

## 콘크리트 포장에서 FRP 튜브 다웰바의 역학적 특성 분석

### Structural Analysis of Concrete-filled FRP Tube Dowel Bar for Jointed Concrete Pavements

박준영	Park, Jun Young	정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 연구원 (E-mail : parkjevel@hotmail.com)
이재훈	Lee, Jae Hoon	정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원 (E-mail : ranian74@ex.co.kr)
손덕수	Sohn, Dueck Su	한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원 (E-mail : mgsds@ex.co.kr)

#### ABSTRACT

As well known, dowel bars are used to transfer traffic load acting on one edge to another edge of concrete slab in concrete pavement system. The dowel bars widely used in South Korea are round shape steel bar and they shows satisfactory performance under bending stress which is developed by repetitive traffic loading and environment loading. However, they are not invulnerable to erosion that may be caused by moisture from masonry joint or bottom of the pavement system. Especially, the erosion could rapidly progress with saline to prevent frost of snow in winter time. The problem under this circumstance is that the erosion not only drops strength of the steel dowel bar but also comes with volume expansion of the steel dowel bar which can reduce load transferring efficiency of the steel dowel bar. To avoid this erosion problem in reasonable expenses, dowel bars with various materials are being developed. Fiber reinforced plastic(FRP) dowel that is presented in this paper is suggested as an alternative of the steel dowel bar and it shows competitive resistance against erosion and tensile stress. The FRP dowel bar is developed in tube shape and is filled with high strength no shrinkage. Several slab thickness designs with the FRP dowel bars are performed by evaluating bearing stress between the dowel bar and concrete slab. To calculate the bearing stresses, theoretical formulation and finite element method(FEM) are utilized with material properties measured from laboratory tests. The results show that both FRP tube dowel bars with diameters of 32mm and 40mm satisfy bearing stress requirement for dowel bars. Also, with consideration that lean concrete is typical material to support concrete slab in South Korea, which means low load transfer efficiency and, therefore, low bearing stress, the FRP tube dowel bar can be used as a replacement of round shape steel bar.

#### KEYWORDS

*alternative dowel bar, concrete-filled FRP tube dowel bar, jointed concrete pavement, bearing stress*

#### 요지

콘크리트 포장의 다웰바는 교통하중을 줄눈 넘어 인접한 슬래브로 전달하는 하중전달장치이다. 현재 국내에서 사용되는 다웰바는 원형봉강으로 교통하중과 환경하중으로 인해 반복적으로 발생하는 전단응력과 휨응력에 대해 높은 내구성을 갖고 있다. 그러나, 강재 다웰바는 장기간 공용시 줄눈틈, 포장 하부 등으로 침투한 수분으로 인해 부식이 발생한다. 특히, 겨울철에 사용되는 제설용 염수와 접촉할 경우 부식은 급격히 진행된다. 다웰바에 부식이 발생하면 부피가 증가하여 줄눈의 거동을 방해하며 유효단면적의 감소로 하중전달효과는 떨어질 수 있다. 이와 함께 지속적인 원자재 가격의 상승으로 강재 다웰바의 가격 경쟁력이 크게 낮아지고 있다. 이러한 강재 다웰바의 문제점을 새로운 재료를 사용한 대체 다웰바의 개발로 이어지고 있다. 본 연구에서는 높은 인장강도, 높은 내부식성을 갖춘 FRP(fiber reinforced plastic)를 튜브 형태로 제작하고 그 속을 고강도 무수축 모르타르로 충전한 FRP 튜브 다웰바에 대한 역학적 두께 설계를 실시하였다. 역학적 두께 설계의 기준으로 다웰바와 콘크리트 면 사이에 발생하는 지압응력을 사용하였다. 지압응력의 산정을 위하여 다웰바에 전달되는 교통하중을 이론식과 유한요소해석을 통해 산출하고 실내시험을 통해 FRP 튜브 다웰바의 물성을 측정하였다. 그 결과, 직경 32mm, 40mm FRP 튜브 다웰바 모두 지압응력 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 국내 콘크리트 포장은 콘크리트 슬래브 하부에 강성이 큰 린 콘크리트층을 사용하기 때문에 다웰바에 전달되는 교통하중이 적고 이로 인해 지압응력도 낮아져 상대적으로 적은 직경의 FRP 튜브 다웰바의 사용이 가능한 것으로 판단된다.

#### 핵심용어

*대체 다웰바, FRP 튜브 다웰바, 줄눈 콘크리트포장, 지압응력*

## 1. 서론

콘크리트 포장에서 다웰바는 교통하중을 줄는 넘어 인접한 슬래브로 전달하는 하중전달장치 역할을 수행한다. 우리나라를 포함한 대부분의 국가에서 원형봉강을 다웰바로 사용한다. 하중을 전달하는 다웰바로 인해 콘크리트 포장에 발생하는 응력을 크게 줄일 수 있으며 결과적으로 슬래브 두께를 줄여 콘크리트 포장은 경제성을 확보할 수 있다. 다웰바에는 교통하중과 환경하중으로 인해 전단응력과 휨응력이 반복적으로 발생하는데 원형봉강은 이 두 가지 하중에 대해 높은 내구성을 갖고 있다. 하지만 최근 다음과 같은 두 가지 측면에서 강재 다웰바의 문제점이 제기되고 있다.

첫 번째는 강재 다웰바의 장기 공용에 따른 부식이다. 강재 다웰바는 시공 초기 녹막이 페인트를 도포하여 수분으로 인한 부식을 방지하지만, 장기 공용시에는 콘크리트와의 마찰로 페인트가 벗겨져 수분과 접촉하여 부식이 발생할 위험이 높다. 특히, 겨울철 제설용으로 사용되는 염수와 접촉할 경우 부식은 급격히 진행될 수 있다. 다웰바에 부식이 발생하면 부피가 증가하여 줄눈의 거동을 방해하거나 다웰바와 접촉한 콘크리트에 손상을 줄 수 있다. 또한, 다웰바의 유효단면적이 감소하여 하중전달 효과가 떨어질 수 있다. 두 번째는 최근 급격히 상승하고 있는 철강의 원자재 가격이다. 국내에 반입되고 있는 철광석 원자재 가격은 2004년 상반기 29달러/톤에서 2009년 상반기에는 96달러/톤으로 300% 이상이 상승했다. 이에 따라, 철광석을 원자재로 생산되는 각종 철강 제품의 가격도 크게 상승한 상황으로 강재 다웰바의 가격 경쟁력이 크게 낮아졌다. 이러한, 강재 다웰바의 문제점은 새로운 재료를 사용한 대체 다웰바의 개발로 이어지고 있다.

1990년대에 본격적으로 연구가 진행된 대체 다웰바는 부식에 대한 저항성이 높은 내부식성 재료를 사용한 연구가 주를 이루고 있다. 내부식성을 위하여 FRP(fiber reinforced plastic), 스테인레스 스틸 등을 이용한 대체 다웰바 연구가 대부분을 차지하고 있다. 이중 FRP 다웰바는 높은 인장강도, 높은 내부식성, 낮은 중량 등 다양한 장점을 갖고 있어 대체 다웰바 재료로 활발히 연구가 진행되고 있다. 하지만, FRP는 강재에 비해 상대적으로 탄성계수가 낮기 때문에 다웰바의 처짐이 크게 발생하고 이로 인해 콘크리트와의 접촉면에 발생하는 지압응력(bearing stress)이 커진다는 단점이 있다. 따라서, FRP 다웰바와 콘크리트 사이의 접촉면을 증가시켜 지압응력을 감소시키기 위해 다웰바의

단면을 타원형으로 설계하거나 직경이 큰 튜브 형태로 설계하는 연구가 활발히 진행 중에 있다. 본 연구에서는 현재 개발이 진행 중인 FRP 튜브 다웰바의 적정 직경 설계를 위하여 지압응력을 기준으로 다양한 직경에 대한 역학적 검토를 실시하였다.



그림 1. 강재 다웰바 부식에 의한 콘크리트 파손

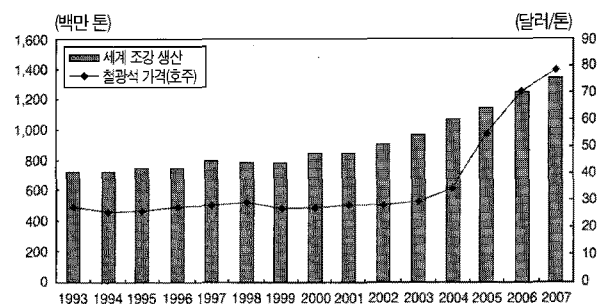


그림 2. 연도별 철광석 가격 및 조강생산량 변화

## 2. FRP 튜브 다웰바

### 2.1. FRP 튜브 다웰바의 특성

대체 다웰바는 부식방지를 위한 재료적 측면과 경제성 및 공용성 향상을 위한 기하학적 측면으로 구분할 수 있다. 재료적 측면으로는 스테인레스 스틸(Stainless steel), FRP(Fiber Reinforced Polymer) 다웰바로 분류할 수 있으며, 기하학적 측면에서는 원형, 타원형, 튜브형, 피복형 다웰바 등으로 분류할 수 있다. 재료와 형태에 따른 대체 다웰바의 장단점은 표 1과 같다. 이중, FRP 튜브 다웰바는 가격이 비싼 FRP 재료의 사용을 최소화하여 경제성을 높이고 시멘트 그라우트를 내부에 충전하여 강도를 증가시킨 장점이 있으나 제작공정이 다소 복잡하다는 단점이 있다.

1997년 미국 캔사스 주에서 FRP 튜브 다웰바의 시험 시공이 미연방도로국(FHWA)의 주관하에 추진중인 고

표 1. 대체 다웰바의 종류와 특징(HITEC, 2005)

종 류	설 명	장 점	단 점
FRP 합성수지 다웰바	FRP는 합성수지 속에 섬유재 또는 기타 강화재를 혼합시켜 강도를 증가시킨 재료	- 강한 내부식성 - 경량성 - 시멘트 콘크리트와의 유사한 강성	- 초기 공사비가 증가 - 탄성계수가 낮음
시멘트 충전 FRP 튜브 다웰바	내부식성이 강한 FRP 튜브에 고강도 시멘트 그라우트를 채움	- FRP 튜브의 내부식성 - FRP 다웰바 대비 비용절감 - 고강도 시멘트 그라우트가 다웰바의 강도를 증가시키고 하중에 의한 변형을 억제	- 공용성 자료 불충분
합성수지 피복 강재 다웰바	강재 다웰바의 표면을 약 0.5~0.8mm 두께의 플라스틱으로 도포	- 다른 대체 다웰바에 비해 상대적으로 저렴 - 높은 부식 저항성 - 공용성 우수	- 강재와 수지간의 접착 문제
스테인리스 다웰바	크롬 혼합물은 눈에 보이지 않는 크롬 산화막을 바의 표면에 형성시켜 부식에 대한 저항 또는 무반응	- 부식에 대한 강한 저항성 - 높은 강성 - 생애주기비용에 대한 장수명으로 비용/효과적 - 완전 재활용이 가능	- 초기 고가의 시공비
스테인리스 피복 강재 다웰바	탄소강봉에 스테인리스를 피복시킨 형태	- 부식에 대해 높은 저항성 - 탄소강의 역학적 물성 - 스테인리스 다웰바에 비해 저렴한 가격	- 다웰바 끝부분이 노출되어 부식 염려

성능 콘크리트 포장(high performance concrete pavement) 연구의 일환으로 진행되었다. 직경 51mm의 FRP 튜브 다웰바가 시공되었으며 1998년부터 2003년까지 하중전달율 조사가 진행되었다. 그 결과, 약 75%에서 90%의 하중전달율을 보이는 것으로 나타났다. 1999년과 2000년에는 일리노이 주에서 FRP 튜브 다웰바의 시험시공이 진행됐다. 두 시험시공에서는 앞서 캔사스 주에서 적용된 제품과 동일한 51mm 직경의 FRP 튜브 다웰바가 시공되었으며 현장조사 결과 85% 이상의 높은 하중전달율을 보였다.

2004년 Murison 등은 실내시험을 통해 FRP 튜브 다웰바의 처짐량 및 반복하중에 대한 피로특성을 분석하였다. 38mm 직경의 강재 다웰바와 FRP 다웰바, 50.8mm와 63.5mm 직경의 FRP 튜브 다웰바가 실험에 사용되었다. 그 결과, 50.8mm의 FRP 튜브 다웰바는 38mm 강재 다웰바와 거의 동일한 처짐량을 보였으며, 63.5mm FRP 튜브 다웰바는 더 적은 처짐량을 보이는 것으로 나타났다.

2006년 Wang 등은 실내시험을 통해 FRP 튜브 다웰바의 물성을 구하고 그 결과를 토대로 지압응력을 평가하였다. 직경 50mm, 59mm, 62mm, 66mm의 FRP 튜브 다웰바를 제작하여 30mm 두께의 강재 다웰바와 지압응력을 비교하였다. 그 결과, 강재 다웰바의 경우 지압응력이 19.5MPa로 나타났으며 FRP 튜브 다웰바는 각각 순서대로 16.8MPa, 10.4MPa, 9.3MPa, 8.1MPa

의 지압응력이 발생하는 것으로 나타났다.

## 2.2. 지압응력 평가 절차

지압응력은 콘크리트 속에 매설된 다웰바와 콘크리트의 접촉면에 발생하는 응력으로 교통하중에 의한 다웰바의 처짐으로 인해 발생한다. 지압응력이 콘크리트의 허용지압응력보다 큰 경우 접촉면의 콘크리트에 파손이 발생하며 이로 인해 다웰바와 콘크리트 사이에 공극이 발생한다. 이러한 공극은 다웰바의 처짐량을 증가시켜 하중전달효율을 떨어뜨리며, 수분이 침투할 공간을 만들어 다웰바의 부식을 앞당긴다. 지압응력( $\sigma_b$ )은 식 (1)과 같이 줄눈에서의 다웰바 처짐( $y_0$ )과 다웰바 지지력 계수( $k_0$ )를 이용해 구할 수 있다.

$$\sigma_b = k_0 y_0 \quad (1)$$

다웰바 지지력 계수는 다웰바의 처짐에 대해 발생하는 단위면적당 반력으로 이론적인 방법으로는 구하기가 어려워 경험적으로 구한 값을 주로 사용한다. 일반적으로 다웰바 지지력계수는 Yoder와 Witczak이 제시한 407GPa/m의 값을 사용한다.

지압응력을 구하기 위해 남은 변수는 다웰바의 줄눈에서의 처짐량이다. 다웰바의 줄눈부 처짐량을 구하는 일반적인 방법은 Timoshenko의 탄성기초 이론을 반

무한대 길이의 보에 적용하여 유도한 Friberg가 제시한 반무한 보의 처짐량 산정식이다. 이를 위해서 다웰바에 작용하는 하중 P, 다웰바의 물성(탄성계수, 전단탄성계수)을 구해야 한다. 지금까지 설명한 지압응력을 구하기 위한 이러한 일련의 절차를 정리하면 그림 3과 같다.

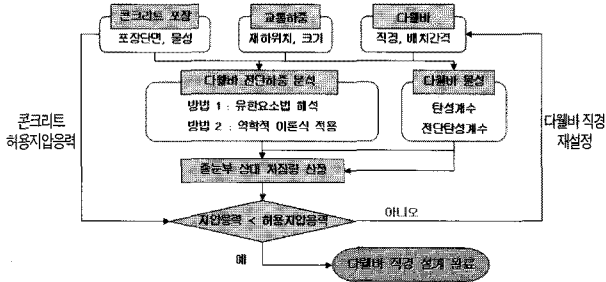


그림 3. 다웰바의 지압응력 평가 절차

### 3. 줄눈에서의 다웰바 거동

1900년대 초 콘크리트 포장에 다웰바가 처음으로 적용된 이래 다웰바의 역학적 설계 및 해석을 위해 줄눈에서의 하중에 의한 다웰바의 거동을 해석하기 위한 다양한 연구가 진행되었다. 1925년 Timoshenko와 Lessells은 콘크리트 포장 내의 다웰바의 거동을 탄성기초상 위에 있는 보의 거동으로 가정하고 역학적 해석을 시도하였다. 1940년 Friberg는 이 이론을 반무한 보에 적용하여 다웰바에 가해지는 하중으로 인한 처짐량을 구하는 공식을 유도하였고 Friberg의 공식은 오늘날까지 다웰바의 거동을 분석하는 방법으로 가장 많이 사용되고 있다.

#### 3.1. 다웰바의 처짐

콘크리트 포장에 하중이 가해지면, 슬래브 간에 상대처짐이 발생하고 하중전달장치인 다웰바에 처짐이 발생한다. 그림 4와 같이, 줄눈에 발생하는 슬래브 간의 상대처짐  $\Delta$ 는 줄눈 면에서 발생하는 처짐  $y_0$ , 다웰바의 기울기로 인한 처짐, 모멘트에 의한 처짐, 전단에 의한 처짐( $\delta$ )으로 구성된다. 이를 수식으로 표현하면 식 (2)와 같다. 여기서, 줄눈폭  $z$ 는 상대적으로 매우 작기 때문에 이와 관련된 두 항(기울기 및 모멘트에 의한 처짐)은 무시할 수 있다. 결과적으로 슬래브 간의 상대처짐은 식 (3)과 같이 정리할 수 있다.

$$\Delta = 2y_0 + z \frac{dy_0}{dx} + \frac{Pz^3}{12EI} + \delta \quad (2)$$

$$\Delta = 2y_0 + \delta \quad (3)$$

여기서,

$$\delta = \frac{\lambda P_1 z}{AG} : \text{전단변형처짐(cm)}$$

$P_1$  : 다웰바에 작용한 하중(kN)

$\lambda$  : 형상계수(원형은 10/9)

$A$  : 다웰바의 단면적( $\text{cm}^2$ )

$G$  : 다웰바의 전단탄성계수(MPa)

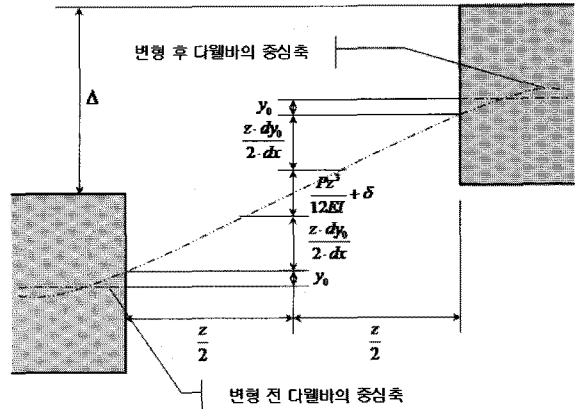


그림 4. 슬래브 간의 상대처짐

줄눈에서의 다웰바 처짐을 구하기 위해서는 하중 재하에 따른 다웰바의 거동 모형이 필요하다. Timoshenko는 그림 5와 같이 다웰바를 탄성기초상의 빔으로 가정하고 식 (4)와 같은 빔의 처짐 모형을 제안하였다.

$$EI = \frac{d^4 y}{dx^4} = -ky \quad (4)$$

여기서,  $k$  : 탄성기초 계수(MPa)

$y$  : 수직 다웰바 처짐(cm)

$E$  : 다웰바의 탄성계수(MPa)

$I$  : 다웰바의 단면 2차모멘트( $\text{cm}^4$ )

이후 Friberg는 그림 6과 같이 Timoshenko의 이론을 반무한 길이의 보에 적용하여 보에 작용하는 모멘트  $M_0$ 와 하중  $P$ , 탄성기초상의 상대강성  $\beta$ 로 이루어진 처짐 함수를 유도하였다. 줄눈 면에서의 다웰바 처짐량을 결정하기 위해 이 함수에  $x=0$ 과  $M_0 = -P_1 z/2$ 을 대입하면, 식 (3)은 식(4)와 같이 정리된다.

$$y(x) = \frac{e^{-\beta x}}{2\beta^3 EI} [P \cos \beta x - \beta M_0 (\cos \beta x - \sin \beta x)] \quad (5)$$

여기서,  $\beta = \sqrt[4]{k_0 b / 4EI}$  : 탄성기초상 보의 상대강성 ( $\text{cm}^{-1}$ )

$k_0$  : 다웰바 지지력 계수(MPa/cm)

$b$  : 다웰바의 폭(cm)

$$y_0 = \frac{P}{4\beta^3 EI} (2 + \beta z) \quad (6)$$

여기서,  $P$  : 다웰바를 통하여 전달되는 하중(kN)

$z$  : 조인트 폭(cm)

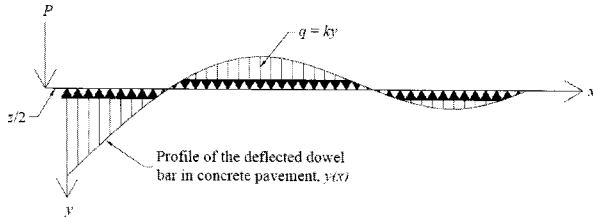


그림 5. 탄성기초상의 보에 대한 처짐 반응(Max L. Porter, 2001)

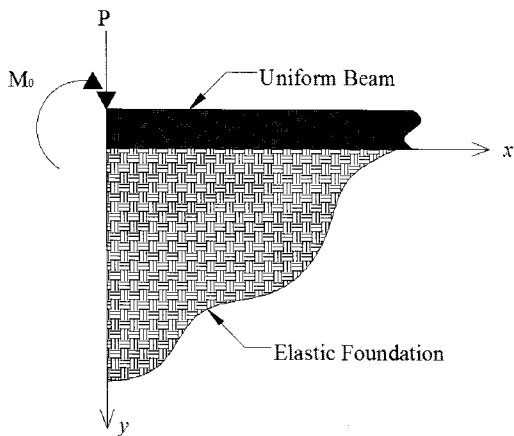


그림 6. 탄성기초상의 반무한 보(Max L. Porter, 2001)

### 3.2. 다웰바의 허용지압응력

다웰바의 설계에서 고려되어야 할 중요한 요소 중 하나로 다웰바와 접촉면의 콘크리트에서 발생하는 지압응력이 있다. 지압응력은 앞서 설명한 것과 같이 식 (1)의 다웰바 지지력 계수와 줄눈 면에서의 다웰바 처짐으로 구할 수 있다. 지압응력은 콘크리트의 허용지압응력보다 작아야 한다. 콘크리트의 허용지압응력은 압축강도와 다웰바의 폭을 이용해 간단하게 구할 수 있다. 식 (7)은 미국콘크리트협회(ACI, American Concrete Institute)에서 제시한 허용지압응력 산정식이다.

$$\sigma_a = \left(\frac{4-b}{3}\right) f'_c \quad (7)$$

여기서,  $\sigma_a$  : 콘크리트의 허용지압응력(MPa)

$f'_c$  : 압축강도(MPa)

### 3.3. 다웰바의 전단하중

줄눈부에서 콘크리트 슬래브에 가해지는 교통하중 중 일부는 포장층 하부로 전달되며 일부는 다웰바를 통해 인접 슬래브로 전달된다. 다웰바를 통한 하중전달이 100% 진행된다고 가정할 때, 차량의 운하중( $P_w$ )의 50%는 포장층 하부로 전달되며, 나머지 50%가 다웰바를 통해 전달된다. 이 경우, 반복적인 하중재하로 인해 다웰바와 콘크리트 사이에 공극이 발생하여 5~10%의 하중전달효율 손실이 발생한다. 따라서, 다웰바에 직접적으로 전달되는 총 하중( $P_t$ )는 다음 식 (8)과 같이 운하중의 45%로 가정하여 설계한다.

$$P_t = 0.45P_w \quad (8)$$

여기서,  $P_t$  : 다웰바를 통해 전달되는 총 하중

$P_w$  : 슬래브에 가해진 운하중

이 때, 다웰바를 통해 전달되는 총 하중  $P_t$ 는 그림 7과 같이 하중이 재하되는 중심의 다웰바를 기준으로 일정간격으로 분산되어 각각의 다웰바에 전달된다. Friberg는 Westergaard의 콘크리트 포장 해석이론을 기초로 식 (9)를 통해 구할 수 있는 상대강성반경( $l_r$ )을 이용해 운하중의 영향반경으로  $1.8 l_r$ 을 제안하였다. Tabatabaie는 현재 공용중인 포장에서의 실험값과 유한요소 해석을 통해 영향반경으로  $1.0 l_r$ 을 제안하고 있다. 이 때, 가장 큰 하중이 재하되는 다웰바의 전단하중  $P_t$ 는 식 (10)을 이용해 영향반경 내에 분포하는 유효 다웰바의 수를 이용해 구할 수 있다.

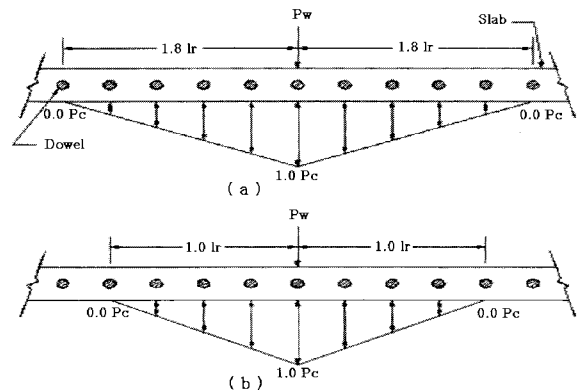


그림 7. Friberg(a)와 Tabatabaie(b)가 제안한 전달하중 분포(Max L. Porter, 2001)

$$l_r = \sqrt[4]{\frac{E_c h^3}{12(1-\mu)^2 K}} \quad (9)$$

여기서,  $E_c$  : 콘크리트 포장의 탄성계수(psi)  
 $h$  : 포장 두께(cm)  
 $\mu$  : 콘크리트 포장의 포아송비  
 $K$  : 지반 반력계수(pci)

$$P_c = \frac{P_t}{\text{유효 다웰바의 수}} \quad (10)$$

## 4. 다웰바 전단하중 분석

### 4.1. 유한요소해석

줄눈 콘크리트 포장에서 하중이 줄눈에 재하될 때 하중의 일부분은 다음 슬래브와 연결된 다웰바를 통하여 전달된다. 하중에서 가장 가까운 다웰바 이외에도 인근 여러 다웰바가 함께 하중을 전달하는 다웰바의 그룹 작용(Dowel Group Action)은 Friberg와 Tabatabaie가 이론식과 유한요소해석 및 실제 도로포장의 처짐 데이터 분석을 통해 상대강성의 1.01~1.8배의 범위로 해석되었다(홍성재, 2009). 본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 EverFE를 이용하여 다웰바 그룹 상태에서 하중재하시 최대 전단하중을 결정하였다. EverFE는 줄눈 콘크리트 포장의 3D 유한요소해석 프로그램으로 다웰바 제원, 물성, 시공위치 및 상태 등을 상세하게 모사할 수 있다는 강점이 있다(정길수, 2008).

### 4.2. 입력변수

유한요소해석에 적용된 줄눈 콘크리트 포장의 입력변수는 실제 고속도로에서 설계되고 수집된 데이터의 일반 값을 따랐다. 설계된 줄눈부의 다웰바는 4@300, 3@450, 4@300 간격으로 총 12개로 구성되어 있다. 포장의 단면은 노상층 50cm, 보조기층 30cm, 린기층 15cm, 콘크리트표층 30cm로 구성하였다. 그 밖의 주요 입력변수는 표 2와 같다. 단, 온도변화에 따른 포장거동에 대한 다웰바의 영향은 고려하지 않았다.

### 4.3. 다웰바의 전단하중

줄눈콘크리트 포장에 있어 다웰바가 받는 주요하중은 전단하중이라 할 수 있다. 다웰바가 받는 전단하중은 다웰바의 처짐과 지압응력에 중요한 변수로 사용된다. 그룹작용에서의 다웰바가 받는 최대 전단하중을 산정하기 위하여 3D유한요소 해석 결과, 우각부 1번 다웰바 상부에 하중이 재하 되었을 때 1.64kN이 1번 다웰바가 받는 최대 전단하중으로 나타났다. 그림 8은 슬래브의 유한

요소 구성 및 하중 재하시 응력분포도이다.

표 2. 유한요소해석 주요 입력변수

종 류	항 목	적 용 값
콘크리트	탄성계수	28GPa
	단위중량	2.4t/m <sup>3</sup>
	포아송비	0.18
린콘크리트	탄성계수	15GPa
	단위중량	2.4t/m <sup>3</sup>
	포아송비	0.2
보조기층	탄성계수	262MPa
	단위중량	2.25t/m <sup>3</sup>
	포아송비	0.3
다웰바	탄성계수	200,000MPa
	포아송비	0.26
	직경	32φ
	길이	500mm
재하하중	종류	일축단륜
	크기	80kN

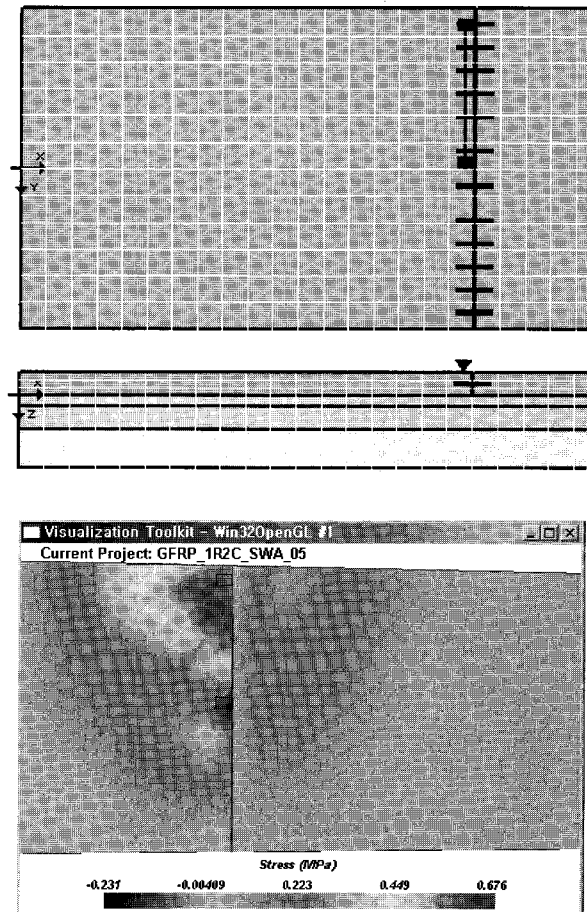


그림 8. 다웰바 해석을 위한 모델링 및 응력분포도

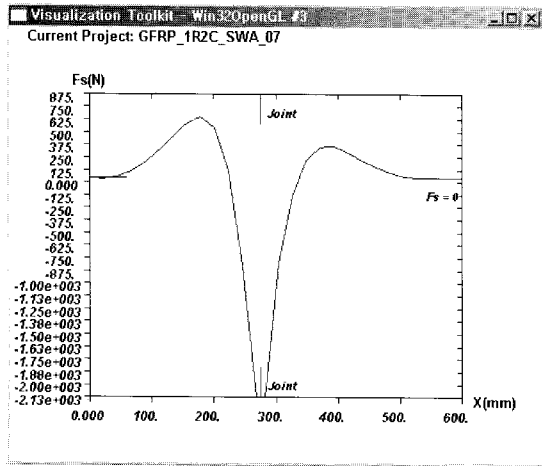


그림 9. 다웰바에 가해지는 최대전단력도 및 최대모멘트도

윤하중에 의해 다웰바로 전달된 전단하중은 FEM 해석 이외에 두 가지의 이론식을 적용하여 표 3과 같이 전단하중을 산정하였다. 다웰바가 국외에서 개발된 이론식의 전단하중보다 FEM해석에 의한 전단하중이 상대적으로 작은 이유는 FEM해석 시 포장 하부의 링기층이 윤하중의 상당부분을 받아주므로 다웰바에 걸리는 하중이 작아지기 때문이다.

표 3. 분석 방식에 따른 전단하중

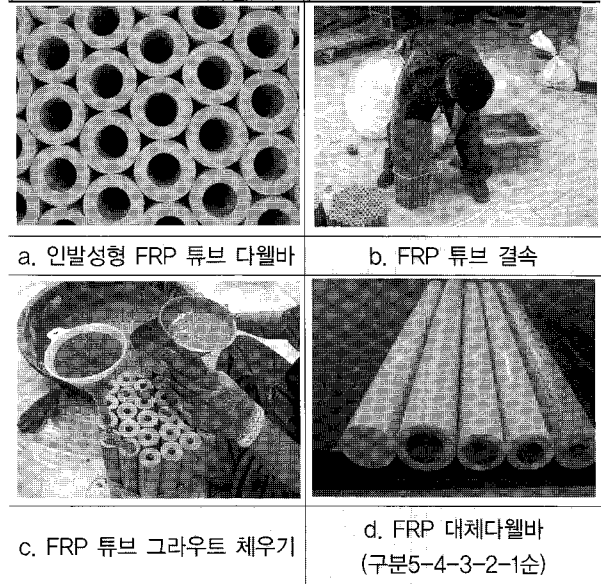
분석 방식	Friberg 이론식	Tabatabaie 이론식	FEM해석
구분			
전단하중(kN)	5.26	7.89	1.5

## 5. FRP 튜브 다웰바 실내실험

### 5.1. FRP 튜브 다웰바 제작

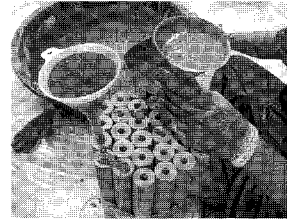
FRP 튜브 다웰바의 역학적 두께 설계를 위한 입력변수로 다웰바 물성이 필요하고 물성실험에 앞서 FRP 튜브 다웰바를 제작하였다. 다웰바 제작은 표 4와 같이 튜브

브형 다웰바와 전단면 FRP 다웰바를 제작하였다. FRP 다웰바 제작은 사출방식으로 방직과정, 수지함침과정, 금형과정, 인발성형과정, 절단과정을 거쳐 생산하였다. 튜브형태의 FRP 다웰바는 고강도 무수축 그라우트(KS F 4044)를 채움재로 사용하였으며 사용된 무수축 그라우트의 28일 압축강도는 74.1MPa이다. 그림 10은 대체 다웰바 제작과정과 제작 후 FRP 다웰바의 단면사진이다.

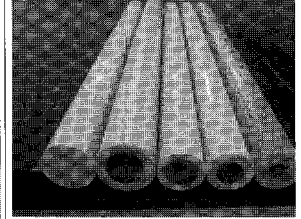


a. 인발성형 FRP 튜브 다웰바

b. FRP 튜브 결속



c. FRP 튜브 그라우트 채우기



d. FRP 대체다웰바 (구분5-4-3-2-1순)

그림 10. 튜브형 FRP 다웰바 제작과정 및 제작 후 FRP 다웰바 단면

표 4. FRP 튜브 다웰바 제원

명칭	구분	외경(내경) (mm)
FRP 튜브 다웰바	1	32(12)
	2	32(18)
	3	32(22)
	4	40(26)
FRP 다웰바	5	38

### 5.2. 압축·조깅인장 강도시험

기존 강재 다웰바는 재료적 특성상 직접 인장시험과 굽힘성시험을 실시하여 항복점, 인장강도, 연신율, 굽힘각도 등을 평가(한국도로공사, 2010)하였으나 FRP 튜브 다웰바의 역학적 특성을 평가하기 위하여 본 연구에서는 압축, 인장, 전단, 휨 특성에 대한 실험을 실시하였다.

다웰바는 일반적으로 압축응력을 받는 장치로 사용되지 않는다. 그러나 길이방향으로 압축응력이 재하되면 다웰바의 파괴 형태는 사인장 파괴와 섬유와의 좌굴이나 전단파괴가 발생한다. 따라서 압축강도 실험의 시편 길

이는 다웰바 직경의 2배로 하여 압축강도 실험을 실시한다. 실험결과에서 얻은 응력-변형률곡선으로 탄성계수를 산정하였고 이를 역학적 해석의 입력변수로 활용하였다. 또한 인장강도시험은 KS F 2423을 참고하여 압축강도 시편을 넓혀 조깅 인장강도 시험법으로 실시하였다. 이는 다웰바의 직접인장 특성보다는 다웰바의 수직하중에 따른 특성을 보여준다.

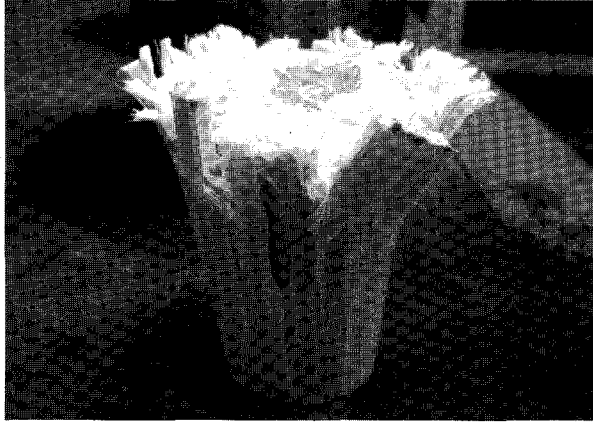


그림 11. FRP 튜브다웰바의 압축특성

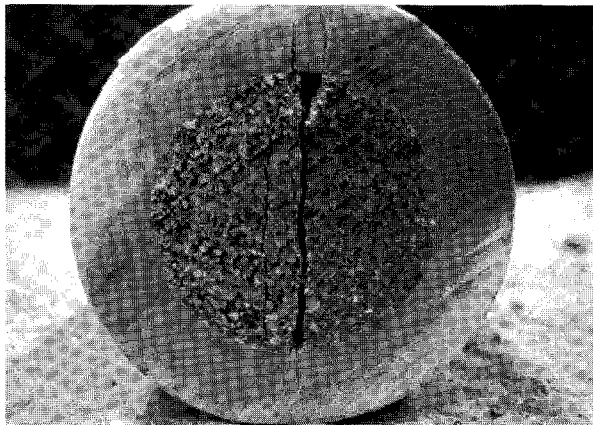


그림 12. FRP 튜브다웰바의 인장특성

표 5. 대체 다웰바 종류별 압축강도, 인장강도, 탄성계수 실험결과

구분 항목	1	2	3	4	5
다웰바 명칭	FRP 32(12)	FRP 32(18)	FRP 32(22)	FRP 40(26)	FRP 38
압축강도 (MPa)	366	243	207	261	343
조깅 인장강도 (MPa)	11	9	10	11	11
탄성계수 (MPa)	15,837	13,750	8,488	19,225	24,998

### 5.3. 전단강도시험

FRP의 재료는 혼입된 유리섬유로 인해 높은 인장강도

를 가지나 상대적으로 횡방향에서 작용하는 하중(전단력)에 대하여 매우 취약한 단점을 가지고 있는 것으로 보고되고 있다. 이는 FRP 다웰바의 제조방식에 있어 섬유를 종방향으로 뽑아내는 방식을 사용하고 있고 폴리머에 의해서 결합된 섬유의 층이 쉽게 분리되어 파괴되기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 FRP 다웰바의 전단특성을 평가하기 위하여 ASTM D 4475(Standard test method for apparent shear strength of punctured reinforced plastic rods by in short-beam method)의 방법을 사용하였다. 그림 13은 실험방법과 지그제원을 나타내고 있다.

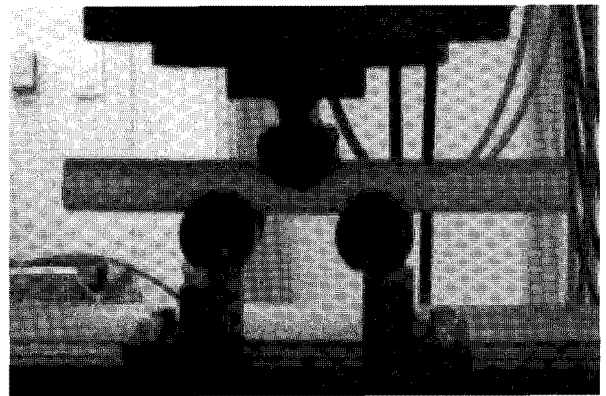
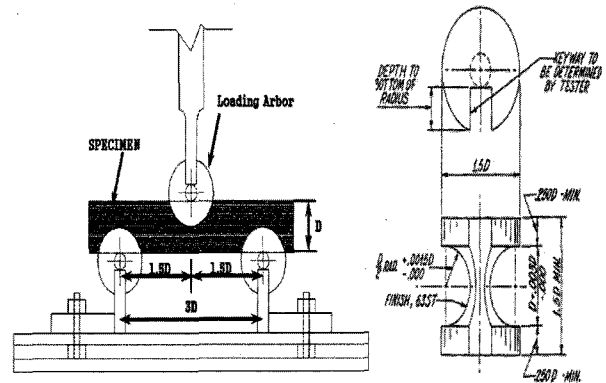


그림 13. 다웰바의 전단강도 실험제원 및 실험방법

표 6. 대체 다웰바 종류별 전단강도 실험결과

구분 항목	1	2	3	4	5
다웰바 명칭	FRP 32(12)	FRP 32(18)	FRP 32(22)	FRP 40(26)	FRP 38
전단강도 (MPa)	42	30	25	28	41

### 5.4. 휨강도시험

FRP 다웰바의 휨특성을 알아보기 위하여 ASTM D 4476-97 시험방법의 지그를 이용하여 수정된 방법으로 실시하였다. FRP 다웰바가 솔리드일 경우 반단면



실험이 가능하나 튜브형태의 시편의 휨특성을 알기위해 전단면 실험을 실시하였다. 그림 14는 ASTM D 4476-97 실험방법과 지그제원을 나타내고 있다. 이 실험의 지그는 기존 휨 지그와는 달리 양쪽 하부지점이 원형 다웰바를 지지할 수 있는 원통형 받침이 필요하기 때문에 이를 위한 각 다웰바 직경별 맞춤 지그를 제작하였다.

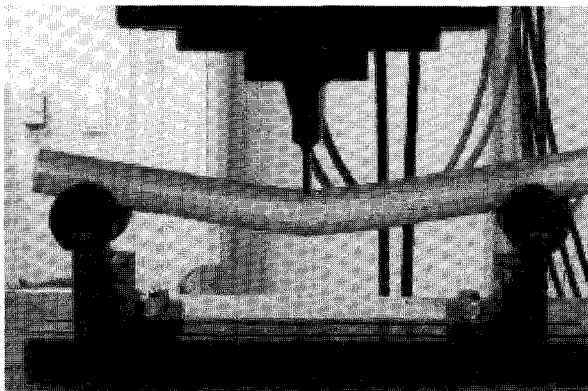
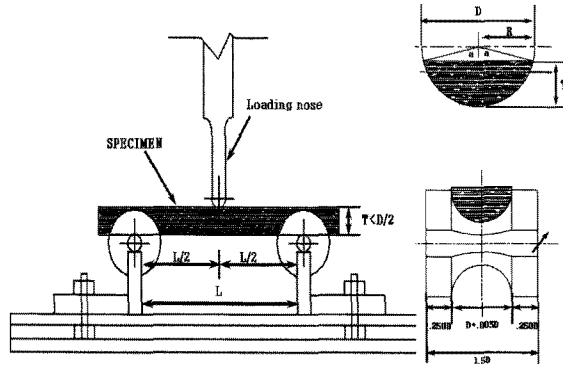


그림 14. 다웰바의 휨강도 실험제원 및 실험방법

표 7. 대체 다웰바 종류별 휨강도 실험결과

구분	1	2	3	4	5
항목					
다웰바 명칭	FRP 32(12)	FRP 32(18)	FRP 32(22)	FRP 40(26)	FRP 38
휨강도(MPa)	514	361	362	380	490

## 6. 대체 다웰바 역학적 특성 분석결과

### 6.1. 줄눈부 상대처짐량

국내 고속도로에 적용중인 콘크리트 포장의 제원과 대체 다웰바의 실내실험에서 얻은 기초 물성 실험자료를 입력변수로 하여 이론적 상대처짐 계산식(식 3)에 의해 결과를 도출하였다. 표 8은 FRP 튜브형 대체다웰바와 기존 강재다웰바의 상대처짐 결과이다. 상대처짐량은 강성이 가장 좋은 강재다웰바가 가장 적었고 슬리드

형 FRP 38mm와 튜브형 FRP 40(26)mm다웰바가 그 다음으로 상대처짐량이 적었다. 나머지 32mm 튜브형 FRP 다웰바는 안지름 12, 18, 22 순이었다. 다웰바 단면에 강성이 큰 FRP 함량이 많을수록 처짐이 상대적으로 적었다.

표 8. 대체 다웰바 종류별 줄눈부 상대처짐량

구분		1	2	3	4	5	6
항목							
다웰바 명칭		FRP 32(12)	FRP 32(18)	FRP 32(22)	FRP 40(26)	FRP 38	Steel 32
상대 처짐량 (mm)	Friberg 이론식	0.080	0.082	0.094	0.053	0.054	0.042
	Tabatabaie 이론식	0.119	0.123	0.141	0.080	0.081	0.062
	FEM해석	0.022	0.023	0.026	0.015	0.015	0.012

### 6.2. 지압응력

콘크리트와 다웰바의 지압응력은 줄눈부의 콘크리트 지지력을 전달함에 있어 역학적으로 검토해야 할 중요 항목이다. 앞서 도출한 상대처짐을 바탕으로 식 (1)를 이용하여 표 9와 같이 지압응력을 산정하였다. 지압응력은 강재다웰바가 가장 우수 하지만 지름이 클수록 지압응력이 작음을 알 수 있다. 지름이 동일한 튜브형 대체다웰바의 지압응력은 안지름이 작을수록 더 작은 값을 보이는데 이는 다웰바 단면에 강성이 큰 FRP 면적이 클수록 지압응력이 작게 나타났다. 허용지압응력은 다웰바의 지름과 콘크리트의 압축강도가 주요 변수이므로 지름이 클수록 허용지압응력 또한 크다. 운하중의 영향반경을 달리한 이론식의 경우, 영향반경이 1.8배 큰 Friberg의 지압응력이 Tabatabaie의 이론식보다 약

표 9. 대체 다웰바 종류별 지압응력

구분		1	2	3	4	5	6
항목							
다웰바 명칭		FRP 32(12)	FRP 32(18)	FRP 32(22)	FRP 40(26)	FRP 38	Steel 32
지압응력, $\sigma_s$ (MPa)	Friberg 이론식	15.8	16.3	18.6	10.6	10.7	8.3
	Tabatabaie 이론식	23.4	24.1	27.5	15.7	15.8	12.3
	FEM해석	4.5	4.6	5.3	3.0	3.0	2.4
허용지압응력, $\sigma_s$ (MPa)		30.1	30.1	30.1	26.7	27.5	30.1

1.5배 적게 나타났다. 반면 국외에서 개발된 이론식의 지압응력보다 FEM해석에 의한 지압응력이 상대적으로 작은 이유는 FEM해석 시 포장 하부의 린기층이 유효층의 상당부분을 받아주므로 다웰바에 걸리는 하중이 작아지기 때문이다. FRP 튜브형 다웰바의 지압응력이 허용지압응력보다 모두 작게 나타났으므로 역학적으로 32(10), 32(7), 32(5), 38, 40(7)mm의 모든 튜브형 FRP 대체다웰바의 적용이 가능하다고 판단된다.

## 7. 결론

본 연구에서는 장기간 공용에 따른 강재 다웰바의 부식위험을 대체 할 수 있는 고내구성 대체 다웰바로 FRP 튜브 다웰바를 선정하고 적정 두께 산정을 위하여 실내실험 및 역학적 해석을 수행하였다. 두께 산정을 위한 기준으로 콘크리트와 다웰바 사이에 발생하는 지압응력을 사용하였다. 그 결과, FRP 튜브 다웰바의 직경을 현행 강재 다웰바와 같이 32mm로 설계하여도 지압응력이 허용지압응력 보다 적은 것으로 나타났다.

향후, 지압응력 뿐만 아니라 반복적인 하중재하를 통한 피로시험, 실제 하중재하에 따른 처짐시험(직접전단 시험), 현장 시험시공, 환경조건(온도 등)을 고려한 FEM 해석 등 다각도로 평가를 진행하여 국내 콘크리트 포장 환경에 적합한 FRP 튜브 다웰바의 특성 분석을 수행할 예정이다. 본 연구를 통해서 얻은 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 유한요소해석 결과 국내 고속도로 콘크리트 포장의 하부에 강성이 큰 린콘크리트 층을 사용하고 있어 다웰바에 전달되는 전단하중이 이론식의 30%~40%에 불과한 것으로 나타났다.
2. 다양한 직경과 내경을 갖는 FRP 튜브 다웰바를 제작하여 물성분석을 위한 실내시험을 수행한 결과, 32mm(12mm)의 FRP 튜브 다웰바는 38mm 솔리드 FRP 다웰바와 유사하거나 더 좋은 강도를 보이는 것으로 나타났다.
3. 각 다웰바를 적용한 경우에 대한 지압응력을 산정한 결과, 외경이 32mm, 40mm인 경우 모두 허용지압응력을 넘지 않는 것으로 나타났다. 기존의 FRP 튜브 다웰바의 국외 시공사례에서 외경이 50mm~60mm의 FRP 튜브 다웰바가 시공된 사례와 비추어 국내 콘크리트 포장은 슬래브가 두껍고 강성이 큰 하부층

을 가지고 있기 때문에 다웰바에 전달되는 전단하중이 적기 때문인 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

- 김주한 (2008), "철광석과 비철금속의 시장 동향 및 전망", 산업연구원
- 이승우 (2001), "콘크리트포장의 줄눈의 잠김에 대한 연구", 한국도로포장공학회지, 제3권1호
- 정길수 (2008), "유한 요소법을 이용한 줄눈 콘크리트 포장 응력식 개발", 한국도로학회 논문집, 제10권 2호, pp.165~179
- 홍성재 (2009), "3차원 유한요소해석을 이용한 줄눈콘크리트 포장의 다웰바 거동에 대한 연구", 한국도로학회 논문집, 제11권 4호, pp.79~85
- 한국도로공사(2010), "고속도로 공사용 건설재료 품질 및 시험 기준", 도로교통연구원 도로시험팀 제 10차 개정, pp.84
- American Concrete Institute's Committee 325
- Dustin Davis (1998), "Evaluation of Glass Fiber Reinforced Plastic Dowel as Load Transfer Devices in Highway Pavement Slabs", 1998 Transportation Conference Proceedings P78~81
- HITEC (2005), "Evaluation of Alternative Dowel Bar Materials", Highway Innovative Technology Evaluation Center 45101-005
- Kurt D.Smith (2002), "High Performance Concrete Pavements : Alternative Dowel Bars for Load Transfer in Jointed Concrete Pavements", FHWA-IF-02-052, Federal Highway Administration
- McCallion, J.P (1999). "FRP Dowel Bars-Analysis of Fiber Reinforced Polymer Dowels Removed From Active Roadways", Technical Report, RJD Industries, Laguna Hills, CA.
- Max L. Porter (2001), "Dowel Bar Optimization— Phases I and II: Final Report", American Highway Technology Report. Ames, Iowa: Iowa State University, Center for Portland Cement Concrete Pavement Technology
- Max L. Porter (2006), "Laboratory Study of Structural Behavior of Alternative Dowel Bars", FHWA DTFH61-01-X-00042 (Project 7) IHRB Project TR-510
- Scott Murison(2004), "Laboratory Evaluation of Concrete-filled GFRP Dowels in Jointed Concrete Pavements", Annual Conference of the Transportation Association of Canada
- Wang Duan-Yi (2006), "Assessment of Grouted Fibre-Reinforced Polymer(GFRP) Tubes As Dowel Bar Alternatives", 25th Southern African Transport Conference

접 수 일 : 2011. 4. 21  
 심 사 일 : 2011. 5. 11  
 심사완료일 : 2011. 8. 23