

아스팔트 혼합물의 배합설계방법 개량 연구

Investigation of The New Mix Design Method in Hot Mix Asphalt Mixture

손원표* · 남영국** · 진정훈*** · 권기범****

Shon, Won Pyo · Nam, Young Gug · Jin, Jung Hoon · Kwon, Gi Bum

1. 서론

현재 국내에서 사용되고 있는 아스팔트 혼합물의 배합설계법은 교통량이 적고 차량의 중량이 낮아 차륜의 접지압이 비교적 낮던 60여 년 전에 개발된 마샬배합설계법이다. 이 방법은 전세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 간편한 방법으로 많은 사람들에게 익숙해져 있고 활용도도 크다. 하지만, 마샬방법에 사용되는 변수 가운데 안정도는 공용성과는 상관성이 낮은 것으로 국내외적으로 인식되고 있으며 국내의 경우 특히, 소성변형 저항성과의 상관성에 많은 문제가 제기되고 있다.

또한, 몰드제작에 사용하고 있는 충격식 다짐방법이 실제포장에서 발생하는 다짐방법과는 매우 상이하여 현실적인 다짐방법을 모사하지 못하고 있으며 더욱이 마샬안정도로 불리는 아스팔트의 강도정수는 HMA의 전단강도를 적절하게 평가하지 못한다는 것이다. 따라서 이러한 마샬배합설계의 단점을 보완할수 있도록 지역별 교통특성과 기후특성 그리고 응력조건을 고려하여 국내실정에 맞는 합리적인 배합설계 및 시방기준의 제정이 필요하며 그러하기 위해서는 보다 체계적이고 과학적인 역학적 개념이 뒷받침된 시험법의 연구가 필요하다.

2. 포장체의 거동특성 분석

아스팔트 콘크리트 포장체의 거동특성은 교통량, 주행속도, 온도조건등의 다양한 인자들의 영향을 받아 초기에는 서서히 변형하기 시작하여 시간이 경과함에 따라 결국 파괴에 도달하게 되는 메카니즘을 갖는다. 아스팔트콘크리트 포장 상부에 차량의 윤하중이 작용하면 포장체의 거동은 상부에는 압축력이 작용하고, 하부에는 인장력이 작용하며 동시에 상부, 하부, 내부에는 전단력이 복합적으로 작용한다. 또한 하중 재하시 아스팔트 콘크리트층의 포장 구성요소 중 입자의 점에 발생하는 응력상태는 그림.1과 같이 수직, 수평응력과 전단응력을 나타낸다.

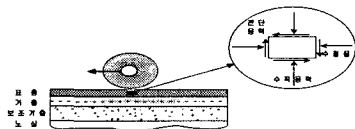


그림 .1 차량하중에 의해 포장구조체에 발생하는 응력 (David Whiteoak,1994)

* 정희원 · 삼안건설기술공사 전무 · 공학박사 · 02-509-4753(E-mail : wpshon@samaneng.com)
** 정희원 · 인천대학교 토목환경 시스템공학과 명예교수 · 공학박사 · 032-770-8915(E-mail : yknam@incheon.ac.kr)
*** 정희원 · 인천대학교 토목환경 시스템공학과 · 공학박사 · 032-770-8915(E-mail : jinrino@kornet.net)
****정희원 · 삼안건설기술공사 사원 · 공학석사 · 02-509-4457(E-mail : kbkwon@samaneng.com)

2.1 포장체의 내부응력분포

아스팔트 포장체는 표층과 기층, 보조기층, 노상에 의해 구성되는 다층구조로서 응력-변형조건을 그림.2와 그림.3과 같이 표현할 수 있다. 그림.2는 운하중에 의한 포장체 내부의 응력분포를 나타낸 것으로 하부층으로 내려갈수록 하중분산이 넓어짐에 따라서 노상에 다다른 응력은 상당히 감소하게 된다. 또한, 상부인 표층에서 응력이 가장 크므로 양질의 재료를 사용해야 한다.

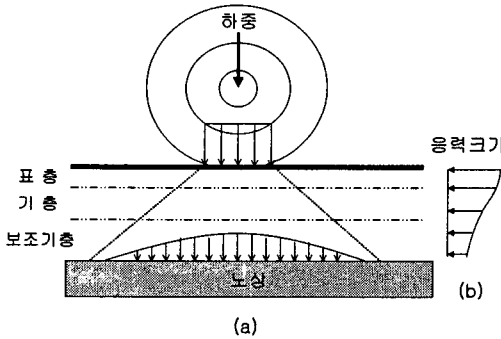


그림.2 운하중에 의한 포장체 내부의 응력분포

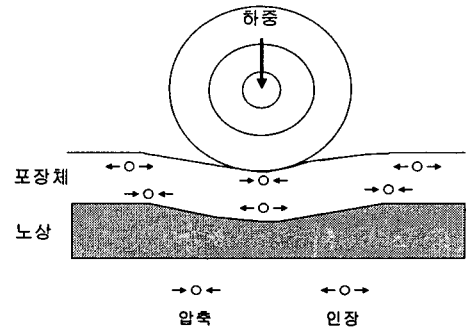


그림.3 포장체침에 따른 응력 유발

그림.3은 하중이 포장체에 작용했을 때 치짐이 발생하고, 하중의 재하 위치와 깊이에 따라 인장응력과 압축 응력이 발생하게 된다

3. 마살배합설계법의 문제점

마살안정도의 재하 메카니즘은 실제 현장에서의 재하 형식과 다르다. 즉, 공시체를 축방향으로 다져놓고 하중은 횡방향에서 쥐어짜듯 가하므로 현장에서 골재가 배열되어 있는 방향과 다르게 하중이 작용한다. 그렇기 때문에 실제로 포장에 가해지는 하중에 의한 포장체의 역학적 거동을 제대로 반영하지 못한다. 또한 혼합물의 강도 특성중 하나라고 사용하는 안정도 측정치는 혼합물을 양생하는 과정에서 온도와 수침 처리하는 시간등과도 매우 밀접한 관계를 가지고 있다. 특히, 국내에서와 같이 실험실의 온도가 외기의 온도에 의해 크게 차이가 나는 경우에 온도에 민감한 아스팔트 혼합물 공시체의 양생온도와 60℃에서 수침처리를 통한 정확한 측정온도의 확보는 매우 중요한 의미를 가진다. 또한, 안정도 측정상의 오류보다도 이것이 도로포장에서 혼합물의 성능과 무관하다는 지적이 많다. 아스팔트 혼합물의 배합설계법의 개선은 과학적이며 역학적인 개념의 배합설계시스템의 방향으로 중요한 진전이 있어야 한다. 그러한 배합설계법은 기존의 경험에 의지하는 현재의 배합설계법에서 탈피해야 한다. 경험적인 시스템이 나쁜 것은 아니지만 이러한 시스템은 새로운 재료나 시공기술 그리고 새로운 시방규정이나 새로운 해석모델들이 배합과정안에 사용될 경우 이들을 쉽게 수용할수 없게 된다. 지난 20세기동안의 아스팔트 혼합물의 배합설계법은 구조성능의 모델링(해석과 모사)과 역학적인 거동예측과는 완전히 별개였다. 이러한 이유에서 포장관련 실무자를 대상으로 실시한 "아스팔트 혼합물의 배합설계 방법등에 대한 의식과 개선방안에 대한 의견"(한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구-아스팔트 포장재료 및 품질관리 기준정립, 2002년)을 종합한 결과 기존 마살배합설계방법의 수정,보완 필요성에 대한 의견 중 12%는 매우 필요하다고 응답하였으며, 78%는 필요성이 있다고 응답하여 약 90%의 응답자가 개선 필요성을 언급하였다. 그리고 기존배합설계 방법의 개선이 필요한 이유로 이미 일부 현장에서 외국의 개선된 배합설계 방법이 적용되고 있는 현실(31%), 기존 마살배합설계 방법이 도로포장의 장기공용성과 상관성이 낮기 때문(25%)등의 순으로 나타났다. 또한, 마살배합설계에서 시험방법이 어렵거나 시급히 보완이 필요한 기준으로는 흐름값(29%), 골재입도(22%)를 제시하였다.



4. 역학적 시험을 통한 개량 배합설계법

본 연구에서는 기존의 경험적인 방법인 마찰 배합설계법의 문제점을 보완하고 역학적 개념이 도입된 새로운 배합설계법을 제안하기 위해 역학적 강도 시험을 통한 도해법의 원리를 이용하고자 한다. 본 연구에서 실시한 역학적 강도 시험으로는 압축강도 시험, 간접인장강도 시험, 전단강도 시험이고 각각의 강도시험을 통해 얻어진 결과로부터 개량 배합설계법을 선정하였다. 개량 배합설계법에 사용된 설계 변수로는 역학적 강도 시험을 통해 얻어진 각 강도값에서 최대 변형량과 마찰 안정도를 선정하였다. 역학적 강도 시험시 시험의 조합은 아스팔트 혼합물 종류별 아스팔트 바인더 함량(4%, 5%, 6%)에 따라 기존 시험체계인 마찰 안정도 시험과 새로운 시험조합 체계인 압축강도 시험, 간접인장강도 시험, 전단강도 시험을 실시하였다. 아스팔트 혼합물 공시체는 아스팔트 바인더의 종류에 따라 일반 아스팔트 바인더 AP-3, AP-5등 상용화된 아스팔트 바인더 제품군을 사용하여 2가지 종류로 제작하였으며, 골재의 입도는 표층용 $\Phi 19\text{mm}$ 밀입도를 채택하였다. 이와 같은 시험 조건을 통해 아스팔트 함량에 따른 각각의 강도 특성 및 응력과 변형량과의 관계, 또한 공극률의 변화, 그리고 공극률과 강도특성 관계 등을 살펴 보는 것과 동시에 궁극적으로 상호 역학적 상관성을 비교·분석하였다.

5. 개량 배합설계법

본 연구에서 제시한 배합설계법은 압축, 간접인장, 전단 등 역학적 강도시험을 통해 이를 분석한 후, 각각의 강도값을 이용하여 최적 아스팔트 함량을 구하는 설계방법이다. 그림.4는 배합설계 그래프이며 X축의 상단은 전단강도, 하단은 간접인장 강도를 나타내며, Y축의 오른쪽은 변형량(또는 마찰 안정도), 왼쪽은 압축강도를 나타낸다. 또한 대각선은 아스팔트 함량을 나타낸다. 본 연구에서의 강도값은 역학적 시험을 통해 얻어진 강도값이며 변형량 역시 강도시험시 발생하는 최대 강도값에서의 변형량이다. 또한 설계변수로는 변형량 뿐만 아니라 마찰 배합설계를 통해 얻어지는 마찰 안정도를 적용하였으며 각각의 설계변수에 따른 최적 아스팔트 함량을 상호 비교하였다. 각각의 강도값에 대한 범위는 전단강도의 경우 $0\sim 9.0\text{kg/cm}^2$, 압축강도는 $0\sim 100\text{kg/cm}^2$, 간접인장강도는 $0\sim 160\text{kg/cm}^2$, 변형량은 $0\sim 4\text{mm}$ 로 설정하였다. 각 축의 스케일은 각각의 역학적 강도의 상관분석을 통해 정하였으며 스케일 적용을 위한 상관성 분석의 조합은 전단강도의 스케일을 기준으로 하여 각각 전단강도-압축강도, 전단강도-간접인장강도, 전단강도-마찰 안정도, 전단강도-변형량 조합으로 상관분석을 실시 하였으며 각 조합의 상관분석시 상관계수(R^2)는 모두 0.7이상을 만족하였다. 아스팔트 함량을 나타내는 대각선의 경우는 2~9%의 범위로 설정을 했는데 이는 도해법에서 사각형의 각 네 변에 적용한 스케일에 맞추어 대각선의 길이를 등분한 스케일이다. 2~9%의 범위는 아스팔트 혼합물의 OAC 범위에 해당하는 4~6%가 중앙에 위치하도록 설정 한 범위이다.

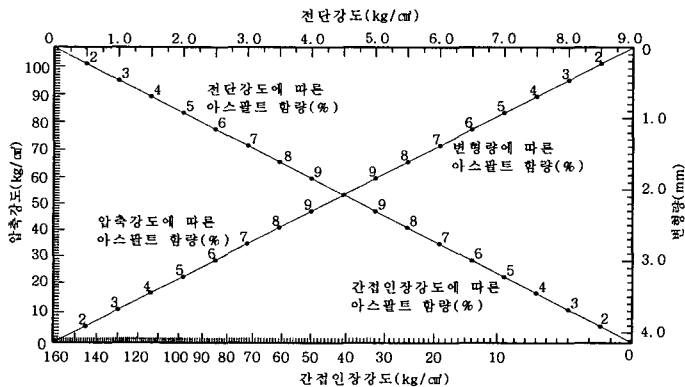


그림.4 개량 배합설계 그래프



5.1 개량 배합설계 그래프 적용방법

역학적 강도 시험으로부터 얻어진 강도값을 개량 배합설계법에 적용하기 위한 방법은 다음과 같다.

- (1) 각각의 역학시험에서 최대값을 갖는 극한 강도값과 아스팔트함량을 연결후 수직, 수평으로 선을 긋는다.
- (2) 4개의 수직, 수평 수직선으로부터 강도제한 구역을 설정한다. 이때 강도제한구역의 각변의 최대값과 최소값은 각각의 역학적 강도 시험에서의 최대 강도값으로 구성되어지기 때문에 각각의 최대 강도값이 강도 제한구역의 최소값 또는 최대값으로 표현되어 진다.
- (3) 그림.10에서 보는 바와 같이 중앙의 사각형이 강도제한 구역이며 파선의 경우는 본 연구에서 수행한 역학시험을 통하여 산출된 강도값이고 실선의 경우는 새로운 개량 배합설계법으로부터 역추적 하여 구한 값이다.
- (4) 개량 배합설계법의 적용된 그래프의 스케일은 각각의 역학적 강도의 상관성 분석을 통해 적용하였다. 역학적 강도의 상관성 분석은 네 가지 시험인 압축강도 시험, 간접인장강도 시험, 전단강도 시험, 마찰 안정도 시험에 대하여 실시 하였다. 상관성 분석을 위한 회귀분석 방법은 전단강도를 설명변수로 하고 다른 나머지 강도들을 종속변수로 하여 선형(linear), 곡선(curvilinear), 대수(logarithm), 지수(exponential), x의 거듭제곱(power) 회귀분석을 하여 표본결정계수(coefficient of determination : R²)가 가장 높은 값을 나타내는 한 가지 모델을 선택하였다. 통계분석에 사용된 인자의 데이터 수는 표.1과 같다.

표.1 시험결과 분석인자

구 분	시험 방법	분석 데이터 수	
		AP-3	AP-5
표층용 (Φ19mm)	마찰 안정도	100	100
	간접인장강도	100	100
	압축강도	100	100
	전단강도	100	100

통계 분석에 사용한 통계치는 평균, 표준편차, 변동계수를 사용했으며, 각각의 경우에 대한 실험결과를 95%의 신뢰구간으로 하였다. 자료의 갯수는 50~200개의 정규분포로 나타나므로 식(1)을 이용하여 범위를 산정 하였다.

$$x - z \frac{\sigma}{\sqrt{n}} < \mu < x + z \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \tag{1}$$

여기서, x : 표본평균, $z \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$: 신뢰계수, σ : 표준편차, n : 표본수, μ : 모평균

이와 같은 통계분석을 통한 AP-3, AP-5, 길소나이트, SBS의 각각의 시험에 대한 평균 통계치는 표.1의 자료를 통하여 표.2와 같은 결과를 얻었다.

표.2 아스팔트 바인더의 시험결과 통계치

구 분	평균	표준편차	변동계수(%)	범위 (95%)
마찰안정도(kg)	1190.6	178.8	15.0	1155.6~1225.7
간접인장강도(kg/cm ²)	7.0	1.0	14.6	6.8~7.2
압축강도 (kg/cm ²)	31.3	7.8	25.0	29.8~32.8
전단강도 (kg/cm ²)	2.6	0.7	28.8	2.4~2.7



이러한 통계분석을 통하여 개량 배합설계법에 적용하기 위한 상관분석의 조합은 전단강도를 기준으로 하여 전단강도-압축강도, 전단강도-간접인장강도, 전단강도-마찰 안정도, 전단강도-변형량으로 분석하였다. 이와 같이 상관분석을 통해 얻어진 자료를 전단강도의 축을 기준으로 하여 각각의 네 변에 적용하여 각 변의 스케일을 정량화하였다. 각각의 조합에서 얻어진 R²은 전단강도-마찰 안정도를 제외하고 모두 0.9 이상을 만족하였다. 그림.5~8는 배합설계법에 스케일을 적용하기 위해 각각의 역학적 강도를 상관분석한 그래프이다.

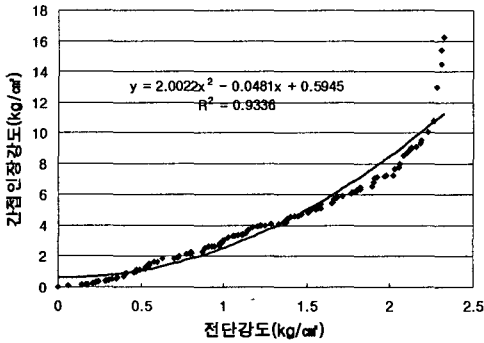


그림.5 전단강도-간접인장강도 상관분석

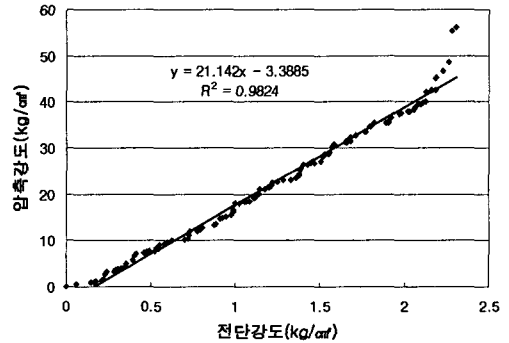


그림.6 전단강도-압축강도 상관분석

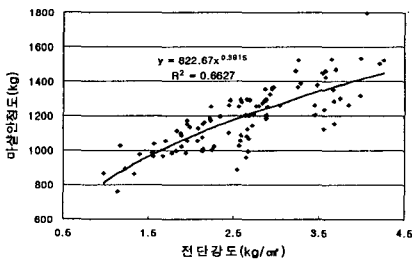


그림.7 전단강도-마찰 안정도 상관분석

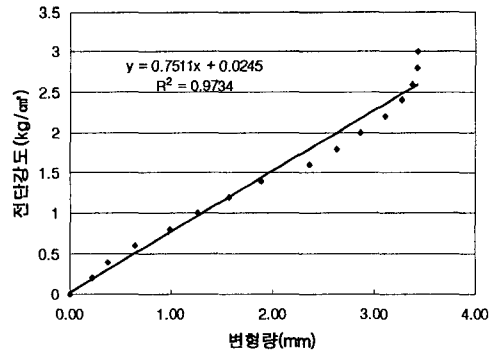


그림.8 전단강도-변형량 상관분석

- (5) 개량 배합설계법의 그래프에 적용된 설계변수의 조합은 간접인장강도, 압축강도, 전단강도를 고정시킨 상태에서 한 가지 설계변수를 변형량과 마찰 안정도로 변화시켜 가며 조합하였다.
- (6) 위와 같이 형성된 개량 배합설계법의 그래프로부터 설정된 강도제한구역의 도심을 찾고 이 도심에서 다시 수평, 수직으로 각 변에 선을 긋는다. 이 선과 각 변의 강도값이 만나는 점이 보정된 강도값이 되며 보정된 강도값을 강도-아스팔트 함량관계의 그래프에 적용하여 최적 아스팔트 함량을 찾아 아스팔트 함량을 나타내는 대각선 축에 표시하고 보정된 강도값과 연결한다.
- (7) 각각의 강도값에 해당하는 새로운 OAC를 찾고 이 OAC를 그림.10의 개량 배합설계 그래프에 적용하여 OAC의 범위를 구하고 모든 설계변수를 만족하는 공통범위를 찾아 최종 OAC를 산정한다.

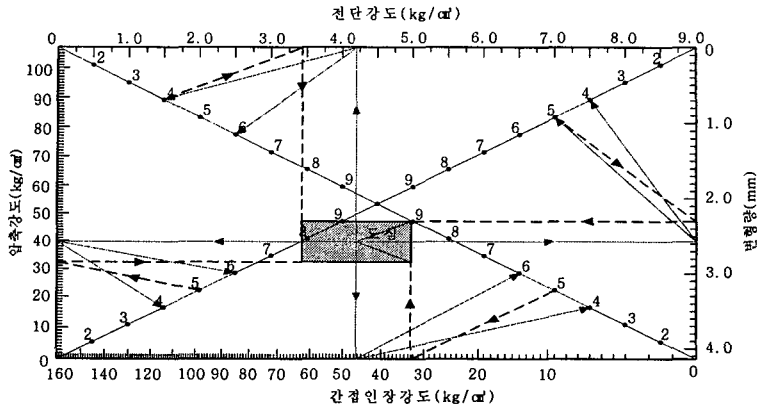


그림.9 개량 배합설계 그래프 적용

5.12 최적 아스팔트 함량 결정방법

최적 아스팔트 함량의 결정은 개량 배합설계법으로부터 구한 각각의 강도에 대한 OAC로부터 결정된다. 이때 최종 아스팔트 함량은 현장배합설계(job mix formular : JMF)를 고려하여 그림.10과 같이 범위로 나타내었다. 현장배합설계에서 아스팔트 함량을 범위로 나타내는 이유는 현장에서 현장다짐을 할 때의 다짐도와 실내에서 실내다짐을 할 때의 다짐도가 서로 상이하기 때문에 생기는 아스팔트 혼합물의 밀도 차이가 OAC의 변화폭을 크게 만들기 때문이다. 이러한 현장밀도와 실내시험 밀도의 차이는 역학적 강도 시험시 최대 강도값에 큰 영향을 미치므로 보다 정확한 역학적 강도 특성 분석을 하기 위해서는 최적 아스팔트 함량의 특정한 값을 적용하는 것보다 범위 구간으로 나타내어 아스팔트 함량을 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다. 그림 .10에서의 범위구간은 개량 배합설계법에서 강도제한 구역으로부터 도출된 OAC의 함량 범위이며 이렇게 설정되어진 범위의 중간 값이 개량 배합설계법의 최종 OAC로 결정된다. 현장 적용시 OAC의 적용구간은 일반적으로 최종 OAC의 $\pm 0.5\%$ 의 구간으로 설정한다.

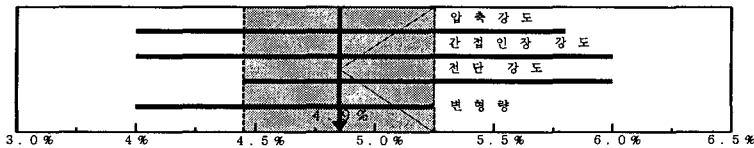
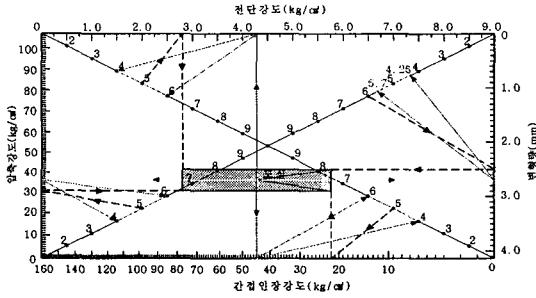


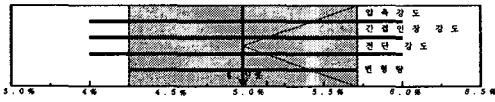
그림.10 최적 아스팔트 함량 결정

6. 개량배합설계 그래프의 적용

본 연구의 시험조합은 아스팔트 혼합물 종류별 아스팔트 바인더 함량(4%, 5%, 6%)에 따라 기존 시험체계인 마샬 안정도시험과 새로운 시험조합체계인 압축강도 시험, 간접인장강도 시험, 전단강도 시험 등을 실시하였다. 아스팔트 혼합물 공시체는 아스팔트 바인더의 종류에 따라 일반 아스팔트 바인더 제품군을 사용하여 2가지 종류로 제작하였으며, 골채입도는 표층용 $\Phi 19\text{mm}$ 밀입도를 채택하였다.

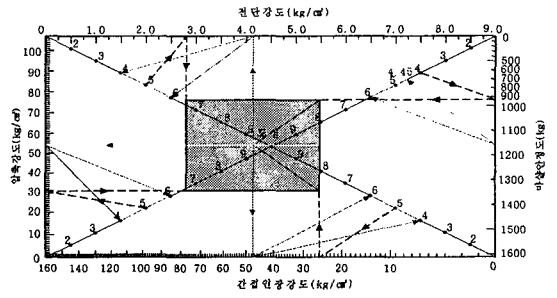


(1) 강도제한구역 설정

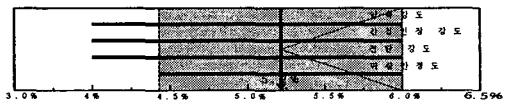


(2) 최종OAC결정

그림.11 변형률을 변수로 한 경우 OAC (AP-3)

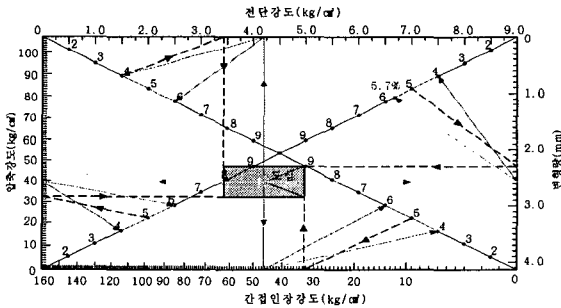


(1) 강도제한구역 설정

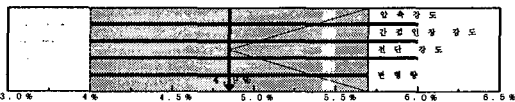


(2) 최종OAC결정

그림.12 마찰 안정도를 변수로 한 경우 OAC (AP-3)

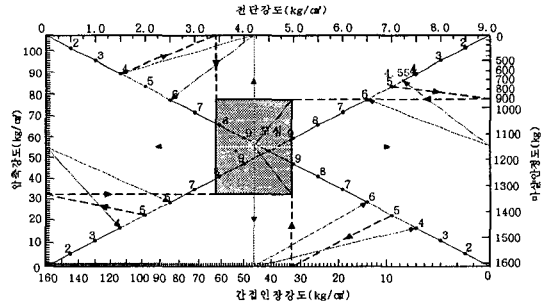


(1) 강도제한구역 설정

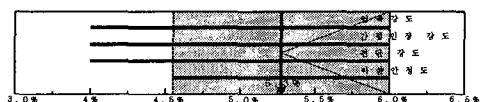


(2) 최종OAC결정

그림.13 변형률을 변수로 한 경우 OAC (AP-5)



(1) 강도제한구역 설정



(2) 최종OAC결정

그림.14 마찰 안정도를 변수로 한 경우 OAC (AP-5)



7. 결론 및 향후과제

아래의 표.3은 개량 배합설계법과 마살 배합설계법의 OAC의 차이를 나타낸 표이다. 여기에서 알 수 있듯이 변형량의 경우는 5% 미만으로 감소하는 경향을 나타내었으나 개량 배합설계법의 설계변수로 사용된 마살 안정도는 마살 배합설계법에 의해 구해진 OAC보다 다소 높은 수치를 나타내었다. 이는 현재 마살 배합설계법의 문제점으로 제기되고 있는 소성변형에 대한 저항성을 높이는데 역학적 강도시험 결과(변형량)를 적용하는 것이 보다 효율적인 배합설계방법이라는 것을 보여주고 있는 것으로 판단된다.

표.3 설계변수에 따른 OAC 비교

설계변수	바인더 종류	설계변수에 따른 최종 OAC(%)	
		AP-3	AP-5
개량배합설계법 에 의한 OAC	변형량	4.9%	4.9%
	마살안정도	5.2%	5.3%
마살 배합설계법에 의한 OAC		5.0%	5.1%

향후 과제로는 본 연구의 개량 배합설계법에 사용된 역학적 강도시험의 구체적인 시험규정과 강도값에 대한 시방규정이 시급히 마련되어야 할 것이며, 또한 가열아스팔트 혼합물의 배합설계에서 사용되는 공극률에 대한 고려는 마살 배합설계에서 공극률이 갖는 개념과는 다른 개념으로 고려되어야 하는 대상인 것으로 사료된다. 이러한 공극률의 검증은 개량 배합설계법을 이용한 추가 시험을 통해 공극률의 변화를 비교함으로써 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 남영국(2000), "가열아스팔트 혼합물의 강도특성을 고려한 개량 배합설계법 연구", 한국도로포장공학회, 학술발표회 논문집, pp. 61~68.
2. 이석홍(2001), "21세기 아스팔트 혼합물의 전망과 그 이후", 한국 도로포장공학회지, 3권 1호, pp. 72~77.
3. Eisenmann, J and Hilmer, A.(1987), "Influence of Wheel Load and Inflation Pressure on The Rutting Effect at Asphalt Pavements Experiments and Theoretical Investigations", Proceedings of Sixth Design of Asphalt Pavements, Vol.1, Ann Arbor, pp. 392-403.
4. Hofstra, S.(1977), "Permanent Deformation of Flexible Pavements Under Simulated Road Traffic Condition", Proceedings of Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol.1, London.
5. Hondros, J. (1966), "Analysis of Stresses and Displacements in An N-layered Elastic System under A Load Uniformly Distributed on A Circular Area", California Research Corporation, California.
6. Kandhal, P. S.(1997), "Low-Temperature Ductility in Relation to Pavement Performance", ASTM, Special Technical Publication G28.
7. Long-Term Cracking(1994) : Binder Validation, Report No. SHRP-A-399, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.