

아스팔트 도로포장에 사용되는 토목섬유의 이해



이 석 준 | 공학박사, Saint Gobain Adfors 기술영업이사

1. 머리말

아스팔트 포장에서 토목섬유는 도로 수명을 경제적으로 연장하려는 목적으로 전세계 도로현장에서 사용되고 있다. 도로를 신설하거나 혹은 보수 시에 아스팔트 표층의 중간층 밑면, 또는 마모층(wearing course)과 중간층(binder course) 사이에 설치되는 토목용 섬유체를 포괄적으로 일컫는다. 이러한 토목 섬유는 균열의 전이를 억제하고, 아스팔트층에 가해진 응력을 분산하고 흡수하도록 개발되었다. 이 중에서 토목섬유 보강재는 아스팔트 표층의 두께를 줄이고, 기능성 소재와 새로운 복합재로 계속 개발되고 있으며, 도로 포장의 역학적, 경험적 설계법(empirical-mechanistic design) 개발과 보조를 같이 하고 있다 (NCHRP 669).

본 고는 유리섬유 보강재 그리드의 디자인과 성능을 예로 들어 아스팔트 토목섬유의 특성을 살펴 보고자 한다.

2. 아스팔트 토목섬유의 이론과 종류

2.1 토목섬유 성능의 효율성

일반적으로 도로는 다층 구조를 이루어서, 전단변형력(shear stress)과 압축응력(compressive stress)이 도로의 깊이를 따라 거동을 달리한다. 그림 1의 개요도에서 보여지는 것처럼, 통상 아스팔트 마모층(wearing course)은 압축응력이, 중간층(Binder course)은 전단응력이 지배적인 영향을 미친다. 그

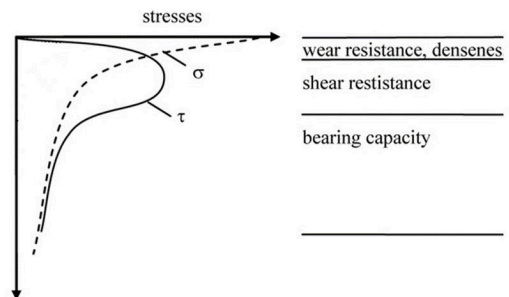
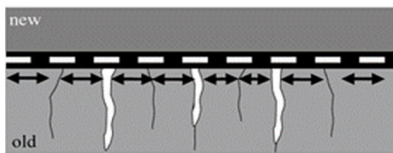


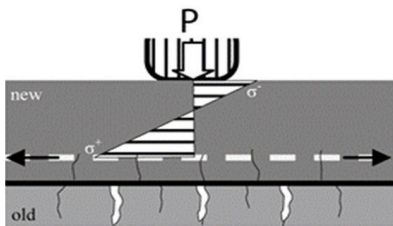
그림 1. 다층 도로구조의 응력 개요도

러므로 토목섬유의 설치 위치를 결정할 때에, 지배적인 응력을 차분하중, 온도변화 등의 도로환경과 함께 고려하는 것이 필요하다.

그림 2에서 Lindenmann 외(2010) 저자들은 아스팔트층 토목섬유의 역학적 효용성을 (1) 크리프(creep)와 (2) 보강(reinforcement)으로 설명하였다. 외부에서 가해진 응력이 토목섬유에 다르면 토목섬유가 점성적 변형(viscous deformation)을 일으켜서, 응력을 감소시키는 crack bridge 효과를 나타낸다(그림 2A). 이와 달리 전단응력(균열)이 보강재에 영향을 미치면 보강재를 따라서 수평방향(horizontal movement)으로 응력을 분산하고, 보강재는 인장되어 응력이 흡수되고, 균열의 전이가 지연된다(그림 2B).



(A) 응력의 수평적 흡수와 분산



(B) 응력의 보강재 인장 전이

그림 2. 토목섬유의 역학적 효용성(Lindemann 외(2010))

그림 2B에서 보여지는 보강재 그리드의 역할은 상온 또는 저온에서의 파괴역학뿐 아니라, 고온(40℃)의 소성변형 시험에서 유리섬유 그리드로 보강된 아스팔트층이 약 25% 소성이 적게 일어나는 것을 발견하였다. 고온에서 아스팔트층의 강성이 낮아져서, 시험기의 하중이 보강재에 보다 직접적으로 작용하게 되어, 그림 2B에서 묘사된 것처럼, 외부 응력으로 인장된 보강재의 형태가 그림 3 아래 사진에서 찾아볼 수 있다.

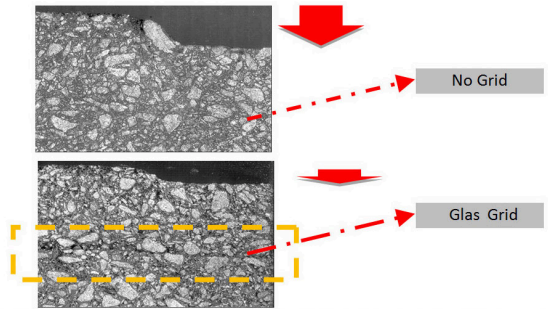
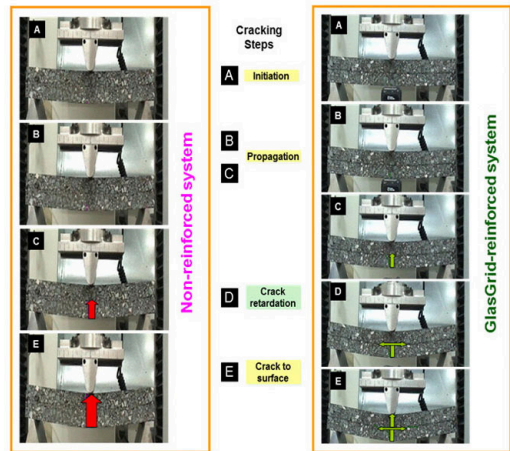
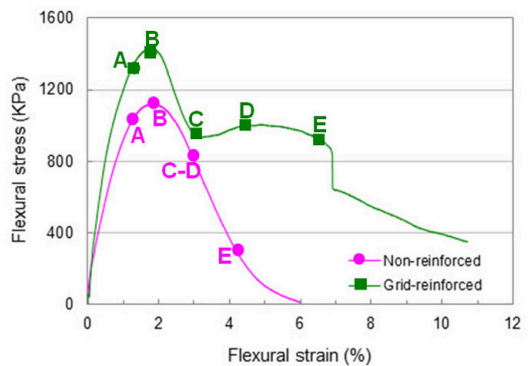


그림 3. 고온(40℃)에서 소성변형 시험(Kim and Lee, 2006)

유리섬유 보강재가 균열의 전이를 지연하는 메커니즘을 이해하기 위하여 아스팔트혼합물 시편의 휨강도를 측정하였고, 휨응력과 변형도를 분석하여 함께 살펴보았다(그림 4).



(A) 강화재 유무에 따른 균열전이 메커니즘



(B) 휨응력- 변형도 곡선

그림 4. 휨강도 측정(Lee, 2008)

균열이 발생한 이후에 유리섬유 보강재의 인장강도의 역할로 균열의 전이가 지연되었다. 일반 시편(그림 4A)의 거동과 달리, 보강재 시편(그림 4B, Grid-reinforced)의 C-E구간(약 3% 인장)에서, 시편의 휨강도는 줄어들지 않고 유지되어 보다 많은 소멸에너지(dissipated energy)가 발생하였다. 이것은 보강된 아스팔트층이 균열에 대항하는 물리적인 저항성(toughness)이 증가된 것으로 해석된다.

2.2 아스팔트 토목섬유의 종류

• 보강재 그리드

고강도, 저연신의 섬유를 이용하여 12 또는 25mm 간격의 격자형태로 직조된다. 이러한 디자인은 그리드를 덮는 아스팔트 혼합물의 자갈들이 서로 연결되고 맞물리도록 하기 위함이다. 아크릴계 폴리머나 개질제 아스팔트 바인더로 직조된 그리드 원사를 함침하여 코팅하면 그리드는 탄성력과 내구성을 얻는다. 또한 압착식 수지접착제로 밑면을 처리할 때 시공을 보다 용이하게 할 수 있다.

표 1. 토목섬유 종류의 비교표

	사 진	기계적 성능	물리적 성능
보강재 그리드		응력 흡수 인장 분산	고강도 저연신
부직포 매트		점성적 완충	점성도 고연신
컴포지트 그리드		응력흡수/ 분산점성 완충	고강도 저연신

• 부직포 매트

부직포 매트는 유리섬유나 폴리에스터를 기본 재료로 하여 복합체를 이룬다. 아스팔트 바인더를 흡착하여 점착되며 아스팔트 덧씌우기나 칩셀(chip seal)에 시공되고 있다. 바인더의 흡착량은 부직포 매트의 구조적 물성과 도로 표면의 조건에 따라 그 양을 유동적으로 결정하여 적용한다.

• 컴포지트 그리드

부직포 매트와 보강재 그리드가 적층된 복합체로 도로나 교량 포장의 보수 시, 절삭면에 직접 시공된다. 고무계 개질제 아스팔트 바인더와 함께 사용하여 보강재와 부직포 매트의 장점을 강화하고 단점을 보완한다. 부직포 매트 대신에 아스팔트 시트를 사용하여 교면포장에서 방수 보강재로 쓰이고, 택필름(tack film)같은 플라스틱 신소재가 사용되기도 한다(특허10-1203935-0000, 2012).

3. 아스팔트 토목섬유 적용 시 고려할 인자들과 접착성능 평가법

3.1 고려할 인자들

• 코팅제

그림 5는 함침된 코팅제가 각각의 필라멘트 표면을 감싸서, 그리드의 인장강도를 약 15%까지 증가시키고, 아스팔트 혼합물 자갈에 의한 손상을 최소화하는 역할을 한다. 특히 고온에서 코팅제의 점탄성도는 그

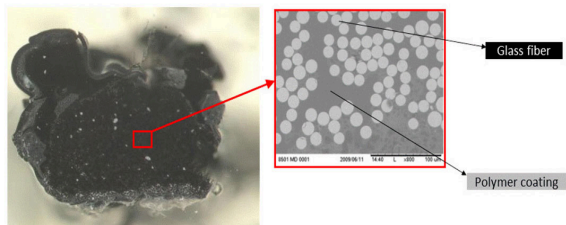


그림 5. 폴리머 코팅이 함침된 보강재 그리드 단면 사진

리드의 접착안정도(Interlayer Bond Stability)와 밀접한 관련이 있다.

Al-Qadi 외(2008) 저자들도 표층의 접착력(Interlayer Bond)이 덧씌우기 공용성을 좌우하는 주요인자로 설명하고 있다. 보강재가 아스팔트 표층에 접착이 강할수록 균열의 전이속도는 현저히 늦어지고(그림 4B의 C-E 구간) 덧씌우기층의 생애주기는 뚜렷이 늘어난다. 그러므로 섬유 보강재의 코팅은 도로포장 재료와 적용온도 같은 외부환경과 함께 적정한지를 평가해야 한다. 올바른 토목섬유 제품을 선택하기 위해서 반드시 코팅제의 품질과 성능을 확인할 필요가 있다.

• 인장강도와 파단신률

보강재 인장강도로 아스팔트 표층은 탄성력을 갖고, 하중(normal shear stress)에 의한 변형에 저항력이 강화된다. 통상 토목섬유는 선형 인장강도와 연신율로 물리적 성질을 규정한다. 하지만 아스팔트 콘크리트의 균열(macro cracks)이 상온에서 2.0% 전후인 점을 고려할 때, 특히 보강재 그리드의 인장강도와 파단에서의 연신율(파단신율)은 도로 구조물의 공용성과 직접 관련된다. 그림 2B에서 보여지는 것처럼 외부응력이 보강재 그리드로 흡수 및 분산되면서 보강재는 인장하게 된다. 하지만, 인장강도 한계 조건(boundary condition)을 수치적 해석으로 규정하기는 어렵다. 현재는, 실제 시공의 경험과 공용성 조사를 바탕으로 교통량과 차륜의 하중 그리고 주변 도로의 균열패턴을 분석하여 경험적으로 제시하고 있는 실정이다.

• 작업성

토목섬유의 작업성은 성공적인 시공과 결부되어 있다. 결국은 아스팔트 덧씌우기의 공용성과 직결된다. 하지만 다양한 작업환경 때문에 시공품질관리는 아직도 개선될 여지가 많이 남아 있다. 대부분의 토목섬유는 텍코팅 유제와 함께 시공되어서, 도로 표면의 청소상태(물기와 먼지), 유제의 양과 종류, 그리

고 분사 후 건조상태는 간과하기 쉬운 매우 중요한 확인요소들이다. 토목섬유 설치를 마치고, 덧씌우기 하는 과정에서 공사차량의 바퀴에 붙어서 토목섬유가 감겨 올라가는 pickup 현상을 경험하기도 한다. 이는 토목섬유의 불충분한 부착력이나 과도한 유제 살포에 기인하며, 이를 사전에 막기 위하여 토목섬유 설치 직후에 그림 6과 같이 부착강도를 현장에서 측정할 필요가 있다. 수지접착제가 밀면에 처리된 보강재 그리드의 경우에는 그리드를 포설하고 압축롤러로 접착제를 활성화시켜서 10kg 이상의 부착력이 확인되면 pickup 현상을 사전에 예방할 수 있다.



그림 6. 보강재 그리드 부착강도 현장 측정

3.2 접착성능 평가법

미국과 유럽에서는 도로현장에서 채취하거나 실험실에서 제작된 아스팔트 덧씌우기 시편의 접착강도를 평가하기 위하여 여러 시험법을 개발하였다. 아스팔트용 토목섬유를 오래 전부터 사용해 온 국가들은 개발된 시험법을 이용하여 덧씌우기에 사용된 토목섬유의 접착강도를 측정하는 설계기준을 마련하였다.

• Overlay Test

미국 텍사스 도로국에서 적용하기 시작한 시험법(그림 7)으로 반사균열이나 피로균열에 시험체가 저항하는 공용성을 평가하는 것이다. 반복적인 직접 인장변위(direct tension displacement)를 수평방향으로 시편에 가하여서 반응하는 강도를 측정한다.

이 때 파괴에 이르는 피로반복횟수(number of cycles to failure)를 평가한다. 이 시험법은 균열의 발생을 유도하고 균열의 진행방향을 직접 확인할 수 있는 장점이 있다. 하지만 미세한 변위의 조절과 적용이 어려운 한계가 있다. 현재 이 시험법은 ASTM International Standard로 제안되어 있다(ASTM WK26816).



그림 7. Overlay 시험기

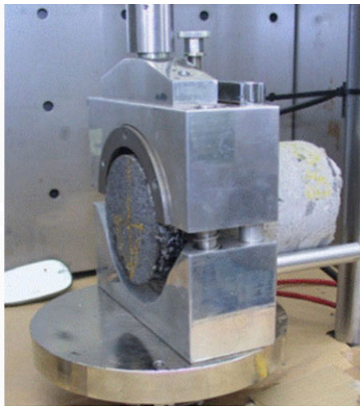


그림 8. Leutner 전단력 시험기

• Leutner Shear Test

1970년대에 독일에서 소개된 이후에 개량된 최근 Leutner 전단력 시험(그림 8)은 두 아스팔트층 사이의 전단부착력을 측정하기 위하여 개발되었다. 현재 유럽연합의 여러 나라에서 이 시험방법을 표준화해서, 직경150mm의 원형 시편을 기준으로 하여 최소 15kN 이상의 전단력을 요구하고 있다(MCHW). 시험은 분당 50mm의 일정 변위를 적용해 최대 전단력을 측정하게 된다.

4. 맺음말

아스팔트포장 토목섬유는 아스팔트 덧씌우기의 수명을 연장하고 생애주기비용을 줄이고자 개발되어왔다.



그림 9. 그리드 보강재의 현장 성능 평가 예

그림 9에서 보이는 보강재 그리드 공용성의 예처럼 토목섬유의 물성과 환경요인을 올바르게 이해하여 적절한 토목섬유를 선택하고, 시공의 품질관리를 엄격하게 적용하여 설치할 때에 충분히 기대하는 도로의 공용성을 얻을 수 있다. 이로 인해, 도로 보수 주기는 늘어나서 도로 유지보수에 드는 비용을 절감하여 높은 경제성을 얻게 된다.

최근 화석연료의 사용과 휘발성 유기화합물(volatile organic compound)의 방출을 줄이려는 국제사회의 요구는 재생 및 상온 아스팔트 혼합물의 사용을 증가시키고 있다. 이러한 시장변화와 요구에 부응하여 아스팔트 토목섬유의 물성을 개질하려는 노력이 진행되고 있다. 한 걸음 더 나아가, 보강재 도로포장이 역학적 경험적 설계법에 포함될 때에, 보강된 박층 아스팔트 포장(reinforced thin asphalt pavement)이 보편화될 수 있을 것이다.

참고 문헌

1. Models for Predicting Reflection Cracking of Hot-Mix Asphalt Overlays, NCHRP Report 669, Transportation Research Board, 2010
2. Lindenmann, H. P., M. Martl, C. Raab, D. Jacobs und F. Schiffmann, Einsatz von Asphaltbewehrungen(Asphalteinlagen) im Erhaltungsmanagement, Schweizerischer

Verband der Strassen- und Verkehrsfachleuten, VSS, 2010

3. Kim, Y.R., Lee, J., Evaluation of Geosynthetics and GlasGrid for Rutting Prevention in Asphalt Pavement, Final Report, February 2006
4. Lee, S. Joon, Mechanical Performance and Crack Retardation Study of a Fiberglass-grid-reinforced Asphalt Concrete System, Can. J. Civ. Eng. 35: 1042-1049, 2008
5. Composite with Tack Film for Asphalt Paving, Method of Paving, and Process for Making a Composite with Tack Film for Asphalt paving, Patent 10-1203935-0000 (2012)
6. Al-Qadi, I.L., Carpenter, S.H., Leng, Z., Ozar, H., Tack Coat Optimization for HMA Overlays, Illinois Center for Transportation, September 2008
7. New Test Method for Determining the Susceptibility of Bituminous Mixtures to Reflective Cracking using the Overlay Tester, ASTM WK26816
8. Manual of Contract Documents for Highway Works (MCHW Volume 1), Clause 954, p46, 2008

학회지 원고접수 안내

학회지 편집위원회에서는 다음과 같은 내용으로 여러분을 초대하고자 합니다. 언제든지 참여하시어 알찬 학회지를 만듭시다. 여러분의 원고를 기다리겠습니다. (연락처 : 학회사무국 또는 편집위원)

컬 럼	내용 및 형식	비 고
권두언/축사/제언/격려사	시사성 있는 내용으로 A4 2쪽이내 분량으로 작성	편집위원회 주관
특집	회원들에게 도로포장내용과 최신동향소개 : 특집편집위원회 주관하여 연재	게재원고료 지급 심의 후 게재
기술기사	도로 및 도로포장과 관련된 기술보고서로서 A4 10쪽 이내 분량으로 작성 : 사례연구, 공사지, 성공 및 실패사례, 지역별 도로특성, 국내 산학연 합동 연구, 국내외 관련연구소 소개 등	게재원고료 지급 심의후 게재
기술위원회 세미나 주요내용	기술위원회 세미나 내용을 자세히 요약하여 그 내용을 회원들에게 알리는 컬럼	기술위원회 제공
해외기술동향	도로 및 도로포장관련 해외의 최신 연구내용 및 결과로 A4 4쪽 이내	
국내의 학술회의	도로 및 도로포장과 관련된 학술 및 기술강좌, 세미나 등의 내용 소개	E-mail 이용 가능
문화산책(교양)	교양과 관련된 내용으로 A4 4쪽 이내 : 수필, 취미생활(등산, 낚시 등), 독후감 및 의견제시 등 자유내용	심의후 게재
국내의 신간도서 소개	최근 발간된 도로 및 도로포장 도서 내용소개 및 총평과 국내 회귀 입수 서적 소개	E-mail 이용 가능
학교 및 업체연구소 소개	도로 및 도로포장관련 학교 연구실 및 업체 연구소의 A4 2쪽 내외의 소개	게재분량 엄수
학회소식	정기총회 및 학술발표회 소식, 이사회 회의록, 기술위원회 활동소식 등	학회 사무국 제공
Q/A	도로 및 도로포장 관련 문제에 대한 질문과 답변	E-mail 이용 가능
회원동정	주소변경, 직장변경, 경조사, 회원가입, 박사 및 석사학위 취득자 등	E-mail 이용 가능

* 집필자는 필히 본인 및 공동집필자 사진을 첨부하십시오.

E-mail : ksre1999@hanmail.net