

유한요소 해석을 이용한 반강성 포장의 거동특성 조사

Investigation of Characteristics of Resin Modified Pavements Using Finite Element Analysis

박강용* · 김다혜** · 김기현*** · 권수안**** · 권오성***** · 김철민***** · 정진훈*****

Park, Kang Yong · Kim, Da Hae · Kim, Ki Hyun · Kwon, Soo Ahn
Kwon, Oh sung · Kim, Cheol Min · Jeong, Jin Hoon

1. 서 론

아스팔트포장은 지속적인 교통량 증가 및 정체구간의 확대에 의하여 파손이 증가되고 있다. 특히 교통량이 많은 교차로나 중차량의 통행이 빈번하고 급제동 및 정차구간에서는 아스팔트포장에 소성변형현상이 발생하여 포장의 수명이 설계기간을 채우지 못하고 보수하는 사례가 늘고 있다. 그리고 여름철 맑은 날 아스팔트 포장표면의 고온화는 도시 열섬현상의 한 원인이 되고 있다. 이를 극복하기 위한 한 방법으로서 아스팔트 모체에 시멘트 페이스트를 침투시켜 아스팔트의 강성을 보완하고 포장 표면온도 상승 억제효과를 기대할 수 있는 반강성 포장공법이 국내에 도입되어 시험시공 및 현장적용 단계에 있다.

반강성포장은 1950년대 프랑스 특허공법인 살비아심 포장으로부터 개발되었고, 1980년대에는 전 세계적으로 반강성포장 공법에 대한 연구개발이 활성화되었다(Gary, 1996). 반강성포장은 공극률이 20~28% 범위인 개립도 아스팔트 혼합물 모체에 그 공극에 시멘트 페이스트를 주입하는 포장공법으로 아스팔트포장의 연성과 콘크리트포장의 강성 및 내구성을 복합적으로 가지고 있다. 포장표면에서 2~3cm까지 시멘트 페이스트를 주입시키는 반침투형과 전체층을 침투시키는 전침투형이 있으며, 높은 내유동성과 내하중성을 필요로 하는 경우에는 전침투형이 보다 유리하다. 반강성포장은 아스팔트포장으로 시공되므로 평탄성이 우수하고 콘크리트포장에 비해 차량진동이나 소음을 저감할 수 있다. 그리고 반강성포장은 아스팔트포장의 단점으로 지적되는 소성변형 방지 및 온도저감효과에 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 반강성포장이 국도 유지보수의 공법으로 적절한지 판단하기 위하여 42번국도 만종삼거리구간에 시험시공 하였다. 포장 공용성을 평가하기 위하여 반강성포장의 특성으로 알려진 온도저감효과와 소성변형 등을 측정하는 추적조사 및 분석 단계에 있으며, 향후 이를 바탕으로 경제성 분석할 계획이다.

본 연구는 구조해석을 통하여 반강성포장의 공용성을 평가하고자 하였다. 3차원 유한요소해석을 위해 Abaqus 6.8을 사용하여 모델을 구성하였으며, 이를 다층탄성프로그램 Bisar 3.0을 사용하여 비교 및 검증하였다. 하중재하 지점에서의 수평방향, 연직방향 응력 및 변형률 거동을 분석하였다. 그리고 공용성평가를 위해 피로균열 예측모델과 소성변형 예측모델을 사용하여 반강성포장과 아스팔트포장을 비교 및 분석하였다.

2. 유한요소 해석

본 연구에서는 두 가지 프로그램을 이용하여 구조해석을 수행하였다. 첫 번째는 유한요소 프로그램인 Abaqus를 이용하여 포장의 수평방향과 연직방향에 발생하는 응력과 변형률 거동을 확인하였다. 두 번째로는

* 학생회원 · 인하대학교 토목공학과 석사과정 · 032-873-5332(E-mail : kamsija@nate.com)
** 정회원 · 한국건설기술연구원 도시시설연구실 · 연구원 · 031-910-0183(E-mail : dahae@kict.re.kr)
*** 정회원 · 한국건설기술연구원 도시시설연구실 · 연구원 · 031-910-0434(E-mail : kihyun@kict.re.kr)
**** 정회원 · 한국건설기술연구원 도시시설연구실 책임연구원 · 공학박사 · 031-910-0434(E-mail : sakwon@kict.re.kr)
***** 정회원 · 국토해양부 도로운영과 · 과장 · 02-2110-8733(E-mail : okwon@korea.kr)
***** 정회원 · 국토해양부 도로운영과 · 사무관 · 02-2110-8737(E-mail : kimcm57@korea.kr)
***** 정회원 · 인하대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사 · 032-860-7574(E-mail : jhj@inha.ac.kr)



다층탄성 프로그램인 Bisar3.0을 이용하여 유한요소 프로그램에서 해석한 내용을 검증하는 단계로 구조해석을 수행하였다. 해석 모델에 적용하기 위해 220mmX220mm의 정사각형 면적에 약 4.1ton의 타이어 압력을 재하 하였으며, 포장 구조해석에 사용되는 입력 물성은 포장의 표층온도로 4계절 대표온도 봄과 가을은 25℃, 여름 40℃, 겨울 5℃로 선정하여 문헌조사 데이터를 사용하였다. 시간별 온도의 데이터를 입력하여 미시적인 분석을 할 경우 더욱 정확한 데이터를 도출할 수 있지만, 이는 소요시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 포장 구조해석을 실시하기 위해 선행연구자들이 실내시험에 사용한 온도데이터를 기준으로 거시적인 구조해석을 실시하였다. 기층, 보조기층, 노상의 탄성계수(백종은, 2000), 반강성포장의 탄성계수(Anderton, 2003), 아스팔트포장의 탄성계수(박성완, 2007)의 값을 입력하여 구조해석 하였다. 포아송비는 일반적인 포장 구조해석에 많이 사용하는 대표적인 값을 사용하였다. 구조해석에 사용된 포장의 표층 두께 및 입력 물성은 각각 표 1과 표 2에 나타내었다.

표 1. 포장구조체 각 층의 두께

포장층	두께(mm)		
	50mm 반강성포장	70mm 반강성포장	아스팔트포장
반강성표층	50	70	-
아스팔트표층	60	40	110
안정처리기층	140	140	140
보조기층	300	300	300
노상	6000	6000	6000

표 2. 포장구조체 각 층의 물성

포장층	탄성계수(MPa)			포아송비		
	40℃	25℃	5℃	40℃	25℃	5℃
반강성표층	5800	11200	19800	0.28	0.26	0.2
아스팔트표층	2918	6036	13670	0.3	0.3	0.3
안정처리기층	2843	5883	12748	0.35	0.35	0.35
보조기층	882	882	862	0.40	0.40	0.40
노상	186	176	166	0.40	0.40	0.40

3. 해석결과 분석

반강성포장과 아스팔트포장의 구조를 해석하기 위하여 먼저 유한요소 프로그램 Abaqus를 이용하여 구조해석하였다. 구조 해석모델은 그림 1과 같이 6mX6m의 정사각형으로 구성하였으며, 표 1과 표 2에서 제시한 포장구조의 포장두께 및 물성치를 입력하여 포장의 응력과 변형률을 비교하였다.

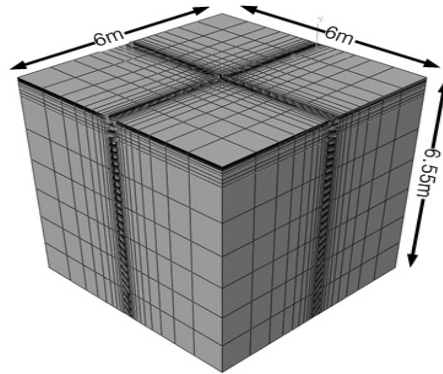
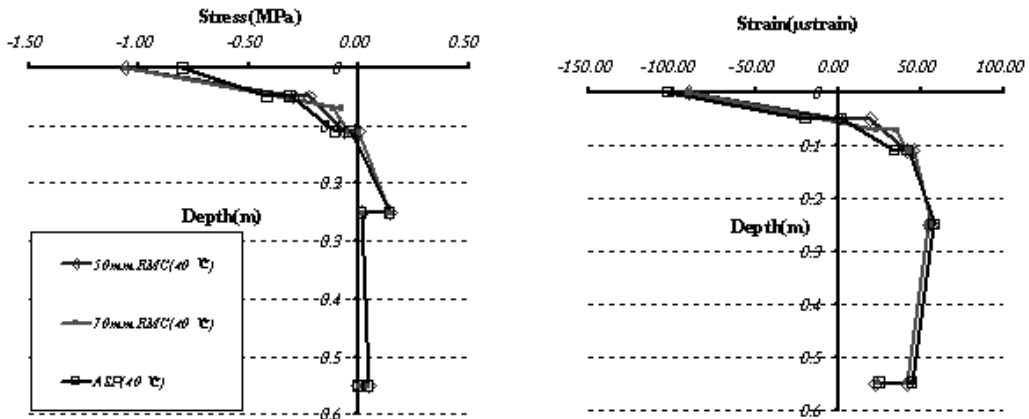


그림 1. 포장체의 유한요소 모델

해석모델의 하층은 표층상부의 중앙 220×220mm 정사각형 지점에 0.827 MPa의 하중이 균일하게 재하되도록 하였다. 온도가 다른 경우의 물성을 입력하여 반강성포장과 아스팔트포장의 깊이에 따른 수평방향 및 연직방향의 응력과 변형률을 확인하여 나타내었다.

그림 2는 Abaqus로 해석한 예로 온도가 40℃인 구조의 포장깊이에 따른 수평방향 응력 및 변형률을 나타낸 그림이다. 표층에서 반강성포장의 압축응력이 아스팔트포장보다 크게 발생한다. 수평방향 변형률은 25℃와 40℃에서 아스팔트표층 변형률이 크지만 5℃에서의 변형률은 반강성표층과 아스팔트표층의 변형률이 비슷한 결과를 나타내었다. 그리고 기층에서의 응력은 온도에 따라 다소 차이가 있으나 반강성포장과 아스팔트포장에 비슷한 응력이 발생하고, 변형률은 온도가 높을수록 포장의 변형률이 크고 반강성포장과 아스팔트포장의 변형률차도 큰 것으로 나타났다.



(a) 응력-수평방향

(b) 변형률-수평방향

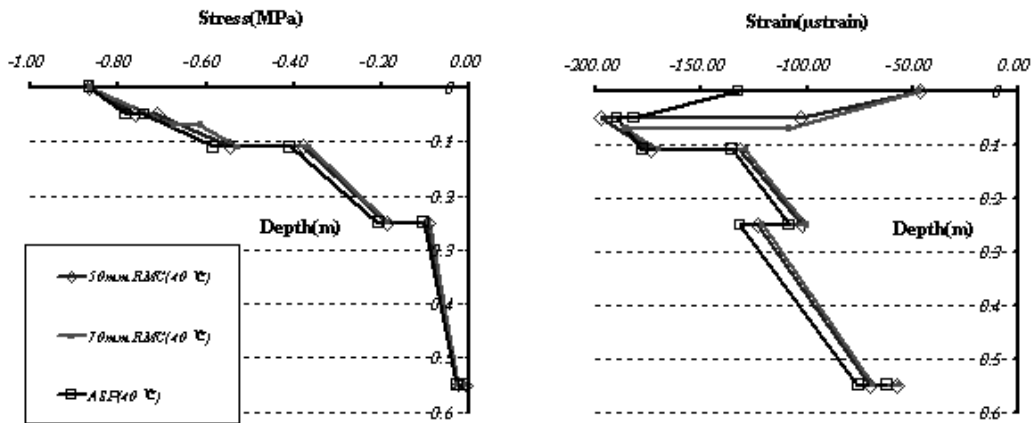
그림 2. 40℃에서 포장 깊이에 따른 수평방향 응력 및 변형률

반강성포장과 아스팔트포장의 기층 하단에서 발생한 수평방향 변형률 결과는 표 3에 나타내었다. 분석 결과, 기층하단의 변형률은 온도와 포장의 종류에 따라 변형률의 차이를 나타내었다. 기층하단의 수평방향 변형률은 온도가 높을수록 변형률이 크게 나타났고, 아스팔트포장, 50mm 반강성포장, 70mm 반강성포장 순으로 변형률이 크게 나타났다.

표 3. 온도에 따른 기층하단 수평방향 변형률(μstrain)

온도	50mm 반강성포장	70mm 반강성포장	아스팔트포장
40℃	56.5	55.7	58.2
25℃	37.8	37.3	39.0
5℃	23.5	23.2	23.9

그림 3은 Abaqus로 해석한 예로 온도가 40℃인 구조의 포장깊이에 따른 연직방향 응력 및 변형률을 나타내었다. 포장에서 발생하는 연직방향 압축응력은 온도 및 포장 종류에 관계없이 비슷한 값을 나타내었다. 40℃에서의 아스팔트표층 변형률은 반강성표층에 비해 약 3배정도 크게 나타났으며, 25℃에서의 아스팔트표층 변형률은 반강성표층에 비해 약 2배정도 크게 나타났다. 그러나 5℃에서의 반강성표층 변형률은 아스팔트표층보다 다소 높은 값을 나타내었다. 그리고 40℃에서 중간층이 보조기층보다 큰 변형률을 보였으나, 25℃와 5℃에서는 중간층보다 보조기층이 더 큰 변형률을 나타내었다. 이는 표층, 중간층 및 기층은 온도의 영향으로 인한 탄성계수 변화가 크게 작용하지만 기층 아래에 있는 보조기층은 탄성계수 변화가 크지 않기 때문에 발생한 현상으로 판단된다.



(a) 응력-연직방향

(b) 변형률-연직방향

그림 3. 40℃에서 포장 깊이에 따른 연직방향 응력 및 변형률

표 4에서는 반강성포장과 아스팔트포장의 아스팔트층과 보조기층, 노상의 중간에서 발생한 연직방향 변형률 결과를 나타내었다. 분석 결과, 온도와 포장의 종류에 따라 변형률의 차이를 나타내었다. 온도가 높을수록 변형률이 크게 나타났으며, 아스팔트포장, 50mm 반강성포장, 70mm 반강성포장 순으로 변형률이 크게 나타났다.

표 4. 온도에 따른 연직방향 변형률(μstrain)

온도	포장층	50mm 반강성포장	70mm 반강성포장	아스팔트포장
40℃	아스팔트층(중간)	-137.1	-127.6	-156.8
	보조기층(중간)	-67.75	-62.16	-84.24
	노상(중간)	-56.78	-53.36	-66.29
25℃	아스팔트층(중간)	-64.96	-61.80	-72.09
	보조기층(중간)	-52.04	-48.28	-64.18
	노상(중간)	-48.42	-45.67	-56.79
5℃	아스팔트층(중간)	-30.17	-29.43	-31.89
	보조기층(중간)	-38.78	-36.86	-44.91
	노상(중간)	-41.04	-39.36	-45.51

4. 해석결과 검증

다층탄성프로그램 Bisar 3.0을 이용하여 유한요소프로그램으로 해석한 반강성포장과 아스팔트포장의 구조를 검증하고, 재해석하기 위한 방법으로 동일한 조건으로 구조해석을 수행하였다. 그림 13과 14에 다층탄성 프로그램으로 검증한 결과의 예로 Abaqus와 Bisar 3.0에서 해석한 40℃에서의 반강성포장과 아스팔트포장의 수평방향 응력 및 변형률 거동을 비교하였다.

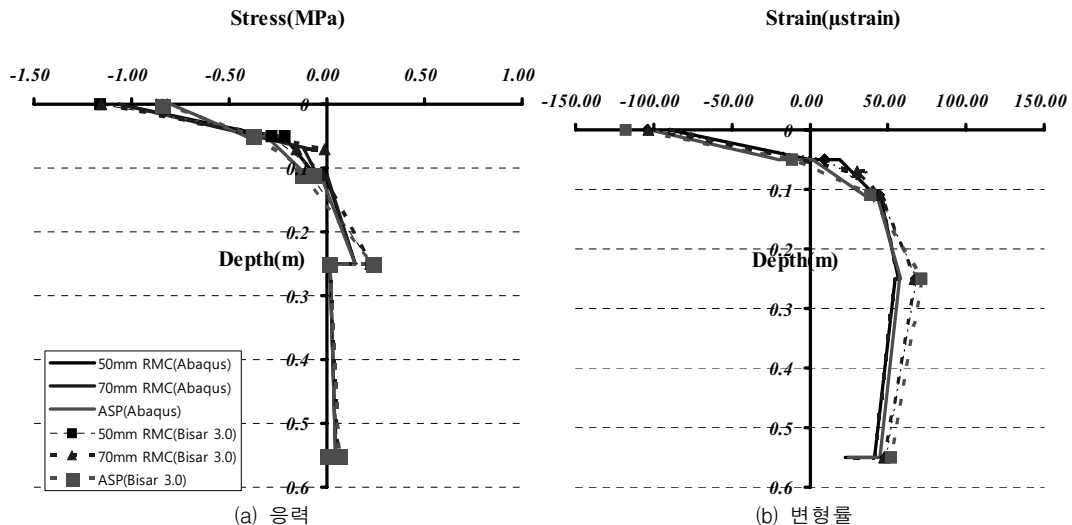


그림 4. 40℃온도에서의 포장 깊이에 따른 수평방향 응력 및 변형률 비교

그림 4는 Abaqus와 Bisar 3.0으로 40℃ 온도에서의 수평방향 응력 발생 및 변형률을 비교한 그림이다. 응력 발생 및 변형률 크기는 최대 10%정도의 오차를 보이지만 전체적인 모델은 비슷하게 거동하였다. 응력 및 변형률의 크기가 차이를 보이는 이유는 Abaqus와 달리 Bisar 3.0은 수평면을 무한으로 가정하고, 노상의 깊



이도 Abaqus에서 정의한 6m와는 달리 무한한 것으로 가정하고 해석하였기 때문인 것으로 판단된다.

5. 공용성 분석

5.1 피로균열 예측

피로균열은 반복되는 교통하중의 영향으로 발생하는 파손이다. 초기에는 미세한 균열로 시작되지만 하중이 반복될수록 균열이 진행되어 포장의 공용성에 영향을 미치는 주요인자 중 하나이다. 피로균열의 발생은 주로 과중한 교통하중이 반복적으로 작용하는 것이 주된 원인이 된다. 피로손상 모델을 이용하여 반강성포장과 아스팔트포장의 피로균열을 예측하였다. 교통하중은 ESAL등가단축하중이 하루에 10000대 재하된다 가정하였으며, 월별 환경조건을 고려하는데에는 많은 시간이 필요하여 4계절의 대표적인 입력변수를 표 5와 같이 고려하였다. 피로균열을 예측하기 위한 구조해석 결과는 아스팔트 층의 하부에서의 수평방향 변형율을 예측 모델에 반영하였다. 식(1)에 대해 반강성포장 재료의 피로모형에 관한 실험계수를 적용할 수 없어, 반강성포장 표층을 아스팔트층으로 치환하여 수치해석 하였다.

먼저, 포장 파괴를 일으키기까지의 재하 횟수 N_f (AI, 1982)를 산출하고, 산출된 값을 근거로 하여 피로균열 전이함수(AASHTO, 2002)를 이용하여 계산하였다. 포장 파괴를 일으키는데 재하 횟수를 구하는 방법은 식 (1)과 같고, 포장온도에 따른 N_f 는 계산하여 표 8에 나타내었다.

$$N_f = f_1(\epsilon_1)^{-f_2}(E_1)^{-f_3} \quad (1)$$

여기서, N_f = 파괴에 이르기까지 필요한 재하 횟수

ϵ_1 = 기층 하부의 인장변형률

$f_1 = 0.0796, f_2 = 3.291, f_3 = 0.854$ (AI, 1982)

표 8. 표층온도에 따른 N_f

온도	$N_f (\times 10^9)$		
	50mm 반강성포장	70mm 반강성포장	아스팔트포장
40℃	0.1188369334	0.124736280	0.1077843155
25℃	0.2409682798	0.2529164105	0.2168526607
5℃	0.5703106564	0.60111107537	0.5377856112

계산된 N_f 를 사용하여 산출된 값을 식 (2)를 사용하여 피로균열을 예측하였다.

$$FC_{bottom} = \left(\frac{6000}{1 + e^{(C_1 \times C'_1 + C_2 \times C'_2 \times \log_{10}(D \times 100))}} \right) \times \left(\frac{1}{60} \right) \quad (2)$$

여기서, FC_{\perp} = 상향 피로 균열율(%)

D = 피로손상

C_1, C'_1, C_2, C'_2 = 모형계수

$C_1 = 1.0, C'_1 = -2 \times C'_2$

$C_2 = 1.0, C'_2 = -2.40874 - 39.748 \times (1 + h_{ac})^{-2.856}$

h_{ac} = 포장두께

반강성포장과 아스팔트포장의 피로균열 예측 결과는 그림 14와 같이 나타내었다. 위스콘신주의 피로 균열을 성능보증 임계한도는 공용기간 5년동안 10%로 정하고 있다. 피로 균열을 10%를 기준으로 50mm 반강성포장이 아스팔트포장에 비해 약 1.15배, 70mm 반강성포장이 아스팔트포장에 비해 약 1.2배정도 증가된 공용수명을 가지는 것으로 나타났다.

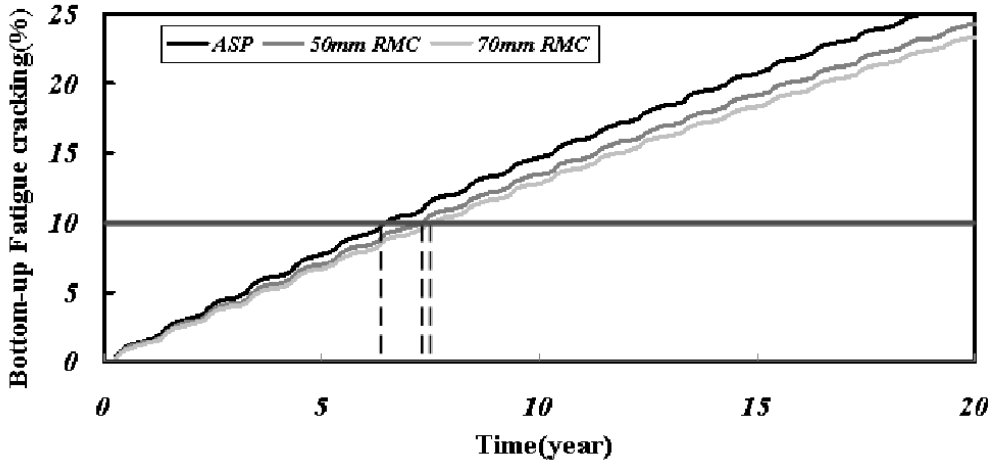


그림 14. 반강성포장과 아스팔트포장의 피로균열 예측 결과 비교

5.2 소성변형 예측

소성변형은 차량하중의 반복 작용으로 인하여 회복 불가능한 변형의 축적으로 발생하는 현상이다. 소성변형의 원인은 여러 가지가 있으나, 아스팔트층과 노상에서의 반복응력으로 인한 변형에 기인한다. 소성변형 예측 모델을 사용하여 반강성포장과 아스팔트포장의 소성변형을 예측하였다. 교통하중은 ESAL 등가단축하중이 하루에 10000대 제하된다 가정하였다. 월별 환경조건을 고려하는데 많은 시간이 소요되므로 4계절의 대표적인 입력변수를 표 5와 같이 고려하였다. 소성변형을 예측하기 위한 구조해석 결과는 각 포장층의 중간에서의 연직방향 변형율을 예측모델에 반영하였다. 반강성포장 재료에 대한 소성변형 모델의 실험계수를 적용할 수 없어, 반강성포장 표층을 아스팔트층으로 치환하여 수치해석 하였다.

포장의 하중 제하 시 소성변형률을 산출하기 위하여 식 (3)의 VESYS 모델과 선행 연구자가 제안한 모델 계수를 이용하여 계산하였다. (Tom Scullion, 2002)

$$\epsilon_p(N) = \epsilon_r \times \frac{\mu}{1-\alpha} N^{(1-\alpha)} \quad (3)$$

여기서, $\epsilon_p(N)$: N번째 하중 제하시 소성 변형률

μ : 소성 변형률과 탄성 변형률 사이의 비례상수

ϵ_r : 회복 탄성변형률

N : 하중반복회수

α : 제하회수에 따른 영구변형 증가량의 감소율

표 9. 소성변형 예측 모델의 계수 (Tom Scullion, 2002)

포장층	α	μ
아스팔트층	0.65	0.6
보조기층	0.7	0.5
노상	0.7	0.04

아스팔트층, 보조기층, 노상으로 각각 나누어 계산된 소성 변형률을 누적하여 전체 포장의 소성변형을 예측하였다. 그림 15에서는 소성변형 예측 결과를 나타내었다. 허용소성변형을 13mm로 하였을 때, 50mm 반강성포장이 아스팔트포장에 비해 약 1.3배, 70mm 반강성포장이 아스팔트포장에 비해 약 1.5배정도 증가된 공용수명을 가지는 것으로 나타났다.

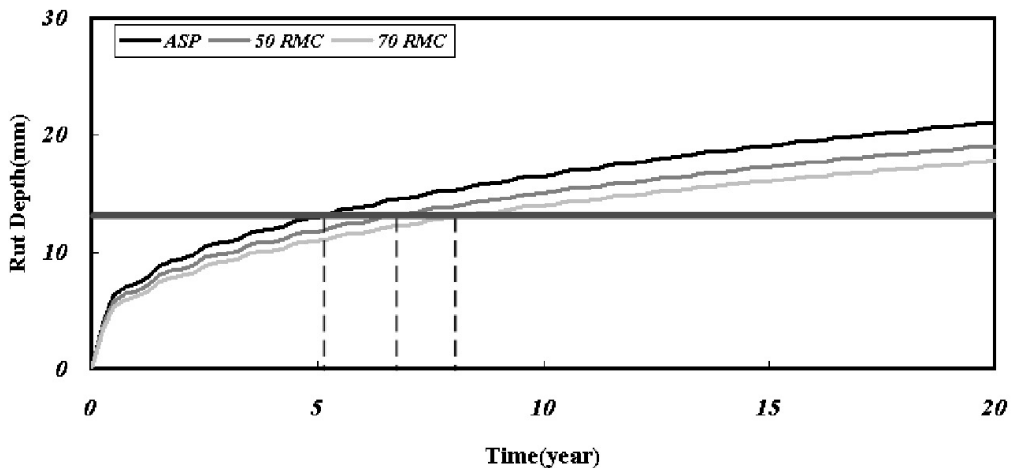


그림 15. 반강성포장과 아스팔트포장의 소성변형 예측 결과 비교

6. 결론

본 연구에서는 반강성포장의 성능을 평가하기 위하여 포장온도변화 측정시험과 구조해석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 반강성포장의 구조해석을 통하여 수평방향 응력 및 변형률을 분석한 결과, 수평방향 응력은 반강성포장이 높게 나타났으나, 수평방향 변형율은 반강성포장이 아스팔트포장에 비해 작게 나타났다.
- (2) 구조해석을 통하여 연직방향 응력 및 변형률을 분석한 결과 응력은 포장 종류 및 온도에 따라 다소 차이가 있었지만 비슷한 거동을 나타내었다. 그러나, 연직방향 변형율은 온도 차이에 따라 큰 차이를 보였으며 같은 온도에서 반강성포장의 변형율은 아스팔트포장의 변형율에 비해 작은 폭으로 거동하였다.
- (3) 구조해석으로 통해 얻어진 아스팔트 층 하부의 수평방향 변형률을 바탕으로 하여 반강성포장과 아스팔트포장의 피로균열 예측한 결과, 피로 균열을 10%에 대하여 반강성포장이 아스팔트포장에 비해 50mm인 경우 1.15배, 70mm인 경우 1.2배 증가된 공용수명을 가지는 것으로 나타났다.
- (4) 구조해석으로 통해 얻어진 각 포장 층 중간에서의 연직방향 변형율을 이용하여 소성변형을 예측한 결과, 허용소성변형을 13mm로 보았을 때, 반강성포장이 아스팔트포장에 비해 50mm인 경우 1.3배, 70mm

인 경우 1.5배 증가된 공용수명을 가지는 것으로 나타났다.

- (5) 향후 지속적인 시험시공 구간 추적조사 및 분석을 실시하고 본 연구에서 조사된 온도저감효과 및 공용성 평가를 바탕으로 반강성포장의 경제성을 분석할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 『시험시공구간 추적조사 및 분석』의 수행결과와 일부로써, 연구지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김주원, 송철영(2004) “반강성포장의 현장시공”, 한국도로학회지, 한국도로학회, 제6권, 제3호, pp 62~72
2. 문정규(2006) “**반강성포장의 공학적 특성 평가**”, 공학석사 학위청구논문, 서울산업대학교 대학원.
3. 박성완(2007), “유전자 알고리즘을 이용한 포장층 탄성계 역해석 기법 개발 Part II : 검증 및 확인” 대한토목학회논문집, 제 27권, 제4D호, pp 449~456.
4. 박태순(2008) “반강성포장의 성능 및 보수성 평가”, 한국도로학회 논문집, 한국도로학회, 제10권, 제1호, pp 69~79.
5. 박희문, 최지영, 박성완 (2005), “19mm 밀입도 아스팔트 혼합물의 소성변형 예측 모델 개발”, 한국도로학회 논문집, 한국도로학회, 제7권, 제4호, pp 1~8.
6. 백종은(2000) “동적유한요소해석에 의한 FWD 시험의 모델링”, 한국도로학회 학술발표회 논문집, 한국도로학회, 제2권, 제1호, pp 9~13.
7. 조명환(2006) “타이어의 접지 면적과 비선형 접지압력을 고려한 연성포장내의 거동분석”, 대한토목학회 논문집, 제 26권, 제4D호, pp 601~608.
8. Ahlrich, R. C. and Anderton, G. L.(1991), “Evaluation of resin modified paving process”, Transportation Research Board, *Transportation Research Record No. 1317*, Washington, DC,
9. Ann M. Johnson(1999), P.E “Use of Design/Build and Warranties in Highway Construction - Guidelines for Program Implementation”, Local Road Research Board, Final Report 1999-37
10. Fujie Zhou and Tom Scullion(2002), “Vesys5 rutting model calibrations with local accelerated pavement test data and associated implementation”, FHWA/TX-03/9-1502-01-2
11. Gary, L. Anderton(1996) “User’s Guide : Resin Modified Pavement”, FEAP-UG-96/01, Facilities Engineering Application Program
12. Gary, L. Anderton(2000), “Engineering Properties of Resin Modified Pavemnet(RMP) for Mechanistic Design”, ERDC/GL TR-00-2,
13. Yang H.Huang(1993) Pavement Analysis and Design. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J