

기열 아스팔트 혼합물의 강도특성 평가를 위한 시험방법 연구

A Study on Testing Method for Strength Characteristic of HMA

최한길* · 유진명** · 조규태*** · 남영국****

Choi, Han Kil · Yoo, Jin Myoung · Cho, Gyu Tae · Nam, Young Kug

1. 서 론

우리나라는 1960년대 이후 시작된 산업화로 새로운 도로가 건설되기 시작하였고, 21세기를 맞은 오늘날 도로는 물류의 95%를 담당하는 경제발전의 축으로써의 기능을 하고있다. 이러한 도로의 역할에 힘입어 차량 또한 급격한 증가와 함께 중량화 및 대형화되는 추세를 가져왔다. 이것은 굴뚝산업의 폐해인 지구의 온난화 현상과 맞물려서 아스팔트 콘크리트 포장파손의 한 형태인 소성변형이라는 심각한 문제점을 발생시켰다. 이에 아스팔트 콘크리트 포장업체 및 도로포장 기술자들은 아스팔트 혼합물의 성능을 향상시키기 위한 목적으로 개질아스팔트 등의 개발 및 새로운 포장재료의 연구를 진행하고 있다. 그러나 이러한 아스팔트 콘크리트포장의 신재료의 개발에도 불구하고 국내 배합설계법은 마찰 안정도를 근거로 설계되고 있다. 아스팔트 콘크리트 포장의 마찰배합설계법은 새로운 재료의 포장에 대한 평가시 실제현장에서 요구되는 외부환경에 대한 저항성이나 역학적 거동에 대해서 불합리적인 한계성을 가지고 있다. 따라서 이러한 한계성을 극복하기 위해서는 체계적이고, 역학적 개념을 근거로 한 아스팔트혼합물의 배합설계법이 필요하다. 즉 경험적인 기초위에 역학적인 시스템을 도입하는 배합설계법과 새로운 재료에 대한 시험방법, 시공기술 및 시방규정들이 마련되어야 될 것이다.

본 연구는 현행 실험체계의 문제점에 따른 새로운 배합설계법과 기준을 만들기 위한 기초 과정으로 포장체 내 응력거동특성을 고려하여 새로운 시험조합을 통한 아스팔트 혼합물의 강도특성을 분석하고 그 역학적 상관성을 규명하고자 한다.

2. 포장체의 거동특성 분석

아스팔트콘크리트 포장 상부에 차량의 윤택중이 작용하면 포장체의 거동은 그림 1과 같이 상부에는 압축력이 작용하고, 하부에는 인장력이 작용하며 동시

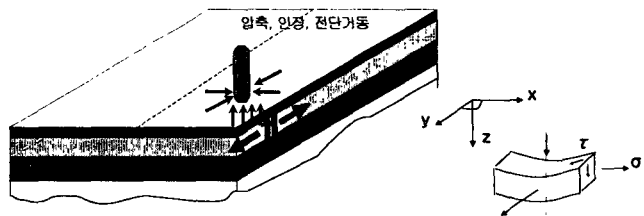


그림 1. 포장체내 거동

* 정회원 · 인천대학교 토목환경시스템공학과 박사과정 · 3400-5709 (E-mail: oneway1950@hanmail.net)
** 정회원 · 인천대학교 토목환경시스템공학과 석사과정 · 032-770-8179 (E-mail: g9922011@incheon.ac.kr)
*** 정회원 · 인천대학교 토목환경시스템공학과 박사과정 · 032-770-8915 (E-mail: cgt@yahoo.co.kr)
**** 정회원 · 인천대학교 토목환경시스템공학과 교수 · 032-770-8461 (E-mail: yknam@incheon.ac.kr)

에 상부, 하부, 내부에는 전단력이 작용한다. 즉 포장체는 압축, 인장, 전단의 복합적인 응력작용에 의해서 거동한다. 그림 2는 윤택중이 재하될 경우 입의 접의 포장 내부에서 발생하는 수직, 수평응력과 전단응력을 나타낸다. 그리고 차량 윤택중 작용시 발생하는 응력경로는 그림 3과 같이 일반적인 아스팔트포장체에서 차량하중이 통과 할 때의 시간에 따른 응력변화를 나타낸 것이다.

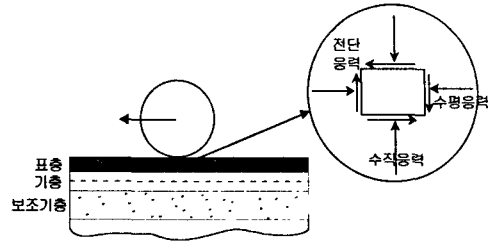


그림 2. 차량하중에 의해 포장구조체에 발생하는 응력

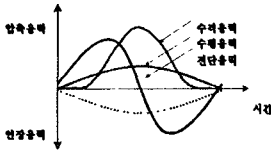


그림 3. 아스팔트포장의 시간에 따른 응력변화

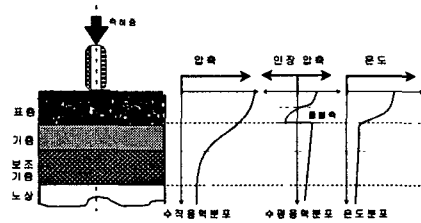


그림 4. 차량하중에 의한 발생응력이 포장체에 미치는 영향

차량 윤택중에 의해 발생된 압축, 인장, 온도 응력이 포장 각 층에 미치는 영향은 그림 4와 같이 표층에서 가장 크다. 압축응력을 제외하고는 표층 하부 층에서 영향이 작으며, 윤택중의 대부분은 포장 상부(표층)에서 지지한다. Brown(1989)의 현장 시험 결과에 의하면 아스팔트 포장의 주된 파괴형태의 하나인 소성변형은 대부분 혼합물의 전단변형에 의한 것으로 '소성변형이 혼합물 상부 10cm내에서 주로 발생한다'는 주장 또한 이를 증명하는 것이다. 아스팔트콘크리트 포장의 복합적인 응력은 상부층(표층)에 발생되며, 표층재와 덧씌우기층재로 많이 사용되는 아스팔트혼합물에 대한 강도특성분석시에는 복합적인 응력들(압축, 인장, 전단응력)을 고려한 분석적이고 역학적인 방법이 현재까지 사용되어 온 마찰시험법보다 효과적일 것이다.

3. 새로운 시험 체계 연구의 필요성

3.1 현행 시험체계의 문제점

우리나라의 아스팔트혼합물 배합설계방법은 1968년 경부고속도로 공사에서 마찰안정도 시험법이 도입되어 현재까지 사용되고 있다. 마찰안정도 시험법은 시험의 간편성, 신속성 및 저가의 장비가격 때문에 1939년 미국 미시시피도로국의 부루스 마찰에 의해 개발되어서 전세계적으로 가장 많이 사용되고 있다. 마찰안정도 시험은 국내에 도입 후 건교부 및 관련기관에 의해서 배합설계인자들의 변화에 따라 배합설계 기준을 몇 차례 수정해왔다. 그러나 마찰안정도의 수치는 경험에 의한 기준치로서 아스팔트 포장체에서 요구되는 외부환경에 대한 저항성이나 품질의 안정성을 만족시키는 매개변수와의



연관성이 떨어지며, 공용성과 직접적인 관련이 없는 것으로 보고되고 있다. 여름철에는 포장체의 온도가 60℃~65℃(1994년)까지 기록되고 있으며, 과거에 비해 교통량이 크게 증가하고, 정체구간이 점차 늘어남은 물론 증차량 및 교통량이 급속하게 증가해 왔지만 배합설계기준은 20여년 전의 방법에 비해 다짐횟수와 안정도만을 증가시켰을 뿐 온도변화와 하중 지속시간에 의한 실제 포장의 점탄성 특성은 전혀 고려하지 못하고 있다. 이러한 문제점으로 인해서 도로의 파손에 의한 유지보수 비용은 해마다 증가되고 있다. 마샬안정도 시험법은 포장체 파손에 영향을 미치는 주요 영향인자인 온도, 교통량, 주행속도, 응력조건 등을 종합적이고 체계적으로 고려하지 못하고, 새로운 재료들의 배합설계를 위한 시험체계로도 적정치 못하다. 이러한 단점들을 보완하기 위해서는 각 도시의 교통 특성과 기후 특성 그리고 응력조건을 고려하여, 국내 실정에 맞는 합리적인 배합설계법 및 시방기준의 제정이 필요하며, 체계적이고, 역학적 개념이 뒷받침된 시험법의 연구가 선행되어야 할 것이다.

3.2 포장체 거동특성을 고려한 시험법 적용

본 연구는 기존 시험체계의 문제점을 살펴보고 새로운 시험체계를 적용하여 기존 시험체계에서 미흡했던 역학적 개념에 근거한 포장체의 내부 응력 발생 이론을 기초로 포장체 거동특성에 따른 역학적 상관성을 보완한 시험법을 선정하여 시험조합을 구성하였다. 시험조합은 압축강도(CBR2.5)시험, 간접인장강도시험, 전단강도시험 방법과 기존 시험체계인 마샬안정도시험(KS 2349)을 병행 실시하여 상호 비교 분석하였다. 아스팔트포장체의 거동특성을 고려한 새로운 시험체계는 포장체 거동특성과 역학적 개념을 도입한 시험조합으로 여러 파손형태의 저항성을 파악할 수 있으며, 실제 포장체에서 복합적인 응력이 동시에 작용하여 거동함에 따라서 작용하는 응력조건들을 모두 고려하여 그 특성을 평가 할 수가 있다.

4. 시험방법의 분류

4.1 압축강도시험

차량이 도로위를 주행하게 되면 차량 운하중이 노면에 수직방향으로 작용하게 되고, 포장체는 반복하중에 의해 압축과 인장 거동을 하게 된다. Harold L. Von Quintus와 Thomas W. Kennedy는 포장의 영구변형에 영향을 미치는 인자를 교통하중에 의해 포장체에 가해지는 압축강도라고 하였으며, 그림 5는 압축강도가 포장파괴에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 압축강도는 아스팔트 혼합물의 흐름특성과 골재 내부마찰각과 관련이 있으며, 낮은 압축강도는 낮은 전단강도를 의미한다. 본 연구에서는 실제 차량하중이 포장체에 수직으로 작용하는 점에 착안하여 ASTM D 1074를 응용한 CBR2.5 관입시험을 통해 아스팔트 혼합물의 압축변형에 대한 저항성을 살펴보았으며 시험온도는 KS F 2349 마샬기준에 준하여 무더운 여름철의 온도를 고려하여 60℃에서 실시하였으며 재하속도는 50.8mm/분으로 시험을 실시하였다. 그림 7은 마샬공시체가 거치된 상태를 보여준다.

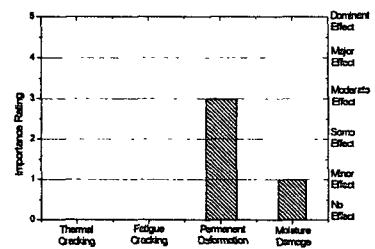


그림 5. 압축강도가 포장파괴에 미치는 영향

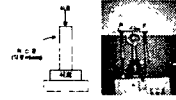
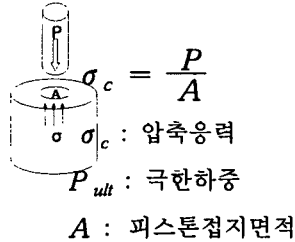


그림 14.

그림 6. 시험공시체에 작용하는 압축응력

압축강도시험 전경

4.2 간접인장강도시험

간접인장강도시험은 교통하중 작용시 또는 표층에서 온도 변화가 심한 지역에서 아스팔트콘크리트 층의 아래 부분 즉, 인장영역의 응력상태를 모사한 시험으로 피로균열과 저온균열에 대한 저항성을 평가할 수 있다. Harold L. Von Quintus 와 Thomas W. Kennedy 간접인장강도가 포장파괴 요인 중 온도균열과 피로균열에 밀접한 관계가 있음을 그림 8과 같이 제시하였다. Frocht은 간접인장강도시험 시 마찰공시체에 작용하는 응력 곡선을 그림 10과 같이 제시하였다.

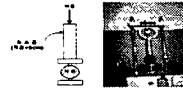
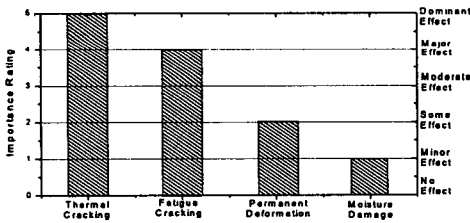
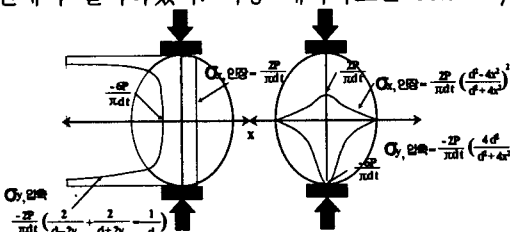


그림 8. 인장강도가 포장파괴에 미치는 영향

그림 9 간접인장강도시험 전경

간접인장강도시험은 원통형의 공시체에 2개의 12.7mm폭의 곡를을 가진 재하대를 평행하게 수직으로 지지시킨 후, 그림 9와 같이 직경면을 따라 균등한 인장을 발생시켜 파괴에 이르게 되는 강도를 측정하는 시험이다. 이때 CBR2.5 관입시 하중을 간접인장강도로 결정하였으며, 시험온도는 25℃ 온도 조건에서 실시하였다. 하중 재하속도는 50.8mm/min로 원주면재하방법으로 하중의 크기를 계속 증가시켜 파괴에 도달했을 때 생기는 인장강도와 압축 강도 및 인장변형률식은 아래와 같다.



$$S_T = \frac{2P_{ult}}{\pi t d} \quad S_C = \frac{-6P_{ult}}{\pi t d}$$

여기서, S_T : 인장강도
 S_C : 압축강도
 P_{ult} : 극한하중

그림 10. 간접인장응력 분포상태



d : 공시체의 지름

$$\epsilon_T = \Delta H_T [(0.03896 + 0.1185\mu)/(0.0673 + 0.2494\mu)]$$

4.3 전단강도시험

포장면에 차량 윤풀중이 작용할 때 포장체의 내부응력은 압축력과 인장력이 작용한다. 이러한 반복 윤풀중의 작용으로 전단력이 발생하며, 노후화 되면서 전단력 부족으로 균열이 발생하게 된다. 이러한 내부응력에 저항하고 내구성이 보장되려면 압축, 전단, 인장응력이 소요되는 강도 수준 이상 되어야 한다.

아스팔트 혼합물 공시체의 전단시험에 관한 연구는 본 연구에서 고안한 방법 이외에도 두 가지 유형의 시험방법이 있다. 하나는 공중원통형 시편에 대한 비틀전단시험(Torsion Shear Tests on Hollow Cylindrical Specimens)으로 축과 비틀전단하중하에서 아스팔트 혼합물의 동적물성을 결정하기 위해 Sousa(1986)에 의해 사용된 것이다. 이 시험의 단점은 일상시험으로 표준화하기에는 매우 복잡하여 연구수단으로써만 사용가치가 있다. 또 다른 하나는 단순전단시험(Simple Shear Test)으로 주로 흙의 물성을 측정하는데 주로 사용되는 것으로 아스팔트 혼합물에는 니딩다짐기에 의한 다짐공시체와 현장에서 채취한 코어 공시체의 반응을 비교하기 위해 Monismith and Tayebali(1988)에 의해 사용되었다. 이것은 응력과 변형률의 제어된 회전을 허용하는 가장 단순한 시험으로 아스팔트 혼합물의 소성전단 흐름에 의한 소성변형 물성을 조사하는데 적당한 것으로 알려져 있다.



$$\tau = \frac{S}{A}$$

τ : 전단응력
 S_{ult} : 극한하중
 A : 공시체 파괴단면적



그림 11. 시험공시체에 작용하는 전단응력

그림 12. 전단강도시험 전경

본 연구에서 전단시험은 그림 12와 같이 일반 마샬공시체에 수직 전단하중을 가하는 방법으로 60℃, 25℃, 0℃ 등의 다양한 온도 조건하에서 계절적인 파괴 특성을 고려하여 여름철 전단변형에 기인한 소성변형과 상온시 피로균열, 그리고 겨울철 저온균열 등에 대한 저항성 평가가 가능하다. 이 연구에서는 우리나라의 포장파손의 주된 형태인 소성변형에 대한 저항성에 주안점을 두고 60℃ 조건에서 앞의 압축시험, 간접인장시험들과 동일한 시험방법으로 시험을 실시하였다.

5. 시험결과

본 연구의 시험조합은 바인더 종류별로 각각의 강도시험을 실시하였다. 바인더의 종류로는 AP-3, AP-5의 일반 아스팔트와 SBS, Gillsonite계열의 상용화된 개질아스팔트 제품군을 사용하였으며, 골재입도는 19mm 밀입도를 채택하였다. 이와같은 시험조건을 통해 포장체 거동 특성을 고려한 역학적 특성 즉, 압축, 인장, 전단특성을 아스팔트 함량에 따른 강도특성 및 응력과의 관계, 또한 상호 역학적 상관

성, 그리고 공극률에 따른 강성의 변화 등을 비교·분석하였다. 마찰시험체계에 의한 시험결과는 그림 13과 같다.

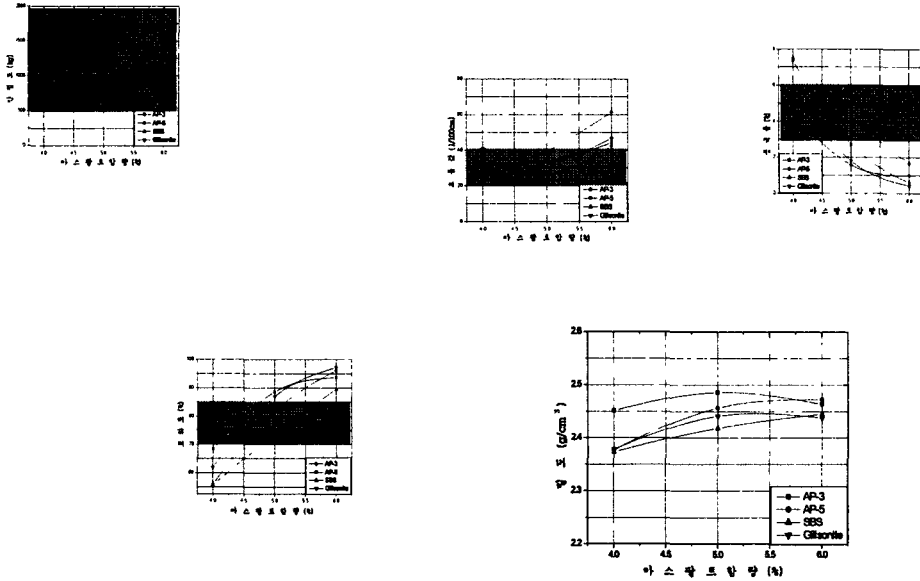
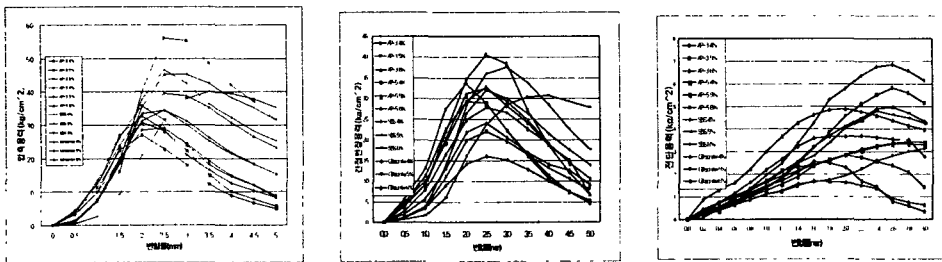


그림 13. 마찰시험 결과(60°C)

포장체 내부 응력거동특성을 고려한 아스팔트 혼합물의 강도 특성 연구를 위해 활용한 시험법들에 의한 역학시험 결과로 바인더 종류별 아스팔트함량에 따른 각각의 응력들과 변형률의 관계는 그림 14와 같다. 각각의 응력시험 결과 변형률이 2~3mm 사이에서 최대응력값을 보이며, 특히 변형률 2.5mm에서 거의 모든 최대응력값들이 결정됨을 알 수 있었다. 또한 개질아스팔트 바인더가 일반 아스팔트 바인더에 비해 변형률이 좀더 큰 상태까지 응력값이 계속 증가하고, 동일 변형률 내에서도 더 큰 강도를 발휘함을 확인할 수가 있었다.



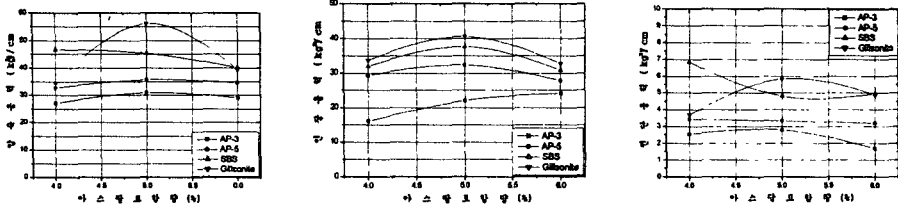
압축강도시험결과(60°C)

인장강도시험결과(25°C)

전단강도시험결과(60°C)

그림 14. 바인더 종류별 아스팔트 함량에 따른 압축, 인장, 전단강도와 변형률과의 관계

그림 15는 바인더 종류별 아스팔트함량에 따른 각각의 응력들의 거동특성을 나타낸 것이다.



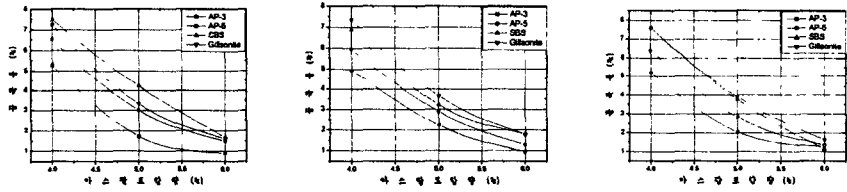
압축강도시험결과(60°C)

인장강도시험결과(25°C)

전단강도시험결과(60°C)

그림 15. 압축강도, 인장강도, 전단강도와 아스팔트함량과의 관계

아스팔트 바인더 함량에 따른 각각의 응력시험결과는 위와 같이 마찰안정도와 마찬가지로 대부분 아스팔트함량이 5%일 때 최대응력값을 보였는데, 특이할만한 점은 SBS 바인더 혼합물의 경우 고온(60°C)에 대한 저항성 평가 결과 압축강도시험과 전단강도시험 결과 모두 바인더 함량 4%에서 최대응력값을 나타냄으로써 마찰안정도와는 다른 거동특성을 나타낸다. 이것은 그림 15에서 60°C 고온조건에 대한 압축, 전단응력의 거동이 비슷한 경향을 보이는 것으로 보아 바인더 함량에 따른 응력거동특성을 마찰안정도보다 더 명확하게 분석할 수 있는 시험체제로 사료된다.



압축강도시험결과(60°C)

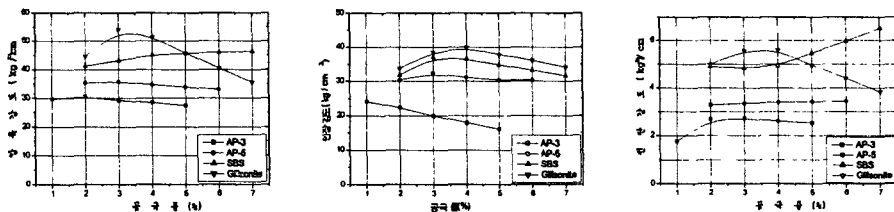
인장강도시험결과(25°C)

전단강도시험결과(60°C)

그림 16. 압축강도, 인장강도, 전단강도시험용 공시체의 아스팔트함량과 공극률 관계

그림 16은 각각의 응력시험에 사용된 공시체들의 아스팔트함량에 따른 공극률의 변화이다. 이것은 개질아스팔트 바인더가 일반 아스팔트 바인더보다 현재 우리나라 시방에서 규정하는 공극률의 범위가 3~6%에서 안전하게 만족시킴을 확인할 수 있다.

그림 17은 아스팔트함량의 변화에 따른 공극률의 변화와 그에 따른 각각의 강도값들의 변화를 나타낸 것이다.



압축강도시험결과(60°C)

인장강도시험결과(25°C)

전단강도시험결과(60°C)

그림 17. 압축강도, 인장강도, 전단강도와 공극률과의 관계



바인더 함량에 따라 공극률이 변하고 공극률에 따라 강도특성이 변화하는 상호 일정 상관성이 있음을 확인할 수 있다. 현재 마살배합설계 체계에서는 바인더의 종류에 대한 고려없이 동일 공극률 범위를 시방상에 규정하고 있는데 반해 위 시험결과에서는 바인더 종류에 따라 다른 공극률과 강도관계특성이 다른 경향을 나타내는 것으로 공극률에 대한 현 시방범위에 대한 검토가 필요한 것으로 사료된다.

6. 결 론

아스팔트 콘크리트 포장의 공용중에 작용하는 외적인 조건인 교통하중과 환경조건에 의해 포장체 내부에서는 재료특성에 따른 탄성, 점성 및 소성적 특성에 의한 복합적인 응력이 발생한다. 따라서 본 연구는 역학적인 시험법 개발을 위한 기초단계로서 압축강도시험, 인장강도시험, 전단강도시험과 기존 배합설계시험법인 마살안정도시험과의 상관관계를 분석하고 현행 가열아스팔트 혼합물의 성능규격과 선정방법 및 응력과 변형률, 아스팔트함량, 공극률에 따른 역학적 개념의 시험체계를 도입하여 다양한 신재료의 혼합물을 평가할 수 있다.

- (1) 본 시험의 결과 가열 아스팔트 혼합물의 변형에 대한 저항성은 압축에는 강한 반면 인장과 전단에 대해서는 작은 저항성을 보인다.
- (2) 각 아스팔트 혼합물은 공극률 2~6% 사이에서 가장 큰 값의 강도(압축, 전단, 인장)를 나타내며, 공극이 클수록 강도가 증가하는 혼합물이 있긴 하나 이에 대한 소성변형과의 상관성은 연구되어야 할 과제이다.
- (3) 전단강도 시험은 향후 수평하중에 의한 전단시험법도 연구 검토가 필요하다.
- (4) 향후 연과제로는 보다 다양한 조건별로 실험을 수행하여 충분한 데이터를 확보하고, 이것을 토대로 우리나라 실정에 맞는 배합설계법과 그 기준마련에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

1. David Whiteoak, 1994, The Shell Bitumen HandBook, pp242~288
2. Hudson, W. R and Kennedy, W. W, 1968, An Indirect Tensile Test for Stabilized Materials, SHRP-A/IR-90-001, pp34~62
3. Strategic Highway Research Program National Research Council Washington, DC, 1994, Permanent Deformation Response of Asphalt Aggregate Mixes, SHRP-A-415, pp41~46
4. RALPH HAAS & W. RONALD HUDSON, 1978, Pavement Management Systems, ROBERT E. KRIEGER PUBLISHING COMPANY, MALABAR, FLORIDA
5. 아스팔트포장연구회, 1999, 아스팔트 포장공학 원론, 경성문화사, pp271~296
6. 안만홍, 1998, 가열 아스팔트 혼합물의 역학적 특성 분석, 석사학위, 인천대학교
7. 이석홍, 2001, 21세기 아스팔트 혼합물의 전망과 그 이후, 도로포장공학회지, 3권 1호, pp72~77
8. 박태순 외 2인, 2000, 국내 아스팔트포장의 배합설계 방법 및 기준 변경을 위한 타당성 조사연구, 2000 학술발표회 논문집, 한국도로포장공학회, pp125~132
9. 황효섭, 2000, 페아스팔트 혼합물의 품질특성, 석사학위, 인천대학교