



콘크리트 포장의 슬래브 두께 손실에 대한 지불규정 기준 정립을 위한 기초연구

Preliminary Investigation of Pavement Adjustment Concepts for Slab Thickness Deficiency in Portland Cement Concrete Pavement

김성민* 이석근**
Kim, Seong-Min Rhee, Suk-Keun

Abstract

The current standards and specifications for the road pavement construction have been developed based on materials and construction methods. The pavements constructed in accordance with those specifications do not guarantee high performance of pavements since they do not consider long-term performance of pavements. Therefore, as part of the study to develop performance-based construction standards for pavements, the payment adjustment methods based on the pavement performance are currently being developed. This paper presents preliminary studies performed to develop the payment adjustment methods when there is deficiency in the concrete slab thickness that is one of the most important factors for the pavement design and construction. First, the payment adjustment methods in USA were investigated. Then, the AASHTO failure equation, the relationship between slab thickness and stress, and the relationship between stress level and pavement life were employed to propose the payment adjustment concepts based on the pavement performance for the deficient slab thickness. The variation in the slab thickness according to measurement locations was investigated by taking cores. In addition, the measurement methods of slab thickness and the variation of measured thicknesses depending on performers were analyzed, and finally the methodology to develop the thickness deficiency ranges for the use in the payment adjustment methods was proposed.

Keywords : *payment adjustment method, concrete pavement, slab thickness, thickness deficiency, pavement life, fatigue failure*

요 지

현재의 도로포장 건설기준 및 시방은 자재 및 시공방법 중심으로 되어 있으며 이러한 시방을 따라 시공된 도로포장은 단기적으로 성능을 판단할 수 있는 근거가 미비하며 또한 장기적인 도로포장의 성능을 고려하지 않기 때문에 고성능 고내구성 이 요구되는 도로포장의 건설을 확신해 주지 못하고 있는 실정이다. 따라서 도로포장 건설분야에 성능중심의 건설기술 기준을 개발하여 적용하기 위한 과정으로 공용성을 기반으로 하는 지불규정을 개발하는 연구가 진행중에 있으며 본 논문은 콘크리트 포장의 설계 및 시공에 있어서 가장 중요시 되는 인자인 콘크리트 슬래브의 두께 손실이 생겼을 경우에 적용할 지불규정 개발을 위해 기초적으로 수행한 연구 내용에 대하여 기술하였다. 먼저 외국의 슬래브 두께에 대한 지불규정 적용에 대하여 분석을 하여 문제점을 파악하였으며, 공용성에 기반을 둔 두께 손실에 대한 지불규정 개념을 개발하기 위하여 AASHTO 피로파손 공식 및 슬래브 두께와 응력과의 상관관계와 응력레벨과 콘크리트 포장 수명과의 상관관계를 이용하는 방법을 제시하였다. 그리고 기존 콘크리트 포장의 두께를 측정하여 위치에 따른 시공 시 슬래브 두께의 편차를 파악하였으며 코어를 이용하여 두께를 측정할 때 두께 측정방법 및 사람에 따른 측정편차에 대한 분석을 수행하여 지불규정에서 두께손실 범위를 결정할 수 있는 방법을 제시하였다.

핵심용어: *지불규정, 콘크리트 포장, 슬래브 두께, 두께 손실, 포장수명, 피로파손*

* 정회원 · 경희대학교 토목건축대학 토목공학전공 교수
** 정회원 · 경희대학교 토목건축대학 토목공학전공 교수, 교신저자

1. 서 론

현재의 도로포장 건설기준 및 시방은 자재 및 시공 방법 중심(method specifications)으로 되어 있으며 이러한 시방을 따라 시공된 도로포장은 단기적으로 성능을 판단할 수 있는 근거가 미비하며 또한 장기적인 도로포장의 성능을 고려하지 않기 때문에 고성능 고내구성이 요구되는 도로포장의 건설을 확신해 주지 못하고 있는 실정이다. 따라서 외국에서는 지불규정(pay factor)을 시공방법 중심의 시방에 포함시켜 사용하고 있는 실정이다. 우리나라도 도로 포장 건설 분야에 성능 중심의 건설기술 기준을 개발하여 적용하기 위한 과정으로 공용성을 기반으로 하는 지불규정(pay Factor)을 개발하는 연구가 진행중에 있다. 지불규정에 관한 적용기준이 개발되어 이를 도로포장의 건설기준 및 시방에 포함하여 적절하게 운영하면 도로포장 시공기술 및 시공기법의 발전을 도모하여 도로포장의 성능 및 품질을 향상시킬 수 있을 것으로 기대하고 있다.

콘크리트 포장의 설계에 있어서 가장 중요시되는 인자는 콘크리트 슬래브의 두께라 할 수 있다. 이에 미국 등의 선진국에서는 시공 시 슬래브의 두께가 설계 두께에 부합될 수 있도록 슬래브 두께에 대한 지불규정을 시방에 포함시켜 운영함으로써 슬래브 두께의 손실에 의한 포장의 성능저하를 방지하는데 노력을 기울이고 있다. 하지만 미국의 각 주에서 사용하고 있는 이러한 기준이 대부분 역학적인 기반에 근거하여 개발된 것이 아니며 또한 슬래브 두께의 측정에 있어서도 문제점을 포함하고 있기 때문에 슬래브 두께에 대한 보다 합리적인 지불규정 기준을 정립하는 것이 필요한 상황이다.

이에 본 논문에서는 우리나라의 실정에 적합한 콘크리트 포장의 슬래브 두께에 대한 지불규정의 개발을 위한 기초연구로써 수행한 내용에 대해서 기술하려고 한다. 먼저 외국의 콘크리트 포장 두께의 지불규정에 대하여 분석을 수행하여 장단점을 파악하였다. 그리고 역학적인 근거에 준한 지불규정을 개발할

수 있는 방안을 제시하였다. 또한 현장에서 슬래브의 두께를 측정하여 시공 시 슬래브 두께의 오차에 대해 분석하였으며 슬래브 두께의 측정에 있어서의 고려할 사항 및 지불규정에서 두께 손실의 범위 결정에 대해서도 분석을 수행하였다.

2. 외국의 지불규정 분석

미국의 여러 주에서는 콘크리트 포장의 슬래브 두께에 대한 지불규정을 개발하여 시공 시 두께의 손실이 발생하지 않도록 유도하고 있으며 두께 손실 발생 시에는 이에 대한 책임으로 벌금을 물도록 하고 있다. 이에 대한 기준은 각 주마다 어느 정도 다른 특성을 보여준다. 먼저 가장 많은 주가 채택하고 있는 방식은 두께 손실의 범위를 정해 두고 이에 따라서 계

표 1. 미국 각 주의 콘크리트 포장 슬래브 두께에 대한 지불규정

| 두께 손실량 (mm) | 지급금액 (%) | 두께 손실량 (mm) | 지급금액 (%) |
|-------------|----------|---------------------------------------|----------|
| Texas | | Oregon | |
| 0 ~ 5.1 | 100 | 0 ~ 5 | 100 |
| 5.1 ~ 7.6 | 80 | 5.1 ~ 7.6 | 83 |
| 7.6 ~ 10.2 | 72 | 7.7 ~ 10.1 | 76 |
| 10.2 ~ 12.7 | 68 | 10.2 ~ 12.7 | 73 |
| 12.7 ~ 19.1 | 57 | 12.8 ~ 19 | 63 |
| Alabama | | 19.1 ~ 25 | 59 |
| 0 ~ 2.5 | 100 | Connecticut, North Carolina, Virginia | |
| 2.5 ~ 6.4 | 90 | 0 ~ 5.1 | 100 |
| 6.4 ~ 10.2 | 80 | 5.2 ~ 7.6 | 80 |
| 10.2 ~ 14 | 70 | 7.7 ~ 10.2 | 72 |
| 14 ~ 19.1 | 60 | 10.3 ~ 12.7 | 68 |
| Indiana | | 12.8 ~ 19.1 | 57 |
| -13 이하 | 105 | 19.2 ~ 25.4 | 50 |
| -7 ~ -13 | 102 | Massachusetts | |
| ±6 | 100 | 0 ~ 5 | 100 |
| 6 ~ 13 | 96 | 5 ~ 10 | 80 |
| 14 ~ 19 | 90 | 10 ~ 15 | 70 |
| 20 ~ 25 | 80 | | |



약 건설비의 해당 비율을 삭감하여 지급하는 것이다. 표 1은 이러한 예를 보여 준다(Texas DOT, 2004; Oregon DOT, 1996; Alabama DOT, 2006; Connecticut DOT, 1999; North Carolina DOT, 2002; Virginia DOT, 2002; Indiana DOT, 2006; Massachusetts DOT, 1995). 표에서 알 수 있는 바와 같이 두께 손실의 기준범위 및 이에 따른 공사비 삭감비율은 주에 따라 다르게 적용되는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 두께에 대한 지불규정을 각 주가 경험적 판단에 의해 자체적으로 개발하여 수정해왔기 때문이다. 또한 몇몇의 주에서는 시공 두께가 설계 두께보다 두꺼울 때는 계약공사비보다 많은 금액을 지불하도록 보너스 개념을 도입하고 있다.

다른 방식으로 두께에 대한 지불규정을 적용하고 있는 예를 표 2에 나타내었다(California DOT, 2006; Burati et al., 2004). 두께 손실에 대한 범위를 지정하는 것은 앞에서 설명한 방식과 일치하나 공사비 삭감을 계약금액을 기준으로 비율에 따라 적용하는 것이 아니라 계약금액에 관계없이 두께 손실 양에 따른 일정 삭감 금액을 정해놓는 것이다.

표 2. 일정 금액을 감하는 지불규정

| 평균 두께 손실량(mm) | 조정 금액 (\$/m ²) | 두께 손실량 (mm) | 조정 금액 (\$/1차로 76m) |
|---------------|----------------------------|-------------|--------------------|
| California | | Wisconsin | |
| 3 | 0.5 | 0 ~ 9.5 | 0 |
| 6.1 | 1.2 | 9.6 ~ 12.7 | 1,143 |
| 9.1 | 2.2 | 12.8 ~ 19.1 | 2,095 |
| 12.2 | 3.4 | 19.2 ~ 25.4 | 2,667 |
| 15.2 | 4.8 | | |
| 18.3 | 6.9 | | |

표 3에서 볼 수 있는 바와 같이 두께 손실이 있지만 그 범위가 작아서 계약공사비를 모두 지급하는 기준도 주에 따라 다르게 적용되고 있다(West Virginia DOT, 2000; Minnesota DOT, 2000; Hawaii DOT, 1994; Ohio DOT, 1997; Pennsylvania DOT, 2000; New York DOT,

1995). 어느 주는 두께 손실이 전혀 없어야 계약 공사비를 모두 지급하지만 또 다른 주는 두께 손실이 13mm가 되도 계약공사비를 모두 지급한다. 표 3은 두께 손실이 지나치게 많아서 재시공을 해야 하는 기준도 보여 준다. 이러한 기준도 주에 따라 다르게 적용되며 그 차이도 상당히 큰 것을 알 수 있다. 거의 대부분의 주가 슬래브의 설계 두께에 관계없이 특정한 두께 손실량을 정해 놓고 이러한 기준을 적용하는데 반해 일리노이 주는 슬래브 설계 두께의 10% 이상의 손실이 있을 경우에 재시공을 하도록 기준을 정해 놓고 있다.

표 3. 두께손실의 허용 및 한계기준

| 100% 지급 허용치 (mm) | 적용주 | 재시공 한계치 (mm) | 적용주 |
|------------------|---|--------------|--|
| 0 | West Virginia, Minnesota | 13 | New York, Ohio, Pennsylvania |
| 2.5 | Alabama, Iowa | 15 | Massachusetts, Hawaii |
| 3 | California | | |
| 5.1 | Virginia, Massachusetts, Connecticut, North Carolina, Oregon, Texas, Ohio, Hawaii | 17.8 | West Virginia, California |
| 6 | Indiana | 19.1 | Alabama, Texas, Wisconsin |
| 6.5 | Pennsylvania | 25.4 | Indiana, Virginia, Connecticut, North Carolina, Oregon |
| 9.5 | Wisconsin | 설계 두께의 10% | Illinois |
| 13 | New York | | |

이와 같이 미국의 각 주가 적용하고 있는 콘크리트 포장의 슬래브 두께에 대한 지불규정은 서로 다른 기준을 보여 주고 있지만 대부분의 주가 두께 손실범위를 정해 놓고 이에 따라 계약공사비의 일정비율을 삭감하여 공사비를 지불하도록 하고 있다. 이러한 두께 손실 범위는 설계 두께에 무관하게 적용되고 있기 때

문에 설계 두께가 두꺼운 포장의 시공에 있어서는 계 약금액도 크기 때문에 같은 두께 손실을 가진 얇은 포장의 시공에 비해 시공사는 상대적으로 많은 손해를 보게 되어 있다. 또한 두께의 손실이 있을 경우에 포장의 수명에 미치는 영향도 설계 두께에 따라 달라질 것이기 때문에 두께 손실 기준은 설계 두께에 따라 바뀌도록 하는 것이 타당한 것으로 보여 진다.

3. 공용성 기반의 지불규정 도입방법

슬래브의 시공 두께가 설계 두께에 미치지 못할 경우에는 두께 손실에 따라 건설비를 삭감하는 것이 타당하다. 그러한 이유중에 가장 중요한 이유는 두께 손실 때문에 포장의 설계수명이 단축될 수 있기 때문이다. 따라서 두께 손실기준과 이에 상응하는 공사비의 삭감정도는 두께 손실에 따른 포장수명의 감소량과 관련지어 결정되는 것이 타당하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 공용성을 기반으로 슬래브 두께에 대한 지불규정을 유도할 수 있는 두 가지의 개념을 정립하였다.

우선 PSI(Present Serviceability Index)의 값이 변화함에 따른 콘크리트 포장의 수명을 예측하는 AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) 피로파손공식 (AASHTO, 1993)을 이용하는 것이다. AASHTO 피로파손 공식은 역학적-경험적으로 개발된 공식으로 AASHO road test (Highway Research Board, 1962)의 결과를 바탕으로 만들어졌으며 다음과 같다.

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R \times S_o + 7.35 \times \log_{10}(D+1) - 0.06 + \frac{\log_{10}\left[\frac{\Delta PSI}{4.5-1.5}\right]}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 \times P_f) \times \log_{10}\left[\frac{S'_c \times C_d \times (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 \times J \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{(E_c/k)^{0.25}}\right]}\right] \quad (1)$$

여기서 W_{18} 은 18 kip 단축하중의 재하 횟수이며, Z_R 은 standard normal deviate, S_o 는 교통량과 성능 예측의 복합 표준 오차이며, D 는 인치 단위의 슬래브 두께이며, ΔPSI 는 초기 PSI와 최종 PSI (P_f)의 차이이며, S'_c 은 psi 단위의 콘크리트 modulus of rupture이며, J 는 하중전달계수이며, C_d 는 배수계수, E_c 는 psi 단위의 콘크리트 탄성계수이며, k 는 pci 단위의 하부지지력이다. 공식에서 볼 수 있는 바와 같이 슬래브의 두께가 설계하중 재하 횟수에 미치는 영향이 매우 큰 것을 알 수 있다.

이러한 피로파손공식을 이용하여 슬래브 두께 손실이 포장의 수명에 어떤 영향을 미치는지를 분석할 수 있으며 이를 이용하여 두께에 대한 지불규정을 개발하는 개념을 그림 1에서 보여준다. 우선 설계 두께를 공식에 대입하여 이에 해당하는 설계수명인 설계하중 재하횟수를 구한다. 그 후 특정양의 설계수명 손실을 선택하여 이에 해당되는 슬래브의 두께를 AASHTO 피로파손공식을 역으로 이용하여 구한다. 이렇게 구한 두께와 설계 두께의 차이가 지정한 수명 손실에 해당하는 두께 손실양이 된다. 따라서 이러한 방식으로 여러 범위의 두께 손실과 이에 해당하는 수명 손실과의 관계를 얻을 수 있다. 지불규정은 두께 손실 때문에 생긴 수명손실양의 설계수명에 대한 비율을 산정하여 이를 공사비에 적용하던지 아니면 공사비 대신에 생애주기비용을 계산하여 수명손실비용을 적용함으로써 개발할 수 있다. 예를 들어 설계수명인 설계하중 재하횟수가 일백만회인데 이러한 포

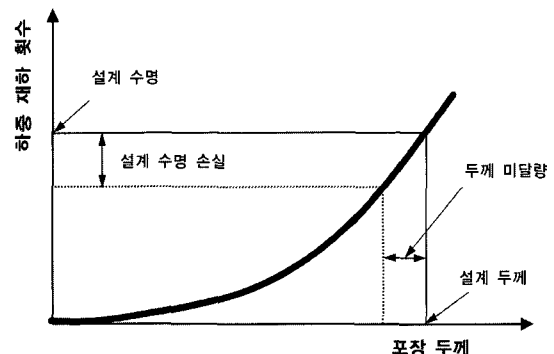


그림 1. AASHTO 공식을 이용한 슬래브 두께 지불규정 개념

장에 10mm의 두께 손실이 생겼으며 이에 해당하는 수명손실이 일십만 하중재하횟수라 하면 10mm의 두께 손실 때문에 10%의 수명손실이 생겼으며 따라서 이러한 경우에는 공사비의 10%를 삭감하여 지급하던지 아니면 생애주기비용을 계산하여 이의 10%를 삭감하여 지불하는 것이다.

이러한 개념을 이용하여 콘크리트 포장의 슬래브 설계 두께에 따라서 두께 손실기준이 어떻게 변화해야 하는지를 분석하였다. 먼저 설계수명을 10% 감소시키는 두께 손실양이 슬래브의 두께에 따라 차이를 보이는 지를 분석하여 그림 2에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 슬래브의 설계 두께가 두꺼울수록 두께 손실기준이 증가하는 것을 알 수 있다. 예를 들어 두께가 0.25m인 슬래브는 10%의 수명손실을 야기하는 두께 손실이 약 4.5mm인데 반해 두께가 0.35m인 슬래브는 10%의 수명손실을 보이는 두께 손실이 약 6mm이다. 따라서 지불규정을 설계수명과 연관시키면 슬래브의 설계 두께에 따라서 두께 손실기준이 변해야 함을 알 수 있다. 물론 두께가 두꺼운 슬래브일수록 두께 손실기준이 완화되어야 함을 알 수 있다. 그림 3은 설계수명 감소에 따른 두께 손실의 변화를 슬래브 두께 별로 보여 준다. 설계수명 감소량이 증가할수록 두께 손실이 거의 선형으로 증가하는 것을 알 수 있으며 일정한 설계수명 감소량에서는 이미 설명한 바와 같이 슬래브 두께가 두꺼울수록 허용 두께 손실이 커지는 것을 알 수 있다.

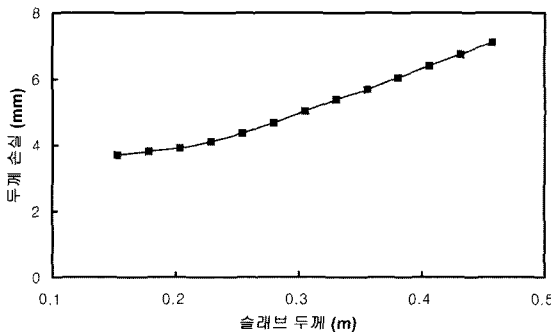


그림 2. AASHTO 공식을 이용하여 구한 슬래브 두께와 두께 손실과의 관계

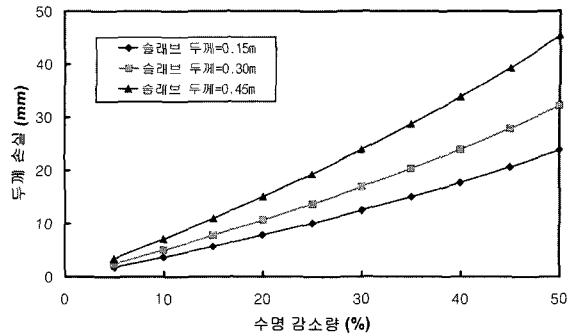


그림 3. AASHTO 공식을 이용하여 구한 포장수명 감소와 두께 손실과의 관계

슬래브 두께에 대한 지불규정을 공용성과 관련하여 유도할 수 있는 다른 방법은 콘크리트 포장의 슬래브 두께와 슬래브 응력과 관계 및 슬래브 응력과 포장수명과의 관계를 이용하는 것이다. 그림 4의 a 그래프에 나타낸 바와 같이 우선 슬래브 두께와 응력과의 관계를 이용하여 슬래브의 설계 두께에 대한 슬래브의 응력을 구한다. 이때 슬래브 두께와 응력과의 관계는 Westergaard 방정식(Westergaard, 1925), 변환영역에서의 해석법(Kim et al., 2002; Kim and McCullough, 2003), 유한요소법 등을 이용하여 구할 수 있다. 응력을 구한 후에는 응력과 강도와의 비율인 응력 레벨을 계산한다. 그 후 그림 4의 b 그래프에 나타낸 바와 같이 응력 레벨에 대한 설계수명을 피로파손공식을 이용하여 유출할 수 있다. 포장의 수명 손실에 대한 두께 손실을 구하기 위해서는 우선 수명손실양에 해당하는 응력 레벨의 증가량을 피로파손공식을 역으로 이용하여 구해 낸다. 그리고 응력 레벨 증가량에 강도를 곱하여 응력증가량을 계산한다. 이렇게 구한 응력증가량을 설계응력에 더하여 수명손실이 있을 때의 슬래브의 응력을 구하고 이에 해당하는 슬래브의 두께를 구하여 설계 두께와의 차이인 두께 손실을 구해 낸다. 이러한 개념을 도입하여 구한 두께 손실에 대한 지불규정의 적용은 앞에서 설명한 AASHTO 공식을 이용하여 두께 손실을 구했을 때와 같은 방법을 이용한다.

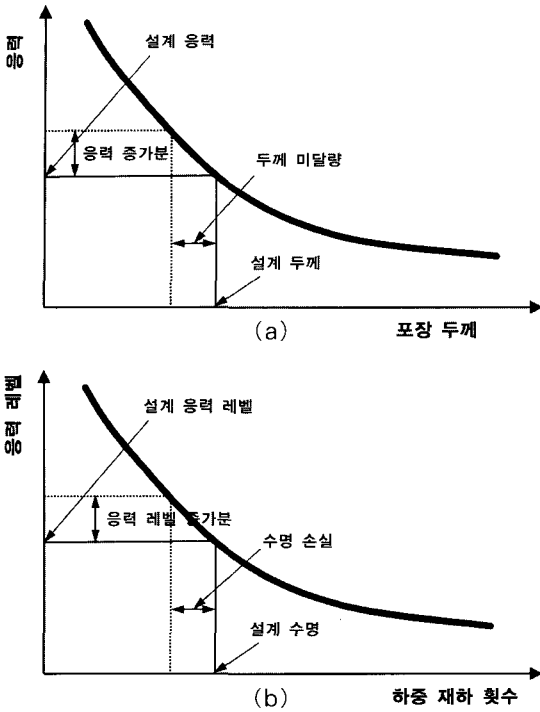


그림 4. 슬래브 응력 및 피로파손 공식을 이용한 슬래브 두께 지 불규정 개념

슬래브의 응력 및 피로파손공식을 이용한 지불규정 결정의 개념을 이용하여 콘크리트 슬래브 설계 두께에 따라서 두께 손실기준이 어떻게 변화해야 하는지를 분석하였다. 슬래브의 응력은 Westergaard 방정식을 이용하여 구했으며 포장수명을 예측하기 위한 피로파손공식은 지수형과 선형공식을 이용하였다. 지수형 피로파손공식으로는 Vesic과 Saxena가 제안한 공식(Vesic and Saxena, 1970)인 식(2)를 사용하였으며 선형 피로파손공식은 Kesler가 제안한 공식(Kesler, 1953)인 식(3)을 사용하였다.

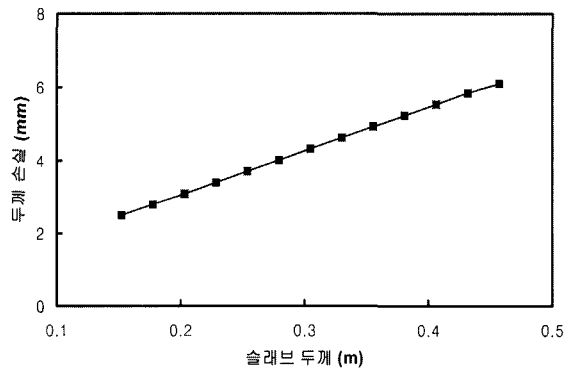
$$N = A \left(\frac{1}{S} \right)^B \quad (2)$$

$$\log_{10} N = aS + b \quad (3)$$

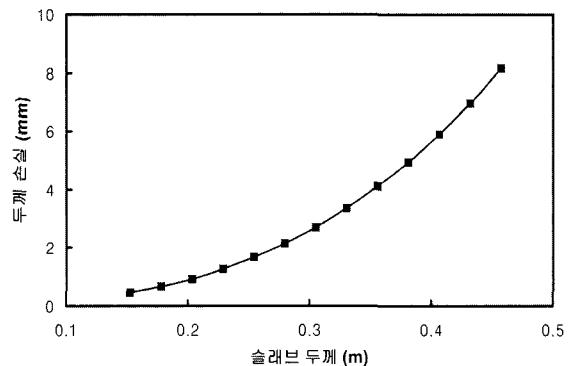
여기서 N 은 하중재하횟수이며, S 는 응력레벨, A, B, a, b 는 상수이다. Vesic은 A 를 225,000, B 를 4로 정

의하였으며 Kesler는 25GPa의 탄성계수를 가진 콘크리트에 대해서 a 를 -20.224, b 를 19.292로 32GPa의 탄성계수를 지닌 콘크리트에 대해서는 a 를 -22.07, b 를 17.81로 정의하였다.

앞에서와 같이 설계 수명을 10% 감소시키는 두께 손실량이 슬래브의 두께에 따라 어떠한 차이를 보이는지를 분석하여 그림 5에 나타내었다. 지수형과 선형 피로파손공식 모두 슬래브의 설계 두께가 두꺼울수록 두께 손실기준이 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 지수형 피로파손공식을 이용하였을 때는 슬래브 두께와 두께 손실이 거의 선형으로 비례하며 선형 피로파손공식을 사용하였을 때는 두께와 두께 손실과의 관계가 기하급수적으로 변화하는 것을 알 수 있다.



(a) 지수형 피로파손공식 이용



(b) 선형 피로파손공식 이용

그림 5. 피로파손 공식을 이용하여 구한 슬래브 두께와 두께 손실과의 관계

그림 6은 슬래브 두께와 두께 손실과의 관계를 앞서 설명한 AASHTO 공식과 지수형 및 선형 피로파손공식을 이용하여 구한 것을 비교하여 보여 준다. 어떤 방법을 이용하던지 슬래브 두께가 두꺼울수록 동일 수명감소(여기서는 10%)에 해당하는 두께 손실량이 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 슬래브의 두께가 일정할 때 두께 손실의 양은 사용하는 공식에 따라 차이가 있는 것을 알 수 있다. 따라서 피로파손 공식 중에 콘크리트 포장의 피로파손을 가장 적절하게 표현하는 공식을 선정하여 사용하는 것이 필요시 된다.

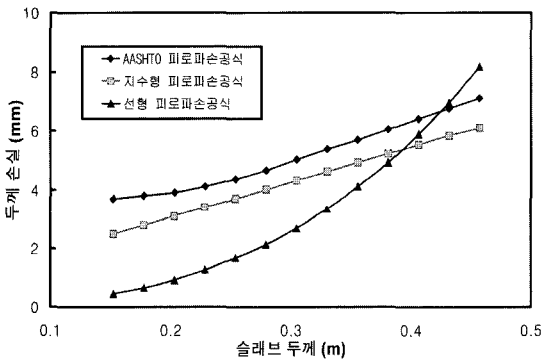


그림 6. 슬래브 두께와 두께 손실과의 관계 비교

콘크리트 슬래브의 두께가 0.3m일 때 포장수명 감소에 따른 두께 손실의 변화를 사용한 피로파손공식에 대하여 비교하여 그림 7에 나타내었다. 어떠한 피로파손공식을 이용하던지 간에 수명감소량이 증가할수록 두께 손실이 거의 선형으로 증가하는 것을 알

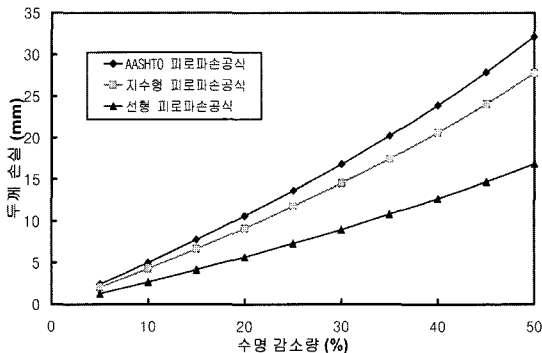


그림 7. 포장수명 감소와 두께 손실과의 관계 비교

수 있다. 하지만 두께 손실의 양은 이용한 공식에 따라 차이가 있는 것을 알 수 있다.

4. 슬래브 두께 측정

콘크리트 포장의 슬래브 두께에 대한 지불규정 적용을 위해서는 슬래브의 두께를 측정할 위치와 측정 방법을 결정해야 한다. 미국의 여러 주는 포장의 특정한 거리를 하나의 구간으로 정해 두고 이러한 구간마다 감독관이 정해주는 위치에서 두께를 측정하도록 하고 있다. 이때 측정값에서 두께 손실이 보이면 얼마만큼 떨어진 두 위치에서 다시 두께를 측정하여 세 개의 두께의 평균을 구해 이것을 그 구간에서의 슬래브 두께로 가정하여 지불규정을 적용한다. 두께 측정은 콘크리트 포장을 타설한 직후에 콘크리트가 굳기 전에 깊이를 잴 수 있는 막대모양의 dipstick을 이용하던지 아니면 콘크리트 경화 후에 코어를 채취하여 두께를 측정한다.

이렇게 일정구간 포장의 임의의 위치에서 한 개 또는 몇 개의 두께 측정으로 그 구간의 슬래브 두께를 대표하는 것은 그리 타당한 것은 아닌 것으로 보인다. 왜냐하면 슬래브의 두께가 위치에 따라 변화를 보일 수 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트 포장의 슬래브 두께가 종방향과 횡방향을 따라 어느 정도 변화를 보이는 지를 파악하기 위한 기초 연구로 줄눈콘크리트 포장의 슬래브 두께를 코어를 채취하여 측정해 보았다. 이를 위해 충북 황간 근처의 경부고속도로 폐도에서 한 개의 줄눈콘크리트 포장 슬래브에서 그림 8에 보인 바와 같이 여러 위치에서 8개의 코어를 채취하였다. 채취한 코어를 이용하여 측정한 슬래브의 두께는 그림에 보인 바와 같다. 이러한 분석에서 알 수 있는 바와 같이 슬래브의 두께는 동일한 슬래브 내에서도 위치에 따라 어느 정도 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 대체로 횡방향을 따라서는 바깥쪽 노건으로 갈수록 두께가 다소 증가하는 추세인 것을 볼 수 있으며 종방향을 따라서는 특

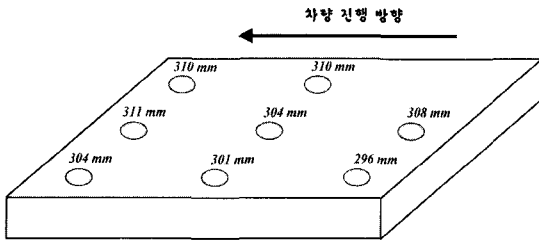


그림 8. 슬래브의 두께 변화 측정

정한 추세는 보이지 않지만 두께 변화가 있는 것을 뚜렷이 볼 수 있다. 이는 물론 하부층인 린콘크리트 층의 표면평탄성과 밀접한 관계가 있다. 코어를 이용하여 측정된 슬래브의 평균 두께는 306mm로 설계 두께인 300mm는 만족하는 것을 알 수 있다. 하지만 측정된 값 중 최소치는 296mm 이므로 4mm의 두께 손실이 있는 것을 알 수 있다. 따라서 만약 이러한 위치에서 측정된 코어를 이용하여 지불규정을 적용한다고 하면 평균 두께는 설계 두께를 만족하더라도 공사금액을 삭감해서 지급할 수도 있다는 문제점을 발견할 수 있다. 이러한 문제가 없게 하기 위해서는 두께 측정 위치 및 두께 측정 횟수 등에 대한 적절한 기준을 세워야 한다. 추후 슬래브 두께의 변화를 신설 및 기존포장의 여러 장소 및 슬래브 내의 여러 위치에서 측정함으로써 두께 변화의 특성을 파악하여 측정 위치의 기준을 설립하고자 한다.

슬래브 두께 측정 시 코어를 채취하여 두께를 측정할 경우에는 어떠한 방법으로 두께를 측정할 것인지에 대한 기준도 결정해야 한다. 이는 코어를 채취하였을 때 코어의 단면이 그리 일정하지 않기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 코어의 두께를 깎 때 측정하는 사람에 따라 어느 정도의 차이를 보이며 어떠한 방법으로 측정을 하는지 알아보기 위해서 5개의 다른 코어를 이용하여 10명의 토목공학전공 대학원 학생에게 두께를 측정해 보도록 하였다. 그림 9에 보인 바와 같이 3개의 코어인 코어 1, 2, 3번은 준농콘크리트 포장에서 채취하였으며 2개의 코어 4, 5번은 연속철근콘크리트 포장에서 채취한 코어를 이용하였다. 코어 1은 하부 단면이 상당히 매끄러운 코어이며

코어 2는 단면의 중앙부는 매끄러우나 주변의 콘크리트가 어느 정도 떨어져 나간 코어이며 코어 3은 코어의 하부 단면이 어느 정도 불규칙한 코어이다. 코어 4와 5는 연속철근콘크리트 포장의 최상위 하부층인 아스팔트 층이 부착되어 있는 상태에서 측정을 실시하도록 하였다.

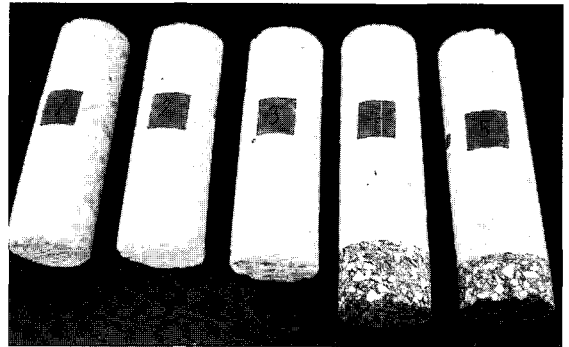


그림 9. 두께 측정을 위한 코어

표 4는 사람에 따라 코어의 두께를 측정한 방법을 나열하고 있다. 대부분의 사람이 줄자 대신에 막대자

표 4. 두께 측정방법 비교

| 번호 | 측 정 방 법 |
|----|---|
| 1 | 육안으로 최소 두께를 보이는 위치를 선정하여 측정. (막대자 사용) |
| 2 | 90도로 네번 나누어서 두께를 측정하여 평균을 구함. (막대자 사용) |
| 3 | 다섯점에 대한 두께를 측정하여 평균을 구함. (막대자 사용) |
| 4 | 단면을 8등분하여 각각에 대하여 연직 두께를 측정한 후 최대값과 최소값을 제외한 6개의 두께의 평균을 구함. (막대자 사용) |
| 5 | 평판을 코어 상단에 대고 한 위치에서 연직두께를 구함. (줄자 사용) |
| 6 | 평판을 코어 상단에 대고 한 위치에서 연직두께를 구함. (막대자 사용) |
| 7 | 평판을 코어 상단에 대고 한 위치에서 연직두께를 구함. (막대자 사용) |
| 8 | 육안으로 최대, 최소 두께를 파악한 후 그 두께의 평균을 구함. (막대자 사용) |
| 9 | 180도로 두 번 나누어서 두께를 측정하여 평균을 구함. (막대자 사용) |
| 10 | 120도로 세 번 나누어서 두께를 측정하여 평균을 구함. (막대자 사용) |

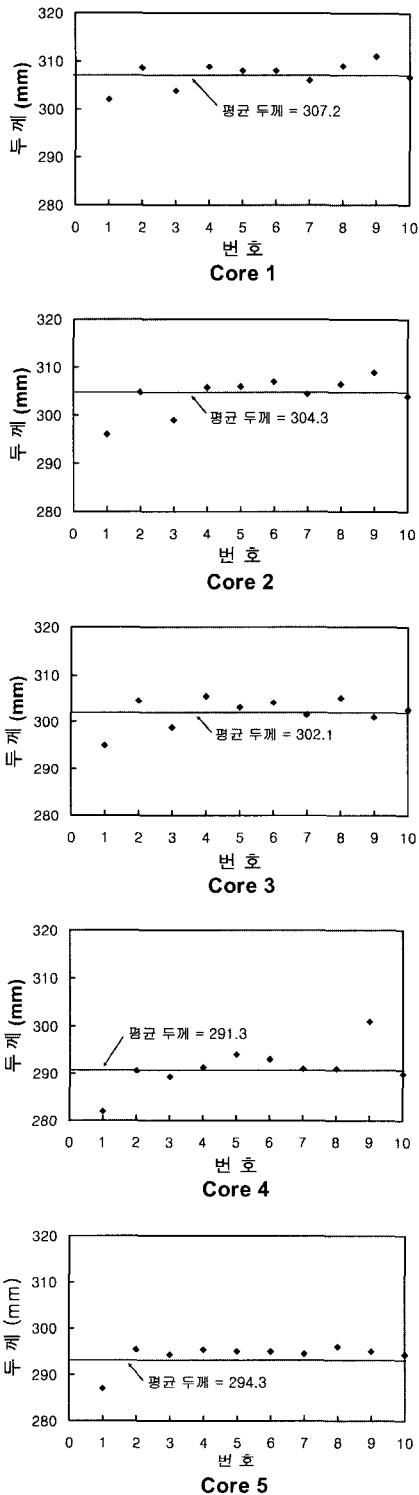


그림 10. 두께 측정치 비교

를 사용한 것을 알 수 있으며 측정방법을 크게 분리하면 세 가지로 분석할 수 있다. 먼저 가장 많은 사람인 6명이 채택한 방법은 코어의 두께를 다른 각도에서 측정하여 평균을 구한 것이다. 이때에도 최소 2점부터 최대 8점까지 나누어서 측정을 시도하였다. 다른 방법은 3명이 채택한 방법으로 평판을 코어의 단면에 대어 두께를 측정하는 것이다. 이때의 두께 측정값은 최대 두께에 가까워지게 된다. 이 외에 반대로 1명은 두께가 최소로 보이는 위치를 선정하여 두께를 측정하였다. 이와 같이 사람에 따라 코어의 두께를 측정하는 방법이 다른 것을 알 수 있으며 가장 보편적인 방법은 두께를 여러 각도에서 측정하여 평균을 구하여 사용하는 것으로 분석되었다. 따라서 이러한 측정 방법을 지불규정에 포함시키기 위해서는 이러한 개념을 지닌 표준화된 측정장치의 개발이 필요시 된다.

그림 10은 각 코어 별로 10명이 두께를 측정하는 데이터를 보여준다. 코어 2와 3이 앞에서 설명한 바와 같이 단면의 불규칙성이 크기 때문에 사람에 따른 두께 측정치의 변화범위도 코어 1에 비해 다소 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 코어 4와 5는 콘크리트 층 밑면에 아스팔트 층이 붙어있어서 층의 경계가 더욱 뚜렷이 나타나는데 코어 4는 층의 경계가 어느 정도 변화를 보이는 코어이며 코어 5는 층의 경계가 매우 일정해 보이는 코어이다. 따라서 코어 4에서는 두께 측정치의 변화 폭이 다소 큰 것을 볼 수 있으며 코어 5에서는 예상한 바와 같이 사람에 따른 두께 측정치가 상당히 일정한 것을 볼 수 있다. 그럼으로 이미 언급한 바와 같이 두께 측정을 하였을 때 측정된 사람에 따른 측정치의 변화 폭을 최소화하기 위해서 두께 측정기준방법의 개발 및 측정장치의 고안이 중요한 사항임을 알 수 있다.

코어의 두께를 10명이 측정하는 결과를 분석하여 표 5에 나타내었다. 측정된 사람에 따른 표준편차를 살펴보면 그림 10의 데이터에서도 볼 수 있는 바와 같이 단면이 매끈한 코어 1과 5에서 가장 작은 값을 보였다. 코어의 단면의 불규칙할 경우는 측정치의 표준편차가 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 지불규정에



서 두께 손실의 범위를 결정할 때 이러한 측정편차에 대한 고려가 포함되어야 한다. 예를 들어 측정편차가 2mm 이상인데 불구하고 지불규정에서의 두께 손실에 대한 범위를 2mm 이하로 하면 문제가 될 소지가 있기 때문이다. 본 연구에서는 10명의 측정치를 가지고 분석을 하였기 때문에 표본의 수가 작아서 신뢰도는 떨어지지만 지불규정의 두께 손실범위 결정을 위하여 95%와 99%의 신뢰도에 대한 측정편차를 구하여 표 5에 나타내었다. 만약에 95%의 신뢰도를 이용한다면 지불규정의 두께 손실범위를 4mm 이상으로 설정하는 것이 타당하며 99%의 신뢰도를 이용하면 6mm 이상으로 두께 손실 범위를 설정하는 것이 타당하다. 따라서 상당히 많은 사람들의 측정치를 이러한 방법으로 분석하여 지불규정의 두께 손실 범위를 결정할 수 있다.

표 5. 두께 측정결과

| | Core 1 | Core 2 | Core 3 | Core 4 | Core 5 |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 평균두께(mm) | 307.2 | 304.3 | 302.1 | 291.3 | 294.2 |
| 표준편차(mm) | 2.6646 | 3.8987 | 3.1896 | 4.6879 | 2.5783 |
| 95% 신뢰구간에 대한 평균과 한계값의 차(mm) | 2.3 | 3.3 | 2.7 | 4.0 | 2.2 |
| 99% 신뢰구간에 대한 평균과 한계값의 차(mm) | 3.1 | 4.5 | 3.7 | 5.5 | 3.0 |

5. 요약 및 결론

본 논문은 콘크리트 포장 시공 시 슬래브 두께에 대한 지불규정 개발을 위해 기초적으로 수행한 연구 내용을 기술하였다. 외국의 슬래브 두께에 대한 지불규정 적용에 대하여 분석을 하였으며, 공용성에 기반을 둔 지불규정 개발을 위한 개념을 제시하였다. 그리고 기존 콘크리트 포장의 두께를 측정하여 위치에 따른 슬래브 두께의 변화를 파악하였으며 코어를 이용하여 두께를 측정할 때의 측정방법 및 측정편차에 대한 분석을 수행하였다. 이러한 연구결과 다음과 같

은 결론을 유출할 수 있었다.

- 미국의 슬래브 두께에 대한 지불규정은 포장의 공용성에 기반을 두지 않고 개발된 후 적절한 수정을 통해 사용되어 지고 있으며 주에 따라 다른 기준을 적용하고 있다.
- 미국에서 가장 많이 쓰이고 있는 두께에 대한 지불규정은 설계 두께에 관계없이 두께 손실의 범위를 정해 두고 이에 따라 공사비를 삭감하는 방법이다.
- 공용성에 기반을 둔 두께에 대한 지불규정 개념을 개발하기 위하여 AASHTO 피로파손공식 및 슬래브 두께와 응력과의 상관관계와 응력레벨과 콘크리트 포장수명과의 상관관계를 이용하는 방법을 제시하였다.
- 슬래브 두께가 두꺼워질수록 지불규정의 두께 손실기준 범위도 넓어져야 한다.
- 두께 손실이 커질수록 포장의 수명감소는 거의 선형적으로 증가하게 된다.
- 기존 포장의 슬래브 두께 측정결과 코어링 위치에 따라 측정 두께의 편차를 보였으며 따라서 두께 측정 위치에 대한 기준을 정립해야 한다.
- 코어의 두께를 측정할 때 사람에 따라 측정방법과 측정치의 차이가 있으므로 기준이 되는 두께 측정방법의 개발 및 측정장치의 고안이 필요시 된다.
- 측정하는 사람에 따른 두께 측정치의 편차 및 위치에 따른 슬래브의 두께 편차를 많은 수의 데이터를 이용하여 구함으로써 두께에 대한 지불규정의 두께 손실범위를 결정할 수 있는 방법을 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원의 건설교통R&D 정책 인프라사업의 일환인 성능중심의 건설기준 표준화 연구 - 도로포장 및 콘크리트 구조물 중심 연구 중 공용성을 기반으로 한 지불규정 개발 연구에서 수행되었습니다.

참고문헌

Alabama Department of Transportation (2006)
Standard Specifications for Highway



Construction. Alabama Department of Transportation.

American Association of State Highway and Transportation Officials (1993) *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. AASHTO,

Burati, J. L., Weed, R. M., Hughes, C. S. and Hill, H. S. (2004) "Evaluation of Procedures for Quality Assurance Specification," *Report FHWA-HRT-04-046*, Department of Civil Engineering, Clemson University.

California Department of Transportation (2006) *Standard Specifications*. California Department of Transportation.

Connecticut Department of Transportation (1999) *Standard Specifications for Roads, Bridges, and Incidental Construction*. Connecticut Department of Transportation,

Hawaii Department of Transportation (1994) *Highway's Standard Specifications*. Hawaii Department of Transportation.

Highway Research Board (1962) "Special Report 61E: The AASHTO Road Test," *Report 5, Pavement Research*, HRB, National Research Council, Washington, D.C.

Indiana Department of Transportation (2006) *Standard Specifications*. Indiana Department of Transportation.

Kesler, C. E. (1953) "Effect of Speed of Testing on Flexural Fatigue Strength of Plain Concrete," *Proceedings of Highway Research Board 32*, No. 5, pp. 251-258.

Kim, S. M. and McCullough, B. F. (2003) "Dynamic Response of Plate on Viscous Winkler Foundation to Moving Loads of Varying Amplitude," *Engineering Structures*, Elsevier Science Ltd., Vol. 25, Issue 9, pp. 1179-1188.

Kim, S. M., Won, M. C. and McCullough, B. F. (2002) "Dynamic Stress Response of Concrete Pavements to Moving Tandem-Axle Loads," *Transportation Research Record 1809*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 32-41.

Massachusetts Department of Transportation (1995) *Standard Specifications for Highway and Bridges*. Massachusetts Department of Transportation.

Minnesota Department of Transportation (2000) *Standard Specifications for Construction*. Minnesota Department of Transportation.

New York Department of Transportation (1995) *Standard Specifications*. New York Department of Transportation.

North Carolina Department of Transportation (2002) *Standard Specifications for Roads and Structures*, North Carolina Department of Transportation.

Ohio Department of Transportation (1997) *Construction and Material Specifications*. Ohio Department of Transportation.

Oregon Department of Transportation (1996) *Standard Specifications*. Oregon Department of Transportation.

Pennsylvania Department of Transportation (2000) *Standard Specifications*. Publication 408/2000-8, Pennsylvania Department of Transportation.

Texas Department of Transportation (2004) *Standard Specifications for Construction and Maintenance of Highways, Streets, and Bridges*. Texas Department of Transportation.

Vesic, A. S., and Saxena, S. K. (1969) "Analysis of Structural Behavior of AASHTO Road Test Rigid Pavements," *Highway Research Record 291*, HRB, pp. 156-158.

Virginia Department of Transportation (2002) *Road and Bridge Specifications*. Virginia Department of Transportation.

Westergaard, H. M. (1925) "Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis," *Public Roads*, Vol. 7, pp. 25-35.

West Virginia Department of Transportation (2000) *Standard Specifications, Roads and Bridges*. West Virginia Department of Transportation.

접 수 일: 2007. 5. 22
 심 사 일: 2007. 5. 22
 심사완료일: 2007. 5. 22