

# 시공중인 터널의 2차원 유한요소해석에 대한 고찰

정 대 열\*

## 1. 서 론

시공중인 터널은 Fig.1과 같은 상태로 굴착에 저항하고 있다. Fig.1에서 보여주듯 막장 전면의 미 굴착부와 막장 후면의 굴착 상태로 인하여 막장 주위는 3차원 응력 상태를 이루며, 막장에서 멀리 떨어진 전, 후면에는 막장부의 영향이 미치지 못하여 평면 변형(Plane Strain) 상태를 이루게 된다. 시공중인 터널을 2차원으로 해석하기 위해서는 터널의 진행부에 있는 임의의 단면을 해석 단면으로 택하고 이 해석 단면이 터널의 시공 중에 겪게되는 경로를 추적하여 해석하여야 한다. Fig.2는 2차원 터널 해석시에 터널 굴착이 전진함에 따라 변화하는 해석 단면을 나타낸다. 해석 단면은 최초에는 초기 응력 상태에 있게 되며(a-a 단면, '초기응력부'라 부름), 굴착이 진행됨에 따라 3차원 응력 상태인 막장 주위(b-b~c-c 단면)를 거쳐서 최종적으로 평면변형 상태(d-d 단면, '변형 수렴부'라 부름)로 접어들게 된다.<sup>(1)</sup> 따라서, 터널을 평면 변형 요소를 사용하는 2차원 모델로 해석하기 위해서는 해석 단면이 3차원 응력 상태인 막장 주위에 위치할 때에 발생하는 3차원적 영향을 모사하는 방법을 강구해야만 한다. 현재까지 알려진 막장주위의 3차원적 영향을 모사하는 방법에는 강성분배율법과 하중분배율법이 있으며<sup>(2)</sup>, 우리나라에서는 하중분배율(LDF : Load Distri-

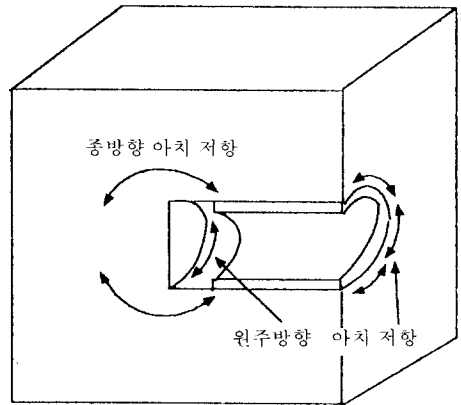


Fig 1 시공중인 터널에서 발생하는 굴착 주위 지반의 굴착에 대한 저항 상태

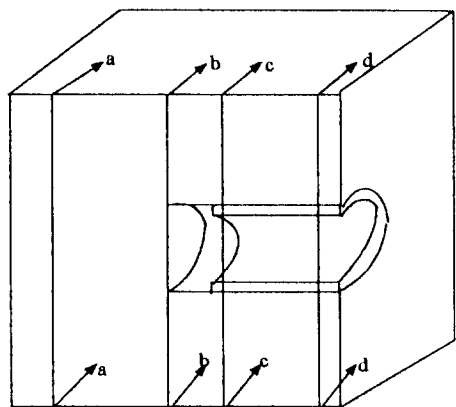


Fig 2 2차원 터널 해석시 굴착의 전진에 따른 해석 단면의 변화 경로 (a-a→b-b→c-c→d-d)

\* 에메랄드 소프트웨어, 공학박사, 토목구조기술사

bution Factor)법을 많이 사용하고 있다. 시공 단계를 고려하는 유한요소해석에 있어서는 해석 단면이 굴착되었을 때 발생하는 굴착 상당력(해방력)은 불평형 절점 하중으로 된다. 따라서 막장 주위의 3차원적 영향을 반영하기 위해서는, 2차원 해석 모델에서 굴착시에 발생하는 불평형 절점 하중(굴착 상당력)은 막장부로부터 변형 수렴부까지의 해석단계에 걸쳐 서서히 가해져야만 하며, 이러한 방법을 하중분배율법이라 한다. 즉, 2차원 해석의 굴착시의 얻어진 굴착 상당력(해방력)을 각 해석 단계에서 해방시키는 율을 결정하여 막장부에서는 해방력의 일부만 해방시키고, 최종적인 평면 변형 상태인 변형 수렴부에서 완전히 해방시키는 방법을 말한다. 이때 막장 주위의 해석 단계는 보통 굴착직후인 막장('막장부'라 부름)과 슛크리트가 1일 강성을 지닌 곳('1일 강성 슛크리트부'라 부름)의 2단계로 이루어진다. 따라서 각 해석 단계에서 해방되는 힘은 전체 해방력에 일정한 율을 곱한 값이며 이러한 율을 하중분배율이라 한다. 막장부, 1일 강성 슛크리트부, 변형 수렴부의 하중분배율의 합은 당연히 백퍼센트가 되어야 할 것이다.

## 2. 2차원 터널 해석 프로그램이 갖추어야 할 특성

위에서 언급한 바와 같이, 2차원 터널 해석 프로그램이 일반적인 범용 유한요소해석 프로그램과 다른 특성은 다음과 같다.

- 하중 분배율법이 적용될 수 있는 해석 절차가 필요하다.

전술한 바와 같이 2차원 터널 해석에서는 하중 분배율법이 적용될 수 있어야 한다. 이를 구현하는 손쉬운 방법은 먼저, 굴착 단계에서 굴착면에 연한 절점(입력항)에 굴착 상당력을 저장해 두고, 그후 각 해석 단계마다 굴착면에 연한 절점과 그 절점에 적용될 하중분배율을 입력하며, 마지막으로 굴착 단계에서 저장된 굴착 상당력에 각 해석 단계에서 입력된 하중분배율을 곱한 힘을 외력으로 간주하는 것이다. 이때 주의할 것은 작용하는 외력이 없을 경우에도 굴착 상당력이 불평형 절점

하중으로 작용한다는 점이다. 이는 불평형 절점 하중이 요소 응력에 의한 등가 절점 하중(Equivalent Nodal Force)에서 입력된 외력(External Nodal Force)을 뺀 값으로 계산되기 때문이다. 따라서 하중분배율에 의해 가해진 외력의 모든 해석 단계에서의 합은 제로가 되도록 입력하여야 한다.

- 초기 응력 상태를 표현할 수 있어야 한다.

초기 응력 상태는 주응력의 방향이 수직 및 수평 방향이어야 한다. 따라서 초기 응력 상태를 표현하기 위해서는 자중 혹은 재하할 필요가 있는 상재 하중을 재하하여 응력 해석을 한 후에, 수직 응력은 해석 결과에 따르며, 수평 응력은 수직 응력에 각 요소의 측압 계수를 곱한 값으로 택하고, 수직 및 수평 방향의 전단 응력은 제로로 택하는 것이다. 또한 이 후의 시공 단계별 해석이 정확한 해석이 되도록, 현재의 응력 상태와 평형을 이룰 수 있는 등가의 외력을 구하여, 이것을 가해진 외력으로 택하고 모든 절점 변위는 제로로 초기화 한다.

- 시공 단계를 고려할 수 있어야 한다.

전술한 바와 같이 터널의 해석은 해석 단계에 따라 경계 조건의 변화, 구조 요소의 첨삭, 재료 특성의 변화등의 구조 시스템이 변함으로 시공 단계를 고려할 수 있어야 한다.

- 소성 해석이 가능해야 한다.

지반의 강성에 따라서 굴착면 주위에 소성 영역이 발생할 수도 있으며, 따라서 소성 해석이 가능해야 한다. 지반에 적용하는 탄소성 해석 모델로는 Mohr-Coulomb 항복 조건과, Drucker-Prager 항복 조건을 사용하는 탄성-완전 소성 모델이 유도식이 간편하고 실제에도 잘 부합된다. 2차원 모델에서는 Mohr-Coulomb 항복 조건에 의한 해석 결과와, Drucker-Prager 항복 조건에 의한 해석 결과가 동일함으로(Plane Strain Matching 사용)<sup>(6)</sup>, 이하에서는 Mohr-Coulomb의 항복 조건에 대해서만 논한다. 탄소성 재료를 해석하는 방법에는 여러가지가 있으나, 지반 문제에 있어서, 암반이나 흙에서는 탄성 계수를 사용하지 않고 현장 시험에 의한 변형 계수를 사용한다. 현장의 암반이나 흙의 역학적 특성에 의해 변형 계수는 일반적으로 하중에 대하여 비선형으로 나타나지만, 보

통 크기(Moderate load)의 하중에 대해서는 선형으로 평가해도 무리가 없다. 따라서 기존의 탄성-완전 소성 모델의 응력-변형도 관계식에서 탄성 계수 대신에 변형 계수를 택하면 기존의 유도식들을 그대로 적용할 수 있다.

전술한 바와 같은 2차원 터널 해석 프로그램이 갖추어야 할 여러가지 특성을 상기하면서, 본고에서는 이러한 특성이 반영된 2차원 터널 전용 유한요소해석 프로그램인 NATAS(Nonlinear Automatic Tunnel Analysis System)의 내부를 살펴봄으로써 실제로 이러한 특성이 어떻게 구현되는지를 알아보기로 한다. 이하에서는 NATAS의 입출력과 연관된 해석 절차 및 탄성-완전 소성재료의 응력 증분 과정에 대하여 논한다.

### 3. 2차원 터널의 유한요소해석

#### 3.1 해석 절차

Fig.3은 입출력과 밀접하게 연관되어진 NATAS의 해석 절차를 나타낸다. Coordinate에서는 절점 좌표를 입력받으며, Initial-stage(초기 응력부)에서는 전술한 바와 같은 방법으로 초기 응력 상태를 유도한다. 다음에 Construction-stage에서는 해석 단면이 막장부, 1일 강성 슛크리트부, 변형 수렴부로 변화함에 따른 구조 시스템 변화를 입력하는 곳이며, 특히 막장부에서는 굴착으로 인하여 발생하는 굴착 상당력을 저장해둘 필요가 있는 절점을 입력 받는다.

Fig.3의 Load-stage 7항의 불평형 하중 벡터는 6항 및 12항에서 구한 불평형 하중의 1/N배를 곱한 것으로 택하기 시작하며, 1/(N-1), 1/(N-2), ..., 1/3, 1/2, 1/1배를 곱하는 방법을 사용한다. 따라서 13항의 수렴 여부 검토는 6항 및 12항에서 구한 불평형 하중 전체를 7항의 불평형 하중 벡터로 택한 후부터 시작한다. 수렴 조건은 식(1)과 같이 내적 에너지 증분 조건<sup>(3)</sup>을 사용한다. 수렴 조건을 택하는 방법은 여러 문헌<sup>(3)</sup>에 나와 있으나 필자가 연구한 바로는 시공 단계를 고려하는 소성 문제에 있어서는, 내적 에너지 증분 조건만 사용할 경우에 수렴 속도가 빠름에도 불구하고 정확한

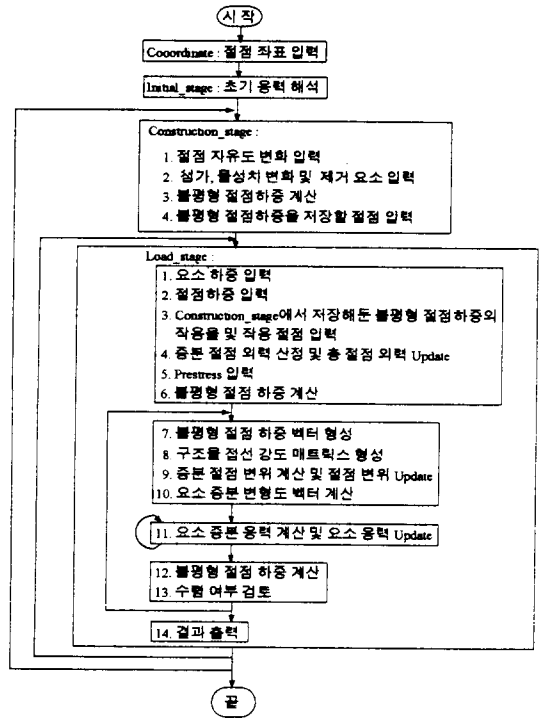


Fig 3 NATAS에 사용된 해석 절차

해석이 되었다.

$$\Delta q^{(i)T} \Delta R^{(i-1)} \leq \epsilon_E \Delta q^{(1)T} \Delta R^0, \quad (1)$$

여기서

$\Delta q^{(1)T} \Delta R^0$  : 최초로 불평형 절점 하중 전체를 가할시에 발생하는 내적 에너지 증가분

$\Delta q^{(i)T} \Delta R^{(i-1)}$  : i번째 Iteration 시에 발생하는 내적 에너지 증가분

$\epsilon_E$  : convergence Tolerance(보통  $2.5 \times 10^{-3}$ )

해석 절차는 단계적 증분 해석법(Step-by step incremental method)을 사용하며, 시간 t에서의 해를 알고 있을때 시간 t+ $\Delta t$ 에서의 해를 구하는 방법은 다음과 같다.

$$\Delta R = {}^{t+\Delta t}R - {}^tR \quad (2)$$

$$= {}^{t+\Delta t}R - \sum_m \int B(m)^T \cdot {}^t\sigma(m) dV(m) \quad (3)$$

$${}^i\mathbf{K} \cdot \Delta\mathbf{q} = \Delta\mathbf{R} \quad (4)$$

여기서

$\Delta\mathbf{R}$  : 불평형 절점 하중(Fig.3. Load-stage 7항)

$\Delta\mathbf{q}$  : 구조물 증분 절점 변위(Fig.3. Load-stage 9항)

${}^i\mathbf{K}$  :  $i$ 단계에서 구조물 접선 강도 매트릭스(Fig.3. Load-stage 8항), 초기치는 시간  $t$ 에서의 구조물 접선 강도 매트릭스( ${}^0\mathbf{K} = {}^i\mathbf{K}$ )

${}^i\mathbf{F}$  :  $i$ 단계에서 요소 응력에 의한 구조물 등가 절점 하중

${}^i\sigma(m)$  :  $i$ 단계에서 요소  $m$ 의 GAUSS Point에서의 응력 벡터, 초기치는 시간  $t$ 에서의 요소  $m$ 의 각 GAUSS Point에서의 응력, 즉  ${}^0\sigma(m) = {}^i\sigma(m)$

$\mathbf{B}(m)$  : 요소  $m$ 의 응력-변형도 관계 매트릭스  
이하 모든 요소 관련 정보(증분 변형도, 증분 응력, 응력, 탄소성 상태, 변형도-변형 관계 매트릭스 등)는 각 GAUSS Point에서의 정보를 의미한다.

식(4)로부터 구조물 증분 절점 변위  $\Delta\mathbf{q}$ 가 구해지면, 절점 변위는 식(5)로 수정된다.(Fig.3. Load-stage 9항)

$${}^{i+1}\mathbf{q} = {}^i\mathbf{q} + \Delta\mathbf{q} \quad (5)$$

각 요소의 증분 변형도  $\Delta\epsilon(m)$ 는 식(6)으로 구해진다.(Fig.3. Load-stage 10항)

$$\Delta\epsilon(m) = \mathbf{B}(m) \cdot \Delta\mathbf{q}(m) \quad (6)$$

각 요소의 증분 응력  $\Delta\sigma(m)$  및 요소 응력은 식(7) 및 식(8)로 Update된다.(Fig.3. Load-stage 11항)

$$\Delta\sigma(m) = {}^i\mathbf{D}_{ep}(m) \cdot \Delta\epsilon(m) \quad (7)$$

$${}^{i+1}\sigma(m) = {}^i\sigma(m) + \Delta\sigma(m) \quad (8)$$

여기서

$\Delta\mathbf{q}(m)$  :  $\Delta\mathbf{q}$ 에 대응하는 요소 절점 변위 벡터

${}^i\mathbf{D}_{ep}(m)$  :  $i$ 단계에서의 요소  $m$ 의 각 GAUSS Point에서의 탄소성 응력-변형도 관

계 매트릭스로서, 동일 요소 내에서도 각 GAUSS Point의 응력 상태에 따라 각 GAUSS Point에서의 값이 다를 수가 있음.

${}^{i+1}\sigma(m)$  :  $i+1$ 단계에서의 요소  $m$ 의 각 GAUSS Point에서의 요소 응력

식(8)에서 구한  ${}^{i+1}\sigma(m)$ 가 탄성 상태를 벗어날 경우에는 Fig.3. Load-stage 11항은 반복 계산된다. 이 경우에는 식(6)의  $\Delta\epsilon(m)$ 을 탄성 상태까지의 부분인  $r \cdot \Delta\epsilon(m)$ 과 나머지 부분인  $(1.0-r) \cdot \Delta\epsilon(m)$ 으로 나눈후,  $r \cdot \Delta\epsilon(m)$  부분만을 식(7)의  $\Delta\epsilon(m)$ 로 택하여 식(7)을 수행하고 (탄성 상태의 응력-변형도 관계 매트릭스 사용), 나머지  $(1.0-r) \cdot \Delta\epsilon(m)$  부분에 대하여는 이것을 다시 8등분하여  $\frac{1.0-r}{8} \cdot \Delta\epsilon(m)$ 을 식(7)의  $\Delta\epsilon(m)$ 로 택하여, 식(7)과 식(8)을 8번 반복 수행함. 여기서  $r$ 은 식(9)를 사용하여 구한다.

$$f({}^i\sigma(m) + r {}^i\mathbf{D}_{ep}(m) \cdot \Delta\epsilon(m)) = 0 \quad (9)$$

여기서

$f$  : 항복 함수

${}^i\mathbf{D}_{ep}(m)$  : 탄성 상태의 응력-변형도 관계 매트릭스

$(1.0-r) \cdot \Delta\epsilon(m)$ 을 8등분하여 식(7)과 식(8)을 수행할 때, 식(7)의  ${}^i\mathbf{D}_{ep}(m)$ 도 계속해서 Update된다. 이때 Fig.4에 보이는 바와같이 응력 상태가 항복면(Yield Surface)을 벗어남으로 인하여 항복 함수( $f$ )가 제로가 되지 않으므로 항복함수가 제로로 되게끔 응력 조절항  $\delta\sigma$ 를 식(8)의 계산시에 더해준다.

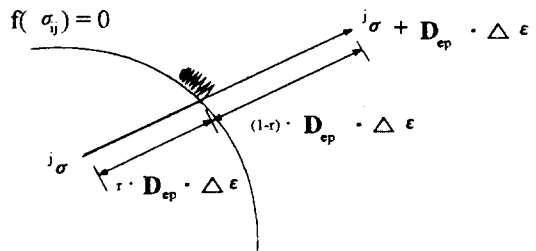


Fig 4 Transition from an elastic to a plastic state

$f(\sigma^{(i+1)})=f_3 \neq 0$ 일 경우에  $\delta\sigma$ 는 식(10)과 같다.<sup>(4)</sup>

$$\delta\sigma = - \frac{(\partial f / \partial \sigma) \cdot f_3}{(\partial f / \partial \sigma)^T \cdot (\partial f / \partial \sigma)} \quad (10)$$

### 3.3 탄성-완전 소성(Elastic-Perfectly Plastic) 재료의 응력 증분

#### 3.3.1 소성 상태의 증분 변형도와 증분 응력의 관계식

탄성-완전 소성 재료에 있어서 소성 상태의 증분 변형도와 증분 응력의 관계는 Plastic Flow Rule에 따라 유도된 탄소성 응력-변형도 관계 매트릭스  $D_{ep}$ 를 사용하여 식(11)으로 구한다.<sup>(5)</sup>

$$d\sigma = D_{ep} \cdot d\varepsilon \quad (11)$$

$$D_{ep} = D_e - \frac{D_e \cdot \partial f / \partial \sigma \cdot (\partial f / \partial \sigma)^T \cdot D_e}{(\partial f / \partial \sigma)^T \cdot D_e \cdot \partial f / \partial \sigma} \quad (12)$$

여기서

$d\varepsilon$  : 증분 변형도 벡터

$d\sigma$  : 소성 상태의 증분 응력 벡터

$D_e$  : 탄성 응력-변형도 관계 매트릭스

$f$  : 항복 함수

따라서 항복 함수의 편미분을 구하면 탄소성 응력-변형도 관계 매트릭스  $D_{ep}$ 를 식(12)로부터 구할 수 있으며, 이로부터 증분 변형도 벡터가 주어지면 소성 상태의 증분 응력 벡터를 식(11)으로부터 구할 수 있다.

#### 3.3.2 항복함수의 편미분

항복 함수( $f$ )는 파괴 기준에 따라 달라지며, 따라서 항복함수의 편미분도 이와 같다. 여기서는 Mohr-Coulomb 파괴 기준을 사용하여 항복함수의 편미분을 구하는 방법을 서술한다.

2차원 모델에서 Mohr-Coulomb 파괴 기준으로는 Fig.5에서의 거리  $R_0$ 이 사용되며, 식(13)와 같이 계산된다. 또한 응력 상태가  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 일 때의 Mohr원의 반경  $R_\sigma$ 는 식(14)과 같다. 따라서 항복 함수  $f$ 는 식(15)로 나타낼 수 있다.

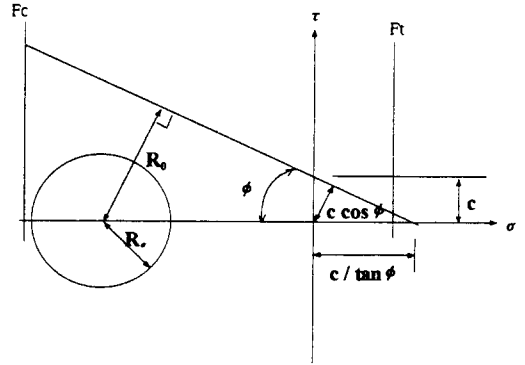


Fig 5 Mohr-Coulomb Failure Criteria

$$R_0 = c \cdot \cos\phi - (\sigma_x + \sigma_y)\sin\phi / 2 \quad (13)$$

여기서

$c$  : 점착력

$\phi$  : 내부 마찰각

$$R_\sigma = [(\sigma_x - \sigma_y)^2 / 4 + \tau_{xy}^2]^{1/2} \quad (14)$$

$$f = R_\sigma - R_0$$

$$= [(\sigma_x - \sigma_y)^2 / 4 + \tau_{xy}^2]^{1/2}$$

$$- c \cdot \cos\phi + (\sigma_x + \sigma_y)\sin\phi / 2 \quad (15)$$

따라서, 항복 함수의 편미분은 식(16)과 같이 구해진다.

$$\partial f / \partial \sigma_x = (\sigma_x - \sigma_y) [(\sigma_x - \sigma_y)^2 / 4 + \tau_{xy}^2]^{-1/2} / 4 + \sin\phi / 2$$

$$\partial f / \partial \sigma_y = (\sigma_y - \sigma_x) [(\sigma_x - \sigma_y)^2 / 4 + \tau_{xy}^2]^{-1/2} / 4 + \sin\phi / 2$$

$$\partial f / \partial \tau_{xy} = \tau_{xy} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 / 4 + \tau_{xy}^2]^{-1/2} \quad (16)$$

$$\partial f / \partial \sigma_z = 0$$

#### 3.3.3 파괴율(Failure rate)

파괴의 정도를 나타내는 파괴율(Failure rate)  $r$ 는 식(17)로 표시되며  $r < 1.0$ 이면 탄성상태,  $r = 1.0$ 이면 소성 상태를 표시하게 된다. 실제에 있어서는 반복 계산 과정에서의 미세한 오차로 인한 Virtual Unloading 현상(Unloading이 아니지만 계산상의 미세한 오차로 인하여 마치 Unloading 상태가 일어나는 것과 같은 현상)을 감안하여  $r >$

0.99이면 소성 상태로 볼 수 있다.

$$r = \frac{R_\sigma}{R_0} = \frac{[(\sigma_x - \sigma_y)^2 / 4 + \tau_{xy}^2]^{1/2}}{c \cdot \cos\phi - (\sigma_x + \sigma_y) \sin\phi / 2} \quad (17)$$

### 3.3.4 혼합 파괴 모델(Plane Cap Model)에 있어서의 응력 증분

Fig.5의 Mohr-Coulomb 파괴 모델에서 인장 파괴 조건(Tension CutOff)인  $F_t$ 가  $c / \tan\phi$ 보다 작은 값으로 입력되면 인장 파괴 모델이 추가되며, 음수로 입력되는 압축 파괴 조건인  $F_c$ 의 절대값이 작을 경우에는 압축 파괴 모델이 추가된다.

압축 파괴 모델에 대한 응력 증분은 간단하다. 즉 어떤 요소의 GAUSS점에 압축 파괴가 일어나면 이점의 응력은 해방(Release)되어 제로로 되며 또한 강성은 영원히 제로로 지속되도록 하된다.

응력 증분 계산에 있어서 인장 파괴 모델의 추가는 매우 복잡한 결과를 초래하며, 세밀히 검토된 절차를 필요로 한다. NATAS에서는 인장 파괴 모델로 Smearred Crack Model을 사용하며, Chen, Schnobrich등이 이미 정식화한 방법을 사용하여 한방향 크랙, 그에 직각 방향의 크랙, 크랙의 봉합등을 추적하여 응력 증분을 실시한다.<sup>(7)(8)</sup> 이때 크랙이 발생하면 이로인하여 크랙 방향의 응력이 해방(Release)되며, 응력이 해방된 후의 응력 증분은 Schnobrich등이 사용한 바와 같이 식(18)을 사용한다.<sup>(8)</sup>

$$d\sigma_x = 0, d\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot d\epsilon_y, d\tau_{xy} = \beta G \cdot d\gamma_{xy} \quad (18)$$

여기서

$x'$ : 크랙 방향

$\beta$ : 입력치로서, 보통 0.01~0.1

혼합 파괴 모델에 있어서는 주어진 증분 변형도에 대하여 어느 파괴 양상(Mode)이 가장 먼저 발생하느냐를 추적해야하는데, 이때에는 이진 탐색법(Binary Search Method)을 사용하면 편리하다.

Fig.6은 NATAS에서 사용하는 혼합 파괴 모델에 있어서의 거시적인 응력 증분 절차를 나타낸다.

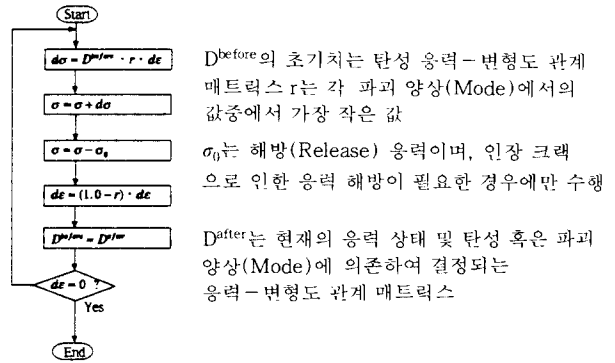


Fig 6 혼합 파괴 모델의 거시적인 응력 증분 절차

## 4. 결 론

서론에서 언급한 바와 같이 근본적으로 터널을 정확히 해석하려면 3차원 해석이 필요하다. 그러나 3차원 해석은 다루어야 할 자료가 방대하고 또한 시공 단계를 고려하는 3차원 소성 해석을 정확히 하기 위해서는 슈퍼 컴퓨터와 같은 컴퓨터 파워가 요구된다. 따라서 터널의 해석에서는 대개 하중분배율법을 사용하여 2차원 해석을 수행하고 있는 실정이다. 그러나 하중분배율법에 의한 2차원 해석의 결과는 선택한 하중분배율에 의존함으로써 정확한 하중분배율을 아는 것이 중요하다. 이제까지의 연구에 의하면 하중분배율은 터널 주위 지반의 물성 일일 굴진장(시공속도에 관계) 숏크리트 두께, 굴착 단면의 크기등에 의존하며, 터널 주위 지반의 강성이 클수록, 숏크리트 두께가 얇을수록 막장부에 적용될 하중분배율은 커지는 경향을 나타내며, 일일 굴진장이 작을수록, 굴착 단면의 크기가 클수록 변형 수렴부에 적용되어야 하는 하중분배율이 커지는 경향을 나타낸다.<sup>(1)</sup>

터널 해석에 있어서 또 한가지 주목할 점으로는 축압 계수이다. 초기 응력 상태에서는 수직응력과 수평 응력의 비가 축압 계수에 의해서 결정되는 바, Fig.5의 Mohr-Coulomb 파괴 포락선과 Mohr 응력원과의 관계를 주목해 보자. 수직 및 수평 방향의 전단 응력이 제로일 때는 수직 응력과 수평 응력의 차이가 Mohr 응력원의 직경이 된다. 따라서 초기 응력 상태에서 수직 응력과 수평 응력의 차이가 크면 초기 응력 상태가 파괴 포락선으로

## 참 고 문 헌

접근하게 됨으로 약간의 응력 변화에도 소성 상태 변하기 쉬우며, 반대로 수직 응력과 수평 응력의 차이가 적으면 Mohr 응력원이 파괴 포락선에서 멀리 떨어지게 되어 상당히 큰 응력 변화가 있기 전까지는 탄성 상태를 유지하게 된다.

따라서 축압 계수가 1.0이 되면 초기 응력 상태가 소성 상태에서 가장 멀리 떨어진 상태가 되어 불안정한 해석이 되며, 축압 계수가 1.0에서 멀어질수록 안전한 해석이 된다.

대개의 경우에 있어서 파괴모델로는 전단 파괴 모델만 사용하며, 이때는 현장 시험에 의한 변형 계수를 사용하든지 혹은 RMR(Rock Mass Rating)치로부터 변형계수를 평가하는 방법<sup>(9)</sup>을 사용한다. 전단파괴 모델과 병용하여 조인트(Joint)를 반영하기 위하여 인장 파괴 모델을 사용한다든가, 압축 파괴(Crushing) 모델을 사용하는 것은 특별한 경우로서 이때에 사용할 변형 계수는 전단 파괴 모델만 사용할 때의 변형 계수보다 큰 값을 사용해야 할 것이다.

또한, 초기응력상태가 탄성상태를 벗어날 경우에는 지반 물성치의 조정 혹은 축압계수의 조정이 필요하다.

결론적으로 2차원 터널 해석을 정확히 하기 위해서는 상술한 요건을 갖춘 프로그램의 확보, 하중분배율에 대한 정확한 평가, 축압 계수의 신중한 선택, 주위 지반의 물성에 대한 신중한 평가가 필요하다.

1. 정대열, "터널 막장 주위의 3차원적 영향을 모사하는 2차원 해석 모델의 하중분배율에 관한 연구", 공학박사학위논문, 서울대학교 공과대학 토목공학과, 1993.8.
2. R. S. Sinha, *Underground Structures: Design and Instrumentation*, Elsevier, 1989, pp.77~128.
3. K. J. BATHE, *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*, Prentice-Hall, 1982, pp. 494~495.
4. W. F. Chen, *Plasticity in Reinforced Concrete*, McGraw-Hill, 1982, pp.402~406.
5. W. F. Chen, *Plasticity in Reinforced Concrete*, McGraw-Hill, 1982, pp.360~361.
6. W. F. Chen, *Plasticity in Reinforced Concrete*, McGraw-Hill, 1982, pp.278~283.
7. W. F. Chen, *Plasticity in Reinforced Concrete*, McGraw-Hill, 1982, pp.88~94.
8. A. H. Nilson, etc., *Finite Element Analysis of Reinforced Concrete*, American Society of Civil Engineers, 1982, pp.204~228.
9. R. E. Goodman, *Introduction to Rock Mechanics*, 2nd Edition, Wiley, 1989, p.198.