



## 전산수치해석의 고속철도에의 활용



이 승 원\*



양재성\*\*

### 1. 서 론

국내에 최초로 건설되는 경부고속철도 건설사업은 공사의 규모, 기술수준, 정밀도 등에서 기존의 철도 및 도로건설과는 달라 국내의 건설기술수준을 한단계 높이고 영업최고속도 300km/h인 고속의 대량수송체계(1개열차 1000명수송)의 도입으로 교통체계나 건설기술 발전에 큰 전환점이 이룩될 것이다. 특히 우리나라에는 산악지대가 70%에 달하는 지형으로 구성되어 있으며, 고속으로 주행하는 열차의 주행안정성을 확보하기 위한 곡선반경을 유지하여야 함으로 인해 경부고속철도 노반구조물은 교량 및 터널등이 장대화되는 특성을 갖게 되었다. 따라서 장대교량, 장대터널, 강화노반등의 토공, 장대레일로 구성된 궤도, 지하역사구조물등 고도의 기술을 요하는 구조물들이 총망라되어 있으므로 이의 설계 시공 및 기술개발에는 국내 최고의 기술진 및 학자들과 국외의 저명 전문기술진 및 학자들이 공동으로 본 사업과 관련하

여 매진하고 있다. 이러한 고도의 대형구조물의 설계 시공 및 기술개발에 전산수치해석기법의 활발한 활용과 연구개발이 이루어지고 있는데, 본고에서는 각 기술분야별로 경부고속철도 건설사업에의 전산수치해석기법의 활용현황 및 고속철도 구조물에 발생하는 특수문제 해결에의 활용등에 대하여 본 공단 토목제도연구실의 연구개발 현황과 함께 설명하고자 한다.

### 2. 교량구조물 분야

#### 2.1 차량과 교량구조물과의 동적 상호작용

고속철도 교량구조물의 정적 설계 및 해석, 시공도중의 구조검토에는 유한요소해석에 의한 전산수치해석기법이 주로 사용된다. 즉 PC-Box교가 주종을 이루고 있는 경부고속철도 교량구조물의 설계 및 해석, 시공중에 발생할 수 있는 특수문제 해석에는 일반적으로 사용되는 PC-Box 전용수치해석 프로그램(SPCFRAME, RM 등)과 범

\* 한국고속철도건설공단 토목제도연구실 노선구조연구팀장

\*\* 한국고속철도건설공단 토목제도연구실 실장

용해석 프로그램(ADINA, ABAQUS 등)이 사용되고 있으며, 이외에도 설계 및 연구용 전산프로그램들이 개발되어 일부 사용되고 있다. 그러나 고속철도 교량구조물의 경우 일반 교량구조물과는 달리 고속으로 주행하는 열차의 동적특성을 고려한 설계 즉 차량과 교량과의 동적상호작용 특성을 고려한 특수 설계 및 해석이 수행되어야 한다. 즉 고속열차가 교량을 통과할 때 열차와 교량의 상호작용으로 인하여 정적해석에서 예기치 못했던 과대응력 및 변위가 발생할 수 있다. 이러한 과대응력은 교량의 안전성 및 수명에 큰 영향을 미치고 과대변위는 차량의 주행안전성에 영향을 미친다. 또한 과대응력이 발생하지 않을지라도 열차동하중의 주기적인 재하는 교량의 피로파괴를 유발할 수 있으며, 교량과 차량과의 상호작용으로 어느 한쪽에 공진현상이 유발함으로서 승차감에 큰 영향을 줄 수 있다. 따라서 반드시 이러한 영향에 대한 사전검토와 이를 바탕으로한 안전설계는 매우 중요한 일이다. 차량과 교량구조물과의 상호작용에 영향을 주는 요인은 크게 차량의 동특성 측면과 교량의 동특성 측면으로 구분된다. 차량의 동특성 요인은 열차의 속도 및 차량의 구성, 차체간의 관절형 연결(TGV 차량의 경우), 현수장치의 일, 이차 스프링 및 댐퍼의 물성치, 열차의 축중 등이 있다. 그리고 교량의 동특성 요인은 교량의 형식 및 제원, 교량상의 궤도형식 및 표면조도, 교각과 상판과의 연결방법 등이 있다. 이와 같이 많은 요소들에 의하여 상호작용의 영향도 다르게 나타나므로 예기치 않은 결과로 인한 피해를 막기 위해서는 모든 고속철도 교량의 설계시 이들에 대한 영향에 대한 검토가 필수적이라 하겠다. 따라서 교량의 이러한 동적문제를 해석할 수 있는 수치해석 프로그램들이 개발되어 일부 사용되고 있다. 그림 1은 위에서 언급한 상호작용에 영향을 주는 요소들을 종합적으로 고려하기 위하여 본 공단 연구실에서 개발한 TGV 차량과 교량의 동적 상호작용해석을 위한 수치모형의 일례를 나타낸다. 이러한 모형을 사용한 수치해석결과는 교량의 동적 설계검토에 만족스럽게 활용할 수 있다. 그러나 열차 각 부재에서의 동특성 응답 및 승차감의 해

석을 위해서는 차량의 3차원 모형화, 레일과 차륜의 접촉역학 등 보다 많은 연구가 진행되어야 하겠다.

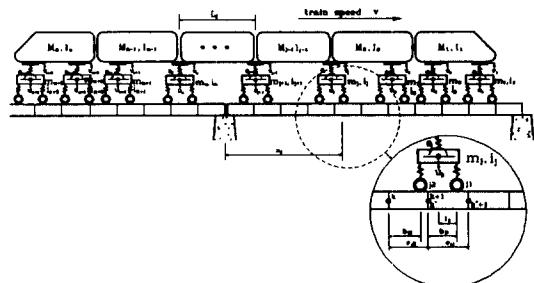


그림 1 열차와 교량과의 상호작용 해석모형

## 2.2 교량상의 궤도축력 및 열차시동 / 제동하중

고속철도는 고속으로 주행하는 열차의 주행안정성 및 승차감 확보를 위하여 장대레일로 부설된다. 그러나 특히 장대교량상에 장대레일이 부설되어 있는 경우 온도변화에 의하여 궤도와 교량은 수축 또는 팽창을 하게되며 이에 따라 레일에서는 일반 토공구간에 설치된 레일보다 큰 응력과 변형이 발생하게 된다. 또한 교량은 상판을 따라 전달된 마찰응력에 의하여 종방향변형이 유발되게 된다. 이러한 레일의 응력 및 변위는 궤도의 유형 및 궤도구성품의 물성, 교량의 경간 및 이동점 또는 고정점의 배치에 따라 영향을 받는데 특히 교량의 이동부와 고정부의 경계에서 과대응력이 발생하여 레일이 파단될 수 있다. 따라서 이러한 궤도축력의 안정성검토에 교량과 레일은 보요소로 궤도체결구와 도상을 Winkler 탄소성기초로 모형화한 조합 유한요소해석 기법을 사용할 수 있다. 또한 열차가 교량상에서 급제동하거나 급시동할 경우 열차의 관성력이 궤도를 통하여 교량에 전달되므로 궤도축력과 비슷한 역학적 과정으로 궤도 및 교량의 안전성을 저해한다. 특히 궤도축력과 제동 및 시동하중의 조합될 경우 그 영향이 심각하므로 위의 궤도축력해석과 동일한 조합 유한요소해석에 의한 수치해석으로 검토할수 있으며 더욱더 심도있는 연구가 필요하다 하겠다. 그림 2는 위에서 언급한 교량의 거동에 영향을 주는 궤도축력의 산

정을 위하여 본 공단 연구실에서 개발 발전시키고 있는 유한요소해석의 해석모형이다.

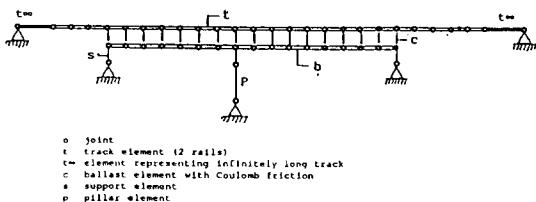


그림 2 교량상의 궤도축력 산정을 위한 해석모형

### 3. 터널구조물 분야

#### 3.1 공기압 및 미기압

차량이 200km/h 이상으로 터널내부를 주행시 공기의 압축성질에 의하여 압축파가 발생하며 이러한 압축파는 터널출구 부분에 미기압파라 불리우는 충격파를 발생시켜 심할 경우 충격소음을 일으킨다. 그림 3은 이러한 충격소음을 일으키는 미기압파의 발생특성을 나타내는데 터널입구에서의 고속열차의 진입에 따른 압축파의 발생(generation), 터널내부를 통한 빠른 속도의 압축파의 전파(propagation), 터널출구에서의 미기압파라고 불리우는 충격파의 방출(radiation) 등의 세부분으로 나뉘어진다.

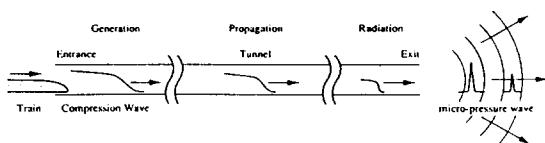


그림 3 미기압파의 발생

또한 터널내를 주행중인 열차 내외부에는 압력변동이 발생하며 이러한 압력변동의 양이 클 경우 승객들은 귀의 이명현상을 비롯한 불쾌감을 느끼게 된다. 따라서 충격소음을 일으키는 미기압 및 이명현상을 일으키는 압력변동은 터널단면적, 열차의 속도 및 단면적, 열차의 밀폐도등과 밀접한 관계를 가지며 터널이 장대화될수록 더욱 심해진

다. 따라서 위의 각종 영향조건등에 따라 충격소음 및 이명현상등이 일어나지 않도록 표준 터널내공단면적의 결정에 공기동역학 혹은 유체동역학적 이론에 의한 수치해석 즉 시뮬레이션기법이 사용되고 있다. 이러한 수치해석기법에 의하여 국내 전문기술진과 공동으로 일본의 Tatsuo Maeda, 영국의 Alan Vardy 등이 터널단면적 및 제원 그리고 TGV 열차특성을 고려하여 경부고속철도 터널의 미기압 및 공기압에 대해서 검토하였다. 그림 4는 수치해석기법에 의한 검토결과의 일례로 터널 단면적 및 열차의 속도변화에 따른 미기압파의 크기를 예측한 결과를 도시한 것이다. 이러한 수치해석기법은 지하역사에 열차가 통과할 때 텁승장의 사람에게 미치는 영향 등의 분석에도 활용되고 있는 중이다.

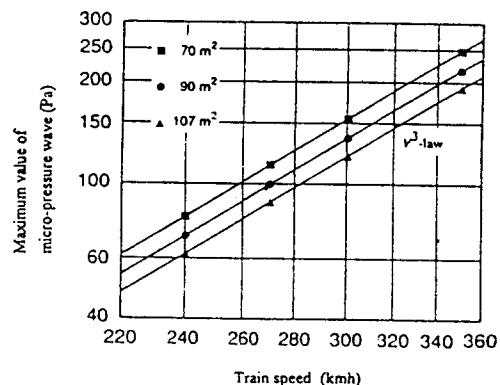


그림 4 터널단면적 및 열차의 속도변화에 따른 미기압파 예측

#### 3.2 안정성 평가, 역해석

고속철도 터널구조물 및 지하역사구조물등의 설계 및 해석, 시공도중 즉 굴착단계별 구조적 안정성평가 및 설계패턴변경 등의 특수문제 해석에는 유한요소해석 및 유한차분해석 등의 터널전용 수치해석 프로그램(FLAC, MR. SOIL 등)과 범용해석 프로그램(ADINA, SAP 등)등이 사용되고 있으며 이외에도 연구용 전산프로그램들이 개발되어 사용되고 있다. 본 공단 연구실에서 수행 중인 터널굴착에 따른 터널구조물의 구조적 안정

성평가에의 수치해석기법 활용의 일례로, 그림 5는 고속철도 표준지보패턴으로 굽착된 터널구조물의 지보재 및 주변암반의 변위 및 응력, 소성상태 등을 분석하기 위한 수치모델의 해석요소망을 나타내는데 지보재인 콘크리트는 Beam 요소로, 락볼트는 Cable 요소로, 굽착주변 암반은 Plane strain 요소로, 암반의 소성파괴는 Mohr-Coulomb 항복조건으로 모델링한 수치모델의 해석요소망이다. 그리고 그림 6은 이러한 수치해석결과의 일례로 굽착에 따른 터널 주변부위의 변위분포를 도시한 것이다. 아울러 본 공단 연구실에서는 위의 수

치해석기법을 안정성평가에의 활용이외에 역해석 기법의 개발에 활용하고 있다. 즉 경부고속철도 표준 설계패턴을 대상으로 터널 현장에서의 천단 및 내공변위 등의 계측치를 수치해석기법에 연결하여 암반의 물성 및 측압계수 등을 현장상태 즉 실제값과 근접하게 추정하는 역해석기법을 개발하여 터널구조물의 효율적인 구조적안정성 평가에 활용하기 위한 연구를 진행중에 있다.

#### 4. 토공구조물 분야

##### 4.1 연약지반 해석

고속철도 토공구조물은 상부 궤도구조물을 통하여 전달되는 열차하중을 안정하게 하부로 지지분포시키고 특히 고속주행에 큰 영향을 미칠수 있는 허용범위 이상의 침하가 발생하지 않아야 한다. 따라서 고속철도 토공구조물중에서는 특히 연약지반의 침하를 방지하기 위한 연약지반 강화공법의 효과를 분석하기 위하여, 그라우팅재나 stone-column 등의 보강재와 원지반과의 상호 역학적 거동분석을 모형화한 지반해석용 수치해석 프로그램이 활용될 수 있다. 그러나 원지반과 보강재의 거동은 복합체역학을 이용하여 분석할 수 있으며 이를 위하여는 탄성 및 탄소성 영역에 걸치는 평형 방정식 및 적합 방정식을 만족하여야 한다. 즉 원지반과 보강재의 소성거동은 그 성질상 다른 항복함수를 이용하여야 하는데 본 공단 연구실에서는 Non-Symmetric equation solver를 채택한 유한요소 해석기법을 연구개발중에 있으며 이러한 연구결과는 현재 현장에서 채택하고 있는 stone-column과 그라우팅재의 타설 깊이와 지지력과의 관계를 구해낼 수 있을뿐만 아니라 경제적 시공을 위한 가변적 근입깊이를 산정할 수 있게 된다. 또한 함수비의 변화를 추적해 낼 수 있으며 배수효과에 대한 수치적 모형화를 꾀할 수 있을 것이다.

##### 4.2 지반진동 예측

고속의 열차주행에 의하여 교량등의 상부구조물에 작용하는 동적하중은 하부지반으로 전파된

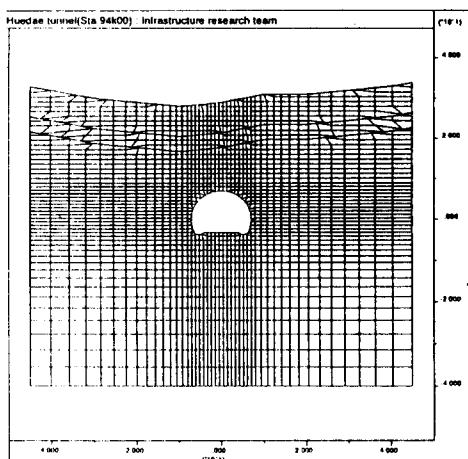


그림 5 수치모델의 해석요소망

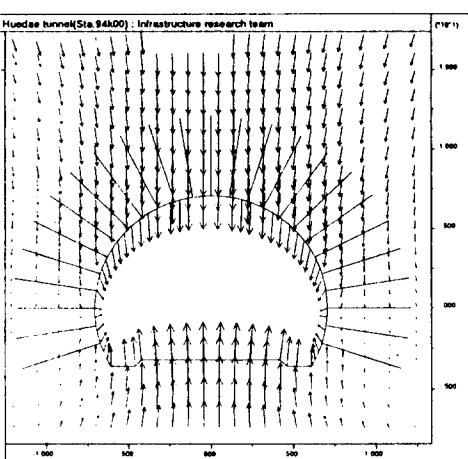


그림 6 터널 주변부위의 변위의 분포도

다. 따라서 지반으로 전파된 진동은 주변 건물이나 구조물 등에 영향을 줄 수 있으므로 이러한 진동에 대한 적절한 방진대책을 수립하기 위해서는 진동의 영향을 정확히 예측하는 것이 필요하다. 그러므로 진동의 영향을 예측하기 위해서는 기존의 경험식으로 추정할 수 있으나 경험식에 의한 방법은 지반과 구조물의 물성 및 형상이 비교적 단순한 경우에 적용이 가능하다. 따라서 다중의 지반으로 전파되는 진동예측을 위해서는 지반-구조물 상호작용 해석기법에 의해 분석함으로써 정확한 진동레벨의 예측이 가능하다. 따라서 지반-구조물 상호작용 해석 전용 프로그램 등에 의해 진동예측이 수행되고 있다. 본 공단 연구실에서는 육상 고가교에서 지반으로 전파되는 지반진동을 예측하기 위하여 앞에서 언급한 차량과 교량의 동적상호작용 해석에 의해 구해진 교각에서의 동적 하중을 대상으로 주변건물에 전파된 지반진동을 예측하는 지반-구조물 상호작용 해석기법을 개발하였으며 이렇게 예측된 진동레벨을 국내외의 진동허용규준과 비교하여 진동에 의한 피해예측 및 이에따른 방진대책마련에 활용하고 있다. 그림 7은 본 공단 연구실에서 개발한 유한요소와 무한요소(infinite element)를 조합한 지반진동 예측 수치해석기법 의해 진동해석을 수행하기 위한 수치해석모형이다. 그림 8은 이러한 수치해석 결과의 일례로 지반으로 전파된 동적하중에 의한 지반과 주변구조물의 변위형상이다.

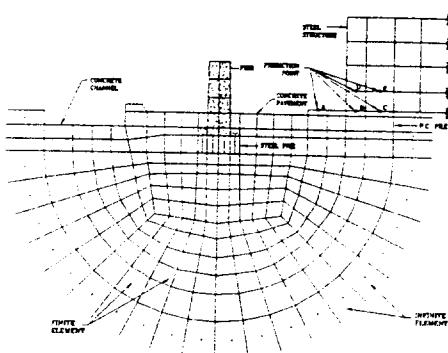


그림 7 지반진동 해석을 위한 수치모형

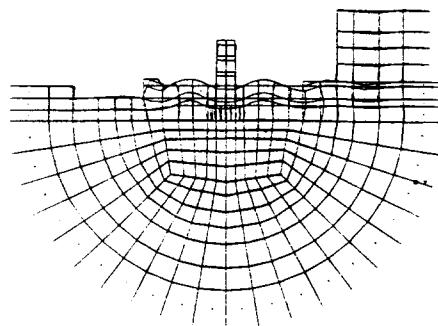


그림 8 지반과 주변구조물의 변위형상

## 5. 궤도구조물 분야

고속철도 궤도구조물은 고속으로 주행하는 열차의 주행안정성 및 승차감을 확보하고 열차하중을 흡수하여 안정하게 교량, 터널, 토공구조물 등 하부구조물로로 지지 분포시켜야 한다. 차량의 동적하중에 의한 궤도구조물의 동적거동은 열차의 동특성과 열차속도, 궤도의 유형 및 궤도재료의 물성치에 따라 달라진다. 따라서 열차주행시 차륜을 통하여 작용하는 동하중에 의한 궤도의 설계 및 해석과 하부구조물의 동적해석에 필요한 하부구조물에 전달되는 열차의 동하중 산정을 위해서는 궤도의 동적해석 즉, 차량과 궤도의 상호작용 해석기법이 필요하다. 이러한 차량과 궤도의 상호작용 해석에는 레일, 침목, 기초를 모형화하는 방법에 따라 1 중보 및 2 중보 모델해석등으로 나뉘어져 개발된 수치해석기법에 의해 각각 설계 및 해석이 수행되고 있다. 그림 9는 2 중보 모델해석에 의해 본 공단 연구실에서 개발한 이동축중하중

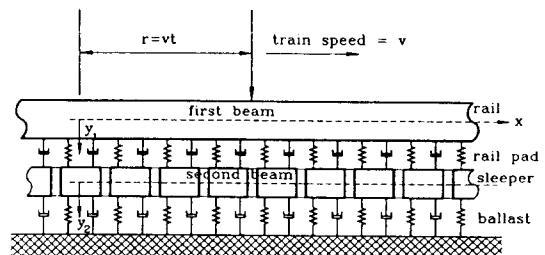


그림 9 이동축중하중을 받는 궤도의 수치해석모형

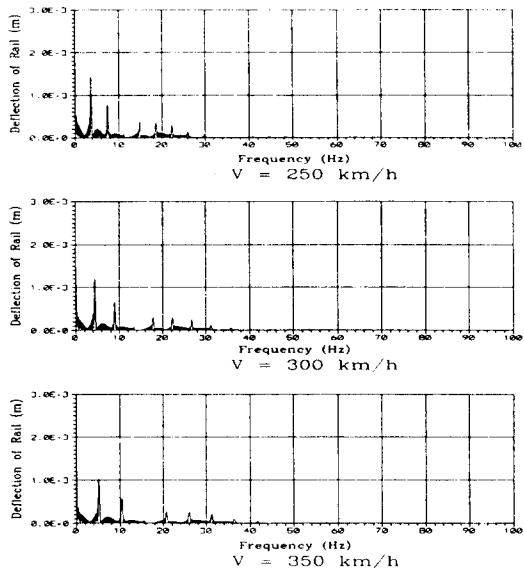


그림 10 TGV 이동축중하중을 받는 유도상궤도의 변위의 복소응답

을 받는 자갈도상궤도의 수치해석모형이다. 그림 10은 이러한 수치해석결과의 일례로 TGV 이동축중하중을 받는 유도상궤도의 변위의 복소응답을 도시한 것이다.

## 6. 결 언

시속 300km로 주행하는 고속철도 열차의 주행 안정성 및 승차감을 확보하기 위해서는 열차하중을 고려한 정교한 정적, 동적해석 및 설계가 이루어져야 한다. 따라서 차량과 궤도의 동적상호작용 및 차량과 교량의 동적상호작용, 터널의 미기압 및 공기압, 대단면 터널굴착의 안정성평가, 열차주행에 의한 지반진동의 예측 등에 전산수치해석 기법의 활용 및 개발이 현재 활발히 이루어지고 있다. 그러나 고속철도 보유국을 포함한 선진국들에 비하면 이러한 전산수치해석분야에 있어서 아직도 더 많은 연구 및 개발이 본 공단을 포함하여 학계 및 연구소에서 이루어져야 하겠으며, 본 경부고속철도 건설사업으로 인하여 차량, 전기시설분야의 각종 첨단기술개발 및 발전과 더불어 하부 토목구조물의 건설 및 설계 해석분야에 많은 발전이 기대된다 하겠다. ■