

原子力發電所 格納 建物の 設計基準과 応力解析 (下)

李 在 根

〈工博·韓國重工業常務〉

최대하중 110,000KN에 대한 이 하중의 t초때 동 하중 계수는 다음 방정식들로 구할수가 있다.

0.04sec ≤ t ≤ 0.05sec 일때

$$DLF = 1 - \frac{1}{\omega \cdot 0.02\text{sec}} \{ \sin \omega t - \sin \omega(t - 0.01\text{sec}) + \sin \omega(t - 0.03\text{sec}) - \sin \omega(t - 0.04\text{sec}) \} \quad (5 \cdot 1)$$

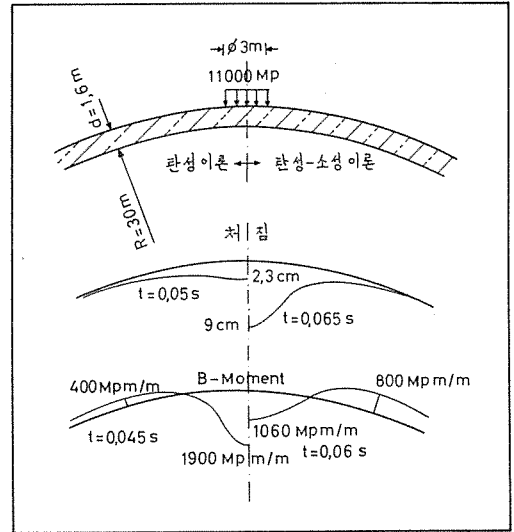
0.05sec ≤ t ≤ 0.07sec 일때

$$DLF = 1 - \frac{1}{\omega \cdot 0.02\text{sec}} [\sin \omega t - \sin \omega(t - 0.01\text{sec}) + \sin \omega(t - 0.03\text{sec}) - \sin \omega(t - 0.04\text{sec})] + \frac{t - 0.05\text{sec}}{0.02\text{sec}} \left[\frac{\sin \omega(t - 0.05\text{sec})}{\omega(t - 0.05\text{sec})} - 1 \right] \quad (5 \cdot 2)$$

0.07sec ≤ t 일때

$$DLF = \frac{1}{\omega \cdot 0.02\text{sec}} [-\sin \omega t + \sin \omega(t - 0.01\text{sec}) - \sin \omega(t - 0.03\text{sec}) + \sin \omega(t - 0.04\text{sec}) + \sin \omega(t - 0.05\text{sec}) - \sin \omega(t - 0.07\text{sec})] \quad (5 \cdot 3)$$

그림 5-8은 반경 30m의 구형 셸이 항공기의 추락하중을 받을때에 생기는 변형과 모멘트를 보여준다. 그림의 왼쪽은 탄성이론만을 적용하였을때이고 오른쪽은 탄성-소성 이론을 적용하였을 때이다. 하중의 작용 단면적은 약 7m²으로 RF-4E기가 추락할 때에 동체의 직경이 약 40cm 늘어난다고 가정한 것이다. 그림 5-8에서 알 수 있듯이 탄성-소성 이론을 적용하면 탄성이론만을 적용하였을 때보다 최대 모멘트는 약 45%가 줄어들고 최대변형은 3.9 배로 늘어나며 최대값이 생기는 시간 t도 달라진다.



격납건물 셸의 두께가 너무 작아서 국부적인 집약하중을 견디지 못하면 소성변형이나 충분한 응력 분포가 이루어지기 전에 항공기가 셸을 뚫고 들어가게 된다. 이것을 Penetration이라고 하며 항공기가 직접 추락하는 경우 외에도 항공기의 엔진이나 포탄이 뚫고 들어가는 경우를 생각할 수 있다. 포탄이 뚫고 들어갈 수 없는 최소의 콘크리트벽체 두께는 Petry나 Schardin 또는 BRL(Ballistic Research Laboratory)와 미 육군에서 제안한 방정식들로 계산할 수 있다. 그러나 이 식들은 일정한 범위 안에서 실험하여 얻은 실험식들이므로 그 범위를 벗어나는 항공기의 추락사고에 그대로 적용하여서는 안된다. 독일에서는 BRL와 미 육군의 식을 근

거로하여 항공기의 추락에 견딜수 있는 최소의 콘크리트 벽체 두께를 다음과 같이 규정하고 있다.

$$d(\text{cm}) = 1.5 \cdot \frac{G[\text{KP}] \cdot V^{\frac{1}{2}}[\text{cm/sec}]}{\sqrt{\beta_{\text{WN}}[\text{KP/cm}^2]} \cdot \phi^{1.8}[\text{cm}]} \quad (5 \cdot 4)$$

방정식(5·4)는 추락속도V가 150m/sec에서 300 m/sec 이하인 경우에 적용할 수 있다. β_{WN} 은 DIN 1045에서 규정한 콘크리트 28일 강도이다. RF-4E 기의 추락시 자중을 $G=20000\text{KP}$, 속도를 215m/sec로 가정하고 동체의 직경 $\phi=24.5\text{cm}$ 를 대입하면 $\beta_{\text{WN}}=250\text{KP/cm}^2$ 인 콘크리트 벽체의 최소 두께는 122cm 이상이어야 한다.

6. 지진

지진에 견딜수 있는 완벽한 설계방법은 아직까지 제시되지 않고 있다. 지진의 강도는 Mercalli-Sieberg의 12등급이 일반에 널리 알려져 있으나 공학에서는 Richter가 제안한 Magnitude 등급을 사용하고 있다. Magnitude 등급은 진앙(震央)으로부터 100km 떨어진 곳에서 wood-Anderson 지진계로 측정된 최대진폭 A를 기준으로하여 방정식

$$M = \log \frac{A}{A_0} \quad (6 \cdot 1)$$

Magnitude	최대 가속도 [g]	진동시간 [초]
5.0	0.09	2
5.5	0.15	6
6.0	0.22	12
6.5	0.29	18
7.0	0.37	24
7.5	0.45	30
8.0	0.50	34
8.0	0.50	37

로서 정의한다. A_0 는 1 micrometer 즉1000분의1밀리미터이다. 일반적으로 M5 이하인 지진은 구조물에 큰 피해를 주지 않는다. M6 이상의 지진은 일반 지진계로 측정하기가 어렵고 특별한 강진 지진계로 지진가속도를 기록하는 것이 보통이며 이것이 지진 해석의 기준이 된다. 다만 아직까지는 강진 지진계가 설치된 곳이 많지 않고 또 강진은 아주 드물게 일어나므로 통계적으로 분석할 수 있을만큼 많은 측정기록이 없는것이 가장 큰 어려움이다.

도표6-1은 Magnitude 등급에 따른 최대 가속도와 진동시간을 보여준다. 최대 가속도는 지구가속도 g의 배수로서 표시하는 것이 보통이다. 엄밀

한 의미에서 최대진폭을 기준으로 분류하는 Magnitude 등급과 최대 가속도 사이에는 아무런 상관관계가 없다. 실제로 M5.6이었던 1966년의 Park-field지진은 최대 가속도가 0.5g나 되는 예외적인 경우도 있었다.

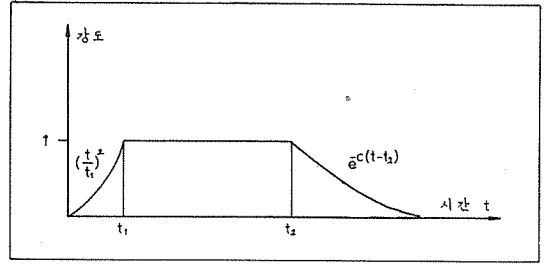
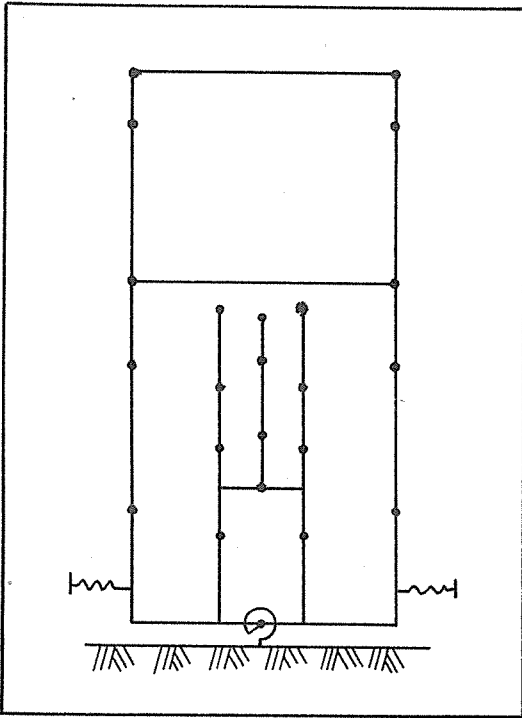
원자력 발전소의 설계기준으로 지진을 가동지진(operating Basis Earthquake), 설계지진(Design Basis Earthquake)과 가상최대지진(Maximum Potential Earthquake)으로 나눈다. 가동지진은 발전소 주위 20km 이내에서 100년에 한번쯤 일어날수 있는 강도의 지진을 말하며 이런 지진이 일어났을 때에도 발전소의 모든 기능이 정상으로 가동할 수 있도록 설계하여야 한다. 설계지진은 발전소 주위 50km 이내에서 500년에 한번쯤 일어날 수 있는 강도의 지진을 말하며 이런 지진이 일어났을때에는 가동이 일시 중단되거나 수리를 한 후에는 다시 가동할 수 있도록 설계하여야 한다. 가상 최대지진은 발전소가 있는 지역에서 일어날수 있다고 생각되는 가장 큰 지진을 말하며 이런 지진이 일어난 후에는 발전소를 폐쇄하게 된다. 그러나 방사선의 유출이나 핵사고가 일어나지 않도록 가동이 완전히 정지될 때까지 핵 안전에 관련된 기기들이 보호되어야 한다. 발전소의 각 건물과 기기에 따라 설계기준으로 적용하여야 하는 지진의 구분은 도표1-1에서 제시한 바와 같다.

가상 최대지진의 최대 수평 가속도는 지진학자의 전문적인 검토를 거쳐서 결정하게 된다. 한국은 현재 0.2g를 택하고 있으나 필자의 의견으로는 0.3g가 타당하다고 생각한다. 최대 수직 가속도는 최대 수평 가속도의 약 $\frac{2}{3}$ 로 추정하고 있다. 설계지진의 경우에는 가상최대 지진의 약 절반되는 값을 택하는 것이 보통이다. 수평진동과 수직진동은 동시에 일어나지만 지진으로 인한 대부분의 피해가 수평진동에 의하여 생긴다.

지진 하중에 대한 구조물의 응력해석에 가장 기본되는 방법으로 Time-History 방법이 있다. 지진 가속도 $\ddot{y}_s(t) = \ddot{y}_{s,\text{max}} \cdot f(t)$ 로 인한 진동은 단일절량인 경우에 미분방정식

$$m \cdot \ddot{u} + k \cdot u + c \cdot \dot{u} = -m \cdot \ddot{y}_{s,\text{max}} \cdot f(t) \quad (6 \cdot 2)$$

로서 표시할 수 있다. 여기서 m은 질량, k는 구조물의 스프링계수, C는 감속계수이며 u는 질량m의 변위 y에서 지진으로 인한 지반의 변위 y_s 를 제(除)한 상대변위를 나타낸다. $\frac{m}{k}$ 를 ω^2 으로, $\frac{c}{2m}$ 을 β 로



서의 질량 m_r 의 상대변위비(相對變位比)이며 각속도 ω_n , 감속계수 β_n 와 함께 Rayleigh의 방법을 이용하여 구할수가 있다. 미분방정식(6.4)는 지진 가속도의 변화함수 $f(t)$ 를 알면 간단히 풀 수 있으며 각 진동양상에서 나오는 값 A_n 을 모두 합하면 구

대체하면 t 초후의 상대변위 $u(t)$ 는 방정식

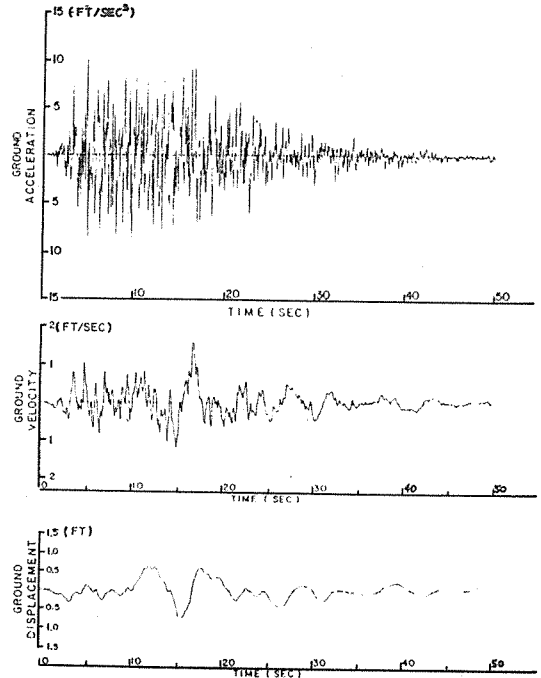
$$U(t) = -\frac{\ddot{y}_{s,max}}{\omega} \cdot \int_0^t f(\tau) \cdot e^{-\beta(t-\tau)} \cdot \sin \omega(t-\tau) \cdot d\tau \quad (6.3)$$

의 해로서 구할수가 있다.

원자로의 격납건물은 단일 질량점으로 대체할 수가 없고 여러개의 질량점으로 나누어서 그 사이는 스프링으로 연결되었다고 가정하여 계산한다. 그림 6-2는 이와같은 모형을 보여준다. 질량점이 많아지면 서로 연관된 미분 방정식들이 진동이 가능한 숫자만큼 생기게 된다. 이 연립 방정식들을 수차적(逐次的)인 방법으로 적분할 수도 있으나 대개의 경우에는 model Analysis를 통하여 가능한 n 가지의 진동양상(normal mode)을 중심으로 n 개의 독립된 미분 방정식

$$\ddot{A}_n + \omega_n^2 \cdot A_n + 2\beta_n \cdot \dot{A}_n = \frac{\ddot{y}_{s,max} \cdot f(t) \sum_{r=1}^n \phi_{rn} \cdot m_r}{\sum_{r=1}^n m_r \cdot \phi_{rn}^2} \quad (6.4)$$

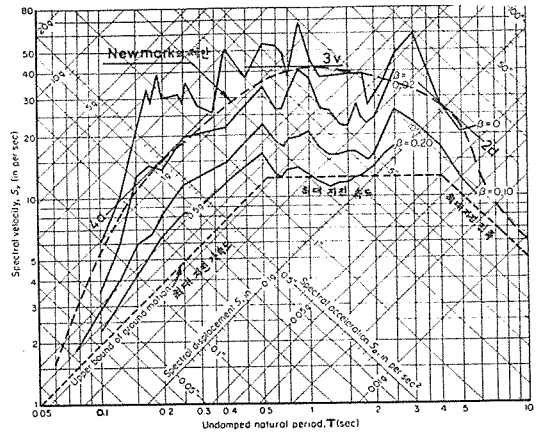
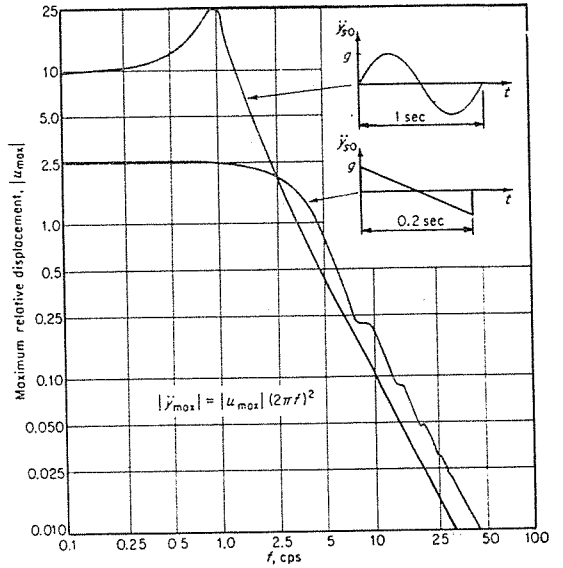
을 구하게 된다. 여기서 ϕ_{rn} 는 n 번째 진동양상에



하는 상대변위가 된다. Time-History 방법으로 계산하자면 발전소가 그 가동기간 동안에 받게될 지진의 가속도변화를 정확히 알아야하는 어려움이 있다. 이를 해결하는 가장 간편한 방법으로 이미 기록된 같은 강도의 지진 가속도변화표를 이용하는 수가 있다. 1940년의 El Centro 지진 가속도 변화표는 실제로 M7 도의 지진이 7km 떨어진 곳에서 일어나는 경우에 대비하는 설계기준으로 많이 이용

되었었다. 그러나 지금까지의 기록을 미루어 보면 같은 강도의 지진일지라도 가속도의 변화에 엄청난 차이가 있었다. 실제로 기록된 강진의 가속도 변화표가 아주 적은것을 보완하기 위하여 인위적으로 가속도변화표를 만드는 방법도 있다. 우선 기록된 실제의 가속도 변화표를 참조하여 도표 6-3과 같은 강도변화표를 만들고 거기에 난사형 충격파(Random Impuls)를 곱하여 가속도 변화표를 만들게 된다. 도표 6-4는 California Institute of Technology)에서 만든 가속도 변화표이다. 그러나 이 방법도 아직은 연구단체를 벗어나지 못하고 있다. Time-History 방법처럼 정확하지는 못하나 이미 기록된 가속도의 변화표를 이용하여 상대변위의 최대값을 구할수 있는 Response Spectra 방법이 있다. 구하는 상대변위의 최대값 $\max U$ 와 구조물의 진동수 f 와의 상관관계를 도표 6-5와 같이 양축이 모두 logarithm 눈금으로 된 도표에 표시하면 가속도의 변화에 큰 영향을 받지 않고 모든 Response Spectra가 2내지 3개의 직선에 접근한다. 이 사실은 정확한 지진 가속도의 변화를 모르면서도 상대변위의 최대값을 구할수 있는 길을 열어주고 있다. newmark, Blume과 Corning은 감속계수가 한계감속(Critical Damping)의 5~10%인 경우에 Response Spectra는 최대진폭의 1 배, 최대진동속도의 1.5배, 최대진동 가속도의 2배가 되는 3개의 직선에 접근한다고 밝히고 있다. 또한 newmark와 Rosenbluth는 감속계수가 한계감속의 2%인 경우에는 최대진폭의 2배, 최대진동 속도의 3배, 최대진동 가속도의 4배가 되는 직선에 접근하는 곡선을 설계기준으로 제안하였다. 도표 6-6은 newmark의 제안과 EL Centro 지진의 실제 값을 보여준다. Housner는 미국에서 기록된 4대 강진인 EL Centro, Taft, California와 Olympia 지진을 분석하여 도표 6-7을 설계기준으로 제안하였다. 이 제안은 최대진동가속도가 0.2g인 지진을 기준으로 하고 있다. 이 도표들에서 보면 구조물의 진동수 외에도 감속계수가 상당한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 감속계수는 사용자재와 접합 방법에 따라서 또 탄성변형인지 소성변형인지에 따라서 달라진다. 도표 6-8은 이에 따른 구조물의 감속계수를 한계감속에 대한 비율로서 나타내고 있다.

구조물을 여러개의 질량점들로 나누어 modal Analysis를 하는 경우에는 각 normal mode마다 생기는 부분적인 상대변위를 합하게 된다. 그림 6-9는

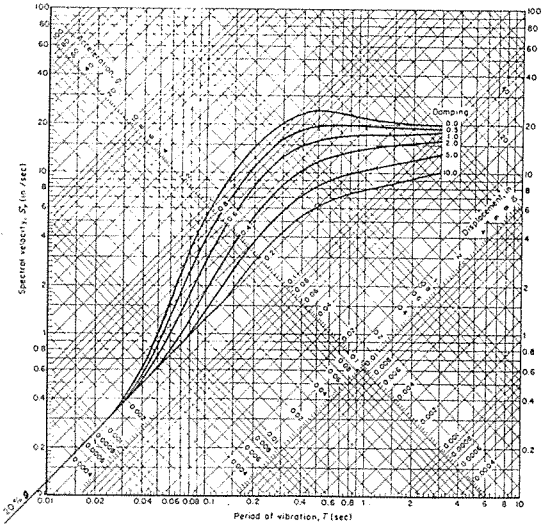


normal mode가 3개인 경우를 보여주는데 Response Spectra 방법을 사용하면 이들 부분적인 상대변위의 최대값만 알 수 있고 시간에 따른 변화를 알 수 없기때문에 합치는데에 어려움이 있다.

가장 안전한 방법은 이들 부분적인 상대변위가 모두 같은시간에 최대값을 가진다고 생각하고 최대값을 모두 합하여 최대상대변위를 구하는 것이다. 그러나 이방법은 너무 보수적이며 실제로 normal mode 수가 많아질수록 최대값이 모두 같은 시간에 생길 확율은 적어진다. 그러므로 최대상대 변위는

일반적으로 식(6·5)에 따른 근사값으로 구한다.

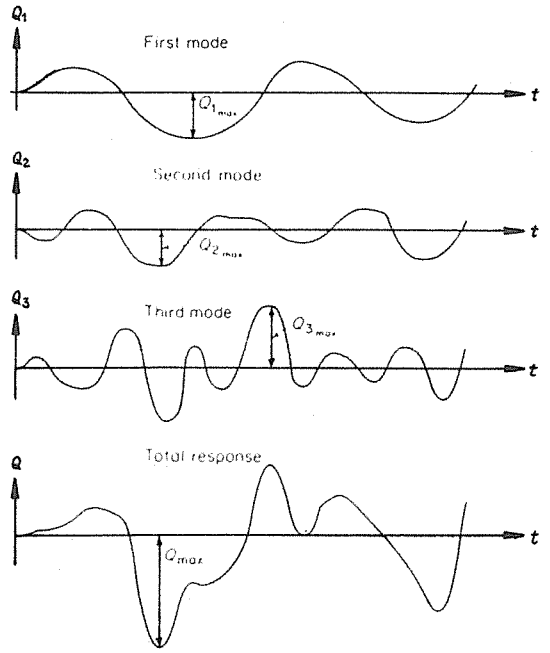
$$\max U = \sqrt{\max A_1^2 + \max A_2^2 + \dots + \max A_n^2} \quad (6 \cdot 5)$$



수로서 0.67에서 1.5까지 구분되어 있다. W는 구조물의 중량이며 C는 구조물의 진동주기 T에 따른 계수로서 방정식

$$C = \frac{0.05}{\sqrt[3]{T}} \quad (6 \cdot 7)$$

로서 구한다. 구조물을 여러개의 질량점으로 나누어 계산할 경우에는 전체 수평하중 V를 그림6-11과 같이 중량과 높이를 곱한 비율로서 분배한다. 불

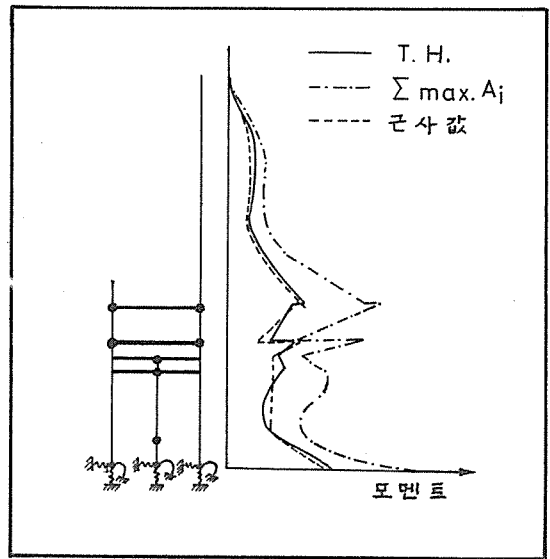


Damping Factor in % of Critical Damping				
G_y : 발진강도	$\sigma < 1/4 G_y$	$\sigma < 1/2 G_y$	$\sigma = G_y$	$\sigma > G_y$
Pipe Line	0.5	0.5 - 1.0	2	5
Steel Structure (welded)	0.5 - 1.0	2	5	7 - 10
Steel Structure (bolted)	0.5 - 1.0	5 - 7	10 - 15	20
Reinforced Concrete	0.5 - 1.0	3 - 5	7 - 10	10 - 15
Prestressed Concrete	0.5 - 1.0	2	5 - 7	10 - 15
Wood Frame	0.5 - 1.0	5 - 7	15 - 20	20

그림6-10은 이 근사값이 Time-History방법으로 계산한 값과 잘 일치하고 있음을 보여준다. Time-History나 Response Spectra 방법보다 간단한 계산방법으로 SEAOC(Structural Engineers Association of California)-Code와 불란서의 Règles Paraseismiques et Annexes 규정이 있으며 최고지진 가속도가 0.1g 이하인 경우에는 원자력 발전소의 설계에도 이들 약산방법이 허용되고 있다. SEAOC-Code에 따르면 지진으로 인한 전체 수평하중V는 방정식

$$V = Z \cdot K \cdot C \cdot W \quad (6 \cdot 6)$$

으로서 구할수 있다. 여기서 Z는 지진의 강도에 따른 계수로서 지역에 따라 0.25에서 1.5까지 구분되어있고 K는 구조물의 소성변형 능력에 따른 계



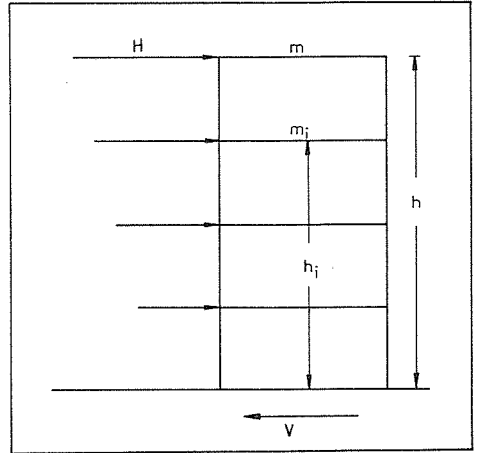
란서 규정에 의한 계산방법도 이와 비슷해서 높이 $h(m)$ 에 있는 질량점 m 이 받는 수평하중 H 는 방정식

$$H = \alpha \cdot \beta \cdot \delta \cdot m \cdot g \cdot h \frac{\sum h_i \cdot m_i}{\sum h_i^2 \cdot m_i^2} \quad (6 \cdot 8)$$

로서 구할수 있다. 여기서 α 는 지진강도에 따른 계수이고 δ 는 기초의 토질에 따른 계수이다. 구조물의 진동주기 T 에 따른 계수 β 는 방정식

$$\beta = \frac{d}{\sqrt[3]{T}} \quad (6 \cdot 9)$$

로서 구하며 d 는 감속계수이다. 지진으로 인한 수직하중은 a 가 1보다 적을때에는 수평하중과 같고 a 가 1보다 클때에는 수평하중은 \sqrt{a} 로서 나눈값을 택한다.



科学토포

國際綜合機械展示會

先進工業國의 最新技術이 선보인 제 1회 國際綜合機械展示會 (ENKOR 80)가 11월 3일 韓國綜合展示場에서 徐錫俊상공부장관, 金元基무역협회장, B.플랭주한프랑스대사등 관계 인사들이 참석한 가운데 개막됐다.

英國에 本부를 둔 인터파마주최, 每日經濟新聞社·후원으로 8일까지 6일간 열린 이전시회에는 오스트리아, 벨지움, 캐나다, 덴마크, 프랑

스, 독일, 일본, 네덜란드, 싱가포르, 스웨덴, 영국, 폴란드등 12개국에서 1백56개업체가 참가, 건축 및 건설업, 전기전자, 공작기계, 식품가공, 교통 및 통신분야의 機械와 技術이 다양하게 전시됐다.

특히 전시회기간동안 프랑스의 '기술신포지엄'등세계의 최신키술소개와 정보를 교환하기 위한 각종 세미나·워크샵도 개최됐다.



全國學生科學發明品競進大會

第2回 全國學生科學發明品競進大會에서 大賞인 國務總理賞(상금50만원)은 경북 진보종합고교 2년인 金基河군이 출품한 「간편한 실내 공기정화기」가 차지했다.

靑少年들의 科學發明에 대한 의욕을 고취시키기 위해 科技처가 東亞日報社와 공동으로 주최한 이번 경진대회에서 金賞인 科學技術處長官賞(상금10만원)은 「새로운 청소용구」를 출품한 安俊成(부산남천국교5년)

군이 차지했으며 東亞日報社長賞은 「화음 호루루기」를 낸 吳文永군(서울신림중 2년)이, 야쿠르트社長賞은 「무중력구슬놀이상자」를 출품한 羅尹晟군(전남나주중 2년)이 차지했다.

이번 대회에는 전국에서 출품된 1천4백27점 가운데 작년도 예선을 거친 1백16점의 작품이 본선에 올라 大賞, 金賞외에 銀賞 6명, 銅賞 12명, 장려상 30명이 뽑혔다.

