Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 38, No. 1: 113-119/ February, 2018
DOI: https://doi.org/10.12652/Ksce.2018.38.1.0113

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Highway Engineering **도로공학**

투수성 아스팔트 포장 구조설계를 위한 설계인자 도출 및 설계방법에 관한 연구

유현우* · 오정호** · 정영욱*** · 한신인****
Yoo, Hyun Woo*, Oh, Jeongho**, Jung, Young Wook***, Han, Shin In****

Establishment of Design Factors and Procedure for Permeable Asphalt Pavements Structural Design

ABSTRACT

An extensive effort is actively being made to implement permeable pavement systems in urban or residential areas of South Korea in order to achieve efficient water circulation system based on low impact development (LID) design concept. This study aims to establish the design factors and procedure for permeable asphalt pavements structural design. Based on the review of previous studies, the 1993 AASHTO design method is found to be adequate for permeable pavements structural design. In this study, the design program based on 1993 AASHTO design procedure in conjunction with domestic roadway design standards was developed to accommodate the characteristics of permeable asphalt pavements. Primary design parameters such as structural layer coefficients of permeable materials were successfully quantified based on literature reviews and parallel analyses. Comparable design thicknesses were obtained between the developed permeable pavement design (PPD) program and Korea pavement research program (KPRP) under different levels of traffic and subgrade load bearing capacity.

Key words : LID, Permeable pavement system, Structural layer coefficients, Design thickness

초 록

현재 국내에서는 도심지 및 주거지에 원활한 물순환 구조를 이루기 위해 저영향개발에 근거한 투수성 포장 시스템 구축에 대한 시도를 하고 있다. 본 연구는 투수성 아스팔트 포장 구조 설계를 위한 포장인자 구축 및 설계법을 제안하고자 한다. 선행 연구 분석 결과, 1993년 AASHTO 설계법이 적합한 것으로 확인 되었다. 본 연구에서는 투수성 아스팔트 포장 재료의 상대구조계수 같은 주요 설계인자를 선행연구 분석을 통해 정량적으로 산정하였으며, 1993년 AASHTO 설계법 및 국내국도설계기준을 적용한 투수성 포장 구조 설계 프로그램을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 프로그램 및 한국형 도로 설계법 프로그램을 비교한 결과 다양한 교통량 및 노반 지지력 조건에서 합리적인 포장 설계 두께를 산정하는 것을 확인하였다.

검색어 : 저영향개발, 투수성 포장 시스템, 상대구조계수, 설계두께

* 한국교통대학교 철도인프라시스템공학 석사과정 (Korea National University of Transportation · 1276014@ut.ac.kr)
** 정회원 · 교신저자 · 한국교통대학교 철도인프라시스템공학과 부교수
(**Corresponding Author** · Korea National University of Transportation · j-oh@ut.ac.kr)
*** (주)서영엔지니어링 기술연구소 과장 (Seoyoung Eng. Inc · ywjung815@seoyoungeng.com)
**** 정회원 · (주)서영엔지니어링 기술연구소 소장 (Seoyoung Eng. Inc · sihan@seoyeong.co.kr)

Received December 8, 2017/ **revised** December 18, 2017/ **accepted** December 21, 2017

Copyright ⓒ 2018 by the Korean Society of Civil Engineers
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

최근 극한강우 빈도가 잦아지면서 짧은 강우 지속시간에도 불구하고 강우량의 극대화에 따른 도로 배수 시설 용량 과부하를 유발하여 잦은 침수로 인한 재난피해가 극심한 경우가 많이 발생하고 있다. 또한, 극한강우 시 주행 중인 운전자의 시야 확보가 어려운 경우가 많아서 관련 교통사고 건수가 증가하고 있는 추세이다. 투수성 포장기법은 대표적인 저영향개발 적용기술 중 하나인 친환경 포장 공법으로 물순환 체계의 개선을 통한 환경 개선 효과와 더불어 차량 주행소음의 감소, 열섬 현상 완화, 미끄럼 저항의 향상 등 다양한 기능을 얻을 수 있으며 국내외 관련 연구가 활발히 진행되고 있다(Vancura et al., 2010; Li et al., 2014; Hein et al., 2013; Kim et al., 2015).

국도건설공사 설계실무요령(2013)에 의하면, 투수성 포장은 강우 시 보행자의 안전성과 환경보전의 관점에서 노상까지 우수를 침투시키는 구조이다. 투수성 포장을 적용하는 경우에는 침투수에 의해 아스팔트와 골재의 박리 및 파괴, 기층부의 지지력 저하, 동절기 동상 등이 발생할 수 있으므로 배수시설과 병행하여 설계할 필요가 있다. 현재 일반도로는 한국형 포장 설계법을 적용하여 설계를 하게 되어 있으나, 현재 투수성 아스팔트 도로를 설계를 위한 지침은 제시되어 있지 않다. 이에 본 연구에서는 국내외 선행연구 조사 및 검토를 통해 투수성 아스팔트 포장 설계인자 및 구조 설계방법을 제안하고자 한다.

2. 투수성 아스팔트 포장 설계 인자

2.1 포장 설계 인자 개요

도로 포장체의 입력 변수는 크게 교통하중, 환경하중, 재료 물성, 불연속면(시멘트 콘크리트 포장) 등으로 나뉜다. 정확한 포장의 거동을 분석하기 위해서 이들을 정량적으로 나타내고 설계에 반영해야 한다. 교통하중은 포장 설계 및 해석에 가장 민감한 영향을 주는 입력 변수로서 포장 파손의 주요 원인이 된다. 교통하중을 정량화하는 방법에는 등가단축하중(Equivalent Single Axle Load : ESAL)을 이용하는 것과 실제 축하중을 포장 해석에 사용하는 방법이 있다. 기존의 경험적인 설계에서는 등가단축하중은 일반 승용차의 복륜의 단축에 80kN (18,000lb)의 축하중이 재하될 때를 기준으로 하여 축하중 및 축 종류에 따른 상대적인 포장의 영향 정도를 나타낸 반면, 한국형 도로 설계법이나 미국 역학적-경험적 도로 설계법에서는 실제 도로에서 운행되는 다양한 차종들의 축하중 및 분포도를 고려하여 실제 설계에 반영될 수 있도록 하고 있다.

환경하중은 온도와 함수비 변화에 따라 포장체 거동에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 온도 변화는 아스팔트 콘크리트 포장에서 표층 및 기층의 물성 변화에 영향을 주며, 하부 구조의 동결에도 영향을 준다. 함수비 변화는 표층 및 기층의 함수비 변화에 따른 물성 변화를 일으키며 잠재적인 포장 파손의 원인이 된다. 투수성 포장의 경우에는 재료 특성상 표층 재료의 공극이 일반 도로설계에 사용되는 재료보다 크므로 온도 변화에 민감할 수 있다. 또한 우수 침투가 원활하게 이루어지기 때문에 하부층에서의 우수 유입으로 인한 지지력 저하를 최소화할 필요성이 있다.

포장재료 물성은 포장의 구조해석에 필요한 입력변수로서 모형에서 포장층의 거동을 분석하기 위해 사용된다. 기존에는 포장층이나 포장 형식에 따라 각각 다른 값을 사용하였다. 기존 93 AASHTO GUIDE 아스팔트 포장에서는 노상토의 회복탄성계수 값을 사용하여 물성을 정의한 반면 콘크리트 포장에서는 복합 지지력 계수를 산정하여 설계에 사용하였다. 역학적-경험적 설계법에서의 아스팔트 혼합물의 경우 일반적으로 사용되는 물성은 동탄성계수이며, 이는 혼합물, 온도와 하중재하속도 등의 함수이므로 이에 대한 고려가 필요하다. 이외에도, 포장 설계를 위해서는 설계수명을 결정하는 공용성 기준 및 설계 신뢰도가 적용된다.

2.2 투수성 아스팔트 포장 설계 인자

한국형 포장 설계법에서는 도로의 중요도와 교통량 등을 감안하여 설계등급을 세 가지 등급으로 구분하고 있으며, 본 연구에서 고려하고 있는 투수성 포장 특성상 설계차량대수(설계 차로 당 일평균 교통량)가 7000대 정도로 설계등급 2에서의 지방도 및 기타도로 군이나 설계등급 3이 적합할 것으로 판단된다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2013). 한국형 포장설계등급에 따른 설계방법으로는 설계등급 3인 경우 포장재료의 일반적인 물성과 데이터베이스화된 축하중별 교통량 분포를 사용하여 설계해석 프로그램을 수행토록 하고 있다. 국외 투수성 아스팔트 포장설계방법에 대한 사례들을 검토한 결과, 93 AASHTO GUIDE Eq. (1)을 적용하여 설계를 하고 있음을 확인하였다(Tennis et al., 2004; Vancura et al., 2010; Li et al., 2014; NAPA, 2008; Hein et al., 2013; Gulliver, 2015; Smith, 2011). 투수성 아스팔트 포장 특성상 주차장이나 주거지 또는 교통량 및 차량 분포 변화가 상대적으로 적은 차로에 적용될 수 있을 것으로 판단되며, AASHTO 설계법에서 적용하는 등가단축하중(W)을 투수성 포장설계에 적용하는 것이 더욱 용이할 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 93 AASHTO GUIDE에 근거한 투수성 아스팔트 구조 설계법을 제안하고자 하며 다음과 같은 포장 인자들을 제안하였다.

$$\log W = Z_R \times S_0 + 9.36\log(SN+1) - 0.02 + \frac{\log[\frac{P_i - P_t}{P_i - 1.5}]}{0.4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32\log(M_R) - 8.07 \quad (1)$$

2.2.1 설계 신뢰도(Z_R=표준정규분포계수, S_o=표준편차)

일반적으로 공용성이 중요시 판단되고 도로 이용도가 큰 고속도로, 간선도로 등은 높은 신뢰도를 고려하여 설계를 한다. 반면에 교통량이 적은 지방도로나 국도 등은 앞서 기술한 설계등급에서와 같이 상대적으로 낮은 신뢰도를 고려하여 설계를 하게 된다. AASHTO 도로 설계법에 의하면 75~95%의 신뢰도를 고려하여 설계를 하고 있으며, Gulliver(2015)에 의하면 80% 수준이 투수성 포장 설계에 적합한 값으로 제안하고 있다. 표준편차는 설계인자의 변동성을 고려한 것으로 재료, 교통, 환경 인자들이 포함된다. 일반적으로 아스팔트 포장 설계에서는 0.44 값이 사용되는 반면, 콘크리트 포장 설계에서는 0.34 값이 사용되고 있다.

2.2.2 포장구조 지수(Structural Number, SN)

AASHTO 아스팔트 도로 설계법에서 포장구조 지수는 포장층의 두께를 산정하는 중요한 인자로 포장구조지수는 각 포장층의 두께에 상대강도계수(a_i) 값을 곱하여 산정하게 되며, 일반적으로 높은 포장구조지수 값은 강성이 큰 도로포장 구조를 의미한다. 따라서, 각 포장층에 사용되는 포장재료의 강도를 나타내는 상대강도계수 값이 설계에 있어서 매우 중요하며, 여러 문헌 조사를 통해 다음과 같이 정리할 수 있었다.

Hein et al.(2013) 일반적인 밀입도 아스팔트 재료의 상대강도계수를 0.4~0.44 값을 많이 사용하고 있는 반면 투수성 아스팔트 재료 경우 투수성을 확보하기 위해서 입도조정을 통한 개립도 배합설계를 적용하므로 상대강도계수를 감소하여 적용하는 것이 타당하다고 보고 있다.

Table 1에서 볼 수 있듯이, 투수성 아스팔트 표층 및 기층의 상대강도 계수의 범위가 큰 것을 확인할 수 있었다. 이에, 국내 투수성 아스팔트 포장 설계에 적합한 상대강도계수를 산정하고자 하였다. Mustaque et al.(1997)은 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$a_1 = 0.4 \times \log\left(\frac{E}{3000\,MPa}\right) + 0.44 \quad 0.20 \le a_1 \le 0.44 \quad (2)$$

Eq. (2)를 이용하여 주어진 상대강도계수 범위 내 투수성 아스팔트 표층의 탄성계수를 계산한 결과는 다음과 같다.

Kim et al.(2016)는 최대골재입경 13mm 섬유보강투수성 아스팔트 배합설계를 다음과 같이 제안하였다.

Table 1. a_i Values for Permeable Asphalt Pavement Layers (Gulliver, 2015)

Material	NAPA (2008)	Oregon DOT	Vermont DOT	Hein et al. (2013)
M1*	0.4~0.42	0.42	0.41	0.2~0.3
M2**	0.3~0.35	0.24	0.33	0.14~0.19
M3***	0.1~0.14	0.10	0.10	0.06~0.09

*permeable asphalt surface layer
**permeable asphalt base layer
***permeable aggregate subbase layer

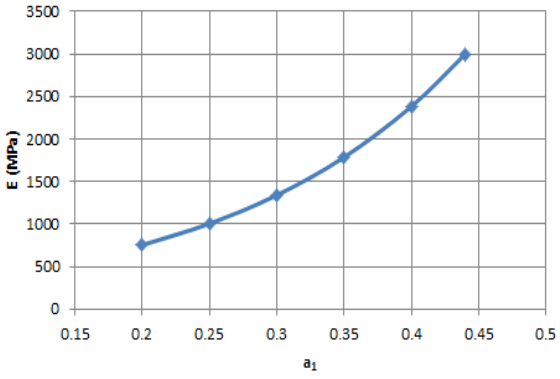

Fig. 1. Relationship between E and a_i of Permeable Asphalt Surface Layer

Table 2. Mix Design of Permeable Asphalt Surface Material (Kim et al., 2016)

Property	Ave. Value
Asphalt content (%)	5.15
Bulk density (g/cm^3)	2.042
Porosity (%)	20.6
Cum. % retained on the 19mm sieve (P_{34})	0.0
Cum. % retained on the 9.5mm sieve (P_{38})	35.0
Cum. % retained on the 4.75mm sieve (P_4)	77.0
% passing #200 (P_{200})	5.0
PG Grade	82-22

Eq. (3)은 아스팔트 동탄성계수 예측식을 보여주고 있으며, Table 2에 제시된 배합설계 값을 적용하여 동탄성계수 마스터곡선을 Fig. 2와 같이 작성하였다. Eq. (3)은 투수성 아스팔트 재료를 반영한 식은 아니지만, 개립도 아스팔트 재료 특성을 반영한 것으로 투수성 포장재료 동탄성계수를 산정하는데 적용하고자 하였다.

$$Log|E^*| = a_1 + a_2(P_{200}) + a_3(P_4) + a_4(V_a) + \frac{a_5(V_{beff})}{V_{beff} + V_a} + \frac{a_6 + a_7(P_4) + a_8(P_{38}) + a_9(P_{34})}{1 + e^{(a_{10} + a_{11} \times \log(f) + a_{12} \times \log(\eta))}} \quad (3)$$

여기서, $|E^*|$: 동탄성계수(MPa)

η : 아스팔트 바인더 점도(106poise)

f : 하중주파수(Hz)

V_a : 공극률(%)

V_{beff} : 유효아스팔트바인더의 함량(%)

a_1 ~ a_9 : 상관계수

투수성 포장 특성상 상대적으로 적은 양의 교통량 및 낮은 주행속도를 고려하여 설계하중재하 주기를 1~10Hz, 설계표준온도를 15~25°C로 가정할 때, 동탄성계수는 550~1200MPa 범위를 보여주고 있으며, Fig. 1 및 Table 1에서의 값들을 검토하였을 때, Hein et al.(2013)이 제시한 상대강도계수 값이 투수성 아스팔트 표층의 설계값으로 적합한 것으로 판단된다. Eq. (4)는 골재보조기층의 상대강도계수와 탄성계수간의 상관관계를 보여주는 식이며 (Mustaque et al., 1997), Eq. (5)는 93 AASHTO 설계법에서 지반반력계수 k와 회복탄성계수(M_R) 간의 관계를 보여주고 있으며, 여기서 회복탄성계수의 단위는 psi이다. Hein et al.(2013)이 제안한 투수성 골재보조기층의 상대강도계수 0.06~0.09 범위에서 Eqs. (4) and (5)를 각각 적용하여 회복탄성계수 및 지반반력계수를 산정하였다.

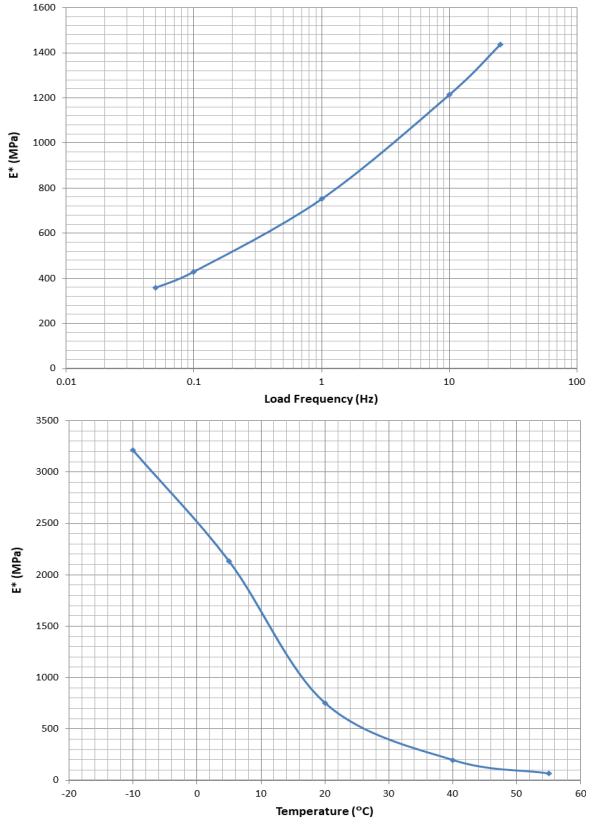

Fig. 2. Master Curve of Permeable Asphalt Surface Material

$$a_3 = 0.23 \times \log\left(\frac{E}{160\,MPa}\right) + 0.15 \quad 0.06 \le a_3 \le 0.20 \quad (4)$$

$$k(pci) = \frac{M_R}{19.4} \quad (5)$$

산정 결과, 지반반력계수는 12.2~17.0kg/cm^{3}로 나타났으며, 이는 투수성 골재보조기층 다짐 후 현장평판재하시험에서 얻은 지반반력계수의 범위와 유사한 것으로 확인되었다(Kwon et al., 2015).

2.2.3 서비스 지수(Pi, Pt)

아스팔트 포장 서비스 지수는 공용수명동안 소성변형, 크랙킹, 패칭 등으로 인해 도로 이용자들의 정성적인 평가를 의미하며, 일반적으로 새로운 아스팔트 포장 경우 초기 서비스 지수(P_i)를 4.1~4.5로 보고 길어깨 포장인 경우는 4.2를 일반적인 값으로 사용하는 반면 최종 서비스 지수(P_t)는 2.5를 적용하고 있다. 본 연구에서는 기존 서비스 지수 값들을 적용하고자 한다.

2.2.4 노상토 회복탄성계수(M_R)

노상토의 지지력은 포장체의 공용성능에 영향을 미치는 중요한 인자 중에 하나이다. 일반적으로 노상토 다짐은 포장체 시공 전에 이루어지게 되며 다짐의 균질성 및 재료의 성질이 지지력 형성에 중요한 요인이 된다. 노상토의 회복탄성계수는 일반적으로 실내 회복탄성계수 시험을 통해 산정하게 되나 실제 실험을 수행하여 값을 산정하는 것이 용이치 않은 경우가 많다. 노상토 물성 파악은 구조적 설계에 있어서 중요한 인자지만, 투수성 포장 수문학적 설계에 있어서 도 중요한 설계인자가 된다. 국도설계기준(2013)에 의하면 노상조건을 세 가지 지지력 조건(CBR<5, 5≤CBR<10, 10≤CBR)으로 구분하여 시멘트 콘크리트 포장의 카달로그 단면표를 제시하였다. 투수성 포장 특성상 우수침투에 의한 노상토의 지지력 저하가 최소화하기 위해서는 어느 정도 투수성이 확보가 되는 노상토 조건에서 설계 및 시공이 이루어져야 할 것으로 사료된다. 노상토의 회복탄성계수와 CBR 값 간의 상관관계는 Eq. (6)과 같으며 Rohde(1994)가 제안한 Eq. (7)을 이용하면 노상토의 상대강도계수를 산정할 수 있으며 본 연구에서는 5~30의 CBR 값을 기준으로 노상토의 상대강도 계수를 산정하였다.

$$M_R(MPa) = 17.6 \times CBR^{0.64} \quad (6)$$

$$a_i = 29.14\,CBR - 0.1977\,CBR^2 + 0.00645\,CBR^3 \quad (7)$$

3. 투수성 아스팔트 포장 구조설계 프로그램

투수성 아스팔트 포장 구조설계 프로그램은 Fig. 3과 같은 절차를 따라 구성된다.

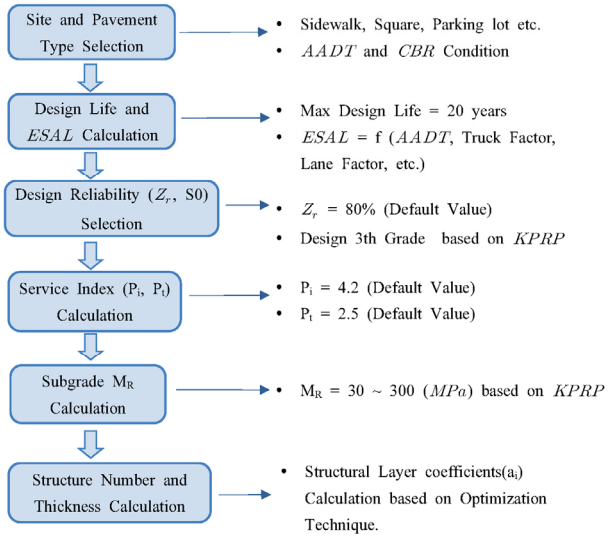

Fig. 3. Permeable Asphalt Pavement Structural Design Procedure

구조지수 결정을 통한 포장층 두께 산정은 각 재료의 상대강도계수의 범위에서 시공 단가를 고려한 최적화 알고리즘을 통해서 결정하게 된다. 1993 AASHTO 아스팔트 포장 구조설계에 의하면, 3층으로 구성된 아스팔트 포장인 경우 구조지수(SN)는 Eq. (8)에 의해 결정된다.

$$SN = a_1 \times D_1 + a_2 \times m_2 \times D_2 + a_3 \times m_3 \times D_3 \quad (8)$$

여기서, m_2와 m_3는 배수계수로 0.4~1.4의 범위를 갖게 되며 일반적으로 1.0의 값을 취한다. 본 연구에서는 투수성 포장 표층에 대한 투수성을 고려하기 위해서, Eq. (9)를 적용하였으며, 표층인 경우 1.4 값을, 기층 및 보조기층은 1.2로 적용하였다.

$$SN = a_1 \times m_1 \times D_1 + a_2 \times m_2 \times D_2 + a_3 \times m_3 \times D_3 \quad (9)$$

Fig. 4는 설계 프로그램에서 적용된 구조지수 결정 알고리즘을 보여주며, 최적화 알고리즘에 의해 결정된 단면을 제시하게 된다. Fig. 5는 현재 개발된 투수성 아스팔트 포장 구조설계 프로그램(PerPaveDesign, PPD)의 인터페이스 화면으로 포장종류를 결정하는 창이다. 투수성 아스팔트 포장 설계 단계에 따라 각각의 인터페이스화면이 있으며 현재 투수성 콘크리트 포장 구조설계 알고리즘 개발도 진행 중이다.

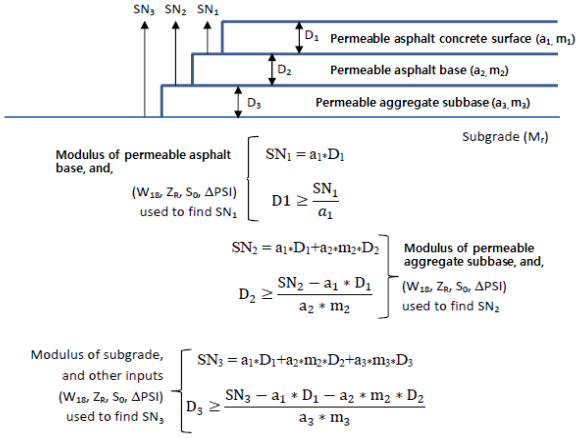

Fig. 4. Algorithm of Determining SN Values (Modified from Timm et al., 2014)

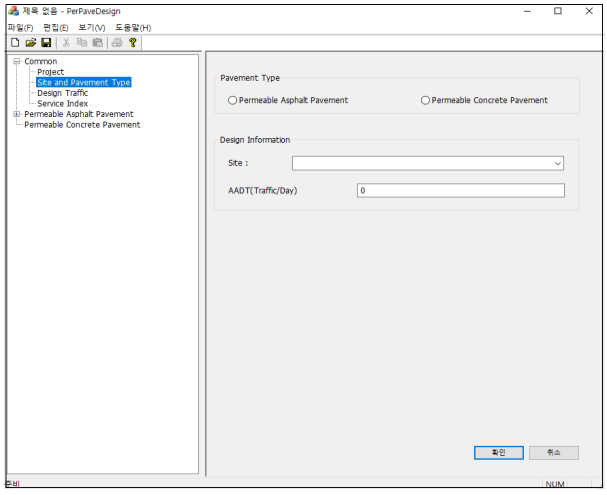

Fig. 5. Per Pave Design Interface

4. PPD 프로그램 검증

본 절에서는 투수성 포장 설계 프로그램(PPD)의 설계 신뢰도를 검토하기 위하여 Table 3과 같이 설계인자를 고려하여 한국형

Table 3. Input Parameters Used

	Inputs	Values		
KPRP	Subgrade M_R* (MPa)	49.3	76.8	
	AADT	100 ~ 7000		
	Design Grade	3		
PPD	CBR	5	10	
	AADT	100 ~ 7000		
	a_i	0.2 ~ 0.3	0.14 ~ 0.19	0.06 ~ 0.09
	Serviceability	4.2	2.5	
	Reliability	80%		

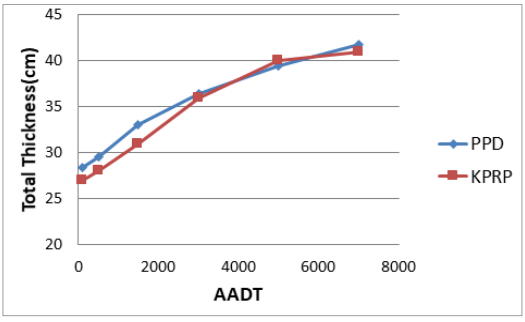

Fig. 6. Relationship between AADT and Design Thickness

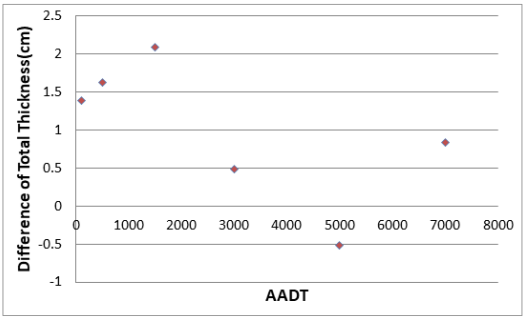

Fig. 7. Difference of Total Thickness

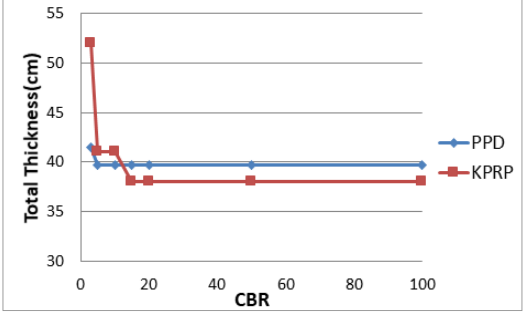

Fig. 8. Relationship between CBR and Design Thickness

도로포장 설계 프로그램(KPRP)과 비교분석하였다.

KPRP에서의 노상토 회복탄성계수의 경우 Eq. (6)을 통해 계산된 값을 대입하였고, PPD에서의 상대강도계수는 Hein et al.(2013)의 범위를 적용하였다. AADT와 포장층 두께간의 상관관계를 비교분석한 결과, AADT가 증가함에 따라 포장층의 두께가 증가하며 AADT가 3000보다 작은 경우 PPD가 KPRP와 비교하여 최대 2cm 정도 전체 포장 두께를 크게 산정하였다(Figs. 6 and 7 참조). 이는 PPD 프로그램에서 등가단축하중 산정 시 트럭계수를 AADT의 0.2 비율로 적용함에 따라, 1~6%의 트럭계수가 AADT 3000 이하 시 고려되어 다소 두꺼운 설계 두께로 산정한 것으로 판단된다.

또한, CBR과 포장층 두께 간의 상관관계를 비교분석한 결과 Fig. 8과 같은 그래프를 얻을 수 있다.

전반적으로 낮은 CBR값(3~10)에서 설계두께가 크게 산정되나 일정값 이상에서는 CBR값의 변화에 대해 포장층 두께가 일정하다. 따라서 포장층의 두께는 CBR값보다 AADT에 큰 영향을 받고 있는 것으로 판단된다.

5. 결론 및 제언

본 논문은 투수성 아스팔트 포장 구조설계를 위한 설계인자 산정 및 프로그램 개발에 관한 것으로 다음과 같은 결론 및 제언을 도출하였다.

(1) 기존 문헌 분석 결과, 투수성 아스팔트 포장 구조 설계는 AASHTO 93 설계법을 활용하여 이루어지고 있음을 확인하였고, 본 연구에서는 국내 국도설계기준을 바탕으로 AASHTO 93 설계법을 적용한 설계 프로그램을 개발하였다.

(2) 투수성 아스팔트 포장 설계에서 층 두께를 산정하기 위해서는 각 포장재료의 상대강도계수가 중요하며, 분석 결과 Hein et al.(2013)이 제안한 상대강도계수 범위가 가장 적합한 것으로 확인되었으나, 향후 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

(3) 설계 프로그램을 활용하여 한국형 포장 설계 프로그램과 비교한 결과(설계등급 3 적용), 설계 포장층의 두께의 차이가 교통량 및 노반 지지력에 따라 약간의 차이가 있었으나, 대체적으로 합리적인 설계포장 두께를 산정하는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구과제는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원 물관리연구사업인 '건전한 도시물순환인프라의 저영향기법(LID) 및 구축운영기술' 과제(12기술혁신C04)의 일환으로 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

References

Applied Research Associates (2004). *Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures*, Final Report, National Cooperative Highway Research Program Project 1-37A, Transportation Research Board, Washington, D.C.

Gulliver, J. S. (2015). *Permeable pavements in cold climates: state of the art and cold climate case studies*, Dept. of Civil, Environmental and Geo-Engineering, University of Minnesota, Final Report, 2015-30.

Hein, D., Strecker, E., Poresky, A. and Roseen, R. (2013a). *Permeable shoulders with stone reservoirs*, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), NCHRP Project

25-25, Task 82, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, DC.

Kim, N., Cho, S., Kim, K. and Ahn, J. (2016). *Mix design for LID based permeable pavement system*, Research Report, Kyonggi University (in Korean).

Kim, S., Ahn, J., Teodosio, B. and Shin, H. (2015). "Numerical analysis of infiltration in permeable pavement system considering unsaturated characteristics." *Journal of the Korea Society of Disaster Information*, Vol. 11, No. 3, pp. 318-328 (in Korean).

Korea Roadway Construction and Design Practice Guideline, 2013. *Ministry of land*, Infrastructure and Transport (in Korean).

Kwon, H., Oh, J. and Han, S. (2015). "A study on effect of geogrid reinforced crushed stone subbase in permeable pavement system." *Journal of Korean Soc. Advanced Composite Structure*, Vol. 6, No. 4, pp. 64-70.

Li, X., Jelen, M. and Smith, B. (2014). *Implement permeable pavements to improve infrastructure sustainability-A case study*, Compendium Paper of Transportation Research Board Annual Meeting, Washington DC.

Mustaque, H., Affan, H. and Todd, L. (1997). "Structural layer coefficients of crumb rubber modified asphalt concrete mixtures." *Journal of the Transportation Research Board, Transportation Research Record*, Vol. 1583, No. 1, pp. 62-70.

NAPA (National Asphalt Pavement Association) (2008). *Porous asphalt pavements for stormwater management, Design, Construction and maintenance guide*, Information Series 131, NAPA, Lanham, MD, USA.

Rohde, G. T. (1994). "Determining pavement structural number from FWD testing." *Transportation Research Record*, Vol. 1448, No. 10, pp. 61-68.

Smith, D. R. (2011). *Permeable interlocking concrete pavements*, 4th edition. Interlocking Concrete Pavement Institute (ICPI), Herndon, VA, USA.

Tennis, P., Leming, M. and Akers, D. (2004). *Pervious concrete pavements*, EB302.02, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, silver spring, Maryland, US.

Timm, D. H., Robbins, M. M., Tran, N. and Rodenzo, C. (2014). "Recalibration procedures for the structural asphalt layer coefficient in the 1993 AASHTO pavement design guide." NCAT Report 14-08, Auburn University, AL, US.

UNHSC (University of New Hampshire Stormwater Center) (2009). *UNHSC Design specifications for porous asphalt pavement and infiltration beds*, University of New Hampshire, Durham, NH, USA.

Vancura, M., Khazanovich, L. and MacDonald, K. (2010). *Performance evaluation of in-service pervious concrete pavements in cold weather*, A Report submitted to Ready Mixed Concrete (RMC) Research & Education Foundation.