

공용중인 아스팔트 포장의 아스팔트층 동탄성계수와 FWD 역산 탄성계수의 상관관계 분석

Analysis on Relationship between FWD Back-calculated Modulus and Dynamic Modulus of Asphalt Layers for Existing Asphalt Pavements

박 희 문 Park, Hee Mun
박 흥 준 Park, Hong Joon

정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 연구위원 · 교신저자 (E-mail : hpark@kict.re.kr)
Tennessee Department of Transportation, Assistant State Asphalt Engineer (E-mail : hong.park@tn.gov)

ABSTRACT

PURPOSES : The objective of this study is to analyze the relationship between the FWD back-calculated modulus and dynamic modulus of asphalt layers for existing asphalt pavements.

METHODS : To evaluate the dynamic modulus of the asphalt mixture in the existing and new asphalt layers, the uniaxial direct tension test was conducted on small asphalt specimens obtained from the existing asphalt-covered pavements. A dynamic modulus master curve was estimated by using the uniaxial direct tension test for each asphalt layer. The falling weight deflectometer (FWD) testing was conducted on the test sections, and the modulus values of pavement layers were back-calculated using the genetic algorithm and the finite element method based back-calculation program. The relationship between measured and back-calculated asphalt layer moduli was examined in this study. The normalized dynamic modulus was adopted to predict the stiffness characteristics of asphalt layers more accurately.

RESULTS : From this study, we can conclude that there is no close relationship between dynamic modulus of first layer and back-calculated asphalt modulus. The dynamic moduli of second and third asphalt layers have some relation with asphalt stiffness. Test results also showed that the normalized dynamic modulus of the asphalt mixture is closely related to the FWD back-calculated modulus with 0.73 of R square value.

CONCLUSIONS : The back-calculated modulus of asphalt layer can be used as an indicator of the stiffness characteristics of asphalt layers in the asphalt-covered pavements.

Keywords

Asphalt Pavement, Falling Weight Deflectometer, Dynamic Modulus, Genetic Algorithm

Corresponding Author : Park, Hee Mun
Korea Institute of Construction Technology 283, Goyangdae-ro,
Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, Korea
Tel : +82.31.910.0323 Fax : +82.31.910.0161
E-mail : hpark@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received Aug. 12, 2015 Revised Aug. 19, 2015 Accepted Oct. 01, 2015

1. 서론

최근 도로포장 건설 산업은 신설도로 건설보다는 기존 공용중인 도로포장을 확장하거나 유지 보수하는 추세이다. 이에 따라 유지보수공법을 적용한 도로포장에

대한 정확한 지지력 및 공용성 평가가 향후 도로포장의 수명 예측 및 유지보수 비용 산정에 매우 중요한 요소가 되고 있다.

주기적인 아스팔트 덧씌우기 공법의 적용에 따라 공

용중인 아스팔트 포장층의 지지력 및 내구성은 변화하게 된다. 기존의 아스팔트층은 시간 경과에 따른 손상발생으로 지지력이 점차 감소할 것이나, 절삭 아스팔트 덧씌우기층은 새로운 아스팔트 혼합물의 적용에 따라 아스팔트층의 전체 지지력을 향상시킨다.

일반적으로 공용중인 아스팔트 포장에서 구조적 지지력 및 도로포장의 잔존수명을 평가하기 위해서는 Falling Weight Deflectometer(FWD) 시험을 가장 널리 사용되고 있다(Ullidtz et al., 1995). 현장에서 측정된 FWD 처짐값은 역산기법을 통하여 도로포장층 탄성계수의 계산에 활용된다(NHI, 1994, 손종철 외, 2006). 일반적으로 역산 아스팔트 탄성계수는 아스팔트층 전체 강성특성을 대표하게 된다. 역산기법으로 산정된 아스팔트 포장층의 탄성계수는 실내시험에서 측정된 아스팔트 혼합물의 동탄성계수와 비교하여 검증하게 된다. 기존에는 FWD 역산 탄성계수와 실내시험을 통하여 측정된 아스팔트 혼합물 동탄성계수의 비교를 위한 연구를 수행하였다(Park et al., 2005). 그러나 기존연구에서는 아스팔트 덧씌우기 공법이 적용된 구간에서는 아스팔트 덧씌우기 포장층의 두께가 얇아서 층별 동탄성계수를 측정하는데 한계가 있었다.

본 논문의 목적은 유지보수 공법 적용에 따른 아스팔트 층별 구조적 지지력을 정확하게 평가하기 위하여 소형 아스팔트 시편 동탄성계수 시험결과와 FWD 역산 시험결과와의 상관관계를 규명하고자 한다. 현장에서 채취한 아스팔트 시편을 실내에서 소형으로 제작하여 일축직접인장시험을 통하여 아스팔트 층별 동탄성계수를 산정하였다. 또한, 현장에서 계측된 FWD 처짐값은 온도 및 하중에 대한 보정을 수행한 후 유전자 알고리즘과 유한요소해석법을 활용한 프로그램을 이용하여 아스팔트 포장의 층별 탄성계수를 역산하였다. 분석결과, FWD 역산 아스팔트 탄성계수는 아스팔트 층별 두께를 고려한 아스팔트 혼합물 동탄성계수와 상관관계가 높은 것으로 판명되었다. 향후 소형 아스팔트 시험결과를 통해 도로포장층 지지력 산정 및 도로포장의 잔존수명을 보다 정확하게 산정하고자 하며 본 시험법의 활용도를 높이고자 한다.

2. 시험현장 소개

본 연구를 위한 아스팔트 덧씌우기 포장 시험구간은 노스캐롤라이나 주 도로국의 피로균열 연구과제를 통하여 검증된 시험현장 중에서 선정하였다. 시험구간은 노

스캐롤라이나 도로포장파손 조사결과와 공사이력을 토대로 총 6개 노선을 선정하였다. 본 구간에서 지점별로 FWD 시험을 수행하였으며, 실내 동탄성계수 시험을 위하여 노선별로 2개 지점에서 아스팔트 시편을 채취하고 동적관입시험을 수행하였다. Table 1은 선정된 구간의 아스팔트층 및 보조기층 두께와 노상층 재료의 분류를 나타내고 있다. 본 구간의 아스팔트층은 덧씌우기 공법 적용 횟수에 따라 3~5개 층으로 구성되어 있으며, 아스팔트층 두께의 범위는 140~330mm이다. 보조기층 두께는 180~330mm 범위이며, 노상재료는 AASHTO 토질분류법에 근거하여 결정하였다. Table 2는 아스팔트 층별 두께를 나타내고 있으며 층별로 상이한 아스팔트 혼합물이 사용되었다. 아스팔트 층별 두께는 최소 29cm에서 최대 127cm로 구성되어 있으며, 1층은 가장 최근에 적용된 아스팔트 덧씌우기층이다.

Table 1. Summary of Pavement Information for Selected Sites

Section	Location	Asphalt thickness (mm)	Subbase thickness (mm)	Subgrade material
US17	1	264	203	A-2
	2	264	203	
NC87	1	311	300	A-3
	2	333	319	
NC24	1	178	233	A-4
	2	178	178	
US70	1	260	220	A-2
	2	273	330	
US74	1	140	317	A-5
	2	171	280	
US601	1	213	290	A-4
	2	146	205	

Table 2. Summary of Asphalt Layer Thicknesses for Selected Sites

Section	Location	Asphalt layer thickness (mm)				
		1st	2nd	3rd	4th	5th
US17	1	29	44	70	121	
	2	29	44	70	121	
NC87	1	38	32	51	64	127
	2	54	25	114	38	102
NC24	1	48	29	102		
	2	41	35	102		
US70	1	48	60	76	76	
	2	38	67	79	89	
US74	1	48	60	32		
	2	44	83	44		
US601	1	51	64	54	44	
	2	35	29	44	38	

3. 아스팔트 동탄성계수 측정

현재 공용중인 아스팔트 포장층의 강성특성을 분석하기 위하여 현장에서 채취하여 실내에서 제작한 소형아스팔트 시편에 대하여 일축직접인장 시험법을 이용하여 아스팔트 층별 동탄성계수를 측정하였다(Park and Kim, 2013). 일반적으로 동탄성계수 시험을 위해서는 75~100mm 지름과 150mm 높이의 아스팔트 시편이 필요하다. 그러나 현장에서 공용중인 아스팔트층의 두께는 50~100mm로써 일반적인 아스팔트 시편에 대한 동탄성계수 시험의 적용에 문제가 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Fig. 1과 같이 38mm 지름, 100mm 높이의 실린더형 시편을 채취하여 동탄성계수 시험을 수행하였다(Kutay et al., 2009). 본 시편을 준비하기 위하여 먼저 현장에서 최소 44mm 두께의 시편을 코어한 후에 실내에서 수평방향으로 38mm 지름, 100mm 높이로 코어하여 일축직접인장시험을 위한 소형아스팔트 시편을 준비하였다.

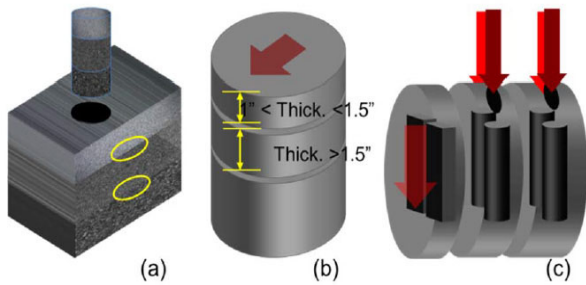


Fig. 1 Preparation of Small Specimen Geometrics (Park and Kim, 2013)

노스캐롤라이나 주의 6개 구간에서 구간별 2개 지점을 선정하여 코어를 채취한 후에 3~5개 층별로 소형시편을 Fig. 1과 같은 절차를 통하여 준비하였다. 준비된 소형 시편들은 5, 20, 40도에서 25, 10, 5, 1, 0.5, 0.1 Hz 하중조건에서 동탄성계수 시험을 수행하여 동탄성계수 마스터커브를 결정하였다. Table 3은 온도 20도, 하중 주파수 10Hz 조건에서 일축직접인장시험을 통해 측정된 아스팔트 혼합물의 동탄성계수를 나타내고 있다. 전반적으로 첫번째층의 아스팔트 혼합물 탄성계수가 2~5층보다 높은 것을 알 수 있으며, 이는 최근에 적용된 아스팔트 혼합물의 강성이 기존 포장층보다 우수하기 때문이다. Fig. 2는 NC24 구간에서 채취한 소형아스팔트 혼합물의 동탄성계수 마스터커브를 나타내고 있다.

Table 3. Summary of Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures for Selected Sites (20°C, 10Hz)

Section	Location	Dynamic modulus (MPa)				
		1st	2nd	3rd	4th	5th
US17	1	18766	8765	9992	9009	
	2	13673	8386	11059	10611	
NC87	1	13491	11272	9266	7076	14076
	2	13496	11172	9274	8804	3266
NC 24	1	5286	5407	5515		
	2	7920	8601	6456		
US70	1	15477	8197	5622	7428	
	2	15663	8399	5921	7828	
US74	1	11573	13273	8476		
	2	10318	11592	7356		
US601	1	8864	13233	7956	15828	
	2	11861	12391	9686	14552	

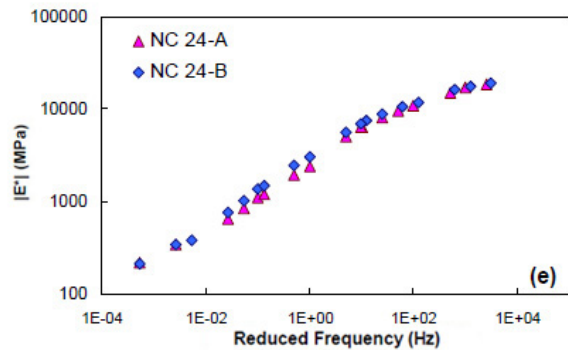


Fig. 2 Dynamic Modulus Master Curve of Small Specimen Geometrics (2nd Layer in the NC 24)

4. FWD 처짐을 이용한 도로포장의 층별 탄성계수 역산

4.1. 유전자 알고리즘 이용한 도로포장층 탄성계수 역산

본 연구에서는 도로포장층 탄성계수를 역산하기 위하여 유한요소해석기법과 유전자 알고리즘을 활용한 역산 프로그램을 이용하였다(박성완 외, 2007). 본 프로그램은 7개의 FWD 표면 처짐값을 이용하여 아스팔트 포장체의 탄성계수를 역산하는 프로그램으로 목적함수 (Objective Function) 값이 최소일 때의 포장체 각 층의 탄성계수 값을 결정하며 이를 위한 목적함수는 Eq. (1)을 이용하여 계산된다.

$$\text{목적함수} = \sum_{i=1}^7 (D_i - d_i)^2 \quad (1)$$

여기서, d_i : 계산된 처짐값 (i 번째 센서)

D_i : FWD 측정 처짐값 (i 번째 센서)

본 프로그램에 이용되는 아스팔트 포장의 구조해석을 위한 정해석 프로그램은 2차원 축대칭 유한요소 구조해석프로그램이며 정적 탄성해석 조건으로 FWD 표면 처짐값 및 포장체 내부의 응력과 변형률을 계산한다.

유한요소망은 포장구조 형식에 따라 자동적으로 생성되며 재하 부분은 조밀하고 재하부분으로부터 멀수록 거칠게 형성된다. 요소망은 4개의 절점을 갖는 요소로 총 2,500개의 절점과 2,200개의 요소로 구성되어 있다. 노상층 하부경계조건은 고정단이고 측면경계조건은 롤러로 수직 변위만 가능하도록 되어 있다. 또한 하부 경계면의 탄성계수는 27,580MPa로 노상층 하부에 위치하도록 설정하였으며 노상층 두께를 6m로 설정하여 경계면의 영향을 최소화 하였다.

본 프로그램에 입력되는 정보는 포장구조체 자료와 유전자 알고리즘 자료로 구분되어 있다. 포장구조 입력 자료에는 포장층 두께와 포와송비, 하중 및 재하 반경, 측정 처짐값 그리고 탄성계수 역해석 범위가 있다. 유전자 알고리즘 입력 자료는 세대수, 개체수, 교차확률, 돌연변이 확률의 유전자 알고리즘 연산자로 구성되어 있다. Table 4는 FWD 역산을 위하여 본 연구에서 적용된 유전자 알고리즘 연산자를 나타내고 있다. 개체수는 개체의 집합으로 이루어져 있고 세대수는 개체수의 집단으로 구성되어 있다. 교차확률은 두 개의 부모 개

체로부터 새로운 자식을 생성해내는 것을 확률로 표현한 것이고, 돌연변이 확률은 현재 집단에 존재하지 않은 새로운 정보를 초기 유전자 조합 이외의 공간에서 탐색할 수 있도록 하는 연산자이다. Fig. 3은 세대수 증가에 따른 계측된 FWD 처짐값과 유한요소 해석으로 계산된 처짐값 간의 오차가 수렴되는 것을 나타내고 있으며, 세대수가 50 이상부터는 오차가 일정 값으로 수렴하고 있다. 본 역산프로그램에서 오차가 최소가 되는 경우의 도로포장층의 탄성계수를 역산 탄성계수로 정의한다.

4.2. 도로포장층 탄성계수 역산 결과

현장 코어지점에서 근접한 위치에서 FWD 시험을 수행하여 위치변화에 따른 FWD 결과값의 오차를 최소화 하였다. 각 구간별로 FWD 시험 시간과 온도가 상이하여 현장에서 계측된 온도를 20도 표준온도를 기준으로 FWD 처짐값을 보정하여 역산을 수행하였다. 아스팔트층 두께는 코어 후 측정한 아스팔트 시편의 두께값을 사용하였으며 보조기층의 두께는 동적관입시험 시험결과를 통하여 계산하여 역산의 입력변수로 사용하였다. 역산프로그램에서는 측정한 FWD 처짐값과 프로그램에서 계산된 처짐값의 오차가 최소일 경우의 도로포장층의 탄성계수값을 산정한다. Table 5는 구간별 도로포장층 FWD 역산 탄성계수를 나타내고 있으며 아스팔트층의 경우, 탄성계수 범위가 1500~6000MPa이며, 보조기층 탄성계수 범위는 150~850MPa이며, 노상층 탄성계수 범위는 60~400MPa이다.

Table 4. Genetic Algorithm Parameters

Generation	Population	Crossover	Mutation
100	100	0.72	0.04

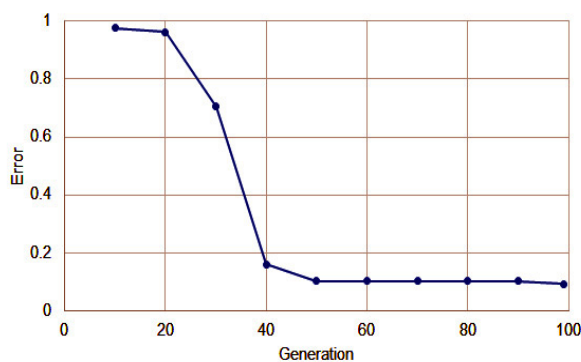


Fig. 3 Decrease of Error with Increase of Generation Number in Genetic Algorithm (NC 24)

Table 5. Summary of Back-calculated Layer Moduli for Selected Sites

Section	Location	Back-calculated modulus (MPa)		
		Asphalt	Subbase	Subgrade
US17	1	4496.1	642.2	227.9
	2	4013.2	854.8	232.9
NC87	1	5880.6	725.5	206.3
	2	4267.8	743.6	220.9
NC24	1	1542.2	258.2	65.5
	2	1568.4	346.6	99.5
US70	1	3301.0	443.8	147.4
	2	2890.5	392.6	100.3
US74	1	6076.2	192.9	71.3
	2	5538.7	159.4	61.4
US601	1	4826.5	589.2	402.6
	2	4514.3	287.7	218.0

5. 아스팔트 혼합물 동탄성계수와 FWD 역산 탄성계수의 상관관계 분석

5.1. 층별 아스팔트 동탄성계수와 FWD 역산 탄성계수의 비교

Fig. 4는 아스팔트 첫 번째층에 위치한 아스팔트 혼합물의 동탄성계수와 FWD 역산 탄성계수 간의 상관관계를 나타내고 있다. 본 구간들의 첫 번째층은 대부분 아스팔트 덧씌우기층으로 아스팔트층 두께는 약 5cm 정도이며 아스팔트 하부에 위치한 층보다 두께가 상대적으로 얇은 편이다. Fig. 4에서 나타난 바와 같이 역산 아스팔트층 탄성계수와 첫 번째층의 동탄성계수 간의 상관도는 낮은 것으로 판단되며 이는 첫 번째층의 두께가 낮아 전체 구조적 지지력에 대한 영향도가 낮기 때문으로 판단된다.

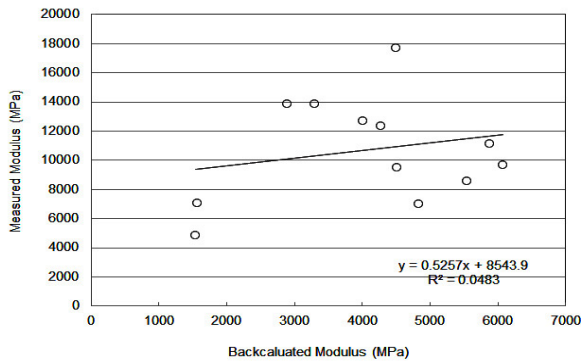


Fig. 4 Relationship between the Dynamic Modulus of 1st Layer and FWD Back-calculated Modulus

Fig. 5~6은 도로포장체 두 번째와 세 번째 층의 동탄성계수와 FWD 역산 아스팔트층 탄성계수 간의 상관관계를 나타내고 있다. FWD 역산 아스팔트층 탄성계수와 아스팔트 혼합물 동탄성계수 간의 상관도는 첫 번째 층에 비해 높으며 이러한 경향은 2~3번째 층 아스팔트 탄성계수가 도로포장체 아스팔트층의 전체 지지력에 영향을 미친다고 판단된다.

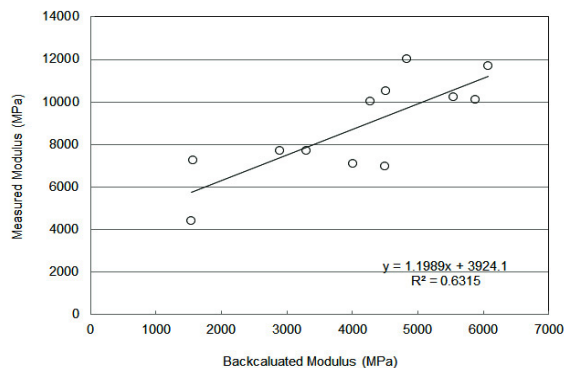


Fig. 5 Relationship between the Dynamic Modulus of 2nd Layer and FWD Back-calculated Modulus

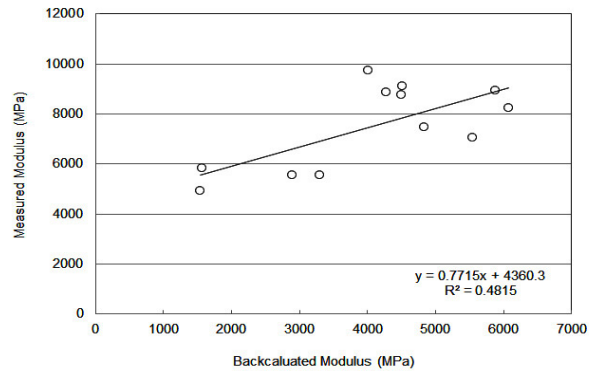


Fig. 6 Relationship between the Dynamic Modulus of 3rd Layer and FWD Back-calculated Modulus

5.2. 아스팔트 혼합물 동탄성계수와 FWD 탄성계수의 상관관계

FWD 처짐값을 이용하여 산정된 아스팔트층 역산 탄성계수는 아스팔트층의 전체 강성특성을 대표하고 있다. 실내시험을 통하여 계측된 동탄성계수는 각 층별의 아스팔트 혼합물 강성을 의미하므로 아스팔트층 전체의 강성특성을 파악하기 위해서는 아스팔트 층별 두께의 고려가 필요하다. I번째 아스팔트층 두께가 두꺼울 경우에는 i번째 아스팔트 혼합물의 동탄성계수가 전체 아스팔트 강성에 미치는 영향이 클 것이다. 이러한 영향을 고려하기 위하여 실내시험을 통하여 결정된 동탄성계수에 두께를 곱한 후 합산한 값을 전체 아스팔트층 두께로 나눈 탄성계수(Normalized Dynamic Modulus)로 산정한 후 FWD 역산탄성계수와 비교하였다. 본 탄성계수를 사용할 경우 도로포장의 두께의 영향을 고려할 수 있으며 두께가 지지력 산정에 반영될 수 있다.

$$\text{Normalized Dynamic Modulus} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i T_i}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad (2)$$

여기서, E_i : i번째 아스팔트층 동탄성계수 (MPa)

T_i : i번째 아스팔트층 두께 (mm)

n : 아스팔트층 총 갯수

Fig. 7에 나타난 바와 같이 아스팔트 혼합물 Normalized Dynamic Modulus와 FWD 역산 탄성계수 간의 R square값이 0.73으로 상관도가 매우 높음을 알 수 있다. 소형 아스팔트 시편의 동탄성계수는 각 층

의 지지력뿐만 아니라 아스팔트 전체 지지력을 산정할 수 있어 향후 역학적-경험적 포장 설계법 및 공용중인 도로포장의 상태평가 및 잔존수명 예측에도 적용이 가능할 것으로 판단된다. 향후에는 FWD 하중 적용 시 발생하는 아스팔트 각 층의 하중주파수를 산정하여 주파수별 동탄성계수와 FWD 역산 탄성계수 간의 상관관계와 아스팔트층 깊이가 상관도에 미치는 영향을 검토하고자 한다. 국내에서는 본 기법을 적용 시 도로포장 유지관리시스템(Pavement Management System, PMS)에서 아스팔트 덧씌우기 공법 적용에 따른 도로포장의 지지력 향상 정도 및 향후 잔존수명을 보다 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

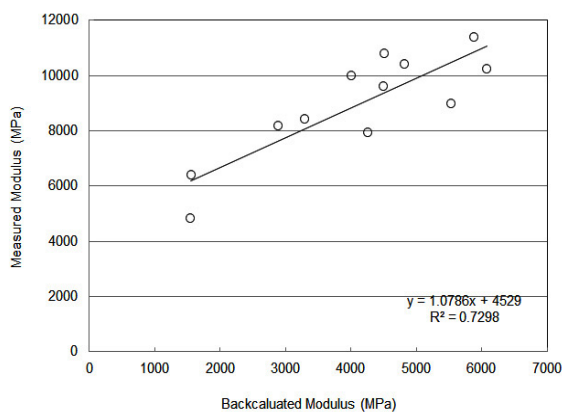


Fig. 7 Relationship between the Normalized Dynamic Modulus and FWD Back-calculated Modulus

6. 결론

본 연구는 아스팔트 덧씌우기 공법 적용에 따른 아스팔트 층별 구조적 지지력을 정확하게 평가하기 위한 아스팔트 층별 동탄성계수 시험결과와 FWD 역산 탄성계수 시험결과와의 상관관계를 규명하는데 목적이 있다. 이를 위하여 소형 아스팔트 시편에 대한 직접인장강도 시험을 수행하여 층별 동탄성계수를 평가하였으며, 유한요소해석법과 유전자 알고리즘 프로그램을 이용한 FWD 역산을 수행하였으며 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 역산 아스팔트층 탄성계수와 아스팔트 덧씌우기 층인 첫 번째층의 동탄성계수 간의 상관도는 낮은 것으로 판단된다. 이는 첫 번째층의 두께가 낮아 전체 구조적 지지력에 대한 영향도가 낮기 때문으로 판단

된다.

2. 도로포장체 두 번째와 세 번째 층의 동탄성계수와 FWD 역산 아스팔트층 탄성계수 간의 상관관계를 검토한 결과, 상관도는 첫 번째 층에 비해 높으며 이러한 경향은 2~3번째 층 아스팔트 탄성계수가 도로포장체 아스팔트층의 전체 지지력에 영향을 미친다.
3. 아스팔트 층별 두께를 고려한 Normalized Dynamic Modulus와 FWD 역산 탄성계수 간의 R square값이 0.73으로 상관도가 높음으로 소형 아스팔트 시편의 동탄성계수는 각 층의 지지력뿐만 아니라 아스팔트 전체 지지력을 산정하는데 적용할 수 있다.
4. 향후에는 아스팔트 층별 하중주파수를 고려한 아스팔트 혼합물 동탄성계수와 FWD 역산 탄성계수 간의 상관관계와 아스팔트층 깊이가 상관도에 미치는 영향과 하중재하 모드변화에 따른 차이점을 검토하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 2015년 국토교통과학기술진흥원 교통물류연구사업인 “도로함몰 위험도 평가 및 분석기술 개발” 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

REFERENCE

- Kutay, M. E., N. H. Gibson, J. Youtcheff, and R. Dongre. (2009) Use of Small Samples to Predict Fatigue Lives of Field Cores: Newly Developed Formulation Based on Viscoelastic Continuum Damage Theory. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2127, National Research Council, Washington, D.C., pp. 90-97.
- NHI.(1994) NHI Course No. 137, “Pavement Deflection Analysis - Participant Workbook”, FHWA-HI-94-021, FHWA, U.S. Department of Transportation.
- Park H.J. and Y. R. Kim (2013), “Investigation into Top-Down Cracking of Asphalt Pavements in North Carolina”, Transportation Research Record 2368, National Research Council, Washington D.C., PP.45-55.
- Park, H.M., Kim, Y.R. and Park, S.W (2005) “Assessment of pavement layer condition with use of multiloading-level falling weight deflectometer deflections”, In Transportation Research Record 1905, TRB, National Research Council, Washington D.C., pp. 107-116.
- Park, S. W., H. M. Park, and J. J. Hwang (2007), “Development of a Backcalculation Method for Estimating Pavement Layer Modulus Using the Genetic Algorithm”, Korean Society of Civil Engineers, Vol 27, pp.441-447.

Son, J. C., S. K. Rhee, D. S. An, and H. M. Park (2006), "Development of the Structural Condition Evaluation Technique for Asphalt Pavements Using Falling Weight Deflectometer Deflections", International Journal of Highway Engineering, Korean Society of Road Engineers, Vol 8/3 , pp.1-19.

Ullidtz, P. and Coetzee, N.F. (1995) "Analytical Procedures in Nondestructive Testing Pavement Evaluation", In Transportation Research Record 1482, TRB, National Research Council, Washington D.C., pp. 61-66.