

미국의 성능 관련 시방서(Performance Related Specification) 관련 과제 소개

- NCHRP 9-22 과제에서 개발된 PRS의 특징, 문제점, 그리고 개선사항 -



정 명 구 | Pavement Engineer / AMEC Earth & Environmental, Inc.

1. 서론

본지에서는 2년 전(2009년 6월, 제11권 2호) 미국 내 아스팔트 포장 성능 시방서에 대한 간략한 소개와 함께 성능 관련 시방서(PRS : Performance Related Specification)개발현황에 대하여 NCHRP 9-22 과제를 중심으로 살펴본 바 있다¹⁾.

현재 NCHRP 9-22 과제는 마무리 단계로 최종 리포트의 출판 준비 중에 있으며, 과제의 결과물로 QRSS(Quality Related Specification Software)라 불리는 아스팔트 포장 성능시방 소프트웨어의 출시를 눈 앞에 두고 있다. 또한, 연결되는 과제인 NCHRP 9-22A를 통하여 NCHRP 9-22에서 개발한 성능 시방 모듈(module)의 효율성 및 현장 적용성을 실제 현장에서 시공된 포장재료의 실험을 통하여 평가하려는 노력을 계속하고 있는 중이다.

본 기사는 미국에서 완료된 그리고 진행중인 성능 관련 시방 과제들을 3회에 걸쳐 소개할 예정이며 오늘은 그 첫번째로 NCHRP 9-22 과제를 통하여 개

발된 PRS의 특징을 소개하고, 또한 성능 관련 시방 모듈에 내재된 한계/문제점들과 개선해야 할 사항들을 함께 알아본다.

2. 본론

2.1 WesTrack 시험주로와 NCHRP 9-22

이전 호(제11권 2호)에서 주지한 바와 같이, 미국의 성능관련시방 개발은 1994년 네바다주에 건설된 WesTrack 시험주로를 통하여 처음 시작되었다.

과제의 목표는 연성포장의 주된 손상요인인 소성변형과 피로균열에 대한 공용성 예측 모델(Performance Prediction Model)을 개발하고, 생애주기분석(Life Cycle Cost Analysis)을 이용하여 설계된 포장재료의 품질과 실제 시공된 포장의 품질을 상대분석하여 시공자에게 페널티를 부과 혹은 보너스를 제공하는 품질성능관련 시방의 기반을 제공하는 것이었다²⁾.

이러한 시도는 현재 미국의 많은 주에서 사용하고 있는 재료 및 방법 시방서(Materials and Construction Specification)의 단점인 포장관련 개별인자(아스팔트 함량, 공기량, 골재입자분포 등)을 이용하여 각각의 인자 개별적으로 지불계수(Pay Factor)를 산정하여 시공자에게 페널티/보너스를 결정하는 비합리성을 개선하기 위한 것이었다²⁾.

NCHRP 9-22 과제는 2000년에 시작되었으며, 초기의 과제목표는 WesTrack을 통해 개발된 성능 관련 시방 모듈과 과제의 결과물인 프로그램(HMA Spec)에 사용된 공용성 예측 모형을 평가하고 미진한 부분을 찾아 개선시키는 것이었다³⁾. 몇 차례의 평가를 통하여 개발된 공용성 예측 모형이 지역에 따라 큰 편차를 보이며 광역적으로 사용하기에 한계가 있음을 파악하고, 패널회의를 통하여 당시 개발중이던 역학-경험설계법(AASHTO MEPDG: Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, 개발 당시에는 2002 Design Guide로 명명)을 위해 개발된 공용성 예측 모형과 동일한 모형을 사용하기로 잠정 결정했다. 하지만, MEPDG공용성 모형을 PRS에 적용시켜 사용하기에는 또 다른 어려움에 봉착한다.

MEPDG의 특징 중 하나는 분석하고자 선택한 지역의 매 시간 실측된 기상데이터를 사용하여 동탄성 계수를 비롯한 중요 포장 관련 변수들을 계산해 내는 것이었는데, 이것은 보다 정확한 공용성 예측을 위하여 필수적인 단계인 반면, 단 한번의 포장 구조 해석에 소요되는 시간을 최소 10여분에서 변수의 수에 따라 최고 수시간까지 요구하였다. 한편, WesTrack과 추후 NCHRP 9-22에서 개발된 PRS는 확률 분석기법으로 Monte Carlo Simulation(MCS)을 이용하고 있는데 (NCHRP 9-22에서는 MCS와는 별도로 Rosenblueth Method를 저온균열의 확률적 분석 위하여 이용), 이는 공용성 예측 모형에 포함된 개별인자들의 평균과 분산을 이용하여 수백번의 시물레이션을 통하여 공용성 모형의 평균과 분산을 구해내는 기법이다^{4, 5, 6)}. 결국, 단 한번의 확률기반 포장 공용성 예측을 위하여 MEPDG를 수백번 사용하

야 했으며, 이는 시간적인 면에서 현실적으로 적용하기 불가하다는 결론에 다다른다.

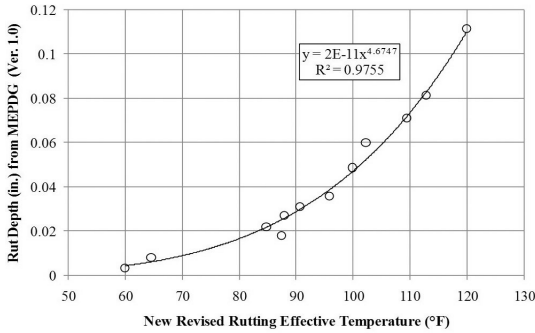
그 후 약 1년간 과제가 잠정 중단된 후, 2005년 Witzzak이 대안으로 제시한 것이 이른바 MEPDG 대체 모형(MEPDG Surrogate Model or MEPDG Short-Cut Model)이다. 이 대체모형은 다양한 포장인자들의 매트릭스를 만들어 MEPDG를 이용해 그 결과들을 데이터베이스화 한 후, 방대한 데이터베이스를 통하여 소성변형, 피로균열, 그리고 저온균열의 공용성을 예측한 것이다^{5, 6, 7)}.

이 모형들은 MEPDG의 취약점이던 장시간의 런닝타임문제를 해결하였으며 또한 MEPDG의 결과와 비교하여 비교적 정확한 공용성 예측을 하고 있다. 대체 모형의 성공적인 개발로 인하여, NCHRP 9-22에 MEPDG의 공용성 모형을 결합시켜, PRS의 통계학적 품질분석을 가능케 하였다.

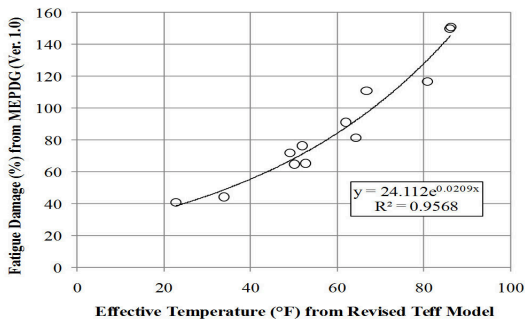
2.2 NCHRP 9-22 PRS의 특징

성능 관련 시방의 개념은 이미 여러 학자들에 의하여 제시된 바 있다^{9, 10)}. 하지만, 실제로 현장에 적용하기에 어려움을 겪었던 몇가지 문제들을 NCHRP 9-22과제에서 대체방법들을 제시하며 실용화에 한 발 더 나아갈 수 있었다. 다음에 나열된 특징들은 NCHRP 9-22에서 보다 개선된 성능 관련 시방 개발을 위해 적용한 개념들이다⁴⁾.

- 유효온도(effective temperature)모형 개발¹¹⁾: MEPDG의 지역별 기후 인자들을 이용하여 특정 지역의 기후와 공용성을 동시에 설명하는 유효 온도 모형이 개발되었다(소성변형과 피로균열의 유효온도모형 각각 개발, 그림 1 참조). 이 모형은 유효 동탄성 계수(effective dynamic modulus)의 계산에 쓰인다.
- MEPDG 대체 공용성 예측 모형 개발^{6, 7, 8)}: 주지한 바와 같이 소성변형, 피로균열, 그리고 저온균열에 대한 공용성 모형이 개발되었다. 소성변형 예측 모형의 경우 소성변형에 가장 큰 영향을 미



(a) 소성변형 VS 유효온도



(b) 피로균열 VS 유효온도

그림 1. 유효온도와 소성변형(a) / 피로균열(b)과의 관계⁽¹⁾

치는 교통량, 유효온도, 그리고 유효 동탄성 계수를 이용한 관계식을 이용하여 공용성을 예측하며, 피로균열의 경우 회기분석을 이용한 통계 모형을 개발하여 이용하고 있다. 저온균열의 경우, 통계 예측모형을 개발하기 위한 다양한 시도가 있었으나, 결국 실패하고, 현재 MEPDG에서 쓰이는 저온균열 예측모형과 같은 알고리즘을 갖는 독립적인 코드(tcnew.exe)를 개발하여 사용중에 있다.

- 확률적 기법 도입⁵⁾: 공용성 예측 모형에 포함된 개별인자(structure and volumetric properties: independent variables)들의 불확실성에 기반한 공용성(pavement performance: dependent variable)의 평균 및 분산을 계산하기 위하여 Monte Carlo Simulation과 Rosenblueth 방법이 소성변형/피로균열 그리고 온도균열을 위하여 각각 사용되었다.

- 포장수명(pavement service life) 예측모형 개

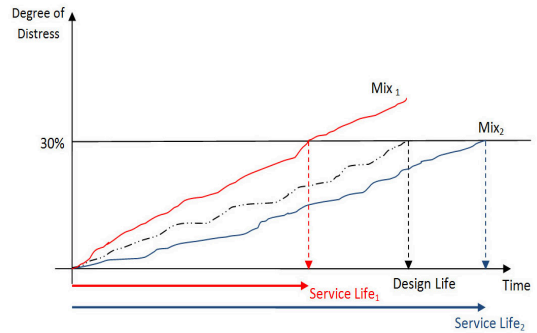


그림 2. 포장수명 예측 개념도³⁾

발⁵⁾: 공용성 예측 모형에 의해 계산된 개별 공용성(즉, 소성변형, 피로균열, 저온균열 각각의 개별 공용성)은 포장수명 예측 모형에 의하여 포장수명으로 통합되어 계산되어 진다(즉, 시간 개념인 단일 단위로 통합, 그림 2 참조). 예측된 포장수명도 역시 평균과 분산을 포함한 확률분포로 표현된다.

- 누적확률분포를 이용한 예측수명차이 계산(PLD: Predicted Life Difference): 현장 배합설계된 포장(Design Job Mix)과 실제 시공된 포장(As-Built or As-Constructed)의 품질은 각각 예측수명을 인자로 하는 누적확률분포로 표현되며 이 두 확률분포의 평균차이(average PLD)가 바로 지불계수(Pay Factor)를 결정하는 최종변수가 된다. Average PLD는 그림 3과 같은 지불 결정 곡선(Pay Schedule)에 의하여 시공자에게 부과하는 페널티/보너스를 결정한다.

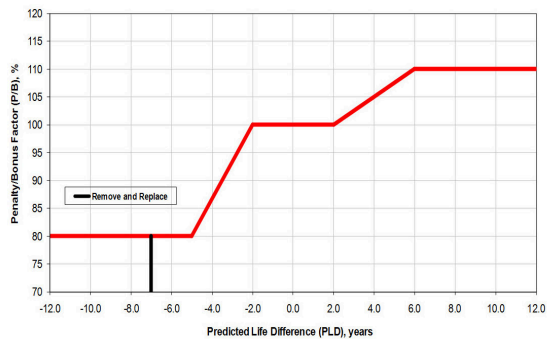


그림 3. 예측 포장 수명 차를 이용한 페널티/보너스 지수 결정³⁾

- 지불계수의 가중계수(Weighting Factor) 사용: 포장 시공되는 지역에 따라 혹은 발주자에 따라 포장 손상요인에 대한 관심도가 다를 수 있다. 예측 수명차에 의하여 결정되는 개별 공용성에 대한 지불계수에 가중계수를 적용시킴으로서 이를 적용시킬수 있다.

2.3 NCHRP 9-22 PRS의 한계 및 개선해야 할 사항

NCHRP 9-22 과제를 통하여 기존의 PRS 현장 적용에 생기는 여러 난점들을 극복한 것은 주지의 사실이나, 여전히 개선되어야 할 과제를 안고 있다. 다음에 기술될 사항들은 현재 과제를 통하여 개발된 PRS의 한계를 지적하며 동시에 미래에 보다 나은 PRS현장 적용을 위하여 개선되어야 할 사항들을 기술한다.

2.3.1 PRS적용범위의 한계

현재 개발된 PRS는 새롭게 시설되는 도로포장의 품질관리에만 적용되는 한계를 가지고 있다. 즉, 기존 포장을 보수하는 덧씌우기 포장(overlay)같은 경우 또는 시멘트나 아스팔트를 함유한 고강도 골재기층/보조기층을 가지고 있는 포장체의 경우 개발된 PRS 품질관리의 정확도가 떨어지는 단점을 가지고 있다. 또한, Stone Matrix, Reclaimed Asphalt, Open Graded HMA, Modified Binder HMA와 같은 특수 연성포장방법/재료의 경우에도 마찬가지로 신뢰성이 줄어든다. 이는 공용성 예측 모형과 그 모형의 주 변수인 동탄성계수가 일반 포장의 경우를 바탕으로 개발되었기 때문이다. 향후, Overlay포장이나 특수 재료에도 적용시킬 수 있는 PRS의 개발이 필요하다.

2.3.2 공용성 예측모형의 갱신

현재 사용중인 공용성 예측 모형은 2005년 MEPDG 0.7 Version-LEVEL 3을 이용하여 개발되었고, 그 후 MEPDG 1.0 Version의 발표이후 한

차례 업그레이드가 실시되었다. 향후, MEPDG는 계속 신규 Version이 나올 예정이어서, 공용성모형의 재갱신을 위한 시간 및 비용문제가 남아 있다. 특히, 예측 모형 중 저온균열 모형은 유효온도를 이용하는 소성변형/피로균열 모형과 달리 실측된 기후데이터를 사용하여 공용성을 예측하고 있다. 이는 사실 MEPDG와 같은 알고리즘을 사용한 것이며, 그 정확도는 매우 높지만 분석 시간이 다소 소요되는 편이다. 또한 Fortran으로 개발되어있는 독립프로그램이기 때문에 코드수정 및 재갱신에 불리함을 안고 있다. 새로운 저온균열 예측 모형의 개발이 필요하다.

2.3.3 공용성 예측 모형의 확대

소성변형 예측 모형의 경우 현재 아스팔트 구조에서 일어나는 소성변형만 고려하고 있으며, 골재층 및 하부구조의 소성변형은 포함하고 있지 않다. 피로균열 예측 모형도 아스팔트 포장층의 바닥면에서 표면 쪽으로 진행되는 피로균열(Bottom-Up Fatigue Cracking)만 고려하고 있으며, 표면에서 하부쪽으로 진행되는 피로균열(Top-Down Fatigue Cracking)은 포함하고 있지 않다. 보다 정확하고 다양한 포장 해석을 위하여 공용성 예측 모형의 확대가 필요하다.

2.3.4 동탄성 계수 모형의 갱신

동탄성계수는 피로균열과 소성변형의 공용성 예측 모형의 주요인자로 선택되었다. 현재 개발된 PRS 모듈에는 1999년 Version의 Witczak 동탄성 계수 예측 모형이 포함되어 있으나, 주지한 바와 같이 이는 개질아스팔트(Modified AC)와 같은 특수 아스팔트 혼합물의 경우 정확도가 다소 떨어진다. 보다 신뢰성있고 다양한 아스팔트 혼합물에 적용할 수 있는 동탄성 계수 예측 모형의 개발이 필요하다.

2.3.5 포장 평탄성 모형 개발

포장의 평탄성(Roughness)와 관련하여 NCHRP 9-22과제는 평평도 예측 모형은 포함하지 않고 있으며, 다만 포장직후 도로의 개방 전에 실측한 국제평

탄성지수(IRI: International Roughness Index)를 지불계수 산정에만 사용하고 있다.

3. 맺음말

NCHRP 9-22과제를 통하여 개발된 성능관련 시방서는 아직 기술적인 여러 한계들과 문제점들을 안고 있다. 하지만, 기존에 쓰이고 있는 전통적인 현장 품질 관리의 비합리성을 극복하기 위한 여러 성능 시방 중에 가장 현장적용에 유리한 방법이라 할 수 있다. 앞으로 보다 많은 연구를 통하여 본문에 기술한 기술적 한계들을 극복한다면 미래에는 보다 나은 아스팔트 포장의 품질 관리를 할 수 있을 것으로 기대되며, 이는 포장의 기대수명을 늘려 장기 공용성의 측면에서 사용자 비용의 감소로 이어질 것이다. 다음 호에서는 NCHRP 9-22 과제의 결과물인 성능관련 시방 컴퓨터 프로그램(QRSS)를 소개하는 시간을 갖도록 하겠다.

참고 문헌

1. 김영수, 서영국 (2009), 미국 내 아스팔트 포장의 성능 시방서 개발 현황, 한국도로학회지, 제11권 2호.
2. Epps, J. A., A. Hand, S. Seeds, T. Schulz, S. Alavi, C. Ashmore, C. L. Monismith, J. A. Deacon, J. T. Harvey, and R. Leahy(2002). NCHRP Report 455 "Recommended Performance Related Specification for Hot-Mix Asphalt Construction: Results of the WesTrack Project". National Cooperative Highway Research Program. Transportation Research Board of the National Academies. Washington, D.C.
3. Moulthrop, J. and M. W. Witczak(2011). Final Report(in press) "Beta Testing and Validation of HMA PRS". National Cooperative Highway Research Program. Transportation Research Board of the National Academies. Washington, D.C.
4. El-Basyouny, M. and M. G. Jeong(2010). Development of Probabilistic Performance Related Specifications Methodology Based upon AASHTO

- MEPDG. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2151, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
5. Jeong, M. G. and M. El-Basyouny(2010). Statistical Application and Stochastic Analysis for Performance Related Specification of Asphalt Pavement Quality Assurance. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2151, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
6. Jeong, M. G., J. Uzan, and M. W. Witczak (2010). Development of a Stochastic Framework of the Thermal Cracking Distress on Asphaltic Pavement. Proceedings of the 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
7. El-Basyouny, M. and Jeong, M. G. (2010). Development of Database Solution for Prediction of the MEPDG Permanent Deformation. Proceedings of the 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
8. El-Badawy. S. M. G. Jeong, and M. El-Basyouny(2009). Methodology to Predict Alligator Fatigue Cracking Distress based on AC Dynamic Modulus. Transportation Research Record:Journal of the Transportation Research Board, No. 2127, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
9. Anderson, D. A., D. R. Luhr, and C. E. Antle(1990). NCHRP Report 332 "Framework for Development of Performance-Related Specifications for Hot-Mix Asphaltic Concrete". National Cooperative Highway Research Program. Transportation Research Board of the National Academies. Washington, D.C.
10. Kopac, P. A.(2002). "Making Roads Better and Better". Public Roads, Vol. 66, Issue 1.
11. El-Basyouny, M., and M. G. Jeong(2009). Effective Temperature for Permanent Deformation and Fatigue Distress Analysis on Asphalt Mixtures. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No.2127, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.