

국내 콘크리트포장의 잔존수명 예측을 위한 2002 AASHTO 설계법의 적용성 연구

Availability of 2002 AASHTO Design Guide for Estimation of Remaining Life of Domestic Concrete Pavements

윤용록* · 서영찬** · 김준형*** · 정진훈****

1. 서론

국내 도로포장은 교통량과 증차량의 증가로 인하여 파손이 심화되고 공용수명이 저하되고 있으며 이에 따라 포장 성능 향상을 위한 노력이 계속되고 있다. 포장 성능 향상을 통하여 포장수명을 연장하고 유지관리비용을 절감할 수 있으며, 이를 위하여 최적의 도로 포장설계법이 필요하다.

현재 국내에서 사용하고 있는 도로 포장설계법은 1950년대 미국의 AASHTO 도로시험을 기준으로 한 AASHTO(Americal Associate of State Highway and Transportation Officials) 설계법으로 72, 86 설계법을 많이 사용하고 있는 실정이다. 하지만 경제성장에 따른 교통량 증차량의 증가와 환경의 변화로 인하여 경험적인 방법을 토대로 하고 있는 기존 설계법을 적용하기에는 지역적, 시간적, 재료적 한계가 있기 때문에 이미 미국에서는 역학적인 개념을 추가하여 2002 AASHTO 포장설계법을 제시하였다.

이에 본 연구는 2002 AASHTO 포장설계법(이하 AASHTO 설계법)의 종단평탄성 산출논리를 이용하여 88 고속도로를 대상으로 포장의 잔존수명을 산출해 보고, 국내 환경에 맞는 각각의 입력변수 수집과 민감도 분석을 통하여 AASHTO 설계법을 국내에 적용할 경우의 한계점과 대안책을 제시하고자 하였다.

2. 2002 AASHTO 포장설계법

AASHTO 설계법에서 도입한 역학적-경험적 설계방식(Mechanistic - Empirical Design)은 기존의 경험적 설계법과 달리 정량화된 포장입력변수를 이용하여 구조해석모형을 통한 포장 거동을 조사하고, 그 결과를 경험적인 파손예측모형에 입력변수로 이용하는 설계 과정을 따르고 있다. 즉 최종 두께를 산출하는 방식에서 벗어나 주어진 포장단면에 대해 해석을 수행하여 포장의 공용성을 예측하는 방식인 것이다.

AASHTO 포장 설계법의 줄눈 콘크리트 포장(JPCP: Jointed Plain Concrete Pavement)에 대한 설계절차는 그림 1과 같이 예비설계를 위한 각 입력변수를 수집하고 역학적 포장 구조해석을 통하여 도출한 응력, 변형률, 처짐량을 이용하여 설계수명기간의 포장 파손(균열, 소성변형, 단차)을 예측한다. 예측된 포장파손과 건설 당시의 초기 평탄성을 합수로 하여 종단평탄성이 결정되고 설계 대상 도로에 의한 신뢰도를 적용하여 최종적으로 공용성을 예측한다. 예측된 공용성이 설계기준에 만족하는지 검토를 하고 불만족 시에는 예비설계를 수정하여 모두 만족될 때까지 반복과정을 통해 최종설계를 완료하게 된다. 이러한 AASHTO 설계법의 몇 가지 특징으로는 설계대상도로에 따라 세 단계 등급변수 적용(Hierarchical Level), 등가단축하중(ESAL) 개념이 아닌 축하중에 따른 누적손상 개념 적용, 환경하중에 대한 통합 기후 예측모델(EICM: Enhanced Integrated Climate Model) 적용과 Miner의 손상이론 도입 등을 다루고 있다는 것이다.

* 한양대학교 교통공학과 공학석사 · E-mail : yun0142@hanmail.net

** 한양대학교 교통공학과 교수 · 공학박사 · E-mail : suhyc@hanyang.ac.kr

*** 한양대학교 교통공학과 박사과정 · 공학석사 · E-mail : kjh0705@hanmail.net

**** 한국도로공사 도로교통기술원 포장연구그룹 · 책임연구원 · 공학박사 · E-mail : j-jeong@freeway.co.kr

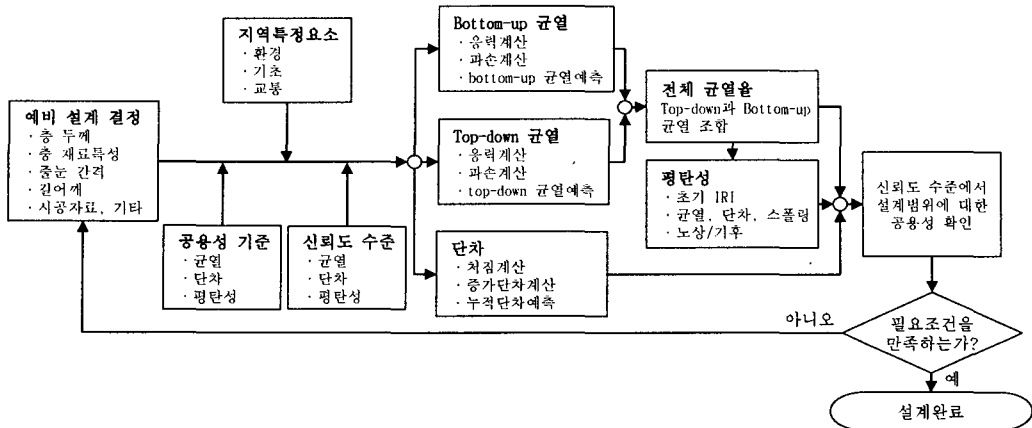


그림 1. JPCP 설계과정

3. 입력변수 수집 및 분석

AASHTO 설계법에서 요구하는 각 변수에 대하여 88 고속도로의 교통량, 기후, 단면구조 및 층별 재료특성에 대한 각각의 입력변수를 수집하고 프로그램에 적용할 수 있도록 대표값을 결정하였다.

3.1 일반정보

기상관측소에서의 자료수집이 가능한 고령-옥포의 23.5km를 대상구간으로 선정하였다. 이 구간에서는 교통 이전의 초기 IRI 자료가 없었기 때문에 중부내륙 고속도로 내 시험도로의 초기 IRI 수치인 1.5m/km를 대신 사용하였고 파괴범위의 IRI는 한국도로공사에서 잠정기준으로 사용하고 있는 3.5m/km를 적용하였다. 균열율과 단차의 파괴범위 기준값은 AASHTO 설계법에서 제시하는 슬래브당 균열율 25%와 단차 3.8mm를 적용하였다. 도출된 결과의 신뢰도는 AASHTO 설계법에서 제시하는 지방부 고속도로 기준으로 95%의 신뢰도를 사용하였다.

3.2 교통량

지난 1999년부터 2003년까지 5년간 고령-옥포 구간에서 조사한 트럭의 연평균일교통량(AADTT: Annual Average Daily Truck Traffic)은 본 연구에서 적용한 5종에 대하여 표 1과 같이 평균 5,661대/일로 나타났다. 도로용량편람(2001)에서 중방향비(DDF: Directional Distribution Factor)는 지방부 고속도로 기준의 0.65를 사용하였고, 설계차로의 트럭비(LDF: Truck Lane Distribution Factor)는 편도 1개 차로를 트럭이 사용하므로 1.0을 사용하였다. 88 고속도로의 설계속도는 도로설계편람(2000)에서 국내 고속도로 왕복 2차로의 제한속도 80km/hr를 적용하였다.

표 1. 고령-옥포 구간 과거 교통량

(단위 : 대/일)

년도	계	승용차 (1)	버스		트럭					AADTT
			소형 (2)	보통 (3)	소형 (4)	보통 (5)	대형 (6)	특수1 (7)	특수2 (8)	
1999	15051	7980	1199	749	23	4262	708	113	17	5849
2000	15886	8425	1715	869	26	3846	899	100	6	5720
2001	14903	7991	1169	754	10	3222	1626	123	8	5733
2002	15617	8434	1282	842	123	4026	829	54	27	5778
2003	14951	8523	1153	547	51	3842	431	336	68	5224
평균	15282	8271	1304	752	46.6	3839.6	898.6	145.2	25.2	5660.8



AASHTO 설계법에서 채택하고 있는 차종분류는 그림 2와 같이 미연방도로국(FHWA: Federal Highway Administration) 기준의 4종부터 13종까지 총 10종을 적용하고 있다. 국내 고속도로의 경우 차종 분류는 그림 3과 같이 1종부터 8종까지이며 본 연구에서 적용한 차종은 교통하중에 큰 영향을 주지 않는 1, 2, 4종을 제외하고 총 5종을 사용하였다. 88 고속도로의 적용 차종 5종의 비율은 표 1에서 산출한 전체 평균 AADTT에 대한 각 차종의 AADTT의 비(%)로 구할 수 있으며 비율의 총합은 100%가 되어야 한다. 차량 형태를 고려하여 AASHTO 설계법의 차종에 적용한 국내 5종의 차종과 그 비율은 표 2와 같다.

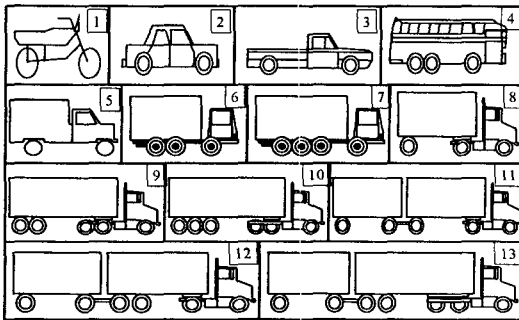


그림 2. FHWA 차종 분류

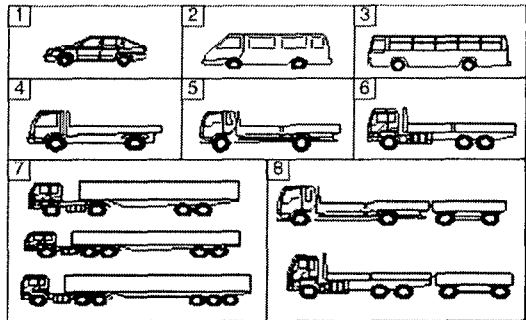


그림 3. 국내 고속도로 차종 분류

표 2. 2002 AASHTO 포장 설계법 적용 차종 분류

FHWA 기준			국내 고속도로 기준			88 고속도로 차종비율(%)
차종	차축		차종	차축		
4	버스	3축	3	보통버스	2축 6륜	13.3
5	소형트럭	2축	5	보통트럭	2축 6륜	67.8
6	트럭	3축	6	대형트럭	3축 10륜	15.9
9	트레일러	5축	7	세미트레일러	4축이상	2.6
11	멀티트레일러	5축이하	8	플트레일러	4축이상	0.4

AASHTO 설계법에서는 교통량의 하중은 기존의 등가단축하중(ESAL: Equivalent Single Axle Load)의 개념이 아닌 축하중분포의 개념을 사용하였다. 그림 4부터 그림 9는 AASHTO 설계법에서 default로 사용하고 있는 각 차량의 Single 및 Tandem 축의 하중 크기의 분포를 한국형 포장 설계법 1단계 2차년도에 수집된 축하중 크기 분포자료와 비교한 것이다. 모든 차종에 대하여 국내의 경우에서 특정 하중대에 높은 빈도수가 나타났고 AASHTO 설계법에서는 국내보다 하중대가 넓고 고르게 분포하는 것을 알 수 있었다.

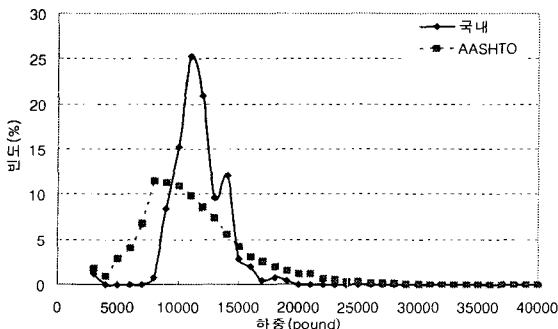


그림 4. Single 4종(국내 3종) 축하중 분포

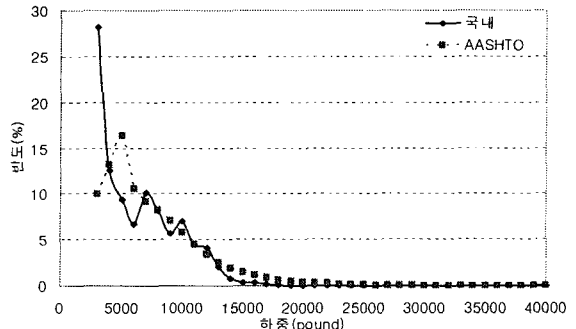


그림 5. Single 5종(국내 5종) 축하중 분포

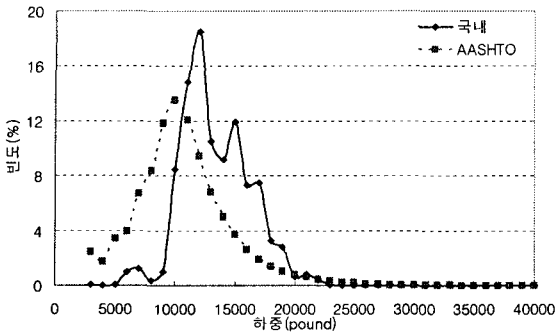


그림 6. Single 6종(국내 6종) 축하중 분포

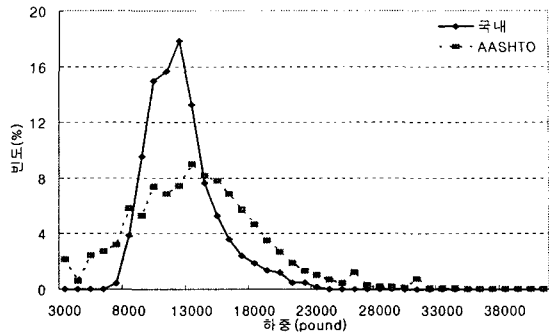


그림 7. Single 7종(국내 9종) 축하중 분포

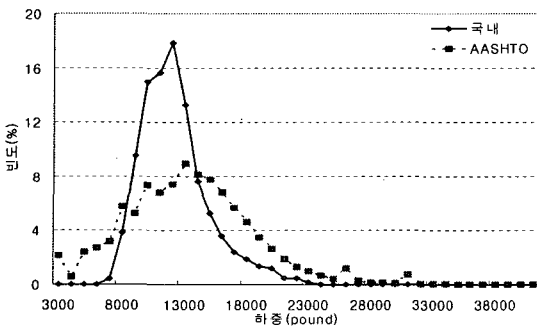


그림 8. Tandem 6종(국내 6종) 축하중 분포

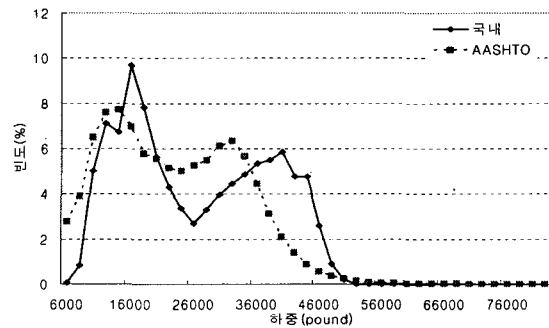


그림 9. Tandem 7종(국내 9종) 축하중 분포

이 외에 설계 차량에 따른 차로 폭과 바퀴 축 형태, 타이어 압력, 축거 등은 도로 설계 편람(2000)과 교통연감(1993)에 의한 자료를 사용하였으며, 3.5m 차로폭에서의 차량의 횡방향 원터링(Wandering)은 국내 연구결과(강민수, 2001)를 참고로 하여 4, 5, 6종의 평균값인 23cm를 사용하였다.

3.3 기후

AASHTO 설계법에서 기후조건은 미국 각 주의 관측소에서 과거 2년 이상 매 시간 수집된 데이터만 사용하도록 구성되어 있기 때문에 본 연구에서는 고령-옥포구간의 기후조건을 설계에 사용할 수 있도록 프로그램상의 기후 입력 방식을 수정하여 대상으로 주변의 기상관측소 자료를 이용할 수 있는 방안을 제시하였다. 본 연구에서 적용한 기후 자료는 대구 관측소의 2003년도 매 시간별 온도, 강수량, 풍속, 습도, 운량자료로서 *.hcd 파일형식으로 자료를 저장 후 프로그램에 사용할 수 있도록 하였다.

3.4 단면구조 및 층별 재료특성

본 연구에서는 88 고속도로의 각 단면 재료특성 자료가 부족한 실정으로 중부내륙 시험도로의 콘크리트 포장구간 시험 결과를 대표변수로 사용하였다. 88 고속도로의 단면구조는 콘크리트 슬래브, 쇄석기층, 보조기층(자갈층), 노상으로 시공되었으며 각각의 두께는 30·20·20cm 이다. 각 층에 대한 입력변수는 시험도로의 시험결과와 AASHTO 설계법의 default 값을 표 3, 표 4, 표 5와 같이 사용하였다. 또한, 일반적으로 슬래브의 줄눈간격은 실제 국내 현장에서 일률적으로 사용하고 있는 6m를 사용하였고, 줄눈재는 국내 콘크리트 포장의 경우 많이 사용하고 있는 종류가 주입형 폴리우레탄 줄눈재이지만 2002 AASHTO 포장설계법에서는 적용 가능한 액체형을 사용하였다. 다웰 직경과 다웰 간격 또한 현장에서 일반적으로 사용하고 있는 32mm와 30cm를 사용하였다.



표 3. 슬래브층 입력변수

입력 변수		변수 값
일반 성질	단위중량	2.35t/m ³
	포아손비	0.15
열적 성질	열팽창계수	5.67×10 ⁻⁶ /°F
	열전도율	1.25BTU/hr-ft·°F
	열용량	0.28BTU/lb·°F
배합 성질	시멘트 함량	340kg
	물/시멘트 비	42.3%
	골재 종류	석회암
	역 수축률	최대수축의 50%
	최대수축 50% 도달시간	35일
	양생 종류	양생제
강도 성질	입력 단계	Level 3
	압축강도	246.7kgf/cm ²

표 4. 노상층 입력변수

입력 변수		변수 값
흙 분류		A-1-b
강도 성질	입력 단계	Level 3
	분석 형태	ICM Inputs
	포아손 비	0.35
	횡토압계수, Ko	0.5
	Modulus	2672kgf/cm ²
ICM Inputs	소성지수, PI	NP
	#200체 통과율	2.5%
	#4체 통과율	94%
	D60	1.6mm
	최대건조단위중량	2.01t/m ³
	비중, Gs	2.66
	최적함수량	9.7%

표 5. 쇄석기층 입력변수

입력 변수		변수 값
강도 성질	입력 단계	Level 3
	분석 형태	ICM Inputs
	포아손비	0.35
	횡토압계수, Ko	0.5
	Modulus	2812kgf/cm ²
ICM Inputs	소성지수, PI	1
	#200체 통과율	10%
	#4체 통과율	30%
	D60	2mm

3.5 민감도 분석

본 연구에서는 각각의 변수들 중에서 공용성 결과에 많은 영향을 주는 변수를 확인해보고, 국내 적용시 중요한 변수를 선별할 수 있도록 간단한 방법으로 민감도 분석을 실행하였다. 모든 변수에 대하여 기준 입력변수의 ± 20% 크기로 입력 값을 증감하면서 계산된 설계수명 25년의 공용성 결과를 비교하였다. 교통량 입력변수들 중에서는 그림 10과 그림 11과 같이 교통량(AADTT), 중방향비(DDF), 원더링(Wandering), 차선에서 바퀴위치(Wheel Location)의 네 가지 변수가 비교적 민감하게 나타났고 그 중에서도 차선에서 바퀴위치와 교통량 입력변수가 더 민감하게 반응하였다.

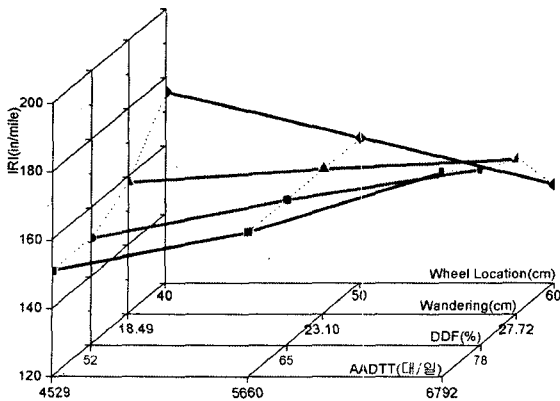


그림 10. 교통량 입력변수 민감도 (IRI)

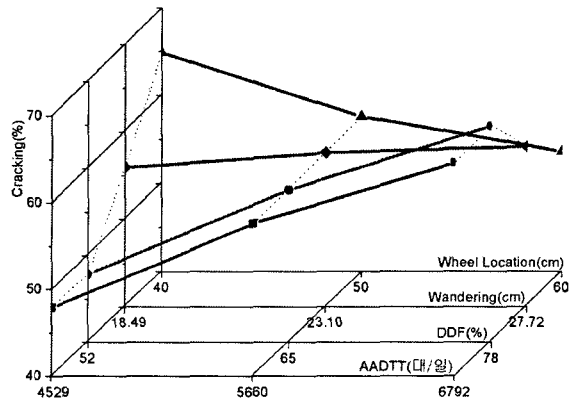


그림 11. 교통량 입력변수 민감도 (균열)

단면구조 입력변수에는 그림 12와 그림 13과 같이 줄눈간격(Joint Spacing), 다웰직경(Dowel Diameter), 장기 하중전달효율(Long-Term Load Transfer Efficiency) 그리고 표면 흡수율(Surface Absorptivity) 등 네 가지의 변수들이 공용성 결과에서 주로 민감한 반응을 보였다. 또한 네 변수들 중에서 가장 민감하게 나타난 변수는 줄눈간격으로서 종단평탄성과 균열 모두 6m 이하에서 급격한 기울기를 보였다.

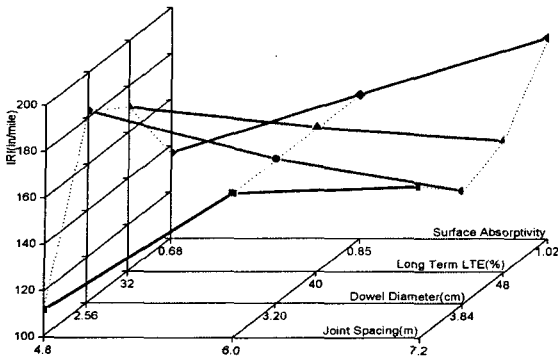


그림 12. 단면구조 입력변수 민감도 (IRI)

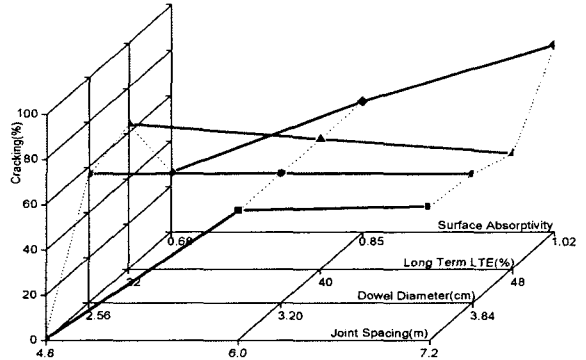


그림 13. 단면구조 입력변수 민감도 (균열)

AASHTO 설계법에서 가장 많은 입력변수를 차지하고 있는 단면의 각 층별 입력변수에서는 단면 층별로 재료에 따른 모든 입력변수에 대하여 민감도 분석을 수행하였으며, 콘크리트 슬래브를 제외한 기층과 노상층의 입력변수들은 공용성 결과에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있었다. 그림 14와 그림 15에서 보듯이, 콘크리트 슬래브의 재료특성 중 열팽창계수(Co. Thermal expansion), 슬래브 두께(Slab thickness), 열전도율(Thermal conductivity), 그리고 압축강도(Compressive strength) 등이 결과에 민감하게 나타났으며, 그 중에서도 열팽창계수가 가장 민감한 반응을 보였다.

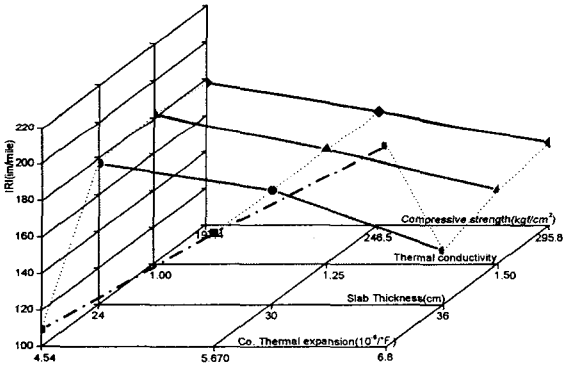


그림 14. 슬래브층 재료특성 입력변수 민감도 (IRI)

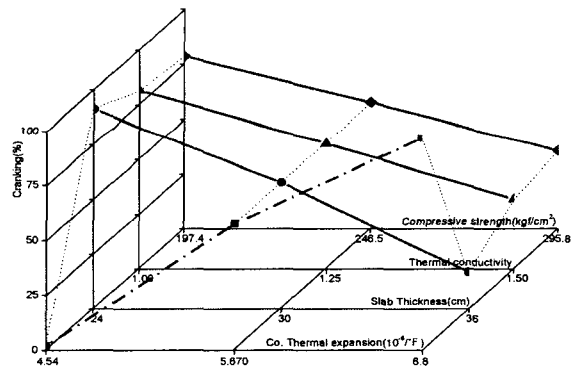


그림 15. 슬래브층 재료특성 입력변수 민감도 (균열)

4. 88 고속도로 조사 및 분석

본 연구에서는 2003년과 2004년도에 수행된 고속도로 포장상태 조사 및 분석(2004)에서 수집된 88 고속도로 진구간의 종단평탄성과 표면손상자료를 분석하여 AASHTO 설계법에 의한 예측결과와 비교하였다. 고령-옥포 구간의 종단평탄성은 그림 16과 표 6에서 평균 2.81로 나타났고, 표준편차를 더한 값은 3.42로 나타났다. 본 연구에서는 평균값에 표준편차를 더한 3.42를 사용하였는데, 이는 이미 보수된 구간을 고려하여 안전측을 두기 위한 것이다(박경부, 2001). AASHTO 설계법에 88 고속도로의 노면손상에 대한 슬래브당 균열율(%) 자료를 적용하기 위해서 100m마다 조사된 선상균열의 길이가 차로폭 3.5m보다 적으면 16개 슬래브 중 균열발생 슬래브 1개(6.3%), 3.5m~7m이면 균열 발생 슬래브 2개(12.5%) 등의 방식으로 슬래브당 균열율(%)을 계산하였다. 대상구간인 고령-옥포의 균열율은 2.7% 정도로 나타났다.

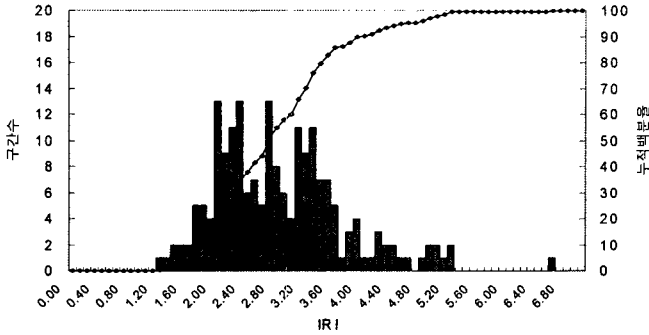


그림 16. 대상구간 IRI 누적분포도(CP)

표 6. 대상구간 IRI 통계자료

고령 - 옥포 구간	23.5km
최소값	1.14
최대값	6.53
평균값	2.81
표준편차	0.61
평균 + 표준편차	3.42

5. 잔존수명 분석

AASHTO 설계법에서 제시하고 있는 중단 평탄성 모델을 통하여 설계수명동안 예측된 88 고속도로의 IRI는 그림 17과 같다. 그림 17에서 보듯이, 현장조사를 통해 결정된 현재 88 고속도로 IRI(216in/mile)와 AASHTO 설계법에 의해 예측된 IRI곡선의 교차지점은 22.8년으로 나타났다. 현재 88 고속도로의 IRI는 조사된 자료의 평균에 표준편차를 더한 값을 사용하였고 예측 IRI의 경우는 신뢰도 95%의 결과를 사용하였다. 프로그램의 초기단계에서 입력한 IRI의 한계기준 222in/mile(3.5m/km)이 예측 IRI곡선과 교차하는 지점은 25.6년으로 나타났고, 따라서, 최종 88 고속도로의 잔존수명은 두 교차지점의 간격인 약 2.8년(32개월)으로 나타났다.

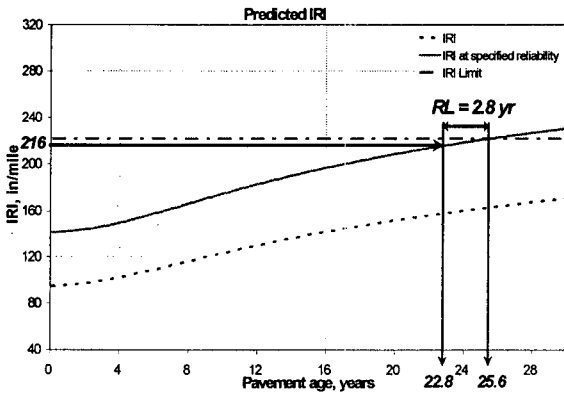


그림 17. IRI 예측 결과

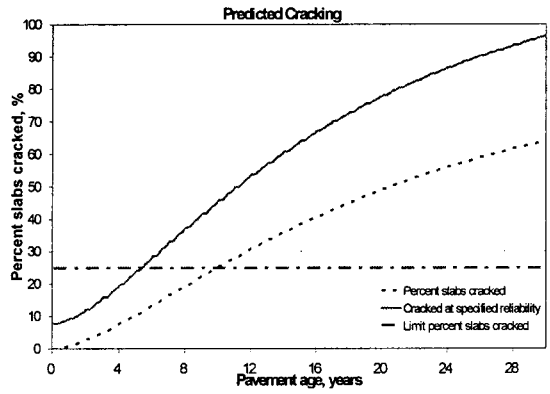


그림 18. 균열을 예측 결과

그림 18의 전체 균열은 Top-down 균열과 Bottom-up 균열을 사용하여 예측되었고, 신뢰도 95%를 사용하여 AASHTO 설계법에 의해 예측한 경우, 공용 5년후에 이미 한계기준 25%를 넘어섰으며 25년에는 90%의 균열율을 보였다. 실제로 측정된 88 고속도로의 손상균열은 앞서 설명한 균열율로 계산하였을 때 현재 3% 미만인 것으로 나타났다. 이와 같이 예측된 균열율과 측정된 균열율 사이에 큰 차이를 나타내는 가장 큰 변수는 콘크리트 포장의 줄눈간격으로서 AASHTO 설계법에서는 default 값으로 4.5m를 사용하고 있고, 국내에서는 6m를 사용하고 있기 때문인 것으로 판단된다.



6. 결 론

AASHTO 설계법의 국내 적용성을 평가하기 위하여 평탄성 산출 방법을 활용하여 재령이 20년이 지난 88 올림픽 고속도로를 대상으로 잔존수명을 산출해 보았다. 일련의 잔존수명 산출과정을 통하여 AASHTO 설계법의 국내 적용시 한계점과 대처방안을 제시 할 수 있었다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) AASHTO 설계법을 이용하여 예측된 IRI의 패턴과 실제 현장에서 조사된 현재 IRI를 비교하였을 때 88 고속도로 고령-옥포 구간(23.5km)의 잔존수명은 2.8년(32개월) 정도인 것으로 나타났다.

(2) AASHTO 설계법의 각각의 입력변수에 대해 국내에서 일반적으로 사용되는 값과 그 값의 80%, 120%로 조정된 값을 사용하여 계산한 결과 여러 변수 중에서 열팽창계수와 줄눈간격이 가장 큰 민감도를 보였고, 그 외에도 AADTT, DDF, 콘크리트 포장의 두께, 열전도율, 압축강도 등이 민감한 것으로 나타났다.

(3) 국내 고속도로의 2003년도 축하중 크기의 분포자료와 AASHTO 설계법에 사용되는 축하중 크기 분포의 default 값을 비교한 결과, 국내고속도로의 축하중이 4~6ton 사이에 집중적으로 몰려있음을 알 수 있었다.

(4) AASHTO 설계법의 기후 변수에 국내 환경을 적용하기 위해서 온도, 풍속, 운량, 강수량, 습도 등의 자료를 수집하여 기후자료 파일을 제작하고, 설계법 프로그램에서 그 파일을 불러들여 사용할 수 있게 함으로써 국내기후조건을 AASHTO 설계법에 적용할 수 있는 방법을 찾아내었다.

참고문헌

1. NCHRP(2004), "Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures", NCHRP 1-37A Final Report
2. 건설교통부(2000, 2001, 2002, 2003, 2004), "1999, 2000, 2001, 2002, 2003 도로 교통량 통계연보"
3. 건설교통부(2000), "도로설계편람"
4. 건설교통부(2001^a), "도로용량편람"
5. 교통신문사(1993), "교통연감"
6. 강민수(2001), "차량 Wandering의 포장손상 저감 정량화 연구", 한양대학교, 석사학위 논문
7. 박경부(2001), "고속도로 포장관리시스템 논리개발 연구", 한양대학교, 박사학위 논문
8. 한국도로공사(2002), "동결심도를 고려한 포장 하부구조 개선방안 연구", 최종보고서
9. 한국도로공사(2002^b), "시험도로 콘크리트 포장재료 물성정량화 방안에 관한 연구", 최종보고서
10. 한국도로공사(2004), "고속도로 포장상태 조사 및 분석", 최종보고서