

MPAM 이론에 의한 지하공간의 설계방법 연구

A Study on Design Method of Underground Space based on MPAM Theory

이완재¹⁾, Lee, Wan-jae, 김태홍²⁾, Kim, Tae-Hong

¹⁾ 정회원, 공학박사, (주)동성엔지니어링

²⁾ 공학박사, Parsons Brinckeroff Inc., New York, U.S.A.

SYNOPSIS : Rock masses represent natural systems that are inherently complex and in which multiple mechanisms occur. Rock engineering systems such as tunnel and slope interact with surrounding systems through an exchange of both mass and energy. Accordingly the complex nature of rock masses calls for a system approach, and the open nature of rock engineering even requires the engineering to be controlled by a system approach for surrounding environments. However, traditional methods cannot take all variables and their interactions into account and are limited to the system with single mechanisms. Therefore, they are not proper for a complex and open system, and also cannot portray the whole system. Thus, a system approach is indispensable to rock engineering for dealing with the whole of a complex and open system. In this paper Mechanism Path Analysis Methodology (MPAM) is introduced for a system approach to rock engineering. The analysis by the methodology gives us all the information of systems behavior in the context of the whole system in order to accomplish the optimum design in accordance with the project objectives and analysis purposes. As an application a conventional model for the evaluation of TBM tunneling performance system is analyzed by MPAM and the result is compared with that by a traditional method.

Key Words: MPAM, Mechanism, System Approach, Interaction, Optimum Design, Tunnel

1. 서론

지하공간 및 사면 등 지반 내에 설치되는 구조물은 많은 변수들과 그들간에 존재하는 mechanism 들의 동역학적인 process-response 에 의해 통치되는 매우 복잡한 시스템일 뿐만 아니라 주변환경을 이루는 여러 시스템들과 질량과 에너지를 끊임없이 교환하며 상호작용관계를 맺고 있는 open system 이기도 하다 (Chorley and Kennedy, 1971). 그러나 현재 지하공간 시스템 설계 및 해석에 적용되고 있는 기존의 방법론 들은 시스템이 보유하고 있는 모든 변수들과 그들의 상호관계를 충분히 표현할 수 없을 뿐만 아니라 다양한 mechanism 들에 의한 연동문제도 충분히 고려하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 기존의 방법론 들은 복잡한 시스템과 open system 의 문제 해결을 위한 도구로서 적합하지 않을 뿐만 아니라 시스템 전체를 고려하는 데도 한계가 있다. 그리하여 이러한 문제를 해결하기 위해서는 새로운

시스템적 접근 방법론이 요구된다. Hudson (1992) 은 그림 1에서 보여주는 바와 같이 interaction matrix 를 사용하여 암반공학적 문제를 해결할 수 있도록 시스템적 접근 방법에 기초한 RES (Rock Engineering System) 개념을 제안하였다. Interaction matrix 는 복잡한 시스템에서 야기되는 많은 변수들과 mechanism 들을 각각 주 대각선 항과 비 대각선 항에 수용할 수 있고 또한 open system 의 특징인 주변시스템과의 상호관계에서 발생하는 형태학적인 변화구조는 여러 시스템의 interaction matrix 들을 연합하여 시스템의 모든 변수들을 서로 간에 관계된 mechanism pathway 로 결합시키므로써 완전한 연동관계에 의하여 표현할 수 있다. 지하공간을 설계하고 해석하는데 있어 다음 두 가지 사항이 매우 필요한 것으로 요구된다. 첫째는 설계 및 해석 방법론이 측정할 수 있는 물리량에 의하여야 하고 수학적으로는 정량적인 해석에 기초해야 한다는 것이다. 둘째는 적용된 방법론이 시스템 전체 안에서 시스템 거동에 관한 모든 정보를 제공하므로써 프로젝트의 목표와 해석목적에 맞는 최적설계를 생산할 수 있도록 유도할 수 있어야 한다는 것이다. Jiao (1995) 는 RES 개념에 기초하여 복잡한 암반공학 시스템에 적용할 수 있는 선형해석적 MPAM (Mechanism Path Analysis Methodology) 방법론을 개발하였다. MPAM 방법론은 open system 전체 안에서 발생하는 물리적인 현상을 엄격한 수학적 이론에 의해 재현할 수 있을 뿐만 아니라 시스템을 효과적으로 제어하여 최적설계를 추구할 수 있는 길을 제시하였다. 그러나 복잡한 성격의 암반에 설치된 대부분의 지하공간은 주로 비선형 시스템으로 구성 변수 간에 형성된 mechanism 들이 비선형 거동을 보인다. 따라서 Lee(2003)는 MPAM 방법론을 비선형 시스템의 해석에 적용할 수 있도록 확장하였다.

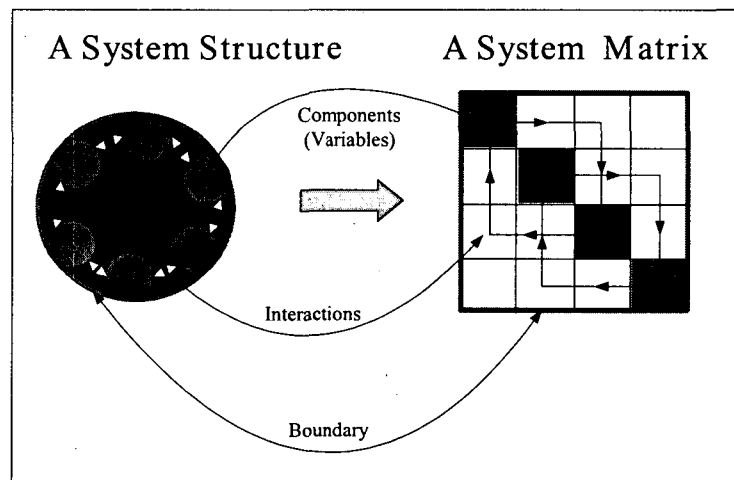


그림. 1.1 System Matrix

2. 시스템과 지하공간

앞서 논의 하였듯이 open system 에 속하는 지하공간 시스템은 그 경계를 통하여 주변 환경과 질량과 에너지를 교환하기 때문에 시스템 내부에서는 동역학적인 변화가 일어나고 외적으로는 형태학적인 변화를 경험하게 된다. 즉 이것은 시스템이 외부 시스템과의 interaction 에 의해 내외적으로 어떤 진화과정을 겪는다는 것을 의미하는 것이다. 따라서 Hudson(1992) 은 이러한 open system의 interaction 과 진화과정을 표현하기 위해 mechanism pathway 개념을 고려할 수 있는 interaction matrix 를 제안하였다. 또한 Arnold (1994) 는 Chorley 와 Kennedy (1971) 가 제시한 지리학적 시스템에 적용한 시

시스템의 변화모델이 암반공학 시스템과 유사하다는 특성을 고려하여 암반공학 시스템의 변화과정을 interaction matrix 를 이용하여 다음의 4단계 진화과정으로 표현하였다.

2.1 Morphological System

이것은 지하공간을 수용하는 암반이 어떤 공학적인 교란 없이 자연상태로서의 평형을 유지하고 있는 것으로 시스템을 이루는 구성요소들 사이에 어떤 특별한 형태의 구조적인 관계를 이루고 있는 상태이다. 이러한 시스템은 Hudson (1992) 이 제시한 interaction matrix 안에서 그림과 같이 주 대각선에 표시된 시스템 상태변수들과 비 대각선에 표시된 그들의 상관관계에 의해 표현될 수 있다. 비 대각선에 표시된 변수간의 상관관계는 시스템이 어떤 교란에 의해 진화할 때 변수간에 직접적인 관계는 물론 mechanism pathway 개념에 의해 간접적인 관계를 유발할 가능성을 잠재하고 있는 것이다. 그림 2.1 에서 주 대각선의 변수들은 암반이 하나의 자연시스템으로서 갖는 물리적인 특성을 나타내며 비 대각선에 표현된 1과 0은 단순히 시스템에 포함된 모든 변수의 상관관계의 유무를 상호 연계하여 보여주고 있다. 즉 변수 P1은 변수 P2에 영향을 주고 변수 P2는 변수 P3에 영향을 주며 변수 P3는 변수 P1에 영향을 주고 있다.

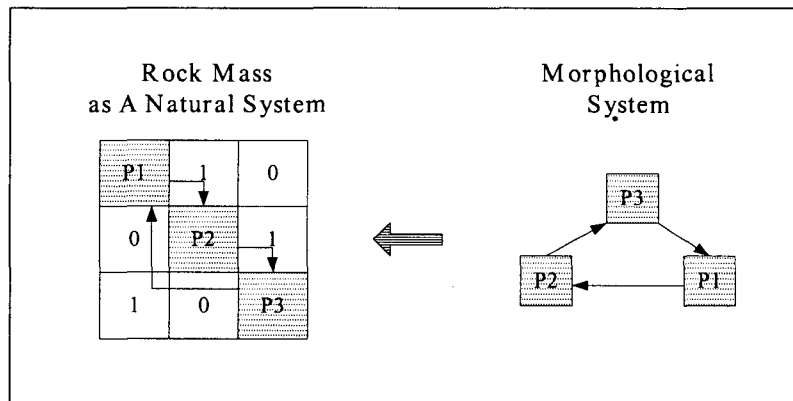


그림 2.1 Morphological System

2.2 Cascading System

Cascading System 은 자연평형상태에 있는 Morphological System 에 외부 시스템으로부터 질량과 에너지가 입력되는 상태이다. 따라서 시스템은 교란되며 불평형상태로 전환된다. 지하공간과 같은 구조물의 건설은 암반에 행해지는 engineering input 으로서 하나의 Cascading System 으로 간주되며 이로 인하여 Morphological System 상태에 있던 자연평형조건에 있던 암반이 거동을 시작하며 불평형 상태에 놓이게 된다. 그림 2.2. 에 보여준 예에서 Morphological System 은 3개의 변수 즉 P1(응력) P2(지하수) P3(열) 로 구성되어 있고 여기에 건설이라는 Cascading System 이 개입되면 질량의 변화로 인하여 응력상태(P3)는 교란된다. 그림에서 변수 P4 는 건설에 의해서 도입된 질량이나 에너지로 간주할 수 있다. 따라서 변수 P4는 응력 P3에 영향을 주어 교란을 야기하고 응력의 변화를 유발시키며 시스템 안에 저장 되기도하고 출력으로서 방출되어 외부시스템에 입력되기도 한다. 이러한 Cascading System 은 Interaction matrix 안에서 mechanism pathway 에 의해 Morphological System 에 연결되므로서 Interaction matrix 를 확장하게 된다.

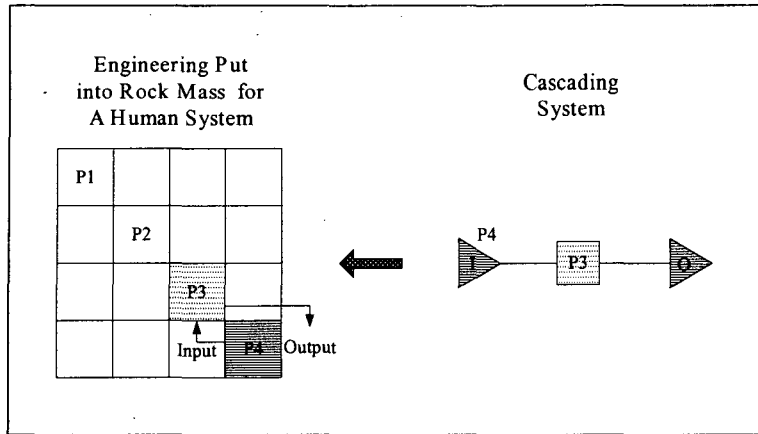


그림 2.2 Cascading System

2.3 Process-Response System

Morphological System 이 Cascading System 과 결합하면 시스템 내부에서는 동역학적인 변화가 일어나고 외적으로는 형태학적인 변화가 일어나며 새로운 평형상태에 도달할 때까지 시스템은 진화하게 되는데 이를 Process-Response System 이라 한다. 그림 2.3 에 보여준 예에서 Cascading System 의 변수 P4 의 입력은 Morphological System 에 있는 변수 P3에 영향을 주고 차례로 Forward Mechanism Pathway 에 의해 변수 P1 과 P2 에 영향을 준 다음 Feedback Mechanism Pathway 에 의해 다시 P3 에 영향을 준다. 이러한 Process-Response 과정은 구성하고 있는 System 의 모든 변수에 입 출력되는 에너지 또는 질량이 새로운 평형상태 (Steady State Equilibrium) 에 도달할 때까지 계속하게 된다. Jiao(1995) 는 암반공학 시스템이란 암반이 공학적 프로젝트에 의해 교란될 때 시스템의 반응을 분석하고 예견하는 것이라고 간주하였고 암반공학시스템이 Process-Response System 으로 거동하는 것은 바로 Interaction Matrix 가 가동하는 것으로 보았다.

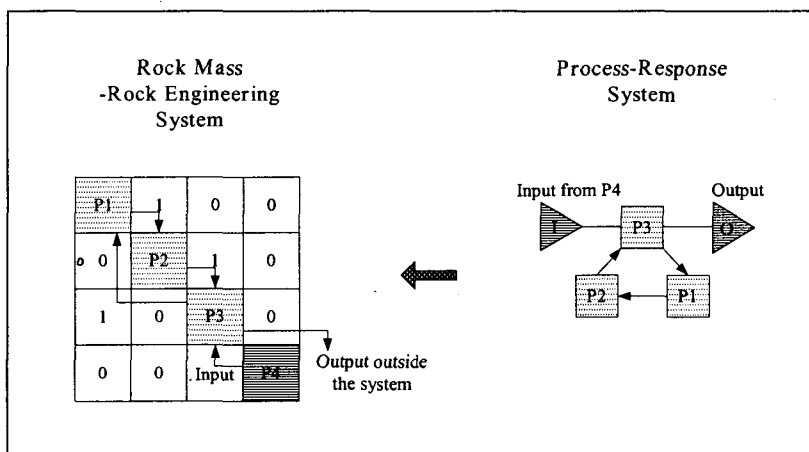


그림 2.3 Process-Response System

2.4 Control System

Open System 은 주변환경에 매우 많은 인위적인 또는 자연적인 시스템을 갖고 있고 시스템의 입 출력 조건에 따라 이들에 직 간접으로 영향을 끼치게 된다. 따라서 Process-Response System 이 그 과정의 끝에서 새로운 평형상태에 도달할 때 그 시스템으로부터 나오는 출력의 값이 주변의 인위적으로 구

축한 시스템은 물론 주위의 자연적인 환경시스템에 미치는 영향을 허용할 수 있는 범위 내로 통제 되어야 할 필요가 있다. 이것은 바로 인간과 자연 사이에 조화를 이루면서 동시에 공학적인 목적을 달성하기 위한 기준이기도 하다. Interaction Matrix 안에서 Control System 을 실현하기 위한 방법은 Process-Response 단계에서 확인된 영향력이 큰 주요 변수와 mechanism 들을 지적으로 통제하여 시스템으로부터 나오는 출력을 외부시스템이 수용할 수 있는 정도로 제한하는 것이다. 그림 2.4 의 예에서는 주변환경에서 요구된 출력으로 조절하기 위하여 변수 P3가 제어되고 있음을 보이고 있다.

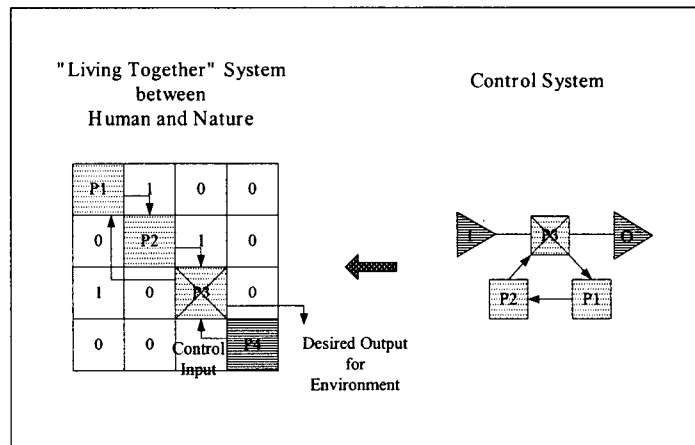


그림 2.4 Control System

3. MPAM 에 의한 해석방법론

3.1 Binary Interaction Mechanism

자연평형 상태에 있는 암반의 Morphological System은 Binary Interaction Matrix (BIM) 를 기본적인 도구로 사용하므로써 수학적인 표현이 가능하게 된다. BIM 의 구축은 Binary Mechanism Matrix 로부터 시작하여 Mechanism Network 으로 전환한 후 레이블링 하므로써 완성된다. 한 시스템에 존재하는 변수들과 Binary Mechanism 을 완전하게 나타낼 수 있는 간결한 방법은 Binary Mechanism Matrix (BMM) 이다. 이 Matrix 안에서 변수들은 주 대각선에 Mechanism 들은 비 대각선에 놓여진다. 그림 3.1 은 한 예로서 4개의 변수와 그들간에 Binary Mechanism 을 BMM 에 표현한 것이다.

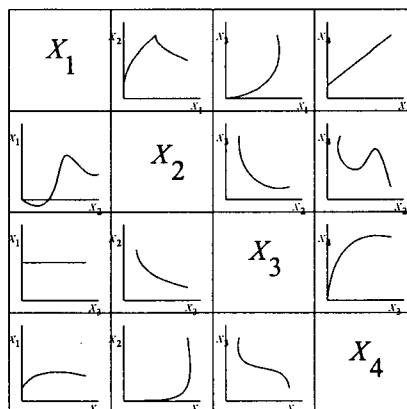


그림 3.1 Binary Mechanism Matrix

비 대각선에 표현된 함수는 두 변수 간에 관계로 $X_j = f_{ij}(X_i)$ 이며 X_i 는 독립 또는 원인 변수이고 x_j 는 종속 또는 결과 변수이다. 따라서 BMM 은 아래와 같이 수학적으로 공식화된 Matrix 형태로 바뀌어진다.

$$R = \begin{bmatrix} x_1 & f_{12}(x_1) & \cdots & f_{1i}(x_1) & \cdots & f_{1n}(x_1) \\ f_{21}(x_2) & x_2 & & f_{2i}(x_2) & & f_{2n}(x_2) \\ \vdots & & \ddots & & & \vdots \\ f_{i1}(x_i) & f_{i2}(x_i) & & x_i & & f_{in}(x_i) \\ \vdots & & & & \ddots & \vdots \\ f_{n1}(x_n) & f_{n2}(x_n) & \cdots & f_{ni}(x_n) & \cdots & x_n \end{bmatrix}$$

Carre(1979) 에 의한 그래프 이론에 의하면 Matrix 는 Network (Digraph) 과 1대 1 대응관계를 갖는다. 즉 Matrix 의 주 대각선에 있는 변수들은 Network 에서 Node 로 표현될 수 있고 비 대각선에 있는 Binary Mechanism 은 Arc 로 표현될 수 있기 때문이다. 따라서 Mechanism Network 은 Node 와 Arc 에 의하여 Mechanism Matrix 보다 변수들 간에 직접적인 관계는 물론 간접적인 관계를 더욱 분명하게 표현해 주고 있다. Mechanism Network 을 수학적으로 처리하기 위하여 한 쌍의 원인-결과 관계를 갖는 입출력 변수 사이에 단위 입력값에 대한 정규화 과정이 필요하고 이러한 과정을 labeling 이라고 하며 이에 의해 생성된 Network 을 Labeled Mechanism Network 이라 한다. 따라서 그림 3.1 에 의한 BMM 을 Mechanism Network 으로 표현한 후 labeling 하면 그림 3.2 와 같은 Labeled Mechanism Network (Labeled Digraph) 을 얻는다.

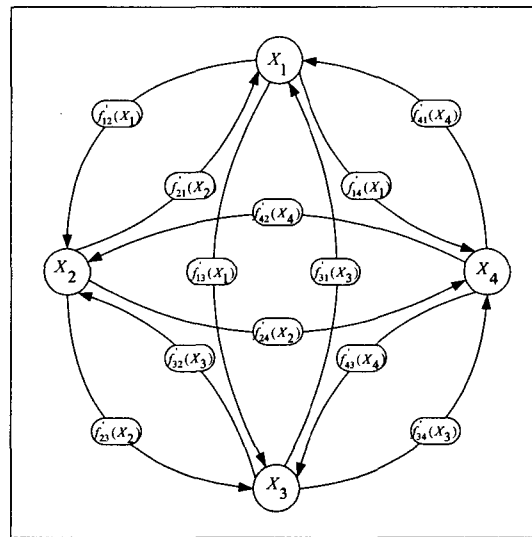


그림 3.2 Labeled Mechanism Network

한 쌍의 원인과 결과를 나타내는 두 변수 사이에는 많은 Mechanism Path 가 있고 이들은 Binary Mechanism 들의 사슬 (Chain) 에 의해 연결되어 있다. 따라서 두변수 관계를 규정하는 Mechanism path 에는 한 변수(원인)에서 다른 변수(결과)로 이르는 일방향의 Forward Mechanism path 가 있고, 다시 원인을 주었던 같은 변수로 회귀하는 Mechanism Feedback Circuit 이 있다. 이들에 대한 관계를

Labeled Mechanism Network 으로부터 Chain Rule 을 이용하여 수학적으로 표현하면 각각 식 3.1 과 3.2 이다.

Forward Mechanism:

$$dX_j = \left[\prod_{k=0}^n f'_{i_k i_{k+1}}(X_{i_k}) \right] dX_{i_0} = P_{ij} \cdot dX_{i_0} \quad (3.1)$$

Mechanism Feedback:

$$dX_{i(output)} = K_{loop} \cdot dX_{i(input)}$$

$$K_{loop} = \prod_{k=0}^n f'_{i_k i_{k+1}}(X_{i_k}) \quad (3.2)$$

Labeled Mechanism Network 은 Gondran 과 Minoux (1984) 의 Digraph 와 Matrix 에 관한 이론에 의해 아래와 같이 Adjacency Matrix 로 전환된다. 이 Adjacency Matrix 는 Network 에서의 Path 에 관련된 문제를 Path Algebra 를 이용하여 수치적으로 다룰 수 있는 기본적인 도구로 MPAM 이론에서는 Binary Interaction Matrix (BIM) 이라 불리운다.

$$BIM = A = \begin{bmatrix} 0 & f'_{12}(X_1) & f'_{13}(X_1) & f'_{14}(X_1) \\ f'_{21}(X_2) & 0 & f'_{23}(X_2) & f'_{24}(X_2) \\ f'_{31}(X_3) & f'_{32}(X_3) & 0 & f'_{34}(X_3) \\ f'_{41}(X_4) & f'_{42}(X_4) & f'_{43}(X_4) & 0 \end{bmatrix}$$

3.2 Fully Coupled Mechanism

Binary Interaction Matrix (BIM) 에 의해 수학적으로 표현된 암반의 Morphological System 이 엔지니어링으로 인한 Cascading System 에 의해 교란된다면 시스템 내부에서는 Mechanism Pathway 를 통하여 변수들 사이에 질량과 에너지의 교환이 시작될 것이다. 이러한 Process-Response System 은 수학적으로는 시스템 내부의 모든 변수들을 동시에 연동시키는 결과이며 결국에는 시스템이 완전히 연동된 후 새로운 평형상태에 도달할 것이다. 시스템의 완전한 연동이란 한 쌍의 원인-결과를 나타내는 변수들 사이에 모든 Mechanism Path 들에 의한 기여를 결합하는 것으로 수학적으로는 두 변수 사이에 존재하는 모든 Forward Mechanism 과 Mechanism Feedback 에 의한 결과를 합성하여 식 3.3 과 같이 표현할 수 있다. 식에서 \oplus 기호는 원인-결과 변수간의 모든 Mechanism 의 동시작용을 나타낸다.

$$dX_j = \frac{\sum_{1 \leq path(i_j) \leq m}^{\oplus} \left[\prod_{k=0}^n f'_{i_k i_{k+1}}(X_{i_k}) \right]_{path(i_j)}}{1 - \sum_{1 \leq loop(i) \leq m}^{\oplus} \left[\prod_{k=0}^n f'_{i_k i_{k+1}}(X_{i_k}) \right]_{loop(i)}} \cdot dX_{i_0} \quad (3.3)$$

상기 식은 시스템의 모든 원인-결과 변수간에 완전하게 연동된 Mechanism을 나타내는 일반식으로 이를 Binary Interaction Matrix (BIM)와 관계시켜 똑같은 형태의 Matrix 로 표현하면 다음과 같이 나타내고 Global Interaction Matrix (GIM) 이라 불리운다.

$$GIM = [F'_{ij}] = \begin{bmatrix} F'_{11}(X_1) & F'_{12}(X_1) & \cdots & F'_{1i}(X_1) & \cdots & F'_{1n}(X_1) \\ F'_{21}(X_2) & F'_{22}(X_2) & & F'_{2i}(X_2) & & F'_{2n}(X_2) \\ \vdots & & \ddots & & & \vdots \\ F'_{i1}(X_i) & F'_{i2}(X_i) & & F'_{ii}(X_i) & & F'_{in}(X_i) \\ \vdots & & & & \ddots & \vdots \\ F'_{n1}(X_n) & F'_{n2}(X_n) & \cdots & F'_{ni}(X_n) & \cdots & F'_{nn}(X_n) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1i} & \cdots & G_{1n} \\ G_{21} & G_{22} & & G_{2i} & & G_{2n} \\ \vdots & & \ddots & & & \vdots \\ G_{i1} & G_{i2} & & G_{ii} & & G_{in} \\ \vdots & & & & \ddots & \vdots \\ G_{n1} & G_{n2} & \cdots & G_{ni} & \cdots & G_{nn} \end{bmatrix}$$

Global Interaction Matrix (GIM) 으로 부터 모든 변수들간에 완전히 결합된 시스템 전체의 반응이 직접적으로 얻어진다. 즉 원인을 제공하는 변수 X_i 가 어떤 입력값 (ΔX_i) 으로 인하여 교란되면 영향을 받는 변수 X_j 는 시스템 차원에서 어떤 출력값 (ΔX_j) 만큼 영향을 받는 것을 의미한다. 이를 식으로 표현하면 식 3.4 와 같다.

$$\{\Delta X_j\}_{output} = \{\Delta X_i\}_{input} \cdot GIM \quad (3.4)$$

Process-Response 결과가 주는 시스템의 총체적 상태를 GIM 으로 부터 다음과 같이 확인할 수 있다
 -GIM의 가로줄(오)은 시스템의 한 변수가 모든 다른 변수에게 어떻게 영향을 주고 있는지를 말해준다
 -GIM의 세로줄(열)은 시스템의 모든 다른 변수가 한 특정한 변수에게 어떠한 영향을 주고 있는지를 말해준다.

-GIM의 주 대각선 항은 그 항에 속한 변수가 스스로 한 쌍의 원인-결과 변수가 되어 주고 받는 Mechanism Feedback 을 의미한다.

3.3 Critical Path Mechanism

주변 System 또는 환경과 조화롭게 공존하면서 실현하고자 하는 시스템을 최적화 하기 위하여 Control System 의 개입이 요구된다. MPAM 이론에서 Control System 은 Critical Mechanism Path Analysis (CMPA) 에 의해 수행된다. 시스템을 공학적으로 통제하기 위해서는 시스템을 통치하는 주요 Mechanism 들이 확인되어야 한다. 이 주요 Mechanism 들은 각 쌍의 원인-결과 변수 간에 형성된 모든 Pathway 중에 가장 영향을 크게 주는 Critical Mechanism Pathway 이다. 시스템을 구성하는 모든 변수들 간에 Critical Mechanism Pathway 는 Process-Response 과정동안 시스템이 연동될때 변수 간에 형성된 각각의 Mechanism Pathway 를 비교하므로써 확인될 수 있으며 Critical Forward

Mechanism 과 Critical Mechanism Feedback 으로 구성된다. 따라서 변수간에 Fully Coupled Critical Mechanism 은 변수 간에 존재하는 이 두종류의 Critical Mechanism 을 연동시키므로써 구할 수 있고 일반식은 3.5 와 같이 표현되고 식에서 \oplus 기호는 원인-결과 변수간의 모든 Mechanism Pathway 를 비교하는 기능을 나타낸다.

$$dX_j^c = \frac{\sum_{1 \leq path(i_j) \leq m} \left[\prod_{k=0}^n f_{i_k i_{k+1}}'(X_{i_k}) \right]_{path(i_j)}}{1 - \sum_{1 \leq loop(i) \leq m} \left[\prod_{k=0}^n f_{i_k i_{k+1}}'(X_{i_k}) \right]_{loop(i)}} \cdot dX_i \quad (3.5)$$

Critical Mechanism Path Analysis (CMPA) 로부터 Critical Effect Matrix (CEM) 와 Critical Path Matrix (CPM)를 구할 수 있다. CEM 의 각 항은 Critical Mechanism Pathway 에 대한 영향정도를 나타내고, 한편 CPM은 Critical Mechanism Pathway를 구성하는 변수들의 체인을 나타낸다. 따라서 이러한 특성을 가진 CEM 과 CPM 을 이용하면 시스템을 최적화하는 데 있어 매우 지력적인 Control System 을 구사할 수 있다.

3.4 Path Algebra 와 해석 알고리즘

지금까지 논의한 대로 MPAM 이론에 의한 시스템의 해석은 Mechanism Network 과 그에 대응하는 Adjacency Matrix 로부터 Pathway 를 발견하는 문제이다. 그러나 시스템이 매우 복잡하여 많은 변수와 Mechanism 으로 구성된다면 시스템은 매우 복잡한 Network 으로 표현되어 최적의 Mechanism Pathway 를 발견하고 그들의 값을 구하는 일이 매우 어렵게 된다. 따라서 Graph Theory 에 기초한 Path Algebra 를 도입하면 Mechanism Network 은 Adjacency Matrix 의 멱에 의해 다음 식 3.6과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} A^* &= E \oplus A \oplus A^2 \oplus \dots \oplus A^k \oplus \dots \\ &= E \oplus A \otimes A^* \\ &= E \oplus AA^* \end{aligned} \quad (3.6)$$

상기 Path Algebra Equation 에서 A 는 해당 Network 의 Adjacency Matrix 로써 결국은 시스템의 Binary Interaction Matrix (BIM)을 의미하며 A^* 는 구하고자 하는 시스템의 해로서 Fully Coupled Mechanism (FCM) 해석에서는 Global Interaction Matrix (GIM)을 의미하고 Critical Mechanism Path Analysis (CMPA) 해석에서는 Critical Effect Matrix (CEM)과 Critical Path Matrix (CPM)을 의미한다. 식 3.6의 해를 쉽게 구하기 위해서 Jordan Recursion Algorithm 이 도입되었고 적용된 FCM 과 CMPA 를 위한 해석 알고리즘은 각각 다음과 같다.

Jordan Recursion Algorithm for FCM

$$a_{kk}^{(k)} = (a_{kk}^{(k-1)})^* = \frac{1}{1 - a_{kk}^{(k-1)}}$$

$$a_{ik}^{(k)} = a_{ik}^{(k-1)} a_{kk}^{(k)} \quad \text{for } i \neq k$$

$$a_{kj}^{(k)} = a_{kk}^{(k)} a_{kj}^{(k-1)} \quad \text{for } j \neq k$$

$$a_{ij}^{(k)} = a_{ij}^{(k-1)} + a_{ik}^{(k-1)} a_{kk}^{(k)} a_{kj}^{(k-1)} \quad \text{for } i \neq k, j \neq k$$

Jordan Recursion Algorithm for CMPA

$$a_{kk}^{(k)} = (a_{kk}^{(k-1)})^* = \frac{1}{1 - a_{kk}^{(k-1)}}$$

$$a_{ik}^{(k)} = a_{ik}^{(k-1)} a_{kk}^{(k)} \quad \text{for } i \neq k$$

$$a_{kj}^{(k)} = a_{kk}^{(k)} a_{kj}^{(k-1)} \quad \text{for } j \neq k$$

if there is a common node between $a_{ij}^{(k-1)}$ and $a_{kk}^{(k-1)}$:

$$a_{ij}^{(k)} = \max(a_{ij}^{(k-1)}, a_{ik}^{(k-1)} a_{kk}^{(k)} a_{kj}^{(k-1)}) \quad \text{for } i \neq k, j \neq k$$

else

$$a_{ij}^{(k)} = \max(a_{ij}^{(k-1)}, a_{ij}^{(k-1)} a_{kk}^{(k)}, a_{ik}^{(k-1)} a_{kk}^{(k)} a_{kj}^{(k-1)}) \quad \text{for } i \neq k, j \neq k$$

4. TBM 기계굴착 시스템에 대한 MPAM 이론의 적용

Tunnel Boring Machine (TBM)에 의한 기계굴착 시스템은 하나의 Open System 으로 암반, 커터헤드, 기계 및 굴진율을 포함하는 운용조건에 관련되는 변수들 간의 관련 셀(set) 이다 (Cigla and Ozdemir, 2000). 이 조건들의 하나의 결정은 다른 조건들에 의해 의존하기도 하고 또한 다른 조건들에 영향을 준다. 따라서 이 조건들은 시스템 안에서 서로 원인-결과의 관계를 형성하고 있기 때문에 프로젝트의 목적과 Open System 의 공학적 목적을 올바르게 달성하기 위해서는 시스템적 접근 방법이 요구된다. 또한 공학적 목적을 달성하기 위한 시스템의 완전한 통제는 시스템의 모든 변수들의 원인-결과의 관계 Mechanism 은 물론 그들을 완전히 연동시켜 해를 구할 수 있을 때 가능해진다. 따라서 TBM 굴착시스템에 대한 해석모델은 특별히 규정된 조건하에서 주어진 TBM 의 수행능력을 평가할 수 있을 뿐만 아니라 커터헤드에 대한 설계를 최적화하고 기계성능에 대한 요구조건을 규정할 수 있어야 한다.

4.1 기존 해석모델

TBM의 수행능력을 평가하는 방법을 위해 두개의 해석모델이 제시되어 있다. 하나는 NTH 모델로 TBM 전체시스템이 현장에서 경험에 의해 획득한 수행결과에 기초되어 있고 다른 하나는 CSM 모델로 각개의 커터에 작용하는 절삭력에 기초되어 있다. 각각의 접근 방법은 서로 다른 적용특성과 함께 장단점을 갖고 있다. NTH 모델은 Norwegian Institute of Technology 의해 개발된 것으로 전형적으로 암석특성, 암반조건, 기계변수 및 굴진을 간에 회귀분석으로 부터 얻어진 경험적 그래프와 방정식의 셀(set)이다. 이 방법의 주요한 의미는 굴착시스템과 지반의 효과를 복잡한 전체시스템 내에 자연적으로 포함시키고 있다는데 있다. 그러나 한편으로는 이 방법이 주로 과거의 자료에 심하게 의존하고 있기 때문에 이 방법에 의한 예견능력이 신규 시스템이 유사한 상황일 때만 효과적일 수 있다는 것이다. CSM 모델은 Colorado School of Mine 에서 개발한 방법으로 각개 커터의 절삭력으로 부터 시작하여 전체 기계추진력, 전체 커터헤드의 동력 요구조건을 결정한다는 것이다. 예측된 값들은 실제 설치된 기계의 추진력 및 동력과 비교한 후 힘의 평형이론에 의해 최대로 성취할 수 있는 굴진율이 결정된다. 커터의 절삭력 평가는 실험크기의 절삭시험에 의해 제공되기도 하는데 이 시험방법이야 말로 가장 신뢰할 수 있고 정확한 방법이다. 이 두가지의 기존 모델들은 TBM 기계굴착시스템을 공학적 목적을 위해 제어하는데 많은 한계도 갖고 있다. 두 모델은 주로 주어진 암석과 특정한 기계를 사용하는 조건하에서 굴진율을 예측하는데 초점을 맞추고 있고 미지조건의 결정이 나머지 조건이 기지 일때만 가능하도록 되어 있기 때문에 시스템의 최적시스템의 달성을 위한 공학적 제어에 한계를 제공하고 있다. 새로운 기계장치와 적용할 수 있는 암반의 조건이 사전에 예정된 굴진율 조건 하에서 시스템의 해석모델에 의해 설계되고 결정될 수 있을 때 진정한 공학적 제어가 가능해 진다.

4.2 NTH 예제모델의 해석

TBM 기계굴착시스템을 상세히 조사하고 TBM 굴진율 예측을 위한 기존 모델을 평가하기 위하여 오스트리아의 Wienerwald 터널을 대상으로 Jodal과 Stempkowski (1995) 에 의해 수행된 NTH 모델의 실예를 제시하고 이를 분석하였다. 주어진 예제의 시스템을 구성하는 변수는 15 개이고 알려진 방정식은 10 개로 다음과 같다.

<시스템 변수>

d : The diameter of Cutter Head (m)

N : The number of Disks (pcs)

M_d : Torque of the Cutter Head (KNm)

n : Rotational Speed of the Cutter Head (RPM)

V : Linear Disc Speed (m / min)

P : Net Penetration Rate (mm / RPM)

I : Net Rate of Advance (m / h)

$F (= F_{\max})$: Max Drilling Force (KN)

F_{crit} : Critical Drilling Force (KN)

F_{crit-0} : Drilling Force (KN)

F_{dri} : Rock factor for DRI

DRI : Drilling Rate Index (%)

σ_c : Rock Strength (Mpa)

fg : Rock Mass Factor

DEG : Angle between tunnel axis and plane of weakness ($^{\circ}$)

<Mechanisms>

$$N = 7 \cdot d$$

$$n = \frac{V}{\pi d}$$

$$M_d = 60 \cdot d^2$$

$$P = \left(\frac{F_{\max}}{F_{crit}} \right)^b \quad \text{where if } F_{crit} \leq 100, \quad b = 0.013 \cdot F_{crit} + 0.95$$

$$\text{if } F_{crit} > 100, \quad b = 0.035 \cdot F_{crit} - 1.25$$

$$I = 0.06 \cdot P \cdot n$$

$$F_{crit} = F_{crit-0} \cdot F_{dri}$$

$$F_{dri} = 0.0001(DRI)^2 - 0.0229(DRI) + 1.8225$$

$$DRI = 0.0016(\sigma_c)^2 - 0.6907(\sigma_c) + 118.6647$$

$$F_{crit-0} = 7.9242(fg)^2 - 66.0682(fg) + 180.5167$$

$$fg = -0.0003(DEG)^2 + 0.073(DEG) + 0.7399$$

시스템을 구성하고 있는 변수의 입력 값들은 설정된 환경 및 경계조건에 따라 변할 수 있다. 따라서 시스템 가동의 시작단계의 초기굴진율은 설정된 초기상태의 입력조건에 의해 결정되지만 추후 발생하는 굴진율은 시스템을 구성하는 변수의 값의 변화에 의존하게 된다. 본 예의 프로젝트에서 초기조건으로 주어진 변수와 그들의 값이 $d = 9.5m$, $V = 150m/min$, $F = 200KN$, $\sigma_c = 145Mpa$, and $DEG = 60^\circ$. 일 때 주어진 Mechanism 을 사용하여 예측된 굴진율은 $I = 1.4870(m/h)$ 이다. 본 예에 적용된 NTH 모델에 의한 해석방법은 주어진 초기조건인 변수값에 의해 단지 굴진율만 예측할 수 있을 뿐이다. 즉 TBM 굴착시스템을 구성하고 있는 변수들을 제어하여 암반, 기계, 커터 및 운용조건에 대한 최적조건을 발견할 수 있거나 설계하는 것이 불가능하다. 따라서 이러한 해석방법의 한계를 극복하고 최적설계조건을 성취하기 위하여는 시스템의 모든 변수를 제어할 수 있는 새로운 방법론이 TBM 굴착 시스템에 적용되어야 한다. 예를들면 굴진율에 영향을 주는 변수들이 발견되어야 하고 또한 그 영향의 정도가 알려져야 한다. 그래야 프로젝트가 요구하는 굴진율을 달성할 수 있도록 영향을 주는 변수를 정량적으로 제어할 수 있기 때문이다. 마찬가지로 굴착시스템의 다른 변수의 요구조건에 대해서도 시스템을 제어할 수 있는 해석모델과 해석방법이 필요하다.

4.3 MPAM 이론에 의한 NTH 예제모델의 해석

TBM 굴착시스템의 기존모델인 NTH 모델이 갖고 있는 한계를 극복하고 시스템을 공학적 목적 달성을 위한 최적조건으로 유도하기 위해 MPAM (Mechanism Path Analysis Methodology) 이론에 의한 해석방법이 예로 제시된 NTH 모델에 적용된다. 그러나 비록 MPAM 해석방법론이 적용된다 하더라도 기존 모델의 해석방법론이 갖고 있는 한계는 극복할 수 있으나 모델 자체가 갖고 있는 변수의 종류나 Mechanism 의 제한에서 오는 단점은 극복하기 어려울 것으로 예상된다. 주어진 시스템 변수 15개와 주어진 10개의 회귀방정식으로부터 유도된 14개의 Binary Mechanism을 이용하여 Labeled Mechanism Network 을 그리면 그림 4.1 과 같다. 이 Mechanism Network 으로부터 시스템은 크게 4개의 그룹, 즉 기계(Machine), 암반(Rock), 커터(Cutter), 굴진율(Advance Rate) 등으로 나눌 수 있는데 특이할 만한 것은 그룹과 그룹간에 소속된 변수들이 서로 직접적인 Interaction 관계가 형성되어 있지 않을 뿐

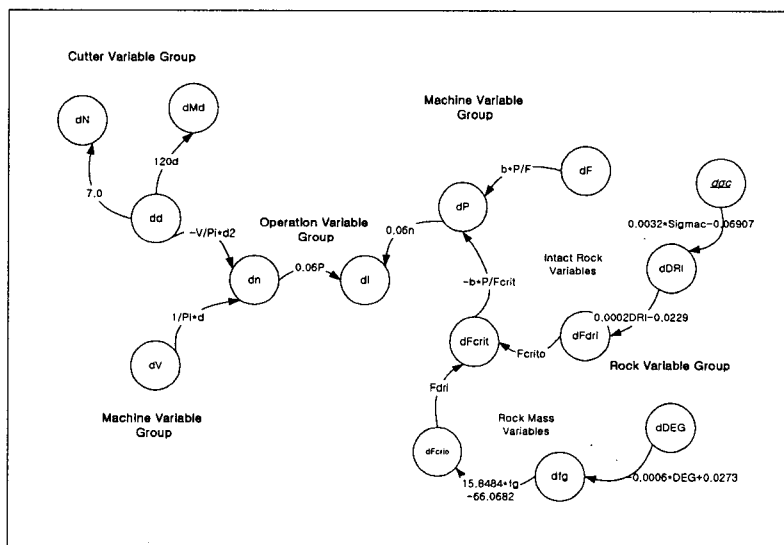


그림 4.1 Labeled Mechanism Network

만 아니라 시스템에 존재하는 변수들 사이에 Forward Mechanism Path 만 있을뿐 Feedback Loop 는 찾아볼 수 없다는 것이다. 이것으로 인하여 MPAM 해석이론이 적용된다 하더라도 기존 모델이 갖고 있는 근본적인 문제로 인하여 시스템을 충분히 제어할 수 있는 결과를 도출하는데 한계가 있을 것으로 예상된다. 본 예제 모델에 적용된 Binary Interaction Mechanism 의 대부분이 비선형이기 때문에 각 변수간에 Labeled Binary Mechanism 이 상수가 아니고 입력변수의 값에 의존하게된다. 따라서 이와같은 비선형 시스템은 초기조건과 참조상태(Reference State) 의 변수값을 이용하여 Lee (2003) 가 제시한 증분방법에 의해 해석하여야 한다. 그러나 비선형 시스템의 해석 문제는 본 논문의 범위를 초과하므로 본 논문에서는 초기상태에 제시된 변수값을 기준으로 선형해석하는 것으로 그 범위를 제한한다. 본 예제 프로젝트에서 제시된 초기값은 $d = 9.5m$, $V = 150m/min$, $F = 200KN$, $\sigma_c = 145Mpa$, and $DEG = 60^\circ$. 따라서 주어진 초기값을 사용하여 Binary Interaction Matrix (BIM) 를 구하면 다음과 같다.

0.0000	-0.5290	7.0000	1140.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2959	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.00335	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3016	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0546	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.1122	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	108.1155	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0087	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	45.4986	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2267
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0125	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

시스템 전체의 거동은 물리적으로는 BIM 의 모든 변수들이 완전하게 연동되는 과정이 완료될 때 나타나게 되는데 수학적으로는 BIM 의 역으로 형성된 Mechanism Path Algebra 방정식을 Jordan Recursion Algorithm (JRA) 으로 풀때 그 결과가 아래와 같이 Global Interaction Matrix (GIM) 으로 나타난다. 본 논문에서는 이러한 계산과정을 수행하기 위하여 Matlab6 (Mathworks, 2000) 프로그램을 사용하였다.

1.0000	-0.5290	7.0000	1140.0	0.0000	-0.1565	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2959	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.00335	0.0000	0.0000	1.0000	0.0099	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3016	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0165	0.0546	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0338	-0.1122	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-3.6686	-12.1306	0.0000	108.1155	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0305	-0.1010	0.0000	0.9002	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0121	-0.0399	0.0000	0.3563	0.0000	0.3958	1.0000	0.0087	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.3860	4.5955	0.0000	-40.9578	0.0000	45.4986	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0104	-0.0344	0.0000	0.3064	0.0028	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.2267
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0460	0.1516	0.0000	-1.3514	-0.0125	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

GIM 을 사용하여 TBM 굴착시스템의 완전히 연동된 Mechanism Network 을 그리면 그림4.2 와 같다 이 Network 은 시스템이 Process-Response 거동을 완료한 후 변수간에 입출력 관계를 보여준다. Network 에 따르면 변수간에 22개의 Mechanism 이 연동효과에 기인하여 GIM 의 비 대각선에 새롭게 형성되었음을 알 수 있고 또한 BIM 에서 영(0) 이었던 주 대각선의 값이 GIM 에서는 1로 바뀌었음을 알 수 있다. 그러나 연동된 시스템의 Network 에서도 연동전과 같이 주요 그룹간에 관계가 형성되어 있지 않고 또한 어떠한 변수에서도 Feedback Loop Mechanism 을 발견할 수 없다. 이것은 근본적으로 예제 모델이 갖고 Binary Mechanism 의 결핍에서 근거하는 것이다.

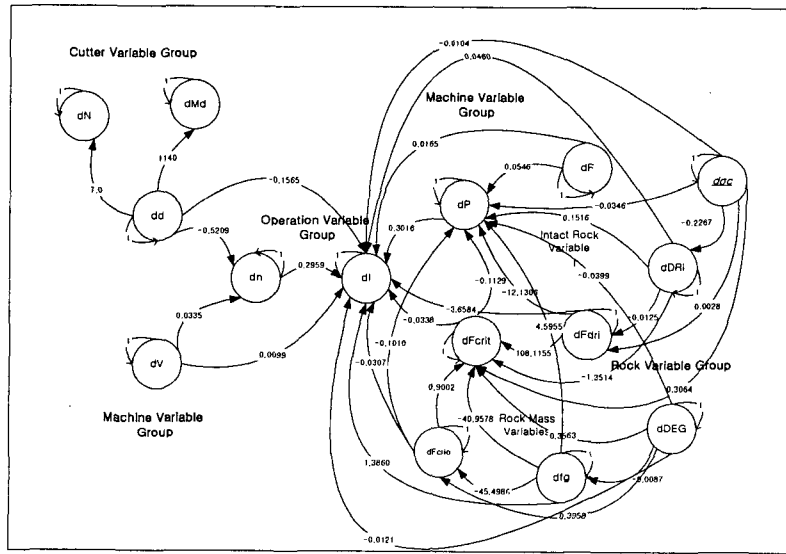


그림 4.2 Fully Coupled Mechanism Network

4.4 해석결과의 분석 및 활용

GIM 과 완전히 연동된 Mechanism Network 으로 부터 공학적 목적을 위해 많은 것들이 활용될 수 있다. GIM 은 TBM 굴착시스템을 구성하는 모든 변수들의 관계를 규명하는 결과일 뿐만 아니라 주어진 입력값에 대한 시스템의 해(solution) 이기도 하다. 따라서 다음의 함수식에 4.1에 의해서 선형시스템의 어떤 상태에 대한 해를 직접 구할 수 있다.

$$\{Outputs\} = \{Inputs\} \cdot GIM$$

$$\{\Delta X_j\}_{output} = \{\Delta X_i\}_{input} \cdot GIM \tag{4.1}$$

그러나 본 예제 문제에서 GIM 은 초기상태하에 주어진 입력변수 값에 의하여 선형화된 비선형 Binary Mechanism 에서 구한 결과이기 때문에 변수 값의 새로운 입출력은 초기상태로부터의 증분으로 간주되어야 한다. 한 예로서 도중에 시스템의 환경변화로 TBM 굴착시스템의 입력변수 값이 $d=0.5m$, $V=5m/min$, $F=10KN$, $DEG=-5^\circ$, $\sigma_c=10Mpa$ 만큼 초기조건으로부터 변화한다면 이 문제는 상기식에 의해 다음과 같이 그 해를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \{\Delta X_i\}_{input} &= \{\Delta d, \Delta n, \Delta N, \Delta M_d, \Delta V, \Delta I, \Delta P, \Delta F, \Delta F_{crit}, \Delta F_{dri}, \Delta F_{crit-0}, \Delta DEG, \Delta fg, \Delta \sigma_c, \Delta DRI\}_{input} \\ &= \{0.5, 0.0, 0.0, 0.0, -5.0, 0.0, 0.0, 10.0, 0.0, 0.0, 0.0, -5.0, 0.0, 10.0, 0.0\}_{input} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \{\Delta X_j\}_{output} &= \{\Delta X_i\}_{input} \cdot GIM \\ &= \{0.5, -0.432, 3.5, 570, -5, -0.00625, 0.4015, 10, 1.2825, 0.028, -1.979, -5, 0.0435, 10, -2.267\}_{output} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \{X_{i+1}\}_{new-reference-state} &= \{X_i\}_{initial-reference-state} + \{\Delta X_j\}_{output} \\ &= \{10, 4.5939, 70, 5985, 145, 1.48075, 5.3326, 210, 98.6067, 0.9282, 106.1365, 55, 1.3414, 155, 49.8862\} \end{aligned}$$

따라서 굴진율은 굴착시스템의 상태의 변화에 따라 초기상태보다 0.00625 m/h 만큼 감소한 1.48075 m/h 가 됨을 알 수 있다. 또한 GIM 은 공학행위를 어떻게 개선하고 최적화 할 것인가에 대한 아이디어도 제공할 수 있다. 즉 이것은 GIM을 통해 시스템의 다른 변수들이 한 특정한 변수에 미치는 영향을 알 수 있기 때문이다. 본 예에서 굴진율 (Advance Rate) 이 다른 변수들에 의해 받는 영향을 조사하면 표 4.1 과 같고 특히 암석에 관한 변수 F_{dri} 와 암반에 관한 변수 fg 가 단위값 증분에 따른 굴진율의 감소와 증가에 가장 큰 영향을 끼치고 있음을 알 수 있다.

표 4.1 굴진율 (Advance Rate) 에 대한 영향

System Variables	Effects on Advance rate
d : diameter of cutter head (m)	-0.1565
n : rotational speed of cutter head (rpm)	0.2959
N : number of disk (pcs)	0.0
M_d : torque of cutter head (KNm)	0.0
V : disc linear speed (m/min)	0.0099
I : advance rate (m/h)	1.0
P : net penetration rate (mm/rpm)	0.3016
F : max. drilling force (KN)	0.0165
F_{crit} : critical drilling force (KN)	-0.0338
F_{dri} : rock factor for DRI	-3.6586
F_{crit-0} : drilling force (KN)	-0.0305
DEG : angle between tunnel and planes	-0.0121
fg : rock mass factor	1.3860
σ_c : rock strength (Mpa)	-0.0104
DRI : drilling rate index (%)	0.0460

한편, 한 특정변수의 입력 값을 단위 값 만큼 변화시킬 때 시스템의 나머지 변수들이 어떤 반응을 보이는지도 다음 절차에 의해 조사될 수 있다. 우선 GIM 의 주 대각선 항으로부터 어떤 특정변수를 선택하여 그 값을 단위 값 만큼 변화시키면 모든 다른 변수들의 값의 변화는 바로 그 특정변수가 속한 가로줄 (오) 항의 값 들이다. TBM 굴착시스템의 실제 예에서 굴진율의 단위 값 증분이 다른 변수에 주는 영향을 아는 것은 시스템 제어 차원에서 매우 중요할 수 있다. 그러나 불행하게도 본 예를 해석한 결과 GIM 에서는 이에 관한 어떤 인과관계를 획득할 수 없다. 이것은 앞서서도 지적했듯이 예로 적용된 모델이 갖고 있는 한계로서 시스템 해석에 필요할 만큼의 Binary Interaction Mechanism 이 제공되어 있지 않고 오로지 굴진율 예측을 위한 모델역할만 하고 있기 때문이다.

5. 결론

이상의 연구와 논의로부터 다음과 같은 결론과 제안이 이루어 진다. 첫째는 기존 모델의 해석 방법론은 시스템 제어를 위해 적합하지 않다. 기존 모델의 해석방법은 단순히 알고 있는 Mechanism 의 산술적인 계산에 기초하고 있으며 시스템 변수간에 연동효과는 물론 충분한 인과 관계도 끌어 내지 못한다. 그러나 MPAM 이론에 의한 해석방법을 적용하면 기존 해석방법의 한계를 극복할 수 있다. 둘째는 기존 모델에 적용된 Binary Mechanism 은 System Control 을 위해 충분치 못하다. 즉 기존 모델은 충분한 Binary Mechanism 을 확보하지 못하고 있을 뿐만 아니라 시스템 변수간에 Multi-pathways 나 Feedback Loop 도 존재하지 않는다. 따라서 시스템이 구성하고 있는 4개 기본 그룹간에 실제 관계된 Mechanism 의 발견과 공식화가 추가적으로 이루어져야 한다. 셋째는 상기와 같이 보완된 모델을 MPAM 이론에 의해 해석한다면 공학적 목적에 최적화할 수 있는 시스템의 설계가 가능해질 것이다.

참고문헌

1. 이완재 (2004), "A Nonlinear System Approach To Rock Engineering", ISRM Regional Symposium EUROCK2004, Salzburg, Austria.
2. 이완재, 김태홍 (2004), "Methods for the Prediction of Hard TBM Utilization Level Considering Rock Mass Properties", Korean Tunneling Association 2004 Symposium, Seoul, Korea.
3. 이완재 (2003), "A System Approach To Rock Engineering", University of Colorado at Boulder, Ph. d. Thesis, U.S.A.
4. Chorley, R. J. and Kennedy, B. A. (1971), "Physical Geography – A System Approach", Prentice Hall International Inc., London.
5. Hudson, J. A. (1992), "Rock Engineering Systems", Rock Engineering Consultants and Imperial College, University of London, Ellis Horwood, New York.
6. Jiao, Y. (1995), "Formalizing the Systems Approach to Rock Engineering", Ph.D. Thesis, Imperial College, University of London.
7. Arnold, P. N. (1993), "The Development of a Rock Engineering Systems Methodology", Ph.D. Thesis, Imperial College, University of London.
8. Carre, B. (1979), "Graphs and Network", Clarendon Press, Oxford.

9. Gondran, M. and Minoux, M. (1984), "Graphs and Algorithm", John Wiley & Sons, New York.
10. Cigla, M. and Ozdemir, L. (2000), "Computer Modeling For Improved production of Mechanical Excavators", SME 2000, Salt Lake City, UT.
11. Jodl, H. G. and Stempkowski, R. (1995), "Operations Research Aspects of TBM Drives – Case Study of The WIENERWALD Tunnel", Proceedings of The International Lecture Series TBM Tunneling Trends, Hagenberg Austria.
12. Mathworks, (2000), "MATLAB – Version 6", MathWorks, Inc.