

아스팔트 도로 포장의 공용성 기반 지불규정 도입방안 연구

Application of Pay Adjustment Based Performance for Asphalt Concrete Pavement

신형호* · 이석근** · 김성민*** · 이광태****

Shin, Hyoung-Ho · Rhee, Suk-Keun · Kim, Seong-Min · Lee, Kwang-Tae

1. 서론

본 연구는 포장 성능 개선을 위한 지불규정(Pay Adjustment)개발의 기초연구로 수행되었다. 지불규정의 도입을 위해서는 지불규정의 합리적인 적용방법에 대한 연구가 선행되어야 한다. 본 논문에서는 아스팔트 포장의 지불규정 도입을 위해 미국 40개 주의 지불규정 사용 현황 및 적용 인자에 대해 조사하고, 적용 방법을 비교 분석하였다. 이를 토대로 국내 건설 실정에 맞는 지불규정 인자를 선정하고, 각 인자들에 대한 시공 현장에서의 합리적인 품질측정방법과 측정된 품질에 상응하는 적합한 시공금액을 결정하기 위한 각 지불규정인자의 지불계수 결정 방법을 선정 하였다. 이외에도 국내 아스팔트 도로 포장 지불규정을 도입하기 위한 알고리즘을 개발하여 '아스팔트 도로 포장 지불규정 지침서' 작성에 필요한 연구를 수행하였다.

2. 국외 지불규정 적용 사례 및 현황

미국의 경우 대부분의 주에서 각 구조물의 시방서에 지불규정을 도입하여 적용하고 있으며, 도로포장 분야에서도 공용성을 기반으로 한 지불규정제도가 활발하게 적용되고 있다.

2.1 미국 지불규정 기준 인자 사용 빈도

현재 미국은 표 2.1과 같이 총 51개 주 중 40여개 주가 밀도를 포함한 8가지 인자를 중심으로 지불규정을 적용하고 있다. 지불규정에 사용되는 인자 중 가장 높은 사용 빈도를 보이는 아스팔트함량의 경우 30개 주에서 지불규정 기준인자로 사용하고 있으며, 밀도는 플로리다주 외 32개주에서 사용 중에 있다. 또한 골재 입도는 버지니아를 비롯한 24개주에서 사용되는 등 포장 성능에 큰 영향을 미치는 인자를 중심으로 지불규정을 적용하고 있다. 특히 미네소타를 비롯한 8개 주는 슈퍼페이브에 대한 지불규정을 따로 적용하고 있다. 하지만 미국 대다수의 주에서는 국내 준공 시험 기준인 두께를 지불규정적용을 위한 기준 인자로 사용하는 빈도수가 굉장히 적었다(FHWA, 2004).

* 비회원 · 경희대학교 토목공학과 도로연구실 석사과정 · 031-201-2923(E-mail : shin_2420@naver.com)

** 정희원 · 경희대학교 토목건축대학 교수 · 공학박사 · 031-201-2900(E-mail : skrhee@khu.ac.kr)

*** 정희원 · 경희대학교 토목건축대학 교수 · 공학박사 · 031-201-2923(E-mail : seongmin@khu.ac.kr)

**** 비회원 · 경희대학교 토목공학과 도로연구실 석사과정 · 031-201-2923(E-mail : ktqoqo@nate.com)



표 2.1 미국 지불규정 적용 현황

| States | Density | VMA | Air-Voids | Binder | Gradation | Thickness | Smoothness |
|----------------|---------|-----|-----------|--------|-----------|-----------|------------|
| Alabama | ○ | | ○ | ○ | | | ○ |
| Alaska | ○ | | | ○ | ○ | | |
| Arkansas | ○ | ○ | ○ | ○ | | | |
| Arizona | | | | | | | ○ |
| Connecticut | ○ | | | | ○ | | |
| California | ○ | | ○ | ○ | ○ | | |
| Illinois | | | | ○ | | ○ | ○ |
| Iowa | ○ | | | | | ○ | ○ |
| Maine | ○ | | | ○ | ○ | | |
| Maryland | ○ | | | ○ | ○ | | ○ |
| Michigan | ○ | ○ | | ○ | ○ | | ○ |
| Minnesota | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ |
| Missouri | | | | | | | ○ |
| Nebraska | ○ | | | | | | ○ |
| New Hampshire | | | ○ | | | | |
| New Jersey | | | ○ | | | | ○ |
| New Mexico | ○ | | ○ | ○ | ○ | | |
| Nevada | | | ○ | ○ | ○ | | ○ |
| North Carolina | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ |
| North Dakota | | | | | | | ○ |
| Ohio | ○ | | | ○ | ○ | | ○ |
| Oklahoma | ○ | | | ○ | ○ | | ○ |
| Pennsylvania | ○ | | | ○ | ○ | | ○ |
| South Carolina | ○ | | ○ | ○ | | | ○ |
| Tennessee | | | | ○ | ○ | | ○ |
| Texas | ○ | | ○ | | | ○ | ○ |
| Utah | ○ | | | ○ | ○ | | |
| Vermont | | | ○ | | | | |
| Washington | ○ | | | ○ | ○ | | |
| Wisconsin | | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ |
| Wyoming | ○ | | | | ○ | | ○ |
| Florida | ○ | | ○ | ○ | | | |
| Virginia | | | | ○ | ○ | | |
| Indiana | ○ | ○ | ○ | ○ | | | |
| Idaho | ○ | | | ○ | ○ | | |
| Ontario | ○ | | ○ | ○ | ○ | | |
| Colorado | ○ | | | ○ | ○ | | |
| Oregon | ○ | | | ○ | ○ | | |
| Kansas | ○ | | ○ | | | | ○ |
| Montana | ○ | | | ○ | ○ | | |
| Total | 31 | 6 | 17 | 27 | 24 | 3 | 22 |

이와 같이 미국 40개주는 밀도와 아스팔트 함량 등 포장의 공용성에 영향을 미치는 인자를 주별로 정리하여 고유의 방식을 통해 지불규정을 적용하고 있다. 인자 별 사용빈도 수 중 밀도와 아스팔트 함량, 입도, 평탄성이 높은 사용 빈도를 보이고 있음을 알 수 있다.

2.2 미국 지불규정 적용 방법에 대한 사례

미국에서는 어떠한 방법으로 각 지불규정인자에 대하여 적용 기준을 나누고 그 기준에 대하여 계약 공사비의 지급 금액을 결정하게 되었는지 파악하기 위하여 문헌조사를 통하여 분석하였다. 과거에는 포장의 공용성에 미치는 여러 인자들을 선정하고 각 인자가 포장의 수명에 미치는 영향을 분석하여 이를 생애주기비용(LCCs ; Life Cycle Costs)에 대입하여 지불계수를 산정하였다. 여기서 지불계수란 계약 공사비에 곱해 지는 계수를 말하는 것으로 지불계수에 따라 공사비를 차등 지급하게 되는 것이다. 하지만 생애주기비용을 이용하여 지불계수를 구하는 방법은 합리적으로 보이지만 각 인자들에 따른 포장의 수명을 정확하게 예측하는 데에는 많은 어려움이 따른다. 이와 같은 불확실성을 보완하고자 현재 미국의 연방 도로청(Federal Highway Administration)은 지불계수 산정을 위하여 포장 재료의 합리적인 품질 측정에 대한 연구를 계속 진행하고 있는 중이다. 현재 연방 도로청은 여러 가지 품질 측정 방법 중에 PWL(Percent Within Limits) 이라고 하는 방법을 추천하고 있다(Burati et al., 2004). 그림 2.1(NCHRP, 2005)에서는 PWL 방법 이외에 미국에서 현재 이용하는 여러 가지 품질측정 방법들에 대한 사용 빈도를 보여준다.

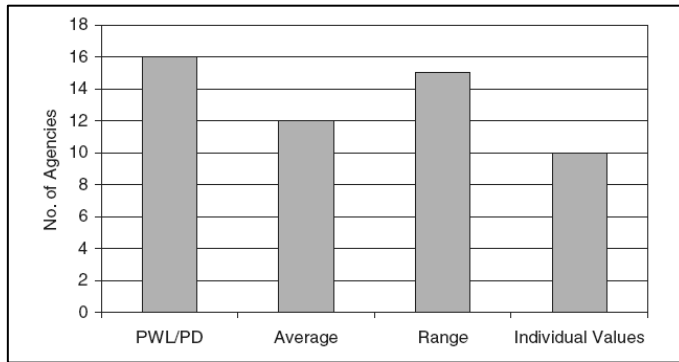


그림 2.1 품질측정 방법에 대한 사용 빈도(NCHRP, 2005)

위의 그림에서 PWL과 PD(Percent Defective)가 같은 항목으로 제시되어 있는데 여기서 PD라는 품질측정 방법은 측정된 각 인자의 품질이 시방 한계값보다 크게 될 확률, 즉 시방 한계값을 만족하지 않을 확률을 나타내는 값으로 PWL 방법을 이용하여 지불규정 인자를 산정하는 방법과 같은 의미를 나타낸다.

PWL을 이용한 품질측정 방법은 측정구간에서 측정된 각 인자에 대한 품질이 시방 한계값 이내로 들어올 확률을 표본 평균과 표본 표준편차를 이용하여 추정하는 통계적인 기법이다. 그리고 각 인자에 대한 측정값의 모집단이 정규 분포를 가진다고 가정하여 정규 확률 분포 곡선 아래의 면적을 계산하는 정규 분포 확률값을 산정하는 방법과 유사한 의미이다. 지불규정 적용 방법과 관련된 PWL 방법을 이용하여 지불계수를 산정하는 과정은 다음과 같다. 먼저 지불규정 인자로 선정된 인자에 대하여 시공된 콘크리트 도로 포장에서 표본을 수집하는 것으로 지불계수의 산정이 시작된다. 표본 자료를 수집한 후, 표본에 대한 기술 통계량(평균, 표준편차 등)을 계산한다. 계산된 기술 통계량으로 품질 지수(Quality Index)를 아래의 두 가지 식을 이용하여 산정한다.

$$Q_L = \frac{(X_{avg} - LSL)}{S} \dots\dots \text{식 (1)}, \quad Q_U = \frac{(USL - X_{avg})}{S} \dots\dots \text{식 (2)}$$

- Q_L = 시방 하한값에 대한 품질 지수, Q_U = 시방 상한값에 대한 품질 지수
- X_{avg} = 측정구간에서 측정한 표본의 평균
- LSL = 시방 하한값
- USL = 시방 상한값

그리고 산정된 품질지수는 컴퓨터 소프트웨어와 표를 이용하여 추정된 PWL로 변환된다. 아래의 표 2.8(Burati et al., 2003)에서 알 수 있는 바와 같이 초기의 PWL에 기초한 지불계수 산정 방법은 정해진 PWL에 대하여 단계적인 지급 조정 금액을 나타내고 있다.

표 2.2 초기 PWL을 이용한 지불계수 산정 방법

| 추정된 PWL | 지급 금액 (%) |
|--------------|-----------|
| 95.0 - 100.0 | 102 |
| 85.0 - 94.9 | 100 |
| 50.0 - 84.9 | 90 |
| 0.0 - 49.9 | 70 |

하지만 최근 들어 미국의 대부분의 주는 AASHTO Quality Assurance Guide Specification에서 제시된 아래의 식 (3)와 같은 Pay Factor Equation을 이용하여 지불계수를 산정한다. 앞서 제시한 초기 PWL 방법을 사용한 지불계수 산정 방법이 단계적인 지급 금액을 나타내는 것과 다르게 AASHTO 지불 공식은 연속적이고 선형적인 식을 따르는 지급 금액을 나타낸다. 또한 AASHTO 지불 공식은 지급 금액을 100% 지급하는 허용 PWL의 값을 90%를 가정하고 있고 지급 금액에 대하여 최대 5% 보너스를 지급할 수 있도록 정의하고 있다.

$$\text{지급 금액 (\%)} = 55 + 0.5 \text{PWL} \dots\dots\dots \text{식 (3)}$$

아래의 그림 2.2(Burati et al., 2003)는 PWL 방법을 이용한 초기의 지불계수 산정 방법과 AASHTO 지불 공식을 이용한 지불계수 산정 방법의 차이를 보여주고 있다.

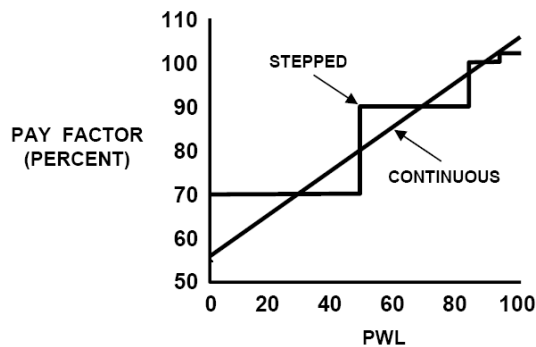


그림 2.2 PWL을 이용한 초기 지불 공식과 AASHTO 지불 공식(Burati et al., 2003)

3. 국내 아스팔트 포장 지불규정 도입 방안

3.1 국내 아스팔트 포장 지불규정 기준 인자 선정

조사된 미국의 40개주에서는 지불규정을 적용할 때 주별로 다른 지불규정인자를 적용하고 있으며 각 지불규정 인자별 공사비 차등 지급 기준 또한 다르게 적용하고 있다. 이는 주별로 상이한 환경 변수에 따라 각 지불규정인자가 도로 포장의 수명에 미치는 영향의 정도가 다르기 때문에 주별로 이루어지는 연구와 경험적인 판단에 의해 결정되어진 것이라고 사료되며 이러한 결과를 볼 때, 국내의 지불규정 역시 국내의 환경 변수에 맞게 적용되어야 할 것으로 사료된다.



국내의 경우 포장 수명에 영향을 미치는 여러 인자 중 현재 국내에서는 밀도, 두께, 평탄성만을 준공검사 기준으로 삼고 있어 아스팔트 도로 포장 공용성을 판단하는 기준으로 적합하지 않다. 이는 아스팔트 바인더 함량 등 포장 성능에 큰 영향을 미치는 인자를 제외한 것으로, 공용성 감소와 수명 주기 예측을 어렵게 만드는 요인으로 지적되고 있다. 이에 국내에서도 도로 포장의 품질관리 기준 확립으로 공용성 향상의 필요성이 제기되었다. 요성이 지불규정을 도입하기 위해서는 포장 성능에 영향을 미치는 인자의 선정이 우선되어야 할 것이다. 인자의 선정에 있어, 미국과 환경, 사회적 요인이 같지 않기에, 요 인자사용되는 인자를 국내에서 바로 사용하기엔 어려움이 있다. 따라서 포장 성능에 영향을 미치는 인자들 중 국내 환경에 맞고, 공용성과 가장 밀접하다고 판단되는 아스팔트 혼합물 품질 기준 인자 2가지(아스팔트 바인더 함량, 입도)와 국내 준공 시험 기준 인자 3가지(밀도, 두께, 평탄성)을 지불규정 인자로 선정하였다.

▷ 국내 아스팔트 포장 지불규정 기준 인자 : 아스팔트 바인더 함량, 밀도, 입도, 두께, 평탄성

3.2 국내 아스팔트 포장 지불규정 인자의 적정 측정 구간 분석

아스팔트 포장의 지불규정에서 합리적인 품질 측정 기준의 개발 방안으로 시공 품질에 따른 시공 금액의 지불 기준을 결정하기 위하여 미국에서 가장 많이 적용하고 있는 PWL방법을 도입한다. PWL 품질측정 방법으로는 미국의 Q-value를 이용한 PWL을 구하는 방법과 표준정규화 지수 Z-value 또는 자료의 수가 적을 경우에 사용하는 ‘Student의 t 분포’에서의 T-value를 이용하여 PWL을 구하는 방법이 있다. 국내 지불규정에서는 자료 수에 관계없이 정규분포와 비슷한 결과값을 가지고 사용이 간편한 Q-value를 이용한 PWL 품질측정 방법을 채택한다. PWL 방법은 일정한 크기의 구간 내에서 측정된 각 지불규정인자의 품질이 시방한 계 값을 만족시킬 수 있는 확률을 구하여 지불계수를 산정하는 방법이기 때문에 각 지불규정인자에 적합한 측정 구간의 크기를 결정해야 한다. 표 3.1은 아스팔트 도로 포장에 대한 품질검사 측정구간 크기에 대한 국내 시방 규정이다.

표 3.1 아스팔트 포장 품질검사 측정 구간에 관한 국내 규정

| 인 자 | 규 정 |
|-----|------------|
| 밀 도 | 포설 1층당 30a |
| 두 겹 | 차로당 500m |
| 평탄성 | 차로당 전구간 |

이에 따라 아스팔트 포장 지불규정 인자 시료채취 및 측정시 용이성을 확보하고, 국내 아스팔트 플랜트의 생산 능력을 고려하여 아스팔트 혼합물의 일일생산량 1,000ton(2km 플랜1Lot으로 정의한다. 1Lot은 4개의 Sublot으로 정의하며, 1Sublot은 500m 이다.

▷ 1Lot (4Sublot) = 2km, 1Sublot = 500m

또한 포장 구간을 Lot(2km)으로 나눈 후, 남은 구간의 크기에 따라 마지막 Lot의 Sublot 수를 표 3.2와 같이 정의한다.

표 3.2 아스팔트 포장 지불규정 단위 Lot의 정의

| LOT의 크기 | Sublot의 수 |
|---------------|-----------|
| 2,500m~3,000m | 6 |
| 2,000m~2,500m | 5 |
| 1,500m~2,000m | 4 |
| 1,500m 이하 | 3 |

3.2 국내 아스팔트 포장 지불규정 인자의 시방한계 설정

시방한계란 아스팔트 도로 포장의 품질 검사 후 지불계수를 산출하기 위하여 각 인자별 품질 목표 값을 설정 하는 것으로서 국내 아스팔트 도로 포장의 현 실태와 환경에 맞는 상한·하한 한계를 설정하기 위하여 국내 아스팔트 도로 포장의 지불규정 도입 초기 시에는 현행 국내 아스팔트 도로 포장의 허용오차 및 상한·하한 한계를 적용하기로 하였다. 아래 표 3.3은 국내 아스팔트 포장 지불규정에 적용하는 인자별 허용오차 및 상한·하한한계이다.

표 3.3 아스팔트 포장 지불규정 인자별 허용오차 및 상한·하한한계

| 지불규정 인자 | 허용오차 | 상한한계 | 하한한계 |
|----------------|-------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 아스팔트 바인더 함량(%) | 0.3% | OAC + 0.3% | OAC - 0.3% |
| 밀 도(기준밀도, %) | 2% | 기준밀도 (기준밀도×98% +2%) | 기준밀도×96% (기준밀도×98% - 2%) |
| 입 도(%) | No. 8 통과중량 백분율 ± 4.0% | No. 8 통과중량 백분율 + 4.0% | No. 8 통과중량 백분율 - 4.0% |
| 두께(cm) | 설계두께 + 10% 이하 설계두께 - 5% 이상 | 설계두께 + 10% | 설계두께 - 5% |
| 평탄성(cm/km) | - | 10 | - |

3.3 국내 아스팔트 포장 지불규정 지불계수 산정 및 준공대가 결정

지불계수는 미국의 연방 도로청(Federal Highway Administration)에서 추천하고 있는 PWL방법과 AASHTO Quality Assurance Guide Specification에서 제시된 Pay Factor Equation을 이용하여 지불계수를 산정한다.

지불규정 각 인자의 지불계수(Pay Factor)가 산정되면 준공대가 금액을 결정한다. 준공대가 금액은 지불규정 각 인자의 지불계수 값에 공용성에 중요한 인자별로 가중치를 곱하여 계산된다. 지불규정 인자별 가중치는 다음과 같다.

표 3.4 아스팔트 포장 지불규정 인자별 가중치

| 지불규정 인자 | 가중치 |
|-------------|------|
| 아스팔트 바인더 함량 | 0.25 |
| 밀 도 | 0.30 |
| 입 도 | 0.15 |
| 두께 | 0.20 |
| 평탄성 | 0.10 |

본 연구에서는 국내 지불규정 도입을 위하여 지불계수 자동 산출 프로그램을 제작 중이며, 프로그램을 통하여 지불계수 산출 과정과 준공대가까지 확인할 수 있다. 다음은 제작 중인 지불계수 자동 산출 프로그램의 화면이다.

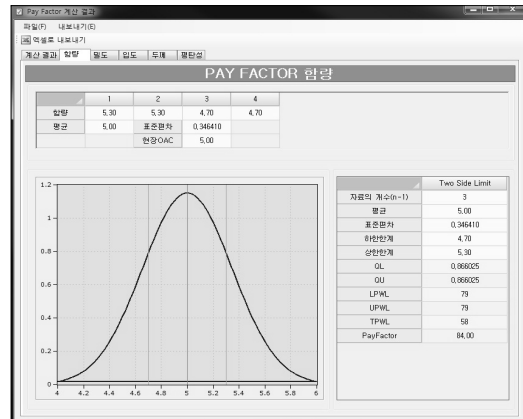
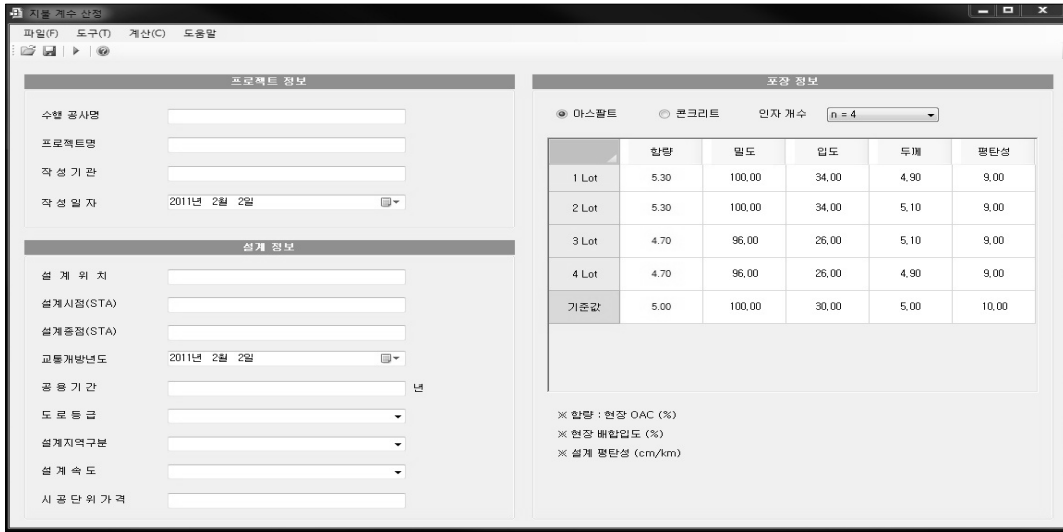


그림 3.1 지불계수 자동 산출 프로그램

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 현재 시공 방법 중심으로 된 국내의 아스팔트 도로 포장의 시방에 포장의 공용성을 고려한 지불규정을 국내에 합리적으로 도입시키기 위하여 연구를 수행하였다. 국내 도로 포장의 공용성을 기반으로 한 지불규정 도입에 있어서 먼저 지불규정을 활발하게 적용하고 있는 미국의 여러 주에 대하여 문헌 조사를 실시하였다. 미국의 여러 주가 적용하고 있는 지불규정 인자들의 적용 빈도, 적용 현황, 적용 방법에 대하여 조사한 후, 국내 지불규정 도입을 위한 인자로 아스팔트 함량, 밀도, 입도, 두께, 평탄성을 선정하였으며, 인자 선정 이후 지불규정 각 인자의 적정 측정 구간 설정 및 시방한계를 설정 하였다. 이 외에도 준공대가 결정시에 사용되는 각 인자별 가중치를 결정하였고, 아스팔트 도로 포장의 제시공 기준, 각 인자별 시험·측정 방법 등을 선정하였다. 이러한 연구를 통하여 국내 지불규정 도입을 위한 ‘지불규정 지침서’를 최종적으로 작성 할 계획이며, 완성도 있는 지불계수 자동 산출 프로그램을 통하여 국내에서 지불규정을 쉽게 이용할 수 있도록 할 계획이다.

감사의 글

이 논문은 건설교통 R&D 정책·인프라 사업 - 성능중심의 건설기준 표준화과제('06~'11) 연구 결과의 일부입니다. 본 연구의 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] 한국건설기술연구원, 한국도로공사(2008), “한국형 포장 설계법 개발과 포장 성능 개선 방안 연구/아스팔트 포장 재료 및 품질 관리 기준 정립”, 건설교통부
- [2] 한국건설기술연구원, 한국도로공사(2004), “한국형 포장 설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”, 건설교통부
- [3] 한국도로교통협회(1997), “아스팔트포장 설계·시공요령”, 한국도로교통협회
- [4] 한국건설기술연구원(2006), “아스팔트 포장의 현장 다짐관리 매뉴얼”, 국토해양부
- [5] 김성민(2008), “콘크리트 도로포장의 품질관리 및 보증을 위한 지불규정 개발 기법”, 한국도로학회 논문집
- [6] 박찬호(2008), “아스팔트 포장의 지불규정 적용을 위한 기초연구“, 석사학위논문, 경희대학교
- [7] 황상민(2009), “아스팔트 함량에 따른 지불계수와 피로균열의 상관관계”, 석사학위논문, 경희대학교
- [8] 황성재(2011), “콘크리트 도로 포장의 공용성 기반 지불규정 제정방안”, 석사학위논문, 경희대학교
- [9] University of California, Berkely(1994), “Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes”, Strategic Highway Research Program
- [10] Burati, J. L., Weed, R. M., Hughes C. S., and Hill, H. S.(2003), “Optimal Procedures for Quality Assurance Specifications”, Report FHWA-RD-02-095, Civil Engineering Department of Clemson University