

# 휠트래킹 시험을 통한 토목섬유시트 보강 아스팔트포장의 소성변형 거동특성 평가

## Evaluation of the Permanent Deformation Behavior on Geosynthetics-Reinforced Asphalt Pavement by using the Wheel Tracking Tests

\*1 조 삼 덕 Cho, Sam-Deok

\*2 이 대 영 Lee, Dae-Young

\*3 김 진 환 Kim, Jin-Hwan

\*4 김 남 호 Kim, Nam-Ho

### Abstract

The major pavement distress types found in the domestic roadways include rutting, fatigue cracking, and reflection cracking which are results of the environment and repeated traffic loads. These distresses usually occur before pavements approach their design life, and therefore, a significant amount of national budget is spent for maintenance of roadway pavements. The purpose of this study is to establish a geosynthetics-asphalt pavement system. For the study, wheel tracking tests are conducted to analyze the controlling effect of geosynthetics on rutting of asphalt pavement. On the basis of these works, the reinforcement effect of geosynthetics on the rutting of the asphalt pavement is clarified and deformation characteristics of geosynthetics-asphalt mixture is examined.

### 요 지

국내 도로포장의 주요 파손형태는 주변환경 및 반복교통하중 조건에 의한 소성변형, 피로균열, 반사균열, 온도균열 등이 있는데, 포장이 설계수명에 도달하기 이전에 주로 발생하며 이로 인한 도로포장의 유리관리에 막대한 국가예산이 낭비되고 있는 실정이다. 본 연구는 토목섬유를 보강한 아스팔트 포장 시스템을 평가하는 것으로 이를 위해 아스팔트 포장 소성변형에 대한 토목섬유의 보강효과를 분석하고자 휠트래킹 시험을 수행하였으며, 토목섬유 보강에 따른 토목섬유와 아스팔트 혼합물의 거동특성을 고찰하였다.

**Keywords :** Rutting, Geosynthetics-asphalt pavement, Wheel tracking test

### 1. 서론

국내 아스팔트 포장의 주요 파손형태 중, 여름철의 이상고온 및 중차량 하중에 의해 발생하는 아스팔트 포장의 소성변형은 아스팔트포장이 설계수명에

도달하기 이전에 주로 발생하며 이로 인한 도로포장의 유리관리에 막대한 국가예산이 낭비되고 있는 실정이며, 이에 따른 방지사공대책 및 보수대책에 대한 관심이 증가하고 있다. 소성변형은 여름철의 이상 고온, 과적차량 등과 같은 외부적 요인뿐 아니라,

\*1 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구부 수석연구원(Member, Research Fellow, Civil Eng. Div., KICT)

\*2 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원(Member, Senior Researcher, Civil Eng. Div., KICT)

\*3 비회원, 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원(Researcher, Civil Eng. Div., KICT)

\*4 비회원, 한국기술교육대학교 건축공학과 조교수(Assistant Professor, Dept. of Architectural Eng. KUT)

아스팔트 및 아스팔트 혼합물과 관련된 여러 내부적 인자가 주요한 발생원인으로 알려져 있다. 일반적으로 아스팔트 포장층 내에 설치된 토목섬유는 균열억제 효과뿐만 아니라 소성변형 억제에도 효과가 있으며, 부수적으로 토목섬유 보강층의 공학적 특성으로 인하여 수밀성이 증대되어 도로균열로 인한 침투수를 차단하는 등의 여러 장점들이 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 국내에서는 아직 토목섬유 보강재를 사용한 아스팔트 포장체의 사용이 실용화되어 있지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 아스팔트 표층과 기층 사이에 유리섬유계열의 보강재를 추가하여 보강한 아스팔트 포장체의 소성변형 거동특성을 휠트래킹 시험을 통하여 얻은 결과를 중심으로 평가하였다.

## 2. 실내 시험

### 2.1 시험 재료

본 연구에서는 토목섬유 종류 및 골재의 크기에 따른 토목섬유 보강 아스팔트 복합체의 소성변형 거동을 평가하기 위하여 2단계에 걸쳐서 시험을 수행하였다. 1단계 시험에서는 표층용 골재로 최대골재 치수 19mm, 기층용 골재로 25mm의 화강암 쇄석을 사용하였으며, 아스팔트는 국내 ○○사의 AP-5 아스팔트를 사용하였다. 2단계 시험에서는 표층용으로 최대치수 13mm 골재를, 기층용 골재로는 일반적으로 도로포장용으로 많이 사용되는 37.5mm의 화강암 쇄석을 사용하였고, 아스팔트는 국내 ○○사의

AP-5 아스팔트 및 SBS 개질 아스팔트를 사용하였다. 사용된 골재 및 아스팔트는 제반 품질규정을 만족하였다.

마찰 배합설계를 통하여 최적 아스팔트 함량을 결정하였는데, 그 결과 1단계 시험의 경우 표층은 5.45%, 가열 아스팔트 안정처리기층은 4.20%를 나타내었으며, 2단계 시험의 경우 AP-5 아스팔트 및 SBS 개질 아스팔트 표층은 각각 5.75%와 5.73%를, 가열 아스팔트 안정처리기층의 최적 아스팔트 함량은 3.95%를 나타내었다.

본 연구에는 두 종류의 토목섬유 보강재가 사용되었는데, 하나는 독일 ○○사의 유리섬유 그리드(glass fiber grid) 제품으로 고강도 유리섬유사를 직직하여 그리드 형태로 만들고, 그리드 내 빈 공간에도 유리섬유사를 배열하여 채운 상태에서 역청제 점착물(bitumen adhesive)로 코팅하여 제조한 연성 지오그리드이다. 다른 하나는 일본 ○○사의 유리섬유 시트(glass fiber sheet)로서, 이 제품은 두께 0.25mm의 유리섬유사를 직선상으로 간격없이 배열하고 폴리프로필렌 수지(PP resin)로 결속한 얇은 막을 직교하도록 적층시킨 후 아스팔트로 도포하여 제조한 두께 2.0mm의 시트형 복합 토목섬유이다(그림 1 참조).

### 2.2 시험포장 단면 및 공시체 제작

본 연구에서는 토목섬유 보강재의 사용여부, 골재 크기 변화, 보강재의 위치 및 각 포장체의 두께에 따

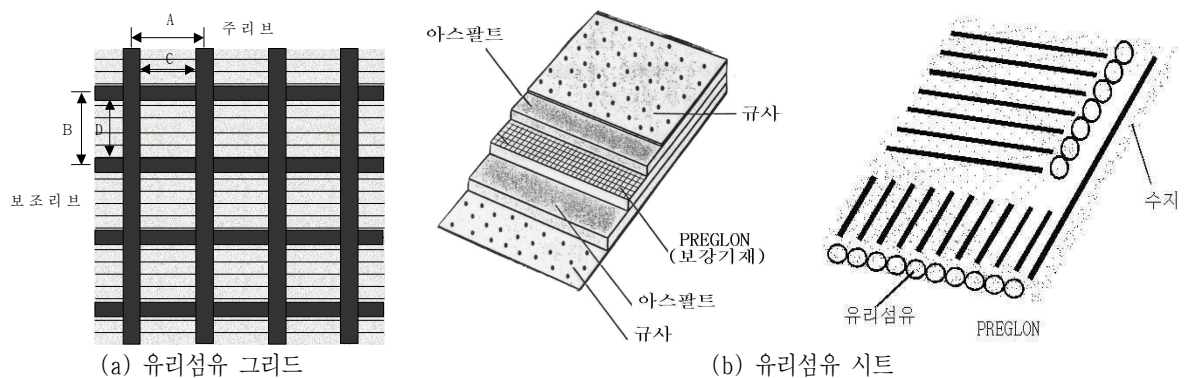


그림 1. 연구에 사용된 토목섬유

큰 소성변형 형태를 파악하기 위하여 그림 2와 같이 세 종류의 포장단면에 대한 시험을 실시하였다. 모형 A는 표층 5cm + 기층 10cm, 모형 B는 표층 5cm + 기층 5cm(2단계 시험에서는 7cm), 모형 C는 표층 3cm + 기층 10cm 로 구성되어 있다.

공시체 제작 1단계 시험에서는 표층용 최대골재치수 19mm와 기층용 최대골재치수 25mm 골재에 대하여 시험실 내에서 무단변속 다짐기를 사용하여 300mm(l)×300mm(b) 크기로 아스팔트 혼합물을 제작하였으며, 2단계 시험의 경우 실외에 설치된 실험장(test pit)에서 제작되었다. 실험장은 다져진 노상 위에 쇠석 보조기층을 15cm 두께로 설치한 후, 그 위에 최대 골재치수가 37.5mm인 가열 아스팔트 안정처리기층을 시공하였다. 다짐은 진동 다짐 로울러를 사용하였으며, 표층의 경우 각 모형 두께에 따라 110cm×80cm의 거푸집을 제작한 후 아스팔트 혼합

물을 부어 다짐하였다. 여러 번의 시행 착오를 통해 다짐도가 96%로 유지되고 소요 공극률이 4.0±0.5%를 만족하며 다짐시 혼합물이 더 이상 유동하지 않는 상태가 유지되는 표면 온도가 약 80℃ 될 때까지 다짐을 실시하였다. 휠트래킹 시험 공시체는 실험장에서 제작된 공시체를 각 모형에 부합하는 크기로 절단하여 제작하였다.

### 2.3 시험 방법

소성변형에 대한 토목섬유의 효과를 평가하기 위해 휠트래킹 시험(Wheel Tracking Test)을 실시하였다. 시험에 사용된 장비는 그림 3과 같은 일본 TANIFUJI사에서 제작된 휠트래킹 시험 장비를 사용하였다. 각 공시체는 시험 개시 6시간 이전에 미리 60±2℃를 유지하는 항온실에서 양생하였다. 공시체

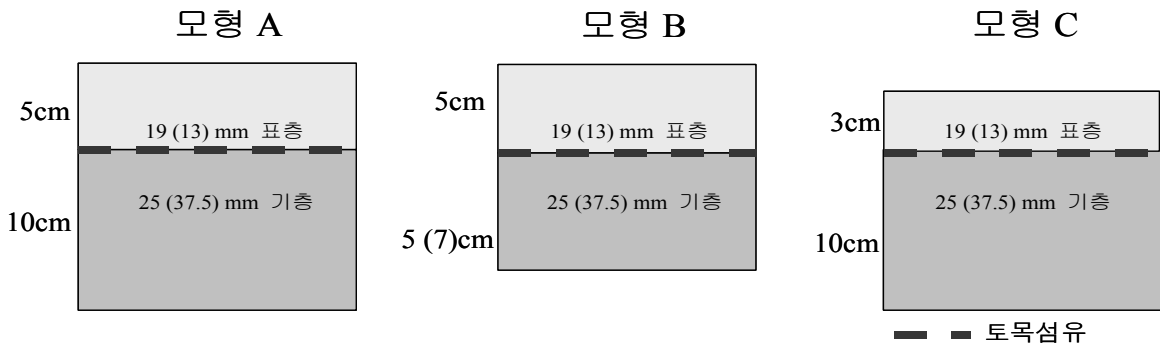


그림 2. 시험 포장단면의 개요

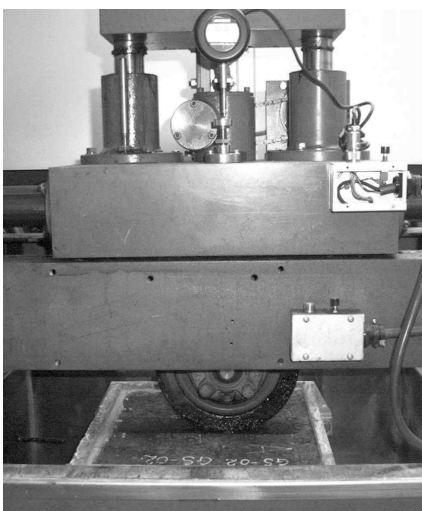


그림 3. 휠트래킹 시험 장비

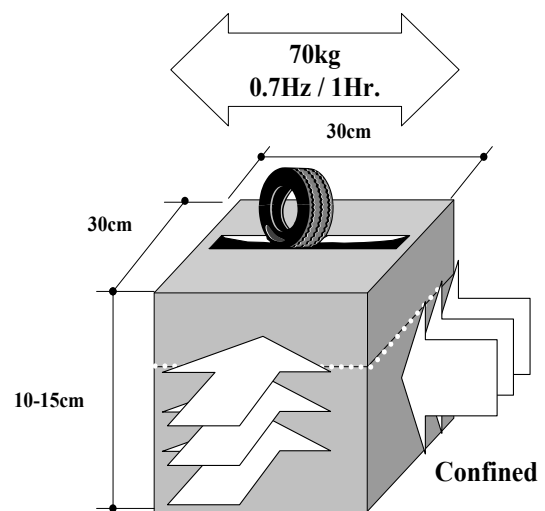


그림 4. 휠트래킹 시험 개요

표 1. 휠트래킹 시험에 사용된 모형의 명칭

	최대골재치수	토목섬유 종류	AP 종류	단면형태	명 칭
1단계	표층 19mm 기층 25mm	N (비보강)	AP-5	A/B/C	N-A / N-B / N-C
		G (유리섬유 그리드)	AP-5	A/B/C	G-A / G-B / G-C
		S (유리섬유 시트)	AP-5	A/B/C	S-A / S-B / S-C
2단계	표층 13mm 기층 37.5mm	N (비보강)	AP-5	A/B/C	N-A-A / N-A-B / N-A-C N-S-A / N-S-B / N-S-C
			SBS 개질	A/B/C	
		G (유리섬유 그리드)	AP-5	A/B/C	G-A-A / G-A-B / G-A-C G-S-A / G-S-B / G-S-C
			SBS 개질	A/B/C	
		S (유리섬유 시트)	AP-5	A/B/C	S-A-A / S-A-B / S-A-C S-S-A / S-S-B / S-S-C
			SBS 개질	A/B/C	

표면이 시험 온도인  $60\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 가 될 때까지 정치시키고 온도가 안정된 후 시험 바퀴를 직진 주행시켰다. 이때 가해진 시험 바퀴의 하중은  $70\pm 1\text{kg}$ 로 하였으며, 공시체의 다짐방향에 대하여 중심선을 따라 주행하도록 하였다. 또한 시험 바퀴는 공시체 중앙부를  $42\pm 1$ 회/min의 속도로 수평 전후 운동을 하였으며, 주행 거리는  $230\pm 10\text{mm}$ 이다(그림 4 참조). 모든 시험은 동일한 공시체를 2개 제작하여 2회의 반복시험을 수행하였으며, 사용된 모형의 명칭은 표 1과 같다.

### 3. 시험결과 분석 및 평가

#### 3.1 1단계 시험

각 단면 형식별로 초기 소성변형량( $D_0$ ), 동적 안정도(DS) 및 변형률(RD)은 토목섬유의 종류 및 사용유무에 따라 약간의 차이는 있었으나, 토목섬유 아스팔트 복합체 공시체의 휠트래킹 시험에 의한 침하량은 그림 5에서 볼 수 있듯이 같은 단면에서는 토목섬

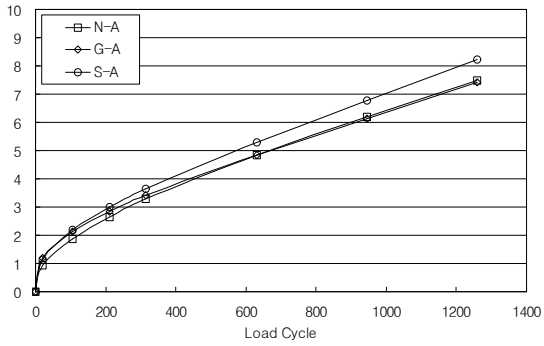
유 보강 여부에 관계없이 소성변형이 거의 비슷한 수준으로 발생하였다. 오히려 표층 침하량은 토목섬유 보강 여부보다는 표층 및 기층 두께의 조합에 크게 좌우되어, 소성변형의 크기는 모형 A (표층 5cm + 기층 10cm), 모형 B (표층 5cm + 기층 5cm), 모형 C (표층 3cm + 기층 10cm) 순으로 크게 나타났다.

이상과 같이 휠트래킹 시험 결과를 정리하여 표 2에 나타내었으며, 휠트래킹 시험에 발생된 기층부분의 소성변형을 분석하기 위하여 휠트래킹 시험 완료 후 공시체의 소성변형 발생 부위를 차륜 이동방향(종방향)으로 절단하고 표층과 기층 경계면의 위치를 측정하여 기층에서 발생한 소성변형량을 측정하였다. 그림 6은 휠트래킹 시험을 통해 발생한 시료의 표층과 기층의 소성변형량을 보여주고 있다.

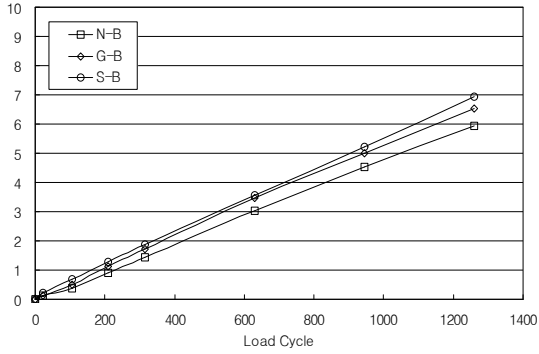
이들 그림은 두 부분으로 구성되는데 하나는 표층에서 발생한 소성변형 contour를, 또 하나는 기층에서 발생한 소성변형 contour를 같은 Y축 상에 동시에 나타낸 것이다. 그 결과 토목섬유를 사용하지 않은 공시체의 경우에는 측정된 소성변형의 약 50% 정도

표 2. 휠트래킹 1단계 시험 결과

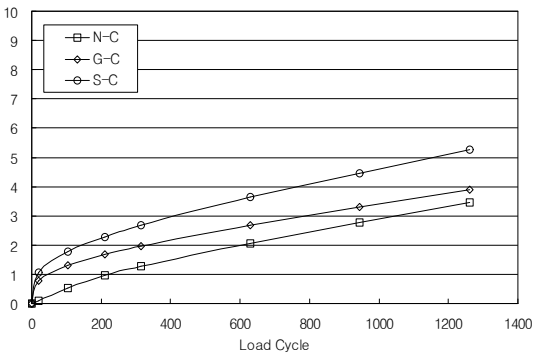
구 분	N-A	G-A	S-A	N-B	G-B	S-B	N-C	G-C	S-C
$D_0$ (mm)	2.31	2.30	2.47	0.72	0.46	0.59	0.69	1.54	2.11
최종 소성변형량 (mm)	7.47	7.42	8.23	5.95	6.52	6.94	3.47	4.22	5.25
DS (T./mm)	489.5	496.6	437.5	449.7	417.9	368.6	910.3	1,067.8	954.5
RD (mm/min)	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.12	0.05	0.04	0.03



(a) 모형 A



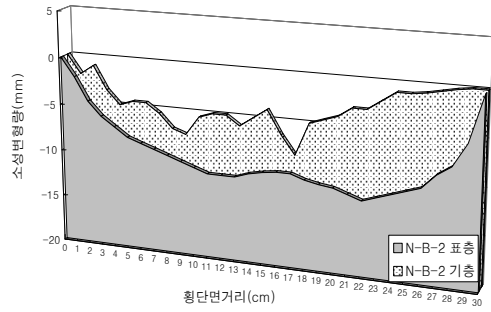
(b) 모형 B



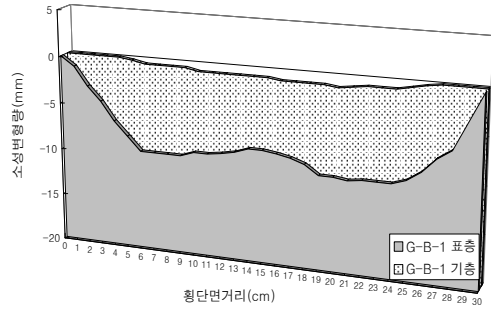
(c) 모형 C

그림 5. 표층의 소성변형 발생량(1단계 시험)

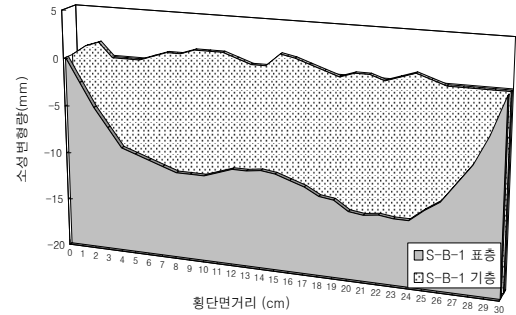
가 기층에서 발생하는 것으로 나타났는데 반하여, 기층에서 발생하는 소성변형의 전체에 대한 비율은 기층의 두께가 클수록 다소 증가하여 N-A(기층 10cm)와 N-B(기층 5cm), N-C(기층 10cm)가 각각 52%, 46%, 69%로 나타났다. 이는 가열아스팔트 안정처리 기층에서는 소성변형이 발생하지 않는다고 하는 일반적인 믿음과는 상관없이 최대골재치수 25mm의 가열아스팔트 안정처리 기층에서도 실제로 많은 양의 소성변형이 발생할 수 있음을 나타내는 흥미로운



(a) N-B



(b) G-B



(c) S-B

그림 6. 표층, 기층의 소성변형 contour(1단계 시험)

결과라 여겨진다.

그러나 이러한 기층에서의 소성변형 현상은 토목섬유를 사용한 공시체의 경우에는 현저히 줄어드는 것으로 나타났다. 각각의 경우마다 다소의 차이는 있었지만 공시체 중앙부 20cm 부근에서 발생한 소성변형 중 기층에서 발생한 소성변형의 비율은 전체의 약 10% 정도로 나타났다. 따라서 본 연구에 사용된 유리섬유 계열의 토목섬유는 종류에 상관없이 기층에서의 소성변형을 막는데 효과적이라고 판단된다.

### 3.2 2단계 시험

많은 경우에 있어서 소성변형량이 4mm 이내로 발생하여 1단계 시험의 소성변형량보다 작게 나타났으며, 이는 사용된 골재크기의 변화(기층 25mm 골재 ⇨ 37.5mm 골재)와 다짐방법의 차이(무단변속다짐 ⇨ 현장 로울러 다짐)에 의한 것으로 판단되며, 유리섬유 그리드 보강 공시체의 경우 대체적으로 휠트래킹의 시험결과가 좋지 않게 나왔는데, 이는 보강재료의 영향보다는 공시체가 제작된 기층 부분의 다짐이 부분적으로 적게 되어 결과적으로 기층재료의 불량에 기인된 결과로 판단된다(표 3 참조).

하중횟수에 따른 중앙점의 소성변형량을 그림 7에 나타내었다. 모형 A의 AP-5를 기준으로 볼 때, 최종 소성변형량은 비보강과 유리섬유 그리드 보강 공시체가 4mm 정도로 유사하게 나타났으며, 유리섬유 시트 보강 공시체가 3mm 정도로 나타났다. SBS를 사용한 경우에도 이러한 유리섬유 시트 사용에 따른 소성변형저항성의 증가 경향은 유사하였으며, 소성변형의 발생량은 AP-5의 경우보다 약 50% 정도 적게 나타났다. 모형 A의 SBS 개질 아스팔트와 유리섬유 시트를 사용한 경우, 발생된 최종 소성변형량은 약 1mm로 본 연구를 통하여 시험된 공시체 중 가장 적은 소성변형량을 기록하였다.

SBS 개질 아스팔트의 사용은 시험된 대부분의 단

면에서 아스팔트 표층에서의 소성변형을 50% 정도 감소시키며, 이러한 경향은 토목섬유 보강재를 사용한 경우에도 일관되게 나타났다. 이러한 경향은 유리섬유 그리드의 모형 B에 나타난 경우처럼 다소의 예외는 있었지만, 이는 앞서 밝힌 바와 같이 기층의 다짐부족에 따른 시험오차로 판단된다.

시험된 휠트래킹 공시체의 보강면에서의 소성변형 정도를 파악하기 위하여, 휠트래킹 시험종료 후, 공시체를 바퀴 하중이 가해진 방향으로 절단하여, 경계면의 소성변형량을 측정하였으며, 최대골재치수 37.5mm의 기층(BB-1)에서는 표층이 너무 얇은 경우(모형 C)를 제외하고는 소성변형이 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 비보강 공시체의 경우에도 동일하게 나타났는데, 이는 1단계 시험 결과인 비보강인 경우 상부에서 발생하는 소성변형의 약 50% 정도가 기층에서 발생한다는 내용과 상충되는 부분으로, 1단계 시험에 사용된 기층골재의 최대치수가 25mm (BB-2)이었던 반면, 2단계 시험에서는 37.5mm(BB-1)의 골재를 사용한 것과 다짐방법의 차이로 기인된 것으로 판단된다. 즉 1단계 시험보다 큰 입径의 골재를 사용함으로 말미암아, 기층의 소성변형 저항성이 높아진 것으로 판단된다. 또한, 모형 A(표층 5cm + 기층 10cm)의 경우 유리섬유시트를 보강함으로써 비보강에 비교해 볼때 표층의 소성변형량을 억제하는데 다소의 효과(30%)가 있으며,

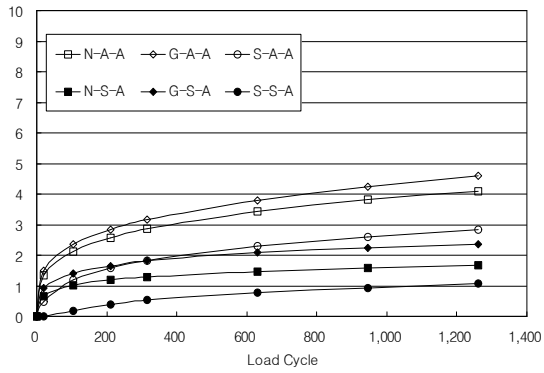
표 3. 휠트래킹 2단계 시험 결과

(a) AP-5 아스팔트

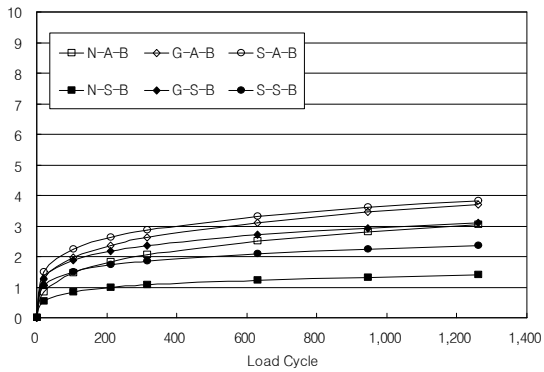
구 분	N-A-A	G-A-A	S-A-A	N-A-B	G-A-B	S-A-B	N-A-C	G-A-C	S-A-C
D <sub>0</sub> (mm)	2.98	3.15	1.89	2.09	2.69	3.00	4.01	3.34	3.70
최종 소성변형량 (mm)	4.10	4.59	2.85	3.05	3.71	3.84	5.21	5.02	6.20
DS (T./mm)	2,250.0	1,784.5	2,643.4	2,744.1	2,471.6	3,000.0	2,160.0	1,500.0	1,013.3
RD (mm/min)	0.0187	0.0240	0.0160	0.0160	0.0170	0.0140	0.0200	0.0280	0.0417

(b) SBS 개질 아스팔트

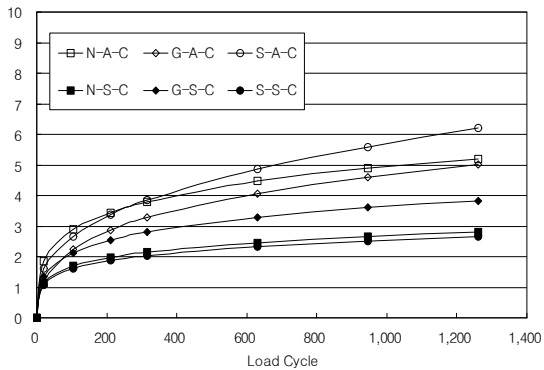
구 분	N-S-A	G-S-A	S-S-A	N-S-B	G-S-B	S-S-B	N-S-C	G-S-C	S-S-C
D <sub>0</sub> (mm)	1.33	1.87	0.52	1.10	2.45	1.87	2.22	2.92	2.19
최종 소성변형량 (mm)	1.69	2.37	1.08	1.40	3.11	2.37	2.80	3.84	2.83
DS (T./mm)	7,087.5	5,048.1	4,500.0	8,750.0	3,850.0	5,048.1	4,350.0	2,760.0	3,937.5
RD (mm/min)	0.0060	0.0084	0.0093	0.0050	0.0110	0.0084	0.0097	0.0154	0.0107



(a) 모형 A



(b) 모형 B

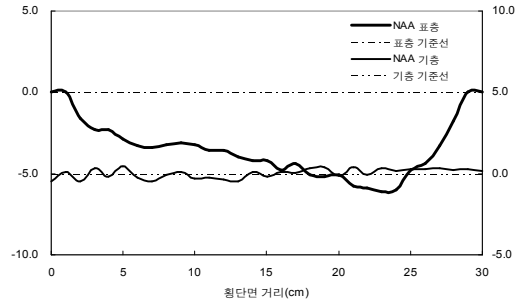


(c) 모형 C

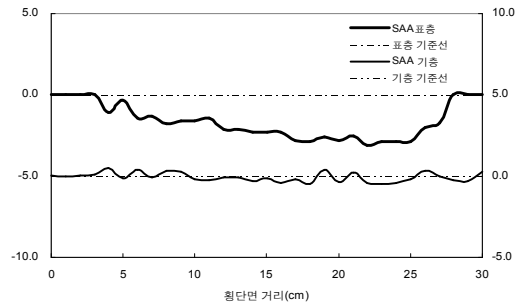
그림 7. 표층의 소성변형 발생량 (2단계 시험)

SBS 개질 아스팔트의 사용은 아스팔트 표층에서의 소성변형량을 50% 정도 감소시키며 이러한 경향은 유리섬유시트를 사용한 경우에도 일관되게 나타났다(그림 8 참조).

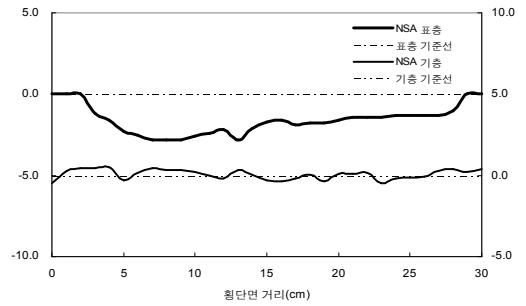
이렇게 관찰된 공시체의 소성변형상태를 기초로 하여, 토목섬유 시트의 소성변형 억제 메커니즘은 다음과 같이 설명될 수 있을 것이다. 즉, 본 연구에서 휠트래킹 시험의 바퀴하중을 통해 유도된 응력에 의하여



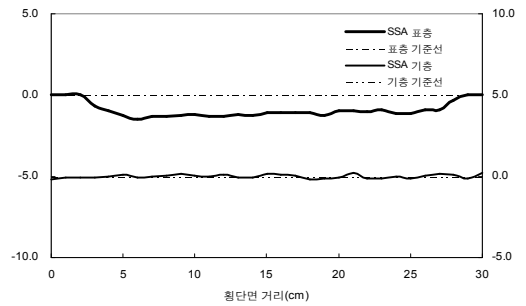
(a) N-A-A



(b) S-A-A



(c) N-S-A



(d) S-S-A

그림 8. 표층, 기층의 소성변형 contour(2단계 시험)

표층 하단부의 혼합물이 횡방향으로 이동하며 경계면에 인장변형을 유발시키는 메커니즘을 갖는 것으로 판단된다.

따라서 비보강 공시체의 경우, 바퀴하중을 통해

유도된 응력에 의하여 표층 하단부의 혼합물이 횡방향으로 이동하고, 표층과 기층 경계면에서 표층 하부로부터의 인장변형이 그대로 기층 상단부의 골재에 유도되어, 저항성이 충분하지 않은 아스팔트 혼합물이 변형되는 것으로 보여진다.

반면, 토목섬유로 보강한 공시체의 경우, 바퀴하중을 통해 유도된 응력에 의하여 표층 하단부의 혼합물이 횡방향으로 이동하며 표층과 기층의 경계면에서 인장응력이 발생하지만, 발생한 인장응력이 경계면의 토목섬유에 의해 차단되어 경계면 하단부, 즉 기층이하로 전달되지 않는 것으로 보여진다. 즉 토목섬유 층은 표층에서의 인장에 의한 골재의 횡방향 이동이 기층 상부에 전달되는 것을 차단함으로써, 기층 상부의 골재는 표층 하단부의 골재가 횡방향으로 이동하는 것과 상관없이 원 상태를 유지하는 것으로 추정된다. 이러한 개념에 의하여, 표층과 기층사이에 설치된 토목섬유가 아스팔트 혼합물의 압밀현상에 따른 소성변형이나 표층 혼합물의 전단변형 및 횡방향 이동현상을 막아주지는 못하지만, 전단변형 및 횡방향 이동현상에 따라 기층에서 발생하는 소성변형을 방지하는데 큰 도움을 줄 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 포장체의 단면조건, 골재크기 변화 및 토목섬유 보강재와 아스팔트의 종류에 따른 토목섬유 보강 아스팔트 포장 시스템의 소성변형 거동특성을 휠트래킹 시험을 통해 고찰하였으며, 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 유리섬유 그리드 및 유리섬유 시트는 아스팔트 포장의 소성변형 거동에 큰 영향을 미쳐, 최대골재 크기 25mm 기층에서 발생하는 소성변형의 대부

분을 막아준다.

2. 아스팔트 포장의 보강재료로서 토목섬유의 사용은 사용조건에 따라 소성변형 저항성의 증대로 연결될 수 있으며, 이에 따라 포장층 두께의 감소효과로 인한 비용절감 효과를 기대할 수 있을 것이다.
3. 최대골재치수 37.5mm의 기층(BB-1)에서는 표층이 너무 얇은 경우(모형 C; 표층 3cm)를 제외하고는 소성변형이 거의 발생하지 않았으며, 이는 다짐방법의 차이와 골재크기의 차이로 인한 것으로 판단된다.
4. 유리섬유시트의 보강은 모형 A(표층 5cm + 기층 10cm)에서 소성변형을 억제하는데 다소의 효과(약 30%)가 있으며, SBS 개질 아스팔트의 사용은 시험된 대부분의 단면에서 아스팔트 표층에서의 소성변형을 50% 정도 감소시키는 것으로 나타났다.

#### 참 고 문 헌

1. 아스팔트포장연구회 (1998), 가열 아스팔트 혼합물의 배합설계지침, 190 pp.
2. 한국도로공사 (1999), 포장균열 및 노면반사균열 억제 방안 연구(III), 1999년도 연구보고서, 216 pp
3. 한국건설기술연구원(2000), 토목섬유를 이용한 아스팔트 포장 내구성 증진연구(I), 1차년도 연차보고서, 156 pp.
4. 한국건설기술연구원(2001), 토목섬유를 이용한 아스팔트 포장 내구성 증진연구(II), 2차년도 연차보고서, 201 pp.
5. 한국건설기술연구원(2002), 토목섬유를 이용한 아스팔트 포장 내구성 증진연구(III), 3차년도 연차보고서, 160 pp.
6. Koerner, R.M. (1992), Polymeric Geogrid Utilization in Paved Roads, FHWA PB 92-189513, Final Report, 56 pp.
7. Kutuk, B. (1998), Performance of Flexible Pavements Reinforced with Geogrids, Dissertation Faculty of Civil and Environmental Engineering, West Virginia University, 302 pp.