

# 아스팔트 혼합물의 파괴에너지 측정시스템 평가 연구

## A Study for Fracture Energy Measurement System of Asphalt Mixture

이문섭<sup>\*</sup> · 윤천주<sup>\*\*</sup> · 김부일<sup>\*\*\*</sup>

Lee, Moon Sup · Yun, Cheon Joo · Kim, Boo il

### 1. 서 론

현재 국내에서는 아스팔트 혼합물 배합설계방법으로 마샬 시험법을 사용하고 있다. 이 배합설계 방법은 시험장치가 간단하고 경제적이지만, 하중을 가하는 방법이 실제 교통하중에 의해 발생하는 응력상태와 상이하여 혼합물의 역학적 특성을 제대로 반영하지 못한다. 이로 인해 소성변형, 피로균열 등 포장의 공용성을 제대로 예측할 수 없다는 단점에도 불구하고 현재까지 널리 사용되고 있다. 따라서 아스팔트 혼합물의 배합설계와 공용성능과의 상관성을 향상시키려면 보다 합리적인 개념의 배합설계로의 진전이 있어야 한다.

아스팔트 혼합물의 강도관련 특성치로 가장 널리 사용되는 것은 마샬 안정도이다. 이것은 혼합물을 다진 후 그것의 견고성(Integrity)을 측정하기 위해 사용되는 것으로 배합설계에서 중요한 항목으로 적용된다. 마샬 안정도는 시험방법이 비교적 쉽고 간편하여 전 세계적으로 널리 사용되나 최근의 많은 연구에서는 아스팔트 혼합물의 공용성과 상관성이 없음을 지적하고 있다. 즉, 배합설계에서 제시된 기준치보다 월등히 높은 안정도를 가진 혼합물에서 피로균열이 심하게 발생하는 등 마샬안정도의 무용론이 제기되고 있으며 대체 특성치의 개발이 필요한 시점이다.

마샬 안정도를 대체하여 아스팔트 혼합물의 균열 저항성을 평가할 수 있는 보다 진보한 시험방법으로는 Superpave IDT, 피로시험 등이 있다. 그러나 이들은 대부분 동적 재하시험이고, 장비가 고가이며, 시험방법이 비교적 어렵고 미숙련자의 경우 작은 환경변화에도 결과의 변동성이 크게 나타나게 되며 해석도 어려워 아스팔트 플랜트 등 현장에서의 실용성이 떨어진다.

마샬안정도 시험을 대체하는 방법으로 김부일 등(2008)은 마샬안정도 시험기를 이용하여 아스팔트 혼합물의 파괴에너지를 측정할 수 있는 시스템을 개발 하였다. 김부일 등(2008)은 그 동안 문제시되었던 공시체 외부에서 변형률을 측정하는 방법과 스트랩에서 발생하는 국부적인 변형량 문제를 해결하여 외부 수직 변형률로 파괴에너지를 구하는 방법을 제시하였다. 이에 본 논문에서는 제시된 외부 수직 변형률을 이용한 파괴에너지 측정방법을 평가하고자 한다.

### 2. 재료 및 방법

#### 2.1 사용 재료

본 논문에서는 3가지 아스팔트 바인더를 사용하여 아스팔트 배합설계를 통한 파괴에너지를 분석하였다. 3가지 바인더는 가열아스팔트 혼합물(hot-mix asphalt: HMA)용 PG64-22와 PG76-22, 준고온 아스팔트 혼합물(warm-mix asphalt: WMA)용 PG70-22이다. 골재 품질에 따른 아스팔트 혼합물의 영향이 크므로, 골재에 대한 영향을 최소화하기 위하여 편장식(flat and elongated particles) 비율이 낮은 골재를 선정하였다. 굵은골재 최대 치수 13mm에 잔골재, 채움재와 혼합하여 밀입도 규격에 적합한 입도로 조정하여 실험을 수행하였다(그림 1). 또한, 다짐온도에 따른 파괴에너지의 변화를 보기위하여 가열아스팔트 혼합물은 115, 135, 155, 175℃에서 준고온 아스팔트 혼합물용은 75, 95, 115, 135℃에서 다짐을 수행하였다. 배합설계는 상기 온도로 아스팔트 함량을 4.5%,

\* 정희원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 연구원 · 공학박사 · 031-910-0690(Email:trupath@kict.re.kr)

\*\* 정희원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 연구원 · 공학석사 · 031-910-0533(Email:cjyoon@kict.re.kr)

\*\*\* 정희원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 수석연구원 · 공학박사 · 031-910-0240(Email:bikim@kict.re.kr)

5.0%, 5.5%, 6.0%까지 4단계로 변화시켜가며 다짐 횟수 75회로 혼합물을 다짐하였다. 비빈 혼합물(loose-mix)은 다짐 전 1시간동안 각 온도의 오븐에서 단기노화(short-term aging) 시켜 공시체를 제조하였다.

## 2.2 시험방법

현재까지 파괴에너지를 시험하는 방법은 그림 2의 (a)와 같이 공시체 내부(일정한 인장 응력이 발생하는 부분)에서 수평 변위를 측정하고 그 때의 인장 응력을 측정하도록 제안하고 있다(Ruth 등, 1977). 하지만, 김부일 등(2008)은 그림 2의 (b)와 같이 마찰안정도 시험기의 변형량 측정 방식으로 LVDT를 공시체 바깥쪽에 설치하여 공시체의 전체 수직 변형량을 측정하는 방식을 제안하였다. 이에 본 논문에서는 두 가지 시험방법을 모두 사용하여 새롭게 제안된 수직 변형량을 이용하는 방법에 대하여 평가해 보았다.

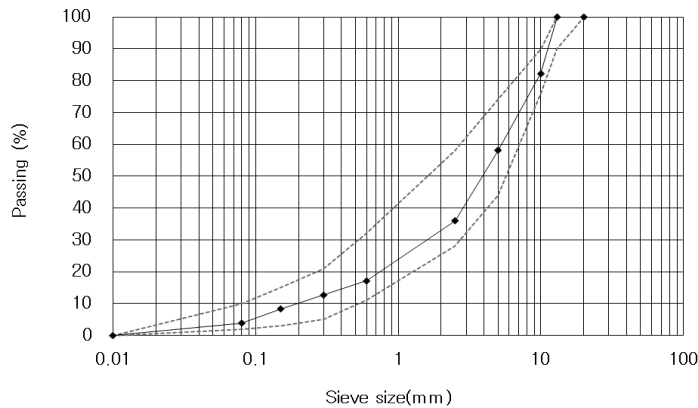
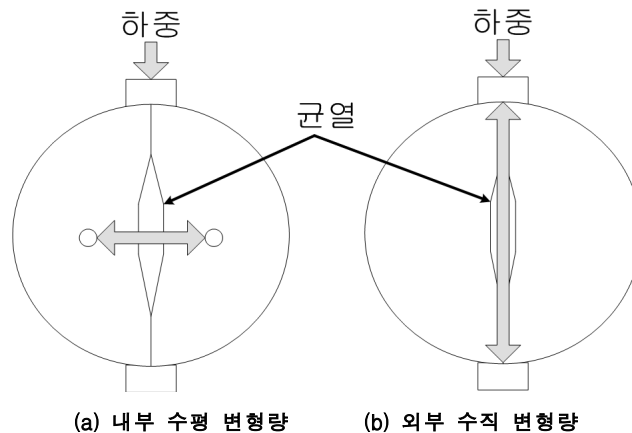


그림 1. 13mm 합성입도



(a) 내부 수평 변형량 (b) 외부 수직 변형량

그림 2. 변형량 측정방법

## 3. 결과 및 고찰

그림 3은 HMA 64-22 아스팔트 혼합물의 내·외부 파괴에너지를 비교한 결과를 보여주고 있다. 외부에서 측정된 파괴에너지가 내부에서 측정된 파괴에너지보다 전체적으로 크게 나타나는 경향을 보여주고 있다. 만약에 아스팔트 혼합물이 탄성체라고 가정하면, 내부 및 외부에서 변형량을 측정하더라도 동일한 변형량을 나

타내야한다. 하지만, 아스팔트 혼합물은 점탄성 특성을 가지고 있기 때문에 내부 및 외부에서 측정하는 변형량이 다를 수밖에 없다. 즉, 외부 수직 변형률은 하중이 재하하기 시작하면서 샘플 전체의 변형량을 측정하기 시작지만, 내부 수평 변형률은 내부까지 하중이 전달되는 순간부터 변형량이 발생하기 때문에 외부 수직 변형량보다 적은 변형량을 나타내게 된다. 이와 같이 측정된 변형량은 파괴에너지 계산에 가장 큰 영향을 미치는 요소 중에 한가지이다. 파괴에너지는 샘플이 파괴될 때까지의 변형량-하중 그래프에서 면적을 구하기 때문에 동일한 하중에 변형량이 크게 나타나면 파괴에너지도 클 수밖에 없다.

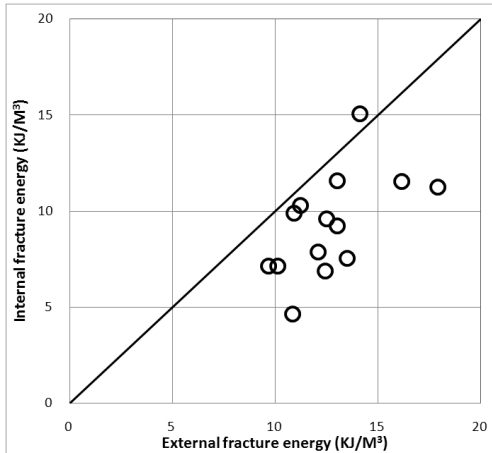


그림 3. HMA 64-22의 내·외부 파괴에너지

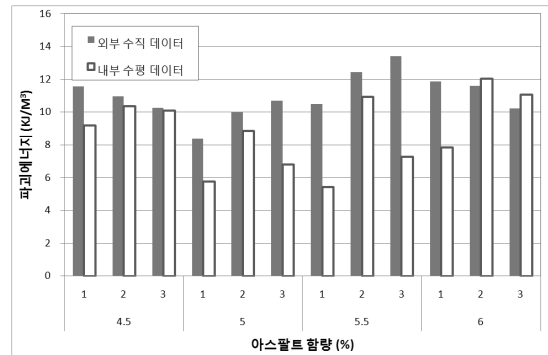


그림 4. 아스팔트 함량별 파괴에너지 (HMA 64-22, 135°C)

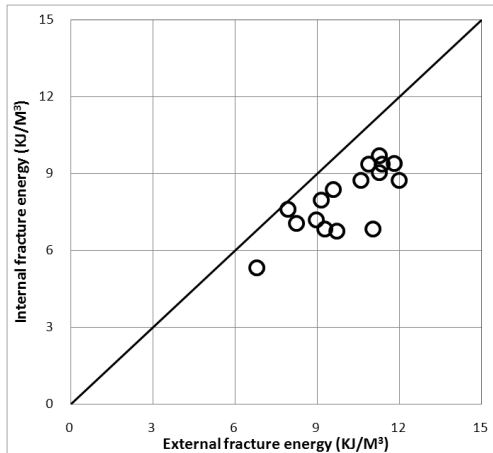


그림 5. WMA 70-22의 내·외부 파괴에너지

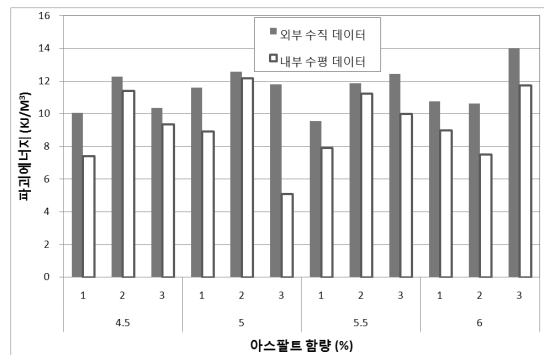


그림 6. 아스팔트 함량별 파괴에너지 (WMA 70-22, 135°C)

또한, 그림 3에서 내부에서 측정된 파괴에너지가 증가할수록 외부에서 측정된 파괴에너지도 증가하는 경향을 보여주고 있다. 즉, 외부에서 측정된 파괴에너지가 내부에서 측정된 파괴에너지보다 큰 값을 나타내지만, 파괴에너지의 변화는 동일한 경향을 보여주기 때문에 외부 수직 변형률을 이용한 파괴에너지는 사용 가능하다는 것을 보여주는 단적인 결과이다.

그림 4는 다짐온도 135°C에서 시험을 수행한 아스팔트 함량별 내·외부 파괴에너지 값을 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 아스팔트 함량별로 3번씩 반복하여 시험을 수행한 결과, 내부에서 측정된 파괴에너지가 외부

에서 측정된 파괴에너지보다 실험 편차가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 김부일 등 (2008)의 연구결과와 동일한 경향을 보여주었다.

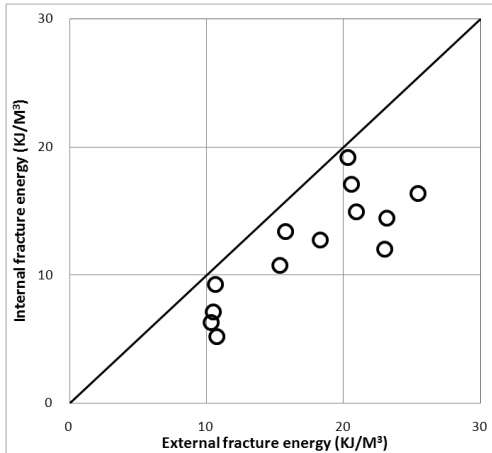


그림 7. HMA 76-22의 내·외부 파괴에너지

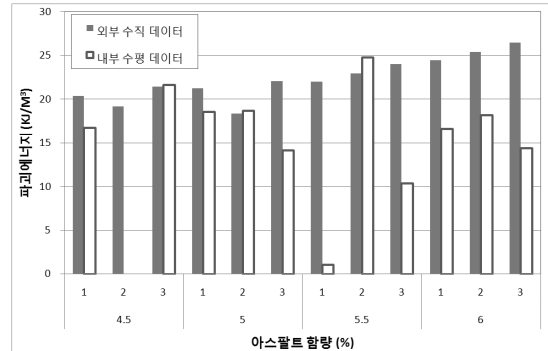


그림 8. 아스팔트 함량별 파괴에너지 (WMA 70-22, 155°C)

그림 5와 7은 각각 WMA 70-22와 HMA 76-22 아스팔트 혼합물의 내·외부 파괴에너지를 비교한 결과를 보여주고 있다. HMA 64-22와 동일한 경향으로 외부 파괴에너지가 내부 파괴에너지보다 더 큰 값을 나타내고 있으며, 일정한 경향으로 증가하는 것을 보여주고 있다. 또한, 그림 4와 7은 각각 다짐온도 135°C와 155°C에서의 아스팔트함량 별 파괴에너지 변화로써, 외부 파괴에너지보다 내부 파괴에너지가 더 큰 편차를 보여주고 있다. 이것 또한 HMA 64-22와 동일한 결과이다.

그림 8에서 보듯이 4.5%의 2번째 샘플은 결과값을 얻지 못하였으며, 6%함량의 3번째 샘플처럼 낮은 결과값을 나타내지 못하는 경우도 발생하였다. 이와 같은 결과가 나타나게 되는 원인은 두 가지로 볼 수 있다. 첫 번째로 내부에서 변형률을 측정하는 방식은 Schmidt(1972)가 제안한 방법으로 게이지 포인트를 장착하여 변형률을 측정한다. 샘플 내부의 좁은 부분에 게이지 포인트를 붙여서 변형률을 측정하기 때문에, 게이지 포인트를 붙이는 부분의 골재 배열에 따라서 이와 같은 오차가 발생하게 된다. 두 번째는 게이지 포인트를 장착하기 위해서는 접착제를 사용하기 때문에 접착제의 샘플과 게이지 포인트의 접촉여부에 따라서 그림 8과 같은 변수가 발생하게 된다. 하지만, 외부에서 변형률을 측정하는 방식은 간접인장 지그 자체가 움직이는 변형률을 측정하기 때문에, 내부에서와 같은 변수는 발생하지 않는 장점을 가지고 있다.

표 1은 4가지 다짐온도에서 4가지 아스팔트 함량별로 3번씩 반복 시험한 내·외부 파괴에너지의 변이 계수 측정결과를 보여주고 있다. 변이 계수는 샘플들의 표준 편차를 샘플의 평균으로 나눈으로서 변동성이 얼마나 큰지를 판단하여 비교할 수 있다. 표 2에서 보는 바와 같이 전체적인 변이 계수는 외부 파괴에너지의 변이 계수가 내부 파괴에너지보다 작게 나타났다. 이와 같은 결과는 외부 파괴에너지가 내부 파괴에너지보다 실험에 대한 오차가 적게 발생하기 때문에 실험 방법으로 타당하다는 것을 보여주는 결과이다.

표 1. 변이 계수 분석 결과

HMA 64-22				WMA 70-22				HMA 76-22			
다짐 온도 (°C)	아스팔트 함량 (%)	변이 계수		다짐 온도 (°C)	아스팔트 함량 (%)	변이 계수		다짐 온도 (°C)	아스팔트 함량 (%)	변이 계수	
		외부	내부			외부	내부			외부	내부
115	4.5	5.79	23.36	75	4.5	4.57	6.23	115	4.5	7.50	13.40
	5.0	12.59	14.96		5.0	6.32	7.71		5.0	9.18	58.76
	5.5	6.06	14.16		5.5	10.75	44.12		5.5	3.65	22.63
	6.0	3.72	85.26		6.0	3.85	32.27		6.0	1.63	54.64
135	4.5	5.99	6.33	95	4.5	13.22	42.71	135	4.5	12.30	46.49
	5.0	12.29	21.96		5.0	3.73	13.24		5.0	3.71	57.65
	5.5	12.25	35.73		5.5	14.19	29.29		5.5	7.60	27.78
	6.0	7.80	21.28		6.0	4.04	25.56		6.0	4.72	31.17
155	4.5	10.43	43.77	115	4.5	4.55	7.02	155	4.5	5.64	18.16
	5.0	15.72	13.71		5.0	8.21	9.94		5.0	9.60	15.17
	5.5	7.85	5.73		5.5	4.91	20.25		5.5	4.33	99.08
	6.0	5.03	49.01		6.0	13.31	26.70		6.0	3.86	11.49
175	4.5	8.61	61.58	135	4.5	11.05	21.14	175	4.5	10.33	16.95
	5.0	12.03	54.16		5.0	4.36	40.60		5.0	3.35	-
	5.5	6.03	-		5.5	13.59	17.33		5.5	5.96	15.40
	6.0	2.55	35.02		6.0	16.27	22.86		6.0	3.89	57.86

#### 4. 결론

본 논문은 마찰안정도 시험기를 이용한 파괴에너지 측정 시스템에 대한 평가를 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 아스팔트 혼합물은 점탄성 특성을 가지고 있기 때문에 내부 및 외부에서 측정되는 변형량은 다르게 측정될 수밖에 없다. 따라서, 외부에서 측정한 파괴에너지가 내부에서 측정한 파괴에너지보다 큰 값을 나타내었다.
2. 내부에서 측정한 파괴에너지가 증가할수록 외부에서 측정한 파괴에너지도 동일하게 증가하는 경향을 보여 외부 수직 변형량을 사용하여 파괴에너지를 사용하는 방법은 타당한 것으로 나타났다.
3. 내부 수직 변형량은 샘플 내부에 게이지 포인트를 장착하여 변형량을 측정하기 때문에, 샘플 내부의 골재 배열에 따라서 실험오차가 크게 발생하였다.
4. 아스팔트 함량별로 3번씩 반복하여 시험을 수행하여 변이 계수 분석 결과, 내부에서 측정한 파괴에너지가 외부에서 측정한 파괴에너지보다 실험 편차가 크게 나타나는 것을 볼 수 있었다.
5. 이상의 연구를 통해 외부 수직 변형률을 이용한 파괴에너지 측정방법은 타당한 것으로 확인하였다. 따라서, 향후에는 내·외부 파괴에너지의 상관관계를 규명하는 연구를 수행하여 외부 수직 변형률에 대한 신뢰도를 높여 현장 적용성이 가능하도록 연구를 진행해야 할 것이다.



### 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원과 강원대학교 석재신소재 연구소의 장비의 지원으로 이루어진 것입니다.

### 참고 문헌

1. 이문섭, 김부일, 홍제청, (2008), “마찰안정도 시험기를 이용한 아스팔트 혼합물의 파괴에너지 측정시스템 개발 연구”, 한국토목학회학술발표.
2. 김부일, 이문섭, (2008), “마찰안정도 시험기를 이용한 아스팔트 혼합물의 파괴에너지 측정시스템 개발 연구”, 한국도로학회논문집 제11권 1호 통권 39호, pp. 135~144
3. B.E. Ruth, and J.D. Maxfield (1977) Fatigue of Asphalt concrete, Final Report-project 245-D54, Department of Civil Engineering, University of Florida, November
4. Schmidt, R. J., (1972) “A Practical Method for Measuring the Resilient Modulus of Asphalt-Treated Mixtures,” Highway Research Record 404, pp.22-32