

# 전력용 변압기 지진강도의 분석

盧 哲 雄

(暁星重工業 技術開發室部長)

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>1. 靜 分 析           <ul style="list-style-type: none"> <li>1.1 변압기 ANCHOR BOLT 분석</li> <li>1.2 변압기 붓싱 분석</li> </ul> </li> <li>2. 動 分 析           <ul style="list-style-type: none"> <li>2.1 TIME HISTORY 법</li> <li>2.2 RESPONSE SPECTRUM 법</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>2.3 변압기 분석절차</li> <li>2.4 변압기 탱크 분석</li> <li>2.5 본체 분석</li> <li>2.6 방열판, 방열기, 방열기 뱅크 분석</li> </ul> <p style="text-align: center;">참 고 문 헌</p> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

원자력 발전소용 전기기기에 대한 지진강도 기준은 지난 십여년 동안 있는 원자력 발전소의 개발 및 성장에 따라 발전되어 왔다. 그러나, 1971년 SAN Fernando 지진시 전기기기의 사고로 인한 대책해로 해서 원자력과 관계없는 기기에 대해서도 지진에 대한 고려를 할 필요성을 갖게 되었다.

기기의 지진강도 적합성에 대한 입증은 위해서는 시험을 하거나 분석을 하는 두가지 방법이 있다. 시험에 의한 입증은 복잡하고 가벼운 기기에 적합한 반면에 분석에 의한 입증은 크고 무거운 기기나 구조물에 적합하다. 또한 시험에 의한 방법이 지진입력을 동시에 두 방향으로 인가하는 것은 불가능한 반면에 분석에 의한 방법에서는 가능하다. 전기기기의 지진강도에 대한 시험노력은 과거 수년동안 수행되고 보고되어 왔다. 그러나, 분석에 의한 대형기기의 지진강도에 대한 평가는 시험에 의한 평가처럼 널리 보고되어 지지 않았다.

여기서는 전력용 변압기의 본체 및 주요 부착기기에 대한 동분석 및 정분석 적용의 실례를 들어본다.

## 1 靜分析

지진의 주요 기주파수 영역인 20 ~ 25 HZ 보다 큰 고유주파수를 갖고 있는 장치는 보편적으로 강체

로 정의된다. 이런 장치의 경우는 무게 중심에 관성력이 작용한다고 가정하고 정분석한다.

또 다른 정분석 중의 하나는 RESPONSE SPECTRUM의 최고치에서 결정되는 가속도 및 장치의 감쇄(DAMPING)를 사용하는 방법이다. 이 방법은 그 장치가 지면이나 지지물의 지진 운동에 대해서 단중자유도로 반응한다는 것을 내포한다. 그러나 이 방법은 RESPONSE SPECTRUM을 사용했기 때문에 엄밀한 의미에서는 정분석이라고 볼 수 없다.

다음은 위의 두가지 경우에 대한 일례이다.

### 1.1 변압기 ANCHOR BOLT 분석

다음은 한국 원자력 7, 8 호기 STEP UP 변압기 (1φ, 345KV, 362MVA)의 ANCHOR BOLT에 대한 내지진 강도 계산을 한 일 예로서 변압기의 무게 중심에 관성력이 작용한다고 보고 분석한 것이다.

구매 시방서상의 내지진 강도 기준은 다음과 같다.

$$F_H = 2.5 \times SA_H \times W \quad \text{단 } SA_H = 0.1$$

$$F_V = 2.5 \times SA_V \times W \quad \text{단 } SA_V = 0.067$$

단, W : 변압기 무게

SA<sub>H</sub>, SA<sub>V</sub> : 수평 및 수직 방향으로의 가속도

F<sub>H</sub>, F<sub>V</sub> : 등가 수평 및 수직 정부하

Anchor bolt의 경우 수평 방향으로 지진력이 인

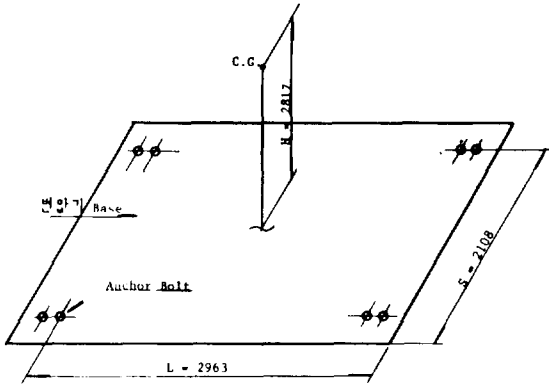


그림 1. 변압기 BASE

가 될 때가 최악의 상태라고 본다. 또 수직성분과 수평성분이 동시에 작용하지는 않는다고 가정한다.

그림 1에서 보듯이 무게 중심에서 Base까지의 거리  $H = 2.817\text{ m}$  이고 변압기 무게는  $193\text{ Ton} = 1.89 \times 10^6\text{ N}$ 이다. 여기서  $P_H = 0.25 W = 0.25 \times 1.89 \times 10^6 = 4.73 \times 10^5\text{ N}$ 이다. 변압기 길이 방향에 작용하는 모멘트를 상쇄시키기 위해서 요구되는 힘은 다음과 같다.

$$F_L = \frac{P_H \times H}{L} = 4.5 \times 10^5\text{ N}$$

폭 방향으로 작용하는 모멘트를 상쇄시키기 위해서 요구되는 힘은 다음과 같다.

$$F_S = \frac{P_H \times H}{S} = 6.3 \times 10^5\text{ N}$$

위의 두 값중 큰 값을 적용했을 때 M48 Anchor bolt (면적 =  $1.81 \times 10^{-3}\text{ m}^2$ ) 하나 당의 작용 응력  $\sigma$ 는 다음과 같다.

$$\sigma = \frac{F_S / 4}{A} = 87.29\text{ MPa}$$

위의 응력  $\sigma$ 와 Anchor bolt의 허용 최대응력을 비교함으로써 Anchor bolt의 내지진 강도를 결정할 수 있다.

### 1.2 변압기 붓심 분석

전력용 변압기의 붓심은 하나의 질량으로 구성되어 Ground Response Spectrum에 대해 단중자유도로 반응하는 감쇄 진동체로 보고 분석한다. 그것은 다음과 같은 네가지 단계로 분석한다.

1) 고유주파수  $f_0$ , 감쇄상수  $D$ , 및 진동체의 무게중심과 크기를 결정한다.

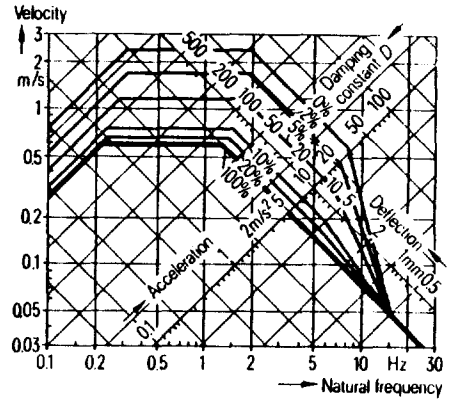


그림 2. 주요한 Response Spectrum

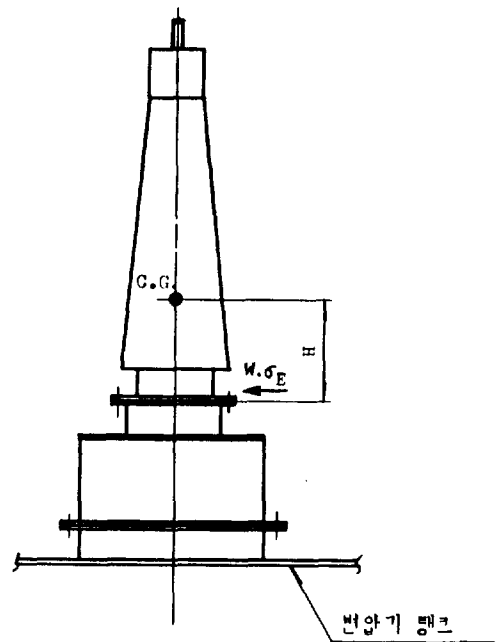


그림 3. 붓 심

2) 매개변수  $f_0$  및  $D$ 를 사용해서 하나의 질량으로 구성된 진동체 무게중심에서의 최대 Response가 속도  $a_{rsp}$ 를 결정한다. 예를들면,  $f_0 = 5\text{ Hz}$ ,  $D = 5\%$ 일때 그림 2와 같은 Response Spectrum을 사용하면 가속도  $a_{rsp} = 1.3g$ 가 된다. 이러한 사실은 붓심이 적어도 25 Hz 이상되는 기초위에 고정되어 있는 강체인 탱크에 놓여있다는 가정에서 나온다.

3) 다음 두 식을 사용하여 무게중심에 작용하는 지진력 및 그와 관련한 붓싱의 횡단면에서의 굽힘응력을 구한다. (그림 3 참조)

$$F_E = m a_{rest}$$

$$\sigma_B = \frac{M}{W} = \frac{F_E H}{W}$$

여기서 W는 붓싱 횡단면에서의 저항 모멘트이며  $F_E$ 는 지진력이며 H는 무게 중심에서의 거리이다.

4) 동시에 붓싱의 횡단면에 작용하는 다른 응력  $\sigma_s$ 를  $\sigma_B$ 에 더한 총 응력  $\sigma_v$ 를 구한다. 여기서  $\sigma_s$ 를 구성하는 것은 풍력에 의한 응력과 내부 도체의 동적 작용에 따라 발생하는 응력등이 있다.

이러한 총 응력  $\sigma_v$ 와 붓싱의 허용최대응력  $\sigma_{perm}$ 에 안전율 S를 곱한  $S \cdot \sigma_{perm}$ 을 비교함으로써 붓싱의 내지진 강도를 결정할 수 있다.

## 2 動分析

20~25HZ 이하의 고유주파수를 갖고있는 장치에 대한 동분석법에는 Time-History법 및 Response법 등 두가지가 있다.

### 2.1 TIME HISTORY법

지진파의 가속도-Time history의 기록에서 나오는 다중 자유도계의 시간의 함수로서 동적 Response는 Time History법에서 계산되어 진다. 그러나, Time history가 주어진 지진의 경우에만 부합되고, 또 지진은 서로 다른 특성을 갖는 경향이 있으므로 단 하나의 Time History 분석으로는 그 장치가 다른 지진에도 견딜 수 있는지의 여부는 알 수 없다. 그러므로 Time-History 분석은 세계나 네개의 지진 기록을 가지고 시행되어야 한다.

### 2.2 RESPONSE SPECTRUM법

Response spectrum법에서는 Mode 분석 및 Response Spectrum을 사용해서 다중 자유도 모델의 각 Mode에 작용하는 변위 및 응력을 구한다. Response Spectrum이 사용되었기 때문에 각 Mode간의 Response는 가상 최대 Response로만 나타내어지고 각 Mode간의 time-phase간의 관계는 무시된다. 그러나 확률 이론을 근거로 한 최대 Response 총합에 대한 근사치는 Mode Response의 실효치를 조합하여 구할 수 있다.

Response Spectrum법은 정밀한 분석과 대략적인 설계간의 가장 뛰어난 절충방법이라 볼 수 있다.

다음은 위와 같은 Response Spectrum을 사용하고 그 계산 방법으로는 유한요소법을 이용한 변압기 및 그 주요 부착기기에 대한 동분석 절차 및 분석절과이다.

### 2.3 변압기 분석 절차

다음은 단상 525 KV 333MVA 단권변압기 및 그 주요 부착기기의 동분석 절차이다. 변압기의 내지진 강도 평가는 대개 다음과 같은 상호 관련된 단계로 구성되어 진다.

#### 1) 지진입력의 결정

시방서에 제시된 0.5g의 Ground Response Spectrum을 사용하고 임계감쇄를 통털어 1%라 가정한다. 1% 감쇄(Damping)에 근거한 속도 Response Spectrum은 19개의 점으로 나타내어 진다. (그림 4 참조) 각 점의 사잇점들의 속도값은 전산 프로그램에 의하여 선형적으로 보간하여 나타낸다.

#### 2) 구조물의 이산화

Closed Form의 해가 존재하지 않는 복잡한 구조물은 유한 요소법으로 이산화 되어 진다. 이것은 연속체를 여러개의 정점의 연결로 이루어진 요소의 조합으로 간주하는 구조적 이산화 작업인데 이때 구조물의 각 정점에 있어서의 변위, 속도 및 가속도가 미지수이다.

#### 3) 유한요소법을 이용한 분석

각 요소를 사용한 계의 힘과 변위관계를 도출하고 그 결과 구할 수 있는 요소의 변위 및 응력에 대한 평가를 가능하게 하는 가장 이상적인 구조의 정점에

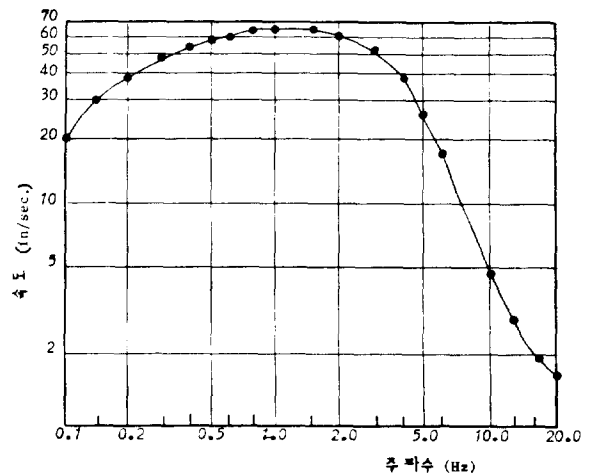


그림 4. Ground Velocity Response Spectrum

서의 평형을 만족시키는 전체 요소 조합에 대한 분석을 한다. 위에서 언급한 힘과 변위의 관계는 변위, 속도 및 가속도를 미지수로 포함하는 평형 혹은 운동 방정식이다.

4) 결과 분석 및 설계의 수정

수치해석 결과치들은 조사 분석된다. 계산된 응력이나 변위값이 요구 조건을 만족시키지 못할 경우에는 설계를 수정하고 다시 분석한다.

2.4 변압기 탱크 분석

지면을 포함한 기초보다 상대적으로 높은 강성을 가진 구조물의 경우 구조물과 대지간의 동적인 상호작용으로 말미암아 구조물 주변에 있는 대지의 움직임은 물론이고 구조물의 Base 혹은 그 Base에 접한 대지의 움직임도 영향을 받는다. 그러나, 여기서는 구조물과 대지간의 그러한 동적인 상호작용은 고려하지 않았다. 따라서 변압기 탱크는 Ground Response Spectrum으로 나타내어지는 지진운동을 하는 기초위에 견고히 지지되는 것으로 간주한다.

본체를 포함한 변압기 탱크 중량은 390 kips 이다. 여기서 탭 절환기 부분은 변압기 탱크에 비해서 크기가 작고 가벼우므로 분석하지 않는다. 변압기 탱크는 34개의 정점과 66개의 삼각형의 얇은 Shell 요소로 모델화한다. 본체의 질량이 정점 5, 25, 9, 12, 29 및 32에 집중되어 있는 반면에 탱크벽의 질량은 균등 분배되어 있다. (그림 5 참조) 보강대료 인해 구조적으로 강도가 강해지는 것은 다른 성질의 자재를 그 부위에 사용한 것 처럼 시뮬레이션 한다. 여기서는 18개의 자재성질을 사용했다.

탱크 밑바닥의 4개의 정점은 견고한 기초위에 고정된 것으로 간주한다.

표 1에서는 최초 다섯개의 계산된 고유주파수 및 서로 다른 네 방향으로 Response Spectrum 값을 인가했을 때 얻을 수 있는 그와 관련된 Mode 분담율 (MPF-Modal Participation Factor)이 나타나

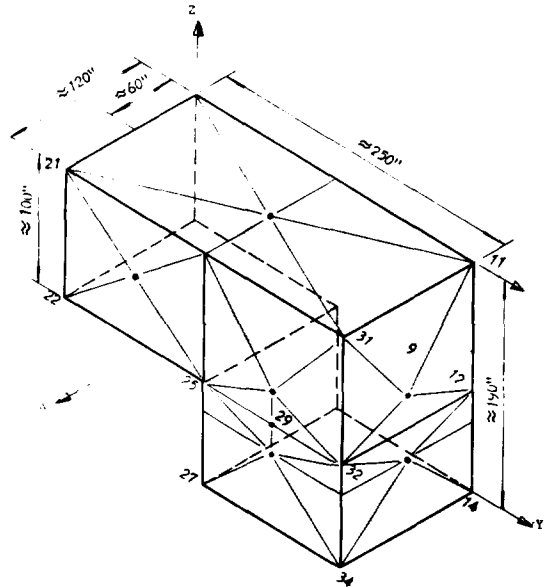


그림 5. 변압기 탱크 모델

있다.

최소 고유주파수 (28, 78HZ)가 20 ~ 25HZ 영역보다 큰 값이므로 탱크는 강체로 간주되고 그 가정 하에서 부속기기의 분석을 한다. 다시 말하면 강체인 탱크는 대지의 운동과 같이 움직이며 탱크에 부착된 부속기기에는 대지의 지진운동이 동적인 증폭 없이 그대로 부과된다.

2.5 본체 분석

그림 5는 철심 텅부 및 권선을 단순한 지지보로 이상화한 개략도이다. 그 무게는 170 kips 이고 경간을 따라 균등 분배되어 있고 관성 모멘트  $I_y$  는  $I_x$  에 비해 훨씬 크다.

표 2에는 두방향의 고유진동수와 MPF가 나타나 있다.

표 1. 변압기 탱크 분석 결과

MODE	주 파 수 (HZ)	Mode 분담율 (MPF)			
		1.0 X	1.0 Y	1.0 X + 0.67 Z	1.0 Y + 0.67 Y
1	28.78	21.96	0.77	17.73	0.10
2	28.87	-17.17	0.96	-14.96	0.13
3	29.66	3.47	0.34	2.95	0.35
4	30.72	2.14	-0.21	1.86	-0.09
5	34.83	0.003	0.7	0.22	0.80

표 2. 본체 분석 결과

주) Ground Velocity Response Spectrum : 1.0 X + 0.67 Y  
주 파 수 (HZ) (MPF)

MODE	수 직 방 향	수 평 방 향
1	15.65(10.37)	
2	62.68(1.92 × 10 <sup>-7</sup> )	
3		84.13(15.49)
4	141.89(2.74)	
5	258.42(1.6 × 10 <sup>-8</sup> )	
6		336.85(1.9 × 10 <sup>-6</sup> )
7	427.56(0.604)	
8		762.58(4.09)

경간 중심에서의 변위

MODE	수 직 방 향	수 평 방 향
1	0.015	
2	-	
3		0.003
4	-0.0003	
5	-	
6		-
7	-	
8		-0.0001

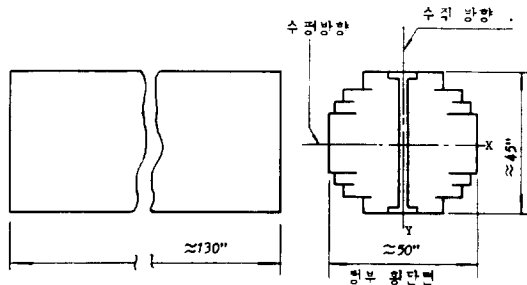


그림 6. 본 체 모 델

Mode의 형태는 그림 7에서 볼 수 있다. Mode의 형태가 경간의 중심선에 대해 비대칭일 경우 Mode 2, 5 및 6의 MPF는 영이된다. 예를들면 제 5 Mode는 수직 방향으로 작용하는 두개의 워전한 파형을 갖는 Mode인 데 그것의 MPF는 영이 된다.

Mode 1과 4는 표 2에서 알 수 있듯이 수직방향으로 작용하는 동적 Response (변위)에 큰 영향을

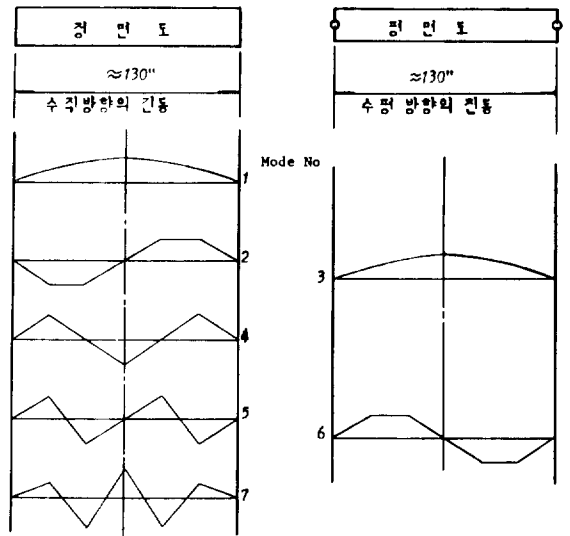


그림 7. 본체의 Mode 형태

미친다. 이것은 이러한 Mode에 대한 MPF가 매우 높은 값이라는 것과 같다.

Mode 응력의 경우도 이와 유사하게 적용되는 데 계산 결과 그 값이 매우 낮으므로 여기서는 고려하지 않는다.

2.6 방열판, 방열기, 방열기 बैं크 분석

1) 방열판 분석

너비 15 inch, 길이 164 inch, 변압기유를 포함한 무게가 104 LB인 개개의 방열판은 동등한 경도를 가진 Shell 요소로 모델화 된다. 그림 8에서 볼 수 있듯이 이 유한요소 모델은 49개의 정점과 52개의 Shell 요소로 이루어진다. 상기 모델에서 핀이 정점 19, 20, 30, 35 및 38에서 방열기 헤드에 고정된다고 가정하며 정점 3, 6, 9, 41, 44 및 47에 보강대가 있어 변위가 선형적으로 변하는 것을 억제한다고 본다.

표 3은 Response Spectrum Mode 분석 결과치이다. 제 2차 Mode만이 높은 MPF를 가지므로 응력은 거의 제 2차 Mode의 영향만 받는다.

2) 방열기 분석

방열기 1조에 대한 분석은 다음과 같다. 방열기는 36개의 방열판으로 이루어져 있는데 그것은 대각선의 보강판을 갖고 있고 방열기 헤드에 연결되며 변압기유를 포함한 무게가 3700 LB이다.

방열판에서와 같이 Shell 요소를 사용해서 36개의 방열판을 모델화 하면 정점과 요소의 수가 너무 많

표 3. 방열판의 Response Spectrum 분석  
 주) Ground Velocity Response Spectrum : 1.0 Z

MODE	주 파 수 (HZ)	MPF	요 소 의 응 력 (psi) (최대값)
1	10.5	$0.22 \times 10^{-4}$	-
2	16.2	0.88	863
3	36.4	$-0.10 \times 10^{-5}$	-
4	38.7	$-0.15 \times 10^{-4}$	-
5	42.1	$0.34 \times 10^{-4}$	-

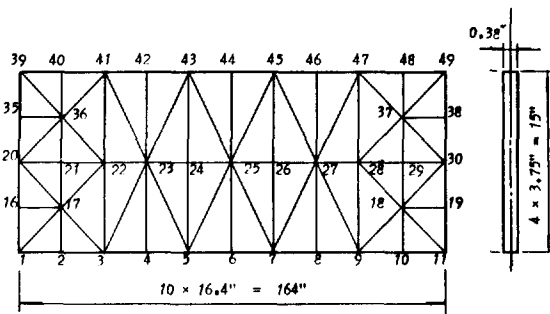


그림 8. 방열판 모델

방열기 모델의 처음 두 고유 주파수는 3.12와 18.24로 계산된다. 그리고 정점 78에서 상기 주파수와와 관련한 z 방향의 Mode 변위는 각각 3.3inch와 0.01 inch이다. 이와같이 지지부분에 계산된 응력이 매우 높은 것은 방열기가 한개인 경우 강성이 낮은 때문인데 그것은 그 부분의 기본 주파수가 3.12 HZ

표 4. 방열기 Bank의 고유주파수

주) Ground Velocity Response Spectrum : 1.0 Z + 0.67 X

MODE	주 파 수 (HZ)	MPF
1	9.83	3.31
2	15.06	2.53
3	15.37	1.14
4	18.65	0.44
5	26.68	1.92

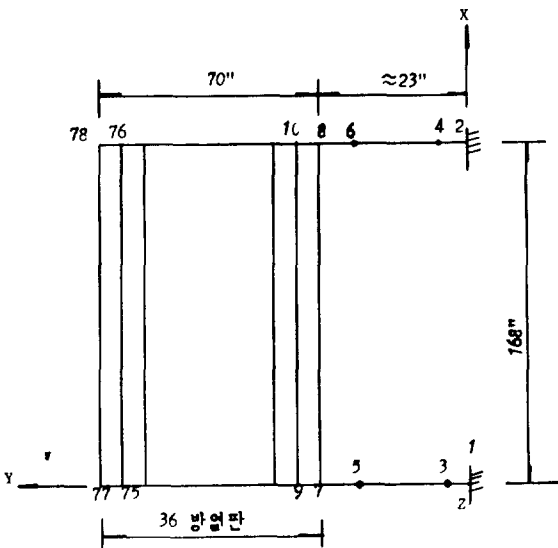


그림 9. 방열기 모델

아직므로 각 방열판과 방열기 해드를 각 요소당 두개의 정점만 필요한 Beam 요소를 사용하여 모델화한다. 방열기 해드는 강체인 탱크에 고정되는 것으로 가정한다. 여기서는 방열판의 응력보다는 방열기 해드의 응력이 중요하므로 이러한 모델을 사용해도 되는 것이다. (그림 9 참조)

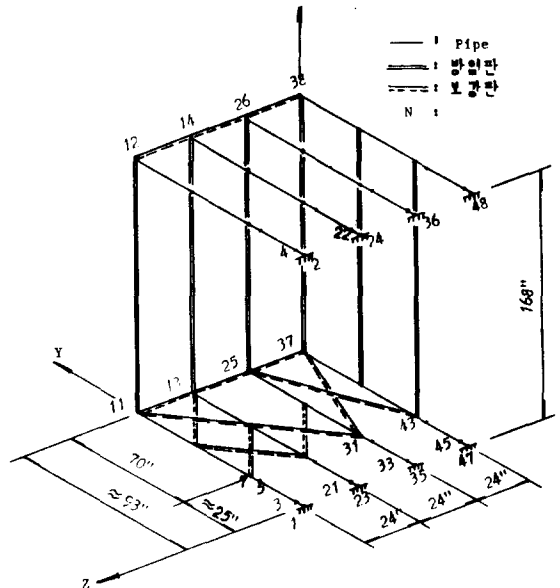


그림 10. 4 조의 방열기로 구성된 방열기 뱅크 모델

표 5. 방열기 Bank의 각 Mode 및 그 응력

주) Ground Velocity Response Spectrum : 1.0 Z + 0.67 Y

요 소 No	인 장 응 력						(psi)	
	I, J	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5	절대치의 합	실 효 치
1	1,3	4289	799	1271	139	1800	8298	4890
2	2,4	7527	369	1278	122	92	9388	7645
33	21,23	3403	819	603	125	1493	6443	3855
34	22,24	6408	578	555	132	620	8293	6489
48	31,33	494	201	29	41	119	884	549
63	43,45	134	289	53	40	12	528	326

인 것으로 알 수 있다.

3) 방열기 뱅크 분석

실제로는 두개 이상의 방열기가 상부 헤드와 하부 헤드에서 서로 연결되어 있다. 그러므로 네개의 방열기를 보강대로 연결하여 만든 방열기 뱅크를 설계하고 분석해 본다.

진채 자유도 수를 줄이기 위해서 한개의 방열기를 다음과 같이 단순히 모델화 한다.

그림 9에서의 36개 Beam요소를 3개의 Beam요소로 대체시키고 기본 고유주파수가 이전의 계산값과 같아 질때까지 밀도를 줄여나간다. 이러한 절차는 일반적으로 기본 Mode에 의한 Mode의 응력 및 변위량이 가장 중요하다는 이론적 근거를 두고 있다. 그림 9의 모델에서 최초 두 고유주파수가 3.12와 18.24인 데 비해 단순화 시켜 채택한 새 모델에서의 고유주파수들은 3.25와 14.4 HZ이다.

방열기 뱅크 모델은 보강대로 연결된 4개의 단순화 된 방열기로 이루어져 있다. (그림 10 참조)

그림 10에서 Beam요소는 두개의 실선으로 표시되고 보강대는 하나의 실선과 하나의 점선으로 나타나 있다. 여기서 일부 Beam요소는 그림상에 나타나 있지 않다.

처음 다섯개의 고유주파수와 그 관련 MPF는 표 4에 주어진다. 여기서 기본 주파수(9.83HZ)가 하나의 방열기 분석의 경우에 비해 훨씬 크다는 것을 알 수 있다.

표 5에는 선별된 Beam요소의 1번째 정점에서 작용하는 처음 다섯 Mode의 Mode 응력들과 그 합계 값이 나타나 있다.

참 고 문 헌

- 1) KS Joung & A.P Reinemann, "Anticipating earthquake when designing Transformers".
- 2) Helmut Spack; "Reliability of outdoor High-voltage oil-immersed instrument transformers under Earthquake conditions". Siemens Power Engineering V(1983) No. 5
- 3) Nathan M. Newmark & Emilio Rosenblueth; "Fundamentals of Earthquake Engineering."
- 4) "Seismic design quidelineing for Substation Facilities", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vool. pas-97 No. 3
- 5) IEEE Std. 323-1974. "Qualifying class 1E equipment for nuclear-power generating stations.
- 6) IEEE Std. 344-1975. "Recommended practices for Seismic Qualification of class 1E Equipment for nuclear power generating stations.
- 7) HYOSUNG HEAVY INDUSTRIES, LTD; "Seismic Qualification Report for 345KV Power Transformer for Korea Nuclear Unit 7 & 8 Step up Transformer."