

신뢰도 분석을 통한 고속도로 교량의 바닥판 잔존 수명 예측

The Prediction of Remaining Life of Concrete Bridge Decks Using The Reliability Analysis

박정희	Park, Jung Hee	한국도로공사 구조물센터 팀장 (E-mail : pjh309@hanmail.net)
이상순	Lee, Sang Soon	한국도로공사 구조물센터 차장 (E-mail : lssp@ex.co.kr)
김지원	Kim, Jiwon	정회원 · (주)토탈페이브시스템 대표이사 (E-mail : aircraft1@paran.com)
박철우	Park, Cheolwoo	정회원 · 강원대학교 부교수 (E-mail : tigerpark@kangwon.ac.kr)
이동현	Lee, Dong Hyun	정회원 · (주)토탈페이브시스템 부장 (E-mail : ssam74@daum.net)

ABSTRACT

Korean national highway has been increased 2 times more for the past ten years because of many highway geometric improvements and new routes since 2000. According to the reasons, maintenance cost has been increased continuously. Deterioration of concrete bridge decks caused by asphalt pavement deformation occupies a high proportion of overall bridge management budget. The number of current highway bridges has reached over 7,800 in 2011, and It is difficult to determine to some future budget. This study predicted the remaining life of concrete bridge decks using the reliability analysis based on Weibull distribution. and The expected future maintenance cost was estimated.

KEYWORDS

bridge deck, budget estimate, bridge management, reliability theory, mean life, survival probability

요지

국내 고속도로의 교량은 2000년 이후 집중된 선형개량 및 신규 노선 증가 사업으로 10년 전과 비교하여 2배 이상 증가하였다. 이에 따라 유지관리 비용도 지속적으로 증가하고 있다. 현재 고속도로 유지관리 예산 비중이 가장 높은 항목은 아스팔트 교면 교량의 콘크리트 바닥판 열화에 의한 보강 부분이다. 2011년 고속도로 관리교량은 약 7,800여개에 도달한 시점에서 현재 방법으로는 향후 어느 정도 바닥판 보강 예산이 필요한지 어느 시기에 증액을 하여야 되는지 명확하게 추정하기 어렵다. 본 연구에서는 신뢰도 분석 방법인 와이불 분포에 의한 생존 수명 예측 기법을 적용하여 현재 고속도로 아스팔트 계열의 교면 교량의 평균 수명을 추정하였고 이를 토대로 향후 예상 보강 비용을 추정하였다.

핵심용어

바닥판, 예산 추정, 교량 유지관리, 신뢰성 이론, 생존 확률, 평균 수명

1. 서론

현재 국내 고속도로의 교량은 2000년 이후 집중된 선형개량 및 신규 노선 증가 사업으로 10년 전과 비교하여 2배 이상 증가되었다. 이들 교량들의 노후화가 본격적으로 진행되는 2015년 이후부터 대규모의 유지관리 비용이 예상되어 이에 대한 대처가 필요한 실정이다. 현재 국내 고속도로 교량 유지관리 업무에서 가장 심각한

게 대두되는 문제 중 하나는 아스팔트 교면방수층의 손상과 이에 따른 콘크리트 바닥판 열화문제이다. 이는 기본적으로 아스팔트 관리교량 증가 및 제설환경변화에 기인하였고 이로 인해 관련 유지보수비가 2004년 약 35억원에서 2008년 280억원으로 급격히 증가하였다. 이들 바닥판 열화는 대부분 아스팔트 계열의 교면포장을 적용한 교량에서 발생하고 있다. 열화된 바닥판 보강

은 코어 채취 등을 통해 포장두께, 아스팔트 혼합물 및 방수층 상태, 바닥판 열화발생 여부를 확인한 후 보강 대상구간과 공법을 선정하고 있으나, 예산 확보 문제로 유지관리 주체에 따라 담당자의 주관적 판단도 작용하고 있는 실정이다.



그림 1. 교면 및 바닥판 열화

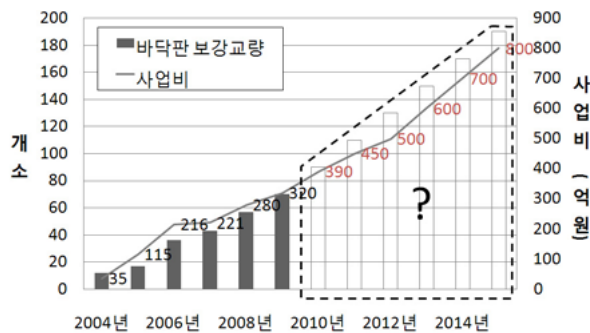


그림 2. 바닥판 열화 보강 교량 개소 및 사업비

이러한 상황에 대처하기 위해 고속도로 관리주체에서는 2010년부터 바닥판 열화가 발생된 것으로 추정된 교량에 대하여 GPR 상태조사를 수행하고 있으며, 이를 통해 바닥판 콘크리트 열화면적, 열화부 분포 상태 등 손상정도 등을 파악하고 있다. 바닥판 열화시 보강 방법으로는 교면포장과 방수층 및 바닥판 열화부를 제거하고 초속경 콘크리트 계열로 보강하는 공법을 대부분 적용하고 있다. 이는 고속도로 특성상 최단시간내에 교통개방이 가능해야하기 때문이다. 그러나 이와 같은 공법은 재포장 공법에 비해 매우 높은 비용이 소요되기 때문에 현재 여건상 모든 보강 대상 교량에 적용하기에는 어려운 실정이다. 이밖에 교량 바닥판 하부 보강공법으로 철판부착공법, 섬유부착공법 등 다양한 공법이 존재하나, 시공 시 콘크리트 바닥판과 일체성이 확보되어야 하고 교량상부 방수가 되지 않을 경우 오히려 교량의 내구성이 떨어질 우려가 있기 때문에 적용되는 사례가 매우 제한적이다. 이에 따라 현재 고속도로에서는 초속경 콘크리트 보강외 다른 공법의 적용 비중이 상대적으로 매우

우 미미한 실정이다. 현재 초속경 콘크리트 보강 물량이 급격하게 증가하고 있으나, 다양한 불확실성 때문에 네트워크 차원에서 향후 어느 정도 예산이 소요되는지 어느 시기에 증액을 하여야 되는지 명확하게 예측하기 어렵다. 본 연구에서는 기존 실적 자료를 바탕으로 생존 분석을 통해 현재 고속도로 교량의 바닥판의 수명을 추정하며, 네트워크 차원에서 향후 어느 정도의 예산이 필요한지 예측할 수 있는 방법론을 정립하고자 한다.

2. 고속도로 교량의 바닥판 현황 조사

교량의 바닥판은 상부의 교면포장에 작용하는 하중을 지지하여, 하부의 주형이나 기초에 전달하는 역할을 하는 부재이다. 일반적으로 바닥판 열화 원인은 초기 건조수축, 설계의 미비, 피로손상, 제설제사용 등이 원인으로 지적되고 있다. 구조적으로는 윤하중이나 충격하중에 의해 발생하는 바닥판 인장축 콘크리트에 발생하는 균열이 주요 손상원인이며, 배수 문제와 연계되어 방수시스템 파손, 주요 부재의 열화 등으로 발전되는 양상으로 방치시 전단력 저하에 큰 영향을 미친다. 현재 콘크리트 교면 포장의 경우는 전체적으로 바닥판 상태가 비교적 양호한 상황이지만 아스팔트 계열 교면 포장인 바

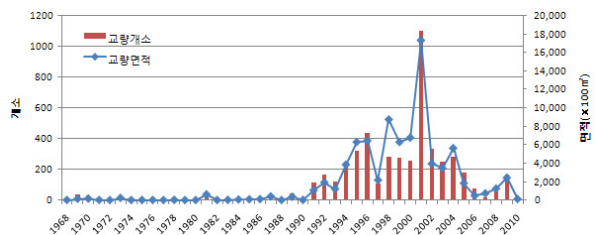


그림 3. 아스팔트 계열 준공년도별 교량 현황

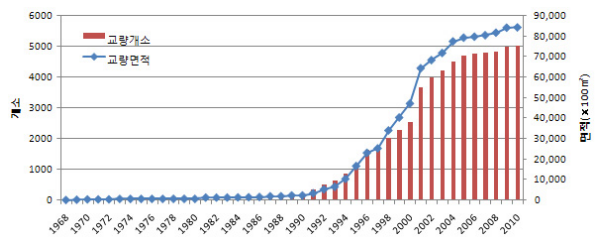


그림 4. 아스팔트 계열 준공년도별 누적 교량 현황

표 1. 아스팔트 계열 교면포장 교량 현황

전체 교량		전면보강 교량		미보강 교량	
개소	면적(×100m²)	개소	면적(×100m²)	개소	면적(×100m²)
5,016	84,208	203	4,968	4,816	79,240

다판 교량의 경우 내부 침투수의 동결융해와 제설염화물에 의한 염해에 의해 바닥판 열화 현상이 급증하게 증가하고 있는 실정이다. 현재 고속도로 전체 교량 중 아스팔트 계열의 교량은 약 5,000여개에 육박하며, 최근 5년간 200여개 교량은 이미 초속경 콘크리트로 전면개량이 실시되었다. 따라서 산술적으로 향후 약 4,800여개의 잠재적인 보강 대상이 아직 남아 있으며, 이들 중 약 500 여개소가 교면 및 바닥판 열화가 이미 진행 중으로 보강 예정이나 관리 대상으로 있다.

3. 국외 바닥판 수명 조사

교량을 구성하고 있는 부재는 시간에 따라 재료 및 구조적인 특성과 외부 환경요인으로 인하여 상태 등급이 저하되고 보수·보강이 이루어진다. 일반적으로 보강이 이루어지는 시기까지를 공용수명으로 정의하고 있다. 해외의 경우 바닥판 수명은 유지보수 이력 자료를 근거로 개발된 상태등급 예측모델에 의해 정의하고 있다. 미국의 경우 우리나라와 달리 9등급의 상태평가 기준을 사용하고 있다. 교량을 크게 바닥판(교면 포함)과 상부구조, 하부구조로 구분하여 각 9등급으로 상태를 구분한다. 9등급은 각 부재의 완벽한 상태를 나타내고 1등급은 붕괴 상태를 의미하며, 기본적으로 미연방도로청(FHWA)에서는 상태등급 4를 최소 관리수준으로 정하고 있다.

해외의 경우도 상태등급 모델을 구축하기 위한 관리 자료에 과거 유지관리조치가 포함되지 않는 경우가 빈번하였기 때문에 정확한 공용 수명 추정에 어려움이 있었다. 또한, 부재 상태의 경우 환경, 설계, 교통량, 하자 등 다양한 복합적인 요소가 영향을 미치고 관리자의 주관적 판단이나 가용 예산 정도에 의해 보수보강 조치 여부가 결정되는 경우가 많기 때문에 명확하게 규정되지 않는 경우가 많다. 미국의 많은 도로국에서도 관리 교량 자료를 이용하여 통계분석을 실시한 후, 상태등급 모델을 구성하려하였으나, 연구결과 통계적 처리만으로는 상태등급 모델을 구성할 수 없다는 결론을 내렸다(공정식, 2008; George E. Ramey, 1997). 해외에서도 현실적으로 상태등급 모델 구성에 충분할 만큼 이력자료를 관리하지 못하는 실정이다. 그러나 대부분 바닥판 상태등급 모델 추정 방식이 상이하지만 일반적으로 콘크리트 바닥판이 첫 번째 보수 및 보강이 필요한 시기는 최소 20년 이상으로 추정하고 있다. 표 2와 표 3는 미국의 인디애나주 DOT(Indiana Department Of Transportation)에서 규정하고 있는 설계 수명 주기와

과거 연구결과 추정된 바닥판의 각 부재별 공용년수를 나타낸 것으로 유지관리계획 수립 시 기준이 되고 있다.

표 2. 공용년수 및 조치사항

강교		콘크리트교	
공용년수	조치사항	공용년수	조치사항
0	가설	0	가설
20	바닥판 보강	20	바닥판 보강
35	바닥판 교체	35	바닥판 보강
50	바닥판 보강	50	교량 개축
65	교량 개축		

표 3. 콘크리트 바닥판 내구년수

구 분		기대수명(년)
교량의 바닥판 보수	부분보수	20
	바닥판의 5% 표면보수	25
	바닥판의 2.5% 표면보수	공용 28년후 매 3년마다
교량 바닥판 교체	일반 철근콘크리트 바닥판	20
		30
		40
		30~35
	에폭시코팅 철근 바닥판	40
	초속경 콘크리트	40
초속경 콘크리트 (에폭시코팅 철근)	50	

참고 : George E. Ramey, 1997

4. 상태등급 자료 조사

국내의 경우 2003년부터 시설물의 안전관리에 관한 특별법 제 7조에 의해 수행되고 있는 정밀안전진단을 정기적으로 실시하고 있다. 정밀안전진단 보고서에는 국내 고속도로 교량(1, 2종) 관리 데이터 중에 세부적인 자료로 각 경간별로 부재별 파손 상태 및 등급이 기록되어 있다. 정밀안전진단은 각 부재의 외부 상태를 근거로 내구성을 평가하는 상태평가와 안전성평가로 구분되는데, 점검주기는 준공 후 10년이 경과한 후 1년 이내에 최초 수행하며, 그 후 안전등급에 따라 4~6년 주기로 수행되고 있다. 바닥판 부재의 경우 A~E등급까지 5단계로 구분되어 있으며, 결함도 지수에 의해 산출되고 있다. 본 연구에서는 한국도로공사 자체 네트워크 시스템인 Hi-Portal에 입력되어 있는 정밀안전진단 자료를 취득하여, 상태평가 결과인 결함도 지수와 당해 공용년수간의 상관관계를 파악하였다. 일부 미기입 대상과 기입 오류 대상을 제외하고 총 449개 교량을 분석하였다.

아스팔트 계열 교량들의 경우 진단 시 평균 부재별 결함도 지수와 당해 공용년수간의 상관관계를 다소 파악할 수 있었고 결함도 지수 0.4인(균열율 2% 이상, 10% 미만) C등급 교량도 다수 발생되었다. 1차 회귀식상으로는 공용년수 약 25년 시점에서 보강이 필요한 시기(결함도 지수 0.4 이상)로 나타났다.

콘크리트 계열 교량은 총 64개소로 공용년수보다는 다른 외적 요인과 상관성이 있을 것으로 추정된다. 아스팔트 및 콘크리트 계열 교량 모두 결함도 지수가 특정시기에 집중되어 있거나, 분산되어 있어 이를 바탕으로 바닥 수명을 정의하기에는 다소 무리가 있다.

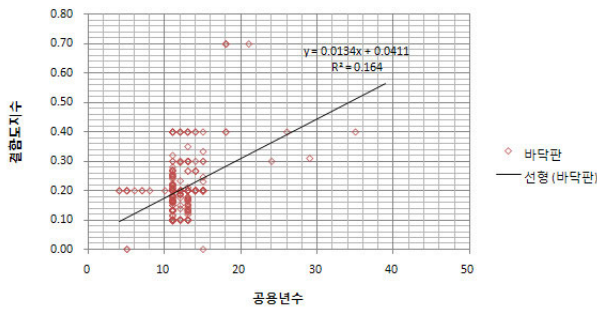


그림 5. 아스팔트 계열 결함도 지수 분포

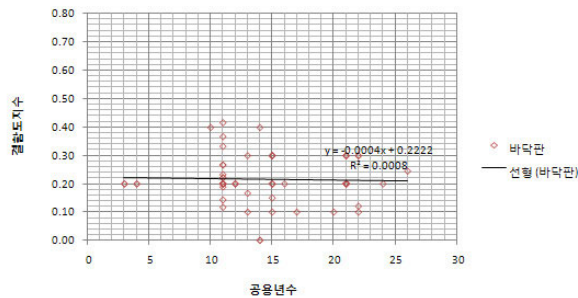


그림 6. 콘크리트 계열 결함도 지수 분포

아스팔트 계열 교면포장의 바닥판 손상은 제설염화물 살포량, 교량 형식, 교통량 등 다양한 요소에 따라 편차가 매우 크지만 준공 이후 10년부터 최초 시작되며, 최소매년 2%가 증가하여 손상률이 20%가 되는 시점인 준공 20년 후부터 최초 보수보강 시기가 도래하는 것으로 판단하고 있다(Khossrow Babaei, 2003). 이 시점은 C등급에서 D등급으로 전환되는 시기로 이론적으로 아직 구조적 안전성이 감소되지는 않았지만 망상균열의 진전으로 콘크리트 박리가 발생되어 수년 안에 구조적 내하력 문제로 진전될 수 있다. 그러나 실제 준공 30년 이상된 교량 중 문제가 발생하지 않은 교량도 있으며, 공용 초기에 열화 현상이 발생하여 교면 개량이 이루어진 경우도 적지 않다. 다음 그림 7은 바닥판 열화가 발생하

여 초속경 콘크리트로 보강된 교량을 대상으로 준공시점부터 보강이 이루어진 시점까지 공용년수를 나타낸 것이다. 준공 20년 이전에 보강한 교량이 전체 77%로 매우 높은 비중을 차지하는데, 이는 현재 준공 20년 미만 교량이 전체 아스팔트계열 교량 중 95%로 절대 다수를 차지하고 있기 때문이다. 또한, 80~90년대에는 시스템이 구축되어 있지 않아 오래된 교량일수록 과거에 보강이 있었음에도 기록이 누락될 가능성도 있다. 현재 바닥판이 보강된 교량이 전체 아스팔트계열 교량의 4%에 불과하나 공용수명 전에 조기 열화가 일어난 교량이 다수 존재한다. 따라서 모든 교량에 대해 확정적으로 바닥판 수명을 결정하고 향후 보강 물량을 추정하는 방법은 바람직하지 않다.

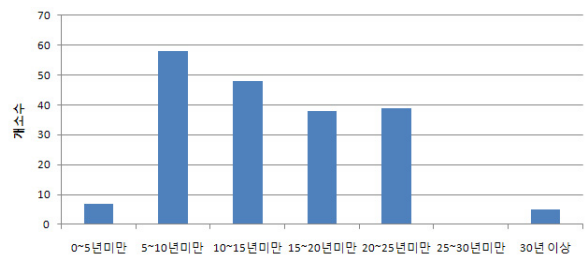


그림 7. 공용년도별 초속경 콘크리트 보강 교량 개소수

5. 생존 분석에 의한 바닥판 수명 예측

산업공학에서는 어떤 부품이나 장치의 수명을 일률적으로 정의하지 않고 신뢰성 분석과 같은 통계 기법을 통하여 교체 시기 및 수량을 예측하고 있다. 여기서 신뢰성이란 부품, 장치, 시스템이 주어진 조건이나 환경 하에서 특정시간동안 요구되는 의도된 기능을 수행할 확률로 정의하고 있다. 여기서 확률은 시간의 함수로서 시스템 제조시 설계 및 하자뿐만 아니라 생산에서 폐기까지 시스템 전체 Life Cycle을 대상으로 한다.

신뢰성 이론은 1950년대 수학적 연구가 진행되면서 제조업에서부터 발전하기 시작되었는데, 공정관리 및 품질관리에 대하여 기술적 요인을 찾아내어 제품의 수명을 연장하고 사후 관리에 대한 분석을 수행하기 위해서 개발되었다. 1960년대부터 샘플링 검사 방법에 적용되기 시작하였으며, 보전이론이나 와이불 분포(weibull distribution) 등의 이론이 정립되면서 본격적으로 시스템 고장 분석도구로 이용되었다(박재민, 2006). 교량 유지관리 관점에서는 구조물의 경우도 교량이라는 시스템에 바닥판 부재가 하나의 부품으로 간주할 수 있으며, 다양한 외부 환경에 노출되면서 시간에 흐름에 따라 성

능 저하가 나타나 보강 시점인 고장 상태로 진행된다고 정의할 수 있다. 제품 즉 바닥판의 수명은 가동 조건인 교통량과 염화물 살포량 등에 따라 달라지고 바닥판 열화에 의해 고장 상태인 보강 시기로 진행하기 때문에 신뢰성 분석이 가능하다. 신뢰성 분석을 통해 어떤 교량이 언제 보강이 필요한지는 파악하기 힘들지만 전체 관리 교량을 대상으로 어떤 시점에서 어느 정도 교량이 바닥판 열화가 발생되는지 파악할 수 있다. 신뢰도 분석의 기본 함수는 다음과 같이 시간 확률변수 t 에 대하여 작동할 확률로 나타낼 수 있다. 여기서, t 는 경과된 시간을 의미한다.

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt$$

전체 총 교량 총개수가 N 이고 시간경과 후 시점 t 에 서 여전히 공용중인 바닥판의 개수가 $n(t)$ 라 할 경우 신뢰도 $R(t)$ 는 $P\{T > t\}$ 로 $n(t)/N$ 으로 정의할 수이다. 본 연구에서는 교량이 준공된 후 바닥판 열화에 따른 교면 개량 보강이 발생한 시간까지를 평균수명(MTBF, Mean Time Between Failure)으로 간주하였다. 여기서 평균수명인 MTBF는 상품이 생산된 후 고장났을 때까지 평균 기간을 의미한다. 이를 위해 교면 개량 보강이 실시된 교량과 현재까지 양호한 상태의 교량을 구분하여 해당시점까지 수명을 산출하였다.

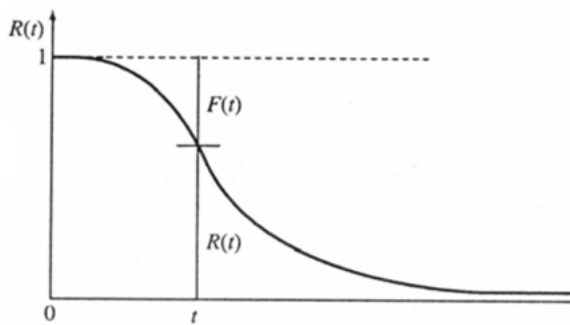


그림 8. 신뢰도 기본 함수

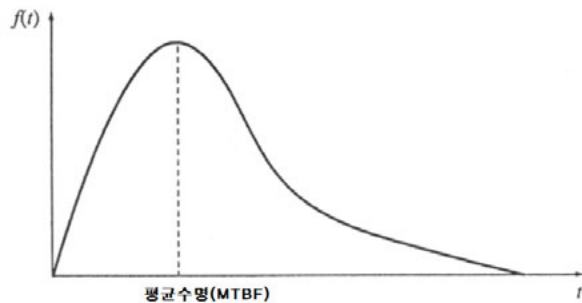


그림 9. 평균수명(MTBR)

평균수명을 산출하기 위해 고장률 함수의 분포에 따라 고장확률 밀도함수를 표현할 수 있는 확률분포가 필요하다. 확률분포의 종류는 크게 지수분포(exponential distribution), 대수정규분포(log-normal distribution), 와이블 분포(weibull distribution) 등이 있다. 지수분포는 시간에 따라 고장률이 일정한 수준을 유지하는 특성을 가지고 있으며, 조합된 기기나 전자장치 등의 내용수명내에 발생하는 우발적인 고장에 주로 적용하고 있다. 대수정규분포는 고장률 함수가 대수정규분포를 따르는 형태로 다양한 형태를 갖기 때문에 비교적 많은 유형의 데이터에 잘 맞는 것으로 알려져 있으며, 금속 피로수명이나 전기 절연체 수명에 자주 적용되고 있다. 본 연구에서는 스웨덴의 Waloddi Weibull이 고안한 와이블 분포 함수를 적용하였다. 와이블 분포는 증가, 감소, 상수(지수분포) 고장률을 변화할 수 있어 다른 분포보다 다룰 수 있는 응용 범위가 매우 넓은 분포 함수이다. 각종 베어링류, 클러치, 피스톤, 모터, 밸브류, 압력용기, 콤프레셔, 펌프, 윤활유 등을 포함한 많은 복합 기계류 부품의 수명이 와이블 분포를 따르는 것으로 알려져 있다. 바닥판 부재는 그림 7과 같이 시간에 따라 고장 확률이 일정하지 않으며, 노후화하는 특성을 나타내기 때문에 와이블 분포 적용이 바람직하다. 이와 같이 와이블 분포는 고장률 함수가 선형으로 분명히 표시할 수 없을 때 주로 사용되며, 다양한 고장률 함수에 대응할 수 있기 때문에 매우 실용적인 특성이 있다. 다음은 와이블 분포에 대한 기본 식으로 적용되는 모수에 따라 고장률 함수가 변동된다. 여기서 확률밀도 함수는 시간에 대한 확률변수이며, 신뢰도 함수는 특정 시간까지 고장없이 성능을 발휘할 수 있는 확률이다. 불신도 함수는 신뢰도 함수와 반대되는 확률이고, 고장률 함수는 시간의 함수로서 시간 t 에서의 고장률은 시간 t 까지 고장이 없다가 시간 t 직후 고장을 일으킬 단위시간당 빈도를 의미한다. 평균수명은 이론적으로 신뢰도 함수를 적분하는 형태로 산출되며, 추정된 형태모수에 따라 고장률이 시간에 따라 증가하는지 감소하는지 특성 산포를 파악할 수 있다.

$$\text{확률밀도 함수(고장확률 } f_{(t)}) \quad f_{(t)} = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \exp^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}}$$

$$\text{신뢰도 함수} \quad R_{(t)} = \exp^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}}$$

$$\text{불신도 함수} \quad F_{(t)} = \int_0^t f_{(t)} dt = 1 - \exp^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}}$$

$$\text{고장률 함수} \quad h_{(t)} = \frac{f_{(t)}}{R_{(t)}} = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1}$$

평균수명(MTTE) $MTTE = \int_0^{\infty} R(t) dt = \theta \gamma (1 + \frac{1}{\beta})$

여기서, t = 시간

θ = 척도모수(scale parameter)

β = 형태모수(shape parameter)

γ = 형태모수에 의해 결정되며, 감마함수 도

표를 이용하여 적용 $\gamma(y) = \int_0^{\infty} t^{y-1} e^{-t} dt$

분석 소프트웨어는 펜실베니아 주립대학 Dr. Barbara F. Ryan에 의해 개발된 Minitab을 이용하였다. 분석 데이터는 HBMS를 통해 파악한 정밀안전진단 자료와 초속경 콘크리트 실적 자료를 이용하였다. 그림 10은 초속경 콘크리트 실적 자료를 토대로 Minitab으로 분석한 각 분포에 따른 확률도(Probability Plot)를 나타낸 것으로 와이불 분포의 상관 계수가 높게 나타나 가장 적합한 것을 알 수 있다.

정밀안전진단 자료의 경우 이미 보강된 교량을 제외하고 바닥판에 대한 결함도 지수가 0.6 이상인 경우를 수명이 다한 교량, 즉 고장난 상태로 정의하였는데, 전

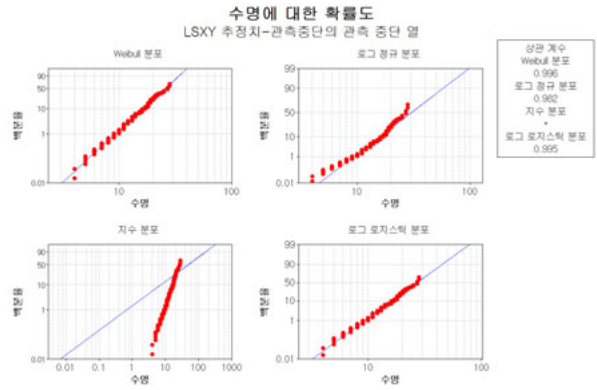


그림 10. 각 분포별 최소 제곱 추정치에 대한 확률도

체 449개 대상 교량 중 결함도 0.6 이상인 교량이 4개소에 불과하여 현실과 큰 차이를 나타내었다. 이는 D 등급(결함도 지수 0.7, 1방향 균열율 10~20%)보다 약간 안전한 수준에 해당하는데 이력 자료가 정확히 반영이 되지 않았거나 현재 정밀안전진단이 1종 교량을 위주로 실시되고 있어서 전체 중 일부분에 불과하기 때문으로 추측된다. 또한, 조사 관행상 등급이 다소 상향 조정되었을 가능성도 있다.

초속경 콘크리트 보강 실적의 경우 과거 보강 실적 및

표 4. 수명 추정 결과

분 포	평균수명(년)	표준 오차	95% 정규 CI		분포도
			하한	상한	
정밀안전진단 자료	27.94	3.02	22.02	33.86	
초속경 콘크리트 실적 (30년 이후 삭제)	25.32	0.57	24.23	26.45	
초속경콘크리트 실적 30년 이후 삭제 (특수지역 대상)	17.48	0.36	16.78	18.19	

향후 보강 예정인 물량을 토대로 분석하였다. 준공년도부터 바닥판 수명은 보강이 발생하는 시점까지를 공용년수로 정의하였다. 최근 5년간 초속경 콘크리트 실적(280개소)과 향후 5년동안 집행될 초속경 콘크리트 물량(295개소)을 합산하고 필터링(중복 교량, 관리제외 교량, 확장 교량 등 수정)하였다. 초속경 콘크리트 공법 조치는 코어채취 및 GPR 결과를 통해 방수층 열화 정도 및 바닥판 파손 상태(손상 면적 최소 10% 이상)를 파악하여 결정한다. 따라서 바닥판의 상태를 외관 조사(육안)보다 정확하게 판단할 수 있다. 전체 고속도로 아스팔트 계열 교면포장 교량(5,019개소) 중 30년 이상 교량(118개소)은 과거 보수보강 이력에 대한 자료 신뢰도가 명확하지 않아 제외하고 4,901개소에 대해서 분석을 수행하였다. 또한, 다음과 같이 특수지역(열화예상지역)으로 구분된 제설제 사용이 많은 지사가 관리하고 있는 교량에 대해서는 재분리하여 추가 분석을 수행하였다. 이들 특수지역은 한국도로공사 자체지침(예방적 유지관리를 위한 제설염화물 피해 최소화 방안(안), 2010년)에 의해 정의된 지역으로 연간 동결융해일수 일평균 기온 0℃ 이하가 45일 이상 및 일평균 최저 온도 -2℃ 이하가 90일 이상이며, 연간 제설제 사용량이 13톤/2차선·km 이상, 연간 누적 적설량 60cm 이상, 연간 강설일수 14일 이상, 노선의 해발 평균이 450m 이상인 지역이다. 원주, 대관령, 홍천 등 10개 지사가 이에 해당되며, 이들 대상 교량은 약 800여개이다.

정밀안전진단 자료의 경우 약 28년으로 가장 수명이 높게 나타났지만, 실제 수명이 다한 교량이 4개소에 불과하여 신뢰성이 낮았다. 그러나 초속경 콘크리트 실적 분석결과는 표본수가 높고 표준오차도 낮아 통계적 유의성이 상대적으로 높은 것으로 판단된다. 평균 수명 25년으로 앞서 조사한 문헌조사 결과와 유사하게 나타났으며, 제설제 투입량이 많은 특수지역에 대한 바닥판 수명은 17년으로 기존 대비 전체 교량 평균수명에 비해 수명이 32%나 감소한 것 나타났다. 이는 동결융해와 염화물이 바닥판 열화를 상당히 촉진시킬 수 있다는 점을 간접적으로 증명한 것으로 볼 수 있다. 동결융해는 콘크리트내 수분이 동결과 융해로 인해 체적 팽창 및 수축이 반복적으로 발생하는 현상으로 이에 따라 내부 조직이 다공질화되어 열화 속도를 증가시키는 역할을 한다. 이는 기후 조건 외에 W/C, 공기량, 배수 및 방수 기능과 연관이 있으며, 배합설계기준 및 방수층 형식 등을 개선함으로써 어느 정도 예방할 수 있다. 염화물의 경우 제설제의 염소이온 성분이 콘크리트와 반응하여 화학적 물리적 성능을 저하시키고, 콘크리트의 포화도 증가와

수산화칼슘 변화 등을 유발한다. 특히 제설제가 동결융해와 복합적으로 작용하여 열화 속도를 더욱 가속화시키는 것으로 판명되었다. 또한 2000년대 초반부터 제설제 사용 기준이 변경되면서 염화나트륨 및 염화칼슘 사용량이 5배 이상 증가한 점도 바닥판 열화 교량이 많이 발생된 한 원인으로 판단된다. 이에 따라 열화 현상이 발생된 콘크리트 내의 염분 함유량이 KS 기준보다 17배 높게 나타났다는 연구 결과도 발표되었다(김재흡, 2009). 따라서 이들 지역 교량에 대해서는 중점 관리 대상으로 선정하여 배합설계 및 방수층 등을 차별화할 필요성이 있으며, 외적으로 저염화물계 제설제 사용 등 기존 제설작업 개선도 필요하다.

6. 고속도로 바닥판 보강 예산 추정

현실적으로 예산 추정시 보강 공법을 선정함에 있어 향후에 초속경 콘크리트 공법 비용이 변화할 가능성이 있으며, 이를 대체할 수 있는 공법도 개발될 수 있다. 그러나 아직까지는 성능과 조기 교통 개방 측면에서 큰 장점이 있기 때문에 특수한 경우를 제외하고 모든 교량의 바닥판 보강에 대해서는 초속경 콘크리트 보강 공법이 적용되고 있다. 따라서 앞장에서 언급된 초속경 콘크리트 실적을 활용하여 보강 물량을 예측하였다. 산술적으로 모든 고속도로 아스팔트 계열 교량 바닥판을 준공 25년 후 초속경 콘크리트로 전면개량을 수행하는 경우는 향후 15년간 약 2조2천억 원 가량의 재원이 필요하다. 그러나 실제 준공 25년 후에도 양호한 교량이 다수 존재하기 때문에 이 비용은 최대한 발생할 수 있는 임계점에 해당하고, 이를 적정 보수 비용으로 판단하는 것은 바람직하지 않다. 와이불 생존 함수를 적용하면 전체 교량에 대해서 각 공용년수별로 생존확률을 파악할 수 있기 때문에 보다 정확한 보강 물량을 예측할 수 있다. 여기서 생존 함수 평균수명 약 25년은 전체의 50%가 약 25년까지 생존한 것을 의미한다.

표 5. 전체 아스팔트 계열 교면 교량의 바닥판 보강 비용

기간	개소	면적(×100m ²)	초속경 콘크리트 실적공사비	총 투입비용
15년	4,816	79,302	283천 원	2조2천억 원

미래의 바닥판 보강 예산을 추정하기 위해 전체 아스팔트 계열의 교량 바닥판 공용년수에 근거하여 생존하지 못하는 교량 면적을 파악하였다. 이를 위해 이미 보강된 교량을 제외한 전체 아스팔트 계열 교면 포장 교량을 공용년수별로 그림 11에 제시된 생존 함수를 통해 확

를 계산하여 향후 연도별 보강 대상 면적으로 산출하였다. 앞서 언급한 그림 4에 나타났듯이 현재 전체 교량의 준공연도는 1968년~2010년까지 다양하게 분포되어 있다. 보강된 교량은 과거 실적 자료를 조사하여 분리하였고 향후 각 연도별로 생존하지 않은 보강 물량을 계산하였다. 생존함수에 나타났듯이 초기 공용 10년 동안은 약 95%가 생존하는 것으로 나타났으며, 공용 40년 이후 생존하지 못한 물량은 약 10%에 불과하다. 그러나 여기서 생존하지 못한 교량 물량이 반드시 바닥판의 구조적 안전성에 문제가 발생하여 붕괴 위험이 발생한 상태를 의미하는 것은 아니다. 이들 교량은 바닥판 보강 조건(방수층 손상, 바닥판 열화면적 약 10% 이상)에 해당되는 상태에 진입하였다는 것을 의미하며, 이는 당장 문제가 크지 않아 임시 보수 조치로 절삭 덧씌우기 등도 적용할 수 있다. 하지만 이를 수년간 방치하였을 경우 바닥판 열화 확대로 인해 내하력에 문제가 발생하여 더 큰 유지보수 비용을 지출할 수 있기 때문에 결국 보강 조치가 필요하다.

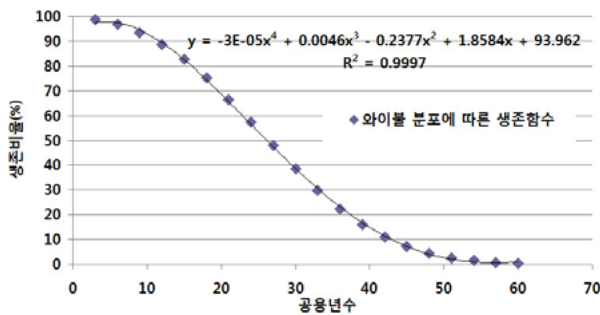


그림 11. 와이볼 분포에 따른 생존 함수

다음 그림 12는 생존 확률로 계산된 연간 바닥판 보강 누적비용이다. 향후 15년동안 1조2천3백억 원이 필요한 것으로 파악되었고 매년 지속적으로 상승하고 있다. 앞서 산술적으로 계산된 2조2천억 원보다는 낮지만 연간 평균 820억 원으로 2009년 바닥판 개량 예산인 370억 원에 비해 매우 높다. 연도별 비용은 예산이 전혀 투입되지 않았을 경우를 가정한 것으로 각 연도별 투입예산

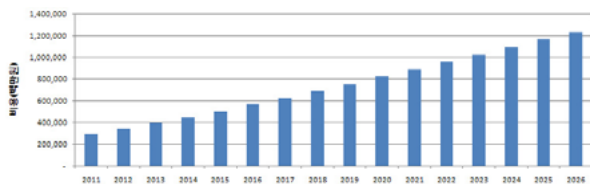


그림 12. 생존함수에 의한 향후 아스팔트계열 바닥판 누적 보강비용

에 따라 다소 편차가 발생할 수 있다. 현재는 이와 같은 예산부족으로 바닥판 손상이 경미하다고 판단되는 교량의 경우는 부분적 응급처치식 보수가 이루어지는 실정이기 때문에 이를 해결하기 위해서는 획기적인 유지관리 방안이 필요하다. 국외와 같이 자산관리와 같은 비용편익 개념을 유지관리 의사결정 시스템에 도입하여 보다 효과적으로 예산을 배정하는 것도 좋은 방법이다.

7. 결론

현재 한국도로공사는 바닥판 열화로 인해 지출되는 보수보강 예산이 매년 급격하게 증가하고 있다. 2000년 초반부터 건설된 교량들이 노후되는 시점부터 바닥판이 열화되는 교량이 급격하게 증가할 것으로 예상된다. 본 연구에서는 아스팔트 계열 교면 교량의 평균 바닥판 수명을 와이볼 분포를 이용한 신뢰도 분석에 의해 추정하였다. 여기에는 5년 이상 축적된 국내 보수 실적 데이터를 활용하였고 이를 토대로 향후 보강 물량을 예측하였다. 국내 고속도로 아스팔트계열의 교량 바닥판의 평균 수명은 약 25년으로 예측되었고, 모든 아스팔트 계열 교면 교량을 대상으로 한 결과, 향후 필요한 예산은 현재 수준보다 매우 높게 파악되었다. 또한 동결융해 현상이 많이 발생하고 염화물 살포량이 높은 지역의 교량은 바닥판 평균 수명이 약 17년으로 나타나 전체 평균에 비해 약 30% 저하되는 것으로 나타났다. 본 연구에서 정의된 “고장 상태(열화 시점)”에서 즉시 내하력 저하로 이어지는 않지만 장기적으로 교량의 구조적 안전성을 저해시키기 때문에 적기에 조치를 취하지 않으면 향후 더 높은 유지관리 비용이 지출될 수 있다. 따라서 이를 대비하여 비파괴 장비인 GPR 등 과학적인 방법에 의해 바닥판 상태를 수시로 점검할 수 있는 체계 구축과 향후 추가 예산 확보가 필요하다. 특히 염화제 살포량이 많은 지역의 경우는 중점관리가 필요한 것으로 판단된다. 또한, 궁극적으로는 자산관리와 같은 비용편익 개념을 유지관리 의사결정 시스템에 도입하여 전체 예산을 보다 효과적으로 배정하여야 한다.

참고 문헌

- 강형택, “자산관리체계 Framework 개발”, 한국도로공사 도로교통연구원, 2009년
- 공정식, “교량상태등급 변화모델 구축을 위한 부재별 LCP 개발”, 한국도로공사 도로교통연구원, 2008년
- 김재흠, “구조물 유지관리 실무자료집”, 한국도로공사, 2009년

박경훈, “교량의 성능 및 사용효율 증대를 위한 자산관리 기
법 개발”, 한국건설기술연구원, 2009년

박재민, “생존분석 이론과 실제”, 신광출판사, 2006년

서순민, “MINITAB 신뢰성 분석”, 이레테크, 2009년

진단본부 교량실, “도로교의 공용수명 연장방안 연구”, 시설
안전기술공단, 2000년

한국도로공사, “고속도로 유지관리 통합 업무 매뉴얼”, 한국
도로공사, 2007년

Dan Scherschligt, “Pontis Based Health Indexes for Bridge Priority
Evaluation”, Kansas Department of Transportation, 2003

George E. Ramey, “Bridge Deterioration Rates and Durability/Longevity
Performance” Practice Periodical on Structural Design and
Construction, 1997

Hatem Elbehairy, *Bridge Management System with Integrated Life
Cycle Cost Optimization*, University of Waterloo, 2007

Jiang, Yi, Ph.D. *The development of performance prediction and
optimization models for bridge management systems*, Purdue
University, 1990

Khossrow Babaei, “Management Methodology for Prediction of
Condition of Concrete Bridge Decks at Network Level”, Wilbur
Smith Associates, 2003

NCHRP REPORT 551, “Performance Measures and Targets for
Transportation Asset Management”, TRR, 2005

접 수 일 : 2011. 9. 14

심 사 일 : 2011. 9. 14

심사완료일 : 2011. 11. 17