

지진, 폭발, 피로 등을 포함한 동적하중에 대한 해석 기술

Dynamic Analysis Technique for Earthquake, Explosion and Fatigue Loadings



이도형*
Do-Hyung Lee



김두기**
Doo-Kie Kim



이기학***
Ki-Hak Lee

1. 동적해석의 목적

동적해석의 목적은 일반적으로 동적하중에 대한 실험적인 방법의 한계성 및 제약으로 인하여 동적하중을 받는 구조물의 거동에 관한 기본적인 응답특성 혹은 상세 응답특성을 얻고자 수행한다. 이와 같은 동적해석에 의해서 얻어진 응답특성들은 설계단계에서 구조물의 제원, 철근콘크리트구조물의 경우 철근량 및 설계목적과 성능기준을 만족하는 상세 등의 선택적인 결정에 유용한 정보를 제공한다. 하지만 해석단계에서 필연적인 여러 가지 가정들에 의해서 해석으로부터 얻어진 응답특성의 형태는 대략적이고 간략한 결과에서부터 비교적 정확한 결과에 이르기까지 해석방법의 선택에 따라 다양하게 얻어질 수 있다.

해석의 기본적인 단계는 크게 세 단계로 나눌 수 있다. 첫째는 모델링이고, 둘째는 해석 및 계산 그리고 마지막으로 얻어진 해석 결과의 분석으로 나눌 수 있다. 모델링 단계에서는 대상 구조물에 작용하는 동적인 하중의 형태는 축약되고 단순화되어 수학적 이상화를 구현하는 단계이다. 이와 같은 모델링 단계는 해석하는 사람의 입장에서 볼 때, 가장 어려운 일이다. 왜냐하면, 모델링 단계는 해석하고자 하는 실제 구조물의 거동에 대한 지식 및 본질적인 공학적 판단과 함께 사용되어질 해석방법을 선택하는 과정이기 때문이다. 해석 및 계산단계는 구성된 모델링을 통해서 구조물의 응답을 결정하는 단계이고, 마지막 분석단계에서는 모델링 단계에서와 마찬가지로 본질적이고 공학적인 판단이 중요시된다.

여기서 동적해석의 경우에는 동적하중 자체의 시간에 따른 연속적인 변화성으로 인해 해석결과에 있어서 불확실성이 존재하고, 이와 같은 불확실성은 구조물이 충분한 강도를 가질 수 있도

록 보수적인 탄성설계를 유도한다. 하지만 지진하중 혹은 폭발 등과 같은 극한 동적하중의 경우에 있어서 보수적인 탄성설계는 비경제적일 뿐만 아니라 바람직한 설계가 아니다. 즉, 극한 동적하중을 받는 구조물의 바람직한 설계는 취성파괴를 피하고 연성적인 거동을 확보할 수 있는 설계이다. 이와 같은 연성거동은 설계기준에서 제시하고 있는 항목들을 만족함과 동시에, 거동예측을 위해 진보된 해석절차를 필요로 한다.

따라서 본고에서는 지진하중을 받는 구조물의 동적해석 방법 및 차량이나 가스 폭발 및 피로 등의 동적하중 모델링과 해석방법에 대해 설명하고자 한다. 모든 동적해석 방법에 대한 자세한 설명은 여러 가지 측면에서 본 기사의 범위를 벗어나기 때문에, 본 기사에서는 가장 많이 보편적으로 사용되는 동적해석방법의 종류를 간략하게 설명하고자 한다.

2. 지진하중의 해석 방법

2.1 진동수영역해석법

진동수영역해석법(frequency domain analysis method)은 주파수영역해석법이라고도 하며, 시간영역에서의 운동방정식을 진동수영역으로 변환한 후 해를 구한다. 일반적으로 푸리에변환(Fourier transformation)을 사용하여 운동방정식을 진동수영역으로 변환하면 시간영역에서 해를 구하는 것보다 효율적으로 해를 구할 수 있다.

또한, 고속 푸리에변환(fast Fourier transformation) 알고리즘을 이용하여 이산 푸리에변환(discrete Fourier transformation)을 적용하면 푸리에변환에 사용되는 적분을 쉽고 빠르게 처리할 수 있다. 진동수영역해석법은 구조시스템의 진동수 의존성을 반영하기 쉽고 해석시간이 시간영역해석법에 비해 상대적으로 적게 소요되는 장점이 있다. 반면에, 구조시스템의 시간의존성을 직접적으로 반영하기 어렵고 중첩의 원리를 기본으로 하고 있기 때문에 구조시스템의 비선형성을 고려하기 어

* 정희원, 배재대학교 건설환경철도공학과 부교수
dohlee@pcu.ac.kr

** 정희원, 군산대학교 토목환경공학부 조교수

*** 정희원, 세종대학교 건축공학과 부교수

려운 단점이 있다. 진동수영역해석법은 시간영역에서의 운동방정식의 해를 구하기 위해, 첫째 푸리에변환을 사용하여 운동방정식을 진동수영역으로 변환한 후, 둘째 진동수영역에서 운동방정식의 해를 구하고, 마지막으로 진동수영역에서 구한 해를 푸리에 역변환을 사용하여 다시 시간영역으로 변환한다. 진동수영역해석법의 도식화된 절차를 <그림 1>에 나타내었다.

2.2 시간영역해석법

시간영역해석법은 크게 모드중첩법과 수치해석을 이용하는 직접적분법으로 나누어진다. 모드중첩법은 각 개별적 모드에 대한 독립적인 응답을 구한 후 조합하는 선형중첩을 이용하는 해석법인 반면에, 선형중첩이 불가능한 경우, 예를 들어 비탄성해석이나 비례감쇠와 같은 경우에는 직접적분법을 사용한다. 직접적분법은 일반적으로 비선형 해석에 주로 사용된다. 시간영역해석법의 경우에는 실제 지진 발생때 각 기록장소(station)에서 기록된 실제지진파 및 각 나라의 설계기준에 부합되는 인공지진파를 생성하여 시간이력해석을 수행하기 때문에 한 개 이상의 지진파를 이용한 시간이력해석이 권고된다.

2.2.1 모드중첩법에 의한 시간이력해석

모드중첩법은 n 개의 자유도를 갖는 2계 연립미분방정식을 자유진동모드행렬을 사용하여 물리좌표계(physical coordinate system)에서 일반좌표계(general 혹은 natural coordinate system)로 좌표변환을 수행한 후, 각 모드에 대한 독립적인 운동방정식을 유도하여 해를 구한 후 조합하는 해석법이다. 물론 구조시스템에 따라 차이가 있지만 일반적인 경우, 제한된 수의 진동모드만을 사용하여도 비교적 정확한 해를 구할 수 있는 효율적인 해석법이다. 따라서 모드중첩법을 이용하여 구조물의 동적시간이력해석을 수행할 경우에는 계산의 효율성을 증대시키기 위하여, 구조 시스템의 자유도 수보다 작은 수의 저차 진동모드만을 사용한다. 이 경우, 해석에 포함시켜야 할 모드의 개수를 정하는 적절한 기준이 필요하며 유효모드질량의 개념을 이용하여 유효모드질량의 합이 전체 구조 시스템 질량의 90% 이상이 되도록 모드의 개수를 정한다. 모드중첩법은 제한된 자유진동모드만을 사용하여 대형 구조물의 동적거동을 비교적 정확하게 나타낼 수 있을 때 효과적인 반면에, 충격하중과 같은 특수하중을 받는 복잡한 구조물의 동적거동을 나타내기 위해 많은 수

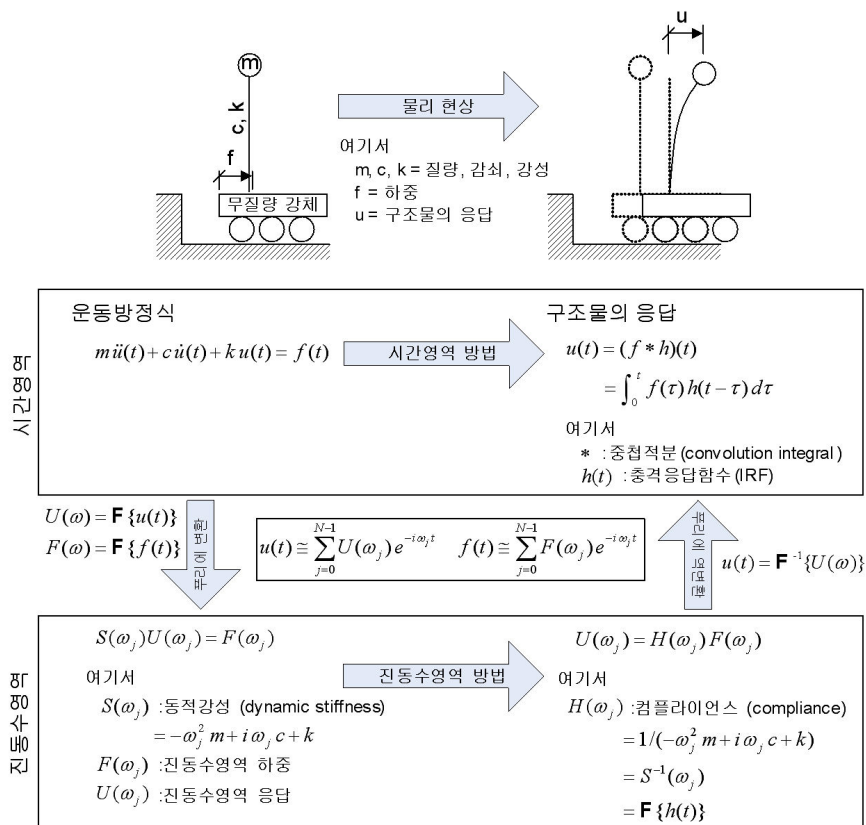


그림 1. 진동수영역해석법의 해석 절차

의 자유진동모드가 필요한 경우에는 효과적이지 않다. 각 모드별 응답의 선형조합과 모드별 응답의 중첩개념에 대한 도식적인 절차를 <그림 2와 3>에 각각 나타내었다.

2.2.2 두함멜 적분법(Duhamel's integral method)
 힘과 시간의 곱으로 정의되는 하중의 형태, 즉 충격하중(impulsive loading)은 비교적 짧은 시간의 간격동안 작용한

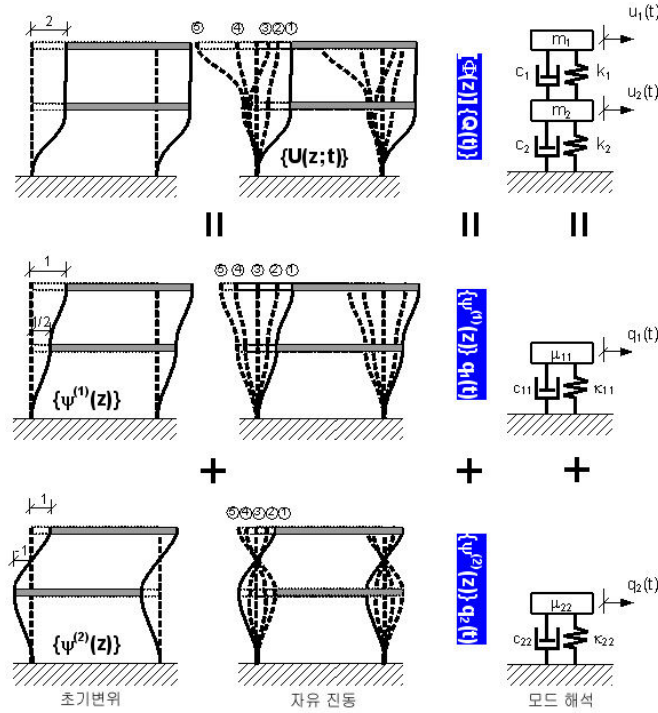


그림 2. 모드별 응답의 선형조합

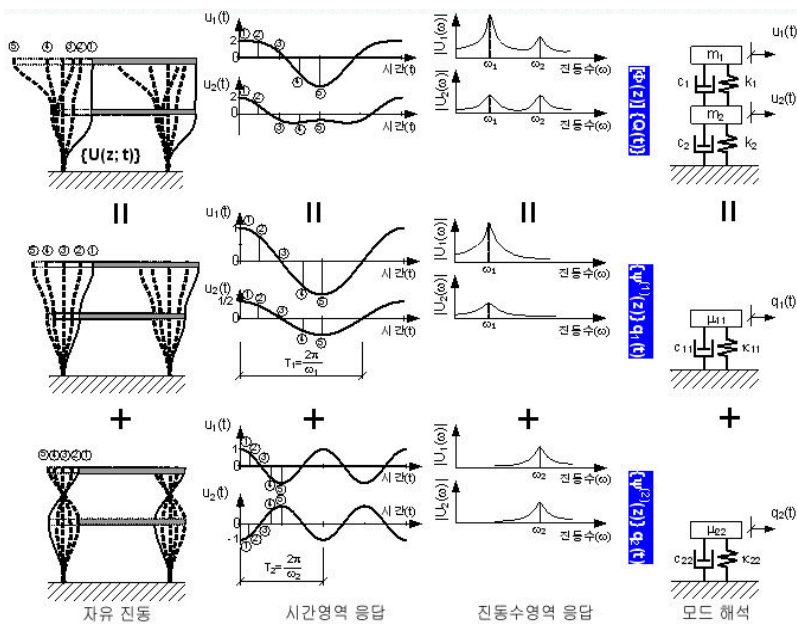


그림 3. 모드별 응답의 개념

다. 이와 같은 하중의 형태는 직사각형 형태, 삼각형 형태, sin함수 형태 등에 이르기까지 다양하다. 이와 같은 매우 짧은 시간간격동안 작용하는 하중을 받는 구조 시스템의 동적응답은 두함멜 적분법에 의해서 구할 수 있다. 두함멜 적분법은 시간구간을 여러 개의 미소시간구간으로 분할한 후, 각 구간에서의 하중이 선형으로 변화한다고 가정하여 동적응답을 구하는 방법으로, 두함멜 적분에 의한 응답을 구하기 위해 필요로 되는 두 상수변수의 계산은 근사적인 수치적분방법인 사다리꼴방법(trapezoidal method)과 심슨방법(Simpson's method)을 사용하여 구할 수 있다.

2.2.3 직접적분법

동적하중을 받고 있는 구조 시스템이 동적해석중에 질량, 감쇠비 및 강성의 변화를 겪는 경우에는 모드중첩법의 사용을 피해야 하고, 연립운동방정식의 해는 직접적분법에 의해서 구해야 한다. 동적유한요소해석절차에 사용되는 직접시간적분법은 어떤 시간 증분에서 평형관계가 부여되는지에 따라서 크게 두 가지로 분류된다. 직접적분법의 해는 항상 현 단계시간+ 시간간격에서 평가되는데, 현 단계시간에서 평형관계를 부여하여 해가 얻어지는 방법을 외연적 방법(explicit method)이라 하고, 현 단계시간 + 시간간격에서 평형관계를 부여하여 해가 얻어지는 방법을 내연적 방법(implicit method)이라고 한다. 일반적으로 내연적 방법은 외연적 방법에 비해 상대적으로 수치적분의 시간간격을 크게 할 수 있지만 계산량이 많게 되고, 외연적 방법은 내연적 방법에 비해 상대적으로 계산량은 적으나 수치적 안정성을 확보하기 위해 시간간격을 작게 하여야 한다. 외연적 방법은 충격하중을 받는 구조물의 응답을 해석하기에는 좋은 반면에, 구조물의 관심 있는 중요한 고유주기에 대해 구한 임계시간간격보다 작아야 하는 조건을 동반하므로 조건부 안정(conditionally stable)이라고 한다. 한편 내연적 방법은 수치적분에 사용되는 시간간격의 크기와는 무관하게 안정하므로 무조건 안정(unconditionally stable)이라고 한다.

대부분의 단일 구조시스템의 경우에는 외연적 방법 혹은 내연적 방법이 사용되는 반면에, 지반-구조시스템 및 유체-구조시스템의 상호관계를 포함하는 경우에는 외연적 방법과 내연적 방법을 혼합하여 사용하면 최적의 정확성과 효율성을 얻을 수 있다고 알려져 있다.

즉, 이와 같은 상호관계 문제에 있어서, 구조 시스템은 내연적 방법으로, 지반 및 유체는 외연적 방법으로 다루어진다. 대표적인 외연적 방법으로는 중앙차분법(central difference)이 있으며 내연적 방법으로는 여러 가지가 있는데 상세한 해석절차는 참고문헌에서 찾을 수 있고, 여기에서는 직접적분법의 종류만을 기술한다.

- 외연적 방법(explicit method)
 - 중앙차분법(central difference method)
- 내연적 방법(implicit method)
 - 룬게-쿠타법(Runge-Kutta method)
 - 평균 가속도법(average acceleration method)
 - 선형 가속도법(linear acceleration method)
 - 호볼트법(Houbolt method)
 - 윌슨- θ 법(Wilson- θ method)
 - 뉴마크- β 법(Newmark- β method)
 - Hilber-Hughes-Taylor α 법(HHT α method)
 - Unified set of single step algorithm¹²
 - p-method³⁾
 - θ_1 method⁷⁾

2.3 응답스펙트럼 해석법

응답스펙트럼해석법은 구조 시스템의 동적거동의 최대응답을 구하기 위하여 사용되는데, 지진하중에 대한 내진설계에는 지진하중에 의해서 구조 시스템에 발생하는 최대변위 및 최대부재력이 필요하기 때문에 구조 시스템의 내진설계에서 많이 사용되는 동적해석법이다.

2.3.1 탄성 응답스펙트럼

응답스펙트럼해석법을 이용하면 단자유도 구조물에 대하여 복잡한 시간이력해석을 수행하지 않고 최대응답을 구할 수 있다. 응답스펙트럼이란, 고유진동수와 감쇠비에 따른 단자유도계에 특정한 지반가속도를 작용시켜 얻은 최대응답, 즉, 최대변위와, 이 최대변위(spectral displacement)를 조화운동으로 가정하여 얻은 유사최대속도(pseudo spectral velocity) 및 유사최대가속도(pseudo spectral acceleration)를 나타낸 것으로, 모드해석(modal analysis) 절차를 이용하여 구조 시스템에 작용될 동적 힘을 평가하는데 주로 사용된다. El Centro(1940) 지진의 지반가속도를 이용하여 최대 가속도 응답스펙트럼을 구하는 개념적인 절차를 <그림 4>에 나타내었다.

모든 주기영역을 고려한 탄성응답스펙트럼을 작성하기 위해서 일반적으로 3중 대수그래프(tripartite logarithmic plot) 또는 4축 대수그래프(four-way logarithmic plot)를 이용한다. 3중 대수그래프는 즉, 최대변위, 유사최대속도 및 유사최대가속도의 3가지 응답을 하나의 그래프로 나타낸 것으로 모드해석에 유용하게 사용된다. 단자유도 구조물의 최대변위 u_{max} 를 구하기 위하여 응답스펙트럼에서 진동주기에 대한 최대변위(D), 유사최대속도(V) 및 유사최대가속도(A) 중에서 하나의 값을 알 수 있다면, 다음 식 (1)과 (2)를 이용하여 최대변위와 최대전단력을 구할 수 있다.

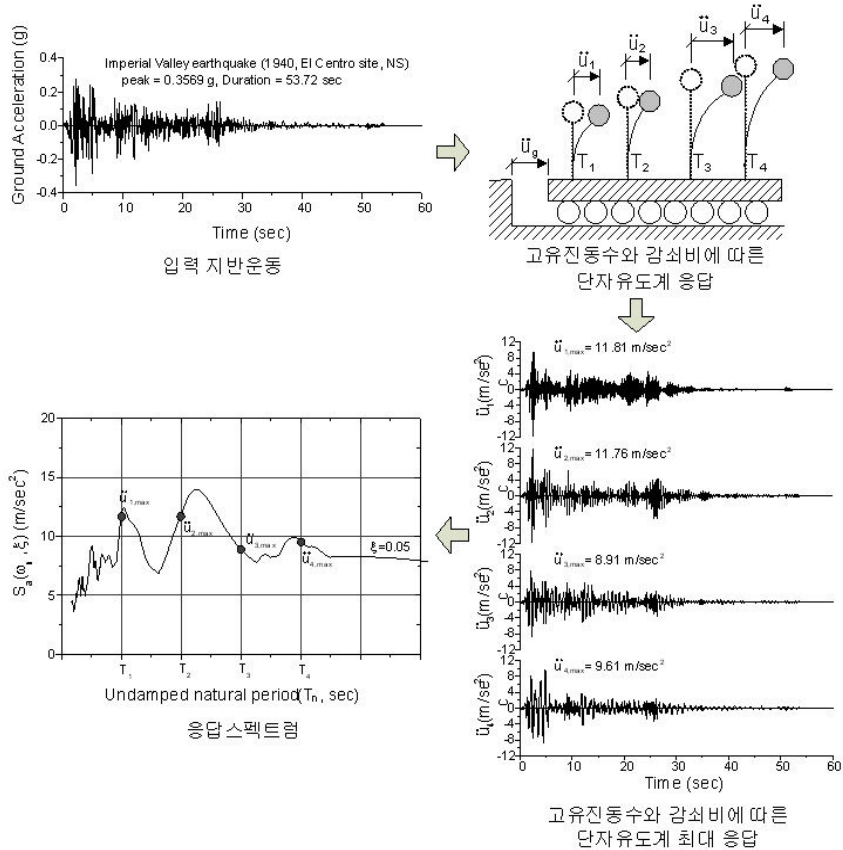


그림 4. 응답스펙트럼 절차의 개념도

$$u_{max} = D = \left(\frac{T_n}{2\pi}\right)V = \left(\frac{T_n}{2\pi}\right)^2 A \quad (1)$$

$$V_{max} = kD = k\left(\frac{1}{\omega_n^2}\right)A \quad (2)$$

여기서 T_n 은 진동주기(s), ω_n 은 고유각진동수(Hz) 그리고 k 는 단자유도계의 강성을 나타낸다.

2.3.2 비탄성 응답스펙트럼

구조 시스템이 비탄성 영역으로 거동하게 되면 구조 시스템은 탄성응답스펙트럼에 근거한 응답과는 다른 거동을 하게 되고, 이 경우에는 비탄성응답스펙트럼을 이용하여 구조 시스템의 응답을 결정한다. 비탄성응답스펙트럼을 구하는 과정은 탄성응답스펙트럼과는 다르다. 즉, 여러 단계의 감쇠비에 대응되는 곡선으로 나타나는 탄성응답스펙트럼과는 달리, 비탄성응답스펙트럼은 하나의 감쇠비에 대해, 여러 단계의 연성도에 대응되는 응답스펙트럼을 구한다. 선택된 감쇠비와 주기를 갖는 구조 시스템의 항복강

도를 변화시켜 가면서 비탄성 동적해석을 반복적으로 수행하여 최대연성도가 목표연성도와 일치할 때의 최대변위를 구한다. 이와 같은 과정을 다양한 주기에 대해 반복수행하면 특정 연성도에 대한 응답스펙트럼을 얻을 수 있다. 따라서 선택된 일정한 감쇠비에 대해 작성된 비탄성응답스펙트럼을 이용하면, 특정한 연성도를 가지는 구조 시스템의 동적응답을 구할 수 있다.

2.3.3 응답스펙트럼 해석 절차

응답스펙트럼 해석법을 사용하여 다자유도 구조 시스템의 최대 변위응답을 구하는 과정을 간략하게 정리하면 다음과 같다.

- 모드(mode)의 직교성을 이용하여 지진하중(지반가속도)을 받는 다자유도 구조시스템의 운동방정식이 서로 독립된 운동방정식으로 각 모드의 운동방정식을 분리한다.
- n 번째 진동모드와 동일한 진동수와 감쇠비를 가지는 등가의 단자유도 모델을 설정한다.
- 등가의 단자유도 동적평형방정식으로부터 모드참여계수(modal participation factor)를 구한다. 주의할 점은 모드참여계수가 클수록 해당모드의 영향이 반드시 큰 것은 아

니다. 왜냐하면 모드형상은 임의적으로 정규화할 수 있으므로 모드참여계수는 모드형상을 어떻게 정규화 하는지에 따라 달라질 수 있기 때문이다. 각 모드가 구조 시스템의 동적 거동에 미치는 영향을 나타내는 변수로는 유효모드질량(effective modal mass)을 생각할 수 있다. 즉, 각 모드의 유효모드질량의 합은 구조 시스템 전체의 질량이 되고, 각 모드의 유효모드질량을 구조 시스템 전체질량으로 나누면 질량참여율(modal participation factor)을 구할 수 있다. 따라서 모든 모드의 질량참여율을 합하면 1이 된다.

- 2.3.1과 2.3.2에서 설명된 방법에 따라서 최대응답을 구한다. 변위응답스펙트럼을 사용하면 직접 모드별 최대변위를 구할 수 있지만 일반적으로 가속도응답스펙트럼을 주로 많이 사용한다. 즉, 구조 시스템에 대해, 각 모드의 고유주기에 해당하는 최대가속도를 응답스펙트럼으로부터 구한 후, 이 최대가속도에 모드참여계수를 곱하면 구조물에 발생할 최대가속도를 구할 수 있다. 각 모드의 최대가속도로부터 식 (1)의 마지막 항을 사용하면 모드 최대변위를 구할 수 있다.
- 모든 모드의 응답이 동시에 최대에 도달하는 경우, 각 모드별 구한 절대최대변위를 더하면 구조 시스템의 최대변위응답을 구할 수 있지만 실제적으로 모든 모드의 응답이 동시에 최대로 발생할 가능성은 확률적으로 매우 낮다. 따라서 최대변위응답을 구하기 위해 모드별 최대응답을 조합하는 방법이 사용된다. 가장 많이 사용되는 조합법으로 SRSS(Square Root of the Sum of Squares)와 CQC (Complete Quadratic Combination)가 있다. 이 조합법 중에서 일반적으로 SRSS 조합법이 보편적으로 많이 사용되지만, 두 개 이상의 인접한 모드에 대한 진동주기가 서로 비슷한 경우에는 과소평가하는 경우가 있는 것으로 알려져 있다.

3. 폭발하중의 해석 방법

3.1 폭발의 정의 및 성질

폭발(explosion)은 빛, 열, 소리 및 충격파의 형태로 순간적으로 매우 많은 양의 에너지를 방출한다. 고압의 폭발이 발생하면 초기에 아주 빠른 속도로 주변의 대기와 평형상태를 만족시키기 위해 공기 폭발(air blast) 충격파를 발생하게 되는데, 이 충격파가 충격파의 전달방향과 평행하지 않은 구조물의 표면에 충돌할 때 반사되면서 엄청난 압력의 증폭이 발생한다. 일반적으로 소리파는 반사될 때의 증폭계수가 2배인 반면에, 충격파는 엄청난 속도(초음속)로 인하여 반사될 때의 증폭계수가 13배까지 될 수 있다. 반사 증폭계수는 폭발지점으로부터의 거리와 충격파의 입사각에 따라 달라진다. 충격파는 전달방향과 직각인 구조물의

표면에 충돌할 때 최대가 되고, 전달방향과 평행이 경우에 최소가 된다. FEMA427⁶⁾에서 제시하고 있는 충격과 압력의 시간이력은 <그림 5>에 나타나 있다. <그림 5>에서 알 수 있는 바와 같이, 폭발에 의해 발생된 파장은 대기압을 순간적으로 상승시킨다. 하지만 상승된 압력은 매우 짧은 시간 즉, 수천분의 1초 동안에 감쇠된다. 하지만 구조물의 돌출부위에 의해서 발생하는 파장의 회절효과는 충격파를 구속시키는 작용을 하여 감쇠시간을 느리게 할 수 있다. 폭발 후에 충격파는 부 압력 단계로 되어 부분적인 진공상태가 형성되고, 그 직후 공기가 흡입되면서 구조물의 표면에 매우 강력한 폭풍(바람)을 발생시킨다. 이런 폭풍은 폭발에 의해 유발된 공기 중에 산재해 있는 파편들을 운반하는 역할을 한다.

3.2 폭발하중의 특징

폭발의 지속시간은 수천분의 1초 정도로 매우 순간적이다. 따라서 길게는 몇 십초까지 지속되는 지진하중과는 차이가 있다. 일반적으로 구조물의 질량에 동적하중이 작용하여 응답이 일어나기 까지는 시간이 소요되기 때문에, 구조물의 질량은 폭발에 의한 응답을 저감시키는데 큰 역할을 한다. 즉, 구조물의 질량이 응답하게 될 때에는 이미 폭발하중이 소멸하여 구조물을 안정시키는 역할을 하게 된다. 하지만 폭발하중 자체의 짧은 지속시간으로 인하여 구조물의 고차모드의 피해를 유발할 수도 있다. 또한, 폭발에 의한 압력은 폭발이 발생한 지점 근처에서는 순간적으로 크게 증가한 후, 거리가 멀어짐에 따라 급격하게 감소한다. 따라서 폭발이 발생한 지점과 가까운 거리에 면하여 있는 구조물의 전면부는 반대편 후면부에 비해 더 큰 손상을 받을 수 있다. 즉, 직접 공기 폭발은 보다 많은 국부적인 손상을 유발할 수 있다.

직접 공기 폭발 충격파에 의해서 구조물에 발생하는 손상은 크

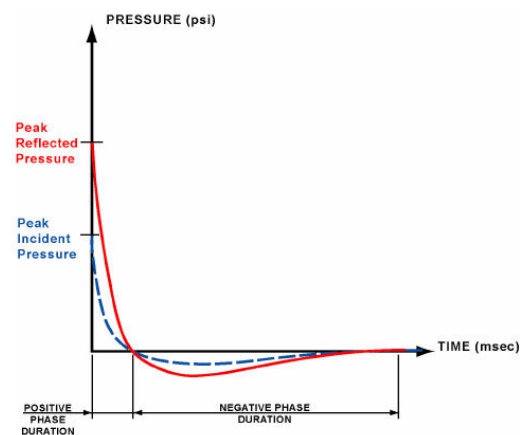


그림 5. 공기 폭발(air blast) 압력의 시간이력⁶⁾

게 두 가지 즉, 직접 공기 폭발효과와 점진적인 붕괴로 나누어 질 수 있다. 직접 공기 폭발 효과는 폭발이 발생한 근처에서 발생하는 매우 강한 공기 폭발 압력에 의해서 유발되어, 구조물의 외벽 및 기둥에 국부적인 손상을 야기시킨다. 한편, 점진적인 붕괴는 말 그대로 국부적인 손상이 연속적으로 이어지면서 결과적으로 전체 구조물이 붕괴되는 것으로, 수직상향 혹은 수직하향으로 발생할 수도 있고 수평방향으로도 발생할 수 있다. 차량폭발에 의해 구조물(빌딩구조물)에 손상이 발생하는 과정을 <그림 6>에 도식적으로 나타내었다.

3.3 폭발하중의 해석 방법

폭발하중에 의한 구조물의 비선형 동적해석기법은 앞서 언급했던 지진하중에 대한 동적해석기법과 동일한 해석기법을 사용한다. 다만, 폭발하중 자체가 매우 강한 압력과 짧은 지속시간 그리고 비선형 응답을 내포하고 있기 때문에 매우 정확하고 상세적인 시간 수치해석이 필요로 된다. 폭발하중에 대한 동적해석의 가장 큰 문제점은 해석모델과 적절한 파괴모드의 선택 그리고 해석결과와의 분석에 있다. 해석결과는 물론 가능한 경우 해석에 사용된 구조물과 가장 유사한 구조물과 하중을 이용한 실험결과와의 비교를 통해서 분석이 되어야 하겠지만, 폭발하중을 이용한 구조물의 실험은 너무나 많은 비용 및 안전성 문제로 인하여, 대부분 공학적인 해석에 의존하고 있다. 따라서 동적해석에 입력되는 폭발하중의 선택 및 결정이 해석결과에 미치는 영향이 크기 때문에, 폭발하중을 결정하는 방법이 중요시된다. 물론 폭발하중을 결정하는 방법에는 폭발의 종류와 형태에 따라 많은 다양한 방법이

있지만, 여기에서는 차량 등의 폭발에 의한 폭발하중과 가스 및 액상물질 등의 폭발에 의한 폭발하중을 고려하는 해석모델만을 간략하게 설명한다.

3.3.1 차량 등의 폭발에 의한 폭발하중

앞서 설명했던 것처럼 차량 등의 폭발에 의해 구조물에 작용하는 폭발 압력을 산정하기 위하여 직접 수치 폭발하중 해석이 일반적으로 많이 사용되고 있다. 즉, 폭발하중을 폭발 압력 펄스로 간주하여 동적해석을 수행한다. 폭발 압력 펄스는, 폭발이 발생한 지점에서 구조물까지의 거리, 충격파의 입사각 및 구조물의 형상에 따라 다르게 반사되는 압력의 크기에 따라 변화하기 때문에, 같은 폭발에 대해서 구조물에 작용되는 입력하중은 다를 수 있다. 다른 동적하중에 대한 해석과 마찬가지로 가장 최악의 경우를 일반적으로 입력하중으로 선택한다. 하지만 상세적인 폭발하중을 필요로 하는 중요하고 복잡한 구조물의 경우에는 폭발하중을 산정하기 위하여 전산유체동역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 사용하기도 한다.

3.3.2 가스 및 액상물질 등의 폭발에 의한 폭발하중

가스 및 액상물질 등의 화재에 의한 폭발은 물질의 분해나 연소 과정에서의 화학반응으로 압력이 상승하는 화학적 폭발 및 사용자 및 공급자의 취급부주의로 인해 폭발이 발생한다. 가스 및 액상물질 등의 폭발하중 모델은 경험적인 모델(empirical model), 현상적인 모델(phenomenological model), 그리고 CFD 및 Advanced CFD를 이용한 해석프로그램 자체의 독자적인 모델에 이르기까지 다양하여, 모든 모델들을 설명하기에는 그 양이 너무 방대하다. 따라서 본고에서는, 모델들의 종류와 독자적인 해석모델을 포함하고 있는 해석프로그램만을 나열하기로 한다.

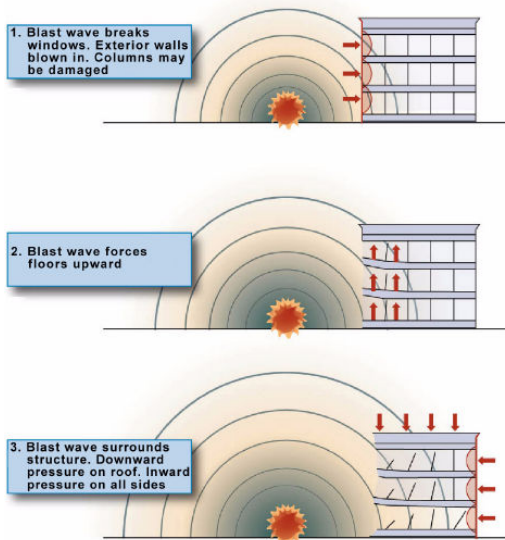


그림 6. 차량폭발에 의한 빌딩구조물의 손상⁶⁾

- 경험적인 모델(empirical model)
 - TNT equivalency model
 - TNO method
 - Multi-energy concept
 - Baker-Strehlow method
 - Congestion assessment method
 - Sedgwick loss assessment method
- 현상적인 모델(phenomenological model)을 이용한 해석 프로그램
 - SCOPE(Shell Code for Over-pressure Prediction in gas Explosions)
 - CLICHE(Confined Linked Chamber Explosion)

- CFD 및 Advanced CFD를 이용한 해석프로그램
 - EXSIM
 - FLACS(FLame ACeleration Simulator)
 - AutoReaGas
 - CFX-4
 - COBRA
 - NEWT
 - REACFLOW
 - Imperial College Research Code

4. 피로하중의 해석 방법

전통적인 피로해석 방법에서는, 주파수 영역에서 표현된 하중으로 피로해석을 하기 위해서 역 푸리에 변환기법(inverse Fourier transformation)을 이용하여 주파수 영역의 하중데이터를 시간영역으로 변환하여 하중 또는 응력이 시간영역에서 시계열로 표현된다. 피로해석을 위해서 이 하중 시계열 데이터를 사이클 카운팅(cycle counting)을 하여 Range-Mean Matrix를 구성하고, Range-Mean Matrix의 각 사이클별로 피로손상을 계산하여 피로수명을 계산한다. 이 방법은 실측한 피로시험 결과인 무한개의 변형률-시간 선도를 유한개의 사이클로 분리하여 일정한 시간마다 변형률의 크기를 조사하거나, 변형률의 최대치와 최소치를 파악하고, 변형률의 한계 범위를 설정한 후, 그 주기성을 탐지하여 평균 변형률을 계산하고 이를 토대로 하여 선형적인 S-N 선도에 적용하였다.

하지만, 주파수 영역에서 표현되는 하중들은 대부분 위상각의 정보가 없는 PSD(Power Spectral Density)형식으로 주어지기 때문에 시간영역으로 정확히 표현될 수가 없다. 하지만 랜덤 하중파형을 에르고딕 정상 Gaussian 랜덤파형으로 가정을 하면, 랜덤 파형의 위상각이 랜덤하다고 가정할 수 있으므로 변환이 가능하다. 이러한 방법은 간단히 주파수 영역의 하중데이터를 시간영역으로 변화하여 기존 피로해석 방법을 사용하기 때문에 간편한 점이 있지만, 생성된 시간영역에서 하중데이터의 양이 많아지기 때문에 복잡해지고 피로해석 시간도 많이 들게 된다. 따라서, 주파수 영역에서 표현되는 하중을 시간영역으로 변환함이 없이, 주파수 영역의 응력 PSD로부터 단품의 피로손상을 계산해 내고자 하는 연구가 진행되어왔고 <그림 7>은 여러 가지 형태의 시간이력과 대응되는 PSD 함수를 나타낸다.

즉, 임의로 가해지는 모든 하중을 구조물에 적용시키기 위해서는 하중의 전체에너지가 포함되어 있는 PSD(Power Spectral Density)를 적용하여 그 결과를 주파수영역에서 관찰하고 응력의 분포를 파악하여 시간영역으로 환산함으로써 실제 하중에서의 피로수명 예측을 예측하고 있다. 그림 7에서와 같이 진동에서

진폭-시간 선도가 PSD-주파수로 대응하듯이 S-N선도에서 변형률 (또는 응력)-사이클 수가 확률 밀도함수(PDF: Probability Density Function)-응력범위로 표현되는 것과 같다. 따라서 주파수 영역에서의 진동피로 해석은 응력 및 변형률 이력을 알 수 있는 유한요소해석 모델을 개발하고, 진동하중에 관한 전력스펙트럼 밀도함수(Power Spectral Density)를 생성하는 방법으로 이루어진다.

5. 결 론

본고에서는 보편적으로 가장 많이 이용되는 동적해석방법에 대해 개념위주의 간략한 내용을 서술하였다. 본고에서 고려된 동적 해석방법은 주로 지진하중에 대한 해석방법을 중심으로 기술하였고, 차량 및 가스 폭발에 의해 발생하는 폭발하중과 피로하중에 대해 간단하게 기술하였다. 이상으로 살펴본 결과, 동적해석 방법은 나름대로의 장단점을 가지고 있고, 해석방법의 선택은 전적으로 해석자의 공학적인 판단에 좌우된다. 하지만 해석의 결과는 설계와 직접적인 연관이 있기 때문에 해석방법의 선택은 전문적인 지식과 함께 상당한 주의가 요구된다.

사실 동적하중에 대한 구조 시스템의 응답해석은 공학실무자가 직면하고 있는 가장 어려운 문제중의 하나이다. 이는 동적하중 자체의 불확실성 뿐만 아니라 해석절차의 다양한 접근방법과도 관련이 있다. 특히, 구조 시스템이 비정형성이고, 응답의 비선형성이 클수록 매우 어려워진다. 해석의 목표는 구조 시스템 거동의 정확한 예측은 아니다. 물리적인 거동의 정확한 예측은 현실적으로 불가능한 일이다. 다만, 해석결과는 일관성이 있어야 하고, 주관적인 판단에 의한 구조 시스템의 이상화된 모델링, 동적하중의 모델링 및 해석방법의 선택이 결정되었다 할지라도, 일련의 모든 해석절차는 반드시 객관적인 일관성이 결여되지 않아야 한다. 따라서 설계에 유용한 데이터를 제공할 수 있을 정도의 신

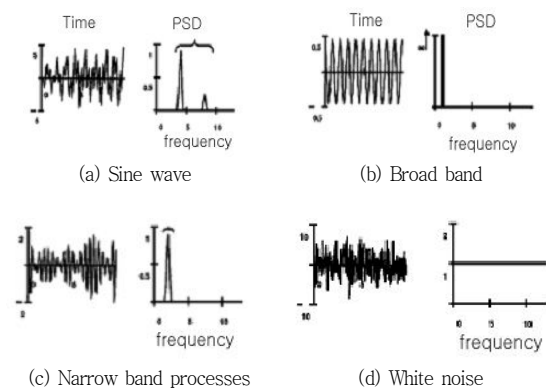


그림 7. 여러 형태의 시간이력과 대응되는 PSD

되성을 갖는 해석결과를 얻을 수 있다면 그걸로 충분할 것이다. 즉, 완벽하게 정확한 해석 결과는 불가능한 것이고, 공학적인 판단을 하는데 사용되어질 수 있을 정도의 정확한 해석 결과를 구하는 편이 훨씬 더 쉬울 것으로 사료된다. □

참고문헌

1. 김두기, 구조동역학, 도서출판 구미서관, 2005.
2. 한우섭, 이혁재, 임홍재, 동적특성을 고려한 차량 현가 시스템의 내구해석 기법, 한국소음진동학회 춘계학술대회 논문집, 2003.
3. Bazzi, G. and Anderheggen, E., "The ρ -Family of Algorithms for Time-Step Integration with Improved Numerical Dissipation," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 10, 1982, pp. 537 ~ 550.
4. Broderick, B. M., Elnashai, A. S., and Izzuddin, B. A., "Observation on the Effect of Numerical Dissipation on the Nonlinear Dynamic Response of Structural Systems," *Engineering Structures*, Vol. 16, No. 1, 1994, pp. 51 ~ 62.
5. FEMA, *Primer for Design of Commercial Buildings to*

Mitigate Terrorist Attacks, 2003.

6. FEMA Report No.427, *Federal Emergency Management Agency*, Washington DC, USA, 2003.
7. Hoff, C. and Pahl, P. J., "Practical Performance of the Θ 1-Method and Comparison with Other Dissipative Algorithms in Structural Dynamics," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engieernig*, Vol. 67, 1988, pp. 87 ~ 110.
8. Lea, C. J., *A Review of the State-of-the-Art in Gas Explosion Modelling*, Fire and Explosion Group, Health and Safety Laboratory, Buxton, UK, 2002.
9. Soong, T. T. and Grigoriu, M., *Random Vibration of Mechanical and Structural Systems*, Prentice Hall International, Ltd., London, 1993.
10. Tedesco, J. W., McDougal, W. G., and Ross C. A., *Structural Dynamics, Theory and Applications*, Addison-Wesley Longman, Inc., 1999.
11. Zienkiewicz, O. C., Wood, W. L., and Taylor, R. L., "An Alternative Single-Step Algorithm for Dynamic Problems," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 8, 1980, pp. 31 ~ 40.

학회지 광고 게재 안내

콘크리트학회지는 격월간으로 발행되어 6,000여 회원을 비롯한 콘크리트 관련 업계, 학계, 유관 기관 및 단체 등에 배포되고 있습니다. 귀사의 미래를 위한 광고가 저렴한 가격과 가장 효과적인 방법으로 활용될 수 있도록 광고를 모집합니다.

1. 광고게재면

게재면	광고 협찬금	게재면	광고 협찬금
표 2	80만원	간지	70만원
표 3	70만원	내지(전면)	50만원
표 4	100만원	박스 광고	30만원

2. 할인혜택 : 본 학회의 특별회원이 게재하는 광고 또는 연간 6회 이상 게재 시 상기 협찬금을 아래와 같이 할인하여 드립니다. 단, 일시불로 납부하여야 적용 가능합니다.

- 1년 계약 : 10% 할인 2년 계약 : 20% 할인 회원사 : 추가 5% 할인