

하모니 검색 알고리즘을 이용한 피로균열의 포장설계 및 유지보수 시기 결정

Analyzing the Fatigue Cracking and Maintenance of Asphalt Concrete Pavements, Based on Harmony Search Algorithm

이상염 Sang-Yum Lee | 정회원 · 서울특별시 품질시험소 센터장 (E-mail : slee11@seoul.go.kr)
문성호 Sungho Mun | 정회원 · 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 부교수 · 교신저자 (E-mail : smun@seoultech.ac.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : This research describes how to predict the life cycles of fatigue cracking based on NCHRP Report 704 as well as modified harmony search (MHS) algorithm.

METHODS : The fatigue cracking regression model of NCHRP Report 704 was used in order to calculate the ESAL (Equivalent Single Axle Load) numbers up to pavement failure, based on using material parameters, composite modulus, and surface pavement thickness. Furthermore, the MHS algorithm was implemented to find appropriate material parameters and other structural conditions given the number of ESALs, which is related to pavement service life.

RESULTS : The case studies show that the material and structural parameters can be obtained, resulting in satisfying the failure endurance of asphalt concrete structure, given the number of ESALs. For example, the required ESALs such as one or two millions are targeted to satisfy the service performance of asphalt concrete pavements in this study.

CONCLUSIONS : According to the case studies, It can be concluded that the MHS algorithm provides a good tool of optimization problems in terms of minimizing the difference between the required service cycles, which is a given value, and the calculated service cycles, which is obtained from the fatigue cracking regression model.

Keywords

fatigue cracking, asphalt concrete pavement, modified harmony search algorithm

Corresponding Author : Sungho Mun, Associate Professor
The Road Pavement Research Division, No.43, Seoul National
University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu,
Seoul, 139-743, Korea
Tel : +82.2.970.9014
E-mail : smun@seoultech.ac.kr

International Journal of Highway Engineering

<http://www.ksre.or.kr/>

ISSN 1738-7159 (print)

ISSN 2287-3678 (Online)

Received Nov. 13, 2014 Revised Nov. 14, 2014 Accepted Nov. 28, 2014

1. 서론

본 연구는 하모니 검색 알고리즘(Harmony Search Algorithm)을 통해 미국 NCHRP(National Cooperative Highway Research Program)의 보고서인 Report 704 (2011)의 아스팔트 포장의 공용성에 근거한 규정(A

Performance-Related Specification for Hot-Mixed Asphalt)에서 제시한 공용성 모델식과 더불어 MEPDG(Mechanical-Empirical Pavement Design Guide)의 동탄성계수식을 이용하여 요구되는 ESAL (Equivalent Single Axle Load)를 구하여 해당되는 유지보수 시기를 결정하는 알고리즘을 구현하였다. 본

방법은 도로의 본선과 더불어 입체화도로인 램프구간에 서도 적용될 수 있는 알고리즘이다. 다양한 아스팔트 포장구조체에 대해 피로균열 관점에서 허용되는 ESAL의 횡수를 구하는데 있어 요구되는 입력변수는 아스팔트 표층 두께, 동탄성계수, 복합지지층의 탄성계수, VFB(Voids Filled with Bitumen)인 포화도가 필요하며 여기서 적용되는 온도를 구함에 있어 아스팔트 콘크리트 포장의 표층에서 1/3에 해당되는 지점의 일년 평균온도가 계산되어야 한다. 본 온도는 동탄성계수를 사용하는데 필요한 온도이다.

아스팔트 콘크리트 포장을 설계함에 있어 주어진 피로파괴까지의 ESAL 즉 N_f (Number of Cycles to Failure)를 목표값으로 설정해두고 활용 가능한 포장두께, 동탄성계수, 그리고 복합지지층의 탄성계수를 이용하는 알고리즘을 개발함으로써 예측되는 교통량 및 N_f 의 값을 근거로 유지보수 시기를 결정할 수 있다. 게다가 기존에 시공된 아스팔트 포장에 대해서는 과거 교통량과 포장두께, 비파괴 시험을 통해 구해진 동탄성계수 및 복합지지층의 탄성계수를 가지고 파괴까지의 ESAL 값을 얻을 수 있다. 따라서 잔존수명을 추정할 수 있는 기법으로도 활용할 수 있다. 특히 NCHRP Report 704에서 제시하는 모델식의 계수는 국내에서 적용하기 위해서는 좀 더 현장데이터 및 실내실험이 필요한 부분이 있지만 본 연구에서는 기존에 연구된 모델식과 계수들을 이용하여 최적의 설계와 유지보수의 결정시기를 예측할 수 있는지를 판단하고자 한다.

일반적으로 아스팔트 콘크리트 포장의 피로균열 파괴식은 포장 층간의 접촉면에서 발생하는 인장변형률이 주요변수로 아래와 같이 사용되고 있다.

$$N_f = k_1 (\epsilon_t)^{k_2} \quad (1)$$

여기서, N_f 는 피로파괴수명의 ESAL 값(Number of Cycles to Failure), ϵ_t 는 인장변형률, k_1 및 k_2 는 실험을 통해 결정되는 계수값들이다. 본 식은 ϵ_t 의 인장변형률이 필요하다. 이를 구하기 위해서는 유한요소해석 혹은 다층탄성이론에 근거한 해석을 통해 얻어질 수 있으나 여기서는 위에서 언급한 것처럼 두께 및 탄성계수가 요구된다.

따라서 다음의 장에서는 NCHRP Report 704에서 사용되는 식과 더불어 하모니 검색 알고리즘을 어떤 방식으로 사용하는가에 따라 본 연구에서 얻고자 하는 최적의 포장두께, 동탄성계수, 복합지지층의 탄성계수를 구하고자 한다.

2. 피로파괴 모델식

아스팔트 콘크리트 포장체에 균열을 발생시키는 인자로서 인장변형률을 기존 다층탄성체 프로그램이나 유한요소법을 이용하지 않고 NCHRP Report 704에서는 다음의 식을 이용하여 피로파괴까지 요구되는 ESAL 횡수를 구한다.

$$\begin{aligned} \log N_f = & 8.3014 - [(b_1 \log(hac)^2 + b_2 \log(hac) + b_3) \log(E^*) \\ & + b_4 \log(hac)^2 + b_5 \log(hac) + b_6] \log(Ecf)^2 \\ & + [b_7 \log(E^*)^2 + b_8 \log(E^*) + b_9] \log(Ecf) \\ & + [b_{10} \log(hac)^2 + b_{11} \log(hac) + b_{12}] \log(VFB)^2 \\ & + [b_{13} \log(hac)^2 + b_{14} \log(hac) + b_{15}] \log(VFB) \\ & + b_{16} \log(E^*)^2 + [b_{17} \log(hac)^2 + b_{18} \log(hac) \\ & + b_{19}] \log(E^*) + b_{20} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, N_f 는 피로파괴전까지 허용 가능한 반복교통(즉, 사용되는 값은 ESAL) 횡수이고, hac 는 아스팔트 콘크리트 표층두께(단위: 인치), E^* 는 동탄성계수(단위: psi), Ecf 는 지지층의 합성탄성계수(단위: ksi), VFB 는 포화도(Voids Filled with Bitumen), 그리고 $b_1 - b_{20}$ 는 회귀방정식의 계수값들이다. 특히 NCHRP Report 704에서는 포장의 두께에 따라 얇은 두께의 포장과 두꺼운 두께의 포장으로 구분하여 회귀방정식의 계수값들을 제시하고 있다. Table 1은 해당되는 계수값들을 정리한 것이다.

Table 1. Regression Coefficients Used for Eq. (2)

For $hac \leq 3$ in. (Thin Model)									
b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}
-0.0095	-0.0756	0.0438	-0.5414	1.4319	-1.0252	-0.0208	0.7040	-4.1171	-4.1659
b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}	b_{16}	b_{17}	b_{18}	b_{19}	b_{20}
-3.0733	-6.4418	-1.5883	-2.8014	-9.2885	-0.1177	0.0681	-0.3789	0.9899	2.9330
For $hac \geq 3$ in. (Thick Model)									
b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}
-0.0645	-0.0144	0.0416	-0.6003	0.7046	-1.0276	-0.0218	0.6280	-3.2499	28.9186
b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}	b_{16}	b_{17}	b_{18}	b_{19}	b_{20}
-51.959	12.7671	15.8844	-28.613	0.9160	-0.1792	0.0024	-0.1009	1.2623	1.4613

위의 방법은 실험계획법과 유사한 방법으로 회귀방정식을 분석한 모델로 판단되며 실험계획법은 많은 영역에서 활용되고 있는 기법으로서 요인 배치법, 분할법, 교략법, 일부실시법, 불완비 블록계획법, 반응표면계획법, 혼합물 실험계획법 및 Taguchi법 등이 있다.

예를 들어,

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (3)$$

여기서, f 는 반응식이며 η 는 피로파괴까지의 반복 하중 횟수를 나타내며, η 값을 얻기 위해서는 다항식으로 표현할 수 있는데 일반적으로 일차함수 혹은 이차함수로 표현할 수 있다. 만약 x_1 과 x_2 가 입력변수라고 가정한다면 일차함수의 경우는 Eq. (4)와 같고 이차함수의 경우는 Eq. (5)과 같다.

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (4)$$

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (5)$$

여기서, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_{11}, \beta_{22}$ 그리고 β_{12} 는 회귀식의 계수값들이다. Eq. (2)에서 회귀방정식은 위에서 언급한 1, 2차 다항식보다 좀 더 복잡한 형태로 구성되어 있으나 기본은 실험계획법에 근거한 통계분석을 통해 얻어진 모델임을 알 수 있다.

유사한 방법으로 NCHRP Report 704에서는 아스팔트 콘크리트 포장의 표층에 해당되는 동탄성계수값을 다양한 물성에 기초해서 하중주파수에 따른 계수값을 다음의 식과 같이 제시하고 있다.

$$\begin{aligned} \log E^* = & -1.249937 + 0.029232 p_{200} - 0.001767 (p_{200})^2 \\ & - 0.002841 p_4 - 0.058097 V_a - 0.8022 \frac{V_{eff}}{(V_{eff} + V_a)} \\ & + \frac{3.8197 - 0.0021 p_4 + 0.003958 p_{38} - 0.000017 (p_{38})^2 + 0.00547 p_{34}}{1 + \exp(-0.603313 - 0.31335 \log(f) - 0.393532 \log(\eta))} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, E^* 는 동탄성계수, η 는 바인더의 점성(단위: 10^6 poise), f 는 주파수(단위:Hz), V_a 는 공극률(단위: %), V_{eff} 는 바인더 함량(단위: 총부피의 %), p_{34} 는 3/4 인치의 체(19mm)에 누적되는 골재(단위: 총중량의 %), p_{38} 는 3/8 인치의 체(9.5mm)의 누적되는 골재(단위: 총중량의 %), p_4 는 4번 체(4.75mm)에 누적되는 골재(단위: 총중량의 %), 그리고 p_{200} 은 200번 체(0.075 mm)에 누적되는 골재(단위: 총중량의 %)이다.

본 연구에서는 Eq. (2)에서 요구되는 동탄성계수를 구하기 위해 $p_{34}, p_{38}, p_4, p_{200}, V_a$ 그리고 V_{eff} 를 변수로 사용하여 계수를 구하는 함수를 정의하였으며 η 의 바인더 점성은 일반적으로 사용되는 점성의 값으로 사

용하였다. 게다가 하중의 지배적인 주파수 설정은 FWD(Falling Weight Deflectometer)에 의해 가해지는 하중의 주파수인 30Hz를 이용하여 동탄성계수를 구하였으며 이는 ESAL에 사용되는 8.2톤 하중과 관련된 주파수이다. 다음은 하모니 검색 알고리즘을 이용하여 주어진 N_f 를 만족하는 포장두께, 동탄성계수를 구하기 위한 변수들, 그리고 합성탄성계수를 결정하고자 한다. 특히 유지보수의 관점에서는 현재 비파괴 시험으로 얻을 수 있는 동탄성계수 및 합성탄성계수를 이용하여 앞으로 잔존하는 N_f 를 구할 수도 있고 앞으로 좀 더 N_f 를 늘리기 위해서 주어진 재료특성과 가능한 덧씌우기 두께를 변수로 사용하여 목표치인 N_f 를 만족시키는 최적의 해를 구할 수도 있다.

3. 개선된 하모니 검색 알고리즘

일반적인 수치해석에서 주로 사용되는 최적화기법은 구배(Gradient)가 필요한 Newton 형식의 최적화기법으로서 쉽게 지역적인 해(Local Optimum)에 수렴하기 쉬운 단점이 있다. 그러나 여기서 적용하고자 하는 개선된 하모니 검색 알고리즘(Modified Harmony Search Algorithm)은 광역적인 해(Global Optimum)를 찾기 위해서 자연의 현상을 모방한 진화연산(Evolutionary Computation)을 기반으로 하며 특히 음악에서의 즉흥연주(Improvisation)를 모방한 하모니 검색방법을 이용하여 최적의 해를 구하는 방법이다. 여기서 사용되는 방법은 Heuristic 알고리즘으로서 이들 방법은 많은 분야(Mun and Cho, 2009; Mun and Geem, 2009a, 2009b; Yi and Mun, 2009; Mun and Lee, 2011)에서 활용됨을 알 수 있다.

하모니 검색 알고리즘의 원리는 즉흥적인 음을 통해 연주자들이 악보에 의존하지 않고 그 자리에서 음을 만들어 내는 것이며, 지속적인 연주가 진행 될수록 좀 더 향상되어 최종 목적으로 최상의 하모니를 찾는 것이다. 이러한 즉흥곡 연주의 현상을 최적화기법에 응용을 한다면 다음과 같이 각 연주자는 목적함수의 최적화연산에서의 결정변수(Decision Variable) 혹은 해 벡터(Solution Vector)로 볼 수 있다.

진행되는 화음인 목적함수에 해 벡터(Solution Vector)가 연주자나 청중들에게 좋게 들린다면 이 화음은 연주자의 좋은 화음으로서 남게 되며, 반면에 좋지 않게 들린다면 그 화음은 버리게 된다. 이런 절차적인 방법으로 최적화 함수에서도 하나의 해 벡터가 얼마나

좋은지 나쁜지는 목적함수에 그 벡터를 대입하여 알 수 있다. 즉 좋은 결과값을 얻을 수 있다면 그 해는 살아남을 것이고 나쁜 결과값을 얻게 된다면 메모리에서 지워지는 절차를 구현하는 것이다. 체계적인 개선된 하모니 검색 알고리즘(Modified Harmony Search Algorithm)은 다음과 같이 구성되고 있다.

• **Step 1:** 초기화 단계로서 무작위하게 구성된 해가 저장될 수 있도록 모든 화음기억공간(HM, Harmony Memory), 무작위 선택(Random Selection), 기억회상빈도(HCR, Memory Consideration Rate), 피치조정빈도(PAR, Pitch Adjustment)으로 구성되는 벡터 및 행렬에 대한 초기화이다. 또한 즉흥횟수(Number of Improvisations) 그리고 화음기억 공간크기(HMS, Harmony Memory Size)를 결정한다. HM의 행렬을 초기화하는데 있어서는 다음의 Eq. (7)인 행렬형태로 저장할 수 있다.

$$HM = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \cdots & x_N^1 & f(X^1) \\ x_1^2 & x_2^2 & \cdots & x_N^2 & f(X^2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \cdots & x_N^{HMS} & f(X^{HMS}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서, 각 열은 각 변수(연주자)를 의미하는 것이고 각행은 하나의 해 벡터(화음)를 의미하며 각 행의 끝에는 그 행의 해 벡터에 해당하는 목적함수값(화음의 결과)을 나타낸다. 따라서 위첨자 및 아래첨자는 각각 시도되는 행 및 모델에 필요한 변수를 말한다. 즉 N은 필요한 변수의 총수를 의미한다.

• **Step 2:** 본 단계에서는 새롭게 즉흥적으로 화음을 발생하게 만든 새로운 행벡터인 $\vec{x}^{novel} = (x_1^{novel}, x_2^{novel}, \dots, x_N^{novel})$ 을 HMCR, PAR, 그리고 무작위로 얻은 변수를 통해 얻을 수 있다. HMCR의 영역은 0부터 1이나 본 연구에서는 0.95를 이용하였으며 의미는 기존 해의 집합으로부터 이용하는 빈도가 95%이고 새롭게 무작위로 추출하는데 있어서는 5%임을 말한다. 따라서 다음과 같이 하모니 벡터를 선택하는 것이다.

$$x_i^{novel} = \begin{cases} x_i^{novel} \in \{x_i^1, x_i^2, x_i^3, \dots, x_i^{HMS}\} & \text{if } R_n \leq HMCR \\ x_i^{novel} \in x_i, \text{ random selection,} & \text{if } R_n > HMCR \end{cases} \quad (8)$$

여기서, R_n 은 0부터 1사이의 무작위 숫자(Random Number)를 말한다. 여기서 아래첨자인 $i = 1, 2, \dots, N$ 는 새로운 하모니 벡터의 변수이다. 최적해를 구하고 지

역적인 해(Local Solution)를 탈출하기 위해서 PAR는 지금까지 수행된 하모니 검색 알고리즘에서 최적해의 인근값을 후보로 결정하는데 PAR에 따라 결정된다. 예를 들어 PAR=0.4이면 최적해의 인근에서 값을 찾는 빈도가 40%를 의미하는 것이다. 다음의 식은 개선된 하모니 검색을 위한 새로운 해를 구하는 방법이다.

$$x_i^{novel} = x_i^{best} \pm bw_{max} \times \exp\left[\frac{\log(bw_{min}/bw_{max})}{NI} \times Iteration\right] \quad (9)$$

여기서, x_i^{best} 는 i 번째 변수를 의미하며 위첨자인 $best$ 는 지금까지 가장 최적해를 얻은 행을 의미한다. bw_{max} 및 bw_{min} 는 각각 최대 및 최소의 폭을 의미하는 것이다. NI 는 설정된 반복횟수이며 $Iteration$ 는 해당되는 횟수를 의미한다(Mahdavi, Fesanghary, & Damangir, 2007).

• **Step 3:** 만약 새롭게 생성된 하모니 벡터가 지금까지 발생된 벡터 중 최악의 해를 만드는 해의 벡터를 새롭게 생성된 하모니 벡터로 대체하는 단계이다. 따라서 최악의 해는 매번 수행되는 절차에서 배제되는 것이다.

• **Step 4:** 지정된 최대의 즉흥 횟수에 도달되면 모든 단계를 마무리하는 단계이다.

4. 목적함수 설정

목적함수를 설정하기 위해서 다음과 같이 하였다.

$$f_{error}(p_{200}, p_4, p_{38}, p_{34}, V_{eff}, V_a, Ecf, hac) = abs[N_f - 10^{[8.3014 - [(b_1 \log(hac)^2 + b_2 \log(hac) + b_3) \log(E^*) + b_4 \log(hac)^2 + b_5 \log(hac) + b_6] \log(Ecf)^2 + [b_7 \log(E^*)^2 + b_8 \log(E^*) + b_9] \log(Ecf) + [b_{10} \log(hac)^2 + b_{11} \log(hac) + b_{12}] \log(VFB)^2 + [b_{13} \log(hac)^2 + b_{14} \log(hac) + b_{15}] \log(VFB) + b_{16} \log(E^*)^2 + [b_{17} \log(hac)^2 + b_{18} \log(hac) + b_{19}] \log(E^*) + b_{20}]]] \quad (10)$$

여기서, f_{error} 는 에러함수로서 목적함수로 사용되고 있으며 변수로는 $p_{200}, p_4, p_{38}, p_{34}, V_{eff}, V_a, Ecf$ 그리고 hac 의 값을 이용하며 $VFB = V_{eff} / (V_{eff} + V_a)$ 이다. E^* 는 Eq. (6)을 이용하여 구할 수 있다. 또한 $abs()$ 는 절대값을 의미한다.

Fig. 1의 경우, Eq. (2)에서 두꺼운 포장(표층 3인치

이상 경우)을 고려하고 3.5인치, 지지력층의 합성탄성계수를 2.5ksi, VFB를 0.53, 그리고 주행주파수를 30Hz으로 고정하여 아스팔트 표층의 동탄성계수가 변화함에 따라 피로균열파괴까지 가는 ESAL(N_f)의 횡수를 보여주는 그림이다. Fig. 2의 경우는 합성탄성계수를 2.5ksi, VFB를 0.53, 표층의 동탄성계수를 500ksi로 고정하고 아스팔트 표층의 두께를 변화시킴에 따른 N_f 의 변화를 보여주고 있다. Fig. 3의 경우는 표층의 두께는 3.5인치, VFB는 0.53, 그리고 동탄성계수는 500ksi로 고정하고 지지력층의 합성탄성계수를 변화시켰을 때 N_f 의 변화를 보여주고 있다. 다음의 경우는 얇은 포장두께의 경우에 대해 N_f 가 어떻게 변화하는지를 살펴보고자 한다. Fig. 4의 경우는 표층의 두께는 2.5인치, 지지력층의 합성 탄성계수는 2.5ksi, VFB는 0.53으로 고정시키고 동탄성계수를 변화시켰을 때 N_f 가 어떻게 변화하는지를 보여주고 있다. Fig. 5의 경우는 두꺼운 표층의 경우와 같이 합성 탄성계수를 2.5ksi, VFB를 0.53, 표층의 동탄성계수를 500ksi로 고정하고 아스팔트 표층의 두께를 변화시킴에 따른 N_f 의 변화를 보여주고 있다. Fig. 6의 경우는 표층의 두께는 2.5인치, VFB는 0.53, 그리고 동탄성계수는 500ksi로 고정하고 지지력층의 합성 탄성계수를 변화시켰을 때 N_f 의 변화를 보여주고 있다.

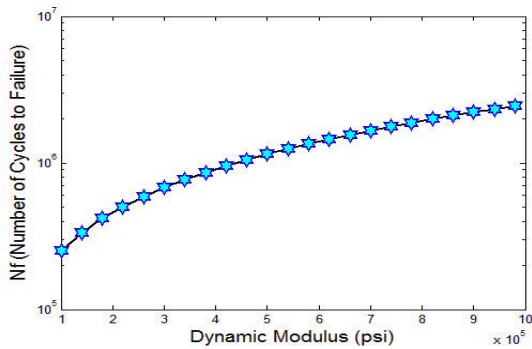


Fig. 1 Dynamic Modulus vs. N_f in Case of Thick Pavement

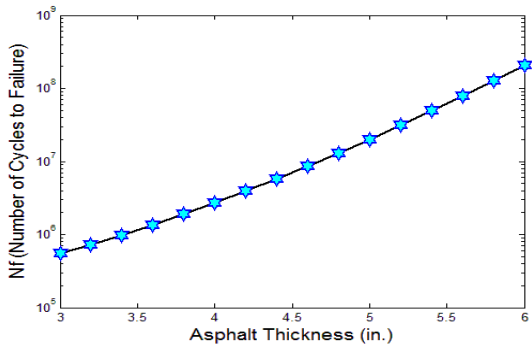


Fig. 2 Asphalt Thickness vs. N_f in Case of Thick Pavement

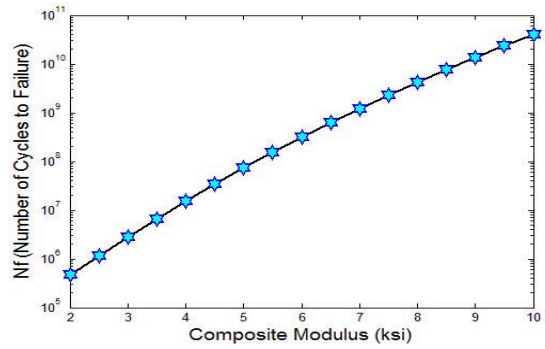


Fig. 3 Composite Modulus vs. N_f in Case of Thick Pavement

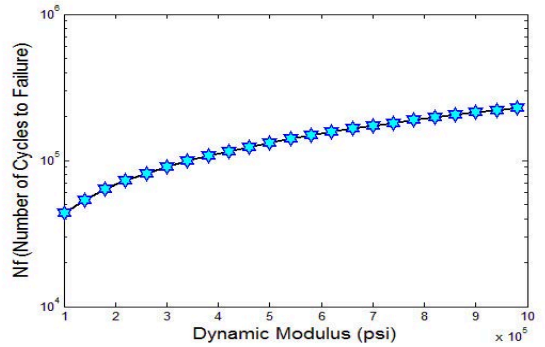


Fig. 4 Dynamic modulus vs. N_f in Case of Thin Pavement

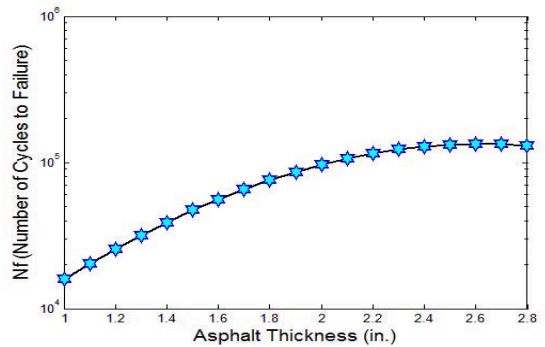


Fig. 5 Asphalt thickness vs. N_f in Case of Thin Pavement

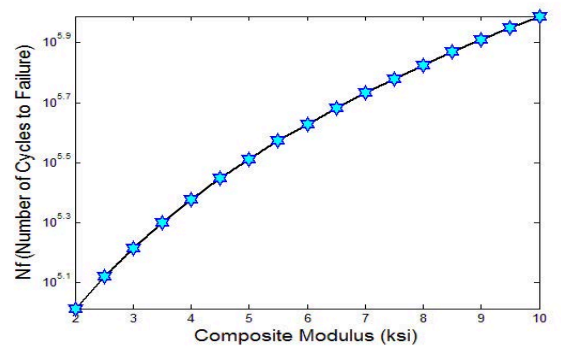


Fig. 6. Composite Modulus vs. N_f in Case of Thin Pavement

Fig. 1과 Fig. 4와의 비교에 있어서 표층의 포장이 두꺼운 경우와 얇은 경우에 있어 표층의 동탄성계수가 증가함에 따라서 N_f 도 함께 증가함을 볼 수 있으며 어느

크기에 있어서는 N_f 가 수렴하는 모습을 보여주고 있다. Fig. 2와 Fig. 5를 비교해 볼 때 두꺼운 포장의 경우에는 표층두께가 증가함에 따라서 N_f 가 지속적으로 증가함을 보여주고 있으나 얇은 포장의 경우 표층의 두께가 증가함에 따라 어느 정도로 N_f 가 수렴하는 것을 보여주고 있다. Fig. 3과 Fig. 6의 비교에 있어서는 지지력층의 복합탄성성이 변함에 따라 두꺼운 경우와 얇은 경우 모두 N_f 가 증가함을 보여주고 있다.

따라서 개선된 하모니 검색 알고리즘을 이용하여 Eq. (10)에서 정의한 에러함수를 이용하여 N_f 가 2백만 ESAL까지 사용될 수 있는 포장구조체를 구하는 문제에서 Fig. 7에서 보는 바와 같이 에러가 수렴하는 것을 볼 수 있으며 그 결과로 다음과 같이 해를 구할 수 있었다. $p_{200}=6.43$; $p_4=24.96$; $p_{38}=9$; $p_{34}=1.07$; $V_{eff}=4.787$; $V_a=4.4$; $E_{cf}=2.26\text{ksi}$; $h_{ac}=4.92\text{inches}$. 또한 N_f 가 1백만 ESAL까지 사용될 수 있는 포장구조체를 개선된 하모니 검색 알고리즘을 통해 구한 결과는 다음과 같다. $p_{200}=6.43$; $p_4=22.44$; $p_{38}=6.29$; $p_{34}=1.58$; $V_{eff}=5.03$; $V_a=4.6$; $E_{cf}=14\text{ksi}$; $h_{ac}=2\text{inches}$. 따라서 본 알고리즘을 이용하여 주어진 N_f 의 ESAL를 이용하여 이를 만족하는 해를 구할 수 있을 개선된 하모니 검색 알고리즘을 통해 알 수 있었다. 또한 재료비를 고려한 최소한의 비용으로 포장구조체를 설계

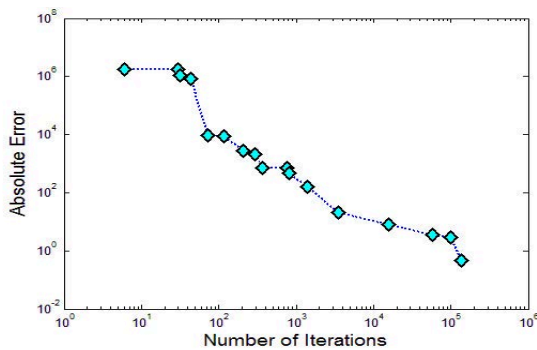


Fig. 7 Number of Iterations vs. Absolute Error in Case of 2Million ESALs

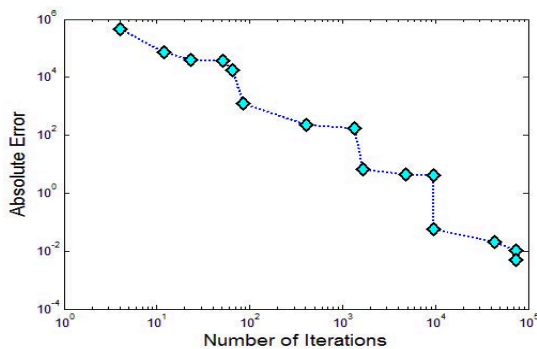


Fig. 8 Number of Iterations vs. Absolute Error in Case of 1Million ESALs

하는 경우에는 다양한 재료에 따른 단위면적에 대한 비용과 더불어 두께를 고려한 목적함수를 설정한다면 적절한 포장을 설계를 할 수 있다. 그리고 현재의 포장의 상태를 알 수 있으면 현재의 표층의 동탄성계수 및 지지력층의 합성탄성계수를 이용하여 향후의 N_f 를 구할 수 있으며 이를 이용하여 향후 사용기간을 만족하는 덧씌우기 두께 혹은 재료의 선택도 결정할 수 있다.

5. 결론

기존 하모니 검색 알고리즘에서 개선된 방법으로 새로운 해를 구하는 방법론을 선택하였다. 피로파괴 모델에 있어서는 NCHRP Report 704에서 제공하는 피로균열 모델을 사용하였으며 이를 구하기 위해서는 아스팔트 동탄성계수, 지지층의 복합탄성계수, VFB, 공극률, 그리고 표층의 두께를 이용하고 있다. 이들을 이용하여 피로파괴까지의 ESAL의 횟수를 구할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 요구되는 ESAL의 횟수를 설정하고 이를 만족하는 재료 및 포장구조를 역으로 구하는 방법으로 개선된 하모니 검색 알고리즘을 활용하였다. 그 결과 주어진 에러함수를 최소화하는 해를 구할 수 있었으며 또한 적절한 물성값과 더불어 아스팔트 표층두께를 구할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다(2014-0353).

References

- Mahdavi, M., Fesanghary, M., and Damangir, E. (2007) "An improved harmony search algorithm for solving optimization problems". *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 188. pp. 1567-1579.
- Mun, S., and Cho, Y-H. (2009) "Noise barrier optimization using a simulated algorithm". *Applied Acoustics*, Vol. 70. pp. 1094-1098.
- Mun, S., and Geem, Z-W. (2009a) "Determination of individual sound power levels of noise sources using a harmony search algorithm". *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 39. pp. 366-370.
- Mun, S., and Geem, Z-W. (2009b) "Determination of viscoelastic and damage properties of hot mix asphalt concrete using a harmony search algorithm". *Mechanics of Materials*, Vol. 41. pp. 339-353.
- NCHRP (2011) "A performance-related specification for hot-mixed asphalt". NCHRP Report 704, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Yi, J-H., and Mun, S. (2009) "Backcalculating pavement structural properties using a Nelder-Mead simplex search". *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 33. pp. 1389-1406.
- Mun, S., and Lee, S. (2011) "Identification of viscoelastic functions for hot-mix asphalt mixtures using a modified harmony search algorithm". *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 25. pp. 139-148.