

Bailey Method 를 이용한 아스팔트 혼합물 최적배합설계 평가

이동항¹, 이관호^{1*}

¹국립공주대학교 건설환경공학부

Evaluation of Mix Design for Asphalt Mixtures by Bailey Method

Dong-Hang Lee¹ and Kwan-Ho Lee^{1*}

¹Dept. of Civil Engineering, Kongju National University

요 약 일반적으로 아스팔트 혼합물 배합설계는 많은 시간과 실험이 필요하다. 또한, 정밀한 배합설계 결과는 실험하는 사람의 숙련도와 밀접한 상관관계가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Bailey는 아스팔트 혼합물용 골재입도에 대한 연구를 통해 골재입도곡선에서 특정한 크기의 골재의 입도 및 통과중량비가 중요함을 제시하였다. 본 연구에서는 Bailey가 제안한 방법을 이용하여 19mm 밀입도 아스팔트 혼합물 및 미연방도로국의 배수성포장(PA 20mm) 혼합물에 대한 배합설계를 시행하였다. Bailey 방법을 이용한 아스팔트 혼합물용 골재입도 결정방법은 기존에 시행착오를 통합 배합 설계방법에 비해 좀더 짧은 시간에 최적배합설계를 수행할 수 있음을 확인하였다. 19mm 밀입도 아스팔트 혼합물의 CA, FA_c, FA_r는 0.724, 0.440 및 0.455로 기준값을 만족하였다. PA 20mm 아스팔트 혼합물의 계산된 CA, FA_c, FA_r는 0.646, 0.476 및 0.450으로 기준값을 만족하였다.

Abstract In general, there are needed lots of time and experiments for determination of optimum asphalt content and mix design. The experimental results are highly depended on the skill of testers. Bailey suggested the proper aggregate gradation of hot mix asphalt are a function of special size and passing percent of the specified aggregate to reduce the test errors. In this paper, the asphalt mix designs of 19mm dense graded mix and PA-20mm for FHWA were carried out, using Bailey's method. The use of Bailey method can cut down the testing times to get the proper aggregate gradation for asphalt mix design. In case of 19mm dense graded asphalt mixture, the measured values of CA, FA_c, FA_r are 0.724, 0.440, and 0.455, which are within the suggested values by Bailey. Also, in case of PA-20 graded asphalt mixture, the measured values of CA, FA_c, FA_r are 0.646, 0.476, and 0.450, respectively.

Key Words : Aggregate Gradation, Bailey Method, Dense Graded Asphalt, Primary Coarse Aggregate

1. 서론

일반적으로 아스팔트 혼합물의 배합설계는 최적아스팔트 함량을 결정하는 것이 주 목적이기는 하나, 배치플랜트에서 생산, 운반 등에 적합한지를 평가하는 항목중의 하나이다. 아스팔트 배합설계는 경제성, 내구성, 내구성을 가지는 혼합물을 결정하는 것이다. 이러한 배합설계는 주로 경험 많은 숙련된 기술자에 의해 시행되고 있다. 아스팔트 혼합물의 배합설계는 실험자의 숙련도에 따라 결과 및 실험에 소요되는 시간의 차이가 매우 크다. 배합설계에 소

요되는 시간의 차이뿐만 아니라, 아스팔트 혼합물의 부피 특성 및 이와 연결된 공용성(performance)에 대한 충분한 이해가 있어야 올바른 배합설계 결과를 얻을 수 있다. 예를 들어, 아스팔트 혼합물의 입도를 조립도(Coarse) 또는 세립도(fine) 중 어느 것을 이용할 것인지, 현장에서 다짐이 어렵지는 않는지? 아스팔트 혼합물의 골재간극률(void in mineral aggregate, VMA) 조정이 어렵지는 않는지, 공용성은 충분한지 등을 결정하여야 한다. 그러나, 현재 우리가 사용하고 있는 마샬배합설계가 오랜 시간동안 사용된 보편화될 설계법임에도 불구하고, 이러한 질문에 충분

본 논문은 공주대학교 2011년 교내학술연구지원 (아스팔트 혼합물의 최적배합설계법의 비교 및 평가) 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Kwan-Ho Lee

Tel: +82-10-9932-4798 email: kholee@kongju.ac.kr

접수일 12년 07월 16일

수정일 12년 08월 08일

게재확정일 12년 10월 11일

한 답을 줄 수 없다.

Bailey 방법은 1980년대에 제시된 개념이지만, 이를 실질적인 배합설계에 적용해서 검증하는 연구는 최근 진행되고 있는 실정이다. 특히, Heitage Research Group의 Bill Pine 등이 Bailey 방법의 기본 개념을 검증하기 위하여 많은 실내시험을 시행하였다. Bailey 방법은 실내 및 현장에서의 아스팔트 혼합물의 입도를 분석하기 위하여 개발되었다. 이 방법은 골재의 배열(packing)이 다짐도 및 부피특성에 미치는 영향을 좀 더 쉽게 이해할 수 있게 하였다. 이 방법은 기존의 보편적으로 사용하는 밀입도 아스팔트 혼합물 뿐만아니라, 최근 많은 관심과 연구가 진행중인 재생아스팔트 혼합물(Reclaimed Asphalt Pavment, RAP)에도 직접 적용할 수 있는 장점이 있다[1].

Bailey 방법에서 가장 중요한 개념은 골재의 배열(packing)특성이다. 즉, 어떤 크기의 골재가 굵은 골재 혼합물의 구조적 특성 및 공극특성을 결정하는지를 결정할 수 있다. 이러한 골재의 배열특성은 골재의 형상, 강도, 표면거칠기, 혼합물 입도, 다짐방법 및 다짐에너지 등에 의해 영향을 받는다. 이러한 배열 특성에 대한 이해를 통해 Bailey 방법은 아스팔트 혼합물의 영구변형 저항성을 증진시킬 수 있고, 골재간극률을 조절할 수 있게 한다.

본 연구에서는 Bailey 방법을 이용하여 국내의 대표적인 아스팔트 혼합물 2종(밀입도 아스팔트, SMA) 에 대한 Bailey 방법의 적용성을 검토해보고, 아스팔트 혼합물의 배합설계 방법을 개선안을 제시하는 것을 목적으로 한다.

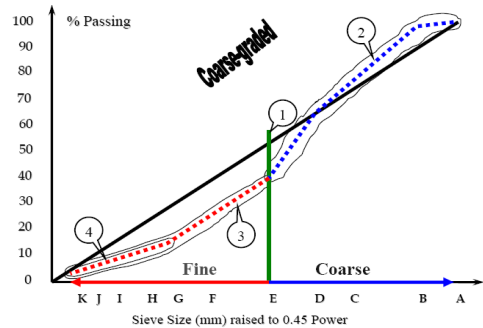
2. Bailey 방법

2.1 기본 개념

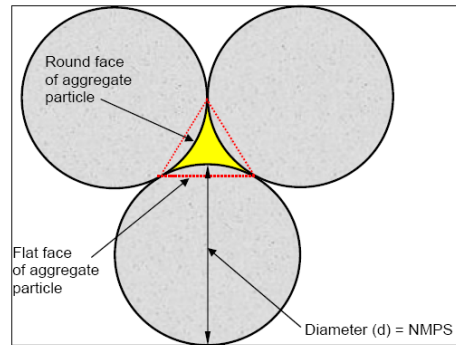
Bailey 방법은 다음의 4가지 중요한 요소로 그림 1에 나타난 것과 같이 구성된다. 첫째로, 골재 사이의 공극을 만들거나 채우는 입자의 크기가 굵은골재 및 잔골재 중 어느 것인지를 결정한다. 둘째는 굵은골재의 배열상태가 잔골재 배열상태에 영향을 준다. 셋째는, 잔골재중에서 상대적으로 큰 입자부분이 전체 혼합입도에 미치는 영향을 평가한다. 넷째는, 잔골재중에서 상대적으로 작은 입자부분이 전체 혼합입도에 미치는 영향을 분석한다[2,3].

그림 1에 나타난 것과 같이 골재의 입도곡선으로부터 위의 4가지 주요 요소를 결정하게 되고, 이러한 4가지 요소는 골재의 배열 또는 골재간극률에 큰 영향을 주게된다. 또한, 현장에서의 다짐도 및 골재분리현상 등과도 밀접한 상관관계를 보여준다. 그림 1에서 ① 항목은 주어진 입도에서 굵은골재 부분과 잔골재 부분을 분리하는 것이

다. 일반적으로 4.75mm 입자 크기를 기준으로 굵은골재와 잔골재로 구분한다. Bailey 방법에서는 먼진 공칭최대치수(Nominal Maximum Particle Size, NMPS) * 0.22를 이용하여 골재입자속의 공극의 크기를 결정한다. 이렇게 결정된 공극의 크기를 Primary Control Sieve(PCS)로 정의하고, 대표값을 표 1에 나타내었다. 여기서 사용된 0.22는 그림 2에 나타난 것과 같이 골재의 지름에 대한 공극의 길이를 기하학적으로 분석하여 결정한 값이다.



[그림 1] Bailey 방법의 4가지 중요 요소
[Fig. 1] The Four Bailey Method Principles



[그림 2] 2차원 형태의 골재배열상태
[Fig. 2] Two-Dimensional Aggregate Packing Model

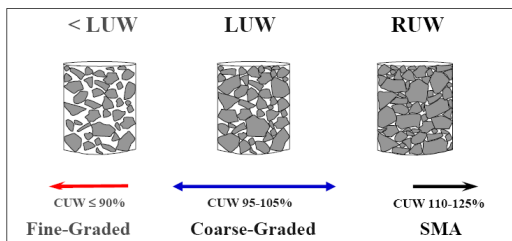
[표 1] 주요 콘트롤 체크기
[Table 1] Primary Control Sieve Size

Mixture NMPS	NMPS x 0.22	Primary Control Sieve
37.5mm	8.250mm	9.5mm
25.0mm	5.500mm	4.75mm
19.0mm	4.180mm	4.75mm
12.5mm	2.750mm	2.36mm
9.5mm	2.090mm	2.36mm
4.75mm	1.045mm	1.18mm

Note: NMPS = Nominal Maximum Particle Size

2.2 혼합물 종류 구분

혼합골재의 부피특성을 이용하여 굵은골재 및 잔골재의 비율을 결정하고, 이를 이용하여 세립도, 조립도, SMA 혼합물로 구분한다. AASHTO T 19의 시험방법을 이용하여 굵은골재의 단위중량을 결정한다. 단위중량은 느슨한 상태(loose unit weight, LUW) 및 다짐한 상태(rodDED unit weight, RUW)로 구분하여 평가한다. 느슨한 상태 및 다져진 상태의 골재의 공극비는 43-49%, 및 37-43% 정도의 범위를 가진다. 같은 방법을 이용하여 잔골재의 느슨한 상태 및 다져진 상태의 공극비는 35-43%, 및 28-36% 정도의 범위를 가진다.



[그림 3] 혼합물종류에 따른 단위중량 결정
[Fig 3.] Chosen Unit Weight Ranges

2.3 혼합입도 결정

개별 골재에 대한 입도, 비중, 단위중량 등을 결정한 후 이들 골재를 혼합한 혼합골재의 입도를 Bailey가 제안한 4가지 요소를 이용하여 결정한다. 이렇게 결정된 입도는 최초 배합설계에 적용되는 입도를 의미한다.

먼저, 혼합물 종류 및 혼합물의 공칭최대치수를 결정한다. 혼합물의 종류는 현장 다짐시 한층 다짐두께, 골재 특성 및 과거의 시공자료등을 이용하여 결정된다.

둘째로, 혼합골재에서 굵은골재의 부피(Coarse Aggregate, CA) 및 잔골재의 부피(Fine Aggregate, FA)를 결정한다.

셋째로, 각각의 굵은 골재 및 잔골재를 부피 기준으로 혼합하여 혼합골재를 만든다.

넷째로, 200번체 통과량을 결정한다.

이러한 과정을 거쳐 만들어진 혼합골재의 입도를 최초 배합설계용 입도로 이용하는 것이다. 일반적으로 배합설계는 공극률과 골재간극률을 정해진 기준에 맞추어야 한다. 이러한 기준을 맞추기 위해 여러번의 시행착오를 거쳐야 최종배합설계가 완성된다.

이러한 시행착오를 혼합입도 결정단계에서 어느 정도 조정할 수 있는 것이 Bailey 방법의 장점이다. 조립도 혼합물의 경우 PCS 2%, CA ratio 0.2, FA_c 및 FA_r ratio 0.1의 조정에 따라 공극률 또는 골재간극률이 약 1% 정도

조정된다. 세립도 혼합물의 경우 PCS 6%, CA ratio 0.35, FA_c 및 FA_r ratio 0.05의 조정에 따라 공극률 또는 골재간극률이 약 1% 정도 조정된다.

[표 2] 조립도 혼합물용 기준값
[Table 2] Guidelines for Coarse-Graded Mixs

NMPS	37.5 mm	25.0 mm	19.0 mm	12.5 mm	9.5 mm	4.75 mm
CA Ratio	0.80-0.95	0.70-0.85	0.60-0.75	0.50-0.65	0.40-0.55	0.30-0.45
FA _c Ratio	0.35-0.50					
FA _r Ratio	0.35-0.50					

NMPS : Nominal Maximum Particle Size
CA : Coarse Aggregate, FA : Fine Aggregate
FA_r : ratio of the fine part of the fine fraction to the total fine part of the fine fraction

[표 3] 세립도 혼합물용 기준값
[Table 3] Guidelines for Fine-Graded Mixs

NMPS	37.5 mm	25.0 mm	19.0 mm	12.5 mm	9.5 mm	4.75 mm
CA Ratio	0.6- 1.0					
FA _c Ratio	0.35-0.50					
FA _r Ratio	0.35-0.50					

3. 실험재료 및 결과분석

실험에 이용된 아스팔트 혼합물은 밀입도 19mm 및 PA 20mm 를 이용하였다. 아스팔트 바인더는 PG 64-22 등급을 이용하였다.

밀입도 19mm 아스팔트 혼합물에 대한 최적배합설계를 위한 최초입도는 2.3절의 혼합입도 결정에서 제시된 Bailey가 제안한 방법을 이용하여 배합입도를 결정하였다. 배합설계입도는 표 4에 나타내었다. Bailey 방법 이용하여 입도를 결정하기 위하여 공칭최대치수(NMPS)를 결정하였다. 공칭최대치수는 19mm이다. Half Sieve의 크기는 공칭최대치수의 50% 수준에서 결정된다. 굵은 입자의 골재 크기에 영향을 미치는 Primary Coarse Aggregate (PCS)의 크기는 공칭최대치수에 0.22를 곱하여 결정하였다. 두 번째로 영향을 미치는 골재의 크기(SCS)는 PCS에 0.22를 곱하여 결정한다. 또한, 세 번째로 영향을 미치는 골재의 크기(TCS)는 SCS에 0.22를 곱하여 결정하였다. 1st 입도분포를 이용하여 결정된 PCS는 4.18mm, SCS는

0.92mm, TCS는 0.20mm 이다. 각각의 크기에 해당하는 골재의 통과 %를 찾아서, CA, FA_c, FA_f를 결정하였다. 결정된 CA, FA_c, FA_f는 0.457, 0.693, 및 0.176이다. 결정된 값을 표 2의 기준값과 비교하였다. 1st 입도의 경우 CA 및 FA_f 값이 범위를 벗어났다. 2차 입도에서는 1차입도에서 문제가 된 부분의 통과비율을 9.5mm (68%), 4.75mm(50%), 1.18mm(27%), 0.15mm(8%)로 조정하였다. 1차 입도와 동일한 계산과정을 거쳐 결정된 결정된 CA, FA_c, FA_f는 0.563, 0.540 및 0.296으로 기준범위를 벗어난 입도로 판정되었다. 3차입도는 9.5mm (71%), 4.75mm(50%), 1.18mm(22%), 0.15mm(10%)로 조정하였다. 계산된 CA, FA_c, FA_f는 0.724, 0.440 및 0.455로 기준값을 만족하였고, 이를 최종배합입도로 결정하였다. 결정된 배합입도를 이용하여 마샬배합설계를 시행하였다. 최적아스팔트 함량은 5.2%, 아스팔트 혼합물의 겉보기비중 2.422, 이론최대밀도 2.506, 공극률 4%, 골재간극률 (VMA) 15.6%, 아스팔트포화도(VFA) 75.4%로 나타났다.

[표 4] 밀입도 19mm 배합설계입도
[Table 4] Optimum Gradation of Mix Design

혼합물 체크기	19mm Dense Graded Mix			
	1st	2nd	Final	Spec.
25	100	100	100	100
19	97	97	97	90-100
12.5	76	80	85	
9.5	65	68	71	56-80
4.75	49	50	50	35-65
2.36	37	37	37	23-49
1.18	34	27	22	
0.6	17	17	17	
0.3	10	10	10	5-19
0.15	6	8	10	
0.078	4	4	4	2-8
NMPS(mm)	19.0	19.0	19.0	
Half Sieve (mm)	9.5	9.5	9.5	
PCS(mm)	4.18	4.18	4.18	
SCS(mm)	0.92	0.92	0.92	
TCS(mm)	0.20	0.20	0.20	
CA	0.457	0.563	0.724	0.6-0.75
FA _c	0.693	0.540	0.440	0.35-0.5
FA _f	0.176	0.296	0.455	0.35-0.5
G _{mb}			2.422	
G _{mm}			2.506	
AirVoid(%)			4.0	4%
VMA(%)			15.6	
VFA(%)			75.4	

$$CA = \frac{(\% \text{ of } half - \% \text{ PCS})}{(100 - \% \text{ PCS})} \quad FA_c = \frac{\% \text{ SCS}}{\% \text{ PCS}} \quad FA_f = \frac{\% \text{ TCS}}{\% \text{ SCS}}$$

Half Sieve = NMPS*0.5, PCS = 0.22* NMPS
SCS = 0.22* PCS, TCS = 0.22* SCS

표 5는 미국연방도로국(FHWA)의 배수성포장용 입도를 이용한 시험결과이다. 표 4와 동일한 방법을 이용하여 배수성 포장에 적합한 골재입도를 결정하였고, 아스팔트 혼합물 시험을 시행하였다. 배수성 아스팔트 혼합물의 최적아스팔트 함량은 6%, 아스팔트 혼합물의 겉보기비중 1.949, 이론최대밀도 2.534, 공극률 24.7%, 골재간극률 (VMA) 32.2%, 아스팔트포화도(VFA) 23.4%로 나타났다.

[표 5] PA 20mm(배수성) 배합설계입도
[Table 5] Optimum Gradation of Mix Design

혼합물 체크기	배수성포장(PA 20mm)			
	1st	2nd	Final	Spec.
25	100	100	100	100
19	98	98	98	
12.5	66	66	66	55-100
9.5	49	50	52	40-55
4.75	21	20	21	16-30
2.36	15.5	15.5	15.5	12-23
1.18				10-18
0.6	10.5	10.5	10	8-15
0.3	7.5	7.5	7.5	7-13
0.15	5.5	5.5	5.5	
0.078	4.5	4.5	4.5	7-12
NMPS (mm)	19	19	19	
Half Sieve (mm)	9.5	9.5	9.5	
PCS(mm)	4.18	4.18	4.18	
SCS(mm)	0.92	0.92	0.92	
TCS(mm)	0.202	0.202	0.202	
CA	0.549	0.600	0.646	0.6-0.75
FA _c	0.500	0.500	0.476	0.35-0.5
FA _f	0.524	0.450	0.450	0.35-0.5
G _{mb}			1.949	
G _{mm}			2.534	
AirVoid(%)			24.7	20% 이상
VMA(%)			32.2	
VFA(%)			23.4	

4. 결론

밀입도 19mm 아스팔트 혼합물과 미연방도로국에서 제안한 배수성포장 혼합물에 대하여 Bailey 방법을 이용하여 최적입도를 결정하였고, 아스팔트 혼합물 배합설계의 적정성을 검토하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) Bailey 방법을 이용한 아스팔트 혼합물용 골재입도 결정방법은 기존에 시행착오를 통한 배합설계방법에 비해 좀더 짧은 시간에 최적배합설계를 수행할

수 있음을 확인하였다.

- (2) Bailey 방법에서 아스팔트 혼합물용 골재입도를 결정하는 중요한 요소는 골재의 최대공칭치수, Half Sieve, PCS, SCS, TCS, CA, FA_c 및 FA_r 등으로 골재의 입도크기 및 통과중량 %로부터 계산할 수 있다.
- (3) 19mm 밀입도 아스팔트 혼합물의 CA, FA_c, FA_r는 0.724, 0.440 및 0.455로 기준값을 만족하였다. 결정된 배합입도를 이용하여 마샬배합설계를 시행하였다. 최적아스팔트 함량은 5.2%, 아스팔트 혼합물의 겉보기비중 2.422, 이론최대밀도 2.506, 공극률 4%, 골재간극률(VMA) 15.6%, 아스팔트포화도(VFA) 75.4%로 나타났다.
- (3) PA 20mm 아스팔트 혼합물의 최종입도는 9.5mm (71%), 4.75mm(50%), 1.18mm(22%), 0.15mm(10%)로 조정하였다. 계산된 CA, FA_c, FA_r는 0.646, 0.476 및 0.450으로 기준값을 만족하였다. 배수성 아스팔트 혼합물의 최적아스팔트 함량은 6%, 아스팔트 혼합물의 겉보기비중 1.949, 이론최대밀도 2.534, 공극률 24.7%, 골재간극률(VMA) 32.2%, 아스팔트포화도(VFA) 23.4%로 나타났다.

References

- [1] Vavrik WR, Pine WJ, Huber H, Carpenter HS, Bailey R., "Bailey Method for Gradation Selection in HMA Mixture Design", Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C (Presentation), 2002.
- [2] AsphaltPro Magazine, "Bailey Method Offers Technicians Volumetric Control", pp. 24-25, January, 2009.
- [3] Pine, WJ, "The Bailey Method -Achieving Volumetrics and HMA Compactability" Course Materials and Handout,, 2005.

이 동 향(Dong-Hang Lee)

[정회원]



- 2012년 2월 : 국립공주대학교 건설환경공학부 (공학사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 국립공주대학교 건설환경공학부(석사과정)

<관심분야>
도로공학 및 지반공학

이 관 호(Kwan-Ho Lee)

[정회원]



- 1991년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1996년 12월 : 미국 Purdue Univ. Civil Eng., (공학박사)
- 2006년 9월 ~ 현재 : 국립공주대학교 건설환경공학부 교수

<관심분야>
도로공학 및 지반공학