

우천에 따른 포트홀 발생 특성을 고려한 도로순찰 전략

한대석

한국건설기술연구원 노후인프라센터

Road Patrol Strategy based on Pothole Occurrence Characteristics considering Rainfall Effects

Daeseok Han

Sustainable Infrastructure Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요약 도로에 발생하는 포트홀은 운전자들의 안전과 만족도, 차량파손에 직접적으로 영향을 미치는 요소로 실시간에 준하는 검지와 대응이 요구된다. 순찰 빈도를 높이면 포트홀의 조속한 검지와 대응이 가능하나, 많은 인력과 비용, 시간이 소요된다. 또한 포트홀은 우천에 따라 발생특성이 달라지기 때문에 순찰의 효율성을 제고하기 위해서는 경제적 관점과 서비스 제공의 관점에서 최적빈도에 대해 고민해야 할 필요가 있다. 이에 본 연구는 장기간에 걸쳐 수집된 포트홀 발생이력과 기상정보를 활용하여 우천이 포트홀 발생에 미치는 영향과, 지속성, 강우강도의 영향에 대해 정량적 분석을 시도하였다. 그리고 이 결과를 근거로 리스크 기반의 최적화-가변화 순찰 전략을 제시하였다. 분석 결과 우천 시에는 포트홀 발생확률은 2.4배 증가하고, 비가 그친 후에도 그 영향은 3일간 지속됨을 알 수 있었다. 또한 강우강도 1mm 당 포트홀 발생확률은 0.46% 증가하며, 1mm 수준의 적은 비에도 발생특성이 민감하게 반응함도 확인하였다. 이러한 특성에 근거한 포트홀 관리 최적 빈도는 신뢰수준 95% 수준에서 우천 비영향권일 경우 3일에 1회, 영향권에서는 1일 2회 이상의 순찰이 필요하다는 결론이 도출되었다.

Abstract Potholes on the road directly affect drivers' safety, satisfaction, and vehicle damage. Thus, real-time detection and response are required. Increasing frequency of patrols allows for potholes to be detected and responded to quickly, but this takes much manpower, money, and time. In addition, potholes have different occurrence characteristics depending on the rain conditions, so it is necessary to consider the optimal frequency from an economic and road-service perspective. Therefore, a quantitative analysis was done on the effects of rainfall on the occurrence characteristics of potholes. Information on the persistence, impact of rainfall intensity, and weather information was collected over a long period. Based on the results, a risk-based, optimized, and changeable road-patrol strategy is presented. The analysis results show that the probability of pothole occurrence increases by 2.4 times in rainy weather. Furthermore, the impact continues for 3 days even after the rain stops. The probability of pothole occurrence increases by 0.46% per 1 mm of rainfall, and the occurrence characteristics react sensitively to even a small amount of rain of around 1 mm. It was concluded that road patrol is required at least once every three days for an effect-free period, while twice a day is needed for the "sphere of influence" period to achieve a 95% reliability level.

Keywords : Pavement, Monitoring, Pothole, Rainfall, Risk management

*Corresponding Author : Daeseok HAN(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

email: handaeseok@kict.re.kr

Received November 3, 2020

Accepted December 4, 2020

Revised November 30, 2020

Published December 31, 2020

1. 서론

도로 포장에는 균열, 소성변형 등 다양한 파손유형이 발생한다. 그 중에서도 포트홀은 운전자의 안전, 만족도, 차량 파손 등 도로이용자에게 가장 민감한 영향을 주는 파손유형으로 실시간에 준하는 검지와 보수를 위해 필요로 한다. 전 세계적으로 도로 관리주체들은 포트홀 검지를 위해 주기적인 순찰을 시행 중이며, 이를 위해 많은 시간·비용·인력을 투자하고 있다. 그럼에도 불구하고 순찰업무를 최적화하기 위한 관심이나 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다.

도로 순찰의 가장 큰 특징은 고정간격이라는 점이다. 순찰 빈도를 높이면 포트홀의 조속한 검지와 대응이 가능하나 인력과 비용이 과다 투입되고, 반대의 경우 도로 이용자의 포트홀 노출 리스크가 증가하게 된다. 반면 포트홀은 불확실하게 발생하며, 온도·우천 등 기후조건 변화, 즉 국면전환 따라 그 특성도 변화한다. 본 연구는 이러한 불확실한 포트홀의 발생 특성, 그리고 이에 대응하는 도로순찰 전략을 연구 주제로 하고 있다.

최적화 된 대응을 위해서는 포트홀 발생특성에 대한 이해와 정량적 접근이 선행되어야 한다. 이를 위해 포트홀을 관리하는 현장관리자들의 인터뷰를 시행하였다. 그들이 경험적으로 인지하고 있는 포트홀은 확실히 우천 후 포트홀 발생이 빈번해지고, 강우강도가 강하거나 길어지는 경우 더 증가한다는 것이다. 특히 본 연구에서 주목한 것은 비가 그친 이후에도 이러한 특성이 한 동안 지속된다는 것이다. 최적화된 도로 순찰 전략은 이러한 현상을 정량화 하고, 리스크 기반의 가변화 전략이 필요하다.

이에 본 연구는 장기간에 걸쳐 수집된 포트홀 발생이력과 기상정보를 활용하여 우천이 포트홀 발생확률과 빈도에 미치는 영향과 지속성, 강우강도의 영향에 대해 정량적 분석을 시도하였다. 또한 이 결과를 바탕으로 관리자가 설정하는 포트홀 관리 신뢰수준에 대응하는 최적 순찰빈도를 우천의 영향권과 비영향권으로 구분하여 제시하였다. 본 연구는 포트홀 발생의 국면전환(우천영향권-비영향권)에 대응하는 차별화 된 순찰을 지원한다는 점에 의미가 있다.

2. 문헌고찰

포트홀은 주로 아스팔트 포장의 표층에 발생하는 국부적 파손유형으로 포장 일부분이 떨어져나가 구멍이 발생

하는 현상을 말한다[1]. 포트홀은 차량 차축과 서스펜션 고장의 주요 원인이며, 잠재적으로 위험한 주행 환경을 만들어 낸다. Kamal 등에 따르면, 포트홀은 영국에서만 매년 약 28억 파운드의 차량 수리비용을 발생시키고 있으며, 영국 정부는 운전자들에게 매년 3,000만 파운드 이상의 보상금을 지급하고 있는 것으로 보고하고 있다 [2]. 한편, 미국의 뉴욕시 교통부는 2014년에만 약 11만 3,000개의 포트홀을 보수했다고 보고할 만큼 포트홀은 광범위하고 빈번하게 발생하는 파손유형이다[3].

Paterson은 포트홀에 대한 물리적 정의에 대해 라벨링(포장 표층의 골재바리 현상)과 구분하기 위한 목적으로 반경 15cm이상에 깊이 2.5cm이상으로 제안한 바 있다[4]. 국제적으로 도로 투자분석 프로그램으로 널리 활용중인 World Bank의 HDM-4(Highway Development and Management-4)에서는 성인의 발이 잠길만한 수준으로써 반경 30cm, 깊이 10cm로 정의하고 있다[4].

포트홀의 발생 특성은 무작위 혹은 확률분포에 가깝다고 볼 수 있다. 보통 이벤트(사건)의 발생 개수 및 확률은 포아송 과정을 사용하게 되는데, 여기서 중요한 가정은 한 종류의 사건이 동일한 간격으로 반복적으로 발생하는 것을 전제로 한다. 그러나 도로 표면에 발생하는 포트홀이 모두 같은 도착률로 발생한다고 가정하는 것은 무리가 있으며, 이러한 특성을 반영하기 위해 혼합 포아송 과정을 적용하고 있다[5].

포트홀 예측 모델들을 중심으로 살펴보면, 포트홀의 발생 원인을 주로 물리적 조건에서 찾고 있다. Rose 등은 포트홀 발생의 설명변수로 라벨링의 비율, 사용연수, 구조지수(SN: Structural Number), 포장두께 등 포장의 설계수준과, 파손정도·노후도에서 찾고 있으며[6], HDM-4 모형에서도 포트홀 초기발생 모델과 확산 모델로 구분하고, 층의 두께와 시공의 질, 교통하중 등을 예측변수로 활용하고 있다[4]. 즉 이미 현장에서는 우천의 영향과 그 지속성 대해 인지하고 있으나, 이러한 경험적 사실을 예측 모델링에 반영하고 있는 경우는 찾아보기 어렵다. 가장 큰 이유는 일반적인 포장관리시스템에서 포트홀 발생 정보와 기상 정보를 다루고 있지 않기 때문이다. 자료가 충분하지 않다 보니 포트홀 발생특성 정립과 대응을 위한 연구도 미흡한 실정이다. 순찰은 전 세계적으로 수많은 도로 관리기관이 시간과 비용을 투자하여 매일 수행하는 업무로써 순찰의 최적화에 대한 접근은 그 필요성이 충분히 인정된다.

3. 방법론

3.1 포트홀 발생 국면의 정의

본 연구의 첫 번째 단계는 “가변화”를 적용하기 위한 국면(regime)의 정의이다. 여기서 국면은 도로관리자가 쉽고 명확하게 판단할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 우천에 따른 국면의 정의를 다음과 같이 3가지로 정의하고, 분석의 기준으로서 활용하였다.

- 우천권 : 비가 오는 날
- 우천영향권 : 비가 온 날을 포함한 3일
- 비영향권 : 맑으며, 우천의 영향권이 아닌 날

여기서 우천권으로 인식하는 기준은 기상청의 최소 인지 기준인 0.5mm로 정의하였다. 이는 일반적으로 노면이 젖는 수준으로 생각하면 쉽다. 우천영향권은 비가 그쳤으나 그 영향이 지속될 것으로 예상되는 기간으로, 우천 후 맑은날 2일을 포함한 3일로 가정하였다. 설정된 3일은 현장관리자가 인지하는 경험적인 기간으로 인터뷰를 통해 제시한 기준을 도입하였다. 이에 따라 비영향권은 당일은 물론 최근 3일간 비가 오지 않은 상태로 정의된다.

아울러, 본 논문에서 활용되는 주요 용어인 ‘포트홀 발생확률’은 1일에 포트홀 1개 이상 발생할 확률, ‘포트홀 발생강도’는 1일 포트홀 발생 개수로 정의한다. 앞서 정의된 내용의 간결한 표기를 위해 포트홀 P , 발생날수 D , 발생갯수 N , 우천일 R , 맑은날 S , 우천 영향권 R_3 , 비 영향권 S_F 등으로 표기하기로 하며, 더 구체적인 사항은 Table 1을 참조하길 바란다.

Table 1. Notations for main terms

Content	Notations
Potholes	P
Number of days	D
Number of potholes	N
Rainy day	R
Sunny day	S
Rainfall effect period (3 days)	R_3
Rainfall effect-free period	S_F
Num. of sunny days	$D(S)$
Num. of rainy days	$D(R)$
Num. of days pothole occurred	$D(P)$
Num. of total potholes	$N(P)$
Mean (lambda-sunny day)	λ_S
Mean (lambda-rainy day)	λ_R
Variance (pothole-sunny day)	$var(S)$

3.2 분석절차 및 방법

본 연구의 목적을 우천에 따른 순찰의 가변화-최적화 전략 제시한 바 있다. 이를 위해 1)우천특성에 따른 포트홀 발생특성 변화, 2)우천 영향의 지속성, 3)우천강도의 영향, 4)리스크 관리 수준 및 국면전환에 따른 최적 순찰 빈도에 대한 접근이 요구된다.

우천에 따른 포트홀 발생특성은 비가 온 날과 오지 않은 날의 포트홀 발생확률과 발생강도를 비교하면 쉽게 도출이 가능하다. 본 연구에서는 추가적으로 포아송 과정(Poisson process) 적용을 통해 발생빈도 별 확률밀도 함수(PDF: Probability Density Function)를 도출하였다. 이는 포트홀 발생 특성에 대한 이론적 접근으로써 모형화, 일반화 관점에서 의미가 있다.

우천의 영향권에 따른 발생 지속성 분석에서는 국면이 2개, 우천영향권과 비영향권 구분된다. 즉 각 조사일은 2개의 국면에 소속되며, 그룹간 포트홀 발생확률과 발생강도를 도출하여 비교하였다.

강우강도의 영향은 강우량을 설명변수로 하는 포아송 감마 모형(Poisson-Gamma)을 적용하여 포트홀 발생강도 함수를 도출하였다. 포아송감마 모형의 도입 이유는 일반 포아송 과정의 가장 큰 단점인 균일간격 도착(포트홀 발생)에 대한 제약조건을 제거할 수 있고, 설명변수를 포함한 변화특성을 모형화 할 수 있기 때문이다. 이에 대한 보다 구체적인 설명은 3.3절에서 다시 기술하기로 한다.

추가적으로 미미한 우천에 따른 포트홀 발생특성 변화에 대해서도 분석을 시행하였다. 이 분석은 말 그대로 소량의 비가 오는데도 순찰 빈도를 늘려야 하는가에 대한 의문을 해소하기 위함이다. 또한 그 결과에 따라 국면의 정의도 바뀔 수 있다. 만약 이 분석결과가 미미한 우천은 영향을 주지 않는다고 한다면 국면의 정의도 바뀌어야 하며, 그에 따른 우천 영향권 분석을 재 시행하여야 한다. 본 연구에서는 미미한 우천에 대한 대안을 3가지(1mm, 3mm, 5mm)로 설정하고, 민감도를 분석하였다. 참고로 본 분석은 앞서 분석된 결과에서 우천이 포트홀 발생에 영향을 미칠 경우에만 의미가 있다.

마지막으로 특정 리스크 관리 수준 및 국면전환에 따른 최적순찰 빈도를 제시하였다. 여기서 “최적”은 관리자가 설정한 리스크 수준을 만족하는 최소 순찰 간격으로 정의 된다. 분석 시나리오를 단순화하기 위해 국면은 우천 영향권과 비영향권으로 구분하고, 신뢰수준은 90%와 95%수준으로 설정하였다.

3.3 포아송 감마 모델

본 절에서는 독자의 이해를 돕고자 본 연구에서 강우 강도에 따른 포트홀 증가함수 도출에 활용된 포아송 감마 모델을 간단히 소개하기로 한다.

일반적인 포아송 모형과 감마 모형의 큰 차이는 포트홀 발생특성에 대한 가정, 그리고 설명변수를 포함한 증가함수를 도출할 수 있다는 점이다. 일반적인 포아송 과정에서는 한 종류의 사건이 동일한 도착률(λ)로 반복적으로 발생하는 것을 전제(가정)로 한다. 그러나 도로 표면에 발생하는 포트홀이 모두 같은 도착률로 발생한다고 가정하는 것은 무리가 있다. 또한 우천에 국면전환, 강우 강도에 따라 발생강도의 편차도 발생할 수 있다. 즉 포트홀의 발생은 무작위 이거나 혹은 확률분포에 따른다고 가정하는 것이 더 합리적이다[5]. 이렇게 포트홀 발생이 확률 분포를 따르고, 그 포트홀이 포아송 과정에 따라 발생한다면 "혼합 포아송 과정(Mixed Poisson process)"을 적용하여야 한다. 혼합 포아송 과정을 활용하면 포아송 과정에서 기대치가 분산과 같다는 제약조건(즉 동일한 간격으로 이벤트가 발생)을 제거할 수 있으며, 이에 따라 좀 더 유연한 모델링이 가능해진다. 혼합 포아송 과정에서 도착률의 이질성은 감마 분포에 의해 표현되며, 사건 발생은 포아송 과정 모델에 의해 설명된다. 포아송 감마 모형은 혼합 포아송 모형 중에서 가장 단순한 모형 구조를 가지며, 나아가 특정 기간 동안 포트홀의 개수를 음이항 분포로 표현할 수 있는 특징이 있다. 이는 포트홀 외에도 도로 상에 발생하는 다양한 이벤트를 모델링 하는데 매우 유용하게 활용될 수 있다[5].

포아송 감마모델의 기본 구조에 대해 간단히 살펴보자. 먼저 구간 $i(i=1, \dots, N)$ 에서의 포트홀 발생률이 확률분포함수를 $F(\epsilon_i)$ 에 따르고, 1개 이상의 포트홀 발생률을 $\lambda_i > 0$ 이라 가정하면, 발생률 λ_i 는 Eq.(1)로 표현할 수 있다.

$$\lambda_i = \mu_i \epsilon_i = \exp(x_i \beta') \epsilon_i \quad (1)$$

where, $\mu_i = \exp(x_i \beta')$ denotes average pothole occurrence rate of section i , x denotes explanatory variable, and ϵ denotes probability error term

여기서 ϵ_i 는 오차항으로 감마 분포(평균 1, 분산 ϕ^{-1})에 따르게 된다. 감마분포의 범위는 $[0, \infty)$ 로 정의 되며, 설명변수의 가중합에 대한 지수함수가 사용됨으로, 임의의

설명변수와 오차항(Eq.(1)의 우변)은 양수가 된다. 확률 오차항 ϵ_i 의 평균은 1이므로, 예상 도착률 $E[\lambda_i]$ 는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$E[\lambda_i] = \exp(x_i \beta) \quad (2)$$

where, $E[\lambda_i]$ denotes expected arrival rate

여기서, 감마 분포 $G(\alpha, \beta)$ 의 확률밀도함수는 다음으로 정의 할 수 있다.

$$f(\epsilon_i : \alpha, \beta) = \frac{\phi^\alpha}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \epsilon_i^{\alpha-1} \left(-\frac{\epsilon_i}{\beta} \right) \quad (3)$$

where, $f(\epsilon_i : \alpha, \beta)$ denotes probability density function of Gamma distribution

감마 분포 $G(\alpha, \beta)$ 의 평균은 $\mu = \alpha\beta$ 이고, 분산은 $\rho^2 = \alpha\beta^2$ 임으로, 평균 1과 분산 $1/\phi$ 을 갖는 확률밀도 함수 $f(\epsilon_i : \phi, \phi^{-1})$ 는 다음으로 표현 가능하다.

$$f(\epsilon_i : \phi, \phi^{-1}) = \frac{\phi^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \epsilon_i^{\alpha-1} \exp(-\phi \epsilon_i) \quad (4)$$

여기서, 포트홀의 발생률이 λ_i 에 따르고 도로관리자가 순찰을 z_i 간격으로 시행한다고 가정한다면, 특정 구간 i 에서 n_i 개의 포트홀을 발견할 확률은 다음 포아송 분포에 따르게 된다.

$$Po(n(z_i) = n_i | \lambda_i) = \frac{(\lambda_i z_i)^{n_i}}{n_i!} \{ \exp(-\lambda_i z_i) \} \quad (5)$$

where, n denotes the number of pothole, and z denotes patrol cycle

여기에, 포트홀 평균 발생에 영향을 미치는 설명변수 벡터 $x_k (k=1, \dots, K)$ 에 대응하는 미지 파라미터 벡터 $\beta_j (j=0, \dots, J)$ 를 도입하면 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda_i = \exp(\beta_j + \beta_j x_k, \dots, \beta_j x_K) \quad (6)$$

Where, $x_k (k=1, \dots, K)$ denotes explanatory variables vector, and $\beta_j (j=0, \dots, J)$ denotes parameter vector

지면의 제약에 따라 포아송 감마 모형에 대한 더 구체적인 내용은 Kobayashi and Kaito(2012)를 참조하길

바란다[5].

3.4 데이터 수집·가공·기초분석

앞선 문헌고찰에서 언급된 바와 같이 본 연구에서의 필수 자료인 포트홀 발생이력과 우천 정보는 포장관리 분야에서 일반적으로 수집·관리하는 자료는 아니다. 본 연구에서는 도로기관에서 매일 작성하는 도로 순찰대장, 보수대장에서 포트홀 보수 이력을 하나하나 찾아내는 방법을 통해 기본 자료를 구축하였다. 기상정보는 일본 기상청(www.jma.go.jp)을 통해 취득 하였으며, 대상 구간과 가장 가까운 구간에 설치된 기상정보시스템 자료를 참조하였다. 최종적으로 조사자료는 “조사일-포트홀 개소수(정수)-당일강우량(mm)-영향권 누적 강우량(mm)-우천영향권 여부(더미)”가 하나의 셋으로 구성되었다.

대상구간은 일본의 오츠(大津, Otsu)지방의 한 고속도로 구간(19.01km)으로 상대적으로 우천이 잦고 강우량도 높은 구간을 선정하였다. 해당 구간의 기후는 평균 16.2도 최대최소 -3.9~37.5℃ 수준으로 우리나라와 유사하다. 연평균 교통량은 48,992대, 대형차량 혼입률 34.8%로 상대적으로 교통량과 하중이 높은 편이다. 포트홀 발생에 가장 밀접한 관계가 있는 균열의 수준은 전 구간 평균 1.67%로 양호해 보이나, 5%이상의 균열이 포함된 세부 구간도 105개 수준으로 분석되었다. 자료 수집 기간은 2007.8.1일부터 2011년 9.30일까지 총 4년 2개월(50개월, 1,522일)로 해당구간의 우천 및 포트홀 발생 특성을 정규화 하는데 충분하다 판단된다. 수집 자료에 대한 기초통계와 포트홀-우천특성을 Table 2~3, Fig. 1에 제시하였다.

Table 3. Basic statistics of the data - for 1,522 days

Contents		Avg.	Std.	Min.	Max
Pothole(n/day)		0.15	0.7	0	11
Rainfall (mm)	Total period	4.5	12.0	0	129
	Rainy day only	12.8	17.4	0.5	129
Temperature (℃)		16.2	8.8	-3.9	37.5

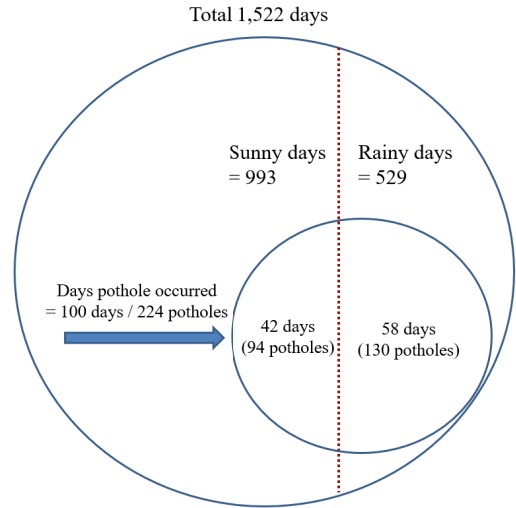


Fig. 1. Structure of pothole and rainfall data

Fig.1은 Table 2를 이해하기 쉽게 도식한 데이터 구조도이다. 전문적인 분석 없이도 비가 오는 날에 포트홀 발생이 활발해 짐을 쉽게 알 수 있다.

4. 분석결과

4.1 우천에 따른 포트홀 증가 특성

포트홀 발생특성 비교는 포아송 모델의 “평균 도착률” λ 의 비교를 통해 가능하다. 3.4절에서 선행 분석결과로 제시된 Table 2을 참조하면 맑은 날의 λ_S 는 0.095개/일, 비가 온 날의 λ_R 은 0.2458개/일로 2.59배 증가하였음을 확인할 수 있다. 도로 순찰 관점에서 중요한 1개 이상 발생 확률은 맑은날 4.2%, 비가 온 날 11.0%로 약 2.62배 증가함을 알 수 있다. 평균도착률을 활용한 포아송 모델의 적용결과는 Table 4, Fig.2와 같다.

Table 2. Pothole-rainfall matching results

Contents	Notations	Data
Sample size	-	1,522
Num. of sunny days	$D(S)$	993
Num. of rainy days	$D(R)$	529
Num. of days pothole occurred	$D(P)$	100
Num. of total potholes	$N(P)$	224
Mean (lambda-sunny day)	λ_S	0.0947
Mean (lambda-rainy day)	λ_R	0.2458
Variance (pothole-sunny day)	$var(S)$	0.4599
Variance (pothole-rainy day)	$var(R)$	0.4602

Table 4. Comparison of pothole occurrence rates by weather condition

Num. of potholes	PDF-Sunny day ($\lambda_S = 0.095$)	PDF-Rainy day ($\lambda_R = 0.249$)	Note (Rainy day)
0	0.9096	0.7821	+12.75%
1	0.0861	0.1922	2.2 times
2	0.0041	0.0236	5.8 times
3	0.0001	0.0019	15.0 times
4	0.0000	0.0001	101.3 times
5	0.0000	0.0000	262.9 times

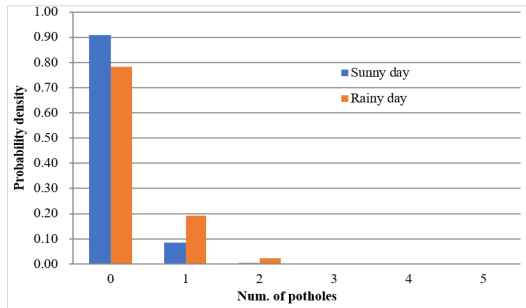


Fig. 2. Pothole occurrence rate by weather condition

포아송 과정에 따른 이론적 발생확률은 우천 시 2.42 배 증가하는 것으로 분석되었다. 원시자료 분석결과인 2.62배와 거의 동일하다. 또한 포트홀 발생 개수별 확률 밀도 함수의 증가율을 살펴보면 1개 2.2배, 2개 5.8배, 3개 15배로 지수형태로 기하급수적으로 증가함을 보여주고 있다. 단 3개 이상은 발생확률 자체가 미미하여 큰 의미를 부여하기는 어렵다.

4.2 우천에 따른 포트홀 발생 지속성

Table 5. Rainfall effect extension analysis results

On rainy day		During influential period (for 3 days)	
Contents	Value	Contents	Value
$D(S)$	993	$D(S_F)$	526
$D(R)$	529	$D(R_3)$	896
$D(P)/N(P)$	100/224	$D(P)/N(P)$	100/224
$D(P \ge 1 S)/N(P S)$	42/94	$D(P \ge 1 S_F)/N(P S_F)$	8/16
$D(P \ge 1 R)/N(P R)$	58/130	$D(P \ge 1 R_3)/N(P R_3)$	92/208
$Prob(P \ge 1 S)$	4.2%	$Prob(P \ge 1 S_F)$	1.5%
$Prob(P \ge 1 R)$	11.0%	$Prob(P \ge 1 R_3)$	10.3%

본 분석은 우천일(1일)과 영향권(3일)에 대한 비교분석으로 쉽게 설명할 수 있다. 분석결과를 Table 5와 Fig.3을 통해 제시하였다.

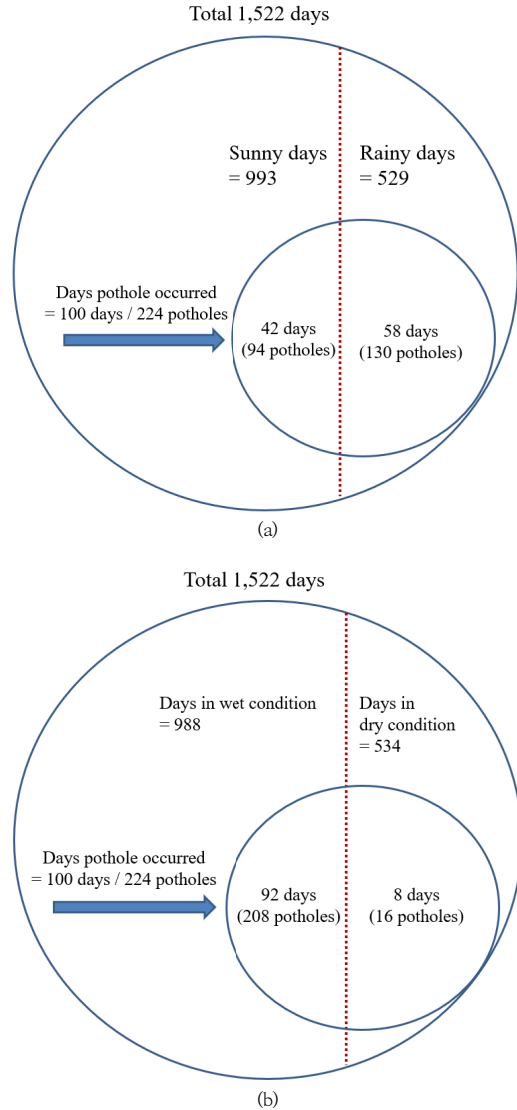


Fig. 3. Pothole occurrence characteristics

- (a) On the rainy day - for a day
- (b) During influential period - for 3 days

Table 5를 살펴보면 비가 온 뒤에도 이 특성은 유지된다는 결론은 얻을 수 있다. 우선 우천 영향권을 3일로 설정 시 영향권에 해당하는 날수는 896일이 되며, 이 기간에 발생한 포트홀 수는 전체 224개 중 208개에 달한다(Fig.3(b)참조). 즉 포트홀은 비 온날을 포함하여 3일 이내에 92.9%가 발생함을 알 수 있다. 중요한 사실은 같

은 맑은 날 이라도 우천 영향권에 들어가 있지 않은 경우 포트홀 발생확률은 1.5%로 줄어든다는 것이다(우천 당일 4.2% 대비 35.7% 수준). 우천의 영향권 설정에 따른 건조 상태와 습윤 상태에서의 포트홀 발생확률은 당일기준 대비 2.4배에서 6.8배로 크게 증가한다. 또한 비 온당일(즉 영향권 1일)과 우천 영향권 3일의 포트홀 발생확률은 각각 11.0%, 10.3%로 비가 그쳐도 이 특성은 유지된다고 판단할 수 있다. 즉 비온 후 3일간은 포트홀 검지를 위한 순찰 강화 전략을 유지할 필요가 있음을 의미한다.

4.3 강우강도에 따른 포트홀 발생특성

본 절에서는 강우량을 설명변수로 하는 포아송 감마 모델의 구축 결과를 제시하기로 한다. 우천 영향권의 누적 강우량을 설명변수로 한 포아송-감마 모델의 파라미터 및 통계치는 Table 6과 같다.

Table 6. A Poisson-Gamma model for pothole occurrence rate by rainfall intensity

Parameters	β_0	β_1
Values (t-value)	-2.4462 (-28.516)	4.1038 (17.8348)
Average precipitation (mm/day) (Normalized value)	13.35 (0.0710)	

Table 6를 살펴보면 강우량을 대표하는 파라미터 β_1 의 t-value가 17.83(95%기준 1.97이상)으로 포트홀 발생확률 예측에 유의한 변수임을 알 수 있다. 특정 강우량 수준에서 포트홀이 1개 이상 발생할 확률밀도함수를 도식하면 Fig.4와 같다.

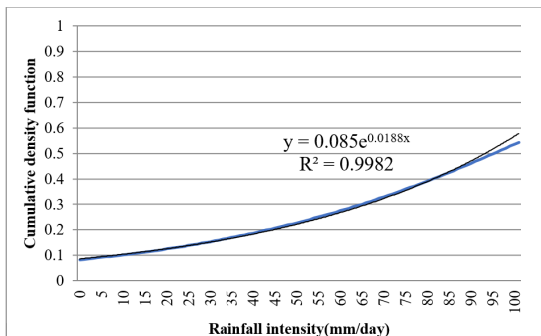


Fig. 4. Cumulative density function of pothole occurrence by rainfall intensity (Case: $N(P) \geq 1$)

Table 7. Probability density function pothole occurrence

Rainfall intensity (mm)	Probability density for pothole occurrence
1	8.5%
10	10.2%
20	12.5%
30	15.4%
40	18.7%
50	22.7%
60	27.5%
70	32.9%
80	39.1%
90	46.1%
100	53.6%

1개 이상 포트홀 발생확률은 우천 영향권에서의 누적 강우량이 1mm이상일 경우 8.5%로 시작하여, 100mm일 경우 50%를 상회한다. 발생확률을 기준으로 해당 강우량을 역으로 분석해 보면 10%-9mm, 20%-44mm, 30%-65mm, 40%-82mm로 나타난다. 분석 구간의 강우 발생확률 95% 수준에서의 강우강도가 70mm 수준임을 감안하면, 강우 발생 시 포트홀 발생 확률은 95% 신뢰수준에서 8.5%~32.9% 수준이 된다. 즉, 우천 강도는 포트홀 발생확률에 영향을 준다고 결론지을 수 있으며, 포아송 감마 모델을 통해 도출된 포트홀과 강우량의 함수 관계는 Eq.(7)으로 표현 가능하다.

$$\hat{N}(P|R_x) = 0.085e^{0.0188x} \quad (R^2 = 0.99982) \quad (7)$$

Where, x denotes rainfall intensity(mm)

Eq.(7)은 비선형으로, 강우량 1mm~100mm까지의 변화량을 선형 모형으로 가정 시 강우 1mm당 포트홀 발생확률은 0.46% 증가하는 것으로 분석되었다.

4.4 경미한 강우에 따른 포트홀 발생특성

미미한 강우량의 기준으로 설정한 1mm, 3mm, 5mm 3가지 대안과 비영향권 발생확률을 비교한 결과는 Table 8과 같다.

Table 8은 일단 소량의 비(0.5~1.0mm이상)라도 내리면 포트홀 발생특성이 변화하는 것을 보여준다. 3일간의 누적강우량 0mm일 경우 1개 이상 발생확률은 1.5%, 발생강도(λ) 0.03개이었으나, 소량의 비라도 내리면 발생확률이 3.9%, 발생강도는 0.06이상으로 2배 이상 증가하였다.

Table 8. Pothole occurrence characteristics at minor rainfall intensities

Contents	Sunny day		1mm standard		3mm standard		5mm standard	
	0	0.5~	0.5~ 1.0	1.0~	0.5~ 3.0	3.0~	0.5~ 5.0	5.0~
D	526	896	127	861	250	738	317	671
$D(P)$	8	92	5	87	8	84	10	82
$N(P)$	16	208	8	200	15	193	20	188
$Prob(P \geq 1)$	1.5	10.3	3.9	10.1	3.2	11.4	3.2	12.2
λ	0.03	0.23	0.06	0.23	0.06	0.26	0.06	0.28

단 1mm, 3mm, 5mm 대안간의 차이는 크지 않았다. 기준을 확대하여 10mm 수준에 대해 추가적으로 분석해 보았으나 발생확률은 3.7%로 큰 변화가 없었고, 20mm 기준에서 5.7%까지 증가함을 확인할 수 있었다. 결과적으로 적은 양의 비라도 내리면 발생확률과 강도에 2배 이상의 영향을 미치나, 10mm 수준까지는 그 편차가 크지 않음을 알 수 있다.

4.5 리스크 기반 도로 순찰 차별화 전략

앞서 분석된 포트홀 발생확률을 근거로 특정 리스크 관리수준에서의 순찰빈도를 제시하였다. 시나리오는 영향권과 비영향권으로 구분하고, 포트홀 관리 신뢰수준은 95%와 90%수준으로 정의하여 결과를 제시하였다. 순찰의 단위를 1일로 설정하는 경우 시계열 포트홀 발생확률은 조건부 확률로써 Eq.(8)로 일반화하여 표현할 수 있다.

$$Prob(P \geq 1)_t = \frac{Prob(P \geq 1)}{1 - \{Prob(P \geq 1)_{t-1}\}} \quad (8)$$

Where, P denotes the number of potholes per day

순찰간격 $z = (1, \dots, \infty)$ 따라 분석된 우천 영향권 및 비영향권별 90%, 95% 신뢰수준을 만족하는 순찰빈도 분석결과를 Table 9에 요약하여 제시하였다.

그 결과 3일에 1회만 순찰해도 신뢰수준 95%를 충족하고, 90%수준은 6일에 1회 면 충족 가능하다. 그러나 우천 영향권에서는 매일 1회씩 순찰해야 90%(89.7%)를 충족 가능하며, 신뢰수준을 95%로 상향할 경우 1일 2회 이상의 순찰이 필요하는 결론이 도출된다. 본 연구에서는 신뢰수준 95%수준에서 우천 비영향권에서는 3일에 1회, 영향권에서는 1일 2회를 적정 순찰간격으로 제시한다.

Table 9. Road patrol interval at confidence levels by weather condition

Period of influence (S_p) : $Prob(P \geq 1 S_p) = 0.015$			Influence-free (R_3) : $Prob(P \geq 1 R_3) = 0.103$		
Interva l (z)	Reliability $Prob(P \geq 1)_t$	Conf. level	Interva l (z)	Reliability $Prob(P \geq 1)_t$	Conf. level
1	98.5%	95%	1	89.7%	90%
2	97.0%		2	78.2%	N/A
3	95.5%		3	66.7%	N/A
4	93.9%	90%	4	55.3%	N/A
5	92.4%		5	43.8%	N/A
6	90.9%		6	32.3%	N/A
7	89.4%	N/A	7	20.8%	N/A
8	87.8%	N/A	8	9.3%	N/A
9	86.3%	N/A	9	0.0%	N/A
10	84.8%	N/A	10	0.0%	N/A

5. 결론

본 연구에서는 그 동안 데이터 확보의 한계로 인해 시도되지 못했던 포트홀과 우천특성의 관계를 정립하고, 리스크 기반의 가변화 순찰 간격을 제시하고자 하였다. 이를 위해 1)우천특성에 따른 포트홀 발생특성 변화, 2)우천 영향의 지속성, 3)우천강도의 영향, 4)리스크 관리 수준 및 국면전환에 따른 최적 순찰빈도에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구의 결론을 다음과 같이 제시한다.

먼저 우천은 포트홀 발생 특성에 변화를 준다. 우천시에는 포트홀 발생확률이 2.4배 발생강도는 2.6배 증가한다. 이는 우천 시에는 순찰빈도를 증가시켜야 함을 의미한다. 본 연구에서 도출된 흥미있는 결과 중 하나는 이 특성이 비가 그친 이후에도 한동안 지속된다는 것이다. 비가 오는 당일과 영향권 내의 포트홀 발생확률은 각각 10%, 11.3%로 동일 수준이었다. 특히 전체 포트홀의 93%가 3일 영향권에서 내에서 발생하는 만큼 관리자는 포트홀 점검 빈도를 유지할 필요가 있다.

다음으로 강우강도가 높을수록 포트홀 발생확률, 빈도가 증가함을 알 수 있었다. 포아송-감마모델 적용결과 강우강도는 유의한 설명변수로 분석되었으며, 증가함수를 선형으로 변형 시 강우 1mm당 포트홀 발생 확률이 0.46% 증가함을 알 수 있었다. 한편 미미한 강우량도 포트홀 발생에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 0.5mm~1.0mm수준의 강우에도 발생확률과 강도는 2배 이상 증가하였다. 본 결과를 통해 소량의 강우 시에도 순찰 빈도를 늘려야 하는가에 대한 의문이 해소되었다.

마지막으로 신뢰수준 95%를 포트홀 리스크 관리기준으로 설정 시, 비영향권에서는 3일에 1회, 영향권에서는 1일 2회 이상의 순찰이 필요하다는 결론이 도출되었다. 단 최적 간격은 관리자가 설정하는 신뢰수준과 지역적 포트홀 발생 특성에 따라 변화 될 수 있음을 유의해야 한다.

본 연구는 그간 획일적으로 적용해 오던 고정간격 순찰주기의 비효율성 개선과 도로이용자의 서비스 만족도 제고, 그리고 도로 자산관리 고도화의 관점에서 연구의 기여도가 있다고 판단된다. 단 우천 영향의 정량화와 관리자의 간편한 의사결정에 중점을 두면서, 다양한 설명변수들이 배제되었다. 향후 연구에서는 온도, 차량하중, 포장 유형 및 상태, 하부구조 등 포트홀 발생인자에 대한 종합적 고려를 통해 포트홀 발생 예측모형으로 고도화할 필요가 있다.

References

- [1] T. P. Wilson, A. R. Romine, Materials and Procedures for Repair of Potholes in Asphalt-surfaced Pavement - Manual of Practice, Technical report (Report No. FHWA-RD-99-168), Federal Highway Administration (FHWA), U.S., p.71.
- [2] K. Kamal, S. Mathavan, T. Zafar, I. Moazzam, A. Ali, U. Ahmad, M. Rahman, "Performance assessment of Kinect as a sensor for pothole imaging and metrology", *International Journal of Pavement Engineering*, Vol.19, No.7, pp.565-576, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1187730>
- [3] A. Picche, How Potholes are Eating City Budgets [Internet], CBS interactive, c2014 [cited 2014 Feb. 24], Available from: <http://www.cbsnews.com/news/how-potholes-are-eating-city-budgets/> (accessed July 12, 2020).
- [4] G. Morosiuk, M. J. Riley, J. B. Odoki, Highway Development & Management Series Volume Six : Modelling Road Deterioration and Work Effects, p.296, The World Road Association (PIARC) on the behalf of the ISOHDM, 2001, pp.B5-1~B5-9. ISBN: 2-84060-102-8.
- [5] K. Kobayashi, K. Kaito, "Obstacle emergence risk and road patrol policy", *Advances in Civil Engineering*, Vol. 2012, Article ID 567509, pp.1-9, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1155/2012/567509>
- [6] S. Rose, B. Mathew, K. P. Issac, A. S. Abhaya, "Risk based probabilistic pavement deterioration prediction models for low volume roads", *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 19, No. 1, pp.88-97, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1162308>

한 대 석(Daeseok Han)

[정회원]



- 2006년 2월 : 국립한밭대학교 대학원 도시공학과(공학석사)
- 2013년 2월 : 교토대학교 공학대학원 도시사회공학과(공학박사)
- 2015년 10월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>

자산관리, 포장관리시스템, 기능성 포장