

KPRP 설계법 개발을 위한 미국 MEPDG 프로그램 피로손상 민감도 분석

A Sensitivity Analysis of Fatigue Damage in MEPDG Program of the U.S. for Developing Design Guide of the KPRP

박정우* · 임진선** · 이창준*** · 권수안**** · 정진훈*****

Park, Jeong Woo · Lim, Jin Sun · Lee, Chang Jun · Kwon, Soo Ahn · Jeong, Jin Hoon

1. 서론

시멘트 콘크리트 포장의 설계수명 예측은 예부터 실시되어 왔다. 또한, 컴퓨터의 발달로 인하여 복잡한 계산도 프로그램을 통하여 빠른 시간안에 해결이 가능하게 되었다. 이에 프로그램을 이용한 설계수명 예측이 시작되었으며, 이 중 미국 AASHTO 설계법을 이용한 시멘트 콘크리트 포장의 설계예측은 MEPDG(Mechanic-Empirical Pavement Design Guide)라 불리는 software로 대표할 수 있다. 이 software는 미국의 NCHRP(National Cooperative Highway Research Program) Project 1-37A 보고서를 기반으로 한 역학적 경험적 (Mechanic-Empirical) 설계를 시작한 것이 시초이며, 이후에 더욱 합리적인 프로그램을 만들기 위한 기술적 발전, 버그(bug)의 추적을 통해 프로그램은 계속 업데이트 되었다. 그리고 2009년 9월에 최신판으로 ver 1.100이 나왔다. MEPDG 프로그램은 교통량, 기후, 물성, 포장 구조 등을 입력변수로 하며 포장수명 동안의 누적손상(accumulated damage)를 계산한다. 그리하여 여러 입력 변수들과의 시멘트 콘크리트 공용성 결과값을 산출하고, 반복법을 이용하여 최적화된 대안을 찾아 가장 좋은 포장공용성을 찾아내는 것이 이 프로그램의 목표라 할 수 있겠다.

한편, MEPDG 프로그램은 미국 내의 특정 지역에 대한 입력변수로 한정되어 있으므로 이것을 특정지역 외의 지역에서 사용하려면 검정(Calibration)과정을 거쳐야 한다. 또는 MEPDG 프로그램 업데이트 과정을 살펴보면 국내에서 개발되고 있는 KPRP(Korea Pavement Research Program)의 방향을 제시할 수도 있다. 따라서, MEPDG 프로그램의 version별 민감도 분석이 중요한 과정임을 알 수 있다. 이 민감도 분석을 통하여 콘크리트 포장 공용성 예측에 대한 입력변수들의 상대적인 영향을 알아 볼 수 있을 것으로 판단된다. 또, 이것은 KPRP 개발 과정의 일부인 피로손상(Fatigue Damage)내 균열율(Cracking)의 관계인 전이함수 개발에 합리적인 방향을 제시할 수 있을 것이다.

2. 선행 연구

MEPDG 프로그램의 version별 민감도 분석은 여러 입력변수들에 대한 결과값의 차이로 나타낼 수 있다. Hall, K. D 등(2005)은 2002 Design Guide라는 이름의 프로그램(이 때에는 MEPDG라는 이름대신 이렇게 불리었음) 출시초기에, 3단계에 걸쳐 여러 입력변수들 간에 민감한 입력변수와 민감하지 않은 입력변수를 공용성 결과값인 폴팅(Faulting), 균열(Cracking), 평탄성(Smoothness)에 표현하였다. 이 중 공용성 결과값 3개 모두에 민감한 입력변수 6개를 뽑아 민감도 분석의 필요성을 언급하였다. Kannekanti, V. 등(2006)은 약

* 학생회원 · 인하대학교 토목공학과 석사과정 · 032-873-5332(E-mail: pjwband2o@naver.com)

** 학생회원 · 인하대학교 토목공학과 박사과정 · 02-2141-7102(E-mail: coreplay@hanmail.net)

*** 정회원 · 한국건설기술연구원 연구원 · 공학박사 · 031-910-0362(E-mail: cjee4@kict.re.kr)

**** 정회원 · 한국건설기술연구원 연구위원 · 공학박사 · 031-910-0714(E-mail: sakwon@kict.re.kr)

***** 정회원 · 인하대학교 토목공학과 부교수 · 공학박사 · 032-860-7574(E-mail: jhj@inha.ac.kr)



10,000개의 케이스 연구를 실시하여 프로그램이 이미 알고 있는 시멘트 콘크리트 포장 지식들과 얼마나 연관성이 있는지 살펴보고, 상대적으로 슬래브 두께가 더 두꺼운 콘크리트 포장의 균열율이 더 크게 나오는 등의 프로그램의 버그와 개선사항을 보고하였다. Guclu, A 등(2009)은 MEPDG ver 0.7, 0.9, 그리고 1.0의 3개 프로그램의 입력변수를 다음과 같이 나누어 구분하였다.

- 설계자가 조절할 수 있는 것(예, 시멘트 콘크리트 각 층의 두께)
- 설계자가 조절할 수 있지만 시방서등의 규정이 변화가 필요한 것(예, 다웰바의 지름, 간격)
- 설계자가 조절할 수 없는 것(예, 교통량, 기후, 열팽창계수)

MEPDG 프로그램의 공용성 결과값 또한 폴팅(Faulting), 균열(Cracking), 평탄성(Smoothness)로 나타내었다. 여기에 각 입력변수에 대한 위의 세가지 공용성 결과값을 입력변수의 변화에 대한 결과값에 대한 비(rate) 즉, 정성적(qualitative) 기준으로 매우 민감(very sensitive), 민감(sensitive), 민감하지 않음(insensitive)으로 표현하였다. 이 중 균열에 대한 결과만 보면 ver 0.9, 1.0은 0.7 보다 더 작은 균열을 가짐을 나타냈다. 이 연구로 version이 업데이트 될수록 공학적 합리성(engineering reasonableness)에 더욱 적합해 짐을 보고하고 있다.

3. MEPDG 프로그램 ver 0.5, 1.0 과 1.1의 민감도 비교

3.1 주어진 입력변수 범위 내에서의 민감도 분석

민감도 분석은 예측모델의 합리성과 주요 입력변수, 그리고 프로그램의 문제점을 분석하는데 큰 도움을 준다. 본 논문에서는 MEPDG ver 0.5, 1.0, 그리고 가장 최신 version인 1.1을 대상으로 민감도 분석을 실시하였다. 이 중 주요관심사인 피로손상은 균열의 주요 원인이므로, Guclu, A 등(2009)의 논문을 참조하여 결과값 균열에 대한 모든 입력변수 중 매우 민감한 변수 6개와 민감한 변수 1개를 기존연구에서 선별하였다. 매우 민감한 변수는 유효온도차이(curling/warping effective temperature difference), 콘크리트 슬래브 줄눈 간격, 슬래브 두께, 슬래브 열팽창계수, 열전도율, 28일 휨강도이며, 민감한 변수는 교통량이다. 그리고 x축을 입력변수로, y축을 피로손상으로 하는 그래프로 표현했다. 입력변수에서, 교통량에 관한 변수는 한국 부산지역의 교통량을 환산하여 입력했으며 기후는 www.trb.org/mepdg에서 Colorado주의 Alamosa 지역의 기후를 hcd(hourly climate data) 파일로 받아 그 값을 프로그램으로 불러와 실행시켰다. 물성에서 기후의 종류는 화강암을, 노상의 종류는 통일분류법에서의 SW를 선택하였고 그 외의 값들은 Default값을 입력하였다. 입력변수의 범위는 표 1과 같으며 이것은 각 프로그램에서 입력변수의 지원 범위를 알아낸 후, 그것을 5가지의 케이스별로 나타낸 것이다. 슬래브 두께와 줄눈 길이는 보기 쉽게 미터로 표기했으며 나머지는 MEPDG에서 쓰는 단위로 표현했다. 민감도 분석 시 기준값은 case3이며 결과는 그림 1~7과 같다.

표 1. 민감도 분석 케이스 - 1

	case 1	case 2	case 3	case 4	case 5
교통량(AADTT)	15000	30000	45000	60000	75000
슬래브두께(m)	0.2	0.23	0.25	0.28	0.3
줄눈길이(m)	4	4.5	5	5.5	6
열팽창계수(microstrain/°F)	4.64	5.14	5.64	6.14	6.64
열전도율(BTU/hr-ft-°F)	0.75	1	1.25	1.5	1.75
휨강도(psi)	544	617	690	762	835
유효온도차이(°F)	-30	-20	-10	0	10

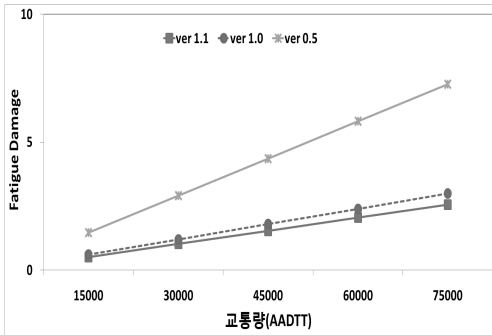


그림 1. 교통량에 대한 민감도

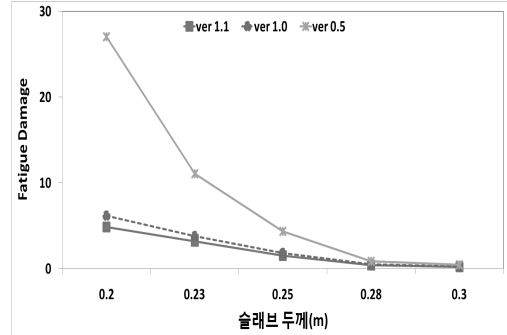


그림 2. 슬래브 두께에 대한 민감도

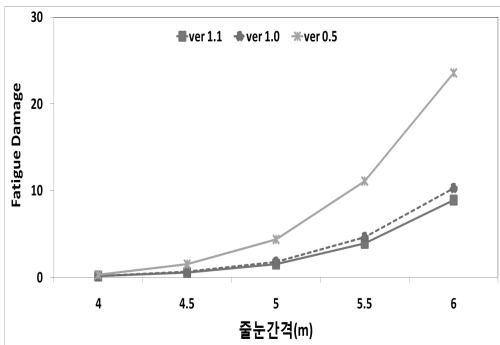


그림 3. 줄눈간격에 대한 민감도

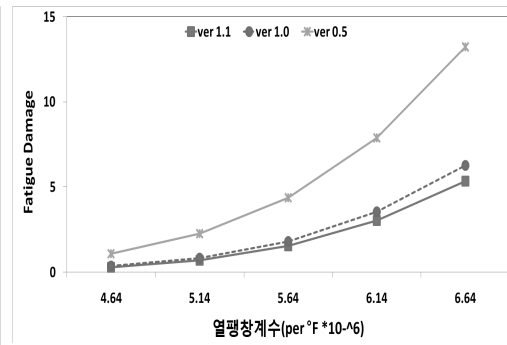


그림 4. 열팽창계수에 대한 민감도

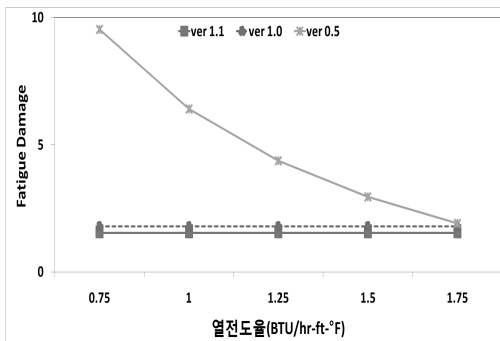


그림 5. 열전도율에 대한 민감도

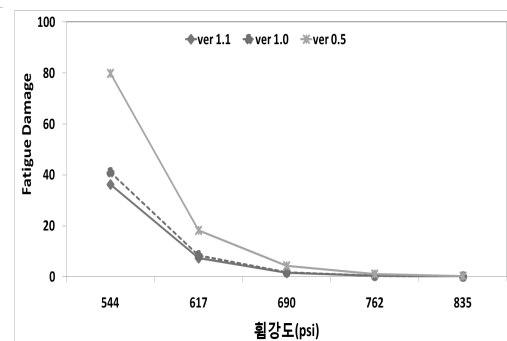


그림 6. 휨강도에 대한 민감도

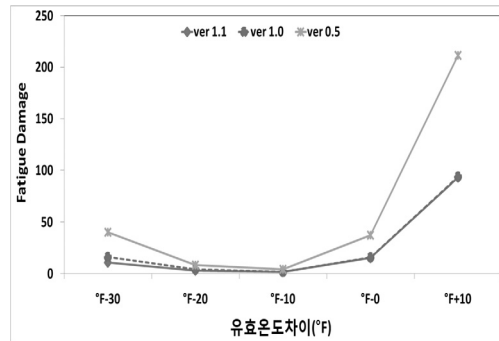


그림 7. 유효온도차이에 대한 민감도

대체적으로 MEPDG ver 0.5는 1.0, 1.1에 비하여 피로손상 값이 크다. 이것은 앞에서 언급한 MEPDG ver 0.7과 0.9, 1.0과의 관계와 비슷하다. MEPDG ver 1.0과 1.1의 차이는 거의 나타나지 않았으나 ver 1.1의 피로손상값이 더 작게 나타남을 알 수 있었다. 그림 1에서는 교통량이 증가할수록 피로손상이 선형으로 커지는 관계를 보였다. 그림 2에서는 슬래브의 두께가 작아질수록 피로손상이 비선형으로 증가하는 모습을 보였으며 version이 업데이트가 될수록 그 정도는 감소하였다. 반대로 그림 3에서는 줄눈간격이 커질수록 피로손상이 비선형으로 증가하는 모습을 보였으며 version이 업데이트가 될수록 그 정도 또한 감소하였다. 그림 4는 열팽창계수가 증가할수록 피로손상이 비선형으로 커지는 그림 3과 비슷한 관계를 가지고 있다. 그림 5에서 ver 0.5는 열전도율 감소에 따라 거의 선형에 가까운 피로손상 증가값을 보였다. 그러나 ver 1.0의 경우 Guclu, A 등(2009)의 참조 논문과 달리 열전도율의 값에 관계없이 민감도 차이가 없음을 알 수 있다. ver 1.1도 피로손상값이 약간 감소하긴 하였지만 열전도율의 값에 관계없이 민감도 차이가 없었다. Guclu, A 등(2009)의 참조 논문과의 민감도 범위 선택 정도가 다를 수 있다고 생각되나 프로그램에서 지원하는 값을 토대로 분석을 실시하였기 때문에 왜 이런 현상이 발생했는지는 후에 더 연구가 필요할 것으로 판단된다. 그림 6은 그림 2와 비슷하게 횡강도가 작아질수록 피로손상이 비선형으로 증가하는 모습을 보였으며 version이 업데이트가 될수록 그 정도는 감소하였다. 그림 7은 °F-10을 꼭지점으로 하는 2차 포물선 형태의 피로손상값을 나타냈으며 양수의 유효 온도차가 음수의 유효온도차보다 훨씬 민감함을 알 수 있다.

3.2 기준 입력변수 ±20% 변화 시의 민감도 분석

각 프로그램에서 입력변수의 지원 범위를 알아낸 후 행한 민감도 분석으로 주어진 입력변수 범위에 대한 최대, 최소의 피로손상의 값을 알 수 있었다. 또한 version 업데이트가 되면서 공학적 합리성(engineering reasonableness)에 더욱 적합하도록 과하게 큰 피로손상값은 점차 작아졌다. 그리고 피로손상의 증감이 입력변수마다 선형, 비선형등의 각기 다른 형태를 띠는 것을 알 수 있었다. 하지만 이 입력변수들 중에 어느값이 가장 민감한 변수인지 그 순위를 정하는 것은 입력변수의 지원 범위를 알아낸 후 행한 민감도 분석에서는 알아내기 힘들다. 그리하여 민감한 입력변수의 순위를 정하기 위한 노력의 일환으로 기준 입력변수를 정하여 그 값의 ±20%에 따른 민감도 분석을 실시하였다. 그림 1에서의 case3값을 기준으로 하여 그 값의 ±20% 되는 값을 정하였다(표 2).

표 2. 민감도 분석 케이스 - 2

	-20%	기준	20%
교통량(AADTT)	36000	45000	54000
슬래브두께(m)	0.2	0.25	0.3
줄눈길이(m)	4	5	6
열팽창계수(microstrain/°F)	4.51	5.64	6.77
열전도율(BTU/hr-ft-°F)	1	1.25	1.5
휨강도(psi)	552	690	828
유효온도차이(°F)	-12	-10	-8

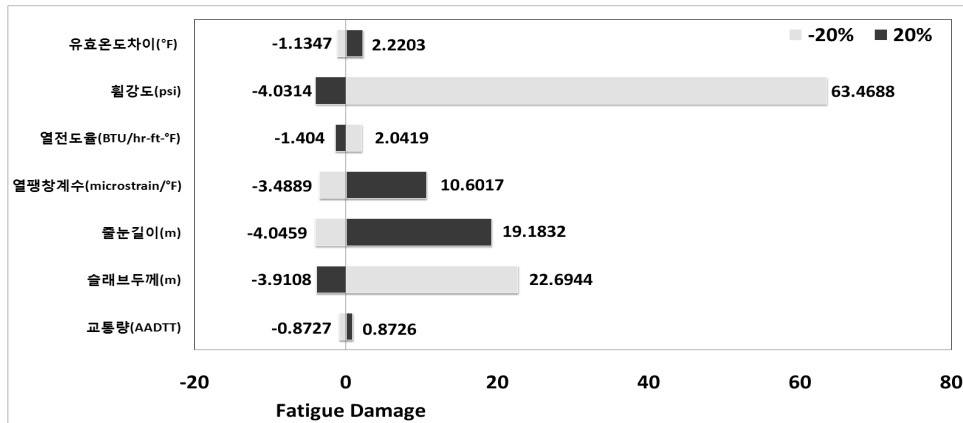


그림 8. version 0.5의 민감도

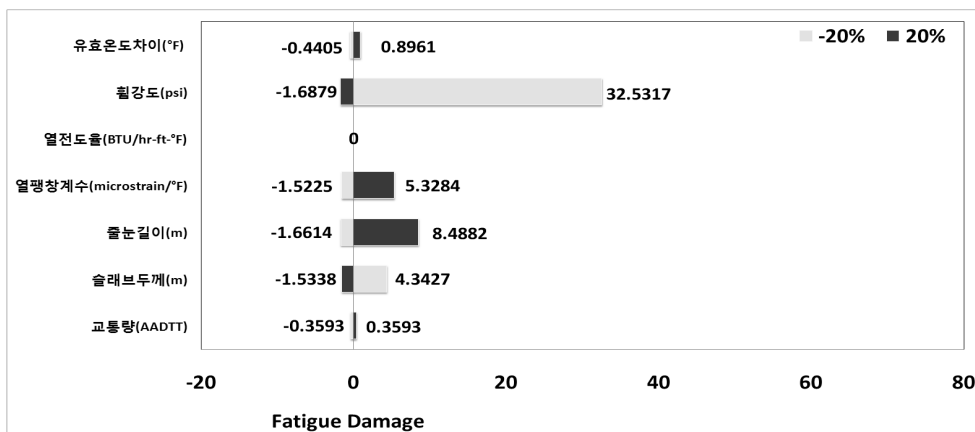


그림 9. version 1.0의 민감도

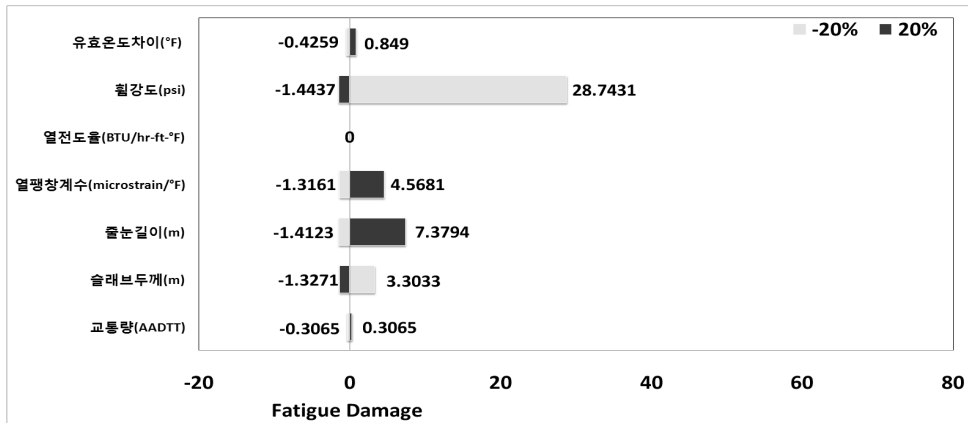


그림 10. version 1.1의 민감도

전체적으로 version 업데이트가 될수록 피로손상의 값은 작아졌으며 휨강도의 민감도가 그 값이 작아질 때 가장 크고 슬래브 두께, 줄눈간격, 열팽창계수 등이 그 다음을 차지했다. 그리고 version 업데이트 후, 민감도 정도의 차이가 감소하였다. 그림 8~10에 대해서 각 입력변수에 대한 피로손상 민감도를 살펴보면 다음과 같다. 교통량은 version 업데이트에 따라 피로손상값은 감소했으나 그 값이 미소하며 version에 상관없이 피로손상의 증감의 값이 같다. ver 0.5 에서 슬래브 두께는 휨강도에 이어 2번째로 큰 민감도를 가졌으나 ver 1.0, 1.1에서는 줄눈간격과 열팽창계수보다 낮은 민감도를 가지게 되었다. 또한 다른 입력변수에 비하여 민감도 정도의 감소가 가장 크다(ver 0.5의 피로손상 값이 ver 1.0, 1.1에 비해 약 1/6~1/7 정도 감소하였다). 줄눈간격은 ver 0.5에서는 슬래브 두께에 이어 3번째로 큰 민감도를 가졌으나 ver 1.0, 1.1에서는 휨강도에 이어 2번째로 큰 민감도를 가지게 되었다. version 업데이트가 되면서 약 절반정도의 피로손상이 감소하였다. 열팽창계수는 ver 0.5에서는 4번째, ver 1.0, 1.1에서는 3번째로 큰 민감도를 가지게 되었다. version 업데이트가 되면서 약 절반정도의 피로손상이 감소하였다. 열전도율은 ver 0.5에서는 어느 정도 민감도를 가지고 있었으나 ver 1.0, 1.1에서는 민감도를 찾아볼 수 없다. 추후에 원인을 연구해 볼 예정이다. 휨강도는 ver 0.5에서는 매우 큰 값을 가졌으며 ver 1.0, 1.1에서 또한 다른 입력변수와 비교했을 때 상대적으로 큰 피로손상값을 가진다. 커링, 와핑에 대한 유효온도차이는 그림 7에서 급격히 올라가는 부분의 입력 변수값이 기준 입력변수의 $\pm 20\%$ 에 해당되지 않아 그리 크지 않은 민감도를 나타낸다. °F-10에서 그 값이 양수 쪽으로 커지는 것이 음수쪽으로 커지는 것 보다 큰 민감도를 가질 것을 예상할 수 있다. 슬래브 두께, 줄눈간격, 열팽창계수, 휨강도등은 그림 2, 3, 4, 6, 에서와 같이 한쪽으로 어떤 정도의 값을 가지면 그리 큰 민감도를 가지지 않음을 알 수 있다. 단, 커링, 와핑에 대한 유효온도차이는 그림 7에서와 같이 중간의 어떤 값을 가져야 큰 민감도를 가지지 않음을 알 수 있다.

4. MEPDG 프로그램 ver 0.5, 1.0 과 1.1의 전이함수 비교

민감도 분석의 목적은 미국 MEPDG의 민감도 분석을 바탕으로 한국 KPRP의 방향을 제시하기 위함이다. 민감도 분석 후, 그 다음과정은 전이함수의 개발 추이를 보는 것이다. 여기서는 미국 MEPDG의 전이함수 발전방향을 살펴보고 한국 KPRP의 전이함수 개발 방향을 제시하려 한다.

그림 1~7을 보면 version이 향상됨에 따라 피로손상값이 급격하게 줄어들음을 알 수 있다. 여기서 전이함수의 경우, 식(1)과 표 3에서와 같이 ver 0.5와 1.0에는 변화가 있었지만 그 변화는 크지 않으며 ver 1.0과 1.1은 변화가 없다(그림 11). 즉, version이 향상됨에 따라 균열율을 작게 예측하는 방향으로 가고 있음을 알 수 있다. 이것은 현재까지도 피로손상 혹은 전이함수를 이용하여 균열율을 적절한 수준으로 예측하기 위한 노력이 계속 진행중임을 보여준다. 이 결과는 한국 KPRP 전이함수 개발에 도움을 주리라 판단된다.

$$Cracking(\%) = \frac{100}{1 + C_1 FD^{C_2}} \quad \text{식(1)}$$

표. 3 version 별 전이함수 상수

	ver 0.5	ver 1.0 & 1.1
C1	1	1
C2	-1.68	-1.98

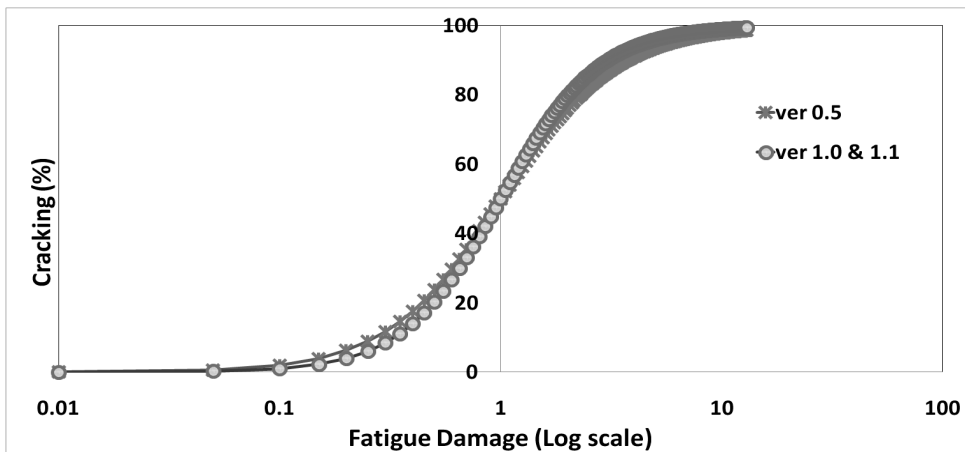


그림 11. version별 전이함수의 변화 추이

5. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는 선행 연구를 바탕으로 MEPDG ver 0.5, 1.0 그리고 1.1의 입력변수 대 피로손상에 대한 민감도 분석을 실시하였다.

- MEPDG ver 0.5와 1.0, 1.1에 입력변수의 주어진 범위에 따른 민감도 분석과 기준 입력변수의 $\pm 20\%$ 에 따른 민감도 분석을 실시하였다.
- MEPDG ver 0.5와 1.0, 1.1의 관계는 MEPDG ver 0.7과 0.9, 1.0의 관계와 비슷하다. 즉, ver 0.5는 1.0, 1.1에 비하여 피로손상 값이 크다.
- MEPDG ver 1.0과 1.1의 피로손상 차이는 거의 나타나지 않았으나 ver 1.1의 값이 더 작게 나타남을 알 수 있었다.
- 입력변수의 주어진 범위에 따른 민감도 분석으로 주어진 입력변수 범위에 대한 최대, 최소의 피로손상의 값을 알 수 있었다. 또한 피로손상의 증감이 입력변수마다 선형, 비선형등의 각기 다른 형태를 띄는 것을 알 수 있었다.
- 기준 입력변수의 $\pm 20\%$ 에 따른 민감도 분석 결과, 전체적으로 version 업데이트가 될수록 피로손상의 값은 작아짐을 알 수 있었다. 또, 휨강도의 민감도가 그 값이 작아질 때 가장 크며 슬래브 두께, 줄눈간격, 열팽창계수등이 그 다음을 차지했다. 그리고 업데이트 후, 민감도 정도의 차이가 감소하였다.
- 슬래브 두께, 줄눈간격, 열팽창계수, 휨강도등은 한쪽으로 어떤 정도의 값을 가지면 그리 큰 민감도를 가지지 않음을 알 수 있다. 단, 쉐어링, 와핑에 대한 유효온도차는 중간의 어떤 값을 가져야 큰 민감도를 가지지



않음을 알 수 있다.

- 열전도율의 값에 관계없이 민감도 차이가 없었다. 왜 이런 현상이 발생했는지는 후에 더 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- MEPDG version이 업데이트 될수록 공학적 합리성(engineering reasonableness)에 더욱 적합해 짐을 알 수 있다.

향후에는 더 나은 정량적인 기준을 잡아서 MEPDG ver 0.5와 1.0, 1.1의 관계에 대한 민감도 분석을 실시할 것이다. 한편, 위와 같은 version에 따른 결과값의 변화는 기후데이터를 포함한 미국 각 지역의 LTPP(Long-Term Pavement Performance) 데이터 증가에 따른 영향이 있다. 이에 따라 모델과 알고리즘의 개선이 있었고, software 자체의 발전도 포함이 된다. 국내에서 개발되고 있는 KPRP(Korea Pavement Research Program)에 대해 MEPDG 프로그램 업데이트 과정은 KPRP 발전과정에 그 방향을 제시할 수 있을 것으로 판단된다. 궁극적으로 KPRP 개발 과정의 일부인 피로손상(피로손상, Fatigue Damage)대 균열을(Cracking)의 관계인 전이함수 개발에 합리적인 방향을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 국토해양부 (2009). 교통량 정보 제공 시스템 (<http://www.road.re.kr/>)
2. 미국 MEPDG software 제공 시스템 : (<http://www.trb.org/mepdg>)
3. Guclu, A., Ceylan, H., Gopalakrishnan, K., Kim, S, H.(2009). "Sensitivity Analysis of Rigid Pavement Systems Using the Mechanistic-Empirical Design Guide Software", *Journal of Transportation Engineering, ASCE*, Volume 135, No 8, pp. 555-562
4. Hall, K. D., and Beam, S. R.(2005). "Estimation of sensitivity of design input variables for rigid pavement analysis using mechanistic empirical design guide.", *Transportation Research Record. 1919*, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 65-73.
5. Kannekanti, V., and Harvey, J.(2006). "Sensitivity analysis of 2002 design guide JPCP distress prediction models.", *Transportation Research Record. 1947*, Transportation Research Board, Washington, D.C. pp. 91-100
6. National Cooperative Highway Research Program NCHRP. (2004). "Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures." Transportation Research Board, Washington, D.C.
7. National Cooperative Highway Research Program NCHRP. (2006). "Changes to the mechanistic-empirical pavement design guide software through version 0.900." *Research results digest*, Vol. 308, Transportation Research Board, Washington, D.C.