

## TBM 터널 공정 분석시스템을 이용한 TBM 수행 평가

백승한, 문현구

한양대학교 지구환경시스템공학과

### 1. 서론

TBM 터널의 설계 및 평가에 있어 고려해야하는 중요한 세가지 요소는 1) 굴착 대상 재료로서의 암석 물성, 2) 암반의 지질학적 구조 및 특성, 그리고 3) 기계의 구조적 및 기능적 성능으로 구분할 수 있다. TBM에 의한 기계식 터널굴착은 미시적으로 굴착과정동안의 암석과 디스크 커터의 상호작용으로 인한 암석의 파쇄과정인 반면에 거시적 관점에서는 굴착 대상 암반과 TBM 사이의 상호작용이 매우 중요하다(Moon, 2001; Baek and Moon, 2003). 또한 TBM 터널 현장의 암석 및 암반 물성에 대한 정보는 실내 및 현장 실험 및 현장 지질 조사 등으로 알 수 있으며, 이러한 여러 가지 정보는 각 현장에서 수행하는 시험 및 조사에 따라 서로 다르다. 따라서 터널 기술자들은 획득된 자료에 알맞은 다양한 설계 및 평가 도구를 필요하게 된다(백승한, 문현구, 2003; 백승한, 2004).

일반적으로 TBM은 각 프로젝트의 조건에 맞추어 최상으로 수행하도록 제작되어지며, 이러한 경우를 forward path라고 한다. 이와 반대로 이미 다른 현장에 사용되었던 TBM을 적용하는 경우를 reverse path라고 하며, 최근 새로운 터널 프로젝트가 증가함에 따라 TBM의 재사용의 수요가 증가하고 있다. 이러한 새로운 조건에서의 터널 계획 및 관리를 위해서는 관입율(PR: penetration rate), 굴진율(AR: advance rate), 가동율(U: utilization)을 이용하여 TBM 수행능력을 평가하는 것이 필요하다(Moon, 2001; 백승한, 문현구, 2003).

TBM 터널의 설계와 평가를 위한 다양한 분석 모델들이 많은 연구자들에 의하여 개발되어 왔으며, 본 연구에서는 여러 분석 모델중 Persson 등이 소개한 분석 방법(1993), 노르웨이에서 개발한 예측방법(NTH, 1994), Jodl과 Stempkowski(1996)가 제안한 방법 그리고 Barton(1999, 2000)의  $Q_{TBM}$ 을 이용한 방법의 특징 및 장단점 등을 비교 분석하였으며, 이를 통합하여 사용자 친화적인 윈도우용 프로그램 AS-TBM(Assessment System of TBM tunnelling)을 개발하고 입력자료에 대한 영향 분석 및 현장자료와 비교하고자 하였다.

### 2. TBM 터널 공정 분석시스템

TBM 터널공정 분석을 위한 Persson(1993) 등에 의한 Swiss 분석 방법, 노르웨이에서 개발한 NTH 예측방법(NTH, 1994; Bruland, 1998), Jodl과 Stempkowski(1996)가 제안한 Austria 방법 그리고 Barton(1999, 2000)의  $Q_{TBM}$ 을 이용한 분석 방법을 소개하였다.

## 2.1 Swiss 분석시스템

Persson 등(1993)에 의해 제시된 방법을 수정 보완한 Swiss 분석시스템의 입력 자료는 크게 암석인자, 기계인자 그리고 시간인자로 구분할 수 있다. 관입율 PR (m/hr)은 TBM 직경 D (m), 관입깊이  $p_e$  (mm/rev) 그리고 TBM 회전률 계수  $k_N$ 으로부터 식(1)과 같이 계산하며, 커터 교환시간  $T_C$  (hr/m)는 TBM 직경, 커터당 교환시간  $t_c$  (hr) 그리고 커터의 수명  $\lambda$  (km)로부터 예측한다. 총 손실시간  $T_L$  (hr/m)은 stroke  $l_s$  (m), 그리고 관입율 등으로부터 계산하며, 이로부터 굴진을 AR (m/hr) 및 TBM 가동율 U (%)를 다음과 같이 결정한다.

$$PR = 0.06 p_e \frac{k_N}{D} \quad (1)$$

$$AR_2 = \frac{(T_S - t_s)}{T_S T} = \frac{(T_S - t_s) p_e}{\left[ \left( \frac{16.7}{k_N} \right) D + t_c \left( \frac{k_C}{\lambda} \right) D^a + T_L p_e \right] T_S} \quad (2)$$

$$U = 100 \left( \frac{AR_2}{PR} \right) = \frac{(T_S - t_s) D}{0.06 k_N \left[ \left( \frac{16.7}{k_N} \right) D + t_c \left( \frac{k_C}{\lambda} \right) D^a + T_L p_e \right] T_S} \quad (3)$$

여기서,  $T_S$ 는 TBM 작업시간,  $t_s$ 는 이동과 식사 등에 소요되는 고정 손실시간,  $k_C$ 와  $a$ 는 커터가 지나간 총길이를 계산하는데 필요한 계수이다.

## 2.2 NTH 분석시스템

노르웨이에서 개발된 TBM 터널공정 예측 모델의 입력 자료는 굴착 대상인 암반과 TBM으로 크게 두 그룹의 요소로 구성되어 있다(NTH, 1994; Bruland, 1998). 관입율 PR (m/hr)은 등가균열계수와 등가추력(equivalent cutter thrust)  $F_T^*$ 으로부터 관입깊이를 계산한 후 식(1)을 이용하여 결정한다. TBM 가동율 U (%)는 여러 입력자료로부터 결정된 굴착시간, 커터 교환시간, 총 손실시간으로 식(4)를 통해 평가하며, 굴진을 AR (m/hr)은 관입율 PR과 가동율 U의 관계로부터 예측한다.

$$U = 100 \left( \frac{T_B}{T_B + T_C + T_L} \right) \quad (4)$$

여기서,  $T_B$ 와  $T_C$  그리고  $T_L$ 은 km당 시간으로 계산되는 굴착시간, 커터 교환시간 그리고 총 손실시간이다.

## 2.3 Austria 분석시스템

Austria 분석시스템은 Jodl과 Stempkowski(1996)에 의해 제시된 모델이다. 최대 커터 추력과 지반조건 및 천공도지수 등으로부터 관입깊이  $p_e$  (mm/rev)를 추정하고 관입율 PR

(m/hr)을 계산한다. 터널 굴착에 사용된 시간으로부터 식(5)를 이용하여 가동율  $U_2$  (%)을 계산하고,  $U_2$ 를 이를 이용하여 시간별, 월별, 일별 굴진을 AR (m/hr),  $AR_3$  (m/mon),  $AR_4$  (m/day)을 평가할 수 있다.

$$U_2 = 100 \left( \frac{T_B}{T_T} \right) = 100 \left( \frac{T_B}{T_B + T_{RS} + T_{RD}} \right) \quad (5)$$

$$AR = 0.01 U_2 PR = \left( \frac{1000}{T_B + T_{RS} + T_{RD}} \right) \quad (6)$$

여기서  $T_B$ 는 굴착시간,  $T_{RS}$ 는 재배치 및 정리 시간,  $T_{RD}$ 는 고장 및 수리 시간이다.

## 2.4 $Q_{TBM}$ 분석시스템

Barton에 의해 제시된 Q 시스템 및 암반분류 기준은 NMT(Norwegian method of Tunnelling)등의 천공 및 발파 터널 현장에 널리 사용되어 왔으며, Barton(1999, 2000)은 TBM 터널 수행능력을 예측하기 위하여 Q 값을 수정 보완한  $Q_{TBM}$ 을 사용하였다. 식(7)로부터 계산된  $Q_{TBM}$ 을 이용하여 관입율 PR (m/hr)을 계산하며, 암반분류 Q값과 관입율 PR로부터 굴진을 AR (m/hr) 및 TBM 가동율 U (%)를 다음과 같이 계산할 수 있다.

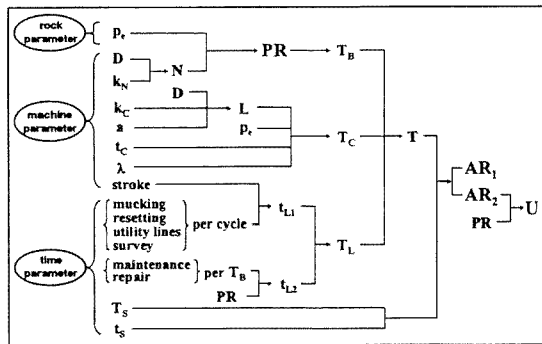


Fig. 1. Swiss assessment system.

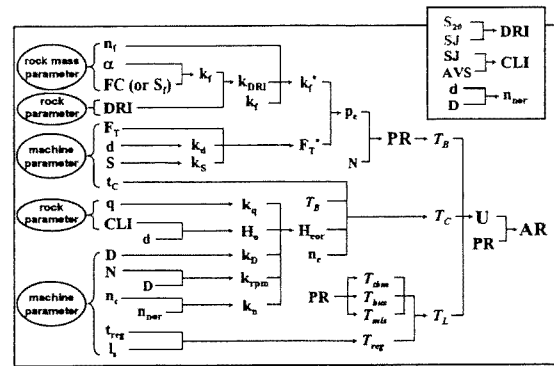


Fig. 2. NTH assessment system.

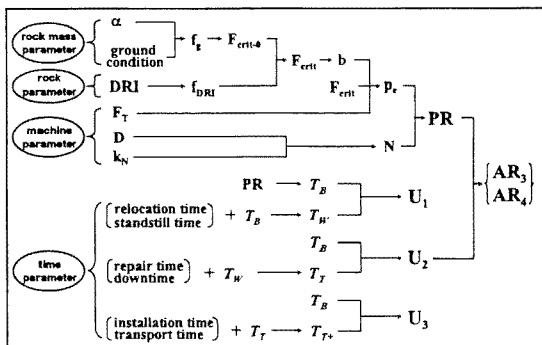


Fig. 3. Austria assessment system.

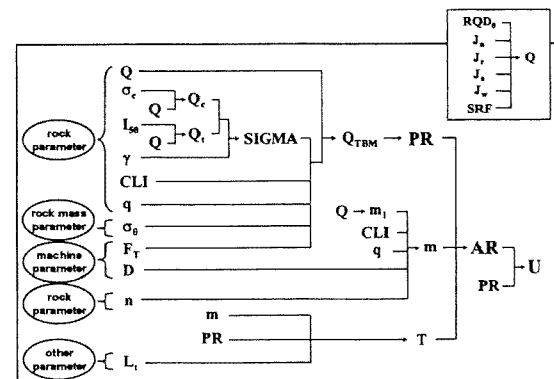


Fig. 4.  $Q_{TBM}$  assessment system.

$$Q_{TBM} = Q \left( \frac{\text{SIGMA}}{F_T^{10}/20^9} \right) \left( \frac{20}{\text{CLI}} \right) \left( \frac{q}{20} \right) \left( \frac{\sigma_\theta}{5} \right) \quad (7)$$

$$\text{PR} = 5 (Q_{TBM})^{-0.2} = 5 \left[ Q \left( \frac{\text{SIGMA}}{F_T^{10}/20^9} \right) \left( \frac{20}{\text{CLI}} \right) \left( \frac{q}{20} \right) \left( \frac{\sigma_\theta}{5} \right) \right]^{-0.2} \quad (8)$$

$$\text{AR} = \text{PR} (T)^m = 5 (Q_{TBM})^{-0.2} (T)^m \quad (9)$$

$$U = 100 \left( \frac{\text{AR}}{\text{PR}} \right) = 100 (T)^m \quad (10)$$

### 3. AS-TBM 프로그램 개발

앞서 소개한 4가지 분석시스템은 많은 식과 도표 및 그래프 등을 이용해야 하며, 그래프 및 도표에서 두 값 사이의 중간값을 결정할 경우 대략적으로 결정해야 하는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 설계 및 현장 기술자가 쉽게 사용할 수 있도록 Window용 프로그램을 개발하였으며, AS-TBM(Assessment System of TBM tunnelling)이라 명칭하였다.

AS-TBM은 입력자료창과 도움창 그리고 4가지 분석시스템 창으로 구성되고 각 변수 및 간단한 설명은 도움창으로 이용할 수 있도록 하였으며, 그래프 및 도표의 중간값을 결정하기 위하여 선형 내삽법(linear interpolation)을 이용하였다. 따라서 기본적인 입력자료를 이용하여 단계적으로 계산되어 최종적으로 관입을 및 굴진을 그리고 가동율을 결정할 수 있다.

Table 1에 정리한 바와 같이 노르웨이에서 개발한 NTH 분석시스템과 Barton에 의해 제시된  $Q_{TBM}$ 을 이용한 분석시스템은 암석 물성, 암반 물성 그리고 TBM 제원에 관련된 자료만으로 관입을, 굴진을 그리고 가동율 등을 평가할 수 있다. 이러한 자료는 현장이 결정된 후 지반조사로부터 비교적 쉽게 얻을 수 있으므로 NTH 분석시스템과  $Q_{TBM}$ 을 이용한 분석시스템은 TBM 터널 시공중 평가뿐만 아니라 TBM 터널 설계 단계에서 설계변수 평가에도 적용가능한 예측시스템이다.

Table 1. Input parameters of four assessment systems

	Input				Output
	Rock	Rock mass	Machine	Time	
Swiss assessment system	$p_e$		$D, l_s, \lambda, t_c$	loss time	PR AR U
NTH assessment system	DRI, CLI, $q$	$\alpha, FC, n_f$	$F_T, D, N, S, d, n_c, l_s, t_c, t_{reg}$		
Austria assessment system	DRI	$\alpha$ rock mass cond.	$F_T, D$	loss time	
$Q_{TBM}$ assessment system	$Q, \sigma_c, I_{50}, \gamma, \text{CLI}, q, n$	$\sigma_\theta$	$F_T, D$		
	$Q_{TBM}$				

Persson 등에 의해 소개된 Swiss 분석시스템과 Jodl과 Stempkowski가 제안한 Austria 분석시스템은 앞서 언급한 예측 모델과 달리 암석과 암반 물성 및 TBM 제원 이외에 커터 교환시간, 손실시간, 고장 및 수리시간 등을 입력자료로 필요로 한다. 따라서 Swiss 분석시스템과 Austria 분석시스템은 설계 단계에서의 예측이 불가능하며, 시공중 또는 시공 완료 후 평가할 수 있는 분석시스템이다.

## 4. TBM 터널 공정 분석

### 4.1 영향인자 분석

분석시스템에 사용되는 입력자료를 일정한 범위내에서 변화시키면서 매개변수 분석을 수행하였다. 하나의 입력자료를 변화시킬 경우 나머지 자료들은 Table 2와 같이 기준값으로 고정하였다.

Table 2. Reference values used for parametric study

Swiss		NTH		Austria		Q <sub>TBM</sub>	
input	value	input	value	input	value	input	value
p <sub>e</sub> (mm/rev)	5	n <sub>f</sub>	1	α (°)	60	Q	2
D (m)	6	α (°)	60	GC	B2	σ <sub>c</sub> (MPa)	150
k <sub>N</sub>	40	S <sub>f</sub> (m)	0.2	DRI	50	I <sub>50</sub> (MPa)	6
k <sub>C</sub>	19.5	D (m)	5	F <sub>T</sub> (kN)	150	γ (g/cm <sup>3</sup> )	2.75
a	1.75	DRI	50	D (m)	5	CLI	20
t <sub>C</sub>	1	F <sub>T</sub> (kN)	150	k <sub>N</sub>	40	q (%)	20
l (km)	150	d (mm)	400	T <sub>rs</sub> (hr/km)	800	F <sub>T</sub> (tonf)	20
T <sub>mnus</sub> (hr)	0.3	S (mm)	70	T <sub>rd</sub> (hr/km)	700	σ <sub>θ</sub> (MPa)	5
stroke	1.5	CLI	40	T <sub>it</sub> (hr/km)	700	n (%)	2
T <sub>mr</sub> (hr)	0.72	q (%)	20			D (m)	5
T <sub>s</sub> (hr)	8	N (rpm)	7			L <sub>t</sub> (km)	1
t <sub>s</sub> (hr)	1	n <sub>C</sub>	42				
		t <sub>reg</sub> (hr)	0.083				
		l <sub>s</sub> (m)	1.5				
		t <sub>C</sub> (hr)	1				

Swiss 분석시스템에서의 분석 결과, PR은 p<sub>e</sub>와 D의 영향을 가장 많이 받고 AR에 대한 영향 순서는 D, p<sub>e</sub>, λ 그리고 k<sub>N</sub>이며, U는 λ의 영향이 가장 크고 그 다음으로 p<sub>e</sub>, k<sub>N</sub>과 λ의 순으로 나타났다. 그중 p<sub>e</sub>에 대한 PR, AR<sub>2</sub> 그리고 U의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 식(1)과 같이 p<sub>e</sub>와 PR은 선형 비례관계이며, AR<sub>2</sub>는 식(2)에서 p<sub>e</sub>가 분모에 비해 분자의 영향을 많이 미치므로 증가하는 양상을 보인다.

NTH 분석시스템에서는 매개변수 α, 절리간격 S<sub>f</sub> (m), DRI, F<sub>T</sub>, CLI 그리고 D에 대한 PR, AR 그리고 U의 변화를 분석한 결과 α, S<sub>f</sub>, F<sub>T</sub> 그리고 D의 영향이 비교적 크게 나타났다. α에 대한 영향은 Fig. 6에서와 같이 α가 60°일 때 k<sub>f</sub>\* 및 p<sub>e</sub>가 최대가 되므로 PR도

1.94 m/hr로 최대가 된다. 반면에 PR이 증가함에 따라  $T_B$ 와  $T_C$  그리고  $T_L$ 은 모두 감소하므로 식(4)의 분자의 감소에 비해 분모의 감소가 크게 나타났다. 따라서 U는  $\alpha$ 가  $0^\circ$ 일 때 65.6 %에서  $\alpha$ 가  $60^\circ$ 일 때 최소값인 57.3 %로 감소하며, 그 이후 다시 증가하여  $\alpha$ 가  $90^\circ$ 에서 62.9 %로 나타났다. AR은 PR과 U의 관계로부터 평가할 수 있으며, PR과 그 경향이 유사하게 나타났다.

Austria 분석시스템을 이용하여  $\alpha$ , GC, DRI,  $F_T$ , D 그리고  $k_N$ 에 대한 PR, AR 그리고 U의 변화를 분석한 결과, PR은  $F_T$ , GC, D 등의 순으로 영향을 많이 받으며, AR은  $F_T$ , DRI, D, GC의 순서로 그리고 U는  $F_T$ , DRI, D, GC, 그리고  $\alpha$ 의 순서로 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. Fig. 7에서와 같이  $F_T$ 가 증가할수록 PR 및 AR은 증가하지만 U는 감소하였으며, D의 영향은  $F_T$ 의 경우와 반대 경향을 나타내었다.

Barton에 의해 개발된  $Q_{TBM}$  분석시스템의 매개변수 연구에 사용된 변수는 Q값, CLI, q,  $F_T$ , n 그리고 D이다. 이 경우  $F_T$ 와 Q의 영향이 매우 크고 그 외 q, CLI, D 등의 영향이 크게 나타났다. Q의 영향은 Fig. 8에서와 같이 Q가 0.1, 1, 10, 1000일 때 PR은 9.69 m/hr, 5.25 m/hr, 2.84 m/hr, 0.83 m/hr로 감소하고 AR은 1.98 m/hr, 2.61 m/hr, 1.65 m/hr, 0.43 m/hr로 나타났으며, U는 20.41 %, 49.7 %, 58.26 %, 51.3 %로 나타났다. 그러나 암반상태가 매우 불량한 경우 터널의 불안정성으로 인해 굴진하기에 매우 위험하므로 PR을 감소시키는 것이 일반적이며, 따라서  $Q_{TBM}$ 이 1이하의 경우 이론적으로 매우 높게 나타나는 PR은 의미가 없다고 판단된다.

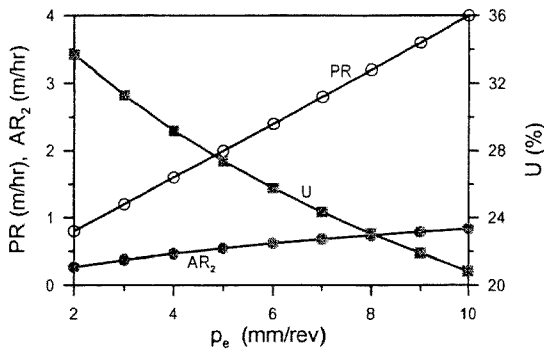


Fig. 5. Swiss 분석시스템의  $p_e$  영향.

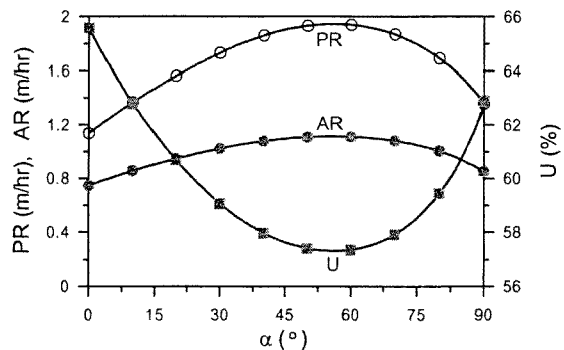


Fig. 6. NTH 분석시스템의  $\alpha$  영향.

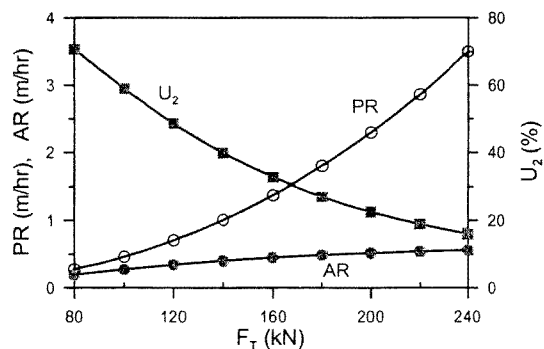


Fig. 7. Austria 분석시스템의  $F_T$  영향.

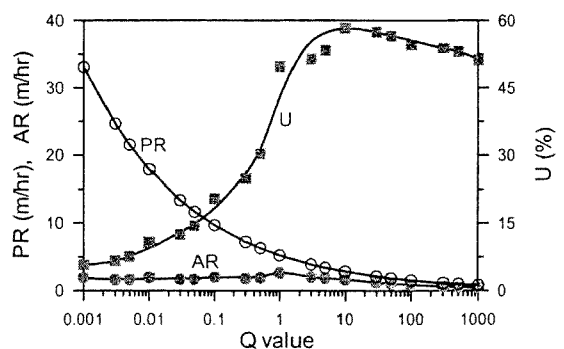


Fig. 8.  $Q_{TBM}$  분석시스템의 Q 영향.

## 4.2 현장자료 분석

본 연구에서는 실제 현장자료와 분석시스템의 비교를 위하여 영천댐 도수터널 자료를 이용하였다. 영천댐 도수로 건설사업은 경상북도의 남동쪽 지방의 증가하는 물 수요를 만족시키기 위해 영천댐의 물 공급 수용능력을 증대시키고, 오염이 매우 심한 금호강의 수질을 향상시키는데 그 목적이 있다. 33 km의 연장을 가진 도수터널 굴착은 3.5 m 직경을 가진 TBM을 이용한 기계식 굴착공법과 재래식 일반공법을 병행하였으며, 1991년에 공사가 시작되고 전체공사의 준공은 1997년 말로 예정되어 있었으나, 시공중 지질조건 불량으로 공기가 일부 연장되었다. 본 건설사업에서는 오스트리아 VOEST-ALPINE BERGTECHNIK에서 제작한 ATB 35 HA를 사용하였으며, ATB 35 HA는 본 프로젝트를 위해 설계되었으므로 forward path에 해당된다. ATB 35 HA는 TBM 주부분의 접근이 용이하고 커터헤드 바로 뒤에서 거의 동시에 록볼트 설치가 가능하다는 특징이 있다. 커터헤드의 중심선부터 반경 1275 mm까지는 평형이고, face 커터 장착부 1275 mm부터 1750 mm까지는 게이시 커트가 70°의 각도로 장착되어 있다. 커터헤드에는 버력 제거를 위하여 헤드 주변에 7개의 버킷(spoon)과 폭이 650 mm의 콘베이어 벨트가 있으며, 헤드 전면의 분진은 2개의 덕트를 통해 제거된다. 커터헤드에는 350 mm 직경의 center 커터 2개와 430 mm의 직경의 face 커터 15개 그리고 7개의 gauge 커터가 장착되어 있으며, 커터당 최대 허용 부하는 260 kN이다((대림산업 TBM사업소, 1992~1998; 대림산업주식회사 중기사업소, 1992).

Fig. 9는 월별 TBM 굴진거리를 나타낸 그림으로, 1992년 6월부터 1998년 8월까지 87개월 동안 작업한 총 굴진거리는 16737.7 m이며, 실제 작업이 이루어진 67개월에 대해 평균 월별 굴진거리는 약 249.82 m이다. 1993년 6월(1993. 5. 18.~7. 21.)은 TBM 3사갱 정비작업으로 인해, 1997년 3월~5월에는 민원 발생으로 TBM 굴진작업이 이루어지지 않았다. 또한 1994년 11월~95년 6월까지와 98년 1월~5월까지의 TBM 굴진에 관한 자료가 없으며, 1999년 5월에는 붕락구간 발생으로 지반 보강작업을 수행하였고 1999년 7월에는 TBM 굴진 가능여부를 위한 막장 전방의 지질조사를 실시하였다. 지질조사후 1999년 8월에는 TBM 굴착이 타당성이 없다고 판단하여 장비해체 작업을 하였다.

Fig. 10은 월별 평균 관입율을 나타낸 그래프이다. 1992년 6월의 PR이 3.52 m/hr로 가장 높으며, 87개월중 실제 작업이 이루어진 67개월에 대한 평균 PR은 1.93 m/hr이다. 1992년 6월~12월, 1993년 5월, 1998년 8월, 1999년 3월과 6월에 2.5 m/hr 이상의 비교적 높은 관입율을 나타낸다.

월별 평균 굴진율은 Fig. 11에서와 같이 1999년 3월에 1.02 m/hr로 가장 큰 값을 나타내며, 총 공사기간의 평균 굴진율은 0.41 m/hr로 나타났다. 1992년 6월과 11월, 1993년 4월과 12월, 1998년 8월, 1999년 2월과 3월에 0.6 m/hr 이상의 비교적 큰 값을 보이며, 이는 지반조건이 양호하여 굴진량이 많은 반면에 커터 소모량과 기계 고장 및 보강 시간이 적어 전체 소요시간이 적음을 의미한다.

Fig. 12와 같이 터널링에 소요된 전체시간에 대한 굴진에 소요된 시간의 비인 TBM 가동율은 1993년 11월, 1994년 8월, 1996년 3월 그리고 1999년 3월에 35% 이상으로 비교적 높게 나타났으며, 그중 1994년 8월이 43.5%로 가장 높게 나타났다. 높은 가동율은 TBM 기계의 고장이 적고 지반조건 역시 양호하여 기타 소요되는 시간이 적다는 것을 의미한다. 총 공사기간의 평균은 약 21.12%로 나타났다.

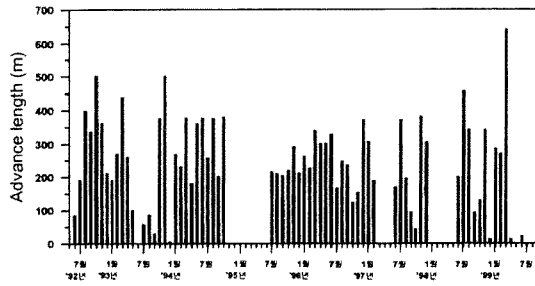


Fig. 9. Monthly advance length.

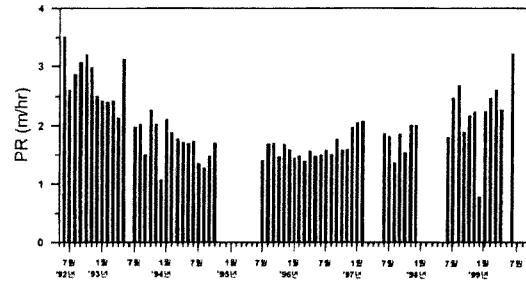


Fig. 10. Monthly penetration rate.

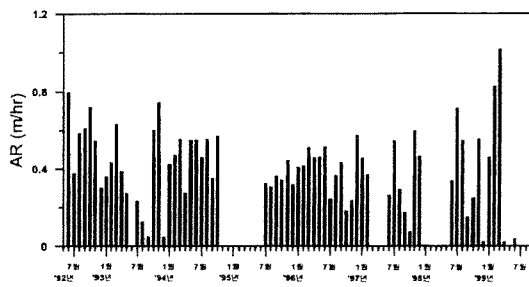


Fig. 11. Monthly advance rate.

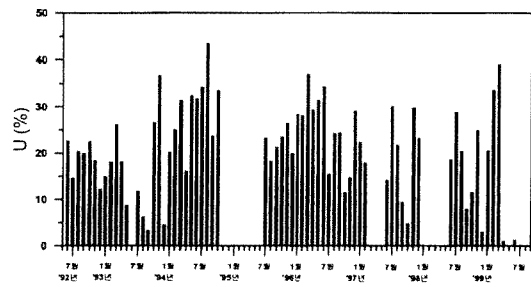


Fig. 12. Monthly utilization.

Fig. 13은 월별 지체시간(downtime)을 나타낸 그래프로서 지체율은 전체 터널링 시간에 대한 실제 굴착작업 이외에 추가작업에 소요되는 시간 비율을 의미한다. 1993년 5월, 8월, 9월, 12월과 1997년 10월, 1998년 9월, 12월 그리고 1999년 6월에 90 % 이상의 높은 지체율을 보여주며, 평균 지체율은 79.2 %로 나타났다. TBM 효율을 높이기 위해서는 작업 지체시간의 발생 원인과 TBM 굴착공정에 미치는 영향을 정확히 파악하여 이를 최소화하는 것이 필요하다고 판단된다. 지체시간의 발생요소는 TBM 유지관리 및 보수, 백업 장비의 보수 그리고 지반상태 등으로 구분할 수 있다. TBM 유지관리 및 보수에는 일반적인 TBM의 점검 및 보수뿐만 아니라 커터헤드 점검 및 커터교환, TBM 콘베이어 보수, 전기장치 및 유압장치 점검 등이 있으며, 백업 장비 보수에는 버력 처리와 관련된 소프트 설비 보수, 광차대기, 후속설비의 점검 그리고 측량 및 레일 설치 등이 포함된다. 지반상태에 따른 지체시간은 지하수 유입이나 지반보강 등으로 발생한다.

Fig. 14는 월별 굴진 단위길이당 TBM 굴착 소요시간으로 1993년 12월과 1998년 12월을 제외하면 약 300 hr/km~800 hr/km의 일정한 범위내에 존재함을 알 수 있다. 1993년 12월은 TBM 가동율이 5 %이고 98년 12월은 3 %로 정상굴진이 거의 이루어지지 않고 버력처리 및 지반보강 등에 소요된 시간이 많이 발생하였다.

Fig. 15는 월별 굴진 단위길이당 TBM 커터 교환시간을 나타내었다. 1994년 7월과 1997년 2월 그리고 1998년 12월에 굴진길이에 대한 커터 교환시간이 많이 소요되었고, 이는 전체시간에 대한 소요비율로 보면 26 %, 45 %, 1.88 %이나 1998년 12월은 정상굴진이 이루어지지 않음으로 인해 큰 값이 발생하였다.

월별 굴진 단위길이당 총 손실시간을 나타낸 Fig. 16에서 보듯이 1993년 9월과 12월,



1997년 10월, 1998년 12월, 1999년 3월과 6월에 큰 값을 보이며, 이는 정상굴진이 거의 이루어지지 않음으로 인해 발생하였다.

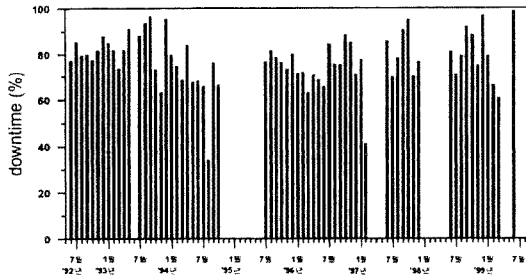


Fig. 13. Monthly downtime.

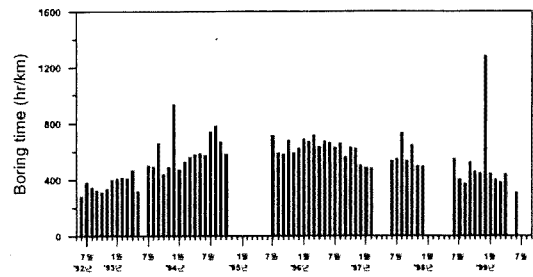


Fig. 14. Monthly boring time.

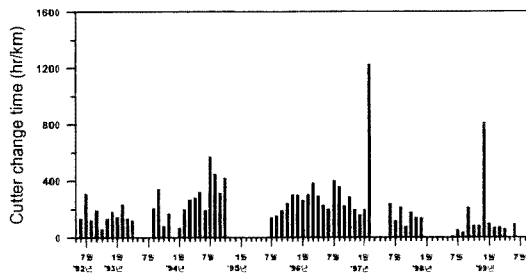


Fig. 15. Monthly cutter change time.

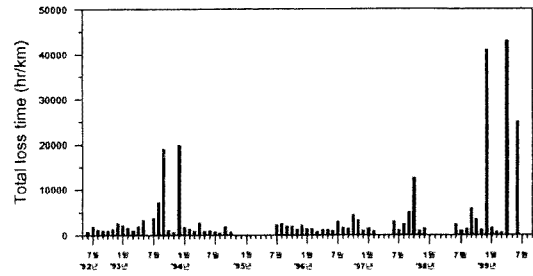


Fig. 16. Monthly total loss time.

본 영천댐 도수터널 현장 자료를 분석한 결과로는 Table 3과 같이 커터 교환시간, TBM 기계장치 고장, 버럭 처리 그리고 슛크리트 타설의 지반 보강작업의 시간 비율이 크게 나타났다. 따라서 지체시간을 감소시키기 위해서는 국내의 지반조건과 현장조건에 적합한 TBM 가동법과 커터의 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

Swiss 분석시스템의 12개 입력자료중 TBM 직경  $D$ 와 커터헤드 회전률  $N$ 을 파악할 수 있으며, 나머지 입력자료는 확실치 않다. 따라서 기본적인 입력자료의 기준값인  $\lambda$ 는 150 km,  $k_N$ 은 40,  $k_C$ 는 19.5,  $a$ 는 1.75,  $t_C$ 는 1 hr,  $T_L$ 은 0.5 hr/m,  $T_S$ 는 8 hr 그리고  $t_s$ 는 1 hr을 적용하고 관입깊이  $p_e$ 를 추정하였다. 그 결과 관입깊이가 약 2.8 mm/rev일 때 관입율이 1.92 m/hr로 나타나며, 굴진율은 약 0.49 m/hr 그리고 가동율은 약 25.5 %로 나타나 비교적 유사한 결과를 보인다.

NTH 분석시스템에서는  $\alpha$ ,  $S_f$ , DRI, CLI,  $n_f$ ,  $q$ ,  $t_c$  그리고  $l_s$ 를 현장 작업일지로부터 확인할 수 없었으며, 따라서 기준값을 적용하였다. 주어진 입력자료로는  $n_c$ 는 24 개,  $N$ 은 125 rpm,  $D$ 는 3.5 m,  $S$ 는 70 mm 그리고  $d$ 는 430 mm를 적용한 후  $t_{reg}$ 는 1 hr로 가정하였다.  $F_T$ 를 100 kN으로 가정한 경우  $p_e$ 는 약 2.85 mm/rev로 계산되고 관입율은 현장 결과와 비교적 유사하게 약 2.13 m/hr로 나타났다. 굴진율과 가동율은 0.69 m/hr와 32.3 %로 나타났으며, 본 시스템을 이용한 예측이 현장자료에 비해 높은 굴진율과 가동율을 보여주고 있다.

Austria 분석시스템에서는  $\alpha$ 는  $60^\circ$ , GC는 B2, DRI는 50, 재배치 및 정리 시간은 800 hr/km, 수리 시간 및 고장 시간은 700 hr/km 그리고 설치 및 이동시간은 700 hr/km을 적

용하고 D는 3.5 m 그리고  $k_N$ 는 40을 입력한 후 PR 및 AR 그리고 U를 현장 결과와 유사하도록  $F_T$ 를 조정하였다. 그 결과 NTH 분석시스템에서 평가한 100 kN보다 큰 값인 160 kN 일 경우 관입율은 1.96 m/hr, 굴진율은 0.5 m/hr, 가동율은 25.4 %로 비교적 근사하게 나타났다.

마지막으로 TBM 제원에 대한 자료와 그 외 기준값을 입력한  $Q_{TBM}$  분석시스템의 경우  $F_T$ 는 13 tonf일 경우 관입율이 약 1.84 m/hr로 현장결과와 비교적 유사하게 나타났으며, 굴진율은 약 0.98 m/hr 그리고 가동율은 약 53 %로 현장 결과보다 매우 높게 예측되었다.

Table 3. Monthly major time of Youngchun water tunnel

year mon	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
1		정상굴진 15% 유압고장 12% 기계고장 11%	정상굴진 20% TR천공 11% 헤드보강 11%	-	정상굴진 28% 기계고장 29% 커터교환 11%	정상굴진 22% 기계고장 10% 커터교환 9%	-	정상굴진 21% 지반보강 16% 버럭처리 11%
2		정상굴진 18% 낙석처리 11% 기계고장 11%	정상굴진 25% 기계고장 11% TR천공 10%	-	정상굴진 28% 기계고장 26% 커터교환 13%	정상굴진 18% 커터교환 45% 전기고장 5%	-	정상굴진 34% 축량 18% 목발트 10%
3		정상굴진 26% 숏타설 8% 낙석처리 7%	정상굴진 31% 커터교환 15% 숏타설 15%	-	정상굴진 37% 커터교환 20% 기계고장 10%	-	-	정상굴진 39% 축량 9% Resetting 7%
4		정상굴진 18% 숏타설 12% 낙석처리 12%	정상굴진 16% 숏타설 15% 낙석처리 8%	-	정상굴진 29% 기계고장 28% 커터교환 13%	-	-	정상굴진 1% 지반보강 80% 버럭처리 8%
5		정상굴진 9% 숏타설 37% 낙석처리 27%	정상굴진 32% 커터교환 18% 기계고장 16%	-	정상굴진 31% 기계고장 21% 커터교환 10%	-	-	정상굴진 0% 지반보강 95% 버럭처리 5%
6	정상굴진 23% 장비조립 23% 커터교환 11%	-	정상굴진 32% 기계고장 35% 커터교환 11%	-	정상굴진 34% 숏타설 11% 커터교환 10%	정상굴진 14% 기계고장 17% 숏타설 15%	정상굴진 19% 장비조립 53% 축량 8%	정상굴진 1% 지반보강 59% 버럭처리 16%
7	정상굴진 15% 장비조립 33% 커터교환 12%	정상굴진 12% 숏타설 28% 콘베이어 13%	정상굴진 34% 커터교환 26% 기계고장 10%	정상굴진 23% 콘베이어 10% 광차문제 9%	정상굴진 16% 기계고장 46% 급수배수 10%	정상굴진 30% 기계고장 16% 커터교환 11%	정상굴진 29% 장비조립 20% 축량 12%	지질조사 100%
8	정상굴진 20% 낙석처리 8% 커터교환 7%	정상굴진 6% 낙석처리 24% 숏타설 21%	정상굴진 44% 커터교환 25% 콘베이어 8%	정상굴진 18% 숏타설 11% 낙석처리 6%	정상굴진 24% 커터교환 13% 헤드용접 13%	정상굴진 22% 기계고장 37% TR천공 23%	정상굴진 21% PIT설치 19% 축량 14%	정상굴진 0% 장비이동 52% 장비해체 31%
9	정상굴진 20% 커터교환 11% 헤드용접 9%	정상굴진 3% 낙석처리 44% 숏타설 29%	정상굴진 24% 버켓보강 15% 커터교환 11%	정상굴진 21% 낙석처리 24% 콘베이어 10%	정상굴진 24% 기계고장 22% 숏타설 13%	정상굴진 9% 기계고장 49% 숏타설 12%	정상굴진 8% 숏타설 26% 지반보강 25%	
10	정상굴진 23% 낙석처리 13% 축량 7%	정상굴진 39% 급수배수 14% 콘베이어 9%	정상굴진 34% 커터교환 24% 기계고장 15%	정상굴진 24% 기계고장 19% 숏타설 10%	정상굴진 12% 기계고장 61% 숏타설 8%	정상굴진 5% 전기고장 49% 기계고장 39%	정상굴진 12% 지반보강 42% 숏타설 14%	
11	정상굴진 18% 유압고장 9% 급수배수 7%	정상굴진 37% 커터교환 13% 급수배수 6%	-	정상굴진 26% 콘베이어 14% 커터교환 13%	정상굴진 15%	정상굴진 30% 기계고장 31% 커터교환 8%	정상굴진 25% 숏타설 21% 지반보강 12%	
12	정상굴진 12% 낙석처리 21% 숏타설 20%	정상굴진 5% 낙석처리 50% 숏타설 26%	-	정상굴진 20% 기계고장 41% 숏타설 13%	정상굴진 29% 낙석처리 20% 숏타설 13%	정상굴진 23% 전기고장 18% 기계고장 11%	정상굴진 3% 버럭처리 26% 지반보강 22%	
평균	정상굴진 18% 낙석처리 9% 커터교환 8% 급수배수 8%	정상굴진 18% 낙석처리 15% 숏타설 13% 커터교환 6%	정상굴진 29% 커터교환 15% 기계고장 12% 숏타설 5%	정상굴진 22% 기계고장 20% 낙석처리 9% 콘베이어 9%	정상굴진 27% 기계고장 24% 커터교환 11% 숏타설 6%	정상굴진 20% 기계고장 23% 전기고장 11% 커터교환 10%	정상굴진 16% 지반보강 14% 숏타설 12% 버럭처리 11%	정상굴진 12% 지반보강 35% 지질조사 15% 버럭처리 7%

본 TBM 현장 자료를 관입율에 맞추어 계산한 결과, Table 4에 나타난 바와 같이 본 연구에서 소개한 분석시스템에 의해 평가된 굴진율 및 가동율이 현장 결과에 비해 높은 값을 나타내고 있다. 이는 현장 자료에서 TBM 고장 수리 및 이동 및 식사로 분류되는 손실시간 외 기타로 분류되는 시간이 비교적 큰 비중을 차지하고 있으며, 국내의 지반 및 현장조건에 적합하지 않은 TBM 가동법의 적용으로 낙석처리 및 슛크리트 타설 등의 보강과 기계고장 그리고 커터교환 등에 소요된 시간 비율이 높게 작용한 데 기인한다고 판단된다.

Table 4. Comparison of PR, AR and U

	Field data	Swiss system	NTH system	Austria system	$Q_{TBM}$ system
Input		$p_e = 2.8$ (mm/rev)	$F_T = 100$ kN $t_{reg} = 1$ hr	$F_T = 160$ kN	$F_T = 13$ tonf
Output			$p_e = 2.85$ (mm/rev)	$p_e = 2.86$ (mm/rev)	
PR (m/hr)	1.93	1.92	2.13	1.96	1.84
AR (m/hr)	0.41	0.49	0.69	0.5	0.98
U (%)	21.12	25.5	32.3	25.4	53

## 5. 결론

본 연구에서는 TBM 터널 공정을 분석할 수 있는 방법을 소개하고 비교 분석하였으며, TBM 터널 공정 분석을 위한 사용자 친화적인 프로그램 개발하고 현장자료를 적용하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

TBM 터널의 설계 및 평가를 위한 4가지 TBM 터널 공정 분석시스템을 소개하였으며, 4가지 분석시스템은 많은 수식과 그래프 그리고 도표 등을 사용해야 하므로 이용이 불편하고 복잡하다. 따라서 본 연구에서는 사용자가 쉽게 이용할 수 있는 윈도우용 프로그램 AS-TBM을 개발하였으며, 이를 통해 설계 및 현장 기술자도 보다 쉽게 TBM 터널 공정을 예측 및 평가할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 네가지 분석법은 한번에 관리할 수 있으므로 획득된 입력자료에 맞는 분석방법을 선택할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서 언급한 시스템중에서 Swiss 분석시스템과 Austria 분석시스템은 수리 및 고장 등에 사용된 시간과 설치 및 이동시간 등이 입력자료로 사용되므로 TBM 터널 완공후 평가 시스템으로 적용할 수 있으며, NTH 분석시스템과  $Q_{TBM}$  분석시스템은 초기 기본적인 암석 및 암반 조건 그리고 TBM 제원 등으로 계산이 가능하므로 TBM 터널설계시 예측이 가능한 방법이다.

관입율, 굴진율 그리고 가동율에 대하여 Swiss 분석시스템에서는 PR에 대하여  $p_e$ 와 D의 영향이 크게 나타났으며, 관입깊이와 TBM 직경이 증가할수록 관입율 및 굴진율은 감소하였다. NTH 분석시스템의 경우  $F_T$ ,  $S_f$ ,  $\alpha$ , D의 영향이 크게 나타났으며,  $\alpha$ 가  $60^\circ$ 일 때 관입율 및 굴진율은 최대가 되고 반면에 가동율은 최소로 나타났다. 또한  $S_f$ 가 증가할수록 관

입을 및 굴진율은 감소하지만,  $F_T$ 가 증가할수록 관입율 및 굴진율은 증가하였다. Austria 분석시스템에서 주요 영향인자는  $F_T$ , GC, D, DRI,  $\alpha$  등이며,  $F_T$ 가 증가함에 따라 관입율과 굴진율은 증가하는 반면에 D가 증가함에 따라 관입율 및 굴진율은 감소하였다. 마지막으로  $Q_{TBM}$  분석시스템에서는 PR 및 AR에 대한 Q,  $F_T$ , CLI 그리고 q의 영향이 비교적 크게 나타났으며, U는 Q의 영향이 가장 크게 작용하고 그 외 CLI와 D 등의 영향이 크게 나타났다.

영천 도수로 TBM 현장 자료를 분석한 결과, 실제 작업이 이루어진 67 개월동안의 평균 월별 굴진거리는 약 249.82 m, 월별 평균 관입율은 1.93 m/hr로 나타났다. 월별 굴진율은 0.41 m/hr, 평균 가동율도 21.1 %로 높지 않은 값을 보였으며, 기계고장 등으로 인한 지체 시간은 79.2 %로 비교적 높게 나타났다. 이는 현장 자료에서 기타로 분류되는 시간 비중이 크고, 국내의 지반 및 현장조건에 적합하지 않은 TBM 가동법의 적용으로 낙석처리 및 지반 보강과 TBM 기계고장 그리고 커터교환 등에 소요된 시간이 큰 비중을 차지하고 있기 때문으로 사료된다.

### 참고문헌

1. 백승한, 문현구, 2003, TBM 터널 공정 분석시스템의 개발 및 적용, 한국암반공학회지, 13(6), pp. 455~464.
2. 백승한, 2004, 커터 관입에 의한 암석 파괴 메커니즘과 TBM 터널 공정 분석시스템에 관한 연구, 공학박사학위 논문, 한양대학교, p. 125.
3. 대림산업 중기사업소, 1992, TBM 취급설명서(ATB 35HA, VABNLF 35~45), 대림산업 주식회사, p. 262.
4. 대림산업 TBM 사업소, 1992~1998, 영천도수로 터널 TBM 굴착일지, 대림산업주식회사.
5. Baek, S. H. and Moon, H. K., 2003, A study on the rock fracture mechanism of cutter penetration and the assessment system of TBM tunnelling procedure, International Symposium on the Fusion Technology of Geosystem Engineering, Rock Engineering and Geophysical Exploration, Nov. 18-19, Seoul, Korea, p.162~169.
6. Barton, N., 1999, TBM Performance Estimation in Rock Using  $Q_{TBM}$ , Tunnels & Tunnelling International, Vol. 31., No. 9, pp 30~34.
7. Barton, N., 2000, TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock, Balkema, p. 172.
8. Bruland, A., 1998, Prediction Model for Performance and Costs, Norwegian TBM Tunnelling, Norwegian Soil and Rock Engineering Association, Publication No. 11, pp. 29~34.
9. Jodl, H.G. and Stempkowski, R., 1996, "Operations Research Aspects of TBM Drives-Case Study of the Wienerwald tunnel", Proc. Int. Lecture Series TBM Tunnelling Trends, Austria, pp. 69-79.
10. Moon, H. K., 2001, A Comparative Study on Five Assessment Systems of TBM Tunnelling, Geosystem Engineering, 4(2), pp. 61~69.
11. NTH, 1994, Hard Rock Tunnel Boring, Project Report 1-94, p. 164.
12. Persson. P, Holmberg, R. and Lee, J., 1993, Rock Blasting and Explosives Engineering, CRC Press, pp. 43~53.