



확률적 포장 공용성 예측모델 개발 방법론

Methodology of a Probabilistic Pavement Performance

Prediction Model Based on the Markov Process

유 평 준* 이 동 현**

Yoo, Pyeong-Jun Lee, Dong-Hyun

Abstract

Pavement Management System has a special purpose that the rehabilitation strategy applied on pavement should be executable in view of technical and economical point after new pavement open to the traffic. To achieve that purpose, a reliable pavement performance prediction model should be embedded in the system. The object of this study is to develop a probabilistic pavement performance prediction model for evaluating asphalt pavements based on the Markov chain concept. In this paper, methodology of the Markov chain modeling principle is explained, and the application of this model to asphalt pavement is described. As the results, transition matrices for predicting asphalt pavement performance are obtained, and also performance life is estimated quantitatively by this system.

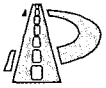
Keywords : PMS, HDM-4, Markov chain, pavement performance prediction

요 지

포장유지관리체계는 신설포장의 공용 이후, 포장 유지보수를 실시함에 있어 기술적으로 타당하고 경제적으로 효율적인 보수전략을 적용하는 것을 목표로 한다. 이를 위해서는 신뢰성 있는 포장공용성 예측모델을 필요로 한다. 본 연구에서는 마르코프 체인 이론에 기초한 확률적 포장공용성 예측 시스템을 제안하고, 아스팔트 포장으로의 적용상 문제점 등을 기술하였다. 본 연구 결과로서 아스팔트 포장의 공용성 예측을 위한 포장상태 전이행렬을 정의하였으며, 정량적인 포장공용 수명평가 결과를 제시하였다.

핵심용어 : 포장관리체계, 파손예측모델, 공용성, 전이행렬

* 정회원 · 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원(pjyoo@kict.re.kr ; 031-910-0173)
 ** 정회원 · 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원(qwe13@kict.re.kr ; 031-910-0725)



1. 서론

일반적으로 도로포장은 신설 이후, 교통 하중 및 환경적 요인에 의해 포장 파손이 진전된다. 이와 같은 포장 파손 상태의 객관적 기준을 포장 공용성(pavement performance)으로 나타낼 수 있다. 포장 공용성은 일반적으로 기능적 공용성, 구조적 공용성 및 안전적 공용성으로 구분할 수 있다. 기능적 공용성은 도로 이용자에게 제공되는 쾌적성 또는 승차감으로서 평탄성(roughness)를 의미하며, 구조적 공용성은 포장의 물리적 상태 변화로서 균열(cracking), 소성변형(rutting) 등의 변화를 의미하고, 안전적 공용성은 포장의 미끄럼 저항(skid number)을 의미한다.

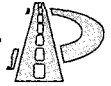
공용성은 시공 직후 양호한 상태에서 교통개방 후 서서히 감소하게 된다. 감소 정도는 교통 하중 및 환경 여건에 따라 매우 다양하나, 도로 이용자 측면의 포장 서비스 지수인 미국의 PSI(present serviceability index)의 경우, 포장 공용 초기에는 서서히 감소하다가 일정 기간 후에는 급격하게 하락하게 된다. 따라서, 비교적 장기간의 포장 공용성 예측 또는 관측 결과를 토대로 최적 포장 보수 시기와 보수공법을 결정해야하므로, 신뢰성 있는 포장 공용성 예측 모델을 필요로 한다.

포장의 현 상태 및 향후 파손 정도를 정확히 예측할 수 있으면, 장기적인 보수 계획 수립과 적정 보수 시기 및 보수 공법 결정이 가능하고, 이에 따라 불필요한 보수비 집행을 방지할 수 있다. 즉, 포장을 효율적으로 관리하고 장기적인 보수 계획 수립을 통한 포장 수명 및 기능 향상을 위하여 포장 공용성 예측 모델의 개발이 필요하다. 그러나, 포장 공용성에 영향을 미치는 요소는 매우 다양하기 때문에 포장의 장기 공용성을 예측하는 것은 매우 어렵다. 미국의 경우, 포장 장기 공용성 관련 연구가 1960년 AASHO 도로시험을 거쳐 현재 진행중인 전략적 도로 연구 사업(SHRP : Strategy Highway Research Program)에서도 수행하고 있

으나, 아직까지 신뢰성 있는 모델을 제시하지 못하고 있다. 외국의 많은 경우에서도 생존 분석(survival analysis), 마르코프 사슬(Markov chain)등과 같은 이론을 이용하여 신뢰성 있는 포장 공용성 예측 모델 개발을 위한 연구를 활발히 진행하고 있다.^{1),2),3)} 특히, 아스팔트 포장의 경우, 포장 상태의 변동 특성이 커 일반적으로 회귀된 공용성 예측 모델을 제시하기가 어려울 뿐만 아니라, 모델의 신뢰성에도 문제가 있음이 지적되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 아스팔트 포장의 파손 예측 데이터에 의해 결정된 포장 공용성 평가 기대값에 마르코프 연쇄 모델을 적용하여, 아스팔트 포장의 상태 공용 특성을 확률적으로 평가할 수 있는 포장 공용성 평가 및 예측 모델을 제안하고자 한다.

2. 포장 공용성 예측모델 개발 개념

포장 공용성 예측 모델이란 포장의 기능적 상태를 나타내는 임의의 특성 값이 주어진 환경 조건하에서 재령 혹은 교통량 변화에 따라 포장 형태별 또는 구조별로 어떻게 변화하는지를 정량적으로 추정할 수 있는 모델을 말한다. 신뢰성 있는 포장 공용성 예측 모델은 장기간 조사된 포장 공용 자료를 전제로 하며, 실제적으로 균열 또는 러팅의 변화를 독립변수로 포함한 회귀모델이 일반적이다. 그러나 이와 같은 회귀된 모델에 의한 결정적 평가값으로 포장의 변동 특성을 설명하는데 한계가 있다. 따라서, 포장 공용 이후, 임의 시간에 다양한 양상으로 분포하는 포장 상태를 확률적 접근 방법을 이용하여 표현하고자 한다. 확률적 포장 공용성 예측 모델의 구성에 이용되는 대표적 이론으로는 변동성이 큰 포장의 거동특성을 적절하게 설명할 수 있는 확률적 모델로서 마르코프 사슬 방법론이 있다. 이 이론의 기본 개념은 포장의 현재 상태와 전이(轉移)확률을 알면, 장래의 포장 상태를 예측할 수 있다는데 전제를 두고



있다. 마르코프 모델의 간략한 구성과 해석 방법은 다음과 같다.

2.1 확률 예측 모델 구성 개념

포장은 공용 이후, 교통 하중 및 환경 요인에 의해 손상을 입어 결국에 파손에 까지 이른다. 이때 임의의 포장상태에서 다른 상태로 전이되는 것은 그 이전의 포장 이력(履歷)에 따라 다르다. 따라서, 본 연구에서는 포장 공용 직후의 초기 포장 상태를 가정하고, 파손되어 가는 과정을 이산 파라미터 마르코프 연쇄에 의해 모델화한다. 마르코프 사슬은 상태, 초기벡터, 전이행렬로 정의된다. 포장은 공용 후 교통 하중 및 환경 하중에 의해 점차 파손되어 가는데 마르코프 사슬에서는 포장이 파손되어 가는 과정을 상태가 변화한다고 정의한다. 또한, 이러한 상태 변화를 이산적인 시간, $t_1, t_2(=t_1+\Delta t), \dots$ 에서 발생한다고 가정한다. 시간 t 에서의 포장 상태를 X_t 라 할 때, 시간 t 일 때 등급 i 의 포장이 시간 $t_1+\Delta t$ 일 때 등급 j 로 전이할 전이확률 p_{ij} 는 다음과 같다.

$$p_{ij} = \text{Prob}[X_{t+\Delta t}=j \mid X_t=i]$$

이 전이확률이 이 전 단계의 확률분포에만 영향을 받는다고 가정하면, p_{ij} 는 시간차 Δt 에만 의존하게 된다. 포장 상태등급에 대한 전이확률을 행렬로 나타내면 다음과 같다.

$$P = \begin{matrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & \dots & p_{2n} \\ \cdot & & & & \\ \cdot & & & & \\ p_{n1} & p_{n2} & p_{n3} & \dots & p_{nn} \end{matrix}$$

여기서, $0 \leq p_{ij} \leq 1$

n 개의 상태를 가지는 마르코프 사슬에서 그 초기상태는 다음 행렬 벡터로 주어지는 상태 확률

로 표현된다.

$$X(0) = [x_1(0) \ x_2(0) \ \dots \ x_n(0)]$$

이때, $x_i(0)$: 포장이 초기 상태에서 등급 i 일 확률

이와 동일하게 1, 2, \dots , m 단계 후의 상태확률 $X(1), X(2), \dots, X(m)$ 은 다음과 같이 이전 단계의 상태확률에 전이행렬의 곱으로 결정된다.

$$X(1) = X(0)P$$

$$X(2) = X(1)P = X(0)PP = X(0)P^2$$

$$X(m) = X(m-1)P = \dots = X(0)P^m$$

이와 같은 전이행렬 및 상태확률로 포장의 교통 공용성에 따른 거동 변화를 표현할 수 있다. 본 연구에서는 일반국도 상에 설치된 포장 장기 공용성 관측 구간 중에서 덧씌우기 포장 구간, 신설 포장 구간에 대한 균열과 러팅의 상태를 5등급 [A(양호), B(정상), C(보통), D(불량), E(매우 불량)]으로 구분하여 5×5 의 전이행렬을 구성하였다. 이때 보수가 이루어지지 않은 경우 포장 상태가 양호한 상태로 전이할 확률은 0이라고 가정하면, $j < i$ 일 때 p_{ij} 는 0이 되고 p_{nn} 은 1이 된다. 또한 포장 파손이 단위 시간동안 한 단계씩만 전이한다고 가정하면, 전이행렬은 아래와 같은 위삼각 행렬로 단순하게 표현된다.

$$P = \begin{matrix} P_A & 1-P_A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_B & 1-P_B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_C & 1-P_C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_D & 1-P_D \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix}$$

가정된 전이행렬의 단계별 변화 확률을 결정하기 위하여 포장 상태 평가지수의 연차별 변화량



을 좌변으로, 전이행렬의 순서 곱을 우변으로 하여 목적함수를 구성한다. 구성된 목적함수는 비선형 방정식으로서 방정식 내의 미지수를 구하기 위해 일반적으로 Fletcher-Powell Algorithm을 이용한다. 이 알고리즘은 연차별 포장 상태 평가값과 마르코프에서 예측된 값과의 편차를 최소화하는 방법으로 일반식은 다음과 같다.

$$MIN = \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^{M(t)} |Y(t, j) - E[X(t, p)]|$$

여기서, N : 단계수 / M(t) : 단계 t에서의 데이터 포인트 개수

Y(t, j) : 결정적 포장 상태 평가 함수 /

E[X(t, p)] : 마르코프 값

이와 같은 마르코프 이론을 이용한 포장 공용성 예측 모델 구성에는 초기 상태 확률을 이용하는 방법과 실제 현장 공용자료를 이용하는 방법이 있다. 이 두 가지 방법을 이용한 모델 구성 흐름을 간략하게 살펴보면 다음과 같다.

◆ 최적화 기법: $\text{Min} \sum \{Q_0[P] - E\}^2$ 해를 찾는다.

여기서, $\{Q_0\}$ 는 초기 벡터

$\{P\}$ 는 전이 행렬, 전이 행렬내의 5개의 전이 확률은 미지수로 설정

$\{E\}$ 는 상태 확률 벡터, 동일 지점의 단위 기간별 조사 자료 이용

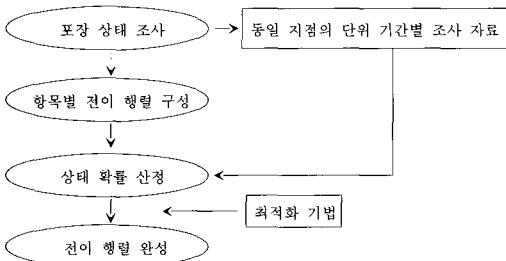


그림 1. 상태 확률을 이용한 마르코프 모델

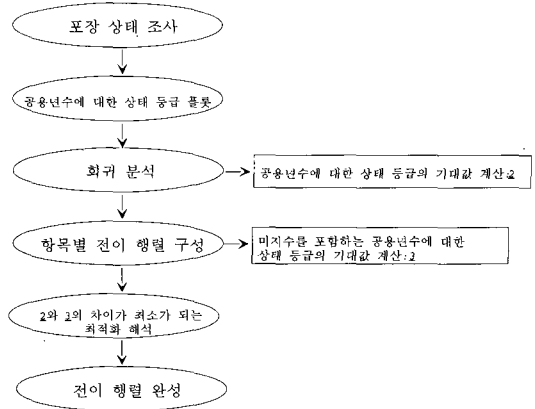


그림 2. 결정적 포장 상태 평가 함수를 이용한 마르코프 모델

◆ 최적화 기법: $\text{Min} \sum |Y(t) - Q(t)R'|$ 해를 찾는다.

여기서, Y(t) : 포장상태 평가함수에 의한 시간 t에서의 상태등급

Q(t) : 마르코프 'Chain' 모델을 통한 시간 t에서의 상태 벡터

R' : 상태등급 벡터, 1~5의 상태등급을 사용한다면 R' = {5,4,3,2,1}

본 연구에서 이용한 방법은 그림 1방법에서 상태 확률 결정을 위한 보수 이력 데이터 부재로 인하여 (그림 2) 결정적 포장 상태 평가 함수를 이용한 마르코프 확률 모델을 구성하였다.

2.2 공용 수명 평가 개념

구해진 포장 상태 전이행렬을 적용함으로써 포장 상태 등급별 변화를 알 수 있으나, 각 상태 전이 단계별로 어느 정도의 공용기간 또는 체류기간을 갖는지는 알 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 마르코프 이론 중 흡수 상태(absorbing state) 개념을 이용하여 각 전이 단계별 체류단계를 계산하고자한다. 이와 같이 계산된 단계별 체류기간을 합산한 것을 전체 공용기간으로 정의하였다.

포장 공용 기간 동안 포장 보수를 고려하지 않



는 경우, 그 상태가 이전 상태보다 양호한 상태로 회복될 수는 없으므로 $j < i$ 일 때 $p_{ij} = 0$, $p_{nn} = 1$ 이며, 천이 확률 행렬은 위삼각 행렬(上三角行列)이 된다. 또, 최종 파괴 상태인 등급 n 에 달한 포장은 다른 상태로 천이되는 일이 없고, 등급 n 은 마르코프 연쇄 내 흡수 상태이다. 초기 상태에서 등급 i 의 포장이 흡수되기까지 등급 j 에 머무르는 평균 단계 수를 m_{ij} 라 한다. 이때, 초기 상태에서 1단계 뒤인 등급 k 로 천이하고, 그 후 등급 j 에 머무르는 단계 수를 고려함으로써 천이 확률 p_{ij} 를 이용하여 m_{ij} 에 관한 다음 연립방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 m_{ij} &= E[\text{등급 } j \text{에서의 체류 단계 수} \mid X_0 = i] \\
 &= E[\text{등급 } j \text{에서의 체류 단계 수} \mid X_0 = i, X_1 = k] \cdot \text{Prob}(X_1 = k \mid X_0 = i) \\
 &= \sum_{k=1}^n \{ \delta_{ij} + E[\text{등급 } j \text{에서의 체류 단계 수} \mid X_0 = k] \} \cdot p_{ik} \\
 &= \delta_{ij} + \sum_{k=1}^n m_{kj} \cdot p_{ik} \dots\dots\dots (1)
 \end{aligned}$$

여기서, δ_{ij} 는 Kronecker의 델타로, 다음 식과 같이 정의된다.

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & (i=j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases}$$

흡수 상태 n 에 대해서는 $m_{in} = m_{nj} = 0$ 이므로, m_{ij} 에 관한 연립방정식은 $i \leq n-1$, $j \leq n-1$ 범위에 대해 고려하면 된다. 이 연립방정식을 행렬로 표시하면 다음과 같다.

$$M = I + P'M \dots\dots\dots (2)$$

이 때, M : 평균 체류 단계 수의 행렬
 I : $(n-1)$ 차 단위행렬
 P' : 천이 확률 행렬에서 n 행과 n 열을 삭제한 $(n-1)$ 차 정방 행렬
 이것으로부터 평균 체류단계 수 행렬 M 은 다

음 식으로 구할 수 있다.

$$M = [I - P']^{-1} \dots\dots\dots (3)$$

행렬 M 의 요소 m_{ij} 는 초기상태가 등급 i 인 포장이 최종 파괴 상태에 이르기까지 등급 j 에 머무르는 평균단계 수로, 각 행 요소의 합은 각 초기상태의 포장이 최종 파손상태에 이르기까지의 평균단계 수를 나타낸다. 이 사실로부터 초기 상태가 등급 1인 포장의 평균 흡수단계 수를 구하고, 신설포장의 평균 공용수명을 평가할 수 있다.

3. 일반 국도 확률적 포장 공용성 예측 모델

전술한 마르코프 전이행렬에서 포함하고 있는 미지수를 구하기 위해 먼저 장기 포장공용성 추적 조사자료를 매개로 한 포장상태 평가기대치 설정을 필요로 한다. 그러나, 국도 장기공용 관리구간의 데이터를 기초로 구성된 회귀 예측식의 신뢰성이 아직까지 실제 이용 모델로서 충분하지 않아 일반국도 포장관리 시스템에서 기본 분석 도구로 이용하고 있는 보정된 HDM-4*1) 예측 결과값을 기준으로 하여 전이행렬의 미지수를 구하였다. HDM-4는 포장관리 도구로서 모델 내에 포장 상태 예측 모델이 내재되어 있으며, 각종 모델을 적용 대상 지역에 맞도록 보정할 수 있는 기능이 포함되어 있다. 본 연구에서는 HDM-4 모델을 국내 여건으로 보정한 방법론 및 결과는 지면 제약상 수록하지 않았다. HDM-4 모델에서와 같은 각각의 포장파손 유형별 포장상태 예측 회귀식은 시간에 따른 함수로서 임의의 시간 경과 이후의 임의 구간의 개별 파손정도는 구분할 수 있지만, 실제적으로 임의구간에 다양한 상태로 분포하는 개별 파손상태를 종합적으로 고려할 수는 없다. 따라서, 임의구간에 분포하는 특정 파손 형태를 파손 정도(severity) 등급별로 종합적으로 구분하

*1) 포장유지보수전략 설정을 위한 소프트웨어, (ISCHDM)International Society of Highway Development and Maintenance 개발, 영국 Birmingham 대학, 2002년 10월 HDM-4 Ver 2.0 출시



기 위하여, 임의구간/임의 시간에서의 등급별 상태 분포율을 초기 상태 등급으로 하여, 시간에 따른 포장 상태 등급 분포율 변화를 예측하였다.

3.1 포장 공용성 평가 기대치 설정 개념

그림 2의 모델 구성 개념에서 포장 공용 년수에 대한 포장 상태 등급 결정을 위해서 일반 국도포장 장기공용성 관측 데이터를 이용하였으나, 데이터 양의 제한으로 새로운 포장 상태 평가 기대치 설정을 위한 회귀모델을 구성할 수는 없었다. 따라서 현장 공용 자료를 매개로 보정한 HDM-4 모델의 예측 값을 포장상태 평가지수식인 일본의 MCI (maintenance condition index) 함수식에 적용하여 시간에 따른 포장 공용성 평가 기대치를 설정하였다. 이에 따라 공용 년수에 대한 상태 등급 변화에 대한 기대값을 가정하기 위하여 덧씌운 포장의 전이 단계를 15단계로 가정하였으나, 단일 기대값으로 15 단계 전체를 대표하는 전이행렬을 구하는 것은 오차범위가 크므로, 이를 그림 1과 같이 3단계로 나누어 기대값을 설정하였다.

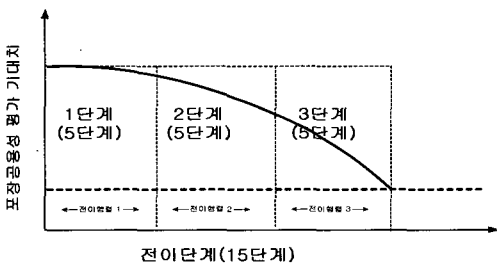


그림 3. 포장 상태 등급 기대값 구분

각 단계별로 포장 상태 변화를 각 단계별로 5개의 MCI 값을 대표 기대값으로 정의하여 전이행렬을 구성한다. 이는 설정한 포장 공용성 평가 기대치를 중심으로 포장상태가 정규 분포한다는 것을 가정한다. 대표 기대값을 매개로 구성한 전이행렬 매트릭스에 의하여 임의 구간의 포장 상태 확률 분포를 예측한다. 따라서, 이와 같은 방법론은 그 기본 가정이 포장 상태 평가 지수에

의한 평가값을 기대값으로 출발하기 때문에, 특정 구간에 대한 포장 파손 예측 값이 정당하다는 전제를 필요로 한다. 따라서, 기대값의 신뢰도를 확보하기 위하여 본 연구에서는 개별 포장 파손 예측 모델(HDM-4의 포장 파손 예측모델)에 의한 예측값(균열, 종단 평탄성, 러팅)에 의한 MCI 값을 각 단계별 기대값으로 정의하였다.

3.2 포장 공용성 평가 기대치 설정

본 연구에서 실측된 데이터와 외국의 공용성 평가식을 이용하여 국도 포장에 대한 공용성 평가를 실시하였으나, 단순한 결정계수만으로 판단할 때 아직까지 포장 파손 분포율 예측모델의 전이행렬을 구하기 위한 데이터로서 신뢰할만한 분석 결과를 얻을 수 없었다. 회귀식의 신뢰도는 분포율 예측 전이행렬식의 신뢰도에 크게 영향을 미친다. 그러나 전술한 바와 같이 본 연구단계의 조사 데이터를 추가했음에도 불구하고, 아직까지 만족할만한 회귀결과를 얻지 못하였다. 이는 본 연구에서 이용한 데이터가 비교적 단기간(3년)에 걸쳐 수집된 결과로서, 아직까지 포장 파손의 초기 진행 단계임을 감안할 때, 본 연구에서 가정한 15 단계를 대표하는 데 아직까지 미흡하다. 따라서, 본 연구에서는 당 연구원에서 2000년에 수행한 "HDM-4 적용 타당성 연구"에서 우리나라 일반국도 표준단면(5cm AC 표층, 10cm 역청기층, 35cm 쇄석보조기층) 상황에 맞게 보정한 균열, 러팅 및 종단 평탄성 예측 결과를 이용하였다.

표 1과 그림 3은 교통량이 많은(연평균일 교통량 AADT 10,000 이상) 구간에 보수를 시행하지 않았을 경우, 20년간 포장 상태 변화를 예측한 것이다. 그림 3에서 포장 상태 파손 양상이 초기(1~5년사이)에는 종단 평탄성(IRI) 및 균열이 다소 선형적으로 증가하다가, 중기(5 ~ 10년 사이)에는 파손이 크게 증가하며, 15년 이후부터는 항복기형을 가지는 포장 파손 추이를 나타내고 있다. 이는 HDM-4의 포장 파손 예측 모델이 지

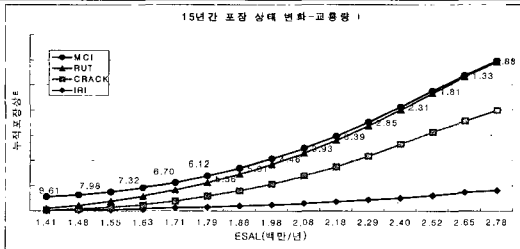


수 형태에 의한 것으로 판단되며, 모델의 보정 계수 또한, 초기파손상태를 모사하는 초기단계요소 (initiation factor)와 중기 이후를 나타내는 진행 단계요소(progression factor)로 구분하여 보정한 결과이다.

그림 4에서 보는 바와 같이 전혀 보수를 시행하지 않았을 경우, 포장 파손 추이 곡선이 지수형 분포를 보임을 알 수 있다. 이 결과를 토대로 교통량이 많은 구간의 전이 행렬 설정을 위한 초기 상태 행렬 기대값을 초기 [9.6, 7.9, 7.3, 6.7, 6.1], 중기 [5.6, 5.0, 4.5, 3.9, 3.3], 말기 [2.8, 2.3, 1.8, 0.8, 0.4]로 정의하였다. 표 2와 그림 5은 교통량이 적은 경우의 포장상태 변화를 나타낸다

표 1. 포장상태예측결과

	AADT	ESAL	IRI(m/Km)	CRACK(%)	RUT(mm)	MCI
1	10500	1.41	0.31	0.00	1.44	9.61
2	11025	1.48	0.70	0.72	3.01	7.98
3	11578	1.55	1.16	1.76	4.76	7.32
4	12155	1.63	1.70	3.35	6.62	6.70
5	12763	1.71	2.32	5.54	8.62	6.12
6	13401	1.79	3.05	8.40	10.76	5.56
7	14071	1.88	3.90	11.99	13.05	5.01
8	14775	1.98	4.87	16.36	15.50	4.46
9	15513	2.08	5.99	21.56	18.13	3.93
10	16289	2.18	7.27	27.65	20.96	3.39
11	17103	2.29	8.74	34.68	24.00	2.85
12	17959	2.40	10.42	42.71	27.26	2.31
13	18856	2.52	12.32	50.26	30.78	1.81
14	19799	2.65	14.45	57.23	34.58	1.33
15	20789	2.78	16.00	63.49	38.67	0.88
16	21829	2.92	16.00	69.07	43.10	0.44
17	22920	3.07	16.00	74.01	47.88	0.01
18	24066	3.22	16.00	78.37	53.07	0.00
19	25270	3.38	16.00	82.00	58.70	0.00
20	26533	3.55	16.00	82.00	64.82	0.00

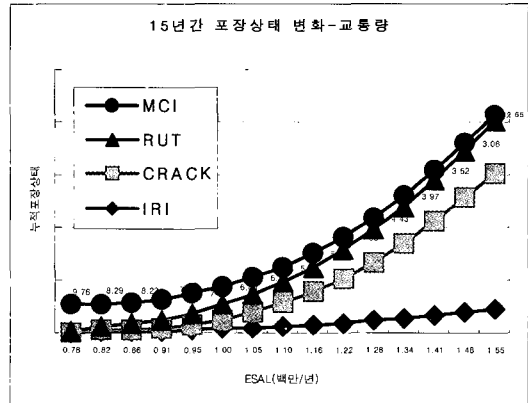


(AADT: 연평균일교통량대), ESAL : 8.2톤 등가단축하중, 백만/년
그림 4. 포장상태 변화 추이

표 2의 경우 교통량이 적은 구간의 전이행렬을 설정하기 위한 HDM-4 예측 결과로서 이결과를 토대로 교통량이 적은 구간의 포장 상태 기대값

표 2. 포장상태 예측결과

	AADT	ESAL	IRI(m/Km)	CRACK(%)	RUT(mm)	MCI
1	5204	0.78	0.16	0.00	0.72	9.76
2	5464	0.82	0.37	0.63	1.51	8.29
3	5737	0.86	0.60	0.48	2.43	8.23
4	6024	0.91	0.88	0.80	3.41	7.88
5	6325	0.95	1.21	1.89	4.45	7.32
6	6642	1.00	1.60	3.54	5.56	6.80
7	6974	1.05	2.06	5.80	6.75	6.30
8	7322	1.10	2.58	8.73	8.02	5.82
9	7688	1.16	3.20	12.40	9.38	5.35
10	8073	1.22	3.90	16.85	10.83	4.89
11	8476	1.28	4.71	22.14	12.40	4.43
12	8900	1.34	5.65	28.32	14.07	3.97
13	9345	1.41	6.72	35.45	15.88	3.52
14	9813	1.48	7.94	43.58	17.82	3.06
15	10303	1.55	9.31	51.08	19.92	2.65
16	10818	1.63	10.85	57.97	22.18	2.27
17	11359	1.71	12.57	64.15	24.62	1.91
18	11927	1.80	14.50	69.66	27.26	1.57
19	12524	1.89	16.00	74.54	30.13	1.24
20	13150	1.98	16.00	78.83	33.24	0.92



(AADT: 연평균일교통량대), ESAL : 8.2톤 등가단축하중, 백만/년
그림 5. 포장상태 변화 추이

을 초기 [9.7, 8.3, 8.2, 7.8, 7.0], 중기 [6.8, 6.3, 5.8, 5.3, 4.8], 말기 [4.4, 3.9, 3.5, 3.0, 2.6]로 정의하여 전이행렬 설정을 위한 기대값으로 설정하였다. 그림 5의 교통량이 적은 경우, 교통량이 많은 구간에서와는 달리 포장 상태 변화가 초기 상태 및 진행 상태 변화가 뚜렷하게 구별되어 있다. 그러나 기대값 설정을 위한 예측데이터가 기술자적 판단결과에 따라 보정한 결과를 이용하였으므로 포장 상태 예측 모델의 신뢰도를 위해서는 향후 실제 공용 데이터를 매개로 보정할 필요가 있다.

이와 같이 정의된 포장 상태 기대값을 토대로



전이행렬을 구하기 위한 연립방정식에 적용하여 최적화 과정을 수행함으로써 단계별 포장 상태 전이행렬을 구하였다.

3.3 국도 포장 공용성 예측 확률 모델

본 절에서는 마르코프 전이행렬을 제시함으로써, 각 파손 또는 변형에 의한 포장등급 변화를 평가한다. 설정된 포장상태 기대치를 토대로 연평균 일일 교통량 별 일반국도 포장 공용성 예측을 위한 전이행렬을 제안하였다. 제안한 전이행렬은 임의 포장구간의 포장상태 등급의 시간에 따른 변화를 모사한다.

본 연구에서는 전이행렬 적용범위를 교통량이 많은 경우(연평균일교통량 AADT 10,000 이상) 및 교통량이 적은 경우(연평균일 교통량 5,000 이하)로 구분하여 설정하였다.

여기서, 임의 조사 구간의 포장등급이란 임의로 구분한 포장등급 확률 분포가 다섯 가지 등급 즉, A, B, C, D, E 로 분포한다고 가정한다. 최초로 전이행렬의 단계별 확률 변화 추이를 알아보기 위해 포장 상태 확률을 A 등급이 100 % 존재한다는 가정하에 이상적인 상태인 [1, 0, 0, 0, 0] 로 가정하여 분석하였다.

이후, 분석한 전이행렬 및 상태확률 분포가 유의적이라고 판단되는 경우, 실제 조사구간의 파손정도별 최초상태 분포를 최적화된 전이행렬 매트릭스에 적용함으로써, 시간에 따른 확률적 포장 공용성 변화를 예측한다. 전이 행렬을 구하기 위한 최적화 기법은 BOX COMPLEX 알고리즘^{*)}을 이용하였다.

가. 교통량이 적은 경우(연평균일교통량 AADT 5000 이하)
포장 평가 지수 중, 균열을 및 러팅 변화에 가

장 민감한 일본의 MCI 함수식을 토대로 0-10 범위의 MCI 중간값인 5를 기점으로 전단계, 중간단계, 후 단계 등의 세 개의 범주로 등급을 나누어 분석을 수행하였다. 교통량이 적은 경우, 각 단계별로 구성된 전이행렬 매트릭스는 다음과 같다.

표 3. 교통량이 적은 경우의 전이행렬

전단계				
0.968	0.032	0	0	0
0	0.994	0.001	0	0
0	0	0.175	0.852	0
0	0	0	0.143	0.857
0	0	0	0	1
중간단계				
0.669	0.330	0	0	0
0	0.751	0.249	0	0
0	0	0.297	0.703	0
0	0	0	0.195	0.805
0	0	0	0	1
후단계				
0.244	0.756	0	0	0
0	0.273	0.727	0	0
0	0	0.107	0.893	0
0	0	0	0.079	0.921
0	0	0	0	1

위에서 제시된 매트릭스 값은 HDM-4 모델의 포장 상태 예측 값에 의한 MCI의 값을 매개로 전이 행렬을 구하기 위한 함수식 구성하여 최적화한 값으로, 초기 포장 상태(상태 등급 A 100%)의 포장이 각 구간별로 5개 단위로 그 포장상태 등급 분포율의 변화 양상을 예측하기 위한 전이 행렬식이다. 이 값을 15개 단위 전체를 대상으로 정리하면 다음 표 4와 그림 6과 같다.

표 4는 덧셈의 상태의 포장이 시간에 따른 파손 분포율 확률 변화 추이를 단계별/등급별로 나타내고 있다. 표 4에서와 같이 1단계 전이 이후, A 등급이 96.8 % 이었던 것이 5단계 전이 이후, 82.7 %로 감소하며, B 등급 16.8%, C 등급이

*) 다변수 최적화 기법의 하나로서 본문에서의 포장평가 기대치와 상태확률에 의한 예측값의 차이가 최소가 되는 전이행렬상의 미지수를 구하는데 이용함.



표 4. 포장상태 확률분포

등급 단계	A	B	C	D	E
1	0.9685	0.0315	0	0	0
2	0.9381	0.0618	0.0002	0	0
3	0.9084	0.091	0.0004	0.0002	0
4	0.8798	0.1191	0.0006	0.0004	0.0001
5	0.827	0.168	0.0008	0.0006	0.0005
6	0.5707	0.391	0.0367	0.0007	0.0009
7	0.3828	0.482	0.1084	0.0259	0.0015
8	0.2561	0.4881	0.1523	0.0812	0.0223
9	0.1715	0.4509	0.1669	0.1229	0.0878
10	0.1149	0.3952	0.162	0.1413	0.1867
11	0.028	0.1947	0.3045	0.1559	0.3169
12	0.0068	0.074	0.174	0.2844	0.4604
13	0.0017	0.0255	0.0726	0.1779	0.7224
14	0.0004	0.0082	0.0262	0.0789	0.8863
15	0.0001	0.0026	0.0088	0.0297	0.9589

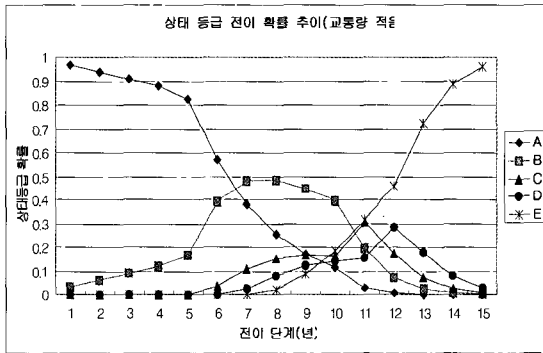


그림 6. 포장상태 등급 변화 추이

0.08 %, D 등급 0.06%, E 등급이 0.05%로 변화하고 있음을 보이고 있다. 그림 6은 초기 포장 상태에서 15개 단위 동안의 포장 상태 등급 변화 확률을 도시한 것이며, 초기 상태 등급 A가 100%인 임의 구간의 단계별 상태 변화 추이를 나타낸다. 그림 6에서 보는 바와 같이 초기 단계에서는 상태 변화 양상이 둔감하다가 5~7 단계 이후부터 급격한 상태 변화 양상을 보이며, 10 단계 이후 단계에서는 항복기로서 E 등급으로 점차 수렴되고 있음을 보이고 있다. 그러나 그림 6에서와 같이 분포 확률 변화 추이 상 기울기 변화가 심한 구간이 생기는 것은 최초 포장 상태 기대치로 설정한 값이 실제 확률분포에 영향을 준 것으로 판단되며, 좀 더 실제에 부합되는 포장상태 기대치를 매개로 한 최적화 수행으로 이 문제점을

극복할 수 있을 것으로 판단된다.

나. 교통량이 많은 경우((연평균일교통량 AADT 10,000 이상)

교통량이 많은 경우, 전술한 바와 같이 마르코프 전이행렬 기본형을 토대로, 일반적인 덧씌운 아스팔트 포장 공용수명이 15년 이상이라고 가정할 때, 단일 전이 행렬로 파손 분포율을 전체적으로 예측하는 데는 다소 무리가 있으므로, 기존 포장 파손 지수(MCI)를 토대로 적정한 시점(4 내지 5년)에서의 평가지수 값을 축으로 세 개의 범주로 구분하여, 전이행렬을 구하였다. 이 경우에서 또한 0-10 범위의 MCI 중간 값인 5를 기점으로 전단계, 중간단계, 후 단계 등의 세 개의 범주로 등급을 나누어 분석을 수행하였다. 각 범위별로 구성된 전이행렬 매트릭스는 다음과 같다.

표 5. 교통량이 많은 경우의 전이행렬

전단계					
0.968	0.032	0	0	0	0
0	0.992	0.008	0	0	0
0	0	0.338	0.662	0	0
0	0	0	0.221	0.779	0
0	0	0	0	0	1
중간단계					
0.618	0.382	0	0	0	0
0	0.701	0.299	0	0	0
0	0	0.280	0.720	0	0
0	0	0	0.190	0.810	0
0	0	0	0	0	1
후단계					
0.168	0.832	0	0	0	0
0	0.153	0.847	0	0	0
0	0	0.096	0.904	0	0
0	0	0	0.079	0.921	0
0	0	0	0	0	1

위에 제시된 매트릭스는 포장 상태가 다음상태로 반드시 1단계로만 상태 전이가 일어난다는 기본 가정에 의하며, 각 단계별 매트릭스는 5단계의 상태변화를 대상으로 하며, 전체적으로는 15단계의 포장 상태 등급 분포율을 예측한다. 최초 이상적인 포장 파손율 분포 등급의 15단계별 상태 확률 분포는 다음과 같다.



표 6. 포장상태 확률분포

단계	A	B	C	D	E
1	0.9679	0.0321	0	0	0
2	0.9368	0.0629	0.0003	0	0
3	0.9068	0.0924	0.0006	0.0002	0
4	0.8777	0.1208	0.001	0.0004	0.0001
5	0.82	0.1479	0.0013	0.0008	0.0005
6	0.5246	0.4287	0.0446	0.0011	0.0011
7	0.3239	0.5013	0.1405	0.0323	0.002
8	0.2	0.4754	0.1891	0.1073	0.0281
9	0.1235	0.4099	0.195	0.1565	0.115
10	0.0763	0.3347	0.1771	0.1702	0.2418
11	0.0128	0.1145	0.3006	0.1736	0.3984
12	0.0022	0.0281	0.1258	0.2856	0.5583
13	0.0004	0.0061	0.0359	0.1365	0.8212
14	0.0001	0.0012	0.0086	0.0433	0.9469
15	0.0001	0.0002	0.0019	0.0112	0.9867

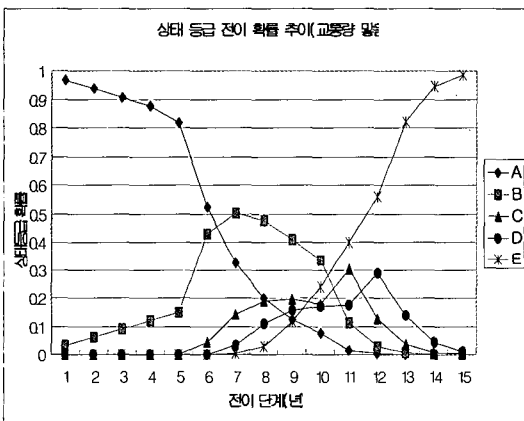


그림 7. 포장상태 변화 추이

표 6은 이상적인 상태 등급 분포인 [1, 0, 0, 0, 0] 인 경우의 15년 단계동안의 포장상태 등급 분포율을 의미한다. 표에서와 같이 최초 A등급의 포장 상태가 100%인 이상적인 단계에서 1년후에 A 등급이 93.6 %, B등급이 6.3 %로 분포함을 의미한다. 최초 A 등급 100%의 임의 포장 구간의 포장상태 등급 확률분포의 시간에 따른 등급변화를 그림으로 살펴보면 다음과 같다. 그림 7은 표 6을 도시한 것으로 이상적인 포장 상태의 시간에 따른 변화를 나타낸다. 그림 7에서와 같이 A등급의 포장이 5년 후에 그 상태가 급격히 나빠지는

양상을 나타내며, 5내지 7년 이후시점부터 B, C, D, E 등급의 분포가 점차로 증가하고, 12년 이후 시점부터 가장 나쁜 단계인 E 등급의 분포가 증가하면서 상대적으로 A, B, C, D 등급의 분포율이 저하되는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 현재 일반국도의 덧씌우기 수명주기가 6 내지 7년인 점을 감안할 때 위의 결과는 상당히 유의성이 있는 것으로 판단할 수 있다.

그림 6과 그림 7을 비교해볼 때, 교통량이 적은 경우 그림 6에서 A등급과 E등급의 교차시점이 공용후 약 9.6년인데 반해 교통량이 많은 경우인 그림 7에서는 약 9.0년이다. 위 결과로만 볼 때 양쪽의 경우에서 약 0.6년의 공용효과 차이가 나고 있다. 또한, 양 그래프에서 중간단계의 전이확률분포가 다소 변동이 심한 것은 전 단계에서 중간단계로의 전이시 단계별로 다른 전이행렬을 적용한 점과 중간단계의 MCI 포장상태 기대값이 적절하게 선정되지 않았음에 기인한다. 이와 같은 오차요인은 향후 누적데이터에 의한 좀 더 정확한 회귀모델을 설정함으로써 극복할 수 있다.

3.4 포장 공용수명 평가

본문에서 제시한 포장 공용성 예측 시스템의 예측결과의 유의성을 평가해보기 위해 먼저 일반국도 포장 2차로 및 4차로를 1984년 신설이후, 각 연도별 신설 연장을 대상으로 공용연수별 보수 비율을 생존율로 계량하여 도시한 결과, 2차로의 경우 전체연장의 50 % 보수되는 기간을 평균 공용 수명으로 가정하였을 경우, 그림 8과 같이 약 9.4년으로 추정되었다.

포장공용수명 평가는 초기상태에서 1단계 뒤인 등급 k로 천이하고, 그후 포장 상태 등급 j에 머무르는 단계수를 고려함으로써 포장이 최종 파손 상태에 이르기까지 각 등급에 머무르는 년수의 기대값을 구할 수 있다. 본 연구에서는 식 (1)을

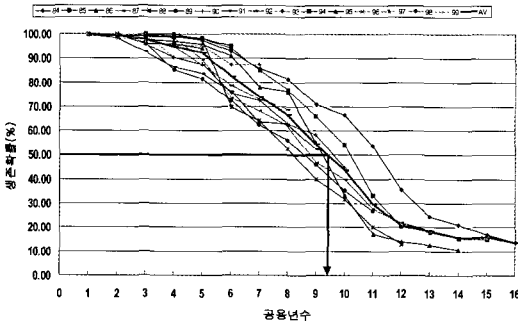


그림 8. 일반국도 2차로 평균 공용 수명

이용하여, 교통량에 따라 구한 천이확률 P_{ij} 를 이용하여 m_{ij} 에 관한 연립방정식을 유도함으로써 최종 파손 상태 등급에 이르기까지 년수의 기대값을 계산한다. 본 연구에서는 교통량이 많은 경우 및 적은 경우에서 구한 3단계 전이행렬 중 이상적인 상태인 전단계 전이행렬을 대상으로 포장 공용수명을 평가하지 않고, 포장의 교통하중에 의한 피로도를 감안하여 일정부분 포장 파손이 진행된 상황을 모사한 중간 단계 전이 행렬을 대상으로 덧씌운 포장의 공용수명을 평가해보았다. 표 8 및 표 9에서의 결과, 양호한 상태에 있는 포장에서 평균 공용 수명은 교통량이 많은 경우에서 약 8.54년, 교통량이 많은 경우에서 약 9.67년으로 계량되었다.

표 8. 공용 수명예측(교통량 대)

2.61	3.33	1.37	1.23	8.54
0	3.34	1.37	1.23	5.94
0	0	1.38	1.23	2.61
0	0	0	1.23	1.23

표 9. 공용 수명예측(교통량 소)

3.02	3.99	1.42	1.24	9.67
0	4.01	1.42	1.24	6.67
0	0	1.42	1.24	2.66
0	0	0	1.24	1.24

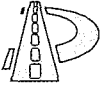
이와 같은 본문에서 결정한 포장 상태 전이행렬을 매개로 계량한 공용 수명 예측결과 그림 8. 일반국도 2차로 평균 공용 수명 결과와 비교적 유사한 결과를 보였다. 따라서, 포장 상태 전이행렬을 이용한 포장 상태 평가결과의 유의성을 어느 정도 설명한다고 하겠으나, 본문에서 HDM-4에 의한 포장상태 예측 값과 포장 상태 변화 기대치의 신뢰도는 향후, 누적데이터에 의한 검증이 필요하다.

4. 결론

본 연구에서는 일반 국도 장기 포장 공용성 조사결과를 토대로 축적된 현장 조사자료를 매개로 포장상태 변화추이를 예측하기 위해서 마르코프 확률과정 전개 방법을 토대로 포장 공용성 예측 모델 개발 방법론을 제안하였다. 그러나, 본문에 제시한 바와 같이 현재까지의 포장 공용성 조사 데이터가 분석에 필요한 만큼 충분히 확보되지 않아, 공용기간 15년 이상된 포장상태를 모사하기 위하여, 현 단계까지의 공용 조사 데이터를 토대로 HDM-4 모델의 포장파손 예측모델을 보정한 후, 예측값을 기초로 모델을 설정하였다. 포장 공용성 예측을 위한 전이행렬 매트릭스는 본문에 제시한 바와 같고, 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 유도하였다.

1) 포장 상태 예측 모델은 여러 가지 요인에 의해 변화하는 특정 파손량의 크기 변화에 의한 결정적인 포장 평가 지수 값으로 예측하는 것보다 다양한 변화 요인을 내포하고 있는 포장상태를 포장상태 등급 변화 확률로 예측하는 것이 포장관리 시스템의 기술적 보수공법 결정 논리가 각종 파손 분포율을 매개로 하고 있는 점을 감안할 때, 네트워크 레벨의 포장 보수 전략 설정을 위한 의사 결정에 유리하다.

2) 제시된 포장 공용성 예측을 위한 전이행렬 모델은 포장이 이상적인 상태에서 시간에 따른



포장 상태 등급 변화를 나타내는 것으로서 기술 자적 판단 및 일반국도의 덧씌우기 수명주기를 고려할 때 현 단계에서 유의성이 있는 것으로 판단되나, 가정된 포장 상태 변화 기대치의 신뢰도는 향후, 누적데이터에 의한 검증을 필요로 한다.

3) 현 단계에서 제시한 포장 공용성 예측 모델로서의 포장 상태 전이 행렬은 교통량을 대/소로만 구분하여 전이행렬을 제시하였으나, 향후 계속적으로 수행될 포장 장기 공용성 관측 연구에서의 조사 결과를 토대로 분석범위를 향상시키기 위한 노력을 계속 해야 한다.

참고문헌

1. Abbas A. Butt, Mohamed Y. Shahin, Samuel H. Carpenter, "Pavement Performance Prediction Model Using the Markov Process", TRR 1123, PP 12~19
2. Alfredo Hua-Sing, *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*. John Wiley & Sons, PP 113 ~ 131, 1984
3. Kelvin C. P. Wang, Zohn P. Zaniewski, "Sensitivity of the Pavement Network Optimization System to its Prediction Models", TRB 74th Annual Meeting, 1995
4. Survival models for flexible pavements, *The 4th International Conference on the Hearing Capacity of Roads and Airfields*, 1994.4
5. Takeyama, 마르코프 연쇄모델에 의한 아스팔트 포장의 파손 평가시스템, 일본토목학회 논문집 420호/N-13, 1990, pp 135~141
6. T. S. Vepa, K. P. George, A. Raja Shekharan, "Prediction of Pavement Remaining Life", TRR 1524, 1996
7. Xin Chen, Stuart Hudson, "Development of New Network Optimization Model for Oklahoma Department of Transportation", TRR 1524, PP 103~108
8. 유인균, "Markovian 의사결정과정을 이용한 포장관리정책의 확률적 평가모델 개발", 박사학위논문, 1999
9. 한국건설기술연구원, "HDM-4 적용 타당성 분석연구", 일반국도 도로포장 관리 시스템 연구보고서 중, 2000 (접수 2002. 7. 31)