

저진동·저소음 궤도기술 개발

양 신 추* · 김 만 철 · 강 윤 석
(한국철도기술연구원)

1. 머리 말

철도는 대중교통수단으로 가장 일찍이 개발되어 근대산업발전에 크게 기여했으나 20세기 중반 이후 자동차, 항공기 산업의 발달 및 투자의 집중으로 철도시설의 낙후 등 정체화의 길을 걷게 되었다. 그러나 산업의 고도화 및 분업화로 인한 교통수요의 급속한 증가와 다양화로 대량수송, 고속성, 안전성, 정시성, 에너지효율성 및 환경오염방지 측면에서 탁월한 장점을 갖는 철도의 역할에 대해 재인식하게 되었다. 철도는 현재 제 2의 도약기에 들어서고 있으며 생활수준의 향상과 더불어 이용자는 안전성과 정시성을 기본 서비스로 여기며 더 나아가 고속성, 편리성, 쾌적성, 유행성 등을 중시하게 되었다. 또한 환경문제에 대한 일반인의 관심증가로 인하여 생활환경을 침해하는 철도공해의 전형인 진동 및 소음을 중심으로 공해방지대책 등의 요구가 높아지고 있다.

철도는 다른 교통수단(비행기, 자동차) 등과 달리 궤도라는 독특한 시설물을 포함하고 있다. 궤도는 열차를 정해진 길로 유도하는 역할을 할뿐만 아니라 하부로 전달되는 열차하중을 완화하여 하부구조물을 보호하는 역할을 수행한다. 그러나 철도의 환경소음 및 진동의 많은 부분은 차륜과 궤도의 상호작용(차륜의 플랫폼, 레일의 파상마모, 궤도틀림 등)에 의하여 발생하며, 철도의 고속화는 더욱 더 큰 진동과 소음을 유발한다. 이러한 철도의 진동 및 소음은 궤도와 궤도를 지지하는 구조물에서 지반을 따라 인접구조물로 전파되고, 또한 궤도의 성능에 의해서 가장 큰 영향을 받는다(그림 1). 따라서 철도 진동 및 소음의 원천적인 방진대책의 수립 측면에서 궤도의 방진설계는 매우 중요하며, 실효성 및 경제성 측면에서 가장 뚜렷한 효과를 얻을 수 있다.

* E-mail : scyang@krii.re.kr

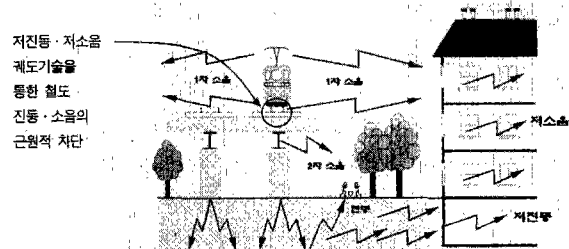


그림 1 철도 진동 및 소음의 전파경로

저진동·저소음 궤도기술은 건설, 철도차량, 소음, 진동, 화공, 생산기술 등 다양한 기술이 복합적으로 구성되어 있으면서 열차의 주행안전성 및 승차감과, 궤도의 성능 및 유지관리를 함께 고려해야 하는 고유 기술특성을 가지고 있다. 저진동·저소음 궤도기술은 차량과 궤도의 상호작용 해석기술, 궤도 시스템 설계 기술, 방진 궤도의 방진성 평가 및 설계기술, 궤도 방음·방진재의 설계, 생산 및 시험 평가 기술 등으로 구성되어 있는데, 본 기술에 있어서 핵심사항은 열차 주행특성을 고려한 방진궤도 설계 및 방진재 생산기술이라 할 수 있다. 본 원고에서는 외국의 저진동·저소음 궤도기술 현황과 국내의 기술수준 및 향후 전망에 대해 살펴보기로 한다.

2. 국외의 저진동·저소음 궤도기술 동향 및 수준

진동·저소음 궤도기술은 방진 슬래브 궤도, 방진 체결구, 방진 침목, 방진 자갈도상매트 등에 관한 기술로 세분할 수 있다. 방진 궤도는 근본적으로 궤도강성을 타구간 보다 유연하게 하므로써 방진·방음 저감 효과를 얻을 수 있으나, 반면 방진궤도구간을 통과하는 열차의 주행안전성을 저해할 가능성이 있다. 특히 고속으로 주행하는 차량의 복잡한 동특성으로 인하여 방진궤도 부설에 많은 비용을 소모하였음에도 불구하고 기대 하로 방진·방음효과가 저하될 수 있는 양면

을 갖고 있다. 방진 궤도는 차량과 궤도의 상호작용 해석기술, 궤도 시스템 설계 기술과 열차주행 안전성 및 승차감과 밀접하게 연관되어 있어 주로 국가 철도 연구소를 중심으로 연구개발 되었다. 일본의 철도총련 (RTRI), 프랑스 SNCF, 독일의 DB, 영국의 BR 등이 대표적인 연구소 또는 연구소 기능을 보유한 철도운영 주체로서 이 분야의 독자적인 연구개발로 자국의 철도산업육성은 물론 세계적으로 철도기술을 수출하고 있다. 선진국의 시속 300 km/h의 고속철도 차량을 안정적으로 지지할 수 있는 하부구조물의 설계 및 시공 기술은 차량과 궤도의 상호작용해석을 바탕으로 한 저진동·저소음 궤도기술의 원천적 확보로 이루어진 결과할 수 있으며, 쾌적한 철도환경의 조성을 통하여 철도에 대한 국민적 신뢰를 이끌어 낸 것도 본 기술의 확보가 있었기에 가능한 결과라 할 수 있다.

일반궤도이면서 방진효과를 높인 궤도는 프랑스의 STEDEF궤도와 LVT가 대표적인데 이들 제품은 국내 대부분의 지하철에서 민원을 줄이기 위하여 채택하여 부설하고 있는 실정이다. 일본 철도총련이 개발한 Ladder 궤도 역시 이러한 유형의 궤도로서 시험 부설결과 그 성능이 입증되어 상용화를 앞두고 있다. 또한 전용 방진 슬래브 궤도는 독일의 GERB사와 오스트리아의 Getzner사에서 개발한 궤도(그림 2~4)가 세계적으로 많은 상용화 실적을 갖고 있다. 일본에서는 동급건설과 미쓰비시제강의 공동연구로써 개발한 방진 슬래브 궤도를 신간선 고속열차에 대한

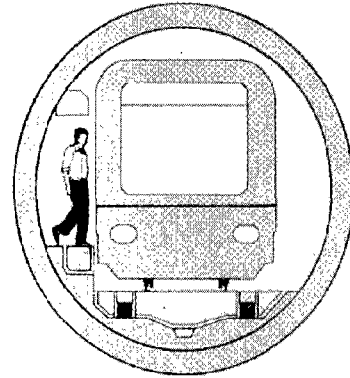


그림 3 방진 슬래브 궤도 개념도

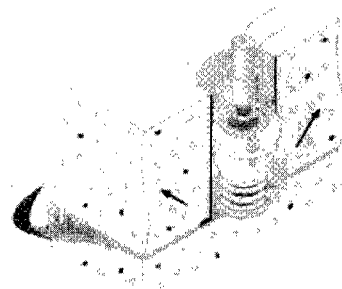


그림 4 방진 궤도의 진동 절연재

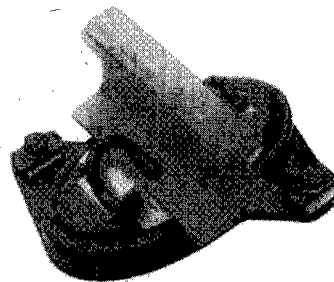


그림 5 Cologne Egg형 방진 체결구

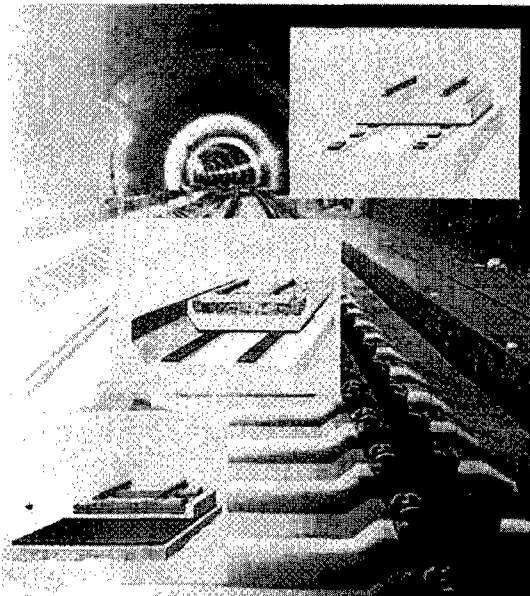


그림 2 Getzner의 방진 슬래브 궤도

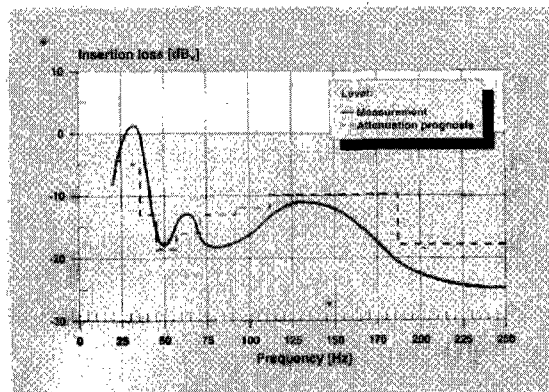


그림 6 Cologne Egg형 방진 체결구의 방진효과

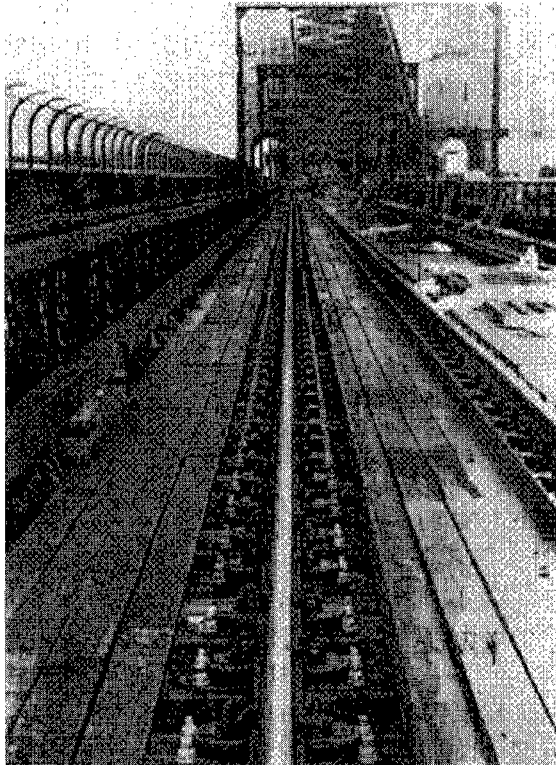


그림 7 하버교량에 설치된 방진 체결구

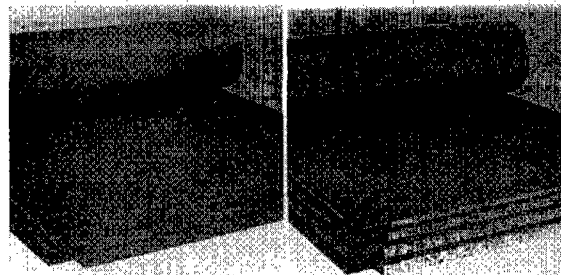
진동저감을 위하여 역구내에 설치한 바 있다. 그밖에 독일의 STS사에서 개발한 방진 슬래브 궤도가 세계적으로 많이 진출하고 있다.

방진체결구는 독일의 Vossloh사와, Clouth사와 오스트리아의 Getzner사가 개발하고 있다. 특히 Clouth사의 제품(그림 5~7)은 1980년 이후 300,000개 이상이 세계적으로 널리 사용되었고, 오랜 시간 동안 그 효율성이 극한상황에서 입증되었다. 현재 세계적으로 철도의 전철화가 이루어지고 있어 터널과 같이 건축 및 차량한계가 적은 구간에서는 이에 대한 해결책으로 방진 체결구 사용이 추천되고 있어 시장규모가 급속도로 커져갈 전망이다.

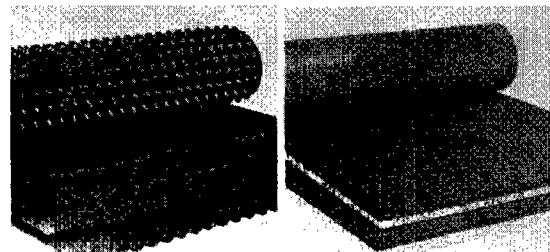
방진매트는 Getzner사, Phoenix사와 Clouth사 등에서 개발하여 사용하고 있다. Getzner사의 Sylomer 방진매트는 자갈궤도의 탄성받침인 자갈도상매트(sub-ballast mat)로 1975년부터 사용되고 있다. Clouth사의 방진매트(그림 8~10)는 차량의 주행에 의해 유발되는 진동을 감소시키기 위해 자연고무인 NR과 합성고무 SBR/CR 또는 EPDM으로 만들어진 탄성합성고무 제품이다. 또한 최대축중이 250kN까지 최대속도 300km/h까지 다양한 강성을 가지고 있는 여러 종류의 매트로 제품이 구성되어 있다. 이러한

방진매트의 개발시 방진효율은 시공에 의해서 얻어지는 진동레벨의 감소에 의해서 일반적으로 평가되므로, 진동레벨 측정시, 시공 전/후 진동의 영향 요인(열차의 형태 및 조건, 궤도의 조건, 시험궤도연변의 상황 등)을 모두 고려하여야 한다. 방진효과는 방진매트 자체만의 특성이 아니라 열차에서 궤도의 하부 구조까지를 포함한 전 시스템의 특성이다. 차량의 스프링 하중량, 궤도 하부 구조의 임피던스, 하중·주파수·진폭에 의해 결정되는 매트의 동적 강성과 감쇠·매트 시공 전 도상의 동적 강성과 같은 파라미터는 특별히 중요하게 고려되어야 한다.

방진침목은 Sylomer와 같은 Micro-Cellulars Polyurethane이 개발되면서 방진 매트를 사용할 때



(a) G-1000형 매트(250 kN) (b) G-500형 매트(135 kN)



(c) Prifiled Mat(250 kN) (d) Clouth Isolating Mat

그림 8 방진매트



그림 9 강교량상의 방진매트 시공현장

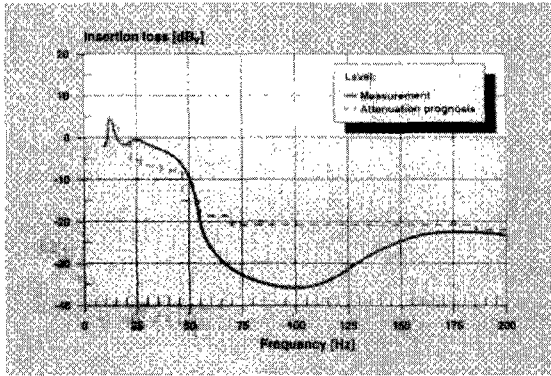


그림 10 G-1000의 방진 효과(평균값)

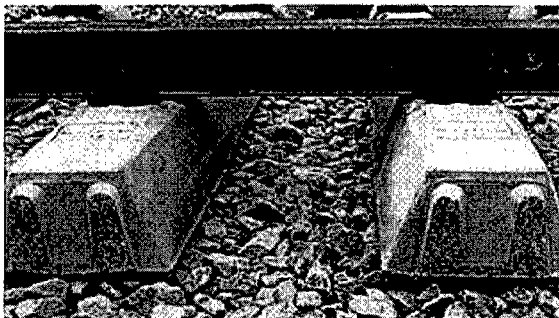


그림 11 방진 침목

와 거의 같은 방진 성능을 발휘하기 때문에 자갈 궤도시의 "가장 경제적인 진동 및 고체음 저감대책"이

라고 할 수 있다. 근래에 일본 및 유럽에서는 독자적으로 설계된 방진 침목 패드를 개발하여 설치하여 운용하고 있는데 이런 방진 침목 패드는 침목과 접촉되는 탄성층과 자갈과 접촉되는 보호층으로 구성되어 있다. 탄성층은 유연한 스프링 상수로 인해 동적 하중 및 진동을 효과적으로 저감시키며 보호층은 단단하고 내마모성이 우수하기 때문에 동적 하중을 자갈에 분산시켜 주고 자갈의 날카로운 면으로부터 탄성층을 보호해 주는 역할을 한다.

3. 국내의 저진동·저소음 궤도기술 동향 및 수준

기술특성상 토목기술과 기계기술의 복합적 성격을 갖는 궤도기술은 국내에서 어느 한 학문분야로 편입되지 않아 대학 등에서 전문적으로 연구된 사례가 많지 않았을 뿐만 아니라 전문 국책연구소도 존재하지 않아 대부분의 기술을 일본, 프랑스, 영국 등 철도 선진국으로부터 수입하는 실정이었다. 따라서 궤도기술 중 비교적 많은 연구투자를 요하는 저진동·저소음 궤도기술은 외국에 비하여 상대적으로 낙후될 수밖에 없었으며, 이를 기초로 하는 방진궤도 산업의 기반은 거의 형성되지 못한 실정이다. 철도기술에

표 1 국내의 저진동·저소음 궤도기술개발 비교

기술항목		외국의 기술수준	국내의 기술수준
차량과 궤도의 상호작용 해석기술		일본, 프랑스, 영국, 독일, 이탈리아, 미국 등 철도선진국에서는 자체적으로 기술을 확보하고 있으며, 그 밖의 많은 나라에서 이에 대한 연구를 활발히 진행중임	일부 대학에서 연구되어 왔으며, 이들 대부분은 차량자체의 동역학적 해석만을 연구한 것임. 차량과 궤도의 상호작용 해석기술은 G7 궤도기술 개발 1단계 사업을 통해 연구가 시작되었음
궤도시스템설계기술 및 방진궤도의 방진효율성 평가 및 설계기술		궤도시스템 설계기술은 대부분의 철도선진국에서 자체적으로 갖고 있으나, 방진궤도의 방진 효율성 평가기술은 방진재의 생산과 맞물려 있기 때문에 이들을 주로 생산하고 있는 오스트리아, 독일을 중심으로 기술개발이 이루어지고 있음	궤도시스템 설계기술 및 방진효율성 평가기술이 G7 궤도기술개발을 통하여 개발된 상태임. 그러나 선진국 수준에 이르기 위해서는 일부 프로그램들에 대해서 성능 향상이 요구됨
궤도 방음·방진재의 설계, 생산 및 시험 평가 기술	방진슬래브 궤도	독일, 일본, 미국, 영국, 스웨덴 등이 고유모델의 방진슬래브 궤도를 개발하여 상용화하고 있음	방진궤도를 자체 개발한 사례는 없음
	방진침목	오스트리아, 일본, 미국 등에서 현재 개발중임, 특히 페타이어를 재활용한 방진침목의 개발이 미국, 일본 등에서 활발히 추진중임	기존 고무를 활용한 방진침목은 현재 G7 시스템엔지니어링 기술개발과제를 통하여 개발중에 있음
	방진 체결구	독일에서 개발한 제품이 세계적으로 많이 사용되고 있음. 미국에서도 자체 개발한 사례가 많지만 미국 내에 한정되어 판매되고 있음	이에 대한 개발사례가 없음
	방진매트	세계적으로 많은 업체에서 생산되고 있음	소형 벤처기업들을 중심으로 연구개발중에 있음

대한 국가적 투자는 96년 이후 철도관련 대형 국책 사업을 시작하면서 본격화되었다고 볼 수 있다. 저진동·저소음 궤도기술의 중요성이 인식되어 차량과 궤도의 상호작용 해석기술, 궤도 시스템 설계기술, 방진 궤도의 방진성 평가 및 설계기술, 방진대 시험평가기술 등이 G7 궤도기술 개발 사업을 통하여 활발하게 연구되고 있으며, 방진 침목 등 일부 제품이 실용화될 예정이다. 그러나 이 분야에 대한 전반적인 기술수준은 외국에 비하여 개발초기 단계에 있다고 할 수 있는데 각 기술분야별로 외국과의 기술수준을 비교하면 표 1과 같다.

표 1에서 알 수 있듯이 저진동·저소음 궤도기술 중 해석 및 설계기술은 G7 궤도기술개발 사업을 통하여 선진국 수준에는 다소 미흡하나 어느 정도 기반을 구축하였다고 볼 수 있다. 향후 방진궤도의 해석 및 설계기술을 선진국 수준으로 향상시키기 위하여 이 분야에 대한 지속적인 연구투자가 있어야 할 것이며, 동시에 개발된 기술에 대한 실용화 연구도 병행되어 추진되어야 할 것이다.

4. 기술 수요 및 전망

4.1 현재의 기술수요

저진동·저소음 궤도기술 중 차량과 궤도의 상호작용해석기술은 방진재 설계뿐만 아니라 현재 건설중인 고속철도를 비롯하여 기존 국철, 지하철, 경전철 등에서 폭넓게 사용되고 있으며 계속적인 기술수요가 기대된다. 방진궤도는 설계비가 1km당 0.3억원 정도이고, 방진재를 포함한 시공비가 18.5억원 이므로 각 도시철도 및 국철, 경전철 등에서 연간 10km 이상 부설되므로 188억의 시장이 예상되고, 방진체결구의 경우 국내 전철화 사업의 본격적인 착수에 힘입어 연간 20km에서 50억 정도의 기술수요가 예상된다. 방진침목의 경우는 고속철도 및 일반철도, 지하철 등에서 연간 300km 이상을 부설하고 있어 400억 이상의 시장이 기대된다. 방진매트는 70% 이상이 산악지형인 관계로 철도건설시 65% 이상이 자갈분쇄 및 파쇄를 막을 수 있는 콘크리트 노반의 수요가 급증하고 있다. 여기에 부설되는 방진매트 가격은 1km당 5억원으로 연간 20km에서 100억원의 수요가 예상된다.

4.2 향후 기술수요 전망

새 천년 국가중핵교통체계의 청사진인 '국가기간교

통망계획(2000-2019)'에 의하면 한반도 종단 X자형 고속철도망(그림 12~13)이 완성됨에 따라 장기적으로는 남북교통망연결은 물론 중국횡단철도(TCR), 시베리아횡단철도(TSR) 등과 연결할 대륙철도망 구축 기반이 갖춰질 예정이다. 또한 중기적으로는 경부고속철도와 호남고속철도를 신설, 수도권과 주요 권역을 연결하는 X자형 한반도종단 고속철도망을 구축하고 통일이후에는 서울-신의주 축과 서울-청진축을 신설될 예정이다. 주요 간선철도로는 기본적으로 고속철도 신선과 연결해 고속철도 차량을 직접 운행할 수 있도록 선로개량 및 전철화를 통해 시속 180km 대의 고속전철 화하되 경부, 호남, 전라, 중앙, 장항선 등 5대간선 전철화에 집중 투자하게 된다.

국내 철도 특성상 인구밀도가 높아 도심지 통과비용이 높은 국내실정을 감안한다면 저진동·저소음 궤도 등 환경기술 관련시장이 급격한 팽창이 예상된다. 또한 도심지에서의 경전철사업 역시 김해~부산 경전철(23.9km), 하남시~창우 경전철(10km), 의정부~회룡역(10.3km) 이외의 여러 경전철사업이 추진될 예정이나 연간 수십만명 이상의 수송효과가 기대되지

■ 남북한 간선 도로·철도망 구상

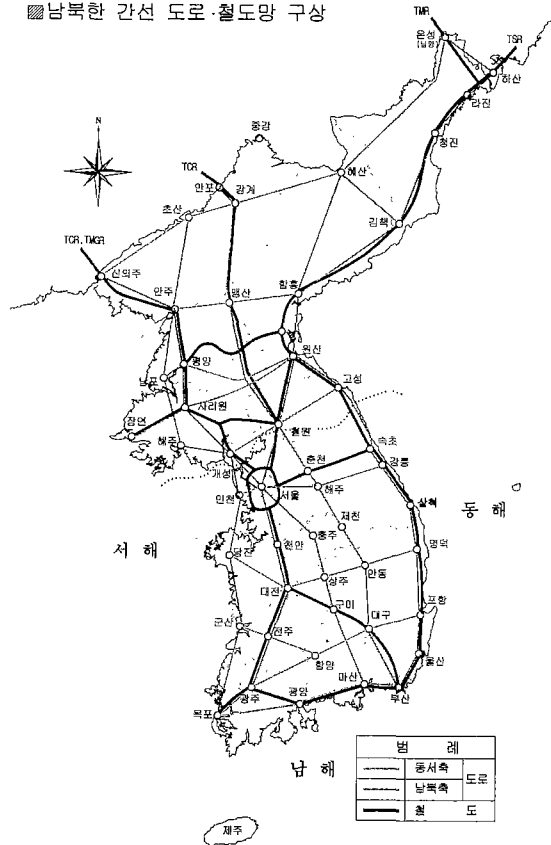


그림 12 남·북한 간선도로 철도망 구상

간선철도망계획 (2000~2019)

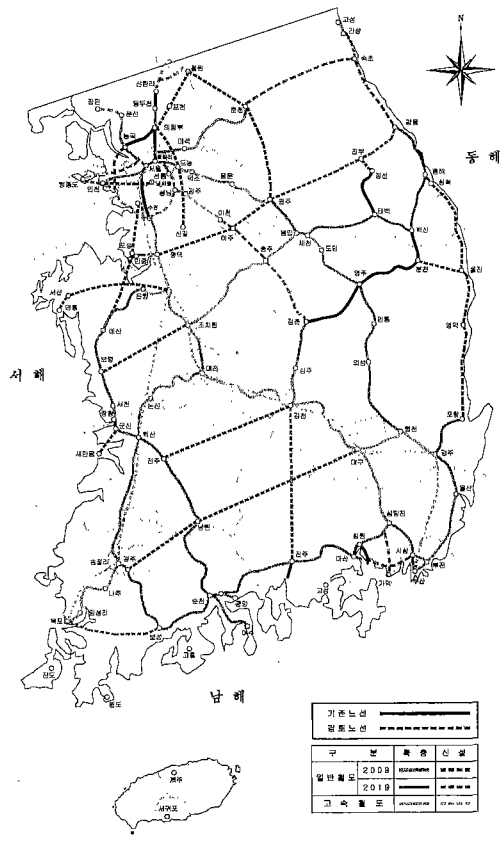


그림 13 간선 철도망 계획

만 주변 상가지역 및 택지지역의 환경소음 및 진동으로 인한 민원이 예상된다.

따라서 저진동·저소음궤도의 개발방향은 환경성(소음 및 진동), 점차적인 속도향상 등으로 인한 주행 안전성 확보, 유지보수성을 보완하는 방향으로 전개될 것이고 장기적으로 대량건설이 예측됨에 따라 비용을 절감될 수 있는 방향으로 발전시켜 나가야 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- (1) 문순경, 1999, "철도공학분야의 기술개발현황과 미래수요예측 및 개발전략", 대한토목학회토목연구소, 연구보고, 98-2호.
- (2) 엄기영, 고태훈, 2000, "방진매트/방진침목패드의 방진효과분석", 철도시설, 제20권, 제76호, pp. 83~91.
- (3) 강수련, 2000, "Micor-Cellular 폴리우레탄(PUR)을 사용한 진동과 고체음의 절연", 철도선로, 제33호, pp. 34~43.
- (4) 이기승, 1999, "유도상궤도의 방진 침목 부설", 철도선로, 제3권, 제30호, pp. 25~30.
- (5) Harris, C. M., 1998, "Shock and Vibration Handbook", McGraw-Hill6.
- (6) Volberg, G., 1983, "Propagation for Ground Vibration near RailWay Tracks", J. of Sound and Vibration, Vol. 87(2), pp. 371~376.