

## 스페이스 프레임의 설계시스템화



이 재 홍\*

공동저자 : 황 재 호\*

김 상 철\*

### 1. 개 요

스페이스 프레임의 설계 과정에서 컴퓨터의 급진적인 진보와 많은 연구노력의 결과로 전체 설계 과정이 통합자동화 방향으로 진행되고 있으며, 특히 구조해석과 구조 설계분야에서 중요한 진보가 이루어져 왔다. 본문에서는 스페이스 프레임의 설계과정을 시스템화함에 있어서 자동화 방법론의 개괄적인 내용과 스페이스 프레임의 3차원적인 복잡한 형태를 표현하기 위한 Formex 대수학(FORMEX ALGEBRA)의 적용사례에 대한 설명 및 후처리단계에서 해석결과치를 가지고 코드검토에 대한 표준식의 소개와 프로그램에 대한 내용을 설명한다.

### 2. 스페이스 프레임 통합시스템

통합시스템(integrated system)이란 시스템을 구축하고자 하는 목적에 따라 여러 의미로 해석할

수 있겠지만, 건축 설계 분야에서의 통합시스템은 전처리에서부터 실시 도면처리까지 일련의 구조 설계과정을 통합, 컴퓨터시스템내에서 일괄처리함으로써 건축 구조해석과 설계 및 실시 도면 작성까지의 작업을 효율적이고 신속 정확하게 처리할 수 있는 시스템을 말한다. 시스템화에 있어서 스페이스 프레임의 특성은 첫째, 각 부재가 선부재들로 구성되어 있으며, 둘째 스페이스 프레임의 직선부재들이 절점에서 편집합이며 따라서 축력만을 전달한다. 세째, 부재 혹은 기본적인 유니트를 반복적으로 사용하는 규칙성을 가진 구조물이다.

이러한 스페이스 프레임을 통합시스템화 시키면서 다른 구조물에 대한 통합시스템을 구축하는데 있어서 원형을 제공해줄 수 있고, 구축과정에서 생성된 시스템모듈은 다른 시스템에 적용시킬 수 있다. 예를들면, 다른 철골조 오피스건물에 대한 해석결과물의 표준검토와 같은 모듈을 들 수 있다. 또한 통합시스템 구축과정을 통하여 구조설

\* 정회원, 현대건설 기술연구소 선임연구원

\*\* 현대건설 기술연구소 연구원

\*\*\* 한양대학교 건축과 박사과정

계과정에서의 실무과정에 대한 동시공학(concurrent engineering)과 리엔지니어링(re-engineering)수행을 위한 방법론에 대한 지식을 축적할 수 있다.

2.1 통합시스템의 구축과정

통합화를 추진하는 과정의 일반적인 상황을 아래와 같이 도식화해 보았다.

그림 1과 같은 순서에 의해 각 단계에서의 설계자의 준비사항은 다음과 같다.

- 대상에 관한 학습 및 대상문제의 결정
- 문제의 표면상의 움직임을 이해하기 위한 관련문제에 대한 관찰 및 조사
- 전문가 및 사용자의 실제업무 수행의 조사 및 관찰
- 전문가 및 사용자와 문제에 대한 토론
- 전문가 및 사용자의 지식을 얻는 방법에 관한 연구
- 해결하여야 할 문제 및 상황에 대처하는 방안 (지식구조 결정, 시스템 구축 방법론 결정, 입출력 결정)의 설명 청취
- 특정문제의 선정 후 전문가와 문답을 통해서 해결방법을 조사 및 관찰

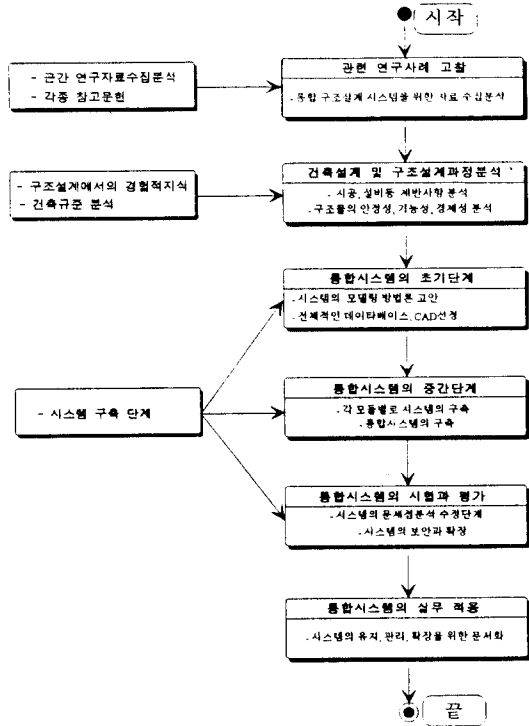


그림 1 통합시스템 구축 흐름도

2.2 시스템 구축시 고려하여야 할 제반사항

시스템의 합리화를 위해서는 구축작업에서 동시공학을 제안하는 골격의 제한사항들을 형식화하는 것이다. 제한사항들은 프로젝트에 관련된 지식만큼 프로젝트의 내용에 관한 정보에 기초해서 작성되어야 한다.

형식화될 수 있는 제한사항들은 구조적인 고려사항 혹은 건축적, 역학적, 시공적인 것으로부터 서로 상호적인 관계를 맺게 된다. 다른 분야에서 대두되는 제한사항들은 각각이 상호작용을 하게 되고, 상호적인 제한사항을 만들게 된다.

2.3 본 연구에서 사용된 시스템

본 연구를 위한 시스템구성은 다음과 같다.

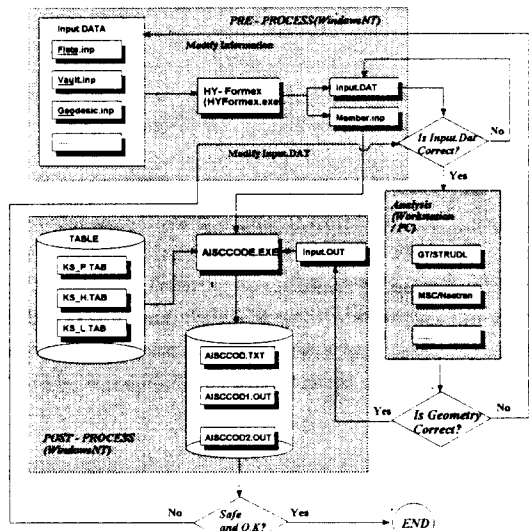


그림 2 데이터의 흐름

컴퓨터 : HP715 Workstation, 486PC  
 Operating System : WindowsNT Ver 3.5,  
 Unix X Window  
 Programing Language : Visual C++ Ver 2.0  
 Analysis Package : GT/STRUDL Ver 9401  
 Network Program : Intergraph Exalt Ver 2.0

본 연구에서 구축된 소프트웨어 구성은 그림 2와 같다. 현재 구축된 그림 2는 전체적인 스페이스 프레임의 설계과정중에서 구조적인 내용만이 들어가 있으며, GT/STRUDL에 대한 해석결과를 처리하도록 되어 있다.

### 3. PRE-PROCESS

본 연구에서는 스페이스 프레임의 형상을 만들기 위해 Formex대수학을 이용하였다. 이에 대한 설명과 함께 현재 구축된 실례와 본 프로그램에 대한 개요는 다음과 같다.

#### 3.1 포맥스 대수학(FORMEX ALGEBRA)

##### 3.1.1 FORMEX 대수학의 일반 사항

대부분의 입체 트러스 구조물이 복잡하고 수많은 부재들로 구성되어 있으나, 단위형태의 조합으로 인한 규칙성을 지닌 점을 착안함으로써, H. Nooshin에 의해 구조물의 형상을 규정하는 수학적 체계인 Formex 대수학이 제안되어졌다. 이 대수학은 평판 격자, 바렐볼트, 돔 등 여러가지 형상을 표현하는 실제적인 문제에 Formex 대수학을 적용하는 과정에서 보완과 일반화가 이루어져 왔다. M.Haristchian은 'Formices'와 'Plenices'라는 두 가지 기본개념을 통하여 규모가 큰 문제에 대한 데이터의 생성 및 구성을 이해하기 쉽게 표현하였으며, Z.S. Makowski와 Jaime S. Sanchez Alvarez는 여러가지 형태의 돔에 대하여 Formex 표현을 하였다. 또한, M.H. Yassaee는 Du Chateau에 의해서 계획된 돔과 바렐 볼트 등에 대하여 Formex 표현을 하였으며, M. Haristchian과 S. Maalek은 송전철탑에 대하여 Formex 표현을 하였다. Formex 대수학의 개념은 구

조형상의 표현 뿐만 아니라 이와 관련된 자료들을 자동생성하는데에 효과적인 수단이 된다. 즉, 여러가지 강성조직의 기하학적 특성을 손쉽게 공식화함으로써 복잡한 배열형상을 다루는데 유용하며, 흔히 적절한 컴퓨터 프로그램과 연관지어 사용되어 왔다.

##### 3.1.2 FORMEX의 도식화

Formex를 도식적으로 나타낼 수 있으며, 그 결과를 나타내는 모양을 Formex plot라고 한다. 또한 주어진 모든 기하학적인 형태를 Formex로 나타낼 수 있다. Formex와 기하학적인 형태의 상호관계는 Formex 대수학을 실제적으로 응용하는데 중요한 역할을 한다.

##### 3.1.3 FORMEX 함수

스칼라 대수학에서와 마찬가지로 Formex에서도 독립변수와 종속변수의 역할을 생각할 수 있다. 즉, 어떤 Formex E로부터 다른 Formex G가 구해질 때, 그 규칙을  $\Phi$ 라하면 이들의 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G = \Phi : E$$

여기서 ':' 기호는 Rallus라고 한다. 또한 E는 독립변수, Formex G는 종속변수의 역할을 수행하고  $\Phi$ 는 두 변수와의 관계를 정의하는 함수를 나타내게 된다. Formex 대수학에서는 이동함수, 대칭함수, 투영함수, 회전함수, 확장함수 등 다섯가지의 기본함수가 있으며, 이들을 중복한 중복함수 및 여러가지 함수를 조합한 복합함수가 있다.

##### 3.2 본 프로그램의 구성

현 시스템에는 하중조건과 지지점의 선택등에 관해서 상세히 고려되어 있지 않지만 향후에 다시 이 부분에 대한 프로그램이 확장될 예정이고, 단일형태의 구조물 이외에 복합적인 구조물의 모델링을 처리할 수 있는 모듈이 개발되어질 수 있을 것이다. 여기서는 현재까지 구축된 모델 형태에 대해 설명한다.

현 단계에서의 Formex 프로그램은 1: Flat, 2: Vault, 3: Geodesic으로 구분되어 있어 원하는 형태를 선택하게 된다. 원하는 형태를 선택하고

난후 이에 해당되는 입력화일인 \*.inp화일을 읽게 되며, Member.Dat를 위한 부재 테이블에 있는 파이프 부재의 사이즈를 결정해 주게 된다.

3.2.1 Flat Truss

평판트러스는 앞 절에서 이야기한 평면형태는 Formex 표현으로 이루어지는 가장 기본적인 트러스 형태이며 본 프로그램에서 Formex모델링하기 위한 데이터(Flat.inp)는 다음과 같다.

Flat.inp :

Flat.inp

\$NUMBER OF BAYS UNIT UX & NY

NX	NY
16	10

\$LENGTH OF UNIT DX DY AND DEPTH

DX	DY	DEPTH
1.40	1.40	1.20

위의 데이터는 모델을 형성하기 위한 기본적인 데이터일 뿐이며, 부재에 대한 데이터, 하중조건, 지지점에 대한 자료는 추가적으로 입력되어야 한다. 본 프로그램내의 Flat함수는 주 프로그램으로부터 평판트러스에 관계된 사항들만을 입력받고

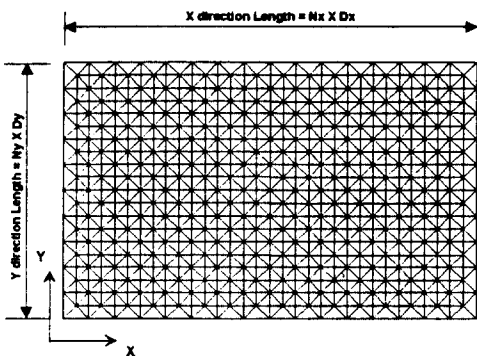


그림 3 Flat Truss의 평면도

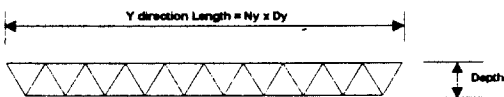


그림 4 Flat Truss의 입면도

그림 3과 같이 X방향의 스패의 길이는 Nx와 Dx에 의해 결정되고, Y방향의 스패의 길이는 Ny와 Dy에 의해 결정되며, 전체적인 높이는 depth에 의해 결정된다. Dead Load와 Live Load의 기본적인 데이터는 상부층과 하부층 절점에 따라 하중이 절점하중으로 계산되어 입력데이터에 추가된다. 그외, 세부하중에 대한 사항은 프로그램이 확장되어야 한다.

3.2.2 Vault Truss

원통형 트러스는 평판트러스와 더불어 기본적인 트러스 형태중의 하나이다. Formex 모델링하기 위한 데이터(Cylin.inp)는 다음과 같다.

Cylin.inp

Cylin.inp

\$NUMBER OF BAYS UNIT UX & NY

NX	NY	RADIUS	LENGTH
16	10	15.0	20.4

\$LENGTH OF UNIT DX DY AND DEPTH

DY	DEPTH
1.400	1.200

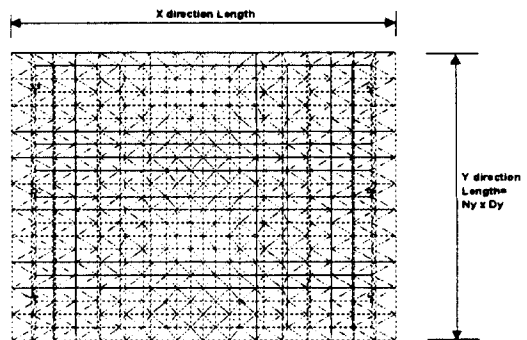


그림 5 Vault Truss의 평면

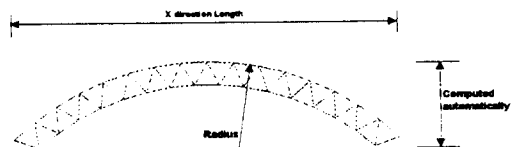


그림 6 Vault Truss의 입면

3.2.3 지오데식 돔

지오데식돔은 기본적인 트러스보다는 형상을 만들기 위한 데이터는 간단하지만 좀더 복잡한 형태를 가지고 있으므로 Formex식의 전개가 복잡해진다.

Geo.inp

Geo.inp

```

$GEODESIC TRUSS INPUT DATA
RADIUS    THICKNESS    FREQUENCY
50        2                6
    
```

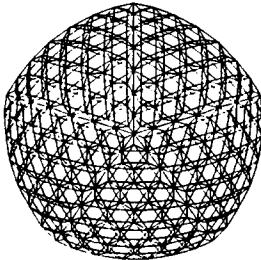


그림 7 지오데식돔 평면도

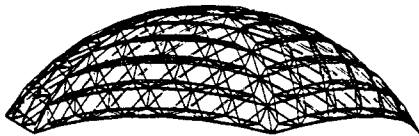


그림 8 지오데식돔 입면도

4. POST-PROCESS

본 연구에서 후처리 과정은 GT/STRU DL출력 데이터를 입력하여 AISC89코드로 검토하도록 되어 있다. 해석결과로부터 축력, 모멘트, 구조물의 정보등을 읽어들이고, 데이터를 구축하고, 부재에 대한 화일로부터 부재정보를 읽어 코드에 맞추어 검증하게 된다. 이 절에서는 후처리단계에서 화일시스템과 AISC89코드를 검토하는 프로그램 방법에 대해서 설명한다. 현재 개발된 후처리단계에서의 화일시스템의 흐름과 구성은 그림 9와 같다.

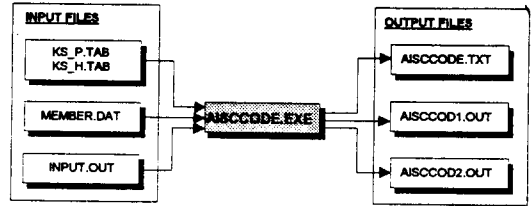


그림 9 후처리단계에서의 화일시스템

4.1 INPUT

후처리단계를 위한 INPUT화일에는 세개의 데이터(KS\_P.TAB, MEMBER.DAT, INPUT.OUT)가 필요하다. 이에 대한 각각의 용도 및 특성은 다음과 같다.

KS\_P.TAB

이 화일은 강관 파이프 부재의 자료를 가지고 있으며, 프로그램 실행중에 AISCCODE 프로그램 내에 저장되어진다. 부재의 확장이 필요한 경우에는 화일 편집기에는 표 1의 형식에 맞추어 입력시켜주면 된다. 프로그램 실행중에 부재 테이블에 없는 부재가 입력되었을 경우에는 에러가 발생하게 된다.

표 1 KS\_P.TAB의 부재표

외경 (mm)	두께 (mm)	단면적 (mm <sup>2</sup> )	단위중량 (kg/m)	단면2차 모멘트(cm <sup>4</sup> )	단면계수 (cm <sup>3</sup> )	단면2차반경 (cm)
21.4	2.8	0.81	0.93	0.71	0.67	0.66
21.7	1.9	1.19	0.93	0.59	0.54	0.70
26.7	2.9	2.15	1.19	1.54	1.16	0.85
48.6	2.4	3.48	2.73	9.32	3.83	1.64
48.6	3.2	4.56	3.58	11.80	4.86	1.61
...	...	...	...	...	...	...

MEMBER.DAT

이 DAT화일은 본 프로그램을 실행시킴으로써 생성되어지는 화일로 각 부재에 대한 부재 성질을 나타내기 위한 부재명과 그룹핑이 되어질 경우를 대비한 부재 그룹핑 이름을 가지고 있다. 부재명은 모델링시 명명되며 앞글자에는 C 그리고 한개의 원하는 문자 두개가 들어가도록 되어 있다. 부재명의 앞에는 강관일 경우 P, H형강일 경우 H, L형강일 경우 L을 앞에 쓰도록 되어 있으나, 실

행과정에서는 스페이스 프레임을 처리하므로 강관에 대해서만 검토가 되어진다. 그룹이름은 임의로 처리되지 않고 그룹핑하고자 하는 앞 부재의 이름을 기록하도록 되어 있다.

INPUT.OUT

이 화일은 GT/STRUDL에서

```
LIST SECTION FORCE SECTION FR NS 3 0.0 0.5 1.0 ALL MEMBER
PRINT STRUCTURAL DATA
```

의 옵션에 의해 해석후 생성되어진 화일의 내용이 포함되어진다. 출력화일로부터 각 부재의 축력과 모멘트등을 각 부재의 세개점에서 축출하여 최대값을 얻게 된다.

아래 출력문은 지면관계상 일부분만을 나타내어 LIST SECTION FORCE에 의한 한부재에서 3개 지점의 해석결과치를 얻게 된다.

```
- MEMBER CT200
```

---

LOADING 3		DEAD+LIVE					
DISTANCE	AXIAL	YSHEAR	ZSHEAR	TORSION	YBENDING	ZBENDING	MOMENT
FROMSTART							
.000 FR	.4150255	.7880182E+10	.4893889E+09	.3799314E+10	.4770173E+03	.2227044E+03	
.500	.4150255	.7880182E+10	.4893889E+09	.3799314E+10	.4770173E+03	.2227044E+03	
1.000	.4150255	.7880182E+10	.4893889E+09	.3799314E+10	.4770173E+03	.2227044E+03	

아래 출력문은 PRINT STRUCTURAL DATA에 대한 INPUT.OUT화일에 있는 내용이다.

```
MEMBERINCIDENCES- /LENGTH- /RELEASES- /STATUS- /
```

MEMBER	START	END	LOCALCOORD.	START	END	FORCE	MOMENT	FORCE	MOMENT
CT1	1	2	140.152			ACTIVE	SPACE	FRAME	
CT2	2	3	140.161			ACTIVE	SPACE	FRAME	
CT3	3	4	140.147			ACTIVE	SPACE	FRAME	

위의 입력화일을 가지고 AISCCODE검토를 하게 된다.

4.2 AISCCODE 실행화일

이 화일은 위의 세개의 화일로부터 코드체크를 하여 세개의 화일을 생성시켜주며, MEMBER.DAT는 MemPro에 저장이 되며, KS\_P.TAB는 SecPro에 저장되어진다. INPUT.OUT 화일을 읽고 Member 클래스의 함수에 의해 코드 체크를 하게 된다.

4.3 OUTPUT 화일

생성된 OUTPUT화일은 AISCCOD.TXT, AISCCOD1.OUT, AISCCOD2.OUT의 세개의 화일이다. 각각 화일의 특성은 다음과 같다.

AISCCOD.TXT

이 화일은 코드체크를 끝내고 그룹핑되어진 부재중에서 가장 응력비가 큰값에 대한 계산서 화일이다. 출력문은 그림 10과 같이 TEXT화일 형식으로 나타난다.

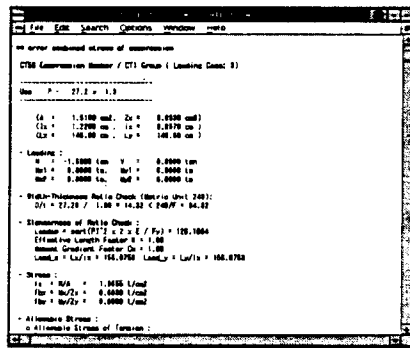


그림 10 AISCCOD.TXT 출력문

그림 10에서 “CT56 Compression Member / CT1 Group(Loading Case : 3)”는 56번 부재는 압축력을 받고 있고, CT1의 그룹중에서 응력비가 하중조건 3번에서 크게 길리고 있다는 것을 말한다. “error combined stress of compression”는 이 부재가 주어진 응력에 대해 응력비가 크게 되어 안전하지 못하다는 메시지이다. 이 앞줄에 “er-

ror b/tf”, “error shear”, “error combined stress of compression”의 에러 메시지를 표시하기도 한다.

### AISCCOD1.OUT

이 파일은 부재번호순으로 출력문을 생성시켜 준다. 그림 11. 만약, 부재의 응력비가 허용값을 넘었을 경우에는 부재이름 앞에 “\*\*”를 찍어 주도록 되어 있다. 그림 11의 파일은 CT6에서 부터 몇 개의 부재가 안전계수 1.0값을 넘고 있는 것을 보여준다.

MEMBER CODE	PROFILE TABLE	LOADING NO.	SECTION NO.	PROVISION NO.	ACTUAL/ALLOWABLE	F1/A0	F2/A0	F3/A0	UNIT
CT1	P27.2x1.9	9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 METER TON
CT2	P27.2x1.9	9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 METER TON
CT3	P27.2x1.9	9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 METER TON
CT4	P27.2x1.9	9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 METER TON
CT5	P27.2x1.9	9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 METER TON
CT6	P27.2x1.9	9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 METER TON
CT7	P27.2x1.9	9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 METER TON
CT8	P27.2x1.9	9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 METER TON
CT9	P27.2x1.9	9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 METER TON
CT10	P27.2x1.9	9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 METER TON
CT11	P27.2x1.9	9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 METER TON
CT12	P27.2x1.9	9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 METER TON

그림 11 AISCCOD1.OUT

### AISCCOD2.OUT

이 파일 그림 12은 그룹핑되어진 부재사이에서 응력이 큰 순서대로 출력문을 생성시켜준다.

Group	Member	Described	Unit	Original Size	Critical Case	Lead	Force Fx	Force Fy	Moment Mz	Unit
CT1	CT121	P27.2x1.9	1.4721	P27.2x1.9	CT121	9	-1.81	0.00	0.00	0.00 ASG
CT1	CT120	P27.2x1.9	1.4721	P27.2x1.9	CT120	9	-1.81	0.00	0.00	0.00 ASG
CT1	CT119	P27.2x1.9	1.4721	P27.2x1.9	CT119	9	-1.81	0.00	0.00	0.00 ASG
CT1	CT118	P27.2x1.9	1.4721	P27.2x1.9	CT118	9	-1.81	0.00	0.00	0.00 ASG
CT1	CT117	P27.2x1.9	1.4721	P27.2x1.9	CT117	9	-1.81	0.00	0.00	0.00 ASG
CT1	CT116	P27.2x1.9	1.4721	P27.2x1.9	CT116	9	-1.81	0.00	0.00	0.00 ASG
CT1	CT115	P27.2x1.9	1.4721	P27.2x1.9	CT115	9	-1.81	0.00	0.00	0.00 ASG
CT1	CT114	P27.2x1.9	1.4721	P27.2x1.9	CT114	9	-1.81	0.00	0.00	0.00 ASG
CT1	CT113	P27.2x1.9	1.4721	P27.2x1.9	CT113	9	-1.81	0.00	0.00	0.00 ASG
CT1	CT112	P27.2x1.9	1.4721	P27.2x1.9	CT112	9	-1.81	0.00	0.00	0.00 ASG
CT1	CT111	P27.2x1.9	1.4721	P27.2x1.9	CT111	9	-1.81	0.00	0.00	0.00 ASG
CT1	CT110	P27.2x1.9	1.4721	P27.2x1.9	CT110	9	-1.81	0.00	0.00	0.00 ASG
CT1	CT109	P27.2x1.9	1.4721	P27.2x1.9	CT109	9	-1.81	0.00	0.00	0.00 ASG
CT1	CT108	P27.2x1.9	1.4721	P27.2x1.9	CT108	9	-1.81	0.00	0.00	0.00 ASG
CT1	CT107	P27.2x1.9	1.4721	P27.2x1.9	CT107	9	-1.81	0.00	0.00	0.00 ASG
CT1	CT106	P27.2x1.9	1.4721	P27.2x1.9	CT106	9	-1.81	0.00	0.00	0.00 ASG
CT1	CT105	P27.2x1.9	1.4721	P27.2x1.9	CT105	9	-1.81	0.00	0.00	0.00 ASG
CT1	CT104	P27.2x1.9	1.4721	P27.2x1.9	CT104	9	-1.81	0.00	0.00	0.00 ASG
CT1	CT103	P27.2x1.9	1.4721	P27.2x1.9	CT103	9	-1.81	0.00	0.00	0.00 ASG
CT1	CT102	P27.2x1.9	1.4721	P27.2x1.9	CT102	9	-1.81	0.00	0.00	0.00 ASG
CT1	CT101	P27.2x1.9	1.4721	P27.2x1.9	CT101	9	-1.81	0.00	0.00	0.00 ASG

그림 12 AISCCOD2.OUT

## 5. 결 론

본문에서는 현대건설기술 연구소가 이미 개발한 스페이스 프레임의 설계자동화 시스템을 소개하였다. 현재 본 시스템을 다음과 같은 분야로 계속 활발한 연구를 진행하고 있다.

- Pre-processor 기능확장 : 부분적으로 개발한 FORMEX대수학분야의 다양한 기하학적인 모양과 경계조건 및 하중조건의 자동생성 등에 대한 기능확장
- Interface확장 : 현 연구에서는 구조해석의 main pre-processor로서 gt/strual를 채택하여 1차적으로 진행하였으나 추가적인 해석 package에 대한 interface확장
- Detail check등 한국규준, AISC, 일본철골규준, BS등에 대한 추가적인 post-processing 추가
- 해석단계에서 초기의 불합리한 부재가정으로 인해 부재의 허용응력보다 부재에 작용하는 응력이 크거나 그 차이가 클경우 적절한 부재를 자동으로 선정, 해석을 다시 수행하는 진정한 의미의 설계자동화 시스템 및 System optimization구축

위와 같은 연구 및 개발이 마무리되어 완벽한 시스템이 구축되면 스페이스 프레임 설계에 혁신적인 발전이 기대된다. 