

## 지반구조물 거동의 정보확보와 시공에의 이용(III)

김 상 환\*<sup>1</sup>  
우 동 찬\*<sup>2</sup>

### 3. 계측을 통한 터널구조물의 이해와 해석

#### 3.1 개요

토질 및 기초공학의 한 분야로서의 터널구조물을 조성함에 있어 일반적인 토질조사와 시험만으로는 해당구조물에 대한 최적설계 또는 시공과정동안 발생하게 될 지반거동에 대한 정확한 예측관리에 충분치 않다. 특히 터널구조물의 연장이 통과하게 될 다양한 토사군과 암반상태 등 지반이력에 연유되는 극명한 불연속성의 출현은 돌발적인 지반거동을 일으킬 수 있는 가능성이 매우 높다. 따라서 안전한 시공관리를 위해서는 실공정에 따라 실제의 지반거동을 정확하게 파악할 수 있는 장치의 필요성이 강력히 대두되고 있으며, 지반계측은 예상되는 지반거동에 대한 적용대책의 적합성 여부를 실시간으로 확인하고 궁극적으로 설계 기초자료의 평가와 변경근거의 확보 및 안전시공의 유도를 꾀하는 매개로서 그 중요성이 나날이 강조되고 있다.

한편, 지반계측은 이러한 중요성에 비추어 지반거동에 연관된 기본이론을 충분히 숙지하고 적용실무 경험이 충분한 지반공학 전문기술자의 축적된 기술력을 배경으로 계기관리, 기초정보관리, 해석관리분야 등 일정한 수준과 기준에 입각하여 계측된 기초정보의 조정과 검

색, 그리고 정량적 해석을 위한 거동관련 인자의 추출 또는 상관계수의 확정 등에 기여해야 하며, 궁극적으로는 수치해석법과의 상호연계를 통해 지역특성에 맞는 관리기준의 확보에까지 진보되어야 한다.

#### 3.2. 지반계측의 범위와 계측 System 결정 요소

지반계측이란 외부하중 또는 절성토와 굴착 등 일련의 공사행위와 관련하여 발생 예상되는 불안정한 지반거동징후의 정량화와 수렴성의 판정근거를 제공하기 위한 일련의 관측행위를 의미한다. 따라서 지반계측의 소극적인 의미는 계기를 대상지반 속에 삽입, 고정하여 지반거동의 징후를 전기저항 또는 진동수 등의 형식을 비는 전기기계적인 변동을 측정하는 매설계측기기류를 지칭하는 한편, 계측관리의 궁극적인 목적에 부합하는 광역의 의미로는 일상적인 육안관측, 측량, 지반조사 및 매설계측기에 의한 측정관리 등이 핵심적인 계측관리 항목에 모두 포함된다.

한편, 계측 system 의 구성을 결정하는 주요 인자로는 계기상호간의 보완성 및 대체성을 고려해야 할 뿐아니라 그 구성의 원리는 향후 해석하고자 하는 기본방향에 따라 합리적으로 이루어져야 한다.

\*1 정희원, 대본엔지니어링(주) 이사

\*2 정희원, 대본엔지니어링(주) 부장

### 3.2.1 지반계측의 종류와 적용

#### (1) 관측(Optical Measurement)

계기를 사용하지 않으면서도 계기상에 포착되지 않는 잠재적 성향의 돌발적 사고를 미연에 방지하는 중요한 계측요소중의 하나는 일상적으로 주의깊게 시행하여야 할 시각적 관측이다. 터널시공중 일상관측으로 이상거동의 징후를 발견하는 경우는 굴착면 또는 지표면상에 진행성과파의 전조로 나타나는 균열의 발견, 또는 지보재 설치의 불완정성 등을 쉽게 꼽을 수 있으며 계측요소로서의 보다 중요한 의미는 매설계측기에 대한 일상관측이 갖는 보완재로서의 역할이다.

매설계측기의 보완재라함은 지반거동의 징후가 진행되고 있음에도 불구하고 매설계측기상에 그 영향이 포착되지 못하고 있을 경우, 또는 매설계측기에 포착되기 전이라도 돌발적인 거동이 나타날 수 있는 지반상태의 불연속성의 발견 등을 고려할 수 있다.

예로써 터널공사가 진행되는 동안 표면도로 하부지반에 국부적인 침하가 발생한다해도 포장은 자체의 강성으로 지반과 일체로 침하하지 않고 한시적으로나마 기존의 상태를 유지함으로써 포장과 지반 사이에는 공동화현상이 발생하게 된다. 이때 지표침하핀이 도로포장 위에만 고정되어 있다면 실제 지반의 침하는 계기상에 포착되지 않을 것이다. 그러나 일상적인 육안관측을 통하여 차량이 통행하고 있는 동안 기 진행된 공동상부의 포장이 반복적인 탄성거동을 나타내고 있음을 발견할 수 있고, 이에 따라 적절한 대응책을 사전에 마련할 수 있을 것이다. 서울지하철 5호선 모공구에서는 사려깊은 일상관측을 통해 터널굴착중 터널측 상부쪽으로 포장과 침하지반 사이에 대규모 공동이 생성되고 있음을 발견하고 그라우팅 공법으로 지반보강함으로써 대형사고의 발생가능성을 미연에 방지한 실례가 있었으며 이러한 일상관측은 반드시 중요한 계측요소로서 고려되어야 한다. 유사한 예로 터널굴착후 즉시 shotcrete

를 타설토록 되어 있으나 시공성에따라 여굴이 심한 경우 타설재료가 천단부에 밀착되지 않아 공동이 생길 확률이 매우 높다. 이때 천단침하를 측정하기 위한 측정핀이 shotcrete에만 삽입되고 굴착면에 직접 정착되지 않을 경우 실제의 천단침하 거동이 측정계기상에는 포착되지 않는 한계를 확인할 수 있다. 뿐만아니라 터널시공중 무지보 상태가 유지되는 동안 갱내로 인입수가 흘러 들어오고 있다면 인입수의 침전물 유무를 확인할 필요가 있다. 이것은 터널을 둘러싸고 있는 주변 지반내에서 공동화현상이 진행되고 있는지의 여부를 확인할 수 있도록 돕는다.

#### (2) 측량(Survey)

지반계측에서의 측량이라함은 지표면 또는 지반내에 선정된 임의의 측정점의 시간경과에 따른 상대변위, 또는 절대변위의 변동을 level 또는 laser광파기 등의 측정도구를 사용하거나

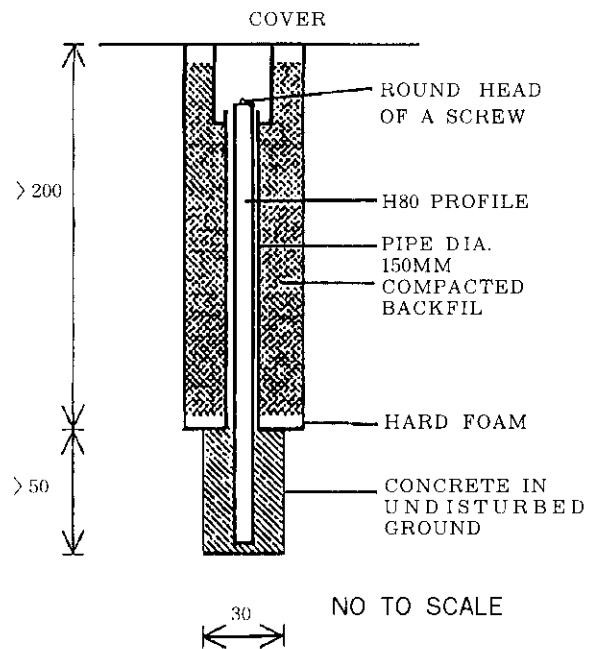


그림 1. 지표침하 측정을 위한 기준점의 설치

scale이 표기된 측정매체를 통해 정량적으로 관측하는 일련의 작업을 의미한다. 터널에서는 주로 지표침하 및 천단침하의 측정 또는 내공 profile과 선형측량 등이 주요 계측요소에 해당하나 전 절에서 기 언급한 바와같이 측정편의 설치방법에 대한 고려가 반영되어야 한다 (그림 1).

특별히 측량을 통해 단순히 지반거동의 정후를 확인하는 차원을 넘어 정량적인 해석근거를 수립해야하는 경우라면 동일점에 대해 측정하는 시점과 횡수에 관계없이 기준점의 좌표는 변동이 없어야 한다. 따라서 지표침하 측정의 경우 터널단면의 invert 좌우단을 통과하는 45° 기울기 직선의 연장이 지표면과 만나는 지점까지의 범위를 충분히 벗어난 지역에 기준점을 설치하여야 한다 (그림 2).

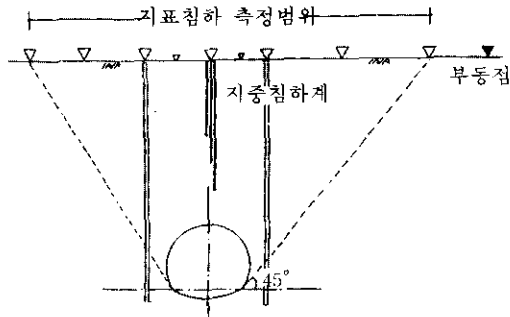


그림 2. 지표침하 측정편의 설치

그러나 터널 내부의 측정점에 대해서는 굴착공정이 진행될 수록 터널외부에 존재하고 있는 기준점으로부터의 상대적인 거리가 점점 멀어지므로 실질적으로 천단침하 등을 절대변위로 측정하기에는 한계가 있다. 따라서 천단부와 내공측벽의 측정점의 수평 및 연직 좌표값의 변동량은 절대변위의 측정과 함께 상대변위 측정으로 결과를 보완하는 것이 유리하다. 그러나 상대변위 측정의 오차를 최소화하거나 오

류를 미연에 방지하기 위해서는 천단침하와 내공변위를 별도의 크기로만 나타낼 것이 아니라 천단의 측정점과 터널측벽의 내공측점들과의 상대거리를 함께 측정함으로써 터널단면의 기하학적인 변화를 주의 깊게 주시해야 한다 (그림3).

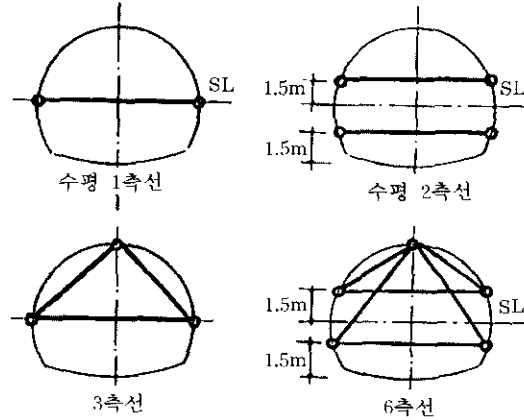


그림 3. 터널단면의 기하학적 측정

그런데 이와같은 측면에서 천단침하와 내공변위를 계측하기 위한 측정점들은 터널단면의 profile 계측을 위해 선택되어질 수 있는 여러 가지 점들 중의 일부로 볼 수 있으며 이러한 측정점이 많으면 많을수록 이론식에 의한 검정이나 수치해석법에 의한 검토결과와의 비교 과정에 훨씬 유리한 조건이 될 수 있다. 이러한 기본적인 생각들이 재래적인 측량의 한계를 넘어 측정기기로 발전된 예가 Bassett Convergency System 이라 불리는 터널내공 측정장비로서 그 구성과 적용을 참고할 수 있다 (그림4, 그림5, 그림6).

### (3) 지반조사(Geotechnical Investigation)

일반적인 기초지반 조사의 경우 일반 토사에 대한 정보수집이 주된 내용으로 이루어지기 때문에 풍화암내지 연암의 출현과 함께 조사가 거의 종결되기 때문에 암반에 대한 정보는 거

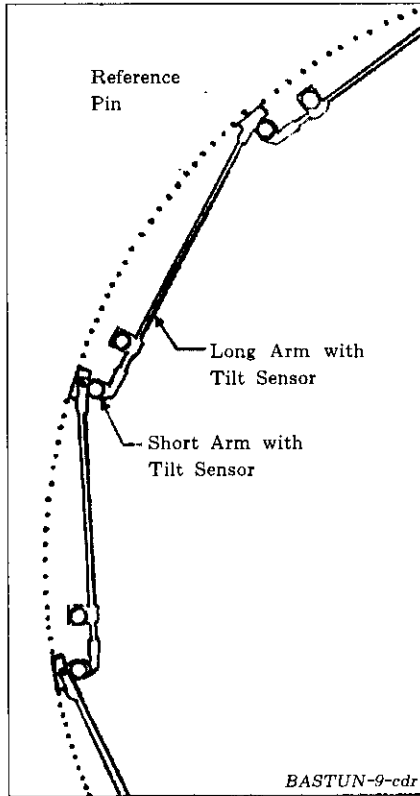


그림 4. The Bassett System

의 전무하다.

그러나 터널굴착을 염두에 둔 지반조사의 경우라면 대부분의 공사가 주로 암반층을 대상으로 이루어짐을 감안할 때 지반조사 단계에서 암석시편에 대한 보다 세밀한 정보를 분석 확인함으로써 굴착대상이 되고 있는 암반의 구조와 특성에 대한 기초정보를 제공할 수 있어야 한다. 따라서 터널시공을 위한 지반조사의 내용에는 암반과 관련한 주요정보들이 포함되어야 할 것이고 이에 따라 지반조사 profile의 구성도 이에 맞게 달라져야 할 것이다 (그림8). 예를 들면 터널노선을 따라 선정된 각 지점에서 연직방향으로 boring 하여 시료를 채취하거나 또는 boring hole 자체를 이용한 원위치시험을 시행하는 것 외에도 터널의 진행방향을 따라 수평천공(horizontal boring) 함으로써 암반의 불연속성과 그 정도를 파악하는 것이 필요하다 (그림7). 이때 암반면이 노출되고 있는 무지보 상태의 터널자체가 하나의 커다란 horizontal boring hole이 되고 있음을 간과하면 안된다. 이것은 곧 geotechnical face mapping의 근거와 배경이 되어 막장면(face)뿐 아니라 노출된 터널벽면

**LONDON UNDERGROUND**  
Current: 14:00:00 08-Aug-94  
Initial: 02-50-00 22-Jul-94

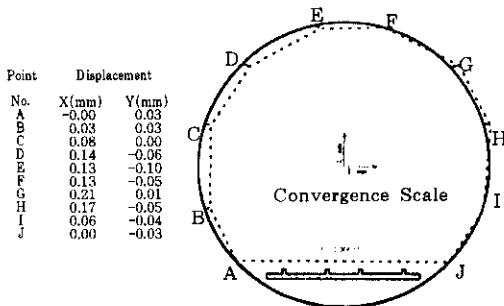


그림 5 Bassett System의 적용 예 (1)

**TUNNEL DU BALAYE**  
Current: 04:00:00 08-Feb-95  
Initial: 02-50-00 15-Jan-95

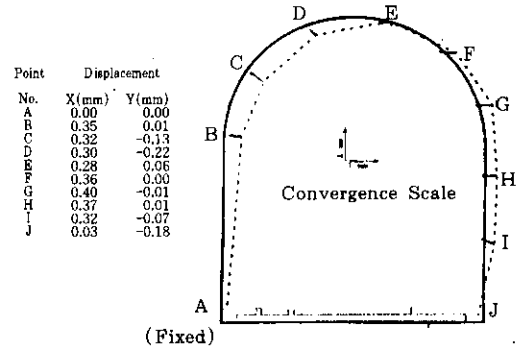


그림 6 Bassett System의 적용 예 (2)

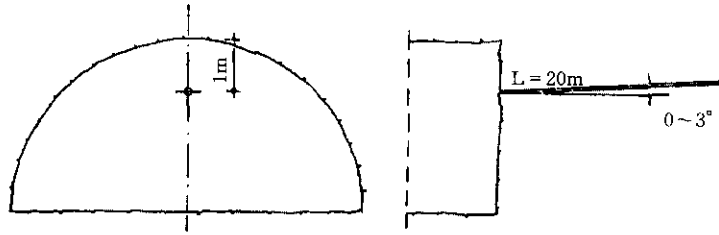


Fig. : Suggested location and working sequence

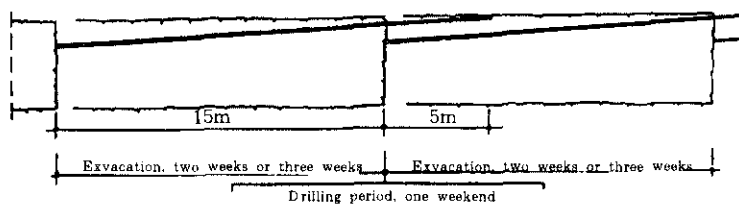


그림 7. 수평천공의 효과와 기대

은 물론 수직구의 벽면까지도 이러한 지반조사의 범주에 포함되어야 한다 (그림9, 그림10). 그러나 암반의 노출면은 암반상태와 무지보 자립시간의 크기에 따라, 굴착에 의한 암반노출 후 일정시간 경과 후에 지보가 신속히 설치되어야 하므로 노출시간이 매우 짧다는 한시적인 속성이 있기 때문에 간과되어지거나 구간별로 누락되기 쉽다. 그러나 지반조사는 연속적으로 시행될 때만이 적절한 효과와 의미를 가질 수 있으므로 이의 철저하고 정확한 시행은 터널계측관리의 그 어떤 요소보다도 강조되어야 할 부분이다.

#### (4) 매설기기에 의한 계측(Geotechnical Measuring Instrumentations)

지반공학에서의 매설계측기란 대상지반 또는 대상지반과 밀착하여 함께 거동하고 있는 지보시스템에 매설하거나 혹은 부착 고정시켜 사용하고 있는, 전기기계적 특성으로 구성된

측정매개를 총괄적으로 의미한다. 그리고 지반의 거동과 안정성 평가를 위해 필요한 역학적 필수정보로는 힘과 변위의 형태로 압축된다. 이에 대응하는 매설계측기로는 load cell에 의한 압력 측정기류가 전자에 속하고 전기적 신호에 의해 측정되는 변형률(strain) 측정기 또는 기계적 조작으로 측정하는 변위측정기와 경사측정계 등이 후자에 속한다. 이러한 계측기들은 계측하고자 하는 대상구조물 또는 지반의 특정 지점에 독립적으로 설치되거나 또는 연합하여 설치하게 되는데 제한된 비용 범위 안에서 지속적으로 많은 정보를 얻기 위해서는 계측기기 상호간의 상호보완성 내지 교차성, 그리고 손상의 경우를 고려한 대체성 등을 고려해서 설치하는 것이 좋다. 따라서 하나의 계측단면에 변위측정기와 하중 또는 응력측정기가 서로 복합적으로 설치되는 것이 일반적이며 특별히 그림11은 터널단면주변지반거동을 포착하기위한 계측요소들을 조합한 일반예와 이

SEOUL SUBWAY CONSTRUCTION INVESTIGATION BOREHOLE - BORE LOG															
DATE: 5-17	DATE: 5-23/93	CHARACTER: 40293.5	LOCATION: SHELLS BORE:	ORIENTATION: vertical	GROUND ELEV: 122.17	SHEET 1 / 2									
DATE OF TEST: 5-27.3. 93 22.3.93		SHELLS BORE: HAM H-75		CORRECTED BY: T.Y. Lee		LOGGED BY: X.J. Kim		FOOTING CEMENT: K.K. 9302							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Description of Material	Thickness	Depth	Symbol Log	Structural Discontinuity	Degree of Weathering	Hardness	Class Fracture	Discontinuity	Spacing	RQD for 10	Rock Designation Ground water Level	Additional Remarks, Samples	Flow Range	Core Diameter	Borehole Type
FILL, loose, reddish brown, silty-sandy gravel with occasional angular scobbles and some root-lice	2.5	2.5									F	standpipe level meter 2" SPT: 17			SPT
SILT, sandy, stiff, brown	0.7	3.2										SPT: 22			SPT
GRAVEL, sandy, light brown, max. 6 10cm	1.8	5.0									AL	SPT: 50/8 4.5m: Sample			SPT
GRANITE, extremely weak, reddish brown, decomposed. (medium dense to dense, sandy Silt/Clay)	1.9	6.9								15/0 25/0	KS	SPT: 50/20			SPT
GRANITE, coarse grained, reddish brown, inequigranular, highly weathered, loosened	4.1	11.0								75/0 80/11 95/18 100/12	WR SR	$4 \times 10^{-5} m/s$			SPT
GRANITE, coarse grained, pinkish grey, inequigranular, 11.5-12.0m: clayey, fault zone										85/10 100/45		11.7m: Sample			SPT

그림 8. 터널공사와 관련한 지반 Profile의 구성(예)

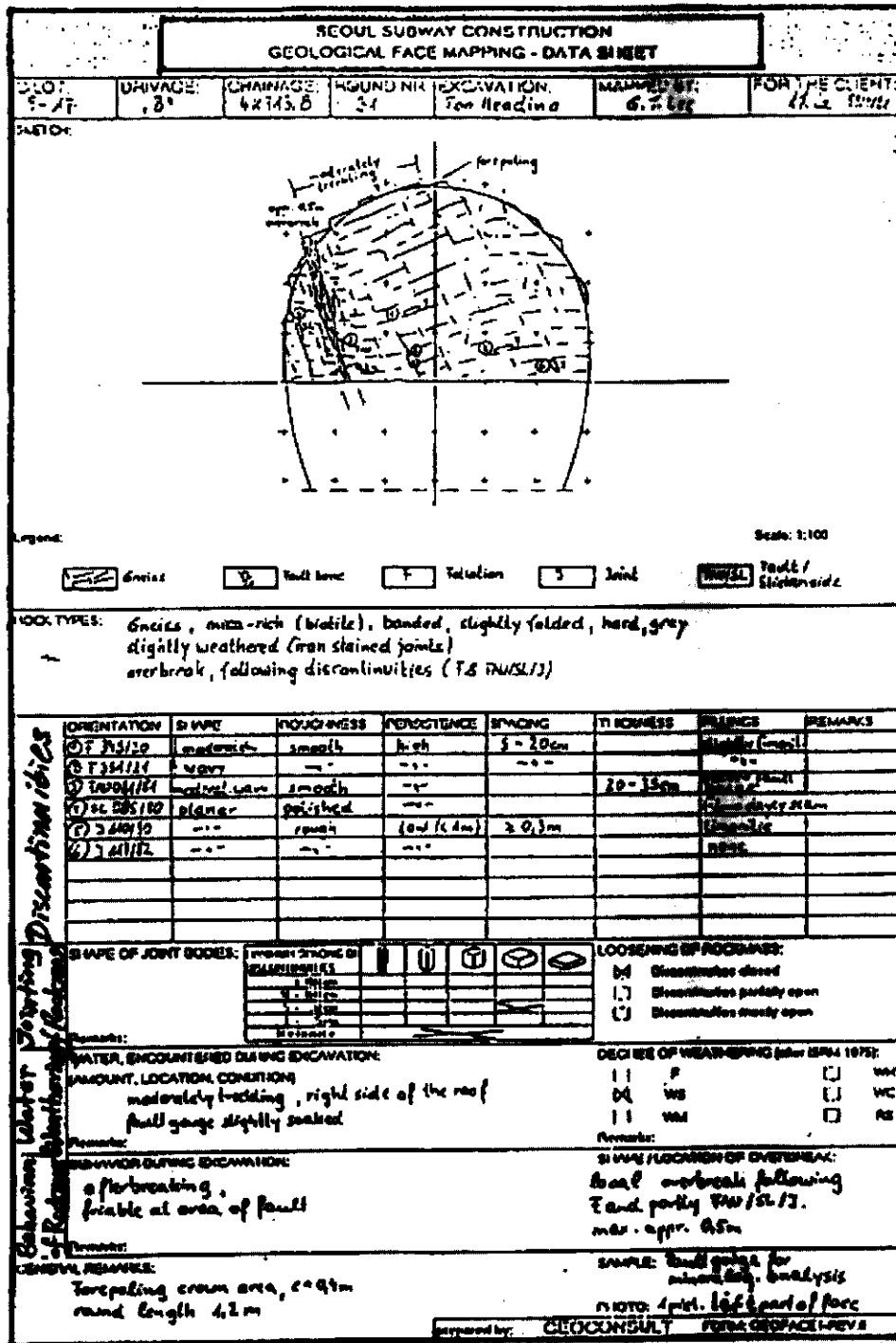


그림 9. 터널막장에서 Face Mapping(예)

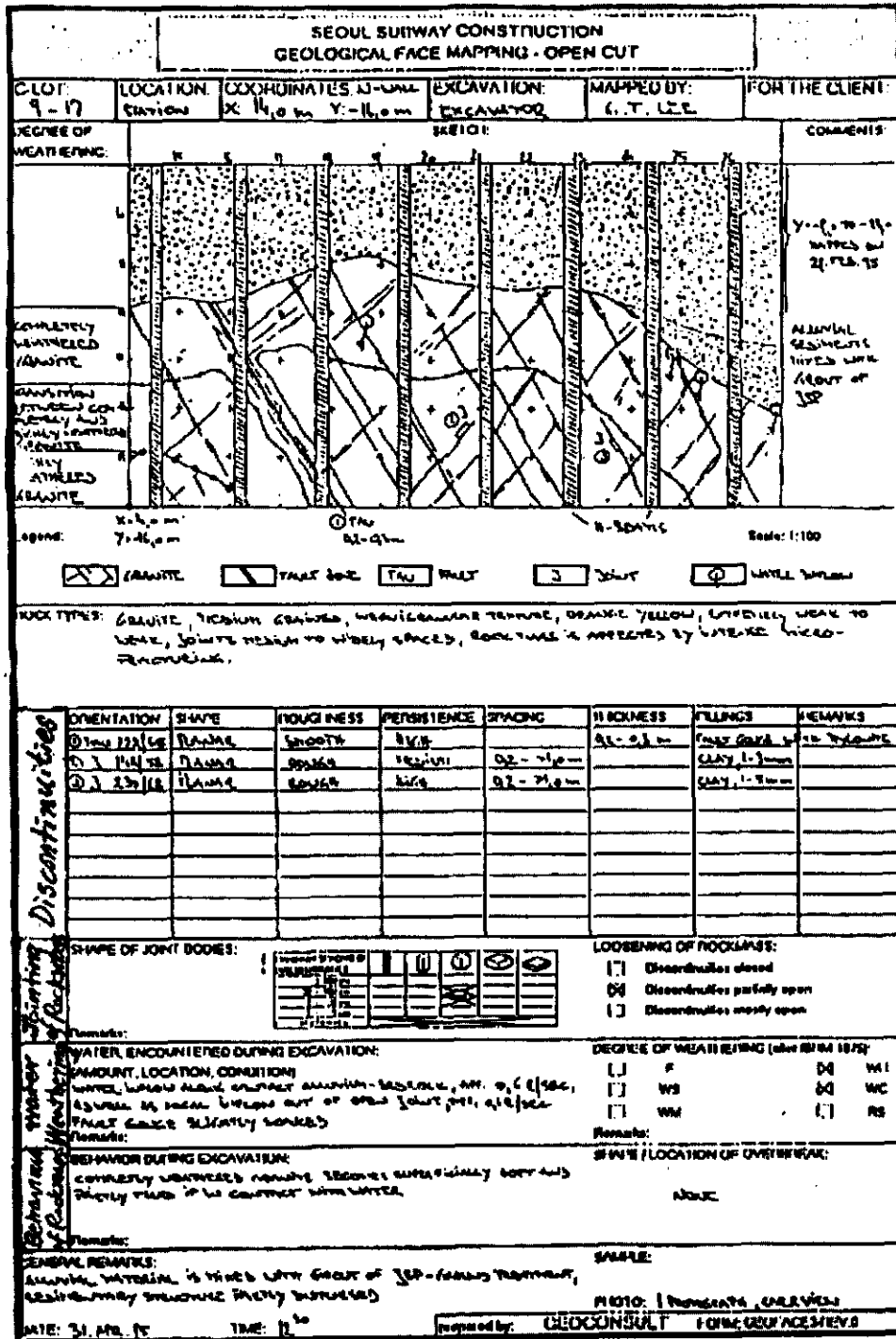


그림 10. 수직구 측벽에서의 Face Mapping(예)



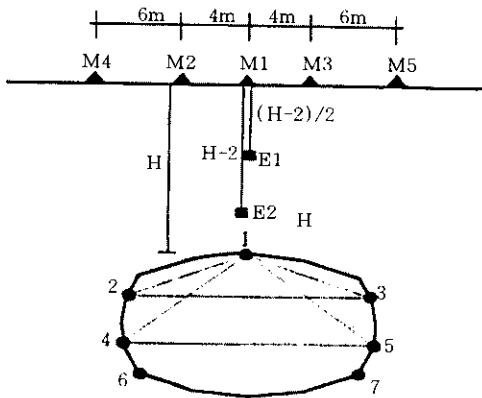


그림 11. 터널에서의 계측기 설치조합 일반

를 응용한 서울지하철 5호선 시공당시의 실제 사례(그림12, 지표침하와 지중침하의 조합관계)를 보여 주고 있다.

상기 예의 경우 그림에는 나타나 있지 않지만 지표침하, 지중침하 및 터널단면 내에서의 천단침하 등은 한가지 지반거동을 다양한 관점으로 바라보는 특성요소로서 궁극적으로는 하나의 연결고리 안에서 비교평가될 수 있을 것이며, 이를 통하여 얻는 소득은 각각의 계측 결과에 대한 신뢰도의 상호검증, 오차발생 가능성의 확인, 그리고 지반공학적인 해석인자간의 상관관계 분석과 추후 분석된 상관관계를 이용한 관련계측인자의 진행예측 및 불가피한 환경에 의해 손상될 경우 이를 대체할 수 있는

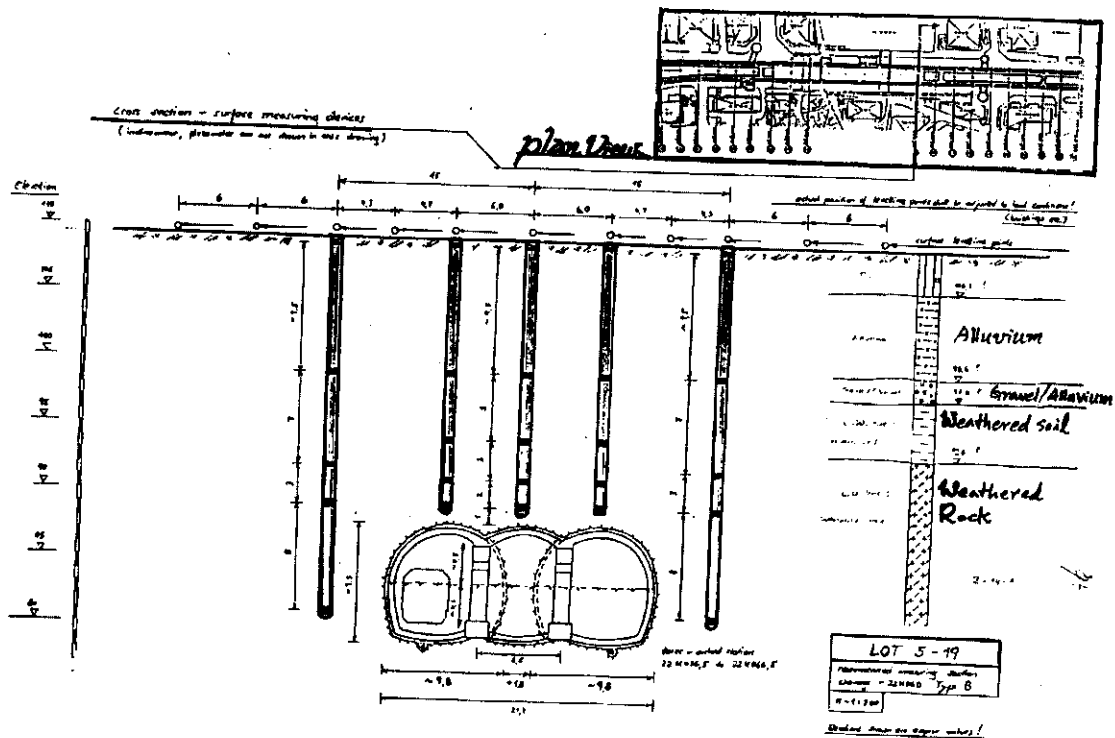


그림 12. 터널주변 지반계측기의 설치조합 예(서울지하철 5호선)

효과를 얻을 수 있다.

한편, 계측기간과 목적에 따라 시공중계측과 영구계측으로 구분할 수 있고 이에 대응하는 계측시스템은 계측방법의 특성상 수동계측과 반자동 및 자동화계측으로 나눌 수 있다. 시공중계측이란 전 절에서 이미 설명한 바와 같이 계측관리를 주관하고 있는 기술자들이 터널과 주변지반 및 구조물 상태를 수시로 확인해야 하므로 원거리 감시체계를 기본개념으로 하는 자동화계측은 오히려 적절하지 않을 수도 있으며 계측 system 의 중복을 피할 수가 없다. 그러나 터널이 완공되어 터널내부의 건축구조물과 터널굴착면과의 공간이 차단되면, 향후 배수 system 의 기능저하로 인한 주변지반내 지하수위의 상승이나 지하철과 고속전철의 개통 후 발생하게 될 반복적인 진동에 반응하는 주변지반 거동특성의 변화 등을 지속적으로 확인하지 않으면 기 완성된 터널구조물의 장기적 안정성 문제를 취급할 수 없다. 따라서 터널완공 후 2차라이닝 시공 schedule 과 더불어 영구 계측시스템의 설치를 고려해야 하며 이때 자동화계측 system 만이 시공후 안정관리의 매개로서 의미를 가질 수 있다.

### 3.2.2 해석을 위한 준비작업 (Error Correction & Data Selection)

터널시공중 안정관리를 위한 계측 system 이 구성되고 측정이 이루어지게 되면 수집된 정보의 해석을 위한 원시 data의 검증작업이 선행되어야 한다. 즉 야장(field record) 또는 측정기기(read out device)를 통해 기록된 최초의 정보를 여과없이 해석에 적용할 경우 지반거동의 특성을 오판하거나 과대 또는 과소평가하게 되는 오류를 범할 수 있다. 예를 들어 측량을 통한 계측의 경우 오독(誤讀) 또는 오기(誤記)에 의한 측정오차, 기록오차가 발생할 가능성이 상존하고 있을 뿐만 아니라 측정기기(steel tape 또는 광파측정기) 자체가 기후, 온도 등에 민감하게 반응하는 경우에는 측정자가

모든 계측과정을 완벽하게 준수했다 할지라도 원시자료 자체에 오차(noise)를 발생시키는 원인이 된다. 뿐만아니라 매설계측기의 경우 기계전기적인 매체를 통해 계측정보가 전달되는 과정에서 전선(electrical cable)의 단선(open circuit)이 있을 수가 있으며 혹은 지하수위에 매설된 기기의 경우 피복내로 지하수가 침투하여 단락(close circuit)의 효과가 나타나기도 한다.

한편, 계측기기를 매설할 당시의 영점이 공장 출하시의 표준값(certificated value)과 일치하지 않는 경우 현장점정(field calibration)에 대한 고려가 있어야 하나 이러한 과정없이 측정값을 사용할 경우 오류가 발생할 수 있다(zero error). 뿐만아니라 측정기 자체가 기계적으로 마모되거나 기타의 이유로 측정결과의 정도(accuracy)가 허용범위를 벗어나고 있을 경우 측정값의 연속성이 유지되지 않고 돌출적인 측정값을 얻을 수도 있다. 이 때 측정값을 분석과정으로 여과없이 도입할 경우 지반거동 해석과정에 오류가 발생할 수 있다(mechanical error). 실령 계측기기상의 문제가 전혀없다 할지라도 연속되는 측정행위의 시간적 공백동안에 지반거동 발생과 무관하게 계측기에 직접적인 영향을 행사할 수 있는 요소, 즉 시공중 장비와 인력에 의한 과도기적 특성값(transitional noise)이 측정값에 포함될 수 있다. 그림 13은 매설계측기 중 지중수평변위계(경사계-inclinometer)의 측정결과로부터 오차를 보정하는 간단한 과정을 보여주고 있다.

#### (1) 기계검정(Device Calibration)

계측에 사용되는 기기는 일정주기로 기계오차에 대한 공식기관의 검정(calibration)을 받아야 한다. 그러나 국내 실정에 준하여 볼 때 대부분의 매설계측기는 수입품으로 구성되어 있어 국내기관에는 각 측정계기를 검정할 수 있는 기준과 장비 등이 거의 전무한 상태로 소위 공신력있는 기관에 검정의뢰하기 위해서는 불가불 계기생산자 또는 생산국의 특정기관에

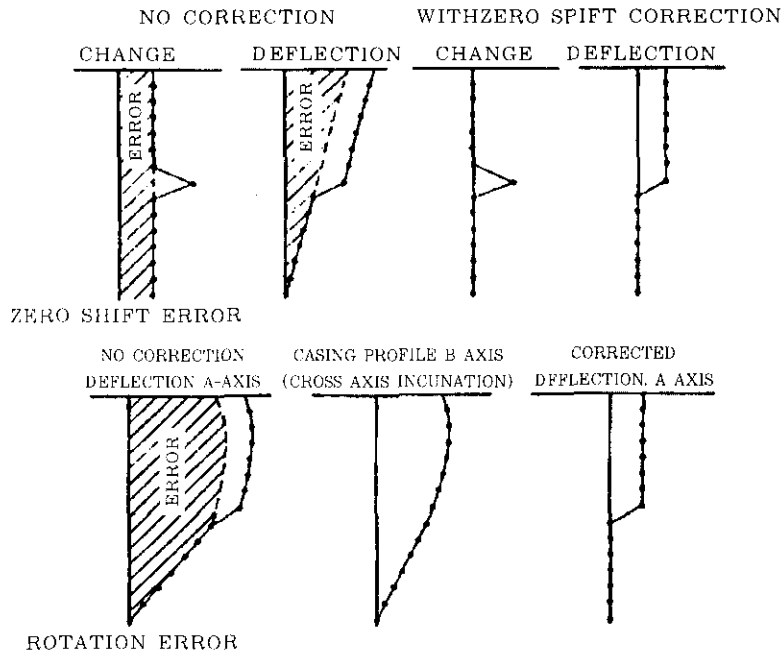


그림 13. 측정값의 영점조정의 예(Inclinometer)

의뢰할 수밖에 없다. 그러나 실제로 이러한 절차를 밟기 위해서는 장기간의 시간이 소요되므로 현실적으로 계기의 사용이 빈번이 이루어지고 있는 측정현장의 입장에서는 거의 불가능할 뿐아니라 일단의 절차를 밟아 기계검정이 이루어진다 할지라도 재차 국내로 반입되는 운송과정에서 계기의 안정성이 손상을 입을 수도 있으므로 실제로 기계검정에 대한 부담이 크다. 따라서 작금의 국내 터널제측 현장에서는 이에 대한 특별한 고려없이도 수년동안 동일 기계를 무검정으로 사용하고 있으나 이런 경우라도 해도 사용현장에서는 현장검정을 통하여 계기의 안정성에 대한 상대적인 지표를 설정하고 이를 근거로 하여 제측결과에 대한 신뢰도 여부를 함께 제시하는 노력이 필요하다.

현장검정(field calibration)을 위해서는 동일 시점에서 제측대상에 대한 무제한의 반복측정을 실시함으로써 시간요소가 배제되고 기계오차 및 측정오차만이 개입된 측정값을 얻을 수

있다. 이렇게 얻어진 측정값 중에 측정오차에 해당하는 요소들은 쉽게 여과될 수 있으므로 나머지 원시자료만을 통계분석함으로써 기계오차의 편차를 구할 수가 있다. 이것이 생산자가 보증하고 있는 허용범위내에 들 경우 측정값은 기계오차의 부담으로부터 자유로울 수 있으나 그렇지 않을 경우 계기를 교체하거나 부득이할 경우 편차의 크기를 감안해도 거동해석의 방향이 근본적으로 바뀌지 않는다면 편차의 확장여부를 계속 확인검증하는 것을 전제하여 측정값의 해석단계로 넘어갈 수 있다.

## (2) 측정자료의 검색(Data Correction)

계기오차에 대한 검정과정의 마무리되었다면 계기가 정상적인 작동을 하고 있는 상태에서 지반거동과 관련없이 측정값에 반영되는 불특정의 오류(noise) 들을 검색해야 한다. 시공중 장비와 인력에 의한 오류값이나 오기(誤記)에 의해 변경된 측정값은 시공현황 중 특기

사항을 참조할 뿐 아니라 시간별, 지역별 연속성을 고려하여 전후 측정값과 인접한 지역에서의 측정값, 또는 상호보완성을 가지고 있는 계기상호간의 계측값 비교를 통하여 확인해야 한다. 특별히 원시자료를 정리하는 과정에서의 오기(誤記)는 수치로 표현되고 있는 측정값군을 그래프로 도식화함으로써 들출되는 값을 검색함으로써 쉽게 조정할 수 있다.

### 3.2.3 기초정보의 단계별해석(Analysis Procedure)

일단 검색된 계측자료의 기초정보는 해석과정에서 이론식과의 비교 또는 안정성평가를 위해 제시되고 있는 여러 가지 해석기법을 적용하기에 적합한 형태로 가공되어야 한다. 해석기법은 크게 정성적인 안정성평가와 정량적인 안전율의 확보의 차원으로 구분되는데 정성적인 평가를 위해서는 개개의 형식으로 분리되어 있는 관련정보들을 집성하여 총괄적으로 수록함으로써 종합적인 안정성여부를 일시에 검토 판정할 수 있는 총괄정보매체의 개발이 필요하다. 반면 정량적인 분석의 경우 터널의 안정성에 관여하고 있는 각종 지보재, 주변지반거동에 관한 계측정보 및 측정개시후 매측정시 경과시간 및 정량화된 시공현황정보(막장이격거리) 등을 총 망라하여 이들중 인자(因子)간의 상관관계가 명료한 값들을 상호연계하여 상관도로 부터 상관계수 및 상관함수 등을 확정하는 기법이 필요하다. 정량적인 방법에 의한 분석을 통하여 소위 경시변화도(time-dependent curve)라 불리는 시간축에 대한 관련 계측인자의 도식화와 관련곡선의 수렴여부를 판단하는 예측관리수준을 절대치관리의 수준으로까지 진보시킬 수 있다.

#### (1) 관련정보의 취합 (All-in-One Record)

터널계측을 통한 안정성평가에 동반되는 해석정보는 매우 다양하다. 따라서 한 두 개 정도의 계측정보만을 가지고 절대적인 안정성을 평가하기란 매우 어려울 뿐 아니라 여러 가지 정보를 개개의 형태로 분석하고 서로 상호비교

하는 작업은 필연적으로 까다로울 수밖에 없다. 이와같이 중요성에 비추어 까다롭고 복잡한 절차를 단순화하여 보다 효과적인 안정성평가가 이루어질 수 있게 하기 위해서는 관련된 모든 정보를 하나의 꾸러미로 묶어 일목요연하게 정리하는 기법이 필요하다.

#### 가) 지반조사정보(Geological Investigation & Survey)

예를 들어 터널시공중 수집된 지반정보의 경우 일반적으로 막장진행과 함께 막장별로 face mapping 된 정보가 개개의 양식에 따로 분리되어 있다. 이 경우 관련기술자가 터널이 진행되는 방향으로의 연속적인 정보를 파악하기 위해서는 개개의 양식을 들여다 보며 머리속에서 스스로 조합해야 하는 불합리한 과정과 순간적인 판단착오의 가능성을 내재하고 있다. 그러나 각각의 막장위치 즉, 측정에서의 관측정보를 관련터널 자체의 연장 또는 연속된 측정점을 수평축으로 하여 하나의 독립된 양식에 암반상태와 절리의 방향과 크기, 지역별 갱내 인입수의 정도, 터널상부토포의 크기와 분포, 측정별 관련계측기의 정보 및 구간전체에 걸친 절리군의 방향과 경사 정보에 의한 암반사면안정 판정기법(평사투영법)을 적용한 결과 등의 수록이 동시에 이루어진다면 이 터널의 전반적인 안정성과 국부적으로 보강이 필요한 지역에 대한 이해, 그리고 한걸음 더 나아가 터널이 계속 진행될 경우 나타나게 될 지반의 불연속성 등에 대한 예측이 가능할 수 있다. 뿐만 아니라 선형터널 시공과정에서 이같은 과정을 통하여 집성된 지반정보는 동방향으로 시공되고 있는 후순위 터널을 안전시공으로 유도하는 완벽한 정보매체가 되는 것이다. 그림 14는 이미 상술한 내용을 현장에서 적용한 실예이다.

#### 나) 지반계측계획(Constrction & Reading Schedule)

계기를 이용한 지반계측의 설정은 기본적으로 터널시공계획에 따라 연동되어진다. 따라서

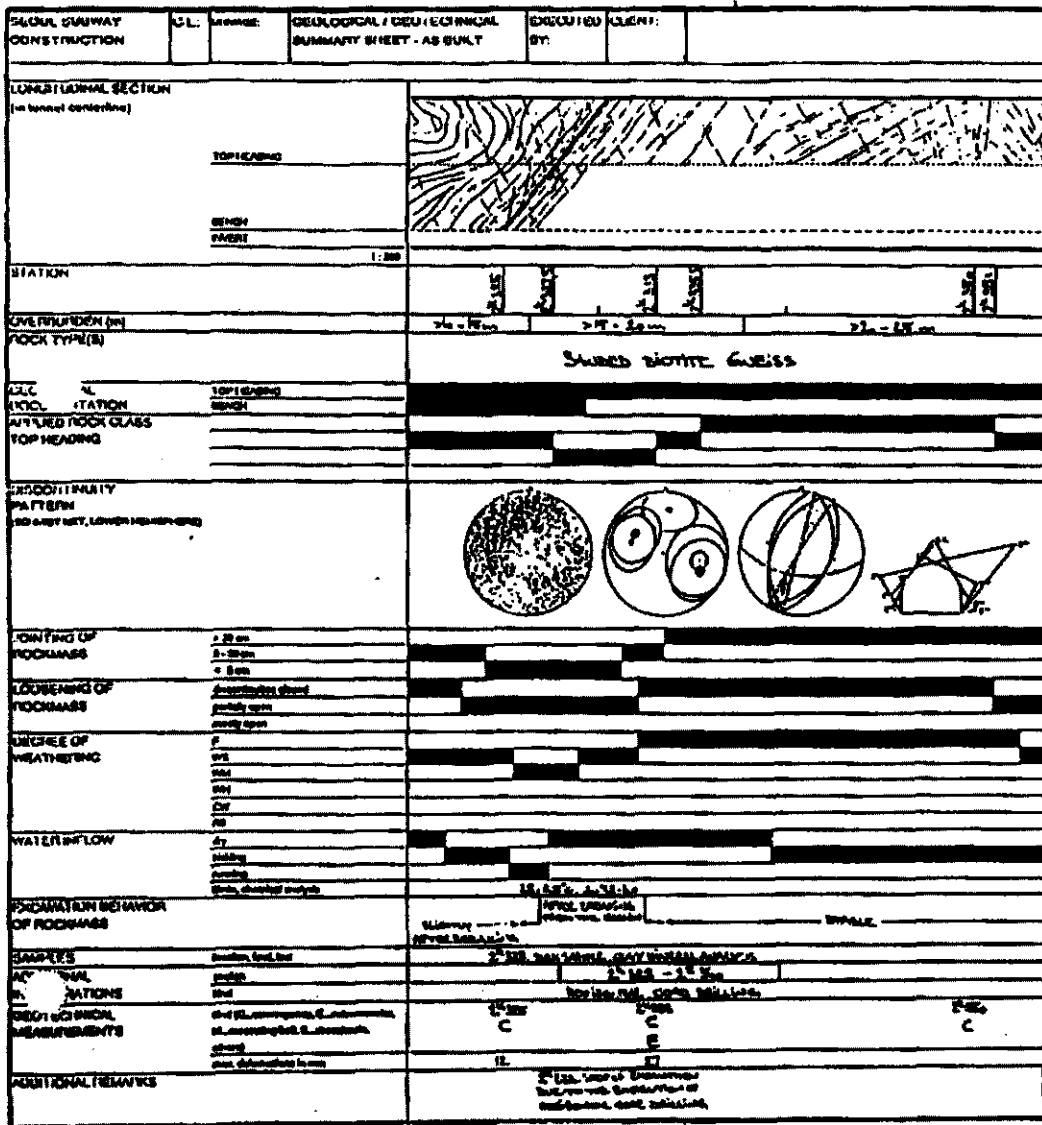


그림 14. 지반조사결과와 총괄예(서울지하철 7호선)

시공정도에 따라 계측빈도를 수량으로 제시하는 일반적인 빈도표기 방법으로는 시공과 계측 일정의 상호관계를 명료하게 파악하기 힘들뿐 아니라 양자간의 안정관리 인자로서의 계측요소가 정확히 연관되지 않을 수 있다. 예를 들어 지중침하계가 지표면으로부터 2 arch 터널

단면의 좌우측 지반내 터널기초부까지와 터널 중앙 상단부까지 각각 연직으로 설치되어 있다면 지중침하계의 각 측정점과 연동되고 있는 터널시공 공사중에 해당하는 주요 관련인자는 경과시간과 함께 매 측정일 당시 측정 단면으로부터 시공중인 터널막장까지의 이격거리(이

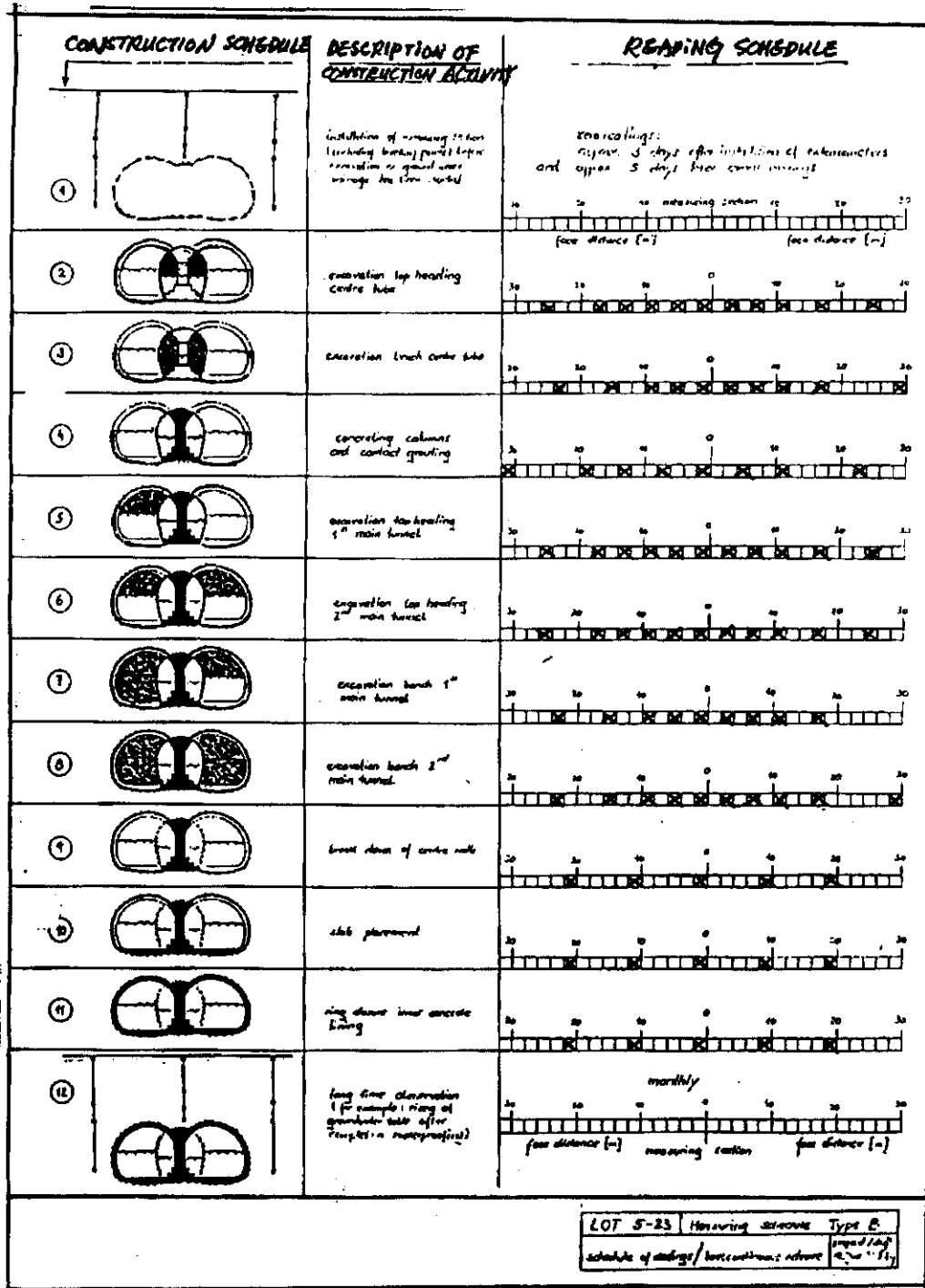


그림 15. 지반계측계획의 총괄예(지하철 5호선)

하 막장이격거리)를 들 수 있다. 따라서 기존의 계측시방에서 표현하고 있는 수량적인 계측 빈도만으로는 막장거리를 독립변수로하는 지중침하의 상관관계를 일관성있게 나타내기를 기대하기 어렵다. 따라서 터널시공 단면의 굴착순서와 막장이격거리에 대한 측정시점을 하나의 양식에 총괄적으로 나타낸다면 측정시점의 누락이나 빈도수에 대한 시비가 사라질 뿐 아니라 측정완료 후 해석단계에서 막장거리에 대한 계측변위의 상관관계가 보다 명료하고 일관성있게 나타남으로써 두 인자간의 실용적인 상관관계 분석이 가능할 뿐아니라 터널단면중 선행굴착된 부분단면의 결과를 이용하여 후발 굴착단면의 시공이 진행될 때의 침하량 변동에 측이 가능할 것이다. 그림 15는 터널시공에 대한 지반계측계획을 보여주는 실예이다.

다) 지반계측결과(Measurement Summary)  
 하나의 계측단면에 설치되어 있는 지반계측 결과는 관련정보가 한 곳에 모일 수 있도록 정리되어야 한다. 만일 개개의 계측정보가 시간 경과에 따른 변동량 기록 즉, 각각의 경시변화도를 이용하여 기록, 관리된다면 시공중 현황과의 관계나 서로 상관있는 측정인자간의 연관성여부를 파악하기 어렵다. 한편, 계측단면으로부터 시공진척도에 따라 이동하고 있는 측정시점의 막장면까지의 이격거리도 매우 중요한 계측 요소인 것을 감안할 때 계측결과의 총괄표를 작성하고 경시도를 작성함에 있어 막장이격거리와 공사정보 즉, 시공중 특기사항을 경시도에 기술함은 물론이거니와 분할굴착단면의 굴착순서에 번호를 부여함으로써 전 계측기간동안 발생한 막장이격거리에 대한 정보가 두 개 이상 혼재하고 있을 때도 각각의 경시도가

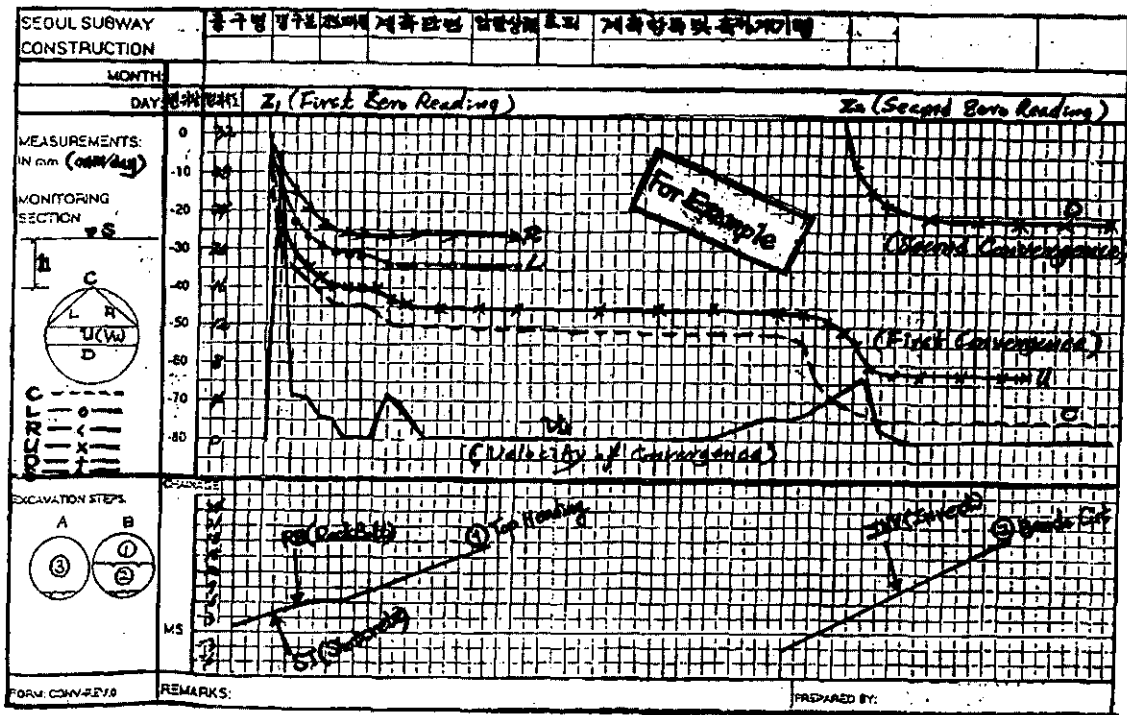


그림 16. 지반계측결과의 총괄표작성 예

쉽게 구분되도록 하여야 하며, 같은 방법으로 관련 계측인과 터널단면과의 상관관계를 도시하고 해당 측정요소별로 기호를 기재하여 동시에 도시된 계측정보를 식별하여야 한다. 따라서 계측결과 총괄표의 특성은 많은 양의 정보를 동시에 포괄함으로써 지반거동의 특성해석에 도움이 되어야 하며 혼돈이 발생하지 않도록 유의해야 한다. 그림 16은 지반계측결과와 총괄표를 작성하는 예를 보여주고 있다.

(2) 상관인자분석(Correlation Analysis)

신뢰도평가를 통한 측정자료의 검색작업이 끝나면 오류(noise)와 오차(error)가 제거된 정련된 정보(refined data)를 얻을 수 있다. 전 절다)항에서 기 언급한 지반계측결과와 총괄적인 정리기법을 통해 시간경과에 대한 측정요소의 변동사항과 연관된 정보의 상호영향여부를 정성적으로 확인할 수 있다. 그러나 서로 상관있는 특정인자 상호간의 정량적인 평가에는 한계가 있고 상관정도의 크기와 일관성에 대한 분석은 불가능하다. 따라서 신뢰할 수 있는 기초 정보를 토대로 특정 상관인자간의 상관관계를 구성하기 위해 동일시간 축에 대한 해당 상관인자들의 중복적인 도식화의 방법이 아니라, 한가지 상관인자를 독립변수 축으로 선택하고 기타 관련인자들의 측정값을 분산형으로 plot 하면 점들의 군을 통과하는 회귀곡선의 상관계수(correlation coefficient)를 구할 수 있고 이것

은 곧 상관성의 신뢰도 크기와 비례한다.

한편, 상관계수의 크기 정도에 따라 연관된 인자간 상관관계의 재관성 여부를 판단할 수 있으며 특별히 독립변수구간 변동에 따라 상관관계의 일관성이 유지되지 않고 일정구간을 벗어나게 되면 현저한 상관계수의 감소현상이 포착될 때 관련인자의 상관유효범위를 정의해야 한다.

예를 들어, 계측단면을 전후한 막장이격거리의 원근에 따라 계측단면을 구성하고 있는 지표침하, 천단침하, 내공변위 및 각종 응력측정 결과의 반응 정도는 일정범위 안에서만 유효하되 제한된 범위를 벗어나면 일정한 수준에서 수렴하는 형태가 될 것이다. 그림 17은 계측범위가 막장위치로부터 후방거리 2D - 5D 구간과, 진행방향으로는 토피 H와 상반굴착깊이  $h_1$ 의 합인 범위까지 제안하고 있으나, 실측결과와 상관성분석으로부터 이 공사지역별로 기준 범위의 적합성여부의 검증과 필요시 범위의 확장여부 등을 판정해야 한다. 같은 방법으로 그림 18에서 볼 수 있는 바와 같이 계측단면과 막장 현위치와의 거리를 l이라 할 때 지보재의 보강 및 계측단면후방 범위를  $1/4 \sim 1/2 l$ 로 정의하고 있으나 실제 계측결과로부터 막장이격거리, 지보재의 길이 두께, 지보범위 등의 상관관계를 분석하여 가장 효과적인 지보범위와 재료의 특성을 선택해야 한다.

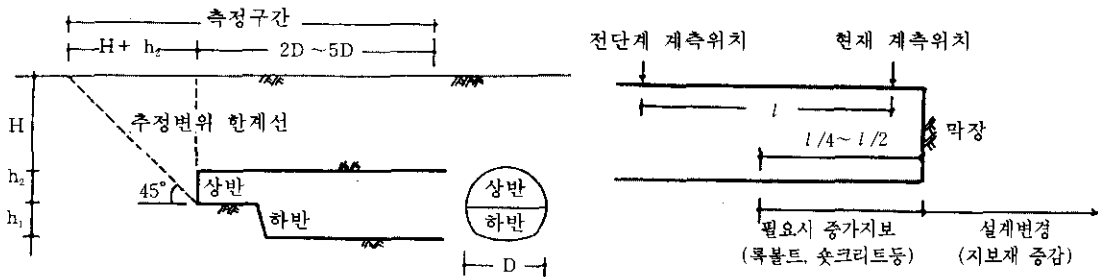


그림 17, 18. 상관관계분석과 유효영역의 판정



### (3) 상관함수분석(Functional Development)

일단 오차와 오류를 제거한 후 상관관계의 충분한 형성 여부와 유효상관구간이 확인된 관련정보만을 선별하여 관련인자간의 함수관계를 대표할 수 있는 회귀곡선의 유형과 함수산정의 과정이 필요하다. 회귀곡선의 선정은 가장 간단하고 적용하기 쉬운 함수형태를 선택하되 함수의 선택에 따라 상관계수의 편차가 심하게 발생할 경우에는 신뢰도 측면에서 상관계수가 가장 높은 쪽을 선택하는 것이 타당하다.

한편, 함수관계가 이론식으로 또는 경험적으로 정의되어 있는 경우 이의 적용성여부를 판단하는 기회로 삼을 수 있으며, 만일 적용코자 하는 함수가 상관함수 형태로서의 적합성이 확인된다면 적용하고자 하는 대상함수가 관련 계측정보의 상관관계를 가장 잘 대표할 수 있도록 (편차가 최소값을 갖도록) 함수내의 계수값을 결정하면 된다. 이렇게 얻어진 계수값은 지반상수의 크기를 좌우하는 요소로서의 역할이 강조되며 feed back 의 한가지 과정으로서 매우 중요한 의미를 가진다.

예를 들어, 내공변위량과 막장이격거리, 또는 내공변위량과 시간의 관계는 각각 식(1)과 (2)로써 정의되며 실제로 현장에서 측정된 계측값 중 막장이격거리/막장직경(=L/D), 경과시간(t)에 대한 내공변위의 대응점들을 분산형 그래프로 plot 한 후 식(1), (2)를 각각의 대표함수 즉, 회귀곡선으로 반영하여 점들의 분산이 최소가 되도록 산정된 계수값을 찾아내어 상관함수를 결정할 수 있다.

$$U = U_m(1 - \exp^{-\beta(L/D)}) \quad (1)$$

$$U = \alpha(1 - \exp^{-\lambda t}) \quad (2)$$

여기에서, U : 변위량

U<sub>m</sub> : 최종변위량

D : 막장직경

L : 막장거리

β : creep 계수

t : 경과시간

α, λ : 상수

한편, 식(2)와 같이 상호관련 계측인자(내공변위 U와 경과시간 t)간의 연관성을 단순비교함으로써 상관함수를 개발하는 것이 기본적인 개념이 되겠으나 식(1)의 경우는 막장거리(L) 또는 터널직경(D)의 각각에 대한 접근방식을 초월하여 양자를 통합하는 1차 상관함수로서의 새로운 변수 L/D를 2차적으로 내공변위(U)와 비교하는, 보다 진보된 형태의 상관함수를 보여주고 있다. 여기에서 함수의 형태와 관계없이 식(1), (2)로부터 각각 U<sub>m</sub>, β 및 α, λ는 상관함수인 지수함수의 계수로 정의되고 상관도에 plot 된 점들을 통과하는 회귀곡선이 최소의 편차를 유지하도록 U<sub>m</sub>, β 또는 α, λ의 조합을 산정함으로써 최종함수를 결정할 수 있다.

### 3.2.4 계측관리의 효율적인 적용사례 및 상관함수 개발의 예

터널굴착중 계측관리와 안정시공관리는 시공의 효율성과 경제성 측면에서 결코 분리하여 생각할 수 없는 절대 불가분의 관계이다. 따라서 실제 현장에서 계측관리에 대한 접근 방식에 따라 위험인자 사전예지와 예방이 가능할 뿐 아니라 혹은 기록관리수준으로 유지하는 현장의 경우 오히려 위험을 가중시키는 부담을 면할 수가 없다.

한편, 지역별 또는 국가별로 터널시공기록과 함께 잘 집적된 계측정보를 총괄적으로 분석해 본다면 지반 형성이력이 유사한 지역대에서 새로운 터널계획을 수립하게 될 때 하나의 잠정적인 관리기준값 내지는 대상지역에 잘 적용될 수 있는 관리기법의 제안이 일반화 될 수 있다.

#### (1) 계측관리의 효율적인 적용사례

서울지하철 5호선 모공구는 기존지반조사 결과 연암층으로 분류되어 규격화된 지보를 터널굴착에 따라 일률적으로 시공하고 있었으나, 1993. 5월중 막장 후방 계측단면에 표착된 내

공변위의 경시변화가 수렴 단계에 접어들던 중 돌연 급격한 증가량이 포착됨으로써 계측단면 전후 20m정도의 범위안의 터널내부 좌우 측벽에 Rock/Bolt를 2열씩 추가 시공함으로써 더 이상의 변위증가를 억제하고 안정화 시도에 성공한 경험이 있다. 원인은 지반물성의 불연속으로 암반강도의 저하 즉, 심한 풍화대를 관통하게 된 때문으로, 이후 본 현장에서는 막장면을 이용한 수평천공을 통해 지반상태의 변동을

사전 탐지하는 한편 계측에 의한 보강 내역을 참조하여 풍화대 통과시에 대한 보강대책을 수립함으로써 안정시공을 유도하였다. 그러나 그림 19는 당시 공구에서 측정된 내공변위 증가시 경시변화도와 특정지점에 추가 R/B 시공을 암시하는 표기가 기재된 실제의 현장기록으로 올바른 계측관리를 통한 위험 예지와 예방의 중요성을 암시하고 있다.

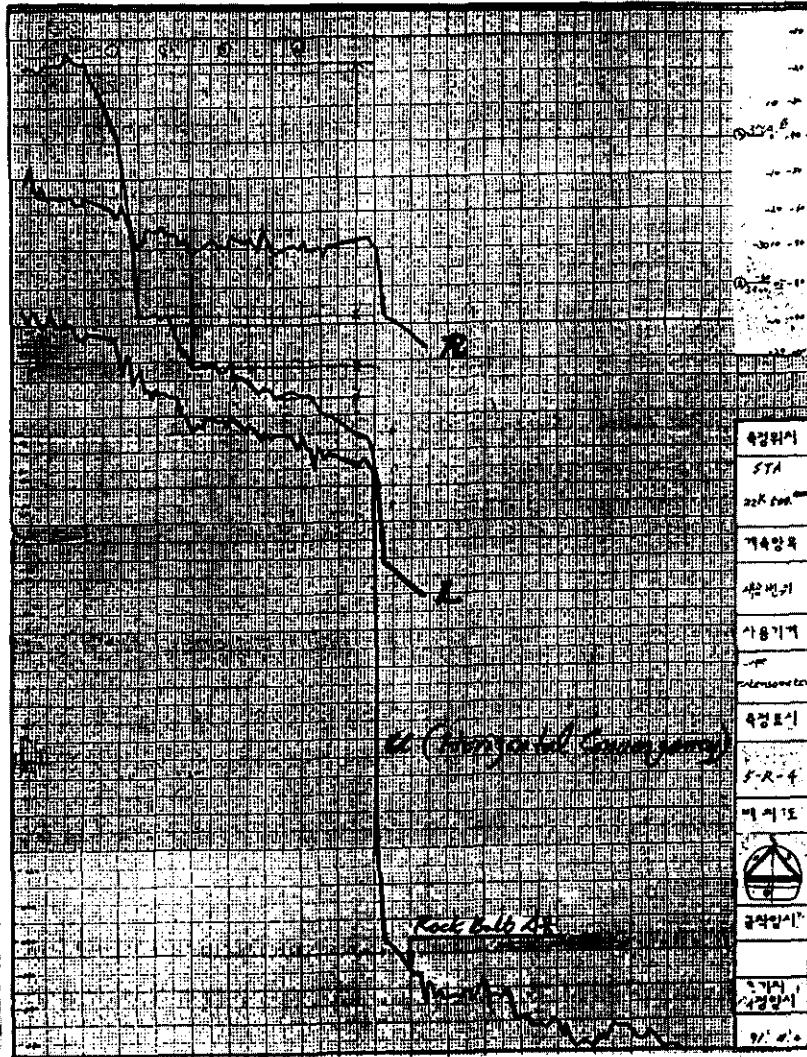


그림 19. 터널 시공중 이상 내공변위 발생과 조치(예)

(2) 상관함수 개발의 예

측정된 계측자료중 상관관계의 일관성이 유지되고 있는 인자들은 특별히 정량적인 상관관계 즉, 관계함수를 정량적으로 규정할수 있다. 그중 가장 많이 취급되고 일반화 되어 있는 예가 지표침하와 관련인자간의 상관관계이다. 예를 들어 지표침하와 터널내부의 천단침하, 또는 각각의 침하량과 막장이격거리, 계측단면 터널중심선으로부터의 좌우 이격거리 등 매우 다양하고 심층적인 상관관계 분석이 이루어짐으로써 각국의 터널시공실태를 중심으로 상관함수 개발에 대한 노력이 결실을 맺고 있으며 우리나라의 경우도 서울시 2기 지하철 건설공사와 더불어 NATM 터널에 대한 계측결과가 물량적으로 충분히 확보됨으로써 작금에 이르러 상술한 바와같은 연구 결과가 결실을 보고 있는 추세이다.

하나의 계측단면을 선정하여 터널중심선으로부터 좌우 이격거리를 따라 분포되는 각 측정점에서의 침하량을 연속적으로 plot하면 관계곡선은 좌우 대칭이 된 것이며, 그 형태는 오차함수곡선(error funtion curve)이 x축에 대해 전도된 모습과 유사하다. 따라서 상관함수의 형태를 오차함수곡선으로 가정하고 이때 지표침하량과 터널중심으로부터의 좌우이격거리의 상관함수를 정의할 수 있다. 그림20은 프랑

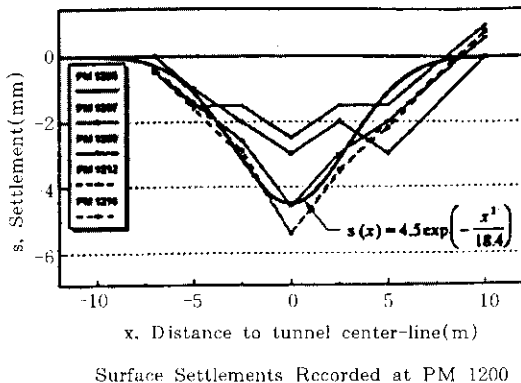
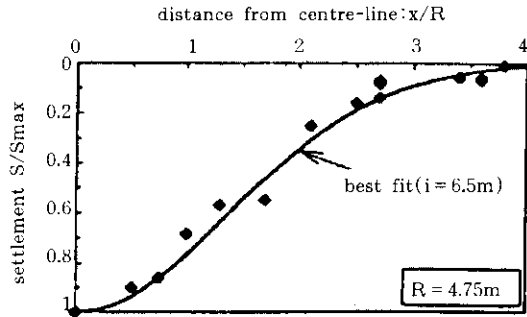


그림 20. 지표침하와 수평이격거리의 상관함수정의(예)

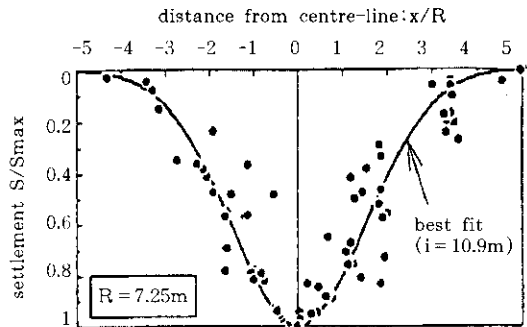
스 Val-de-Marne지역에서 시공된 sewer tunnel 시공중 측정된 계측단면(PM1200)중 하나로부터 상관함수를 도출한 예이다.

그러나 그림20에서 정의한 함수관계는 터널의 규격과 지반의 상태가 반영되지 않은 매우 제한적이고 지역적인 특성식이므로 상관 관계의 도출시 제한조건을 함께 정의하는 것이 필요하다.

한편, 보다 진보된 형태의 상관함수정의 방식으로는 상관인자를 무차원함수로 개발하는 것이다. 예를 들어 그림 20의 경우 침하량  $S_{(x)}$ 는  $S_{(x)}/S_{max}$ 로, 수평이격거리 X는 터널반경에 비교한 상대거리  $X/R$ 로 계측정보를 1차 가공



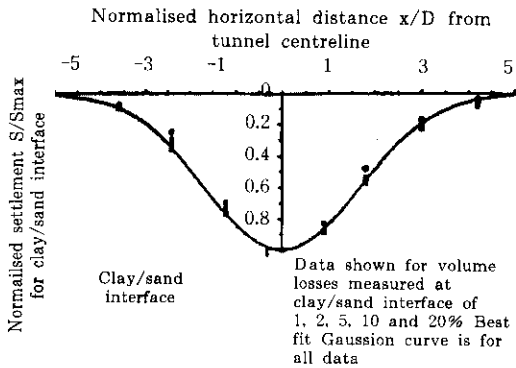
(a) Normalised shape of the surface settlement trough. Line 2 TBM tunnel.



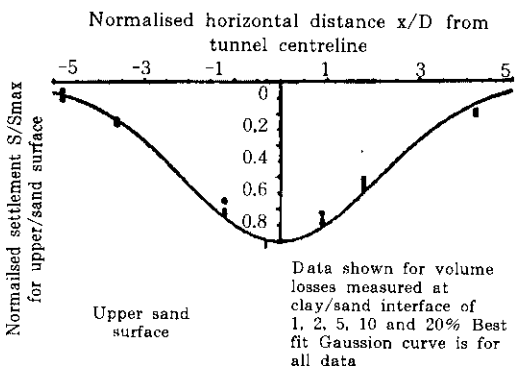
(b) Normalised surface settlement trough at Omonia underground station

그림 21. 상관함수정의의 일반화와 최적함수 개발(예)

하고 이들을 상관인자로 선택하여 비교한다면 지반의 특성과 터널규격의 상이에 의한 상관함수와 상관계수의 변동성을 제어함으로써 상관함수는 보다 일반적인 형태로 정의된다. 그림 21은 Athens시의 지하철 건설공사 관련 TBM 및 NATM tunnel시공중 취득한 계측정보를 분석한 예이다.



(a) Normalised troughs at the clay/sand interface



(b) Normalised troughs at the upper sand surface.

그림 22. 상이지반조건하에서의 상관함수특성비교

이 때의 관계식은

$$S_{(x)}/S_{max} = \exp(-x^2/2i^2) \quad (3)$$

으로 정의되며, 그림 20의 특정식에 비해 식 (3)은  $i$  라는 상수(trough width parameter)를 사용함으로써 상관도에 분포된 측정점들을 통과하는 가능한 여러 가지 곡선중에서 신뢰도가 최대(또는 편차가 최소)인 최적의 곡선을 정의할 수 있도록 구성된 일반식이다.

상기와 같이 상관함수의 일반적 정의와 최적화된 함수의 개발은 지반상태가 상이한 조건하에서의 상관함수 특성비교를 단순명료하게 한다.

따라서 일반화된 상관함수의 개발은 그 자체로서만 의미가 있는 것이 아니라 향후 더욱 확장된 지반공학의 영역으로까지 그 가치를 더할 수가 있다.

### 3.3. 결론

터널구조물과 계측에 대한 상호 연관성, 또는 계측을 통한 터널구조물의 거동과 이해라는 대명제하에 계측행위를 규정하는 일단의 시방내역들은 이미 보편적 지식으로 관련 기술자들에게 널리 보급되어 상식화 되어 있는 영역이므로 본 강좌에서는 고려하지 않았다.

한편, 일련의 계측행위에 대한 전반이 이미 정형화되어 터널 기술자들에게는 보편적 상식의 수준으로 자리매김하고 있는 반면, 작금의 현실을 계측결과와 지반공학적인 해석과정이 일부 소홀히 취급되는 경향이 없지 않았다. 따라서 금번 강좌에서는 측정 결과의 검색으로부터 가공, 상관관계해석과 신뢰도 문제까지를 주도적으로 논의하였다.

다만, 지면 관계상 아쉬운점은 이러한 해석 결과의 도출 전과정에 대한 총괄적인 예와 터널거동의 지반공학적인 이론적 배경을 좀 더 심도있게 접속할 기회를 갖지 못한 점에 대해 아쉬움이 남는다.

## 참 고 문 헌

1. "지하철 터널 설계와 시공자료집(I)", 서울시 지하철 건설본부, 1992
2. "지하철 터널 설계와 시공자료집(II)", 서울시 지하철 건설본부, 1992
3. "건설계측 시험과 시공", (주)아주지오시스템스
4. "터널신공법(TURS)계측시스템에 관한 연구 개발 보고서", (주)대우건설기술연구소, 1985.6
5. "계측관리 Field Manual(서울지하철 6-1공구)", 은진건설 엔지니어링(주), 1994. 3
6. M.E. ABDEL SALAM, "Tunnelling and Ground Conditions", National Authority for Tunnels & Egypt Tunnelling Society, Cairo, Egypt, 1994
7. Alfredo H.S. & Wilson H. Tang, "Probability Concepts in Engineering Planning and Design" Volume I, II, John Wiley & Sons, Inc, 1984
8. Vieitez - Utesa & Montunez - Cartaxo, "Towards New Worlds in Tunnelling", Vol I, II, International Tunnelling Association, 1992.
9. "Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground", An International Symposium Held at City University, London, U.K., 15-17 April, 1996.