

줄눈을 메운 덧씌우기 아스팔트 콘크리트의 반사균열 피로수명 추정

Fatigue Life Estimation of Reflection Cracking of Overlaid Asphalt Pavement on Joint Sealed PCC

김광우* · 최동춘** · 이영관*** · 김성태**** · 도영수*****

Kim, K. W. · Choi, D. C. · Lee, Y. G. · Kim, S. T · Doh, Y. S.

1. 서론

본 연구의 목적은 콘크리트 줄눈 실링재의 사용이 덧씌우기 아스팔트 포장의 반사균열 제어에 미치는 영향을 파악하고, 사용된 실링재의 종류에 따른 아스팔트 포장의 상대수명을 추정하는 연구를 수행하는 것이다. 이를 위하여 반복하중하의 복합파괴모드(Fracture mode II)를 모사한 실험(김광우 등, 1999)을 통하여 실링재의 종류에 따른 아스팔트 포장체의 반사균열 저항 특성을 비교분석하였다. 또한 유한요소해석법을 이용하여 균열선단에서의 파괴인성을 구하고 수정 Paris 법칙(도영수, 2000)에 근거한 피로수명 추정을 통해 실링재의 성능을 상대비교하기 위한 근거를 제시하였다. 본 논문은 그 중 피로수명 추정을 다루고 있다. 현장 조건을 모사한 실내 실험 방법 및 결과는 본 논문집에 동반하여 실린 “줄눈을 메운 덧씌우기 아스팔트 포장의 반사균열 제어효과”에서 자세히 언급하였다.

2. 피로수명 추정

본 연구에서는 반사균열에 따른 피로수명을 예측하기 위하여 유한요소 프로그램으로부터 균열선단의 응력확대계수를 구하고 그것을 이용하여 피로수명을 추정하였다. 이에 대한 자세한 방법은 참고문헌(최동춘, 2002)에 상세히 기술되어있다.

2.1. 피로수명 추정방법

유한요소 프로그램에서는 반사균열 실험을 위한 공시체 치수 (Fig. 1)를 근거로 하여 Fig. 2와 같이 모델링하였으며 사용된 각 층의 물성치는 Table 1과 같다.

여기서 콘크리트의 두께 3cm는 Fig. 1에 보여준 공시체의 가운데 공간의 높이이므로 이를 줄눈깊이로 가정하고 또한 초기균열길이(a_0)로 취급하였다.

Table 1. Properties and thickness of each layer material

Classification		Elastic modulus (kgf/cm ²)	Poisson's ratio	Thickness (cm)
Asphalt overlay	NAP	20,000	0.39	5.0
	PMA	22,000	0.30	5.0
Concrete		200,000	0.20	3.0

*정회원 · 강원대학교 농업공학부 교수 · 공학박사 (033-250-6467, kwkim@kangwon.ac.kr)
**정회원 · 미국 시카고시 공무원 · 공학박사
***정회원 · 강원대학교 대학원 지역기반공학과 석사과정 (033-250-7284, ygguy@korea.com)
****정회원 · 강원대학교 대학원 지역기반공학과 석사과정 (033-250-7284, popmaker@yahoo.co.kr)
*****정회원 · 고속도로관리공단 포장연구실장 (ysdoh@himan.co.kr)

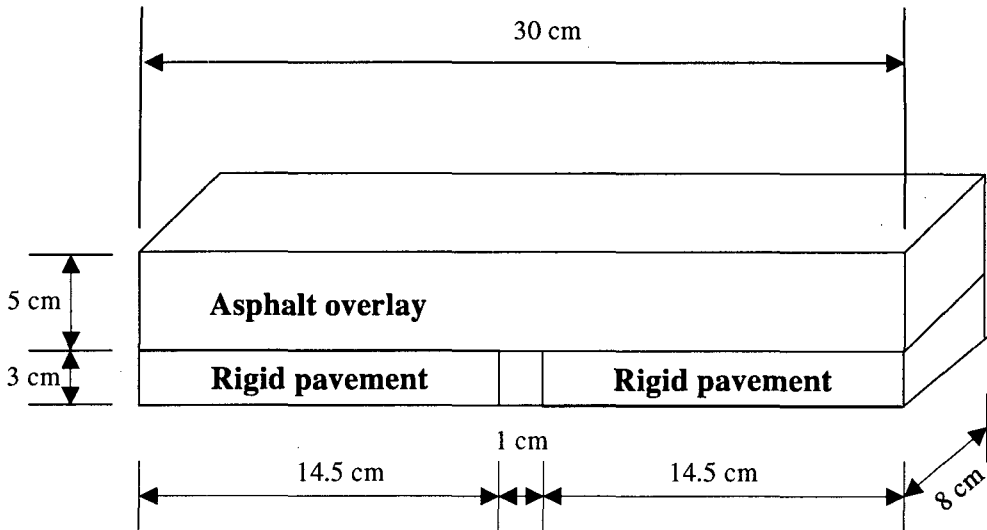


Fig. 1 Specimen size for mixed failure test

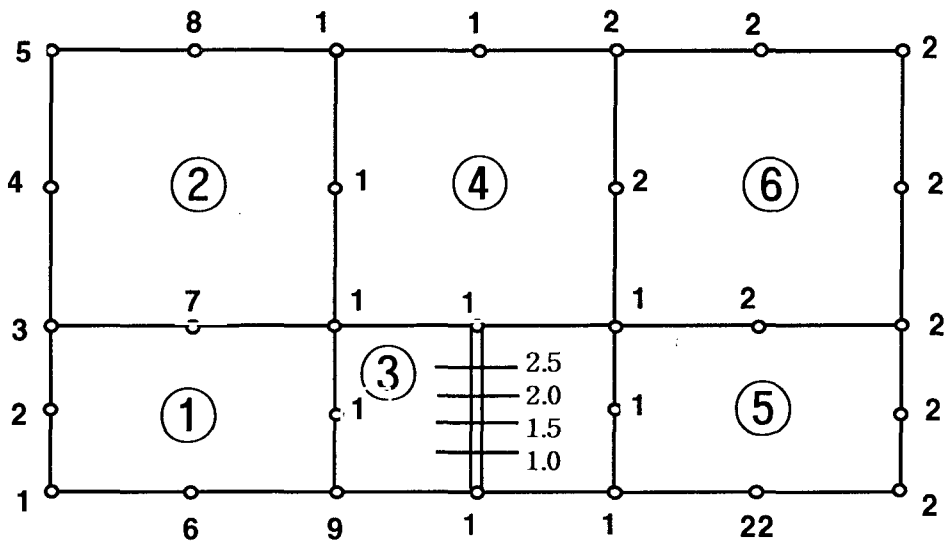


Fig. 2 Mesh model for solution of a specimen

유한요소해석은 Fig. 2에서와 같이 요소는 총 6개로 나누었고, 노드는 합계 29개로 결정하였으며, 요소당 6개 노드로 하였다. 노드좌표를 입력한 노드수는 13개 (1, 3, 5, 9, 10, 11, 13, 14, 17, 19, 21, 25, 27, 29)이다. 요소 3에서 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 등은 선정된 재료들의 초기균열길이(a_0)값으로 실제 초기균열축소효과를 보기 위하여 가정한 점들이다.

실행모델을 유한요소해석법으로 해석하기 위하여 선형탄성 파괴해석법으로 균열진전에 의한 응력확대계



수 값을 구하였다. 유한요소해석은 2차원 선형 탄성과피방법을 사용하였고 하중조건은 균열 부 바로 위에 재 하하여 포장 하부에서 인장응력을 받는 경우와 줄눈부 끝부분에 하중을 재하하여 전단응력을 유발하는 형식으로 가정하였다. 하중 크기는 실험에서 적용한 100kgf를 적용하였다. 구속조건은 하단부의 양단을 고정시켰다.

유효 응력확대계수를 구하려면 Paris 법칙을 사용해야 한다. 하지만 실링재로 줄눈을 채움으로 인하여 외형상으로는 초기 균열이 없어진 것 같이 보이나 실링재료의 탄성계수가 크게 낮아 단지 초기균열이 줄어드는 효과를 낸다. 따라서 본 연구에서는 실링재의 탄성계수가 아스팔트 콘크리트에 비해 아주 낮으나 실링재 별로 강성(Stiffness)에 따라 각각 초기균열 길이를 다르게 설정하기로 하였다.

혼합물 별로 초기균열 길이를 1.0, 1.5, 2.0, 2.5mm로 가정하고 유효응력확대계수를 구한 다음 혼합물의 피로수명을 추정하여 상관관계가 가장 높게 얻어지는 균열길이를 초기균열 길이로 설정하였다.

2.2. 응력확대계수에 의한 피로수명 추정

2.2.1. 수평변위의 확장에 의한 수명 추정

유한요소해석법을 사용하여 휨과 전단에 의해 아스팔트 콘크리트에서 발생하는 응력확대계수를 계산하였다. 실링재를 사용한 혼합물들은 초기균열 길이를 1.0, 1.5, 2.0, 2.5mm로 가정하였을 때의 응력확대계수의 값과 du/dN 에 대하여 회귀분석을 수행하여 Fig. 3과 같은 그림으로 나타내었다. 혼합물 별로 초기균열 길이는 Fig. 4와 같이 회귀분석에서 상관관계 값이 가장 높게 얻어지는 정점 값으로 결정하였으며 그 결과를 Table 2에 제시하였다.

또한 결정된 균열길이를 대입하여 구한 각 혼합물들의 응력확대계수와 수평인장변위 확장에 근거한 수명 추정에 따른 재료상수 C 와 m 을 회귀분석을 통하여 구하고 이를 Table 2에 나타내었으며 혼합과피에 의한 균열의 피로수명 추정식 및 추정값을 Table 3에 제시하였다. Table 3에서 보여준 추정식에 의한 피로수명 추정값과 실험에 의한 측정값의 상관관계를 Fig. 5에 제시하였다. 혼합과피에 의한 피로수명과 응력확대계수의 관계를 고려한 수명 예측치와 실측치의 상관관계는 $R^2 \approx 0.98$ 로 아주 높게 나타났다.

2.2.2. 피로수명과 응력확대계수의 관계에 의한 수명 측정

혼합과피의 반사균열 진전에 따른 유효응력확대계수의 변화에 대한 피로수명에 대하여 회귀분석을 수행하여 대표적인 한 가지 경우를 Fig. 6에 나타내었다. 또한 혼합과피에서의 각 혼합물들의 유효응력확대계수와 피로수명에 근거한 수명추정에 따른 재료상수 C 와 m 을 회귀분석을 통하여 구하고 이를 Table 4에 나타내었으며 이 방법에 의한 반사균열의 피로수명 추정식 및 추정값을 Table 5에 제시하였다.

Table 5의 회귀분석에 의한 피로수명의 추정값과 실험에 의한 측정치의 상관관계를 혼합과피에 대한 모든 혼합물에 대하여 Fig. 7에 나타냈다. 그 결과 R^2 는 0.8정도로 비교적 양호한 측정결과를 보여준다. 여기서 PMA 혼합물들보다는 NAP(일반 아스팔트 혼합물) 혼합물들에서의 측정치 정확도가 비교적 높았으며 상대적으로 개질 혼합물들은 0.9미만으로 낮게 나타나는 차이를 보였다. 이는 개질재료들의 사용이 이질적인 재료의 사용으로 인해 결과의 일체성이 떨어지기 때문으로 보여진다.

또한 앞에서 수행한 수평변위에 의한 추정치와 비교해서보면 비교적 낮은 R^2 를 보여 전자의 방법이 더 정확도가 높음을 알 수 있었다. 이는 줄눈을 채운 재료별로 초기균열이 감소된 효과를 내는 점을 고려해 준 점이 크게 영향을 미친 것으로 보여진다. 특히 이로부터 줄눈 실링재의 사용이 실제 수평변위를 제어하며 이로 인한 피로수명의 증가는 초기균열을 적게 준 것과 같은 효과를 낸다는 가정이 현실로 입증된 것이라 할 수 있다.

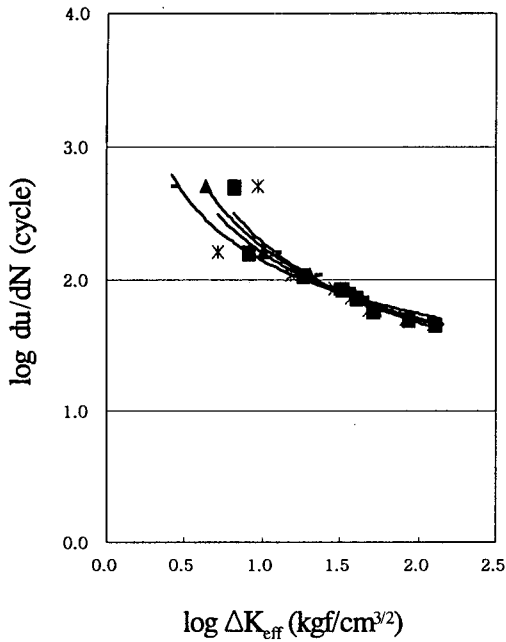
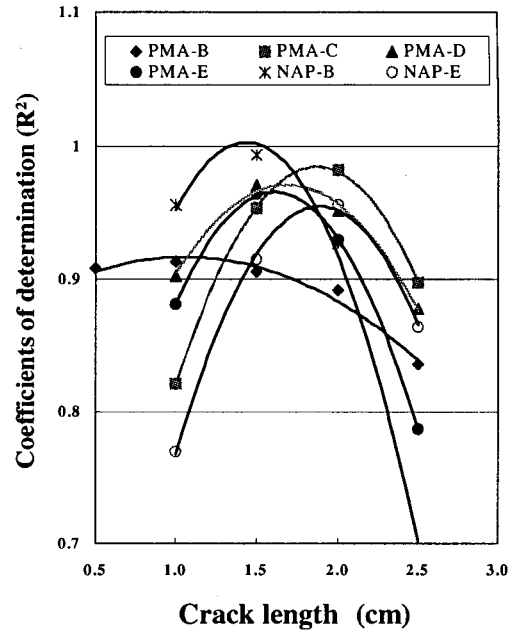

 Fig. 3 du/dN by variation of effective stress intensity factor (NAP-B)


Fig. 4 Determination of initial crack length for various mixtures by coefficients of determination

Table 2. Initial notch depth, effective stress intensity factor and material's constant for various mixture-sealant combinations

Mixture	a_0	ΔK_{eff}	C	m
NAP-O	3.00	148.44	2.8254	-0.3005
NAP-B	1.44	128.93	2.0667	-0.3706
NAP-E	1.88	127.08	2.2949	0.6489
PMA-O	3.00	143.39	1.0177	-0.3503
PMA-B	1.00	142.50	1.5583	-2.8484
PMA-C	1.87	142.50	1.6137	-0.9504
PMA-D	1.68	143.30	1.5537	-1.6413
PMA-E	1.61	143.60	1.3473	-2.0897



Table 3. Regression analysis of fatigue life of reflection crack for various mixture-sealant combinations

Mixture	Regression formula	Estimated life (cycle)	R ²
NAP-O	$du/dN=2.8254 \cdot K^{-0.3005}$	1,213	0.9935
NAP-B	$du/dN=2.2667 \cdot K^{0.2706}$	4,732	0.9393
NAP-E	$du/dN=2.2949 \cdot K^{-0.6489}$	10,738	0.9393
PMA-O	$du/dN=1.0177 \cdot K^{0.3503}$	25,538	0.7798
PMA-B	$du/dN=1.5583 \cdot K^{-2.8484}$	43,149	0.9132
PMA-C	$du/dN=1.6137 \cdot K^{-0.9504}$	37,335	0.9828
PMA-D	$du/dN=1.5537 \cdot K^{-1.6413}$	47,819	0.9714
PMA-E	$du/dN=1.3473 \cdot K^{-2.0887}$	72,277	0.9645

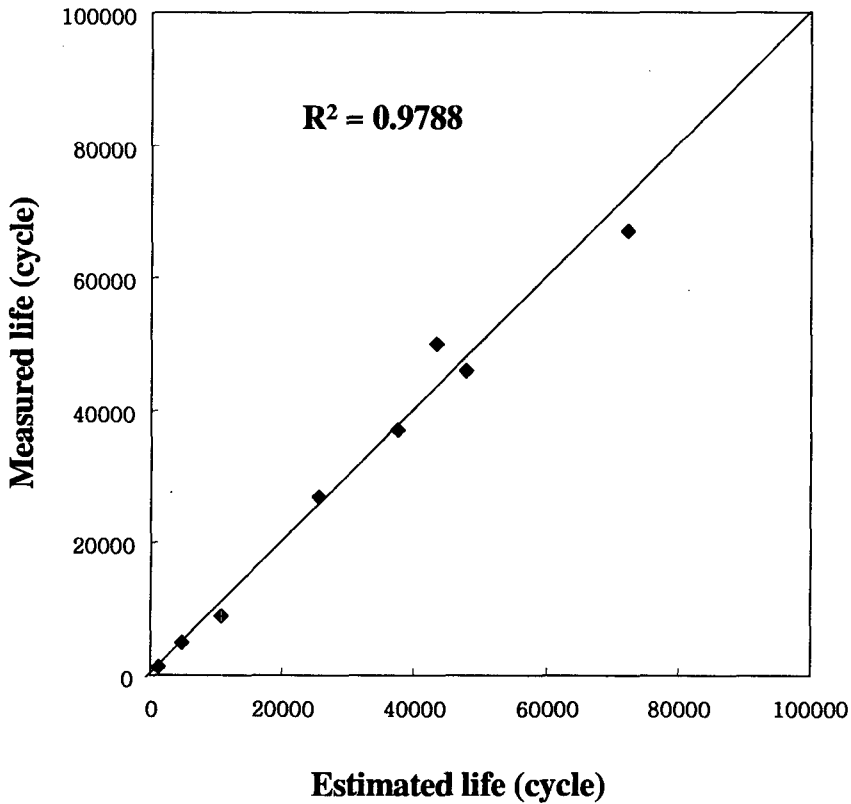


Fig. 5 Correlation between estimated life by horizontal deformation and measured fatigue life of all mixture-sealant combinations

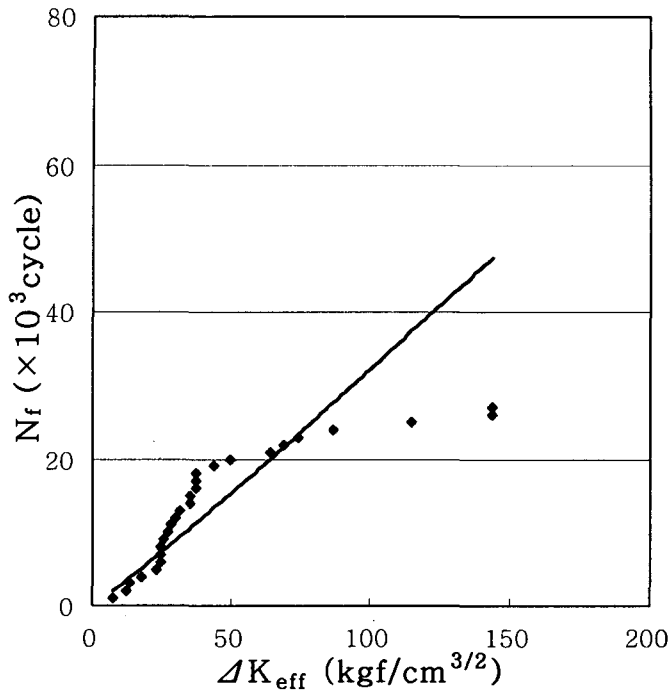


Fig. 6 Estimation of fatigue life by variation of effective stress intensity factor (PMA-O)

Table 4. Effective stress intensity factor and material's constant for various mixture-sealant combinations

Mixture	ΔK_{eff}	C	m
NAP-O	148.44	0.0254	0.7824
NAP-B	128.93	0.0211	1.4062
NAP-E	127.08	0.0566	0.9478
PMA-O	143.39	0.2400	1.0643
PMA-B	142.50	0.5204	0.9562
PMA-C	142.50	0.4175	0.9790
PMA-D	143.30	0.2373	1.1217
PMA-E	143.60	0.1326	1.4335



Table 5. Regression analysis of fatigue life of reflection crack for various mixture-sealant combinations

Mixture	Regression formula	Estimated life (cycle)	R ²
NAP-O	$N=0.0254 \cdot K^{0.7824}$	1,270	0.9925
NAP-B	$N=0.0211 \cdot K^{1.4062}$	5,850	0.8963
NAP-E	$N=0.0566 \cdot K^{0.9478}$	15,822	0.9838
PMA-O	$N=0.2400 \cdot K^{1.0643}$	29,151	0.8279
PMA-B	$N=0.5204 \cdot K^{0.9562}$	59,437	0.9120
PMA-C	$N=0.4175 \cdot K^{0.979}$	50,342	0.9538
PMA-D	$N=0.2373 \cdot K^{1.1217}$	62,663	0.8445
PMA-E	$N=0.1326 \cdot K^{1.4335}$	69,639	0.8866

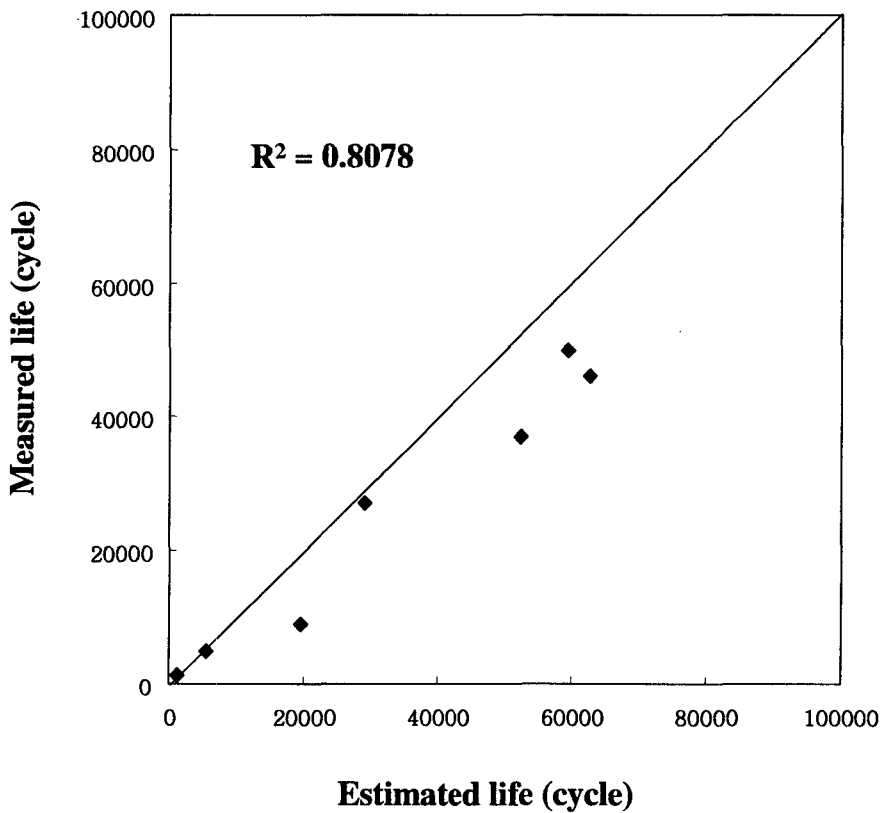


Fig. 7 Correlation between estimated life and measured fatigue life of all asphalt mixtures



3. 결 론

- 1) 줄눈을 채워주고 덧씌우기를 하는 경우 피로수명이 증가됨을 확인하였는데 이는 파괴역학에서 초기균열길이를 적게 만들어 주는 것과 같은 효과를 가져오기 때문임이 확인되었다.
- 2) 혼합파괴의 반사균열 실험결과에 의하여 혼합물의 피로수명을 추정할 결과 $du/dN=C(\Delta K)^m$ 에 의한 추정결과($R^2=0.9788$)가 $N=C(\Delta K)^m$ ($R^2=0.8078$)보다 높은 상관관계를 나타내었다. 따라서 향후 아스팔트 덧씌우기 혼합물의 설계를 위한 연구에 기초자료로 $du/dN=C(\Delta K)^m$ 를 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단지정 강원대학교 석재복합신소재연구센터의 지원에 의하여 이루어진 연구입니다.

참고문헌

1. 김광우, 임성빈, 도영수, 이석근, (1999), "전단반사균열 모사실험 방법 개발 및 적용성 연구," 한국도로포장공학회 논문집 제 1권 1호.
2. 도영수, (2000), "보강 덧씌우기 아스팔트 콘크리트의 반사균열 피로수명 추정 연구," 강원대학교 대학원, 박사학위 논문.
3. 도영수, 김광우, (2000), "보강 덧씌우기 아스팔트포장의 휨파괴에 의한 반사균열 피로수명 추정," 한국도로포장공학회 논문집 제 2권 4호.
4. 최동춘, (2002) "줄눈 실링재가 아스팔트 콘크리트의 반사균열에 미치는 영향," 강원대학교 대학원, 박사학위 논문.