편마암에서 계측결과와 RMR을 이용한 터널의 거동 연구
The Application of Observational Method for Tunnel Analysis in Gneiss Rock

정강진[1], Kang-Jin Jeong, 김찬국[4], Chan-Kuk Kim, 황의석[3], Eui-Seok Hwang, 김학문[2], Hak-Moon Kim

[1] (주)신성 지반부 사원, Dept. of Geotechnical, Shin-Sung Corporation
[2] 단국대학교 토목환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Envir. Engrg., Dankook Univ.
[3] 대림산업(주) 건설사업부, Construction Division, Daelim Industrial Co., Ltd.
[4] 단국대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Envir. Engrg., Dankook Univ.

SYNOPSIS : This research concentrates on presenting a more reasonable and engineering tunnel interpretation method with the numerical value observation data using the Hoek-Brown Model that uses mining observation data gained during construction, and the experience material constant of m and s for Seoul Underground tunnel field, which was evaluated as RMR Ⅲ and RMR Ⅳ for its bedrock ratings, and by modifying and complementing the properties of ground materials with the direct method, one method in back analysis, and by using the field measurement value.

Key words : Hoek-Brown model, RMR, Tunnel, Back analysis

1. 서 론

지하 공간 개발 공법 중 터널공법에 대한 연구가 중요시 되고 있는데 특히 암반에 시공되는 터널은 지질적으로 단층, 절리, 균열 등이 발달되어 있고 지층 및 암종에 따라 불균질하며 이를 조사하기 위한 현지 암반 시험은 시간 및 비용의 제한으로 충분히 시행할 수 없기 때문에 터널의 거동을 정확히 해석하는 것이 용이하지 않다. 그 중 지하구조물의 기하학적 형상과 관련된 문제들은 컴퓨터와 수치해석기법의 발달로 많이 해결되었으나 지반 재료의 물성과 관련된 문제들은 아직도 많은 문제점으로 남아 있다. 최근 터널의 합리적인 설계와 해석을 위한 정확한 암반재료의 물성을 파악하기 위하여 현장 지질조사와 계측 데이터를 이용한 역해석으로 설계의 타당성과 설계변경의 필요성 그리고 암반거동의 예측을 위한 방안이 연구 되고 있다. 특히 기존의 국내의 터널 설계 및 안정성 해석에 있어 Mohr-Coulomb의 파괴이론을 가장 일반적으로 적용하고 있으나 암반에 시공되는 터널의 해석에 있어서 RMR을 고려할 수 있는 Hoek-Brown의 파괴이론이 사용되고 있다.

본 연구에서는 RMR Ⅲ, Ⅳ에 해당하는 터널현장을 경험적 재료 상수 m, s값과 시공 중 유일하게 얻을 수 있는 막장에서 관찰된 암석 및 암반의 평점분류 방식인 RMR을 이용할 수 있는 Hoek-Brown Model을 이용한 수치해석 결과와 현재 시공 중인 지하철 터널공사현장의 계측자료를 비교분석하여 지반재료의 물성을 수정 및 보완하여 보다 합리적이고 공학적인 터널 해석 방법을 제시하고자 한다. 또한 현재 잘 시행 되고 있지 않은 암반의 탄성계수와 암반 내 초기응력을 간단한 2차원 프로그램을 이용하여 시공현장에서 신속히 구하고 즉시 활용할 수 있도록 하고자 한다.

이번 연구의 결과 터널 굴착 시 현장에서 계측된 변위를 이용하여 암반의 거동을 신속하고 정확하게 이해할 수 있을 뿐 만 아니라 보강방법과 보강시기를 적절히 변화 시키는 피드백이 가능하므로 특히 요즘 많이 시공 되는 NATM공법을 적용하는 터널 현장에서 합리적이고 경제적인 시공에 도움이 될 것으로 생각 된다.

2. 해석 지반의 특성 및 해석방법

2.1 해석지역의 지질학적 특성

해석 대상 지역은 서울지하철 9호선 906공구로 지질은 주로 선캠브리아기의 편마암류와 이들을 관입한 중생대의 각종 화성암류로 대별할 수 있으며 이들은 모두 부정합으로 덥고 있는 제4기의 충적층이 분포하고 있다. 편마암류는 여러 차례의 교란으로 엽리구조의 변화가 심하며 더욱이 수많은 단층(Fault), 단층파쇄대(Fault Zone), 절리(Joint), 습곡(Fold), 엽리(Foliation)를 형성하고 이들의 영향으로 인해 본 터널 구간의 암반상태는 매우 불규칙하게 교란되어 있다.

지층 분포 상태는 살펴보면 지표면으로부터 토사구간인 매립층, 풍화토가 분포하고 있으며, 풍화암 및 연암이 하부에 분포하고 있다. 그리고 RMR 분류 기준으로 III, IV에 해당하는 지역이다.

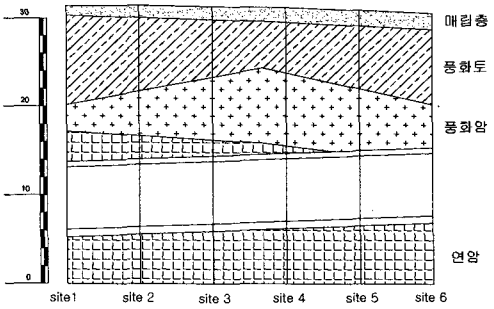

그림 1. 해석 지역의 지질특성

표 1. 해석 지역의 지층 개요

구분	단위	site 1	site 2	site 3	site 4	site 5	site 6
매립층	m	1.1	1.3	1.5	1.6	1.8	1.8
풍화토	m	10.1	8.3	6.5	5.8	7.1	8.5
풍화암	m	3	5	7.1	8.3	7.5	6.7
연암	m	17	16.6	16.1	15.5	14.8	14.2

2.2 해석 대상지역의 특성

본 연구에서 적용된 지반의 입력 물성치는 지반 조사 보고서와 현장의 막장 관찰 자료를 이용하여 산정하였고 지보재인 Shotcrete, Rockbolt의 물성치는 국내에서 일반적으로 사용하는 물성치를 사용하였다. 그리고 Shotcrete는 연속체 요소, Rockbolt는 트러스 요소로 적용하여 해석하였다. 지반 입력 물성치와 지보재 입력 물성치를 표 2와 표 3에 나타내었다. 그리고 RMR에 따른 Hoek-Brown Model에 사용되는 입력물성치를 표 4에 나타내었다.

표 2. 터널 해석에 사용된 지반 입력물성치

지반명	단위중량$r_t(t/m^3)$	점착력c(t/m^2)	내부마찰각Φ(°)	변형계수E(t/m^2)	포아송비 υ	측압계수
매립층	1.8	0	30	1000	0.35	0.5
풍화토	1.9	2	30	3000	0.35	0.5
풍화암	2.0	5	35	15,000	0.33	0.7
연암	2.3	20	35	30,000	0.30	1

표 3. 터널 해석에 사용된 지보재 입력물성치

구분	단위중량$r_t(t/m^3)$	점착력C(t/m^2)	내부마찰각Φ(°)	E(t/m^2)	포아송비 υ
Shotcrete(Soft)	2.30	500	30	500,000	0.20
Shotcrete(Hard)	2.30	500	30	1,500,000	0.20
Rockbolt	7.85	-	-	20,000,000	0.20

표 4. Hoek-Brown Model에 사용되는 입력물성치

구분	RMR	m_i(편마암)	m	s	σ_{ci}
site 1	37	33	0.367	2.76E-05	10200
site 2	39	33	0.423	3.85E-05	10200
site 3	48	33	0.805	1.72E-04	10200
site 4	52	33	1.071	3.36E-04	10200
site 5	50	33	0.928	2.41E-04	10200
site 6	40	33	0.488	5.37E-05	10200

2.3 해석 방법 및 경계조건

해석방법으로 파괴규준은 현장 암반 상태를 고려할 수 있는 Hoek-Brown Model을 사용하였으며, 요소망의 범위는 터널 굴착으로 인하여 변위가 무시될 수 있도록 터널 직경의 3배 이상을 적용하여 해석영역을 결정하였다.

해석경계조건은 좌우 경계부로는 수평 방향 변위만 구속하였고 하부 경계부에는 수직 방향 변위만 구속하였다. 또한 하부 양 모서리는 수평, 수직방향 변위 모두를 구속하였다. 해석 프로그램을 이용하여 수치해석에 사용된 요소망과 경계조건은 그림 2와 같다.

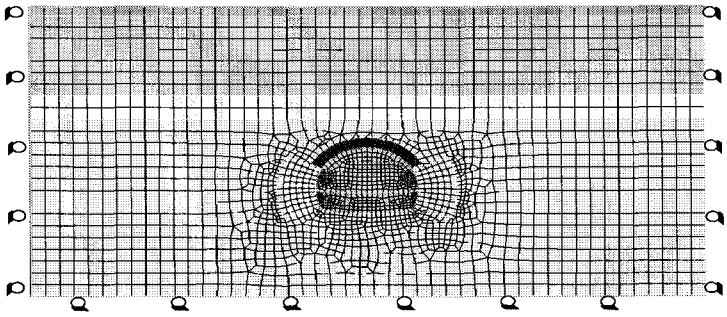

그림 2. 경계조건 및 요소망

그리고 터널굴착단계에 따른 하중분담률은 국내에서 일반적으로 사용되는 것을 사용하였다. 본 논문에서 사용한 하중분담률을 표 5에 나타내었다.

표 5. 해석에 적용된 하중분담률

굴착단계	1차 Shotcrete	2차 Shotcrete
40%	30%	30%

2.4 강관 다단 그라우팅 물성치 산정

본 연구에서 해석 터널에 설치된 그라우팅은 터널 천단부의 지반 변위를 억제하기 위하여 개발된 대표적인 보조공법의 하나이다. 보강영역의 탄성계수를 산정하기 위하여 원지반과 강관 그라우팅재의 면적 및 탄성계수를 고려하여 등가환산법을 이용하여 산정된 물성치를 표 6에 나타내었다.

표 6. 강관다단 보강영역 적용 물성치

구 분	단위중량(t/m^3)	점착력c(t/m^2)	내부마찰각(°)	포아송비(υ)	변형계수(t/m^2)
보강영역	2.3	20	35	0.3	65,700

2.5 계측 방법 및 계측결과 분석

터널 시공에서 지금까지 가장 많이 사용되고 있는 변위 계측 방법은 내공변위계측(Convergencemeter)와 천단침하계측(Crown Settlement)이 있다. 내공변위계측은 지하공동의 단면변형을 계측하는 것으로 다른 계측 방법에 비하여 측정법이 간단하며 천단침하계측은 지하공동의 천단에 발생하는 연직변위를 측정하는 것이다. 본 연구의 터널 현장 내공변위와 천단침하의 계측기 설치 위치는 그림 3과 같고 계측된 내공변위와 천단침하 시간에 따른 변위를 그림 4와 5에 나타내었다. 그리고 기존의 문헌을 이용하여 선행 내공변위와 천단침하를 총변위를 40%로 가정하여 표 7과 8에 나타내었다.

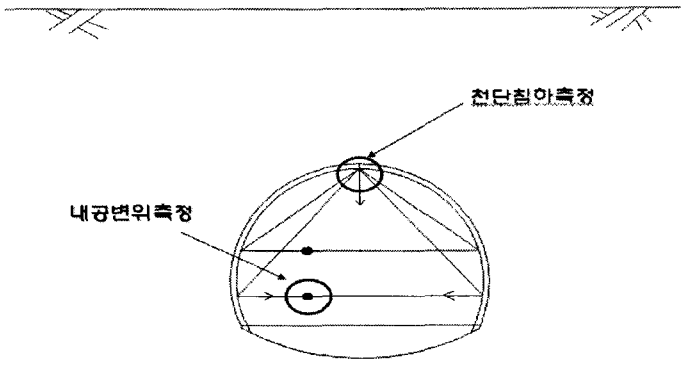

그림 3. 계측기 설치 위치

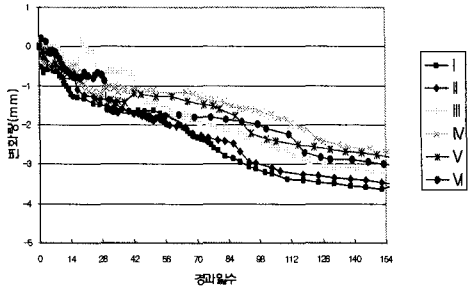

그림 4. 시간에 따른 내공변위

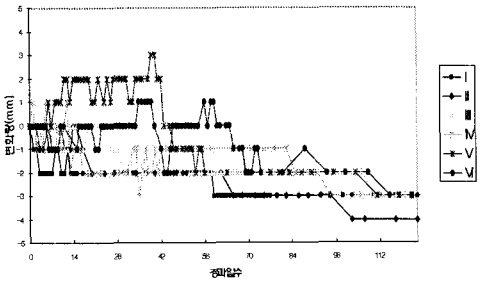

그림 5. 시간에 따른 천단침하

표 7. 계측된 내공변위를 이용한 선행변위와 총변위

구분	계측변위(mm)	선행변위(mm)	총변위(mm)
site 1	3.50	2.33	5.83
site 2	2.95	1.97	4.92
site 3	3.31	2.21	5.52
site 4	2.53	1.69	4.22
site 5	5.64	1.76	4.40
site 6	2.38	1.59	3.97

표 8. 계측된 천단침하를 이용한 선행변위와 총변위

구분	계측변위(mm)	선행변위(mm)	총변위(mm)
site 1	3.00	2.00	5.00
site 2	4.00	2.67	6.67
site 3	3.00	2.00	5.00
site 4	3.00	2.00	5.00
site 5	3.00	2.00	5.00
site 6	3.00	2.00	5.00

2.6 역해석 수행 방법

본 연구에서 역해석 방법 중 다양한 문제에 대하여 적용이 가능한 직접법으로 터널 굴착 시 계측변위를 이용하여 변형계수와 초기 응력을 추정하는 역해석을 실시하였다. 직접법(Direct Search Method)의 과정은 최초 계측변위를 입력 시킨 후에, 지반 물성치를 입력한다. 그리고 유한요소 해석을 수행하여 계

산으로 구한 변위를 산정한다. 계산에 의한 변위와 계측변위를 이용하여 오차함수를 구성하고 이 오차함수가 허용 오차 내에 들어올 경우 최적의 물성값을 산정하게 된다. 오차가 큰 경우 그 값들을 최소화하도록 보정계수를 이용하여 보정한 후 반복하여 일정한 값에 수렴할 수 있도록 역해석의 최적화를 실행한다. 이러한 과정을 계측변위와 계산변위가 일치하여 오차함수가 허용범위내로 수렴할 때까지 반복적으로 수행하게 된다. 직접법의 전체적인 흐름도는 그림 6에 나타내었다.

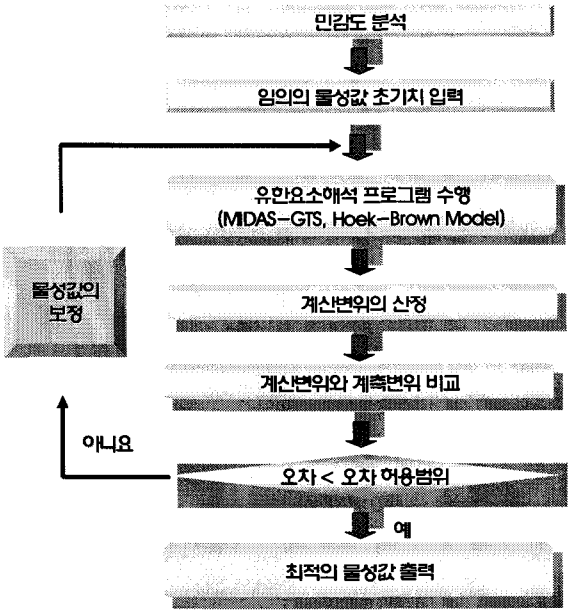

그림 6. 역해석 과정 흐름도

3. 역해석 결과 및 비교분석

3.1 지반 정수 민감도 분석

본 연구에서 역해석을 수행하기 위하여 터널의 거동을 지배하는 다양한 매개변수 중 내공변위와 천단침하에 영향이 가장 큰 것을 역해석의 대상으로 하고자 민감도 분석을 하였다. 해석 방법으로는 입력물성치를 초기 지반 물성치의 20%씩 증가 시키면서 내공변위와 천단침하의 변화량을 검토하였다. 민감도 분석에 입력된 지반 물성치는 표 9에 나타내었다.

표 9. 민감도 분석에 사용된 지반 물성치

물성치 증가비	변형계수E(t/m^2)	점착력c(t/m^2)	내부마찰각Φ(°)	측압계수 K_o
초기값	10,000	10.0	10.0	0.50
20%	12,000	12.0	12.0	0.60
40%	14,400	14.4	14.4	0.72
60%	17,280	17.3	17.3	0.86
80%	20,736	20.7	20.7	1.04
100%	24,883	24.9	24.9	1.24

물성치의 증가에 따라 내공변위와 천단침하의 변화량은 그림 7과 8에 나타내었다. 결과를 살펴보면 내공변위의 변화량은 내부마찰각과 점착력의 물성치의 증가비에 따라 거의 변화가 없는 것으로 나타난다. 그리고 측압계수의 증가비에 따라 내공변위의 변화량이 급격하게 커지고 변형계수의 증가비에 따른 내공변위의 변화량은 측압계수보다는 미비하지만 내부마찰각과 점착력에 비교해 볼 때 큰 것으로 나타

난다. 또 천단침하의 변화량은 내공변위와 마찬가지로 내부마찰각과 점착력의 영향은 아주 미비한 것으로 나타난다. 그리고 측압계수와 변형계수가 증가함에 따라 천단변위는 급격히 변화하는 것을 볼 수 있다. 따라서 내공변위 보다는 천단변위가 측압계수와 변형계수의 변화에 더 민감한 것으로 판단된다.

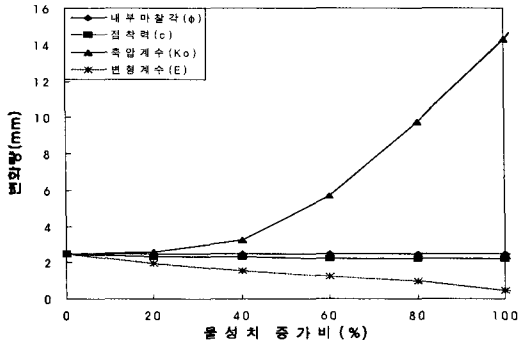

그림 7. 내공변위에 따른 지반물성 민감도

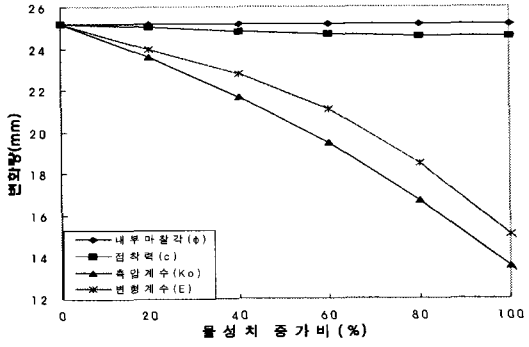

그림 8. 천단침하에 따른 지반물성 민감도

3.2 역해석에 의한 측압계수 비교분석

민감도 분석 결과를 이용하여 터널의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 측압계수를 직접법을 이용하여 역해석을 수행 하였다. 역해석 방법으로 계측변위인 내공변위와 천단침하를 수치해석 결과와 비교하여 RMR Ⅳ, Ⅲ에 해당하는 구간의 측압계수 결과를 그림 9와 그림 10에 나타내었다.

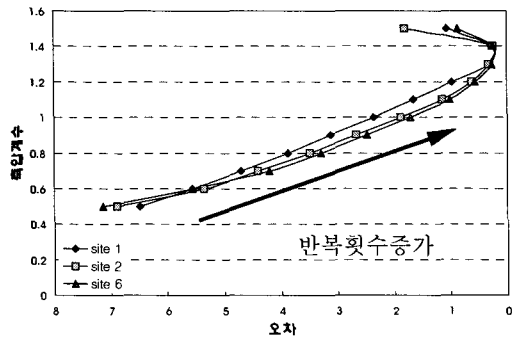

그림 9. 역해석을 이용한 측압계수 (RMR Ⅳ)

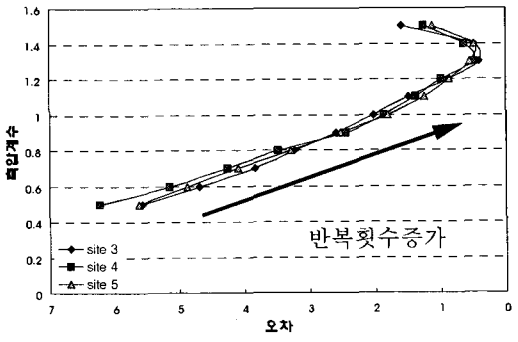

그림 10. 역해석을 이용한 측압계수 (RMR Ⅲ)

RMR Ⅳ에 해당하는 그림 9에서 터널의 측압계수를 살펴보면 1.3 ~ 1.4 정도로 나타나고 있다. 또 RMR Ⅲ에 해당하는 구간의 측압계수를 나타내는 그림 10을 살펴보면 RMR Ⅳ와 비슷한 1.2 ~ 1.4 정도의 측압계수를 나타냄을 알 수 있다. 이러한 결과는 평가 대상 지층이 과거에 풍화, 단층, 습곡의 영향을 받았거나 암반의 불규칙성 때문인 것으로 판단된다.

그리고 그림 11에 국내의 기존 깊이에 따른 측압계수 제안식과 역해석을 이용하여 구한 측압계수를 나타내었다. 그림 11를 살펴보면 역해석을 이용하여 구한 측압계수는 국내에서 연구된 깊이에 따른 측압계수 제안식과 비교하여 차이를 나타내는데 이는 큰 범위를 나타내는 기존의 깊이에 따른 산정식보다 역해석을 이용한 결과를 사용하면 보다 합리적이고 정확하게 접근 할 수 있을 것으로 판단된다.

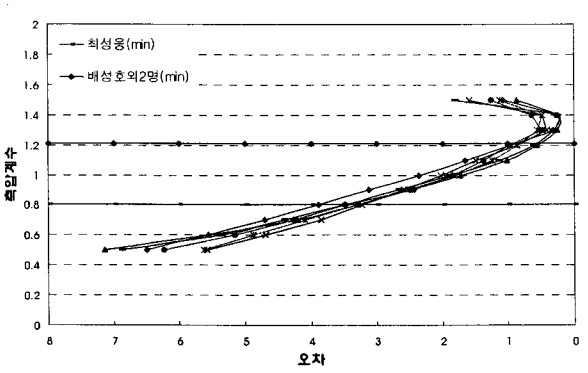

그림 11. 기존 측압계수 제안식과 역해석으로 구한 측압계수 비교

3.3 역해석에 의한 변형계수 비교분석

RMR Ⅳ와 RMR Ⅲ에 해당하는 본 연구 구간의 변형계수를 역해석을 이용하여 그림 12와 그림 13에 나타내었다.

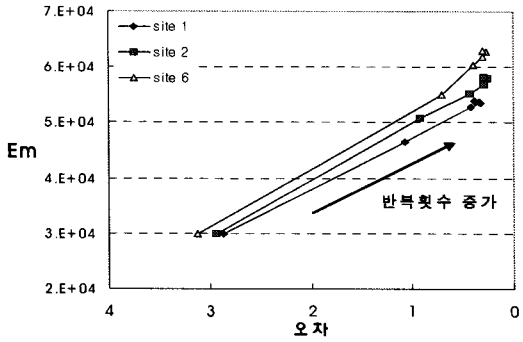

그림 12. 역해석을 이용한 변형계수 (RMR Ⅳ)

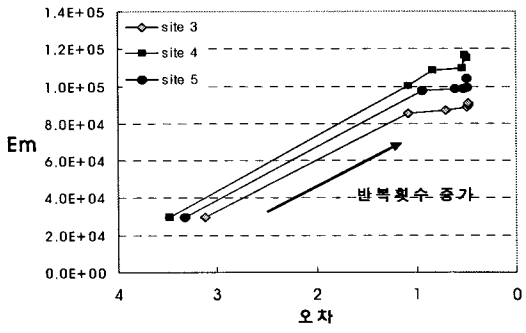

그림 13. 역해석을 이용한 변형계수 (RMR Ⅲ)

그림 12와 13을 살펴보면 기존의 설계자료의 변형계수와 비교하여 볼 때 상향 조정되는 것으로 나타난다. 이것은 보수적인 설계자료에 비교하여 볼 때 본 연구에서 역해석을 이용하여 좀 더 합리적인 변형계수를 구할 수 있다고 판단된다.

다음으로 그림 14에 기존에 연구된 변형계수식과 역해석을 이용하여 수정된 변형계수식을 나타내었다.

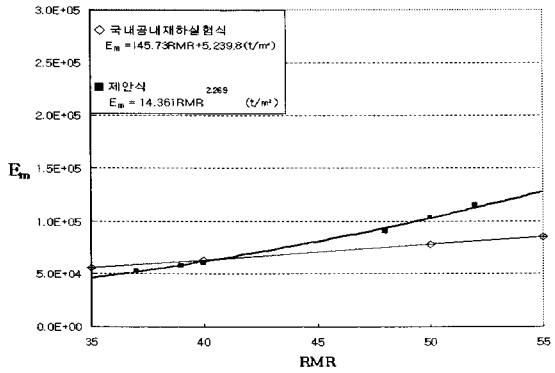

그림 14. 기존 공내재하실험식과 편마암에서 수정된 변형계수식 비교

그림 14에서 국내의 공내재하시험 자료를 이용하여 노양섭(2004)이 제안한 식과 본 논문에서 제안된 변형계수식을 비교하여 볼 때 RMR Ⅳ에 해당되는 구간에서는 비교적 접근 하였으며 RMR Ⅲ에 해당되는 구간에서는 크게 평가 되었다. 식 (1)에 현장 계측자료를 이용하여 역해석으로 구한 변형계수를 식으로 나타내었다.

$$E_m = 14.361 \cdot \mathrm{RMR}^{2.269} \tag{1}$$

식 (1)은 암종이 편마암일 때 그리고 암반이 RMR Ⅲ, Ⅳ 로 평가되는 구간에 국한되어 있다. 하지만 기존의 해외 기존식들과 비교하여 볼 때 국내의 편마암 지대에서 RMR을 이용한 변형계수식은 하향조정 되어야 될 것으로 판단된다.

3.4 현장 계측 데이터와 해석 결과 비교분석

여러 가지 현장 계측 데이터 중 터널 단면의 좌측부, 중앙부, 우측부 지표침하의 계측 데이터와 역해석으로 산정된 지반물성치를 이용하여 수치해석을 수행한 결과를 비교하여 그림 15에 나타내었다.

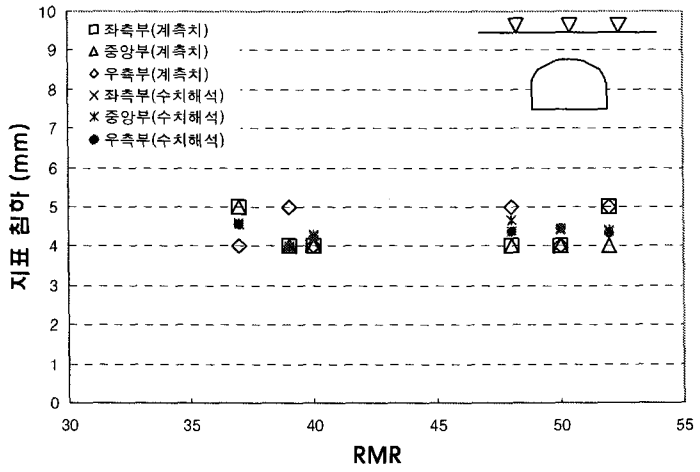

그림 15. 지표침하 계측 데이터와 수치해석 결과 비교

그림 15를 살펴보면 터널 단면이 지나가는 구간의 지표침하와 해석 결과를 비교하여 볼 때 좌측부, 중앙부, 우측부 모두 비교적 일치하여 역해석 결과를 이용하여 산정된 지반 물성치를 이용한 해석으로 지표침하 예측이 가능하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구를 종합해 보면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) 터널의 내공변위와 천단침하에 대한 민감도분석을 수행한 결과 내부마찰각과 점착력의 영향은 작게 나타났으며 내공변위는 변형계수 보다 측압계수의 영향이 크고 천단침하는 변형계수와 측압계수 모두 영향이 큰 것으로 나타난다.
2) 터널의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 측압계수를 역해석 한 결과 국내 깊이에 따른 측압계수 제안식과 비교하여 볼 때 범위가 큰 기존의 제안식보다 정확한 현장의 측압계수를 역해석을 이용하여 추정할 수 있다고 판단된다.
3) 편마암으로 평가되는 암반의 변형계수를 역해석 한 결과 국내 공내재하시험식과 기존의 암반 변형계수식과 비교하여 볼 때 국내 공내재하시험식과는 비교적 일치하였고 기존의 제안식과 비교하여 하향 조정됨이 확인 되었다.
4) RMR Ⅲ, RMR Ⅳ에 해당하고 편마암으로 평가되는 암반의 변형계수를 역해석 한 결과와 기존의 변형계수식을 이용하여 수정식을 제안하였다.
5) 터널 현장에서의 계측자료 중 천단침하와 내공변위를 이용한 측압계수와 변형계수를 매개변수로 하는 역해석을 수행하여, 터널 굴착 시 보다 정확한 합리적인 지반 및 터널의 안정성을 평가 할 수 있는 것으로 확인 되었다.

참 고 문 헌

1) 이봉열, 김광진, 김학문, “Hoek-Brown 암반모델을 이용한 비선형 유한요소 터널해석 및 평가”, 한국지반공학회 창립 10주년 기념 및 가을학술발표회 논문집, 1994, pp. 235-244
2) 김형탁, 김학문, “3차원 터널해석에 의한 강관다단그라우팅의 보강효과” 단국대학교 석사학위논문, 1995
3) 남순성, “암반특성에 따른 NATM터널의 시공 중 거동에 관한 연구” 한양대학교 박사학위논문, 1995
4) 민덕기, 최성욱, 박명철, “터널의 계측변위를 이용한 역해석기법에 관한 연구”, 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, 1996
5) 김상환, “근접터널의 해석과 설계에 대한 고찰”, 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, 1997, pp. 125-132
6) 배성호, 전석원, 최용근, 김재민, “서울 중심부 편마암 분포지역 저심도 구간의 암반 초기응력 분포특성 연구”, 터널기술, 제5권 , 2003,
7) Hoek, E. and Brown, E. T., "Underground Excavation in Rock", Institution of Mining and Metallurgy, 1980, pp. 131-149
8) Hoek, E. and Brown, E. T., "Empirical Strength Criterion for Rock Masses", Geotechnical Engineering Division, Vol. 106, No.9, 1980, pp. 1013-1035
9) Hoek, E., Kaiser, P. K., Bawden, W. F., "Support of Underground Excavations in Hard Rock", A.A.BALKEMA, 1995, pp. 84-98
10) Hoek, E., "Rock Engineering", Evert Hoek Consulting Engineer Inc, 1998, pp. 161-221