

모듈러 포장에 적용가능한 고탄성 연결재료 개발을 위한 해석적 연구

이영호¹, 강수태^{2*}, 송재준¹, 이상윤¹
¹한국건설기술연구원 인프라구조연구실, ²대구대학교 토목공학과

An analytical Study for the Development of Highly Elastic Material applicable for Joint in Modular Pavement

Young-Ho Lee¹, Su-Tae Kang^{2*}, Jae-Joon Song¹ and Sang-Yoon Lee¹

¹Structural Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

²Department of Civil Engineering, Daegu University

요약 본 연구에서는 급속시공이 가능한 모듈러 도로포장 시스템에서 포장체 모듈 사이의 조인트에서 발생하는 축방향 변형량을 평가하고, 시멘트 페이스트, 에폭시, 폴리우레탄을 매트릭스로 하는 2성상 복합재료에 대하여 조인트 연결재료로서의 적용가능성을 검토하였다. 포장체 모듈 하부에 받침이 있는 경우와 노반에 직접 접촉하는 경우에 대해 FEM해석을 실시하여 발생 변형량을 평가하였다. 변형 유발 요인으로 자중 및 활하중, 온도변화 및 건조수축을 고려하였으며, 그 중 온도변화에 의한 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 2성상 복합체의 변형성능 예측은 수정 전단지연 모델을 이용하여 수행하였다. 모래 혼입 부피비율에 따른 복합체의 탄성계수와 최대 인장변형률 변화를 검토한 결과, 15~20 mm의 조인트 폭에 대해, 폴리우레탄을 사용할 경우 모래를 20~30 % 비율로 치환함으로써 소요 변형성능을 확보하면서 동시에 경제적인 조인트 연결재료로 활용할 수 있는 것으로 나타났다.

Abstract This study was intended to estimate the axial deformation of joint between pavement modules in the rapid-constructible modular pavement system, and to investigate the applicability of two-phase composites for a joint material, which was composed of cement paste, epoxy, or polyurethane as a matrix and sand as particles. A case which had supports under the pavement module as well as a case which the module was put on roadbed directly were considered in FEM analysis for the axial deformation. The effect of self-weight, live load, thermal change, and drying shrinkage were estimated and the thermal change was found to cause the largest deformation compared to the others. Deformation capacity of two-phase composites was predicted using the modified shear-lag model. In the analytical results for the elastic modulus and maximum tensile strain with different volume fractions of sand, 20~30 % replacement of sand was revealed to satisfy the required strain capacity with economy when if the width of joint was designed to be 15~20 mm.

Key Words : Modular pavement, Joint, Two-phase composites, Modified shear-lag model, Polyurethane

1. 서론

건설산업에서는 공사비 절감, 공기 단축, 시공불량 또는 오차의 최소화 등을 목적으로 콘크리트 구조부재를

프리캐스트 공법으로 제작하는 경우가 매우 많다. 프리캐스트 공법은 콘크리트 블록, 패널, 거더, 바닥판, 말뚝 등의 다양한 콘크리트 부재에 널리 사용되고 있으며, 최근에는 교량의 상·하부 구조를 모두 프리캐스트 부재로 제

본 논문은 한국건설기술연구원의 주요사업인 “지속가능한 장수명 모듈러 도로시스템 개발”의 일환으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Su-Tae Kang(Daegu Univ.)

Tel: +82-53-850-6528 email: stkang@daegu.ac.kr

Received September 5, 2013 Revised October 14, 2013 Accepted November 7, 2013

작하여 조립하는 공법이 적용되고 있으며, 도로 포장공법에서도 프리캐스트 공법을 적극적으로 도입하고자 하고 있다[1-5].

현재 국내 도로는 교통량의 급격한 증가, 운하중의 중량화, 제설제 살포 등과 같은 환경적 요인 등으로 인해 도로의 손상이 더욱 빈번해 지고 있으며 공용기간 내 유지관리비용도 함께 크게 증가하고 있는 실정이다. 따라서 유지관리비용을 최소화할 수 있는 포장 기술에 대한 필요성이 크게 대두되고 있다[6,7].

일반적으로 도로 포장은 표층의 사용재료에 따라 크게 아스팔트 포장이나 콘크리트 포장으로 구분된다. 아스팔트 포장은 주행성과 소음발생 측면에서 우수하지만, 콘크리트 포장에 비해 낮은 내구성으로 인해 잦은 보수가 필요하다라는 단점이 있다. 반면에 콘크리트 포장은 내구성이 우수하여 유지관리비용이 적게 들지만 양생기간이 길고 국부적 보수가 어렵다는 단점과 함께, 주행성 및 소음발생에 있어 상대적으로 불리하다.

이에 한국건설기술연구원(KICT)에서는 앞서 언급한 현행 도로포장의 제반 문제점들을 해결함과 동시에 급속시공이 가능하게 하는 지속가능한 도로포장 시스템에 관한 연구를 활발히 진행하고 있다. 개발 중인 모듈러 도로 포장 시스템은 미리 제작된 프리캐스트 포장 모듈을 이용한 급속시공, 공장생산을 통한 프리캐스트 모듈의 고품

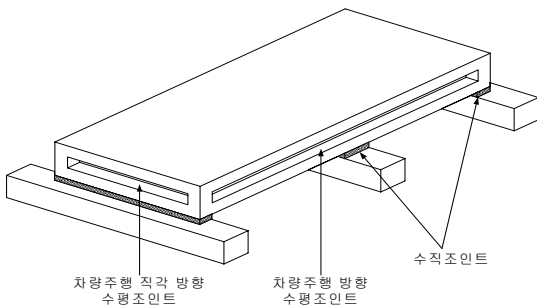
질화를 통한 고내구성 실현, 그리고 부분교체 및 모듈 재활용을 통하여 도로 시스템의 자원 순환구조를 확립할 수 있는 방법으로, 개념도는 Fig. 1과 같다. 포장체의 사용성(주행성 및 소음)과 내구성을 동시에 고려하여 콘크리트 슬래브와 얇은 아스팔트 표층으로 구성된 포장체와, 노반 및 기층을 필요로 하지 않도록 하부구조로 개념설계를 하고 있다. 상부 포장체는 손상이 발생할 경우 모듈의 교체가 용이하도록 제작되며, 각 포장 모듈은 네 면의 주변 모듈들과 일체화된 도로면을 구성하게 된다. 기존의 프리캐스트 포장 공법에서는 프리캐스트 슬래브를 연결할 때 조인트에 다웰바(dowel bar)나 긴장재가 반드시 사용된 반면[1,2,8-11], 개발 공법에서는 교체의 편의성을 위해 다웰바 또는 긴장재 없이 주입재만으로 조인트가 구성된다는 점에서 큰 차이가 있다.

모듈러 도로시스템은 슬래브와 같은 형식을 갖는 포장 모듈을 상부구조로 하는 교량과 유사한 구조를 갖는다. 따라서 모듈러 도로시스템에서는 기본적으로 하중 전달 기능과 구조적인 안정성이 확보되어야 한다. 프리캐스트 교량에서 하중이 교량 받침과 연결부를 통해 전달되는 것과 같이, 모듈러 도로시스템에서는 조인트 시스템을 통해 하중이 전달되어야 한다. 자중 및 차량하중은 수직조인트(Fig. 2 참조)를 통해서 전달될 수 있으며, 차량진행 직각방향 수평조인트(Fig. 2 참조)는 인접한 포장 모듈 사이에 발생하는 전단력을 전달할 수 있어야 한다. 그리고 특히 콘크리트 슬래브 포장 모듈에 작용하는 건조수축, 온도변화 및 차량하중으로 인해 발생하는 축방향 변형을 조인트 재료가 충분히 흡수할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 압축 및 전단에 대한 충분한 저항력을 가지며 모듈 간에 발생하는 축방향 변형에 대응할 수 있는 고강도·고신축성 조인트 재료를 개발하기 위한 연구의 일환으로서 몇 가지 2성상 복합재료에 대하여 탄성거동 및 변형성능에 대한 해석적 검토를 수행하여 적용가능성을 비교·검토하였다.



[Fig. 1] Basic concept of modular road system



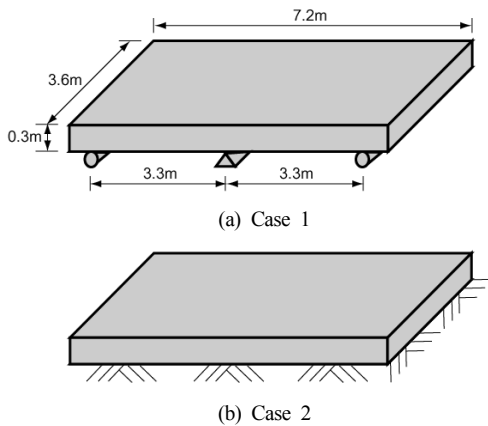
[Fig. 2] Details of joint system in pavement module

2. 조인트 축방향 변형량 검토

2.1 모듈러 포장 시공 및 해석 조건

2.1.1 시공조건

조인트에서의 축방향 변형량을 검토하기 위해서는 먼저 모듈러 포장체의 치수와 지지조건이 결정되어야 한다. 일반적으로 포장체 모듈의 폭과 길이는 한 차선의 너비인 3.6 m를 기준으로 제작되며, 프리캐스트로 제작되는 모듈의 차량운반을 고려하여 폭과 길이의 비는 1:2로 가



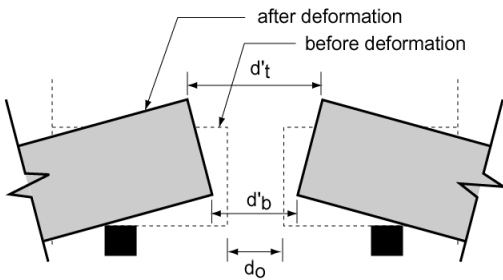
[Fig. 3] Assumed two different support systems of pavement module

정하였다. 포장체의 두께는 기존 프리캐스트 슬래브 포장체의 적용 두께를 고려하여 300 mm로 가정하였다. 지지조건은 중앙지점은 고정받침으로, 양단에서는 이동받침으로 고려하였다. 이동받침의 위치는 단부에서 300 mm 안쪽에 놓이는 것으로 고려하였다. 이와 같은 지지조건은 Fig. 3(a)의 Case 1과 같다.

한편, 모듈체 포장 공법은 기존의 포장을 제거하고 재포장 하는 경우에도 사용이 가능하다. 이 때 포장체 모듈은 기존에 놓여져 있는 노반 및 기층 위에 가설할 수 있다. 이러한 상황을 고려하여 지반 위에 곧바로 놓여지는 경우에 대해서도 검토하였다. Fig. 3(b)의 Case 2가 이에 해당한다.

2.1.2 해석조건

포장체 모듈에 작용하는 자중, 차량하중, 온도변화에 의해 축방향 변형이 발생하게 되면 결과적으로 조인트에서의 변형이 Fig. 4와 같이 발생한다. 온도변화에 따른 변형량은 상하단에서 동일하게 발생하지만 자중 및 차량하중에 의한 변형량은 상하단에서 서로 반대 크기로



[Fig. 4] Measurement of axial deformation in joint

나타나게 된다. 따라서 원래 조인트의 폭을 d_o 라 하고, 변형 후 상하단의 변위 d'_t, d'_b 를 구하여 변형 전후 상대변위를 이용하여 조인트에서의 최대 축방향 변형량을 계산하였다.

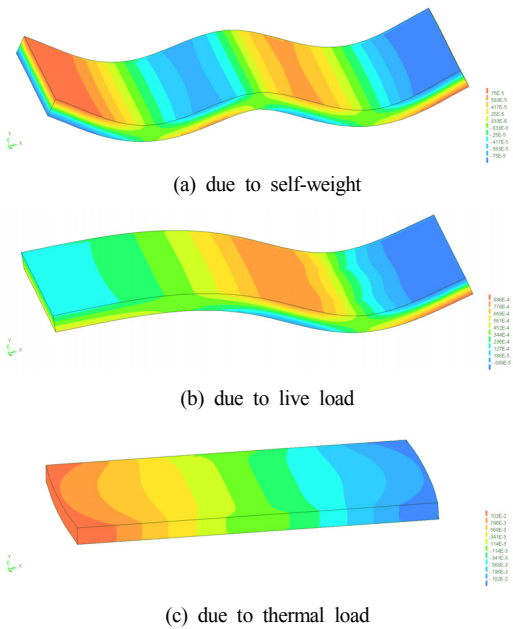
해석은 3차원 고체요소를 이용하여 FEM해석을 수행하였다. 포장체의 재료는 철근콘크리트로 가정하였으며, 밀도 $2,500 \text{ kg/m}^3$, 탄성계수 39 GPa , 열팽창계수 1.0×10^{-5} 을 적용하였다. 하중은 자중, 차량하중(또는 이동하중) 및 온도하중을 고려하였으며, 차량하중은 DB-24 하중등급의 후륜하중에 충격계수를 고려한 124.8 kN 을 적용하였다. 차량하중의 위치는 Case 1의 경우, 단부에서 회전각이 가장 크게 발생하도록 하는 위치에 차량하중을 가하였으며, Case 2에서는 모듈의 완전 연속화를 가정하여 중앙부에 재하하였을 때 포장체 모듈 내 발생하는 최대 축방향 변형량을 구하였다. 노반지지 조건에 대한 해석 시에는 지지조건에 대해서는 스프링 요소를 적용하여 고려하였으며, 이때 지반반력계수는 200 MN/m^3 으로 가정하였다.

온도하중은 도로교 설계기준[12]에서 가동받침의 이동량 산정 시 콘크리트 교량에 대해 $-15 \text{ }^\circ\text{C} \sim +35 \text{ }^\circ\text{C}$ 범위의 온도변화를 적용하도록 하고 있으며, 프리캐스트로 제작되는 포장체 모듈의 기준온도를 감안하여 $\pm 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 를 적용하였다. 포장체 상하단에서 발생가능한 온도구배는 별도로 고려하지 않았다. 그리고 콘크리트의 건조수축에 따른 축방향 변형량은 도로교 설계기준[12]에서는 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 하강에 상당하는 온도하중과 동일하게 고려하도록 하고 있으나, 여기에서는 포장체 모듈의 시공재령과 제작관리 단계에서 건조수축에 의한 변형량을 줄이는 방안 등을 종합적으로 고려하여 20%만을 반영하였다.

2.2 해석결과

Fig. 5와 Fig. 6은 Case 1과 Case 2에 대한 FEM 해석 결과를 나타낸 것으로 자중, 차량하중 및 온도변화에 의한 포장체 모듈의 축방향 변위를 나타낸 것이다.

FEM 해석 결과를 토대로 조인트에서 발생하는 최대 축방향 변형량을 계산한 결과는 Table 1과 같다. 여기서 (+)값은 조인트가 늘어남을, (-)값은 조인트가 줄어들음을 의미한다. 그 결과를 살펴보면, 자중이나 차량하중에 비해 온도하중에 의한 영향이 절대적으로 크게 나타남을 알 수 있다. 자중이나 차량하중에 의한 축방향 변형량은 Case 1의 경우 최대 0.2m정도 나타났으며, Case 2의 경우에는 0.03 m 정도로 작게 나타났다. 하지만 온도하중에 의한 영향은 2.1~2.5 mm 정도로 자중 및 차량하중에 의한 변형량의 10배 이상으로 크게 나타났다. 결과적으로



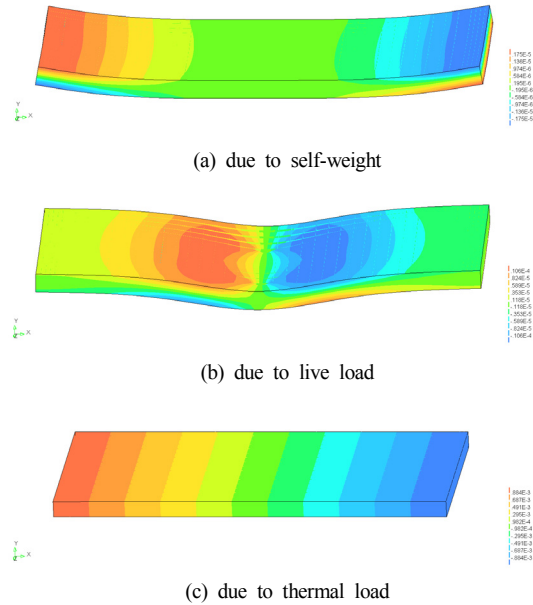
[Fig. 5] FEM analysis results for axial deformation of pavement module (Case 1)

조인트에서 발생하는 변형량은 Case 1의 경우 온도가 30 ℃ 하강했을 때 +3.051 mm를 나타내고, 온도가 30 ℃ 상승했을 때 -2.226 mm로 예상된다. Case 2의 경우에는 온도 하강 시 +2.487 mm, 상승 시 -1.902 mm의 축방향 변형량을 예상할 수 있다.

3. 변형대응 재료의 성능 분석

3.1 수정 전단지연 모델

재료의 역학적 특성을 개선하는 가장 일반적인 물리적 방법 중의 하나가 역학적 특성이 훨씬 더 우수한 입자 또는 섬유를 내부에 혼입하는 것이다. 그래서 예전부터 두 가지 재료를 혼합하여 제조하는 2성상(two-phase) 복합체에 관한 많은 연구가 이루어졌고 우수한 성능도 입증되었다.

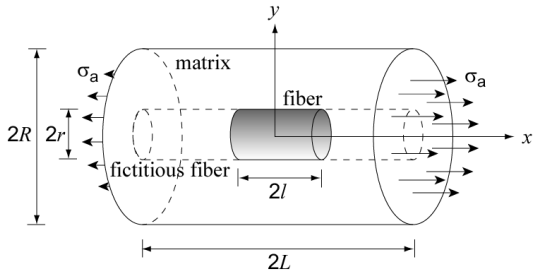


[Fig. 6] FEM analysis results for axial deformation of pavement module (Case 2)

전단지연 모델[13]은 일반적으로 섬유보강 복합체에서 불연속적으로 놓여진 섬유의 탄성거동 및 변형특성을 계산하기 위해서 널리 사용되지만, 2성상의 시멘트 모르타르나 다성상의 결정상 또는 광물질로 이루어진 압축 등의 복합체의 거동예측에서도 유용하게 사용되고 있다 [14,15]. 2성상 또는 다성상의 복합체의 거동특성을 파악하는데 있어서 전단지연 모델의 가장 큰 장점은 복합체의 복잡한 미세구조에 대한 정보나 복잡한 수치해석 기법을 도입하지 않아도 된다는 점이다. 전단지연 모델은 각 성상 재료의 거시적 물리적 특성만으로 복합체의 탄성거동 및 변형특성을 쉽게 예측할 수 있다. 그러나 전단지연 모델은 섬유 끝단에서의 응력 경계조건에 따라 정확도가 크게 영향을 받게 되는 문제점을 가지고 있다. 그래서 Hsueh[16]는 Fig. 7과 같은 수정 전단지연 모델을 제안하였는데, 섬유(또는 입자), 매트릭스에 덧붙여 섬유(또는 입자)의 단면을 단위 셀의 끝까지 연장한 가상의 섬유(또는 입자)를 함께 고려하여 단위 셀을 구성하였다.

[Table 1] Calculated axial deformations in joint

| Case | Location | Deformation (mm) | | | | Maximum |
|--------|----------|------------------|-----------|--------------|-----------|---------|
| | | self-weight | live load | thermal load | shrinkage | |
| Case 1 | Top | 0.018 | 0.199 | ±2.501 | 0.333 | +3.051 |
| | Bottom | -0.018 | -0.040 | ±2.501 | 0.333 | -2.226 |
| Case 2 | Top | 0.004 | 0.026 | ±2.160 | 0.288 | +2.478 |
| | Bottom | -0.004 | -0.026 | ±2.160 | 0.288 | -1.902 |



[Fig. 7] Unit cell geometry in modified shear-lag model

이 때 가상 섬유(또는 입자)는 매트릭스의 재료물성을 가진다. 수정 전단모델을 이용하면 섬유 바깥의 매트릭스에 작용하는 응력분포까지 파악이 가능하다.

수정 전단모델을 이용하여 구한 섬유에 작용하는 축방향 인장응력과 전단응력은 각각 식 (1)과 (2)로 계산되어진다.

$$\sigma_f(x) = \frac{R^2 E_f \sigma_a}{S} + 2A \cosh(\beta x) \quad (1)$$

$$\tau_{ff}(r_1, x) = -r_1 \beta A \sinh(\beta x) \quad (2)$$

그리고 섬유 바깥의 매트릭스에 작용하는 응력은 식 (3) 및 (4)와 같이 표현된다.

$$\sigma_{ff}(x) = \exp(\beta_f x) c_1 + \exp(-\beta_f x) c_2 + \sigma_a \quad (3)$$

$$\tau_{ff}(r_1, x) = -\frac{r_1 \beta_1}{2} [\exp(\beta_f x) c_1 - \exp(-\beta_f x) c_2] \quad (4)$$

식 (1), (2)에서 E_f 는 섬유(또는 입자)의 탄성계수를 의미하며, A 는 경계조건으로부터 결정되는 계수이다. 그리고 S 와 β 는 다음과 같다.

$$S = r^2 E_f + (R^2 - r^2) E_m \quad (5)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{SH}{R^2 E_f}} \quad (6)$$

$$H = \frac{R^2}{r^2 (1 + \nu_m) \left[R^2 \ln(R/r) - \frac{(R^2 - r^2)}{2} \right]} \quad (7)$$

그리고 식 (3), (4)에서 c_1 과 c_2 는 경계조건으로부터

구할 수 있으며, β_f 는 아래 식 (8)과 같다.

$$\beta_f = \sqrt{H} \quad (8)$$

E_m , ν_m 은 각각 매트릭스의 탄성계수와 포와송비를 나타낸다.

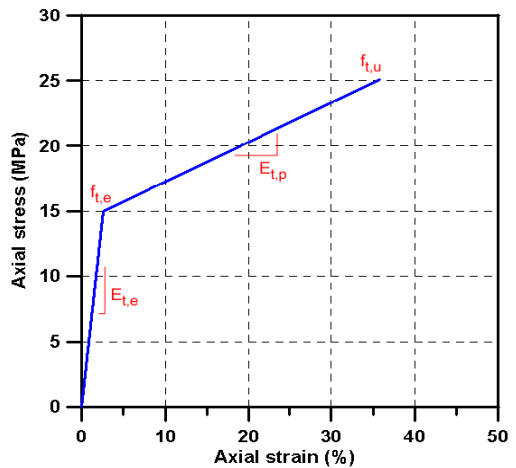
그리고 2성상 복합체의 탄성계수는 다음 식 (9)와 (10)을 이용하여 구할 수 있다.

$$E_c = \frac{\sigma_a}{\frac{\sigma_a}{E_m} + M} \quad (9)$$

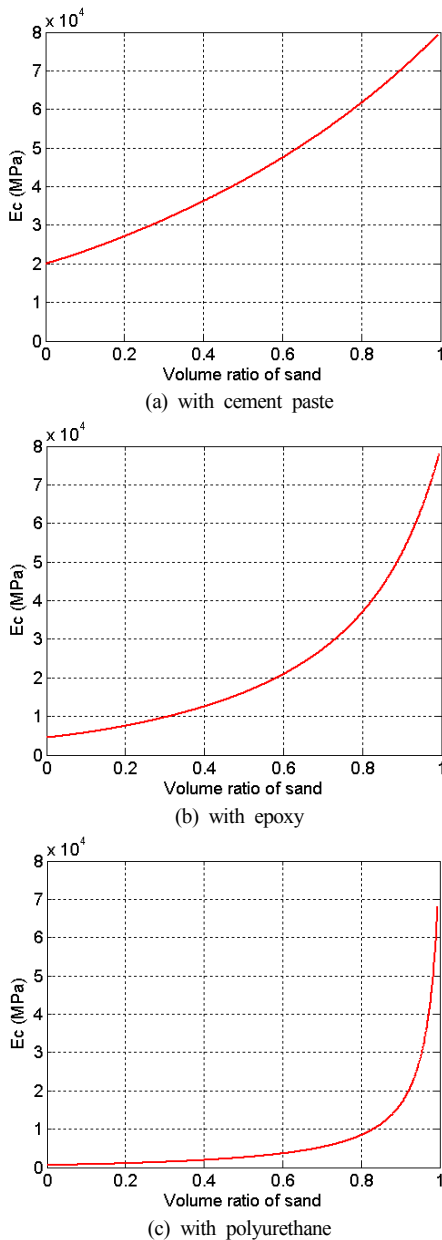
$$M = \left(\frac{2A \sinh(\beta l)}{\beta} + \frac{l R^2 E_f \sigma_a}{S} \right) \left(\frac{1}{E_f} - \frac{1}{E_m} \right) \frac{r^2}{L R^2} \quad (10)$$

3.2 탄성거동 및 변형성능 분석

본 해석적 연구에서는 그라우트 재료로 가장 일반적으로 사용되고 있는 재료들인 시멘트 페이스트, 에폭시, 그리고 탄성변형 성능이 우수한 폴리우레탄에 대해 인장 탄성거동 특성 및 변형성능을 검토하였다. 해석에 사용한 시멘트 페이스트의 탄성계수와 인장강도는 각각 20,000 MPa와 4 MPa이며, 에폭시는 4,500 MPa와 40 MPa를 적용하였다. 이 값은 각각에 대해 가장 보편적으로 사용되는 물성값을 적용한 것이다. 그리고 폴리우레탄은 비선형 거동특성을 고려하여 근사적으로 Fig. 8과 같이 적용하였다[17]. $E_{t,e}$ 는 초기탄성계수를 나타내며, 응력-변형률 곡



[Fig. 8] Tensile stress-strain curve of polyurethane



[Fig. 9] Variation of elastic modulus according to volume ratio of sand in two-phase composites

선에서 $f_{t,c}$ 는 초기 선형구간이 끝나는 지점의 응력을 의미한다. $E_{t,p}$ 는 응력이 $f_{t,c}$ 를 초과한 영역에서의 탄성계수를 나타내며, $f_{t,u}$ 는 폴리우레탄의 인장강도를 나타낸다.

재료의 소요성능과 경제성을 함께 고려한 2성상 재료의 적정 구성비 도출을 고려하여, 2성상 재료의 탄성거동

및 변형특성을 모래의 혼합 비율 변화에 따라 살펴보았다. 해석에서 모래의 입자크기는 길이로 0.1 mm로 가정하였으며, 형상비(길이/직경)는 1.5로 고려하였다[18]. 그리고 탄성계수는 80,000 MPa로 가정하였다.

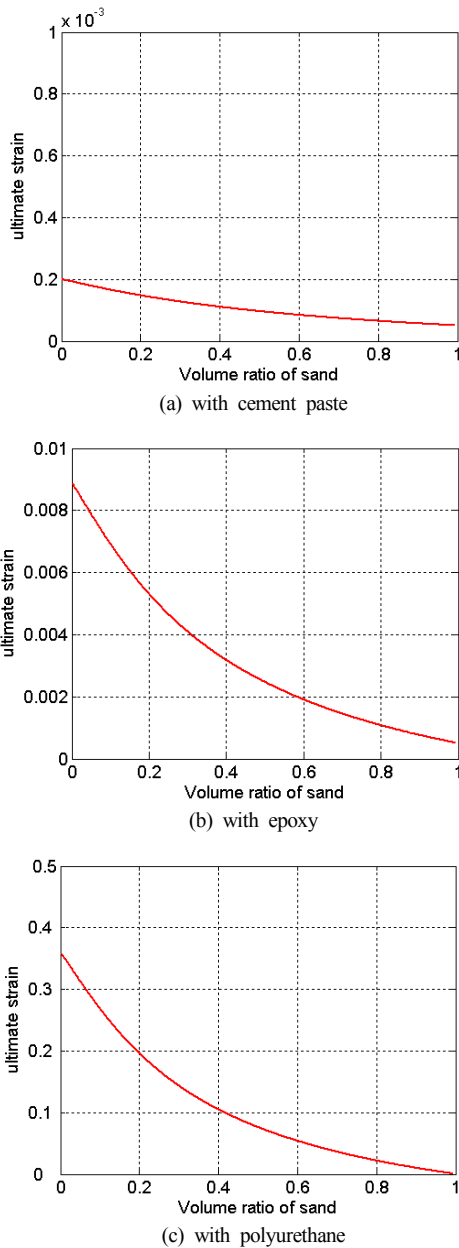
모래의 혼합 부피비율에 따른 탄성계수의 변화와 최대 인장변형률에 대한 해석결과는 Fig. 9와 10으로 나타내었다. Fig. 9에서 시멘트 페이스트나 에폭시에 비해 폴리우레탄을 매트릭스로 사용할 경우에 모래 치환율이 80%에 이를 때까지 10,000 MPa 이하의 낮은 탄성계수를 유지하고 있는 것을 볼 수 있다. 또 인장강도 도달 시까지의 변형률에서는 Fig. 10에서 보는 바와 같이 시멘트 페이스트나 에폭시의 경우 매트릭스의 탄성계수가 크기 때문에 아주 작은 극한 인장변형률을 보인 반면, 폴리우레탄의 경우에는 탄성계수가 작기 때문에 모래를 40% 치환했을 때에도 인장변형률이 10% 이상이 되는 것을 볼 수 있다.

앞서 2장에서 검토한 바와 같이 조인트에서 발생하는 인장 변형량은 Case 1에서 최대 3.05 mm, Case 2에서 최대 2.48 mm였다. 조인트의 폭이 10 mm라고 하면 인장변형률이 약 25~30%에 해당하며, 조인트 폭이 20 mm로 가정하면 인장변형률은 약 13~15% 정도가 되는 것이다. 조인트의 폭을 넓히게 되면 인장변형률을 줄일 수 있기 때문에 효과적이지만, 차량의 주행성을 고려할 때 30 mm 이상의 조인트 폭을 실제 적용하기에는 다소 무리가 있다. 따라서 조인트의 폭을 15~20 mm 정도로 설계에 반영한다고 가정하면 조인트에서 발생하는 인장변형률은 약 13~20% 정도로 예상할 수 있다. 이 정도의 인장변형률은 폴리우레탄을 매트릭스로 사용하고 모래를 부피비로 20~30% 치환했을 때 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

한편, 조인트에서의 변형량 예측에서 모듈 포장체가 축방향 변형에 완전히 자유로운 것으로 가정하여 해석을 수행하였지만, 일정부분 구속 정도에 따라 예측 변형량이 줄어들 수 있을 것으로 판단되며, 그럴 경우 모래의 치환율을 좀 더 증가시켜서 보다 경제적인 조인트 충전 재료의 배합설계가 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 급속시공이 가능한 모듈러 도로포장 시스템에서 포장체 모듈 사이의 조인트에서 발생하는 신축 변형에 저항할 수 있는 조인트 연결재료 개발 연구의 일환으로 몇 가지 2성상 복합재료에 대하여 탄성거동 및 변형성능에 대한 해석적 검토를 수행하여 적용가능성을 비교·검토하였으며, 다음과 같은 결론을 제시할 수 있다.



[Fig. 10] Variation of strain capacity according to volume ratio of sand in two-phase composites

- (1) 조인트에서의 축방향 발생 변형량은 FEM해석을 통해 검토하였으며, 포장체 모듈 하부에 받침이 있는 경우와 노반에 직접 접촉하는 경우에 대해 해석을 실시하였다.
- (2) 변형 유발 요인으로 자중 및 활하중, 온도변화 및 건조수축을 고려하였으며, 그 중 온도변화에 의한

영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 두 가지 경우에 대해 조인트에서의 발생 변형량은 온도하중에 대해 +2.487~3.051 mm, 온도상승에 대해 -1.902~2.226 mm로 나타났다.

- (3) 조인트 연결재료로서 시멘트 페이스트, 에폭시 및 폴리우레탄을 매트릭스로 사용하고 모래를 혼입 입자로 고려한 2상 복합체를 검토하였으며, 탄성거동 특성과 변형성능 예측을 위해 전단지연 모델을 적용하였다.
- (4) 모래 혼입 부피비율에 따른 복합체의 탄성계수와 최대 인장변형률 변화를 검토한 결과, 시멘트 페이스트 및 에폭시에 비해 폴리우레탄이 가장 우수한 성능을 보였다. 조인트 폭을 15~20 mm로 적용한다면, 폴리우레탄을 사용할 경우 모래를 20~30% 비율로 치환함으로써 소요 변형성능을 확보하면서 동시 경제적인 조인트 재료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] D. K. Merritt and S. D. Tayabji, *Precast Prestressed Concrete Pavement for Reconstruction and Rehabilitation of Existing Pavements* (FHWA-HIF-09-008), Federal Highway Administration, Washington DC, 2009.
- [2] D. K. Merritt and S. S. Tyson, "Precast Prestressed Concrete Pavement-A Long-Life Approach for Rapid Repair and Rehabilitation", *Proceedings of the International Conference on Long-Life Concrete Pavements*, Chicago, USA, pp. 497-512, October, 2006.
- [3] L. J. M. Houben, M. Huurman, J. van der Kooij, and S. Poot, "Modieslab Innovative Concrete Pavement Structure: From Idea through Research to Implementation", *Proceedings of the 8th International Conference on Concrete Pavements*, Colorado, USA, pp. 75-92, August, 2005.
- [4] S. M. Kim, H. B. Park, S. C. Yang, and S. H. Han, "Development of Construction Method and Design Guide for Newly Constructed Precast Concrete Pavements", *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 10, No. 2, pp. 193-203, 2008. (in Korean)
- [5] S. C. Yang, S. M. Kim, T. S. Yoo, and S. H. Han, "Joint Stiffness Tests for Precast Concrete Pavements", *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 10, No.1, pp. 229-239, 2008. (in Korean)

- [6] J. Giu, M. F. C. van de Ven, S. Wu, J. Yu, and A. A. A. Molenaar, "Investigating the Self Healing Capability of Bituminous Binders", *Int'l Journal of Road Materials and Pavement Design*, Vol. 10, Special Issue, pp. 81-94, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2009.9690237>
- [7] J. S. Park, S. Y. Choi, W. T. Jung, and Y. H. Park, "An Experimental Study on Mechanical Properties of Hybrid Fiber Reinforced Concrete Pavement", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 25, No. 1, pp. 11-18, 2013. (in Korean)
DOI: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2013.25.1.011>
- [8] D. K. Merritt, B. F. McCullough, N. H. Burns, and A. K. Schindler, *The Feasibility of Using Precast Concrete Panels to Expedite Highway Pavement Construction*, Research Report 1517-3F, The University of Texas at Austin, 2000.
- [9] P. J. Smith and E. J. Barenberg, "Using Precast Super-Slab® for Rapid Repair of Concrete Pavement", *Proceedings of the 8th Int'l Conference on Concrete Pavements*, Colorado, USA, August, pp. 789-807, 2005.
- [10] V. Perry, D. Dykstra, P. Murray, and B. Rajlic, "Innovative Field Cast UHPC Joints for Precast Bridge Systems - 3-span Live Load Continuous", *Proceedings of the 2010 Annual Conference of the Transportation Association of Canada*, Nova Scotia, Canada, pp.1-15, 2010.
- [11] M. D. Lepech and V. C. Li, "Application of ECC for Bridge Deck Link Slabs", *Materials and Structures*, Vol. 42, pp. 1185-1195, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-009-9544-5>
- [12] Korea Road & Transportation Association(KRTA), *Bridge Design Specifications 2010*, pp. 2:1-2:42, KRTA, 2010.
- [13] H. L. Cox, "The Elasticity and Strength of Paper and Other Fibrous Materials", *British Journal of Applied Physics*, Vol. 3, pp. 72-79, 1952.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0508-3443/3/3/302>
- [14] K. S. Ravichandran, "Elastic Properties of Two-Phase Composites", *Journal of American Ceramic Society*, Vol. 77, No. 5, pp. 1178-1184, 1994.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.1994.tb05390.x>
- [15] M. J. Starink and S. Syngellakis, "Shear Lag Models for Discontinuous Composites: Fiber End Stresses and Weak Interface Layers", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 270, pp. 270-277, 1999.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00277-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00277-4)
- [16] C. H. Hsueh, "A Modified Analysis for Stress Transfer

in Fibre-Reinforced Composites with Bonded Fibre Ends", *Journal of Materials Science*, Vol. 30, pp. 331-350, 1995.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00352153>

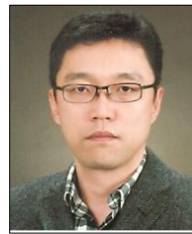
- [17] J. C. San Roman, *Experiments on Epoxy, Polyurethane and ADP Adhesives*, Technical Report No. CCLab2000.1b/1, EPFL, 2005.

- [18] J. C. Afonso and G. Ranalli, "Elastic Properties of Three-phase Composites: Analytical Model based on the Modified Shear-lag Model and the Method of Cells", *Composites Science and Technology*, Vol. 65, pp. 1264-1275, 2005.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.12.033>

이 영 호(Young-Ho Lee)

[정회원]



- 1995년 2월 : 고려대학교 대학원 토목환경공학과 (공학석사)
- 1999년 3월 : 오사카대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2000년 8월 ~ 2001년 12월 : 고려대학교 연구교수
- 2001년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 인프라구조연구실 연구위원

<관심분야>

콘크리트구조, 내진설계

강 수 태(Su-Tae Kang)

[정회원]



- 2003년 2월 : KAIST 건설및환경공학과 (공학석사)
- 2010년 1월 : KAIST 건설및환경공학과 (공학박사)
- 2002년 12월 ~ 2011년 8월 : 한국건설기술연구원 수석연구원
- 2011년 9월 ~ 현재 : 대구대학교 토목공학과 조교수

<관심분야>

고성능 콘크리트, 섬유보강 복합체, 시공성능

송 재 준(Jae-Joon Song)

[정회원]



- 1993년 1월 : 독일 아헨공대 토목공학과 (구조공학석사)
- 1993년 2월 ~ 1995년 9월 : 삼우기술단 대리
- 1995년 12월 ~ 1998년 10월 : 포항산업과학연구원 선임연구원
- 2002년 10월 : 독일 다름슈타트 공대 토목공학과 (구조공학박사)
- 2003년 6월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 인프라구조연구실 연구위원

<관심분야>

합성구조, 강구조

이 상 윤(Sang-Yoon Lee)

[정회원]



- 2003년 2월 : 한양대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2013년 8월 : 고려대학교 대학원 사회환경시스템공학과 (공학박사)
- 2003년 1월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 전임연구원

<관심분야>

토목구조, 합성구조, 프리캐스트 구조