

순열알고리즘을 이용한 도로포장의 유지보수

Pavement Maintenance System Through using the Permutation Algorithm

김 장 락 Jang-Rak Kim
이 상 염 Sang-Yum Lee
문 성 호 Sungho Mun

정회원 · ㈜로드텍 이사 (E-mail : jaksal93@hanmail.net)
정회원 · 서울특별시 품질시험소 센터장 (E-mail : slee11@seoul.go.kr)
정회원 · 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 부교수 · 교신저자 (E-mail : smun@seoultech.ac.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : This study focuses on conducting pavement rehabilitation for more deteriorated roads given a limited government budget.

METHODS : Therefore, we apply a optimization programming model of the permutation algorithm used for rehabilitating more deteriorated pavement areas, which is subjected to the limited budget.

RESULTS : The permutation algorithm was evaluated in terms of determining the maximized rehabilitation of deteriorated pavement areas, using the newly developed performance models such as fatigue cracking, rutting, international roughness index(IRI) through the surveying data from 2006 to 2012. When compared with a traditional model of the so-called worst-first sequence(WFS) method, the permutation algorithm worked better than the WFS method, resulting in covering more deteriorated pavement areas given the limited government budget.

CONCLUSIONS : Through a case study, it could be concluded that the permutation algorithm provides more reliable results in terms of rehabilitating more deteriorated pavement areas given the limited budget.

Keywords

pavement, rehabilitation, deteriorated pavement, fatigue cracking, rutting, IRI

Corresponding Author : Mun, Sungho, Associate Professor
Department of Civil Engineering, 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 Sep. 12, 2014 Revised Sep. 15, 2014 Accepted Oct. 2, 2014

1. 서론

지자체 도로, 일반국도, 고속도로의 포장을 합리적으로 유지보수하기 위해 많은 기관에서 포장관리시스템을 적용하고 있다. 또한 자산관리의 개념을 도입하여 보다 더 적극적으로 도로기반시설을 잘 관리하고자 하는 움직임을 국내에서도 찾을 수 있다(도명식 외, 2013). 따라서 본 논문에서는 주어진 예산을 보다 효율적으로 사용할 수 있는 순열알고리즘을 적용하고자 한다. 순열알고리즘(Permutation Algorithm, PA)을 통해 도로포장의 유지보수를 원활하게 할 수 있는 개선된 기법을 본

논문에서 소개하고자 한다. 이를 적용하기 위해 서울시 유지보수의 효율적 운영을 위해 포장상태평가 및 보수 공법결정의 근거에 따라 우선순위결정을 할 수 있도록 전반적인 평가절차를 검토하고 주어진 예산을 효율적으로 사용할 수 있는 절차를 수립하는데 있다. 따라서 유지보수 의사결정을 위해 기본적인 절차는 다음과 같다. 1) 표면균열, 소성변형, IRI(International Roughness Index)를 조사하고 이들 파손에 대해 공용성 모형(Performance Model) 개발을 위해 조사데이터를 이용하여 회귀분석을 수행하였으며; 2) 기존 서울시 포장

평가지수인 SPI (Seoul Pavement Index)를 이용하였으며; 3) 주어진 예산을 가지고 많은 면적을 유지보수할 수 있는 순열알고리즘을 이용한 사례를 본 논문에서 제시하였다.

2. 공용성 모형(Performance Model)

포장의 공용성 예측모형을 개발과 관련하여 서울시 포장에 대한 공용된 기간과 포장의 파손정도를 2006년에서 2012년까지 실시한 포장관리시스템을 통해 얻은 자료를 사용하였으며 본 데이터는 서울시의 6개 도로사업소 및 시설관리공단에서 수집한 보수이력자료를 바탕으로 정확한 재령의 확인이 가능한 구간이다. 사용된 데이터는 Table 1에서 보는 바와 같이 총 연장으로 2,099.6km에 해당되는 데이터를 이용하였다. Table 1과 관련된 수집된 데이터는 100m 간격으로 그룹화를 실시하였으며 회귀분석을 통해 공용성 모형을 Table 2와 같이 개발하였다. 특히 공용성 모형을 개발하기 위해서 Table 1의 데이터를 근거로 하였으며 도로표면의 균열율(단위: 퍼센트), 소성변형(단위: mm), 그리고 평탄성을 판단할 수 있는 IRI(단위: m/km)를 사용하였다. Table 2에서 입력은 공용된 개월 수이며 출력은 해당되는 단위에 따라 균열율, 소성변형 깊이, 평탄성 지수이다.

Table 1. Date Used for Model Development

Content	Length (km)
Total Length	2,099.6
Expressway	398.7
Major Road	400.4
Minor Road	1,157.3
Bus Rapid Transit	143.1

Table 2. Performance Model

Percentage of Crack	Expressway	$y = 0.001004 x^2 - 0.000167 x$
Crack	Major Road	$y = 0.000775 x^2 + 0.03101 x$
	Minor Road	$y = 0.001357 x^2 + 0.017219 x$
	Expressway	$y = 7.21E-05 x^2 + 0.003423 x + 4$
Rutting	Major Road	$y = 4.594E-05 x^2 + 0.00228953 x + 4$
	Minor Road	$y = 0.000273 x^2 + 0.00738 x + 4$
	Expressway	$y = -7E-05 x^2 + 0.030015 x + 2.5$
IRI	Major Road	$y = -0.000173 x^2 + 0.011844 x + 2.5$
	Minor Road	$y = 0.0001357 x^2 + 0.015965 x + 2.5$
	Expressway	

개발된 모델로 연차별 균열율, 소성변형, 종단평탄성

의 증가를 예측하여 SPI를 산정한 결과 도로등급별로 SPI 6 이하(보수기준)가 되는 시기는 도시고속도로(Expressway), 주간선도로(Major Road), 보조간선도로(Minor Road), 버스중앙차로(Bus Rapid Transit) 모두 7년으로 분석되었다. 서울시 포장평가지수(SPI)는 “0~10점” 체계로 표현되며 10점은 이상적인 포장상태, 0점은 포장파괴의 의미를 나타낸다. SPI는 포장의 균열율(%), 소성변형(mm), 종단평탄성(m/km)의 파손량을 종합하여 지수로 표현하여 종합적으로 분석하는 것이 용이하여 사용되고 있다. 특히 서울시는 “SPI=6.0” 이하구간을 보수대상 기준으로 설정하였으며 “SPI=6.0”에 해당하는 각각의 파손량의 값은 Table 3과 같다.

Table 3. Relationship SPI and Deteriorations

SPI	Crack(%)	Rutting(mm)	IRI(m/km)	Remark
6.0	7.0	20.0	6.0	Maintenance Criteria

3. SPI 관리기준 및 도로기능별에 따른 포장 상태 분포

2012년 포장상태 조사자료를 기초로 분석한 결과 보수기준인 “SPI=6.0” 이하에 해당되는 단일 결함의 발생분포는 균열율 7% 이상 발생구간이 26.35%, 소성변형 20mm 이상 발생구간이 0.29%, 종단평탄성 6m/km 이상 발생구간이 14.54%로 분석되었다. 특히, 균열율의 경우 보수대상구간이 전체의 26.35%로 상대적으로 큰 영향을 주며 소성변형량의 경우 1% 미만의 매우 적은 분포를 나타낸 것이 특징이다.

유지관리기준에 따른 도로기능별 분포는 Table 4~Table 6과 같다. 균열율의 경우 보조간선도로(Minor Road)의 관리기준 이하의 비율이 상대적으로 높았으며, 소성변형의 경우 전반적으로 매우 낮은 비율을 유지하는 것으로 확인되었다. 종단평탄성의 경우 도로등급에 따른 평탄성 발생분포의 격차가 큰 것으로 분석되었고 통행속도가 빠른 도시고속도로(Expressway)의 평탄성이 상대적으로 낮은 것으로 확인이 되었다. 도시고속도로(Expressway)가 상대적으로 관리기준 이하의 비율이 높았으며 버스중앙차로(Bus Rapid Transit)의 경우 가장 낮은 비율인 것으로 확인되었다. 관리노선의 연장을 고려할 때 보조간선도로의 비율이 매우 높기 때문에 전반적인 전체 평균에도 가장 큰 영향을 끼친 것으로 판단되었다. Table 7은 도로기능별로 조사된 자료를 보여 주고 있다.

Table 4. Percentage of Crack

Content	SPI Criterion	SPI < 6
	Percentage of Crack	Above 7%
Crack (%)	Expressway	32.05%
	Major Road	25.15%
	Minor Road	28.56%
	Bus Rapid Transit	18.49%
	Total	26.45%

Table 5. Rutting Survey Data

Content	SPI Criterion	SPI < 6
	Percentage of Crack	Above 20mm
Rutting (mm)	Expressway	0.01 %
	Major Road	0.33 %
	Minor Road	0.10 %
	Bus Rapid Transit	1.02 %
	Total	0.29 %

Table 6. IRI Survey Data

Content	SPI Criterion	SPI < 6
	Percentage of Crack	Above 6.0m/km
IRI (m/km)	Expressway	2.15 %
	Major Road	11.85 %
	Minor Road	19.55 %
	Bus Rapid Transit	12.42 %
	Total	14.54 %

Table 7. Deterioration Ratios Related to SPI

Content	SPI Criterion	SPI < 6
SPI	Expressway	34.60 %
	Major Road	36.17 %
	Minor Road	43.71 %
	Bus Rapid Transit	29.40 %
	Total	38.58 %

Table 8과 같이 결함별 관리기준은 서울시 도로 관리자 및 실무자 전문가의 의견을 수렴하여 변경하였다. 변경내용은 균열율을 기존 7%에서 10%로 상향조정하였고 소성변형의 기준을 20mm에서 15mm로 하향조정하였다. 평탄성의 경우 도로의 기능별로 결함의 발생형태가 다르기 때문에 도로등급별(제한속도)로 도시고속도로 5.0m/km, 주간선 5.5m/km, 보조간선 6.0m/km로 구분하였다. 결함별 관리기준의 변경에 따라 개선된 SPI 산출모형은 Table 9와 같다.

Table 8. Adjustment of Criteria

Content	Crack(%)	Rutting(mm)	IRI(m/km)	
Updated Criteria	10	15	Expressway	5
			Major Road	5.5
			Minor Road	6.0

Table 9. Developed Equations Used for Deteriorations

Content	Previous Equations	Criteria	Adjusted Equations	Criteria	
Crack	$SPI_{CR} = 10 - (2.23 \times Crack^{0.3})$	7%	$SPI_{CR} = 10 - (1.667 \times Crack^{0.38})$	10%	
Rutting	$SPI_R = 10 - (0.2 \times Rutting)$	20mm	$SPI_R = 10 - (0.267 \times Rutting)$	15mm	
IRI	$SPI_{IRI} = 10 - (0.667 \times IRI)$	6m/km	Expressway	$SPI_{IRI} = 10 - (0.8 \times IRI)$	5m/km
			Major Road	$SPI_{IRI} = 10 - (0.727 \times IRI)$	5.5m/km
			Minor Road	$SPI_{IRI} = 10 - (0.667 \times IRI)$	6m/km

포장평가지수(SPI) 산정을 위한 관리기준 변경에 따라 도로등급별 결함량에 대해 살펴보았으며 수정된 기준에 따라 조정된 식을 도출하였다. 평균 포장평가지수는 전체 평균이 6.37에서 6.46으로 증가하였으며 도로등급별 평균은 버스중앙차로를 제외하면 모두 증가하였다. 포장평가지수는 균열율, 소성변형, 종단평탄성의 세 가지 결함의 양에 따라 표현되는 지수(Index)이다보니 세 가지 결함이 복합적으로 작용하는 것이므로 도로등급별 포장평가지수의 증감은 일정하게 산출되는 것이 아니므로 개선된 수식은 균열량과 평탄성이 낮고 소성변형이 많이 발생한 버스중앙차로에 가장 영향을 끼친 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 추후 최종적으로 버스중앙차로는 분리하여 모델링 및 공용성 평가가 요구되고 좀 더 자료가 확보가 된 후에 접근하고 해석해야 됨에 따라 여기서는 다루지 않기로 했다.

결함별 보수기준 이하 비율을 살펴본 결과 평탄성, 소성변형은 증가하였으나 균열율은 상대적으로 감소량이 커 전체적으로 보수기준 이하 비율이 38.9%에서 33.6%로 감소한 것을 확인하였다. 여기서 사용된 SPI 식은 다음과 같다.

$$SPI = 10 - [(SPI_{CR})^5 + (SPI_R)^5 + (SPI_{IRI})^5]^{1/5} \quad (1)$$

보수우선순위 결정은 도로관리자가 예산의 효율적인 사용을 위한 의사결정에 상당히 중요한 부분이라 할 수 있을 것이다. 포장상태가 유사한 구간이 보수대상구간

에 선정되었을 경우 특정구간의 포장상태만을 고려하여 보수순서를 결정하는 것보다 도로의 기능, 도로의 운영, 교통량, 보수연장 등을 반영하여 우선순위에 차등을 주어 보수를 하는 것이 필요하다. 여기서는 순열알고리즘을 통해 제안된 예산을 가지고 많은 면적을 보수할 수 있는 알고리즘을 적용하고자 한다.

4. 순열알고리즘(Permutation Algorithm)

순열알고리즘은(Lee et al., 2013) 무작위로 생성되는 순열과 관련된 메타 휴리스틱 최적(Metaheuristic Optimization)이다. 이는 부분 최적화(Local Optimization) 기법을 탈피하고 글로벌 최적화(Global Optimization)를 추구하는 기법이다. 우선 서울시에서 사용되는 SPI 지수를 이용하여 유지보수가 요구되는 지수인 6 이하인 경우 모든 구간에 대해 유지보수비용과 더불어 해당면적을 조사된 데이터베이스(Data Base)에서 추출한다. 초기의 데이터 정렬에 있어서는 SPI 지수가 가장 적은 순서가 우선이 되도록 정렬한다. 두 번째 단계에 있어서는 다음의 최적화 식에 의해 목적함수 및 제한조건을 정의한다.

$$\text{Maximize } AREA_r = \sum_{i=1}^N AREA_i \quad (2)$$

$$\text{Subject to } L_{Budget} \quad (3)$$

위의 Eq. (2)에서 보는 바와 같이 Eq. (3)의 주어진 예산인 L_{Budget} 에 근거하여 최대의 면적을 유지 및 보수하는 목적함수이다. 여기서 $AREA_r$ 는 보수구간의 총면적을 말하고 $AREA_i$ 는 각각의 구간에서의 보수면적을 말한다.

세 번째의 단계로는 Eq. (4)와 같이 첫 번째 행벡터에는 최악의 구간이 먼저 보수되는 알고리즘인 Worst-First Sequence(WFS) 방법으로 입력하고 두 번째 행벡터는 무작위 방식의 순열로 구성된 벡터로서 Matlab 프로그램에 있어 randperm 함수를 이용하여 무작위 순열을 생성할 수 있다. 여기서 중요한 점은 SPI 지수가 6 이하인 구간에 대해 무작위 순열로 구성하고 순서대로 선택된 구간부터 보수비용을 합산하여 제한된 보수비용에 근거로 해당되는 구간까지 면적의 합을 계산했을 때 WFS 방법으로 수행한 알고리즘에서 구해진 총 면적과 비교하여 개선될 때까지 무작위 순열을 지속하는 것이다.

$$PM = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{2,1} & x_{3,1} & \cdots & x_{N,1} & AREA_{T,1} \\ x_{14,2} & x_{1,2} & x_{N,2} & \cdots & x_{10,2} & AREA_{T,2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, PM은 Permutation Memory의 약자이며 이는 하모니검색 알고리즘(Mun and Kim, 2009a and 2009b)의 경우 HM(Harmony Memory)에 해당하여 $x_{1,1}$ 의 왼쪽 아래첨자인 1은 SPI 지수에 있어 가장 낮은 경우를 의미하고 오른쪽 아래첨자 1은 WFS 방법을 의미한다. 또한 $x_{14,2}$ 의 왼쪽 아래첨자 14는 14번째로 SPI 지수가 낮은 지역을 의미하며 오른쪽의 아래첨자인 2는 두 번째 행의 의미와 더불어 순열알고리즘을 통해 생성된 행의 의미이다. 게다가 $AREA_{T,1}$ 의 의미는 주어진 예산을 가지고 유지 및 보수를 할 수 있는 총 면적의 의미와 더불어 오른쪽 아래첨자 1은 첫 번째 행을 의미하고 WFS 방법을 통해 얻어진 면적을 의미한다.

네 번째의 단계에서는 유전알고리즘(Genetic Algorithm)과 같이 우수한 인자를 찾아 PM의 행렬에 있어 첫 번째 행에 있는 $AREA_{T,1}$ 및 $AREA_{T,2}$ 의 면적보다 많은 구간을 보수할 수 있는 경우를 찾기 위해 반복적인 무작위 순열을 통해 PM 행렬을 최적화를 위해 개선해 나가는 방법이다. Eq. (5)는 새로운 행벡터를 생성하는 예를 보여 주고 있고 본 행벡터의 경우가 $AREA_{T,1}$ 및 $AREA_{T,2}$ 의 면적보다 많은 구간을 보수할 수 있는지를 목적함수인 Eq. (2) 및 제한조건인 Eq. (3) 을 통해 구해진 면적과 비교하여 많은 구간을 보수할 수 있는 경우 Eq. (4)의 세 번째 행에 새로운 행벡터를 삽입하는 것이다. 이와 더불어 지속적으로 좋은 최적화 해를 구하기 위해 PM 행렬을 지속적으로 갱신하기 위해 PM 행렬의 네 번째 행을 채우기 위해 다시 Eq. (5)와 같이 새로운 행벡터를 생성시키고 세 번째 행의 면적과 비교하여 더 많은 면적을 보수할 수 있는 경우 네 번째 행을 채우며 이를 지속적으로 이어나가 PM 행렬을 갱신하는 것이다.

$$\vec{x}_n = (x_{11,n}, x_{5,n}, x_{20,n}, \cdots, x_{N,n}, \cdots), \quad (5)$$

여기서, $x_{11,n}$ 의 의미는 11번째 구간이고 새로운(new) n 행벡터를 말한다. \vec{x}_n 는 무작위 순열로 구성된 새로운 벡터를 의미한다. 본 알고리즘의 수행을 멈추는 것은 정해진 무작위 순열을 수행하는 횟수를 정의하면 된다. 따라서 Eq. (6)과 같이 본 알고리즘에서 PM 행렬의 마지막 행벡터를 선택하면 주어진 비용을 가지고 많은 면적을 보수할 수 있는 경우 구할 수 있다.

$$PM = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{2,1} & x_{3,1} & \dots & x_{N,1} & AREA_{T,1} \\ x_{14,2} & x_{1,2} & x_{N,2} & \dots & x_{10,2} & AREA_{T,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ x_{21,12} & x_{11,12} & x_{31,12} & \dots & x_{1,12} & AREA_{T,12} \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, Eq. (6)에서 보는 바와 같이 주어진 무작위 순열을 발생시키는 횟수를 정의한 후 PM 행렬을 갱신한 결과 최종적으로 12번째 행이 주어진 예산을 이용하여 최대의 면적을 보수할 수 있는 경우를 제시한다.

5. 순열알고리즘 응용

순열알고리즘을 응용한 예제를 위해 주간선도로에 대한 유지보수를 위해 주어진 예산인 65억 원의 비용으로 보다 많은 면적을 보수하는 예를 소개하고자 한다. 유지보수비용은 균열율, 소성변형, IRI의 정도에 따라 달리 면적당 비용을 규정하였으며 Eq. (4)와 같이 PM 행렬을 얻을 수 있었다. Eq. (7)은 순열알고리즘을 바탕으로 구한 것이다.

$$PM = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \dots & 17 & 18 & 19 & 20 & 21 & 22 & 23 & 24 & 25 & 26 & 27 & 28 & 29 & 245740 \\ 43 & 124 & \dots & 32 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 257820 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서, WFS 알고리즘으로 수행한 결과는 245,740m²을 보수할 수 있으며 Eq. (4)와 같이 무작위 순열을 이용한 결과는 254,080m²을 보수할 수 있는 결과를 얻을 수 있다. 위에서 알고리즘에 대해 설명한 바와 같이 주어진 순열횟수인 5,000번을 수행한 결과 Table 10과 같이 10개의 경우의 순열을 얻을 수 있었으며 Fig. 1과 같이 무작위 순열횟수에 따른 최적의 해를 구한 면적이 개선된 것을 알 수 있다. 또한 Eq. (7)에서

Table 10. Result of the Case Study through Using Permutation Algorithm

1	2	...	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	245740
43	124	...	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	257820
66	98	...	87	84	49	19	132	0	0	0	0	0	0	0	0	259060
94	1	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	259380
80	65	...	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	259720
84	95	...	124	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	259800
107	52	...	126	120	100	102	40	64	32	18	0	0	0	0	0	259860
50	146	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	259920
14	48	...	42	104	74	88	3	125	0	0	0	0	0	0	0	259960
133	104	...	92	61	13	8	69	55	118	54	4	11	84	0	0	259980

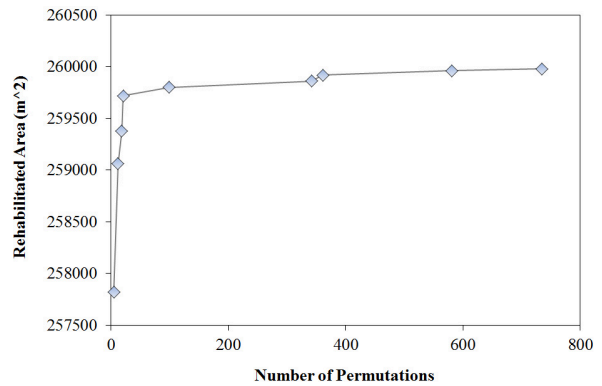


Fig. 1 Rehabilitated Area vs. Number of Permutations

0의 의미는 구역이 선정되지 않았다는 의미이며 숫자로 표기된 구역까지 보수할 수 있는 예산의 제한사항을 만족한다는 의미이다.

6. 결론

본 논문에서 순열알고리즘(Permutation Algorithm, PA)을 통해 도로포장의 유지보수를 하는데 있어 주어진 예산을 가지고 유지보수가 요구되는 SPI 지수가 6 이하인 지역에 대해 보다 넓은 면적을 보수할 수 있는지를 검증하였으며 SPI 지수를 개선하기 위해 2006년에서 2012년까지 조사한 자료에 근거해서 균열율, 소성변형, IRI에 대해 공용성 모형을 개발하였으며 이를 활용하여 서울시 도로사용기간에 따른 파손을 예측할 수 있었다. 또한 이들 모델을 이용하여 새로운 서울시 SPI 지수를 보완하였으며 이를 바탕으로 순열알고리즘을 적용하였으며 그 결과 기존 WFS 방법에서 구해진 보수면적 보다 더 많은 구간을 보수할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다 (2014-0355).

References

Do, Myungsik, Kwon, Soo-Ahn, and Choi, Seunghyun, 2013. Methodology for Benefit Evaluation according to Maintenance Method and Timing of National Highway Pavement Section, International Journal of Highway Engineering, Vol. 15. No. 5. pp. 91-99.

Lee, Sangyum, Mun, Sungho, and Moon, Hyungchul, 2013. Determination of Pavement Rehabilitation Activities through a Permutation Algorithm, Journal of Applied Mathematics, Vol. 2013, DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/252808>.

Mun, Sungho and Geem, Zong-Woo, 2009a. Determination of Viscoelastic and Damage Properties of Hot Mix Asphalt Concrete Using a Harmony Search Algorithm, *Mechanics of Materials*, Vol. 41, No. 3, pp. 339-353.

Mun, Sungho and Geem, Zong-Woo, 2009b. Determination of Individual Sound Power Levels of Noise Sources Using a Harmony Search Algorithm, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 39, No. 2, pp. 366-370.