

지불계수를 이용한 시험포장구간의 품질평가와 피로수명 분석

An Evaluation on Quality of Field Trial Protocol using Pay Factor and Analysis of Fatigue Life

이 재 학 Lee, Jae Hack
 이 석 근 Rhee, Suk keun
 김 성 민 Kim, Seong-Min
 황 상 민 Hwang, Sang Min

비회원 · 경희대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail : dracular206@hanmail.net)
 정회원 · 경희대학교 토목건축대학 교수 (E-mail : skrhee@khu.ac.kr)
 정회원 · 경희대학교 토목건축대학 부교수 (E-mail : seongmin@khu.ac.kr)
 비회원 · 경희대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail : jsddd23@hanmail.net)

ABSTRACT

This research is performed to estimate quality of trial pavement for construction and analyze effect of fatigue life by using the pay factor. Specially, asphalt content which is difficult to control the pavement quality, is selected by pay adjustment standard factors and pay factor is calculated by asphalt content. This research is also analyzed to present relation of fatigue life according to asphalt content, to evaluate quality of the road pavement by calculating pay factor of sampling trial field mixture 2 times. This research confirms that it is different quality of road pavement according to pay factor changes. To analyze the fatigue life of pavement by using asphalt mixture for trial field. As a result, it is conformed that high pay factor could be high fatigue life of trial field. This means that pay factor using probability theory reflects road pavement fatigue life. Also, this study is included that beam fatigue test manufacturing specimen such as mixing type of plant which purvey asphalt mixture to trial field, compared with fatigue life of trial field. As a result, the fatigue life of specimen that is manufactured by mix type is higher than trial field specimen. This means that performance of road pavement can be reduced by gradation or other effects. Therefore, to exactly evaluate the quality of road pavement, pay factor should be calculated applying various pay adjustment standard factors such as gradation, air-void in U.S. states which is adopted pay adjustment.

KEYWORDS

pay adjustment, pay factor, pay adjustment standard factors, fatigue cracking, in direct tensile fatigue test, beam fatigue test, asphalt pavement

요지

본 연구는 지불계수를 이용하여 시험포장 구간의 품질을 평가하고 이에 따른 피로수명의 변화를 분석하기 위해 실시되었다. 특히 품질관리가 어려운 아스팔트 함량을 지불규정 기준인자로 선정하여 지불계수를 산출하였다. 먼저 아스팔트 함량이 피로수명에 미치는 영향을 확인하기 위하여 아스팔트 함량에 따른 피로수명의 연관성을 분석하였다. 이후 총 2회에 걸쳐 시험포장 구간에서 시료를 채취해서 지불계수를 산출하여 시험포장 구간의 품질을 평가하였으며, 지불계수에 따라 시험포장 구간의 품질에 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 시험포장 구간에 포설된 아스팔트 혼합물을 이용하여 시편을 제작, 피로수명을 분석하였다. 그 결과 지불계수가 높은 시험포장의 피로수명이 월등히 높음을 확인할 수 있었다. 이는 통계이론을 이용한 지불계수가 실제 포장의 피로수명을 반영한다는 것을 의미한다고 사료된다. 또한 시험포장 구간에 아스팔트 혼합물을 납품한 플랜트의 배합보고서와 동일한 시편을 제작하여 힘 피로 시험을 실시하여 1, 2회차 시험포장의 피로수명들과 비교하였다. 그 결과 배합보고서를 기초로 제작한 시편의 피로수명이 시험포장 구간의 피로수명에 비해 월등히 높음을 알 수 있었다. 이는 입도나 기타 요인에 따른 공용성 감소현상이 발생 할 수 있음을 나타내는 것이라 사료된다. 따라서 지불규정을 적용중인 미국과 같이 입도, 공극률 등을 지불규정 기준인자로 선정하여 최종적인 지불계수를 산출하는 것이 보다 정확한 도로포장의 품질을 평가할 수 있을 것이다.

핵심용어

지불규정, 지불계수, 지불규정 기준인자, 피로수명, 간접인장피로시험, 빔피로시험, 아스팔트포장

1. 서론

도로포장 분야는 준공 당시 품질을 평가할 수 있는 근거가 미비하기 때문에 도로포장의 시공품질저하에 따른 문제가 빈번히 발생하고 있다. 특히 우리나라는 두께와 밀도, 평탄성만을 준공 기준으로 적용하고 있어, 기타 요인으로 인한 공용성 감소와 수명 단축을 예방하기 어려운 실정이다. 이에 따라 우리나라 역시 성능기준 설계 및 시공 지침을 운영하기 위해 단기적으로는 지불규정(Pay adjustment) 개발 및 적용을, 장기적으로 성능기준의 도입이 요구되고 있다(최장규, 2009).

지불규정이란 통계이론을 바탕으로 포장의 품질을 결정하여 시공비용을 조정하는 방법이며 지불계수(Pay Factor)는 시공비용 조정의 기준이 되는 값을 나타낸다. 지불규정을 적용 중인 미국 대다수의 주에서는 AASHTO에서 제시한 식 $Pay\ Factor(P.F) = 55 + 0.5PWL$ 과 같이 지불계수를 사용한다. 여기서, PWL이란 한 개의 LOT(품질측정을 위한 전체 표본을 일컫는 말)에서 얻어진 자료가 정규확률분포를 가진다고 가정할 때 시방한계에 있는 표본집단의 비율을 평가하기 위해서 샘플의 평균과 표준편차를 이용하는 방법이다. 예를 들어 아스팔트 포장의 시공초기 품질을 대표할 수 있는 공극률, 아스팔트 함량 등과 같은 지불규정 기준인자를 선정하여 각 인자의 측정값을 표본집단으로, 전체 포장구간을 모집단으로 하여, 시방한계에 만족하는 확률값을 산출하는 방식이다. 따라서 발주자와 시공자에게 합리적인 지불규정을 제안하기 위해서는 지불계수의 변화에 따른 실제 포장의 공용성 변화를 실증해야 할 필요가 있으며, 본 연구에서는 시험포장 구간의 지불계수를 이용하여 아스팔트 포장의 품질을 평가하고 이에 따른 피로수명의 공용성을 분석하고자 하였다.

특히 아스팔트 포장의 공용성에 영향을 미치는 많은 인자들 중 아스팔트 함량을 중심으로 지불계수를 산출하였다. 아스팔트 포장의 공용성은 아스팔트 함량, TMD(이론최대밀도), 입도, 골재간극률, 두께, 평탄성 등의 요인에 의하여 결정된다. 이와 같은 여러 인자들은 아스팔트 혼합물 생산 시 관리감독이 요구되는 품질관리 기준인자(아스팔트 함량, 입도, 온도 등)와 아스팔트 포장 시공 시 관리감독이 요구되는 시공관리 기준인자(TMD, 공극률, 두께, 평탄성, 온도 등) 등으로 구분할 수 있다. 하지만 본 연구에서는 미국 각 주의 지불규정 기준인자의 사용빈도와 현재 플랜트에서 실질적인 품질관리가 이루어지지 않고 있는 점을 고려하여 아스팔트 함량을 지불규정 기준인자로 선택하게 되었다.

지불계수를 산출하기 앞서 아스팔트 함량과 피로수명의 연관성 분석을 위하여 진행된 시험의 경우, 지불규정 인자 간 미치는 영향을 최소화 하도록 다양한 시험시편을 제작하여 시험을 진행하였다. 특히 시험변수에 미세한 편차를 설정하

여 시험을 진행하여 각 인자별 편차에 따른 피로수명의 연관성을 보다 정확하게 파악하고자 하였다. 특히 아스팔트 혼합물의 피로수명을 예측할 수 있는 대표적인 시험방법인 간접인장피로시험 뿐만 아니라 휨피로시험도 실시해 본 연구의 신뢰도를 높이고자 하였다.

아스팔트 함량과 피로공용성의 연관성을 분석 후, 지불계수를 이용하여 국내 시험포장구간의 품질을 측정하였으며 이를 바탕으로 시험포장구간의 피로수명을 분석하였다. 본 연구에서 사용된 포장 자료는 국도 38호선 구간에서 총 2회에 걸쳐 진행된 시험포장구간의 자료이며 지불계수 산출방법은 미국에서 주로 사용하고 있는 PWL방식을 사용하였다(FHWA, 2004). 일반적인 통계분석방법의 정규분포곡선에 Z-Value가 사용되는 반면 PWL측정에는 Q-Value가 사용된다. Q-Value는 품질 측정을 위하여 추출된 모집단의 정규분포에 임의의 시방한계를 만족하는 확률값을 얻기 위하여 설정하는 것으로 기본적인 개념은 Z-Value와 매우 유사하다. 하지만 유사한 개념의 Z-Value와 Q-Value는 최종적인 확률값과 PWL산출에 있어 근본적인 차이를 보인다. Z-Value를 이용한 확률값은 표준정규분포 곡선상의 면적으로 정의되는 반면 Q-Value에 따른 PWL은 지불규정을 실시하고 있는 각 주의 자체적인 기준에 따른 품질테이블로 정의되고 있다. 본 논문에서는 미국 사우스 캐롤라이나 주의 품질테이블을 이용하여 시험포장 구간의 지불계수를 산출하여 아스팔트 포장의 품질을 평가하였다.

이후 1회차 시험포장에서 채취한 시료와 2회 차 시험포장에서 채취한 시료를 이용하여 피로수명을 분석하였다. 이를 통해 지불계수의 차이가 실제 피로수명에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 또한 시험포장 구간에 아스팔트 혼합물을 납품한 플랜트의 배합보고서와 동일한 골재와 입도분포, 최적아스팔트 함량(OAC)를 갖는 시편을 제작, 휨 피로 시험을 실시하여 1, 2회차 시험포장의 피로수명과 비교하여 입도, TMD 등, 아스팔트 함량 이외의 인자들이 피로수명에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

2. 지불규정 기준인자와 피로수명의 연관성 분석

2.1. 배합설계

본 연구에서는 현재 국내에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 밀입도 19mm 아스팔트 혼합물로 화강암 종류의 골재를 이용하였으며 바인더는 PG58-22를 사용해 시험 시편을 제작하였다. 선회다짐기를 사용해 시험시편의 공극률을 조정하였으나 배합설계의 경우 본 연구의 결과가 국내 실제 공사에 적용될 것을 고려하여 현재 현장에서 가장 많이 사용하고 있는 마샬배합설계에 따라 진행하였다.

표 1과 같은 입도별 통과백분율을 이용해 표준입도곡선의 #8번체 통과율 40%에 대해 배합설계를 실시하였다.

표 1. 골재의 입도별 통과 백분율

체크기/mm	20	13	10	5 (#4)	2.5 (#8)	1.2 (#16)	0.6 (#30)	0.3 (#50)	0.15 (#100)	0.08 (#200)	
#8 통과 율	32%	100	86	75	54	32	30	21	15	8.8	6.2
	35%	100	86	75	54	35	30	21	15	8.8	6.2
	40% (표준입도)	100	86	75	54	39	29	21	15	8.8	6.2
	50%	100	86	75	54	50	31	21	15	8.8	6.2
	53%	100	86	75	54	53	31	21	15	8.8	6.2

위와 같이 #8번체 통과율을 기준으로 한 골재 입도별 통과 백분율에 따라 흐름값, 공극률, 포화도, 골재 간극률, 안정도를 각각 측정하여 최적 아스팔트 함량을 5.1%로 결정하였다.

2.2. 간접인장피로시험

2.2.1. 시편제작

아래 표 2와 같이 선회다짐기를 이용하여 다양한 시험시편을 제작하였다. 아스팔트 함량 변화에 따른 피로균열 발생 경향을 확인하기 위해 아스팔트 함량의 편차를 1%로 하여 총 4종류의 공시체를 제작하였으며 또한 아스팔트 함량만의 영향을 평가하기 위해 시편의 높이를 제어하여 공극률을 4%로 고정하였다. 하지만 시편의 높이를 제어하여 시편을 제작함으로써 인하여 발생할 수 있는 과다짐의 영향을 고려, 다짐횟수를 제어하여 공극률을 구속하지 않은 시편도 제작하였다.

표 2. 피로시험을 위한 인자별 변수 및 편차

지불규정인자	각 인자의 편차	변수개수	비고
아스팔트 함량	3.5% 4.5%, 5.5% 6.5%	4	입도 : 표준입도 공극률 구속시편
	4.1%, 4.6%, 5.1%, 5.6%	4	입도 : 표준입도 공극률 불구속시편

2.2.2. 시험방법

본 연구에서 사용된 시험 장치는 상부재하방식의 INSTRON사의 Servo-Hydraulic closed-loop 시스템이며, 모든 시험은 하중제어에 의한 간접인장 방식으로 수행되었다. 변위측정은 RDP Electronic사의 LVDT를 사용하였다. 각 센서에서 발생하는 데이터의 동기화를 위하여 National Instruments사의 데이터 수집카드(16bit), 데이터 수집장비(SCXI새시) 및 모듈, LabVIEW 프로그램을 사용하였다.

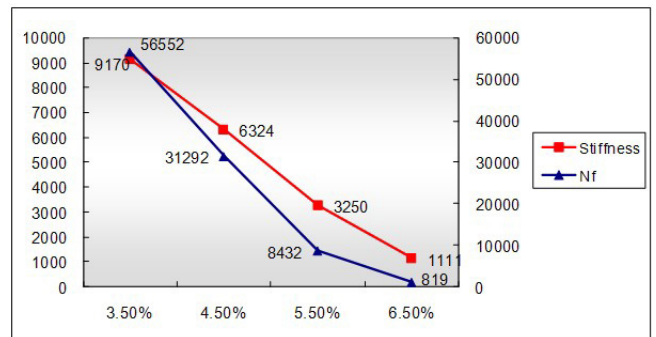
아스팔트 혼합물의 피로수명을 평가하는 가장 일반적인 방법은 혼합물에 대해 피로시험을 수행하여 얻어진 데이터로부터

터 강성(stiffness)을 계산하고 이를 통해 시편의 강성이 초기 강성의 50% 도달했을 때까지 시편에 가해진 하중재하회수를 피로수명으로 결정하는 방식, 그리고 하중재하회수에 따른 변형률 진폭의 변화를 그래프로 그린 다음 최소 곡률반경이 되는 지점의 하중재하회수를 피로수명으로 결정하는 방식이라 정의하고 있다(SHRP, 2004). 본 연구에서는 시편의 강성이 초기 강성의 50%에 도달할 때까지 적용된 하중재하회수를 피로수명으로 결정하였다.

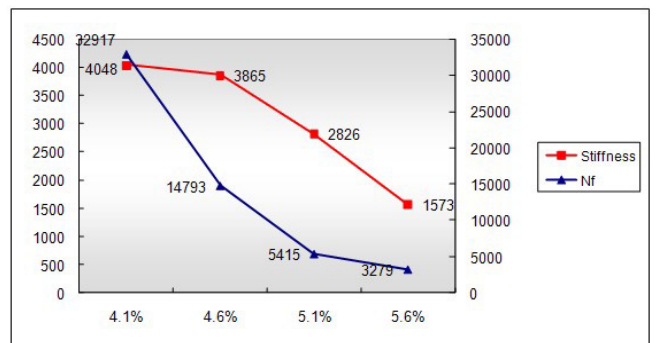
2.2.3. 시험결과

선회다짐기를 이용하여 시편의 높이를 제어하는 방식과 다짐횟수를 제어하는 방식으로 공극률 구속 시편과 불구속 시편으로 분리하여 시험을 진행하였다.

시험결과, 공극률 구속여부와 관계없이 모든 시편의 강성과 파괴 시까지의 피로수명은 그림 1과 같이 아스팔트 함량이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 이는 '아스팔트 함량이 증가할 경우 피로수명은 증가하는 반면 소성변형에는 취약해진다(한국형 포장설계법, 2004)'는 기존 연구와 다른 결과를 나타내었다.



(a) 공극률 구속 시편



(b) 공극률 불구속 시편

그림 1. 아스팔트 함량 변수의 피로 경향 비교

아스팔트 함량이 높을수록 반복 재하 되는 피로하중에 대한 저항력이 증가하는 이유는 아스팔트가 골재사이의 완충재 역할을 하게 되어 Flexible 상태가 되기 때문이며, 반대의 경

우는 골재 사이의 충돌이 상대적으로 빈번하게 발생하여 피로하중에 쉽게 파괴되기 때문이다. 하지만 위의 그림 1과 같은 결과를 얻게 된 이유로는, 본 연구에서 진행된 간접인장피로시험이 변위제어방식이 아닌 하중제어 방식을 사용하였기 때문으로 생각된다. OAC보다 낮은 아스팔트 함량의 시편에 일정한 하중을 가하는 방식의 경우, 골재들이 서로 강하게 결속하는 현상이 발생하여 반복적인 하중재하에도 불구하고 계속하여 탄성범위 안에서 거동할 가능성을 완전히 배제할 수 없기 때문이다. 이와 관련하여 '간접인장시험을 이용한 아스팔트 혼합물의 피로 해석(이현중 외, 2003)' 역시 아스팔트 함량이 증가할수록 피로수명이 줄어든다는 기존 연구와 다른 결과를 발표하기도 하였다. 따라서 이 후 진행된 시험은 변위제어방식의 휨 피로시험을 진행하여 아스팔트 함량과 피로공용성의 연관성을 분석하였다.

2.3. 휨 피로시험

2.3.1. 시편제작

최적아스팔트 함량을 기준으로 편차를 0.5%씩 조정하여 아래 표 3과 같이 총 4개의 각기 다른 아스팔트 함량을 갖는 시편을 제작하였으며, 공극률을 4~6%로 조정하였다.

표 3. 4점 휨 피로시험을 위한 인자별 변수 및 편차

지불규정인자	각 인자의 편차	변수개수	비 고
아스팔트 함량	4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5%	4	공극률 4~6% 조정

공극률을 4~6%로 설정한 이유는 현장의 다짐 상태와 유사하게 시편을 제작하기 위함이다. 또한 공극률을 일정한 범위로 제한한 이유는 휨 피로시험을 위해 제작하는 시편은 무단변속다짐기를 이용하여 제작하였기 때문이다. 무단변속 다짐기는 시편의 높이 및 다짐에너지 조절을 통해 공극률을 조절할 수 있는 선화다짐기와 달리 경험적 방법에 의해 시편의 공극률을 조절해야 하는 단점이 있기 때문에 일정한 공극률 범위를 갖는 시편을 제작하였다.

2.3.2. 시험방법

본 연구에서 사용된 시험장치는 간접인장피로 시험과 동일한 상부재하방식의 INSTRON사의 Servo-Hydraulic closed-loop 시스템인 반면, 모든 시험은 4점 휨 피로 방식에 의해 수행되었다. 변위측정은 RDP Electronic사의 LVDT를 사용하였다.

하중재하는 변형률 제어방식으로, 10Hz의 Haversine파로 재하하였으며, 스트레인 레벨을 100~300 $\mu\epsilon$ 의 범위로 한정하여 시험을 진행하였다. 시험온도는 20℃로, 시편은 20

℃에서 2시간이상 방치후 시험을 실시하였다. 시험 데이터는 시험초기의 50cycles의 값을 계산하여 초기 강성값(S_{mi})을 구하고, 매 500cycles 마다 데이터를 계산 및 저장하여 초기 강성값 40%가 되면 시험이 끝나도록 하였다.

2.3.3. 시험결과

실험을 진행한 모든 시편의 강성은 아스팔트 함량이 증가함에 따라 감소되는 것으로 나타났으며, 표 4와 같이 함량이 증가함에 따라 강성은 작아지고, 피로수명은 늘어나는 결과를 나타내었다.

표 4. 아스팔트 함량 변수별 휨 피로시험 결과 값

	Micro epsilon($\mu\epsilon$)	초기강성	Nf	비 고
4.0%	146	9615.40	55,503	
4.5%	152	7682.82	89,502	
5.0%	150	8692.11	127,001	
5.5%	154	4923.40	185,004	

이러한 결과 값은 아스팔트 혼합물의 아스팔트함량이 낮으면 그 배합은 내구적이지 못하고, 아스팔트함량이 많으면 안정적이지 못 함을 보여준다. 혼합물의 아스팔트 함량이 너무 과다하게 되면, 골재 입자간의 내부마찰력이 감소되며, 이로 인해 강성이 작아지는 것으로 보여 진다. 특히 휨 피로시험의 결과는 간접인장피로시험과 달리 '아스팔트 함량이 증가할 경우 피로수명에 대한 저항성은 증가하는 반면 소성변형에는 취약해진다(한국형 포장설계법, 2004)'는 기존 연구와 부합되는 결과를 얻을 수 있었다.

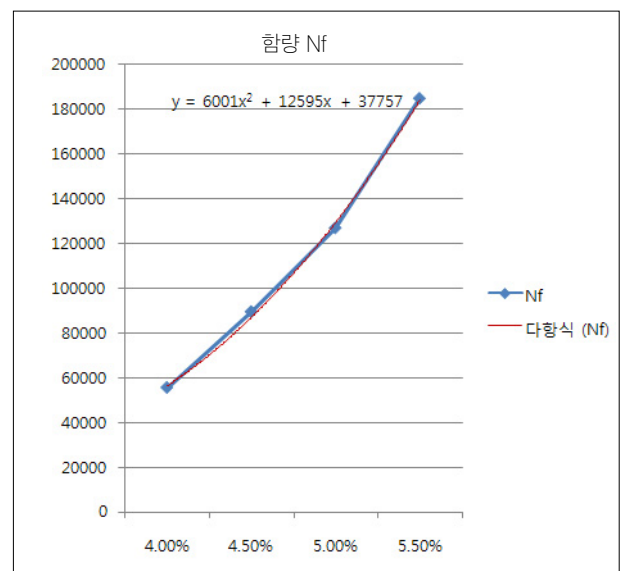


그림 2. 아스팔트 함량 변수의 피로수명 경향

3. 지불계수를 이용한 시험포장 구간의 품질 평가

3.1. 시료채취 및 분석 방법

본 연구에서 사용된 포장 자료는 국도 38호선 구간의 시험 포장 자료이다. 시험포장 구간의 자료를 이용하여 지불계수를 산출하였다. 앞서 언급한 바와 같이 지불규정을 적용 중인 미국 대다수의 주에서는 AASHTO에서 제시한 아래 식 (1) 과 같이 지불계수를 산출한다.

$$Pay Factor(P.F) = 55 + 0.5PWL \quad (1)$$

PWL을 결정하기 위해서는 아스팔트 포장 구간의 샘플로부터 얻은 데이터를 통해 Q-Value를 산출한다. Q-Value는 하한 시방한계만을 이용할 때는 Q_L 만을 사용하고, 상한 시방한계만을 이용할 때는 Q_U 만을 사용하며 식 (2)와 같이 Q-Value가 계산된다.

$$Q_L = \frac{\bar{X} - LSL}{s} \quad \text{and} \quad Q_U = \frac{USL - \bar{X}}{s} \quad (2)$$

여기서,

Q_L = 하한 시방한계에 대한 품질지수

Q_U = 상한 시방한계에 대한 품질지수

LSL (하한 시방한계 Lower Specification Limit)
= 목표값 + 허용오차

USL (상한 시방한계 Upper Specification Limit)
= 목표값 - 허용오차

\bar{X} = 샘플 평균

s = 샘플 표준편차

미국의 경우 이와 같이 산출된 Q-Value를 이용해 각주에서 사용 중인 품질측정테이블에 따라 PWL을 결정한다. 또한 아스팔트 포장의 밀도와 함량과 같이 하한, 상한 시방한계를 모두 사용할 경우 PWL 값은 식 (3)과 같이 계산되며 AASHTO에서는 최종적인 지불계수를 식 (4)와 같이 제안한다. 이를 표준정규분포곡선에 나타낸 것이 그림 3이다.

$$TPWL = UPWL + LPWL - 100 \quad (3)$$

여기서,

UPWL = 상한 시방한계내의 백분율 (Q_U 에 근거)

LPWL = 하한 시방한계내의 백분율 (Q_L 에 근거)

$$Pay Factor = 55 + 0.5TPWL \quad (4)$$

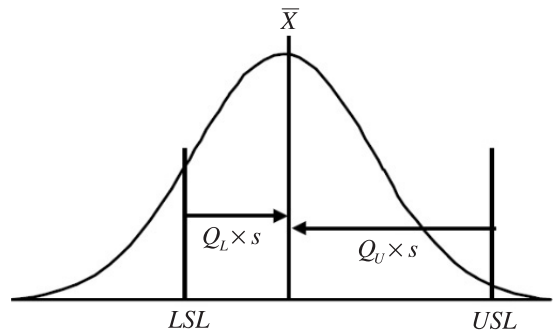


그림 3. 표준정규분포곡선의 상한한계와 하한한계 (Burati 외, 2003)

미국의 경우 각각의 시방한계를 산정함에 있어 특정한 목표값에 일정부분의 허용오차를 주고 있다. 이는 품질측정에 앞서 진행되는 시료의 채취와 물성실험에서 발생 가능한 오차를 보정해 주기 위한 것이다(FHWA, 2004).

본 연구에서는 국도 38호선 신동-가사 구간의 시험 포장에서 총 2회에 걸쳐 다짐 전 시료 20,000kg을 확보하여 KS F 2490, '연소법을 이용한 아스팔트 함량 결정방법'에 따라 아스팔트 함량 시험을 실시하였다. 시방한계는 '2005 가열 아스팔트 혼합물 배합설계 지침 (건교부)'에 따라 $OAC \pm 0.3$ 으로 결정하였고 품질측정테이블은 미국 South Carolina DOT의 것을 사용하였으며 아래 표 5와 같다.

표 5. Q_L 과 Q_U 값에 따른 LPWL과 UPWL(n=9) (South Carolina, 2004)

QL or QU	LPWL or UPWL	QL or QU	LPWL or UPWL
2.001 or More	100	-0.539 to -0.540	30
1.841 to 2.000	99	-0.599 to -0.570	29
.	.	.	.
.	.	.	.
1.421 to 1.480	94	-0.999 to -0.960	17
1.311 to 1.360	92	-1.079 to -1.040	15
.	.	.	.
.	.	.	.
0.081 to 0.100	53	-2.529 to -2.000	1
0.051 to 0.080	52	-2.530 or Less	0

3.2. 지불계수 산출

총 2회에 걸쳐 채취한 국도 38호선 신동-가사 구간의 다짐 전 시료를 이용한 아스팔트 함량 시험 결과는 아래 표 6과 같다.

표 6. 신동-가사 구간의 아스팔트 함량 시험 결과

일자	위치					평균	표준편차
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5		
1회차	4.49	5.07	5.03	5.06	4.12	4.7546	0.43.4
2회차	4.93	4.92	4.89	5.12	5.16	5.004	0.125

1회차에 채취한 시료의 평균이 2회차에 채취한 시료의 평균보다 낮음을 알 수 있을 뿐 아니라 편차도 약 3배에 달해 아스팔트함량에 대한 균일한 품질관리가 이루어지지 않았음을 알 수 있다. 미국 AASHTO에서 제시한 식 (1)을 사용하여 산출한 지불계수는 아래 표 7, 표 8과 같다.

표 7. 신동-가사 구간의 지불계수(1회차)

샘플 수(n)	평균(\bar{X})	표준편차(s)	하한한계	상한한계	
5	4.7546	0.434	4.7	5.3	
Q-Value		시방한계 백분율		전체 백분율	PAY FACTOR
Q_L	Q_U	LPWL	UPWL	TPWL	
0.125	1.268	55	91	46	78

표 8. 신동-가사 구간의 지불계수(2회차)

샘플 수(n)	평균(\bar{X})	표준편차(s)	하한한계	상한한계	
5	5.004	0.125	4.7	5.3	
Q-Value		시방한계 백분율		전체 백분율	PAY FACTOR
Q_L	Q_U	LPWL	UPWL	TPWL	
2.415	2.352	100	100	100	105

위의 결과에서 알 수 있듯이 1회차에 포설된 구간의 지불계수가 2회차에 포설된 구간의 지불계수에 비해 30% 이상 감소되는 것을 알 수 있다. 이는 1회차 포설구간의 아스팔트 함량 시험결과, 평균이 하한한계에 매우 가까울 뿐 아니라 표준편차 역시 크게 측정됐기 때문이라 생각된다. 하지만 2회차에 채취한 시료의 경우, 평균이 OAC와 근접했으며 편차도 매우 작을뿐 아니라 상한 및 하한한계에 고루 분포했기 때문에 지불계수의 최대값인 105%로 산출된 것으로 판단된다. 최종적으로 1회차에 포설된 구간은 표준편차를 반영하지 않는 현행 시방규정을 적용하였을 경우, 평균이 시방한계 안에 존재하므로 합격판정을 받을 수 있지만 실제 지불계수 100% 이하로 나타나 품질이 고르지 못하다고 판단된다. 반면 2회차에 포설된 구간의 평균은 시방한계를 만족하였으며 표준편차 역시 크지 않아 지불계수가 100% 이상의 값을 나타내어 시공초기 품질이 우수한 것으로 판단된다.

4. 시험포장 구간의 피로수명 분석

본 연구는 지불계수를 이용하여 시험포장 구간의 품질을 평가하고 이에 따른 피로수명의 변화를 분석하기 위해 실시되었다. 만약 지불계수가 낮게 산출이 된다면 혼합물의 생산과정 혹은 포장 시공에 문제가 있었다는 것으로 판단할 수 있다. 그 중 아스팔트 함량은 플랜트의 생산과정에서 하자가 발생할 수 있는 확률이 굉장히 높은 인자이다. 따라서 총 2

회에 걸쳐 신동-가사 구간에서 포설된 'A'사의 시료를 채취하여 아스팔트 함량에 대한 지불계수를 산출하였다. 이후 동일한 시료를 이용해 제작된 시편의 휨 피로시험을 진행하여 피로수명 $N_f \alpha_1$, $N_f \alpha_2$ 를 확인하였다. 또한 'A'사에서 사용 중인 골재를 확보하여 아스팔트 배합보고서에 명시된 입도와 OAC를 동일하게 적용하여 실내에서 시편을 제작하여 피로수명 $N_f \beta$ 를 확인하였다. $N_f \alpha_1$ 과 $N_f \alpha_2$ 를 비교하여 지불계수 차이에 따른 피로수명의 차이를 비교하였다. 또한 $N_f \alpha_1$ 과 $N_f \alpha_2$ 중, 지불계수가 높게 산출된 시험포장 구간의 피로수명과 $N_f \beta$ 를 비교 분석하였다. 이는 'A'사의 플랜트에서 생산되는 아스팔트 혼합물이 실제 배합보고서와 맞게 생산된다면, 실제 현장에서 채취한 시료를 바탕으로 산출한 지불계수가 높게 나올 것이며 피로수명 역시 $N_f \beta \geq N_f \alpha$ 로 확인될 것이기 때문이다. 하지만 생산과정에서 불량 발생하여 지불계수가 낮게 산출된다면 $N_f \alpha > N_f \beta$ 의 관계가 성립할 것이다. 따라서 본 논문에서는 실제 지불계수의 변화에 따른 피로수명 변화의 관계를 분석하였다.

시험포장 구간의 피로수명 분석을 위한 시험은 4점 휨 피로시험으로 진행되었으며, 시편의 제작과 시험에 사용된 장비와 시험조건, 데이터 수집 등은 본 논문의 2.3의 휨 피로시험에 명시된 조건과 동일하게 진행되었다.

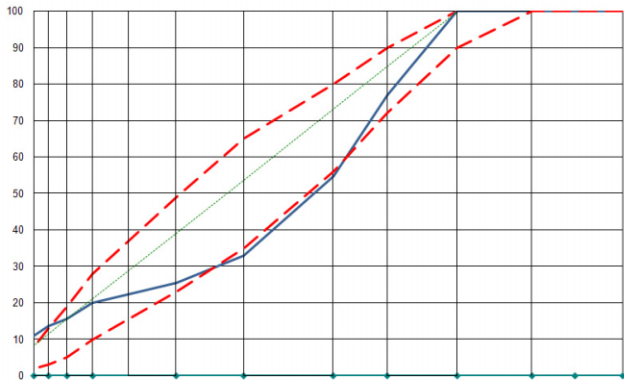
4.1. 사용재료 및 시편제작

본 연구에 사용된 골재는 국도 38호선 공사에 이용된 화강암질 쇄석을 사용하였다. 신동-가사 구간에 사용된 아스팔트 혼합물을 생산한 'A'사의 Hot Bin 입도를 분석하였다. 대부분의 국내 아스팔트 플랜트에서는 시공사와 공사계약을 맺기 전 공정시방서를 작성하게 된다. 이 때 아스팔트 배합보고서를 작성하게 되는데, 이 때 골재원에서 납품받은 골재를 사용해 배합설계를 실시하게 된다. 하지만 실제 생산되는 아스팔트 혼합물은 이 배합설계를 따르지 않는 경우가 많은 것이 현실이다. 총 2회에 걸쳐 생산된 'A'사의 Hot Bin에서 추출된 입도는 그림 4(a)와 같았지만 그림 4(b)와 같이 배합보고서의 입도는 큰 차이를 보였다.

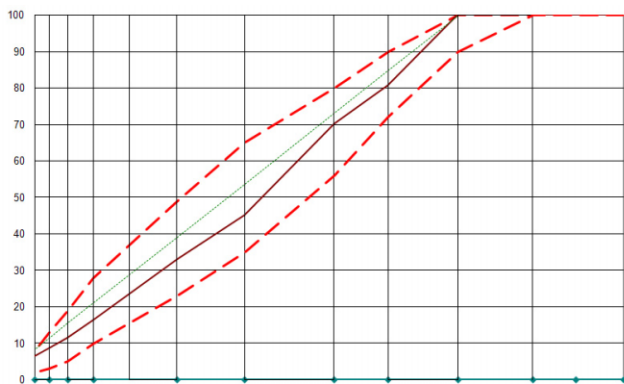
그림 4와 같이 'A'사의 배합보고서와 달리 실제 Hot Bin의 입도결과는 시방한계를 벗어나는 것으로 나타난다(점선은 시방입도 곡선을 나타내며, 실선을 입도분포를 나타냄). 이는 시험포장 구간에 포설된 'A'사의 혼합물이 배합보고서와 달리 그림 4(a)와 같은 입도분포임을 의미한다. 따라서 그림 4(b)와 같은 입도분포를 갖는 'A'사 아스팔트 혼합물의 최적 아스팔트 함량은 5%이지만 시험포장 구간에 포설된 아스팔트 혼합물의 OAC는 배합보고서와 다른 것은 당연한 것이다. 산출한 현장의 다짐 전 시료를 사용해 만든 시편과 달리 현장 골재를 이용한 시편은 지불계수가 100%라는 가정하에 제작

해 두 경우의 피로수명을 비교하는 것이 본 연구의 목표이다. 따라서 현장 골재를 사용하여 제작하는 시편은 'A' 사의 배합 보고서와 동일하게 혼합하였다.

아스팔트 바인더(Control binder)는 국내 S사에서 생산되는 일반 아스팔트 바인더로서 침입도 기준 60~80 등급 및 PG 등급 58-22를 가지는 포장용 아스팔트를 사용하였다.



(a) Hot Bin 입도



(b) 배합보고서상의 입도

그림 4. 'A' 사의 Hot Bin 입도

4.2. 시험결과

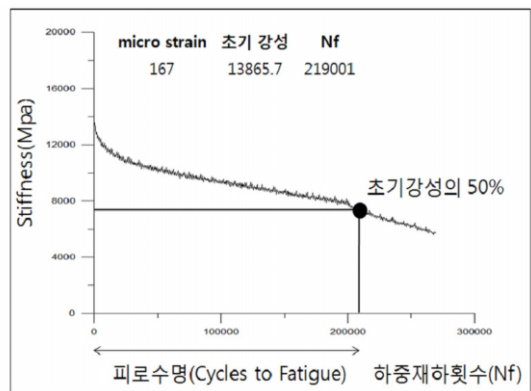
각 시편에 대하여 변형률제어 방식으로 시험이 이루어 졌다. 재하된 변형률은 160~180 $\mu\epsilon$ 로서, 시편의 크기에 따라 변형률이 조금씩 다르게 나타났다.

4.2.1. 다짐 전 시료로 제작한 시편의 피로수명

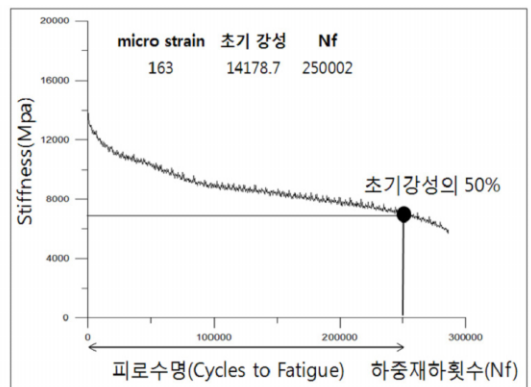
(1) 1회차 시험포장

1회차 시험포장 시 사용된 시료를 사용하여 제작된 시편에 재하된 변형률은 160~180 $\mu\epsilon$ 이며 각 시편의 피로수명은 그림 5와 같다.

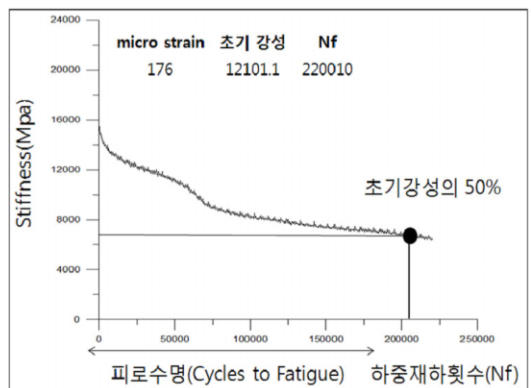
신동-가사 구간의 1회차에 포설된 다짐 전 시료를 이용한 휨 피로시험 결과, 초기강성은 12000~140000Mpa로 나타났으며, 파괴 시까지의 하중재하 횟수 Nf는 23만회 전 후인



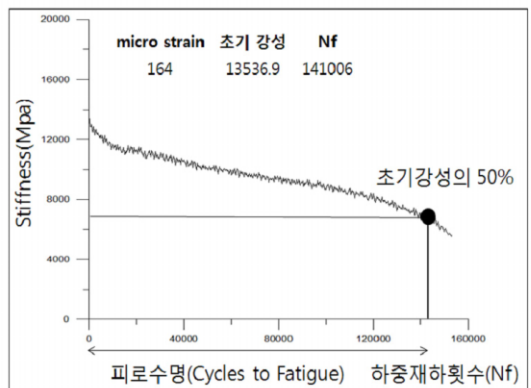
(a) 1회차 시료의 피로수명 No.1



(b) 1회차 시료의 피로수명 No.2

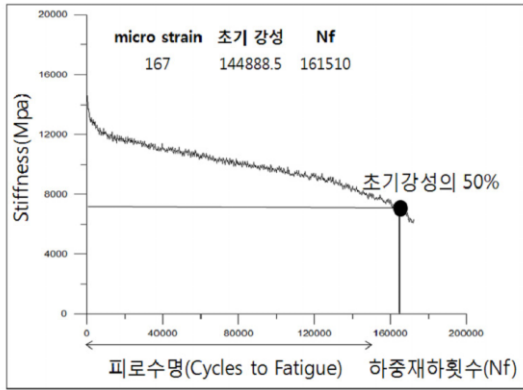


(c) 1회차 시료의 피로수명 No.3



(d) 1회차 시료의 피로수명 No.4

〈그림 계속〉



(e) 1회차 시료의 피로수명 No.5

그림 5. 1회차 시험포장의 피로수명

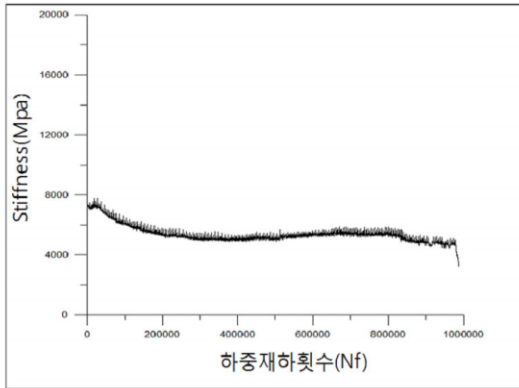
것으로 나타났다. 하지만 No.4, No.5 시편의 경우 20만회 미만에서 초기강성의 50%에 도달하였는데, 이는 No.4, No.5 시편의 공극률이 5.5%로 No.1, No.2, No.3 시편의 공극률 4.5%보다 크기 때문으로 생각된다.

(2) 2회차 시험포장

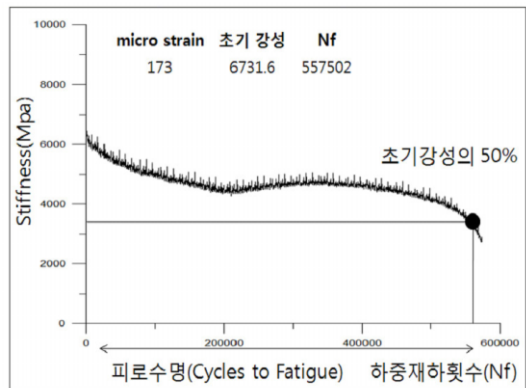
2회차 시험포장 시 사용된 시료를 사용하여 제작된 시편에

재하된 변형률은 $160\sim 180\mu\epsilon$ 이며 각 시편의 피로수명은 그림 6과 같다.

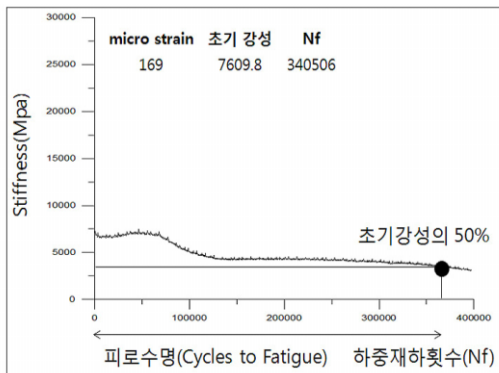
1회 차와 동일한 배합보고서를 사용한 2회차에 포설된 신동-가사 구간의 다짐 전 시료를 이용한 휨 피로시험 결과 6,700~7,500Mpa의 초기강성을 갖는 것으로 나타났다. 이는 1회차에 포설된 시료를 사용한 피로시험의 경우보다 초기강성이 매우 작은 것을 알 수 있다. 하지만 초기강성이 작다하여 2회차에 포설된 시료를 사용한 시편이 피로파괴에 강하다고 단정지을 수 없다. 일반적인 아스팔트 혼합물의 피로거동에 따르면 아스팔트 함량이 증가할수록 초기강성은 작게 측정되는데, 이는 아스팔트 함량이 작을 경우, 골재 맞물림 작용으로 인해 강성이 높아지기 때문이다(SHRP-A-404, 1994). 반면 파괴 시까지의 하중재하 횟수 Nf는 최소 34만회에서 75만회의 편차를 보였으며, No. 1시료의 경우 100만회에 도달하는 영구변형의 양상까지 보인 것으로 파악된다. 파괴 시까지의 하중재하 횟수가 34만회에서 75만회로 편차가 큰 편이나 전체적으로 지불계수 105%를 획득한 2회차에 포설된 시료를 사용한 시편이 지불계수 78%를 획득한 시료에 비해 피로수명이 월등히 높음을 확인할 수 있었다.



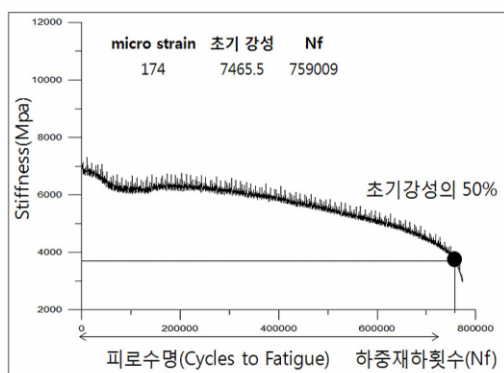
(a) 2회차 시료의 피로수명 No.1



(b) 2회차 시료의 피로수명 No.2



(c) 2회차 시료의 피로수명 No.3



(d) 2회차 시료의 피로수명 No.4

그림 6. 2회차 시험포장의 피로수명

4.2.2. 배합보고서를 이용해 제작한 시편의 피로수명

배합고서를 이용해 제작한 시편에 재하된 변형률은 240 $\mu\epsilon$ 이다. 이는 앞서 진행된 실험에서 재하된 변형률이 낮아, 피로파괴 시까지의 하중재하 횟수가 크게 증가했기 때문이다. 배합보고서를 이용해 제작한 시편의 피로수명은 아래 그림 7과 같다.

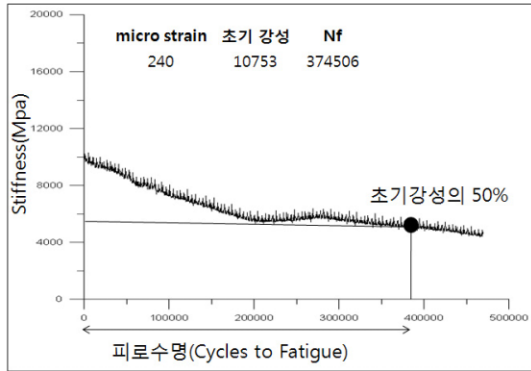


그림 7. 배합보고서를 이용한 시편의 피로수명

'A' 사의 배합보고서를 이용해 제작한 시편의 초기강성은 10,735Mpa이었고 파괴 시까지의 하중재하 횟수는 374,506회였다. 이는 앞서 피로시험을 진행한 시편과 비교 시, 높은 초기강성과 피로수명을 보이는 것이다. 본 시편에 재하된 변형률이 240 $\mu\epsilon$ 으로 앞서 진행된 피로시험의 변형률 160~180 $\mu\epsilon$ 인 점을 감안한다면 배합보고서를 이용해 제작한 시편이 실제 현장에서 생산된 아스팔트 혼합물로 제작된 시편에 비해 높은 피로수명을 갖는 것으로 판단되며, 지불계수가 작을수록 피로수명이 감소하는 것을 입증한 것이라 사료된다.

4.3.3. 시험포장 구간의 지불계수와 피로균열의 상관관계

본 연구는 지불계수를 이용하여 시험포장 구간의 품질을 평가하고 이에 따른 피로수명의 변화를 분석하기 위해 실시되었다. 시험 결과 그림 8과 같이 지불계수가 78%인 1회차에 포설된 아스팔트 혼합물이 지불계수 105%인 2회차에 포

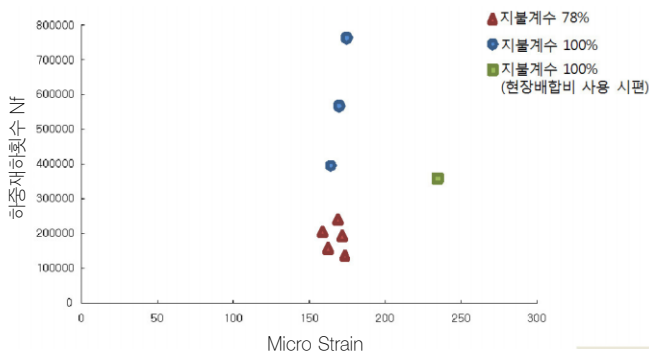


그림 8. 지불계수와 피로수명의 관계

설된 아스팔트 혼합물에 비해 피로수명이 월등히 낮음을 알 수 있다.

또한 아스팔트 함량과 입도 등 모든 지불규정 기준인자의 시방기준을 만족시킨 현장배합비를 사용한 시편의 경우 높은 변형률을 재하하였음에도 불구하고 높은 피로수명을 나타내었다. 특히 실제 지불계수가 105%인 2회차에 포설된 아스팔트 혼합물에 비해서도 높은 피로수명을 가지는 것으로 나타났는데, 그 이유는 배합보고서를 이용해 제작한 시편의 경우 입도와 아스팔트 함량을 모두 만족하였지만 현장 아스팔트 플랜트의 Hot Bin에서의 입도는 시방규정에 들지 못하였기 때문으로 판단된다. 따라서 아스팔트 함량에 대한 지불계수는 100% 이상을 만족하더라도 입도나 기타 요인에 따른 공용성 감소현상이 발생할 수 있으므로 최종적인 지불계수는 아스팔트 함량 이외의 지불규정 기준인자에 대한 합성 지불계수 산출이 요구된다고 생각된다.

5. 결론

본 연구는 발주자와 시공자에게 합리적인 지불규정을 제안하기 위하여 지불계수를 이용하여 시험포장 구간의 품질을 평가하고, 지불계수에 따른 시험포장 구간의 피로수명을 분석하고자 다음과 같은 연구내용을 수행하였다. 먼저 지불규정을 적용 중인 미국의 사례와 국내 아스팔트 포장의 품질관리 인자들을 고려하여 아스팔트 함량의 지불규정 기준인자를 선정하였으며, 지불규정 기준인자와 피로수명의 연관성을 분석하였다. 또한 시험포장 구간의 자료를 이용, 지불계수를 산출하여 시험포장 구간의 품질을 평가하였고 시험포장의 지불계수에 따른 피로수명을 분석하였으며 그 결과는 아래와 같다.

1. 시험포장구간의 지불계수를 산출하기 위하여 지불규정 기준인자를 선정하였다. 이는 아스팔트 혼합물 생산 시 관리감독이 요구되는 품질관리 기준인자(아스팔트 함량, 입도, 온도 등)와 아스팔트 포장 시공 시 관리감독이 요구되는 시공관리 기준인자(TMD, 공극률, 두께, 평탄성, 온도 등) 중, 미국 각 주의 지불규정 기준인자 사용 빈도, 플랜트에서의 품질관리 여부 등을 고려하여 아스팔트 함량을 지불규정 기준인자로 선정하였다.
2. 시험포장구간의 지불계수를 산출하기 위하여 선정된 아스팔트 함량과 피로수명의 연관성을 분석하였다. 이는 선정된 지불규정 기준인자가 실제 피로수명의 변화에 미치는 영향을 파악하기 위함이다. 시험결과 아스팔트 함량에 따라 피로수명의 변화경향이 뚜렷이 나타났으며 지불규정인자의 편차에 따라 피로수명은 일정한 경향을

보이며 감소하였다.

3. 간접인장피로시험 결과 아스팔트 함량은 공극률 구속여부와 관계없이 모든 시편의 강성과 파괴 시까지의 피로수명은 아스팔트 함량이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 그 이유는 변위제어방식이 아닌 하중제어방식을 사용하였기 때문으로 생각된다. 따라서 이후 진행된 다양한 시험은 변위제어방식의 휨 피로 시험을 진행하여 지불규정 기준인자와 피로공용성의 연관성을 분석하였다.
4. 휨 피로시험 결과, 아스팔트 함량에 따라 피로수명의 변화 경향이 뚜렷이 나타났으며 지불규정인자의 편차에 따라 피로수명은 일정한 경향을 보이며 감소하였다. 앞서 진행된 간접인장피로시험과 달리 아스팔트 함량이 증가함에 따라 피로수명도 증가함을 보였다.
5. 총 2회에 걸쳐 실시된 국도 38호선 신동-가사 시험포장 구간의 자료를 바탕으로 지불계수를 이용하여 시험포장 구간의 품질을 평가하였다. 1회차에 포설된 구간의 지불계수는 78%로, 2회차에 포설된 구간의 지불계수 105%에 비해 30%이상 감소되는 것을 알 수 있었다. 이는 1회차 포설구간의 아스팔트 함량 시험결과, 평균이 하한한계에 매우 가까울뿐 아니라 표준편차 역시 크게 측정됐기 때문이라 생각된다. 따라서 1회차에 포설된 구간의 지불계수는 100% 이하로 나타나 품질이 고르지 못하다고 판단된다.
6. 2회차에 채취한 시료의 경우, 평균이 OAC와 근접했으며 편차도 매우 작을 뿐 아니라 상한 및 하한한계에 모두 분포했기 때문에 지불계수의 최대값인 105%로 산출된 것으로 생각되며, 지불계수 역시 100% 이상의 값을 나타내어 시공초기 품질이 우수한 것으로 보여 진다.
7. 국도 38호선 신동-가사 구간의 아스팔트 혼합물을 이용하여 지불계수와 피로균열의 상관관계를 분석하였다. 분석결과 지불계수가 78%인 아스팔트 혼합물이 지불계수가 100%인 아스팔트 혼합물에 비해 피로수명이 월등히 낮음을 알 수 있다.
8. 시험포장 구간에 아스팔트 혼합물을 납품한 플랜트의 배합보고서를 사용하여 시편을 제작, 휨 피로 시험을 진행하였다. 그 결과 높은 변형률을 재하 하였음에도 불구하고 시험포장 구간에서 채취한 시료에 비해 높은 피로수명을 나타내었다. 특히 실제 지불계수가 105%인 2회차 시험포장 현장에서 채취한 시료에 비해서도 높은 피로수명을 가지는 것으로 나타났다.
9. 배합보고서를 이용해 제작한 시편의 피로수명이 월등히 높은 이유는 1, 2회차 시험포장구간에 포설된 아스팔트 혼합물이 생산된 플랜트 Hot Bin에서의 입도가 시방규

정을 만족하지 못하였기 때문으로 판단된다. 따라서 입도나 기타 요인에 따른 공용성 감소현상이 발생할 수 있으므로 향후 최종적인 지불계수는 아스팔트 함량 이외의 지불규정 기준인자에 대한 합성지불계수 산출이 요구된다고 생각된다.

감사의글

본 연구는 경희대학교의 일반대학원에서 진행된 우수연구논문 장학의 지원으로 이루어진 것입니다.

참고 문헌

김광우, 연구석, 이정규, 박용철, "아스팔트 포장 다짐밀도의 통계적 품질관리 규정 개발", *대한토목학회 논문집* 제 15권 1호, 1995.1, pp. 119-129.

이영호, "삼축압축 반복재하 시험을 통한 아스팔트 혼합물의 소성변형 특성 연구", 석사학위논문, 경희대학교, 2004.

이현종, 박현순, 강민균, "간접인장시험을 이용한 아스팔트 혼합물의 피로해석", *한국도로학회 학술대회 논문집*, 2003.

최장규, 이석근, 김성민, 황상민, "아스팔트 포장의 품질측정을 위한 확률론과 PWL방법의 비교 분석", *한국도로학회 논문집* 제11권 2호, 2009. 6, pp. 1-9.

한국건설기술연구원, 한국도로공사, "한국형포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구", 국토해양부, 2004.

한국건설기술연구원, "아스팔트 포장의 현장다짐 관리 매뉴얼", 국토해양부 2006.

한국건설기술연구원, "아스팔트포장의 현장다짐관리 매뉴얼", 국토해양부, 2006.

한국도로교통협회, "아스팔트 포장 설계 및 시공요령", 한국도로교통협회 1997.

Asphalt Research Program Institute of Transportation Studies University of California, Berkeley, "Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes", *Strategic Highway Research Program*, 1994.

Burati, J. L., Weed, R. M., Hughes C. S., and Hill, H. S. "Optimal Procedures for Quality Assurance Specifications" Report FHWA-RD-02-095, Civil Engineering Department of Clemson University, 2003.

Federal Highway Administration, "Evaluation of Procedures for Quality Assurance Specifications", Federal Highway Administration, 2004.

South Carolina Department of Transportation., "QA Specification for Hot Mix Asphalt (Percent Within Limits)", 2004

접 수 일 : 2009. 11. 25
심 사 일 : 2009. 11. 25
심사완료일 : 2009. 12. 1