



# 마살 배합설계 방법의 개선과 기존 방법과의 비교 평가

## Improvement of Marshall Mix Design and Comparative Evaluation with Current Marshall Mix Design Method

황 성 도\*    윤 안 상\*\*    김 부 일\*\*\*  
Hwang, Sung Do    Yoon, An Sang    Kim, Boo Il

### Abstract

The Marshall mix design method used in Korea, which was described in the design & construction regulation, had been introduced from Japan Highway Cooperation standard guide. Most engineers have thought that it is the major reason that causes pavement distresses. Therefore, there is a need to modify the current Marshall mix design through using the volumetric design concept, which is most widely used in asphalt mix design.

The modified mix design determines the preliminary optimum asphalt content at 4% VTM (Voids in Total Mix). If the Marshall properties, which are VFA, VMA, stability, and flow, were satisfied with the requirements, the preliminary optimum asphalt content is determined as the final optimum asphalt content. The modified Marshall mix design considers VMA, while the current Marshall mix design does not consider VMA. By considering the Marshall stability and flow as the criteria instead of design factors, the modified Marshall mix design is able to decrease the errors occurred in Marshall stability test.

The test was performed to compare the Marshall properties between current and modified Marshall mix design. The test results showed that there was no difference in the Marshall properties, except for VTM. Thus, the modified Marshall mix design can produce the asphalt mixtures with the constant VTM (4%), and it can improve the asphalt mixture quality in Korea.

*Keywords : modified Marshall mix design, VTM, preliminary optimum asphalt content, VMA*

### 요 지

국내의 각종 시방서 및 지침에 수록되어 있는 기존 마살 배합설계 방법은 일본 도로공단의 규격을 도입하여 사용한 것이다. 이러한 배합설계 방법은 최근의 도로 포장의 공용성에 많은 문제점을 야기시키는 원인 중의 하나로 인식되어 지고 있다. 따라서 현재 외국의 배합설계 과정에서 가장 많이 이용되고 있는 용적 개념의 도입을 통해 개선된 마살 배

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 선임연구원  
\*\* 한국건설기술연구원 연구원  
\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 선임연구원



합설계 방법을 제시하고자 한다.

본 연구를 통해 개선된 배합설계 방법은 공극률 4%에 해당하는 아스팔트 함량을 예비 최적 아스팔트 함량으로 결정 한 후 포화도, VMA(골재 간극률), 안정도, 흐름값의 마찰 물성치를 만족하면 이를 최적 아스팔트 함량으로 정하는 방법이다. 이러한 배합설계 방법은 기존 방법에서는 고려하지 않는 VMA 값을 도입하였으며, 현장에서 오차가 많이 발생하는 마찰 안정도 시험을 설계 요소가 아닌 검토 요소로 정함으로써 배합설계의 오류를 줄이는 방법이다.

실내 실험을 통한 기존 방법과 개선 방법의 비교 결과, 공극률을 제외한 최적 아스팔트 함량, 밀도, 안정도, 그리고 흐름값의 마찰 물성치에서는 비슷한 결과값을 나타내었다. 이는 개선 방법을 적용할 때 다른 마찰 물성치들은 큰 변동이 없이 일정한 공극률을 가지는 혼합물 생산이 가능하다는 것을 나타낸다. 따라서 개선된 마찰 배합설계 방법은 현장에서 일정한 공극률(4%)을 가지는 혼합물의 생산을 가능하게 하고, 이는 아스팔트 혼합물의 품질 향상에 큰 도움을 줄 것으로 생각된다.

## 핵심 용어 : 개선된 마찰 배합설계, 공극률, 예비 최적 아스팔트 함량, 골재 간극률

### 1. 서론

국내에서 사용되고 있는 아스팔트 혼합물의 배합설계는 주로 마찰 배합설계가 이용되고 있다. 이 방법은 마찰 다짐을 통해 아스팔트 혼합물의 공극률(Va, Air Void)과 포화도(VFA, Void Filled with Asphalt)를 구하고, 마찰 안정도 시험을 통해 안정도 및 흐름값을 구한 결과를 바탕으로 최적 아스팔트 함량을 결정하는 방법이다. 그러나 아스팔트 플랜트 현장에서 이루어지는 마찰 안정도 시험은 시험실간의 안정도 장비의 차이, 작동자간의 재현성 부족, 그리고 데이터 해석의 오류 등의 문제점을 안고 있다. 이로 인해 국내 아스팔트 혼합물의 배합설계는 품질 시험실 사이에 상이한 결과를 초래할 가능성이 큰 것으로 알려져 있다. 또한 마찰 물성치와 포장 공용성과 관련된 연구에 따르면 마찰 안정도와 흐름값이 소성변형 등 도로 포장의 성능을 제대로 반영하지 못한다고 보고하고 있다. 따라서 최근 외국의 배합설계에서는 혼합물의 안정도와 흐름값을 바탕으로 하는 배합설계보다는 용적(Volumetric Properties) 개념에 근거한 배합설계를 규정하고 있다.

본 연구에서는 이와 같은 기존 마찰 배합설계 방법의 문제점을 인식하여, 용적 개념의 개선된 마찰 배합설계 방법을 제안하고자 한다. 또한 통계분석을 통

해 기존 방법과 개선 방법 사이의 배합설계 결과를 분석하고, 이를 통해 개선 방법의 효과를 검증해 보 고자 한다.

### 2. 기존 마찰 배합설계에 대한 고찰

#### 2.1 기존 마찰 배합설계의 문제점

기존 아스팔트 혼합물의 배합설계 중 마찰 안정도 시험은 실무자들의 관리 및 경험 부족으로 인해 배합설계 결과의 오류를 야기시키고 있는 실정으로, 최근의 도로 포장에 발생하는 문제점의 주요 원인으로 인식되면서 기존 마찰 배합설계 방법에 대한 개선의 필요성이 제기되고 있다.

포장 관련 실무자를 대상으로 실시한 "아스팔트 혼합물의 배합설계 방법 등에 대한 의식과 개선 방안에 대한 의견"(한국형 포장 설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구-아스팔트 포장재료 및 품질관리 기준 정립, 2002년)을 종합한 결과, 기존 마찰 배합설계 방법의 수정·보완 필요성에 대한 의견 중 12%는 매우 필요하다고 응답하였으며, 78%는 필요성이 있다고 응답하여 약 90%의 응답자가 개선 필요성을 언급하였다. 그리고 기존 배합설계 방법의 개선이 필



요한 이유로, 이미 일부 현장에서 외국의 개선된 배합설계 방법이 적용되고 있는 현실(31%), 기존 마사살 배합설계 방법이 도로 포장의 장기 공용성과 상관성이 낮기 때문(25%) 등의 순으로 나타났다. 또한 마사살 배합설계에서 시험 방법이 어렵거나 시급히 보완이 필요한 기준으로는 흐름값(29%)과 골재 입도(22%)를 제시하였다. 특히, 아스팔트 플랜트의 다수 실무자가 배합설계에서 흐름값 기준의 개선 또는 대체 방안이 가장 절실한 요구 사항으로 제시되었으며, 실무 경험에서 마사살 안정도와 흐름값의 기준이 포장의 공용 성능과 연관성이 적은 것으로 평가되었다. 이에 덧붙여, 기존 마사살 배합설계 방법에서 새로

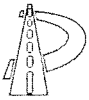
운 기준을 적용한 개선안이 마련되어야 한다고 하였다. 표 1은 이러한 현장 실무자의 의견을 종합하여 기존 마사살 배합설계 방법의 문제점을 정리한 것이다. 표 2는 실제 현장에서 조사한 결과를 종합하여 기존 마사살 배합설계의 문제점을 정리한 것이다. 여기서는 기존 마사살 배합설계의 문제점을 크게 시험장비와 배합설계 기준으로 구분하여 정리하였으며, 실제적인 문제점들을 사항별로 언급하였다. 조사에 따르면 안정도 시험기의 경우 규격 제품의 인증 및 규정 마련이 시급하였다. 부정확한 안정도 시험기의 사용으로 안정도 시험에 의한 결과값의 오차가 많이 발생하여 배합설계 결과의 일관성이 떨어졌다. 마사살 다짐기

표 1. 기존 마사살 배합설계 문제점에 대한 실무자 의견

구 분	실 무 자 의 견	
시험 장비	안정도 시험기	규격화 제품의 운용 규정이 마련되어 있지 않아 시험 결과의 오차 및 배합설계의 부정확성 발생
	마사살 다짐기	표준화된 다짐 특성을 구현할 수 있는 세부적인 규격 마련 시급
배합설계 기준	안정도	포장 공용성과 관련성이 적고 시험 과정에서 측정값 사이의 격차가 발생하여 장비별로 일관성 있는 시험 결과의 획득이 어려움
	흐름값	
	최적아스팔트 함량 결정	포장의 성능 개선을 위한 새로운 기준 정립 및 간편화된 절차 필요

표 2. 현장 조사 결과에 의한 기존 마사살 배합설계의 문제점

구 분	현 장 조 사 결 과	
시험 장비	안정도 시험기	KS 규격 제품의 사용을 통한 시험 결과의 오차 제거 및 배합설계의 일관성 확보 필요 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 규격 제품의 인증제도 실시</li> <li>• 재하 속도에 대한 교정 규정 마련</li> </ul>
	마사살 다짐기	표준화된 다짐 특성을 확보할 수 있는 세부적인 규격의 개선 및 도입 필요 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 타격 횟수의 규정 신설</li> <li>• 받침대, 정치 방법의 규정 마련</li> </ul>
배합설계 기준	안정도	시험기의 제품별 제원 특성에 의한 측정값의 변동성이 심하고 배합설계의 일관성 확보 어려움 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 안정도 및 흐름값의 재정립 필요</li> </ul>
	흐름값	
	최적아스팔트 함량 결정	포장의 성능 개선을 위한 배합설계 변수의 적용기준 및 새로운 절차 도입 필요 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 현 실무자의 요구 사항 반영</li> <li>• 국제 규정의 도입 및 반영</li> </ul>



에서는 표준화된 제원확보가 필요하였다. 각기 다른 제원(받침대, 정치 방법)의 사용으로 일정한 다짐효과를 발휘하지 못하는 것으로 나타났으며 타격 속도도 현장에 따라 큰 차이를 나타내었다. 배합설계 기준에서는 안정도와 흐름값에 대한 재정립 필요성을 공감하였고 국제 규정의 반영을 통해 개선된 최적 아스팔트 함량 결정 방법의 도입이 요구되었다.

## 2.2 각 규정별 최적 아스팔트 함량 결정 방법

마살 배합설계를 통한 최적 아스팔트 함량 결정은 국내와 외국에서 약간의 차이를 보이고 있다. 현재 국내 마살 배합설계에서는 용적 개념인 공극률과 포화도, 그리고 마살 안정도 시험을 통한 안정도와 흐름값의 기준을 만족하는 각 아스팔트 함량 공통 범위에서의 중간값을 최적 아스팔트 함량으로 결정하고 있다. 이는 일본도로공단에서 사용하는 방식과 동일한 방법이다(그림 1). 미국의 경우 National Asphalt Pavement Association(NAPA) 규정에서는 4% 공극률에 해당하는 아스팔트 함량을 최적 아스팔트 함량으로 결정하고 있다. Asphalt Institute(AI) 규정에서는 최대 안정도, 최대 혼합물 밀도, 그리고 4% 공극률에 해당하는 아스팔트 함량을 각각 구하고 3개의 산술 평균값을 최적 아스팔트

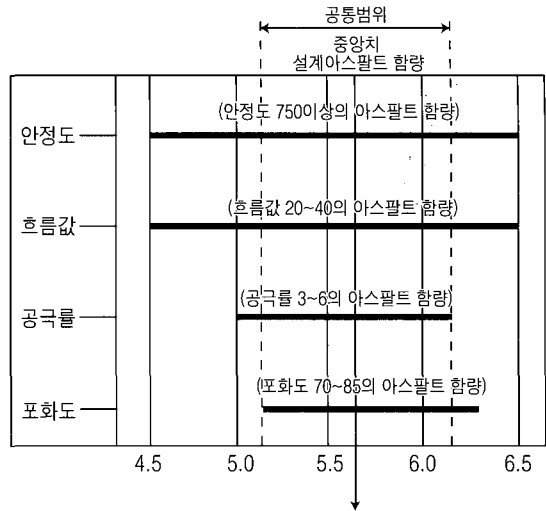


그림 1. 기존 최적 아스팔트 함량 결정 방법  
(밀립도 아스팔트 혼합물)

함량으로 결정하고 있다. 또 영국 British Standard(BS) 규정에서는 최대 안정도, 최대 혼합물 밀도, 최대 골재 밀도에 해당하는 아스팔트 함량을 각각 구하고, 각각의 아스팔트 함량의 산술 평균값을 최적 아스팔트 함량으로 선정하고 있다. 표 3은 각 규정별 최적 아스팔트 함량 결정 방법을 나타내고 있고, 표 4는 각 규정별 마살 배합설계 기준값을 보여주고 있다.

표 3. 각 규정별 최적 아스팔트 함량 결정방법

규 정	최적 아스팔트 함량 산정 방법
한 국 일본도로공단	공극률, 포화도, 안정도, 흐름값의 기준 내에 해당하는 아스팔트 함량을 각각 구하고 공통된 범위 내에서 중간값을 최적 아스팔트 함량으로 선정함
미 국 (NAPA)	4% 공극률에 해당하는 아스팔트 함량을 결정한 후, 아스팔트 함량에 해당하는 포화도, VMA, 안정도, 흐름값이 기준값(표 4)을 만족하는지를 확인한 다음, 이를 최적 아스팔트 함량으로 선정함
미 국 (AI)	최대 안정도, 최대 혼합물 밀도, 그리고 4% 공극률에 해당하는 아스팔트 함량을 각각 구하고 3개의 산술 평균값을 구한 후 평균 아스팔트 함량에 대한 안정도, 흐름값, 공극률 및 VMA에 대한 기준값(표 4)을 만족하는지 확인한 다음 이를 최적 아스팔트 함량으로 선정함
영 국 (BS)	최대 안정도, 최대 혼합물 밀도, 최대 골재 밀도에 해당하는 아스팔트 함량을 각각 구하고, 각각의 아스팔트 함량의 산술 평균값을 최적 아스팔트 함량으로 선정함



표 4. 각 규정별 마살 배합설계 기준값(표층-중(重)교통-20mm 밀립도)

물성치 \ 규 정	한 국 일본도로공단	미 국 (NAPA)	미 국 (AI)
다짐 횟수(면당)	75	75	75
안정도	750kg 이상	1800lb 이상	1800lb 이상
흐름값(0.01cm)	20~40	20~35	20~35
공극률(%)	3~6	3~5	3~5
포화도(%)	70~85	65~75	65~75
VMA(%)	-	13 이상	13 이상

최적 아스팔트 함량 결정은 이렇게 각 나라의 규정 별로 틀리게 나타나지만, 공극률을 고려하는 용적 개념은 필수 항목으로 모든 배합설계에서 고려되어지고 있다. AI 규정의 경우, 1988년도 Manual Series No. 2에서는 최적 아스팔트 함량 결정을 위해서 언급한 바와 같이 최대 안정도, 최대 혼합물 밀도, 4% 공극률에 해당하는 아스팔트 함량을 각각 구하고 3개의 산술 평균값을 최적 아스팔트 함량으로 결정하였다. 1995년도 Manual Series에서는 NAPA 규정과 동일한 방식으로 4% 공극률에 해당하는 아스팔트 함량을 최적 아스팔트 함량으로 결정하고, 이를 통해 VMA, 포화도, 안정도, 흐름값을 검토하는 방식으로 배합설계를 실시하였다. 1998년도 Manual Series에서는 다시 과거의 방식으로 회귀하여 1988년도 방식과 동일한 방법으로 최적 아스팔트 함량을 산정하고 있지만, 공극률을 고려하는 용적 개념은 필수항목으로 고려하고 있다.

최근 마살 배합설계 방법과는 별도로 미국에서 Superpave 배합설계 방식이 개발되었다. 이 방식에서는 마살 배합설계에서 사용하는 충격식 다짐 방법과는 다른 선회 다짐기(Gyratory Compactor)를 사용하지만 최적 아스팔트 함량 결정은 4% 공극률에 해당하는 아스팔트 함량을 최적 아스팔트 함량으로 결정하고 있다.

이와 같이 대부분의 마살 배합설계에서 공극률은 필수 항목으로 고려되어지고 있는 이유는 첫째, 공극

률은 이론최대밀도( $G_{mm}$ )와 현장에서의 밀도( $G_{mb}$ ) 측정만으로 쉽게 측정이 가능하다. 둘째, 아직까지 공극률과 혼합물 성능과의 상관성이 이론적으로 밝혀지지 않았으나, 경험적으로 일반 아스팔트 혼합물의 경우 4% 공극률을 기준으로 배합설계한 아스팔트 혼합물들이 비교적 만족할 만한 성능을 보여주었다. 이러한 이유로 인해 용적개념의 배합설계, 그 중에서 공극률은 배합설계의 필수 항목으로 고려되어지고 있다.

### 3. 개선된 마살 배합설계 방법

본 연구에서 개선된 마살 배합설계 방법은 국내에서 사용되고 있는 마살 배합설계의 단점을 보완하고 용적 개념의 장점을 도입한 배합설계 방법(Volumetric Mix Design)이다. 본 내용은 건설교통부 발주 과제이며 현재 한국건설기술연구원과 한국도로공사, 그리고 한국도로학회에서 수행하고 있는 "한국형 포장 설계법 개발과 포장 성능 개선 방안 연구" 중 현행 마살 배합설계 개선 연구를 통해 수행되었던 "가열아스팔트 혼합물의 배합설계 지침"을 통해 제시되었다. 이 지침에서는 개선된 최적 아스팔트 함량 결정 방법 외에 마살 다짐장비의 표준화, 자연모래의 함유율, 실측 이론최대밀도의 사용 이유 등을 제시하고 있다.



본 연구에서 제시된 개선 마샬 배합설계를 설명하면, 먼저 설계자의 경험이나 과거 설계 자료에 근거하여 초기 아스팔트 함량을 결정하고 이를 기준으로  $\pm 0.5\%$ ,  $\pm 1.0\%$  변화시킨 아스팔트 함량으로 총 5가지의 공시체를 제작한다. 각 혼합물별로 이론최대 밀도를 결정하고 각 공시체에 대한 겉보기 밀도 시험을 실시하여 공극률과 아스팔트 함량에 대한 관계를 구한다. 다음으로 여기에서 공극률 4%에 해당하는 아스팔트 함량을 예비 설계 아스팔트 함량으로 선정한다. 그리고 예비 설계 아스팔트 함량이 적정한지를 판단하기 위하여 포화도, VMA, 안정도, 흐름값에 대하여 기준 범위에 만족하는지를 검토한다. 예비 설계 아스팔트 함량을 사용한 공시체가 표 5에서와 같은 4가지의 기준 범위를 모두 만족하면 이를 최적 아스팔트 함량으로 결정하고, 그렇지 못하다면 배합설계를 다시 실시한다. 표 5는 개선된 배합설계의 기준값을 보여주고 있으며, 그림 2는 개선 마샬 배합설계의 순서도를 보여주고 있다.

표 5. 개선된 마샬 배합설계의 기준값(표층-20mm 밀립도)

물 성 치	기 준 값
다짐 횟수(면당)	50(75)
안정도	4,900N(500kg) 이상 [7,350N(750kg)] 이상
흐름값(0.01cm)	20~40
포화도(%)	70~85 [65~80]
VMA(%)	13 이상

※ ( )안은 설계 ESAL  $> 10^6$ 인 경우에 유동에 의한 소성변형이 우려되는 포장에 적용함

## 4. 기존 방법과 개선 방법과의 비교

### 4.1 개요

기존 마샬 배합설계 방법(공극률, 포화도, 안정도,

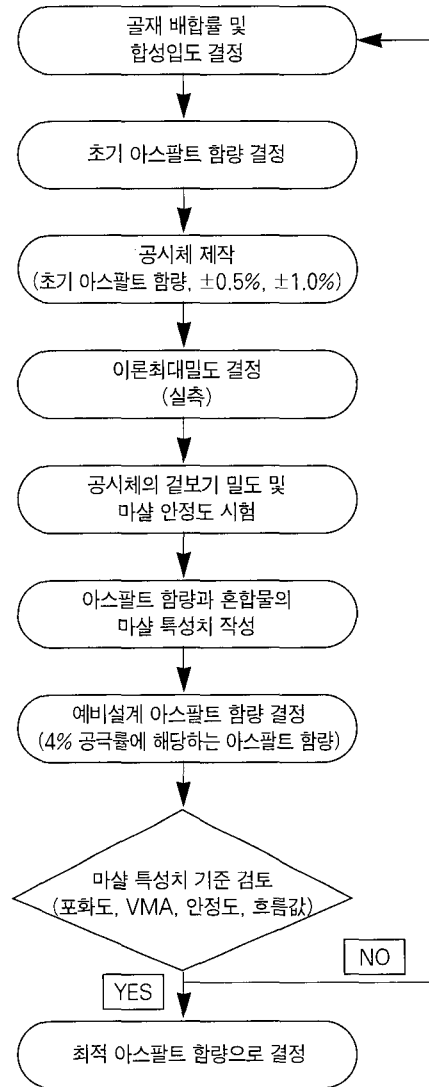


그림 2. 개선 마샬 배합설계 순서도

흐름값을 고려하는 배합설계)과 개선된 방법(4% 공극률을 갖도록 하는 배합설계)과의 비교를 위하여 각각의 방법으로 배합설계를 실시한 후 혼합물 특성치(최적 아스팔트 함량, 밀도, 공극률, 안정도, 흐름값)를 비교 분석하였다. 그림 3은 본 연구의 실험 계획 흐름도를 보여주고 있다.

여기서, 최적 아스팔트 함량 결정 방법에서의 차이점 분석을 위하여 다른 조건들(사용된 골재, 아스팔트 바인더, 표준 다짐장비 사용)은 모두 동일하게 유지하였다.

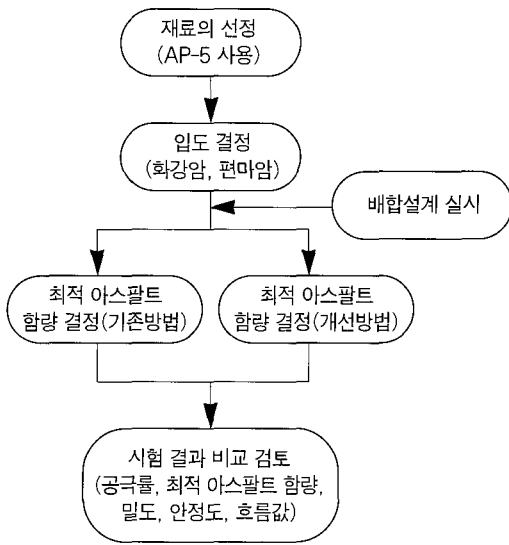


그림 3. 실험 계획 흐름도

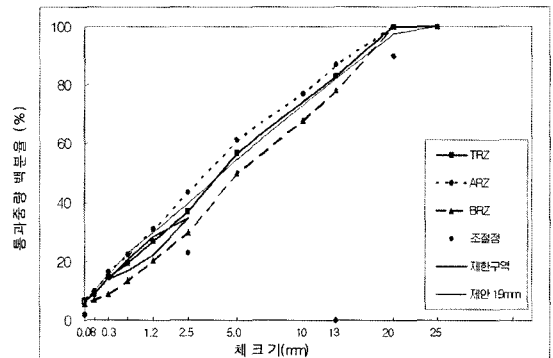
#### 4.2 실험 재료 및 방법

본 연구에서 아스팔트 혼합물 배합 설계에 사용한 골재는 충북 음성에서 생산되는 화강암과 경기도 포천에서 생산되는 편마암 종류의 쇄석을 사용하였고 채움재로는 석회 석분을 사용하였다. 혼합물 종류는 골재 호칭 최대치수 20mm를 사용하여 20mm 밀립도 혼합물을 제작하였다.

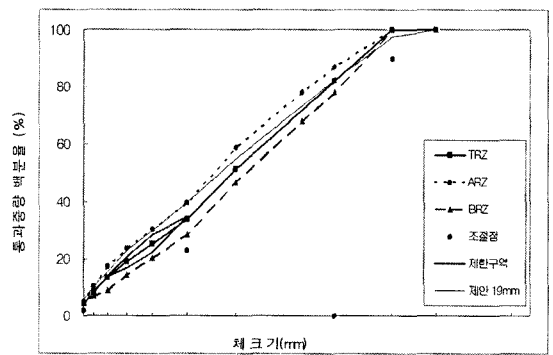
기존 방법과 개선 방법 사이에 마찰 물성치 비교 검토를 위하여 본 연구에서는 화강암, 편마암 골재에 대하여 3개의 입도를 선택하였다. 입도 선택은 1994년 미국에서 연구 완료된 신도로연구(Strategic Highway Research Program-SHRP)의 Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement) 배합설계 1단계의 결과로 제안된 연한 혼합물(Tender Mix)이 생산되는 제한구역(Restricted Zone)을 기준으로 ARZ(Above Restricted Zone), TRZ(Through Restricted Zone), 그리고 BRZ(Below Restricted Zone)로 입도를 분류하였다. ARZ는 세립분을 많이 포함하는 골재 입도이고 BRZ는 굵은 골재를 많이 함유하는

골재 입도이다. 따라서 세립 입도(Fine Graded), 조립 입도(Coarse Graded), 그리고 이들의 중간 입도 혼합물에 대한 배합설계를 실시하여 기존 방법과 개선된 배합설계 방법사이의 차이를 규명하고자 하였다. 그림 4는 본 연구의 배합설계에 사용된 화강암, 편마암 골재의 ARZ, TRZ, BRZ 입도를 나타내고 있다. 또한 각각의 골재에 대하여 3가지 입도별 3번씩의 배합설계를 실시하여 총 18번(2종류 골재 × 3종류 입도 × 3번의 배합설계)의 배합설계를 수행하였으며, 이 때 각각의 배합설계에 대해 최적 아스팔트 함량과 마찰 물성치들을 구하였다.

본 연구에 사용된 아스팔트 바인더는 국내 S사에서 생산되는 AP-5(침입도 61~80)를 사용하였고, 표 6은 아스팔트 바인더 물성시험 결과를 나타내고 있다.



(a)



(b)

그림 4. 골재 합성입도 곡선(a : 화강암, b: 편마암)

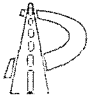


표 6. 아스팔트 바인더 물성시험 결과

Original		RTFO	
침입도(0.1mm)	73	47	
인화점(℃)	346	-	
연화점(℃)	42	47	
점도(cP)	385	585	
PG(DSR)	G*/sinδ(kPa)		G*/sinδ(kPa)
	52℃	7.018	15.41
	58℃	2.773	5.84
	64℃	1.149	2.338
Failure Temp : 64.9℃		Failure Temp : 64.3℃	
PG(BBR)	-6℃	Stiffness(MPa)	m-value
		113.31	0.33
PG 등급	64-16		
RTFO 후 손실량(%)	0.72		

본 연구에서 수행한 배합설계는 아스팔트 함량을 골재 총 중량의 5.5%를 기준으로  $\pm 0.5\%$ 와  $\pm 1.0\%$ 의 공시체를 각각 3개씩 제작한 후 기존 방법과 개선 방법을 적용하여 최적 아스팔트 함량을 산출하였다. 공시체는 KS F 2337과 ASTM D 1559의 마찰 아스팔트 혼합물 제조 방법에 따라 제조하였다. 본 연구의 마찰 다짐 횟수는  $ESAL > 10^6$ 인 경우와 소성 변형이 우려되는 포장으로 고려하여 양면 75회를 적용하였으며, 혼합온도와 다짐온도는 KS 규정을 적용하였다.

#### 4.3 결과 분석

기존 마찰 배합설계의 문제점에서 기술한 바와 같이, 마찰 안정도 시험은 장비의 차이, 작동자의 비전문성, 그리고 데이터 해석 오류 등의 문제점으로 인하여 안정도와 흐름값이 배합설계의 결정 항목으로 이용될 경우 동일한 배합설계 조건에서 설계자 사이에 다른 배합설계 결과를 도출할 가능성이 높다. 즉 기존 배합설계 방법은 결과의 일관성이 매우 낮은

방법이라고 말할 수 있다. 그런데 만일 본 연구에서와 같이 기존 방법과 개선 방법의 배합설계 결과를 비교하고자 할 때 비교 대상 중 하나인 기존 방법의 결과가 전술한 바와 같이 상당한 실험 오차를 포함하고 있다면 두 방법의 비교는 그 신뢰성을 잃게 된다. 따라서 본 연구에서는 표준화된 안정도 시험 장비를 사용하여 실험 오차를 최소화하고자 노력하였으며 그 결과는 표 7에서 보는 바와 같다. 마찰 안정도는 표 7에서 보는 바와 같이 최대 오차가 6.7%, 흐름값은 최대 오차가 6.9%로 나타나 시험 결과값으로의 적용 가능한 허용 범위 내에 있다고 말할 수 있다. 따라서 위의 실험값들을 이용한 기존 배합설계와 개선 배합설계와의 비교는 충분히 신뢰할만하다고 할 수 있다.

기존 방법과 개선 방법을 비교하기 위하여 각각의 방법으로 결정된 최적 아스팔트 함량(Optimum Asphalt Content, OAC), 밀도, 공극률, 안정도, 흐름값을 표 8에 나타내었다. 다양한 경우의 비교를 위해 2종류의 골재(화강암, 편마암), 골재 종류별 3종류의 입도(ARZ, TRZ, BRZ)를 대상으로 하였고,





표 7. 마셜 안정도 시험 오차표(기존 방법 적용)

골재 종류	입 도	반복 횟수	안정도 (kg)	흐름값 (0.01cm)	오차(%)	
					안정도	흐름값
화강암 (20mm)	ARZ	1	1458	33	3.6	0
		2	1564	32	3.4	3.0
		3	1516	33	0.2	0
		평균	1513	33	2.4	1.0
	TRZ	1	1704	36	0	9.1
		2	1770	32	3.9	3.0
		3	1638	32	3.9	3.0
		평균	1704	33	2.6	5.0
	BRZ	1	1002	32	2.5	5.9
		2	1058	38	2.9	11.8
		3	1023	33	0.5	2.9
		평균	1028	34	2.0	6.9
편마암 (20mm)	ARZ	1	1191	29	5.4	6.5
		2	1112	33	1.6	6.5
		3	1087	32	5.0	3.2
		평균	1130	31	4.0	5.4
	TRZ	1	1193	34	3.5	6.3
		2	1228	31	6.5	3.1
		3	1037	31	10.1	3.1
		평균	1153	32	6.7	4.2
	BRZ	1	1005	26	1.8	0
		2	970	24	5.2	7.7
		3	1094	29	6.9	11.5
		평균	1023	26	4.6	6.4

실험 오차를 줄이기 위해 입도 종류별 3번의 배합설계를 실시하였다. 표 8에 의하면 최적 아스팔트 함량, 밀도, 안정도, 그리고 흐름값은 기존 방법과 개선 방법 사이에 차이가 없는 것을 볼 수 있다. 그러나 공극률은 개선 방법을 적용할 때는 일정한 공극률(4%)인 반면 기존 방법에서는 거의 모든 입도에서 4%와 큰 차이를 나타내었다. [최대: 0.64%(화강암-BRZ)]

본 실험 결과를 바탕으로 기존 방법과 개선 방법을 적용할 때 공극률의 차이가 얼마나 발생하는지를 검토하기 위하여 분산 분석(ANOVA: Analysis Of Variance)을 실시하였으며 그 결과는 표 9와 같다. 공극률 분산 분석 결과, 거의 모든 입도 종류에서 F ratio값이 기각치를 훨씬 넘어서는 값을 나타내어 기존 방법과 개선 방법 사이에는 큰 차이가 있는 것으로 나타났다.

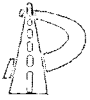


표 8. 마샬 배합설계 결과

골재 종류	입도 종류	배합설계 방법	OAC (%)	밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	공극률 (%)	안정도 (kg)	흐름값 (0.01cm)
(화강암) 20mm 밀립도	ARZ	기존	4.98	2.360	4.23	1513	33
		개선	5.05	2.363	4.00	1508	33
	TRZ	기존	4.94	2.367	3.88	1704	33
		개선	4.89	2.366	4.00	1716	33
	BRZ	기존	5.56	2.324	4.64	1028	34
		개선	5.87	2.329	4.00	1012	35
(편마암) 20mm 밀립도	ARZ	기존	5.34	2.442	4.57	1130	31
		개선	5.60	2.447	4.00	1121	34
	TRZ	기존	5.21	2.448	4.51	1153	32
		개선	5.45	2.451	4.00	1122	34
	BRZ	기존	4.88	2.426	4.13	1023	26
		개선	4.93	2.427	4.00	1015	27

※ ARZ : Above Restricted Zone  
TRZ : Through Restricted Zone  
BRZ : Below Restricted Zone

한편, 마샬 배합설계에서 최적 아스팔트 함량을 결정하는 중요 요소들을 검토해 보았다. 기존 방법의 경우 배합설계의 4가지 요소들 중 안정도와 흐름값은 모든 아스팔트 함량 범위 (초기 아스팔트 함량의 4.5%~6.5%)에서 기준 값을 상회하였다. 즉 그림 1에서와 같이 공극률과 포화도만으로 최적 아스팔트 함량이 결정되었다. 그런데 포화도 역시 공극률에 지배를 받는다. 따라서 최적 아스팔트 함량을 결정하는 기존 방법의 4가지 요소들 중 공극률이 최적 아스팔트

트 함량을 결정하는 가장 중요한 요소임을 알 수 있었다. 즉, 안정도와 흐름값은 최적 아스팔트 함량을 결정하는데 있어 영향을 주지 못하고 있음을 알 수 있었다.

전술한 바와 같이 국내 현장의 경우, 마샬 테스트를 수행함에 있어 실험실간의 차이, 작동자의 비전문성, 그리고 데이터 해석의 오류 등으로 인해 마샬 안정도와 흐름값에 있어 부정확한 값을 결정할 가능성이 높다. 따라서 기존 마샬 방법으로 배합설계를 할 경우 배합설계에 일관성이 결여될 수 있는 문제점을 안고 있다. 한편, 위에 기술한 것처럼 국내의 일반적인 아스팔트 혼합물의 경우는 안정도와 흐름값이 최적 아스팔트 함량 결정에 영향을 주지 못한다. 따라서 개선 방법으로 최적 아스팔트 함량을 결정함으로써 마샬 안정도 시험에 의한 오차를 억제할 수 있으며, 일정한 공극률을 갖는 아스팔트 혼합물을 생산할 수 있다.

표 9. 공극률 분산 분석 결과

골재	입도	F ratio	P value	F 기각치
화강암	ARZ	<b>20.88</b>	<b>0.01</b>	7.71
	TRZ	1.259	0.325	
	BRZ	<b>31.67</b>	<b>0.005</b>	
편마암	ARZ	<b>94.63</b>	<b>0.001</b>	
	TRZ	<b>33.58</b>	<b>0.004</b>	
	BRZ	0.86	0.407	



## 5. 결론

본 연구에서는 기존 마샬 배합설계 방법의 문제점을 인식하고, 이러한 문제점을 해결할 수 있는 개선된 방법을 제시하고자 하였다. 연구 수행 결과는 다음과 같다.

1. 현장 실무자들에 대한 설문 조사와 현장 실사 조사 결과, 표준화된 시험 장비 미비로 인한 배합설계의 일관성 결여, 안정도와 흐름값이 포장 공용성능과의 연관성이 적음, 안정도 시험 방법의 어려움, 배합설계에 대한 전문적인 지식을 가지고 있는 사람의 부족 등이 기존 마샬 배합설계의 문제점으로 조사되었다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 개선된 마샬 배합 설계법을 제시하였다. 개선된 마샬 배합 설계법에서는 마샬 안정도와 흐름값을 최적 아스팔트 함량 결정 요소에서 제외시키고 검토 요소로 전환시켰다. 이로써 4% 공극률을 갖는 최적 아스팔트 함량을 결정하는 배합설계 방법을 제시할 수 있었다.
2. 기존 방법과 개선 방법과의 배합설계 결과값의 비교·결과, 최적 아스팔트 함량, 밀도, 안정도, 흐름값은 기존 방법과 개선 방법 사이에 차이가 존재하지 않았다. 그러나 기존 방법의 공극률은 개선 방법의 공극률과 상이하였다. 기존 방법을 적용할 때는 일정한 공극률을 가지는 아스팔트 혼합물 생산이 불가능하나, 개선 방법을 적용할 때는 일정한 공극률(4%)을 가지는 아스팔트 혼합물 생산함으로써 품질의 변동성이 없는 아스팔트 혼합물이 생산이 가능하였다.
3. 본 연구의 실험 결과, 기존 마샬 배합설계 방법에서의 2가지 요소들(안정도, 흐름값)은 최적 아스팔트 함량 산정을 함에 있어 전혀 고려 대상이 되지 못하였다. 안정도는 18번의 배합설계 모두에서 기준 값(750kgf)을 상회하는 것으로 나타났고 흐름값도 1번의 배합설계를 제외하고는 모든 아스팔트 함량 범위(4.5~6.5%)에서 기준을 만족

하였다. 따라서 기존 배합설계는 최적 아스팔트 함량을 결정하는 4가지 요소들 중 공극률에 의존도가 가장 높음을 알 수 있었다. 따라서 공극률(4%)만으로 최적 아스팔트 함량을 결정하는 개선 방법이 타당함을 실험적으로 증명할 수 있었다.

4. 이상적인 아스팔트 혼합물 배합 설계법은 공용 기간동안 최상의 성능을 유지할 수 있는 공극률에서의 아스팔트 함량을 결정하여야 한다. 이를 위해서는 적절한 실내 실험을 통해 혼합물별로 공극률과 공용성과의 상관성을 구하고, 이를 근거로 최적 아스팔트 함량을 결정해야 한다. 그러나 기존의 배합설계 방법의 공용성 시험인 마샬 안정도시험은 아스팔트 혼합물의 성능을 제대로 반영하지 못하는 것으로 알려지고 있다. 또한 현재까지 공용성과 공극률과의 상관성이 명확히 밝혀지지 않았기 때문에 공용기간 동안 최상의 성능을 유지할 수 있는 배합설계 공극률을 결정하는 것은 현실적으로 어렵다. 한편, 많은 연구들이 일반적인 아스팔트 혼합물의 경우, 공극률 4%를 기준으로 배합설계한 아스팔트 혼합물이 비교적 우수한 공용성을 보여준다고 보고하고 있다. 이와 같은 상황에서 본 연구에서 제시한 배합설계는 현장에서 적용이 용이하면서도 합리적인 방법이라 할 수 있다.

## 참고문헌

1. 한국건설기술연구원(2002), "한국형 포장 설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구(1차년도 1단계)-아스팔트 포장재료 및 품질관리 기준 정립", 건설교통부
2. 한국건설기술연구원(2003), "한국형 포장 설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구(1차년도-2단계)-아스팔트 포장재료 및 품질관리 기준 정립", 건설교통부
3. 한국건설기술연구원(2003), "가열아스팔트 혼합물의 배합설계 지침", 건설교통부
4. Asphalt Institute(1988), "Mix Design Methods for Asphalt Concrete-Manual Series No."
5. Asphalt Institute(1995), "Mix Design Methods



for Asphalt Concrete-Manual Series No. 2(sixth edition)”

6. 한국표준협회(2001), “KS 핸드북”
7. 아스팔트 포장 연구회(1998), “가열 아스팔트 혼합물의 배합 설계 지침”
8. Thomas D. White, “Marshall Procedures for Design and Quality Control of Asphalt Mixtures”, *Asphalt Paving Technology*, Vol. 54, 1985.
9. Kandhal, S. and Koehler, S., “Marshall Mix Design Method : Current Practice”, *Asphalt Paving Technology*, Vol. 54, 1985.
10. C. R. Foster, “Development of Marshall Procedures for Designing Asphalt Paving Mixtures” Information Series 84, National Asphalt Pavement Association, Riverdale, Maryland, 1982.
11. Pennsylvania Department of Transportation, “Marshall Criteria for Compacted Bituminous Specimens”, Pennsylvania Test Method 705, Field Test Manual, 1983. 3.

〈접수 : 2004. 4. 19〉