

DataPave 프로그램을 이용한 포장파손예측모델개발

Development of Pavement Distress Prediction Models Using DataPave Program

진 명 섭* · 윤 석 준**
Jin, Myung-Sub · Yoon, Seok-Joon

ABSTRACT

The main distresses that influence pavement performance are rutting, fatigue cracking, and longitudinal roughness. Thus, it is important to analyze the factors that affect these three distresses, and to develop prediction models. In this paper, three distress prediction models were developed using DataPave program which stores data from a wide variety of pavement sections in the United States. Also, sensitivity studies were conducted to evaluate how the input variables impact on the distresses. The result of sensitivity study for the prediction model of rutting showed that asphalt content, air void, and optimum moisture content of subgrade were the major factors that affect rutting. The output of sensitivity study for the prediction model of fatigue cracking revealed that asphalt consistency, asphalt content, and air void were the most influential variables. The prediction model of longitudinal roughness indicated asphalt consistency, #200 passing percent of subgrade aggregate, and asphalt content were the factors that affect longitudinal roughness.

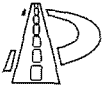
Keywords : rutting, fatigue cracking, longitudinal roughness, prediction model, DataPave program, sensitivity study

요 지

포장의 공용성에 영향을 미치는 주요파손은 소성변형, 피로균열, 종단평탄성이다. 따라서 이들 세가지 파손량에 영향을 미치는 요인들을 분석하고 예측모델을 개발하는 것이 포장의 공용성 관리면에서 중요하다. 본 논문에서는 미국에서 개발되어 다양한 포장구간에 대한 광범위한 데이터가 축적되어 있는 DataPave 프로그램을 이용하여 세가지 파손량과 각각에 영향을 미치는 인자들을 추출한 후 파손예측모델을 개발하였다. 개발된 모델의 입력변수들이 각각의 파손량에 미치는 영향을 파악하기 위해 민감도분석을 수행하였다. 소성변형 예측모델의 민감도분석결과 아스팔트함량, 공극율, 노상의 최적함수비가 주요영향인자로 나타났으며, 피로균열예측모델의 경우 아스팔트점도, 아스팔트함량, 공극율 순으로 나타났다. 종단평탄성 예측모델 분석결과 아스팔트점도, 노상골재의 200번체 통과율, 아스팔트함량 순으로 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 소성변형, 피로균열, 종단평탄성, 예측모델, 데이터베이스 프로그램, 민감도분석

* 정회원 · 한남대학교 토목환경공학과 부교수
** 정회원 · (주)대륜엔지니어링 도로부 사원



1. 서 론

국내의 아스팔트포장은 교통량 증가와 제반환경의 변화 등으로 인하여 파손이 급증하고 있는 실정이며 이에 따라 유지보수비용도 해마다 기하급수적으로 증가하고 있다. 따라서 포장을 경제적이고 효율적으로 관리하기 위해서는 포장파손을 줄이려는 다각적인 노력이 절실하다. 이에 따라 새로운 포장재료의 개발, 여러 가지 포장공법의 활용 등 포장의 파손을 줄이기 위한 다양한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

한편, 포장유지관리시스템(Pavement Management System : PMS)을 구축하고 이를 이용하여 포장상태를 합리적으로 진단하고 적절한 유지보수공법을 제시하기 위해서 포장파손예측모델의 개발에 대한 필요성이 끊임없이 제기되고 있다. 현재 국내에서는 포장의 유지보수시기와 유지보수공법을 결정하기 위해 AASHTO도로시험에서 개발된 서비스지수(Present Serviceability Index : PSI)개념과 일본에서 개발된 유지관리지수(Maintenance Control Index : MCI), 또는 국내에서 개발된 고속도로 포장상태 평가지수(Highway Pavement Condition Index : HPCI)나 종합적 포장상태 평가지수(Universal Pavement Condition Index : UPCI) 등을 활용하고 있다. 이 지수들에 공통적으로 포함되어 있는 대표적인 포장파손은 소성변형, 피로균열, 종단평탄성이다.^(2,3) 따라서 이들 파손에 영향을 주는 인자들을 분석하고 포장파손예측모델을 개발하여 PMS에 활용할 수 있다면 증가하고 있는 유지보수비용의 부담을 줄일 수 있을 것이다.

본 연구에서는 이러한 배경을 바탕으로 소성변형, 피로균열, 종단평탄성에 영향을 주는 인자들을 선정하고 이에 대한 데이터를 수년간 미국에서 수행된 장기공용성(Long-Term Pavement Performance : LTPP)연구의 산물인 DataPave 프로그램으로부터 수집하여 포장파손예측모델을 개발하고자 한다. 또한 통계적 분석을 통하여 모델의 적합성과 유의성을 검토한 뒤, 각각의 예측모델의 입력변수들이 소성변형, 피로균열, 종단평

탄성에 미치는 영향을 파악하기 위해 민감도분석을 실시하고자 한다.

2. DataPave 프로그램의 개요

공용성이 우수한 포장을 시공하기 위해서는 공용성에 영향을 미치는 여러 인자들을 분석하여 설계에 반영해야 한다. 이러한 목적을 달성하기 위해 미국의 전략적 도로연구프로그램(Strategic Highway Research Program : SHRP)에서는 1987년에 LTPP 연구계획을 구축하고, 이 연구수행을 위해 1989년부터 20년 계획으로 미국 전역에 걸쳐 지정된 포장 구간에 대한 광범위한 데이터 수집을 실시하고 있다. 이러한 광범위한 데이터들의 실제적인 사용도구로서 만들어진 것이 DataPave 프로그램이다.⁽⁷⁾

DataPave 프로그램은 LTPP 지역 선택 모듈, 포장 단면 정보 모듈, 파손량 그래프 모듈, LTPP 데이터 베이스 추출 모듈의 4가지 모듈로 구성되어 있다. 이 중 파손량 자료에는 소성변형, 국제평탄성 지수(International Roughness Index : IRI, m/km), 피로균열, 횡단균열, 종단균열, 단차, 박리, 펀치아웃의 8가지 대표적인 파손에 대한 자료가 포함되어 있으며, LTPP 데이터 베이스 추출 모듈을 이용해 다양한 포장정보를 Excel이나 Text 등의 형식으로 추출할 수 있다. 예로 그림 1과 그림 2에 포장 단면 정보 모듈과 LTPP 데이터 베이스 추출 모듈을 각각 보여 주고 있다.

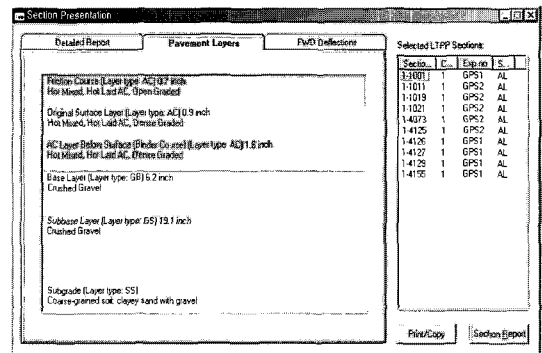


그림 1. 포장 단면 정보 모듈

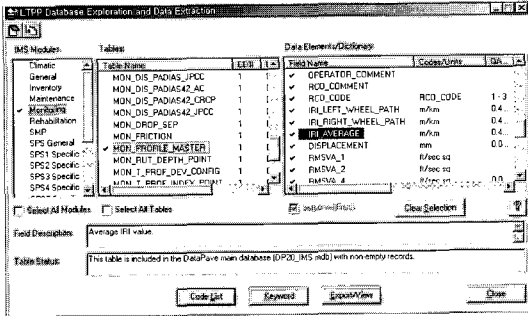
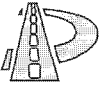


그림 2 LTPP 데이터베이스 추출 모듈

또한, DataPave 프로그램을 구성하는 데이터는 표준 포장 설계로 시공되거나 최초 덧석우기가 진행된 일반적인 포장 단면인 일반포장연구(General Pavement Studies : GPS)구간에 대한 포장체 구성형태별 9가지의 데이터와, 특별한 영향인자에 대한 연구를 위해 따로 건설된 특별포장연구(Special Pavement Studies : SPS)구간에 대한 연구 영역별 9종류의 데이터가 있다.⁽⁷⁾ 본 연구에서는 해석기층을 가진 아스팔트 포장 단면으로 구성되어 있는 GPS-1 데이터와 안정처리 기층을 갖고 있는 아스팔트 포장 단면으로 구성되어 있는 GPS-2 데이터만을 이용하였다.

3. 영향인자 선정

3.1 소성변형

소성변형은 과중한 교통하중으로 인하여 아스팔트 포장의 횡단면상에 변형이 축적되어 차바퀴가 닿는 부분에 나타나는 영구변형이다. 최근 중하중의 교통량이 많은 고속도로나 국도 등의 도로에 많이 발생하여 심각한 유지보수비용을 초래함으로써 이의 방지 대책이 우리 나라 도로분야의 중요한 이슈로 등장하고 있다.

소성변형은 과다한 교통하중 외에도 노상의 지지력이 낮거나, 골재 입자 사이에서 결합재로서의

기능을 못하고 윤햄제와 같이 작용하여 골재 입자간의 내부마찰력을 감소시키는 과다한 아스팔트 함량과 이로 인한 공극률의 감소로 인해 발생하기도 한다. 또한 아스팔트 혼합물의 강성 저하, 부족한 포장 두께, 수분의 침투로 인한 노상의 약화, 여름철의 고온으로 인한 포장체의 지지력 저하 등이 소성변형을 일으키는 요인으로 알려져 있다.^(3,6)

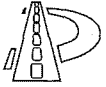
이러한 분석을 배경으로 하여 본 연구에서는 소성변형 발생에 영향을 미치는 인자들을 9개로 분류하여 다음과 같이 선정하였다. :

- 8.2ton 누적등가단축하중 (ESAL), 대
- 아스팔트혼합물의 공극율, %
- 600C에서의 아스팔트 점도, poise
- 아스팔트혼합물의 아스팔트 함량, %
- 아스팔트 침입도,
- 노상골재의 200번체 통과중량백분율, %
- 노상의 최적함수비, %
- 아스팔트 콘크리트층의 두께, cm
- 연평균 320C 이상 일수, 일

3.2 피로균열

피로균열은 반복되는 교통하중의 영향으로 교통진행방향으로 발생하는 파손이다. 초기 피로균열은 미세균열의 형태로 시작되지만 하중이 반복될수록 균열이 더욱 진행되어 거북등과 같은 격자 형태의 거북등균열로 나타난다. 이러한 피로균열이 더욱 심해지면 포트홀과 같은 붕괴현상까지 나타나게 되어 결국은 포장수명을 단축시키는 주된 요인이 된다.

피로균열의 발생은 주로 과중한 교통하중이 반복적으로 작용하는 것이 주된 원인이 되며, 아스팔트의 지나친 노화로 인한 경화, 아스팔트층의 두께가 부족하거나 지나치게 단단한 아스팔트를 사용하는 경우, 그리고 부적절한 포장배수로 인한



포장 각 층의 강도상실이 피로균열을 일으키는 요인으로 알려져 있다.^(4,6,8)

이러한 분석을 배경으로 하여 본 연구에서는 피로균열 발생에 영향을 미치는 인자들을 8개로 분류하여 다음과 같이 선정하였다. :

- 8.2ton 누적등가단축하중 (ESAL), 대
- 아스팔트혼합물의 공극율, %
- 60°C에서의 아스팔트 점도, poise
- 아스팔트혼합물의 아스팔트 함량, %
- 기층의 두께, cm
- 아스팔트 콘크리트층의 두께, cm
- 재령, 년수
- 연평균 강우량, mm

3.3 종단평탄성

종단평탄성은 소성변형, 피로균열과 더불어 포장의 공용성에 영향을 미치는 주요 요소로써 특히 승차감에 직접적인 영향을 주는 척도가 되며, 포장의 차바퀴가 닿는 부분에 교통진행방향으로 파장이 비교적 긴 요철형태로 발생한다.

종단평탄성은 주로 불균일한 교통하중에 의해 파생되는 변형량의 차이로 발생하며 소성변형, 피로균열, 라벨링과 같은 포장파손이 심각해짐에 따라 저하될 수 있다. 또한, 아스팔트혼합물의 품질 불량, 노상지지력의 부족, 불량한 포장 구조 등이 종단평탄성의 저하를 가져오는 요인으로 알려져 있다.^(1,2) 따라서 소성변형이나 피로균열의 발생요인과 비슷한 다음과 같은 8개의 인자들을 종단평탄성에 영향을 미치는 요인들로 선정하였다. :

- 8.2ton 누적등가단축하중 (ESAL), 대
- 아스팔트혼합물의 공극율, %
- 60°C에서의 아스팔트 점도, poise
- 아스팔트혼합물의 아스팔트 함량, %
- 노상골재의 200번체 통과중량백분율, %
- 아스팔트 콘크리트층의 두께, cm

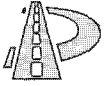
- 재령, 년수
- 연평균 32°C 이상 일수, 일

4. 데이터의 수집 및 이용

예측모델 개발을 위한 입력 데이터로써 앞서 서술한 각 파손량과 영향인자들을 DataPave 프로그램으로부터 수집하였다. 이들 데이터의 추출은 LTPP 지역 선택 모듈을 이용하여 미국내 전 지역의 GPS-1과 GPS-2 구간을 선택하고 이 구간에 대하여 그림 2에 보인 것과 같은 LTPP 데이터 베이스 추출 모듈로부터 엑셀 파일의 형식으로 이루어졌다.

소성변형 데이터는 모든 구간마다 500ft(152.4m) 구역에 대해서 50ft(15.24m) 간격으로 바퀴자국 좌우 2개씩 11개 지점의 소성변형 깊이(단위 : mm) 중에서 큰 값들을 선택하여 평균한 값을 사용하였다. 피로균열 데이터는 위와 같은 구간 내 12ft(3.66m)폭의 한 차로를 기준으로 구성되어 있는데, 피로균열의 심한 정도에 따라 전단면, 반단면, 부분단면 피로균열로 구분한 3가지 면적(단위 : m²)을 모두 합하여 사용하였다. 종단평탄성 데이터는 1km구역에 대해서 프로필로미터에 의해 측정되는 국제 평탄성 지수인 IRI(International Roughness Index : m/km)로 저장되어 있는데 바퀴자국 좌우의 IRI 값을 평균한 값을 사용하였다.

교통량은 8.2ton 누적등가단축하중(ESAL)으로써 데이터베이스에는 매년 ESAL 값이 저장되어 있어 포장 신설 후 파손 측정년도까지의 ESAL을 누적하였다. 아스팔트혼합물의 공극율, 아스팔트 함량, 60°C의 아스팔트 점도, 아스팔트의 침입도, 노상골재의 200번체 통과중량백분율, 노상의 최적 함수비 등은 시공시의 데이터를 사용하였다. 아스팔트층의 두께는 시공시 역청안정기층을 포함한 두께이며 표층 위의 표면처리층과 실코트층은 제외시켰다. 연평균 32°C 이상 일수와 연평균 강우



량 데이터는 1990년도 이후의 데이터가 없어서 1990년도까지의 값들을 평균하여 사용하였으며, 재령은 포장이 신설 시공된 이후부터 파손 측정년도까지의 경과 년수로 하였다.

5. 예측모델 개발

포장파손량인 소성변형, 피로균열, 종단평탄성을 종속변수로 하고 각각의 영향인자들을 독립변수로 하여 먼저 각각의 독립변수들이 종속변수에 대하여 어떠한 관계가 있는지를 독립변수별로 플롯트 해 보았다. 이러한 과정을 통하여 비선형 다중 회귀분석을 하기 위해 필요한 종속변수와 각 독립변수와의 적합한 함수의 형태를 회귀분석을 이용하여 구하였으며, 일관성 없는 데이터는 배제하였다. 각각의 구간별로 독립변수들의 데이터가 5개 이상 있는 구간들만을 선택하고 몇 개의 독립변수 데이터가 없는 것은 이전에 구해 놓은 각 독립변수별 회귀식으로부터 계산하여 추가시켰다. 이러한 방법으로 예측모델 개발에 필요한 입력 데이터를 정리하였고, 한 예로 소성변형 예측모델 개발에 이용된 LTPP 지점의 정보와 입력 데이터를 표 1과 2에 각각 보여 주고 있다.

예측모델 개발은 DataFit라는 회귀분석 프로그램을 이용하였으며 각각의 독립변수 계수들의 P-value와 결정계수 R^2 값을 기준으로 하여 통계적으로 유의한 회귀모형을 찾는 시행착오의 방법으로 비형 다중 회귀분석을 실시하였다. 여러 가지 모델 중 각 독립변수 계수들의 P-value가 0.1 이하이고 R^2 이 가장 큰 모델을 제안 모델로 하였다. 또한 잔차분석을 통하여 모델의 적합성을 검증하였다.

비선형 다중 회귀분석 결과, 아스팔트포장의 소성변형 예측모델, 피로균열 예측모델, 종단평탄성 예측모델은 각각 아래의 식 (1), (2), (3)과 같은 형태로 개발되었다.

표 1. 소성변형 데이터에 이용된 LTPP 지점 정보

Section I.D	AREA명	건설 년도	파손 측정 년도
1	1-1001	Alabama Lee	80 93
2	1-1011	Alabama Lauderdale	85 93
3	1-1021	Alabama Elmore	85 93
4	1-4073	Alabama Jackson	88 93
5	1-4126	Alabama Cullman	88 93
6	1-4129	Alabama Coosa	89 93
7	1-4155	Alabama Houston	75 95
8	2-1004	Alaska Anchorage	77 90
9	12-4097	Florida Jackson	86 94
10	12-4107	Florida ST Lucie	83 93
11	13-1001	Georgia Walton	86 92
12	13-1031	Georgia Dawson	81 93
13	13-4111	Georgia Oconee	80 92
14	13-4119	Georgia Bartow	78 92
15	17-1003	Illinois Clinton	86 90
16	20-1005	Kansas Franklin	71 90
17	21-1010	Kentucky Owsley	85 93
18	26-1012	Michigan Mecosta	80 92
19	26-1013	Michigan Montcalm	80 92
20	27-1019	Minnesota Mille Lacs	80 94
21	28-1802	Mississippi Convington	83 95
22	47-1028	Tennessee Hawkins	83 91
23	47-3110	Tennessee MC Minn	81 89
24	47-9025	Tennessee Cannon	80 91
25	48-1049	Texas Nacogdoches	84 91
26	48-1050	Texas Grimes	83 93
27	48-1068	Texas Lamar	85 91
28	48-1070	Texas Kaufman	77 91
29	48-1076	Texas Terry	77 93
30	48-1087	Texas Smith	73 91
31	48-1096	Texas Medina	79 91
32	48-1109	Texas Walker	84 93
33	48-1116	Texas Rusk	87 91
34	48-1122	Texas Willson	74 95
35	48-1168	Texas Wood	85 91
36	48-1174	Texas Nueces	73 92
37	48-1178	Texas Burleson	88 93
38	48-1181	Texas Live oak	80 91
39	48-1183	Texas Garza	75 93
40	48-2108	Texas Galveston	85 91
41	48-2172	Texas Mitchell	82 95
42	48-3559	Texas Walker	70 95
43	48-3579	Texas Van zandf	87 95
44	48-3739	Texas Kenedy	82 91
45	49-1008	Utah Sevier	76 90
46	53-1005	Washington Adams	73 89

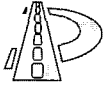
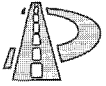


표 2 소성변형 예측모델 입력 데이터

	Rut Depth (mm)	Acc. ESAL (대)	AP 공극율 (%)	AP 점도 (poise)	AP 함량 (%)	AP 침입도 (0.1mm)	Sub.Agg #200 (%)	Sub. OMC (%)	HMAC 두께 (cm)	연평균32℃ 이상일수 (days)
1	7.09	1322586	3.5	1993	6.2	79	20.7	21.6	18.54	60
2	4.09	864513	7.1	1819	4.9	100	55.0	11.5	28.96	49
3	5.73	1353679	3.8	1767	5.9	91	59.0	13.3	22.61	58
4	2.91	676217	6.4	2136	5.4	88	76.2	5.3	35.56	39
5	3.45	100000	8.3	2218	5.6	72	25.2	8.8	32.26	41
6	4.36	697278	6.6	1622	5.1	97	40.5	8.8	27.69	47
7	4.09	762572	7.1	2033	5.7	71	41.9	10.3	28.96	66
8	10.00	597345	0.4	404	6.8	146	26.0	27.9	10.16	149
9	8.45	1666537	3.9	2146	6.5	73	9.7	24.8	14.99	76
10	4.73	771064	3.2	2146	5.3	85	45.9	9.2	26.16	65
11	4.09	244285	5.7	2347	5.6	75	53.5	11.5	19.05	47
12	8.00	1559274	2.0	2286	5.9	98	46.0	14.8	25.40	118
13	5.18	707366	6.6	2007	5.8	85	40.2	15.8	20.32	48
14	7.33	1387836	5.0	1900	6.5	70	48.0	14.0	12.70	34
15	4.09	192918	6.4	1899	4.9	73	55.0	15.6	27.94	32
16	3.64	233681	4.9	2506	4.6	90	97.0	18.0	29.21	46
17	5.73	905155	3.0	1767	5.7	91	33.9	16.8	16.00	28
18	8.45	1935924	2.7	674	5.4	131	9.7	24.8	15.24	126
19	6.36	971412	2.5	1440	5.7	97	27.4	19.6	19.05	86
20	6.18	574798	7.2	1503	6.1	90	14.1	12.7	12.19	82
21	4.09	497636	7.1	2075	6.1	75	15.0	8.8	28.96	55
22	3.91	745673	7.5	1987	4.8	70	83.0	18.5	20.32	14
23	3.64	311416	9.7	1772	5.5	84	64.0	16.5	31.24	28
24	4.91	1138512	3.6	1992	5.4	71	43.6	14.9	25.40	42
25	8.64	1710121	3.9	2057	7.0	76	8.3	25.2	13.97	79
26	7.45	1419664	3.9	1980	5.8	107	17.6	19.7	17.53	90
27	3.18	291920	7.9	1976	5.4	84	85.0	12.2	25.40	78
28	4.09	871916	7.1	1849	4.9	75	55.0	11.5	24.13	91
29	6.91	436403	2.1	895	6.4	90	22.3	21.1	13.97	78
30	7.18	1347310	3.0	1254	6.1	105	19.9	14.7	19.05	75
31	3.91	1089976	4.7	2411	4.5	99	57.8	10.7	17.27	19
32	5.91	551789	5.0	1800	5.2	92	32.0	18.7	21.84	89
33	5.18	707366	5.3	2181	5.7	75	40.2	14.2	24.38	71
34	5.18	516469	2.8	1962	5.6	101	40.2	16.0	24.38	115
35	3.27	100000	8.7	2019	6.0	81	68.9	14.0	33.27	69
36	7.36	414285	2.7	995	5.3	110	18.3	22.3	11.43	116
37	4.00	246811	7.2	2037	5.9	62	56.4	11.1	20.32	99
38	9.18	708359	2.4	927	7.1	97	4.5	19.6	17.78	131
39	7.55	1340238	2.5	916	5.3	93	16.7	22.8	16.51	75
40	2.91	172891	9.6	2765	4.8	81	76.2	15.5	35.56	15
41	5.55	842595	2.7	1831	5.3	92	35.9	17.1	25.40	87
42	2.91	723621	9.6	2503	4.0	63	28.0	17.6	35.56	89
43	5.82	935702	5.3	2119	5.8	91	33.0	14.4	22.35	72
44	7.73	618593	2.3	1853	5.7	110	15.3	16.4	16.76	117
45	9.18	1828948	1.0	850	7.1	84	13.0	26.3	23.37	43
46	7.45	2168147	2.6	1158	6.3	93	17.6	22.5	26.16	25



소성변형량, $mm = \text{ExpA} - (5.829\text{E}-4) * \text{VIS} + (6.406\text{E}-6) * \text{VIS} * \text{PEN} - 0.854$

여기서, $A = (1.407\text{E}-7) * \text{EAL} - 0.025 * \text{AIR} + 0.114 * \text{AP} - (5.507\text{E}-3) * \#200 + (2.494\text{E}-4) * \#200 * \text{OMC} - 0.023 * \text{ATK} + (1.409\text{E}-3) * \text{DAY} + 1.383$ (1)

피로균열량, $m^2/152.4m = (2.452\text{E}-6) * \text{EAL} * \text{AGE} - 110.340 * \text{AIR} + 0.061 * \text{VIS} + 59.553 * \text{AP} + 0.034 * \text{PRE} + 697.697 * \text{AIR} / \text{AP} - 0.612 * \text{BTK} * \text{ATK} - 323.002$ (2)

중단평탄성량(IRI), $m/km = \text{ExpA} + (7.983\text{E}-9) * \text{EAL} * \text{AGE} + (8.236\text{E}-3) * \text{AP} * \text{AIR} - 0.055 * \text{AIR} - (1.412\text{E}-4) * \text{VIS} - 0.017 * \text{ATK} + 0.888$

여기서, $A = (3.339\text{E}-3) * \#200(1.698\text{E}-3) * \text{DAY}$ (3)

- EAL : 8.2ton 누적등가단축하중, 대
- AIR : 아스팔트혼합물의 공극율, %
- AP : 아스팔트 함량, %
- #200: 노상골재의 200번체 통과중량백분율, %
- OMC: 노상의 최적함수비, %
- ATK : 아스팔트 콘크리트층의 두께, cm
- DAY : 연평균 32°C 이상 일수, 일
- VIS : 60°C에서의 아스팔트의 점도, poise
- PEN : 아스팔트의 침입도
- AGE : 재령, 년수
- PRE : 연평균 강우량, mm
- BTK : 기층의 두께, cm

본 연구에서 개발된 모델들의 회귀계수들은 통계적 유의수준 10%에서 모두 유의하였으며, 결정

계수와 표준편차는 소성변형 예측모델이 각각 0.866, 0.410이고, 피로균열 예측모델이 각각 0.903, 23.610이며, 중단평탄성 예측모델이 각각 0.854, 0.101로 나타났다. 데이터베이스에 저장되어 있는 실측값과 본 예측모델을 이용한 예측값과의 잔차분포를 보면 세 가지 모델이 모두 어떤 특정한 분포를 보이지 않고 고루 분포되어 있음을 알 수 있다. 예로써 피로균열 예측모델의 잔차분포를 보면 다음 그림 3과 같으며 다른 모델들도 비슷한 경향을 보이므로 본 논문에는 생략하기로 한다.

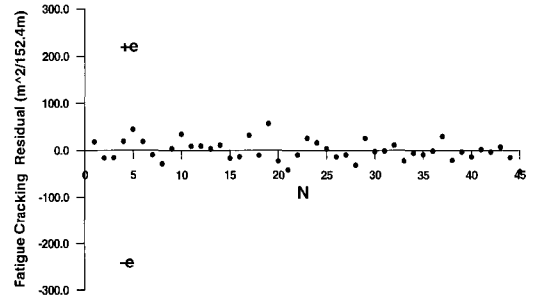
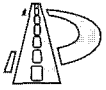


그림 3. 피로균열 예측모델의 잔차분포

각 모델의 결정계수가 비교적 높고 잔차분포가 고른 것으로 볼 때, 본 연구에서 개발된 모델들이 각각의 영향인자에 대한 데이터만 지속적으로 제공이 된다면 파손량을 예측하는데 충분히 활용될 수 있음을 알 수 있다.

6. 민감도 분석

개발된 예측모델을 이용하여 각각의 파손량에 영향인자들이 미치는 정도를 파악하기 위해 민감도 분석을 실시하였다. 민감도 분석은 하나의 독립변수이외의, 나머지 모든 변수들은 고정시키고 분석대상 독립변수를 일정한 범위 내에서 단계값 만큼 변화시켜 가면서 종속변수의 변화량을 분석하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 적용하고 있는 값들을 변화 범위로 하고 일정한 단



계값들을 부여하여 민감도 분석을 시행하였다. 단, 포장이 신설 시공되는 시점을 기준으로 포장이 공용되기 이전에 해당하는 변수를 적용하기로 하고 시간에 관련된 독립변수인 교통량과 재령은 분석에서 제외하였다.

6.1 소성변형 예측모델의 민감도 분석

소성변형 예측모델의 민감도 분석은 표 3에 제시한 값들을 기준으로 실시하였다.

표 3. 소성변형 예측모델의 민감도 분석에 사용된 데이터

소성변형 영향인자	중간값	변화범위	단계값
8.2ton 누적등가단축하중, 백만대	1.5	-	-
아스팔트 혼합물의 공극율, %	4.5	2.5-6.5	1
60°C에서의 아스팔트 점도, poise	2000	800-2400	400
아스팔트 혼합물의 아스팔트 함량, %	6	4.5-6.5	0.5
25°C에서의 아스팔트 침입도, 0.1mm	80	60-100	10
노상골재의 200번체 통과중량백분율, %	20	10-50	10
노상의 최적함수비, %	15	5-25	5
아스팔트 콘크리트층의 두께, cm	10	5-15	2.5
연평균 32°C 이상 일수, days	60	30-70	10

표 3에서 8.2ton 누적등가단축하중은 소성변형 예측모델 개발을 위해 사용된 값들 중 평균적인 값을 사용하였으며, 아스팔트 혼합물의 공극율은 국내 표층용 밀입도 아스팔트 콘크리트의 공극율 규정치인 3-6%의 평균치인 4.5%를 중간값으로 하여 적용하였다. 60°C에서의 아스팔트 점도는 아직 국내에서 조사된 바가 없기 때문에 국내에서 많이 사용하고 있는 AP-5와 AP-3 아스팔트의 침입도 범위인 60-100에 해당하는 점도 분류에 의

한 AC-10과 AC-20 아스팔트 점도 범위인 800-2400poise를 적용하였다. 아스팔트 함량은 국내 표층용 밀입도 아스팔트 혼합물의 아스팔트 함량 규정치인 5-7%를 적용하였으며, 노상골재의 200번체 통과 중량 백분율은 연약지반일 경우 약 50%정도인 점을 감안하여 변화범위를 설정하였다. 나머지 값들도 국내에서 많이 적용하고 있는 값들을 기준으로 하여 설정하였다.

민감도 분석을 실시한 결과를 그림 4와 같이 나타내 보았다.

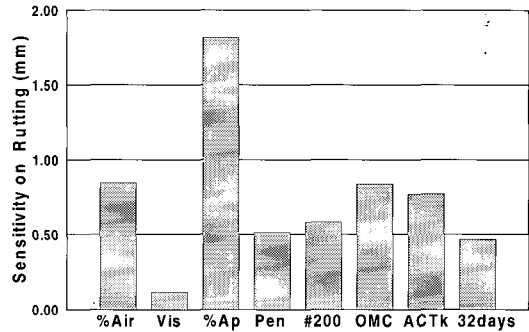


그림 4. 소성변형 예측 모델의 각 변수별 민감도

그림 4에서 알 수 있듯이 아스팔트 함량이 가장 소성변형량에 민감하게 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 공극율, 노상의 최적함수비 순으로 영향을 미치고, 아스팔트 점도에 의한 영향정도가 가장 미미한 것으로 나타났다. 따라서 소성변형의 발생은 과다한 아스팔트 함량의 사용과 이에 따른 공극율의 저하가 가장 큰 원인으로 작용하며 연약한 노상도 소성변형과 밀접한 관계가 있음을 민감도 분석 결과로도 알 수 있다.

6.2 피로균열 예측모델의 민감도 분석

피로균열 예측모델의 민감도 분석은 표 4의 데이터를 이용하여 실시하였다.

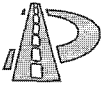


표 4. 피로균열 예측모델의 민감도 분석에 사용된 데이터

피로균열 영향인자	중간값	변화범위	단계값
8.2ton 누적동가단축하중, 백만대	1.5	-	-
제령, 경과년수	15	-	-
아스팔트 혼합물의 공극율, %	4.5	2.5-6.5	1
60°C에서의 아스팔트 점도, poise	2000	800-2400	400
아스팔트 혼합물의 아스팔트 함량, %	6	4.5-6.5	0.5
기층의 두께, cm	20	15-25	2.5
아스팔트 콘크리트층의 두께, cm	10	5-15	2.5
연평균 강우량, mm	1300	1000-1400	100

표 4에서 기층두께와 연간강우량은 국내에서 적용되는 값과 과거의 평균값을 참고로 각각 사용하였으며 나머지 값들은 소성변형 민감도 분석 시 사용한 값들과 같다.

민감도 분석결과를 나타내 보면 그림 5와 같다.

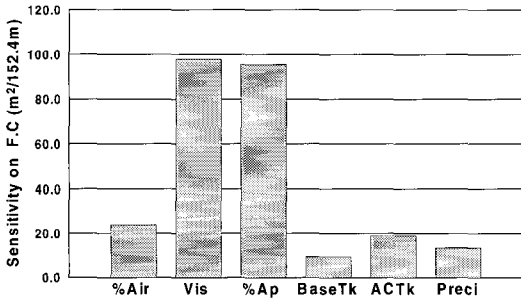


그림 5. 피로균열 예측모델의 각 변수별 민감도

그림 5에서 아스팔트의 점도와 아스팔트 함량이 피로균열에 상당히 영향을 미치는 것으로 나타났으며 기층 두께의 변화가 상대적으로 피로균열에 별로 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이와 같이 피로균열 발생의 가장 큰 원인은 높은 점도의 아스팔트 사용에 따른 아스팔트의 노화가속화와 부족한 아스팔트 함량에 있음이 개발된 예측모델과 민감도 분석에 의해 입증되었다고 할

수 있다.

6.3 종단평탄성 예측모델의 민감도 분석

종단평탄성 예측모델의 민감도 분석에 사용된 데이터는 표 5와 같으며 적용된 변수들의 중간값과 변화범위 등은 앞에서 실시한 민감도 분석에 사용된 것과 같다.

표 5. 종단평탄성 예측모델의 민감도 분석에 사용된 데이터

종단평탄성 영향인자	중간값	변화범위	단계값
8.2ton 누적동가단축하중, 백만대	1.5	-	-
제령, 경과년수	15	-	-
아스팔트 혼합물의 공극율, %	4.5	2.5-6.5	1
60°C에서의 아스팔트 점도, poise	2000	800-2400	400
아스팔트 혼합물의 아스팔트 함량, %	6	4.5-6.5	0.5
노상골재의 200번체 통과중량 백분율, %	20	10-50	10
아스팔트 콘크리트층의 두께, cm	10	5-15	2.5
연평균 32°C 이상 일수, days	60	30-70	10

종단평탄성 예측모델의 민감도 분석 결과는 그림 6과 같다.

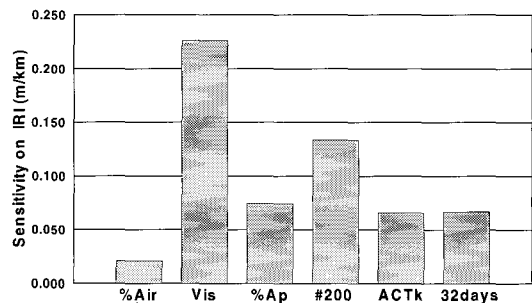


그림 6. 종단평탄성 예측모델의 각 변수별 민감도

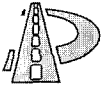


그림 6에서 아스팔트 점도가 가장 중단평탄성에 영향을 미치는 변수이고 그 다음으로 노상골재의 200번체 통과중량백분율인 것으로 나타났으며, 공극율의 영향은 가장 미미하였다. 이와 같이 민감도 분석 결과 중단평탄성이 저하되는 가장 큰 원인은 낮은 점도의 아스팔트 사용과, 노상의 지지력 부족, 과도한 아스팔트 함량으로 볼 수 있다.

7. 결론

본 연구에서는 미국내 포장의 장기공용성 연구를 위하여 구축된 DataPave 프로그램을 이용하여 아스팔트포장의 소성변형, 피로균열, 중단평탄성 파손량과 각각의 영향인자들을 수집하고 포장 파손예측모델을 개발하였다. 또한 개발된 각 모델을 이용하여 민감도 분석을 실시하였다. 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 개발된 예측모델들은 회귀계수들의 결정계수, P-value에서 모두 통계적으로 유의한 것으로 나타났으며, 잔차분석을 통하여 모델의 적합성이 검증되었다.

2) 소성변형 예측모델의 민감도 분석 결과 아스팔트 함량, 공극율, 노상의 최적함수비가 주요한 영향을 미치는 변수로 나타났으며, 반면에 아스팔트 점도는 소성변형에 거의 영향을 미치지 않았다.

3) 피로균열 예측모델의 민감도 분석 결과 아스팔트 점도, 아스팔트 함량, 공극율이 주요 변수이며 기층두께는 피로균열에 거의 영향을 미치지 않았다.

4) 중단평탄성 예측모델의 민감도 분석 결과

아스팔트 점도, 노상골재의 200번체 통과 중량백분율, 아스팔트 함량이 주요한 변수로 나타났다.

5) 예측모델의 예측치와 실측치와의 비교를 통해 모델에 포함된 영향인자를 적절히 관리하여 포장의 유지 보수에 활용함으로써 포장의 수명을 늘리고 비용을 절감할 수 있을 것이다.

6) 향후 연구과제로써 본 연구에서 개발된 모델을 국내에 적용하기 위해 DataPave와 같은 지속적이고 장기적인 포장조사에 의한 포장자료를 축적하여 모델에 반영하여야 할 것이다.

참고문헌

1. 건설부(1994), “도로포장 설계·시공지침”, 원기술.
2. 권호진, 진명섭(2000), “최신 도로공학”, 기문당, pp. 224-299.
3. 김남호, 서영찬, 이광호, 최진욱(1996), “아스팔트 포장 소성변형 원인조사 사례연구”, '96 아스팔트 포장공학의 첨단기술 심포지엄 논문집, 강원대학교, pp. 139-163.
4. 아스팔트포장연구회(1994), “아스팔트포장 핸드북”, 대건사.
5. 한국도로공사(1996), “아스팔트 포장의 유지관리 시스템 구축에 관한 연구”, 도로연구소 96-46-18, pp. 11-36.
6. Asphalt Institute(1995), “Superpave Level 1 Mix Design”, SP-2.
7. FHWA(1997), “Long Term Pavement Performance Information Management System Data Users Reference Manual”, FHWA-RD-97-001.
8. Roberts F. L., Kandhal P. S., Brown E. R., Lee D. Y., and Kennedy T. W.(1991), “Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction”, NAPA Education Foundation.

(접수 : 2001. 9. 22)