

우면산 터널 설계시 예술의 전당 통과에 대한 중점고려사항

이 두 화 ((주)삼보기술단, 대표이사), 김 정 호 ((주)삼보기술단, 전무이사),
김 두 용 ((주)삼보기술단, 상무이사), 오 세 준 ((주)삼보기술단, 구조부 부장)

1. 머리말

우면산 터널은 과천~의왕간 도시고속화도로를 서울 강남도심으로 연결함으로써 남태령을 통한 서울~과천, 의왕간 교통량의 분산처리와 우면산을 중심으로 한 남북간 연계 개발 촉진을 목적으로 하는 민자유치사업이다. 우면산 터널 시점측 예술의 전당 통과부는 [그림 1]에 나타낸 것과 같이 예술의 전당 구조물과 매우 근접하게 위치되어 있다. 따라서 예술의 전당 근접 통과에 따른 구조물과 터널의 안정성, 시공중에 구조물의 안정성 검토 및 완공후 예술의 전당 하부에서 발생하는 진동·소음에 대한 대책, 완공후 구조물의 유지관리를 위한 계측 등이 고려되어야 한다.

터널이 구조물을 근접 통과하므로 인한 주변 구

조물의 피해를 최소화하는 터널 단면형식을 결정하며, 터널 굴착시에도 예술의 전당 구조물의 안정성 확보 및 공연중 진동 소음에 의한 피해를 최소화하는 공법을 고려한다.

또한 예술의 전당에서 계속되는 공연과 전시를 위해 시공중 뿐만 아니라 및 완공후 차량주행에 의해 발생하는 진동과 소음에 대해서도 검토하여 기준치 이상일 경우 대책이 수립되어야 한다. 진동과 소음의 문제는 연주자와 관객은 물론 정밀한 음향 시스템과 컴퓨터 제어 유틸리티에 치명적인 영향을 미칠 수 있기 때문에 이러한 문제를 발생시킬 가능성을 초기에 제거하는 것이 바람직하다.

계측은 설계의 타당성을 검증하며, 특히 터널과 지반과의 상호관계, 진동·소음의 예측 등과 같은 복잡한 Simulation 해석의 공학적인 한계를 최종



(그림 1) 우면산터널 조감도 (예술의 전당)

적으로 보완할 수 있는 마지막 단계이므로, 이에 대한 철저한 계획을 수립하여 구조물의 안정성을 최종적으로 보완하여야 한다.

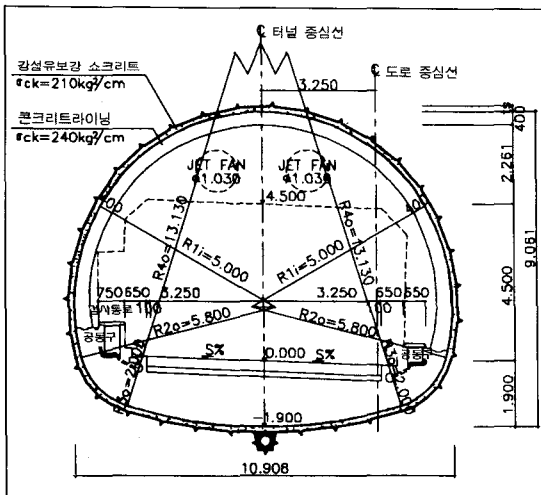
2. 예술의 전당하부 터널계획

2.1 터널단면

터널의 단면은 그 크기에 따라 공사비에 미치는 영향이 가장 크므로 터널의 기능에 따라 가장 적절하고 경제적인 단면을 결정하여야 한다. 또한 터널의 내공단면은 도로폭원 및 건축한계를 만족시킬 뿐만 아니라 환기, 방재, 조명, 내장, 배수 등 내부 설비의 설치공간을 확보하여야 한다.

본 설계에서는 설계속도 60km/hr에 해당하는 8.75×4.5m의 건축한계를 확보하였으며, 배연 및 환기를 위한 종류식(Jet Fan)+전기집진기 환기 방식을 채택하여 차도부 건축한계 상부에 Jet Fan을 설치하기 위해서 여유공간을 확보하였다.

예술의 전당 통과부는 토피가 작으며(9~15m) 예술의 전당 구조물 시공시 시공한 자료관 하부의 기시공 Box와 연결되는 구간으로서 본 노선(터널)과 인접한 상부에 오페라극장 및 음악당이 위치한다.

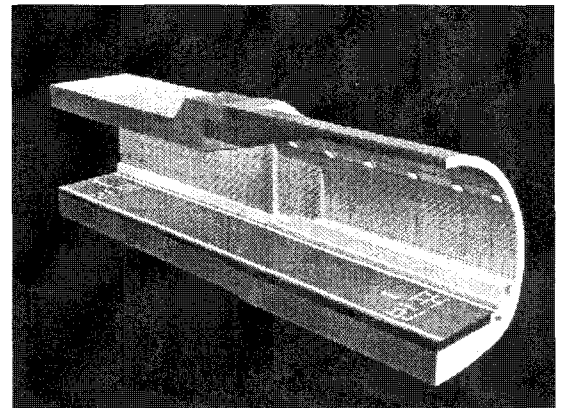
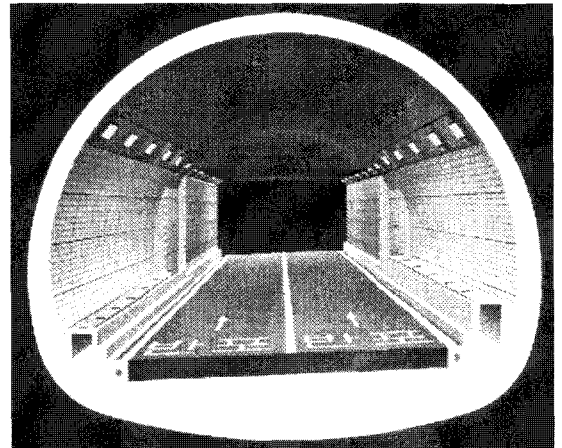


[그림 2] 예술의 전당 통과부 단면계획

다. 따라서 터널 천단부의 지반상태(풍화암)를 고려할 때 완공후 지하수위 저하에 따른 예상치 못한 침하 발생 등으로 주변 구조물(오페라극장, 음악당)에 피해가 우려되므로, 예술의 전당 통과부 단면계획은 공사비는 고가이나 지하수위 저하에 따른 침하를 방지하고 교통에 의한 진동 소음을 저감할 수 있는 [그림 2]와 같은 완전방수형 터널단면을 계획하였으며, 기시공 Box와의 접속형태는 [그림 3]과 같이 계획하였다.

2.2 굴착공법

터널의 설계 및 시공시 굴착공법의 결정은 터널의 안정성, 경제성, 공기 등을 결정하는 중요한 요소이므로 터널 단면의 형상 및 크기, 지반의 지



[그림 3] 기시공 Box 연결부 현황도

력, 주변환경 등 제반적인 여건을 고려하여 시공이 용이하고 가장 경제적인 공법을 선정하여야 한다.

우면산 터널은 총 연장이 1,900m(하행선 기준)로서 지하차도, 기시공 Box, 갱문을 제외한 터널 굴착 연장은 1,688m이며, 예술의 전당 통과구간은 약 208m이다. 본 구간에 대한 굴착공법 선정시 굴착에 따른 경제성보다 주변 구조물의 안정성 및 진동 소음의 영향 등이 최소화할 수 있는 굴착공법을 선정하였다(표 1) 참조).

예술의 전당 하부 통과구간은 터널 굴착에 있어서 발파에 의한 굴착공법으로는 진동 제한치(공연시 0.015cm/sec, 공사중 0.2cm/sec)를 제어하기 어려우므로, 진동 및 소음의 제한치를 충족시킬 수 있는 공법 선정이 필요하며, 터널 굴착으로 인한 주변 구조물의 안정성이 최대한 확보될 수 있는 굴착공법 선정이 필요하다.

예술의 전당하부의 터널 굴착공법으로 기계굴착인 Road Header, HRS(유압파쇄기) 공법 및 T.T.M 100에 대하여 검토하였다. Road Header는 진동·소음에 유리하며 국내 사용실적은 많으나, 경암부(일축압축강도 800kg/cm² 이상)에서는

시공성이 불량하여 공사비가 증대되며, HRS(유압파쇄기) 공법은 무진동·무소음으로 민원에 대해서는 유리하나 공사기간이 길고 공사비가 매우 고가이며 풍화암 구간에서는 시공성이 불량하다. 따라서 예술의 전당 통과부는 국내 실적은 적으나 경암부(일축압축강도 3,000kg/cm² 이상)에서도 굴착이 가능하며 진동 및 소음이 적은 기계식 굴착인 T.T.M 100을 선정하였다(그림 4), [표 2] 참조).

2.3 예술의 전당 통과부 보강공법

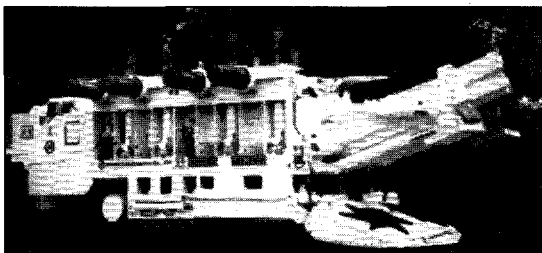
예술의 전당부 통과구간은 예술의 전당 건물이 인접하여 있고, 풍화암으로 구성된 낮은 토피고(9~15m), 기존의 자료관 하부의 기시공 Box (L=78m) 설치시 터파기 사면 형성후 되메움에 의한 되메움구간이 생기게 되는 어려움이 있다. 이상과 같은 어려움을 극복하기 위하여 다음과 같은 보강공법을 계획하였다.

기시공 Box 되메움구간에서 터널 좌·우측 구간은 L/W 그라우팅을 적용하고, 터널 직상부 구간에서는 Cement Milk 그라우팅을 계획하였다(그림 5) 참조). 또한 지질조건이 풍화암인 낮은 토피고(9~15m)로 형성되어 있으므로 과대어굴 및 터널 천단부의 안정성(암피복층의 강도증진)을 확보하기 위하여 강판단단 그라우팅을 계획하였으며, 병행하여 국부적인 과대굴착 및 소규모 낙반을 방지하기 위하여 2~2.4m 간격으로 휘폴링을 보강하였다(그림 6) 참조).

또한 터널 천단부의 지질조건상 누수가 예상되므로 차수 목적으로 L/W 그라우팅을 적용하였다. L/W 그라우팅 주입시 초기압은 5~7kg/cm²로 주입하기 때문에 인접 구조물에 미치는 영향은 적

[표 1] 굴착공법 검토

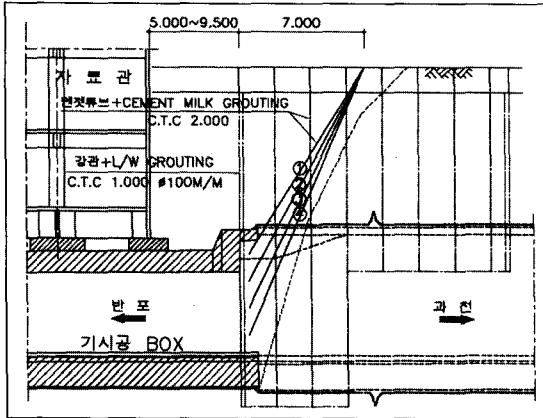
구간	위치	연장 (하행선 기준)	고려 사항	적용
예술의 전당 통과구간	STA. 0+512.304 ~ 0+720.000	208m	○ 예술의 전당내 주변구조물 안정성 및 공연 등을 고려하며 터널 굴착시 발생하는 소음 및 진동에 대해 특별히 주의를 요함	기계식 굴착 (T.T.M 100)



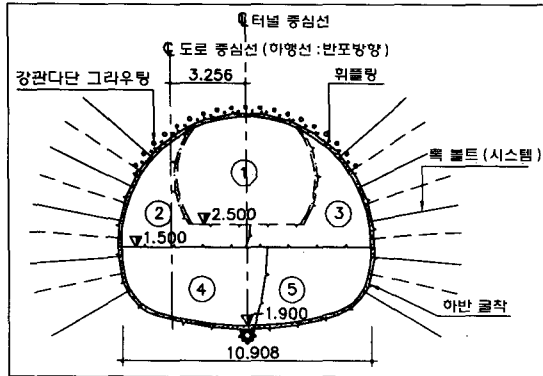
[그림 4] 기계장비 T.T.M 100

[표 2] T.T.M 100의 제원

일반 제원	총 중량	135 ton
	전장(본체)	13 m
	전 폭	3.8 m
굴진속도 경암 1,600kg/cm ² 이상	전 고	3.8 m
	1 시간	0.3 m
	1일(18시간)	5.0 m
	1개월(25일)	125.0 m



(그림 5) 기시공 Box 연결부 보강공법



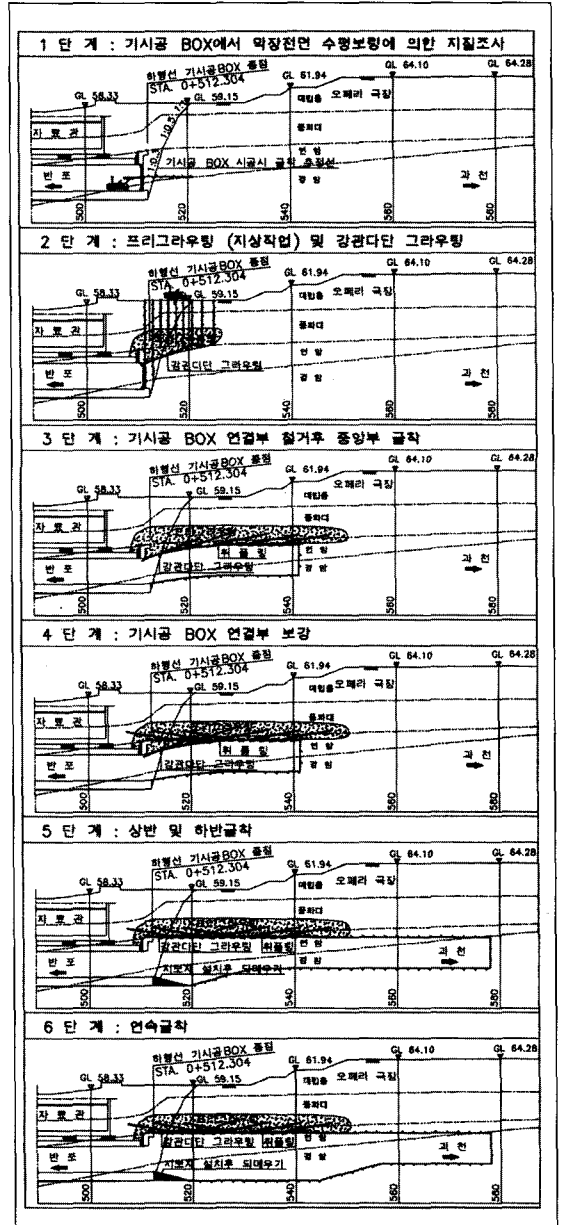
(그림 6) 예술의 전당 터널부 보강공법

으나, 시공시 인접구조물인 예술의 전당 구조물의 제척결과를 검토하여 주입압을 조절하여야 한다. 이상과 같은 보강공법을 이용하여 예술의 전당 통과부 굴착을 계획하였으며 굴착 순서도는 (그림 7)에 나타내었다.

3. 진동 소음 예측 및 대책

3.1 진동과 소음 허용규제치 결정

진동 허용규제치는 일반적으로 국내의 지반진동에서 많이 사용되고 있는 일본 기상청의 JMA진동계에서 제시한 인간의 감각으로 느낄 수 없는 0.8 gal(peak) 이하의 진동상태를 규제치로 결정한다.



(그림 7) 예술의 전당 통과부 굴착 시공순서도

또한 차량 주행에 의해 발생하는 소음은 터널 내부 소음과 터널 진동에 의한 소음으로 구분된다. 이때 터널 내부소음은 예술의 전당 구조물에는 영향을 주지 않으며, 예술의 전당 구조물에 영향을 주는 소음

은 터널 진동에 의한 소음으로 이에 대한 평가 및 대책을 세웠다. 예술의 전당 소음 규제치는 미국 공조, 냉동, 냉방 기술자협회(ASHRAE)의 음악당 기준에 의해 30dB(A)로 결정하였다. 진동에 의한 소음으로 30dB(A)에 해당되는 진동을 속도로 환산하면 0.15mm/sec이므로, 진동이 0.15mm/sec 이내일 경우에는 소음이 30dB(A) 이내가 된다.

3.2 예술의 전당하부 진동예측치 결정 가. 차량진동원

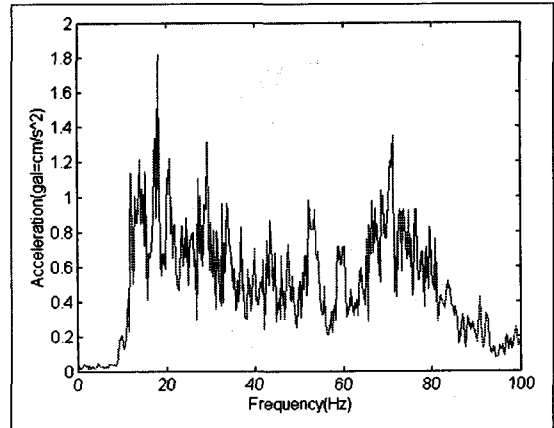
차량의 주행속도에 의한 진동레벨은 원칙적으로 10km/hr당 약 2dB정도 상승하므로, 60km/hr에서 측정된 차량진동 측정결과를 기준으로 100km/hr에 해당되는 진동원을 생성하여 적용하였다. [그림 8]은 차량이 100km/hr 주행시 콘크리트 포장 노면에서 예측되는 진동원으로 예술의 전당하부 진동 예측치 산정시 가진 데이터로 적용하였다.

나. 지반물성치

지반조사 보고서를 기초로 하여 지반모델링에 적용한 물성치를 [표 3]과 같이 제시하였다.

다. 예술의 전당하부 진동예측치

오페라극장의 진동예측을 위해, [그림 9]에 제시한 오페라극장의 횡단면도를 [그림 10]과 같이 모델링하였고, ANSYS 프로그램을 이용하여 해석하였다. 100km/hr 속도의 차량주행에 의해 발생하는 진동원을 지반구조



(그림 8) 차량 100km/hr 주행시 콘크리트포장 노면에서 예측되는 진동원

물 시스템에 적용하여 진동예측치를 산정하였다.

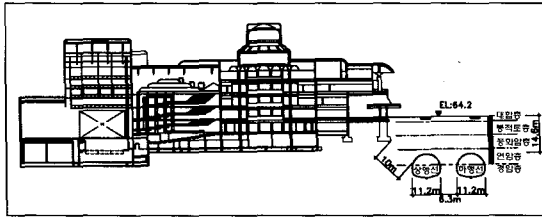
오페라극장과 같은 방법으로 예술의 전당부의 다른 건물에 대해 진동해석을 수행하고, 그 결과를 [표 4]에 정리하였다. 그 결과 예술의 전당부 건물들의 진동치는 허용규제치 이내이나, 자료관은 허용규제치를 초과하므로 이에 대한 대책이 요구된다.

3.3 자료관에 대한 방진대책

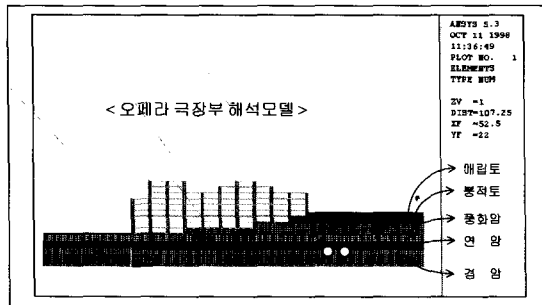
과거 예술의 전당 자료관 시공시 우면산터널 계획을 고려하여 자료관 하부의 일정범위에 대해서 터널 Box를 시공하고 터널 Box 위에 자료관 기초 일부가 시공되었다. 비록 자료관 기초와 터널 Box 상부 사이에 방진패드가 설치되어 있더라도, 차량주행에 의한 진동이 자료관으로 전달될 가능성이

(표 3) 지반모델링에 적용된 기본물성치

토 질 명	매립토	농적토	풍화암	연암	경암	콘크리트
탄성계수(N/m ²)	2.94E7	3.43E7	2.94E8	4.41E9	5.68E9	2.3E10
밀도(kg/m ³)	2000	2000	2400	2650	2750	2400
포아송비(ν)	0.3	0.3	0.3	0.25	0.2	0.167
감쇠비(%)	15	15	10	5	5	5
탄성파 속도(m/s ²)	Vp	-	4200	5240	6090	3200
	Vs	300	500	2530	2840	3280
파장(10Hz일때)	30	50	253	284	328	165



(그림 9) 오페라극장 부분의 횡단면도



(그림 10) 오페라극장부 해석모델

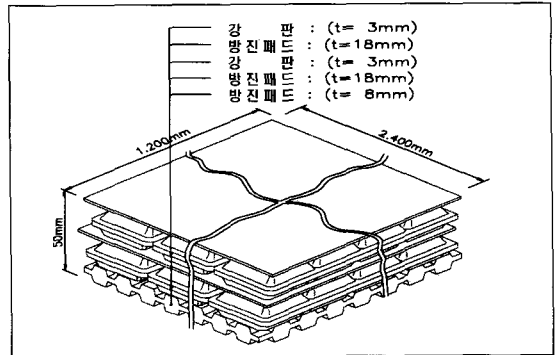
높은 구간이다. 또한, 해석결과도 진동규제치를 초과하므로 차량이 직접 주행하는 노면에 진동을 제어할 목적으로 방진패드 25T와 50T를 적용하여 해석을 실시하였으며, 결과는 [표 5]에 제시하였다. 여기서 나타나듯이 방진패드는 50T (50mm)의 두께를 적용하여야 차량주행에 의한 진동이 허용 진동규제치 이내가 된다고 판단되었다.

(표 4) 예술의 전당부 건물별 진동예측치

건물명	진동예측치		허용진동규준치	
	가속도, gal	속도, mm/sec	가속도, gal	속도, mm/sec
오페라극장	0.75	0.076	0.8	0.15
음악당	0.53	0.051		
서예관	0.44	0.040		
자료관	4.12	0.656		

(표 5) 방진대책 후 대형차량 주행속도별 자료관 건물의 진동예측치

방진대책	진동예측치		허용진동규제치	
	가속도, ga	속도, Max (mm/sec)	가속도, gal	속도, Max (mm/sec)
25T방진패드	1.09	0.174	0.8	0.15
50T방진패드	0.77	0.138	0.8	0.15



(그림 11) 50T(50mm) 두께의 방진패드

(그림 11)은 기시공 Box에 적용한 50T(50mm) 두께의 방진패드 상세도를 나타낸 것이다.

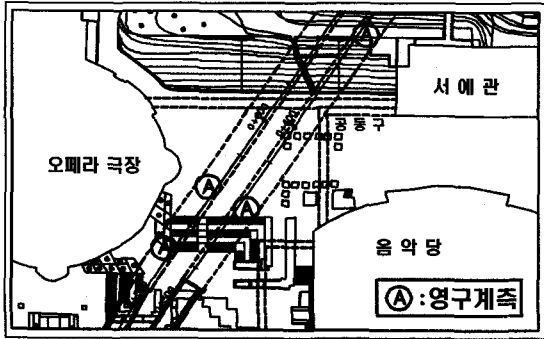
4. 계측

4.1 터널의 계측관리

계측의 목적은 굴착지반의 움직임과 각 지보재의 효과를 파악하여 주변 구조물에 미치는 영향 및 터널의 안정성을 확인하는 등 주변 구조물 및 터널의 안정성을 확보하고, 계측결과를 설계 및 시공에 반영하여 장래계획을 위한 자료로 활용하는 데 있다.

예술의 전당은 국가적으로 매우 중요한 구조물 이므로 구조물 및 터널에 다소의 문제가 발생시 사전에 즉시 대처할 수 있도록 4 Point에 대해서 자동계측계획을 수립하였으며, 터널 완공후에도 일정기간 구조물 및 터널의 안정성 확보를 위해 영구 계측으로 전환하도록 하였다.

이때 터널의 안정성 확보에서의 계측항목은 내공변위, 천단침하, 지중변위, Rock Bolt 축력, 슛크리트 응력, 간극수압, 지표침하, 지중수평변위 등이 해당되고, 구조물 안정성 측면의 계측항목은 구조물의 침하측정을 위한 침하계, 및 경사계 균열의 진전여부를 검토할 균열계 등을 계획하며, 공연 중 사용성 측면에서 진동 소음계를 계획하였다. ((그림 12) 참조)



(그림 12) 예술의 전당 통과부 터널의 계측계획

4.2 예술의 전당 구조물의 자동계측관리

자동계측관리 시스템은 Sensor 및 중앙통제실을 포함한 Hardware, 측정된 계측치를 분석하는 Software 및 관리 한계치 설정을 위한 구조해석 부분으로 구성된다. 구조해석부분은 수치해석을 통해 계산된 수치해석값과 조사된 기준값을 설계 보고서를 참조하여 인용하고, 분석 Software는 각 계측회사마다 고유의 시스템을 구축하고 있다. 그리고 Sensor를 통해 계측된 값을 중앙통제실로 전송하는 시스템은 예술의 전당부와 터널내부로 구분하여 계획한다.

예술의 전당 구조물에 위치한 계측 Sensor 즉 구조물 침하, 진동·소음 측정 Sensor는 Lead선을 Data Logger로 연결한 후 전화선을 이용한 모뎀을 통해서 관리사무소 및 예술의 전당 운영실로 연결하도록 계획하였으며, 터널 내부의 자동계측 Sensor인 지중변위, Rock Bolt 축력, 슛크리트 응력 및 간극수압 측정 Sensor는 Data Logger로 연결후 케이블을 터널의 공동구를 이용하여 관리사무소 및 예술의 전당 운영실로 연결한다.

5. 맺음말

본 과업은 서울시 도시계획시설 도로결정에 의해 예술의 전당이라는 국가적 중요시설물에 인접하여

낮은 토피고를 유지한 상태로 터널이 계획되었다. 이와 같은 조건에서의 터널 설계는 국내에서 처음이라, 설계자는 매우 많은 사항에 대해 검토를 수행하였으며, 터널 계획시 경제성보다는 예술의 전당 안정성 및 사용성에 중점을 두어서 계획을 수립하였다.

본 내용은 예술의 전당부 터널 설계시 설계와 관련된 관계자들이 많은 고민을 하고, 각 분야의 전문가들에게 수 차례의 자문 및 조언을 얻어서 계획한 내용중 일부를 정리한 것이다. 국내에서는 이러한 조건에 대한 터널 설계는 처음이고, 특히 진동분야는 토목 설계자에게는 다소 어려운 분야이므로 설계기간 동안 고민한 내용을 기술하여 이와 유사한 설계를 수행하는 설계자에게 도움이 되었으면 한다.

알림

본 내용은 "우면산 터널 축조공사 민자유치 시설사업 조사 및 실시설계"의 일부로서 설계시 많은 도움을 주신 "우면산 개발 주식회사" 직원 및 "예술의 전당" 관계자에게 감사의 뜻을 전한다.

참고문헌

- (1) 이두화, "우면산터널 완공후 차량 주행에 의한 예술의 전당 진동과 소음 예측 및 대책", 대한토목학회지, pp. 91~96, Vol. 47, No. 4, 1999
- (2) 우면산개발주식회사, "우면산터널 축조공사 및 민자유치 시설사업 조사 및 실시설계 보고서", 1998. 12
- (3) Hal Amick and Colin Gordon, "Specifying and Interpreting a Site Vibration Evaluation" MICROCONTAMINATION, pp. 42~53, October 1989
- (4) Eric E. Ungar, "Vibration Control Design of High Technology Facilities" Sound and Vibration, July, 1990