. 축하중에 따른 비교

온도하중에 따른 응력 해석결과

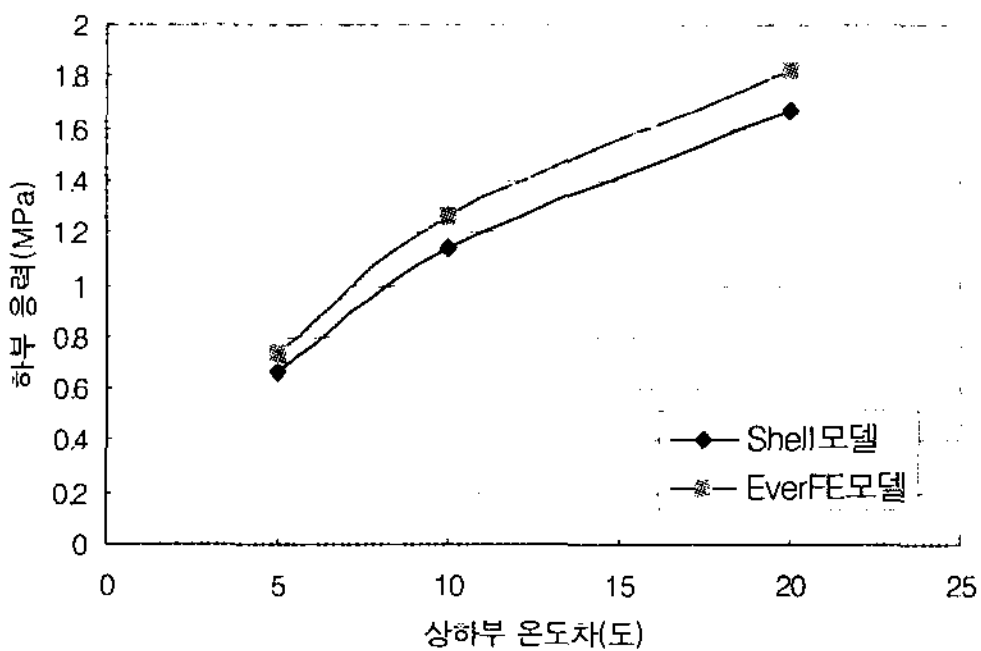


그림 18. 온도차에 따른 비교

5. 회귀식 도출

제안된 줄눈 콘크리트 포장 해석 모형을 이용하여 설계 변수의 값을 변화시켜 콘크리트 슬래브에서 발생하는 상부최대응력과 하부최대응력에 미치

는 상관관계를 분석하였다. 설계응력 값을 변화시켰을 때 유한요소법을 이용하여 예측한 응력을 바탕으로 회귀식을 도출하여 모형에서 계산한 결과 외에 다른 설계변수 값을 가질 때의 응력을 예측하는 것을 목적으로 하였다.

5.1. 합성 응력 해석

온도와 교통하중이 동시에 슬래브에 재하될 경우 Tensionless 스프링기초를 사용한 모형에서 동시에 해석하는 방법과 일반 스프링 기초에서 각각을 응력값을 계산하여 합하는 방법이 큰 차이를 보이지 않기 때문에, 일반 스프링 기초를 이용하여 교통하중에 따른 응력값과 상하부 온도차이로 발생하는 응력값을 각각 계산하여 합치면 동시에 재하되는 값으로 계산할 수 있다. <식 2>는 이를 식으로 표현한 것이다.

$$\sigma_{complex} = \sigma_{load} + \sigma_{temp} \quad (2)$$

여기서, $\sigma_{complex}$: 합성응력, σ_{load} : 교통하중으로 인하여 발생 응력

σ_{temp} : 온도구배로 인하여 발생한 응력

이 식의 경우 슬래브 상하부응력 분석 모두에 적용될 수 있으므로, 응력을 해석할 경우 교통하중으로 발생하는 응력과 온도로 발생하는 응력을 따로 계산하였다.

5.2. 교통하중에 의한 하부응력 분석

하부응력은 슬래브의 중앙에 교통하중이 위치할 경우 하부에서 가장 크게 발생하였다. 때문에 중앙부에 싱글타이어 싱글축과 듀얼타이어 싱글축, 탠덤축이 재하된 경우에 대한 분석을 실시하였다. 분석시 사용한 교통하중과 온도구배 값은 <표 2>와 같다.



표 2. 하부응력 분석을 위하여 적용된 설계변수 값

구분	항목	SI Unit (타이어 아바쿠스 물성)	항목
축하중	싱글타이어 싱글축(5, 10톤)	0.612916×10 ⁶ , 1.225831×10 ⁶ Pa	2가지
	듀얼타이어 싱글축(5, 10톤)	0.612916×10 ⁶ , 1.225831×10 ⁶ Pa	2가지
	탠덤축(8, 14, 20톤)	0.49033×10 ⁶ , 0.85808×10 ⁶ , 1.22583×10 ⁶ Pa	3가지

교통하중으로 발생하는 하부응력분석의 경우 슬래브 크기에 따른 영향이 거의 없기 때문에 6m 슬래브에 대하여 해석을 시행하였다. 또한 하부응력이 최대가 되는 지점은 온도하중과 합성되었을 경우 슬래브 줄눈부의 중앙에 위치하기 때문에 이 위치에 대한 응력값으로 분석하였다.

분석한 결과를 바탕으로 교통하중에 따른 응력을 예측하는 회귀식의 형태는 <식 3>과 같다.

$$\sigma = b_1 \cdot k^{b_2} \cdot P^{b_3} \cdot E^{b_4} \cdot T^{b_5} \quad (\text{식 3})$$

여기서, k : 기초 지지력(MPa/m)

P : 축하중(kN)

E : 탄성계수(N/m²)

T : 슬래브 두께 (m)

b_{1,2,3,4,5} : 하부응력 계산을 위한 회귀식 계수

표 3. 축 종류에 따른 적용하는 하부응력 계수

구분	싱글타이어 싱글축	듀얼 타이어 싱글축	탠덤축
b ₁	99.236357	54.341035	10.981769
b ₂	-0.158607	-0.187159	-0.247176
b ₃	0.998823	0.999635	1.000059
b ₄	0.159392	0.187525	0.241563
b ₅	-1.603563	-1.497026	-1.308737

<표 3>은 다양한 타이어 종류와 축에 따른 하부응력 회귀식 계수를 나타낸 값이다. 회귀식 계수를 토대로 계산해 보면, 기초지지력, 두께가 작고, 하중과 탄성계수가 클수록 더 큰 응력을 발생시키

는 것으로 나타났다.

5.3. 슬래브 상부응력 분석

슬래브 상부응력에 대한 해석을 하기 위해서는 슬래브 상하부 온도차와 교통하중에 대한 고려가 있어야 한다. 이에 대한 많은 고려가 필요하며 교통하중에 대한 계산시 하부응력 분석과 다르게 슬래브 길이에 따라서도 고려를 해야 한다.

<표 4>는 상부응력 분석을 위하여 사용된 물성값이다. 싱글타이어 싱글축과 듀얼타이어 싱글축의 경우는 각각 5톤과 10톤에 대하여 분석하였으며, 탠덤축의 경우 8, 14, 20톤에 대하여 분석하였다. 온도구배는 하부응력의 분석과 동일한 값을 적용하였으며 LTE에 따른 상부응력의 영향을 평가하기 위하여 LTE의 값을 50, 75, 100%로 변화시켜 그 결과를 계산하였다.

표 4. 상부응력 분석을 위한 설계 변수

구분	물성값	항목	
싱글타이어 싱글축 - 탠덤축	축거	3.00m	1가지
	하중(전-후축하중)	5-8톤, 5-14톤, 5-20톤, 10-14톤, 10-20톤	5가지
싱글타이어 싱글축 - 듀얼타이어 싱글축	축거	3.8, 4.5, 4.9, 5.8m	4가지
	하중(전-후축하중)	5-5톤, 5-10톤, 10-5톤, 10-10톤	4가지
LTE		50, 75, 100%	3가지
기초 지지력		200, 900, 1600	3가지
온도구배 (30cm일때 5,10도차이)		0, 0.166667°C/cm, 0.333333°C/cm	3가지

5.3.1. 교통하중 응력식 개발

대우 상용 자동차 홈페이지를 이용하여 교통하중의 축거를 분석하였다. 대부분의 차량은 대하여 싱글 타이어 싱글축이 기본적으로 제일 앞에 위치하게 되며, 뒷축은 대표적으로 탠덤축, 듀얼타이어 싱글축이었다. 따라서 이에 대한 해석을 수행하여



회귀식을 개발하였다.

(가) 앞축 싱글타이어 싱글축 - 뒤축 탠덤축 응력식

앞축이 싱글타이어 싱글축이고 뒤축이 탠덤축의 경우 포장의 상태에 큰 영향을 미치는 카고 트럭, 트랙터 믹서 및 덤프트럭의 축거는 3.01, 3.27, 3.215, 3.555, 4.925, 5.125m로 다양하게 나타났다. 탠덤축 사이의 축거가 1.3m 또는 1.35m이기 때문에 6m 슬래브를 기준으로 앞 뒤축이 모두 한 슬래브에 놓이는 앞과 뒤축의 간격은 4.3m 이하가 되어야 한다. 때문에 뒤축 모두가 6m 슬래브에 작용하는 차량의 축거는 3.01~3.555m인 것으로 나타났다. 2005년 교통량 조사 자료에서 가장 많은 교통량을 차지하는 8종으로 확인하였으며, 이에 따라 축거를 3.01m이므로 탠덤축에 대한 상부응력 분석을 위하여 3m로 분석하였다.

온도하중과의 조합을 고려할 경우 교통하중으로 인한 최대하중이 슬래브의 줄눈부 중앙에 발생할 경우가 가장 큰 응력을 발생하므로 줄눈 중앙부에 가장 큰 응력 발생을 유발하는 타이어의 위치를 설정한 후 이를 기준으로 설계변수를 변화시켜 상부응력 분석을 실시하였다.

탠덤축에 대한 회귀식은 <식 4>과 같이 표현할 수 있으며 각각의 계수값은 <표 5>와 같다.

$$\sigma = lt_1 \cdot k^{lt_2} \cdot P_1^{lt_3} \cdot P_2^{lt_4} \cdot E^{lt_5} \cdot T^{lt_6} \cdot LTE^{lt_7} \cdot L^{lt_8} \quad (\text{식 4})$$

여기서, P 1 : 전축 싱글타이어 축하중(kN), P 2 : 탠덤축 축하중(kN)

- k : 기초 지지력(Mpa/m)
- T : 슬래브 두께 (m)
- E : 탄성계수(N/m²)
- LTE : 하중 전달계수 (%)
- L : 슬래브 길이(m)
- lt_{1,2,3,4,.....,8} : 교통하중 상부 응력 계산 계수

표 5. 슬래브 길이, 두께에 따른 탠덤축 회귀식 계수

구분	계수값
lt ₁	10.20939
lt ₂	-0.217
lt ₃	0.381
lt ₄	0.618
lt ₅	0.248
lt ₆	-1.33
lt ₇	-0.073
lt ₈	-0.24

회귀식을 살펴보면 지지력, 두께, LTE값이 클수록 응력이 작아지게 나타난다. 상관계수는 0.9이상으로 나타났다.

(나) 앞축 싱글타이어 싱글축 - 뒤축 듀얼타이어 응력식

뒤축이 듀얼타이어 싱글축일 경우 축거는 매우 다양하게 나타났지만 그 중 대표적인 4가지의 거리를 선정하여 그 결과를 분석하였다. 축거는 3.8, 4.5, 4.9, 4.925, 5.125, 5.85m로 나타났다. 이 중에서 4.925m와 5.125m의 경우 4.9m로 분석하여 상부응력의 값을 비교할 경우 큰 차이를 보이지 않았기 때문에 축거를 3.80, 4.50, 4.90, 5.80m로 설정하였다.

이 조건에 대하여 구조해석을 다음 <식 5>를 도출하였다. 기본적으로 뒤축이 탠덤축일 때 분석한 경우와 동일한 형태의 식이며 축간 거리가 추가되었다.

$$\sigma = ld_1 \cdot k^{ld_2} \cdot P_1^{ld_3} \cdot P_2^{ld_4} \cdot E^{ld_5} \cdot T^{ld_6} \cdot LTE^{ld_7} \cdot L^{ld_8} \cdot AXL^{ld_9} \quad (\text{식 5})$$

여기서, P 1 : 전축 싱글타이어 축하중(kN), P 2 : 탠덤축 축하중(kN)

- k : 기초 지지력(Mpa/m)
- T : 슬래브 두께 (m)
- E : 탄성계수(N/m²)



LTE : 하중 전달계수 (%)
 L : 슬래브 길이(m)
 AXL : 축간 거리(m)
 $ld_{1,2,3,4,\dots,9}$: 듀얼타이어 싱글축 상부
 응력 계산 계수

표 6. 슬래브 길이, 두께에 따른 단륜 복축 회귀식 계수

구분	계수값
lt_1	11.83042
lt_2	-0.35
lt_3	0.562
lt_4	0.435
lt_5	0.381
lt_6	-0.933
lt_7	-0.131
lt_8	-0.449
lt_9	-0.618

회귀식을 살펴보면 지지력, 두께, LTE 값, 축간 거리가 클수록 응력이 작아지게 나타난다. 상관계수는 0.86 이상으로 나타났다.

5.4. 슬래브 상하부 온도차이로 발생하는 상하부응력

슬래브 온도 차이로 인하여 상하부에 발생하는 응력은 <식 6>과 같은 회귀식으로 구성하였다.

$$\sigma = tb_1 \cdot \alpha \cdot g \cdot k^{tb_2} \cdot E^{tb_3} \cdot T^{tb_4} \cdot L^{tb_5}$$

(식 6)

여기서, α : 열팽창계수($^{\circ}\text{C}$)
 g : 온도구배($^{\circ}\text{C}/\text{cm}$)
 k : 기초 지지력(Mpa/m)
 E : 탄성계수(N/m²)
 T : 두께(m)
 L : 슬래브 길이(m)
 $tb_{1,2,3,4}$: 하부 온도응력 계산을 위한 상수

<표 7>은 회귀식의 각 계수를 나타내는 것이다. 유한요소법해석이 예측한 결과를 바탕으로 회귀식

을 계산할 경우 상관계수가 0.9 이상인 것으로 나타났다. 실제 R2 값이 0.9 이상으로 나타났으며 유한요소법으로 계산한 응력값과 회귀식으로 예측한 응력값은 비슷하였다.

표 7. 상하부응력 온도 분석에 사용된 회귀식 계수

구분	계수값
tb_1	138.676
tb_2	0.171
tb_3	0.846
tb_4	0.533
tb_5	0.654

6. 결론

유한요소 해석 모형을 이용하여 줄눈 콘크리트 포장의 교통하중과 슬래브 상하부 온도차이에 따른 슬래브의 응력을 해석하기 위한 모형을 구성하였다. 모형을 구성한 후 기존식 및 프로그램과 비교하여정확성을 확보하였다. 그 후 다양한 경우에 대한 구조해석을 수행하여 온도 및 교통 하중으로 인한 응력을 산출할 수 있는 회귀모형을 개발하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

-사용가능한 줄눈 콘크리트 모형에 대하여 검토한 후 정확도가 높고 상대적으로 분석시간이 짧은 Shell 요소 모형을 선정하였다.

-슬래브 하부 응력에 대하여 분석한 결과 LTE와 슬래브 크기에 대하여 영향이 거의 없는 것으로 나타났으며, LTE에 따른 온도로 인한 거동에는 변화가 없는 것으로 나타났다.

-슬래브 상부 응력의 경우 최대 응력값은 하부 최대 응력의 약 70%정도 수준인 것으로 나타났다.

-Closed-Form Solution, 3D Solid모형, EverFE 모형과의 응력비교를 통하여 모형의 정확도를 검증한 결과 Closed-Form Solution으로 구한 응력과



2%의 오차가 있었으며, 보정된 3D Solid모형으로 구한 응력값과는 거의 일치하였다. 또한 이미 외국에서 검증되어 사용되고 있는 EverFE 프로그램과는 10%이내의 오차가 발생하여 Shell 모형의 정확도는 높은 것으로 나타났다.

-슬래브의 작용하는 교통하중과 온도변화를 고려하여 슬래브 상하부에 발생하는 응력에 대한 회귀식을 제시하였다. 슬래브 하부응력에 대한 회귀식의 경우는 회귀식과 유한요소 해석법으로 예측한 값을 비교하였을 때 2%차이가 있었으며, 온도로 발생하는 응력 및 슬래브 상부에 발생하는 응력을 비교하였을 경우 R2 값이 최소 0.86에서 0.9 이상으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부에서 지원한 한국형 포장설계법 개발연구의 수행 결과입니다.

참고문헌

조윤호 등 (2005), "친환경 4s 포장시스템 개발 연구", 건설교통부

대우 상용차 홈페이지 (2006), "http://www.tata-daewoo.com"

ABAQUS, Inc. (2007) "ABAQUS Analysis User's Manual Version 6.5"

H. Thomas Yu, Lev Khazanovich, Michael I. Darter (2004), "Consideration of JPCP Curling and Warping in the 2002 Design Guide", *TRB*.

NCHRP (2004), "Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures final report"

기상청 홈페이지(2007), "www.kma.go.kr"

한국도로공사 (2007), "고속도로 포장용 배합표"

남영국 (2004), "도로포장공학", 구미서관.

Yang H. Huang (2004), "Pavement analysis and design, 2nd edition", Prentice Hall.

EverFE 홈페이지 (2007)

, "http://www.civil.umaine.edu/EverFE/"

Weijun Wang, Imad Basheer, Katherine Petros (2006), "Jointed Plain Concrete pavement models evaluation", *TRB*.

접 수 일: 2008. 3. 17
 심 사 일: 2008. 3. 17
 심사완료일: 2008. 3. 27