

터널내 교량의 이동차량하중 작용시 충격계수에 대한 사례연구

김재민¹⁾ · 이종건²⁾ · 이익효³⁾ · 이두화⁴⁾

A Case Study on Impact Factor of Bridge in Tunnels Subjected to Moving Vehicle Load

Jae-Min Kim, Jung-Geon Lee, Ik-Hyo Lee and Du-Hwa Lee

ABSTRACT This paper presents results of dynamic analysis for a bridge in intersection part of two tunnels subjected to moving vehicle load. Since such a bridge system is very unusual due to the fact that it is located in tunnel, the dynamic characteristics of the structure can not be assumed as conventional one. The structure investigated in this study is a reinforced concrete bridge in the intersection part of Namsan Tunnel-1 and Tunnel-2 in Seoul. It is supported by temporary steel structure which shall be constructed during the period of replacing lining in Tunnel-2. Dynamic analysis was carried out for the system using a finite element model constructed by general purpose FE program SAP2000. For this purpose, the structure, lining of tunnels, and surrounding rock were represented by finite elements, while the rock region is truncated and on its outer boundary viscous dampers were placed to simulate radiation of elastic waves generated tunnels. Several types of vehicle with various driving velocities were considered in this analysis. The FE model including vehicle loadings was verified by comparing calculated peak particle velocity with the measured one. From the analysis, the impact factor for the bridge was estimated as 0.21, which indicates that the use of upper bound for the impact factor in design code is reasonable for this kind of bridge system.

Key words : bridge, impact factor, moving vehicle load, soil-structure interaction

초 록 본 연구에서는 2개 터널의 교차부에 설치된 교량에 이동차량하중이 작용될 때 동적해석결과를 제시하였다. 이와 같은 터널내에 위치한 교량은 매우 희귀한 사례로서 구조물의 동적특성은 통상적인 것으로 가정할 수 없을 것이다. 본 연구에서 조사한 교량은 서울 남산1호터널과 남산2호터널의 교차부에 설치된 철근콘크리트교이다. 교차부는 강구조물로 된 가시설구조물에 의해 지지되며 이는 2호터널내의 라이닝이 교체되는 기간 동안에 설치될 것이다. 동적해석은 범용유한요소해석 프로그램인 SAP2000을 이용하였다. 이때 구조물, 터널의 라이닝 그리고 주변 암반은 3차원입체요소로 표현되었으며 터널에서 방사되는 탄성파에너지를 모의하기 위하여 외부경계에 점성감쇠장치를 설치하였다. 주행속도에 따른 몇 가지 차량형태를 해석에서 고려하였다. 차량하중을 포함한 유한요소모델은 예측된 속도와 계산된 최대질점속도를 비교하여 검증되었다. 해석으로부터 이 교량에 대한 충격계수는 0.21로 추정되었다. 그러므로 이와 같은 교량구조물의 설계시 충격계수는 설계시방서에서 정한 상한값을 사용할 경우 안전측일 것으로 판단되었다.

핵심어 : 교량, 충격계수, 이동차량하중, 지반-구조물 상호작용

1. 서 론

남산2호터널은 왕복2차선으로 1970년에 건설되어 서울시 이태원동과 장충동 사이의 교통 소통을 원활하게 하는데 크게 기여해 오고 있다. 이 터널은 한남동에서 퇴계로방면의 편도 2차선 교통을 분담하는 남산1호터널과 약 69도의 사잇각을 가지면서 Fig. 1과 같이 교차한다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 1호터널의 도로와 2호터널의 상단 반원부분이 교차하는데, 이와 같이 교량 구조물이 터널 교차부에 설치되는 경우는 매우 희귀한 사례로서 일반적인

설계방법을 적용할 때는 충분한 검토가 필요할 것이다. 일반적으로 2개 터널의 교차부에서는 응력집중이 예상되므로 이들의 설계, 시공, 유지 보수시에 터널의 일반부 보다 세심한 주의를 기울여야 한다. 상기 두 터널의 교차부에서 1호터널 라이닝이 2호터널과 만나면서 발생하는 지

- 1) 정회원, 여수대학교 해양토목공학과, 전임강사
 - 2) 학생회원, 여수대학교 해양토목공학과, 석사과정
 - 3) 정회원, 여수대학교 해양토목공학과, 교수
 - 4) 정회원, (주)삼보기술단, 대표이사
- 원고접수일 : 1999년 6월 3일
원고 심사 완료일 : 1999년 7월 17일

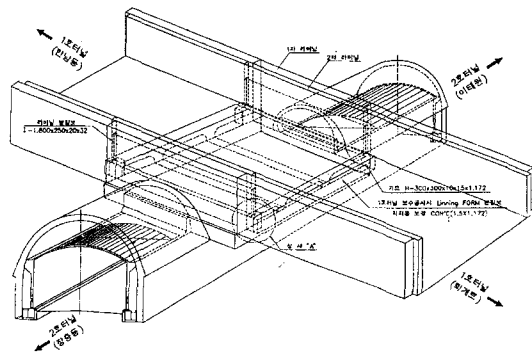


Fig. 1. Configuration of intersection part of Namsan Tunnel-1 and Tunnel-2 (Before Repairing)

는 차량하중에 의한 하중은, 1호터널 교차부 라이닝 하단에 보강된 I-형강, 1호터널의 T-형보 및 하단 슬랩을 통하여 분산되고 암반 및 2호터널 라이닝 및 내부구조물에 의하여 최종적으로 지지하도록 되어 있다(Fig. 1 참조). 그러나 교차부에 교좌장치나 신축이음장치는 없다.

최근 2호터널의 라이닝과 암반사이의 공동 존재 가능성, 라이닝 균열에 의한 누수 등의 문제가 심각해짐에 따라 남산 2호터널의 전반적인 보수 및 보강이 진행되고 있다. 이에 따라 남산 2호터널 개수공사중 터널 교차부의 차량 통과시 동적거동에 대한 관심이 커지게 되었다. 본 연구에서는 시공중 상태에 대한 교차부 교량의 엄밀한 동적해석을 수행하여 시공중 설치되는 가시설구조물의 설계와 터널의 안전도평가에 효과적으로 활용되고자 한다. 본 연

구에서 검토한 시공중 가시설구조물은 Fig. 2에 간략히 나타내었다.

일반적으로 차량의 주행에 의하여 구조물 및 지반에 작용되는 하중은 준정적(quasi-static) 성분, 조도(roughness) 성분, 제동력성분으로 구분되며 노반을 통하여 지반에 직접 하중이 전달되는 철도의 일반부 주행과 같은 경우를 제외한 교량구간에서는 준정적성분의 영향이 조도성분에 비하여 매우 큰 것으로 보고되고 있다.^(1,2) 여기서 제동력은 다시 구름저항력(rolling friction)과 미끄럼마찰(sliding friction)의 합으로 나타내어지지만, 수학적 표현의 어려움 등으로 인하여 보수적인 가정에 의하여 마찰저항만을 고려한 해석이 많이 이루어지고 있다. 그러나 이의 영향은 시간이 비교적 긴 교량 구조물에는 크게 나타나기도 하지만 본 연구의 대상과 같이 시간이 10 m가량이고 구조물이 구속되어서 교통하중에 의한 횡방향 거동의 영향이 매우 작은 경우에는 무시될 수 있다. 현 도로교시방서³⁾에서는 상기 차량하중의 동적효과에 대한 영향을 활하중(L)을 $L(1+I)$ 로 크게 작용시켜 정적해석에 고려하도록 하고 있다. 이때 I는 양의 값을 가지는 충격계수(impact factor)로서 다음과 같이 정의된다.

$$I = \frac{y_{dynamic} - 1}{y_{static}} \quad (1)$$

여기서 y_{static} 과 $y_{dynamic}$ 은 차량하중을 각각 정적 및 동적으로 작용시켰을 때 구조물의 절대 최대응답을 나타낸다.

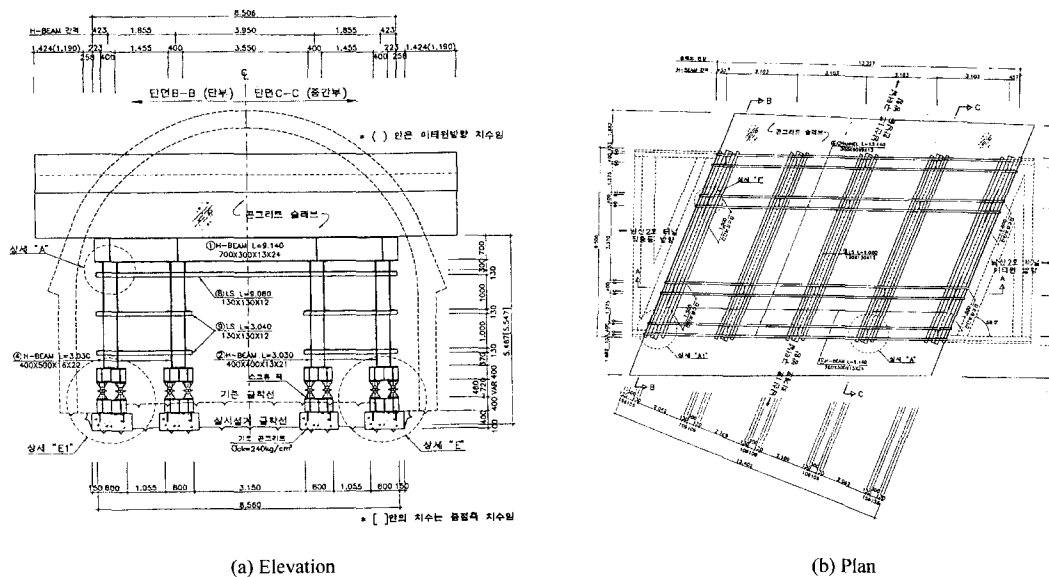


Fig. 2. Configuration of temporary steel structure under repairing

충격계수는 구조형식 및 차량하중의 특성에 따라 변하며 현 국내 도로교시방서에서는 지간의 함수로 주어지고, 상한값을 0.3으로 정하고 있다.

본 연구에서는 남산1호터널(구터널)과 2호터널의 교차부에서 1호터널 차량통과에 의한 동적거동해석을 2호터널의 개수공사 시공중 교차부 가시설구조물 설치후 상태에 대하여 수행하였다. 이를 위하여 터널구조물(라이닝 및 내부구조물), 교차부 보강구조물, 주변 암반을 범용유한요소 해석용 S/W인 SAP2000 Nonlinear의 입체요소와 프레임요소로 모형화하고, 암반에서 무한영역으로 방사되는 탄성파에너지를 모의하기 위하여 해석모형의 외부경계에 암반의 파동전파특성을 고려한 감쇠장치를 설치하여 이의 영향을 근사적으로 고려하였으며, 차량이 남산1호터널을 따라 주행하도록 하중을 설정하여 동적해석을 수행하였다. 마지막으로 차량하중의 정적재하에 의한 응답과 동적재하에 의한 응답의 차이를 비교하여 시공중 가시설구조물의 설계에 사용되는 충격계수를 구하였다.

2. 터널구조물 동적 모델링 및 하중조건

2.1 교차부 및 터널구조물의 유한요소 모형화

본 연구와 유사한 해석 범주에 속하는 지반-구조물 상호작용해석에서 구조물을 지지하는 지반의 구조물 응답에로의 영향은 크게 두가지로 설명될 수 있다. 첫번째 효과는 지반의 유연성으로 인한 구조물 고유진동수의 변화이고, 두번째는 지반의 반무한성(또는 무한성)으로 인한 감쇠비의 증가이다. 이에 따라 일부 구조공학자들은 지반과 접하는 구조물 경계(지점)를 고정시킨 경우인 지점고정 구조물의 자유진동해석을 수행하고, 주변 지반의 영향은 단순한 지반에 대한 결과나 경험적지식을 바탕으로 고유진

동수를 낮추고 모우드감쇠비를 증가시켜서 고려하기도 한다.⁴⁾ 이와 같은 접근방법은 지반조건과 구조형상이 단순한 경우 개략적인 동특성의 파악과 실용적인 측면에서 설계 시 유용하게 사용될 수 있다. 그러나 본 연구에서와 같은 구조물을 지지하는 지반의 기하학적 형상이 대단히 복잡한 경우 가용한 이론해가 없고 본 연구에서 고려하는 터널내 교량에 대한 경험적인 연구도 찾아보기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 전체 암반-구조계를 직접 모형화하는 방법을 사용하였다.

일반적으로 점진동원(point source)에 의한 진동이 탄성체를 통하여 실체파(body wave)의 형태로 전파될 때 진원으로부터 거리의 제곱에 역비례하여 진폭이 감소한다.⁵⁾ 본 연구에서는 이를 고려하여 교차부를 포함하는 남산1, 2호 터널을 Fig. 3과 같이 교차부의 진동에 의한 진폭이 충분히 작아지는 터널크기(약 10 m)의 3배 거리까지 유한요소를 이용하여 모델링하였다. 모형화 할 영역의 모서리는 남산 1호터널 중심선과 평행하도록 하였고 교차점이 중앙에 위치하도록 하였다. 그리고 2호터널과 교차부는 Fig. 2에 보인 경사진 형상을 있는 그대로 입체요소를 이용하여 모형화하였다. 다만 남산1호터널 T-형보는 모형화 과정의 편의를 위하여 등가슬랩으로 나타내었고, 이 부분의 질량밀도를 작게 하여 등가슬랩의 질량이 실제 T-형보와 같게 하였으며, T-형보와 휨강성이 같도록 등가슬랩의 강성을 감소시켰다. 모형화에 사용된 유한요소는 SAP2000의 8절점 입체요소(solid element)와 6절점 쉘기모양 입체요소로서, 8절점요소로는 휨거동을 개선시키는 9개의 비적합변형모드가 추가된 요소를 사용하였다. 암반과 구조물의 재료비선형 및 탄소소성효과는 차량하중에 의한 비선형거동이 작다고 판단되어 해석시 고려되지 않았다.

그리고 슬랩 및 주변구조물과의 경계조건은 Fig. 4와

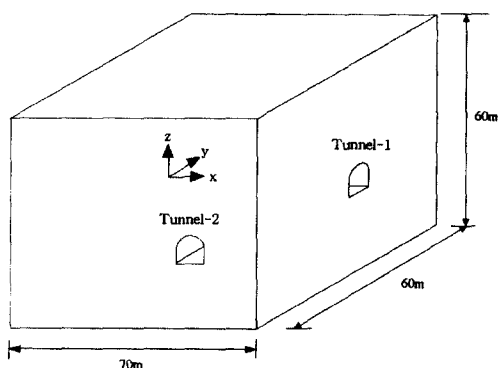


Fig. 3. Extent of finite element modeling for surrounding rock medium

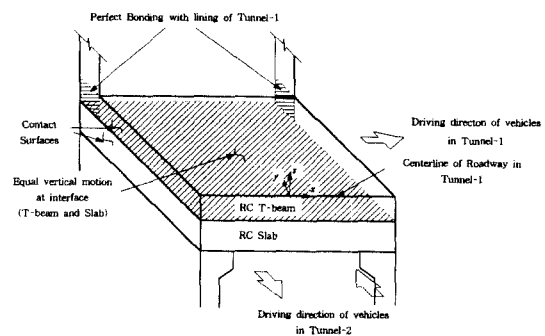


Fig. 4. Boundary conditions at bridge in intersection part of Namsan Tunnel-1 and Tunnel-2

같이 구현하였다. 즉, T-형보와 슬랩의 접촉면, T-형보 및 슬랩과 주변 암반사이의 접촉면에서 상대적인 미끄러짐은 허용하고 접촉면의 법선방향 변위는 같도록 하였다. 이때 접촉면에서 마찰의 영향은 무시하였다. 그리고 슬랩과 2호터널의 라이닝 및 내부구조물과 접하는 경계면은 완전부착으로 가정하였다. 유한요소모형 작성시에 사용된 교차부에서 남산1호터널 T-형보 및 슬랩에서의 경계조건은 Fig. 4에 요약하여 나타내었다.

한편, 1호터널과 2호터널에서의 환풍을 위하여 설치된 2차구조물들은 이들이 전체구조계의 동적거동에 미치는 영향이 거의 없을 것이므로 해석에 포함시키지 않았고, 1호터널의 외측 1차라이닝과 내측 2차라이닝의 압축강도차이가 크지 않아서 하나의 재료로 모델링하였으며, 이 때 압축강도값은 단면적에 대한 가중평균을 취하여 산정하였다.

철근콘크리트로 이루어진 터널의 라이닝, 내부구조물, 교차부 T-형보 및 슬랩의 질량밀도는 보통콘크리트로 가정하여 2,300 kg/m³을 사용하였고⁶⁾ 이들의 탄성계수는 도로교시방서 기준을 사용하여 추정하였다.⁶⁾ 그리고 암반은 최초 건설시 암반에 대한 시험자료를 참조하여 압축파속도(V_p) = 3000 m/sec, 전단파속도(V_s) = 1732 m/sec, 프아송비(ν) = 0.25를 사용하였다. 해석에 사용된 각 영역의 물성치는 Table 1에 정리하였다.

동적해석을 위한 유한요소모형의 체눈 작성시에는 정적해석에서 고려하는 응력집중부 체눈세분화법 이외에도 해석시 고려하는 최대주파수(f_{max} , H_n), 매질의 전단파속도를 고려하여 최소전단파장을 계산하고 이의 공간적인 변화를 유한요소로 적절히 나타내도록 하여야 한다. 본 연구에서 사용하는 유한요소는 1차요소의 하나인 8절점 입체요소이므로 위의 최소 전단파장을 8개의 선형 보간함수로 근사한다고 할 때, 체눈작성시 기준이 되는 최대체눈길이(h_{max})는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$h_{max} = \frac{1}{8} \frac{V_s}{f_{max}} \tag{3}$$

통상 차량통과에 의한 응답을 산정할 때 구조물에 주된 영향을 미치는 주파수 범위는 50Hz이내이므로 이를 기준으로 본 연구의 대상문제에 대한 최대체눈길이(h_{max})는 약 4.33 m이다. 이에 따라 본 연구의 유한요소모형 작성시에 요소의 최대크기가 4.33 m이내가 되도록 하였다. 그러나 교차부와 교차부 인접부는 응력 집중이 예상되어서 위의 기준보다 작은 변질이 1.5 m내외의 세분화된 체눈을 Fig. 5 와 같이 작성하였다. 한편, 철골가시설구조물은 SAP2000의 프레임요소를 사용하여 모형화하였다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 가시설구조물의 지지점은 2호터널 종방향과 횡방향으로 놓여져 있어서, 본 연구에서는 2호터널 방향으로 극좌표계를 설정하고 가시설구조물 지점에서 한방향 회전만을 허용하도록 하였다.¹³⁾ 모든 철골 가시설구조물은 부재의 단면중심을 따라 모형화하였고 상부 콘크리트 슬랩 및 하부 지지 암반과는 인접 절점간 변위가 같도록 구속조건을 적용하여 변위적합조건을 만족하도록 하였다. 해석에 사용된 프레임요소의 주요 단면계수값은 Table 2에 정리하였다. 유한요소모형의 사용된 전체 절점갯수는 9,953개 이고 전체유한요소갯수는 8,016개 이었다.

2.2 탄성파에너지의 방사현상 모형화

본 연구의 암반영역과 같이 구조물을 둘러싸는 무한대

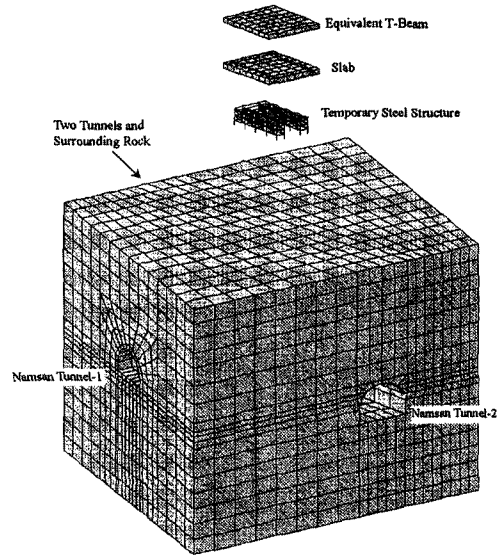


Fig. 5. Finite element mesh used in SAP2000 analysis

Table 1. Material properties of structures and rock region used in FE analysis

Regions	Mass Density (kg/m ³)	Young's Modulus* (kgf/cm ²)	Poisson's Ratio (ν)
Rock	2,600	1.988 × 10 ⁵	0.25
Lining of Tunnel-1	2,300	2.225 × 10 ⁵ (220)	0.18
T-Beam	2,300	2.324 × 10 ⁵ (240)	0.18
Slab	2,300	2.013 × 10 ⁵ (180)	0.18
Steel Member	7,827	2.100 × 10 ⁶	0.30

* Value in parenthesis is compressive strength of concrete in kgf/cm².

Table 2. Properties of temporary steel structure used in FE analysis

Structural Members	Cross-sectional Area (m ²)	Second moment of Inertia (m ⁴)	
		I ₂₂	I ₃₃
H-Shape Beam	2.29 × 10 ⁻²	1.08 × 10 ⁻⁴	1.95 × 10 ⁻³
H-Shape Column	2.49 × 10 ⁻²	2.35 × 10 ⁻⁴	1.13 × 10 ⁻³
2C-Shape (strong axis)	1.06 × 10 ⁻²	1.17 × 10 ⁻⁴	3.26 × 10 ⁻³
2L-Shape (strong axis)	5.95 × 10 ⁻²	9.60 × 10 ⁻⁶	9.10 × 10 ⁻⁴
2L-Shape (weak axis)	5.95 × 10 ⁻³	9.60 × 10 ⁻⁶	3.44 × 10 ⁻⁴
L-Shape X-Bracing	2.98 × 10 ⁻³	4.80 × 10 ⁻⁶	4.80 × 10 ⁻⁶

질은 구조물에서 발생하는 진동에너지를 파동의 형태로 외부 무한영역으로 전파하게 된다. 진원으로 부터 일정거리 떨어진 면을 통과하는 파동에너지를 전체 값은 진원에서 입력 진동에너지와 같다는 에너지 보존조건을 적용

할 때, 진원으로 부터 일정거리 R만큼 떨어진 면의 전체 면적은 R²의 차원이 되므로 에너지밀도는 R²에 역비례하여 감소한다고 간단히 분석 할 수 있다. 이와 같이 매질의 무한성으로 인한 진폭의 감쇠효과를 방사감쇠(radiation damping)라고 하며 이는 진원의 진동주파수에 매우 민감한 것으로 알려져 있다. 따라서 이 방사감쇠효과를 정확하게 고려하기 위해서는 동적해석을 주파수영역해석법을 사용하여야 한다.^{5,7,8)}

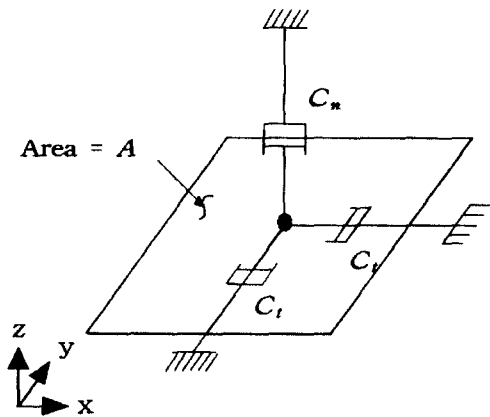
그러나 주파수영역해법은 실용적인 측면에서 많은 제한점이 있어서 방사감쇠를 시간영역에서 고려하는 연구가 많이 수행되어 오고 있다.⁹⁾ 이들 중 일반적으로 가장 많이 사용되는 방법은 구조물을 포함한 근역(near field)은 유한요소를 이용하여 최대한 진원에서 멀리까지 모형화하고 유한요소의 외부경계에 Fig. 6과 같이 점성감쇠장치를 부가하여 해석하는 방법이다. 이 때 점성감쇠장치의 감쇠계수는 다음과 같이 P파와 S파의 전파속도, 질량밀도, 통과면의 면적(A)을 고려하여 다음과 같이 계산할 수 있다.¹⁰⁾

$$C_n = \rho AV_p, C_t = \rho AV_s \tag{4}$$

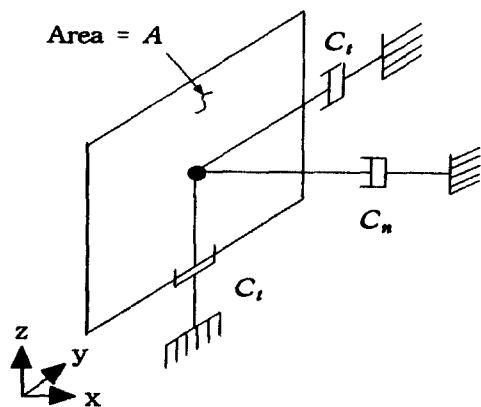
Fig. 5에 보인 유한요소모형에 사용된 점성감쇠장치 갯수는 6,651개 이었다.

2.3 차량하중 모형화

차량의 주행에 의한 구조물의 진동해석 목적은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫째는 진동에 의한 구조물의 안전성에 관한 것이고, 두번째는 진동으로 인한 사용성의 문제이다. 통상 구조물의 안전성과 관련이 있는 동적성분은 50 Hz미만의 성분이고, 사용성과 관련한 환경진동 문제는 50 Hz이상의 고주파수 성분이다.¹¹⁾ 그리고 차량하중의 성분중 조도성분은 고주파수 성분이 지배적이므로 주로 환경진동에 영향을 미친다고 할 수 있다. 반면에 준정적성분은 구조물의 안전성과 관련한 진동문제의 주요 하



(a) On upper and lower boundaries



(b) On side boundaries

Fig. 6. Viscous dampers on outer boundaries of FE model

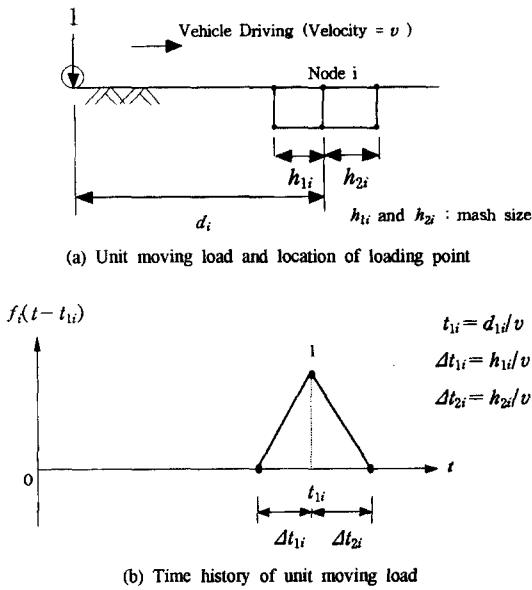


Fig. 7. Quasi-static component of unit moving load

중이 된다.

유한요소 해석모형에서 준정적하중은 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다. 즉 차량의 한 축하중을 매 해석시간단계마다 차량의 주행속도를 고려하여 하중작용점의 위치를 달리하여 재하한다. 이 때 하중의 작용점이 유한요소 내부에 위치하게 되면 Dirac Delta함수로 표현되는 집중하중을 유한요소 정식화에서 분포하중을 절점하중으로 변환하는 공식에 대입하면 이를 간단히 계산할 수 있다. 유한요소절점이 Fig. 7과 같이 차량의 주행선에 놓일 때 임의 절점 i에서 시간에 따른 이동하중의 준정적성분 $f_i(t)$ 는 Fig. 7(b)와 같이 삼각파 형태의 충격하중이 된다.

그러므로 절점 i에 작용되는 트럭하중 $F_i(t)$ 은 아래와 같이 단위 이동축하중의 선형중첩으로 표현할 수 있다.

$$F_i(t) = P_1 f_i(t-t_{i1}) + P_2 f_i(t-t_{i2}) + P_3 f_i(t-t_{i3}) \quad (5)$$

그리고 절점 i에 작용되는 연행 트럭하중 $F_i(t)$ 는 위의 트럭하중이 일정한 지연시간을 가지면서 주기적으로 작용되는 것이므로 다음과 같이 다시 트럭하중을 선형중첩하여 구할 수 있다.

$$F_i(t) = F_i(t) + \sum_{k=1}^{N_i-1} F_i(t-k\Delta\tau) \quad (6)$$

여기서 N_i 는 전체 연행차량수, $\Delta\tau = d_i/v$ 는 인접 차량간 도착지연시간이고, d_i 는 인접 차량간 도착지연시간이고, d_i 는 인접 차량의 첫번째 축사이의 거리로서 Fig. 8(b)에서는 16.4 m이다.

2.4 하중조건

본 연구에서는 Fig. 8과 같이 대형버스하중(현대자동차 생산 AERO CITY BUS 기준)과 연행 DB-24트럭하중에 대한 교차부의 동적해석을 수행하였다. 차량하중은 남산1호터널 차선중앙에 재하한 경우와 2차선에 걸쳐서 구조물에 응력이 최대가 되도록 중앙부에 재하한 경우에 대하여 동적해석을 수행하였다.

3. 동적해석 결과 및 토의

본 연구에서는 범용 유한요소해석용 S/W인 SAP2000의 Ritz 모드벡터를 사용하는 시간이력해석법을 사용하여 동적해석을 수행하였다. 이 때 사용한 시간적분간격(Δt)은 최대 유효해석주파수를 100 Hz로 가정하여 1/200초 이하가 되도록하였고 Fig. 7(b)와 같은 하나의 삼각하중함수를 최소 30개 이상 세분화할 수 있도록 정하였다. 즉,

$$\Delta t \leq \min\left(\frac{\Delta t_{i1} + \Delta t_{i2}}{30}, \frac{1}{200}\right) \quad (7)$$

해석에 사용된 Ritz 모우드는 하중조건에 따라 간단한 예비해석을 하여 응답의 수렴성을 검토한 후 구조물 및

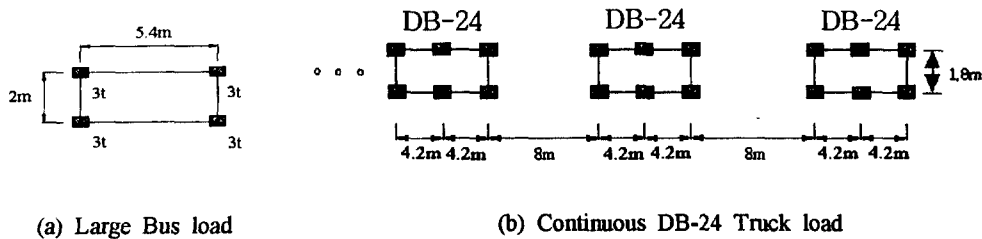


Fig. 8. Types of vehicle load considered in dynamic analysis

압반의 거동에 대하여 30개를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 Ritz모우드 해석법이 동적하중의 정적 변형형상을 참조하여 구성되므로 지진해석과 강제진동해석시에 해의 수렴성이 매우 우수한 것으로 알려져 있다.¹²⁾

3.1 대형 버스하중에 대한 남산2호터널 개수공사 전 상태의 동적해석

본 연구에서는 남산2호터널 개수공사 전 교차부 슬랩에서 계측된 진동기록을 이용하여 유한요소 해석모형을 간접적으로 검증하였다. 진동계측 당시의 교통량에 대한 조사자료가 없어서 평시 일반적인 교통차량 중 가장 큰 차량으로 여길 수 있는 만원인 대형버스를 하중으로 선택하고 이에 의한 슬랩에서 최대수직속도를 계측기록중 최대값과 비교하였다. 한 절점에 작용된 하중의 시간이력은 버스의 속력이 100 km/h라는 가정 아래 Fig. 9와 같이 구하였고, Fig. 10에 나타낸 슬랩중앙과 중앙에서 약간 떨어진 점의 수직속도를 구하였다. 이들의 시간이력곡선은 Fig. 11과 같고 Fig. 10의 A점에서 계산된 최대속도는 0.277 mm/s이었다. 이 결과는 A점 부근에서 계측된 최대 수직속도 0.21 mm/s와 비교할 때 본 연구의 결과가 계측치와 매우 유사함을 알 수 있었다.¹³⁾ 따라서 본 연구에서

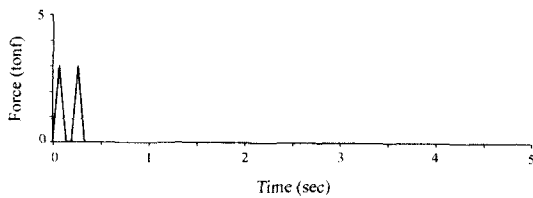


Fig. 9. Time history of large Bus load

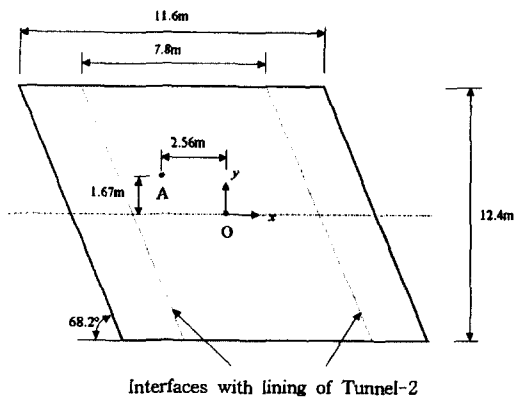


Fig. 10. Plan of bridge slab and location of observation point of vertical velocity

사용하는 해석모형은 차량하중에 의한 교차부 최대응답을 적절하게 평가할 것으로 판단되었다.

3.2 연행 DB-24 트럭하중에 대한 동적해석

남산 2호터널의 보수 공사중 가장 불리한 하중조건으로서 Fig. 8(b)와 같은 연행 DB-24하중을 고려하여 동적해석을 수행하였다. 차량하중의 차선재하는 단일차량에 대한 해석결과 중앙1차선 재하시에 동적효과가 가장 큰 것으로 분석되어 이에 대한 연행하중효과를 검토하였다. 차량의 주행속도는 30 km/h, 60 km/h, 100 km/h, 150 km/h인 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 5개의 차량이 연행할 경우 충분히 정상응답(stationary response)

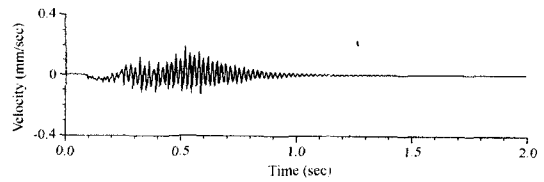


Fig. 11. Calculated vertical velocity at point A on slab of bridge before repairing Tunnel-2 due to moving Bus load (Total weight of Bus = 12.0 tonf, Velocity = 100 km/h)

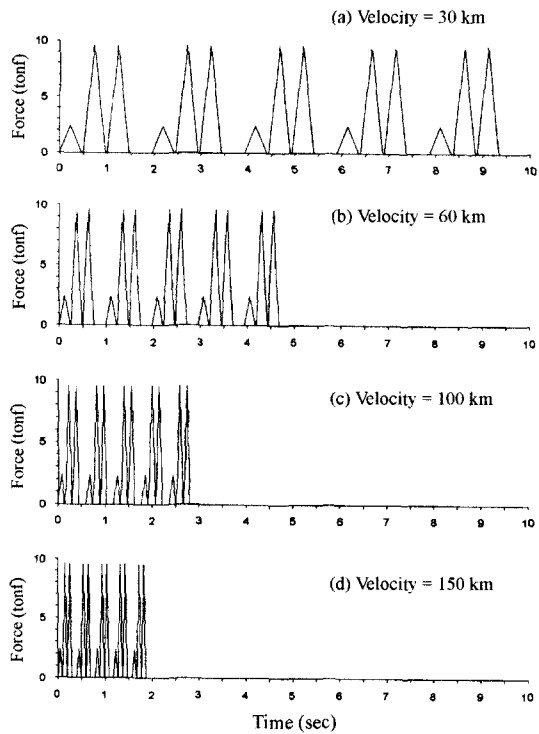


Fig. 12. Time histories of continuous DB-24 Truck load

Table 3. Maximum member forces in temporary steel structure subjected to continuous single-lane DB-24 Truck load along centerline of Namsan Tunnel-1

Member Force	Static Analysis	Dynamic Analysis*			
		$v = 30$ km/h	$v = 60$ km/h	$v = 100$ km/h	$v = 150$ km/h
Axial Force (kN)	-54.76	-55.52 (0.01)	-59.71 (0.09)	-58.87 (0.08)	-62.19 (0.14)
Bending Moment (Weak axis, kN-m)	1.27	1.28 (0.01)	1.37 (0.08)	1.35 (0.06)	1.45 (0.14)
Bending Moment (Strong axis, kN-m)	2.31	2.57 (0.11)	2.80 (0.21)	2.60 (0.13)	2.78 (0.20)

* Values in parentheses are impact factors.

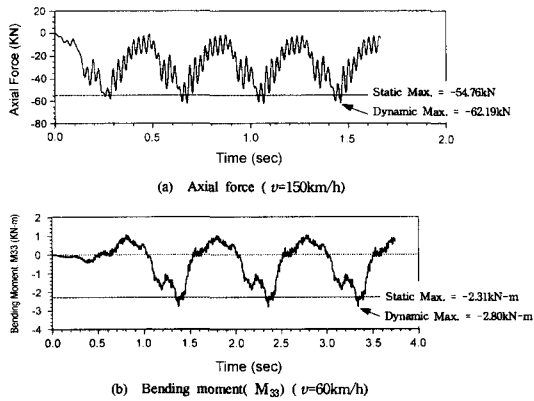


Fig. 13. Time histories of member forces in temporary steel structure due to continuous DB-24 Truck load applied along centerline of Tunnel-1

에 도달하게 될 것으로 판단되어 유한요소의 한 절점에 작용된 수직력의 시간이력을 Fig. 12와 같이 작용시켰다. 이에 의한 가시설구조물에서 최대부재력은 Table 3에 충격계수와 함께 정리하였다.

남산 1, 2호터널교차부의 지간길이는 약 10m인 반면 본 연구에서 고려하는 차량간 거리(전행 차량의 후륜과 후행차량의 전륜)는 8m이어서 정적하중에 의한 최대부재력의 증가는 없었다. 반면 동적해석에서는 전행차량에 의한 진동이 완전히 소멸되기 전에 후행차량하중이 작용되므로 단일 차량에 비하여 응답이 커지게 됨을 알 수 있었다. Table 3에 나타난 가시설구조물의 충격계수는 기둥의 축력에 대하여 최대 0.14이었고, 휨모멘트에 관하여 0.21이다. 가시설구조물의 축력과 휨모멘트에서 최대 동적 증폭이 되는 경우에 대한 부재력의 시간이력을 Fig. 13에 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 남산1, 2호터널 교차부와 주변암반을

SAP2000의 유한요소(입체요소 및 프레임요소)와 점성감쇠장치를 이용하여 모형화하고, 남산2호터널의 개수공사중 1호터널 차량통과에 의한 교차부 가시설구조물의 동적응답을 분석하였다. 유한요소모형은 교차부 슬랩에서 계측된 최대 수직속도를 해석결과와 비교하여 검증하였고, 충격계수는 연행 DB-24 차량하중에 대하여 평가하였다. 해석결과, 남산1, 2호터널 교차부의 차량하중에 의한 동적응답은 정적응답에 비하여 교차부 구조물의 부재력이 약 21%가량 클 것으로 예측되었다. 따라서 남산2호터널의 개수공사를 위한 교차부의 가시설 구조물의 설계시 활하중의 동적 재하에 의한 응답의 증폭을 고려하는 충격계수로서 현 도로교시방서에서 규정한 최대값 0.3을 사용하는 것은 안전측일 것으로 판단되었다.

사 사

본 연구는 (주)삼보기술단의 연구비 지원에 의하여 이루어진 연구결과로서, 저자들은 이의 지원에 감사드린다.

참 고 문 헌

- 윤정방, 김문겸, 이동근, 오우영, 1997, 교량, 터널 및 복합건축구조물의 진동저감 신공법개발, 교통하중을 중심으로, 과학기술처.
- 한국강구조학회, 1998, 경량전철 강구조물 실용화 연구: 제II편 제2장 소음 및 진동.
- 건설교통부, 1996, 도로교 표준시방서, 대한토목학회.
- Wu, W-H. and Smith, H.A., 1995, Efficient modal analysis for structures with soil-structure interaction, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 24, 283-299.
- Wolf, J.P., 1985, Dynamic Soil-Structure Interaction, Prentice-Hall, Inc.
- 건설교통부, 1996, 콘크리트표준시방서, 대한토목학회.
- 윤정방, 김동수, 1996, 직접법에 의한 지반-구조물시스템 내진해석 모델링 방법 연구 (IV), 보고서 번호 KINS/HR-146, 한국원자력안전기술원.

8. Yun, C-B., Kim, J-M., and Hyun, C-H., 1995, Axisymmetric elastodynamic infinite elements for multilayered half-space, Int'l. J. for Numerical Methods in Engineering, 38, 3723-3743.

9. Wolf, J.P., 1988, Soil-Structure Interaction Analysis in Time Domain, Prentice-Hall, Inc.

10. Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R.L., 1969, Finite dynamic model for infinite media, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, 95, 859-877.

11. 양신추, 고영현, 1994, 열차주행시 허부구조물에 작용하는 동하중의 산정, 한국고속철도건설공단.

12. Computers and Structures, Inc., 1998, SAP2000 Non-linear Users Manual.

13. 김재민, 이종건, 1998, 차량통과에 의한 남산2호터널의 교차부 동적해석, 여수대학교 산업기술연구소.

김 재 민

Tel : 0662-659-3245
 현재 여수대학교 해양토목공학과, 전임강사

이 종 건

Tel : 0662-659-3240
 현재 여수대학교 해양토목공학과, 석사과정

이 익 효

현재 여수대학교 해양토목공학과, 교수

이 두 화

1972년 한양대학교 공과대학 토목공학과, 공학사
 1991년 한양대학교 산업대학원 토목공학과, 공학석사
 1978년 (주)삼우기술단

Tel : 02-557-4545
 E-mail : samboeng@chollian.net
 현재 (주)삼보기술단, 대표이사
