

# 손상곡선에 의한 구조물의 거동파악

The Response of the Structure with the Damage Curve.

이 상 호\*

Lee, Sang-Ho

송 현 섭\*\*

Song, Hyun-Seop

## Abstract

The effects of the impulse and the magnitude of the impulsive loads to the responses of the structure are analyzed with the safety criteria established with the peak load and impulse ratio. It is shown for the loadings with short duration that the impulse is dominant factor for the damage of the structures due to the inertial effect. On the other hand the magnitude of the load is dominant factor for the load with long duration due to the duration time long enough for the loads to overcome the inertia force. It is also shown that the peak particle velocity and the peak particle acceleration of the foundation have the same influences as the impulse and the magnitude of the loads do to the structures.

## 요 지

임펄스 비와 하중최대치의 비로 작성된 손상곡선을 이용하여 충격하중의 임펄스와 하중의 크기가 구조물의 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 단기에 종료하는 충격하중의 경우 관성력의 영향으로 하중의 크기보다는 임펄스가 구조물 손상에 주요변수가 되며, 관성력을 극복할 충분한 시간을 갖는 장기하중이 작용하는 경우에는 임펄스보다는 하중의 크기가 구조물 손상에 주요변수가 된다. 지반충격에 의한 구조물의 손상은 단기인 경우에는 지반의 최대입자속도가 그러나 장기인 경우에는 최대입자가속도가 손상의 주요 변수가 된다.

**Keywords :** Impulse, Peak load, Damage curve

**핵심 용어 :** 임펄스, 최대하중, 손상곡선

\* 정회원, 단국대학교 공학부 토목환경공학전공 교수  
\*\* 정회원, 단국대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정

E-mail: shlee@dankook.ac.kr 019-635-3525

• 본 논문에 대한 토의를 2005년 3월 31일까지 학회로 보내 주시면 2005년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서론

충격하중은 충돌이나 폭발 시에 충돌 물체나 인근 구조물에 순간적으로 작용하는 하중을 말한다. 충격하중이 작용하는 구조물은 발파작업이 수시로 수행되는 건설현장이나 광산의 인근 구조물, 파도에 의한 충격이 발생하는 해안 구조물이나 선박의 선체, 차량의 탑승자를 보호하기 위해 설치된 도로나 교량의 분리대 등이 있다. 이들 용도가 다른 구조물에 발생하는 충격하중의 형태는 하중의 발생 원인에 따라 다를 수 있으나, 일반적으로 하중 최대치에 급격히 도달한 후에 서서히 감소하는 형태를 갖으며 하중작용시간(duration of loading)은 구조물의 고유주기보다 짧은 시간에 종료하는 특성을 갖는다(Watson 등1989; Wees 등, 1995).

충격하중이 발생할 때 구조물의 안전성을 파악할 수 있는 방법은 동적 하중계수(dynamic load factor)방법, 발파공법시 사용되는 지반의 최대입자속도(peak particle velocity)방법, 그리고 지진 시에 사용되는 지반의 최대입자가속도(peak particle acceleration)방법이 있다. 그러나 이들 방법들은 하중과 구조물의 동적인 특성이 고려되지 않은 방법으로 모든 구조물과 하중에 대해 일괄적으로 적용할 수 없다.

폭발이나 발파로 인한 충격, 파도에 의한 충격, 자동차의 충돌 등으로 인한 충격하중은 높은 압력을 발생시키며 순간적으로 종료하는 특성을 갖는다. 이러한 충격하중이 구조물에 작용할 때 충격하중의 임펄스는 구조물의 초기속도(initial velocities)의 형태로 방출된다. 따라서 순간적으로 종료하는 하중에 의한 구조물의 거동은 초기속도에 의한 거동으로 볼 수 있으며 이때 초기속도의 크기는 충격하중의 임펄스의 크기에 의해 결정된다. 초기속도의 크기를 결정짓는 이러한 임펄스는 하중-시간 곡선의 면적으로 정의되기 때문에 충격하중에 의한 구조물의 거동은 하중의 형태와 크기 그리고 하중작용시간에 의해 영향을 받게 된다. 따라서 충격하중이 작용하는 구조물의 안전성 검토를 위해서는 충격하중의 특성을 하중최대치와 임펄스를 이용하여 분류할 필요가 있다(Florence, 1987).

본 연구에서는 하중최대치와 임펄스를 변수로 사용

한 손상기준을 설정하고, 설정된 손상기준을 이용하여 손상곡선을 작성하며, 작성된 손상곡선을 이용하여 구조물의 안전성을 파악할 수 있는 방법을 제시 하고자 한다. 제시된 방법은 하중의 동적 특성과 구조물의 동적 특성이 함께 고려된 방법으로, 구조물의 안전성을 일괄적으로 파악할 수 있는 방법이다. 또한 작성된 손상곡선을 이용하여, 충격하중의 임펄스와 하중의 크기가 구조물의 거동에 미치는 영향을 분석한다. 손상곡선을 작성하기 위한 충격하중의 형태로는 사각형 형태와 지수형태의 하중을 사용하며, 해석방법으로는 시간 영역의 합성곱(convolution)을 이용한다.

모든 구조물은 사용기간 중에 여러 형태의 동 하중이 작용한다. 동 하중은 형태에 따라 주기하중과 비주기하중이 있으며, 그중, 비 주기하중인 충격하중은 발생하는 응답형태, 해석방법에 있어 주기하중과 구별된다. 주기하중이 작용하는 구조물에서는 감쇠효과(damping effect)가 크게 작용하는 정상상태 응답(steady state response)이 중요하나, 충격하중과 같이 단기에 종료하는 하중이 작용하는 경우에는 감쇠에 의한 에너지 흡수능력이 효과적으로 작동하기 전에 최대치가 발생하기 때문에 비 감쇠를 적용한다(Thomson, 1993).

## 2. 일자유도 계의 거동

다자유도 구조물의 운동방정식을 상태방정식(state equation)과 출력방정식(output equation)으로 변환시키면 아래와 같다.

$$\{\dot{x}\} = [A]\{x\} + [B]\{u\}$$

$$\{y\} = [C]\{x\} + [D]\{u\}$$

여기서  $\{x\}$ 는 상태변수(state variables)벡터이고,  $\{u\}$ 는 입력벡터, 그리고  $\{y\}$ 는 출력벡터이다. 출력  $\{y\}$ 는 임펄스응답(impulse response)행렬  $[h]$ 와 입력  $\{u\}$ 의 합성곱으로 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\{y\} = [h] * \{u\}$$

따라서 일 자유도계의 변위는 아래와 같이 임펄스 응답  $h$ 와 하중  $p$ 의 합성 곱으로 구할 수 있다.

$$x = h * p \quad (1)$$

동 하중이 작용하는 구조물의 거동은 구조물의 동적 특성과 하중의 동적특성에 따라 다르게 반응한다. 주기하중이 작용하는 구조물에서는 정상상태 응답이 중요하며 정상상태 응답은 감쇠의 영향이 크다. 그러나 충격하중이 작용하는 경우에는 주기하중이 작용하는 구조물과는 달리 감쇠에 의한 에너지 흡수기능이 효과적으로 작동하기 전에 최대변위가 발생되기 때문에 비감쇠를 적용한다.

구조물의 거동은 영입력응답 (zero input response)과 영상태응답 (zero state response)의 합으로 아래와 같이 구성되어 있다.

$$x = x_{zi} + x_{zs}$$

여기서,  $x_{zi}$ 는 영입력응답으로 초기조건에 의해서 발생하는 응답을 나타내며,  $x_{zs}$ 는 영상태 응답으로 정지중인 구조물의 작용하중으로 인한 응답을 나타낸다. 비감쇠 일자유도 구조물의 영입력 응답은 아래 식과 같다.

$$x_{zi} = \frac{\dot{x}(0) + x(0)}{\omega} \sin \omega t + x(0) \cos \omega t$$

여기서  $\dot{x}(0)$ 와  $x(0)$ 는 초기속도와 초기변위이다. 영상태 응답은 식 (1)로부터 아래와 같이 표현된다.

$$x_{zs} = p(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t-\tau) p(\tau) d\tau$$

여기서  $h(t)$ 는 영상태 단위 임펄스응답 (zero state unit impulse response)으로 아래와 같다.

$$h(t) = \frac{1}{m\omega} \sin \omega t, \quad t \geq 0 \quad (2)$$

$$h(t) = 0, \quad t < 0$$

따라서 초기상태가 0인 구조물의 응답은 아래와 같이 영상태 응답만으로 표현할 수 있다.

$$x = x_{zs} = p(t) * h(t) = \int_0^t h(t-\tau) p(\tau) d\tau \quad (3)$$

위의 식의 적분구간은 변수가 음의 값을 가질 때 영상태 단위임펄스응답은 0이기 때문이다.

## 2.1 이상임펄스 (ideal impulse)에 의한 거동

단위이상임펄스(unit ideal impulse)는 하중의 크기는 무한대로 크고, 하중작용시간은 무한소로 짧으며, 임펄스의 크기는 단위 값을 갖는 하중을 말한다. 이러한 단위이상임펄스는 Dirac Delta 함수  $\delta(t)$ 를 이용하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\delta(t) = \infty, \quad t=0$$

$$\delta(t) = 0, \quad t \neq 0$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1$$

이러한 정의를 이용하면  $\delta(t)$  함수의 샘플링특성 (sampling property)을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) \delta(t) dt &= \int_{-\infty}^{\infty} \phi(0) \delta(t) dt \\ &= \phi(0) \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = \phi(0) \end{aligned}$$

즉 임의의 함수와 단위이상임펄스 곱의 적분 값은 단위이상임펄스가 존재하는 곳의 임의함수 값이 된다. 이러한 샘플링특성을 식 (3)에 적용하면 영상태 단위 임펄스응답을 아래 식과 같이 구할 수 있다.

$$\int_0^t h(t-\tau) \delta(\tau) d\tau = h(t)$$

위의 식에 나타난 적분구간은  $\delta(t)$ 의 값은  $0^-$ 에서

0<sup>+</sup> 사이에서 존재하며, 임펄스응답은 시간이 음의 값일 때에는 0이기 때문이다.

## 2.2 계단 하중에 의한 거동

계단 하중은 이상임펄스와는 반대로 하중작용시간과 임펄스 값이 무한대인 하중으로 크기가 P인 계단하중은 아래와 같다.

$$p(t) = F, \quad t \geq 0$$

$$p(t) = 0, \quad t < 0$$

계단하중에 의한 구조물의 거동은 식 (3)을 이용하여 구하면 아래와 같다.

$$x = \frac{P}{m\omega^2} (1 - \cos \omega t) \quad (4)$$

식 (4)의 괄호 속에 첫 번째 항은 계단하중에 의해 발생된 강제모드(forced mode)이고, 두 번째 항은 구조물의 고유특성에 의한 자연모드(natural mode)이다. 구조물의 동적거동은 이와 같이 하중의 동적특성에 의한 강제모드와 구조물의 동적특성에 의한 자연모드의 중첩으로 구성되어 있다.

## 2.3 사각형 하중에 의한 거동

사각형 하중에 의한 구조물의 거동은 하중작용구간과 하중종료후의 자유진동 구간으로 나누어 구하여야 한다. 하중작용구간의 변위는 계단하중에 의한 거동과 동일하게 식 (4)로 표현된다. 하중이 종료한 구간의 변위는 적분구간을 아래와 같이 하중작용구간과 하중종료구간으로 나누어 구한다.

$$x(t) = P \int_0^{t_1} h(t-\tau) d\tau + \int_{t_1}^t 0 d\tau$$

여기서  $t_1$ 은 사각형 하중의 하중작용시간이다. 위의

식을 적분하면 하중종료후의 거동은 다음과 같으며, 하중이 종료한 구간의 거동은 자연모드의 거동으로 이루어져 있음을 알 수 있다.

$$x(t) = \frac{P}{k} \{ \cos \omega(t-t_1) - \cos \omega t \}$$

하중종료 후 자유진동 구간에서 발생하는 최대변위는 위의 식으로부터 아래와 같이 구할 수 있다.

$$x^{\max}(t_1) = \frac{P}{k} \sqrt{2(1 - \cos \omega t_1)} \quad (5)$$

## 2.4 지수 하중에 의한 거동

Fig. 1에는 지수형태의 하중과 함께 지수형태의 하중과 동일한 하중최대치와 임펄스를 갖는 사각형하중이 나타나 있으며, Fig. 1에 나타나 있는 사각형하중의 하중작용시간을 지수형태 하중의 유효하중작용시간(effective duration of loading)으로 규정한다.

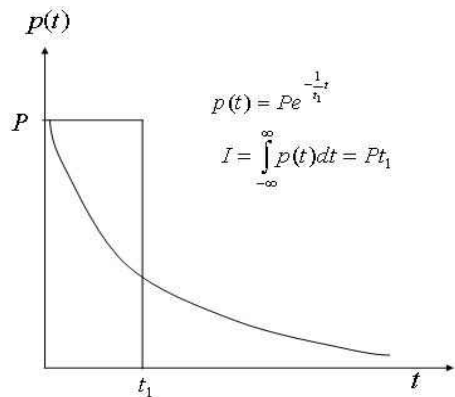


Fig. 1 지수하중

지수하중이 작용하는 구조물의 해를 식 (3)을 이용하여 구하면 아래와 같다.

$$x(t) = \frac{P}{m} \frac{1}{\left(\frac{1}{t_1}\right)^2 + \omega^2} \left[ e^{-\frac{1}{t_1}t} + \cos \omega t - \frac{1}{\omega t_1} \sin \omega t \right] \quad (6)$$

여기서  $t_1$ 은 Fig. 1에 나타나 있는 유효하중작용시간이다. 식 (6)의 괄호 속에 첫 번째 항은 지수하중에 의해 발생된 강제모드이고, 나머지 두 항은 구조물의 고유특성에 의한 자연모드이다. 이와 같이 지수 하중에 의한 구조물의 거동도 하중의 동적특성에 의한 강제모드와 구조물의 동적특성에 의한 자연모드의 중첩으로 구성되어 있다. 식 (6)을 보면 초기에는 강제모드가 주요 거동상태가 되나, 시간이 경과하여 하중의 크기가 감소한 후에는 자연모드가 주요 거동상태가 되는 것을 알 수 있다. 또한 괄호 속에 세 번째 항의 분모에 있는 유효하중시간의 크기에 따라 거동특성이 변화가 발생하는 것도 알 수 있다.

## 2.5 지반충격에 의한 거동

지반진동 시 구조물의 운동방정식은 다음과 같으며, 식으로부터 관성력은 절대가속도에 비례하고 탄성력은 상대 변위에 비례하는 것을 알 수 있다.

$$m\ddot{x} + k(x - x_g) = 0$$

여기서  $x$ 는 절대변위(absolute displacement)이고  $x_g$ 는 지반변위를 나타낸다. 절대변위와 지반변위의 차인 상대변위(relative displacement)를 이용하여 위의 식을 정리하면 다음과 같다.

$$m\ddot{x}_r + kx_r = -m\ddot{x}_g = p_{eff}$$

여기서  $p_{eff}$ 는 유효하중(effective load)으로 상대변위를 사용하여 운동방정식을 유도할 경우 운동방정식의 하중 항은 지반가속도에 의한 관성력으로 대체할 수 있음을 보여준다. 따라서 유효하중의 하중최대치는 지반의 최대입자가속도(peak particle acceleration)에 비례하며, 유효하중을 적분한 값인 임펄스는 지반가속도를 적분하여 얻어진 지반의 최대입자속도(peak particle velocity)에 비례하는 것을 알 수 있다.

## 3. 손상 곡선

충격하중이 구조물에 작용 할 때 구조물의 안전성을 검토 할 수 있는 손상곡선은 임계변위를 발생시키는 이상임펄스와 계단하중을 구한 후, 이들에 대한 충격하중의 임펄스 비와 하중최대치 비를 이용하여 구할 수 있다.

임펄스 값이  $I_0$  인 이상임펄스에 의해 임계변위가 발생되었다면 임계변위는 식 (2)로부터 다음과 같다.

$$x_{cr} = \frac{I_0}{m\omega} \quad (7)$$

계단하중에 의해 발생하는 최대변위는 식 (4)로부터 아래와 같다.

$$x_{max}^P = \frac{P}{m\omega^2} \quad (8)$$

따라서 계단하중  $P_0$ 에 의한 임계변위는 다음과 같다.

$$x_{cr} = \frac{2P_0}{m\omega^2} \quad (9)$$

임펄스  $I$ 를 갖는 이상임펄스가 구조물에 작용할 경우 임펄스 비  $I/I_0$ 가 1보다 작으면 손상이 발생되지 않는다. 그러나, 1보다 큰 경우에는 손상이 발생된다. 마찬가지로 크기가  $P$ 인 계단하중이 구조물에 작용할 경우 하중 비  $P/P_0$ 가 1보다 작으면 손상이 발생되지 않으나, 크면 손상이 발생된다. 따라서 이러한 원리를 이용하면 충격하중의 임펄스 비와 하중최대치 비를 사용하여 구조물의 안전성을 검토할 수 있는 손상 곡선을 작성할 수 있다.

### 3.1 사각형 하중의 손상 곡선

사각형 형태의 충격하중이 작용하는 구조물의 손상

곡선은 아래와 같이 작성할 수 있다. 하중작용시간이 장기인 경우에는 하중작용 구간에서 최대변위가 발생되며, 손상곡선의 수직 축 값은 식 (8)과 식 (9)를 등치시키어 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\left(\frac{P}{P_0}\right)_1 = 1 \quad (10)$$

또한 식 (8)의 분자와 분모에 하중작용시간을 곱하여 식 (7)과 등치시키면 손상곡선의 수직 축 값에 대응되는 수평축 값을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\left(\frac{I}{I_0}\right)_1 = 2\pi \frac{t_1}{\tau} \quad (11)$$

여기서  $\tau$ 는 고유주기이다.

하중작용시간이 단기인 경우에는 최대변위가 하중종료 후 자유진동 시에 발생되며 식 (5)와 같다. 단기하중이 작용하는 경우 손상곡선의 수직 축 값은 식 (5)와 식 (9)를 등치시키면 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\left(\frac{P}{P_0}\right)_2 = \frac{2}{\sqrt{2(1 - \cos 2\pi \frac{t_1}{\tau})}} \quad (12)$$

또한 식 (5)의 분자와 분모에 하중작용시간을 곱하여 식 (7)과 등치시키면 식 (12)에 대응되는 손상곡선의 수평축 값을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\left(\frac{I}{I_0}\right)_2 = \frac{2\pi \frac{t_1}{\tau}}{\sqrt{2(1 - \cos 2\pi \frac{t_1}{\tau})}} \quad (13)$$

### 3.2 지수하중의 손상 곡선

지수형태의 충격하중이 작용하는 구조물의 손상곡선은 아래와 같이 작성할 수 있다. 지수형태 충격하중에 의한 최대변위는 유효하중시간이 장기일 경우에는 시간  $t = 0^+$ 에서 발생되며 아래와 같다.

$$x_{\max} = \frac{2P}{m} \frac{1}{\left(\frac{1}{t_1}\right)^2 + \omega^2} \quad (14)$$

유효하중시간이 장기인 경우에 적용할 수 있는 손상곡선의 수직 축 값은 식 (9)와 식 (14)를 등치시키면 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\left(\frac{P}{P_0}\right)_1 = \frac{1}{\left(2\pi \frac{t_1}{\tau}\right)^2 + 1} \quad (15)$$

또한 식 (14)의 분자와 분모에 유효하중시간을 곱하여 식 (7)과 등치시키면 손상곡선의 수평축 값을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\left(\frac{I}{I_0}\right)_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\left(2\pi \frac{t_1}{\tau}\right)} + 2\pi \frac{t_1}{\tau} \right) \quad (16)$$

유효하중시간이 고유주기에 비해 단기일 경우에는 강제모드가 소멸된 자연모드의 진폭을 최대변위로 사용할 수 있으며 자연모드의 진폭은 아래와 같다.

$$x_{\max} = \frac{2P}{m\omega} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{t_1}\right)^2 + \omega^2}} \quad (17)$$

유효하중시간이 단기인 경우에 적용할 수 있는 손상곡선의 수직 축 값은 식 (17)과 식 (9)를 등치시키면 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\left(\frac{P}{P_0}\right)_2 = 2\sqrt{1 + \left(2\pi \frac{t_1}{\tau}\right)^2} \quad (18)$$

또한 식 (17)의 분자와 분모에 유효하중시간을 곱하여 식 (7)과 등치시키면 손상곡선의 수평축 값을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\left(\frac{I}{I_0}\right)_2 = \sqrt{1 + \left(2\pi \frac{t_1}{\tau}\right)^2} \quad (19)$$

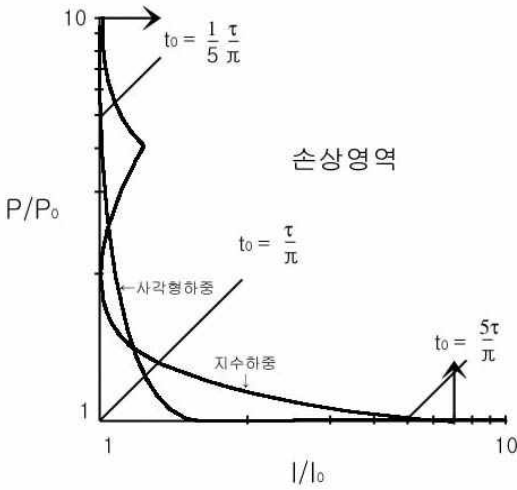


Fig. 2 손상곡선

Fig. 2에는 사각형과 지수형태의 충격하중이 작용하는 구조물의 손상곡선이 도시되어 있다. 사각형 하중에 의한 손상곡선은 식 (10)과 (11) 그리고 식 (12)와 (13)을 사용하여 작성되었으며, 지수 하중에 의한 손상곡선은 식 (15)와 (16) 그리고 식 (18)과 (19)를 사용하여 작성되었다. 그림에서 손상곡선의 우측 상부는 구조물에 손상을 발생시키는 하중들로 이루어진 영역이며 손상영역의 반대편인 좌측 하부는 손상이 발생되지 않는 하중들로 이루어진 안전영역이다. Fig. 2에 작성된 손상 곡선들은 임계변위를 발생시키는 하중들에 대한 임펄스 비와 하중최대치 비가 로그 스케일로 변환되어 도시되어 있다.

Fig. 2에는 단위 기울기를 갖고 있는 직선들이 나타나 있으며, 이 직선들의 기울기는 아래와 같다.

$$\frac{\log \frac{P}{P_0} - \log \frac{P_1}{P_0}}{\log \frac{I}{I_0} - \log \frac{I_1}{I_0}} = 1 \quad (20)$$

여기서  $P_1, I_1$ 은 단위 기울기를 갖는 직선상에 위치한 사각형하중의 최대치와 임펄스 값이다. 위의 식 (20)을 정리하면 아래 식 (21)과 같다.

$$\frac{I}{P} = \frac{I_1}{P_1} \quad (21)$$

식 (21)에서  $I/F$  값은 충격하중의 임펄스 값을 하중최대치로 나누어 준 값이며, 이는 사각형하중의 경우 하중작용시간이며, 지수하중의 경우에는 유효하중 작용시간을 의미한다. 또한 단위 기울기를 갖는 동일 직선상에 위치한 하중들의  $I/F$  값은 동일함으로, 단위 기울기를 갖는 동일 직선상에 위치한 하중들은 동일한 하중작용시간을 갖는 것을 알 수 있다.

Fig. 2에 나타난 직선 중 원점을 통과하는 직선의  $I/F$  값은 아래와 같다.

$$\frac{I}{P} = \frac{I_1}{P_1} = \frac{I_0}{P_0} \quad (22)$$

식 (7)과 식 (9)로부터 식 (22)는 아래와 같으며 따라서 Fig. 2의 원점을 통과하는 단위기울기의 직선상에 위치한 하중들의 하중작용시간은  $\tau/\pi$  이다.

$$\frac{I_0}{P_0} = \frac{\tau}{\pi}$$

Fig. 2에 위치한 다른 하중들의 하중작용시간은 식 (14)를 아래와 같이 변환시키어 구할 수 있다.

$$\frac{I}{P} = \frac{I_1/I_0}{P_1/P_0} \frac{I_0}{P_0} = \frac{I_1/I_0}{P_1/P_0} \frac{\tau}{\pi} \quad (23)$$

즉 충격하중의 하중작용시간은 임계변위를 발생시키는 이상임펄스에 대한 임펄스 비와 계단하중에 대한 하중최대치 비를 구하여 식 (23)에 대입하면 구할 수 있다.

Fig. 2에는 수평축과 수직축에 접근된 손상곡선의 그래디언트가 화살표로 표시되어 있다. 이들 중 수평축에 접근된 손상곡선의 그래디언트는 수직축과 평행한 방향의 손상영역을 가리키며, 반대로 수직축에 접근한 손상곡선의 그래디언트는 수평축과 평행한 방향

의 손상영역을 가리킨다. 이는 장기하중이 작용할 경우 임펄스보다는 하중최대치가 구조물의 안전에 주요 변수가 됨을 의미하며, 단기하중의 경우에는 하중최대치보다는 임펄스가 구조물의 안전에 주요 변수가 됨을 의미한다. 여기서 하중작용시간에 대한 장 단기의 여부는 구조물의 고유주기와 비교한 상대적인 값이다.

#### 4. 결 론

하중최대치 비와 임펄스 비를 이용하여 구조물의 안전성을 검토할 수 있는 손상곡선을 작성하였다. 작성된 손상곡선은 동일한 손상을 발생시키는 등가동하중 (equivalent dynamic loads)에 초점을 맞추고 있어 충격하중이 작용하는 구조물의 안전을 판단하는데 유용한 방법으로, 손상곡선 작성결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 구조물의 안전성은 단기에 종료하는 충격하중에 대해서는 임펄스가 중요 변수가 되며 반대로 장기간 작용하는 하중에 대해서는 임펄스보다는 하중최대치가 구조물의 안전에 주요변수가 되는 것을 파악하였다. 이러한 이유는 구조물의 동적거동에서는 탄성력뿐 아니라 관성력도 하중에 대해 저항하기 때문이다.
- 2) 단기에 종료하는 하중의 경우 초기관성력을 극복하기 이전에 하중이 종료하기 때문에 초기속도의 크기를 결정짓는 임펄스가 구조물의 안전에 중요변수가 되나 장기하중의 경우에는 하중작용시간이 초기관성력을 극복할 충분한 시간을 갖기 때문에 충격하중의 임펄스보다는 하중최대치가 구조물의 안전에 중요변수가 된다.
- 3) 지반 충격 시 지반의 최대입자속도는 충격하중의 임펄스에 해당되며 최대입자속도는 하중최대치에 해당된다. 따라서 지반 충격에 의한 구조물의 안전성은 단기에 종료하는 지반충격에 대해서는 지반의 최대입자속도가 그리고 장기간 작용하는

지반충격에 대해서는 지반의 최대입자속도가 구조물의 안전에 중요변수가 된다. 여기서 하중작용시간의 장·단기 여부는 구조물의 고유주기와 비교한 상대적인 값이며, 충격하중에 대한 구조물의 안전성을 판단하기 위해서는 하중의 동적특성과 구조물의 동적특성이 함께 고려되어야 한다.

#### 감사의 글

이 연구는 2003학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

#### 참고문헌

1. Explosives and Rock Blasting, Atlas Powder Company, 1995
2. Florence, A. L., Critical Loads for Reinforced Concrete Bunkers, final report to DNA, Contract No. DNA 001-77-C-0181, SRI international, 1987.
3. Seismic Analyses of Structures and Equipment for Nuclear Power Plants, Topical Report, Bectel Power Co. 1985.
4. Thomson, William Tyrrell, Theory of Vibration with Application, Prentice Hall, 1993.
5. Watson AJ, Hobbs B, Wright SJ. Scaling Explosive Damage to Reinforced Concrete Beams and Slabs, Proceedings of the First international Conference on Structures under Shock and Impact, 1989 July ; Cambrige, MA, USA. pp 15~28.
6. Wees, M. M., Peters, Dirk-Jan, Accuracy and Range of Applicability of the Single-Degree-of-Freedom Method. Proceedings of the Seventh International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures, 1995 April 24-28 ; Mannheim, Germany. pp 371~380.

(접수일자 : 2004년 9월 5일) (급행)