



전산해석 프로그램을 이용한 아스팔트포장 단면의 거동특성분석

An Analysis on Characteristics of Thickness of Asphalt Concrete
Pavement with Computer Programs

이경하* · 이광호**

ABSTRACT

Asphalt pavement tends to rut in high temperature and to crack in cold temperature. The performance of asphalt pavement can be deteriorated by Korean weather condition which has the four distinct seasons.

In this study, the typical sections that may minimize rutting and fatigue were analyzed through the numerical model tests. The layered elastic theory, finite element method and visco elastic theory were utilized for these numerical model tests.

From the various numerical model tests, it is found that an optimum design procedure was recommended. It was increasing the thickness of asphalt stabilized base with fixing the wearing course as 5cm the minimum specified thickness. The section was most beneficial in resting rutting and fatigue.

From the analysis of the relative index on tensile strain and cost analysis, it was recommended that the thickness ratio of subbase and asphalt concrete is 1.0~2.5.

요 지

본 연구에서는 아스팔트 포장에서 소성변형과 균열에 대한 저항성, 그리고 경제성효과를 만족시킬 수 있는 최적 단면을 구하고자 하였다. 국내 아스팔트 포장재료의 물성치와 현행 국내설계적용 상대강도계수로 부터 구한 탄성계수의 2종류 물성요인을 입력변수로 하여 다층탄성이론에 의한 구조해석과 유한요소해석을 실시하여 아스팔트층의 하단인장변형률과 노상압축변형률에 대한 저항성 효과를 분석하였고, 점탄성해석에 의한 소성변형 예측과 경제성 분석을 통해 아스팔트 포장단면설계의 개선방안을 제시하였다.

점탄성 구조해석결과, 표층의 두께는 다층탄성해석과 마찬가지로 표층의 두께는 최소두께인 5cm일 때 소성변형에 대한 저항성이 큰 단면으로 나타났으며, 기층의 두께는 SN치가 감소함에 따라 다층탄성 구조해석시보다 기층두께감소가 커지는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 아스팔트포장의 내구성, 소성변형, 경제성을 만족하는 단면을 찾기위해 상대지수개념을 도입하였으며 상대지수분석을 통하여 보조기층의 두께에 대한 아스팔트층의 적정단면비가 1.0~2.5임을 제시하였다.

* 한국도로공사 도로연구소 책임연구원

** 한국도로공사 도로연구소 수석연구원



1. 서 론

아스팔트 포장은 하중재하에 의해서 생기는 응력이 포장을 구성하는 각 층에 분포되어 하부층으로 갈수록 점차 넓은 면적에 분산시키므로 각 층의 구성과 두께는 역학적 균형을 유지하며 교통하중에 충분히 견딜 수 있어야 한다.

아스팔트 포장단면설계는 노상에 분포되는 하중을 저감시키고자 하는 목적으로 Boussinesque 이론으로부터 출발하여 포장공용성과 교통 및 노상조건, 기후환경조건, 재료조건을 복합적으로 고려한 경험적 설계법으로 발전되어 왔으며 최근에는 경험적 설계법에 이론적 설계를 보완한 반경험적 설계법으로 전환되고 있는 경향이다.

미국의 AASHTO에서는 86년에 AASHTO개정 지침을 작성하여 노상토의 지지력 및 포장재료의 강도특성으로 회복탄성계수 개념을 사용하여 평가하고 있는데, 이는 포장구조 해석시 포장수명을 예측할 수 있고 점탄성 해석에 의해 공용성 예측까지 가능하다. 뿐만아니라, 공용중인 포장체의 현장 시험을 통하여 잔존수명을 추정할 수 있어서 합리적인 물성치로 평가 받고 있다.

포장단면설계는 포장체의 공용성과도 직결되며 포장단면설계가 부적절할 경우 포장의 공용성 저해요인으로 작용할 수 있다. 포장의 파손요인으로는 크게 소성변형과 피로균열이 있으며 이러한 요인은 구조적요인, 시공요인, 재료요인으로 나눌 수 있다. 소성변형과 균열은 서로 상반되는 성질을 가지고 있어서 특히 사계절 기후변화가 뚜렷한 지역에서 소성변형을 감소시키고자 하면 균열이 증대되는 문제점을 가지고 있다. 이와 같은 아스팔트포장의 점탄성적 특성을 개선시키기 위해서는 재료적 측면과 아울러 구조적 측면의 연구가 이루어져야 한다.

따라서, 본 연구에서는 국내의 아스팔트 포장설계의 문제점을 분석하고 아스팔트 포장에서

소성변형과 피로수명을 지배하는 인장균열에 대한 저항성, 그리고 비용효과를 고려한 경제성을 만족시킬 수 있는 단면을 제시하고자 한다.

본 연구의 내용 및 수행방법으로는 국내 고속도로 아스팔트 시공현장의 포장재료 물성치 및 현행 설계적용 물성치를 입력변수로 하여 다층탄성이론에 의한 포장구조해석과 점탄성해석에 의한 공용성 예측을 통하여 물성 및 단면요인 변화에 따른 민감도 분석을 실시하여 경제성과 피로수명 및 소성변형에 대한 저항성을 만족하는 단면을 제시하고자 한다.

2. 포장체 거동특성의 이론적 고찰

아스팔트 포장체에서 운하중 재하시 최대연직응력은 재하하중 중심의 바로 아래에서 일어난다. 그리고 깊이에 따라 연직응력은 감소하게 된다. 반면, 수평응력은 아스팔트층의 표면에서 압축을 띠고 하단에서는 인장응력이 발생한다. 처짐은 노상면에서 가장 크게 발생하여 전체 처짐량은 노상의 압축변형에 좌우된다.

Van Tiel⁽²⁾은 아스팔트 각 층 재료의 상대강도계수의 변동성을 결정하는데 다층탄성이론을 적용할 수 있으며 상대강도계수 결정을 위한 기준으로 표면처짐, 아스팔트층 하단 인장변형률, 노상압축변형률의 세가지를 제시하였다.

인장변형과 압축변형은 허용한계를 넘었을 경우 파괴를 일으킬 수 있다. 표면처짐은 그 자체로서는 어떤 손상형태를 직접적으로 유발하지는 않지만 포장체가 장기 공용시 점탄성 거동으로 인하여 소성변형과 인장균열을 유도하게 된다. 소성변형은 포장재료가 압착되어 밀도가 증가하거나 재료가 전단변형을 일으켜 발생하는 것으로 노상을 비롯한 포장의 모든 층에서 그 원인을 제공한다. 이와같이 아스팔트층의 하단 인장응력과 노상연직 압축변형률은 포장구조의



역학적 특성을 판단하는 기준이 된다.

Hofstra⁽⁴⁾는 소성변형이 밀도증가에 의한 것 보다는 전단변형에 의한 원인이 지배적이고 차량하중을 직접 받는 포장의 표면부근에서 소성유동이 가장 크게 발생하고 하부로 갈수록 소성유동이 작게 발생함을 밝혔다. 또한 Eisenman 등⁽³⁾은 소성변형은 주로 포장재료의 체적변화 없이 아스팔트 재료의 유동에 의해 발생한다고 하였으며 교통개방 초기에 차량의 통과에 의한 다짐이 주원인이고, 통과차량의 하중에 의해 다짐이 된 이후에는 차륜하부 체적 감소와 인접상향 변형의 체적이 같게 된다고 하였다. Uge 등⁽⁸⁾은 아스팔트 층에서의 소성유동은 표면하부 특정깊이(13cm) 이내에서만 발생한다고 하였다.

아스팔트 포장의 피로균열은 윤택중 작용시 휨작용에 의한 인장변형이 반복 휨응력을 받게 되므로써 인장변형에 대한 포장재료의 저항능력이 감소하는 과정을 의미한다. 균열발생부에서 휨응력이 증가하면 균열이 표면쪽으로 전파하게 된다. 균열의 또다른 형태는 저온균열로써 체적변화로 인해 인장변형이 발생한다.

균열은 물의 침투와 포장층의 탄성계수를 감소시켜 휨응력 증가와 그에 따른 인장변형의 증가로 새로운 균열발생을 초래하고 표면으로 전파된다. 이와같이 증가된 균열은 거북등 균열이라 불리우는 다중균열로 발전한다. 물의 침투는 보조기층과 노상의 탄성계수를 감소시키는 반면, 펌핑침식은 표층의 휨을 증가시키고 인장변

형과 전단변형이 증가된다. 그 결과, 바퀴자국과 포트홀 현상이 생길 수 있다.⁽¹⁰⁾

3. 아스팔트 포장단면 구조해석

3.1 다층탄성 구조해석

본 연구에서는 아스팔트 포장설계에서 가장 중요한 요소인 아스팔트포장 단면설계를 위하여 현재 국내에서 사용중인 포장재료의 물성치와 현행 설계적용 상대강도계수를 역산하여 구한 탄성계수를 입력변수로하여 포장단면의 구조해석을 실시하였다. 구조해석결과를 바탕으로 소성변형에 대한 저항성 및 피로수명을 증대시키며 경제성을 만족시킬 수 있는 적정단면을 결정하였다.

현재 국내 고속도로 아스팔트 포장이 시공중이거나 시공이 완료된 포장단면은 표 1.과 같다. 표 1.에서 우리나라의 설계 SN 치는 3.4~6.75의 범위에 있음을 알 수 있다.

포장단면설계는 같은 SN 치라 하더라도 포장단면이 다양하게 나올 수 있다. 이 중 아스팔트 포장의 표면처짐에 대한 저항성이 큰 단면과 인장균열에 대한 저항성이 큰 단면, 그리고 노상의 지지력이 큰 단면이 여러종류로 나올 수 있으므로 위의 세가지 조건에 적합한 단면을 찾을 수 있다.

표 1.에서 SN 치의 최소치 3.4 와 중간치

표 1. 국내 고속도로 아스팔트 포장단면

| 구 분 | 서해 | 경인 | 대전 - 진주 | 냉정 - 구포 | 경부 | 호남/영동 | 동해 |
|----------|------|------|---------|---------|------|-------|------|
| 표층(cm) | 10 | 10 | 10 | 10 | 7.5 | 5 | 5 |
| 기층(cm) | 25 | 25 | 20 | 25 | 15 | 15 | 15 |
| 보조기층(cm) | 45 | 40 | 50 | 50 | 40 | 30 | 20 |
| SN | 6.50 | 6.24 | 6.20 | 6.75 | 4.78 | 3.90 | 3.40 |



4.78. 그리고 최대치 6.75 의 3 수준 요인에 대한 동일한 SN 치를 줄 수 있는 단면을 설정하여 다층탄성이론을 이용한 구조해석을 실시하였다.

포장단면의 구조해석시 기준되는 파라메타로 아스팔트 표층의 표면처짐은 아스팔트 포장의 공용성 평가에 이용되며 아스팔트층 하단의 인장변형률은 피로저항평가에, 노상압축변형률은 소성변형의 평가척도로 사용된다.

포장단면 구조해석에서 주요입력변수인 탄성계수는 국내 아스팔트 포장재료의 물성시험치를 식(1)~식(3)으로부터 환산하여 구한 탄성계수와 국내설계적용 기준상대강도계수를 역산하여 구한 탄성계수의 두 종류 물성요인에 대해 단면 구조해석을 실시하였다. 포장단면해석에서 각 층의 탄성계수는 표 2.와 같다. 표 2.에서 물성요인 A는 국내 아스팔트 포장재료의 물성시험치를 환산식으로 부터 구한 탄성계수이고 물성요인 B는 현행 아스팔트 포장 국내 설계적용 기준 상대강도계수인 표층 0.145, 기층 0.11, 보조기층 0.051을 식(1)~식(3)으로부터 역산하여 구한 탄성계수이다.

$$a_1 = 0.16 \log(E_1/30584) + 0.17[0.08 < a_1 < 0.17] \dots\dots (1)$$

$$a_2 = 0.12 \log(E_1/30584) + 0.13[0.04 < a_2 < 0.12] \dots\dots (2)$$

$$a_3 = 0.09 \log(E_3/1617) + 0.06[0.02 < a_3 < 0.08] \dots\dots (3)$$

여기서,

a_i : 표층, 기층 및 보조기층의 상대강도계수

E_i : 표층, 기층 및 보조기층의 탄성계수

포장구조해석시 하중조건은 표준설계하중인 8.2ton 단축하중의 한쪽 차륜부만을 고려한 4.1ton 복륜조건을 적용하였으며 바퀴 하나의 하중은 2.05ton이고, 윤하중 접지면은 원형으로 그 반경은 11.25cm (4.5in), 타이어 접지압은 5kg/cm² (70psi), 바퀴 중심간 거리는 33.75cm로 가정하였다. 해석프로그램은 다층탄성해석 프로그램인 Elsym 5 를 이용하여 다음과 같은 단면요인과 물성요인을 조합하여 포장구조해석을 실시하였고 복륜하중 중심에서 포장 표면처짐과 아스팔트층 하단 인장변형률, 그리고 노상의 압축변형률을 구하고자 하였다.

포장구조해석결과는 표 3.과 표 4.에 나타냈다.

표 4.의 결과로부터 각 공용인자에 대한 우선순위를 나타내면 표 5.와 같고 이 중에서 각 SN 값에 대해서 각 공용인자별로 가장 우수한 단면을 표 6.에 나타냈다.

표 2. 포장 각 층의 탄성계수

| 구 분 | 탄성계수 (kg/cm ²) | | 포아스비 |
|------|----------------------------|--------|------|
| | 물성요인A | 물성요인B | |
| 표 층 | 28,000 | 21,100 | 0.4 |
| 기 층 | 20,400 | 20,400 | 0.4 |
| 보조기층 | 1,270 | 1,400 | 0.45 |
| 노 상 | 490 | 490 | 0.45 |



표 3. 포장구조해석 결과(물성요인 A)

| SN | 단면 번호 | 단 면 (cm) | | | 표면처짐 ($\times 10^{-1}$ cm) | 아스팔트층 하단 인장 변형률 ($\times 10^{-3}$ cm/cm) | 노상압축 변형률 ($\times 10^{-3}$ cm/cm) |
|------|-------|----------|----|------|--------------------------------|--|---------------------------------------|
| | | 표층 | 기층 | 보조기층 | | | |
| 3.4 | 101 | 5 | 10 | 31 | 0.6149 | 0.2656 | 0.5274 |
| | 102 | 5 | 15 | 20 | 0.5489 | 0.2079 | 0.4074 |
| | 103 | 5 | 20 | 10 | 0.4877 | 0.1713 | 0.4042 |
| 4.78 | 201 | 5 | 10 | 58 | 0.5352 | 0.2499 | 0.3071 |
| | 202 | 5 | 15 | 47 | 0.4783 | 0.1909 | 0.2915 |
| | 203 | 5 | 20 | 31 | 0.4427 | 0.1539 | 0.2948 |
| | 204 | 5 | 25 | 26 | 0.3945 | 0.1227 | 0.2477 |
| | 205 | 5 | 30 | 15 | 0.3625 | 0.1021 | 0.2287 |
| | 206 | 7.5 | 15 | 40 | 0.4575 | 0.1702 | 0.2887 |
| | 207 | 7.5 | 20 | 29 | 0.4163 | 0.1368 | 0.2676 |
| | 208 | 10 | 15 | 33 | 0.4382 | 0.1521 | 0.2315 |
| | 209 | 10 | 20 | 22 | 0.3998 | 0.1418 | 0.2623 |
| | 301 | 5 | 10 | 97 | 0.4793 | 0.2446 | 0.1323 |
| 6.75 | 302 | 5 | 20 | 75 | 0.3843 | 0.1424 | 0.1529 |
| | 303 | 5 | 30 | 53 | 0.3279 | 0.1089 | 0.1373 |
| | 304 | 5 | 40 | 32 | 0.2903 | 0.0364 | 0.0992 |
| | 305 | 7.5 | 15 | 79 | 0.4041 | 0.1612 | 0.1591 |
| | 306 | 7.5 | 20 | 68 | 0.3690 | 0.1266 | 0.1520 |
| | 307 | 7.5 | 25 | 57 | 0.3411 | 0.1019 | 0.1438 |
| | 308 | 7.5 | 30 | 46 | 0.3183 | 0.0740 | 0.1047 |
| | 309 | 7.5 | 35 | 36 | 0.2992 | 0.0698 | 0.1276 |
| | 310 | 10 | 15 | 72 | 0.3866 | 0.1419 | 0.1299 |
| | 311 | 10 | 20 | 61 | 0.3553 | 0.1134 | 0.1506 |
| | 312 | 10 | 25 | 50 | 0.3299 | 0.0922 | 0.1156 |
| | 313 | 10 | 30 | 39 | 0.3094 | 0.0765 | 0.1347 |

표 4. 포장구조해석 결과(물성요인 B)

| SN | 단면 번호 | 단 면 (cm) | | | 표면처짐 ($\times 10^{-1}$ cm) | 아스팔트층 하단 인장 변형률 ($\times 10^{-3}$ cm/cm) | 노상압축 변형률 ($\times 10^{-3}$ cm/cm) |
|------|-------|----------|----|------|--------------------------------|--|---------------------------------------|
| | | 표층 | 기층 | 보조기층 | | | |
| 3.4 | 101 | 5 | 10 | 31 | 0.6175 | 0.2740 | 0.5169 |
| | 102 | 5 | 15 | 20 | 0.5433 | 0.2103 | 0.2157 |
| | 103 | 5 | 20 | 10 | 0.4785 | 0.1693 | 0.3879 |
| 4.78 | 201 | 5 | 10 | 58 | 0.5464 | 0.2564 | 0.3081 |
| | 202 | 5 | 15 | 47 | 0.4823 | 0.1938 | 0.2875 |
| | 203 | 5 | 20 | 31 | 0.4407 | 0.1548 | 0.2862 |
| | 204 | 5 | 25 | 26 | 0.3912 | 0.1227 | 0.2395 |
| | 205 | 5 | 30 | 15 | 0.3579 | 0.1012 | 0.2204 |
| | 206 | 7.5 | 15 | 40 | 0.4569 | 0.1708 | 0.2803 |
| | 207 | 7.5 | 20 | 29 | 0.4117 | 0.1362 | 0.1182 |
| | 208 | 10 | 15 | 33 | 0.4336 | 0.1507 | 0.2245 |
| | 209 | 10 | 20 | 22 | 0.3924 | 0.1223 | 0.2488 |
| | 301 | 5 | 10 | 97 | 0.4945 | 0.2204 | 0.1372 |
| 6.75 | 302 | 5 | 20 | 75 | 0.3896 | 0.1444 | 0.1524 |
| | 303 | 5 | 30 | 53 | 0.3287 | 0.0927 | 0.1344 |
| | 304 | 5 | 40 | 32 | 0.2891 | 0.0640 | 0.0976 |
| | 305 | 7.5 | 15 | 79 | 0.4099 | 0.1625 | 0.1585 |
| | 306 | 7.5 | 20 | 68 | 0.3713 | 0.1273 | 0.1494 |
| | 307 | 7.5 | 25 | 57 | 0.3411 | 0.1022 | 0.1399 |
| | 308 | 7.5 | 30 | 46 | 0.3170 | 0.0836 | 0.1314 |
| | 309 | 7.5 | 35 | 36 | 0.2969 | 0.0695 | 0.1230 |
| | 310 | 10 | 15 | 72 | 0.3891 | 0.1416 | 0.1295 |
| | 311 | 10 | 20 | 61 | 0.3551 | 0.1129 | 0.1463 |
| | 312 | 10 | 25 | 50 | 0.3279 | 0.0917 | 0.1127 |
| | 313 | 10 | 30 | 39 | 0.3063 | 0.0757 | 0.1289 |



표 5. 공용인자 우선순위 (다층탄성해석)

| SN | 순위 | 단 면 번 호 | | |
|------|----|---------|--------------------|-------------|
| | | 표면처짐 | 아스팔트층 하단 인장 변형률 | 노상압축 변형률 |
| 3.4 | 1 | 103 | 103 | 103 |
| | 2 | 102 | 102 | 102 |
| | 3 | 101 | 101 | 101 |
| 4.78 | 1 | 205 | 205 | 205 |
| | 2 | 204 | 204 | 208 |
| | 3 | 209 | 207 | 204 |
| | 4 | 207 | 209 | 209 |
| | 5 | 208 | 208 | 207 |
| | 6 | 203 | 203 | 206 |
| | 7 | 206 | 206 | 202 |
| | 8 | 202 | 202 | 203 |
| | 9 | 201 | 201 | 201 |
| 6.75 | 1 | 304 | 304 | 304 |
| | 2 | 309 | 309 | 308 |
| | 3 | 313 | 308 | 312 |
| | 4 | 308 | 313 | 309 |
| | 5 | 303 | 312 | 310 |
| | 6 | 312 | 307 | 301 |
| | 7 | 307 | 303 | 313 |
| | 8 | 311 | 311 | 303 |
| | 9 | 306 | 306 | 307 |
| | 10 | 302 | 310 | 311 |
| | 11 | 310 | 302 | 306 |
| | 12 | 305 | 305 | 302 |
| | 13 | 301 | 301 | 305 |

표 6.에서 다층탄성해석 결과는 각 SN치 모두 표층이 5cm, 기층이 20cm, 보조기층이 10cm인 단면에서 표면처짐, 아스팔트층 하단인장 변형률, 노상압축변형률에 대한 저항성이 가장 우수한 것으로 나타났다.

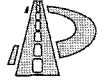
3.2 유한요소 구조해석

다층 탄성 구조해석에서는 선형해석만이 가능하였으나 비선형 해석을 위해서는 유한요소 해석을 실시하여야 한다. 포장단면에서 아스팔트층은 선형해석이 가능하나 보조기층 및 노상토층은 입상토 재료이기 때문에 보조기층 및 노상의 거동특성 파악을 위해서는 비선형해석을 실

표 6. 공용인자 우수단면 (다층탄성해석)

| SN | 구 분 | 단면 번호 | 단 면 두 겹 (cm) | | |
|------|---------------|----------|--------------|----|----------|
| | | | 표층 | 기층 | 보조 기층 |
| 3.4 | 표면처짐 | 103 | 5 | 20 | 10 |
| | 아스팔트층 하단인장변형률 | 103 | 5 | 20 | 10 |
| | 노상압축변형률 | 103 | 5 | 20 | 10 |
| 4.78 | 표면처짐 | 205 | 5 | 30 | 15 |
| | 아스팔트층 하단인장변형률 | 205 | 5 | 30 | 15 |
| | 노상압축변형률 | 205 | 5 | 30 | 15 |
| 6.75 | 표면처짐 | 304 | 5 | 40 | 32 |
| | 아스팔트층 하단인장변형률 | 304 | 5 | 40 | 32 |
| | 노상압축변형률 | 304 | 5 | 40 | 32 |

시하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 포장 단면의 유한요소법에 의한 비선형 구조해석을 위



해서는 유한요소 포장구조해석 프로그램인 MICH-PAVE 프로그램을 사용하였다. 프로그램에 사용된 입력변수는 다음과 같다.

- 층의 수 : 4
- 바퀴 하중 : 9,000lb
- 타이어 압력 : 70psi
- 아스팔트의 동점도 : 270 centi stokes
- 아스팔트 표층의 탄성계수 : 400,000psi
- 아스팔트 기층의 탄성계수 : 300,000psi
- 보조기층의 탄성계수 모델 : $k_1=7120\text{psi}$,
 $k_2=0.45$
- 노상토층의 탄성계수 모델 : $k_1=4480\text{psi}$,
 $k_2=0.53$

보조기층 재료의 내부마찰각 : 30°
노상토 재료의 내부마찰각 : 20°

유한요소해석에 의한 포장 구조해석 결과는 표 7.과 같다. 표 7.의 결과로부터 각 공용인자에 대한 우선순위를 나타내면 표 8.과 같고 이 중에서 각 SN값에 대해서 각 공용인자별로 가장 우수한 단면을 표 9.에 나타냈다

표 9.의 결과에서 아스팔트층의 하단인장 변형률은 SN이 4.78과 6.75에서 표층이 7.5cm일 때 우수한 공용특성을 나타냈으며 노상압축변형률은 다층탄성해석결과와 동일한 결과를 나타냈다.

표 7. 포장구조해석 결과(유한요소해석)

| SN | 번호 | 단 면 (cm) | | | 아스팔트 하단 인장 변형률 ($\times 10^{-6}$) | 아스팔트 층 압축 변형률 ($\times 10^{-6}$) | 노상압축 변형률 ($\times 10^{-5}$) |
|------|-----|----------|----|------|---|--|-------------------------------------|
| | | 표층 | 기층 | 보조기층 | | | |
| 3.4 | 101 | 5 | 10 | 31 | 7.064 | 10.280 | 11.210 |
| | 102 | 5 | 15 | 20 | 8.138 | 3.060 | 7.916 |
| | 103 | 5 | 20 | 10 | 6.231 | 1.652 | 6.350 |
| 4.78 | 201 | 5 | 10 | 58 | 7.283 | 9.822 | 7.193 |
| | 202 | 5 | 15 | 47 | 7.948 | 2.793 | 5.105 |
| | 203 | 5 | 20 | 31 | 6.117 | 1.793 | 4.342 |
| | 204 | 5 | 25 | 26 | 4.377 | 4.655 | 3.466 |
| | 205 | 5 | 30 | 15 | 2.966 | 6.620 | 3.297 |
| | 206 | 7.5 | 15 | 40 | 1.120 | 2.344 | 4.487 |
| | 207 | 7.5 | 20 | 29 | 1.186 | 5.218 | 3.719 |
| | 208 | 10 | 15 | 33 | 1.963 | 4.996 | 4.167 |
| | 209 | 10 | 20 | 22 | 1.168 | 6.985 | 3.623 |
| 6.75 | 301 | 5 | 10 | 97 | 7.199 | 9.460 | 3.864 |
| | 302 | 5 | 20 | 75 | 5.970 | 1.969 | 2.331 |
| | 303 | 5 | 30 | 53 | 2.884 | 6.708 | 1.816 |
| | 304 | 5 | 40 | 32 | 1.074 | 8.935 | 1.665 |
| | 305 | 7.5 | 15 | 79 | 1.044 | 2.495 | 2.589 |
| | 306 | 7.5 | 20 | 68 | 1.113 | 5.326 | 2.144 |
| | 307 | 7.5 | 25 | 57 | 0.570 | 7.160 | 1.913 |
| | 308 | 7.5 | 30 | 46 | 0.061 | 8.497 | 1.766 |
| | 309 | 7.5 | 35 | 36 | 0.601 | 9.424 | 1.680 |
| | 310 | 10 | 15 | 72 | 2.000 | 5.110 | 2.395 |
| | 311 | 10 | 20 | 61 | 1.214 | 7.702 | 2.042 |
| | 312 | 10 | 25 | 50 | 1.247 | 8.399 | 1.856 |
| | 313 | 10 | 30 | 39 | 1.499 | 9.392 | 1.753 |



표 8. 공용인자 우선순위 (유한요소 해석)

| SN | 순위 | 단 면 번 호 | | |
|------|----|------------------|-------------|-------------|
| | | 아스팔트층 하단인장변형률 | 아스팔트층 압축변형률 | 노상압축 변형률 |
| 3.4 | 1 | 103 | 103 | 103 |
| | 2 | 101 | 102 | 102 |
| | 3 | 102 | 101 | 101 |
| 4.78 | 1 | 206 | 203 | 205 |
| | 2 | 209 | 206 | 204 |
| | 3 | 207 | 202 | 209 |
| | 4 | 208 | 204 | 207 |
| | 5 | 205 | 208 | 208 |
| | 6 | 204 | 207 | 203 |
| | 7 | 203 | 205 | 206 |
| | 8 | 201 | 209 | 202 |
| | 9 | 202 | 201 | 201 |
| 6.75 | 1 | 308 | 302 | 304 |
| | 2 | 307 | 305 | 309 |
| | 3 | 309 | 310 | 313 |
| | 4 | 305 | 306 | 308 |
| | 5 | 304 | 303 | 303 |
| | 6 | 306 | 311 | 312 |
| | 7 | 311 | 307 | 307 |
| | 8 | 312 | 312 | 311 |
| | 9 | 313 | 308 | 306 |
| | 10 | 310 | 304 | 302 |
| | 11 | 303 | 313 | 310 |
| | 12 | 302 | 309 | 305 |
| | 13 | 301 | 301 | 301 |

표 9. 공용인자 우수단면 (유한요소 해석)

| SN | 구 분 | 단면 번호 | 단 면 두 계 (cm) | | |
|------|---------------|----------|--------------|----|----------|
| | | | 표층 | 기층 | 보조 기층 |
| 3.4 | 아스팔트층 하단인장변형률 | 103 | 5 | 20 | 10 |
| | 아스팔트층 압축변형률 | 103 | 5 | 20 | 10 |
| | 노상 압축변형률 | 103 | 5 | 20 | 10 |
| 4.78 | 아스팔트층 하단인장변형률 | 206 | 7.5 | 15 | 40 |
| | 아스팔트층 압축변형률 | 203 | 5 | 20 | 31 |
| | 노상 압축변형률 | 205 | 5 | 30 | 15 |
| 6.75 | 아스팔트층 하단인장변형률 | 308 | 7.5 | 30 | 46 |
| | 아스팔트층 압축변형률 | 302 | 5 | 20 | 75 |
| | 노상 압축변형률 | 304 | 5 | 40 | 32 |

표 10. 계절별 재료특성치

| 재 료 특 성 | | 겨 울 | 봄 | 여 름 | 가 을 | |
|-------------------------------------|-------|---------|---------|---------|--------|---------|
| 회복탄성 계수 (kg/cm ²) | 표 층 | 112.517 | 38.678 | 9.845 | 31.645 | |
| | 기 층 | 70.323 | 28.129 | 11.252 | 21.097 | |
| | 보조기층 | 1.406 | 1.055 | 1.406 | 1.406 | |
| | 노 상 토 | 316 | 211 | 316 | 316 | |
| 영구변형 특성 | 표 층 | μ | 0.04 | 0.078 | 0.10 | 0.082 |
| | | a | 0.60 | 0.72 | 0.60 | 0.71 |
| | 기 층 | μ | 0.04 | 0.078 | 0.10 | 0.082 |
| | | a | 0.60 | 0.72 | 0.60 | 0.71 |
| | 보조기층 | μ | 0.04 | 0.15 | 0.04 | 0.04 |
| | | a | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| 노 상 토 | μ | 0.04 | 0.15 | 0.04 | 0.04 | |
| | a | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | |
| 피로특성 | 표 층 | k_1 | 1.0E-13 | 1.8E-12 | 1.3E-8 | 3.0E-10 |
| | | k_2 | 5.10 | 5.10 | 4.87 | 4.99 |



3.3 점탄성 구조해석

점탄성 해석은 현재 공용중인 포장, 특정 하중, 포장재료등의 평가에 이용되며 포장체의 거동, 시간의 흐름에 따른 포장의 파손정도 및 공용성을 산출해낼 수 있다. 또한 해석결과를 이용하여 포장체의 잔존수명도 결정할 수 있다.

본 연구에서는 앞에서 제시한 각 단면에 대해 점탄성 해석을 실시하여 공용기간중 소성변형과 평탄성, PSI에 대한 분석을 통해 다층탄성해석과 유효요소해석에 의해 포장의 구조능력이 평가된 단면이 교통개방시 장기간에 걸쳐 어떠한 공용성을 띄는지 분석하고자 한다. 포장구조해석 프로그램은 미연방도로국에서 개발한 VESYS 프로그램을 사용하였다.

점탄성구조해석시 입력변수는 계절별 대표 온도조건에 대한 재료의 회복탄성계수, 영구변형 특성인 μ 와 α , 그리고 피로특성인 k_1 , k_2 값을 사용하여야 하는데, 본 연구에서는 점탄성 해석을 위한 입력변수인자는 표 10.과 같이 Kenis⁽⁶⁾가 발표한 연구결과를 이용하였다.

표 11. 교통량 입력변수

| SN | 교통량 (ESAL/일) |
|------|--------------|
| 3.4 | 300 |
| 4.78 | 2,000 |
| 6.75 | 10,000 |

점탄성 해석시 공용기간은 10년으로 하였으며 교통량은 SN 치에 따라 그에 상응하는 교통량을 8.2톤 등가단축 환산하중으로 하여 표 11.의 값을 적용하였으며, 교통량의 증가율은 고려하지 않았고 교통개방은 연초(1월)에 하는 것으로 가정하였다.

Vesys 프로그램 수행에 의한 점탄성 해석에서 공용 10년후의 공용성 예측결과를 표 12.에 나

타냈다. 표 12.에서 평탄성 및 서비스지수(PSI)는 소성변형량의 함수이므로 소성변형에 대한 저항성이 큰 단면은 평탄성과 서비스지수 모두를 만족한다.

표 12.의 결과로부터 각 공용인자에 대한 우선순위를 나타내면 표 13.과 같고, 이 중에서 각 SN값에 대해서 각 공용인자별로 가장 우수한 단면을 표 14.에 나타냈다

표 12. 공용 10년후 공용성 예측 결과

| SN | 번호 | 표층 | 기층 | 보조기층 | 소성변형 깊이 (cm) | 평탄성 | PSI |
|------|-----|-----|----|------|--------------|--------|--------|
| 3.4 | 101 | 5 | 10 | 31 | 0.4420 | 0.2135 | 3.9978 |
| | 102 | 5 | 15 | 20 | 0.9406 | 0.1194 | 3.3627 |
| | 103 | 5 | 20 | 10 | 0.5095 | 0.2011 | 3.9924 |
| 4.78 | 201 | 5 | 10 | 58 | 0.7597 | 0.6334 | 3.6624 |
| | 202 | 5 | 15 | 47 | 0.7932 | 0.5447 | 3.7054 |
| | 203 | 7.5 | 15 | 40 | 0.8542 | 0.5953 | 3.6571 |
| | 204 | 10 | 15 | 33 | 0.9121 | 0.6460 | 3.6092 |
| | 205 | 5 | 20 | 31 | 0.7050 | 0.4814 | 3.7685 |
| | 206 | 7.5 | 20 | 29 | 0.7597 | 0.5327 | 3.723 |
| | 207 | 10 | 20 | 22 | 0.9601 | 0.6426 | 3.599 |
| | 208 | 5 | 25 | 26 | 0.6876 | 0.4468 | 3.793 |
| | 209 | 5 | 30 | 15 | 1.2802 | 0.2614 | 2.7909 |
| 6.75 | 301 | 5 | 10 | 97 | 1.2078 | 1.1595 | 2.7842 |
| | 302 | 5 | 20 | 75 | 1.1003 | 1.1737 | 3.2992 |
| | 303 | 5 | 30 | 53 | 1.1240 | 0.9977 | 3.3569 |
| | 304 | 5 | 40 | 32 | 1.0206 | 0.9885 | 3.4088 |
| | 305 | 7.5 | 15 | 79 | 1.3399 | 1.5152 | 3.0528 |
| | 306 | 7.5 | 20 | 68 | 1.2118 | 1.3553 | 3.1774 |
| | 307 | 7.5 | 25 | 57 | 1.1773 | 1.2504 | 3.2326 |
| | 308 | 7.5 | 30 | 46 | 1.2355 | 1.1438 | 3.2421 |
| | 309 | 7.5 | 35 | 36 | 1.1356 | 1.1589 | 3.2875 |
| | 310 | 10 | 15 | 72 | 1.4605 | 1.7119 | 2.9178 |
| | 311 | 10 | 20 | 61 | 1.3238 | 1.5552 | 3.0490 |
| | 312 | 10 | 25 | 50 | 1.2868 | 0.1439 | 3.1081 |
| | 313 | 10 | 30 | 39 | 1.3485 | 1.3044 | 3.1195 |



표 13. 공용인자 우선순위 (점탄성해석)

| SN | 순위 | 단 면 번 호 | | |
|------|----|---------|-----|-----|
| | | 소성변형 | 평탄성 | PSI |
| 3.4 | 1 | 101 | 102 | 102 |
| | 2 | 103 | 103 | 103 |
| | 3 | 102 | 101 | 101 |
| 4.78 | 1 | 208 | 209 | 209 |
| | 2 | 205 | 208 | 207 |
| | 3 | 201 | 205 | 204 |
| | 4 | 206 | 206 | 203 |
| | 5 | 202 | 202 | 201 |
| | 6 | 203 | 203 | 202 |
| | 7 | 204 | 201 | 206 |
| | 8 | 207 | 207 | 205 |
| | 9 | 209 | 204 | 208 |
| 6.75 | 1 | 304 | 312 | 301 |
| | 2 | 302 | 304 | 310 |
| | 3 | 303 | 303 | 311 |
| | 4 | 309 | 308 | 305 |
| | 5 | 307 | 309 | 312 |
| | 6 | 301 | 301 | 313 |
| | 7 | 306 | 302 | 306 |
| | 8 | 308 | 307 | 307 |
| | 9 | 312 | 313 | 308 |
| | 10 | 311 | 306 | 309 |
| | 11 | 305 | 305 | 302 |
| | 12 | 313 | 311 | 303 |
| | 13 | 310 | 310 | 304 |

표 14. 공용인자 우수단면 (점탄성 해석)

| SN | 구 분 | 단면 번호 | 단 면 두 겹 (cm) | | |
|------|------|-------|--------------|-----|------|
| | | | 표 층 | 기 층 | 보조기층 |
| 3.4 | 소성변형 | 101 | 5 | 10 | 31 |
| | 평탄성 | 102 | 5 | 15 | 20 |
| | PSI | 102 | 5 | 15 | 20 |
| 4.78 | 소성변형 | 208 | 10 | 15 | 33 |
| | 평탄성 | 209 | 10 | 20 | 22 |
| | PSI | 209 | 10 | 20 | 22 |
| 6.75 | 소성변형 | 304 | 5 | 40 | 32 |
| | 평탄성 | 312 | 10 | 25 | 50 |
| | PSI | 301 | 5 | 10 | 97 |

3.4 최적단면 결정

본 연구에서는 아스팔트 포장에서 포장수명을 지배하는 인장균열의 척도인 아스팔트층 하단 인장변형률과 노상압축변형률, 그리고 소성변형에 대한 저항성을 모두 만족하는 단면을 구하기 위해 차원이 서로다른 세가지 요인의 상대적인 평가척도로서 다음과 같이 상대지수를 구하고자 하였다.

$$\text{상대지수} = \frac{\text{최대치} - \text{해당값}}{\text{최대치} - \text{최소치}}$$

상대지수는 각 공용인자의 범위가 다르므로 각 변수에 대한 최대치와 최소치의 범위에서 해당 공용인자가 위치하는 척도를 나타내는 값이다. 각 공용인자가 최대치에서는 0을 나타내고 최소치에서는 1을 나타낼 수 있도록 하기 위하여 상대지수는 0부터 1까지 범위로 나타나며 상대지수가 클수록 효과적인 단면이 된다. 표 15.는 각 포장단면의 상대지수를 나타낸 것으로 아스팔트층 하단 인장변형률의 상대지수는 물성요인 두가지의 평균값을 적용하도록 하였다. 표 15.의 결과를 토대로 상대지수의 합이 가장 큰 단면을 표 16.에 나타냈다.

표 16.에서 표층은 최소 규정두께인 5 cm 를 적용하고 SN 치가 증가함에 따라 기층의 두께를 증가시키는 것이 균열 및 소성변형에 대한 저항성과 경제성 효과를 모두 만족하는 단면을 알 수 있다.

4. 경제성을 고려한 아스팔트 포장 단면 특성

국내 아스팔트포장의 효시라 할 수 있는 경부고속도로 포장은 쇠석기층을 사용하여 공용후 얼마 지나지 않아 피로균열이 많이 발생되었다.



표 15. 상대지수

| SN | 번호 | 표층 | 기층 | 보조기층 | 아스팔트층 하단 인장 변형률 | | | 노상압축 변형률 ② | 소성변형 ③ | 상대지수합 (①+②+③) |
|------|-----|-----|----|------|-----------------|-------|------|---------------|-----------|------------------|
| | | | | | 물성요인A | 물성요인B | 평균 ① | | | |
| 3.4 | 101 | 5 | 10 | 31 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 1.00 |
| | 102 | 5 | 15 | 20 | 0.59 | 0.61 | 0.60 | 0.68 | 0.00 | 1.28 |
| | 103 | 5 | 20 | 10 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.86 | 2.86 |
| 4.78 | 201 | 5 | 10 | 58 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.88 | 0.88 |
| | 202 | 5 | 15 | 47 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 0.54 | 0.82 | 1.76 |
| | 203 | 5 | 20 | 31 | 0.65 | 0.65 | 0.65 | 0.73 | 0.97 | 2.35 |
| | 204 | 5 | 25 | 26 | 0.86 | 0.86 | 0.86 | 0.96 | 1.00 | 2.82 |
| | 205 | 5 | 30 | 15 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.00 | 2.00 |
| | 206 | 7.5 | 15 | 40 | 0.54 | 0.55 | 0.55 | 0.69 | 0.72 | 1.96 |
| | 207 | 7.5 | 20 | 29 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.89 | 0.88 | 2.54 |
| | 208 | 10 | 15 | 33 | 0.66 | 0.68 | 0.67 | 0.78 | 0.62 | 2.07 |
| | 209 | 10 | 20 | 22 | 0.73 | 0.86 | 0.80 | 0.92 | 0.54 | 2.26 |
| 6.75 | 301 | 5 | 10 | 97 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.57 | 0.57 |
| | 302 | 5 | 20 | 75 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.70 | 0.82 | 2.01 |
| | 303 | 5 | 30 | 53 | 0.65 | 0.82 | 0.73 | 0.93 | 0.76 | 2.42 |
| | 304 | 5 | 40 | 32 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 3.00 |
| | 305 | 7.5 | 15 | 79 | 0.40 | 0.37 | 0.39 | 0.58 | 0.27 | 2.24 |
| | 306 | 7.5 | 20 | 68 | 0.57 | 0.60 | 0.58 | 0.78 | 0.57 | 1.93 |
| | 307 | 7.5 | 25 | 57 | 0.69 | 0.76 | 0.72 | 0.89 | 0.64 | 2.25 |
| | 308 | 7.5 | 30 | 46 | 0.82 | 0.87 | 0.85 | 0.96 | 0.51 | 2.32 |
| | 309 | 7.5 | 35 | 36 | 0.84 | 0.97 | 0.90 | 1.00 | 0.74 | 2.64 |
| | 310 | 10 | 15 | 72 | 0.49 | 0.50 | 0.50 | 0.67 | 0.00 | 1.17 |
| | 311 | 10 | 20 | 61 | 0.63 | 0.69 | 0.66 | 0.83 | 0.31 | 1.80 |
| | 312 | 10 | 25 | 50 | 0.73 | 0.82 | 0.78 | 0.92 | 0.40 | 2.10 |
| | 313 | 10 | 30 | 39 | 0.81 | 0.93 | 0.87 | 0.96 | 0.25 | 2.08 |

그 후 아스팔트 혼합물 덧씌우기 시공으로 피로 균열은 감소되었으나 최근에는 중차량의 증가로 인하여 소성변형이 큰 문제점으로 대두되었다. 소성변형은 주행쾌적성 저하와 교통사고의 잠재적 요인이 되고 있으며 공용성 저하의 가장 큰 요인이 되고 있다.

소성변형의 원인으로는 크게 구조적 요인과 시공요인, 재료요인으로 나눌 수 있으며 소성변형은 이러한 세가지 요인이 복합적으로 작용하여 발생한다. 그러므로 소성변형을 감소시키기 위해서는 여러 가지 측면에서의 연구가 이루어져야 한다. 현재까지 아스팔트 포장단면설계는 표 1.에서도 보는 바와 같이 표층을 10cm로 설계, 시공하는 경우가 많았고 이와같이 시공된

표 16. 상대지수 우수단면

| SN | 단면번호 | 단면두께 (cm) | | |
|------|------|-----------|----|------|
| | | 표층 | 기층 | 보조기층 |
| 3.4 | 103 | 5 | 20 | 10 |
| 4.78 | 204 | 5 | 25 | 26 |
| 6.75 | 304 | 5 | 40 | 32 |

경우 소성변형이 많이 발생되었다.

본 연구에서는 현행 아스팔트 포장 단면설계의 문제점을 인식하고 포장구조해석을 실시하여 표층을 최소두께인 5cm만을 적용하고 하중지지 역할은 골재의 전단저항이 큰 기층에서 받도록 하는 것이 구조적 측면에서 유리한 것으로 나타났다.

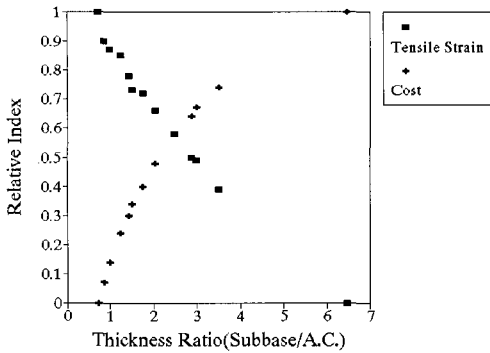


그림 3. 단면비에 따른 상대지수 (SN=6.75)

여기서, 인장변형률곡선과 비용곡선이 만나는 점의 단면비는 그림 1.에서는 1.0, 그림 2.에서는 2.0, 그림 3.에서는 2.5로 나타나며 이 점을 단면구성의 적정비라고 정의하였을 때 SN치 범위에 따라 아스팔트포장 단면적정비의 범위가 1.0 ~ 2.5인 것으로 나타났다. 따라서 아스팔트포장단면 설계시 입상토 보조기층과 아스팔트표층과 역청안정처리 기층을 합한 아스팔트층의 두께비를 1.0 ~ 2.5 범위내에 들도록 하면 경제성과 내구성을 모두 만족하는 단면을 구할 수 있을 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 아스팔트 포장에서 소성변형과 균열에 대한 저항성, 그리고 경제성효과를 만족시킬 수 있는 최적 단면을 구하고자 국내 아스팔트 포장재료의 물성치와 현행 국내설계적용 상대강도계수로 부터 구한 탄성계수의 2종류 물성요인을 입력변수로 하여 다층탄성이론에 의한 포장구조해석과 유한요소 구조해석을 실시하였고, 점탄성해석에 의한 소성변형 예측과 경제성 분석을 통해 아스팔트 포장단면설계의 개선방안

을 제시하였다. 본 연구에서 얻은 주요결론은 다음과 같다.

1. 국내물성시험치와 적용기준탄성계수를 두 가지 요인으로 하여 다층탄성해석을 실시한 결과, 표층은 최소두께로 하고 SN치가 증가함에 따라 기층의 두께가 증가하는 단면에서 표면치짐, 아스팔트층 하단 인장변형률, 노상압축변형률에 대한 저항성이 증가하는 것으로 나타났다.
2. 유한요소 해석에 의한 포장구조해석 결과, 아스팔트층의 하단인장 변형률은 SN이 4.78과 6.75에서 표층이 7.5cm일 때 우수한 공용특성을 나타냈으며 노상압축변형률은 다층탄성해석결과와 동일한 결과를 나타냈다.
3. 점탄성 구조해석결과, 표층의 두께는 다층탄성해석과 마찬가지로 표층의 두께는 최소두께인 5cm일 때 소성변형에 대한 저항성이 큰 단면으로 나타났으며, 기층의 두께는 SN치가 감소함에 따라 다층탄성 구조해석시보다 기층두께감소가 커지는 것으로 나타났다.
4. 본 연구에서는 아스팔트포장의 내구성, 소성변형, 경제성을 만족하는 단면을 찾기위해 상대지수개념을 만들었으며 상대지수분석을 통하여 보조기층의 두께에 대한 아스팔트층의 적정단면비가 1.0~2.5로 제시되었다.

참고문헌

1. AASHTO, AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, AASHTO 1986, pp.8-17.



2. C.J. Van Til, B.F. McCullough, B.A. Vallerga, and R.G. Hicks, Evaluation of AASHO Interime Guides for Design of Pavement Structures, NCHRP, Report.128, 1972, pp.19-38.
3. Eisenmann, J. and Hilmer, A., Influence of Wheel Load and Inflation Pressure on the Rutting Effect at Asphalt-Pavements-Experiments and Theoretical Investigations, Proceedings of Sixth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol.1, Ann Arbor, 1987. pp.392-403.
4. Hofstra, S., Permanent Deformation of Flexible Pavements Under Simulated Road Traffic Conditions, Proceedings, of Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol.1, London, 1977.
5. Kenis, W.J. "Predictive Design Procedures, VESYS Users Manual", FHWA Report 77-154, 1978, pp.97-127.
6. Kenis, W.J., "Evaluation of Mechanical Parameters of Inservice Pavements from Field Data", Proceedings of the Sixth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol 1, Ann Arbor, Michigan, 1987, pp.710-724.
7. Per ullidtz, Pavement Analysis, Elsevier, 1987, pp.177-210.
8. Uge, P. and van de Loo, P.J., Pavement Deformation of Asphalt Mixes, Koninklijke/Shell Laboratorium, Amsterdam, 1974.
9. 日本 アスファルト 協會, アスファルト, Vol. 35, No.173, 平成 4年. 10., pp.68-78.
10. 한국건설기술연구원, 도로포장설계 입력변수의 산정기법에 관한 연구, 전기연 89-H-1, 1989. 12, pp.137-210.
11. 한국도로공사, 고속도로 아스팔트 포장설계법 개선에 관한 연구, 도로연-94-15-6, 1994. 12, pp.42-83.
12. 한국도로공사, 아스팔트 포장구조해석 연구, 도로연-92-13-6, 1992. 12, pp.167-196.