

지하철 터널에서의 위험도 분석을 통한 지반조사 신뢰성 평가 Reliability Estimation of Site Investigation by Geotechnical Risk Analysis in Subway Tunnel

김환준, 김우성, 김영근, 이두화 ((주)삼보기술단)
박진우 ((주)희송지오택)
김갑부 ((주)에이스올)

요 지

본 연구에서는 도심지 지하철 터널을 대상으로 지반공학적 위험요소가 공사비 및 공기에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 잔여 리스크 개념을 이용하여 조사개소의 증가에 따른 공사비 및 공기의 신뢰도를 분석하였다. 신뢰도 분석결과, 지반조사 개소가 증가함에 따라 공사비 및 공기에 대한 위험도가 축소됨을 확인하였으며, 이러한 결과를 통하여 도심지 지하철 터널에서의 지반공학적 위험도 분석의 유용성을 확인하였다.

주요어 : 지하철 터널, 지반조사, 위험도 분석, 신뢰성 평가, 공사비 및 공기

1. 서 론

최근 터널설계에 있어 정확한 지반정보를 얻기 위한 노력이 증가함에 따라 지반조사 양(빈도)도 급격히 증가하고 있다. 또한 이러한 지반조사결과를 바탕으로 단층파쇄대, 연약대와 같은 지반공학적 위험요소를 사전에 탐지하여, 시공중 설계변경을 최소화하고 공사비에 대한 변화요인을 최소화하도록 하여야 한다. 이를 위하여 지반내에 존재하는 불확실성에 대한 요소를 파악하여, 이러한 제반 위험요소가 실제 공사에 미치는 영향을 분석하려는 연구가 진행되고 있으며, 이와 같은 지반공학적 위험도분석(Geotechnical Risk Analysis)을 통하여 지반특성과 공사비 및 공기에 관한 상호관계를 보다 명확히 할 필요가 있다고 판단된다.

특히 도심지 지하철의 경우, 제한된 조사여건으로 인하여 충분한 조사를 수행하지 못하는 경우가 많고, 이에 따라 설계요소에 지반의 불확실성이 더욱 많이 내재되어 있어 시공중에 설계변경이 계속적으로 증가함에 따라 발주처로부터 지반조사에 대한 신뢰성을 상실하는 경우가 많은 실정이다. 또한 최근 턴키나 대안설계와 같은 경쟁체제에서의 조사수량 및 조사비용의 급격한 증가는 설계품질을 향상시키는 것은 사실이지만, 이러한 조사방향이 근본적으로 시공에 어떤 영향을 미치는 지에 대한 정량적 분석이 부족한 실정이다.

본 연구에서는 도심지 지하철 터널을 대상으로 단계별 지반조사계획에 따른 공사비 및 공기의 신뢰도를 분석하기 위하여 공사비 및 공기에 대한 잔여 리스크(Remaining Risk)의 축소개념으로 접근하였다. 이러한 결과를 통하여 지반조사 단계별로 공사비와 공기 모두 리스크가 축소됨을 확인하였으며, 도심지 지하철 터널에서의 지반공학적 위험도 분석의 유용성을 확인하였다.

2. 지하철 터널설계에서의 지반조사

2.1 공사개요

본 구간은 서울시 지하철 3호선 연장 사업중 송파구 가락동~송파구 오금동을 연결하는 노선으로 총연장 1,579.3m 로 정거장 2개소, 환기구 6개소가 계획되었으며 터널 현황은 표 1, 현황도 및 터널단면 형상은 그림 1과 같다. A, C 구간은 각각 정거장 구간으로 2Arch 터널단면으로 계획하였으며 B와 D는 본선구간과 유치선 구간으로 복선단면과 대단면(3선)으로 시공성을 고려하여 직·곡선 통합단면 개념을 도입하였다.

표 1. 지하철 ○○○공구 터널 현황

구 분	A ○○정거장 터널	B 복선 터널	C ○○정거장 터널	D 유치선 터널
연 장(m)	56.4	593.8	65.0	448.2
단면적(m ²)	176.1	85.5	169.9	131.5

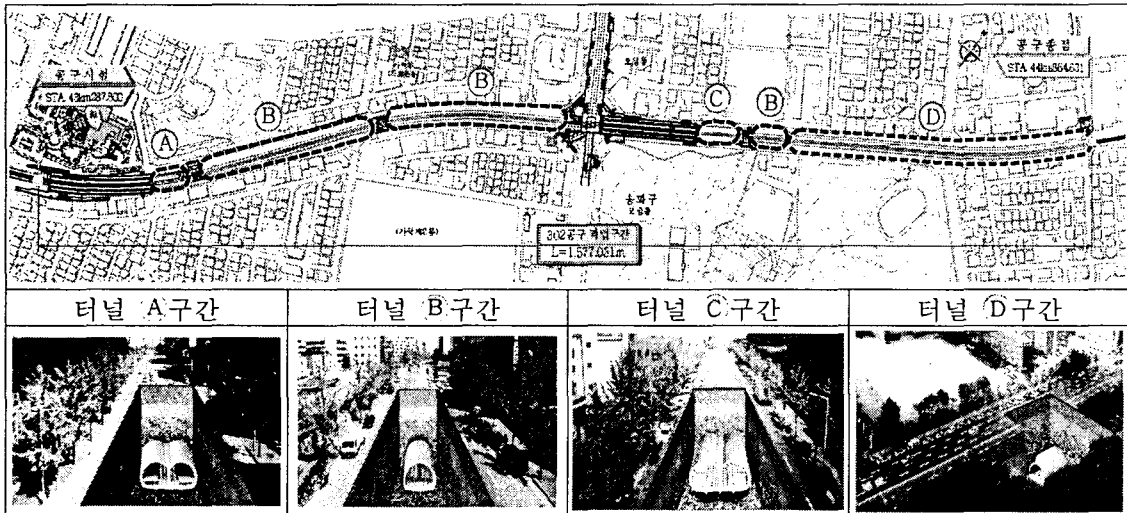


그림 1. 지하철 터널 주요 현황

본 구간내 지반조건은 붕적토 및 편마암의 풍화토에서 경암에 이르는 복합지층을 형성하고 있으며 횡단편차(동저서고)가 심한 상태이다. 터널통과 구간인 A와 D구간은 풍화암~연암의 암반층을 형성하고 있으며 B와 C구간은 연암이상으로 양호한 상태의 암반층을 형성하고 있다. 특히 종점부 부근에 단층파쇄대가 분포하는 것으로 조사되었다.

주요 지장물로는 광역상수도(Ø2,400) 및 공동구(5.5×2.3m이상)가 터널로부터 상부 16~24m이격된 위치에 노선전체를 따라 위치하고 있으며 노선하부로는 전력구 터널이 세미셴드 공법으로 현재 설계중에 있다. 특히 A, B 및 C구간에는 주유소가 위치하고 있어 터널내 대책이 요구되며 구간전체 노선주변에 건물들이 밀집되어 있어 발파시 소음·진동을 고려하여 계획하였다.

2.2 지반조사 및 결과분석

2.2.1 지질 및 지반특성

본 구간에 분포하고 있는 층적층은 한강 및 탄천에 의한 자갈 및 모래, 점토 등으로 구성되어 있으며, 본 구간은 선캠브리아기에 생성된 화성기원의 편마암 복합체(주로 호상흑운모 편마암 및 흑운모편암 등으로 구성)가 분포하고 있다. 또한 호상 흑운모 편마암의 편마구조는 NNE 내지 NEE 주향 방향을 나타내었다. 그림 2에는 본구간의 지질종단면도를 나타낸 것으로 302(경찰병원)정거장 및 터널 A구간은 각섬석 및 흑운모가 우세한 편마암으로 구성되어 있으며, 303(오금)정거장 및 터널 B구간은 석류석 및 화강암이 우세한 편마암으로 구성되어 있다.

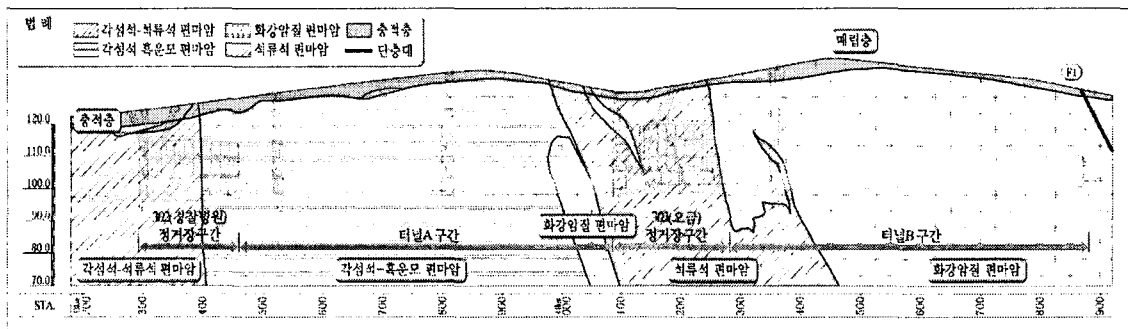


그림 2. 지질 종단면도

그림 3에는 본구간에서의 절리 방향성 조사결과를 나타낸 것으로 시점부에서 종점부까지의 주절리의 방향성은 257/16, 113/36, 353/58로 분포하고 있으며, 균질절리영역(HFD)의 방향성 동질성 검증시 총 3개의 영역으로 구분하였다.

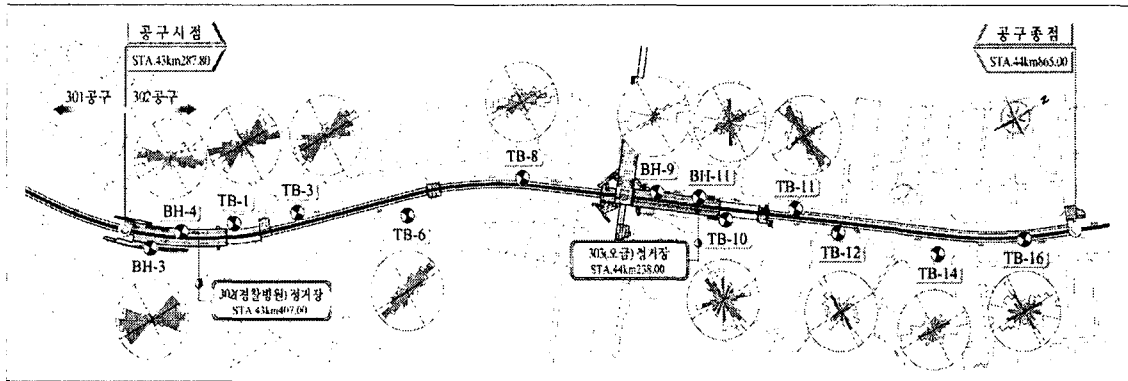


그림 3. 절리의 방향성 조사결과

2.2.2 시추조사

기본계획시 2공의 시추조사, 기본설계시 32공의 시추조사를 수행하였으며, 인근 시추조사자료와 전력구 시추조사결과를 이용하여 지층분석을 수행하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이 본구간의 지층은 서울지역에 분포하는 경기편마암 복합체 지반으로 시점부에는 풍화암층 발달이 발달하여 있으며, 중앙에는 풍화층이 얇아지면서 경암층이 조기에 출현하고 있다. 또한 종점부에는 연암층이 깊어지면서 단층과쇄대가 발달하고 있음을 볼 수 있다.

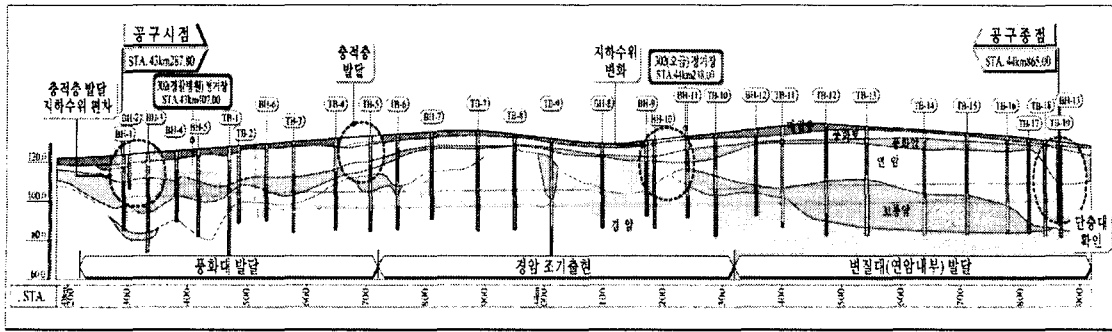
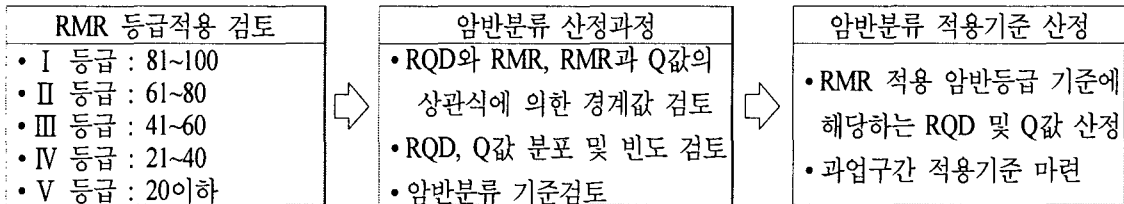


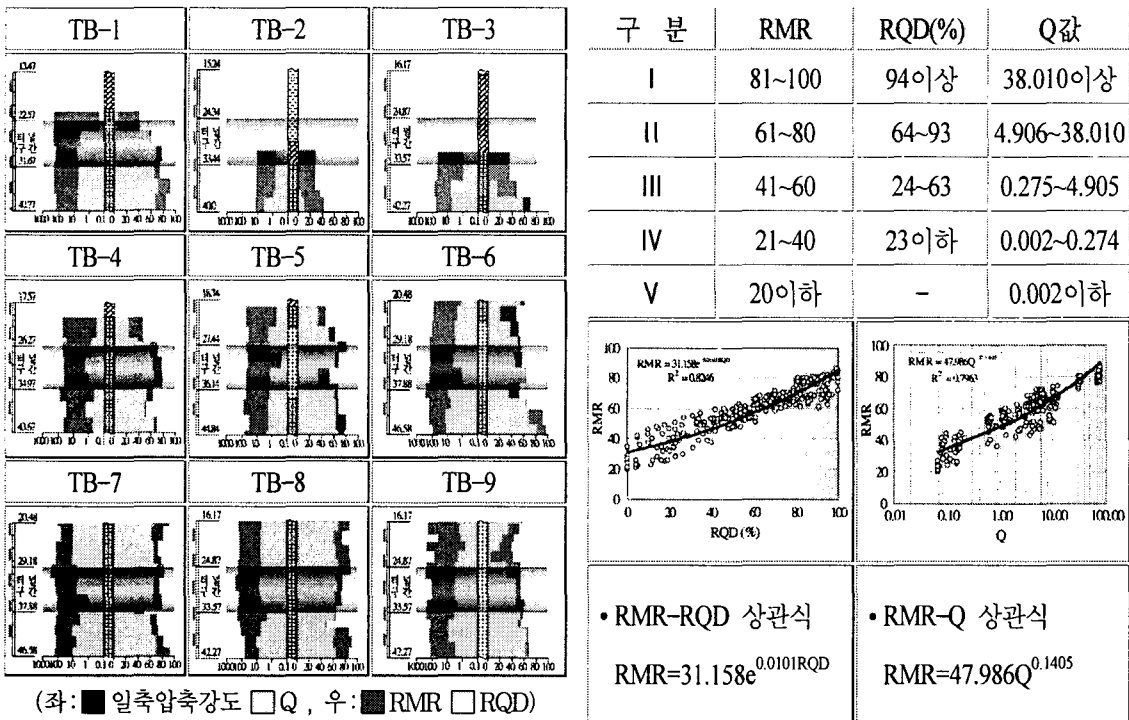
그림 4. 지층 종단면도

2.2.3 암반분류

(1) 암반등급 기준산정

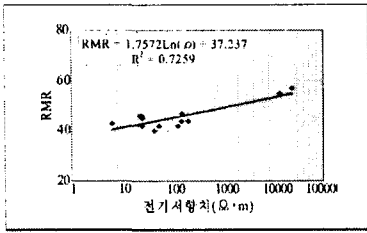


(2) 구간별 암반분류성과



(3) 미시추구간 암반분류

RMR 분류와 전기비저항치의 상관관계를 분석하여 비저항치에 의한 미시추구간의 암반등급도 작성하여 암종별 RMR 등급별 비저항치 분포도를 작성해 터널구간 암반분류에 적용하였다.



암반등급	I	II	III	IV	V
RMR	81~100	61~80	41~60	21~40	0~20
전기비저항 (Ω·m)	9×10 ¹⁰ 이상	7×10 ⁵ ~9×10 ¹⁰	5×10 ¹ ~7×10 ⁵	4×10 ⁻⁵ ~5×10 ¹	4×10 ⁻⁵ 이하

• RMR - 전기비저항치 상관식 = 1.7572Ln(ρ) + 37.237

(4) 터널구간 암반분류

터널구간에 대한 암반분류는 그림 5에서 보는 전기비저항 종단면도와 시추결과 그리고 미시추구간에 대한 암반분류결과를 바탕으로 그림 6에서 보는바와 같은 RMR 종단면도를 작성하였다. 그림에서 보는바와 같이 시점부에는 RMR 암반등급 IV이 주를 이루고 있어 암반상태가 풍화대가 깊고 절리가 발달한 지층임을 알 수 있다. 그리고 중앙부로 갈수록 RMR 암반등급이 II 또는 III등급으로 양호해짐을 볼 수 있으며, 종점부에서 다시 암반등급이 III 또는 IV 등급으로 불량해지고 종점부 끝 환기구 위치에서 일부 단층파쇄대가 확인되었다.

RMR 종단면도는 굴착/보강 설계와 수치해석의 입력물성 결정을 위한 정량적인 자료와 Guideline 제공하고 터널시공시 RMR시스템은 터널유지시간 및 무지보폭 등의 예측에 활용하였다.

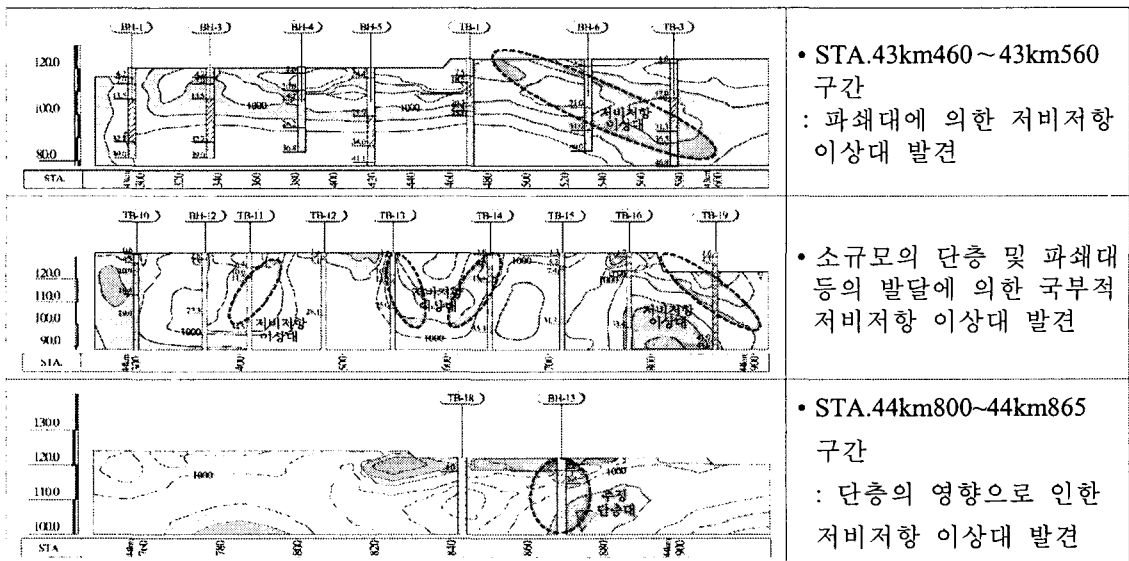


그림 5. 전기비저항 종단면도

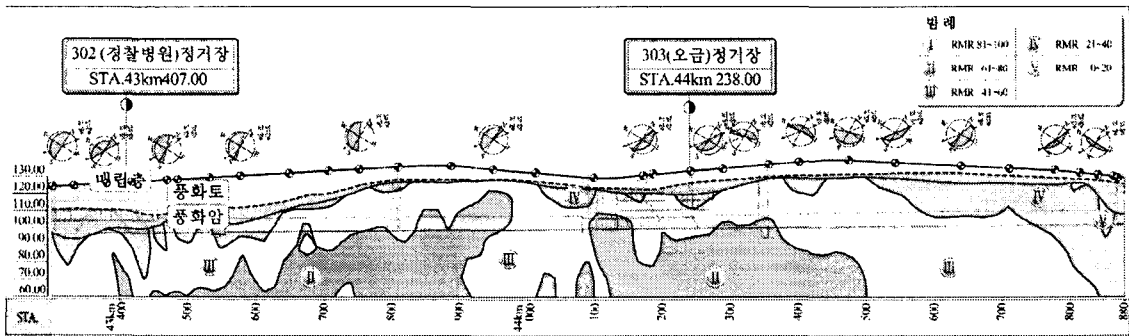


그림 6. RMR 종단면도

3. 지반공학적 위험도 분석

3.1 위험도 분석의 목적

본 연구에서는 지반공학적 위험요소가 터널공사에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 지반조사개소의 증가에 따른 공사비, 공기의 신뢰도를 추정하였다. 이를 통하여 지반조사결과와 신뢰성을 확보하고 시공중 지반 불확실성에 의한 리스크를 최소화하고자 하였다. 그림 7에는 본 연구에서 수행한 신뢰성과 위험도 분석의 관계를 나타낸 것이다.

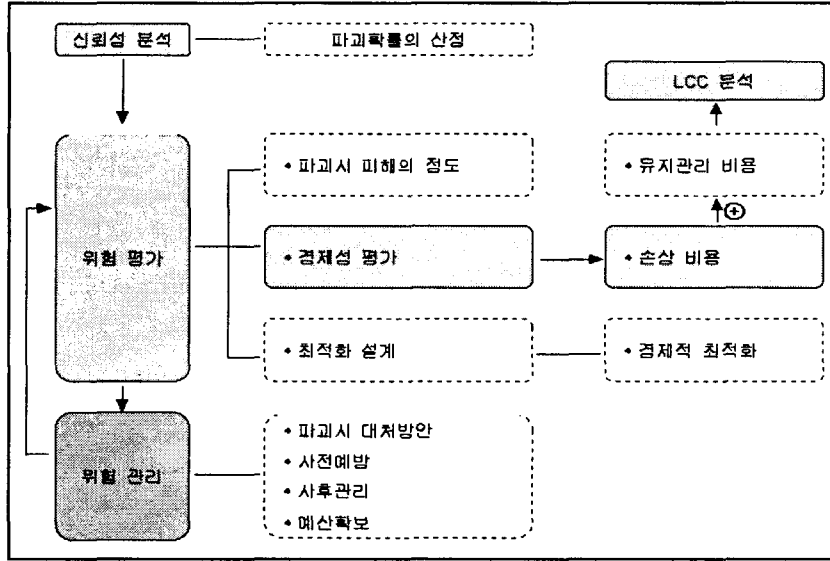


그림 7. 신뢰성과 위험도 분석의 관계

3.2 단계별 지반조사계획

1단계, 2단계, 3단계 조사계획을 수립하였으며, 각 조사단계별, RMR분포에 따른 지보형식 결정하고, 지보형식에 따른 공사비 및 공기를 추정하였다. 또한 공사비 및 공기의 편차가 변화되는 변곡점 결정하였으며, 총공사비 및 편차가 수립하는 단계에서 조사를 완료하였다.

표 1. 단계별 지반조사 계획

구 분	지 반 정보 획득 방안 (시추조사)	비 고
1단계 조사 (터널시추 6공)	<p>시추공수 : 6공 (평균시추공간격 약 200m)</p>	• 설계기준 시추 간격의 50%
2단계 조사 (터널시추 12공)	<p>시추공수 : 12공 (평균시추공간격 약 100m)</p>	• 설계기준 시추 간격 100m 이내 만족
3단계 조사 (터널시추 19공)	<p>시추공수 : 19공 (평균시추공간격 약 60m)</p>	• 설계기준 시추 간격의 150%

3.3 분석방법 및 위험도 분석

3.3.1 분석모델 및 분석절차

각 조사공 RMR 분포는 면적비로 환산하여 공간 중간부분 영역의 지보형식 결정하였으며, 면적비는 지보형식의 확률이라 가정하였다. 또한 공사비 및 공기는 정규분포를 따르는 것으로 가정하였다. 그림 8에는 본 연구에서 적용한 분석절차가 나타나 있다.

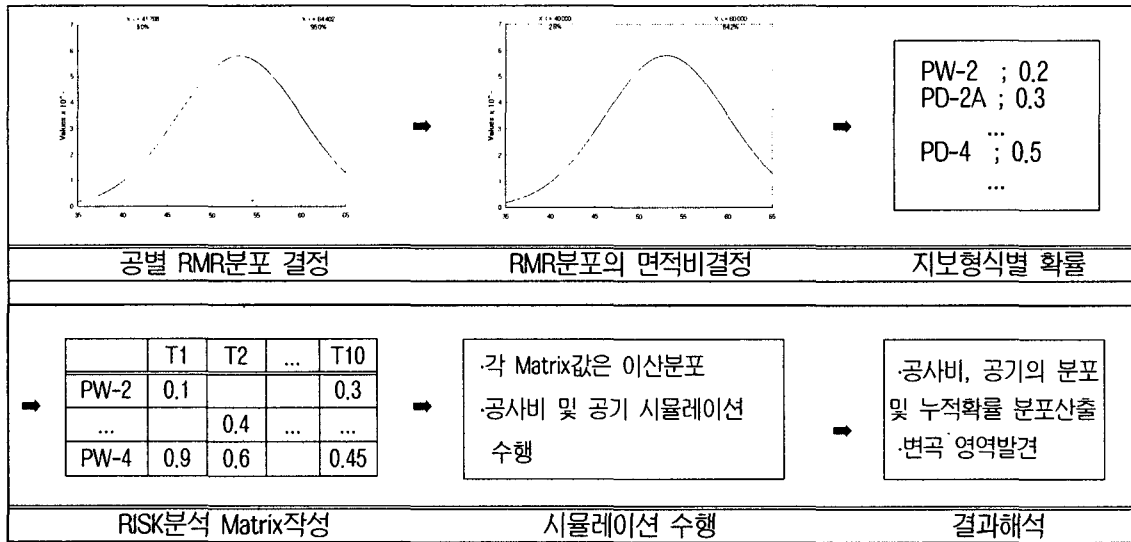


그림 8. 분석절차

3.3.2 단계별 위험도 분석

그림 9에는 단계별 위험도 분석과정이 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 설계과정에 선의 획득한 지반정보로부터 공사 및 공사비에 대한 분석을 실시하였다.

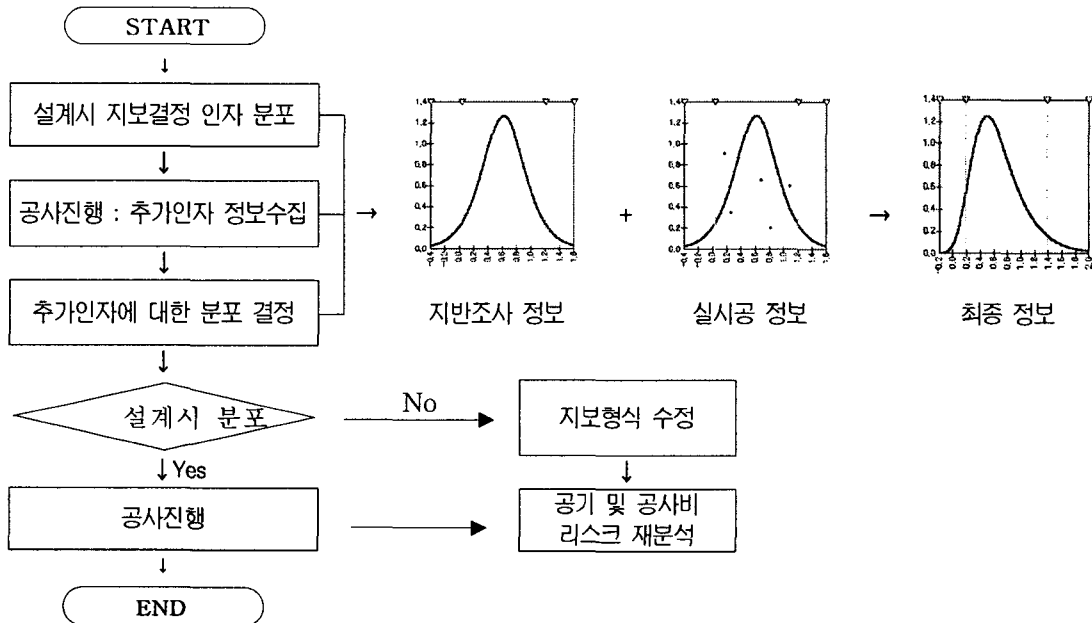


그림 9. 단계별 위험도 분석

3.4 분석결과

3.4.1 공사비 분석

단계별 지반조사결과에 따른 공사비 분석결과는 그림 10에서 보는 바와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 단계별로 표시되는 공사비를 확률밀도분포 및 누적밀도분포로 나타내었다. 공사비 분석결과, 지반조사 1단계와 2단계 사이에 평균공사비의 현격한 변화 발생함을 볼 수 있으며, 지반조사 2, 3단계는 평균 공사비의 변화가 미미한 상태에서 표준편차만 감소함을 알 수 있다. 또한 누적분포에서 1단계와 2단계사이의 이격은 불확실성의 확연한 감소를 의미하고 있으며, 지반조사 2, 3단계는 누적분포의 기울기 변화만 미세하게 발생함을 확인할 수 있었다.

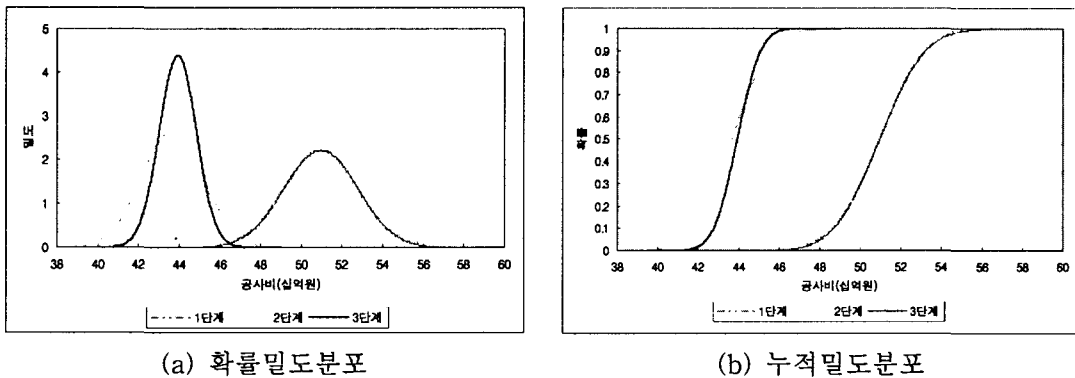


그림 10. 공사비 분석결과

3.4.2 공기 분석

단계별 지반조사결과에 따른 공기 분석결과는 그림 11에서 보는 바와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 단계별로 표시되는 공사비를 확률밀도분포 및 누적밀도분포로 나타내었다. 공기 분석결과, 지반조사 1, 2단계사이에는 평균공기의 감소 및 표준편차의 감소를 나타내었으며, 지반조사 2, 3단계 사이는 평균공기의 미세한 변화와 표준편차에서만 변화 발생하였다. 또한 지반조사 1, 2단계 사이에서 공기의 급격한 변화 발생으로 공기의 불확실성 감소하였으며, 지반조사 2, 3단계 사이는 누적분포의 기울기에서만 변화 발생함을 볼 수 있다.

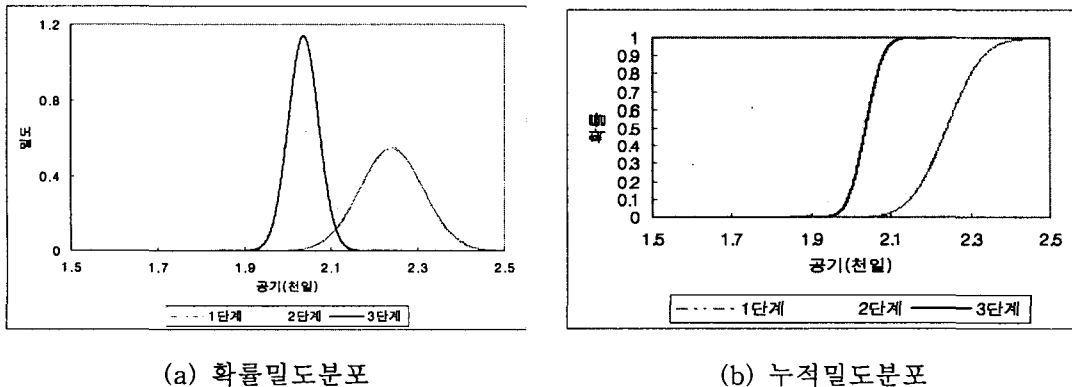


그림 11. 공기 분석결과

3.4.3 공사비와 공기의 관계

단계별 지반조사결과에 따른 공사비와 공기에 대한 분석결과는 그림 12에서 보는 바와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 단계별로 표시되는 공사비와 공기의 관계를 1 σ , 2 σ , 3 σ 의 범위를 표시하였으며, 분석결과 지반조사 단계별로 타원형의 면적이 축소되는 양상을 나타내고 있음을 볼 수 있는데, 이는 지반조사 단계가 증가함에 따라, 즉 조사량이 증가함에 따라 공사비와 공기 모두 리스크가 축소됨을 확인하였다.

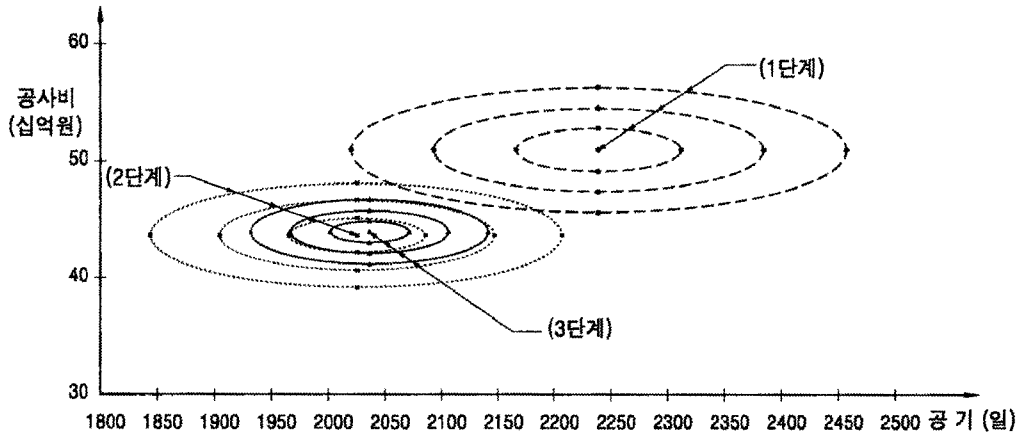
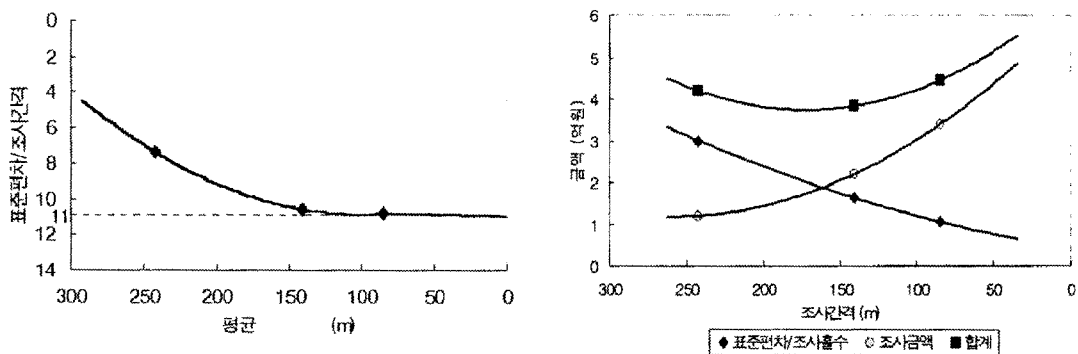


그림 12. 공사비 및 공기 분석결과

3.4.4 조사 간격, 조사금액 및 공사비의 관계

지반조사간격 및 조사금액 및 공사비와의 관계에 대한 분석결과는 그림 13에서 보는 바와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 조사간격이 약 80m 정도에서 공사비가 수렴하고 있는데, 이러한 결과로부터 시방서의 조사간격 100m보다는 80m간격이 보다 정확한 공사비를 산출하는데 적합하다고 할 수 있다. 또한 지반조사비가 공사비에 비하여 상대적으로 적음에 따라 조사간격과 공사금액의 관계는 상관성이 적음을 볼 수 있다.



(a) 조사간격에 따른 표준편차

(b) 조사간격, 조사금액 및 공사비 관계

그림 13. 조사간격, 조사금액 및 공사비와의 관계

4. 결 론

본 연구에서는 도심지 지하철 터널구간을 대상으로 지반조사계획 및 결과에 대한 신뢰성을 평가하기 위하여 지반조사계획에 따른 공사비 및 공기에 대한 위험도 분석을 실시하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 공사비 및 공기에 대한 위험도 분석결과, 1단계(조사공수:6공)는 불확실성을 과다하게 포함하는 것으로 나타났으며 2단계(조사공수:12공)는 1단계의 불확실성요인을 확연하게 감소시키며 3단계(조사공수:19공)일 때 2단계 대비 표준편차가 축소되어 설계단계에서의 지반 불확실성을 터널공기, 공사비 대비 2% 이내로 예측 가능한 것으로 나타났다.

2) 지반조사 신뢰도 분석결과, 공사비 및 공사기간 모두 지반조사량이 증가함에 따라 불확실성의 요인이 감소하는 것을 확인 할 수 있었으며 2, 3단계에서는 표준편차의 변화 및 누적분포의 기울기 변화만이 발생함을 볼 수 있었다. 또한 3단계에서 Remaining Risk를 최소화하므로써, 본 터널구간에 대하여 수행한 지반조사 계획(빈도와 간격)이 적정함을 확인하였다.

3) 본 설계는 3단계 조사공수를 기준으로 지반조사계획이 수립되었으며 시공중 현장자료의 지속적인 갱신과 다양한 매개변수 검토를 통하여 시공단계에서 발생 가능한 위험도를 최소화하고 이를 위해 지반위험도가 높은 구간에 대해 시공중 보완조사계획을 수립하도록 제안하였다.

참고문헌

1. 위용근, 박준경, 전성권, 김영근 (2002), "합리적인 터널설계를 위한 정량화 지표 개발 및 적용에 관한 연구", 한국터널공학회 추계학술발표회 논문집, pp. 31~42.
2. 최창립, 박준경, 유동욱, 김영근, 이두화 (2004), "도심지 터널 특성을 고려한 MI 시스템 개발 및 적용", 한국터널공학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 156~173.
3. Andreas Goricki, Wulf Schbert, Arnold Steidl and Alois Vigl(2002), "Geotechnical Risk Assessment as the Basis for Cost Estimates in Tunnelling", Rock and Soil Engineering, Nr.5, pp. 24~30.
4. 지하철 3호선연장 ○○○공구 건설공사(2004), 지반특성을 고려한 터널 신뢰성 해석에 관한 검토보고서, (주)삼보기술단, (주)에이스올.
5. 지하철 3호선연장 ○○○공구 건설공사 설계보고서(2004), 서울특별시 지하철 건설본부.
6. 지하철 3호선연장 ○○○공구 건설공사 지반조사보고서(2004), 서울특별시 지하철 건설본부.
7. 지하철 3호선연장 ○○○공구 건설공사 구조계산서(2004), 서울특별시 지하철 건설본부.