

# 매개변수식 기하 표현법에 의한 3차원 터널 모델링

## 3D Tunnel Modeling by Parametric Representation of Geometry

이 형 우†

신 대 석\*

Lee, Hyung-Woo

Shin, Dae-Seock

(논문접수일 : 2001년 2월 23일 ; 심사종료일 : 2002년 2월 21일)

### 요 지

본 연구에서는 3차원 곡면의 매개변수식 기하 표현법과 계층적/관계형 자료 구조를 이용하여 3차원 터널을 자동으로 모델링할 수 있는 방안을 제시한다. 매개변수식 기하 표현법과 계층적/관계형 자료 구조의 이용은 3차원 터널 표현의 일반화와 확장성을 제공하며 해석을 위한 터널 구조의 특성을 정확하게 처리할 수 있게 한다. 그리고 터널 곡면의 곡률 특징을 이용하여 2차원 요소망 생성 알고리즘을 사용하여 3차원 요소망을 자동으로 생성할 수 있다.

**핵심용어** : 터널, 매개변수식 기하 표현법, 위상 연산, 자동 요소망 생성

### Abstract

A method of automatic 3D tunnel modeling is proposed. The proposed method uses the parametric representation of geometry and a hierarchical and relational data structure. These two bases provide the generalization and extension for 3D tunnel modeling. Especially, these two fundamentals form the basis for representing the characteristics of the tunnel structure for analysis. The constant-curvature characteristic is exploited to generate 3D mesh on the tunnel surface. This is attributed to the advantage that any 2D automatic mesh generation algorithm can be applied to 3D mesh modeling.

**Keywords** : tunnel, parametric representation, topological operation, automatic mesh generation

### 1. 서 론

일반적으로 터널은 종방향으로 연속되는 구조형태를 가지고 있어서 2차원 모델이 가능하다. 그러나 터널의 구조형태가 변화하는 피난통로 접속부 구간이나 터널의 입·출구 개착 구간에서는 구조계의 거동을 더 이상 2차원으로 단순화할 수 없고 3차원 모델을 사용하여 해석을 수행하여야 한다. 터널의 단면은 여러 개의 반지름에 의해 정의되므로 3차원 형상을 정확하게 표현

하고 접속부의 교차선 등을 계산하는 것은 복잡한 기하학적 연산과 많은 시간을 요구한다. 이런 이유로 유한요소법(FEM)과 경계요소법(BEM)을 사용한 터널 해석 기법 및 관련 구조해석 프로그램들이 꾸준히 개발 전하였음에도 불구하고 실무에서는 여전히 2차원 모델 또는 종방향으로 변화가 없는 3차원 단순 모델에 대한 해석이 선호되고 있다. 특히 라이닝 해석에서 중요한 접속부 구간이나 개착 구간에 대해서는 종종 3차원 해석이 생략되거나 부정확한 모델, 부적절한 요소망으로

† 책임저자, 정회원 · (주) 마이다스아이티 대표이사  
전화: 02-2142-0001; Fax: 02-2142-0011  
E-mail: midas@midasit.com

\* (주) 마이다스아이티 기술연구소 연구원

• 이 논문에 대한 토론을 2002년 6월 29일까지 본 학회에 보내주시면 2002년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

해석이 수행되고 있다. 그리고 상용 전처리 프로그램을 사용하는 경우에는 고급 곡면인 NURBS 또는 Bi-cubic Coons Patch 등을 사용하여 모델링한다. 이 경우에는 교차연산과 요소망 생성에서 초기 제어점과 일치하지 않는 곳에 새로운 교차점, 절점이 생성될 때에는 제어점의 좌표를 토대로 새로운 점의 좌표를 보간, 결정하므로 대수적인 방법으로 직접 곡면상의 좌표를 결정하는 것보다 정확도가 떨어지게 되며, CAD에 대한 전문 지식이 없는 사용자는 작업이 어렵다는 단점이 있다.

본 논문에서는 매개변수식 기하 표현법을 사용하여 터널의 형상 표현, 교차연산, 그리고 요소망 생성으로 구성되는 일련의 3차원 터널 모델링 작업을 자동으로 정확하게 처리할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 3차원 터널 모델링

### 2.1 매개변수식 기하표현법

원기둥, 구, 평면 등의 정형화된 3차원 면(곡면, 평면)은 매개변수식 표현법<sup>1)</sup>에 의해 쉽게 정의할 수 있다. 그림 1에서 원기둥은 반지름( $R$ ), 사용각도( $\theta$ ), 높이( $H$ )의 기하정보와 두 개의 매개변수  $\xi$ 와  $\eta$ 에 의해 정의된다. 사용각도  $\theta$ 는 사용할 원기둥의 범위를 지정하며, 완전한 원기둥이면  $2\pi$ , 반원기둥이면  $\pi$ 가 된다. 이 사용각도  $\theta$ 를 조절함으로써 원기둥의 전체 또는 일부만을 자유롭게 표현할 수 있다. 그림 1에서  $(x_1, x_2, x_3)$ 은 임의의 직교좌표계를 표시하며, 각 좌표축은 모델링에서의 편리한 선택에 따라 각각  $x, y, z$ 축이 될 수 있다.

그림 2의 3심원 터널에서 세 개의 하위 곡면  $S_i, S_c, S_r$ 은 원기둥의 일부라는 특징을 이용하여 3차원 모델

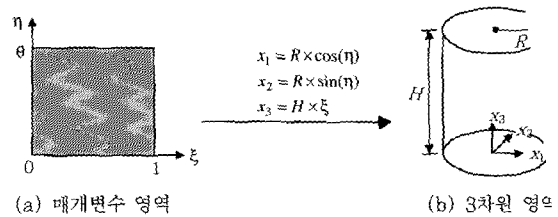


그림 1 매개변수식 표현법에 의한 원기둥의 정의

링 직교좌표계  $(x, y, z)$ 에서 반지름  $R$ , 사용각도  $\theta$  및 길이  $L$ 에 의한 매개변수식으로 다음의 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$S_r: \begin{cases} x_0 = R_c \times \cos(\eta) \\ y_0 = L \times \xi \\ z_0 = R_c \times \sin(\eta) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} x \\ y \\ z \end{cases} = [R] \begin{cases} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{cases} + \begin{cases} T_x^0 \\ T_y^0 \\ T_z^0 \end{cases}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{cases} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{cases} + \begin{cases} X_r \\ 0 \\ E_r \end{cases}$$

$(0 \leq \xi \leq 1, 0 \leq \eta \leq \theta), \alpha = \theta, -\frac{\pi - \theta_c}{2}$  (1a)

$$S_c: \begin{cases} x_0 = R_c \times \cos(\eta) \\ y_0 = L \times \xi \\ z_0 = R_c \times \sin(\eta) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} x \\ y \\ z \end{cases} = [R] \begin{cases} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{cases} + \begin{cases} T_x^0 \\ T_y^0 \\ T_z^0 \end{cases}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{cases} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{cases} + \begin{cases} 0 \\ 0 \\ E_c \end{cases}$$

$(0 \leq \xi \leq 1, 0 \leq \eta \leq \theta_c), \beta = \frac{\pi - \theta_c}{2}$  (1b)

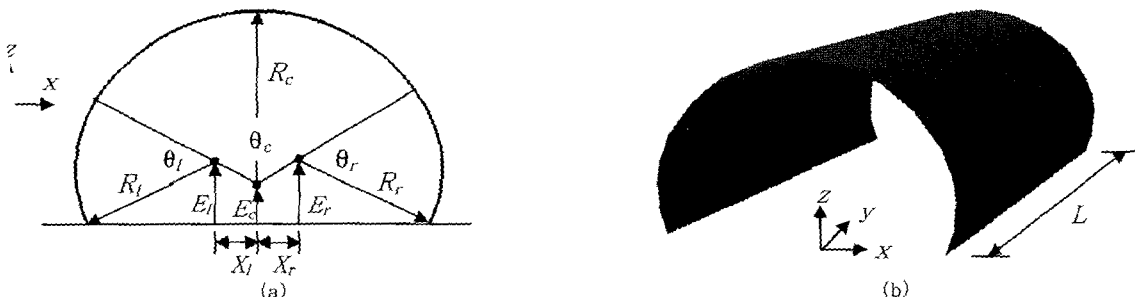


그림 2 3심원 터널의 매개변수 정보와 하위 곡면의 구성

$$\begin{aligned}
 x_0 &= R_i \times \cos(\eta) \\
 y_0 &= L \times \xi \\
 z_0 &= R_i \times \sin(\eta)
 \end{aligned}
 \rightarrow
 \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix}
 =
 [\mathbf{R}]
 \begin{Bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{Bmatrix}
 +
 \begin{Bmatrix} T_x^0 \\ T_y^0 \\ T_z^0 \end{Bmatrix}$$

$$=
 \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix}
 \begin{Bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{Bmatrix}
 +
 \begin{Bmatrix} X_i \\ 0 \\ E_i \end{Bmatrix}$$

$$(0 \leq \xi \leq 1, 0 \leq \eta \leq \theta_i), \gamma = \frac{\pi + \theta_c}{2} \quad (1c)$$

식(1)에서 각 하위 곡면은 원점을 기준으로 (+)xy 평면상에서 시작하므로 매개변수  $\xi, \eta$ 를 이용하여 원기둥 상의 좌표  $(x_0, y_0, z_0)$ 를 계산한 후, y축에 대한 회전과 중심 거리  $(E, X)$  만큼의 병진에 의해 최종적인 좌표  $(x, y, z)$ 가 계산된다. 하위 곡면  $S_i$ 은 y축에 대해 (+)회전을 하고  $S_c$ 와  $S_i$ 은 (-)회전을 하며, 회전각은 각각 식(1)의  $\alpha, \beta, \gamma$ 이다.

이렇게 정의된 터널은 기본적으로 3차원 공간에서 기준좌표계의 원점에서부터 (+)y 방향으로 0~L사이의 구간에 위치하며, 세 축에 대한 병진과 회전에 의해 위치로 이동시킬 수 있다.

### 2.2 자료 구조

모델링과 요소망 생성 작업을 위하여 터널 모델의 모든 정보는 그림 3과 같은 계층적/관계형 자료 구조에 의해 매개변수 영역에서 관리된다. 이 자료 구조는 B-Rep(boundary representation)<sup>(1,2)</sup>을 터널 모델링에 적합하게 응용한 것이다.

그림 3(b)의 하위 곡면( $S_i$ )은 서로 분리된 영역의 집합으로 구성된다. 각 영역은 하위 계층인 루프로 구성되어 있다. 다시 루프는 여러 개의 간선으로 구성되며, 루프의 간선들은 진행방향의 좌측에 곡면의 내부 영역이 존재하도록 순차적으로 연결된다(LHC : left-hand convention). 예로 외곽 경계 루프인  $L_1$ 을 구성하는 하위 간선들은  $E_1 \rightarrow E_2 \rightarrow E_3 \rightarrow E_4 \rightarrow E_5 \rightarrow E_6$ 의 순서로 연결된다. 그리고, 각각의 간선은 자료 구조의 최하위 계층인 점으로 구성된다. 간선  $L_1$ 처럼 직선인 간선은 시작과 끝을 정의하는 두 개의 점으로 구성되고, 간선  $L_3$ 이나  $L_7$ 처럼 복잡한 형상을 표현할 때에는 여러 개의 연속점으로 구성된다. 간선을 구성하는 점들도 역시 진행방향의 좌측에 영역이 존재하도록 연

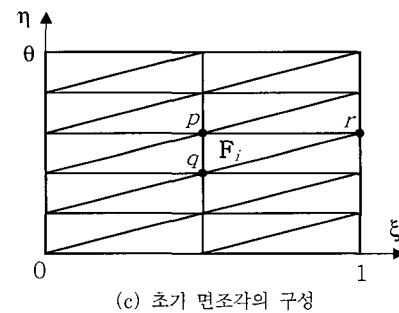
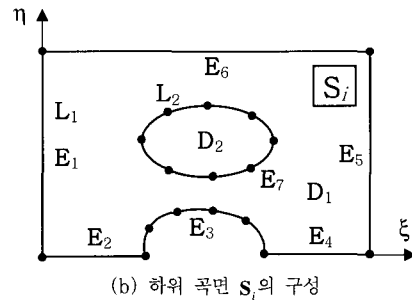
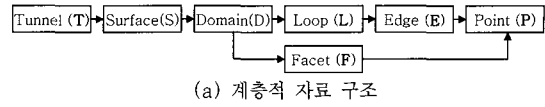
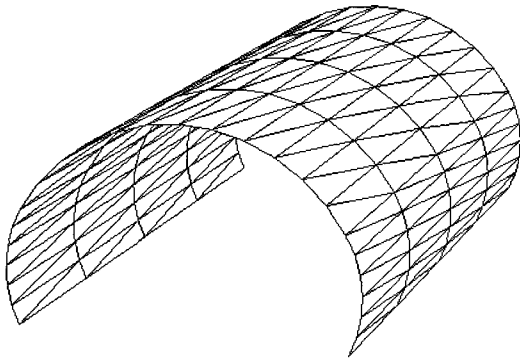


그림 3 터널의 계층적/관계형 자료 구조

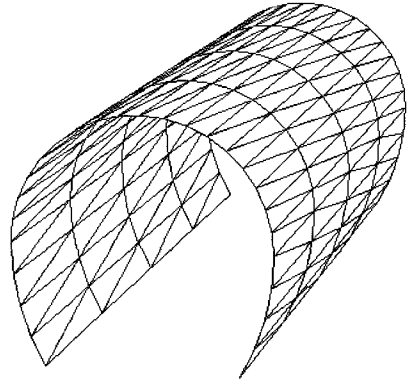
결된다. 각 점은 매개변수 좌표  $(\xi, \eta)$ 와 3차원 좌표  $(x, y, z)$ 를 가지며 식(1)에 의해 매개변수 영역  $(\xi, \eta)$ 에서 3차원 영역  $(x, y, z)$ 로 사상(map)된다.

모든 하위 곡면은 최초 생성시에는 1개의 영역과 이 영역의 외곽 경계를 표현하는 1개의 루프와 4개의 간선으로 구성되며, 교차연산 등의 기하학적 연산이 수행되면서 영역이 분할되어 그림 3(b)처럼 점차 복잡한 구조로 발전하게 된다. 프로그램의 구현에서 이처럼 발전하는 구조를 효율적으로 관리하기 위해서는 크기가 고정된 배열을 사용하는 것보다 가변적인 크기를 갖는 벡터 또는 연결리스트를 사용하는 것이 좋다.<sup>(3,4)</sup>

터널의 실제 3차원 형상을 그래픽으로 표현하고, 교차연산을 처리하기 위해서 추가적으로 표면을 표현하는 삼각형의 면조각(simplex facet)을 구성한다. 초기 면조각은 그림 3(c)처럼 매개변수 영역에서 격자를 생성한 후, 각 격자를 대각선으로 분할하여 쉽게 구성할 수 있다. 면조각은 반시계방향으로 진행되는 3개의 점으로 구성된다( $F_i: p-q-r$ ). 면조각을 생성하기 위



(a) 터널 본체



(b) 터널 피난부

그림 4 면조각으로 표현된 터널의 3차원 형상

한 격자의 분할에서  $\xi$  방향으로서는 2개 또는 4개로 분할하고,  $\eta$  방향으로서는  $10^\circ$  또는  $15^\circ$  만큼씩 분할한다. 각 영역은 자신의 하위 면조각 구성 정보를 갖고 있으며, 교차연산 후에 사용하지 않게 된 무효영역은 하위 면조각을 그리지 않는다. 그림 4에는 면조각으로 표현된 초기 터널의 3차원 형상이 나타나 있다.

### 2.3 교차연산

터널 접속부처럼 교차하는 두 개의 터널에 대한 교차연산은 두 터널의 하위 곡면을 구성하는 면조각 사이의 “삼각형-삼각형 교차연산”으로 처리된다. 면조각을 사용한 교차연산은 3차원 곡면 교차연산 방법 중에서 가장 안정적이며 면조각으로 표현된 모든 곡면에 대해서 적용이 가능하다는 일반화의 장점이 있다. 그림 5의 왼쪽에는 3차원 공간에서 서로 교차하는 2개의 삼각형  $\triangle lmn$ 과  $\triangle pqr$ 이 그려져 있다.

3차원 좌표표를 갖는 임의의 두 삼각형 사이의 교차에

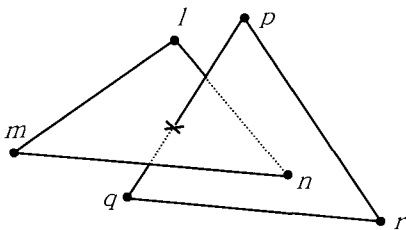
대한 직접적인 수치해법은 불안정하므로 그림 5의 오른쪽처럼 한 삼각형( $\triangle lmn$ )의 무한평면에 대해 다른 삼각형( $\triangle pqr$ )의 각 선분의 교차점을 찾는 방식을 사용한다.

삼각형의 무한평면 방정식 :  $\mathbf{n} \cdot \mathbf{x} = d$

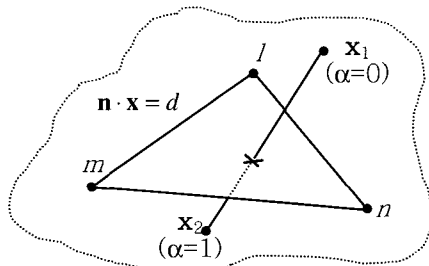
선분의 매개변수 방정식<sup>1)</sup> :  $\mathbf{x} = \mathbf{x}_1 + \alpha(\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1)$

교차점의 매개변수 값 :  $\alpha = \frac{d - \mathbf{n} \cdot \mathbf{x}_1}{\mathbf{n} \cdot (\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1)} \quad (0 \leq \alpha \leq 1)$  (2)

식(2)의 삼각형의 무한평면 방정식에서  $\mathbf{n}$ 은 법선벡터이며,  $\mathbf{x}$ 는 위치벡터  $[x \ y \ z]^T$ 이다. 선분의 방정식은 교차연산을 효율적으로 처리하기 위하여 매개변수식으로 표현하며,  $\mathbf{x}_1$ 과  $\mathbf{x}_2$ 는 각각 시작점과 끝점의 위치벡터이다. 선분의 매개변수 방정식에서 삼각형의 무한평면과 교차하는 점의 매개변수  $\alpha$ 의 값이 0과 1 사이일 때만 교차하는 것으로 판단하며, 이  $\alpha$ 값을 선분의 매개변수 방정식에 대입하여 바로 교차점의 좌표



(a)



(b)

그림 5 3차원 공간에서 서로 교차하는 두 개의 삼각형

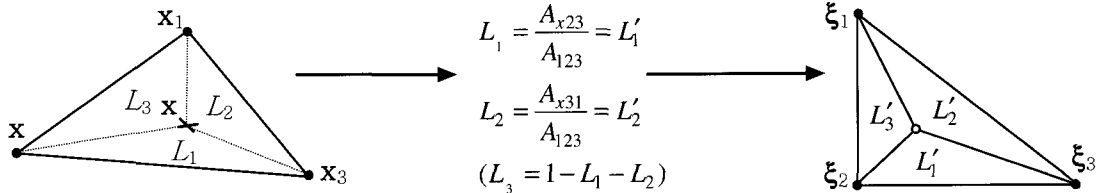


그림 6 면적좌표계를 이용한 교차점 좌표의 역사상

를 얻는다. 계산된 교차점은 삼각형의 무한평면과 선분의 교차점이므로 추가적으로 이 교차점이 삼각형의 내부에 존재하는지 조사하여 실제 삼각형과 선분의 교차점인지 판단한다. 3차원 좌표를 이용하여 삼각형의 내부/외부를 판단하는 것은 부동소수점의 오차로 인해 불안정하므로 Gram-Schmidt 직교정규화(Gram-Schmidt orthonormalization)<sup>5)</sup> 등을 이용하여 2차원 좌표로 변환한 후 판단한다. 중복 교차점을 포함하여 두 개의 삼각형은 항상 두 개의 교차점을 가지며, 터널의 하위 곡면에서 교차하는 면조각의 이웃 면조각으로 차례대로 이동하면서 연속적인 교차점을 찾을 수 있다.

교차점의 좌표는 그림 6처럼 삼각형 면조각의 면적좌표계(area coordinate system)에서 연립방정식을 이용하여 3차원 좌표  $(x, y, z)$ 와 동일한 면적좌표값  $(L_1, L_2)$ 을 갖는 매개변수 좌표  $(\xi, \eta)$ 를 찾아서 매개변수 영역으로 역사상(inverse map)시킨다.

그림 7에는 교차연산 후에 터널의 하위곡면의 매개변수 영역에 역사상된 교차선의 형상이 그려져 있다.

### 2.4 영역 재구성

교차선이 계산된 후에는 터널의 각 하위곡면에서 영역 재구성 작업이 수행된다. 영역 재구성은 위상 연산(topological operation)을 통해 폐경로에 의해 둘러싸인 각각의 영역을 찾아내는 것이다.<sup>1)</sup>

먼저 기존의 모든 간선과 교차선 사이의 교차 여부를 조사하여 교차점을 기준으로 간선과 교차선을 분할한다. 그리고 모든 교차점과 교차선을 새로운 점과 간선으로 자료 구조에 등록시킨다. 교차선은 원래의 방향과 역방향으로 각각 하나씩 총 두 개의 새로운 간선으로 등록시킨다. 폐경로를 찾기 위한 위상 연산은 그림 8(a)와 같은 간단한 위상 부그래프(topological subgraph)<sup>6)</sup>를 사용하여 수행한다. 그림 8(a)에서 간선  $E_i$ 와  $E_j$ 는 기존의 외곽 루프를 구성하는 간선으로 진행방향이 그림처럼 특정방향으로 고정되어 있다. 간선  $E_k$ 와  $E_l$ 은 교차선이 각 방향에 대해 등록된 것이다. 간선  $E_i$ 가 자신의 진행방향으로 진행하다가 분기노드  $N$ 에서 간선

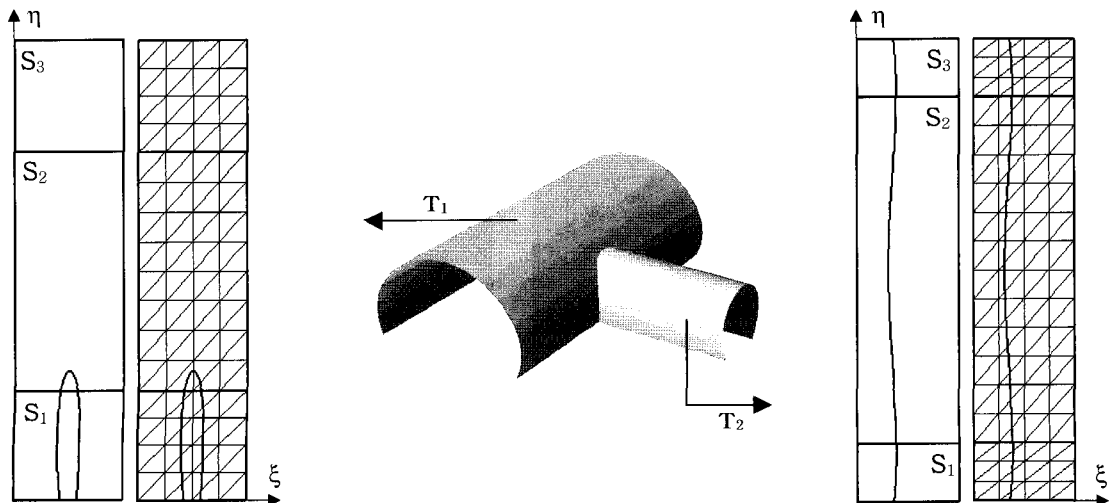


그림 7 터널의 매개변수 영역에 역사상된 교차선의 형상

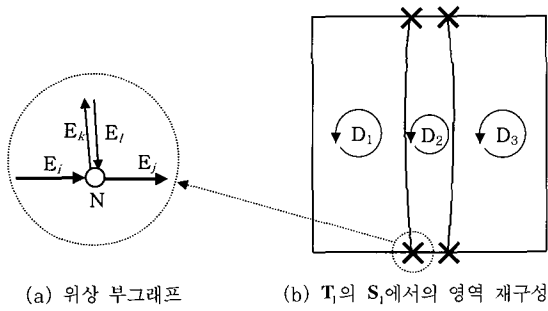


그림 8 교차선에 의한 영역의 재구성 작업

$E_j, E_k, E_l$ 과 만나면 동일한 진행방향을 갖는 간선  $E_j, E_k$  중에서 가장 왼쪽으로 회전할 수 있는 간선을 찾아서 진행한다. 그림 8(a)에서는 간선  $E_k$ 가 다음의 진행 간선이 된다. 그리고 최초의 시작 간선으로 되돌아오면 총 진행경로를 하나의 루프로 등록시킨다. 2.2의 자료 구조에서 초기의 모든 루프와 간선들은 LHC에 따라 구성되었으므로 이 위상 연산은 모든 새로운 루프, 간선이 자동으로 LHC를 따르도록 영역을 재구성한다.

그림 8(b)는 터널  $T_1$ 의 하위 곡면인  $S_1$ 에서의 영역 재구성 작업을 보여준다. 여기에서는 총 3개의 영역  $D_1, D_2, D_3$ 이 새롭게 구성된다. 각각의 영역에 대해서는 사용자의 지정에 따라 사용 또는 비사용의 플래그가 설정되며, 그래픽 처리와 요소망 생성에는 각 하위 곡면의 영역 중에서 사용 플래그가 설정된 영역에 대해서만 작업을 수행한다.

그리고 각 하위곡면에서 교차선을 기준으로 면조각을 갱신한다. 교차선이 지나간 면조각에 대해서 교차점을 기준으로 기존의 면조각을 여러 개의 삼각형으로 분할한다. 그림 9에는 그림 7의 터널  $T_1$ 과  $T_2$ 의 유효영역에 대해 갱신된 면조각의 3차원 형상과 면조각의 경계선이 감춰진 형상이 그려져 있다.

### 3. 요소망 생성

3차원 터널 모델에 대한 요소망 생성에서는 터널의 각 하위 곡면이 원기둥의 일부이며 원기둥 표면 상의

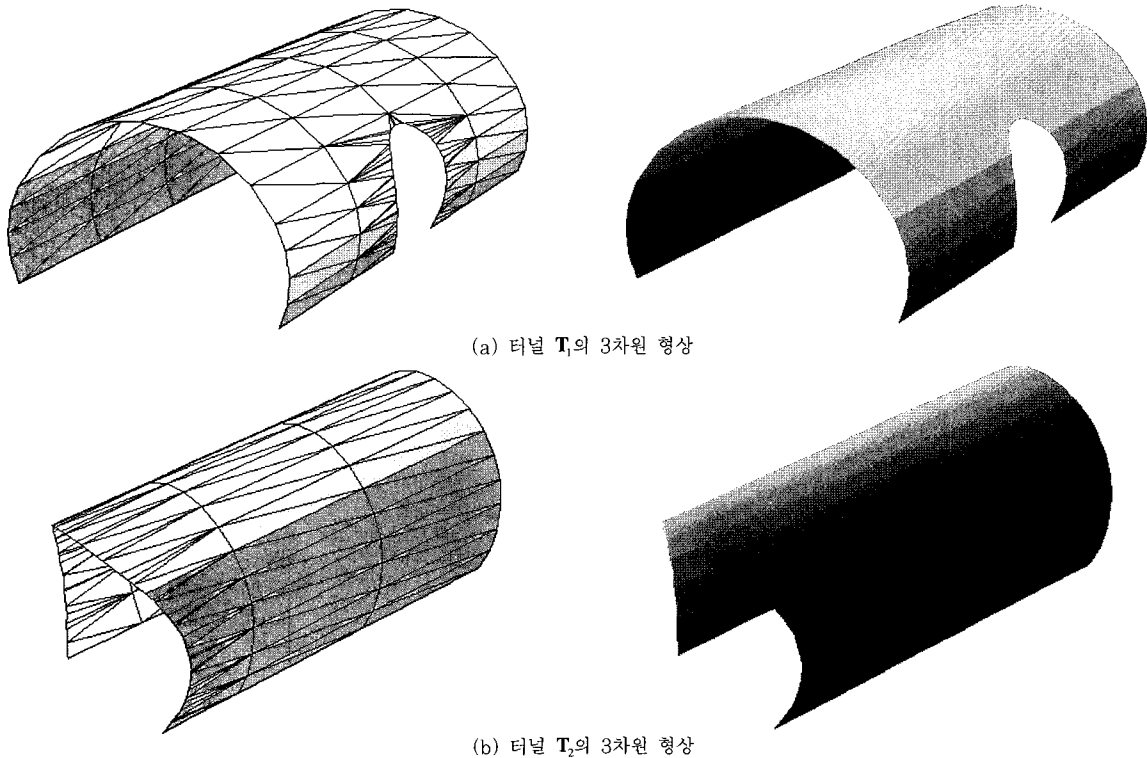


그림 9 교차연산 후 영역이 재구성된 터널의 3차원 형상

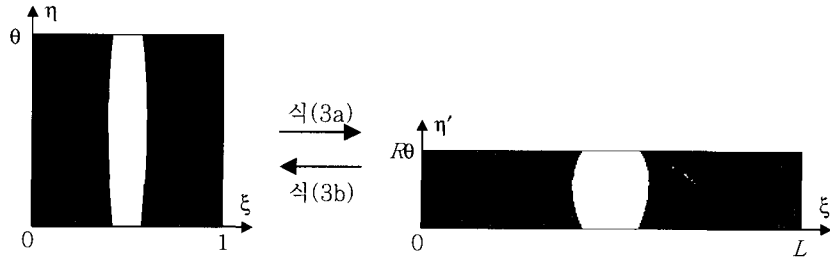


그림 10 요소망 생성을 위해 확장된 매개변수 영역

모든 점은 동일한 곡률을 갖는다는 특징을 이용한다. 즉, 터널의 3차원 곡면 상에서 직접 요소망을 생성하는 대신 실제 크기로 확장된 매개변수 영역에서 2차원 요소망을 생성하고 3차원으로 사상시킨다. 이것은 3차원 곡면상에서 직접 요소망을 생성할 때 발생하는 좌표 보간, 곡률 제어 및 요소망 수준 제어의 어려움을 모두 제거한다. 식(3a)을 이용하여 그림 10처럼 하위 곡면의 매개변수 영역에서  $\xi, \eta$  방향으로 각각 하위 곡면의 길이  $L$  과 반경  $R$  만큼 확장시킨다. 이렇게 함으로써 요소망 생성에서 실제 3차원 곡면상에서 요구되는 등방의 요소 크기를 적용할 수 있고, 추가적인 변환 작업 없이 직접 요소망의 수준도 제어할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \xi' \\ \eta' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \xi \\ \eta \end{Bmatrix} \quad (3a)$$

$$\begin{Bmatrix} \xi \\ \eta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \xi' \\ \eta' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/L & 0 \\ 0 & 1/R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \xi' \\ \eta' \end{Bmatrix} \quad (3b)$$

확장된 매개변수 영역은 완전한 2차원 영역이므로 모든 2차원 요소망 생성 알고리즘을 그대로 사용하여 요소망을 생성할 수 있다. 생성된 2차원 요소망은 먼저 식(3b)에 의해 원래의 매개변수 영역으로 역사상된 후 다시 식(1)에 의해 3차원 영역으로 사상된다. 각 터널에 생성된 요소망에 대해서는 터널의 종방향을 기준으로 요소좌표계를 정렬하여 설계를 위한 해석 결과 분석을 편리하게 할 수 있다. 선형 요소와 고차 요소가 혼합된 요소망 또는 변질점 요소가 포함된 요소망을 생성하고자 할 때에도 확장된 2차원 매개변수 영역에서 자동 요소망 생성 알고리즘과 요소망 탐색 기법<sup>7)</sup>을 부분적으로 사용하여 원하는 요소망을 생성할 수 있다.

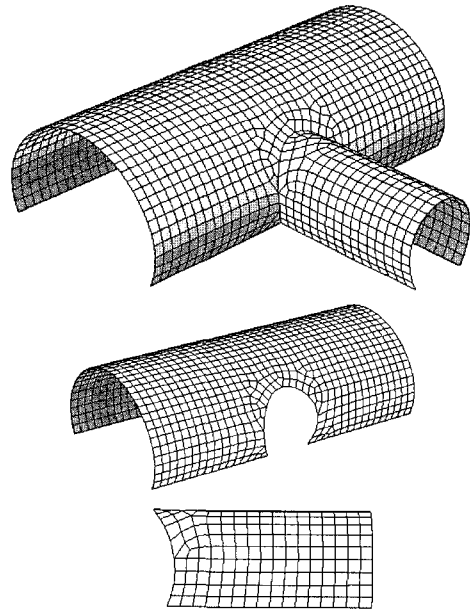


그림 11 터널 접속부 모델에 생성된 3차원 사각형 요소망

그림 11은 격자기반의 요소망 생성 알고리즘을 사용하여 그림 7의 터널 접속부 구간의 모델에 생성한 3차원 사각형 요소망이다.

#### 4. 적용 예제

##### 4.1 터널 개착 구간의 모델링

개착 구간은 평판을 생성하여 터널과 교차시킴으로써 모델링할 수 있다. 평판은 가장 간단한 정형화된 형상이므로 가로 길이  $W$ 와 세로 길이  $H$ 의 기하정보에 의해 매개변수식으로 표현할 수 있다. 기하정보의 차원이 동일하므로 매개변수영역에서는 그림 12에 보이는 단위좌표계를 사용한다.

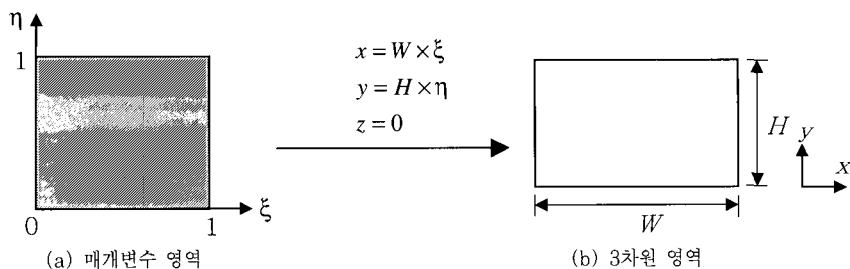


그림 12 매개변수식 표현법에 의한 평판의 정의

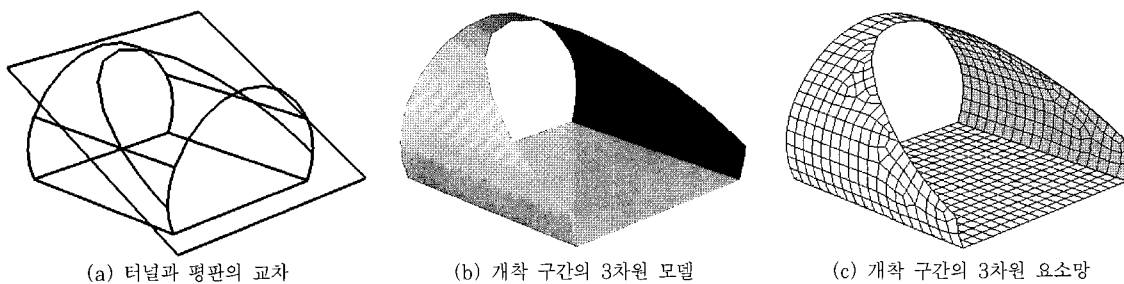


그림 13 평판을 사용한 개착 구간의 모델링

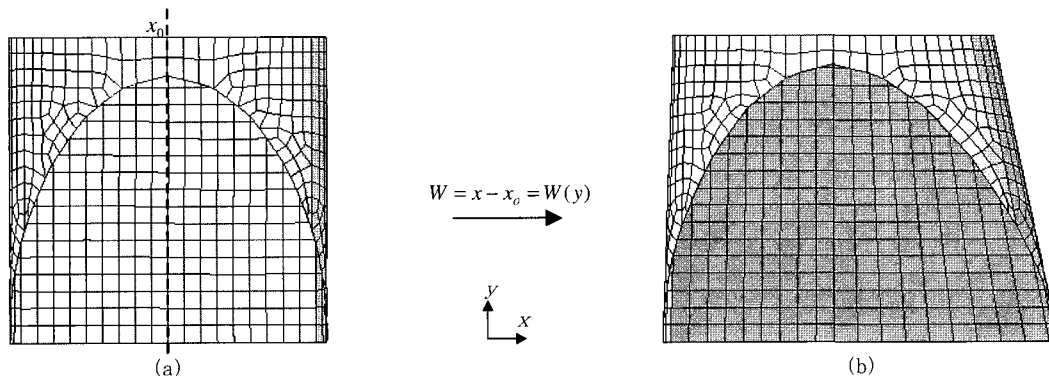


그림 13 개착 확폭 구간의 선형 스케일링 처리

이렇게 정의된 평판을 그림 13(a)처럼 터널의 개착 구간에 경사지게 위치시켜서 터널과 교차연산을 수행 시킴으로써 터널에서 불필요한 부분을 삭제한다. 2.2~2.4에서 정리된 모델링 방법들이 모두 매개변수로 표현 가능한 3차원 면(곡면, 평면)에 대해 일반화된 것이므로 평판에도 그대로 적용할 수 있다. 그림 13에서는 터널 바닥도 역시 평판을 이용하여 표현하였다.

만약 개착 구간이 확폭인 경우에는 3차원 요소망에서 확폭 부분의 절점 위치를 스케일링하여 처리할 수 있다. 그림 13은 y에 대한 폭(x좌표)의 선형함수를 사용

하여 좌·우로 스케일링한 확폭 구간 요소망의 예이다.

#### 4.2 라이닝 해석을 위한 압축전담요소의 자동 생성

라이닝 해석에서 터널의 외부와 지반이 만나는 부분은 지반의 특성상 인장을 받지 못하므로 압축전담요소 (compression-only element)를 사용하여 압축력만을 전달하도록 하여야 한다. Woelfer의 공식에 의해 지반반력계수의 값은 반지름의 크기에 따라 달라진다.



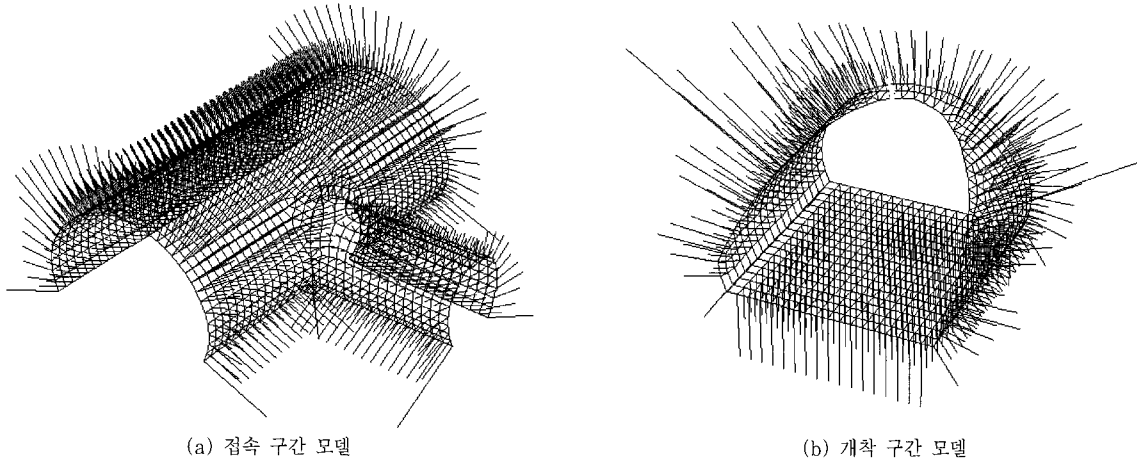


그림 14 자동생성된 압축전담요소

매개변수식 표현법에서는 2.2의 계층적 구조에서 반지름에 따라 각 하위 곡면을 구분하여 관리하기 때문에 쉽게 자동으로 처리할 수 있다. 압축전담요소의 생성에서 식(4)를 사용하여 요소 강성을 길이로 표현하였다. 그림 14는 터널 접속 구간 모델과 개착 구간 모델에 자동 생성된 압축전담요소를 보여준다.

$$K_s \times A_{soil} = \left( \frac{E \times A_{section}}{L} \right)_{compression-only} \quad (4)$$

( $K_s$ : 지반반력계수,  $A_{soil}$ : 한 절점이 차지하는 유효면적,  $E$ : 탄성계수,  $A_{section}$ : 단면적,  $L$ : 길이)

#### 4.4 기타 응용

5심원 터널의 경우에는 하위 곡면의 개수를 5개로 늘리고 5개의 하위 곡면에 맞게 식(1)을 수정하기만 하면 된다. 그외의 모든 모델링, 요소망 방법은 2.2~2.4의 내용들이 모두 그대로 적용된다.

터널의 가변 구간은 가변 구간을 제외한 나머지 구간을 모델링하고 요소망을 생성한 후, 두 구간 사이의 요소망을 연결하는 방법으로 처리할 수 있다. 요소망 연결은 사상 요소망(mapped mesh) 생성법<sup>8)</sup> 등을 사용하여 자동으로 처리할 수도 있다.

터널 내부의 체트 펜은 원기둥의 형상을 가지므로 그림 1처럼 매개변수식 표현법으로 정의하여 처리할 수 있다.

#### 4.5 터널 라이닝 해석 예

그림 15는 접속 구간 모델에 대해 MIDAS/GEN<sup>9)</sup>을 사용하여 라이닝 해석을 수행한 결과의 예(단위 길이 당 최대모멘트 분포도)이다.

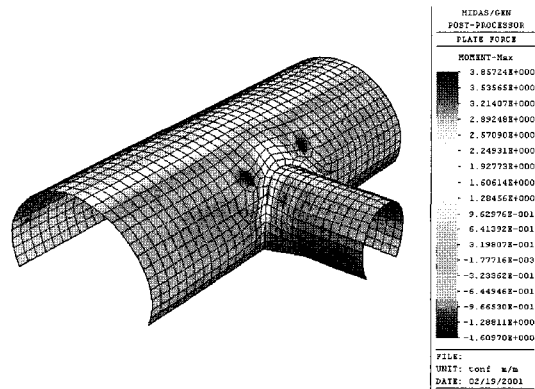


그림 15 터널 접속 구간 모델과 해석 결과 예

#### 5. 결 론

1. 매개변수식 기하 표현법을 사용하여 3차원 터널 모델링 작업을 자동으로 정확하게 수행할 수 있다.
2. 3차원 좌표 계산에서 매개변수식에 의한 대수적인 방법을 사용하므로 일반 곡면 표현법의 보간법을 사용하는 것보다 정확하게 곡면상의 좌표를 계산할 수 있다.
3. 매개변수식 기하 표현법과 계층적/관계형 자료 구

- 조의 사용은 3차원 터널 모델링의 일반화와 확장성을 제공하였다.
4. 면조각 교차연산 및 위상 연산을 사용하여 터널의 모든 3차원 교차연산 및 자료 구조 갱신을 일반적으로 처리하였다.
  5. 터널의 각 하위 곡면에서는 곡률이 일정하다는 특징과 매개변수식 표현법을 활용하여 2차원 요소망 생성 알고리즘으로 3차원 터널 요소망을 생성하였다.
  6. 자동 요소망 생성에서 각 터널의 종방향 기준으로 요소좌표계를 정렬하여 설계를 위한 해석 결과 분석을 편리하게 하였다.
  7. 계층적 자료 구조에 의한 모델 관리로 반지름에 따라 달라지는 지반반력계수 등과 같은 터널 구조의 특성을 정확하게 처리하였다.
  8. 3차원 요소망을 생성한 후에 간단한 조작으로 다양한 형상의 터널을 처리할 수 있다.

#### 참 고 문 헌

1. Michael E. Mortenson, *Geometric Modeling*, John Wiley & Sons, 1985
2. Martti Mantyla, *An Introduction to Solid Modeling*, Computer Science Press, 1988
3. Bjarne Stroustrup, *The C++ Programming Language*, Addison-Wesley, 1997
4. Alexander Stepanov, Meng Lee, *The Standard Template Library*, 1985, <http://www.sgi.com/tech/stl>
5. Seymour Lipschutz, *Linear Algebra*, McGraw-Hill, 1987
6. ACIS 3D Toolkit, Spatial Technology Inc., 1999
7. 김한수, "탐색기법을 이용한 2차원 유한요소 연결관계의 자동추출", 한국전산구조공학회 논문집, 제13권 제3호, 2000, pp.329~336
8. Joe F. Thompson, "Numerical grid generation: Foundations and application", *North-Holland*, 1985
9. MIDAS/GENw Version 4.3, MIDAS IT Co., Ltd, 2000, <http://www.midasit.com>