

화강암 골재를 이용한 아스팔트 혼합물의 동탄성 계수 예측방정식

Predictive Equation of Dynamic Modulus for Hot Mix Asphalt with Granite Aggregates

이관호* · 김현오** · 장민석***

Lee, Kwan-Ho · Kim, Hyun-O · Jang, Min-Seok

Abstract

The presented work provided a predictive equation for dynamic modulus of hot mix asphalt, which showed higher reliability and more simplicity. Lots of test result by UTM at laboratory has been used to develop the precise predictive equation. Evaluation of dynamic modulus for 13mm and 19mm surface course and 25mm of base course of hot mix asphalt with granite aggregate and two asphalt binders (AP-3 and AP-5) were carried out. Superpave Level 1 Mix Design with gyrator compactor was adopted to determine the optimum asphalt binder content (OAC) and the measured ranges of OAC were between 5.1% and 5.4% for surface HMA, and around 4.2% for base HMA. The dynamic modulus and phase angle were determined by testing on UTM, with 5 different testing temperature (-10, 5, 20, 40, & 55°C) and 5 different loading frequencies (0.05, 0.1, 1, 10, 25 Hz). Using the measured dynamic modulus and phase angle, the input parameters of Sigmoidal function equation to represent the master curve were determined and these will be adopted in FEM analysis for asphalt pavements. The effect of each parameter for equation has been compared. Due to the limitation of laboratory tests, the reliability of predictive equation for dynamic modulus is around 80%.

Keywords : dynamic modulus, predictive equation, master curve, shift factor, granite, gyratory compactor

요 지

본 연구에서는 화강암 골재를 이용한 아스팔트 표층용 혼합물 및 기층용 혼합물의 동탄성계수를 평가하고, 배합설계에 사용된 데이터를 바탕으로 신뢰성이 높고, 간단한 형태의 동탄성계수 예측방정식을 개발하는 목표를 두고 있다. 기존의 마살 배합설계가 아닌 슈퍼페이브 배합설계를 이용하여, 재료들의 기본 물성치를 정리하였다. 표층용(13mm 및 19mm)과 기층용(25mm) 밀입도 아스팔트 혼합물을 적용하였고, 국내의 대표적인 아스팔트 AP-3, AP-5 아스팔트 바인더를 이용하여 배합설계를 실시하였다. 최적아스팔트함량에 공극률 2%, 4%, 6%의 시편과 공극률 4%에 최적 아스팔트 함량에서 $\pm 1\%$ 의 아스팔트 함량을 이용하여 시편을 제작하였다. 5개의 다른 시험온도, -10, 5, 21, 40, 55°C 및 0.05, 0.1, 1, 10, 25Hz의 5개의 하중주파수를 이용하여 일축압축 시험모드로 동탄성 계수를 평가하였다. 기존의 동탄성계수 예측용 Witzak 방정식을 표층용 및 기층용 아스팔트 혼합물 실험결과를 이용하여 국내 아스팔트 혼합물에 적용할 수 있는 수정된 예측방정식을 제안하였다. 예측방정식에 사용된 각각의 변수들에 의한 영향정도를 상호 비교 평가하였고, 제한된 실험 자료로 인해 예측방정식의 신뢰도는 약 80% 수준으로 평가되었다.

핵심용어 : 동탄성 계수, 마스터곡선, 예측방정식, 전이함수, 화강암, 선회다짐기

1. 연구배경 및 목적

국내의 도로의 총연장이 100,000km를 상회하고 있고, 최근의 턴키제도 등으로 인하여 도로의 설계 등에 있어서 많은 관심과 새로운 공법의 도입 등 다양한 시도가 이루어지고 있는 실정이다. 그러나, 실질적으로 국내에서 도로설계에 이용되는 설계법의 경우 미국의 AASHTO 72년 잠정 설계법 및 86년 개정설계법이 주를 이루고 있고, 또한 일본의 TA 설계법 일부를 준용하고 있는 실정이다. 외국의 설계법의 이용에 있어서 설계에 필요한 설계입력변수의 상당 부분

을 설계자의 주관적이고 자의적인 판단 기준에 의존하여 설계하고 있다. 또한, 설계기준에 있어서도 기초적인 연구가 이루어지지 않은 상태로 설계 입력변수 설정에서부터 설계과정에 이르기까지 체계적인 정립이 필요한 실정이다. 그러므로, 효율적인 도로포장의 설계, 시공, 운영, 관리를 위한 새로운 도로포장 설계법 개발이 요구되며, 재료연구, 설계모형 개발, 현장시험 등 장기간의 조사 및 연구가 필요하다. 더욱이, 포장기술의 선진국인 미국과 유럽에서도 기존의 경험적 설계법을 역학적 이론에 기초한 차세대 포장설계법의 개발을 진행하고 있다. 따라서, 우리나라도 기존 외국에서 개발

*정회원 · 경성대학교 건설환경공학부 부교수 (E-mail : khlee@ks.ac.kr)

**경성대학교 건설환경공학부 석사 (E-mail : kho1052@hotmail.com)

***경성대학교 건설환경공학부 석사과정 (E-mail : jms03010@hotmail.com)

된 설계법의 적용상 한계를 극복하고 최선의 연구 성과를 반영한 보다 선진화된 포장설계법의 개발이 절실히 요구되고 있다(건교부, 2002).

본 연구는 한국형 포장 설계법 개발을 위한 아스팔트 혼합물의 재료물성정량화의 1단계 3년차 연구결과를 정리한 것이다. 주요 연구내용은 하중주파수와 온도의 중첩원리를 이용한 아스팔트 혼합물의 변환함수 및 동탄성 계수를 평가하고, 또한 아스팔트 혼합물의 재료물성 중 가장 중요한 물성치인 동탄성 계수를 예측하는 예측공식을 제안하는 것이다.

2. 아스팔트 혼합물의 동탄성 계수

2.1 동탄성계수 실험의 발전사

1962년 Papaziand에 의해 수행된 아스팔트 혼합물의 점탄성 특성평가가 아스팔트 혼합물의 동탄성계수(Dynamic Modulus) 관련 첫 번째 시험이라 할 수 있다. 실험은 원통형 시편에 사인과 하중을 정해진 하중주파수를 이용하였고, 사인과 형태의 변형량을 측정하였다. 실험은 다양한 조건의 하중주파수 및 온도조건에서 수행하였다. 실험으로부터 아스팔트 혼합물의 점탄성 이론을 도로포장설계에 적용할 수 있음을 확인하였다.

이후 지난 40여 년간 많은 아스팔트 혼합물 동탄성계수 평가에 많은 연구가 수행되었다. 각각의 연구자별로 다양한 실험방법을 이용하였고, 특히 하중조건의 경우 압축하중을 기본으로 인장하중, 간접인장 등이 이용되었다. 1974년 Witzczak과 Root는 인장-압축시험을 이용하여 고온에서의 phase angle이 큰 영향을 주는 것을 발표하였다. 1977년 Bonnaure 등은 bending 시험을 이용하여 동탄성계수를 평가하였다. 시편은 사다리꼴 형태를 이용하였고, 사인과 하중을 이용하였다.

1980년 및 1990년 초경에는 International Union of Testing and Research에서 아스팔트 혼합물의 설계법 및 설계입력변수 연구에서 동탄성계수를 주로 다루었다. 유럽의 약 15개의 다른 실험실에서 같은 종류의 시편을 이용하여 비교시험을 수행하였다. 이들 시험으로부터 bending 시험과 간접인장시험을 이용한 동탄성계수 시험이 상당히 유사한 결과를 나타냄을 제시하였다.

1990년대 중반에는 NCHRP에서 동탄성계수와 관련된 많은 연구가 수행되었고, 현재 보편적으로 이용되는 표준화된 시험법을 제시하였다. 즉, 실험 시편의 형상 및 크기, 시편 준비과정, 시험방법, 하중조건, 해석법등을 제시하였다.

2.2 동탄성계수 기본 이론

아스팔트 혼합물의 점탄성 거동특성은 사인과 하중을 휴지기 없이 연속 재하한 상태에서 측정된 변형특성과의 상관관계로부터 규명이 가능하며, 이때 이용하는 파라미터를 복합탄성계수(complex modulus, E^*)로 정의한다. 시험에 이용되는 하중과 측정된 변형 및 복합탄성계수는 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma = \sigma_o \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$\sigma = \sigma_o \sin(\omega t - \phi) \quad (2)$$

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_o e^{i\omega t}}{\phi_o e^{i(\omega t - \phi)}} \quad (3)$$

동탄성계수는 복합탄성계수의 절대값을 의미하며, 식 (4)와 같이 표현된다.

$$|E^*| = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} \quad (4)$$

시험으로부터 결정되는 동탄성계수는 시험온도 및 하중의 조합에 따라 각각의 값을 얻을 수 있다. 이것을 하중시간과 온도의 중첩(Superposition Principle)원리를 적용하여 그림 1과 같은 마스터곡선(Master Curve)을 작성할 수 있다. 마스터곡선은 특정 아스팔트 혼합물의 하중과 온도와의 상관관계를 규명할 수 있는 장점을 가지고 있다. 마스터곡선을 만드는 방법은 크게 두 가지로 구분되는데, 하중주파수와 온도의 상관관계를 이용하는 Arrhenius 방법과 아스팔트 바인더의 점도와 하중재하시간과의 상관관계를 이용하는 AASHTO 2002 방법이 있다.

Arrhenius 방법은 마스터곡선을 만들기 위해서 하중시간에 따른 변환함수(shift factor)의 결정이 필요하다. 이를 위해 reduced frequency(f_r)를 이용하여 각각의 하중주파수(f)를 나누어주면 된다. 여기서 $a(T)$ 는 주어진 온도로의 변환에 필요한 변환량을 의미한다.

$$f_r = \frac{f}{a(T)} \quad \text{or} \quad \log(f_r) = \log(f) - \log[a(T)] \quad (5)$$

일반적으로, 저온 및 상온에서의 아스팔트 혼합물의 하중 응답특성은 지수함수형태를 이용하고, 고온에서의 특성 평가 시에는 다중함수(polynominal fitting function)를 이용한다. Pellinen(2001)에 의해 제안된 새로운 방법은 Sigmoidal 함수를 이용하여 마스터곡선을 결정하는 것으로, 이 함수는 측정된 동탄성 계수를 비선형최소자승법을 이용하여 처리한다(Kaloush, 2001, 김현오 & 이관호, 2005). 기본방정식은 다음과 같고, MS사의 EXCEL의 해석기능(Solver Function)을 이용하여 방정식에 사용된 파라미터를 결정하였다.

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + \exp^{\beta - \gamma \log(f_r)}} \quad (6)$$

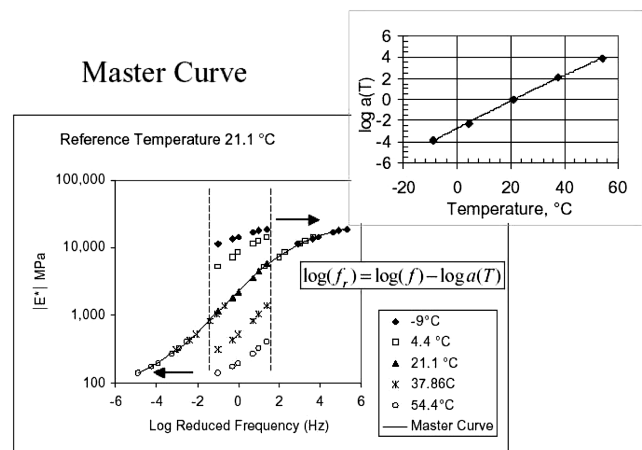


그림 1. 마스터곡선 및 변환함수

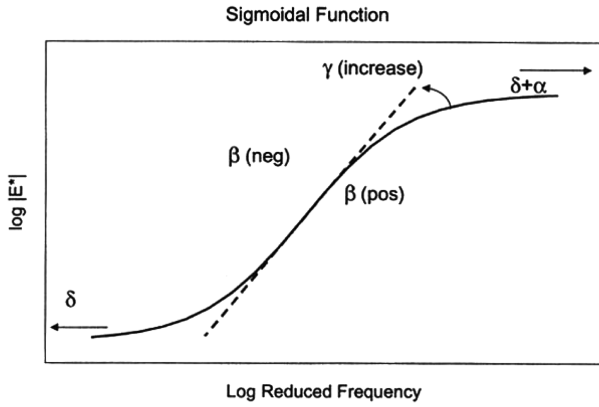


그림 2. Shape parameter의 정의

$$\log(t_r) = \log(t) - c\{\log(\eta) - \log(\eta_{Tr})\} \quad (7)$$

여기서, $\log(E^*)$ = 로그 함수값의 동탄성 계수

δ = minimum modulus (최소값)

α = range of possible value

β & γ = shape parameter

η, η_{Tr} = 아스팔트 바인더의 점도

그림 2에 나타난 것과 같이, γ 는 함수 값의 기울기를 의미하고, β 는 수평방향의 분기점(turning point)을 의미한다.

동탄성 계수 시험결과에서 결정된 동탄성 계수를 실수부(탄성영역, E_1)와 허수부(점성영역, E_2)로 구분할 수 있고, 이를 그래프로 표시한 것을 Cole & Cole Plane 또는 Complex plane이라 한다. 로그스케일의 동탄성 계수의 절대값과 위상각(phase angle)과 상관관계를 나타내는 그래프를 Black space라 정의한다. Black space에 나타난 것과 같이 하중주파수와 온도는 동탄성 계수와 위상각과의 상관관계가 없음을 보여주고, 위상각이 0인 경우는 재료의 탄성적인 특성을 보여준다. 역학적-경험적 설계법인 AASHTO 2002 Design Guide에서는 다층탄성이론을 이용하여 포장체의 응력과 변형을 해석하고, 해석에 이용되는 포장체의 주요 물성치가 동탄성 계수이다. 이 방법에서는 아스팔트 바인더의 점성(viscosity)를 이용하여 변환함수(shift factor)를 결정하고, 이를 이용하여 아스팔트 혼합물의 동탄성 계수를 결정한다(김현오, 2005).

3. 실험재료 및 시험방법

3.1 실험재료

실험에 이용된 골재는 국내에서 보편적으로 이용 가능한

화강암골재를, 아스팔트는 AP-3와 AP-5등급을 이용하였다. 성능등급 시험결과로부터 AP-3는 PG58-22, AP-5는 PG64-22로 확인되었다. 아스팔트 혼합물은 표층용 밀입도 13mm, 표층용 밀입도 19mm, 기층용 밀입도 25mm를 적용하였다.

3.2 배합설계

아스팔트 혼합물의 배합설계는 Superpave Level 1 방법을 준용하였고, 다짐은 선회다짐기를 이용하였다. 선회다짐기의 다짐횟수에 따른 밀도변화 및 공극율의 변화를 측정하여 4% 공극율을 가지는 아스팔트 함량을 결정하였고, 이를 표 1에 나타내었다. 시험에 이용된 시편은 선회다짐기를 이용하여 직경 150mm, 높이 160mm 원통형 시편을 제작한 후, 코어링(corring)하여 직경 100mm, 높이 150mm 원통형 공시체를 시험용 시편으로 이용하였다.

3.3 동탄성계수 시험 및 시험결과

3.3.1 만능시험기(UTM)를 이용한 동탄성계수 시험

본 연구에서는 동탄성계수 평가를 위해 만능시험기(UTM)를 이용하였다. 본 연구에 적용된 동탄성 계수 평가용 시험 항목과 시험항목별 구체적인 시험조건은 Pellinen(2001)에 의해 수행된 Simple Performance Test(SPT) 연구에 적용된 내용을 국내의 시험기기 여건 등을 고려하여 국내 상황에 맞게 수정하여 이용하였다. 동탄성 계수시험은 5개의 다른 온도 및 5개의 하중주파수를 이용하였고, 표 2와 같은 시험 온도, 하중조건 및 변형률을 적용하였다. 시험에서 이용된 응력상태에서 선형응력상태는 시료에 하중이 재하 되었을 경우 선형거동특성을 주로 평가하게 된다. 높은 온도에서의 아스팔트 혼합물의 거동특성 중 골재의 맞물림 저항(mobilizing the aggregate friction)을 반영하는 소성변형 특성평가에 다소 취약하다. 그러나, 이는 혼합물 소성변형 특성 평가 연구팀에서 따로 연구가 시행될 것이므로 재료물성 정량화 부분에서는 문제가 없을 것으로 판단된다. 동탄성계수 시험은 각각의 준비된 시험시편에 5개의 온도조건, 5개의 하중주파수를 이용하여 시험을 수행한다. 시험은 유압을 이용한 만능시험기를 이용하고, 하중은 휴지기가 없는 사인파형태의 압축응력을 적용하였다.

동탄성계수는 비파괴 시험이므로 고온에서의 특별한 상태가 아니면 같은 시편을 이용하여 일련의 시험을 순차적으로 수행한다. 시험은 저온에서 고온으로, 높은 하중주파수에서 낮은 하중주파수의 형태로 변환하여 수행한다. 이러한 온도-하중주파수 변이시험은 시험중 발생하는 시험시편의 손상을 최소화할 수 있는 시험순서이다(김현오, 2005). 저온 및 상온(-10

표 1. 아스팔트 혼합물 배합설계자료

아스팔트 혼합물	골재	밀입도 표층용 13mm (SGA-11)		밀입도 표층용 19mm (SGA-12)		밀입도 기층용 25mm (BGA-11)	
	아스팔트	PG 58-22 (AA-1)	PG 64-22 (AB-1)	PG 58-22 (AA-1)	PG 64-22 (AB-1)	PG 58-22 (AA-1)	PG 64-22 (AB-1)
최적아스팔트함량(%)		5.2	5.3	5.1	5.1	4.3	4.5
G_{mm}		2.462	2.458	2.475	2.468	2.481	2.487

표 2. 동탄성 계수 시험항목 및 시험조건

시험항목	시험온도(°C)	주파수(Hz)	응력 상태	변형률(μ strain)
Dynamic Complex Modulus	-10, 5, 20, 40, 55	25, 10, 1, 0.1, 0.05	선형	< 150

표 3. 하중주파수 및 결과측정범위

시험시료	하중조건	하중주파수	반복횟수	측정범위
채취시료 및 실내제작시편	사인파하중	25	200	95-200
		10	200	95-200
		5	100	95-100
		0.1	20	15-20
		0.05	15	10-15

°C, 5°C, 20°C)에서는 138kPa(20psi)에서 965kPa(140psi) 정도의 압축하중을 이용하였고, 여기서 965kPa 하중수준은 대형트레일러의 차량하중을 모사한 것이다. 고온, 40°C의 경우 하중수준을 46-68kPa(7-10psi), 55°C에서는 21kPa(3psi)를 적용하였다. 주어진 시험온도에서 하중주파수의 변환은 다음 단계의 하중주파수를 적용 시까지 약 60초 정도의 휴지기 시간을 적용한 후 시험한다. 이러한 일련의 시험이 온도 및 하중주파수를 변환하였다. 표 3은 시험에 이용된 하중주파수 및 시험결과측정범위를 보여주고 있다.

3.3.2 실험결과

만능시험기를 이용한 각각의 아스팔트 혼합물의 동탄성계수 및 위상각을 표 4에 정리하였다. 측정된 동탄성계수의 경우 미국의 연구진에 의해 제시된 측정값보다 다소 작게 산정되었다. 이는 국내에서 사용하고 있는 밀입도 아스팔트 혼합물의 입도가 잔골재의 함유량이 높아서 값의 차이를 나타내는 것으로 판단된다.

표 4. a 표층용 화강암 13mm + AP-3 (PG58-22)

공극율		2%		4%		6%	
시험온도	주파수	E*	δ	E*	δ	E*	δ
-10도	0.05	7874.3	10.72	6928.0	10.75	6589.0	9.64
	0.1	8052.7	9.60	10663.0	10.21	6971.5	9.49
	1	9108.0	6.65	8098.0	6.31	8032.0	6.91
	10	9539.3	4.44	8370.3	4.50	8544.0	4.27
	25	9265.3	3.94	8170.7	1.79	9498.5	5.88
5도	0.05	5209.0	15.78	4662.0	15.91	4416.7	16.68
	0.1	5566.3	12.66	4917.7	14.01	4694.3	15.21
	1	6748.3	8.62	6060.3	10.30	5729.3	8.72
	10	7735.3	6.55	6833.3	7.65	6668.3	7.16
	25	7975.3	4.15	6964.7	4.35	6632.3	5.68
20도	0.05	2479.3	26.50	2196.3	26.44	1957.0	27.02
	0.1	4202.5	24.11	2150.7	24.96	2188.3	25.38
	1	4111.3	14.78	3672.0	16.69	3342.3	16.29
	10	5178.7	11.85	4802.7	10.37	4582.7	11.92
	25	5977.0	12.06	5411.0	10.56	5013.0	11.91
40도	0.05	739.0	18.35	715.0	19.37	653.0	20.85
	0.1	818.0	19.32	791.3	19.79	739.7	20.55
	1	1229.0	20.81	1143.0	19.52	1023.7	18.05
	10	1948.3	21.28	1828.7	17.52	1574.3	21.61
	25	2369.3	19.80	2108.3	14.12	1874.7	16.52
55도	0.05	326.7	12.43	302.7	14.46	274.0	12.26
	0.1	324.0	13.25	323.7	14.63	292.3	13.58
	1	426.3	15.69	433.7	16.73	552.0	16.27
	10	679.7	22.19	652.3	22.88	563.7	20.45
	25	857.0	16.06	834.3	27.23	677.7	20.13

표 4. b 표층용 화강암 19mm + AP-3 (PG58-22)

공극율		2%		4%		6%	
시험온도	주파수	E*	δ	E*	δ	E*	δ
-10도	0.05	7288.7	11.17	6821.7	10.70	7742.7	10.64
	0.1	7495.7	10.33	7055.0	9.27	8110.3	9.55
	1	8700.3	7.01	7893.0	6.42	9215.7	7.47
	10	9245.7	5.46	8532.7	4.21	9757.3	5.07
	25	8619.7	3.28	8515.7	3.58	9730.7	2.93
	5도	0.05	4539.0	16.10	4140.3	16.55	4525.7
0.1		4744.3	15.22	4341.3	14.58	7168.0	14.86
1		6038.7	9.09	5318.3	9.47	8989.0	10.69
10		6425.3	6.06	5834.0	6.17	10276.0	7.37
25		6601.3	5.09	5742.0	3.71	10454.0	5.08
20도	0.05	2233.7	27.22	1926.7	26.61	1948.3	26.51
	0.1	3815.5	25.75	2171.7	25.01	2215.7	24.94
	1	3816.3	16.71	3228.7	16.45	3408.7	15.96
	10	5245.3	11.50	4303.7	11.26	4528.7	13.13
	25	5603.3	13.26	4513.0	10.55	5017.0	12.37
40도	0.05	755.3	18.04	702.0	20.24	706.3	19.97
	0.1	825.7	17.98	757.3	19.93	776.7	18.64
	1	1183.0	17.02	1061.0	17.88	1086.0	17.79
	10	1834.3	19.12	2432.0	16.53	1702.0	16.18
	25	2165.7	15.16	2894.0	17.63	1999.0	17.98
55도	0.05	322.3	11.19	301.7	19.08	282.7	11.70
	0.1	344.0	13.27	313.3	13.53	293.7	12.93
	1	427.3	16.41	403.7	15.71	539.5	14.97
	10	640.3	28.33	577.0	21.12	511.3	19.94
	25	796.0	23.88	733.0	21.28	616.0	18.09

표 4. c 표층용 화강암 13mm + AP-5 (PG 64-22)

공극율		2%		4%		6%	
시험온도	주파수	E*	δ	E*	δ	E*	δ
-10도	0.05	9035.7	8.85	8253.0	7.90	7299.7	9.30
	0.1	9291.3	7.67	12769.0	7.71	7547.3	8.29
	1	10068.7	5.52	14170.0	5.81	8528.3	4.90
	10	11050.3	3.47	15863.5	3.82	8784.0	4.75
	25	10275.3	3.55	15445.0	5.03	8931.0	3.12
5도	0.05	5536.7	15.01	5050.7	15.72	4485.3	15.55
	0.1	5689.7	13.63	5413.0	13.95	6975.5	14.35
	1	7028.0	9.32	6701.7	8.36	8480.5	9.02
	10	8226.7	6.04	7496.3	6.79	10127.0	7.16
	25	7683.7	5.31	7734.3	6.04	9983.0	4.88
20도	0.05	2426.7	25.61	2293.3	25.58	1982.0	27.05
	0.1	4141.0	24.00	2545.0	24.36	2254.0	24.45
	1	4253.7	16.14	3869.7	15.24	3372.3	16.60
	10	5937.3	10.01	4923.7	11.10	4475.7	11.86
	25	5961.7	8.04	5337.7	11.74	4968.7	13.23
40도	0.05	855.0	18.19	770.7	20.90	738.0	23.27
	0.1	856.3	19.94	870.0	21.53	825.3	22.34
	1	1401.0	18.86	1327.7	19.45	1279.0	18.25
	10	2340.0	19.87	3087.0	20.00	1967.3	16.98
	25	2807.7	17.47	3895.0	17.85	2190.7	17.57
55도	0.05	341.0	9.91	324.7	13.05	317.7	13.78
	0.1	357.0	12.27	342.3	14.27	327.0	14.52
	1	469.0	15.94	468.3	18.35	694.0	18.15
	10	726.3	20.99	727.7	19.16	712.3	22.25
	25	891.0	21.77	933.0	22.79	908.3	23.51

표 4. d 표층용 화강암 19mm + AP-5 (PG 64-22)

공극율		2%		4%		6%	
시험온도	주파수	E*	δ	E*	δ	E*	δ
-10도	0.05	8732.0	8.10	8299.3	8.09	7641.7	8.52
	0.1	8876.7	7.77	8635.3	8.28	7803.7	8.16
	1	9901.0	5.31	9372.7	5.94	8741.7	6.23
	10	10263.7	3.88	10031.0	4.49	9271.0	4.14
	25	10025.3	4.01	9983.0	2.53	8972.7	1.97
5도	0.05	5666.3	13.33	5298.7	14.65	4780.7	16.85
	0.1	9043.0	11.93	8520.5	13.68	7886.0	15.53
	1	7047.3	7.26	7113.0	8.60	6350.3	9.44
	10	8045.3	5.98	7787.7	6.24	7291.3	6.89
	25	7823.3	6.27	7536.0	6.63	7359.0	6.77
20도	0.05	2706.0	24.29	2351.7	25.75	2173.0	26.45
	0.1	3140.3	23.78	2669.0	23.95	2474.3	24.22
	1	4463.3	14.23	4004.7	15.36	3679.3	15.33
	10	8419.5	8.78	5241.3	11.04	5084.3	11.12
	25	6286.3	11.07	5575.0	8.18	5820.3	9.98
40도	0.05	940.0	19.57	881.7	21.03	1262.0	19.97
	0.1	1036.0	19.53	975.0	19.55	1365.5	21.09
	1	1564.3	16.80	1453.0	17.13	1306.0	18.44
	10	2482.7	17.22	2267.0	22.13	2030.7	19.75
	25	2670.0	17.85	2443.0	18.86	2312.3	19.46
55도	0.05	394.7	12.82	379.3	13.38	367.3	11.64
	0.1	410.7	12.68	402.3	11.69	393.7	12.19
	1	788.5	17.30	540.0	17.59	743.0	15.20
	10	846.0	22.42	818.3	23.10	714.7	15.92
	25	1087.3	24.89	1004.7	10.11	853.7	21.57

표 4. f 기층용 화강암 25mm + AP-5 (PG 64-22)

공극율		2%		4%		6%	
시험온도	주파수	E*	δ	E*	δ	E*	δ
-10도	0.05	6707.7	9.23	6522.3	9.96	5900	11.16
	0.1	6863.7	9.02	6684.0	9.10	6018.5	10.30
	1	7434.3	5.85	7516.3	4.83	6802.5	6.14
	10	7710.3	2.27	7672.0	2.33	7300	3.37
	25	7641.0	2.25	7581.3	2.48	7048	3.87
5도	0.05	4511.3	11.94	4559.3	13.49	3644	15.29
	0.1	4620.3	10.78	4716.7	12.02	3891.5	13.48
	1	5233.7	6.5	5463.7	8.81	4685.5	8.88
	10	5667.7	5.74	5973.3	6.58	5216	7.38
	25	5590.0	5.84	5694.3	6.17	5235	4.65
20도	0.05	2306.7	21.55	2205	23.45	1739.5	26.54
	0.1	2545.0	20.47	2476.7	22.39	1929	24.33
	1	3468.0	12.65	3495.3	14.81	2867.5	10.13
	10	4203.0	8.99	4366.0	9.43	3552.5	12.01
	25	4384.0	11.87	4464.0	7.57	3519.5	9.33
40도	0.05	934	19.12	901.3	17.99	740	22.34
	0.1	1029.7	18.1	969.7	19.50	798	20.07
	1	1489.0	16.33	1382.0	17.76	1133	18.78
	10	2175.0	15.13	2107	16.04	1688	18.23
	25	2507.7	13.22	2232.7	17.85	1840	16.73
55도	0.05	326	20.06	359	12.95	290	12.42
	0.1	444	14.85	416	17.45	334	15.1
	1	559	49.15	600	17.71	491.5	15.9
	10	950	18.5	833.3	18.6	690.5	17.7
	25	1302	27.02	999.3	15.92	848	18.49

표 4. e 기층용 화강암 25mm + AP-3 (PG58-22)

공극율		2%		4%		6%	
시험온도	주파수	E*	δ	E*	δ	E*	δ
-10도	0.05	8042.3	7.48	5546	9.95	7788	10.76
	0.1	8066	8.72	5658.5	10.36	7920.7	9.7
	1	8387.7	6.26	4161.3	4.89	9011.7	5.22
	10	9672	7.14	6563.5	13.9	9114.7	3.41
	25	9157.3	7.61	5983.5	0.75	9312.3	3.91
5도	0.05	6698	8.98	4955	12.6	5241	15.91
	0.1	5472.3	11.17	5172.5	12.6	5629.7	14.31
	1	6375	7.14	5864	9.2	6582	10.11
	10	6678.3	4.39	6365.5	3.2	7380.3	6.27
	25	6335	3.32	6203	3.1	7327	6.43
20도	0.05	2823.3	23.2	2044.5	23.8	2647.3	24.3
	0.1	3032.3	21.24	1519.7	23	2992.3	22.9
	1	4127.7	14.43	3030	14.9	4069	12.25
	10	4974.7	10.15	3778.5	12.2	5216.3	9.8
	25	4585.3	13.24	3499	11.8	5596.3	6.7
40도	0.05	829.3	17.1	720.5	17.5	802.3	16.3
	0.1	931	17.2	777	18.2	866.7	17.3
	1	1294	17.1	1077.5	17.4	1205.3	17
	10	2091	17.4	1653.5	17.5	1747.7	18
	25	2413	17.8	2002	22	2098.3	18.7
55도	0.05	342.3	14.8	332	17.1	327	12.5
	0.1	384	15.1	369.5	18.8	333	12.4
	1	522	17.8	527.5	18.4	452.7	17.6
	10	781	21.8	756	22.9	660.3	20
	25	933	23.4	932	21.8	711	20

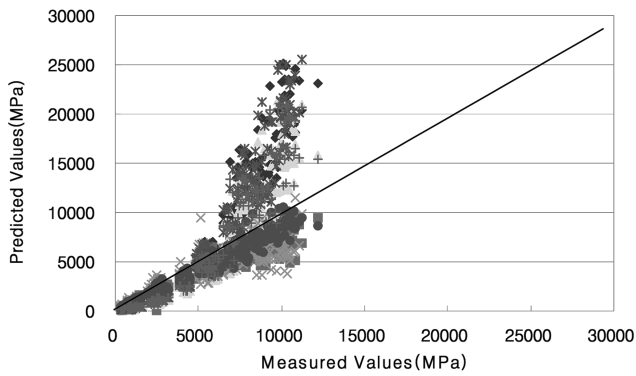
4. 예측방정식 개발

4.1 수정된 예측방정식

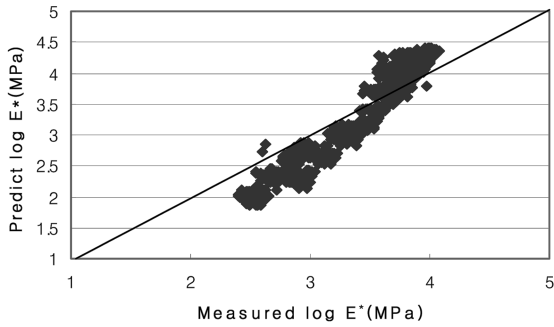
일반적으로 아스팔트 혼합물의 동탄성계수 시험은 비교적 고가의 시험장비와 실험 및 해석에 상당한 시간이 요구된다. 따라서, 고급도로의 설계를 제외한 나머지 도로 설계시 동탄성계수 실험보다는 기존의 DB 또는 예측방정식을 이용하여 설계에 필요한 물성을 평가하는 것이 최근의 추세이다.

본 연구에서는 국내 연구 자료의 제한으로 인해, 기존의 Witczak & Fonseca (1996)의 예측방정식을 기준으로 하여, 실험에서 구한 동탄성계수와 단계별 예측방정식에서 나온 값들의 상호 비교를 하였다. 그림 3에서 보듯이 기존의 예측방정식은 본 논문에서 실험한 결과와 비교를 하면 상온에서는 그 값이 상당히 유사하나, 고온에서는 너무 저평가 되고, 고온에서는 너무 과 평가 되었다. 이것은 국내와 미국의 골재의 입도 및 형태에 대한 규정과 아스팔트바인더의 입도규정 등이 다르기 때문이다. 그리고, Witczak의 예측방정식은 값의 정밀도를 위해서 너무 복잡한 형식으로 되어 있어서 실효성에 문제가 있다.

현재 국내에서 연구된 동탄성계수의 실험값은 화강암 골재를 이용한 표층용 혼합물(13mm, 19mm) 기층용 혼합물(25mm) 골재에 2가지 아스팔트 바인더를 이용한 자료 밖에 없는 실정이기 때문에, Witczak의 예측방정식이 나온 과정처럼 모든 단계를 수용할 수 없었다. 그래서, 기존의



(a) Witczak 예측방정식과 실험값 비교



(b) Witczak 예측방정식과 실험값 비교(로그눈금)

그림 3. Witczak 예측방정식과 실험값 비교

Witczak의 예측방정식을 사용하여 실험결과 값을 비교하여, 상관도가 낮은 것은 제거하고, 통계적인 분석을 통하여 계수 값들을 수정하였다. 표 5는 회귀분석 함수에 사용된 변수들이다.

Sigmoidal 함수는 비선형 방정식이기 때문에, 본 연구에서는 양변에 로그를 취하여, 선형의 형태가 되도록 만들어서 분석을 하였다. 그림 4는 회귀분석을 하기 위해서 Sigmoidal 함수의 특성에 맞게 함수의 항목별로 변수를 정의한 것이다. D의 경우 최소 값으로 고온 영역에 해당하므로 점도 값은 매우 작아지고, 주파수의 영향을 거의 받지 않고, 골재의 입도의 주로 영향을 받으며 전체방정식에서 영향범위가 작은 $D=f(P_{200}, P_4, V_a, V_{beff}(V_{beff}+V_a))$ 의 함수이다. A의 경우 최대 값으로 점도의 저온 상태에 와서 2.7×10^{12} cetipoise가 넘어가면 유리의 특성을 가지게 되면서 취성상태가 되기 때문에 저온에서의 점도 값은 의미가 없어지게 된다. 그래서, 골재의 입도 중 굵은 골재의 입도의 영향을 받는 $A=f(P_4, P_{38}, P_{34})$ 의 함수가 된다. 가운데 곡선의 기울기 부분은 점

표 5. 예측방정식에 사용된 변수정리

변수	용어정의
E	동탄성 계수 (10^5 psi)
η	아스팔트의 점도, 10^6 poise
f	하중주파수 (Hz)
V_{beff}	유효아스팔트비인더의 함량(%)
V_a	혼합물의 공극률(%)
P_{34}	19mm 체의 누가잔류량(%)
P_{38}	9.5mm 체의 누가잔류량(%)
P_4	4.76mm 체의 누가잔류량(%)
P_{200}	0.075mm 체의 통과량(%)

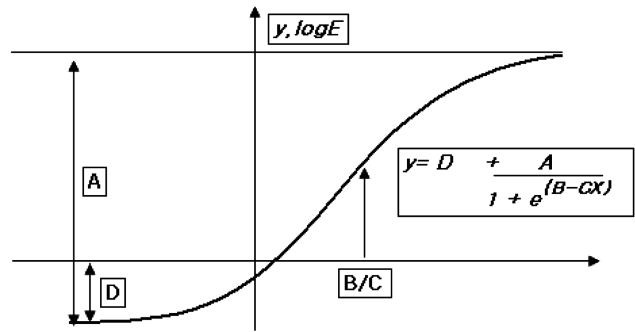


그림 4. 예측방정식의 기본모형

도와 주파수의 영향을 주로 점차적으로 증가 되는 형태의 함수로 표현된다. $B=f(\log f, \log \eta)$ 이다.

표 6은 국내에서 동탄성계수 실험을 실시한 표층용 혼합물(13mm, 19mm)과 기층용 혼합물(25mm)의 배합설계 시 사용한 기본 물성치이며, 표 7은 아스팔트비인더의 점도 값이다. 이 값들은 예측방정식의 변수로 이용되었다.

아래의 식 (8)은 동탄성계수 실험결과로 나온 Sigmoidal 함수의 파라미터들을 이용하여, 회귀분석을 실시하여서 나온 수정된 예측방정식이다.

표 6. 아스팔트 혼합물별 기본 물성치

		no	V_a	V_{beff}	P_{34}	P_{38}	P_4	P_{200}
13mm	2%	1	2.212	9.8	0	16.2	32.5	7
		2	2.467	9.8	0	16.2	32.5	7
		3	2.117	9.8	0	16.2	32.5	7
	4%	4	4.268	9.6	0	16.2	32.5	7
		5	3.795	9.6	0	16.2	32.5	7
		6	4.13	9.6	0	16.2	32.5	7
	6%	7	6.573	9.4	0	16.2	32.5	7
		8	6.137	9.4	0	16.2	32.5	7
		9	6.036	9.4	0	16.2	32.5	7
19mm	2%	16	2.436	9.7	2.5	24	45	5
		17	2.375	9.7	2.5	24	45	5
		18	2.562	9.7	2.5	24	45	5
	4%	19	4.363	9.5	2.5	24	45	5
		20	4.321	9.5	2.5	24	45	5
		21	4.768	9.5	2.5	24	45	5
	6%	22	6.396	9.3	2.5	24	45	5
		23	6.463	9.3	2.5	24	45	5
24		6.306	9.3	2.5	24	45	5	
25mm	2%	31	1.654	7.8	13	35	51	4
		32	1.568	7.8	13	35	51	4
		33	1.591	7.8	13	35	51	4
	4%	34	3.687	7.6	13	35	51	4
		35	3.589	7.6	13	35	51	4
		36	3.571	7.6	13	35	51	4
	6%	37	5.561	7.4	13	35	51	4
38		5.571	7.4	13	35	51	4	
		39	5.689	7.4	13	35	51	4

표 7. 아스팔트바인더의 점도와 감온성특성

	PG 58-22	PG64-22
A	10.896	-3.717
VTS	-3.658	11.067

$$\log|E^*| = -1.25 + 0.016(P_{200}) - 0.0031(P_4)^{-0.0823(V_a)} - \frac{0.828V_{eff}}{V_{eff} + V_a} + \frac{3.851 - 0.0021P_4 + 0.00361P_{38} + 0.00611P_{34}}{1 + e^{(-0.65 - 0.241 \log(f) - 0.191 * \log(\eta))}} \quad (8)$$

여기서, $|E^*|$: 동탄성계수 (105 psi)

η : 아스팔트 바인더 점도 (106 poise)

f : 하중주파수 (Hz)

V_a : 공극률 (%)

V_{beff} : 유효아스팔트바인더의 함량(%)

P_{34} : 19mm 체의 누가잔류량(%)

P_{38} : 9.5mm 체의 누가잔류량(%)

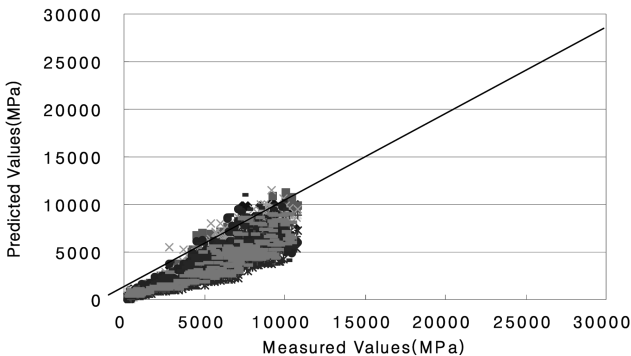
P_4 : 4.76mm 체의 누가잔류량(%)

P_{200} : 0.075mm 체의 통과량(%)

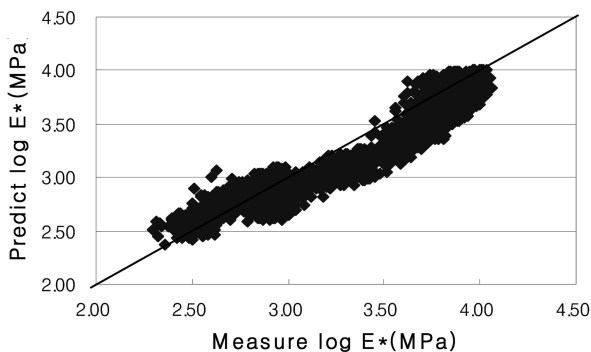
위의 그림 5는 수정된 예측방정식과 동탄성계수 실험 결과 값을 상호비교 한 것이다. 표 8에서 보듯이 신뢰도 수준은 로그눈금일대는 0.899, 일반눈금에서는 0.810의 신뢰도가

표 8. 예측값의 일반적인 통계자료

	R ²	표준오차(MPa)	표준편차(MPa)
일반눈금	0.810	53.86	2482.34
로그눈금	0.899	0.00088	0.406

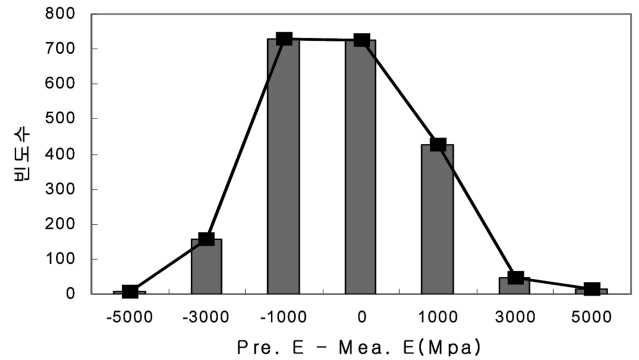


(a) 수정된 예측방정식과 실험값비교(일반눈금)

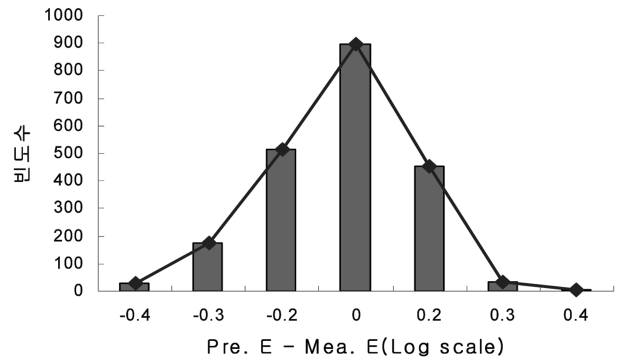


(b) 수정된 예측방정식과 실험값비교(로그눈금)

그림 5. 수정된 예측방정식과 실험값 비교



(a) 예측값과 실험값의 차이의 분산(일반눈금)



(b) 예측값과 실험값의 차이의 분산(로그눈금)

그림 6. 예측 값과 실험값의 차이의 분산

나왔다. 표준오차와 표준편차는 일반눈금 일 때는 53.86 MPa, 2482.34MPa, 로그눈금의 경우 0.00088, 0.406의 값이 나왔다. 지금까지 실시한 모든 데이터를 전부 표시한 결과, 예측 값이 커지는 저온영역에서는 좀 분산되어 있는 경우를 보이며, 그림 6에서 예측 값과 실험값의 차이를 분산시켜 본 결과 전체적으로 값이 저평가 되었다는 것을 알 수 있다. 시편별로 살펴보면 각 온도별로 주파수가 10Hz, 25Hz에서는 거의 유사한 결과를 보이고, 저온영역에서는 약 1.2배 값이 나오고 상온에는 조금 0.7~0.8배정도 저평가 되었으며, 고온에서는 값의 차이가 약 0.8~0.9배정도의 오차를 보였다.

4.2 변수와 예측방정식과의 관계

예측방정식에 사용된 변수를 변화시켜, 예측방정식과의 상호관계를 알아보았다. 대부분의 변수들이 실험에서 나온 결과 및 아스팔트 혼합물의 기본적인 이론과 유사한 양상을 보여주고 있기 때문에 예측방정식의 신뢰도가 한층 높다고 할 수 있다.

그림 7은 1, 4, 16, 25Hz의 4가지 주파수 별로 점도를 변환시킨 것이다. 그림에서 보듯이 저온상태에서는 주파수나 점도의 영향을 받지 않고, 동탄성계수가 수렴하는 것을 알 수 있다. 상온에서의 기울기가 급한 것을 보면 아스팔트 혼합물 특성처럼 점도가 동탄성계수에 많은 영향을 주는 것을 알 수 있다.

그림 8은 다른 온도에서 하중주파수와 동탄성계수의 상관관계를 나타낸 것이다. 점도와 마찬가지로 하중주파수도 동탄성계수에 매우 큰 영향을 가지는 변수이다. 그림에서 보듯이 하중주파수는 시간-온도 중첩원리에 의해서 마스터커브

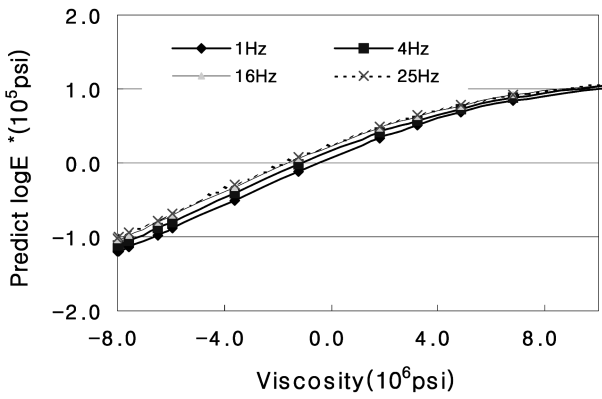


그림 7. 점도와 예측한 동탄성계수 관계

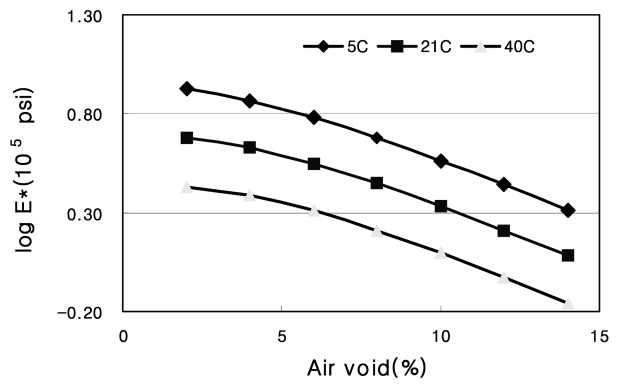


그림 9. 공극률과 예측된 동탄성계수 관계

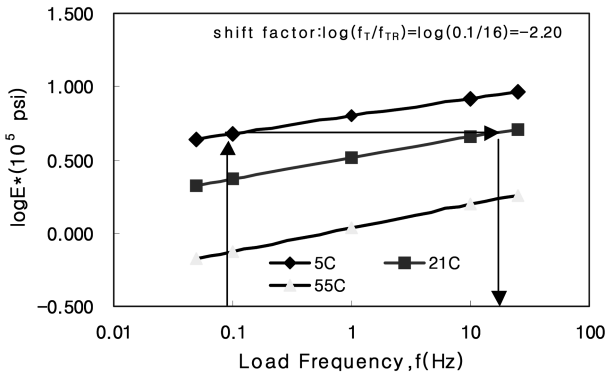


그림 8. 하중주파수와 예측된 동탄성계수 관계

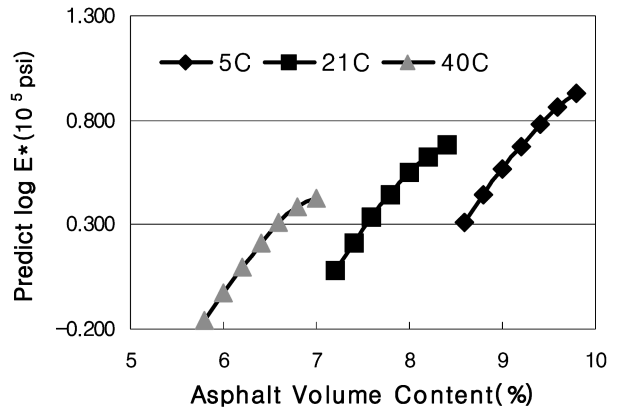


그림 10. 유효아스팔트 함량과 예측된 동탄성계수의 관계

작성에서 기준온도에 대해서 전이하는 과정을 보여준다. 그림 7에서 보듯이 어떤 기준온도에 대해 온도가 감소하면 하중주파수가 중첩이 되면서 혼합물의 강성값이 증가함을 알 수 있다.

그림 8에서 보듯이 21°C의 온도에서 0.1Hz에서 16Hz로의 전이함수는 -2.20이다.

$$\alpha = 1.037 \times 10^A + VTS \log(70 + 459.6) - (10^A + VTS \log(40 + 459.6)) = -2.11 \quad (9)$$

식 (9)에서 보듯이 예측방정식에서 나온 전이함수와 온도 특성을 나타내는 점도를 이용하여 나온 결과가 거의 유사함을 알 수 있다. 이것은 동탄성계수가 시간-온도 중첩원리에 적용된다는 것을 보여준다.

그림 9와 그림 10은 그림 공극률과 유효아스팔트 함량만 변화 시키고, 하중주파수는 10Hz로 고정하고, 그 양상을 알아보았다. 앞에서의 결과와 마찬가지로 공극률이 증가하면 동탄성 계수가 감소함을 알 수 있다. 유효아스팔트바인더 함량을 보면 이 방정식에서는 유효아스팔트 함량 변화는 매우 민감한 결과를 보여 준다. 그러나, 일반적으로 유효아스팔트 함량은 최적아스팔트 함량에서 ±0.6% 이하의 범위만 가지게 되기 때문에, 그림 9와 같은 급격한 경사가 생길만큼 변화는 발생하지 않는다.

그림 11은 주파수를 10Hz로 고정시킨 후, 골재와 동탄성 계수의 상호관계를 나타낸 것이다. 표에서 보듯이 고온 영역에서는 최소값을 나타내는 P₂₀₀, P₄의 값이 큰 25mm와 19mm 혼합물의 동탄성 계수 값이 작으며, 저온영역으로 저

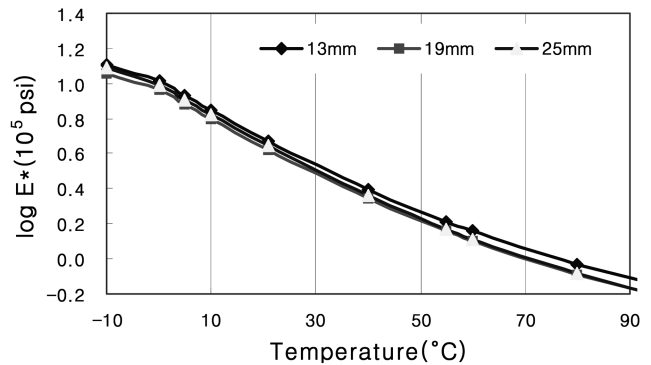


그림 11. 골재 크기와 동탄성계수의 관계

온영역에서는 P₃₈, P₃₄, P₄의 값이 큰 25mm와 19mm의 값이 증가함을 알 수 있다. 그러나, 다른 변수에 비해서 동탄성계수의 값에 미치는 영향이 매우 작다고 할 수 있다.

5. 결론 및 향후연구과제

AP-3 및 AP-5를 이용한 표층용 화강암골재 아스팔트 혼합물(13mm 및 19mm)의 동탄성계수 시험을 수행하였고, 지금까지의 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 기존의 Witczak 예측방정식이 나라별 기준 문제 등으로 국내의 실험결과와는 많은 오차를 보였고, 너무 복잡한 형태이기 때문에 국내의 실험결과를 이용하여, 기본적인 Witczak의 모델을 수정하여 식 (6)과 같은 형태의 모델을 완성하였다. 저온영역에서는 약 1.2~1.3배 정도 고평가 되었으며, 고온영역은 거의 유사한 결과를 보이고, 상온영역에서는 약

0.8배정도 저평가가 되었다. 이것은 아직 국내의 시험결과는 골재의 종류와 아스팔트바인더에 대해서 매우 한정적이 이며, 실내시험의 데이터만 의존한 것으로 판단된다. 예측방정식은 기본적으로 전이함수가 적용되어 있는 방정식이기 때문에 실험값으로부터 나온 Sigmoidal 함수 값을 비교하여야 하나, Sigmoidal 함수에 들어갈 교통하중에 대한 주파수에 대한 정의가 아직 내려지지 않았기 때문에 적용시키지 못하였다.

- 수정된 예측방정식에서 점도와 하중주파수가 동탄성 계수에 가장 큰 영향을 주며, 예측방정식에서 온도에 대한 영향을 받는 변수는 점도뿐이기 때문에, 점도와 하중주파수는 시간-온도의 중첩원리를 반영하는 변수이다. 변수 중에서 점도와 하중주파수를 제외한 공극률, 유효아스팔트함량, 골재 입도 등은 영향정도가 그다지 크지 않다. 그러나, 일반적인 아스팔트 혼합물의 실험에 의한 특성이 잘 표현 되었다.

- 본 연구에서 동탄성계수와 예측방정식을 수정하였지만, 외국에 비하면 실험설비나 실험결과가 매우 부족한 실정이다. 국내에서 동탄성계수 실험이 가능한곳은 현재 국내에 2~3곳 정도만 가능 할 것이다. 국내에서도 경험적이고 역학적인 설계를 위해서는 실험설비가 우선적으로 구축되어야 할 것이다. 그리고, -10°C까지 내려가는 저온영역에서 실험을 실시하기 때문에, 실험장비 주위에 습도가 높으면, 변위측정기에 서리가 내리는 문제 등으로 인하여 변위 측정에서 많은 오차가 발생할 여지가 있다. 예측방정식의 경우에는 측정값은 1000개가 넘으나, 골재의 종류와 아스팔트 바인더의 종류의 수가 매우 제한적이어서, 예측방정식이 국내에 이용되는 아스팔트 포장설계에 제한적으로 이용될 수 있을 것이다.

- 현재 예측방정식은 신뢰도가 80%정도에 달하기 때문에 신뢰도를 올리기 위해서는 화강암 골재 이외에도 국내에서 생산되는 편마암, 퇴적암 계열의 골재에 대한 연구가 수반되어야 한다. 아스팔트 바인더의 경우, 이 연구에서는 점도의

감온성(VTS : Viscosity Temperature Susceptibility)을 위주로 점도 값을 결정하였으나, 국내 데이터 개수는 매우 부족하며, 개질제를 첨가한 경우에 대해서도 연구가 진행되어야 한다. 본 연구에서는 아스팔트 혼합물의 노화과정에 대한 영향이 들어있지 않으므로, 단기노화와 장기노화에 대한 영향을 측정하여야 하며, 기층용 혼합물의 경우 깊이에 따른 하중 주파수의 변화, 교통하중이 실제 포장체에서 미치는 주파수의 변화 등에 대한 연구가 더 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 건설교통부 “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안연구” 연구비에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 건설교통부(2002) 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구, KPRP-요약-02, pp. 142.
- 김현오(2005) 기층용 아스팔트 혼합물의 동탄성 계수 평가 및 예측방정식 개발, 석사학위논문, 경성대학교 대학원, pp. 60.
- 김현오, 이관호(2005) 전이함수 결정법에 따른 아스팔트 혼합물의 동탄성 계수 비교평가, 한국도로학회논문집, 한국도로학회, 제7권 제1호, pp. 49-61.
- Kaloush, K.E. (2001) *Simple Performance Test for Permanent Deformation of Asphalt Mixtures*, Ph.D Thesis, Arizona State University, pp. 413.
- Pellinen, T.K. (2001) *Investigation of the Use of Dynamic Modulus as an Indicator of Hot-Mix Asphalt Performance*, Ph.D Thesis, Arizona State University, pp. 788
- Witzak, M. W. and Fonseca, O. A. (1996) Revised Predictive Model for Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures, TRB Record 1540.

(접수일: 2005.7.5/심사일: 2005.8.19/심사완료일: 2005.10.10)