



# 아스팔트 혼합물의 손상회복 특성 평가

## Evaluation of Healing Properties of Asphalt Mixtures

김 부 일\*  
Kim, Booil

### Abstract

While the repeated traffic loading accumulates the damage of asphalt pavement, the damage has being healed during rest periods. And then, this healing enhances the fatigue life of asphalt pavement. A method was developed to determine the healing rate of asphalt mixture in terms of recovered dissipated creep strain energy (DCSE) per unit time, and the healing properties of four different asphalt mixtures were evaluated. The test procedure consists of repeated loading test and periodical resilient modulus tests. A normalized healing rate in terms of  $DCSE/DCSE_{applied}$  was defined to evaluate the healing properties independently of the amount of damage incurred in the mixture. From the test results, it was concluded that the healing rates of asphalt mixtures were increased exponentially as the temperature was increased and more affected by the structural characteristics of mixture such as asphalt content than the binder characteristics such as the polymer modification.

*Keywords : healing property, dissipated creep strain energy, normalized healing rate*

### 요 지

반복적인 교통하중은 아스팔트 포장에 손상을 누적시키는 반면, 휴식기 동안 아스팔트 혼합물에는 축적된 손상의 회복현상이 지속적으로 일어난다. 이러한 손상회복 현상은 아스팔트 포장의 피로수명을 증가시킨다. 본 연구에서는 간접인장시험을 이용하여 아스팔트 혼합물의 손상회복특성을 측정할 수 있는 시험방법을 개발하고, 이를 통해 일반 아스팔트와 개질 아스팔트를 포함하는 총 네 가지 아스팔트 혼합물의 손상회복특성을 평가하였다. 본 연구에서 개발한 손상회복시험은 반복재하시험과 일련의  $M_R$  시험으로 구성된다. 반복재하시험과  $M_R$  시험 동안 회복변형(resilient deformation)을 측정하고 응력과 변형률을 이용하여 DCSE (Dissipated Creep Strain Energy)를 구하고 이를 통해 아스팔트 혼합물의 손상회복특성을 평가할 수 있는 파라미터로서  $DCSE/DCSE_{applied}$ 를 이용한 정규화된 손상회복속도(normalized healing rate)를 제안하였다. 실험결과, 아스팔트 혼합물의 손상회복속도는 온도가 증가함에 따라 지수 함수적으로 증가함을 알 수 있었으며, 아스팔트 혼합물의 손상회복특성은 폴리머 개질과 같은 아스팔트 바인더의 특성보다는 아스팔트 함량과 같은 혼합물의 구조적인 특성에 더 많은 영향을 받음을 알 수 있었다.

**핵심용어 : 손상회복특성, 소모된 크리프 변형 에너지, 정규화된 손상회복속도**

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 선임연구원



## 1. 서론

반복적으로 가해지는 교통하중은 아스팔트 포장의 손상을 누적시키고 결과적으로 아스팔트 포장의 피로 수명을 감소시킨다. 이에 반해, 하중이 가해지지 않는 시간 (다음 번 교통하중이 작용하기까지의 시간, 휴식기, rest period) 동안 아스팔트 혼합물에는 점탄성 특성으로 인한 응력완화 (stress relaxation) 현상과 미세손상 (micro damage)의 회복 (healing) 현상이 지속적으로 일어난다. 이러한 손상회복 현상은 아스팔트 포장의 피로수명을 증가시킨다. 실험실에서 측정된 아스팔트 혼합물의 피로수명과 실제 아스팔트 포장의 피로수명에 차이가 발생하는 이유 중 하나는 실험실에서 피로시험이 실제 아스팔트 포장에서의 휴식기를 반영하지 못하고, 그로 인해 아스팔트 혼합물의 손상회복특성을 모사하지 못하기 때문이다. Bazin과 Saunier (1967)가 하중의 휴식기 동안에 발생하는 아스팔트 시멘트의 인장강도의 회복에 대하여 보고한 것을 시작으로 몇몇 연구자들이 아스팔트 시멘트의 손상회복에 관한 메커니즘을 분석하였다 (Wool and O'connor, 1981). 최근에 Kim과 Little (1990)은 아스팔트 혼합물의 손상회복특성을 나타낼 수 있는 매개변수로서 손상회복지수 (healing index)를 소개하였으며, Zhang (2000)은 간접인장시험을 이용하여 아스팔트 혼합물에 가해진 손상이 회복될 수 있음을 보여주었다. 따라서 아스팔트 포장의 피로수명을 정확히 예측하기 위해서는 아스팔트 혼합물의 피로특성뿐만 아니라 손상회복특성을 파악해야 한다. 본 연구에서는 간접인장시험 (InDirect Tensile test, IDT)을 이용하여 아스팔트 혼합물의 손상회복특성을 측정할 수 있는 시험방법을 개발하고, 이를 통해 몇 가지 아스팔트 혼합물의 손상회복특성을 평가하고자 한다.

## 2. 실험 재료

본 연구에서는 다음과 같이 총 4종류의 아스팔트

혼합물을 실내시험에 사용하였다.

- 아스팔트 바인더 (2종류) : 일반 아스팔트, 폴리머 개질 아스팔트
- 아스팔트 함량 (2종류) : 6.1%, 7.2%
- 골재 (1종류) : 슈퍼페이브 입도제한구역을 아래로 통과하는 입도를 가진 석회암 골재 (그림 1)

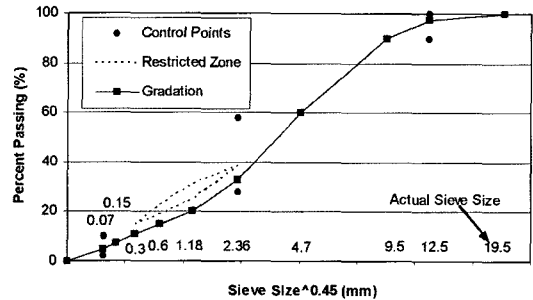


그림 1. 골재입도 분포곡선

일반 아스팔트에 대하여 슈퍼페이브 배합설계를 수행하여 중(重)교통량 (Superpave traffic level 6)과 경(輕)교통량 (Superpave traffic level 2)에서의 아스팔트 함량 6.1%와 7.2%를 구하였으며, 동일한 아스팔트 함량을 개질 아스팔트에도 적용함으로써 아스팔트 바인더의 특성 차이로 인한 아스팔트 혼합물의 손상회복특성의 차이를 파악하고자 하였다. 아스팔트 혼합물의 명칭은 6.1% 일반 아스팔트를 함유한 혼합물을 "6.1", 7.2% 일반 아스팔트를 함유한 혼합물을 "7.2", 6.1% 개질 아스팔트를 함유한 혼합물을 "6.1M", 7.2% 개질 아스팔트를 함유한 혼합물을 "7.2M"로 명명하였다. 본 연구에 사용된 일반 아스팔트와 개질 아스팔트의 특성은 표 1과 같다. 아스팔트 혼합물은 단기노화 (short term oven aging) 시켰으며, 선화다짐기를 이용하여 7% ±0.5%로 다짐하였다. 아스팔트 혼합물 시험시편은 지름 15cm, 두께 5cm의 크기로 제작하였다.

## 3. 손상회복 (Healing) 시험

본 연구에서는 아스팔트 혼합물의 손상회복특성을



표 1. 시험에 사용된 일반 아스팔트 및 개질 아스팔트의 특성

아스팔트 바인더 특성	시험 방법	노화	일반 아스팔트	개질 아스팔트
Performance Grade			PG 67-22	PG 76-22
Viscosity (20rpm) @ 135°C, $P_{a-s}$	ASTM D4402	Unaged	0.51	1.315
Viscosity (20rpm) @ 165°C, $P_{a-s}$	ASTM D4402	Unaged	0.155	0.368
Dynamic Shear (10rad/sec) $G^*/\sin\delta$ , kPa	AASHTO TP5	Unaged	1.27 and 85.8 @ 67°C	1.386 and 71.6 @ 76 °C
Dynamic Shear (10rad/sec) $G^*/\sin\delta$ , kPa	AASHTO TP5	RTFO aged	2.864 @ 67°C	3.025 @ 76 °C
Dynamic Shear (10rad/sec) $G^*\sin\delta$ , kPa	AASHTO TP5	PAV aged	2754 @ 25°C	2879 @ 25 °C 1432 @ 31 °C
Creep Stiffness and m-value, 60sec.	AASHTO TP1	PAV aged	155.0 and 0.362 @ -12°C	131 and 0.355 @ -12°C 263 and 0.298 @ -18°C

소모된 크리프 변형 에너지 (dissipated creep strain energy, DCSE)의 형태로 표현하였다. DCSE는 어떤 물체에 하중을 가했을 때 그 물체에 손상을 입히는데 소모된 변형 에너지를 뜻한다. 예를 들어 그림 2에서와 같은 강도시험의 경우, 재료가 파괴될 때까지 가해진 총 에너지를 파괴에너지(fracture energy)라고 한다면, 파괴에너지의 일부는 탄성에너지(elastic energy)의 형태로 재료 내부에 흡수되지 않은 채 외부로 작용하며, 파괴에너지의 나머지 부분은 재료에 손상을 입히는데 소모된다고 할 수 있다. 따라서 재료에 작용한 외부에너지 중 순수하게 재료에 손상을 입히는데 사용된 에너지를 DCSE라 정의한다.

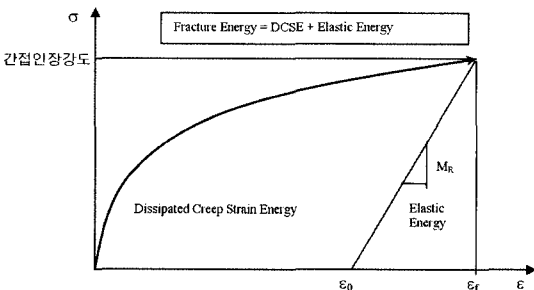
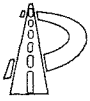


그림 2. 강도시험으로부터 얻어지는 Fracture Energy 및 Dissipated Creep Strain Energy

본 연구에서 개발한 손상회복시험은 반복재하시험과 일련의 회복탄성계수시험(resilient modulus test,  $M_R$ )으로구성된다. 즉, 재료는 반복적인 하중에 의해 손상을 입게 되고(손상누적단계), 하중 재하를 멈추면 재료가 입은 손상은 시간에 따라 회복하게 된다(손상회복단계). 손상회복단계의 임의의 시간에서  $M_R$  시험을 수행하여 손상이 회복되는 정도를 측정한다. 반복재하시험과  $M_R$  시험 동안 회복변형(resilient deformation,  $\delta_R$ )을 측정하고 응력과 변형률을 이용하여 스티프니스(응력과 변형률의 비)나 혹은 DCSE(응력과 변형률의 곱)를 구할 수 있다(Zhang, 2000). 본 연구에서는 측정된 회복변형을 이용하여 에너지 형태인 DCSE를 계산하고 이를 손상누적과 손상회복을 보여주는 매개변수로 이용하였다. 본 연구의 손상회복시험은 기본적으로 AASHTO TP31-94의 간접인장을 이용한 회복탄성계수시험을 따르며, 그 절차를 요약하면 다음과 같다.

- ① 샘플을 준비한 후, 양쪽 면에 변형을 측정하기 위한 센서를 부착한다.
- ② 1000회 반복하중을 가한다. 하중은 0.1초 반사인파(haversine)를 하중과 0.9초 휴식기로 구성된다. 100회마다  $\delta_R$ 를 측정한다.
- ③ 하중을 제거한다.



- ④ 하중을 제거한 후 2분, 4분, 6분, 10분, 20분, 40분, 60분에  $M_R$  시험을 수행한다.  $M_R$  시험을 통해  $\delta_R$ 를 측정한다.
- ⑤ 시간에 따른 DCSE를 도출하고, 로그 스케일로 시간에 따른 DCSE의 변화속도를 계산한다.

#### 4. 손상회복특성 평가

그림 3은 4가지 혼합물에 대한 손상회복시험 결과를 보여준다. 그림 2에서 보는 바와 같이 하중이 반복 재하 됨에 따라 손상 (DCSE)은 선형적으로 증가하고 하중이 제거된 이후에는 비선형적으로 회복되고 있음을 알 수 있다. 따라서 손상회복의 비선형적 거동을 로그함수 형태로 표현하고, 그 기울기를 이용하여 아스팔트 혼합물의 손상회복속도 (healing rate)를 구한다. 본 연구에서는 이 값을 이용하여 아스팔트 혼합물의 손상회복특성을 평가하고자 한다.

그림 3에서 보는 바와 같이 개질 아스팔트 혼합물의 손상회복속도가 일반 아스팔트 혼합물의 손상회복속도에 비해 더 작음을 알 수 있다. 그러나 동일한 하중 (75psi로 1000회 반복재하)을 가하였음에도 불구하고 누적된 손상은 개질 아스팔트 혼합물과 일반 아스팔트 혼합물에서 현격한 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 총 누적 손상량이 아스팔트 혼합물의 손상회복속도에 어떤 영향을 미칠 수 있음을 보여주는 결

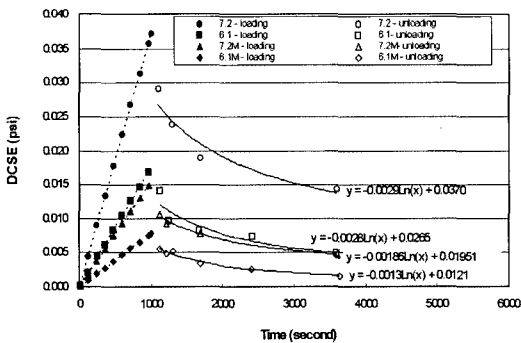


그림 3. 손상회복시험 결과 (75psi 하중 1000회 반복재하 후 손상회복 측정, 15℃)

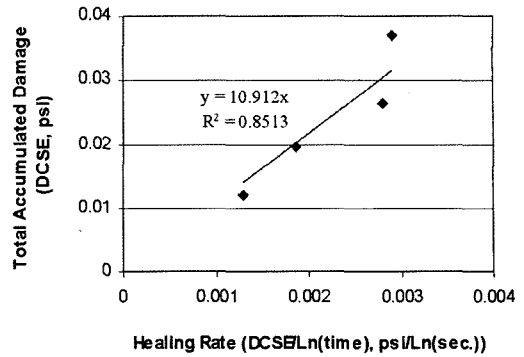


그림 4. 총 누적손상량과 손상회복속도와의 관계 (4가지 다른 혼합물에 동일한 하중을 가한 경우, 15℃)

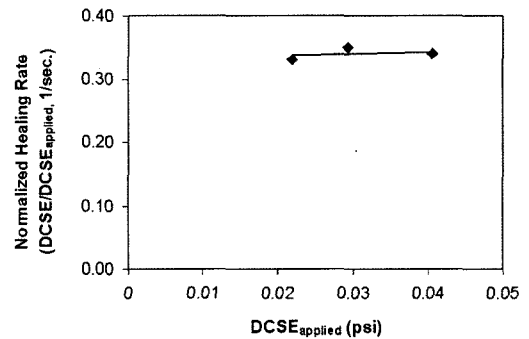


그림 5. 총 누적손상량과 손상회복속도와의 관계 (동일한 혼합물에 3가지 다른 크기의 하중을 가한 경우, 20℃)

과이다. 따라서 총 누적 손상량 (total accumulated damage,  $DCSE_{applied}$ )이 손상회복속도에 어떤 영향을 주는지 살펴보기 위해 그림 4를 도출해 보았다. 그림 4에서 보는 바와 같이 손상회복속도는 총 누적 손상량에 비례함을 알 수 있다. 이러한 결과를 조금 더 확인해 보기 위해 동일한 혼합물 (6.1% 개질 아스팔트 혼합물)에 대해 실험을 수행하였다. 즉 동일한 혼합물에 다른 크기의 하중(55psi의 하중을 540, 720, 1000회 반복재하)을 가하여 총 누적손상량을 변화시킨 후 손상회복속도를 측정하였다. 이를 통해 그림 5에서와 같은 결과를 얻음으로써 손상회복속도가 총 누적손상량에 비례함을 실험적으로 증명할 수 있었다. 따라서 각 측정단계에서의 손상량을 총 누적손상량으로 나눈 값  $DCSE/DCSE_{applied}$ 를 이용함으로써 누적손상량에 의한 영향을 제거하고 순수하게

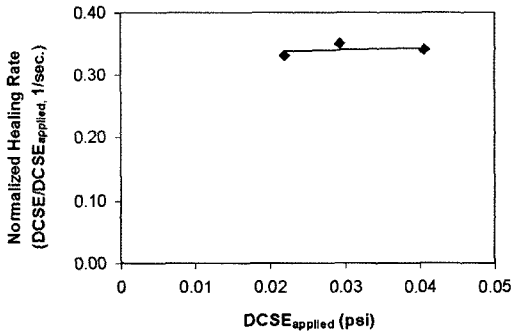


그림 6. 정규화된 손상회복속도와 총 누적손상량과의 관계 (동일한 혼합물에 3가지 다른 크기의 하중을 가한 경우, 20℃)

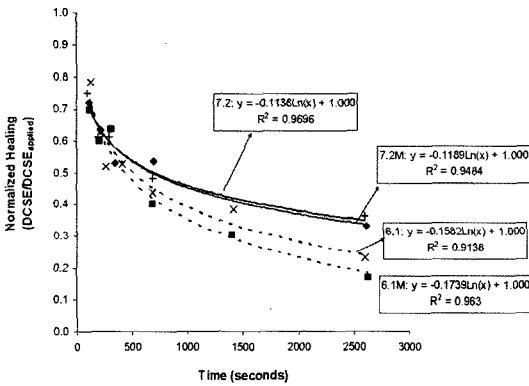


그림 7. 정규화된 손상회복특성(75psi 하중 1000회 반복재하 후 손상회복 측정, 15℃)

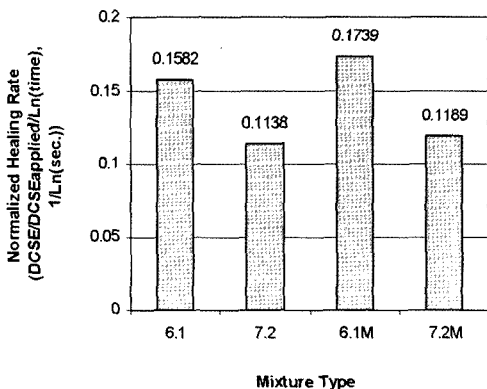


그림 8. 4가지 아스팔트 혼합물의 정규화된 손상회복속도

아스팔트 혼합물의 특성 차이로 인한 손상회복속도의 차이를 산정할 수 있음을 알 수 있다. 그림 6은 DCSE/DCSE<sub>applied</sub>를 이용하여 정규화된 손상회복

속도 (normalized healing rate)를 보여주고 있는데, 동일한 아스팔트 혼합물에 대하여 총 누적손상량에 무관하게 normalized healing rate은 일정한 값을 보여주고 있다. 따라서 본 연구에서는 아스팔트 혼합물의 손상회복을 특성화하기 위한 파라미터로서 로그 스케일에서 시간에 대한 DCSE/DCSE<sub>applied</sub>의 기울기 즉, normalized healing rate을 제안한다.

그림 7은 본 연구의 4가지 혼합물에 대한 정규화된 손상회복특성을 보여주고 있으며, 그림 8에서는 정규화된 손상회복속도를 비교 도시하였다. 그림 8에서 보는 바와 같이 손상회복속도에 대한 폴리머 개질 (polymer modification)효과는 매우 작음을 알 수 있다. 즉 6.1% 아스팔트 함량의 경우 일반 아스팔트 혼합물과 개질 아스팔트 혼합물의 손상회복속도는 약 10% 정도의 차이로 거의 유사하며, 7.2% 아스팔트 함량 경우도 역시 일반 아스팔트 혼합물과 개질 아스팔트 혼합물의 손상회복속도는 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나 아스팔트 함량의 차이는 손상회복속도에 큰 영향을 주고 있다. 일반 아스팔트 혼합물의 경우 6.1% 혼합물이 7.2% 혼합물에 비해 약 40% 손상회복속도의 증가를 보여준다. 이와 비슷하게 개질 아스팔트 혼합물의 경우도 6.1% 혼합물이 7.2% 혼합물에 비해 약 46% 손상회복속도의 증가를 보여주고 있다.

온도에 의한 손상회복특성을 살펴보기 위해 3가지 온도 (0℃, 10℃, 20℃)에 대한 손상회복속도를 측정하였다. 하중은 0℃, 10℃ 및 20℃에서 각각 2000 lb, 1200 lb 및 500 lb를 360회 반복재하 하였다. 그림 9는 온도변화에 따른 손상회복속도의 변화를 보여준다. 그림에서와 같이 온도가 증가함에 따라 손상회복 속도는 지수 함수적으로 증가함을 알 수 있다. 세가지 온도영역 모두에서 6.1% 아스팔트 함량을 가진 혼합물이 7.2% 아스팔트 함량을 가진 혼합물보다 손상회복속도가 더 큼을 알 수 있다. 한가지 흥미로운 결과는 온도증가에 따른 손상회복속도의 증가율은 6.1% 아스팔트 함량에서 보다 7.2% 아스팔트 함량에서 더 큰 것으로 나타났다. 이는

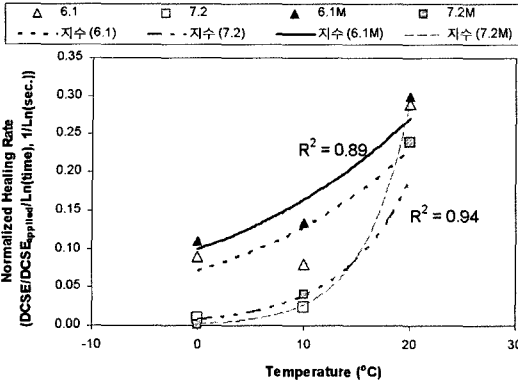


그림 9. 온도에 따른 아스팔트 혼합물의 손상회복속도

즉 아스팔트 함량이 많을수록 혼합물의 손상회복특성은 온도에 더 민감함을 알 수 있다.

결론적으로 본 연구에서와 같은 조건에서의 아스팔트 혼합물의 손상회복특성은 폴리머 개질과 같은 아스팔트 바인더의 특성보다는 아스팔트 함량과 같은 혼합물의 구조적인 특성에 더 많은 영향을 받음을 알 수 있었다. 본 연구에서 아스팔트 함량이 낮은 혼합물이 아스팔트 함량이 높은 혼합물보다 손상회복속도가 큰 것으로 나타났는데, 이러한 결과는 아스팔트가 많이 함유될수록 손상회복속도가 빠를 것이라는 실험전의 예상과 반대되는 것이다. 물론 명확한 이유를 밝히기에는 실험 샘플수가 부족하긴 하지만 본 연구의 결과만을 가지고 분석해 보면 최적 아스팔트 함량을 초과하는 과도한 아스팔트 함량은 오히려 손상회복을 지연시킬 수도 있음을 보여주는 결과라 하겠다. 또한 본 연구에서 대상으로 한 저온에서 중간 정도의 온도 영역 (0°C~20°C)에서 6.1% 아스팔트 함량을 가진 혼합물이 7.2% 아스팔트 함량을 가진 혼합물보다 손상회복속도가 더 큰 것으로 나타났지만, 손상회복특성의 온도에 대한 민감성은 아스팔트 함량이 많을수록 더 큰 것으로 나타났다.

## 5. Damage Recovery

아스팔트 혼합물의 손상회복특성에 대한 첫 번째 연구(4장에 기술된 내용)는 전체적인 손상회복특성

에 대한 것이었다. 이를 좀 더 자세히 설명하면 다음과 같다. 아스팔트 혼합물은 하중이 가해지는 동안 세 가지 원인에 의해 스티프니스 (혹은 resilient deformation의 형태로 표현할 수 있음)가 감소하게 된다. 즉 하중재하 초기에 재료의 구조가 재배열되면서 스티프니스가 급격히 감소하게 되는 steric softening에 의해, 재료 내부의 온도 상승 (heating)으로 인해, 나머지는 순수하게 damage에 의해 스티프니스가 감소한다. 반대로 하중을 제거할 경우 손상회복 역시 세 가지 원인 (steric hardening, cooling, and damage recovery)에 의해 발생한다. 이 중에서 steric softening과 heating은 주로 하중재하 초기에 발생하며 재료의 damage의 누적과 직접적인 관련이 없으므로 하나로 묶을 수 있다. 이를 그림으로 도시하면 그림 10에서와 같이, resilient deformation의 총 증가 ( $\delta_D - \delta_i$ )는 damage와 직접적으로 관련되어 있는  $\Delta\delta_D (= \delta_D - \delta_i)$ 와 steric softening과 heating과 관련되어 있는  $ss (= \delta_0 - \delta_i)$ 로 구분할 수 있다. 이때 손상회복 부분은  $\Delta\delta_{DR} (= \delta_D - \delta_{DR})$ 에 대한 damage recovery)과  $\Delta\delta_{SH} (= \delta_{SH} - \delta_0)$ 에 대한 steric hardening과 cooling에 의한 recovery)로 나눌 수 있다. 그림 10에서  $t_D$ 는 하중 재하가 끝나는 시간,  $t_{DR}$ 는 damage recovery가 끝나는 시간,  $t_H$ 는 재료의 손상이 완전히 회복되는 시간, 그리고  $H_N$ 은 damage recovery rate을 나타내고 있다.

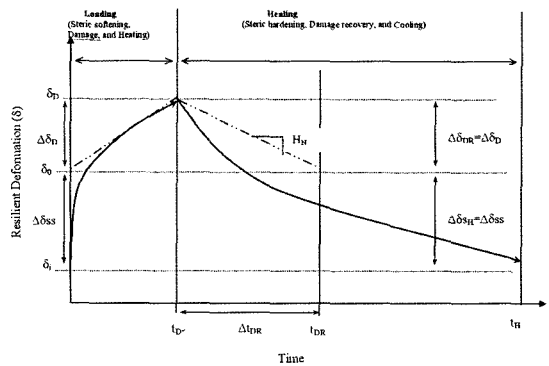


그림 10. 반복재하와 손상회복 동안의 Resilient Deformation의 변화

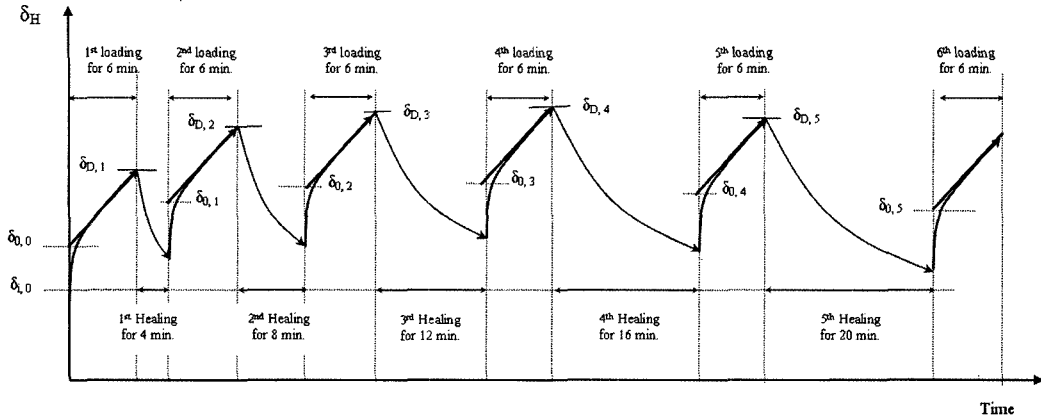


그림 11. Damage Recovery를 측정하기 위한 실험절차

따라서 본 장에서는 전체적인 손상회복 중에서 steric hardening과 cooling에 의한 recovery부분을 제거함으로써 damage recovery만을 규명하고자 그림 11에서 보는 바와 같은 실내시험을 수행하였다. 즉, 휴식기를 갖는 일련의 반복하중조합을 가함으로써 휴식시간(rest time)에 대한 damage recovery를 구하고, 이를 이용하여 단위 휴식시간에 대한 damage recovery 즉 damage recovery rate을 구하였다. 반복하중 재하시간은 6분(360회 반복하중)이었으며, 다음 번 반복하중을 가할 때까지 4분, 8분, 12분, 16분, 20분 순으로 휴식기를 갖도록 시험을 구성하였다.

그림 12는 위와 같은 방법으로 측정한 4가지 혼합물에 대한 normalized damage recovery rate을 보

여준다. 시험결과, damage recovery rate과 전체적인 healing rate은 서로 비슷한 경향을 보임을 알 수 있었다. 즉 일반 아스팔트 혼합물과 개질 아스팔트 혼합물 사이에 순수한 damage recovery rate의 차이는 거의 없었지만, 아스팔트 바인더의 양에 의한 damage recovery rate의 차이는 상당히 존재함을 알 수 있었다. 따라서 아스팔트 혼합물의 손상회복특성을 평가하기 위한 방법으로 5장에서 기술한 방법과 같은 매우 복잡하고 힘든 실험을 수행하기 보다는 본 연구의 3장에서 제안한 방법이 보다 적절하다고 판단된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 간접인장시험을 이용하여 아스팔트 혼합물의 손상회복특성을 측정할 수 있는 시험방법을 개발하고, 이를 통해 아스팔트 혼합물의 손상회복특성을 평가하고자 하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. AASHTO TP31-94의 간접인장을 이용한 회복탄성계수시험을 기본으로 아스팔트 혼합물의 손상회복특성을 측정할 수 있는 시험방법을 개발하였다.
2. 아스팔트 혼합물의 손상회복을 특성화하기 위한

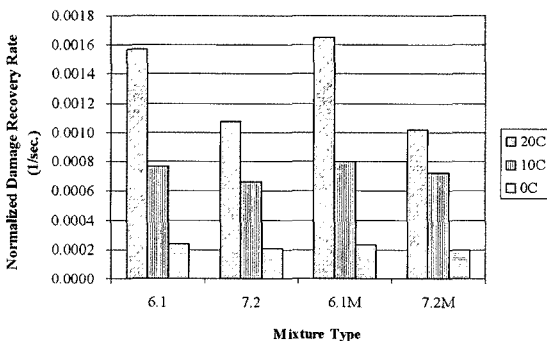
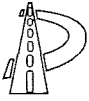


그림 12. 세가지 온도에서의 Normalized Damage Recovery Rates



파라미터로서 DCSE/DCSE<sub>applied</sub>를 이용한 정규화된 손상회복속도(normalized healing rate)를 제안하였다.

3. 개질 아스팔트 바인더는 같은 반복하중 하에서 일반 아스팔트 바인더에 비해 누적손상량이 적게 발생하였으며, 이에 따른 손상회복속도가 큼을 알 수 있었다.
4. 아스팔트 혼합물의 손상회복특성은 폴리머 개질과 같은 아스팔트 바인더의 특성보다는 아스팔트 함량과 같은 혼합물의 구조적인 특성에 더 많은 영향을 받음을 알 수 있었다.
5. 본 연구의 4가지 혼합물에 대한 실험결과, 최적 아스팔트 함량을 초과하는 과도한 아스팔트 함량은 오히려 손상회복을 지연시킬 수도 있음을 보여주었다.
6. 아스팔트 혼합물의 손상회복속도는 온도가 증가함에 따라 지수 함수적으로 증가함을 알 수 있었다.
7. 아스팔트 혼합물의 순수한 damage recovery rate을 측정할 수 있는 방법을 제시하였으며, 시험결과 damage recovery rate은 전체적인 healing rate과 비슷한 경향을 보임을 알 수 있었다.
8. 아스팔트 혼합물의 피로거동을 정확하게 파악/예측하기 위해서는 아스팔트 혼합물의 손상회복특성을 반영해야 한다. 따라서 향후 아스팔트 혼합물의 손상회복특성에 영향을 주는 다양한 인자들

을 파악하고 이를 아스팔트 포장의 피로 모델에 반영하기 위한 연구가 요구된다.

#### 참고문헌

1. Bazin, P. and J. B. Saunier, "Deformability, Fatigue and Healing Properties of Asphalt Mixes," *Proceedings, Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbor, MI., pp. 553-569, 1967.
2. Wool, R. P. and K. M. O'connor, "A Theory of Crack Healing in Polymers," *Journal of Applied Physics*, Vol. 52, No. 10, pp. 5953-5963, 1981.
3. Kim, Y. R., D. N. Little, and F. C. Benson, "Chemical and Mechanical Evaluation on Healing Mechanism of Asphalt Concrete," *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 59, pp. 240-275, 1990.
4. Zhang, Zhiwang, "Identification of Crack Growth Law for Asphalt Mixtures Using the Superpave Indirect Tensile Test (IDT)," Ph.D. Dissertation, University of Florida, 2000.

〈접수 : 2004. 12. 6〉