

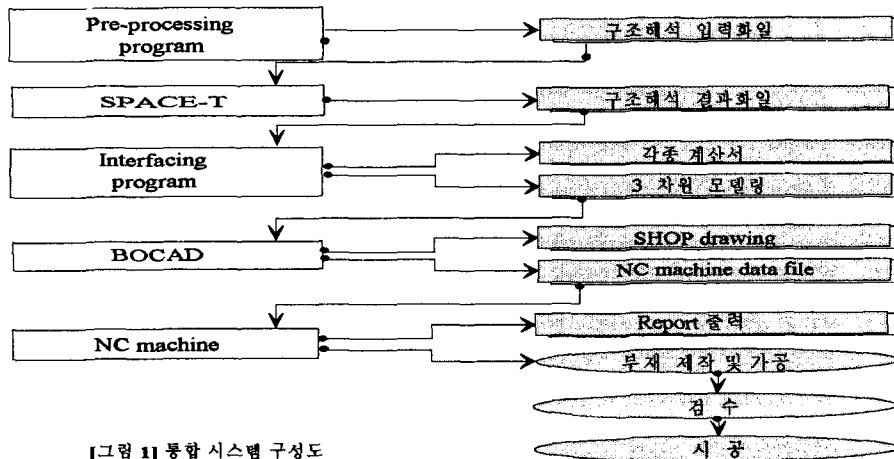
立體 트리스 構造物의 設計 및 製作 統合 시스템 構築  
Total design and manufacturing system for Space Truss structure  
이 병 해 \*                      김 홍 국 \*\*                      김 성 근 \*\*\*  
Lee, Byung Hai                      Kim, Hong Kook                      Kim, Seong Geun

The purpose of this study is to construct a total design & manufacturing system for the Space-Truss structure. In this study, we choose the transmission tower as the study model to show the possibility of a Total System for another space truss structure. We are confident that this total system should provide more convenience, accuracy and should help to save time from the design stage to construct stage of the transmission tower.

1. 序 論

오늘날 構造物들은 그 規模의 龐大함과 構造의 複雜함 때문에 設計 및 製作 까지의 모든 段階를 手作業으로 하기에는 많은 어려움을 겪게 된다. 다행히 요즘은 컴퓨터의 도입과 有限要素法 등의 導入 덕택으로 소요되는 시간의 절약과 그 정확도가 많이 向上된 것이 사실이다. 그러나 각 시스템들이 각각의 작업마다 斷絶되어있어 한 段階의 작업이 끝날때마다 다시 情報를 入力하여야 하고 임의의 단계에서 발생하는 한번의 작은 修整일지라도 전체 공정에 대한 再作業이 불가피한 상태이다. 이러한 과정에서 발생하는 시간과 경제적인 손실, 그리고 오류의 발생 가능성이 대단히 크다고 하겠다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 설계에서부터 제작까지의 모든 단계를 統合하여 관리할 수 있는 시스템의 구축이 매우 절실하며, 현재 이와같은 個別 시스템들에 대한 통합 시스템 구축 작업이 많은 企業 및 大學 등에서 활발히 진행되고 있다<sup>(1)(2)(3)(4)</sup>. 본 연구실에서도 鐵骨 및 RC/PC 콘크리트 構造物, 그리고 立體 truss 構造物 등에 對한 統合 시스템의 構築에 많은 노력을 기울여왔으며, 어느정도 活用段階에 접어들게 되었다.

본 연구에서는 이와같은 一連의 작업중에서 立體 truss 구조물에 적용하고있는 한 事例를 說明하기로 한다.



[그림 1] 통합 시스템 구성도

\* 한양대학교 건축공학과 교수  
\*\*한양대학교 건축공학과 박사과정  
\*\*\*한양대학교 건축공학과 석사과정

## 2. 研究對象 모델

본 연구에서는 研究의 對象을 立體 truss 構造物 중에서도 送電鐵塔을 택하여, 統合 處理 시스템의 效率性을 보이고 다른 一般의 對象物에 對한 統合 시스템의 構築에도 그 可能性을 提示 하는데 있다. [그림 1]은 本 研究를 통해 構築하려는 統合 시스템의 構成을 보인 것이다.

## 3. 構造物의 統合 시스템 開發 過程

### 3-1. 前處理 過程

여기에서 前處理 過程이라 함은 構造解析에서 필요로하는 入力 file을 生成 시키는 過程을 말한다. 既存의 手作業으로 입력 file을 만드는데 소요되는 시간과 약간의 錯誤나 變更으로 인한 全體工程에 미치는 影響등을 생각할때 이 과정이 매우 중요하다 하겠다.

送電 鐵塔의 一般의 形態는 팔(Arm)과 브레이스(Brace)로 構成되어 있는데 팔의 종류를 42종류로 브레이스는 52종류의 형태로 細分하여 라이브러리에 저장시켜놓아 이들을 組合하여 파라미터(parameter)를 入力함으로서 일반적인 모든 경우의 서로 다른 구조물에 對한 構造解析 入力 file의 自動生成이 可能하다. 가능한 모든 형태의 경우를 라이브러리화 하여 任意의 段階에서 디자인의 요구에 의한 브레이스나 팔의 形態 變更의 경우에도 쉽게 對應할 수 있게 하였으며, 각각의 모든 형태들을 따로 라이브러리화 하였기때문에 새로운 형태가 追加되어야하는 경우라도 기존의 것들은 변경시킬 必要가 없이 그 部分만 追加하면 되도록하였다. 그리고, 本 연구에서 개발된 前處理 過程은 다음과같이 2 段階로 이루어져 있다.

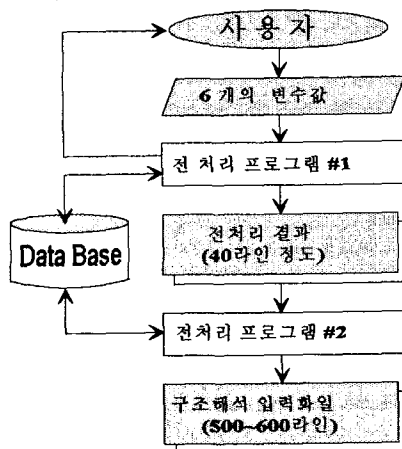
- 1 단계) 送電 鐵塔을 이루는 팔과 브레이스의 타입 그리고 設置地域에 따라 달라지는 荷重의 種類, 節點의 좌표값 등을 使用者와의 對話를 통해 알아내는 過程으로서 5-6 段階의 對話 過程만을 거치면 된다. 1 段階 前處理 過程의 실행이 끝나면 40라인 정도의 1 段階 結果 file이 生成되게 된다.
- 2 단계) 앞의 1 段階 前處理 過程에서 얻어진 結果 file을 根據로 구조물의 各 節點 座標와 荷重등을 결정하며 構造解析 프로그램이 필요로하는 精確한 入力 file(500-600 라인 정도)을 生成하는 段階이다.

아래의 [그림 2]는 本 연구에서 개발한 前處理 過程의 흐름도이다.

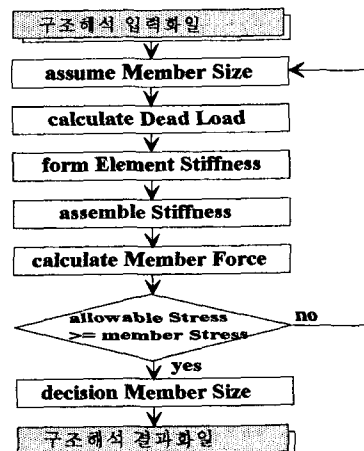
### 3-2. 構造解析 過程

本 연구에서 사용되는 構造解析의 方法은 直接 剛性法(Direct Stiffness Method)을 사용하였 으며 方程式의 解法으로는 Banded Solver를 使用하였다. 部材의 設計에는 國內의 剛構造 規準을 적용하였고, AISC와 일본의 JEC규준을 첨가 하였다.

이 構造解析 過程에서는 주어진 荷重條件에서 最適의 部材가 選擇될때까지 反復修行하게 된다. 다음의 [그림 3]은 構造解析 過程에 對한 간단한 흐름도이다.



[그림 2] 전처리 과정의 흐름도



[그림 3] SPACE-T의 흐름도

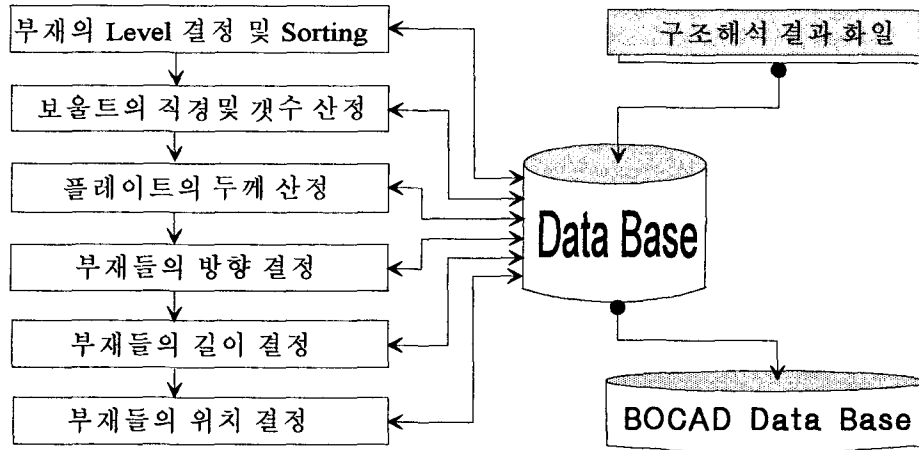
### 3-3. 實施圖面 自動生成을 위한 3次元 모델링 過程

構造解析 過程에서 얻어진 結果를 分析하여 CAD 패키지와 互換될 수 있는 형태로 data를 變換 시켜주는 過程이다. 이 過程에서는 圖面의 自動生成을 위한 작업은 물론 各 部材의 物量算出書, 計算書, 그리고 NC machine이 필요한 데이터를 얻기 위한 事前作業들이 이루어 진다.

構造解析에서 얻어진 data의 現 상태로는 部材 中心線을 잇는 程度の 그래픽 情報만을 갖고 있다. 이러한 상태에서 구조물의 實際狀況을 精確히 모델링하기 위해서는 다음과 같은 사항들이 基本的으로 考慮되어야만 한다.

- 1) 部材의 分類.
- 2) 보울트와 플레이트의 選定.
- 3) 部材의 位置 決定.
- 4) 部材의 길이 決定.
- 5) CAD시스템 내에서의 部材 生成 方法.

이 過程의 개략적인 흐름도는 [그림 4]에 나타난 바와 같다.



[그림 4] 3 차원 모델링 과정 흐름도

### 3-4. NC machine을 위한 데이터의 生成過程.

NC(Numerical Control)는 工作 機械를 數值命令에 따라 作動시키는 方式으로서 迅速, 正確, 殘材 損失 防止, 人力節減 등의 目的을 가지며, 1952년 미국의 MIT(Massachusetts Institute of Technology)에서 그 기술이 발표된 후 工作 自動化的 有力한 手段으로서 급속히 보급되었다. 이는 컴퓨터에 의한 情報處理 技術의 發展이 중요한 役割을 한 것이다.

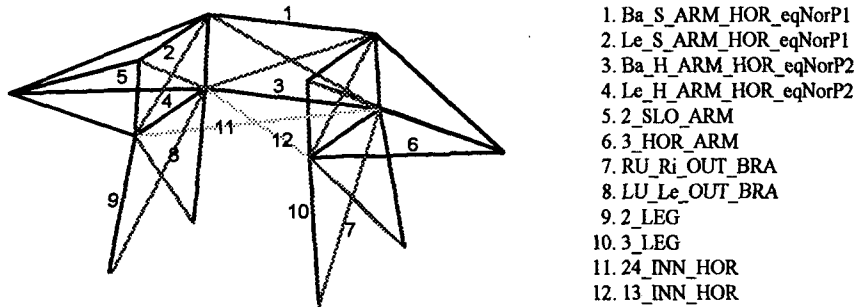
NC machine은 圖面上의 線의 形體를 座標나 幾何學的인 數值로 表現하여 部材들을 cutting, punching, drilling, marking 등의 作業을 통해 實際 組立 可能한 상태로 加工하는 裝備이며, 본 연구에서는 CAD 패키지가 이 裝備의 使用言語 형태로 圖面情報를 分析하여 NC machine의 入力 化 일을 生成 시켜준다. NC 言語들에도 使用地域과 目的 등에 따라 여러가지가 쓰이고 있으며 1965년 이후 미국의 일리노이(Illinois)工大를 중심으로 개발이 추진된 APT(Automatically Programmed Tools)시스템이 가장 代表的이라고 할 수 있다. 본 연구에서 사용한 NC machine은 MUBER<sup>(5)</sup>시스템으로서 使用하는 言語는 DSTV 形式이다.

## 4. 3次元 모델링 過程

앞에서 간략하게 소개하였던 實施圖面 自動生成을 위한 3次元 모델링 過程이 본 研究 過程 중 데이터의 變化가 상당히 많았던 부분이어서, 그 過程을 여기서 비교적 상세히 言及 하기로 한다. 이 過程에서 필요한 概略的인 考慮事項은 열거했으므로 여기서는 각각의 내용들에 대해 살펴 보기로 한다.

#### 4-1. 部材의 分類.

構造物을 CAD상에 모델링 할때 가장 先行되어야하는 작업은 각 부재마다의 名稱을 정해주는 일이다. 이 작업이 이루어지지않은 狀態에서는 部材 各各의 特性에 따라 位置 移動과 길이 變化 등을 考慮한 구조물의 狀況을 表現하기가 대단히 어렵기 때문이다. 즉, 이 分類 作業이 3次元 모델링 過程 中에서 가장 先行되어야할 作業일뿐만 아니라, 가장 重要한 作業이기도 하다. 본 연구에서는 이를 구조해석 결과로부터 알 수 있는 各 部材의 기울기와 位置등으로부터 分類하는 方法을 택하였다. 다음의 [그림 5]는 본 연구의 대상 모델중 임의의 레벨에서 分類 作業이 完了된 後의 各 部材에 주어진 名稱이다.



[그림 5] sorting된 후의 부재의 명칭

#### 4-2. 보울트 및 플레이트의 選定

모델링 작업중 중요한 또 하나는 보울트에 대한 情報과 플레이트에 관한 情報를 生成시키는 것이다. 이러한 작업을 하지않고서는 各 部材들을 正確한 位置에 生成시키지 못하기 때문이다. 보울트의 直徑, 갯수 그리고 材質의 選擇등이 必要하며, 보울트의 길이 決定은 위의 사항들이 결정된 후 縮結될 부재들의 두께와 플레이트 두께, 縮結 方法 등에 의해 決定되어야 한다.

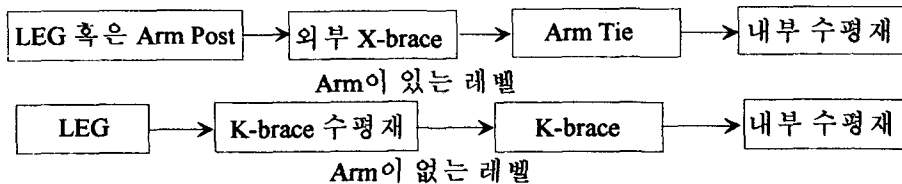
플레이트의 選定에는 먼저 플레이트가 위치하는 節點이 파악되어야하며 각 節點에서의 플레이트 두께가 正確히 계산된 以後라야 구조물의 正確한 모델링이 가능하다.

#### 4-3. 各 部材의 位置 決定.

部材들의 正確한 位置 決定을 위해서는 부재들의 相互 關係에 의한 配置 方法과 隣接 部材의 斷面크기에 대한 情報, 그리고 플레이트에 대한 情報가 考慮되어야 한다. 그러나, 構造解析 結果로부터는 도저히 決定되지 못하는 경우도 있는데, 이는 ARM 端部의 組立 形式에 따라 ARM을 이루는 부재들의 位置가 달라지기 때문이다.

#### 4-4. 部材의 길이 決定.

구조해석에서 얻어진 부재의 길이와 實際 施工되는 길이는 분명히 다르다. 그러므로 이에 대한 決定도 빠져서는 안되는 부분이다. 부재의 길이를 결정하는 가장 重要한 要因은 부재끼리의 接점의 與否이고, 또 하나는 연결에 사용된 보울트에 대한 最小 端部 거리 이다. 각 부재의 最小 端部 거리는 그 부재에 사용되는 보울트의 直徑으로부터 쉽게 구할 수 있다. 그리고 부재끼리의 接점에 대한 문제가 발생했을 경우에는 部材끼리의 相互 關係를 考慮하여야 하는데, 예를들면 外部에 붙는 X-brace의 경우 ARM POST와 接하게되는 부분은 ARM POST와 接쳐지지 않도록 X-brace의 길이가 짧아져야하는 關係 等이다.



[그림 6] 길이 결정에 대한 우선순위

#### 4-5. 空間上에서의 部材 生成 方法

앞에서 얻어진 情報들을 그래픽으로 表現하기 위해서는 使用하는 CAD에서 部材를 生成시키는 방법을 알아야만 한다. 일반적으로 部材를 生成시키기 위해 필요한 最小限의 情報는 部材의 始作點과 終點 座標값, 部材의 軸에 대한 回轉角, 그리고 部材의 profile이다.

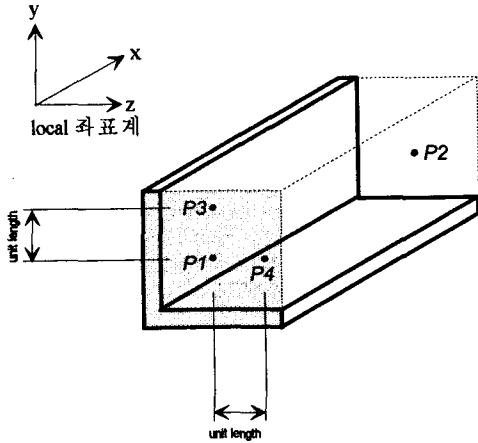
本 研究에서 使用한 CAD는 [그림 7]에서 처럼 4개의 點을 部材의 위치 결정에 사용하고, 部材斷面의 크기는 profile에 적힌 것을 취한다. 여기서,

P1 : 部材 시작점의 좌표값.

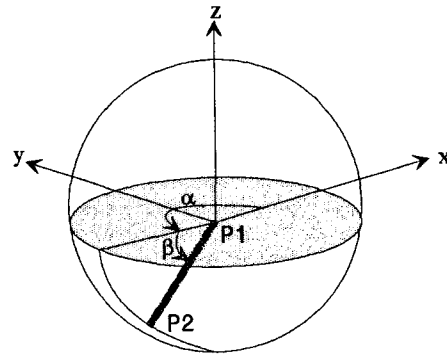
P2 : 部材 끝점의 좌표값.

P3, P4 : P1과 P2를 잇는 部材의 軸과 垂直인 面에 위치하는 點이며, 軸에대한 部材 自身의 回轉 狀態를 定義한다.

P1과 P2의 座標는 구조해석 결과로부터 이미 가지고 있으므로 P3점과 P4점의 좌표를 새로 구해야하는데 이를 구하기 위해서는 3次元 空間에서는 3개의 回轉角이 필요하다. 이중 두개의 회전각은 [그림 8]에 나타난것처럼 球 座標系<sup>(8)</sup>를 이용하면 쉽게 구할 수 있다. 그리고 나머지 하나의 회전각은 部材들 各各의 相互關係에 따라 달라지게 된다.



[그림 7] 部材의 生成에 필요한 사항



[그림 8] 球좌표계를 이용한 部材의 회전각

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{P2_z - P1_z}{L}\right)$$

$$\text{그림의 } \beta = \left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{P2_x - P1_x}{L \sin \beta}\right) \text{ 혹은}$$

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{P2_y - P1_y}{L \sin \beta}\right)$$

(1)

이렇게 두개의 軸에대한 回轉角  $\alpha$ ,  $\beta$ 와 部材軸에 대한 回轉角의 크기  $\gamma$ 만큼 회전이된 P3와 P4를 구하는데 필요한 回轉行列<sup>(6)(7)</sup> R은 다음과 같다.

$$[R] = [A][B][C] \text{ ----- (2)}$$

여기서

$$[A] = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{----- (3)}$$

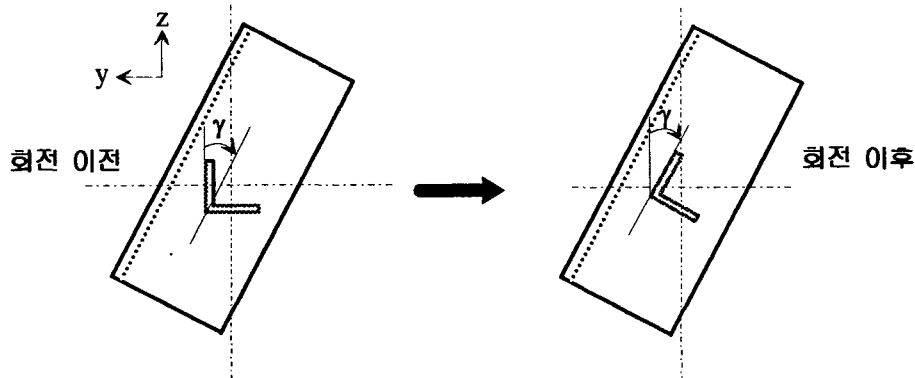
$$[B] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \text{----- (4)}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} \cos\gamma & 0 & -\sin\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\gamma & 0 & \cos\gamma \end{bmatrix} \text{----- (5)}$$

즉, 각 부재의 4 점의 좌표는 아래의 식(6)에서와 같이 구할 수 있다.

$$\{ \text{Global 좌표} \} = [R] \{ \text{Local 좌표} \} \text{----- (6)}$$

식(5)에서  $\gamma$ 의 크기는 [그림 9]에서 보는 바와 같이 부재 상호간의 관계에 따라 달라지게 된다. 즉, 부재 자신이 連結되어야 할 다른 部材의 2次元 기울기(여기서는 YZ平面)  $\gamma$ 만큼 自身의 部材軸을 中心으로 回轉하여야 한다.



[그림 9] 부재축에 대한 회전

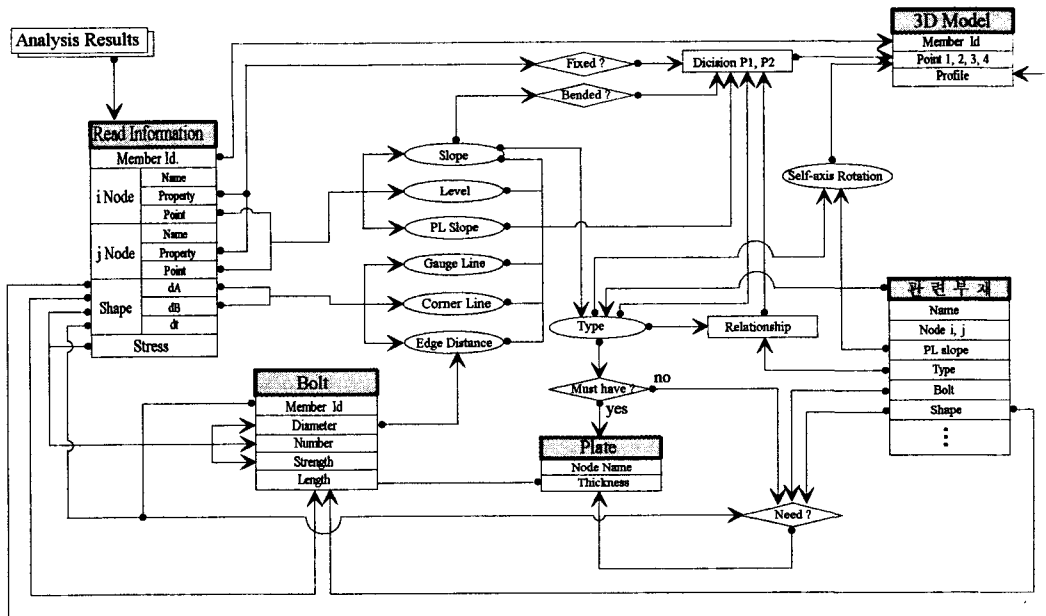
## 5. 데이터의 構造 및 흐름

### 5-1. 實際 狀況 모델링에 必要한 데이터의 흐름.

아래의 [그림 10]은 全體 構造物중 任意의 한 부재가 實際 狀況에 맞게 모델링되기 위해 거쳐야 하는 데이터의 흐름을 간략하게 표현한 것인데, 모든 부재가 이와 同一한 經路를 거치는 것은 아니다. 이는 構造物의 組立過程을 생각하면 쉽게 알 수 있는데, 一例로 構造物의 특성상 LEG 부재는 精確한 위치에 놓여지기 위해 다른 部材의 位置를 考慮할 必要가 없다. 즉, 構造物을 모델링하는 동안 그 構造物을 이루는 각각의 부재들이 모두 [그림 10]의 데이터 흐름도와 同一한 方式의 데이터 흐름을 갖는것은 아니다.

### 5-2. 實際 狀況 모델링을 위한 各 部材의 데이터 構造

앞에서 살펴본바와 같이 構造物을 實際 狀況대로 모델링하기 위해서는 構造解析에서 나온 情報들로부터 부재들간의 相互關係를 考慮하여 여러가지의 정보를 더 얻어내야만 한다. 다음의 [그림 11]은 본 연구로부터, 實際 狀況과 동일하게 構造物을 모델링하기 위해 必要한 各 부재의 最小限의 데이터 構造를 나타낸 것이다.



[그림 10] 데이터의 흐름

Member structure		
NAME		DISCRIPTION
ID		member identity
Name		member name
Node i	Name	about start point
	Property P1	
Node j	Name	about end point
	Property P2	
P3		define member rotation
P4		
P5		gauge line
P6		
P7		edge line
P8		
CG		gauge distance of member
Slope		member 3D slope
PL slope		member 2D slope
Rotation		self-axis rotation angle
Level		member location level
Shape	dA	section size of angle
	dB	
	dt	
Type		property of member
Stress		loaded stress of member
Strength		strength of member
e1		minimum edge distance
Bolt	Number	about bolts
	Diameter	
	Strength	
	Length	

[그림 11] 임의의 부재를 위한 데이터 구조

## 6. 結 論

立體 truss의 한 종류로서, 比較的 부재들의 配置 狀況이 복잡한 구조물인 送電鐵塔을 대상으로 統合 시스템을 構築하였다. 본 구축과정을 통해 다음과 같은 결론을 얻게되었다.

- 가) 지금까지는 각각 斷絶되어 遂行되었던 여러 段階의 作業이 統合되므로써 각 단계마다의 소요되던 時間을 節約할 수 있었고, 각 단계 사이에서 발생할 수 있었던 誤謬를 最小化시킬 수 있었다.
- 나) 物量 算出 및 구조물에 대한 여러가지 情報를 迅速 正確하게 구할 수 있었다.
- 다) 구조물의 計劃 段階로부터 部品 製作까지의 과정이 自動化되므로써, 소위 "what if" 과정을 통해 最適의 解答을 얻을 수 있는 方便을 얻게되었다.
- 라) 各各의 段階마다의 약간의 修正으로 말미암은 以後 作業에 所要되던 時間과 重複된 作業을 어렵지않게 신속히 해결할 수 있었다.
- 마) 對象 모델은 송전철탑의 경우로 限定하였는데, 이번 연구에서 얻은 결과로부터 다른 종류의 입체 truss 構造物은 물론 其他 一般 鐵骨 構造物에도 이러한 統合 시스템 方法論의 導入이 可能하게 되었다.

## 7. 앞으로의 研究 課題

- 1) 最適의 基本 Frame構成과 接合部 形態 決定을 위한 知識 基盤 시스템의 導入.
- 2) 작업 과정에서 일어날 수 있는 變更과 後續 生産管理 作業등의 柔軟한 連繫를 위한 客體 指向 DB 導入을 포함한 DB의 效率化 作業.
- 3) 資材 管理등을 포함한 生産 管理와 工程 管理 등의 後續 시스템 開發.

## 8. 參 考 文 獻

- 1) 임 기식, 이 병해: "입체 트러스 구조물의 설계 자동화", 대한 건축학회 논문집 제 11 권, 제 2 호, 1991.
- 2) 김 홍국, 이 병해: "철골 구조물의 통합설계 시스템",
- 3) 부 용석, 이 병해: "입체 철골 트러스의 설계 자동화", 대한 건축학회 논문집 제 10 권, 제 2 호, 1990.
- 4) 이 병해, 김 종현: "철근 콘크리트 구조물의 설계 자동화", 대한 건축학회 논문집, 제 11 권, 제 1 호, 1991.
- 5) Muhr und Bender: "Users Manual of MUBEA-MATIC CNC-100"
- 6) William Weaver: "Computer programs for structural Analysis", D.VAN NOSTRAND COMPANY, Inc. ,1967.
- 7) Willam McGuire, Richard H. Gallagher: "MATRIX STRUCTURAL ANALYSIS", John Willy & Sons, Inc. ,1979.
- 8) Erwin Kreyszig: "ADVANCED ENGINEERING MATHEMATICS", John Willy & Sons, Inc. sixth edition, 1988.