

모델링 방법의 차이에 따른 원전 계측캐비닛의
동특성 해석결과 비교 분석
Comparative Study of Analytical Modal Properties
of Instrumentation Cabinet of Nuclear Power Plant

조 양 회* 박 형 기* 조 성 국**
Joe, Yang-Hee Park, Hyung-Ghee Cho, Sung-Gook

ABSTRACT

Safety-related equipments of nuclear power plant must be seismically qualified to demonstrate their ability to function as required during and/or after the earthquake. The seismic qualification is usually achieved through analysis and testing. Analysis method is preferably adopted for structurally simple equipments which are easy to be mathematically modeled. However, even for relatively complex equipments, analysis method is occasionally used for computing the input motion or supporting information for the component test followed. Electrical cabinet is a typical example for which analysis method is combinedly used with test to get modal properties of the enclosing cabinet structure. Usually the structural elements and doors of the cabinet are loosely interconnected with small-size bolts or spot welding. Therefore, cabinet-type equipment usually has high and complex nonlinear properties which are not easily idealized by simple practical modeling techniques. In this paper, with respect to a typical cabinet-type structure(instrumentation cabinet of nuclear power plant) a comparative study has been performed between three different state-of-the-art modeling techniques: lumped mass model, frame model, and FEM modal. From the study results, it has been found that the modal properties of the cabinet-type structure in the elastic behavior range can be reasonably computed through any type of modeling techniques in the practice with slight modification of model properties to get better accuracy. However, it needs additional modeling techniques to get reasonable results up to nonlinear range.

1. 서론

원자력발전소에 설치되는 안전관련기기는 설치 전에 그 기기가 설계지진시 혹은 그 후에도 원래의 기능을 유지할 수 있음을 입증해 보이도록 요구하고 있다. 이와 같은 입증작업 즉, "내진검증(seismic qualification)" 과정은 크게 동적해석 혹은 진동대시험을 통하여 이루어 진다. 상대적으로 기기형태가 단순하고 기능성보다는 구조적 건전성이 중요한 기기의 경우는 동적해석을 통한 해석적방법을 이용한 기기검증이 선호되는 반면에 전기 혹은 전자계측기와 같이 그 구조가 복잡하여 해석적모델 작성이 곤란하거나 기능성이 중요시 되는 기기에 대해서는 부득이 시험을 통한 검증이 이루어진다.

한편, 이상과 같은 두가지 특성을 동시에 가진 기기에 대해서는 두가지 방법 즉, 해석 및 시험을 혼용하기도 한다. 즉, 기기의 전체적인 구조시스템에 대해서는 해석적 방법을 이용하여 그 내

* 인천대학교 공과대학 토목공학과 교수, 정회원
** 인천대학교 공과대학 토목공학과 박사과정, 정회원

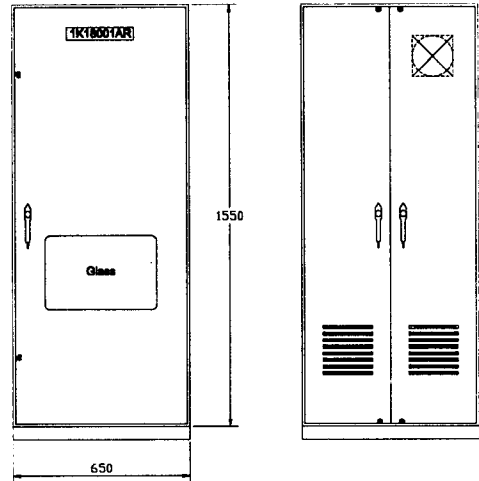
진성을 확인하는 반면, 그 기기상에 부착된 계기 및 부품에 대해서는 별도의 시험을 수행함으로써 기기 전체의 내진성을 검증하게 된다. 원전에서 대량으로 사용되는 전기 혹은 계측캐비닛이 바로 이와같은 경우에 해당된다. 즉, 전기 혹은 계측시스템을 적재하고 있는 전체 캐비닛구조는 해석적 방법에 의하여, 또 내부의 전기 및 전자 부품들은 시험에 의하여 내진검증을 수행하는 것이 일반적인 경향이다. 이 과정에서, 해석적방법에 의하여 얻어진 캐비닛의 응답이 계기 혹은 부품의 시험용 입력자료로 활용된다. 그러나, 대부분의 경우에 캐비닛의 구조적 형태가 복잡하면, 구조요소 간의 연결상태가 완벽하지 못하기 때문에 해석을 위한 모델링의 방법에 따라 그 동특성이 큰 차이를 보일 수 있다. 또한, 그 구조형태상 높은 지진운동수준(excitation level) 하에서는 심한 비선형 거동을 보일 수도 있다.

본 연구에서는 원자력발전소 지진계측시스템의 중앙처리장치캐비닛 (이하, "원전계측캐비닛")을 대상으로 실무에서 많이 사용하는 세가지의 서로 다른 해석모델을 작성하고 각각의 모델에 대하여 동특성해석(고유치해석)을 수행하였다. 이로부터 얻어진 결과를 시험을 통한 동특성분석결과와 상호 비교함으로써, 캐비닛형태의 기기에 대한 해석적방법의 적용성 여부 혹은 그 문제점을 확인하는 한편, 필요한 경우 신뢰성 제고를 위한 모델링 작성방법의 개선방향을 제시하고자 한다.

2. 대상기기 및 시험결과

2.1 대상기기

시험대상기기는 원자력발전소의 지진감시계통의 핵심부로서 계측지진신호의 기록 및 처리기능을 담당하고 있는 중앙처리장치를 보관하는 캐비닛이다. 이 캐비닛의 외형은 전후, 좌우, 높이의 길이가 각각 800mm, 650mm, 1550mm인 3.2mm 두께의 철판과 그 내부에 있는 철제 프레임으로 구성되어 있다. 한편, 이러한 형태의 기기는 그 특성상 구조적 건전정보다는 부품의 성능유지(functional operability)가 더욱 중요한 의미를 갖고 있다. 캐비닛의 구조는 전후의 문짝을 포함하는 외부철판과, 철판을 지지하고 있는 채널 및 앵글로 만들어진 수평 및 수직보강재 (내부 프레임) 및 부품설치를 위한 4개의 층 격판으로 되어 있다. 이들 구조요소들은 상호간에 용접 및 볼트로 다양하게 연결되어 있기 때문에 복잡한 비선형 거동이 예상되며, 이에 따른 높은 감쇠값이 예상되는 구조적 특성을 갖고 있다. 이러한 구조적 특성상 재료의 비선형거동에 의한 재료감쇠보다는 연결부 혹은 부품간의 마찰 등으로 인한 구조적 시스템감쇠의 특징이 강할 것으로 예상되는 기기



(가) 전면

(나) 후면

그림 1 시험대상 캐비닛의 외부 형상

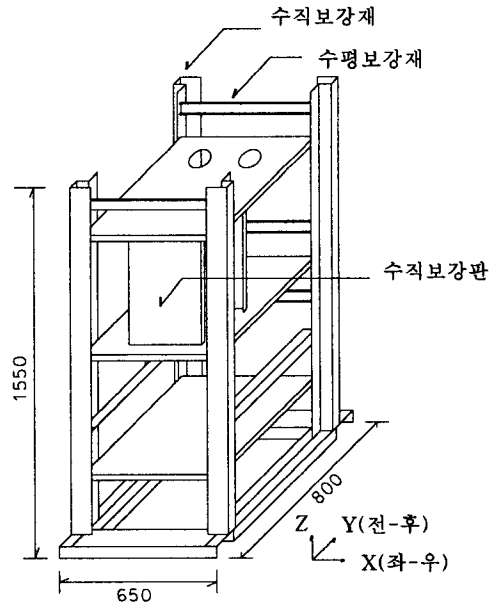


그림 2 시험대상 캐비닛의 내부프레임

이다. 이와같은 캐비닛은 설치시 볼트를 사용하여 바닥판에 고정하게 되어 있다. 그림 1과 그림 2는 대상캐비닛의 외형 및 내부프레임의 구조를 나타낸 그림이다.

2.2 시험결과

본 연구에서는 대상캐비닛에 대하여 별도로 수행된 동특성분석시험의 결과를 동특성 해석모델 및 결과분석을 위한 기준자료(baseline data)로 사용하였다. 이와 같은 동특성분석시험은 한국기계연구소의 대형 6-자유도 진동대⁽¹⁾를 사용하여 수행되었다. 이 시험의 입력운동으로서는 1~40 Hz의 진동수폭을 갖는 광대역 입력운동을 사용하였으며, 시험시 입력운동 및 응답의 계측을 위하여 총 16개의 각종 계측기를 설치하였다. 시험은 세 직각방향(그림 2 참조)에 대하여 독립적으로 수행되었으며, 각 방향별로 입력운동의 크기에 따른 기기의 동특성 변화 및 비선형거동의 여부를 확인할 수 있도록 그 크기를 최하 0.2g에서 최고 1.2g까지 0.2g 편차를 가지고 증가시켜 가면서 총 6회의 시험을 반복하였다. 이와 같이 수행된 시험의 결과는 총 720개의 시간이력 파일로 기록, 보관되었다. 이 시간이력자료는 우선 진동수 영역의 전달함수로 변환한 다음, 다항식곡선 회귀기법(polynomial curvefitting technique)⁽²⁾을 적용하여 주요 동특성을 도출하였다. 이와 같이 도출된 기기의 대표적인 동특성을 표 1과 그림 2에 요약 정리하였다.⁽³⁾

표 1 시험에 의한 대상캐비닛의 대표적인 동특성 분석결과

입력운동수준	0.2 g					1.0 g				
	X-방향			Y-방향		X-방향			Y-방향	
모드번호	1	2	3	1	2	1	2	3	1	2
고유진동수(Hz)	15.69	36.01	42.23	26.59	40.0	12.53	36.87	41.26	38.86	44.73
감쇠비 (%)	11.82	1.43	1.61	5.48	2.94	11.30	1.30	1.13	3.48	0.20

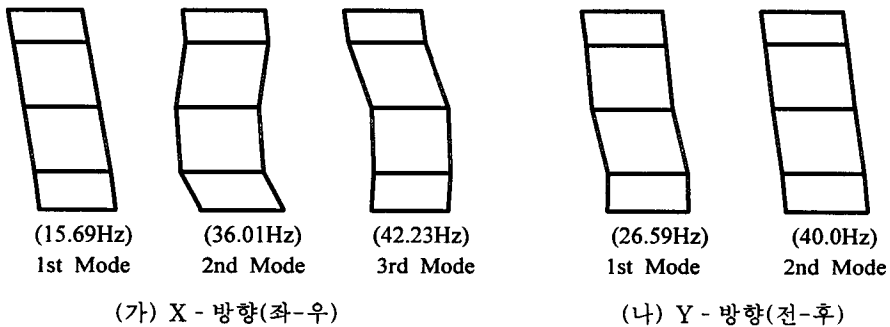


그림 2 시험에 의한 동특성분석결과로부터 구한 대표적인 고유모드 (0.2g 입력운동)

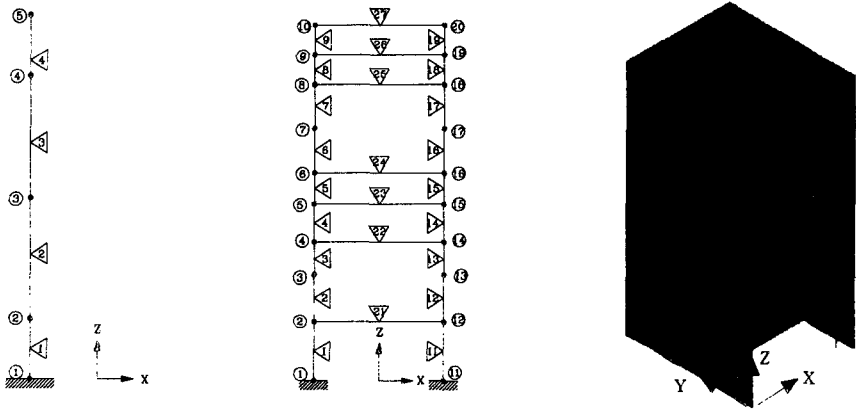
3. 해석모델 작성

3.1 개요

본 연구에서는 대상기에 대하여 현재 실무에서 일반적으로 사용하고 있는 모델링방법에 따라 3가지의 서로 다른 3차원해석모델 즉, 집중질량-보요소모델⁽⁴⁾, 프레임모델 및 유한요소모델을 작성

하였다. 등가보요소와 프레임모델은 상대적으로 정확도가 떨어지지만 실무에서는 자주 이용되고 있는 모델이며, 유한요소모델은 비교적 실제와 가깝게 모델링이 가능하여 시험치와 근사한 결과를 줄 것으로 예상된다.

모델링과정에서 요구되는 각 부재의 크기 및 두께, 각 부재간 연결상태 등은 설계도면에 표시된 자료와 현장에서 직접 측정한 실측치를 기초로하여 결정한 후, 모델 작성시에 이를 부재의 강성과 부재간 연결조건 및 경계조건 결정을 위한 기본자료로 활용하였다. 또한, 캐비닛의 앞, 뒤 문짝을 포함한 구조용강재의 중량은 강재의 표준단위중량($7.85 \times 10^{-3} \text{kg/cm}^3$)을 이용하여 직접 계산하고, 내부에 복잡하게 배치된 각 층의 기기와 전선 등의 중량은 진동대시험 수행후 해체하여 각 부품별로 중량저울을 이용하여 실측하였다. 바닥고정구를 포함한 대상캐비닛의 전체 중량은 현장에서 실측한 결과 317kg으로서 이것은 강재의 단위중량을 적용하여 계산된 구조용 강재 중량과 해체하여 측정한 내부 각 부품의 중량 및 계산 혹은 측정에 포함되지 않은 각종 소규모 내부 부품 및 전선의 중량을 포함한다. 계산 혹은 측정된 대상캐비닛의 중량을 표 2에 요약하였다.



(가) 집중질량-보요소모델

(나) 프레임모델

(다) 유한요소모델

그림 3 모델링방법에 따른 세가지 해석모델

표 2 대상캐비닛 및 구성요소별 중량

구 성 요 소		중 량	비 고
강재중량	구조용 보강재 및 판넬	182.48 kg	계산치
	바닥고정구	21.64 kg	
	문짝 (전면, 후면)	55.60 kg	
기기중량	PC (2번째 층)	14.0 kg	실측치
	전기부품(지붕상단)	12.4 kg	
잔여중량 (전선 및 연결장치)		31.88 kg	계산치
총중량		317.0 kg	실측치

3.2 작성과정 및 결과

대상캐비닛은 바닥부의 고정구(fixture) 상단에서 고정지지된 것으로 가정하여 고정구 프레임의

영향은 모델링에서 제외 하였다. 이때, 모든 구조요소의 재료특성은 강재의 표준재료특성(탄성계수 = $2.1 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$, 포와송비=0.3)을 사용하였다.

(1) 집중질량-보요소모델

집중질량-보요소모델은 횡력에 대한 캐비닛의 거동을 단일보거동으로 가정한 모델로서, 대상캐비닛의 휨강성과 축방향강성을 한 개의 등가보요소로 이상화한 모델이다. 이 모델에서는 등가보요소의 횡방향 강성을 캐비닛의 각 모서리에 위치한 수직보강재의 도심점에서 계산된 벽체와 수직보강재의 휨강성의 합으로 표현한 것으로서 수직보강재 상호간의 수평방향 연결에 따른 강성의 변화를 무시하였다. 또한, 보요소의 축방향 강성 계산시에도 동일한 단면을 고려하였다. 대상캐비닛의 구조질량 및 각 층의 기기질량은 해당 층슬래브판넬의 높이에 집중질량으로 배치하였다. 이로부터 계산된 각 절점의 집중질량특성과 등가보요소의 단면특성은 표 3과 표 4에 나타낸 바와 같다.

표 3 집중질량-보요소모델의 절점질량

절점번호	질량 (kg·sec ² /cm)	절점번호	질량 (kg·sec ² /cm)
2	78.111×10^{-3}	4	68.045×10^{-3}
3	84.345×10^{-3}	5	41.995×10^{-3}

표 4 집중질량-보요소모델의 단면특성

단면적(cm ²)	단면2차모멘트 (cm ⁴)	
	I _{yy}	I _{xx}
91.52	379.34	796.32

(2) 프레임모델

3차원 프레임모델은 캐비닛의 강성을 캐비닛의 좌, 우측에 각각 별도의 보요소로서 표현하고, 좌, 우측의 보요소를 층판넬 및 수평보강재가 위치한 각 절점에서 수평방향 보요소로 연결한 모델이다. 좌, 우측의 등가보요소의 강성은 집중질량-보요소모델의 강성을 양쪽 벽체부분으로 양분하여 계산하였다. 모델의 관성효과는 문짝을 포함한 구조질량과 내부 기기 및 부품을 포함한 층판넬과 수평보강재 등의 질량을 해당높이에 절점질량으로 배치함으로써 고려하였다. 계산된 등가보요소의 단면특성 및 각 절점의 집중질량특성은 표 5와 표 6에 나타낸 바와 같다.

표 5 프레임모델 축방향요소의 단면특성

부재 종류	요소번호 ^{*)}	A (cm ²)	I (cm ⁴)
지붕슬래브	27	25.6	0.16
층슬래브	21, 23, 25	18.56	0.16
수평보강재	22, 24	1.96	4.30
	26	3.84	8.60

*) 그림 3(나) 참조

표 6 프레임모델의 절점질량

절점번호	질량 (kg·sec ² /cm)	절점번호	질량 (kg·sec ² /cm)
2	2844.08×10^{-5}	12	2844.08×10^{-5}
3	1279.83×10^{-5}	13	1177.33×10^{-5}
4	1013.44×10^{-5}	14	1013.44×10^{-5}
5	1939.06×10^{-5}	15	1836.09×10^{-5}
6	1559.65×10^{-5}	16	1559.65×10^{-5}
8	2575.08×10^{-5}	18	2575.08×10^{-5}
9	843.33×10^{-5}	19	843.33×10^{-5}
10	1678.29×10^{-5}	20	1678.29×10^{-5}

(3) 3차원 유한요소모델

이 해석모델 작성시에는 해석대상 캐비닛을 3차원 판요소와 비틀의 영향을 무시한 3차원 보요소의 조합으로 표현하고, 모든 부재들의 연결상태를 강체연결상태로 가정하였다. 해석모델의 강성을 표현하기 위하여 좌, 우측 벽체와 지붕판넬, 각 층의 슬래브판넬 및 내부의 수직보강판은 3차원 판요소로 이상화하고, 수직보강재와 수평보강재는 보요소로써 표현하였다. 지붕과 양측 벽체 판넬의 모서리부를 따라 접혀져 보강된 부분의 강성 증가효과를 고려하기 위하여 판요소

의 단부를 따라 별도의 보요소를 추가 연결하였다. 각 층의 슬래브판넬 및 내부의 수직보강판 모서리부에 접혀져 보강된 부분과 캐비넷 앞, 뒤 문짝의 강성은 무시하였다.

표 7 유한요소모델에 사용된 보요소의 단면특성

부재 종류		단면특성	단면적 (cm ²)	전단면적 (cm ²)		단면2차모멘트(cm ⁴)	
				A ₂	A ₃	I ₃₃	I ₂₂
수평보강재	좌-우 (X-방향)		1.92	1.28	0.64	4.3	0.22
	전-후 (Y-방향)		3.2	1.6	1.6	13.35	13.35
수직보강재			7.2	2.88	4.32	63.72	63.26
판넬모서리 보강부			2.88	0.96	1.92	5.1	5.8

해석모델의 관성효과를 고려하기 위하여 대상캐비넷의 구조질량 및 각 부품의 질량은 3차원 판요소 혹은 보요소의 단위체적질량 혹은 단위길이당질량으로 입력하여 동적해석시 전산프로그램에 의해 각 절점의 집중질량(lumped mass)으로 자동 계산되도록 하였다. 강성모델에 포함되지 않은 전, 후 문짝의 질량은 양쪽 측면에 위치한 벽체의 모서리 보강부를 표현하는 보요소에 부가하였으며, 2층 슬래브판넬과 지붕판넬 상단의 기기중량은 해당 판넬에, 그 외의 잔여질량은 각 층의 슬래브판넬에 고르게 배분하였다.

표 8 유한요소모델의 질량 입력
(가) 판요소

부재 종류	측면벽체	지붕판넬	내부 층슬래브판넬			수직보강판		
			2층	3층	4층	P1	P2	P3
단위체적당질량 × 10 ⁻⁵ (kg·sec ² /cm ⁴)	0.801	2.050	3.139	1.740	1.740	0.964	0.935	1.012

(나) 보요소

부재 종류	수직보강재		벽체 모서리 보강부		지붕모서리 보강부	수평보강재	
	전면	후면	3층	4층		좌-우	전-후
단위길이당질량 × 10 ⁻⁵ (kg·sec ² /cm ²)	10.89	5.77	11.42	12.10	2.31	1.54	2.51

4. 동특성해석 및 결과의 비교분석

작성된 각 해석모델의 동특성해석을 위하여 범용전산프로그램 SAP90⁽⁵⁾을 이용하여 고유치해석을 수행하고 그 결과를 표 9에 비교하였다.

표 9 해석모델과 시험치의 X-방향 고유진동수 비교

시험치	집중질량-보요소모델	프레임모델	유한요소모델
15.69Hz	14.12Hz (-10.0%)	18.93Hz (+20.7%)	16.70Hz (+6.4%)

() 안의 숫자는 시험치와의 고유진동수 차이임.

표 9에서 보는 바와 같이 집중질량-보요소모델의 고유진동수는 시험치에 비해 약 10%정도 적게 계산됨을 알 수 있다. 이것은 일반 실무수행과정에 사용되는 방법을 따라 4개의 수직보강재를 연결하는 수평보강재의 강성을 무시하였기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 한편, 수평보강재의 영향을 보요소로서 이상화한 프레임모델에서 계산된 고유진동수는 시험치에 비해 20%정도 크게 나타났다. 이것은 수직 및 수평보강재의 복합단면에 대한 단면계수가 과다하게 계산되었을 뿐만 아니라, 수직 및 수평보강재의 연결부가 실제와는 달리 강체연결로 이상화 되었기 때문인 것으로 판단된다. 유한요소모델을 사용한 고유치해석 결과는 시험치에 비하여 약 6%정도의 차이가 발생하였으며, 이것은 실제의 대상기기가 각 구조요소 혹은 부품간에 서로 점용접(spot welding) 또는 볼트로 연결되어 있으나, 모델링 과정에서 모든 요소들이 고정 연결인 것으로 가정한 사실에 기인하는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 비교적 단순하면서도 실무에서 주로 이용되는 집중질량-등가보모델의 작성시에는 각 구조요소의 연결부에서 복합단면 효과로 인한 단면계수를 적절히 고려하지 않을 경우 실제보다 강성이 적게 표현될 수 있음을 확인하였다. 또한, 프레임모델을 사용하는 경우에는 수평방향 연결재의 모델링 방법에 따라 대상기기의 강성이 과대평가 될 수 있음을 확인하였다. 이와같은 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 기존 기술현황상의 해석방법을 통하여 캐비넷형태의 기기에 대한 공학적으로 사용 가능한 선형거동상태의 동특성을 얻을 수 있다. 단, 모델링 방법에 따라 동적해석결과가 달라질 수 있으므로, 모델 작성시 각 모델의 특성에 따라 단면계수 및 연결상태 등에 대한 특별한 고려가 필요한 것으로 판단된다. 특히, 유한요소해석모델의 작성시에는 각 부재의 볼트연결 혹은 용접연결 등의 연결상태를 고려한 해석모델 작성이 요구된다.
- 캐비넷 형태의 기기의 경우, 상대적으로 큰 입력운동(1.0g 정도 이상) 작용시에는 현저한 비선형특성을 나타내기 때문에 이와 같은 특성을 해석모델에 반영하기 위해서는 별도의 비선형 모델작성기법이 요구된다.

6. 참고문헌

- (1) 김영중외 4인, "6자유도 진동대 사용자 지침서", 한국기계연구원, 연구보고서 UCE 022-139-M, 1994.
- (2) STAR User's Guide, Spectral Dynamics, Inc., 1996.
- (3) 조양희, 박형기, "원전지진계측시스템 캐비넷의 동특성분석 시험", 대한토목학회논문집, 제19권, 제 1-3호, 1999. 5, pp. 449-456.
- (4) Cabinet analysis calculations, "Qualification of seismic instrumentation for Korea electric power corporation Yonggwang nuclear power plant Units 3 &4", Rev. B, App. D, Vol 2, Agbajian Associates Engineers and Consultants, Aug., 1992.
- (5) SAP90 Users Manual, Computers & Structures, Inc., 1992.