

## 베일리 방법을 이용한 아령형 섬유보강 아스팔트 혼합물의 골재 배합설계법 연구

함상민<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 SOC성능연구소 도로포장연구실

## A Study on Aggregate Mix Design of Dumbbell-shape Fiber Reinforced Asphalt Concrete Mixture using Bailey Method

Sang-Min Ham<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Highway Pavement Research Division, SOC Research Institute,  
Korea Institute of Construction Technology

**요 약** 본 연구는 아스팔트 혼합물의 주요 파손 형태인 피로균열과 러팅 저항성을 증가시키기 위한 섬유보강아스팔트 혼합물을 개발하기 위한 연구로서, 보강섬유를 고려한 골재 혼합물의 배합설계법에 대한 연구 결과를 나타내고 있다. 실험을 통하여 다졌을 때와 다지지 않았을 때의 단위중량 및 단위중량 비를 산정하였으며, 굵은 골재와 중간골재의 단위 중량비는 1.100, 1.119, 잔골재의 단위 중량비는 1.137로 굵은 골재나 중간 골재에 비하여 다소 큰 것으로 확인되었다. 부피 개념을 이용하여 특정 골재(4.75mm, #4)를 아령형 보강 섬유로 치환하는 방법을 베일리 방법을 사용하여 확인하였는데 1950g의 혼합물에 0.3%의 보강 섬유를 첨가하였을 때 섬유와 교체되어야 할 PCS골재의 무게는 11.88g으로 계산되었다. 따라서 본 연구에서는 골재와 보강섬유의 특성을 최대한 설계에 반영할 수 있는 골재의 배합 설계 방법 개발을 통하여 기존의 수퍼페이브 배합설계법이 가지는 단점을 극복하고 자원 활용을 극대화 하고자 한다.

**Abstract** The aim of this study was to develop a fiber-reinforced asphalt mixture that was designed to do the following: 1) address fatigue cracks, which is a major source of damage; and 2) increase the rutting resistance. This study reports the effects of the aggregate mixture design that incorporates a dumbbell-shaped fiber. An experiment was carried out to measure the unit weights and unit weight ratios between the mixture that was compacted and the one that was not. A method to substitute a specific aggregate mixture with the dumbbell-shaped fiber was confirmed using the volume concept according to the Bailey method. The results showed that the weight of the PCS aggregate mixture that need to be replaced was 11.88g when a 0.3% reinforcing fiber was added to the 1950g mixture.

**Key Words** : Bailey Method, Aggregate Mix Design, Fiber Reinforced Asphalt, Rutting, Fatigue

### 1. 서론

본 연구에서는 아스팔트의 주요 파손 형태인 피로균열과 러팅에 대한 저항성을 증가시키기 위한 섬유보강 아스팔트 혼합물(Fiber Reinforced Asphalt, FRA)개발에 필요한 최적골재배합 설계에 대한 연구 방법 및 과정을 나

타내고 있다. 현재 아스팔트 혼합물을 생산하기 위한 골재의 배합설계는 수퍼페이브 배합 설계법(Superpave mix Design)을 따르고 있는데, 이는 상한 및 하한입경 제한 내에 있으며 제한구역(restrict zone)을 통과하지 않는 골재 입도를 모두 허용하는 방식을 취하고 있다. 그러나 이러한 방법은 주어진 골재의 입도분포를 획득하기 위하여

본 논문은 한국건설기술연구원의 다기능 복합도로 포장 시스템 개발 연구과제로 수행되었음.

\*Corresponding Author : Sang-Min Ham(Korea Institute of Construction Technology)

Tel: +82-31-995-0855 email: [genie83@kict.re.kr](mailto:genie83@kict.re.kr)

Received October 16, 2013 Revised (1st November 02, 2013, 2nd November 21, 2013) Accepted December 5, 2013

골재를 단입도로 관리해야한다는 어려움과 상한 및 하한 입경 제한과 제한 구역에 대한 조건을 만족하는 모든 골재 혼합물의 공용성을 동일시하여 그 차이를 설계에 반영하지 못하고 있어, 효율적인 골재활용을 제약하고 있다. 본 연구에서는 골재와 보강 섬유(fiber)의 특성을 최대한 설계에 반영할 수 있는 골재 및 혼합물의 배합설계 방법 개발을 통하여 기존의 수퍼페이드 배합설계법이 가지는 단점을 극복하고 최적의 공용성을 나타내는 골재 배합 설계법을 제시하여 자원 활용을 극대화하는 것을 목적으로 한다.

## 2. 베일리 방법

아스팔트 혼합물은 다양한 크기의 골재 및 아스팔트 바인더 혼합물이다. 서로 다른 크기의 골재는 적절한 배합설계에 따라 혼합되어 최대의 골재 간 맞물림 응력 발휘를 목표로 한다. 일반적으로 굵은 골재와 잔골재 간 크기 및 부피함량 조절 실패로 다짐이 어렵거나 최대의 골재 간 맞물림 효과를 기대할 수 없게 된다. 따라서 서로 다른 크기의 골재함량을 골재크기를 고려한 상대적 부피비로 결정하는 것은 배합설계에서 매우 중요하다. 또한 아스팔트 콘크리트 혼합물 시편의 체적 또는 물리 특성과 현장공용성능과의 유의적 상관관계가 최적 아스팔트 포장 두께 설계에 매우 중요한 요소이므로 기존의 아스팔트 콘크리트 혼합물 배합설계에서는 최적 아스팔트 함량의 혼합물 결정이 배합설계의 최종목표로 간주된다. 그러나 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성은 미국 수퍼페이드의 VMA 규정 이외에 골재의 구조 특히, 굵은 골재의 맞물림에 연관성이 있다고 믿고 있지만, 기존 혼합물 배합설계 절차에서는 그에 대한 타당한 굵은 골재의 맞물림에 대한 정량화가 어렵다. 따라서 폴리머 섬유 혼입으로 최대 골재 맞물림 응력 발휘를 기대하기 위해서는 골재의 입도 및 부피비 평가 방식의 Bailey Method를 통하여 골재의 맞물림 효과에 대한 정량화를 폴리머 혼입 혼합물 배합설계 과정에 연계할 필요성이 있다. Bailey 방법의 적절한 굵은 골재 부피비를 결정하는 변수인 CA ratio (Coarse aggregate ratio)는 혼합물의 부피 변수인 VMA(Void of Mineral Aggregate)와 매우 큰 상관관계가 있다. 따라서 CA 값은 혼합물의 다짐정도와도 매우 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있다. Bailey Method에서는 굵은 골재와 잔골재의 개념정의 즉, 굵은 골재와 잔골재를 구분하는 Packing factor 정립 및 체적에 의해 조합된 골재와 혼합물의 평가 등을 포함한다. 굵은 골재와 잔골재의 분류를 위해 그 기준점을 다음과 같은 방법으로 정

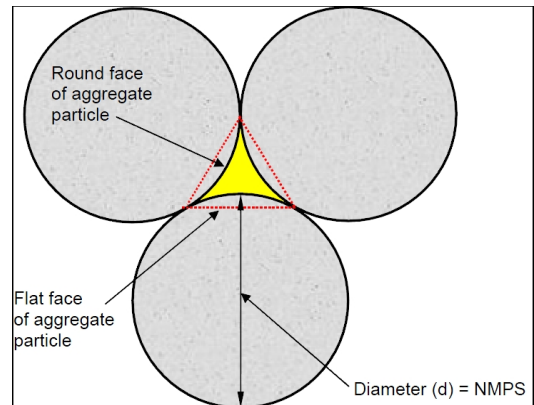
의하였다.[1,2,3]

$$PCS = NMPS \times 0.22$$

PCS : 잔골재와 굵은골재를 나누는 기준 체 (Primary Control Sieve)

NMPS : 골재 공칭최대치수 잔류를 10%이상의 첫 번째 체보다 한 단계 큰 체 (Nominal Maximum Particle Size)

위의 식에서 0.22 값은 Fig. 1과 같이 서로 인접한 굵은 골재 사이에서 만들어 내는 공극의 크기를 굵은 골재 직경에 대비해 기하학적으로 계산하여 결정한 값이며, 골재 공칭최대치수에 따른 PCS 계산한 값은 다음 Table 1과 같다.[1,4]



[Fig. 1] Two-dimensional aggregate packing model

[Table 1] Primary control sieve(PCS) by nominal maximum size of aggregate

| NMPS    | NMPS × 0.22 | Primary Control Sieve (PCS) |
|---------|-------------|-----------------------------|
| 37.5 mm | 8.250       | 9.5 mm                      |
| 25.0 mm | 5.500       | 4.75 mm                     |
| 19.0 mm | 4.180       | 4.75 mm                     |
| 12.5 mm | 2.750       | 2.36 mm                     |
| 9.5 mm  | 2.090       | 2.36 mm                     |
| 1.75 mm | 1.045       | 1.18 mm                     |

굵은 골재는 혼합물 내에서 대부분의 공극을 만들어낸다. 이와 같은 공극을 잔골재(Fine aggregate)들이 메운다는 관점에서 적절한 골재별 단위중량의 조합으로 최대의 골재 맞물림을 유도하기위해 중량배합보다는 체적배합의

중요성을 강조할 필요가 있다. Bailey 방법은 최초 굵은 골재에서 만들어 내는 공극으로부터 출발하며 공극을 메우는 잔골재는 혼합물의 NMPS가 25mm인 경우, PCS는 4.75mm로 4.75mm(#4)체에 남는 골재가 굵은 골재로, 통과하는 골재는 잔골재로 분류된다. Bailey Method에서는 굵은 골재와 잔골재 분류 기준 이외에 균형 잡힌 골재 부피비 및 최대의 골재 간 맞물림 효과를 위해 중간체(Half sieve) 개념을 도입하였으며, 중간체는 NMPS의 1/2 크기의 체를 의미하며 다음과 같이 표현할 수 있다.[1,2,3]

$$Half\ sieve = 0.5 \times NMPS$$

$$SCS = 0.22 \times PCS$$

### 3. FRA 복합 포장 혼합물 배합 설계

#### 3.1 Bailey method의 응용

미국의 SHRP 배합설계에서 골재입도는 시방에 정의한 공극율 (SHRP의 경우 4%)에 따라 시험골재배합이 설계배합으로 결정되는 반면, Bailey 방법은 골재혼합을 위한 체계적인 방법으로서 최대의 맞물림 효과를 확보하기 위해 굵은 골재 및 잔골재를 PCS, SCS 및 TCS등에 따라 구분하여 각기 형성되는 공극을 단위중량으로 조절하는 방법이다.

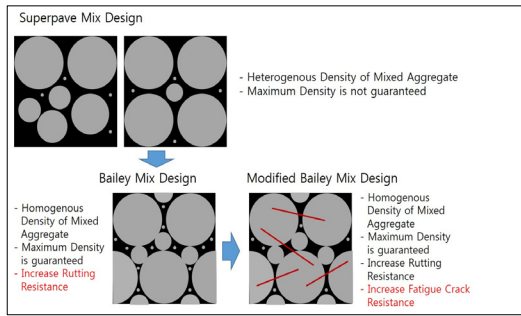
Bailey Method의 연구자들은 혼합물이 적절한 공용성능을 발휘하기 위해서는 충분히 큰 골재 입자가 형성하는 공극을 작은 입자가 메움으로써 최대의 맞물림 및 밀도를 나타내는 골재혼합이 완성되는 개념으로 출발한다. 그러나 단위중량으로 결정되는 골재 간의 배합비로 결정되는 최종 혼합물의 분석 또는 정해진 비율시방에 이용되는 PCS, SCS 및 TCS가 경험적으로 결정된 지수(0.22 또는 0.50)를 사용함으로써 적용되는 골재의 밀도가 항상 적합한 골재 구성을 나타낸다고 확신할 수 없는 문제점이 있다.[4]

예를 들어, 굵은 골재가 원형에서 벗어나 연속되지 않은 각기 다른 크기의 골재를 포함하는 경우, 굵은 골재와 잔골재의 혼합구조 사이에서 맞물림을 형성하지 못하고 떠다닐 것이다. 따라서 혼합물의 골재 입도 내에서 각기 다른 크기의 골재가 연속적으로 접하면서 맞물림 효과를 나타내는 적절한 크기의 골재입도 범위를 파악하는 것이 중요할 것으로 판단된다. 그러므로 Bailey 방법에 골재의 편평 세장율이 고려된 PCS 지수(0.22) 및 중간체 지수(Half Sieve 0.50)를 결정하는 절차를 추가할 필요가 있다. 이에 따라 아스팔트 혼합물에서의 골재 맞물림을 나

타내는 굵은 골재의 적절한 범위에 대한 경계조건이 수립된다면 골재 혼합물입도와 아스팔트 콘크리트 혼합물의 공용성능의 상관관계의 신뢰도가 크게 개선될 것으로 판단한다.

아스팔트 바인더의 점착력 및 방수특성은 혼합물의 인장강도와 크게 관계되며, 골재 간 결합력(Interlocking Force)은 굵은 골재 및 잔골재의 맞물림을 통해 발휘된다. 따라서 섬유보강 아스팔트 혼합물의 최대의 골재 간 맞물림 응력을 유도하기 위해서는 혼합물을 상기한 단일 공칭 최대 골재 치수에 의한 단일 VMA 기준에의한 입도 조정 보다는 아스팔트 혼합물에 혼입되는 섬유의 규격을 감안하여, 섬유 혼입비가 가장 크게 영향을 받는 주요 골재 크기(Primary Control Sieve: PCS)를 평가할 필요가 있다. 이를 위해 기본적으로 PCS를 기준으로 골재 입도를 굵은 입도 및 잔골재 입도로 분류하여 골재의 맞물림 효과에 대한 정량화 방법(Bailey Method)을 응용할 필요가 있다.

앞서 언급한 바와 같이, 베일리 골재 배합 설계법은 골재의 최대 밀도를 유지하여 러팅에 대한 저항성을 정량적으로 평가하고 향상시킬 수 있다는 장점이 있으나, 인장응력에 의하여 발생하는 피로균열에 대한 저항성을 보장할 수 없다는 단점이 있다. 아스팔트 혼합물의 피로균열에 대한 저항성을 증대시키기 위한방법으로는 아스팔트 바인더의 개질과 함께 보강섬유를 활용하는 방법이 활용되고 있는데, 보강섬유를 사용할 경우에는 아스팔트 혼합물에 적용되는 총중량에 대하여 보강섬유의 무게를 결정하고 보강된 바인더의 특성이나 보강된 아스팔트 혼합물의 특성을 물리적 실험을 통하여 평가하는 간접적인 방법이 주로 사용된다. 이러한 방법은 배합량을 결정하기 용이하다는 장점이 있으나, 골재, 아스팔트 및 보강섬유 사이의 상호 연관성을 혼합물 내에서 정량화하지 못하며, 이를 설계시점에서 조절할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 피로균열과 러팅에 대한 저항성을 극대화한 섬유보강 아스팔트 혼합물의 배합 설계법을 개발하기 위하여, 보강 섬유량 결정 방법을 제시하였다. 다음 Fig. 2는 베일리의 최대밀도를 위한 골재배합과 보강섬유의 역할을 도식적으로 나타내고 있는데, 베일리 골재배합 설계법의 장점인 러팅에 대한 저항성 증가와 함께, 보강 섬유에 의한 균열에 대한 저항성 증가를 기대할 수 있음을 알 수 있다.[5]



[Fig. 2] Concepts of the bailey method and modified bailey method

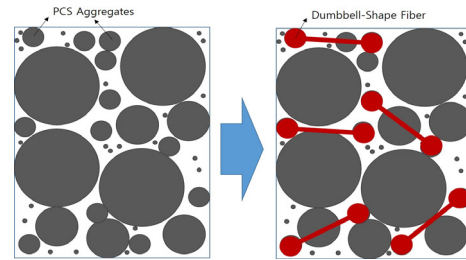
### 3.2 체적 특성

베일리 골재 배합설계법의 장점을 그대로 유지하기 위해서는 골재 마찰력의 중심이 되는 굵은 골재의 구조를 방해하지 않는 상태에서 보강섬유를 첨가할 수 있는 방법이 제시되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 기존의 골재구조를 그대로 유지한 상태에서 아령형태의 보강섬유를 추가하기 위하여 추가되는 보강섬유의 부피만큼 잔골재에 해당하는 골재를 제거하는 방법을 따르도록 하였다.

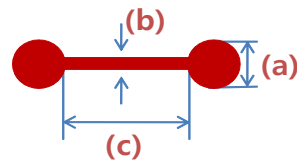
한편, 베일리 골재 배합 설계법은 동일한 부피에서 중량을 최대화하는 개념을 택하고 있기 때문에 골재 혼합물의 단위중량이 골재간의 마찰력 또는 맞물림에 영향을 미치는 중요한 평가기준이 된다. 기존의 보강섬유를 일반적인 골재 배합 설계법을 따르는 골재 혼합물 또는 아스팔트 혼합물에 혼입하는 경우, 전체 무게에 대한 비율을 기준으로 정상화하는 것이 일반적이다. 이는 무게를 기준으로 혼입량을 결정하는 방법이 혼입량 조절에 유리하기 때문이며, 보강섬유는 골재와 아스팔트 바인더의 무게에 대하여 0.2% - 0.9%를 혼입하는 것이 일반적이다. 이러한 혼입량 결정방법은 보강섬유가 골재구조에 영향을 미치지 않으며 바인더의 함량에만 영향을 미치는 첨가물로 고려되는 경우에만 유의하다.

그러나 본 연구에서 활용되고 있는 아령형 보강섬유와 같이, 보강섬유의 부피가 골재구조에 영향을 미쳐서 첨가물이 아닌 골재 대체물로 고려되어야 하는 경우에는 보강섬유의 무게뿐만 아니라 부피도 동시에 고려되는 것이 보다 합리적이다. 아래 Fig. 3는 위의 베일리 방법에 의하여 결정된 골재혼합물 중의 PCS 골재가 아령형 보강섬유에 의하여 치환되는 개념을 나타내고 있다. 사용자의 결정 또는 공용성에 기준한 배합설계 실험결과에 따라서 골재 혼합물 및 바인더 중량에 대하여 일정 비율에 해당하는 무게에 해당하는 PCS 골재가 아령형 보강섬유로 치환된다. 따라서 본 연구에서 사용되는 보강 섬유량을 나

타내는 0.2% - 0.9%는 전체 골재 및 바인더의 무게에 대한 보강섬유의 무게비율이 아니라 치환될 PCS골재의 무게비율이다. 이렇게 일반적인 지표와 다른 의미를 갖는 보강 섬유량의 개념은 베일리 골재 배합설계방법에서 얻어진 최적의 골재구조를 고려하면서 일반적인 보강섬유에 사용되는 단위개념을 동시에 사용하기에 편리하다. 한편 아래 Fig. 4와 Table 2에 나타난 바와 같이, 양 끝단의 구형 부분이외에도 중간 봉 부분의 부피도 치환에 사용되는 보강섬유의 부피로 고려되었다.



[Fig. 3] Role of reinforcing fibers on the bailey design method

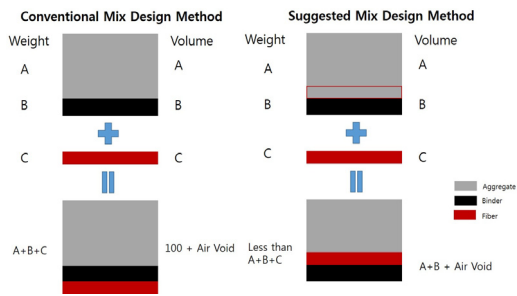


[Fig. 4] Dumbbell-shape fiber

[Table 2] Material properties of a dumbbell-shape fiber

| Diameter of Ball (cm) (a) | Diameter of Bar (cm) (b) | Length of Bar (cm) (c) | Volume (cm <sup>3</sup> ) | Weight (g) | Specific Gravity (g/cm <sup>3</sup> ) |
|---------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------------|------------|---------------------------------------|
| 0.2                       | 0.1                      | 2.7                    | 0.03                      | 0.04       | 1.35                                  |

아래 Fig. 5는 일반적인 배합설계에서 보강섬유를 고려했을 경우의 무게 및 부피 특성(a)과 베일리 골재 배합 설계에서 아령형 보강섬유를 고려했을 경우의 무게 및 부피 특성(b)을 나타내고 있다. 일반적인 배합 설계법에서는 보강섬유가 추가된 만큼 골재와 부피가 증가하지만 보강섬유를 고려한 베일리 배합 설계법에서는 추가된 보강섬유의 부피만큼 골재를 치환하기 때문에, 전체중량이 각각의 골재, 바인더, 보강섬유의 무게보다 작아지는 것을 알 수 있다.



[Fig. 5] Comparison of Bailey design method

### 3.3 Bailey method를 활용한 배합설계

본 연구에서는 굵은 골재(CA#1), 중간 골재(CA#2), 잔골재(FA#1)의 3가지 골재더미(stock pile)를 사용하는 일반적인 개립도(Coarse graded) 골재혼합물의 최적 골재 배합비를 얻기 위하여 베일리 골재 배합설계법이 사용되었다. 위의 3개의 골재더미 각각의 입도특성과 합성입도 특성은 Table 3에 나타나 있다.

[Table 3] Example of bailey aggregate gradation(coarse gradation)

| Sieve Size (mm) | CA#1        |          | CA#2        |          | FA#3        |          |
|-----------------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|
|                 | Passing (%) | Mass (g) | Passing (%) | Mass (g) | Passing (%) | Mass (g) |
| 25.0            | 100.0       | 0        | 100.0       | 0        | 100.0       | 0        |
| 19.0            | 94.0        | 792      | 90.9        | 1206     | 100.0       | 0        |
| 12.5            | 30.0        | 8448     | 69.7        | 2796     | 100.0       | 0        |
| 9.5             | 24.7        | 700      | 56.7        | 1709     | 50.0        | 7500     |
| 4.75            | 6.0         | 2468     | 31.3        | 3356     | 38.2        | 1770     |
| 2.36            | 5.0         | 132      | 22.0        | 1222     | 35.0        | 480      |
| 1.18            | 5.0         | 0        | 13.0        | 1194     | 32.0        | 450      |
| 0.60            | 2.0         | 396      | 7.4         | 742      | 30.0        | 300      |
| 0.30            | 2.0         | 0        | 1.8         | 732      | 29.0        | 150      |
| 0.15            | 1.0         | 132      | 1.0         | 113      | 10.0        | 2850     |
| 0.075           | 0.2         | 106      | 0.4         | 74       | 9.2         | 120      |
|                 |             | 26       |             | 56       |             | 1380     |
| Total Mass(g)   |             | 13200    |             | 13200    |             | 15000    |

### 3.4 실내 실험

골재더미의 무게 또는 부피의 특성을 이용하여 공극을 최소화하는 골재의 배합비를 결정하는 베일리 골재배합 설계방법을 사용하기 위해서는 각 골재 더미의 다지지 않은 골재의 무게(loose aggregate weight)와 다진 골재의 무게(roddeed aggregate weight)를 확인하기 위한 실험이 진행되어야 한다. 이를 결정하기 위하여, AASHTO T-19를 따르는 골재다짐 실험을 진행하였으며, 각 조건에 대하여 실험을 3회 반복하여 평균값을 이용하도록 하였다.[6]

베일리 방법에서는 잔골재의 다진 골재 중량을 필요로 하지 않지만, 잔골재의 단위 중량비를 확인하기 위하여 잔골재에 대한 다진 골재 중량도 측정하였다. 굵은 골재와 중간골재의 중량을 측정하기 위하여 사용된 몰드의 부피는  $0.007\text{m}^3$ 이며 잔골재의 중량을 측정하기 위하여 사용된 몰드의 부피는  $0.007\text{m}^3$ 으로 물을 이용하여 측정하였으며, 온도에 대한 보정으로 정밀한 값을 얻도록 하였다.

다음의 Table 4는 위의 실험을 통하여 얻어진 다지지 않은 골재와 다진 골재의 중량과 이들의 중량비 및 평균값을 나타내고 있는데, 굵은 골재와 중간골재의 단위 중량비는 1.100, 1.119로 유사하게 나타났으며, 잔골재의 단위 중량비는 1.137로 굵은 골재나 중간골재에 비하여 다소 큰 것으로 확인되었다. 3가지 골재더미의 취재원에 동일한 점을 고려할 때, 이는 굵은 골재 더미에서 더 큰 공극이 존재하며, 잔골재에서 공극이 적게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

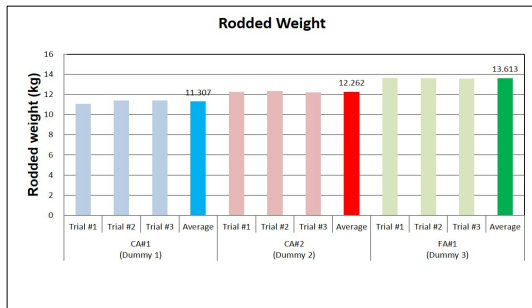
[Table 4] Unit weight and unit weight ratio of loose weight and roddeed weight

|                |          | Loose Weight (+mold) (kg) | Loose Weight (kg) | Loose Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> ) | Rodded Weight (+mold) (kg) | Rodded Weight (kg) | Rodded Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> ) | Rodded /Loose Unit Weight |
|----------------|----------|---------------------------|-------------------|----------------------------------------|----------------------------|--------------------|-----------------------------------------|---------------------------|
|                |          |                           |                   |                                        |                            |                    |                                         |                           |
| CA#1 (Dummy 1) | Trial #1 | 12.856                    | 9.993             | 1452.5                                 | 13.933                     | 11.071             | 1554.8                                  | 1.070                     |
|                | Trial #2 | 12.781                    | 9.918             | 1441.6                                 | 14.292                     | 11.429             | 1605.1                                  | 1.113                     |
|                | Trial #3 | 12.745                    | 9.882             | 1436.4                                 | 14.285                     | 11.422             | 1604.1                                  | 1.117                     |
|                | Average  | 12.794                    | 9.931             | 1443.5                                 | 14.170                     | 11.307             | 1588.0                                  | 1.100                     |
| CA#2 (Dummy 2) | Trial #1 | 13.827                    | 10.964            | 1593.7                                 | 15.102                     | 12.239             | 1779.0                                  | 1.116                     |
|                | Trial #2 | 13.792                    | 10.930            | 1588.6                                 | 15.189                     | 13.326             | 1791.6                                  | 1.128                     |
|                | Trial #3 | 13.842                    | 10.979            | 1595.8                                 | 15.083                     | 12.220             | 1776.2                                  | 1.113                     |
|                | Average  | 13.820                    | 10.958            | 1592.7                                 | 15.124                     | 12.262             | 1782.3                                  | 1.119                     |
| FA#1 (Dummy 3) | Trial #1 | 14.872                    | 12.010            | 1745.6                                 | 16.510                     | 13.648             | 1983.7                                  | 1.136                     |
|                | Trial #2 | 14.739                    | 11.877            | 1726.3                                 | 16.490                     | 13.628             | 1980.8                                  | 1.147                     |
|                | Trial #3 | 14.885                    | 12.022            | 1747.4                                 | 16.426                     | 13.564             | 1971.5                                  | 1.128                     |
|                | Average  | 14.832                    | 11.969            | 1739.8                                 | 16.475                     | 13.613             | 1978.7                                  | 1.137                     |

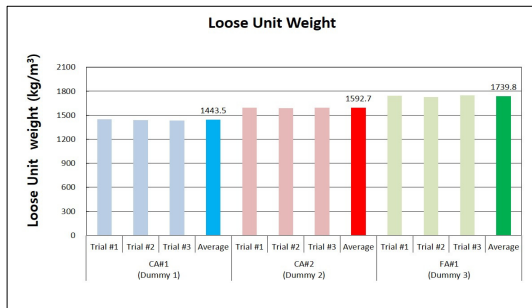
다음 Fig. 6 - Fig. 11은 Table 4에 나타난 값을 그래프로 나타내고 있다. Fig. 6과 Fig. 7에 나타난 바와 같이, 한 골재더미에서 발생된 반복실험 사이의 편차는 다른 골재더미에 대하여 얻어진 중량과의 구별이 충분히 가능할 정도로 매우 작았으며, 다진 골재의 중량은 다지지 않은 골재의 중량에 비하여 약 10%이상 큰 값을 나타냄을 알 수 있다.



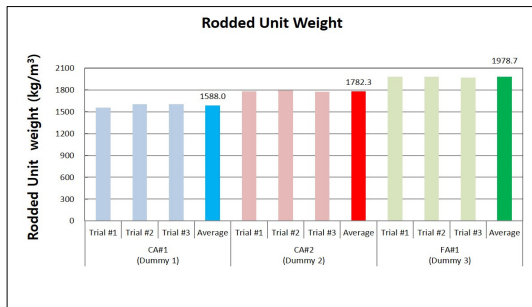
[Fig. 6] Loose weight of aggregate and experiment variations



[Fig. 7] Rodded weight of aggregate and experiment variations



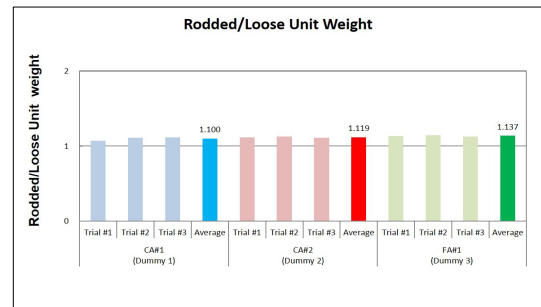
[Fig. 8] Loose unit weight of aggregate and experiment variations



[Fig. 9] Rodded unit weight of aggregate and experiment variations

또한 Fig. 8과 Fig. 9는 다진 골재와 다지지 않은 골재의 단위중량을 나타내고 있으며, 중량의 변화를 확인하기 위하여 수행된 실험에서 얻어진 결과와 유사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 3가지 골재 더미에 대해서 다지기 전/후의 단위중량의 비를 나타내고 있는데, 주어진 실험조건에서 잔골재의 단위중량의 변화가 가장 큰 것으로 나타났으며, 큰 골재에서 단위중량의 변화가 가장 작은 것으로 나타났다. 이것은 다짐만으로는 골재의 밀도를 최대화 할 수 없으므로 굵은 골재가 생성하는 공극을 잔골재로 계량적으로 메우는 형식의 베일리 골재배합 설계법의 기본 개념이 타당하다는 것을 실험적으로 나타내는 것이라 할 수 있다.



[Fig. 10] Rodded unit weight/loose unit weight of aggregate and experiment variations

위의 실험에서 얻어진 다지기 전/후의 단위중량은 CA ratio, FAC, Faf 등과 함께 베일리 골재배합 설계법에서 중요한 입력변수로 사용된다. 아래 Fig. 11은 굵은 골재, 중간 골재, 잔골재 및 필러(Mineral filler)의 중량비를 결정하기 위하여 사용된 베일리 골재 배합 설계표를 나타내고 있다.

이상의 베일리 골재배합 설계법으로 결정된 굵은 골재, 중간골재, 잔골재 더미 및 필러의 전체골재에 대한 무게 비율은 각각 11.62%, 77.72%, 9.04%, 1.62%로 나타났다.

한편 피로균열에 대한 저항성을 향상시키기 위하여 Table 2에 나타난 물리적 특성을 갖는 아령형태의 보강섬유를 사용하였다. 이 아령형태의 보강섬유는 베일리 골재 배합 설계법에서 PCS로 결정된 4.75mm의 골재를 치환하게 되는데, 이를 위하여 전체 아스팔트 혼합물의 무게에 대하여 0.3%, 0.6%, 0.9%에 해당하는 4.75mm 골재의 무게를 산정하여 골재 무게 해당하는 부피만큼을 보강섬유로 치환하였다. 이때 4.75mm는 완전한 구형으로 가정하였으며, 단일 구형 골재의 밀도는  $2.60\text{g/cm}^3$ 을 사용하였다.

|                                            | Design Value                            | Specification | MMPS  | PCS            | PCS    | SCS    |                | SCS                    | TCS                  | SCS          |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------|-------|----------------|--------|--------|----------------|------------------------|----------------------|--------------|
| CA Chosen Weight as % of Loose Weight      | 115.0%                                  | 110%~125%     | 19    | 4.18           | 4.75   | 0.9196 |                | 0.18                   | 0.202212             | 0.15         |
| Desired % Pass 0.075mm                     | 5.0%                                    | 3.5~6.0       |       |                |        |        |                |                        |                      |              |
|                                            | Coarse Aggregate                        |               |       | Fine Aggregate |        |        | Mineral Filler | CA Ratio               |                      |              |
|                                            | CA-1                                    | CA-2          | CA-3  | FA-1           | FA-2   | FA-3   |                | CA Ratio               | FA                   | FA           |
| Material Grade                             | Coarse                                  | Intermediate  |       | Sand           |        |        |                | 0.495                  | 0.505                | 0.224        |
| Coarse / Fine Aggregate Blend by Volume    | 20.0%                                   | 80.0%         |       | 100%           |        |        |                | 0.25~0.4               | 0.6~0.85             | 0.6~0.85     |
| Bulk Specific Gravity                      | 2.702                                   | 2.698         |       | 2.652          |        |        | 2.806          |                        |                      |              |
| Apparent Specific Gravity                  | 2.812                                   | 2.812         |       | 2.650          |        |        | 2.806          |                        |                      |              |
| % Absorption                               | 1.452                                   | 1.502         |       | 0.844          |        |        |                |                        |                      |              |
| Loose Weight (kg/m <sup>3</sup> )          | 1469                                    | 1400          |       |                |        |        |                |                        |                      |              |
| Roasted Weight (kg/m <sup>3</sup> )        | 1558                                    | 1578          |       | 1520           |        |        |                |                        |                      |              |
| Sieve Size (mm)                            | Aggregate Gradation (Percent Passing %) |               |       |                |        |        |                | US No.                 | U.S. Pass            | Stone Course |
| 25.0                                       | 100                                     | 100           |       | 100            |        |        |                | 4.75                   | 100.0                |              |
| 19.0                                       | 94.0                                    | 85.9          |       | 100.0          |        |        |                | 7.5                    | 92.2                 |              |
| 12.5                                       | 30.0                                    | 49.7          |       | 100.0          |        |        |                | 12.5                   | 31.8                 | 49.3         |
| 9.5                                        | 24.7                                    | 56.7          |       | 50.0           |        |        |                | 19                     | 25.2                 | 53.1         |
| 4.75                                       | 6.0                                     | 31.3          |       | 38.2           |        |        |                | 30                     | 7.0                  | 30.1         |
| 2.5                                        | 5.0                                     | 22.0          |       | 35.0           |        |        |                | 40                     | 6.0                  | 22.5         |
| 1.18                                       | 3.0                                     | 10.0          |       | 30.0           |        |        |                | 60                     | 3.0                  | 10.5         |
| 0.85                                       | 2.0                                     | 7.4           |       | 28.0           |        |        |                | 80                     | 2.0                  | 10.0         |
| 0.30                                       | 1.0                                     | 1.8           |       | 25.0           |        |        |                | 100                    | 1.0                  | 9.5          |
| 0.15                                       | 1.0                                     | 1.0           |       | 10.0           |        |        |                | 200                    | 0.425                | 5.4          |
| 0.075                                      | 0.2                                     | 0.4           |       | 0.2            |        |        |                | 200                    | 0.075                | 0.8          |
|                                            | CA-1                                    | CA-2          | CA-3  | FA-1           | FA-2   | FA-3   | Mineral Filler | Coarse Aggregate Total | Fine Aggregate Total | Blend Total  |
| Chosen Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )    | 1469.2                                  | 1409.5        | 0.0   | 1520.0         | 0.0    | 0.0    |                |                        |                      |              |
| Contributions (kg/m <sup>3</sup> )         | 337.8                                   | 2287.4        | 0.0   | 763.8          | 0.0    | 0.0    |                | 29.37                  | 1288.3               |              |
| Yield in Aggregate                         | 7.50                                    | 30.28         | 0.00  |                |        |        |                |                        |                      |              |
| Initial Blend Percentage                   | 34.1%                                   | 55.9%         | 0.0%  | 32.0%          | 0.0%   | 0.0%   | 1.62%          |                        |                      |              |
| Percent Passing PCS                        | 6.0%                                    | 31.3%         | 0.0%  | 61.8%          | 100.0% | 100.0% |                |                        |                      |              |
| Fine / Coarse / Agg. in Coarse / Fine Agg. | 0.85%                                   | 16.87%        | 0.00% | 15.76%         | 0.00%  | 0.00%  | 17.72%         | 15.76%                 |                      |              |
| Correct the Initial Blend                  | 10.88%                                  | 55.11%        | 0.00% | 34.01%         | 0.00%  | 0.00%  |                |                        |                      |              |
| Amount of 0.075mm sieve                    | 0.02%                                   | 0.23%         | 0.00% | 0.12%          | 0.00%  | 0.00%  |                |                        | 3.38%                |              |
| Final Blend Percentage of Fine Agg.        |                                         |               |       | 32.39%         | 0.00%  | 0.00%  |                |                        |                      |              |
| Final Blending                             | 11.62%                                  | 77.72%        | 0.00% | 9.04%          | 0.00%  | 0.00%  | 1.62%          | 100.00%                |                      |              |

[Fig. 11] Example of bailey method design table

다음은 보강섬유량 및 치환골재량을 결정하기 위하여 사용된 보강섬유량 산정 방법을 전체 혼합물 중량 대비 0.3%의 예로 나타내고 있다. 아래에서 치환에 사용될 보강섬유의 무게와 Fiber와 교체되어야할 PCS골재의 무게가 다른 이유는 이들의 단위중량이 서로 다르기 때문이다. 또한 보강섬유 혼입시 전체 혼합물의 무게에 대한 비율(%)로 결정하는 것이 편리하기 때문에 아래와 같은 과정이 필요하다. 바인더 함유량은 5.6%로 가정하였고, 다음 내용 및 Table 5은 이를 정리한 결과이다.

- 혼합물 제작에 사용될 골재의 무게 결정  
: 1950.00g
- 바인더 함량 및 보강섬유 함량 결정  
: 5.60%, 0.30%
- 바인더 무게 및 골재+바인더의 무게 계산  
: 109.20g (=1950.00g×5.60%),  
2059.20g (=1950.00g+109.20g)
- 보강섬유 함량(0.3%)에 해당하는 보강섬유의 무게 계산  
: 6.18g (=2059.20g×0.30%)
- 단일 보강섬유의 부피 및 단위중량 확인  
: 0.03cm<sup>3</sup>, 1.35g/cm<sup>3</sup>
- 보강섬유의 부피 결정  
: 4.57g/cm<sup>3</sup> (=6.18g÷1.35g/cm<sup>3</sup>)

- 보강섬유의 부피에 해당하는 보강섬유의 개수 결정  
: 154개 (=4.57g/cm<sup>3</sup>÷0.03cm<sup>3</sup>)
- 보강섬유의 부피에 해당하는 PCS골재의 무게 결정  
: 11.88g(=4.57g/cm<sup>3</sup>×2.60g/cm<sup>3</sup>)

[Table 5] Aggregate replacement and estimation methods of reinforcing fibers at 0.3%

|                                                                       | Mass (g) | Proportion |
|-----------------------------------------------------------------------|----------|------------|
| Aggregate Weight                                                      | 1950.00  | 94.10%     |
| Asphalt Binder Weight                                                 | 109.20   | 5.60%      |
| Weight of the reinforcing fiber should be used to replace             | 6.18     | 0.30%      |
| Aggregate + Asphalt Binder Weight                                     | 2059.20  | 100.0%     |
| Fiber Volume (cm <sup>3</sup> )                                       | 0.03     |            |
| Specific Gravity or Unit Weight of Fiber (g/cm <sup>3</sup> )         | 1.20     |            |
| Volume Added Fiber (cm <sup>3</sup> )                                 | 4.57     |            |
| Number of Fibers                                                      | 154      |            |
| Specific Gravity or Unit Weight of PCS Aggregate (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.60     |            |
| Weight of PCS Aggregate should be replaced Fiber (g)                  | 11.88    |            |

이상에서 나타난 바와 같이, 1950g의 골재, 5.6%(109.20g)의 바인더, 0.3%(6.18g)의 보강섬유를 사용하여 섬유 보강 아스팔트 혼합물을 제작하기 위해서는 보강섬유 0.3%의 동일한 부피에 해당하는 11.88g의 PCS 골재를 위의 골재에서 제거해야하는 것을 알 수 있다.

## 4. 결론

- (1) 굵은 골재(CA#1), 중간골재(CA#2), 잔골재(FA#1)의 3가지 골재 더미의 다지기 않은 골재의 무게와 다진 골재의 무게를 확인하여 단위 중량비를 확인하였으며, 단위 중량비는 1.100, 1.119, 1.137로 잔골재의 단위 중량비는 굵은 골재나 중간 골재에 비하여 다소 큰 것으로 확인되었다.
- (2) 베일리 골재 배합 설계법으로 결정된 굵은 골재, 중간골재, 잔골재 더미 및 필러의 전체골재에 대한 무게 비율은 각각 11.62%, 77.72%, 9.04%, 1.62%로 나타났다.
- (3) 골재의 무게와 부피를 고려한 PCS골재 크기(4.25mm)에 해당하는 아령형 보강섬유를 전체 혼합물 대비 0.3%를 첨가하였을 때 혼합물 제작에 필요한 보강 섬유량은 154개로 결정되었고 보강

섬유의 부피에 해당하는 PCS골재의 무게는 11.88g으로 결정하였다.

- (4) 보강 섬유를 첨가한 경우에는 보강섬유 첨가량에 따라 단위중량이 크게 변화하지 않는 것으로 확인 되었으며 이는 골재치환 개념을 베일리 골재 배합 설계법에 추가하여도 베일리 방법에서 사용되는 목표 단위중량(Chosen Unit Weight)이나 기타 지표들을 산정하는 것이 가능할 것으로 판단된다.
- (5) 향후 연구에서는 본 논문의 결과로 계산된 보강 섬유의 첨가량 및 섬유 첨가로 대체되어야할 PCS골재의 무게를 고려한 골재 무게 및 배합설계에 따른 최적 아스팔트 함량으로 혼합물을 제작하여 아스팔트 혼합물의 공용성 평가가 필요할 것으로 사료된다.

## References

- [1] Vavrik, W. R., W. J. Pine, G. A. Huber, S. H. Carpenter, and R. Bailey. "The Bailey Method of Gradation Evaluation: The Influence of Aggregate Gradation and Packing Characteristics on Voids in the Mineral Aggregate", *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 70, 2001
- [2] E. Denneman, B.M.J.A.Verhaeghe, E. S. Sadzik "Aggregate Packing Characteristics of Good And Poor Performing Asphalt Mixes", *Proceedings of the 26<sup>th</sup> Southern African Transportation Conference(SATC 2007)*, Pretoria, South Africa, 2007
- [3] Christopher Wayne Wald, "Investigation of the Use of the Bailey Method of Aggregate Gradation Selection for Asphalt Mix Design in Arkansas, *University of Arkansas*, 2002
- [4] Vavrik, W. R., W. J. Pine, and S. H. Carpenter "Aggregate Blending for Asphalt Mix Design : The Bailey Method", *Presented at the 81st Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C, 2002
- [5] Yun, Taeyoung "Development of Optimized Aggregate Mix Design Method based on Bailey's Approach", *Korean Society of Civil Engineers conference & Civil Expo*, South Korea, 2010
- [6] AASHTO T 19M/T 19-00, "Standard Method of Test for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate, *American Association of State and Highway Transportation Officials*, p 9, 2004

함 상 민(Sang-Min Ham)

[정회원]



- 2009년 2월 : 공주대학교 건설환경공학부 토목환경공학전공(공학사)
- 2011년 2월 : 공주대학교 방재공학과 지반 및 도로공학 전공(공학석사)
- 2011년 4월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 도로포장연구실 전임연구원

<관심분야>

토목공학, 도로공학, 방재공학, 지반공학