

## 콘크리트포장 줄눈부의 평가에 관한 기법연구

### A Study on the Evaluation System of Jointed Concrete Pavement

박 제 선\*    이 주 형\*\*    홍 창 우\*\*    이 정 호\*\*  
Park, Je-Seon   Lee Joo-Hyung   Hong Chang-Woo   Lee, Jung Ho

#### Abstract

The joint in the concrete pavement provides a control against transverse or longitudinal cracking at slab, which may be caused by temperature or moisture variation during or after hydration. Without control of cracking, random crack may cause more serious distresses and result in structural or functional failure of pavement system. Sometimes, joint itself, purposed to control crack, may cause a distresses in joint due to its inherent weakness in structural integrity. Thus, the load transfer capacity in joint is very important for serviceability and durability.

The purpose of this dissertation was to develop an evaluation system at joints of jointed concrete pavement using finite element analysis was performed using ILLI-SLAB program with a selected variables which might affect fairly to on the performance of transverse joints. The most significant variables were selected from precise analysis. It was concluded that the variables which most significantly affect to pavement deflections are the modulus of subgrade reaction(K) and the modulus of dowel/concrete interaction(G), and limiting criteria on the performance of joints at JCP are 300pci, 500,000 lb/in. respectively.

키워드 : ILLI-SLAB, 노상지지력계수, 다웰/콘크리트 상호관계

Keywords : *ILLI-SLAB, Modulus of subgrade reaction, Modulus of dowel/concrete interaction*

#### 1. 서 론

콘크리트포장은 콘크리트 슬래브가 구조체로서의 높은 휨강도와 큰 탄성계수를 가지므로 휨응력 및 전단력에도 저항을 하게 된다. 따라서, 콘크리트포장은 아스팔트포장에 비하여 내구성 및 중차량에 대한 적용성이 뛰어나며 장기간 공용성을 지닌다. 이러한 콘크리트포장의 줄눈은 슬래브의 온도나 습도 변화에 의한 구속변형에 의해 슬래브 내부에 발생하는 종방향 균열이나 횡방향 균열발생을 제어할 목적으로 설치하나, 때때로 포장손상의 원인이 된다. 이는 줄눈부에서의 불연속성 때문에 두 슬래브 사이의

하중 전달기능을 감소시키며, 상대적으로 구조적 취약성을 지녔기 때문이다. 그러므로 콘크리트포장 줄눈부 손상유형 및 정도에 대한 객관적이고 과학적인 평가가 이루어져야 합리적이고 경제적인 보수방법을 결정할 수 있다.

본 논문은 콘크리트포장에서 가장 취약한 줄눈부와 포장체의 구조적 거동을 콘크리트포장 해석 프로그램인 ILLI-SLAB를 이용하여 콘크리트 포장의 줄눈부를 평가하는데 목적이 있다. 이를 위해 콘크리트 포장에서 가장 취약한 줄눈부에 영향을 줄 수 있는 변수를 선정하고, 포장해석 프로그램인 ILLI-SLAB를 사용하여 민감도 분석을 함으로써 줄눈부에 영향을 크게 미치는 변수를 찾았다. 이러한 변수를 세밀히 분석해 줄눈부의 하중전달효과 및 표면 처짐의 관계를 나타내어, 현장에서 FWD 측정을 실시하여 얻은 하중전

\* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

\*\* 강원대학교 산업기술연구소 연구원

달효과와 재하위치의 표면 처짐을 통해 콘크리트 포장체를 평가할 수 있었다.

## 2. 탄성체 기초위의 판해석

Westergaard<sup>(23)</sup>는 3가지 종류의 하중이 각각의 경계조건을 가지고 무한히 큰 콘크리트 슬래브에 작용할 때의 응력과 처짐을 산정하는 이론식을 제시하였다. 하중 종류로는 첫째, 선단의 영향을 받지 않는 4방향으로 모두 무한히 큰 슬래브 내부에 적용된 하중, 둘째, 우각부의 영향을 받지 않는 반 무한의 슬래브의 선단에 적용된 하중, 셋째, 두 방향으로 무한한 두 개의 선단이 직각으로 만나는 슬래브의 우각부에 적용된 하중 세 가지이다. 이 식에서 Westergaard는 탄성이론을 사용하였고, 포장이 Winkler 기초 위에 있다고 가정하였다. 즉, 어느 점에서 슬래브와 노반 사이의 반작용적인 압력은 노상지지력 계수 또는 K 값이라 불리는 비례상수를 가지고, 그 점에서의 처짐과 비례하고 모든 다른 점들에서의 처짐과는 독립적이라고 하는 것이다. Fig.2-1에서 (a)는 Winkler 기초가 집중하중에 대한 거동을 나타낸다.

다음 식들은 3가지 종류의 하중이 각각의 경계조건을 가진 콘크리트 슬래브에 작용하였을 때 슬래브에 발생하는 최대응력과 최대처짐을 나타낸다.

### ① 내부하중

$$f = 0.275(1+\nu) \frac{p}{h^2} (4 \log \frac{l}{b} + 1.069) \quad (2.1)$$

$$\Delta = \frac{P}{8Kl^2} \quad (2.2)$$

### ② 선단하중

$$f = 0.497(1+\nu) \frac{p}{h^2} (4 \log \frac{l}{b} + 0.359) \quad (2.3)$$

$$\Delta = \frac{1}{\sqrt{6}}(1+0.4\nu) \frac{P}{Kl^2} \quad (2.4)$$

### ③ 우각부하중

$$f = \frac{3P}{h^2} \left[ 1 - \left( \frac{a}{l} \right)^{0.6} \right] \quad (2.5)$$

$$\Delta = \frac{P}{kl^2} \left[ 1.1 - 0.88 \frac{a}{l} \right] \quad (2.6)$$

여기서,  $f$  = 하중 하에 최대응력

$\Delta$  = 하중 하에 최대처짐

$P$  = 적용하중

$a$  = 원형 재하 면적의 반지름

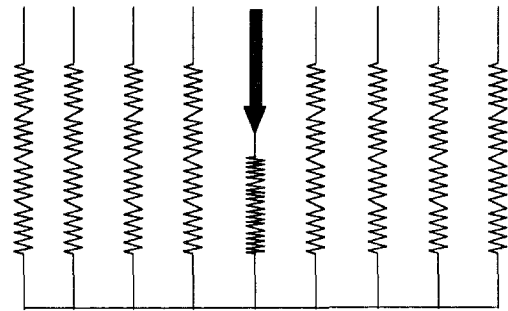
$h$  = 슬래브 두께

$b = \sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675h$ , (for  $a < 1.724h$ )  
 $= a$ , (for  $a > 1.724h$ )

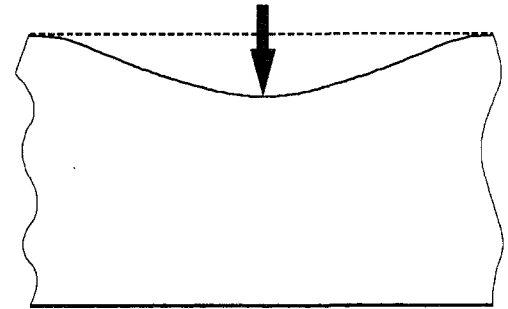
$K$  = 노상지지력 계수

$l$  = 노상에 대하여 포장의 상대강성의 반지름

$$l = 4 \sqrt{\frac{Ek^3}{12(1-\nu^2)K}} \quad (2.8)$$



(a) Winkler Foundation



(b) Elastic Solid Foundation

Figure 1 Comparison of Winkler Foundation with Elastic Solid Foundation

## 3. 현장측정

### 3.1 재하시험

현장시험은 88고속도로를 대상으로 실시하였다. 먼저 다웰바가 설치된 슬래브 중앙에 FWD하중을 타격 하여 기울임 보정계수를 구하고, 각 바퀴통과 부분의 줄눈부에 FWD하중을 타격 하여 처짐비와 기울임 보정계수로 하중진달효과를 산출하였다.

FWD는 포장면에 충격하중을 재하 하여 표면의 처

짐을 측정하는 장비로서 측정자료의 역산을 통해 포장구성단면 각 층의 물성을 파악하고 향후 예상 교통량을 감안한 포장체의 잔존수명을 예측할 수 있다. 특히, 콘크리트 포장의 경우 줄눈 균열부의 하중전달기능 파악 및 포장슬래브 하부의 공동예측 등을 수행할 수 있다. 현장계측조사 방법에는 여러 가지가 있으나, 이 연구에서는 하중전달 효과를 측정할 수 있으며 시험 차량을 실제차량 하중조건에 근접 시킬 수 있는 FWD 측정을 그 대상으로 하였고, FWD를 이용하여 콘크리트 포장체의 구조지지력을 측정할 수 있고 줄눈부와 균열부의 하중전달기능을 파악하고자 하였다. Fig.2와 같이 콘크리트포장 표면에 충격하중을 가하여 geophone을 이용해 처짐을 측정하였다. 이때 기온이 27°C 이상인 경우에는 줄눈부의 균열이 완전히 닫혀질 수가 있으므로 측정하지 않는다. 측정은 주로 줄눈부에서 실시하였으나, 포장 자체의 구조적 성능 평가 및 슬래브 기울임 보정계수(B)를 구하고자 Fig. 3-1 에서와 같이 슬래브 중앙에서도 가끔 수행하였다. 줄눈부에서의 측정은 다웰바 설치구간과 미설치구간을 측정하여 하중전달기능의 차이를 고찰하고자 하였다.



Figure 2. FWD Test

### 3.2 하중전달효과

일반적으로 하중전달효과는 하중이 재하 되지 않은 쪽의 처짐량과 하중이 재하된 쪽의 처짐량비로 나타낸다. FWD 시험을 통해 측정된 처짐 결과물 가지고 다음 식(3.1)에 의해 하중전달효과( $\Delta LT$ )를 계산할 수 있다.

$$\Delta LT = 100 \times \left( \frac{\Delta_{ul}}{\Delta_l} \right) \times B \quad (3.1)$$

여기서,  $\Delta LT$ : 하중전달에 따른 처짐, %

$\Delta_{ul}$  : 하중이 재하되지 않은 쪽의 처짐량( inch)

$\Delta_l$  : 하중이 재하된 쪽의 처짐량(inch)

$B$  : 측정에 따른 슬래브 기울임 보정계수

$B$ 값은 측정에 따른 슬래브 기울임 보정계수로 줄눈부의 실제 처짐비를 구하기 위해 슬래브의 전체적인 기울기를 보정하는 것으로, 슬래브의 중앙에 FWD 하중을 타격하여 타격점의 처짐( $d_0$ )과 타격점으로부터 12in. 떨어진 위치의 처짐( $d_{12}$ )을 가지고 다음 식(3.2)을 사용하여 구한다.

$$B = \frac{d_{0 \text{ center}}}{d_{12 \text{ center}}} \quad (3.2)$$

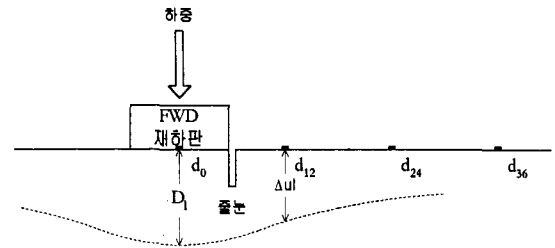


Figure 3 FWD Measurement at Test Joint

### 3.3 측정 결과

FWD 충격하중은 9,000 lb (4.1ton)크기로 타격하였다. 먼저 슬래브 중심부에 하중을 타격하여 슬래브 기울임 보정계수를 구하고, 바퀴통과부분의 줄눈부에 FWD하중을 타격 하여 재하 위치의 처짐과 재하 하지 않은 쪽의 처짐을 구하여 식(1)에 의해 하중전달효과를 산정 하였다.

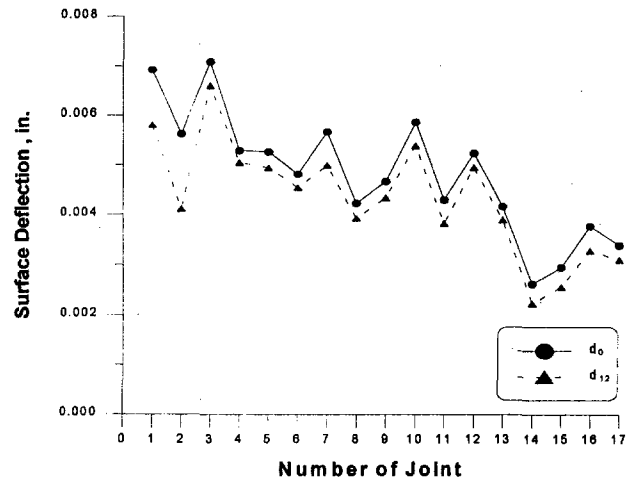


Figure 4 Surface Deflection from Test

대부분의 줄눈부에서 하중전달효과가 큼을 Fig. 3-7에서 볼 수 있다. 그러나 2번 줄눈부에서의 하중전달효과는 77.08%로 다른 줄눈부에 비해 작은 하중전달효과가 나타났다. 이 2번 줄눈부의 육안조사를 살펴보면, 줄눈부에는 큰 손상이 없으나, 슬래브에 팽창부분이 발견되고 약 1.7m길이의 균열이 발견되었다.

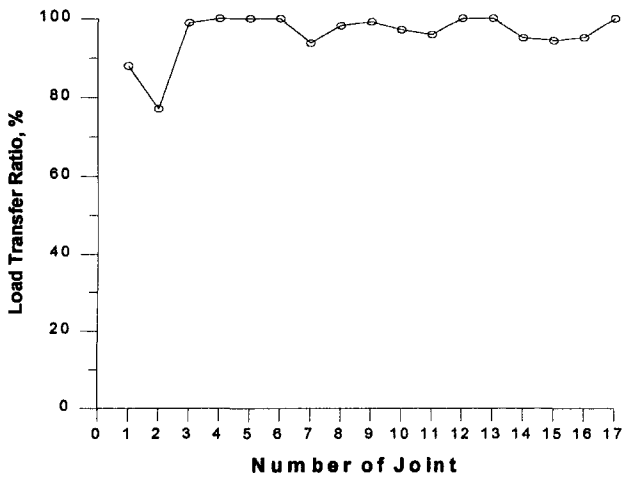


Figure 5 Load Transfer Ratio from FWD

#### 4. 유한요소해석에 의한 분석

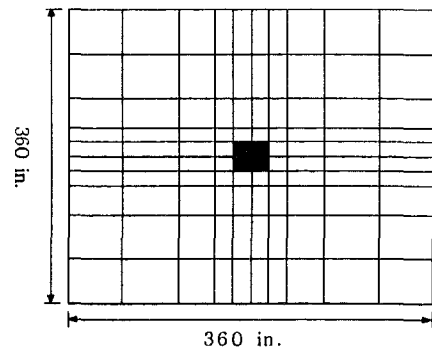
콘크리트포장 해석 프로그램인 ILLI-SLAB 사용한 모델의 검증용 통해 이 프로그램의 타당성을 알아보았고, 줄눈부 거동의 영향을 주는 변수에 대해 분석하였다. 먼저 기존의 이론적 해와 FWD시험 결과를 가지고 유한요소 모델을 검증하여 보았으며, 콘크리트 포장에서 가장 취약한 줄눈부 거동에 영향을 주는 변수를 선정하여 영향관계를 분석해 주요 변수를 선정하였다.

##### 4.1 모델검증

유한요소 분석과 이론적 해석 결과를 비교하였고, 그 다음 실제 현장에서 시험한 결과와 이 프로그램을 사용한 유한요소 분석과 비교하여 ILLI-SLAB 프로그램의 타당성을 검증하였다. 이론식은 Westergaard의 방정식을 사용하였고, 현장시험은 FWD시험을 사용하였다.

Fig. 6~8은 360in.×360in.의 큰 콘크리트 슬래브에 10 kips의 하중이 각각 내부, 선단, 우각부에 재하 하

는 경우의 유한요소법 모델을 나타내며, 각각의 유한요소해석 결과를 Westergaard가 제시한 이론식의 결과치와 비교하였다. 여기서 Westergaard의 정밀해는 식(2.1)과 식(2.3), 식(2.5)를 사용하여 산정 하였다. Westergaard의 정밀해는 무한슬래브에 대해서 해석한 반면, 유한요소분석은 360in.×360in.의 비교적 큰 슬래브를 사용하였다. Westergaard의 이론식에 적용한 하중은 지름 12in.인 작은 원의 면적으로 균일하게 분포한다고 가정하였으며, 유한요소분석에서는 지름 12in인 원의 면적을 정사각형 면적으로 환산하여 10.63in. 길이의 정사각형 면적으로 하중조건을 선택하였다. 콘크리트 슬래브의 탄성계수와 포아송 비는  $4.0 \times 10^6$  psi와 0.20, 슬래브 두께는 12in.로 가정하였다. 위와 같은 가정하에 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 pci 일곱 가지의 노상지지력 계수를 가지고 비교하였다. 세 가지 그림에서 볼 수 있듯이 이론해와 유한요소 해석값이 유사함을 알 수 있다.



##### Interior Loading

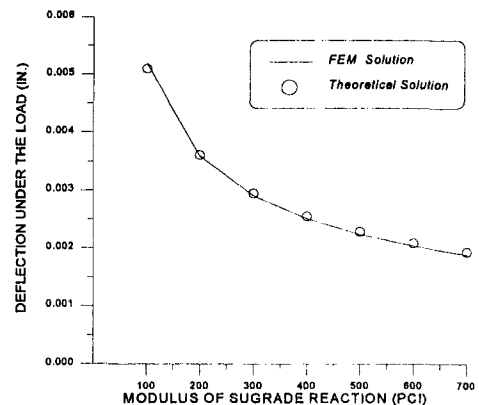
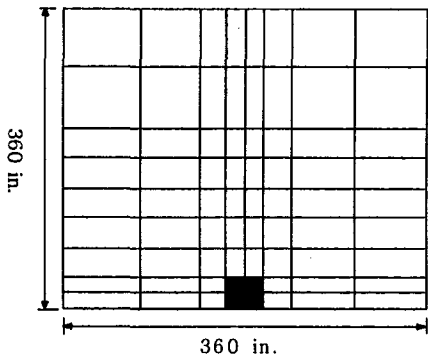


Figure 6 Comparison of Finite Element Solutions with Westergaard's Equation for Interior Loading



Edge Loading

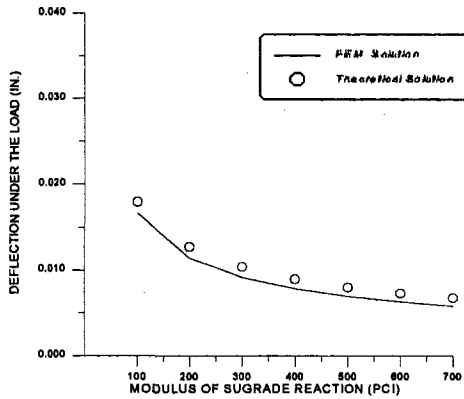


Figure 7 Comparison of Finite Element Solutions with Westergaard's Equation for Edge Loading

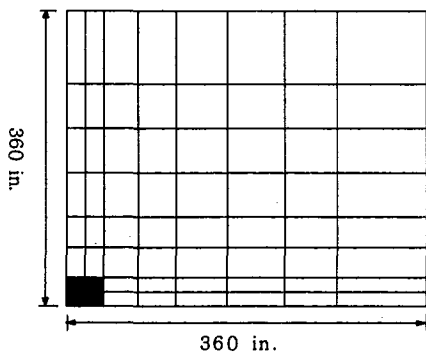


Figure 8 Comparison of Finite Element Solutions with Westergaard's Equation for Corner Loading

Corner Loading

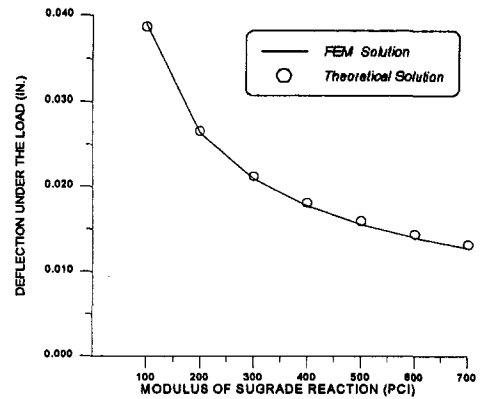


Figure 8 Comparison of Finite Element Solutions with Westergaard's Equation for Corner Loading(continued)

#### 4.2 민감도분석

콘크리트포장의 구조적 거동에 설계 변수가 미치는 영향을 분석하기 위해 민감도 분석을 실시하였다. 변수로는 골재의 맞물림효과, 콘크리트의 탄성계수, 린 콘크리트의 탄성계수, 줄눈틈, 콘크리트의 포아송비, 다웰바의 탄성계수, 노상지지력 계수, 다웰/콘크리트의 상호관계 계수 등 8가지를 선택하였다.

다웰/콘크리트 상호관계 계수(G)는  $1.0 \times 10^5$ ,  $2.0 \times 10^5$ ,  $5.0 \times 10^5$ ,  $1.0 \times 10^6$ ,  $2.0 \times 10^6$ ,  $3.0 \times 10^6$ ,  $4.0 \times 10^6$  lbs/in.로 변화에 따른 줄눈부의 처짐을 Fig. 13에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 이 계수의 증감에 따른 처짐의 차이도 큼을 알 수 있으며, 이는 줄눈부 거동에 이 다웰/콘크리트 상호관계 계수(G)가 상당한 영향을 미침을 알 수 있다. 또한, 7가지 노상지지력에 대한 줄눈부 처짐을 나타내고 있는데 노상지지력 계수가 증가할수록 처짐은 상당히 감소하는 것을 볼 수 있으며 200 pci 이하에서는 처짐이 크게 증가하는 것을 알 수 있다.

Effect of Concrete's Modulus of Elasticity (Deflection)

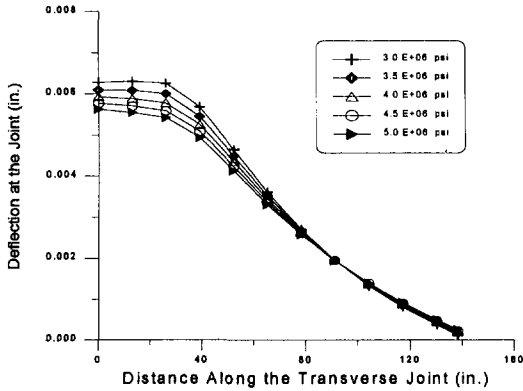


Figure 9 Effect of Concrete's Modulus of Elasticity on Pavement Responses

Effect of Modulus of Subgrade Reaction (Deflection)

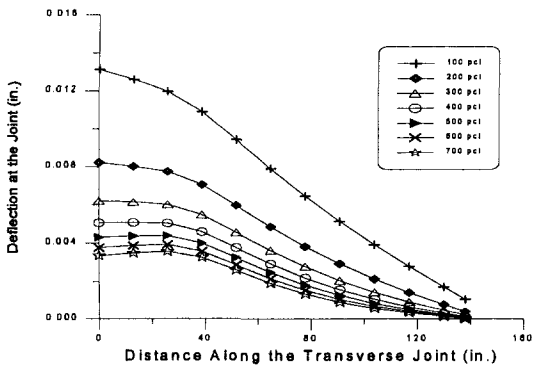


Figure 10 Effect of Modulus of Subgrade Reaction on Pavement Responses

Effect of Modulus of Dowel/Concrete Interaction (Deflection)

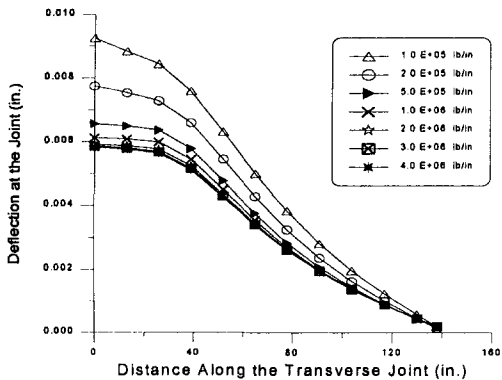


Figure 11 Effect of Modulus of Dowel/Concrete Interaction on Pavement Responses

노상지지력 계수(K)와 다웰/콘크리트의 상호관계 계수(G)를 제외하고 나머지 변수들은 처짐에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있었으며, 노상지지력 계수와 다웰/콘크리트 상호관계 계수에 따라서 줄눈부의

처짐 차이가 커짐으로 줄눈부의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 변수임을 알 수 있다.

### 4.3 하중전달효과 평가

Table 1은 민감도 분석에 사용된 계수 값의 범위를 정리한 것이다. 포장 시스템을 분석하기 위해, 표면 처짐과 하중전달효과는 다른 변수들을 일정하게 유지하면서 하나의 계수(K 또는 G)를 변화시켜 산정하였다. 다른 모든 변수와 하중의 재원은 앞에서 언급한 표준 콘크리트 포장 모델의 경우와 같게 유지하였다.

Fig. 12와 13은 각각 FWD 하중에 의한 포장표면 처짐과 하중전달효과와 다웰/콘크리트 상호관계 계수(G)의 관계를 여러 노상지지력 계수(K)에서 보여주고 있다. Fig. 14에서 노상지지력 계수가 300pci 이상인 경우는 노상지지력 계수 변화에 따른 처짐 차이가 적어짐을 알 수 있으나, 노상지지력 계수가 300pci 이하인 경우는 노상지지력 계수의 변화에 따른 처짐 차가 커짐을 알 수 있다. 이는 노상이 양호한 지지조건이 300pci이상임을 나타내고 있다. 또한, Fig. 14와 Fig. 15에서 노상이 양호한 지지조건인 300pci이상인 경우에 대해서 다웰/콘크리트 상호관계 계수가 500,000 lb/in.이상인 경우는 표면 처짐이 일정하고, 하중전달효과가 좋으나, 500,000 lb/in.이하에서는 표면 처짐이 상당히 증가하고, 하중전달효과가 떨어짐을 알 수 있다. 즉, 양호한 지지조건인 노상인 경우 다웰/콘크리트 상호관계 계수의 임계값은 500,000 lb/in.임을 나타내고 있다.

Table 1 Modulus Values Used in the Sensitivity Analysis

Modulus	Value
K ( pci )	100, 200, 300, 400, 500, 600, 700
G(×10 <sup>4</sup> lbs/in)	20, 30, 50, 75, 100, 200, 300, 400

대부분의 포장의 다웰/콘크리트 상호관계 계수는 상당히 큰 값을 가지는 반면 노상지지력 계수는 낮은 값이 나타남을 알 수 있다. 이는 줄눈부의 하중전달기구인 다웰바가 그 기능을 충분히 발휘함을 나타내고 있다. 그러나, 이 포장의 지지조건은 매우 불량한 것을 알 수 있으며, 심지어 임계값보다 낮은 지지조건을 갖는 슬래브도 발견할 수 있다. 이와 같은 지지조건이 불량한 슬래브는 처짐이 크게 발생하며 포장의 큰 손상을 발생시킨다.

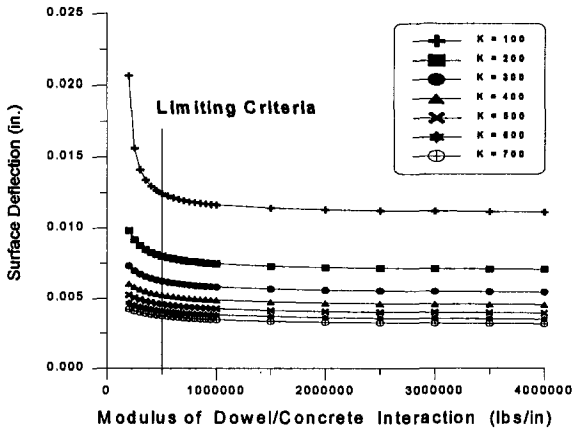


Figure 12 Variation of Surface Deflection at the Joint with Modulus of Dowel/Concrete Interaction

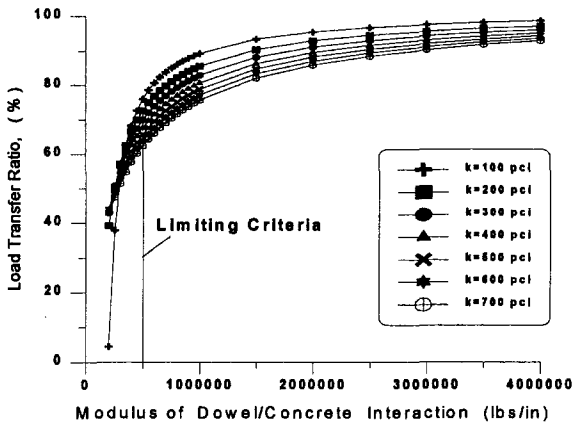


Figure 13 Variation of Amount of Load Transfer Across the Joint with Modulus of Dowel/Concrete Interaction

## 5. 결 론

줄눈 콘크리트포장의 줄눈부 손상 원인 및 손상 정도를 합리적이고 정량적으로 평가하기 위하여 유한요소법을 이용하여 평가하였으며, 이를 현장측정결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 콘크리트 슬래브의 표면 처짐과 하중전달효과의 결과치, 그리고 노상지지력 계수(K)와 다웰/콘크리트 상호관계 계수(G)의 관계로 줄눈 콘크리트포장의 구조적 거동을 평가할 수 있음을 확인하였다.
2. 콘크리트포장의 줄눈부 거동에 큰 영향을 미치는 변수를 확인하고자 콘크리트포장 유한요소해석

프로그램인 ILLI-SLAB를 이용하여 민감도 분석한 결과, 노상지지력 계수와 다웰/콘크리트 상호관계 계수(G)임을 알 수 있었다.

3. 노상지지력 계수와 다웰/콘크리트 상호관계 계수를 분석한 결과 각각 300 pci와 500,000 lbs/in. 가 줄눈콘크리트포장의 줄눈부 거동에 중요한 영향을 미치는 임계값임을 확인하였다.
4. 실제 고속도로에 적용하여 평가해 본 결과, 다웰/콘크리트 상호관계 계수는 높은 값을 가지나, 노상지지력 계수는 매우 낮은 값을 가지므로 노상지지 조건이 양호하지 않음을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] Tabatabaie, A. M., "Structural Analysis of Concrete Pavement Joint," Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1978
- [2] Westergaard, H. M., "New Formulas for Stresses in Concrete Pavements of Airfields", Transactions, *American Society of Civil Engineering*, Vol. 113, 1948, pp. 425-439.
- [3] Westergaard, H. M., "Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis", *Public Road*, 1926, pp. 25-35.
- [4] Khazanovich, L., "Structural Analysis of Multi-Layered Concrete Pavement Systems," Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1994