

# 아스팔트 혼합물의 동탄성계수 예측방정식 개발

## Development of Predictive Equation for Dynamic Modulus

김현오\*, 문성호\*\*, 이관호\*\*\*

### 1. 연구배경 및 목적

국내에서 도로설계에 이용되는 설계법의 경우 미국의 AASHTO 72년 잠정 설계법 및 86년 개정설계법이 주를 이루고 있고, 또한 일본의  $T_A$  설계법 일부를 준용하고 있는 실정이다. 외국의 설계법의 이용에 있어서 설계에 필요한 설계입력변수의 상당 부분을 설계자의 주관적이고 자의적인 판단 기준에 의존하여 설계하고 있다. 그러므로, 효율적인 도로포장의 설계, 시공, 운영, 관리를 위한 새로운 도로포장 설계법 개발이 요구되며, 재료연구, 설계모형개발, 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 개발된 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 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

1962년 Papaziand에 의해 수행된 아스팔트 혼합물의 점탄성 특성평가가 아스팔트 혼합물의 동탄성계수(Dynamic Modulus) 관련 첫 번째 시험이라 할 수 있다. 실험은 원통형 시편에 사인파 하중을 정해진 하중주파수를 이용하여 제하하였고, 사인파 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 Witczak 과 Root는 인장-압축시험을 이용하여 고온에서의 phase angle이 큰 영향을 주는 것을 발표하였다. 1977년 Bonnaure 등은 bending 시험을 이용하여 동탄성계수를 평가하였다. 시편은 사다리꼴 형태를 이용하였고, 사인파 하중을 제하하였다.

1980년 및 1990년 초경에는 International Union of Testing and Reseach에서 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, 시편준비과정, 시험방법, 하중조건, 해석법등을 제시하였다.

\* 정희원, 경성대학교 건설환경공학부 공학석사 051-620-4756 (E-mail : 5hyun100@hanmail.net)

\*\* 정희원, 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원 공학박사 031-371-3360 (E-mail : smun@freeway.co.kr)

\*\*\* 정희원, 경성대학교 건설환경공학부 부교수 051-620-4756 (E-mail : khlee@ks.ac.kr)



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. 동탄성 계수는 복합탄성계수의 절대값을 의미하며,  $|E^*| = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$  와 같이 표현된다. 시험으로부터 결정되는 동탄성 계수는 시험온도 및 하중의 조합에 따라 각각의 값을 얻을 수 있다. 이것을 하중시간과 온도의 중첩(Superposition Principle)원리를 적용하여 마스터곡선(Master Curve)을 작성할 수 있다. 마스터곡선은 특정 아스팔트 혼합물의 하중과 온도와의 상관관계를 규명할 수 있는 장점을 가지고 있다.

일반적으로, 저온 및 상온에서의 아스팔트 혼합물의 하중응답특성은 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 비선형 최소자승법을 이용하여 처리한다(Kaloush, 2001, 김현오 & 이관호, 2005).

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + \exp^{\beta - \gamma \log(t, t_r)}} , \quad \log(t, t_r) = \log(t) - c(\log(n) - \log(n_{T_r}))$$

여기서,  $\log(|E^*|)$  는 로그 함수값의 동탄성 계수,  $\delta$  는 최소값,  $\alpha$  는 동탄성계수 범위,  $\beta$  및  $\gamma$  는 형상 계수,  $n, n_{T_r}$  는 아스팔트 바인더의 점도를 나타낸다.

### 3. 실험재료 및 시험방법

#### 3.1 실험재료 및 배합설계

실험에 이용된 골재는 국내에서 보편적으로 이용 가능한 화강암골재를 이용하였고, 아스팔트는 AP-3와 AP-5등급을 이용하였다. 성능등급시험결과로부터 AP-3는 PG58-22, AP-5는 PG64-22로 확인되었다. 아스팔트 혼합물은 표층용 밀입도 13mm, 표층용 밀입도 19mm, 기층용 밀입도 25mm를 적용하였다.

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

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

#### 3.3 동탄성 계수 시험 및 시험결과

##### (1) 만능시험기(UTM)를 이용한 동탄성 계수 시험

본 연구에서는 동탄성 계수 평가를 위해 만능시험기(UTM)를 이용하였다. 본 연구에 적용된 동탄성 계수 평가용 시험항목과 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 계수는 비파괴 시험이므로 고온에서의 특별한 상태가 아니면 같은 시편을 이용하여 일련의 시험을 순차적으로 수행한다. 시험은 저온에서 고온으로, 높은 하중과수에서 낮은 하중과수의 형태로 변환하여 수행한다. 이러한 온도-하중과수 변이시험은 시험중 발생하는 시험시편의 손상을 최소화할 수 있는 시험순서이다(김현오, 2005).



(2) 실험결과

만능시험기를 이용한 아스팔트 혼합물의 동탄성 계수 실험을 수행하였다. 측정된 동탄성 계수의 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.

4. 예측방정식 개발

4.1 수정된 예측방정식

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

<그림 1>은 Witczak & Fonseca (1996)의 예측방정식을 기준으로 하여, 실험에서 구한 동탄성 계수와 단계별 예측방정식에서 나온 값들의 상호 비교를 하였다. 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 동탄성 계수의 실험값은 매우 제한적이기 때문에, 기존의 Witczak의 예측방정식을 사용하여 실험결과 값을 비교하여, 상관도가 낮은 것은 제거하고, 통계적인 분석을 통하여 계수 값들을 수정하였다. <그림 2>는 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  $D=f(P_{200}, P_4, V_a, V_{eff}/(V_{eff}+V_a))$ 의 함수이다. A의 경우 최대 값으로 점도의 저온 상태에 와서  $2.7 \times 10^{12}$  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 점도와 주파수의 영향을 주로 점차적으로 증가 되는 형태의 함수로 표현된다.  $B=f(\log f, \log n)$ 이다.

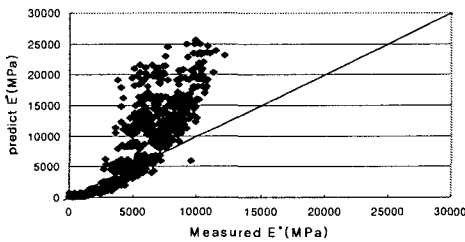


그림 1. Witczak 예측방정식과 실험값 비교

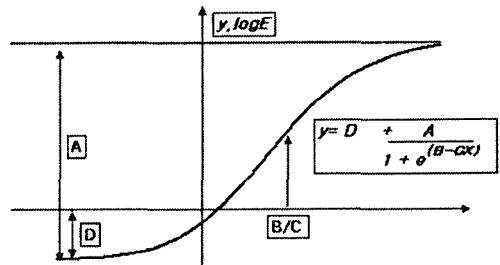


그림 2. 예측방정식의 기본모형

아래의 식은 동탄성 계수 실험결과로 나온 Sigmoidal 함수의 파라미터들을 이용하여, 회귀분석을 실시하여서 나온 수정된 예측방정식이다.

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

여기서,  $|E^*|$ :는 동탄성 계수 ( $10^5$  psi),  $n$  는 아스팔트 바인더 점도 ( $10^6$  poise),  $f$  는 하중주파수 (Hz),  $V_a$  는 공극률 (%),  $V_{eff}$  는 유효아스팔트바인더의 함량(%),  $P_{34}$  는 19mm 체의 누가잔류량(%)



$P_{38}$  는 9.5mm 체의 누가잔류량(%),  $P_4$  4.76mm 체의 누가잔류량(%),  $P_{200}$  0.075mm 체의 통과량(%) 을 의미한다. <그림 3>은 수정된 예측방정식과 동탄성 계수 실험 결과 값을 상호비교 한 것 이다. 지금까지 실시한 모든 데이터를 전부 표시한 결과, 예측 값이 커지는 저온영역에서는 좀 분산되어 있는 경우를 보이며, <그림 4>에서 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 0.7-0.8 배정도 저평가 되었으며, 고온에서는 값의 차이가 약 0.8-0.9배정도의 오차를 보였다.

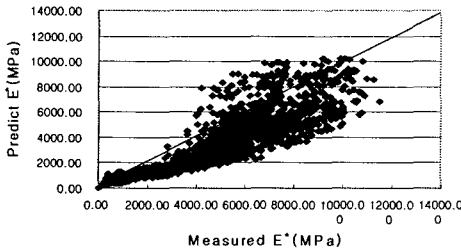


그림 3. 수정된 예측방정식과 실험값

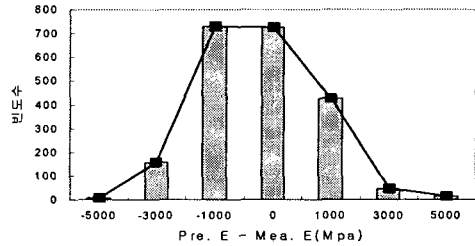


그림 4. 예측/실험값의 차이의 분산

### 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 5>는 1, 4, 16, 25Hz의 4가지 주파수 별로 점도를 변환시킨 것이다. 그림에서 보듯이 저온상태에서는 주파수나 점도의 영향을 받지 않고, 동탄성 계수가 수렴하는 것을 알 수 있다. 상온에서의 기울기가 급한 것을 보면 아스팔트 혼합물 특성처럼 점도가 동탄성 계수에 많은 영향을 주는 것을 알 수 있다.

<그림 6>은 다른 온도에서 하중주파수와 동탄성 계수의 상관관계를 나타낸 것이다. 점도와 마찬가지로 하중주파수도 동탄성 계수에 매우 큰 영향을 가지는 변수이다. 그림에서 보듯이 하중주파수는 시간-온도 중첩원리에 의해서 마스터커브 작성에서 기준온도에 대해서 전이하는 과정을 보여준다. <그림 6>에서 보듯이 어떤 기준온도에 대해 온도가 감소하면 하중주파수가 중첩이 되면서 혼합물의 강성값이 증가함을 알 수 있다. <그림 7>에서 보듯이 21°C의 온도에서 0.1Hz에서 16Hz로의 전이함수는 -2.20이다.

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

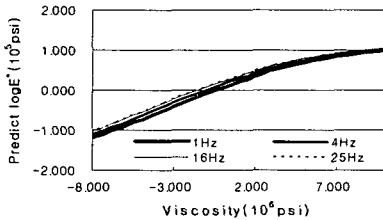


그림 5. 점도와 예측한 동탄성 계수와의 관계

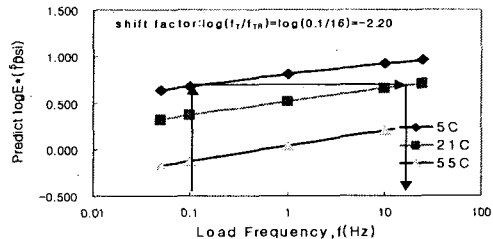


그림 6. 하중주파수와 동탄성 계수 관계



식에서 보듯이 예측방정식에서 나온 전이함수와 온도특성을 나타내는 점도를 이용하여 나온 결과가 거의 유사함을 알 수 있다. 이것은 동탄성 계수가 시간-온도 중첩원리에 적용된다는 것을 보여준다.

<그림 7>과 <그림 8>은 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  $\pm 0.6\%$ 이하의 범위만 가지게 되기 때문에, <그림 8>와 같은 급격한 경사가 생길만큼 변화는 발생하지 않는다.

<그림 9>는 주파수를 10Hz로 고정시킨 후, 골재와 동탄성 계수의 상호관계를 나타낸 것이다. 표에서 보듯이 고온 영역에서는 최소값을 나타내는 P<sub>200</sub>, P<sub>4</sub>의 값이 큰 25mm와 19mm 혼합물의 동탄성 계수 값이 작으며, 저온영역으로 저온영역에서는 P<sub>38</sub>, P<sub>34</sub>, P<sub>4</sub>의 값이 큰 25mm와 19mm의 값이 증가함을 알 수 있다. 그러나, 다른 변수에 비해서 동탄성 계수의 값에 미치는 영향이 매우 작다고 할 수 있다.

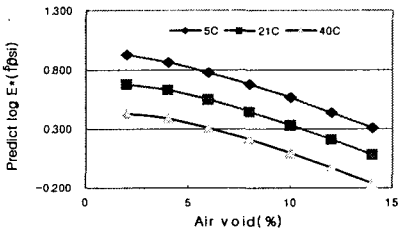


그림 7. 공극률과 예측된 동탄성 계수

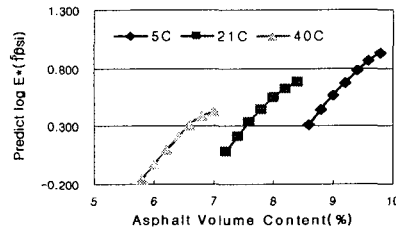


그림 8. 유효아스팔트함량과 예측된 동탄성 계수

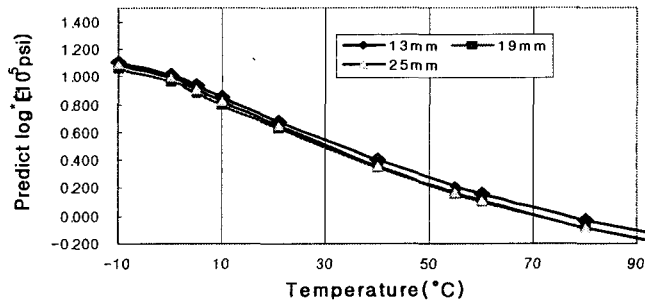


그림 9. 골재 크기와 동탄성 계수와의 관계

### 5. 결론 및 향후연구과제

AP-3 및 AP-5를 이용한 표층용 화강암골재 아스팔트 혼합물의 동탄성 계수 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 잠정수정모델을 완성하였다. 저온영역에서는 약 1.2~1.3배 정도 고평가 되었으며, 고온영역은 거의 유사한 결과를 보



이고, 상온영역에서는 약 0.8배정도 저평가가 되었다. 이것은 아직 국내의 시험결과는 골재의 종류와 아스팔트바인더에 대해서 매우 한정적이 이며, 실내시험의 데이터만 의존한 것으로 판단된다.

- 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, 골재입도 등은 영향정도가 그다지 크지 않다.
- 본 연구에서 동탄성 계수와 예측방정식을 수정하였지만, 외국에 비하면 실험설비나 실험결과가 매우 부족한 실정이다. 국내에서 동탄성 계수 실험이 가능한곳은 현재 국내에 2~3곳 정도만 가능 할 것이다. 국내에서도 경험적이고 역학적인 설계를 위해서는 실험설비가 우선적으로 구축되어야 할 것이다. 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.

### 감사의 글

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

### 참고문헌

1. 건설교통부(2002), “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”, KPRP-요약-02, pp. 142
2. 김현오(2005), “기층용 아스팔트 혼합물의 동탄성 계수 평가 및 예측방정식 개발”, 경성대학교 건설환경공학부 석사학위논문, pp. 60
3. 김현오, 이관호(2005), “전이합수 결정법에 따른 아스팔트 혼합물의 동탄성 계수 비교평가”, 한국도로학회, 7권 1호, pp. 49-61
4. Kaloush, K.E. (2001), “Simple Performance Test for Permanent Deformation of Asphalt Mixtures”, Ph.D Thesis, Arizona State University, pp. 413
5. 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
6. Witczak, M. W., and Fonseca, O. A. (1996), “Revised Predictive Model for Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures”, TRB Record 1540