

철도용 재료의 환경평가와 궤도에서 新재료의 적용



ㅣ 서 사 범 ㅣ
(주)서현기술단 부사장
공학박사/철도기술사

I. 머리말

수송기관은 현대사회 활동의 기반 시스템이며, 고속화나 쾌적성 등의 수송기능, 안전성, 경제성이 요구되어 왔다. 근년에는 이에 더하여 지구환경 문제의 관점에서 에너지절약이나 자원절약의 중요성이 증가되어 왔다. 지구온난화의 원인인 이산화탄소 등의 배출에서는 수송 분야가 나라전체의 약 2 할 정도를 점하고 있다. 또한, 자원소비의 관점에서도 주요 소재의 상당한 양이 수송 분야에 투입되고 있다. 이러한 관점에서 지구온난화로 대표되는 심각한 지구환경 문제에 대하여 수송 분야에서의 대응이 요구되고 있다. 이를 위해서는 수송에 따른 환경부하를 정량적으로 삭감하는 것이 중요하다. 그것을 정량화하는 방법의 하나로써 생애주기평가(LCA)가 있다.

철도 분야의 궤도재료에서도 지구온난화에 대응하는 한편, 고기능화, 저비용화, 보수생력화, 자원리사이클 등의 과제가 있다. 이와 관련하여 궤도에서는 현재 베이나이트(bainite) 레일과 비닐론섬유보강콘크리트의 적용도 검토되고 있다. 레일의 경우에, 레일 교환수명에는 그 원인의 하나로 쉘링(shelling)이라 부르는 손상이 있다. 이 손상을 방지하여 두면 레일절손에 이르는 경우가 있으므로 손상의 감시나 레일교환에 많은 노력과 비용이 투입되

고 있다. 콘크리트궤도의 구성부재인 콘크리트도상이나 궤도슬래브는 철근콘크리트제로서 콘크리트도상은 현장에서 시공되고, 궤도슬래브의 경우는 공장에서 제작된다. 이 경우에 철근의 가공·조립(배근)에는 노력과 시간이 걸린다. 또한, 해저터널 등에서는 철근이 부식하여 콘크리트에 균열이 발생되는 염해가 콘크리트도상이나 궤도슬래브에 생길 우려도 있다.

상기의 사항들과 관련하여 본고에서는 ① 철도용 재료에 대한 생애주기평가(LCA)의 목적과 평가결과 등의 표현 및 지오폐리머 콘크리트를 이용한 PC침목의 환경부하 저감에 관한 평가, ② 쉘링 손상의 발생을 억제하여 레일수명을 연신하기 위한 베이나이트(bainite) 레일의 개발과 부설시험의 사례 및 ③ 배근작업이 없고, 염해 등의 환경작용에 대하여 내구성이 있는 콘크리트도상이나 궤도슬래브를 개발하기 위하여 비닐론섬유로 보강한 콘크리트의 적용 등에 대하여 소개한다.

II. LCA를 이용한 철도용 재료의 환경평가

1. 개요

지구온난화로 대표되는 심각한 지구환경 문제에 대처하기 위하여 구체적으로 효과적인 행동이 기업

레벨과 개인레벨에서 요구되고 있다. 예를 들어, 수송사업자는 수송사업에 따른 환경부하를 저감시키고, 개인에게는 수송수단을 선택할 때에 환경부하를 고려하는 것이 필요하다. 어느 경우에도 단지 줄이려고 하는 결의를 나타내 보일 뿐만 아니라 수송에 따른 환경부하를 정량적으로 삭감하는 것이 중요하다. 그것을 정량화하는 방법의 하나로서 생애주기평가(Life Cycle Assessment, LCA)가 있다. 이 장에서는 철도에 사용되는 재료에 착안하여 LCA를 어떠한 목적으로 철도용 재료에 적용하는가, 평가효과는 어떻게 표현되는가에 대하여 해설한 다음에 코스트와 환경부하에 대하여 평가한 사례를 소개한다.

2. 지구환경 문제의 심각성

근년에는 이산화탄소(CO₂) 등의 배출에 따른 지구온난화로 대표되는 지구환경 문제가 심각하게 우려되고 있다. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 기후변동에 관한 정부간 패널)의 제4차 보고서(2007) 등에서는 지구의 평균기온 상승이 인위적 요인 때문이라는 점이 이제는 확실하다고 지적하고 있다. 또한, 사막화, 북극해 얼음량의 감소라고 하는 현상의 현재화나 이들에 따른 향후의 전염병이나 홍수의 증가에 대하여도 보고되고 있다. 근년에는 우리나라에서도 태풍 접근 수의 증가, 집중적인 호우의 증가가 보이고 있다. 이들은 현재의 경우에 지구온난화가 원인이라고까지는 단정되지 않고 있지만, 적어도 온난화의 진행이 이와 같은 현상에 기여한다고는 말할 수 있을 것이다.

이와 같은 점에서 지구온난화를 방지하기 위한 구체적이고 효과적인 행동이 기업레벨과 개인레벨에서 당장 요구되고 있다. 예를 들어 3R 활동, 즉 reduce(감량), reuse(재사용), recycle(재이용)이라고 하는 주로 3개의 고려방식에 따라 자원절약, 에너지절약을 추진한다고 하는 것은 누구라도 알고 있을 것이다. 수송부문에 관하여 생각하면, 수송사업자는 수송사업에 따른 환경부하를 어떻게 저감시키는가, 개인에게는 수송수단을 선택할 때에 환경부하를 고려하였는가, 등에 직접 관련될 것이다.

근년에는 기업 등의 조직에 사회적 책임(Corporate social responsibility, CSR)이라고 하는 사고방식이 보급되어 있다. 종래에는 기업의 책임이라고 하면 고객에 대한 것으로 제품, 서비스의 제공과 그 대가(對價)에 역점의 대부분을 두고 있었다. 그러나 현재는 고객에만 한하지 않는 모든 이해관

계자(stakeholder, 스테이크홀더)에 대한 대응이 요구되고 있다. 구체적으로 말하면, CSR란 모든 이해관계자에 대하여 경제(경영)적 측면, 사회적 측면, 환경적 측면 등, 다양한 측면에서 대응한다고 하는 것으로 된다. 게다가 수송사업자에게는 여기에 안전적 측면이 더해질 것이다. 또한, 이들에 대하여 이해관계자에게 오해가 없게 이들의 내용이나 사정을 전하기 위해서는 정량화된 정보를 갖는 것이 바람직하다.

이와 같은 점에서 수송서비스 환경부하의 정량화는 향후에 점점 증가되어 갈 것이다. 그 정량화 방법의 하나로서 생애주기평가(LCA)가 있다.

3. 인벤토리와 원단위

환경문제가 복잡하다고 하는 이유의 하나로서 환경부하에는 다양한 것이 존재하고 있다. 일례로서 그림 1에 독일의 산업기술종합연구소 라이프사이클 엑세스먼트 연구센터가 발표한 피해산정형 생애주기(라이프사이클) 환경영향평가방법(LIME2)의 고려방법을 나타낸다. 이 그림에는 환경부하 물질 등{이 그림의 인벤토리(inventory)}과 그에 따른 환경영향{이 그림의 영향영역과 카테고리 엔드 포인트(Kategorie endpoint)}이 나타내어져 있다.

‘인벤토리(환경부하 항목)’로서는 CO₂, SO_x, NO_x나 PM(입자모양 물질), 소음 등의 19 항목이 열거되어 있다. 그들로 인하여 야기되는 ‘영향영역’으로서 지구온난화를 비롯하여 오존층 파괴, 유해화학물질이나 화석연료 소비 등 15 항목이 열거되어 있다. 다음의 ‘카테고리 엔드 포인트’에는 예를 들어 지구온난화에 따라 영향을 받는 감염증, 재해피해, 농작물 등 18 항목이 있다. 다음의 ‘보호대상’은 인간건강, 생물다양성 등 4 항목을 열거하고, 최종적으로는 그들에 가중치를 주어 단일지표로 ‘통합화’되어 있다. 각 스텝 간, 예를 들어 CO₂와 지구온난화의 관계는 지구온난화계수로 정량화하고 있다. 현재는 지구온난화 문제가 큰 화제로 되어 있어 당면은 이 해소에 중점이 주어지고 있다. 그러나 중장기적으로 보면 우리들은 이들의 어떠한 환경영향에 대하여도 지속적으로 주의를 기울여야 할 것이다.

그런데, 이들의 환경부하 물질 등은 대부분의 경우에 재료와 에너지의 소비에 따라 발생된다. 재료의 경우에 그 제조 시에 에너지를 소비하기 때문에 제조자 측에서 환경부하 물질이 발생된다. 재료를 제조할 때에 단위량(1 kg 등) 당 발생하는 환경부하 물질의 양을 제조 시 배출 원단위(原單位)

LIME2(Life cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling)



그림 1. LIME2에서 환경부하 종합화의 흐름

라고 부른다.

표 1에 제조 시 배출 원단위의 예를 나타낸다. 다만, 이들의 값은 복수의 단체에 따라 다른 값이 제안되고 있어 실제의 사용 시에는 신중한 검토가 필요하다.

일반적으로 반응성이 큰 물질은 제조하는 데에 보다 많은 에너지를 소비한다. 예를 들어, 알루미늄은 광석에서 금속으로 만들 때의 에너지가 철에 비하여 크게 된다. 같은 기능

표 1. 제조 시 배출 원단위의 예

항목 명	제조 시 배출 원단위(kg-inventory/kg)		
	CO ₂	NO _x	SO _x
냉연강판의 제조	1.43	1.49×10 ⁻³	9.07×10 ⁻⁴
알루미늄 판 대형 형재	10.16	3.12×10 ⁻²	7.72×10 ⁻³
폴리염화 비닐	2.75	1.59×10 ⁻³	2.04×10 ⁻³
나일론6	3.91	1.89×10 ⁻³	2.61×10 ⁻³
에폭시 수지	5.30	2.44×10 ⁻³	3.14×10 ⁻³
천연고무	0.203	2.71×10 ⁻⁴	3.80×10 ⁻⁴
유리	1.18	6.35×10 ⁻⁴	1.20×10 ⁻³
포틀랜드 시멘트	0.746	1.51×10 ⁻³	6.30×10 ⁻⁵

을 같은 중량으로 달성하려면 원단위가 작은 재료의 쪽이 환경부하가 적게 된다. 그러나 실제로는 그렇지 않으며, 각 재료에는 각각 사용하기 위한 기능, 이점이 있다. 예를 들어, 알루미늄은 철보다도 비중이 작아 사용방법에 따라서는 경량화의 가능성이 있다. 또한, 리사이클하기 쉬움도 고려할 필요가 있다. 제조 시 배출 원단위가 커도 리사이클을 하면 최종적인 배출량은 줄어든다. 더욱이, 첨단재료라고 부르는 재료를 이용함으로써 전체적인 재료 사용량, 에너지 사용량을 감소시키는 것이라면 통상은 그 쪽이 좋을 것이다.

4. 라이프사이클 평가의 중요성

이상의 점에서 재료에는 다양한 특성이 있다. 한 재료의 한 장점을 뽑았다고 하여도 전체로서 무엇이 좋게 되어 있는가를 알기 어려운 것이 있다. 그러므로 환경부하를 평가하기 위해서는 원재료의 채취로부터 운반, 소재의 제조, 부품의 조립, 제품의 제조, 및 제품의 사용이나 서비스의 제공, 최후의 폐기, 리사이클이라고 하는 라이프 스테이지(stage;

라이프사이클의 각 단계)에서 얼마만큼의 자원·에너지를 투입하고 폐기물·배출물질을 내고 있는가를 집계하는 것이 필요하다. 이것이 생애주기평가(LCA)이다. LCA를 이용함으로써 어떤 라이프 스테이지에서 배출 물질량이 많은가를 특정하여 향후의 제품개발, 또는 메인テナンス 등으로 대책을 강구하기가 쉽게 된다. 철도에 한하지 않는 산업을 지속적으로 운영하기 위해서는 코스트를 비롯한 경영적인 관점에서의 검토가 당연히 요구된다. 각 사업자의 경영사정을 배려하면서 가능한 한 환경부하를 삭감하여 가는 것이, 즉 경제와 환경의 양립을 의식하는 것이 바람직할 것이다.

5. 희소금속(rare metal)의 고려

배출물질이란 화제가 약간 바뀌지만, 향후에 재료에 대하여 더욱 주의를 기울여야 하는 것으로서 희소금속(rare metal)의 문제가 있다. 희소금속(rare metal)에는 몇 가지의 정의가 있지만, 협의의 의미로서는 철, 강, 아연, 알루미늄 등의 비(卑)금속(base metal)이나 금, 은 등의 귀금속 이외에 산업에 이용되고 있는 비(非)철금속 31종을 가리킨다. 희소금속은 단체(單體)이며 대량으로 사용하는 것이 아니라 오로지 합금, 첨가제에 미량 함유되거나 화학합성용 매체로서 사용된다. 이 때문에 제품 중에 어떠한 것이 사용되고 있는지가 눈에 띄지 않는 것이 대부분이다. 그러나 그 제품을 대량으로 사용하면 당연히 희소금속의 사용량도 비례하여 증가되어 왔다. 또한, 생산이 따라잡지 못하거나, 채굴할 수 있는 양이 줄어들면 먼저 가격의 급격한 상승으로 이어지거나, 게다가 사용이 곤란하게 되는 점도 생각할 수 있다. 따라서 중장기적인 관점에서 희소금속이 사용되고 있는 재료, 제품에 대하여는 어떻게 이들을 지속하여 가느냐에 주의를 기울일 필요가 있다.

6. 재료변경에 대한 LCA의 예

어떤 제품에 새로운 재료를 도입하려고 하는 것은 그 재료를 사용함으로써 지금까지와 비교하여 무엇인가를 좋게 한다고 하는 목적과 이유가 있다. 예를 들어, 비용의 삭감, 편리성의 증가, 환경부하의 삭감 등이 열거된다. 이들의 좋은 점을 평가할 때는 단지 좋다고 하는 것만 아니라 상기에 서 기술한 것처럼 제조, 사용, 메인テナンス, 처분 등이라고 하는 라이프사이클에서 이전보다 향상되고 있는가를 파악하는 것이 중요하다. 환경부하에 대하여는 실현가능한 범

표 2. PC침목용 각 콘크리트의 성분 (1 m³ 당)

원료	PC침목용 보통 콘크리트	지오폴리머 콘크리트	사용한 CO ₂ 원단위 (kg-CO ₂ /kg)
조강 시멘트	475 kg	-	0.7455
석탄회	-	545 kg	0.0179
물유리	-	95 kg	0.4330
가성(苛性) 소다	-	40 kg	0.9076
물	160 kg	115 kg	(제로 값)
세골재	640 kg	904 kg	0.0034
조골재	1,084 kg	786 kg	0.0028
혼화제	수 kg	수 kg	(제로 값)
합계	약 2,350 kg	약 2,490 kg	

위로 LCA의 관점에서 검토하여 가는 것이 좋을 것이다.

이하에서는 새로운 재료의 도입에서 LCA의 사례를 소개한다.

○ 지오폴리머(geopolymer) 콘크리트에 따른 환경부하 저감의 평가

재료를 변경함에 따른 환경부하에 대한 영향 평가의 일례로서 최근에 실용화가 검토되고 있는 지오폴리머 콘크리트에 대하여 소개한다. 지오폴리머 콘크리트는 석탄회와 물유리를 이용한 콘크리트이며 제조 시의 CO₂ 배출량을 삭감할 수가 있다. 표 2에 PC 침목을 상정한 경우의 1 m³ 당 콘크리트에서 각 원료의 양과 CO₂ 원단위를 나타낸다. 주된 원료를 비교하면, 조강 시멘트에 비하여 석탄회의 CO₂ 원단위가 대단히 작은 것을 알 수 있다. 이들의 데이터로 PC 침목 용도를 산정하여 각 콘크리트 1 m³ 당의 CO₂ 배출량(kg-CO₂/kg)을 적산한 결과에 따르면 보통 콘크리트는 345.9 kg-CO₂/kg이고 지오폴리머 콘크리트는 73.8 kg-CO₂/kg이었다. 따라서 지오폴리머 콘크리트 제조에서의 CO₂ 배출량은 보통 콘크리트의 약 21%로 되어 대폭적인 배출 억제로 된다. 더욱이, 그 후의 메인テナンス, 수명은 동등하다고 생각할 수 있다.

Ⅲ. 베이나이트 레일에 따른 웨빙의 예방

1. 개요

레일의 교환 시기는 마모량과 누적 통과톤수에 따라 결정되고 있다. 마모량은 신폼레일과 마모레일 두부의 치수차이로 나타내며, 단위는 mm이다. 또한, 누적 통과톤수는 [차

량의 차축하중) × [그 지점을 통과하는 차축의 수]로 나타내며 단위는 ton이다. 마모량에 따른 레일교환은 '마모교환', 누적 통과톤수에 따른 레일교환은 '통과톤수 교환' 또는 '주기교환'이라고 부르고 있다. 마모교환과 통과톤수 교환은 마모량과 누적 통과톤수가 미리 정해진 한도 값(계획수명)에 달한 때에 행하여지는 계획적인 교환이다. 레일은 마모로 교환되는 이외에 통과톤수 교환까지 사용하는 것이 전제로 되어 있다. 그러나 실제로는 계획수명에 달하기 전에 손상으로 인하여 교환되는 일이 있다. 이 장에서는 이것을 '교환수명'이라고 부르는 것으로 한다. 이 교환수명의 원인 중에는 쉘링이라 부르는 손상이 있다. 이 손상은 방치하여 두면 레일절손에 이르는 경우가 있으므로 손상의 감시나 레일교환에 많은 노력과 비용이 투입되고 있다. 이 장에서는 쉘링 손상의 발생을 억제함으로써 레일 교환수명의 연신을 목적으로 한 베이나이트(bainite) 레일의 개발과 그 실용화를 위하여 수행된 부설시험의 사례를 소개한다.

2. 쉘링

레일은 열차주행 시에 차륜의 전동접촉을 받는다. 차륜의 전동접촉을 받는 횟수가 많게 되면, 차륜과 접촉되는 레

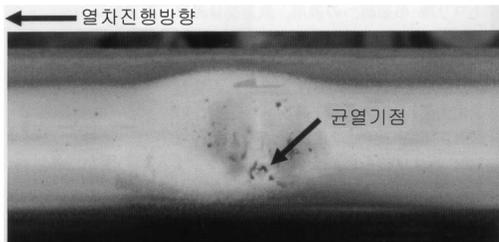


그림 2. 쉘링의 외관

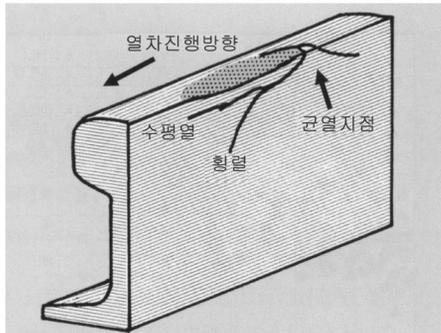


그림 3. 쉘링의 균열진전 상태

일두부 상면의 표층금속이 피로한다. 또한, 차량의 구동·제동 시에 차륜이 공전·활주하면 마찰열로 인하여 레일두부 상면의 표층부분이 딱딱하고 부서지기 쉬운 금속조직(백색 층)으로 열(熱)변태된다. 이 금속피로와 백색 층을 기점으로 하여 균열이 생기는 경우가 있다. 이들의 균열을 방치한 채로 레일을 계속하여 사용하면 레일두부 상면에 패임이나 박리가 생겨 레일절손으로 이르는 경우도 있다. 쉘링(shelling)이란 이와 같은 손상을 포괄한 명칭이며, 차륜과의 전동-미끄럼 접촉에 기인한 전동피로손상으로 분류된다. 이 손상은 열차의 운전횟수가 많고 열차속도가 높은 직선구간에 많이 발생하는 경향이 있다. 또한, 우수 등의 물이 개재되는 환경에서 발생하는 특징이 있으며, 누수가 없는 건조터널에서는 발생되지 않는다.

그림 2에 레일두부 상면의 위쪽에서 본 초기단계 쉘링의 외관을 나타낸다. 레일두부 상면의 함몰에 따라 국부적으로 차륜 접촉면의 폭이 넓어져 있다. 쉘링이 발견된 단계에서는 그림 2와 같은 외관을 하고 있는 경우가 많이 눈에 띈다.

그림 3에 쉘링의 균열진전 상태의 모식도를 나타낸다. 균열은 다음과 같이 진전된다고 생각되고 있다. 균열기점에서 발생한 균열은 먼저 레일두부 상면에 거의 평행하게 진전하여 수평균열을 형성한다. 수평균열은 열차진행방향으로 우선적으로 진전하는 경향을 나타낸다. 이 수평균열이 진전되어 가서 도중단계에서 레일저부 방향으로 향하는 횡열(橫裂)이 분기된다. 수평균열, 횡열 모두 재료의 피로파괴에 따라 형성되는 '피로균열'이다. 균열 면(파면)이 조개껍질 모양(shell pattern)을 하고 있기 때문에 이 손상을 쉘링(shelling)이라 부르게 되었다.

3. 베이나이트 레일

(1) 개발개념

耐쉘링用 레일의 개발은 지금까지 수 회 시도되어 복수의 시작(試作)레일이 제조되어 있다. 이들 시작 레일의 개발 개념(concept)은 재료의 강도를 높게(고강도화) 하면, 금속피로가 일어나기 어렵게 된다고 하는 재료과학의 기본적인 사고방식에 입각한 것이었다. 이와 같은 개념에 따라 레일소재로 되는 강(鋼)에 합금을 첨가하기도 하고 또는 열처리함으로써 고강도의 시작(試作)레일이 제조되었다. 이들의 시작 레일은 레일의 재질규격 시험을 거쳐 耐쉘링性を 확인하기 위하여 실제로 열차가 주행하는 영업선로에서 시험적으로 부

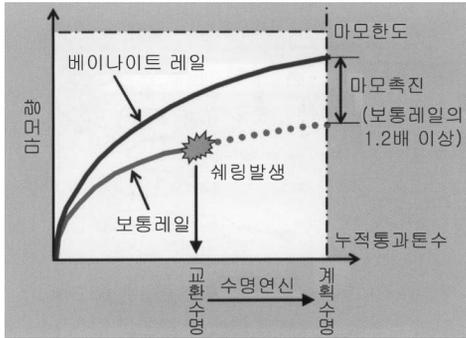


그림 4. 개발구상의 개념도

설되었다. 이와 같은 시험을 부설시험이라고 한다. 그러나 쉐링의 발생이나 쉐링의 발생이 확인되기 이전에 용접부위에 문제가 생겨 소기의 목적을 달성할 수가 없었다. 그러므로 이번의 **내쉐링용 레일의 개발**에서는 지금까지 행하여진 개발의 결과에 입각하여 레일의 고강도화라고 하는 종래의 개념에서 벗어나서 새로운 방향을 탐구하는 것으로 하였다.

여러 가지를 검토한 결과, '레일두부 상면에 금속피로 층이 형성되는 속도보다도 레일이 마모되는 속도를 적당하게 촉진함으로써 금속피로 층을 자기가 제거하는 **마모촉진형 내쉐링용 레일**' 이라고 하는 새로운 개념을 고안하였다. 그림 4에 그 개발구상의 개념도를 나타낸다. 더욱이, 이 레일에는 '차륜의 공전·회주 시에 발생하는 마찰열로 생성되는 백색 층과 그것을 기점으로 한 균열의 발생을 억제한다.' 고 하는 성능도 겸비시키는 것으로 하였다.

개발개념의 요점으로 되는 마모촉진의 목표치에 대하여는 쉐링의 원인으로 되는 금속피로 층을 **숫돌(砥石)**로 강제적으로 삭정하여 제거하는 '레일삭정'의 효과에 착안하여 그 안내시험 및 실제기계 삭정시험의 결과를 참고로 하여 보통레일의 1.2배 이상으로 하는 것으로 하였다.

(2) 소재의 선정

이하에 나타내는 전제조건에 입각하여 개발개념에 적합한 레일소재를 탐색하였다.

- ① 레일의 강도는 레일규격에 정해진 범위 내로 한다.
- ② 현행 4 종류의 레일용접방법(가스압접, 플래시 빗 용접, 엔크로즈 아크 용접 및 테르밋 용접)을 이용하여 용접할 수 있어야 한다.
- ③ 레일은 신호회로로서도 사용되고 있으므로 전기저항

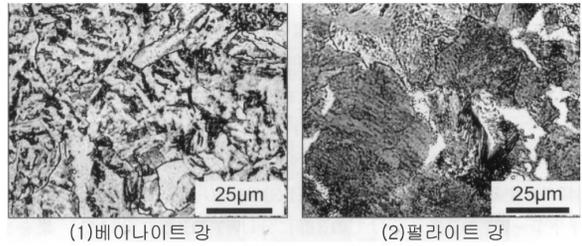


그림 5. 금속조직 비교

값은 현행대로 정해진 범위 내로 한다.
 ④ 철도용 레일로서 입수할 수 있는 가격대로 한다.
 소재의 탐색은 철강재료 뿐만 아니라 비철재료 등 넓은 범위의 재료를 대상으로 하여 행하였다. 그 결과, 레일의 소재로서 후보로 될 수 있는 재료는 철강 재료로 좁혀졌다. 그 중에서 개발개념에 적합한 소재후보로서 '베이나이트(bainite)' 라고 부르는 강종을 최종적으로 선택하였다.

그림 5에 선정 강종인 베이나이트鋼과 현재 직선구간에 주로 사용되고 있는 레일(보통레일)의 금속조직을 나타낸다. 베이나이트강의 금속조직은 강종 명과 같이 '베이나이트(bainite)', 보통레일 소재강종의 금속조직은 '펄라이트(pearlite)' 라고 한다. 양쪽 금속조직의 차이는 주로 화학기호 Fe₃C로 나타내는 시멘타이트(cementite)라고 부르는 철과 탄소의 화합물(탄화물) 형태에 있다. 탄화물은 베이나이트강에서는 입상(粒狀)으로 분산되어 있지만, 펄라이트鋼에서는 판 모양의 층상(層狀)으로 배열되어 있다.

4. 부설시험 사례

(1) 개요

베이나이트鋼을 소재로 한 레일을 시작(試作)하여 각종 안내시험 및 레일규격에 정해진 재료시험을 하여 재료강도, 마모 특성, 전동접촉 피로강도 및 용접성능을 검증하였다. 게다가, 실제사용 조건하에서 마모촉진성과 내쉐링성을 확인하기 위하여 약 19년간에 걸쳐 부설시험을 하였다. 부설 시험은 열차속도가 높고 운전횟수가 많은 일반철도의 4 선구에서 행하였다. 이 중에서 3 선구는 직선구간, 1 선구는 반경 1,000m의 곡선구간으로 하였다. 직선구간에서는 내쉐링성을 평가하였다. 곡선구간에서는 레일두부의 게이지코

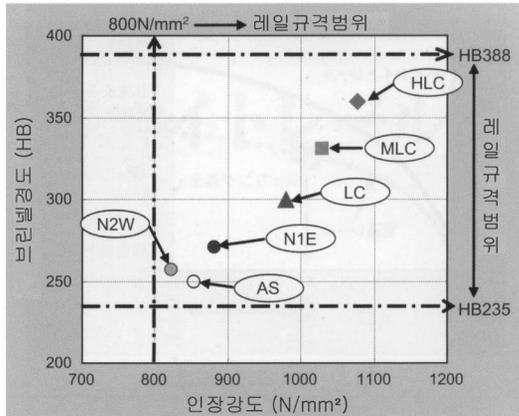


그림 6. 시험레일의 경도와 인장강도

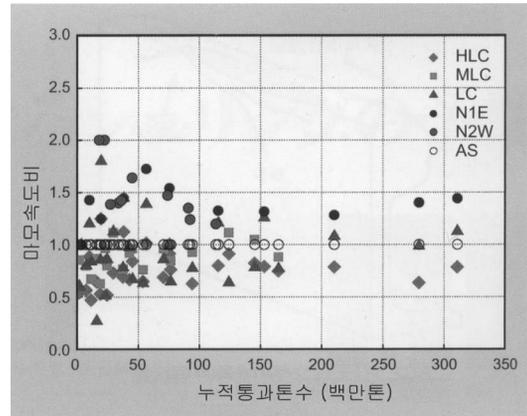


그림 7. 누적 통과톤수와 마모속도비의 관계

너부분(차륜의 플랜지부분이 접촉하는 부분)에 생기는 전동접촉 피로손상의 일종인 ‘헤드체크(head checks)’에 대한 내손상성을 평가하였다.

(2) 시험레일

그림 6에 시험레일의 경도와 인장강도의 관계를 나타낸다. 베이나이트 레일은 레일규격의 범위 내에서 경도를 5 단계(HLC, MLC, LC, N1E, N2W)로 설정하였다. 또한, 비교 재료로 보통레일(AS)을 이용하였다. 이하에서는 베이나이트 레일의 경도에 따라 편의적으로 高경도 베이나이트 레일(HLC, MLC), 中경도 베이나이트 레일(LC) 및 低경도 베이나이트 레일(N1E, N2W)의 3 群으로 나누어 설명하기로 한다. 더욱이, 시험레일의 부설량은 약 4,600 m이다.

(3) 마모촉진성의 시험결과

각 베이나이트 레일의 마모촉진성을 평가하기 위하여 보통레일(AS)에 대한 마모속도비와 누적 통과톤수의 관계를 구하였다. 그림 7에 결과를 나타낸다. 여기에는 [마모량 ÷ 누적 통과톤수]를 단위 누적 통과톤수 당의 마모속도로 하여 각 베이나이트 레일의 마모속도를 보통레일(AS)의 마모속도로 나눈 값을 마모속도비로 하였다.

低경도 베이나이트 레일(N1E, N2W)의 마모속도비는 누적 통과톤수가 낮은 단계에서 약간 분산이 있기는 하였으나 수축정기간을 통하여 보통레일(AS)보다도 높은 값을 나타내었다. 한편, 高경도 베이나이트 레일(HLC, MLC)은 보통레일(AS)과 거의 같이 낮은 값을 나타내었

다. 이에 비하여 中경도 베이나이트 레일(LC)은 누적 통과톤수가 낮은 단계에서 데이터에 분산이 보였지만 누적 통과톤수가 증가함에 따라 거의 보통레일(AS)과 같은 레벨로 수속되었다.

부설시험에 따라 低경도 베이나이트 레일(N1E, N2W)이라면 목표로 하는 마모속도비(보통레일의 1.2배 이상)를 유지시킬 수 있는 것이 확인되었다. 이에 따라 마모촉진의 목표치를 만족하는 베이나이트 레일의 경도는 HB255~HB275의 범위인 것을 알 수 있었다.

(4) 내쉐링성의 시험결과

표 3에 각 시험레일의 쉐링 발생상황을 나타낸다. 발생상황은 부설시험현장에서 조사할 때에 육안으로 확인하였다. 확인된 어느 쉐링도 초음파탐상 시스템을 탑재한 레일탐상차로 검지할 수 있는 한계치수의 크기에는 달하지 않고 있었다. 게다가, 표 중에는 마모목표의 달성상황도 아울러 나타내고 있다. 결과를 정리하면 다음과 같이 된다. 低경도 베이나이트 레일(N1E, N2W)에는 쉐링의 발생이 보이지 않았다. 이에 대하여 高경도 베이나이트 레일(HLC, MLC)과 中경도 베이나이트 레일(LC)에는 쉐링의 발생이 확인되었다.

표 3. 쉐링의 발생상황

시험레일	쉐링 손상	마모 목표치
高경도 베이나이트 레일	발생	미달성
中경도 베이나이트 레일	발생	미달성
低경도 베이나이트 레일	未발생	달성
보통레일(비교재료)	미달성	발생

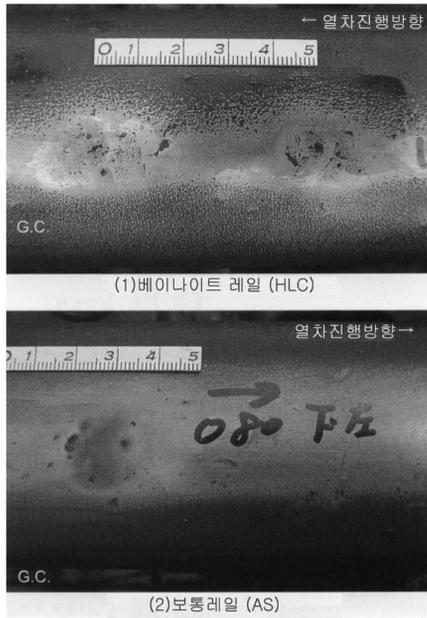


그림 8. 쉘링의 외관

그림 8에 시험레일 중에서 경도가 가장 높은 베이나이트 레일(HLC)과 보통레일(AS)에 발생된 쉘링의 외관을 나타낸다. 이들의 쉘링은 누적 통과톤수 150백만 톤 시점에서의 현지조사에서는 확인되지 않고 있었지만, 누적 통과톤수 215백만 톤 시점에서 실시한 현지조사 시에 발견되었다. 또한, 쉘링의 발생과 마모 목표치의 관계에 착안하여 이들의 결과를 보면 마모목표치를 만족한 低경도 베이나이트 레일만이 쉘링의 억제를 달성하고 있는 것을 알 수 있다.

이상의 부설시험 결과에서 보통레일(AS)에 대한 低경도 베이나이트 레일(N1E, N2W)의 耐쉘링性의 우위가 확인되었다.

(5) 용접부위의 성능

누적 통과톤수의 증가에 따라 용접부위에 요철이 생긴다. 이것은 용접 시의 열 영향에 따른 레일모재의 연화(軟化)나 용접부위와 레일모재 간의 경도차이로 인하여 마모진행에 차이가 생기는 등의 원인으로 생긴다고 생각된다. 이 요철량을 평가적도로 하여 용접부위의 성능을 평가하였다. 그 결과, 용접방법에 따라서 요철량에 차이가 보였지만, 시험레일의 용접부위에 열차주행 상 특히 문제로 되는 요철이 형성되는 일은 없었다. 그 때문에 영업선로에서의 실제사용에서도 용접부위에 특히 문제가 생기는 일은 없다고 생각된다.

5. 베이나이트 레일의 적용범위

베이나이트 레일의 투입구분은 부설시험의 실적에 입각하여 직선과 반경 1,000 m 이상의 곡선이라고 고려된다. 이 범위이라면 쉘링과 헤드체크 등과 같이 차륜의 전동접촉에 기인하는 손상을 억제할 수가 있다고 생각된다. 또한 보수 상, 쉘링의 다발로 레일이 교환되는 개소에 베이나이트 레일을 우선하여 부설하는 것이 유효하다고 생각된다.

IV. 궤도에서 비닐론섬유 보강콘크리트의 적용

1. 개요

자갈궤도는 레일, 침목, 꺾 자갈의 집합인 자갈도상으로 구성되며, 우리나라를 비롯한 세계에서 사용되고 있는 대표적인 궤도이지만, 궤도에는 꺾 자갈을 이용하지 않는 직결궤도가 있다. 우리나라에서는 이와 같이 꺾 자갈을 이용하지 않는 직결궤도를 일반적으로 콘크리트궤도라고 부른다. 이러한 직결궤도에는 우리나라에 도입된 Rheda 콘크리트궤도나 Stedef 콘크리트궤도 등과 같은 침목 직결궤도 및 슬래브 궤도, 기타의 직결궤도 등이 있다. 자갈궤도는 열차가 반복하여 통과함에 따라서 서서히 꺾 자갈 도상이 허물어지므로 매일의 메인テナンス가 필요하다. 콘크리트궤도는 꺾 자갈을 이용하지 않기 때문에 매일의 메인テナンス가 거의 필요하지 않으며, 최근에는 신설선로에서 콘크리트궤도가 증가되고 있는 추세이다.

콘크리트궤도의 구성부재인 콘크리트도상이나 궤도슬래브는 철근콘크리트체로서 콘크리트도상은 현장에서 시공되고, 궤도슬래브의 경우는 공장에서 제작된다. 이와 같은 현장시공이나 공장제작 시에 철근의 가공·조립(배근이라고 한다)에는 많은 노력과 시간이 걸린다. 또한, 철근을 이용하고 있으므로 해저터널 등에서는 철근이 부식하여 콘크리트에 균열이 발생하는 염해가 콘크리트도상이나 궤도슬래브에 생길 우려도 있다. 이 장에서는 배근작업이 없고, 염해 등의 환경작용에 대하여 내구성이 있는 콘크리트도상이나 궤도슬래브를 개발하기 위하여 이들에 대하여 비닐론섬유 보강콘크리트를 적용한 사례에 대하여 소개한다.

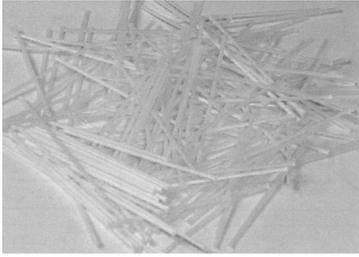


그림 9. 비닐론섬유

2. 비닐론섬유 보강콘크리트

(1) 비닐론섬유

비닐론은 폴리비닐알코올(PVA)을 원료로 하여 얻어진 합성섬유에 주어진 일반명칭이며 PVA는 수용성 플라스틱의 일종으로 포발(poval)이라고도 부른다. PVA는 합성 고분자이면서 “물에 녹는다.”고 하는 독특한 성질을 갖고 있으므로 PVA를 원료로 하는 비닐론섬유(그림 9)는 친수성이 뛰어나며, 콘크리트와의 부착이 좋은 섬유이다. PVA는 비닐 외에 필름의 원료나 섬유 가공제, 종이 가공제, 근년에는 자동차의 앞 유리창용 중간 막(膜) 원료, 잉크젯 용지 등의 정보용지의 가공제에 사용되고 있다.

(2) 가교(架橋)효과

콘크리트에 균열이 발생되면 철근이 균열의 진행을 억제하지만, 비닐론섬유 보강콘크리트의 경우는 그림 10에 나타난 것처럼 균열이 발생되면 그 균열의 계면을 비닐론섬유가 연결하여 균열의 진행을 억제한다. 이것을 가교(架橋)효과라고 한다. 이 가교효과 때문에 철근을 없애는 것이 가능하게 된다.

(3) 시공성

콘크리트에 섬유를 혼입하면 일반적으로 유동성이 나빠게 된다. 유동성이 나빠게 되면 콘크리트의 시공성이 저하되기 때문에 섬유를 혼입한 콘크리트의 유동성은 중요하다. 이 유동성의 지표로 되는 것이 콘크리트의 슬럼프 플로(slump flow, SF)이다. 슬럼프 플로는 슬럼프 시험에서 얻어진다. 콘크리트를 채워 넣은 콘(cone)을 위로 들어 올릴 때 콘크리트가 옆으로 넓어지는 변화가 슬럼프 플로이며 높이의 변화가 슬럼프이다. 비닐론섬유를 혼입한 콘크리트는 혼합 전후의 슬럼프 플로의 비(슬럼프 플로 변동비)가 0.5 이하로 되면 콘크리트 타설 시의 시공성이 나빠게 되기 때문

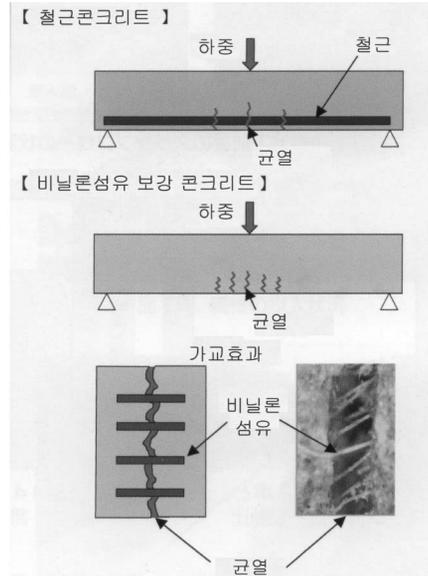


그림 10. 비닐론섬유 콘크리트의 가교효과

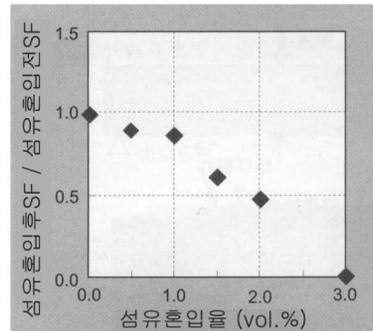


그림 11. 섬유 혼입률과 슬럼프 플로 변동비

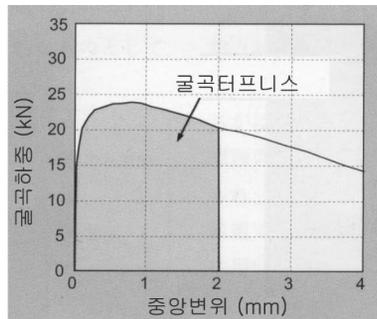


그림 12. 굴곡시험에 따른 하중 · 변위 관계

에 콘크리트에서의 비닐론섬유의 혼입률은 체적比로 2% 정도가 한계로 된다(그림 11).

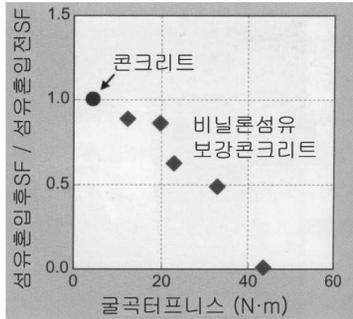


그림 13. 굴곡 터프니스와 슬럼프 플로 변동비

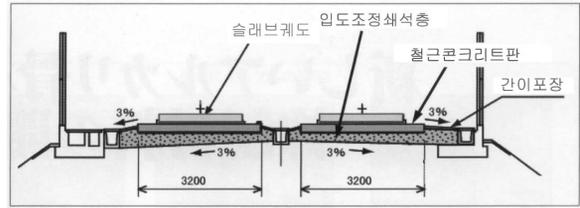


그림 14. 콘크리트 노반의 구조

(4) 강도특성

콘크리트의 강도특성을 파악하기 위하여 통상적으로 굴곡시험을 한다. 그림 12에 나타난 굴곡 터프니스(toughness)는 콘크리트의 인성(靱性, toughness)을 나타내는 지표로 된다. 콘크리트의 인성을 나타내는 지표인 굴곡 터프니스와 시공성의 지표로 되는 슬럼프 플로 변동비의 관계(그림 13)를 보면 비닐론섬유 보강콘크리트는 통상의 콘크리트에 비하여 인성이 큰 것을 알 수 있다. 또한, 비닐론섬유 보강콘크리트는 슬럼프 플로 변동비가 클수록 인성이 크게 되지만 동시에 시공성이 악화된다. 결국, 시공성이나 비닐론섬유 보강콘크리트의 적용개소를 고려하여 섬유 혼입률을 결정하는 것으로 된다.

3. 궤도에서 비닐론섬유 보강콘크리트의 적용

(1) 콘크리트도상에 대한 적용

침목 직결궤도의 콘크리트도상 시공 시의 배근작업을 없앨 목적으로 비닐론섬유 보강콘크리트를 콘크리트도상에서 적용하기 위하여 곡선구간에서 열차의 차륜에서 레일을 통하여 작용하는 수평방향의 하중(횡압이라고 한다)에 대한 검토를 재하시험으로 행하였다. 재하시험은 콘크리트도상의 실물 大모형을 수직으로 세워 행하여 철근콘크리트와 동등의 강도가 있는 것을 확인하였다. 따라서 침목 직결궤도의 도상콘크리트에는 비닐론섬유 보강콘크리트의 적용이 충분히 가능하다는 것을 알 수 있었다.

(2) 궤도슬래브에 대한 적용

궤도슬래브의 설계 내용연수는 통상 50년으로 하고 있다. 그 동안에 열차주행에 따른 차륜의 통과횟수는 1억 회 이상으로도 된다. 궤도슬래브는 레일을 통하여 열차로부터

의 하중을 받기 때문에 1억 회 이상 반복 작용하는 하중에 대하여 내구성이 있어야만 한다. 그러므로 비닐론섬유 보강콘크리트를 이용한 궤도슬래브에 반복 작용하는 하중에 대한 내구성의 검토를 반복시험으로 검토하였다. 그 결과, 1억 회 이상으로 반복하여 작용하는 하중에 대하여 문제가 없는 것이 확인되었다. 게다가, 궤도슬래브는 공장에서 제작하기 때문에 공장제작에 관한 검토가 필요하게 된다.

(3) 콘크리트노반에 대한 적용

흙 쌓기 등의 흙 구조물 위에 슬래브궤도를 부설하는 경우는 그림 14에 나타내는 것처럼 노반에는 콘크리트노반(철근콘크리트 판+ 입도조정 쇄석 층)이 적용된다. 이 노반의 철근콘크리트 판에 비닐론섬유 보강콘크리트를 적용하기 위한 검토로서 연장 60m의 시공시험을 하였다. 레미콘 차에 섬유를 투입하여 레미콘과 좋게 혼합한 후에 타설하였다. 60m의 콘크리트 타설이 하루에 가능하므로 시공성이 문제가 없고 완성 후 6개월이 경과한 후에도 균열 등의 변상이 생기지 않는 것이 확인되었다.

V. 맺음말

지구온난화 대책은 2008년 洞爺湖(도야코) G8 서미트에서의 주요 의제의 하나로 된 세계적인 중요 과제이며, 2050년에는 세계의 CO₂ 총배출량을 반감하는 방향으로 추진하기 시작하였다. 철도를 포함한 수송 분야에서도 반감 이상의 달성이 요구되고 있다고 생각되며, 지금까지 이상으로 치밀하고 혁신적인 노력이 필요하게 된다. 또한, CO₂ 이외의 배출물질에 대한 관심도 점점 높아진다고 생각된다. 향

후에 이들에 대한 대처를 진행하여 가기 위해서는 LCA 등의 평가기법을 잘 다루고 환경부하 삭감의 목표를 명확히 하여 기술개발을 진행하여 가는 것이 요구된다고 생각된다.

지구환경 문제에 대한 발본적인 대책으로서는 순환(循環)형 사회로의 이행이 필요하다는 인식에 기초하여 법률의 정비도 필요할 것으로 생각된다. 또한, 철도의 장래를 고려할 때에 “교통의 자원절약·환경·안전 문제”가 하나의 힌트를 주게 될 것이다. 재료의 면에서는 예를 들어 가볍고 강하다고 하는 것만이 아니고 리사이클이나 최후의 폐기처리까지 고려된 것을 개발할 수 없는가라고 고려하고 있다. 토털(total)의 고려 방법에 기초한 재료를 사용하여 그 메리트를 추구하는 것도 필요하다고 생각된다. 앞으로는 “성능은 다소 떨어질지도 모르지만 라이프사이클 코스트로서는 오히려 싸다”고 하는 재료 개발에 몰두할 가치가 있을 것이다.

또한, 철도시스템 중에서 재료를 고려할 때 예를 들어 생태학(ecology)에 주안을 두든지, 또는 대수롭지 않은 고장이 라면 자체 표시하는 스마트(smart) 재료나 복합재료 등 여러 가지 가능성이 있다고 생각된다. 또한, 재료라고 하기보다 구조에 대한 것이지만 강도나 성능이 떨어지는 약점 개소를 사전에 파악하여두면 검사나 진단이 용이하게 될 것이다.

여기서 신(新)재료만을 화제로 하고 있지만, 현재의 콘크리트 열화문제 등을 고려하면, 이미 사용하고 있는 재료의 수명을 정확하게 예측할 수 있는 것도 중요하다고 생각된다. 지금 어떤 것의 열화현상을 정확하게 해명하고 포인트를 파악하여 재료 개발에 연결시킨다고 하는 방법도 있다고 생각된다. “21세기는 메인테넌스(maintenance)의 시대”라고도 말하여지고 있다. 재료공학 분야가 각광을 받고 동시에 힘을 들여야 하는 분야로 되어갈 것이라고 생각된다.

약 10년간에 걸친 영업선로에서의 부설시험에 따라 低경도 베이나이트 레일(N1E, N2W)의 耐쇄링성이 보통레일(AS)에 비하여 우수하다는 것이 확인되었다. 또한, 베이나이트 레일의 마모 목표치를 만족하는 경도범위는 HB255~HB275인 것이 밝혀지게 되었다. 게다가, 용접부위에 대하여도 특히 문제가 없는 것이 확인되었다. 베이나이트 레일은 현재 외국의 일부 선로에서 실용화되고 있다.

침목 직결궤도용의 콘크리트도상이나 흙 구조물 위의 콘크리트노반에는 비닐론섬유 보강콘크리트가 충분히 사용 가능하지만, 궤도슬래브에 대하여는 제작 등에 대한 과제를 더욱 검토하여야 한다. S