

터널 내공변위의 이론과 계측결과의 분석

김호영¹⁾ · 박의섭¹⁾

Theory and Analysis Method of Tunnel Convergence

Ho Yeong Kim and Eui Seob Park

ABSTRACT

Convergence measurements play very important role in the assessment of stability of a tunnel and of the economics of rock reinforcements. The characteristics of convergences are both due to the face advance effect and the time-dependent behaviour of rocks. As the convergence law can be modeled as a specific function of two variables of distance and time, we can determine the type of function and the related parameters from the field measurements. By using the regression method based on the Levenberg-Marquardt algorithm, an analysis of convergence of two different tunnels and one numerical example is described. It is shown that the convergence can be modeled as following function,

$$C(x) = a\{1 - \exp(-bx)\} \text{ or } C(t) = a\{1 - \exp(-bt)\}$$

in case of a tunnel excavated in elastic rocks, and

$$C(x, t) = C_s \left\{ 1 - \left(\frac{X}{X+x} \right)^2 \right\} \left[1 + m \left\{ 1 - \frac{T}{T+t} \right\}^{0.3} \right]$$

in case of elasto-plastic or over-stressed rocks.

1. 서 론

굴착된 터널의 안정성을 획득하기 위하여 암반보강이 실시되며, 이러한 보강의 궁극적인 기능은 터널 주변 암반의 변위를 적절하게 제어하여 안정된 값으로 수렴시키는 것이다. 수치해석 기법의 발달에 따라 설계 단계에서 암반의 변형거동에 대한 예측이 이루어지고 있으며, 시공 단계에서는 현장계측에 의해 실제 암반의 변형거동이 측정되고 있다. 터널의 변형은 굴착에 의한 하중이력과 암반의 변형특성에 의

하여 크게 영향을 받으며, 측정된 내공변위의 적절한 분석에 의해 이러한 지압조건과 암반의 특성을 해석하고 굴착 및 보강 방식에 대한 평가가 가능한 것이다. 최근들어 내공변위를 이용하여 설계단계에서 추정된 수치해석의 입력자료를 역산하는 방법인 Back Calculation 방법이 개발됨에 따라 내공변위의 중요성은 더욱 증대되었다.¹⁾

본 연구에서는 터널 내공변위에 관련된 기존의 연구결과 및 이론을 정리하였으며, 이론적인 모델링 함수를 적용하여 내공변위를 회귀분석하는 방법을

*1993년 5월 20일 접수

1) 정회원, 선경건설주식회사

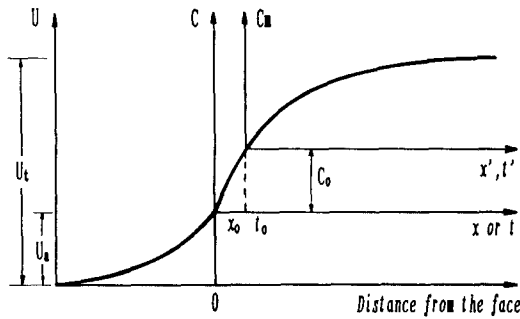


Fig. 1. Generalized form of tunnel convergence.

개발하였다. 특히 계측기 설치 이전에 발생하는 변위를 포함하여 거리와 시간에 따른 완전한 내공변위 함수를 결정할 수 있도록 하였다. 또한 수치해석으로 구해진 결과에 대해 회귀분석방법을 적용하여 타당성을 검토하였으며, 도로 터널과 심부 광산 터널에서 실제 계측된 자료를 분석하여 조건에 따른 내공변위의 양상에 대해 고찰하였다. 개발된 프로그램은 부록으로 첨부하였다.

2. 터널 내공변위의 이론

터널의 변형은 굴착면 진행의 영향과, 굴착면 주변의 하중 이력에 대응한 암반의 변형특성에 의해 결정된다. 또한 암반보강의 종류와 특성에 따라서도 변형이 달라진다.

터널 벽면에서 발생하는 변위의 일반적인 형태는 Fig.1과 같다. 굴착 이전에 발생하는 변위 U_a 는 암반의 변형특성에 의존하는 것으로 알려져 있다. Panet (1982)에 의한 Axi-symmetric FEM 해석에 따르면 최종변위 U_i 에 대한 U_a 의 비율은 탄성해석에서 27%, 소성해석시 Von Mises 파괴조건일 때 30%, 완전탄소성 Drucker 파괴조건에서 20%, Strain-softening 재료에서는 21%로 계산되었다. Hanafy(1980)에 의해 수행된 점탄성 Axi-symmetric FEM 해석의 경우, U_a 의 비율은 30% 내외로 나타났다. 한편 Vassilev (1988)는 터널 형상에 의한 영향을 규명하기 위하여 3차원 탄성 FEM 해석을 실시하였으며, 그 결과는 Fig.2와 같다. 즉, U_a 의 비율은 28~32%로서 터널의 형상에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

전술한 세가지 사례는 모두 보강이 없는 경우에

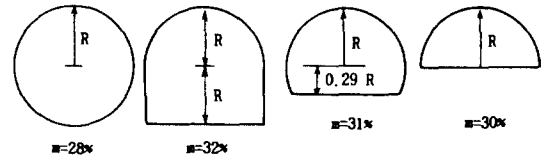


Fig. 2. Effect of the shape of cross section; $m = U_a/U_i$ (Vassilev, 1988).

대한 해석으로서, 그 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다. 즉, 일반적인 탄성, 점탄성 또는 탄소성 암반에서 보강이 없는 경우 굴착면 이전에 발생하는 변위는, 작업장 후방에서 응력조건이 2차원 상태로 수렴될 때까지 발생하는 최종 변위의 20~35% 수준이 되며, 그 값은 터널의 형상에 큰 영향을 받지 않는다.

일반적으로 터널 내공변위(Convergence)란 굴착면으로부터 그 후방의 벽면변위를 말하는 것이다. 내공변위는 굴착 이후 시간의 경과에 따라 계측되며 계측된 결과는 시간과 굴착면 거리의 함수로서, 실제의 경우에는 굴착면에서 x_0 만큼 떨어져서 시간 t_0 만큼 경과한 이후에 계측이 시작되므로 측정 전에 C_0 만큼의 변위가 존재하게 되며, 계측이 지연되어 x_0 와 t_0 가 증가할수록 측정 전 변위 C_0 가 증가하게 되어 상대적으로 측정된 내공변위 C_m 의 값은 감소하게 된다. 따라서 측정된 결과만으로 내공변위의 크기와 형상을 판단하는 것은 옳지 않으며 전체적인 내공변위에 대한 분석이 필요한 것이다.

탄성 암반에서 굴착면을 원점으로 한 경우 내공변위는 다음과 같이 지수함수로 표시될 수 있다.⁹⁾

$$C = C_x \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{x}{X}\right) \right\} \quad (1)$$

여기서 C_x 는 최종 내공변위이며 X 는 굴착면의 영향 거리에 관련된 상수이다. 이 경우 내공변위는 터널 폭의 2~3배 이내에서 수렴하는 것으로 나타났다.

한편 굴진속도가 일정하다면 (1)식은 다음과 같이 시간에 대한 함수로 바꿔 쓸 수 있다.

$$C = C_x \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right\} \quad (2)$$

실제 터널에 대한 계측결과, 굴착면의 영향거리는 탄성해석의 경우보다 훨씬 크게 나타났다. Frejus 터널의 경우 영향거리는 5배 이상, Kielder 시험터널에

서도 4~5배 이상인 것으로 계측되었다.⁹⁾ 한편 Hanafy(1980)의 해석에 의하면 크립을 고려한 경우에는 내공변위의 크기와 함께 영향거리도 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 터널 주위 암반의 변위 해석시 암반의 탄소성 또는 점탄성적인 변형거동을 고려하여야 한다.

Kaiser(1980)에 의하면 시간의존적 변형거동을 보이는 암반에서 터널의 변형은 다음과 같은 3가지 mode로 나누어 고찰할 수 있다.

(1) 점진적인 파괴(Progressive Failure)-암반의 시간의존적 강도특성의 변화에 기인한다.

(2) 시간의존적 변형(Time-dependent Closure)-암반의 시간의존적 강성도 변화에 기인한다.

(3) 과지압 암반에서 소성영역의 발생 양상과 내공변위의 형태-하중이력에 따라 결정된다.

앞의 두가지 문제는 점성을 고려한 해석의 필요성을 나타내며 세번째 문제에서는 소성을 고려할 필요가 있음을 의미한다.

이론적인 거동모델을 이용하여 내공변위 계측결과에 대한 해석이 여러 저자들에 의해 발표되었다.

Calcareous Schist내에 굴착된 Frejus 터널의 계측결과에 대해서 점소성 모델이 적용되었으며, 내공변위는 다음과 같은 log 함수와 잘 일치하는 것으로 나타났다.⁹⁾

$$C = a + b \log\left(1 + \frac{t}{T}\right) \quad (3)$$

Lombardi(1979)는 층리가 심한 Shale 층내에 굴착된 Gothard 도로터널에서 125일 동안의 계측결과를 2개의 Bingham 모델과 1개의 탄성요소를 직렬로 결합한 점소성 모델로써 해석하였으며 본 모델이 점진적 파괴를 나타내는 터널에서의 계측결과에 잘 부합한다고 하였다.

Otsuka(1981)는 Kelvin-Voigt 모델을 이용하여 암반의 점탄성 해석을 실시하고 내공변위의 이론적인 변형특성을 다음 식으로 단순화하였다.

$$C = a\{1 - \exp(-bx)\} + c\{1 - \exp(-dt)\} \quad (4)$$

(4)식의 전항은 굴착면 진행에 의한 영향을 나타내며, 마지막 항은 암반의 시간의존적 변형특성을 나타내는 것으로서 내공변위는 두 변위의 합으로 표시된다. Tufaceous Mudstone내에 굴착된 Nabetachiyama 터널

에서의 계측결과에 (4)식을 적용한 결과 초기 변형에 대해서는 부합하지 않지만 20일 이후부터는 내공변위 계측결과와 잘 부합하는 것으로 나타났다.

한편, 소성변형이 있는 경우에 대해서는 수치해석 결과를 이용하여 다음 식이 제안되었다.¹⁰⁾

$$C(x) = C_s \left\{ 1 - \left(\frac{1}{1 + (x/0.84r_p)} \right)^2 \right\} \quad (5)$$

여기서 r_p 는 소성영역의 반경이다.

(5)식은 굴착면 진행의 영향만을 고려한 것이며 소성변형이 시간의존적으로 발생한다면 이에 의한 변위가 부가되어야 한다. 계측자료의 분석결과, 시간의존적 변형은 (4)식과 같이 독립적으로 발생하는 것이 아니라 굴착면 진행에 의한 영향을 받는 것으로 밝혀졌는데, 이는 Kaiser(1980)에 의해 제시된 바와 같이 하중이력의 영향이 시간의존적 변형에 관련됨을 의미한다 하겠다. 따라서 내공변위는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$C(x, t) = C_1(x) + A(x)C_2(t) \quad (6)$$

한편 Frejus 터널계측에 대한 최근의 연구결과, 굴착면에서 멀리 떨어진 지점에서 발생하는 시간의존적 변형은 log 함수보다는 다음과 같은 분수함수에 더 잘 부합하는 것으로 나타났다.¹²⁾

$$C(t) = A \left\{ 1 - \left(\frac{T}{t+T} \right)^n \right\} \quad (7)$$

탄소성 암반에서 상수 n 은 일반적으로 0.3이 적합한 것으로 제안되었다.

최종적으로 (5)식 및 (7)식을 (6)에 대입하여 다음과 같은 함수가 제안되었다.

$$C(x, t) = C_s \left\{ 1 - \left(\frac{X}{X+x} \right)^2 \right\} \left[1 + m \left\{ 1 - \left(\frac{T}{T+t} \right)^{0.3} \right\} \right] \quad (8)$$

여기서, X : 굴착면의 영향거리에 관련된 상수

T : 암반의 시간의존적 변형특성에 관련된 상수

C_s : 굴착면이 무한히 멀 때 굴착면 진행의 영향에 의해서만 발생한 변위

$C_s(1+m)$: 굴착면이 무한히 멀고 장시간이

경과한 후의 최종적인 내공변위이다.

Sulem 등은 (8)식을 이용하여 평균심도 600~1200 m의 Frejus 터널과, 심도 100 m의 Marly Soil에 굴착된 Las Planas 터널에서의 계측결과에 적용하여 좋은 결과를 얻었다.

3. 내공변위 함수의 회귀분석

전장에서 설명한 바와 같이 내공변위는 터널 주위 암반의 거동특성에 의해 여러가지 형태의 함수로 모델화되며, 이를 요약하면 Table 1과 같다. 실제 측정된 내공변위를 모델 함수에 대해 회귀분석하므로써 함수의 parameter를 결정할 수 있다. 그러나 이 경우, 측정 전 내공변위 C_0 를 고려하여야 한다. 즉, 실제 측정된 내공변위를 C_m 이라 한다면,

$$C_m = C(x, t) - C_0 \quad (9)$$

이므로 회귀분석시 C_0 도 미지수가 되어 모델 함수에서 주어진 parameter와 함께 해석에 포함되어야 한다.

모델함수에 대한 parameter를 결정하기 위한 회귀 분석 프로그램에서 사용된 방법은 Leverberg-Marquardt법이며, 프로그램의 기본 알고리즘은 Press (1987)의 방법을 따랐다. 개발된 프로그램을 Table 1의 모델함수들에 대해 시험한 결과, 측정 전 변위 C_0 를 포함하여 각 parameter를 오차 5% 이내로 역산할 수 있었다. 프로그램은 부록으로 첨부하였다.

최적 parameter가 결정되면 모델의 오차를 결정하여야 한다. 이는 다음과 같은 평균상대오차(average relative error)로 정의될 수 있다.

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|C_{im} - C_{ic}|}{C_{im}} \quad (10)$$

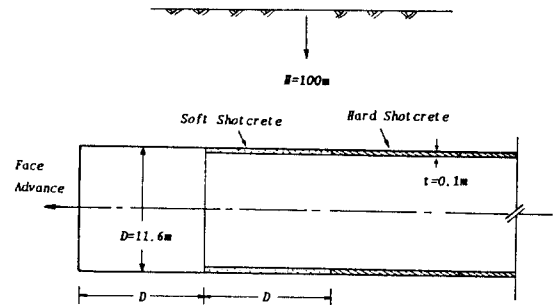
여기서 C_{im} : 측정된 내공변위
 C_{ic} : 계산된 내공변위

이다.

4. 적용사례

4.1 수치해석 결과에 대한 적용

굴착면 진행의 영향과 보강의 효과를 관찰하기 위하여 원형터널에 대한 Axisymmetric 탄성해석을 실시하였다. Fig. 3과 같이 터널의 심도 $H=100$ m, 직경 $D=11.6$ m이며, 1회 굴착시 직경만큼 진행하고 직경



Property	Rock Mass	Soft Shotcrete	Hard Shotcrete
γ (ton/m ³)	2.7	2.3	2.3
E (ton/m ³)	560,000	500,000	2,000,000
ν	0.23	0.2	0.2

Fig. 3. Model of axis-symmetric analysis for the simulation of face advance.

Table 1. Modelling functions of tunnel convergence

No.	Modelling Function	Parameter	Remarks
1	$C(x) = a\{1 - \exp(-bx)\}$ or $C(t) = a\{1 - \exp(-bt)\}$	a, b	Elastic
2	$C(t) = a \log(1 + bt)$	a, b	Visco-plastic
3	$C(x) = C_s \left\{ 1 - \left(\frac{X}{X+x} \right)^2 \right\}$	C_s, X	Elasto-plastic
4	$C(x, t) = a\{1 - \exp(-bx)\} + c\{1 - \exp(-dt)\}$	a, b, c, d	Visco-elastic (Kelvin-Voigt)
5	$C(x, t) = C_s \left\{ 1 - \left(\frac{X}{X+x} \right)^2 \right\} \left[1 + m \left\{ 1 - \left(\frac{T}{T+t} \right)^{0.33} \right\} \right]$	C_s, X, T, m	Elasto-plastic with time-dependent closure

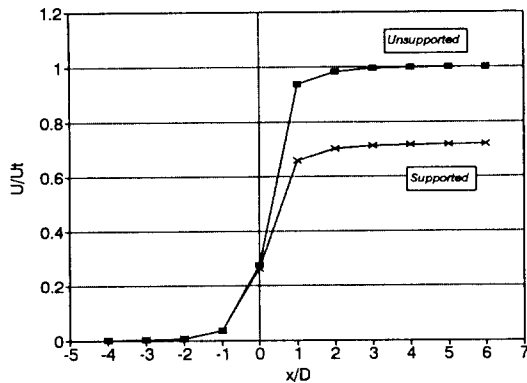


Fig. 4. Displacements of tunnel walls by face advance in axi-symmetric analysis.

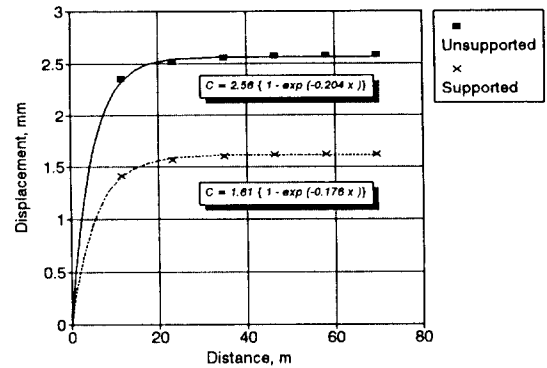


Fig. 5. Modelling function of displacements of tunnel walls in axi-symmetric analysis.

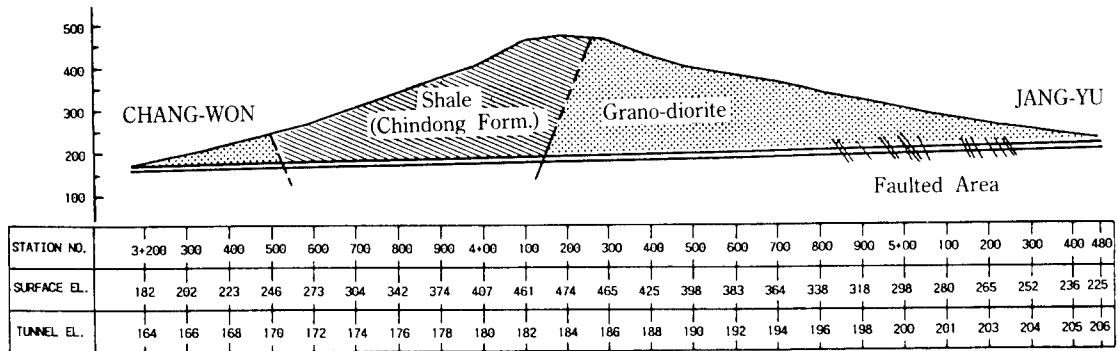


Fig. 6. Longitudinal section of Bulmosan road tunnel.

만큼 떨어진 후방에서 슛크리트 10 cm를 시공하는 것으로 가정하였다. 암반과 슛크리트의 물성은 그림과 같으며, 시공직후의 슛크리트와 시간이 경과한 후의 슛크리트는 물성이 다른 것으로 가정하였다. 해석에 사용된 프로그램은 유한차분 응력해석 프로그램인 FLAC이다.

해석결과 굴착면으로부터 거리에 따른 터널 벽면의 변위를 나타내면 Fig. 4와 같다. 보강이 없는 경우 굴착면 전방의 변위는 최종변위의 27%로 계산되었으며, 보강이 있는 경우에는 36%로 계산되었다. 한편, 보강이 실시된 경우에 최종변위는 보강이 없는 경우의 72%로 계산되었으며, 굴착면 전방의 변위를 제외하면 그 비율은 63%이다. 즉, 보강이 실시된 경우에 터널의 벽면 변위는 보강이 없는 경우에 비하여 훨씬 작게 계산되었다.

굴착면 후방에서 발생하는 변위, 즉 내공변위에 대하여 지수함수를 적용하여 회귀분석을 실시한 결

과는 Fig. 5와 같다. 두 경우 모두 상대오차는 1% 이내로서, 탄성해석시 내공변위는 지수함수로서 해석된다는 Panet(1978)의 이론과 일치하고 있다. 보강이 있는 경우에서 parameter b의 값이 더 작게 계산되는데, 이는 보강에 의해 내공변위의 수렴속도가 빨라짐을 의미한다.

4.2 불모산 터널

불모산 터널은 창원과 장유를 잇는 총길이 2340 m의 2차선 도로터널이다. 터널 종단면도는 Fig. 6과 같으며, 터널의 표준 단면은 Fig. 7과 같다.

본 지역은 충적층인 진동층 세일에 화강 심록암이 관입한 곳으로서, 암반 자체는 강하지만 불규칙적인 절리가 많이 발달되어 있고 터널 축을 따라 암상의 변화가 심한 곳이 많이 나타난다. 또한 지하수가 다량 용출되어 암질을 저하시키고 있다. 본 지역의 경암부에 해당되는 구간에 대하여 RMR 및 Q-system에

Table 2. Rock classifications in the hard rock section of Bulmosan tunnel

System	Parameter	Description	Value
RMR	1. σ_c	100~200 MPa	12
	2. R.Q.D	50~75%	13
	3. Joint spacing	0.3~1 m	20
	4. Joint condition	slightly rough	12
	5. Ground water	25~100 l/min	4
	6. Joint orientation	unfavourable(sharp)	-10
	Rating	51	
	Class	FAIR	
Q	1. R.Q.D	50~75%	65
	2. J_n	2+ random	6
	3. J_r	rough, planar	1.5
	4. J_a	slightly altered	2
	5. J_w	medium inflow	0.66
	6. SRF	single weakness zone, clay	2.5
	Rating	2.145	
	Class	POOR	

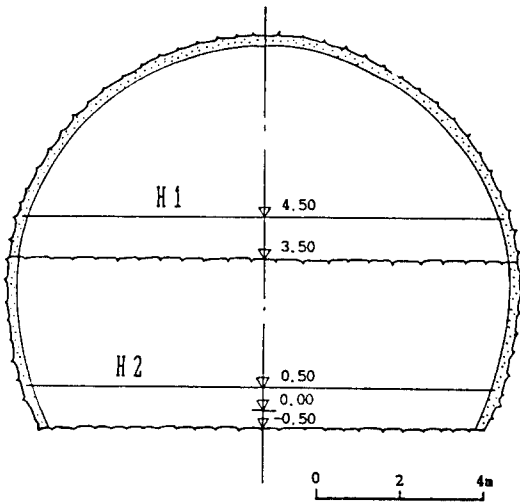


Fig. 7. Cross-section of Bulmosan road tunnel.

의한 암반분류를 실시한 결과는 Table 2와 같다. 암반이 비교적 불량함에 따라 터널은 상하 반단면씩 분할 굴착되었으며, 굴착 및 보강방식은 NATM 공법을 사용하였다. 암반 보강은 1차 슛크리트 50 mm, 레진볼트 길이 4 m 및 간격 2 m, 2차 슛크리트 50 mm로 시공되었다.

계측은 Fig. 7에서와 같이 H1 및 H2의 수평 내공 변위를 측정하였다. 상부 반단면 굴착 이후 H1에 대한 내공변위 측정결과를 도시하면 Fig. 8과 같다. 계측단

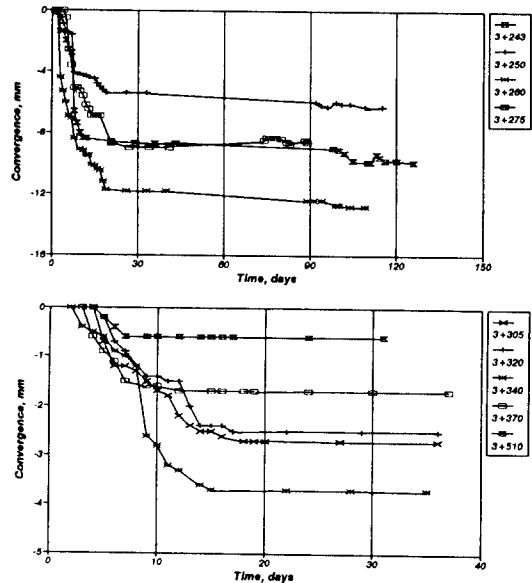


Fig. 8. Results of convergence measurements in Bulmosan tunnel (H1).

면 3+243~3+275에 해당되는 창원측 갱구부 주변은 풍화가 많이 진행된 연암층으로서 측정된 내공변위는 5~12 mm 정도였다. 한편 비교적 경암에 해당되는 3+305~3+510 구간에서 내공변위는 15일 이내 안정된 값으로 수렴하면서 측정치는 1.8~4 mm로서 연암층보다 작게 나타났다.

Table 3. Regression results of convergence measurements in Bulmosan tunnel

Station No.	t ₀	a	b	C ₀	S(%)	Remarks
3+243	2	16.61	0.187	7.15	17.1	Portal section
+250	0	7.39	0.112	1.27	27.4	〃
+260	2	11.13	0.110	-1.34	2.1	〃
+275	4	16.76	0.167	8.18	10.0	〃
+305	4	4.94	0.159	2.07	7.2	Hard rock section
+320	4	5.58	0.167	2.94	8.2	〃
+340	2	6.63	0.158	2.70	31.2	〃
+370	3	5.18	0.390	3.48	2.5	〃
+510	4	4.99	0.520	4.39	4.7	〃

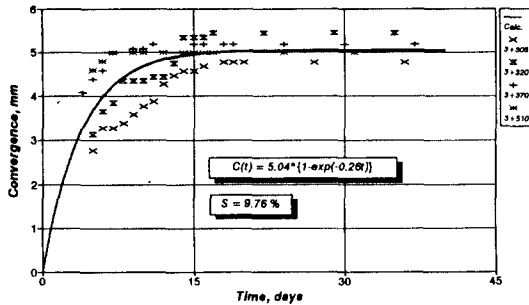


Fig. 9. Modelling function of convergence in the hard rock section of Bulmosan tunnel.

계측결과에 대해 회귀분석을 실시한 결과, 다음과 같은 지수함수가 가장 적합한 것으로 나타났다.

$$C_m(t) = a\{1 - \exp(-bt)\} - C_0$$

즉, 계측결과는 시간의 지수함수로서 표시된다. 이 경우에 굴착면 진행속도가 일정한 것으로 판단되며, 따라서 내공변위는 굴착면 진행거리의 함수로 나타나는 것으로도 볼 수 있다.

각 측정치에 대해 상기 함수를 적용하여 parameter a, b 및 측정전 변위 C₀를 구하면 Table 3과 같다. 표에서 볼 때, 연암에 해당하는 갱구부 부근의 연암 구간에서는 최종변위를 나타내는 parameter a의 변화가 크며, 상대오차도 비교적 크다. 그러나 경암부에서는 a 및 b의 값이 비슷하게 계산되었으며, 상대오차도 7~8% 이내로서 모델의 적합도가 양호한 것을 알 수 있다.

경암구간에서 상대오차가 유난히 큰 3+340 단면을 제외하고 4개 계측 단면의 측정치에 대해 C₀를 고려하여 모든 측정치를 종합한 회귀분석을 실시한 결과는

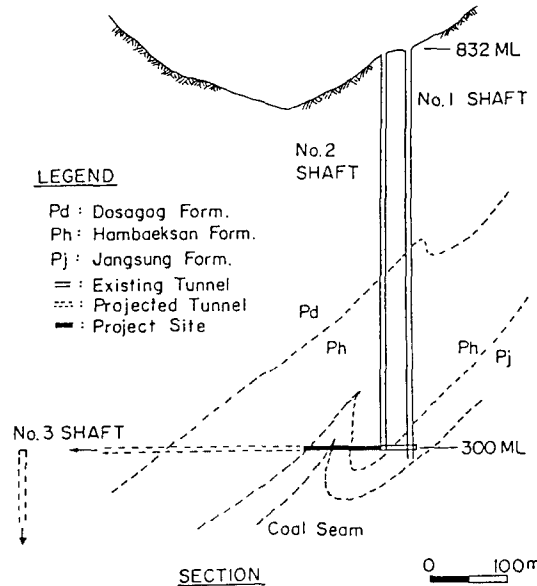


Fig. 10. Geological condition around the 300 ML Main-cross tunnel in Sam-cheok coal mine.

Fig.9와 같다. 즉, 본 지역의 경암부에서 상부 반단면만 굴착한 경우, 수평 내공변위 함수는 그림과 같은 모델함수로서 나타낼 수 있는 것으로 판단된다. 최종 내공변위 a는 약 5 mm이며, 내공변위는 굴착 1주일 이내 85% 가량이 발생하고 15일 이내 최종 값으로 수렴한다.

불모산 터널의 폭이 11.4 m로서 비교적 대단면 도로터널이지만 경암구간에서 상부 반단면 굴착시 내공변위 함수는 시간의 지수함수로서 표시될 수 있으므로 주변 암반의 거동은 주로 탄성적이며 소성영역의 발달은 미약한 것으로 판단된다. 한편, 양쪽 갱구부의

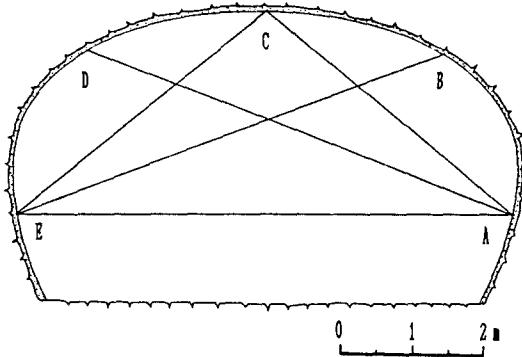


Fig. 11. Cross-section of Main-cross tunnel.

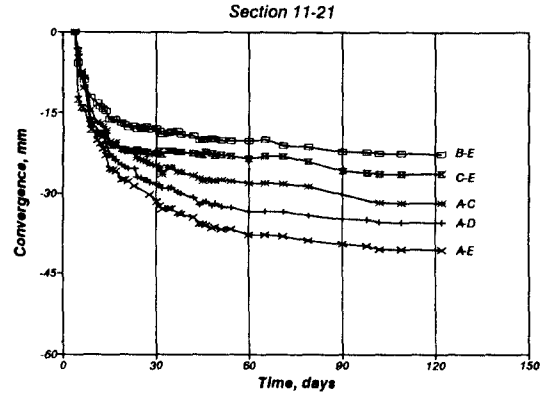


Fig. 12. Results of convergence measurements in Main-cross tunnel.

풍화암 또는 연암 구간에서는 지수함수의 적합도가 저하되며, 이 지역에서는 굴착면 거리와 시간의 영향을 모두 고려한 소성해석이 필요한 것으로 판단된다.

4.3 심부 광산 터널

삼척탄좌의 300 ML 연락갱(Main Cross Tunnel)은 심도 530 m, 폭 7 m, 높이 4 m의 터널로서 터널 주변 지질 현황은 Fig. 10과 같으며, 터널의 단면은 Fig. 11과 같다. 그림에서와 같이 본 지역은 터널 하부의 석탄층이 상부로 돌출한 곳으로서 터널 주변의 암반은 석탄층과 함께 파쇄된 연약한 세일층으로 구성되어

있다. 본 지역에 대한 암반 분류 결과는 Table 4와 같다.

본 터널은 전단면 NATM 공법으로 굴착되었으며, 암반보강은 1차 슛크리트 50 mm, 전면 접착형 록볼트 길이 2.5 m 및 간격 0.8~1.2 m, 2차 슛크리트 50 mm로 시공되었다. 이후 약 60일 경과시에 추가 보강으로서 3차 슛크리트 50 mm가 시공되었다.²⁾

내공변위는 1개 측정단면에서 총 5개 측선에 대해 측정이 실시되었으며, 예로서 11-21단면에서 120일간 측정된 결과를 나타내면 Fig. 12와 같다. 내공변위는

Table 4. Rock classifications of Main-cross tunnel in Sam-check coal mine

System	Parameter	Description	Value
RMR	1. σ_c	100MPa	10
	2. R.Q.D	20%	3
	3. Joint spacing	0.1~0.2 m	10
	4. Joint condition	slickensided	6
	5. Ground water	none	10
	6. Joint orientation	unfavourable(sharp)	-10
	Rating		26
	Class		POOR
Q	1. R.Q.D	20%	20
	2. Jn	3 sets	9
	3. Jr	smooth, undulating	1.0
	4. Ja	slightly altered	2
	5. Jw	dry	1.0
	6. SRF	mild squeezing	5
	Rating		0.22
	Class		VERY POOR

Table 5. Regression results of convergence measurements in 11-21 section

Line	C_x	X	T	m	C_0	C_{tot}	$\frac{C_x}{C_{tot}}$	S(%)
A-E	12.2	3.5	1.51	7.1	32.0	99.1	0.12	5.4
A-D	14.5	3.9	1.32	5.2	31.8	90.0	0.16	6.7
A-C	13.5	4.9	1.34	4.5	24.9	74.6	0.18	5.5
B-E	11.1	5.4	0.50	3.8	21.4	53.6	0.21	2.5
C-E	9.4	7.3	0.15	3.9	14.4	46.5	0.20	2.1

60일 이후에도 수렴되지 못하며 120일까지도 작은 양이지만 꾸준히 증가하고 있음을 알 수 있다.

계측결과에 대해 다음과 같이 굴착면 거리와 시간의 영향을 모두 고려한 함수가 적용되었다.

$$C(x, t) = C_x \left\{ 1 - \left(\frac{X}{X+x} \right)^2 \right\} \left[1 + m \left\{ 1 - \left(\frac{T}{T+t} \right)^{0.3} \right\} \right] - C_0$$

회귀분석으로 구하여야 할 parameter는 C_x , X, m, T, C_0 의 5개로서, 먼저 굴착면이 충분히 멀어지거나, 또는 굴착이 장시간 중단된 기간 중에 측정된 값에 대해 시간의 영향에 관련된 parameter인 m과 T를 구하고, 전체 자료에 대해 나머지 parameter를 구하였다. 즉, 회귀분석은 동일한 자료에 대해 2회 반복하여 실시되었다.

5개 측선에 대해 회귀분석한 결과는 Table 5와 같다. 본 측정은 굴착 후 4일 경과시 굴착면 거리가 4 m일 때부터 계측이 시작되었으며, 회귀분석 결과 구해진 측정전 변위 C_0 는 최종변위의 30~40%에 달하고 있음을 알 수 있다. 또한 표에서 C_x/C_{tot} 는 전체 내공변위에 대한 굴착면 진행의 영향을 나타내는 것으로 그 비율은 12~21%로 계산되었다. 이는 심도 600~1200 m의 calcareous schist에 굴착된 Frejus 터널에서 굴착면 진행의 영향이 12~25%이었던 것과 유사한 결과를 나타내고 있다.¹²⁾

회귀분석의 평균상대오차는 7% 이내로서 모델함수의 적합도는 양호한 것으로 판단된다. 예로서 A-E 및 C-E 측선에 대한 회귀분석 결과를 측정치와 비교하여 도시하면 Fig. 13과 같다. 그림에서 점선은 굴착면의 거리를 나타내는 것으로 본 지점에서 굴착 17일 후 굴착이 장기간 중단되었다가 70일 이후 굴착이 재개되었음을 보여준다. 내공변위는 굴착이 중단된 기간 중에도 계속 증가하고 있어 시간의 영향을

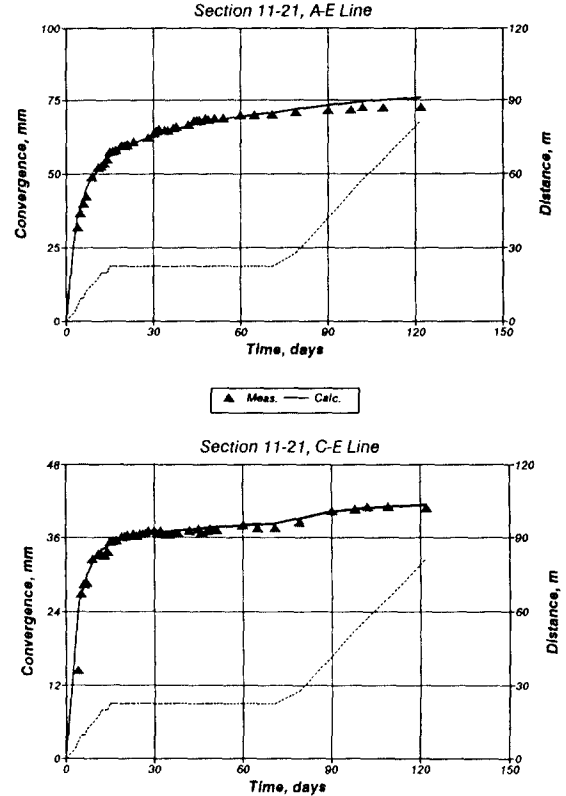


Fig. 13. Measured and calculated convergence of Main-cross tunnel.

명백하게 보여준다. 특히 계측치로부터 굴착 재개에 의한 굴착면 진행의 영향을 볼 수 있으며, 모델 함수가 이러한 굴착 재개의 영향을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

Table 5에서 측선 A-E의 최종 내공변위가 99.1 mm로 계산되었으며, Fig. 13에서 120일 경과시의 내공변위는 75 mm로 나타나는 것을 볼 때, 본 지역과 같이 심부의 연약 암반 중에 굴착된 터널은 암반은 시간의존적 거동에 의해 변형이 크게 발생하며 이러한 변형은 수년에 걸쳐 장기간 발생하는 것으로 판단된다. 이와같은 장기간의 변형은 NATM에 의한 1차 지보의 최종적인 안전을 판단에 고려되어야 할 사항이며, 특히 내부 라이닝에도 큰 하중을 부과하게 되므로, 심부 과지압 암반에서는 내부 라이닝에 대해서도 장기적인 계측을 실시하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

터널 내공변위는 터널의 안정성 평가와, 설계의 Feed-back를 통한 암반보강의 경제성 평가를 위해 가장 중요하게 취급되는 계측항목이다. 또한 내공변위의 발생양상을 통해 터널 주변암반의 탄성, 점탄성 또는 탄소성적 변형거동에 대한 분석이 가능하다.

본 연구에서는 굴착면 이전에 발생하는 변위를 포함하여 전체적인 터널의 변형거동을 고찰하고, 굴착면 후방에서 발생하는 내공변위의 형상을 암반의 변형 특성과 관련하여 고찰하였다. 특히 내공변위를 모델화하는 함수에 대해 살펴보고 이를 이용하여 실제 측정된 결과를 회귀분석하므로써 측정 전 변위를 포함하는 완전한 내공변위 형태를 결정하는 기법을 개발하였다. 개발된 방법을 사용하여 사례분석을 실시하였으며, 이에 대한 중요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 탄성 Axi-symmetric으로 해석된 터널에서 내공변위는 보강의 유무와 관계없이 모두 거리에 따른 지수함수로 표시되며, 보강이 있는 경우에 내공변위는 더 빨리 수렴하는 것으로 나타났다.

(2) 불모산 터널에서 경암부의 내공변위는 다음과 같이 시간에 따른 지수함수로 잘 표시되는 것으로 해석되었다.

$$C(t) = 5.04 \cdot \{1 - \exp(-2.06 \cdot t)\}$$

그러나 갱구 부근의 연암부에서 측정된 내공변위에 대해서는 지수함수가 적합하지 않은 것으로 나타났다.

(3) 심도 530 m의 연암에 굴착된 심부 광산 터널에서 계측된 결과에 대해서는 다음과 같은 굴착면 거리와 굴착 후 경과시간을 모두 고려한 분수함수가 적합한 것으로 해석되었다.

$$C(x, t) = C_x \left\{ 1 - \left(\frac{X}{X+x} \right)^2 \right\} \left[1 + m \left\{ 1 - \left(\frac{T}{T+t} \right)^{0.3} \right\} \right]$$

(4) 사례분석을 통하여, 탄성암반에서는 지수함수, 탄소성 암반에서는 분수함수로 내공변위가 모델화된다는 기존의 이론을 확인하였다.

동 주위 암반의 응력해석 및 변형거동에 관한 연구, 서울대학교 공학박사 학위논문.

- 2) 이경운 외, 1986, 심부 대단면 시설갱도에 대한 신지보법 설계 및 감리, 삼척탄좌개발(주), 서울.
- 3) 이경운, 김복윤, 김호영, 이창훈, 1987, Tunnelling experience with NATM in Korean colliery, Int. Symp. on Coal Mining & Safety, Seoul, KIMME, p. 431-438.
- 4) Hanafy, E.A. & J.J. Emery, 1980, Advancing face simulation of tunnel excavations and lining placement, 13th Canadian Rock Mechanics Symp., CIMM, Montreal, p. 119-125.
- 5) Kaiser, P.K., 1980, Effect of stress-history on the deformation behaviour of underground openings, 13th Canadian Rock Mechanics Symp., CIMM, Montreal, p. 133-140.
- 6) Lombardi, G., 1979, Long-term measurements in underground opening and their interpretation with special consideration to the rheological behaviour of the rock, Field Measurements in Rock Mechanics, Zurich, V.2, p. 839-858.
- 7) Ohashi, Y. et al., 1982, Analysis of advancing tunnel by 2-dimesional FEM, 4th Int. Congr. on Numerical Methods in Geomech, Edmonton, V.2, p. 571-578.
- 8) Otsuka, M. & T. Kondoh, 1981, On the displacement forecasting methods and their application to tunnelling by NATM, Int. Symp. on Weak Rock, Tokyo, p. 945-950.
- 9) Panet, M., 1979, Time-dependent deformations in underground works, 4th Int. Congr. on Rock Mechanics, ISRM, Montreux, V.3, p. 279-289.
- 10) Panet, M. & A. Guenot, 1982, Analysis of convergence behind the face of a tunnel, Tunnelling 82, IMM, Brighton, p. 197-204.
- 11) Press, W.H., 1987, Numerical Recipes, Cambridge Univ. Press, p. 498-528.
- 12) Sulem, J., Panet, M. & A. Guenot, 1987, Closure analysis in deep tunnels, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. V.24, No. 3, p. 145-154.
- 13) Vassilev, V.H. & T.N. Hrisstov, 1988, Influence of the heading face and a two-dimensional calculation model of tunnel linings, 6th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomech., Innsbruck, V.3, p. 1551-1555.

참고문헌

- 1) 김지환, 1990, 현장 계측치의 역해석에 의한 지하공

부록 : 내공변위 회귀분석 Program-MARQ

PROGRAM MARQ

```

C=====
C   Regression of Tunnel Convergence Data from the Field Measurements
C-----
C   IFLAG  1 = Exponential Function
C           2 = First Regression for the Time Parameters in Double
C             Fractional Expression
C           3 = Second Regression for the Face-advancing Parameters
C             in Double Fractional Expression
C   * All functions contain the pre-convergence term.
C=====
      DIMENSION T(100),X(100),Y(100),A(20),COVAR(20,20),ALPHA(20,20)
      ITER=0
      OPEN(5,FILE='MARQ0.DAT')
      OPEN(7,FILE='MARQ0.OUT')
      READ(5,*) NDATA,MFIT,NITER,IFLAG,TOLER
      WRITE(7,10) NDATA,MFIT,NITER,IFLAG,TOLER
10  FORMAT(///,15X,'NDATA=',I5,5X,'MFIT=',I5,5X,'NITER=',I5,/,
           15X,'IFLAG=',I5,5X,'TOLER=',F10.5,/)
      READ(5,*) (A(I),I=1,MFIT)
      WRITE(7,11) (A(I),I=1,MFIT)
11  FORMAT(/,15X,'INITIAL GUESS OF A(I) ;',5F10.4/)
      IF(IFLAG.LE.2) THEN
          READ(5,*) (X(I),Y(I),I=1,NDATA)
          WRITE(7,20)
          WRITE(7,21) (X(I),Y(I),I=1,NDATA)
          DO I=1,NDATA
              T(I)=0.
              A4=0.
              A5=0.
          ENDDO
      ELSE
          READ(5,*) A4,A5
          WRITE(7,22) A4,A5
          READ(5,*) (T(I),X(I),Y(I),I=1,NDATA)
          WRITE(7,23)
          WRITE(7,24) (T(I),X(I),Y(I),I=1,NDATA)
      ENDIF
      NCA=MFIT

```

```

ALAMDA=-1.
CALL MRQMIN(T,X,Y,NDATA,A,MFIT,COVAR,ALPHA,NCA,CHISQ,ALAMDA,
+          IFLAG,A4,A5)
220 IF(CHISQ.LT.TOLER) GO TO 100
ITER=ITER+1
IF(ITER.GE.NITER) THEN
WRITE(7,34) CHISQ
WRITE(7,30) (A(I),I=1,MFIT)
STOP
ENDIF
CALL MRQMIN(T,X,Y,NDATA,A,MFIT,COVAR,ALPHA,NCA,CHISQ,ALAMDA,
+          IFLAG,A4,A5)
GO TO 220

```

C-----Calculation of average relative error

```

100 CALL RELER(T,X,Y,NDATA,A,MFIT,SAR,IFLAG,A4,A5)
WRITE(7,30) (A(I),I=1,MFIT)
WRITE(7,31) ITER,CHISQ,SAR
20 FORMAT(/,20X,'X(I)',10X,'Y(I)',/)
21 FORMAT(15X,F10.4,5X,F10.4)
22 FORMAT(/,15X,'m=',F10.4,5X,'T=',F10.4,/)
23 FORMAT(/,20X,'T(I)',10X,'X(I)',10X,'Y(I)',/)
24 FORMAT(15X,F10.4,5X,F10.4,5X,F10.4)
30 FORMAT(/,15X,'A(I)=' ,5F10.4)
31 FORMAT(/,15X,'ITER=' ,I5,5X,'CHISQ=' ,E12.4,/,
+       15X,'Ave. Relative Error =' ,F10.4,/)
34 FORMAT(/,15X,'CONVERGENCE WAS FAILED!!!' ,/,15X,'CHISQ=' ,E12.4)
300 STOP
END
SUBROUTINE MRQMIN(T,X,Y,NDATA,A,MFIT,COVAR,ALPHA,NCA,CHISQ,
+          ALAMDA,IFLAG,A4,A5)
PARAMETER (MMAX=20)
DIMENSION T(NDATA),X(NDATA),Y(NDATA),A(MFIT),COVAR(NCA,NCA),
+          ALPHA(NCA,NCA),ATRY(MMAX),BETA(MMAX),DA(MMAX)
IF(ALAMDA.LT.0.) THEN
ALAMDA=0.001
CALL MRQCOP(T,X,Y,NDATA,A,MFIT,ALPHA,BETA,NCA,CHISQ,IFLAG,A4,A5)
OCHISQ=CHISQ
DO J=1,MFIT
ATRY(J)=A(J)
ENDDO
ENDIF
DO J=1,MFIT
DO K=1,MFIT
COVAR(J,K)=ALPHA(J,K)

```

```

        ENDDO
        COVAR(J,J)=ALPHA(J,J)*(1.+ALAMDA)
        DA(J)=BETA(J)
    ENDDO
C----- Matrix solution.
    CALL GAUSSJ(COVAR,MFIT,NCA,DA,1,1)
C----- Did the trial succeed?
    DO J=1,MFIT
        ATRY(J)=A(J)+DA(J)
    ENDDO
    CALL MRQCOF(T,X,Y,NDATA,ATRY,MFIT,COVAR,DA,NCA,CHISQ,IFLAG,A4,A5)
    IF(CHISQ.LT.OCHISQ) THEN
C----- Success, accept the new solution.
        ALAMDA=0.1*ALAMDA
        OCHISQ=CHISQ
        DO J=1,MFIT
            DO K=1,MFIT
                ALPHA(J,K)=COVAR(J,K)
            ENDDO
            BETA(J)=DA(J)
            A(J)=ATRY(J)
        ENDDO
    ELSE
C----- Failure, increase ALAMDA and return
        ALAMDA=10.*ALAMDA
        CHISQ=OCHISQ
    ENDIF
    RETURN
END
SUBROUTINE MRQCOF(T,X,Y,NDATA,A,MFIT,ALPHA,BETA,NALP,CHISQ,
+               IFLAG,A4,A5)
    PARAMETER(MMAX=20)
    DIMENSION T(NDATA),X(NDATA),Y(NDATA),ALPHA(NALP,NALP),BETA(MFIT),
+           DYDA(MMAX),A(MFIT)
    BIG=1.0E+12
    DO J=1,MFIT
        DO K=1,J
            ALPHA(J,K)=0.
        ENDDO
        BETA(J)=0.
    ENDDO
    CHISQ=0.
    DO I=1,NDATA
        IF(IFLAG.EQ.1) THEN

```

```

      CALL FUNCS1(X(I),A,YMOD,DYDA,MFIT)
    ELSE IF(IFLAG.EQ.2) THEN
      CALL FUNCS2(X(I),A,YMOD,DYDA,MFIT)
    ELSE
      CALL FUNCS3(X(I),A,YMOD,DYDA,MFIT,T(I),A4,A5)
    ENDIF
    DY=Y(I)-YMOD
    DO J=1,MFIT
      WT=DYDA(J)
      IF(ABS(WT).GT.BIG) RETURN

```

```

C-----
C      WRITE(7,77) WT
C 77  FORMAT(//,5X,'Your initial guess is far from the correct values of
C + parameters!!!',/,5X,'Please try again!!!',//,5X,'WT=',E12.4)
C-----

```

```

      DO K=1,J
        ALPHA(J,K)=ALPHA(J,K)+WT*DYDA(K)
      ENDDO
      BETA(J)=BETA(J)+DY*WT
    ENDDO
    CHISQ=CHISQ+DY*DY
  ENDDO
  DO J=2,MFIT
    DO K=1,J-1
      ALPHA(K,J)=ALPHA(J,K)
    ENDDO
  ENDDO
  RETURN
END
SUBROUTINE GAUSSJ(A,N,NP,B,M,MP)
  PARAMETER(NMAX=50)
  DIMENSION A(NP,NP),B(NP,MP),IPIV(NMAX),INDXR(NMAX),INDXC(NMAX)
  DO 11 J=1,N
    IPIV(J)=0
11  CONTINUE
    DO 22 I=1,N
      BIG=0.
      DO 13 J=1,N
        IF(IPIV(J).NE.1) THEN
          DO 12 K=1,N
            IF(IPIV(K).EQ.0) THEN
              IF(ABS(A(J,K)).GE.BIG) THEN
                BIG=ABS(A(J,K))
                IROW=J

```

```

    ICOL=K
    ENDIF
    ELSE IF(IPIV(K).GT.1) THEN
    PAUSE
    ENDIF
12 CONTINUE
    ENDIF
13 CONTINUE
    IPIV(ICOL)=IPIV(ICOL)+1
    IF(IROW.NE.ICOL) THEN
    DO 14 L=1,N
    DUM=A(IROW,L)
    A(IROW,L)=A(ICOL,L)
    A(ICOL,L)=DUM
14 CONTINUE
    DO 15 L=1,M
    DUM=B(IROW,L)
    B(IROW,L)=B(ICOL,L)
    B(ICOL,L)=DUM
15 CONTINUE
    ENDIF
    INDXR(I)=IROW
    INDXC(I)=ICOL
    IF(A(ICOL,ICOL).EQ.0.) PAUSE
    PIVINV=1./A(ICOL,ICOL)
    A(ICOL,ICOL)=1.
    DO 16 L=1,N
    A(ICOL,L)=A(ICOL,L)*PIVINV
16 CONTINUE
    DO 17 L=1,M
    B(ICOL,L)=B(ICOL,L)*PIVINV
17 CONTINUE
    DO 21 LL=1,N
    SUBROUTINE FUNCS2(T,A,Y,DYDA,NA)
        PARAMETER(MMAX=20)
    DIMENSION A(NA),DYDA(MMAX)
    CC=A(3)/(A(3)+T)
    CC1=A(2)*(1.-CC**0.3)
    Y=A(1)*(1.+CC1)-A(4)
    DYDA(1)=1.+CC1
    DYDA(2)=A(1)*CC1/A(2)
    DYDA(3)=-0.3*A(1)*A(2)*(CC**1.3)*T/(A(3)**2)
    DYDA(4)=-1.
    RETURN

```

```
END
SUBROUTINE FUNCS3(X,A,Y,DYDA,NA,T,A4,A5)
PARAMETER(MMAX=20)
DIMENSION A(NA),DYDA(MMAX)
  AA1=A(2)/(A(2)+X)
  AA2=AA1*X/(A(2)+X)**2
  TT=1.+A4*(1.-(A5/(A5+T))**0.3)
  Y=A(1)*TT*(1.-AA1**2)-A(3)
  DYDA(1)=TT*(1.-AA1**2)
  DYDA(2)=-2.*TT*A(1)*AA2
  DYDA(3)=-1.
RETURN
END
```