



하중변환 알고리즘을 적용한 줄눈 콘크리트 포장해석 프로그램 개발

Development of Structure Analysis Program for Jointed Concrete Pavement Applying Load Discretization Algorithm

윤태영* · 김지원** · 조윤호***

Yun, Tae-Young · Kim, Ji-Won · Cho, Yoon-Ho

Abstract

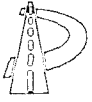
Recently, the new pavement design method considering Korean environment and the specification for improving performance of pavement are being developed in Korea. The Jointed Concrete Pavement Program Applying Load Discretization Algorithm (called HEART-JCP) is one of the results of Korea Pavement Research Project in Korea. HEART-JCP program is developed to analyze various loading condition using the load discretization algorithm without mesh refinement. In addition, it can be modified easily into multi-purpose concrete pavement analysis program because of the modularized structure characteristic of HEART-JCP. The program consists of basic program part and load discretization part. In basic program part, the displacement and stress are computed in the concrete slab, sub-layer, and dowel bar, which are modeled with plate/shell element, spring element and beam element. In load discretization program part, load discretization algorithm that was used for the continuum solid element is modified to analyze the model with plate and shell element. The program can analyze the distributed load, concentrated load, thermal load and body load using load discretization algorithm. From the result of verification and sensitivity study, it was known that the loading position, the magnitude of load, and the thickness of slab were the major factors of concrete pavement behavior as expected. Since the result of the model developed is similar to the results of Westergaard solution and ILLISLAB, the program can be used to estimate the behavior of jointed concrete pavement reasonably.

Keywords: pavement analysis, fem, load discretization algorithm

요 지

최근 국내에서는 국내 여건을 고려한 설계법을 개발함과 동시에 이미 공용중에 있는 도로 포장의 성능향상을 위한 「한국형 포장 설계법 개발과 성능개선 연구」가 진행되고 있다. 본 연구에서 개발된 「하중변환 알고리즘을 적용한 줄눈 콘크리트 포장 해석 프로그램」은 이러한 연구의 세부분야인 콘크리트 포장 설계법 개발분야의 연구 결과로서 기본 프

* 정회원 · 중앙대학교 공학석사
** 정회원 · (주)토탈페이브시스템 대표이사
*** 정회원 · 중앙대학교 건설환경공학과 부교수



로그램 부분과 하중변환 부분으로 구분되어 구성되며, 기본 프로그램 부분에서는 판/셸 요소, 스포링 요소, 보 요소를 이용하여 줄눈 콘크리트 포장의 콘크리트 슬래브, 하부층, 다웰바를 모사한다. 하중변환 부분에서는 기존의 연속체 요소에 대한 하중변환 알고리즘을 수정/적용하여 요소망에 제약이 받지 않고 다양한 하중 조건을 해석한다. 또한 프로그램은 하중변환 알고리즘을 적용하여 해석을 수행하는 등분포 하중 이외에, 집중하중, 온도하중, 자중 등을 고려할 수 있는 특징이 있다. 개발된 프로그램의 특성을 분석하기 위한 민감도 분석 결과, 하중크기 및 위치와 콘크리트 슬래브의 두께가 포장의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 인자로 분석되었으며, 이는 Westergaard 계산식, ILLISLAB과 유사한 결과이다.

핵심용어 : 유한요소법, 구조해석모형, 하중변환 알고리즘

1. 서론

포장 구조해석 모형은 과거 경험적인 포장 설계의 한계를 극복하고 보다 효율적인 포장 단면 설계를 추구하는 경험적-역학적 설계법 개발을 위한 기본 조건으로 이해되고 있다. 국외의 경우, 콘크리트 포장 구조해석 모형은 1970년대 JSLAB의 개발을 시작으로 ILLISLAB, KENSLAB 등이 개발되어 포장의 일반적인 거동을 해석하는데 적용되었으며, 최근에는 다양한 이론 및 알고리즘과 연계되어 설계 수명에 따른 단면을 제시할 뿐만 아니라 지역적 특성을 고려하여 다양한 파손을 예측하는 발전적인 형태로 거듭나고 있다.

최근 국내에서는 포장의 성능을 향상시키고 보다 효율적인 도로 포장 설계를 위한 「한국형 포장 설계법 개발과 성능개선 연구」가 다각적으로 진행되고 있다. 콘크리트 포장 구조해석 모형에 관한 연구는 「한국형 포장 설계법 개발과 성능개선 연구」의 세부 과제로서, 그간 국내에서 상대적으로 뒤쳐져 있던 콘크리트 포장 구조해석 프로그램 개발을 우선적인 연구 목표로 진행되고 있다.

본 논문은 줄눈 콘크리트 포장의 거동을 해석하기 위한 구조해석 기본 프로그램 개발 연구 결과의 일부이며, 주요 연구 내용은 다음과 같다.

2. 기본이론

2.1 콘크리트 포장 구성요소

개발 프로그램은 실제 포장 구성요소를 프로그램 내에서 구현한 기본 이론에 관한 부분과 하중을 등가의 절점하중으로 변환하는 부분으로 구분할 수 있다. 또한 줄눈 콘크리트 포장의 구성요소는 콘크리트 슬래브, 노상, 다웰바, 하중부분으로 아래와 같이 구분될 수 있다.

1) 콘크리트 슬래브

콘크리트 슬래브는 4절점 12자유도의 판 요소와 4절점 20자유도의 셸 요소를 이용하여 해석 조건에 따라 적용할 수 있도록 구성되었다. 셸 요소의 강성도 행렬은 판 요소의 강성도 행렬(12×12)에 평면 요소의 강성도 행렬(8×8)이 추가된 형태(20×20)로 유도된다. 다음 식(1), 식(2)는 프로그램에 적용된 판 요소, 평면요소와 셸 요소의 강성도 행렬 유도식을 나타내고 있으며, 개발 프로그램에서는 조건에 따라 요소를 선정하여 해석할 수 있도록 하였다.

$$K_{shell} = K_{plate} + K_{plane} \quad (1)$$

$$K_{plate/plane} = \int_A B^T DBdA = \int_{-b-a}^{+b+a} \int_{-1}^{+1} B^T DBdx_1 dx_2 = ab \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} B^T DBd\xi d\eta \quad (2)$$



여기서,

a, b : 판/셸/평면 요소의 횡방향(x방향),
 종방향(y방향) 너비/2

B^T : 보간함수의 2계 미분 행렬의 전치
 (Transpose)행렬

D : 물성 행렬

B : 보간함수의 2계 미분 행렬

$$K_{me} = \begin{bmatrix} k_{11} & 0 & k_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{21} & 0 & k_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ \theta_x \\ \theta_y \\ u \\ v \end{bmatrix} \quad (6)$$

다웰바와 타이바는 동일한 요소를 이용하여 모사되지만, 강성도 행렬을 어셈블리하는 과정에서 다웰바의 회전에 대한 강성은 판/셸 요소의 x축에 대한 회전 강성에 더해지며, 타이바의 회전에 대한 강성은 식(6)과 같이 판/셸 요소의 y축에 대한 회전 강성에 더해진다.

2) 노상

노상은 절점 주위 4개 요소의 1/4 면적에 노상 지지력을 곱하여 스프링 강성을 결정하는 방법과 판 요소의 수직방향 보간함수에 절점 주위 4개 요소의 전체 면적을 고려하는 두 가지 방법을 이용하여 모사하였다. 다음 식(3)은 노상 지지력을 이용하여 스프링 요소의 강성을 계산하는 식을 나타내고 있는데, 식(4)에 나타난 바와 같이 스프링 요소의 강성도는 판 요소나 셸 요소의 처짐과 관련된 행렬 요소에만 영향을 미치도록 적용된다.

$$k_{spring} = k \times ab \quad (3)$$

여기서,

k : 노상 지지력(kN/m³)

a, b : 판 요소의 종방향(x방향),
 횡방향(y방향) 너비/2

$$K_{plate/shell} = \begin{bmatrix} k_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ \theta_x \\ \theta_y \\ u \\ v \end{bmatrix} \quad (4)$$

3) 다웰바와 타이바

다웰바와 타이바는 2절점 4자유도의 보 요소를 이용하였으며, 보 요소의 사용된 강성도 행렬은 다음 식(5)로 표현될 수 있다.

$$K_{beam} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ \theta_y \end{bmatrix} \quad (5)$$

4) 등분포하중과 온도하중

교통하중에 의한 접지압과 콘크리트 슬래브의 자중은 유한요소법의 특성에 따라 등가의 절점하중으로 변환되어 적용된다. 판/셸 요소는 연속체 요소와는 달리 각 절점에서 2개의 회전에 대한 자유도를 가지므로, 등분포 하중을 절점 하중으로 변환할 경우에는 모멘트 하중을 고려해야 한다. 요소망의 크기가 일정할 경우, 절점의 집중하중과 모멘트 하중은 하중의 좌표에 따라 결정되는 기여도에 의하여 계산되며, 특히 모멘트는 압력이 재하된 최외곽 요소의 절점에서만 발생하게 된다. 식(7)은 슬래브의 자중이 등분포 하중으로 고려되는 개념을 개략적으로 나타내고 있다.

$$P_{uniform\ pressure} = ab \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} N^T b_z d\xi d\eta \quad (7)$$

여기서,

b_z : 압력(단위중량×콘크리트 슬래브 두께)

온도차에 의한 초기 변형은 교통하중에 의해 변형이 발생하기 이전에 존재하는 것으로 응력을 발생시키지 않는다. 그러므로 최종적인 슬래브 내 응력을 계산할 경우에는 초기 온도에 의한 변형을 제외해야 하며, 이는 콘크리트 포장 해석에서 중요한 개념이다. 이는 다음 식(8), 식(9), 식(10), 식(11)로 설명될 수 있다.



$$\sigma = D\epsilon_{total} - D\epsilon_{initial} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \delta U &= \int_V \delta \epsilon^T \sigma dV \\ &= \delta u \left[\int_V B^T D B dV \right] u - \delta u \left[\int_V B^T D \epsilon_{initial} dV \right] \\ &= \delta u (Ku - P_{initial}) \end{aligned} \quad (9)$$

$$P_{initial} = \int_V B^T D \epsilon_{initial} dV \quad (10)$$

$$\therefore Ku = P + P_{initial} \quad (11)$$

여기서,

$$\epsilon_{initial} = \epsilon_{thermal} = \alpha(\Delta T):$$

변형률(초기 변형이 온도차에 의한 경우)

$P_{initial}$: 초기 변위를 발생시키는 가상 절점 하중

P : 절점에 가해지는 외력

2.2 하중변환 알고리즘

2.2.1 기본 개념

유한요소법에서는 하중이 요소망 내에 등분포 하중으로 재하된 경우일지라도 등분포 하중을 등가의 절점하중으로 변환하여 해석을 수행한다. 연속체 요소의 경우에는 등분포 하중을 등가의 집중하중만으로 변환하여 적용할 수 있으나, 판 요소나 쉘 요소와 같이 수평축에 대한 회전의 자유도를 갖는 요소를 해석할 경우에는 등분포 하중을 등가의 집중하중과 모멘트 하중으로 변환하여 적용해야 한다. 그림 1은 모멘트 하중을 고려한 판 요소에서의 하중 변환 개념을 나타내고 있다. 그러나 그림 1의 하중변환 개념은 일반적으로 하중이 요소의 하중 재하면 전체에 작용할

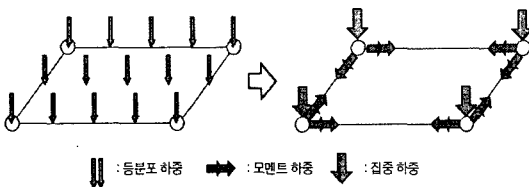


그림 1. 하중변환의 기본 개념

경우 사용될 수 있는 방법으로서, 하중이 요소면에 부분적으로 재하될 경우에는 이와 같은 방법을 적용할 수 없다. 따라서 일반적인 유한요소 해석에서 요소망을 생성할 경우에는 하중 재하 위치를 우선적으로 고려해야 하며, 요소망 생성시 고려되지 못한 위치에 하중을 재하할 경우에는 요소망을 다시 생성해야 하는 어려움이 있다. 그러나 이러한 문제는 이미 개발된 하중변환 알고리즘을 이용하여 해결할 수 있는데, 본 프로그램에서는 기존의 연속체 요소에 대한 하중변환 알고리즘을 수정/보완하여 판/쉘 요소에서도 적용할 수 있도록 하였다. 식(12)는 부분적인 하중이 재하되는 요소를 세분화하여 수치적분을 수행하고, 이를 등가의 절점하중으로 변환하는 하중변환 기법의 기본 개념을 나타내고 있다. 이는 가상일의 원리(Virtual work principle)로부터 요소에 작용하는 하중 P , 즉 요소 내 절점의 등가 집중하중의 합은 요소 내 임의의 미소 면적 dA 에 작용하는 하중 크기 t 와 요소의 보간함수의 전치행렬 N^T 의 곱으로 표현될 수 있음을 의미한다. 이때 요소 내 부분적으로 작용하는 하중은 보간함수로 정의된 각 절점에서의 기여분에 따라 변환된다.

$$P_e = \int_{S_e} N_{ni}^T t_e dA_e \quad (12)$$

여기서,

P_e : 요소에 재하되는 전체 하중

N_{ni}^T : 절점 i 에서의 n 방향 보간함수

(Interpolation function)의 전치행렬

S_e : 요소의 하중 재하면의 범위

t_e : 임의의 위치에서의 하중 크기

2.2.2 하중변환 알고리즘의 적용

하중변환 알고리즘은 우선 사용자 범위 내에 존재하는 절점과 요소를 정의하고, 이들 절점 및 요소가 하중이 재하되는 범위 안에 있는지를 확인하여 전체 면 하중재하 요소와 부분면 하중재하 요소로 구분하여 수치적분을 수행한다. 이때, 수치적분을 통하여 계산된 하중의 크기가 사용자가 입력한 하중의 크기



보다 작은 경우에는 확장 검색을 통하여 초기 검색 서버루틴이 찾지 못한 요소를 검색하고 이에 대한 수치적분을 수행하며, 수치적분을 통하여 계산된 하중의 크기와 사용자가 입력한 하중의 크기가 일정 범위 안에 있으면 확장 검색을 통하지 않고 등분포 하중을 등가의 절점하중으로 변환한다.

1) 사용자 범위내 절점 및 요소 검색

요소의 크기가 매우 작고 요소의 수가 많을 경우, 사용자가 검색 범위를 제한하여 전체 요소를 검색하게 되면서 소요되는 시간을 단축하기 위한 과정으로서, 프로그램은 절점의 좌표와 절점-요소 관계(Node-element connectivity)를 이용하여 해당되는 요소가 사용자 검색범위 내에 있는지 확인하게 된다.

2) 하중 범위내 절점, 요소 검색 및 하중 조건에 따른 구분

사용자 검색 범위 내의 절점과 요소가 선정되면, 하중이 재하된 좌표 내에 존재하는 절점과 요소를 그림 2에 나타난 방법으로 선정한다. 하중 재하면 내에 존재하는 절점은 식(13)과 같이 하중 재하면을 나타내는 직선 또는 곡선의 함수에 부등식 영역의 개념을 적용하여 선정되는데, 하중 재하면을 직사각형으로 가정할 경우에는 직선의 방정식(4개) 각각에 3개의 계수를 결정하게 된다. 하중 재하 경계와 요소망이 일치하지 않는 부분적 하중 재하 요소의 존재여부는

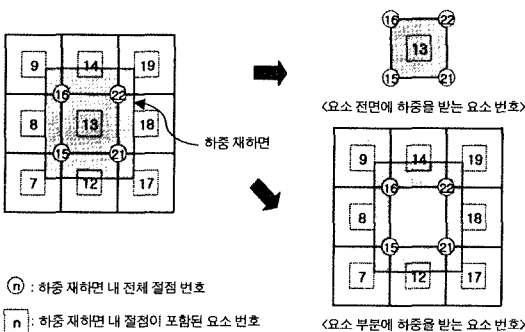


그림 2. 하중 재하 조건에 따른 요소 구분

하중 재하범위 내에 존재하는 요소의 절점수로 결정하게 된다.

$$\Omega = xy | f \times y \leq 0 \quad (13)$$

여기서,

Ω : 하중 재하면

$f(x,y)$: 2차원 직선 또는 곡선을 나타내는 함수

$f_m(x,y) = a_m x + b_m y + c_m$ (하중 경계가 직선인 경우)

m : 절점번호

3) 수치적분

요소 내 수치적분은 요소가 재하받는 하중의 조건에 따라 구분되어 수행된다. 그림 3의 13번 요소와 같이 요소면 전체에 등분포 하중이 재하되는 요소는 가우스 적분(Gauss quadrature)법을 이용하여 손쉽게 4개 절점의 12개의 하중 벡터를 계산되는 반면, 7번 요소와 같이 부분적으로 하중이 재하되는 경우에는 요소를 충분히 세분화하여 기여도를 계산한다. 다음 가우스 적분법을 수행한다. 부분적인 하중이 재하되는 요소는 정밀도와 해석 시간을 고려한 세분화 정도(ndx)에 의하여 나누어지며, 세분화된 요소의 중심 좌표가 하중 재하 범위 내에 존재하는 것이 확인되면 보간함수와 세분화된 요소의 면적을 이용하여 기여도를 계산한다. 세분화된 요소의 위치는 요소 중심의 좌표가 하중 재하면 내에 존재하는가의 여부로 결정되며, 적용되는 가우스 적분법의 차수는 함수의 차수를 고려하여 결정된다. 세분화된 요소의 기여도가 모두 계산되면 이는 재하된 하중의 크기를 고려하여 등가의 절점하중으로 변환된다.

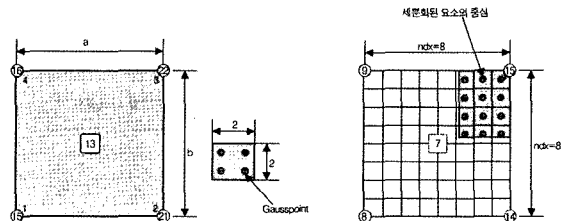


그림 3. 하중 재하면의 특성에 따른 수치적분의 개념



4) 확장 검색을 통한 요소 선정

하중의 경계가 원형 또는 타원형이거나 하중이 요소망과 일치하지 않는 방향으로 재하된 경우, 이상의 선정 과정에서는 누락되는 요소가 있을 수 있다. 하중 변환 알고리즘에서는 이러한 특정 조건의 요소 존재 여부를 확인하기 위하여 수치적분에 의하여 계산된 하중과 입력된 하중의 차이가 제한된 범위 내에 있는지를 확인한다. 만약 두 하중의 차이가 사용자에게 의하여 제한된 범위를 초과할 경우에는 선정되지 않은 요소가 있는 것으로 가정하고 확장 검색 서브루틴을 실행하게 된다. 확장 검색은 그림 4와 같이 요소의 대각 방향 길이를 기준으로 확장 간격을 결정하여 진행되며, 이를 통하여 선정된 요소는 부분적으로 하중이 재하되는 요소와 동일한 방법의 수치적분이 적용되어 증가의 하중 벡터로 추가된다.

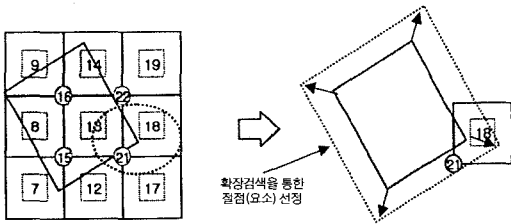


그림 4. 확장검색을 통한 요소 선정 개념

3. 프로그램의 기본 구성

1) 기본 프로그램 부분

개발된 프로그램은 자료 입력부(READ INPUT)와 요소망 생성부(MESH), 요소 강성도 행렬 생성부(KMAT), 어셈블리부(ASSEMBLY), 계산부(SOLVER), 결과 출력부(OUTPUT)로 구분되는 기본 프로그램 부분과 사용자 범위 설정부(PRE_SEARCH), 하중 재하 범위 설정부(WHEEL),

수치적분부(COMPUTE)로 구분되는 하중 변환 부분으로 나눌 수 있다. 하중변환 프로그램 부분은 기본 프로그램의 요소망 생성부에서 절점의 좌표가 결정된 후에 기본 프로그램에서 호출되어 실행되며, 이로부터 계산된 절점하중은 하중 어셈블리(ASSEMBLY LOAD)부에서 집중하중이나 온도하중과 함께 더해져 하중 벡터를 생성한다.

2) 하중 변환 부분

하중 변환 서브루틴은 입력받은 변수로부터 기본적인 메모리와 변수의 크기를 설정하는 MEM, ALLOC 서브루틴과 사용자가 정의한 하중 재하 구간 내의 절점과 요소의 정보를 계산하는 PRE_SEARCH 서브루틴, 재하된 타이어 하중의 형태를 나타내는 방정식의 계수를 계산하는 WHEEL 서브루틴, 타이어 재하면에서 전체적 또는 부분적으로 하중이 재하되는 요소의 정보를 찾아 각각에 수치적분을 수행하는 COMPUTE 서브루틴으로 구분할 수 있다.

그림 5는 하중 변환 프로그램 부의 서브루틴의 구성 관계를 나타내고 있는데, 현재까지는 단일 직사각형 등분포 하중만을 고려할 수 있도록 구성되어 있으나, 필요에 따라 다양한 형태의 하중을 고려하기 위한 서브루틴을 추가할 수 있다.

4. 프로그램 검증 및 민감도 분석

본 장에서는 개발된 모형의 타당성을 검증하고 슬래브의 거동에 영향을 미치는 인자들에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 콘크리트 슬래브의 크기는 횡방향 3.6m, 종방향 6.0m로 설정하였으며, 수렴성 분석(Convergence test)을 토대로 요소수를 10개로 설정하여 노상지지력, 하중, 콘크리트 슬래브의 두께 3가지 인자에 대한 콘크리트 슬래브의 인장응력과 처짐량의 변화를 분석하였다.

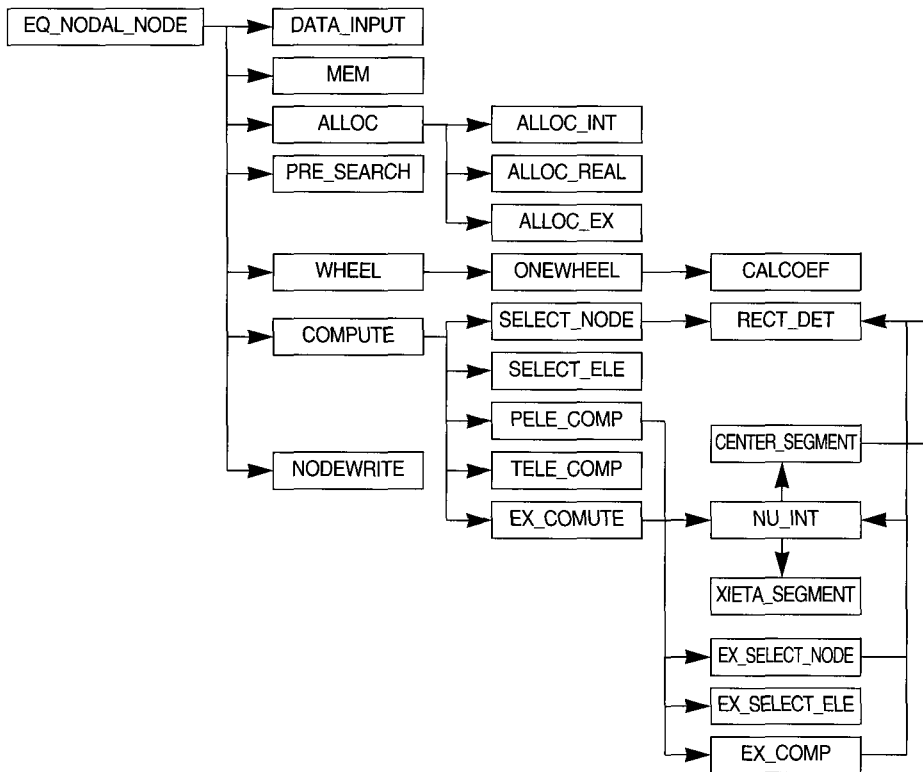


그림 5. 판/휠 요소에 대한 하중변환 서브루틴의 구성

1) 분석 조건

표 1과 그림 6은 프로그램 검증 및 민감도 분석에 적용된 단면 및 물성 조건으로서, 그림 6의 슬래브 내 숫자 1, 2, 3, 4는 하중재하 위치를 나타낸다. 표

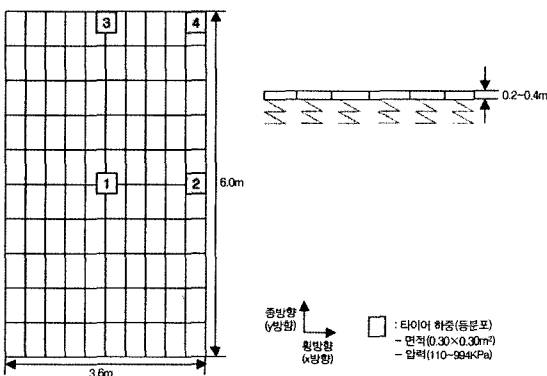


그림 6. 민감도 분석에 적용된 기준 단면

1의 굵은(bold)체는 분석의 기준 조건을 나타낸다.

모형에 의해 산출된 결과의 타당성을 검증하기 위하여 기존 콘크리트 구조 해석 모형인 Westergaard 계산식과 ILLISLAB를 이용하였다. 이때, Westergaard 계산식은 등분포하중을 고려할 수 없으므로, ILLISLAB이나 개발 모형에 입력되는 등분포하중을 집중하중으로 변환하여 적용하였다. 또한 등분포하중을 재하할 경우에는 본 연구에서 개발된 판/휠 요소의 하중변환 알고리즘을 적용하여 해석하도록 하였다.

2) 노상 지지력의 영향

콘크리트 포장은 대부분의 교통하중을 콘크리트 슬래브의 휨강성으로 지지하므로 일반적으로는 노상의 영향이 적게 받는 것으로 알려져 있다. 그림 7은



표 1. 민감도 분석 인자 및 범위

접지압		콘크리트 슬래브		노상 지지력 (kN/m ³)	기준 조건에 대한 비율
면적 (m×m)	압력 (kPa)	두께 (m)	탄성계수 (GPa)		
.	110	0.06	.	16,292	20%
.	331	0.18	.	48,876	60%
0.30×0.30	552	0.30	27.58	81,460	100%
.	773	0.42	.	114,044	140%
.	994	0.54	.	146,628	180%

노상 지지력(Winkler foundation, Elastic foundation)과 접지압의 크기가 콘크리트 슬래브 하부 인장응력에 미치는 영향을 분석하고 기존 해석결과와의 차이를 확인하기 위하여, 접지압 994, 552, 110kPa의 조건에서 노상 지지력을 16,292~146,628kN/m³로 변화시킬 경우 그에 따라 발생하는 횡/종방향 인장응력을 나타낸 것이다.

그림 7에 나타난 바와 같이, 노상 지지력에 따른

하부 인장응력은 ILLISLAB, Westergaard 계산식, 개발 모형이 모두 유사한 결과를 나타내어 개발된 모형이 노상조건에 무관하게 타당한 값을 산출하는 것으로 판단되었다. 특히 종방향(y방향) 응력의 경우, 개발 모형과 ILLISLAB에서 계산된 하부 인장응력은 거의 일치하는 결과를 나타내었으며, Westergaard 계산식과는 0.2E+06 Pa 정도의 차이를 나타내었다. 반면 하중과 노상 지지력에 따른

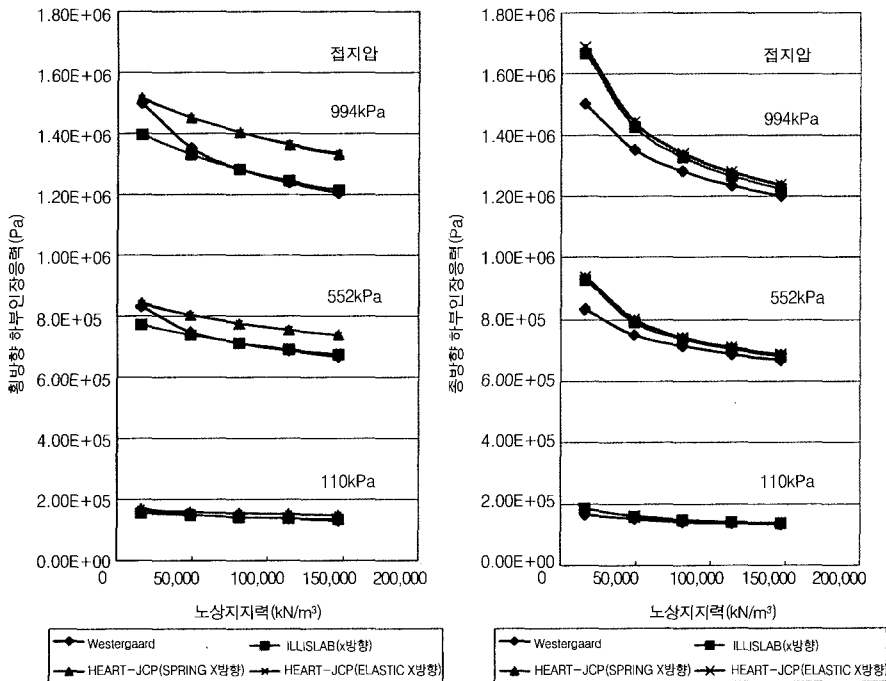


그림 7. 노상 지지력과 접지압에 따른 하부 인장응력의 변화



횡방향(x방향) 인장응력은 개발 모형과 ILLISLAB에서 산출된 결과가 일치하지는 않았는데, 이는 개발 모형과 ILLISLAB의 경계조건과 하중 재하 방법의 차이에 의한 것으로 판단된다. 또한 횡방향 하부 인장응력의 경우, 개발 모형과 ILLISLAB의 결과는 Westergaard 계산식의 결과와 다른 경향을 나타내었는데, 이는 Westergaard 계산식이 콘크리트 슬래브의 길이와 응력 발생 방향에 대한 차이를 고려하지 못하기 때문에 발생한 것으로 종/횡방향 인장응력의 차이가 커지는 조건(큰 하중+작은 노상 지지력 조건)에서는 Westergaard 계산식을 적용하기 어려울 것으로 판단된다. 한편, 노상 지지력의 변화에 따른 하부 인장응력의 변화는 접지압이 큰 조건(994 kPa)에서 두드러지게 나타나는데, 이는 접지압이 커지면서 전제하중에 대한 노상의 부담 비율이 증가하기 때문으로 판단되었다.

3) 하중 위치의 영향

그림 8은 개발된 모형과 ILLISLAB를 이용하여 하중 재하 위치와 접지압에 따른 콘크리트 슬래브 하부의 처짐을 나타낸 것으로서, 개발된 모형의 노상은 Winkler foundation을 이용한 방법을 적용하였다.

이때, 중앙부(Interior) 하중 재하 조건을 나타내는 1번을 제외한 나머지 하중은 하중 경계면이 콘크리트 슬래브의 외곽 면과 일치하도록 위치하였으며, 기타의 단면 크기, 물성 등은 위의 기준 조건을 따르도록 하였다.

그 결과, 콘크리트 슬래브 하부의 처짐량은 접지압이 변화함에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었으며, 각 하중 위치에서의 최대 처짐량 차는 접지압이 994 kPa일 때 발생하였다. 1, 2, 3번 위치에서 두 모형에서 계산된 처짐량 차이는 최소 3.6E-04mm에서 최대 1.7E-03mm까지 발생하였으며, 이 차이는 Westergaard 계산식에 의한 중앙부 처짐량이 6.5E-02mm 정도인 것을 고려할 때 비교적 크지 않은 것으로 판단된다. 두 모형의 처짐량 차이는 4번

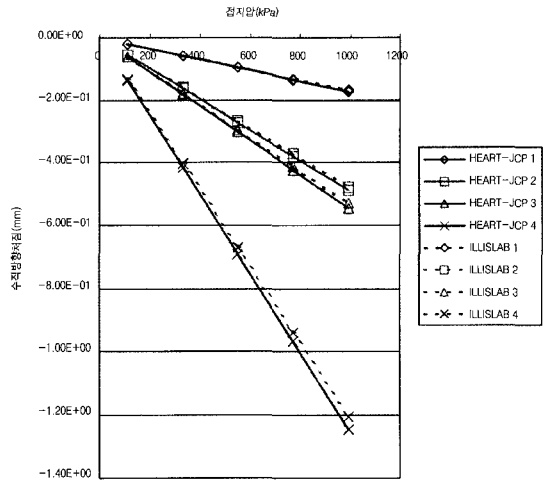


그림 8. 하중재하 위치와 접지압의 크기 따른 수직방향 처짐의 변화

모서리 하중 재하 조건에서 최대가 되었는데, 약 4.0E-2mm의 처짐량 차이가 계산되었다. 콘크리트 슬래브의 수직방향 처짐량은 4번, 3번, 2번, 1번 순으로 계산되었으며, 이는 일반적인 구조해석 결과의 경향과 일치한다.

4) 콘크리트 슬래브 두께의 영향

그림 9는 콘크리트 슬래브의 두께 변화에 따른 콘크리트 슬래브의 하부 인장응력을 나타낸 것으로, 슬래브의 두께 변화 폭은 기준 조건에 대하여 20, 60, 100, 140, 180%로 설정하였으며, 노상 지지력은

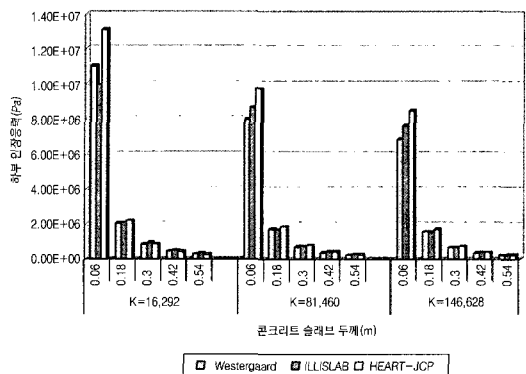


그림 9. 콘크리트 슬래브의 두께와 노상 지지력에 따른 인장응력의 변화



16292, 81460, 146628 kN/m³조건을 고려하였다.

그림 9에 나타난 바와 같이, 콘크리트 슬래브의 두께는 슬래브 하부의 인장응력에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 다른 민감도 인자와는 달리 인장 응력의 변화가 비선형적인 경향을 나타내었다. 이는 응력 계산시 콘크리트 슬래브의 두께가 제곱의 차원으로 고려되기 때문으로, 콘크리트 슬래브의 두께가 0.06~0.3m으로 작고 노상 지지력이 16,292 kN/m³으로 영향력이 작은 조건에서 두드러지게 나타났다. 특히 콘크리트 슬래브의 두께가 0.06m이고 노상 지지력이 16,292 kN/m³인 조건에서의 인장응력은 약 1.0E+7~1.2E+07 Pa로 계산되었으며 이는 기준 조건에 대하여 약 10배에 해당한다. 이러한 경향은 ILLISLAB와 개발 모형에서 공통적으로 나타났으며, Westergaard 계산식에 비하여 ILLISLAB과 개발모형에서 응력이 크게 산출하는 것으로 나타났다. 또한 개발 모형은 전반적인 조건에서 상대적으로 응력을 크게 산출하였는데, 이는 앞서 언급한 바와 같이, ILLISLAB과 개발모형의 경계 조건 및 하중재하 방법이 상이하기 때문에 발생하는 차이로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 기존의 유한요소법에 근거한 포장 해석 모형 분석을 바탕으로, 하중 변환 알고리즘을 적용한 줄눈 콘크리트 포장 구조해석 기본 모형을 개발하였으며, 이에 따른 수렴성 시험과 프로그램 검증, 민감도 분석을 수행하였다. 본 논문에서 개발한 프로그램의 구조적 특성, 프로그램 검증 및 민감도 분석결과를 정리하면 다음과 같다.

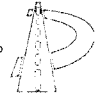
- 개발된 프로그램은 판/셸 요소, 스프링 요소, 보 요소를 이용하여 줄눈 콘크리트 포장의 거동을 해석한다.
- 개발된 프로그램은 하부층을 합성층(노상+보조기층, 기층)으로 가정하고, 하부층의 합성지지력은

Winkler foundation 과 Elastic foundation으로 모사하여 해석한다. 또한 다웰바와 타이바는 보요소를 이용하여 모사한다.

- 개발된 프로그램은 연속체 요소에 적용하여 사용될 수 있는 하중 변환 알고리즘을 수정/보완하여 적용하였으며, 이를 통하여 하중 재하 위치와 수평 재하 각도에 제약받지 않고 해석을 수행할 수 있다.
- 개발된 프로그램은 각각의 서브루틴을 가능한 모듈화하여 향후 다양한 방법으로 수정/보완이 쉽게 이루어질 수 있다.
- 개발된 프로그램은 전체적인 결과에서 ILLISLAB 및 Westerggard 계산식과 유사한 결과를 나타내었다. 슬래브의 두께가 매우 작거나 노상지지력이 매우 큰 경우에는 기존의 해석 결과와 다소 차이를 나타내었으나, 이는 기준 해석 이론 및 모형과 경계조건 및 하중재하 방식의 상이성에서 발생한 것으로 판단된다.
- 노상 지지력에 대한 프로그램 검증 및 민감도 분석을 수행한 결과, 개발모형에 의하여 산출된 하부 인장응력과 Westergaard 계산식이나 ILLISLAB에 의하여 산출된 하부 인장응력의 차이는 10E+07 Pa이하로 상대적으로 작은 것으로 나타났다.
- 다양한 조건에 대한 검증 및 민감도 분석 결과, 콘크리트 슬래브의 두께는 포장의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 인자이며, 노상지지력은 상대적으로 거의 영향을 미치지 않는 것이 개발모형과 ILLISLAB의 결과에서 확인되었다.

6. 참고문헌

1. 윤태영 (2003), "하중변환 알고리즘을 적용한 줄눈 콘크리트 포장 해석 프로그램 개발", 중앙대학교.
2. Jiwon Kim (2000), "Three-dimensional finite element analysis of multi-layered systems", University of illinois.



3. Robert D. Cook (1994), "Finite element modeling for stress analysis", John Wiley & Sons.
4. Carlos A. Felippa (2001), "Introduction to finite element methods", University of Colorado
5. G.L. Fenves (2000), "Finite element method", University of Berkeley.
6. 최양근 (1989), "유한요소해석" 집문당.
7. Samir N. Shoukry (2000), "Finite element modeling of pavement structures", *Preproceedings of the second international symposium on 3D Finite element for pavement analysis, design, and research.*
8. Stacey L. Edgar, 류성렬 (1994), "Fortran 90", 태정출판사.
9. A.M.Iannides, E.J. Brenberg, M.R.Thompson (1980), "Finite-element model with stress-dependent support", *Journal of the American Concrete Institute.*
10. Amir M. Tabatabaie, Ernest J. Brenberg (1982), "Finite-element analysis of jointed or cracked concrete pavements", *Journal of the American Concrete Institute*
11. Anastasios M. Ioannides, Craig M. Davis, Christopher M.Weber (1998), "Westergaard curling solution reconsidered", *TRB*
12. Amir M. Tabatabaie, Ernest J. Barenberg (1980), "Structural analysis of concrete pavement systems", *Transportation engineering journal*
13. Yang H. Huang, "Pavement analysis and design", University of Kentucky,
14. William G. Davids (2000), "Effect of dowel looseness on response of jointed concrete pavements", ASCE.
15. Chen-Ming Kuo, Kathleen T. Hall, Michael I. Darter (1996), "Three-dimensional finite element model for analysis of concrete pavement support", *TRB.*
16. Lutll Raad, Jose L. figueroa (1980), "Load response of transportation support systems", ASCE.
17. William G. Davids (1999), "Foundation modeling for jointed concrete pavements", *TRB*
18. Michael I. Hammons, John B. Metcalf (1999), "Effect of transverse shear on edge stresses in rigid pavements", *Journal of Transportation Engineering*
19. William. H. Press (1990), "Numerical recipes in fortran 90"

〈접수 : 2003. 10. 28〉