

불규칙변동하중에 대한 모사피로하중스펙트럼 산출기법 연구

권 정 호
항공우주공학과

<요 약>

항공기 주구조 설계과정에서 건전성 평가를 위하여 피로하중에 대한 내구성 또는 손상 허용성 해석이 요구된다. 이것은 피로손상누적이나 균열성장에 대한 해석적 분석이나 구조시험을 통하여 수행하게 되고 이때 사용수명 중 예상되는 신뢰성 있는 모사 피로하중스펙트럼 산출이 정확한 평가결과를 얻는데 중요한 관건이 된다. 항공기에 작용되는 불규칙 변동하중은 확정적 하중과 통계적 추론하중으로 구분할 수 있다. 비행 중 발생하는 돌풍이나 지상활주 등과 같은 하중은 후자에 속하게 되며 이러한 하중스펙트럼은 예상되는 실제하중 형태와 유사하게 모사하기가 매우 어려운 일이다. 특히 불규칙 변동하중 하에서 하중사이클 발생이력이 균열성장이나 피로손상누적에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있으며 따라서 이러한 추론적 하중은 방대한 측정자료로부터 통계적 확률처리를 거쳐 실제와 유사한 하중스펙트럼 형태로 모사할 필요가 있다. 이러한 관점에서 본 연구는 마르코프기법을 활용하여 측정하중의 분석자료를 기초로 확률적 랜덤처리 과정을 거쳐 불규칙하중스펙트럼을 구성하는 알고리즘을 고찰하고 계산과정을 전산프로그램화 한다.

A Study of Simulated Fatigue Load Spectra Generation Method for Fatigue Life Evaluation and Testing

Jung Ho Kwon
Dept. of Aerospace Engineering

<Abstract>

Increasing emphasis on fatigue life and damage tolerance evaluation in aircraft structural design requires a more precise analytical definition and simulation of the fatigue load spectrum. The need for clear understanding and generation method of simulated flight load spectrum, has been emphasized by developments that clarify the role of fatigue load sequences and interaction in the fatigue failure process. The load spectrum applied to airframes can be classified into two kinds, such as deterministic and stochastic load. The latter case, for example gust or ground load, is not easy to be simulated as real load profile in the consideration of probabilistic occurrences of load level. A method is presented for deriving realistic fatigue load spectrum using the technique of Markov process on the basis of distribution of load level occurrence frequencies from the measured random load data.

1. 서 론

항공기 구조의 설계기술은 경량화와 안전성 그리고 정비성에 대한 높은 신뢰도가 요구된다. 특히 주구조물의 피로하중에 대한 내구성과 손상허용성 평가는 항공기의 감항안전성과 운용상의 경제성에 직결되는 문제로 감항인증 규정에서 요구하고 있는 핵심적인 설계기술 분야라고 할 수 있다[1,2]. 따라서 새로운 항공기의 설계, 또는 최근 대두되고 있는 기존 운용항공기의 사용수명 연장을 위한 건전성 재평가 문제 등과 관련하여 내구성과 손상허용성 해석 및 시험평가 기술개발은 중요한 연구과제로 부각되고 있다[3]. 이와 같은 피로손상에 대한 설계검증 과정은 해석적 방법과 구조시험을 통하여 수행하게 되며 이때 해당 구조부위 별로 특별한 환경조건을 감안한 국부하중스펙트럼의 정확한 산출이 선결과제라고 할 수 있다. 일반적으로 항공기 주구조에 작용되는 피로하중스펙트럼은 비행 대비행(ft-by-ft) 형태로 구성하는 것이 타당한 것으로 알려져 있으며 구성단위인 비행당 하중스펙트럼은 각 비행임무의 성격에 따라 그림 1과 같이 다시 여러 비행구간으로 나누어지게 되고 이러한 구성요소들을 조합하여 하중스펙트럼을 산출하게 된다. 이때 정확한 피로손상 거동을 해석하기 위해서는 실제 작용하중과 유사한 비행모사 하중스펙트럼을 구성할 필요가 있다. 항공기에 작용하는 국부하중스펙트럼은 구조부위별로 기능상 매우 다른 형태로 나타난다. 비행중 발생하는 돌풍하중이나 활주노면의 요철형 굴곡에 의한 지상하중의 영향을 받는 구조부위의 국부하중스펙트럼은 통계적 추론하중 특성을 지니게 된다. 이러한 하중스펙트럼은 비행파라미터의 변화에 따라 통계적 하중발생 빈도자료[4,5,6]로 부터 해석적 방법으로 얻을 수도 있으나 항공기에 따라 여러 경우에 적용될 수 있는 범용자료는 제한적이기 때문에 많은 경우 직접 유사항공기의 운용하중 분석자료로 부터 하중스펙트럼을 구성하게 된다. 현재 많이 사용되고 있는 모사피로하중스펙트럼 산출기법으로 다음과 같은 것들이 있다[7,8,9].

- 블럭하중 프로그래밍법
- RMS값 프로그래밍법
- 랜덤 하중순서법

항공기 구조의 경우 비교적 간단한 블럭하중프로그래밍법을 많이 적용하고 있다. 이것은 하중분석자료로부터 하중발생 누적빈도곡선을 얻어 그림 2와 같이 누적빈도곡선을 단계별로 간략화(step approximation)하고 블럭하중스펙트럼을 구성하여 손상누적이거나 균열성장 수명해석 또는 구조시험에 적용하게 된다[10].

그러나 손상누적이거나 균열성장거동은 작용하중사이클의 크기(magnitude), 빈도수(frequency) 뿐만 아니라 작용하중 순서(sequence)의 영향도 크게 받게 된다. 블럭스펙트럼화 할 경우는 실제 불규칙 변동하중에서 발생하는 개별 하중사이클 순서에 따른 하중상호간섭 영향을 충분히 감안할 수가 없게 되어 피로손상과 균열성장의 해석 및 시험 결과에 오차를 가져올 수가 있다. 또한 RMS법이나 랜덤하중순서법의 경우에도 불규칙변동 형태는 얻을 수 있으나 이 경우에도 실제 하중스펙트럼에서 peak/valley 또는 valley/peak로 전환되는 발생빈도의 확률적 특성을 고려하지 않는다면 신뢰성 있는 하중스펙트럼을 모사할 수가 없게 된다. 즉, 불규칙변동피로하중을 peak/valley 또는 valley/peak의 연속적인 하중반전으로 구성된 것이라고 생각하면 각 하중요소의 발생빈도수와 peak/valley값의 전환확률이 피로손상누적과 피로수명에 중요한 영향을 미친다고 할 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 이러한 확률적 특성을 고려한 불규칙변동하중스펙트럼을 산출하기 위하여 측정하중자료를 신호분석기로 분석한 결과로부터 peak/valley 전환에 대한 From/To 누적빈도자료[11]를 얻고 이 자료를 기초로 마르코프기법을 통한 확률적 랜덤처리과정을 거쳐 모사하중스펙트럼을 구성하는 방법을 고찰하고 알고리즘을 전산프로그램화 하는데 목적이 있다.

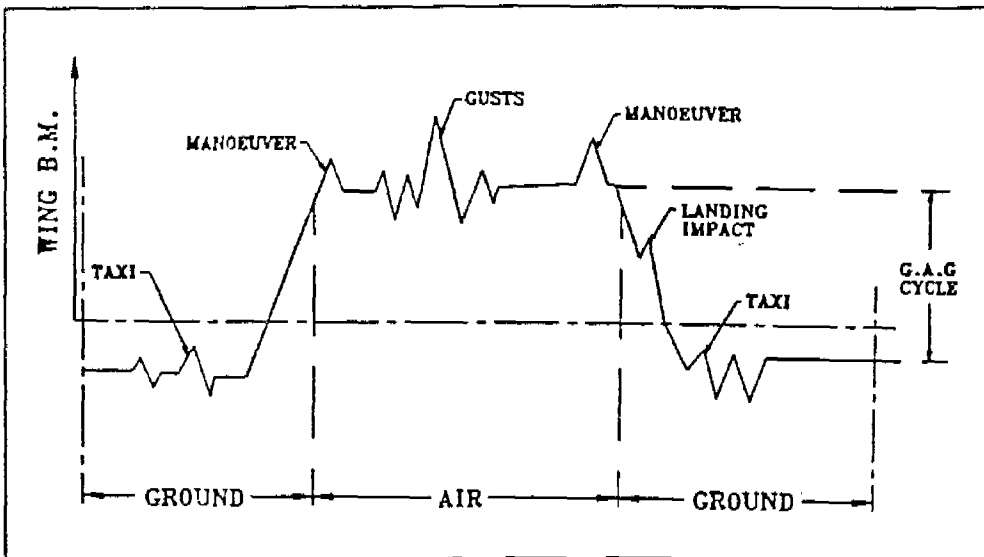


그림1. 1flight 비행시뮬레이션 스펙트럼의 형태

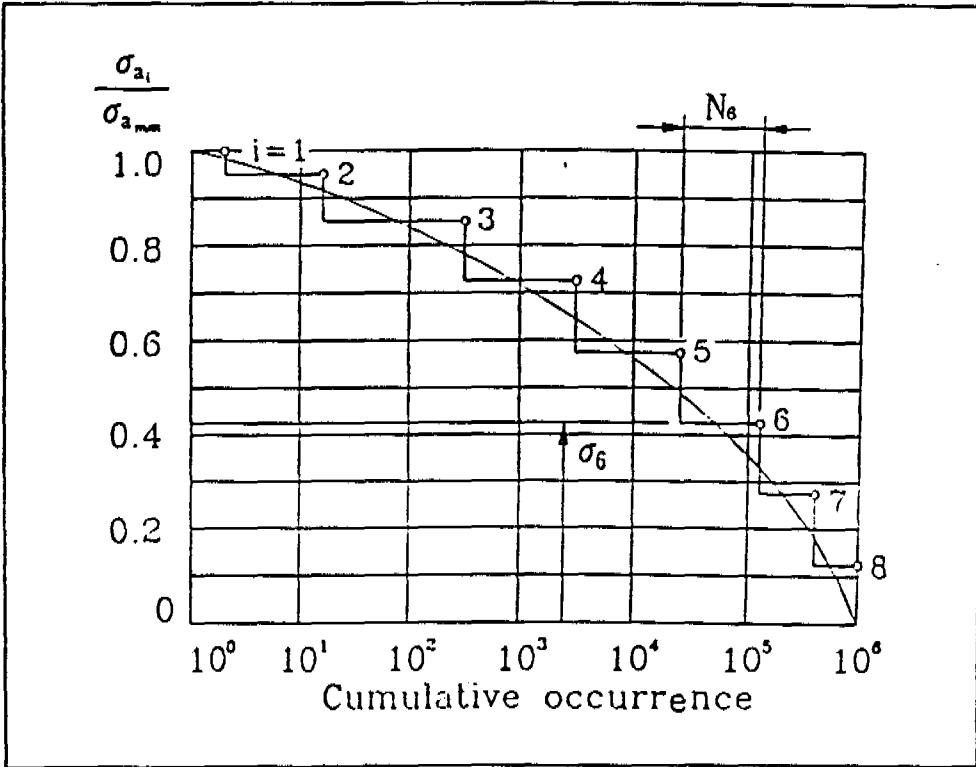


그림2. Exceedance Curve의 블록스펙트럼의 예

2. 이론적 배경

2.1 마르코프 기법 (Markov Chain)의 개요

마르코프기법[12]은 확률적인 연관성을 가지고 발생하는 일련의 사건을 종합하는 기법으로 임의의 상태공간, S 에서 어떤 랜덤변수, X_t 의 집합, T (즉 $t \in T$) 내에서 X_t 사이의 연관성에 의해 구성된다. 즉,

- 특정집합체의 상태공간, S
- 변수지표들의 집합, T
- 랜덤변수, X_t 사이의 연관성

이러한 세 파라미터가 처리과정을 좌우하는 주요인자가 된다. 여기서 우리는 peak/valley의 연속적인 구성을 통하여 모사하중스펙트럼을 산출하는데 이 기법을 적용하기 위하여 이러한 요소들을 고찰하기로 한다.

1) 상태공간, S

랜덤변수, X_t 는 임의의 시점, t 에서 시편에 작용하는 하중을 나타내는 변수이다. 이러한 작용하중 수준을 k 단계 (1, 2, 3, ..., k)로 나누면 변수, X_t 는 $2k$ 개의 값을 가지게 된다. 그러나 엄밀히 말하면 peak/valley로 구성된 연속적인 불규칙 변동하중을 얻기 위해서는 같은 하중수준에서 반사이클이 생길 수 없으므로 실제로 가능한 변수의 개수는 $(2K-2)$ 개의 변수들의 집합이 된다. 즉,

$$S = (\underbrace{1, 2, 3, \dots, k-1}_{\text{valley}}, \underbrace{2, 3, 4, \dots, k}_{\text{peak}})$$

2) 변수지표, t 의 집합, T

지표 t 의 집합인 T는 연속적인 반사이클의 순서를 나타내는 정수값들이다. 즉,

$$T = (0, 1, 2, \dots, n, \dots)$$

그러므로 X_0 는 초기 하중치를 나타내는 랜덤값이고 X_n 는 n 번째의 하중값을 나타낸다.

3) 변수 상호연관성

일반적으로 유한한 집합구성 변수, X_1, \dots, X_n 사이의 관계는 상호 분포함수를 통하여 연관성을 특성짓게 된다. 즉,

$$P_r (X_1=i, X_2=j, \dots, X_n=m)$$

단, $i, j, \dots, m \in S$ 로써 $X_1=i$ 는 변수 X_1 은 i 상태에 속해 있음을 의미한다. 여기서 주어진 변수값, X_t 에 대하여 다음의 변수값, $X_s(s>t)$ 는 그전의 변수값, $X_u(u<t)$ 와 무관하게 될때 이러한 일련의 변수들의 관계를 1차 마르코프체인이라 한다. 즉, 이것은 현재의 정확한 상태를 알고 있는 어떤 변수에 대하여 앞으로 발생되는 임의의 확률은 이미 지나간 변수들의 거동과는 무관하다는 것을 의미하며 이것을 확률적으로 표시하면,

$$P_r(X_{n+1}=j / X_1=1, \dots, X_n=i) = P_r(X_{n+1}=j / X_n=i)$$

로 표현할 수 있다. 여기서 X_n 이 상태 i 인 조건에서 X_{n+1} 이 상태 j 에 놓일 확률을 전환확률(transition probability)이라고 하며 $H_{ij}^{n,n+1}$ 로 표시한다. 또한 상태 i 에서 상태 j 로 전환되는 확률은 불규칙변동하중의 경우 시간과는 무관한 것으로 보고 정상전환(stationary transition) 확률로 간주한다. 즉, $H_{ij}^{n,n+1}$ 는 발생순서의 시점 n 과는 무관하고 단지 어떤 응력상태 i 에서 j 로 전환하는 반사이클의 확률만을 의미한다. 이 확률값을 H_{ij} 로 표시하여 행렬형태로 나타낼 수 있다. 이것을 전환행렬(transition matrix) 또는 마르코프행렬이라고 부르며 다음 그림 3과 같은 형태로 구성된다. 즉 행렬의 i 번째 줄은 $X_n=i$ 의 조건에서 X_{n+1} 에 대한 확률분포를 나타낸다. 이때 확률값 H_{ij} 는 다음 조건을 만족하게 된다.

$$H_{ij} \geq 0 \text{ 그리고 } \sum_{j=1}^{2k-2} H_{ij} = 1$$

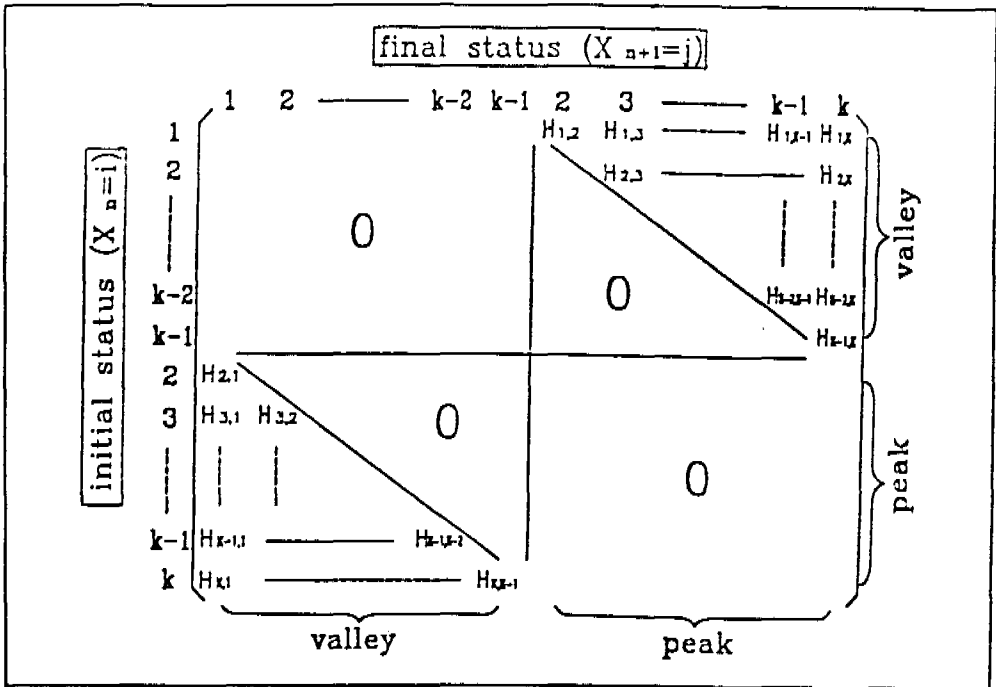


그림3. 전환행렬의 형태

2.2 Peak/Valley의 랜덤순서 구성

앞에서 전환행렬 $[H]$ 의 많은 요소가 영이므로 이것을 재배치 시켜 $[k \times k]$ 행렬로 축약시키는 것이 편리하다. 다음 그림 4(a)에서와 같은 불규칙변동하중에서 p 와 q 는 각각 연속적인 peak/valley값을 낸다. 이때 그림 4(b)에서와 같이 가로축을 peak, 세로축을 valley의 하중단계로 각각 적당하게 나누어 해당구간 내의 하중수준 i 에서 j 로 전환되는 빈도수를 H_{ij} 로 나타냄으로써 전환빈도행렬 $[H]$ 를 구성할 수 있다. 이때 그림 5와 같이 가로 세로축을 $2n$ 개의 등간격으로 나누고 중간값 n 을 기준으로 i, j 를 각각 n 보다 작은 값을 valley, n 보다 큰 값을 peak치의 영역으로 간주하면 행렬의 대각선 아래쪽은 peak→valley로 전환되는 빈도수, 위쪽은 valley→peak로 전환되는 빈도수를 나타내게 된다. 그러므로 대각선상 즉 $i=j$ 는 모두 영이 되고 전체 peak/valley의 수, N_e 는,

$$N_e = \sum_{i=1}^{2n} \left[\sum_{j=1}^{2n} H_{ij} \right]$$

이며 a 번째 단계의 peak 수, S_a 는 다음 값과 같아진다. 즉,

∴ a 보다 작은 단계의 모든 valley에서 a 단계의 peak로 전환되는 수

$$S_\alpha = \sum_{i=1}^{\alpha} H_{i\alpha} \quad \text{또는}$$

-, α 단계의 모든 peak가 α 보다 작은 단계의 valley로 전환되는 수 :

$$S_\alpha = \sum_{j=1}^{\alpha} H_{\alpha j}$$

또한, valley 수, T_β 에 대해서도 마찬가지로,

$$T_\beta = \sum_{i=\beta}^{2n} H_{i\beta} = \sum_{j=\beta}^{2n} H_{\beta j}$$

가 된다. $H_{\beta j}(j > \beta)$ 는 β 하중수준의 valley에서 임의의 peak 값으로 전환되는 빈도수를 나타내며 대각선 상부의 β 열에 위치하게 되고 β 열에 위치한 $H_{\beta j}(j > \beta)$ 의 합은, T_β 는,

$$T_\beta = \sum_{j=\beta}^k H_{\beta j}$$

가 된다. 그러므로 $H_{\beta j}$ 의 분포거동을 j 에 따라 그림 6(a)와 같이 히스토그램 형태로 나타낼 수 있고 이것을 누적시킴으로써 그림 6(c)와 같이 누적빈도의 히스토그램을 얻을 수 있다. 여기서 β 하중수준의 valley값에서 임의의 peak값을 찾아가는 과정을 생각하자. 즉, 1에서 T_β 사이의 모든 정수 중에서 우연히 취해진 랜덤수 Z 에 대하여 그림 6(b)에서와 같이 누적 전환빈도수 히스토그램의 세로축의 값으로 취하면 이 값에 해당하는 가로축 상의 peak level α 를 결정할 수가 있다. 즉, $H_{\beta \alpha}$ 가 매우 큰 값이면 그림 6(c)에서 보는 바와 같이 T_β 에 대해 $H_{\beta \alpha}$ 가 차지하는 높이가 커므로 그만큼 하중수준 β 에 해당하는 우연의 수 Z 가 α 에 떨어질 확률은 커지게 된다. 이러한 확률적 처리과정을 통하여 β level의 valley에서 α level의 peak로 전환되게 되고 다시 α level의 peak는 다음 valley를 찾기 위한 출발점이 되어 앞에서 설명한 과정을 되풀이하여 임의의 다음 valley level을 찾아가게 된다. 이때 출발점이 된 하중위치의 빈도수는 하나씩 감소하게 되고 따라서 하중반전시 마다 누적확률이 다시 계산되게 된다. 여기서 1과 T_β 사이에서 한개씩 존재하는 정수 중 한번 뽑을 수 있는 우연의 수를 의사랜덤수(quasi-random number)로 생각할 수 있고, 따라서 1과 T_β 사이를 0~1 사이의 균일확률분포로 간주하여 랜덤번호를 산출함으로써 우연의 수 Z 를 얻을 수 있다.

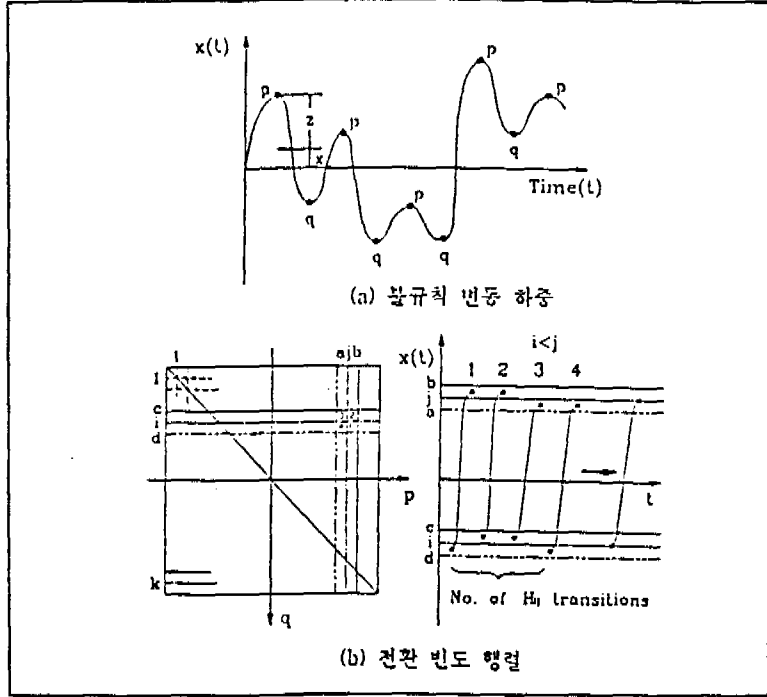


그림4. 불규칙변동하중의 Peak/Vally와 전환빈도행렬의 구성

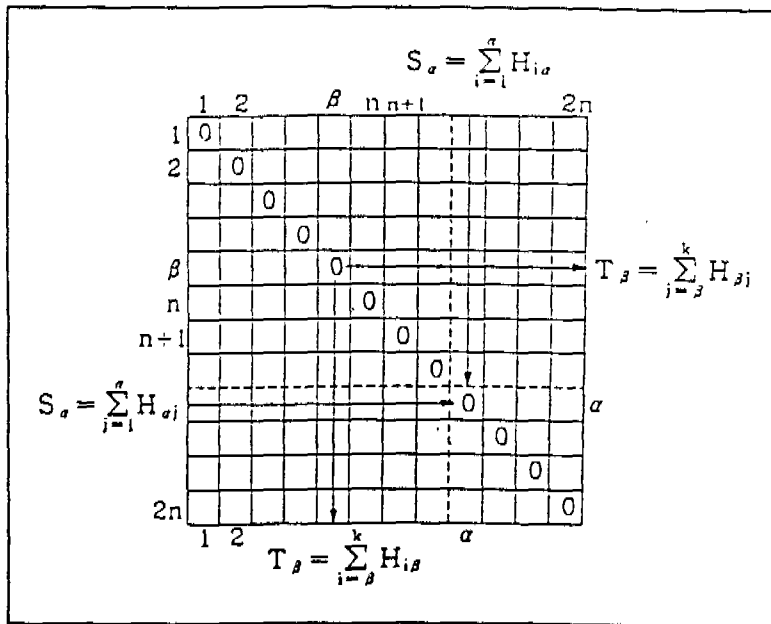


그림5. 전환행렬의 빈도수

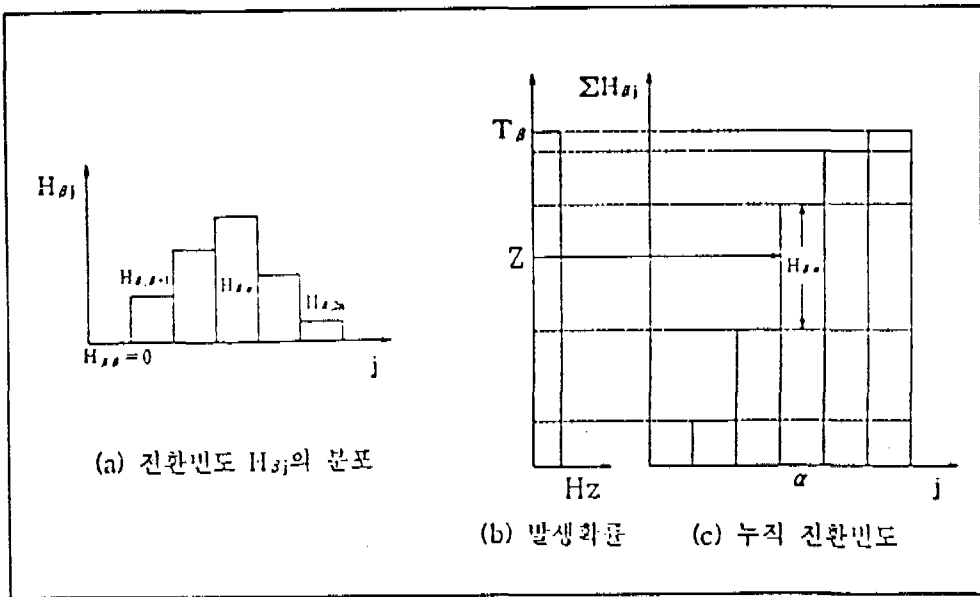


그림6. 누적빈도 히스토그램과 발생확률

3. 구조물의 피로하중스펙트럼 산출에의 응용

앞에서 설명한 마르코프기법을 사용하여 Peak/Valley의 연속적 랜덤순서를 구성함으로써 실제 구조물에 작용하는 모사 피로하중 스펙트럼 산출에 응용할 수가 있으며 계산과정을 다음의 두 단계로 나눌 수가 있다. 즉,

- 초기하중 위치의 결정: 전환행렬 대각선에 대하여 상·하부의 위치에 따라 시작 점이 peak 또는 valley 인지의 결정과 그때의 하중수준 위치의 확률적 결정
- 결정된 초기하중의 위치에 따라 다음의 peak 또는 valley 의 하중수준에 대한 연속적인 확률적 결정

3.1 초기하중, X_0 의 결정

전환빈도행렬의 대각선을 따라 상·하부 각각의 열에 나타난 반전수를 합산함으로써 peak 또는 valley의 각 하중수준에 대한 절대빈도수를 얻을 수 있다. 그러므로 초기치 X_0 가 각 위치에 놓일 확률은 peak와 valley의 전체빈도수로 각 열의 절대빈도수를 나눔으로써 얻을 수 있다. 이 X_0 의 누적확률분포, $F(X_0)$ 로 부터 그림 7에서 보는 바와 같이 랜덤번호 Z 에 따라 초기치의 위치를 확률적으로 결정할 수 있다. 즉, $0 \sim 1$ 사이의 무작위수를 얻어 그 값이 $F(4) < z \leq F(5)$ 사이의 값이라면 level 5의 valley값이 초기치로 결정되게 된다. 초기치 결정에 사용될 랜덤번호는 등분포확률 조건으로 $0 \sim 1$ 사이의 랜덤번호를 산출하여 사용하며 여기서는 FORTRAN에서 사용되는 수치해석법[13]을 적용하였다.

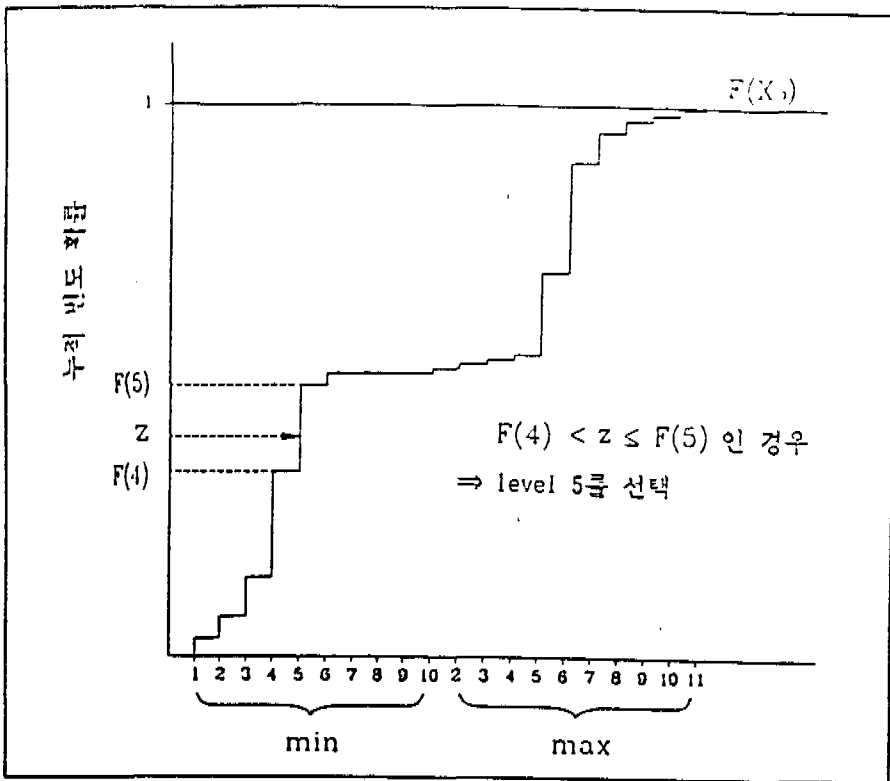


그림7. 누적빈도 확률분포로부터 초기치, X_0 의 결정

3.2 후속 Peak/Valley 값의 결정

초기치, X_0 가 결정되면 연속되는 다음 값 X_i 를 얻기 위하여 전환행렬 [H]는 각각 해당되는 절대빈도수로 대각선 상·하부의 각 열을 나눔으로써 해당 확률값을 얻을 수 있다. 즉, 초기조건이 결정되면 전환행렬 H_{ij} 는 대각선 상·하부의 하중행렬의 각 요소를 같은 열의 요소들을 합한 절대빈도수로 나눈 값이 초기 이후의 전환 확률분포를 나타내게 된다. 이 경우 하중행렬의 전체 빈도수가 구조물의 수명에 대해 하중스펙트럼 특성을 나타낼 수 있을 정도로 충분한 빈도수라야 한다. 이때 필요한 랜덤번호의 산출은 앞서서와 같이 랜덤번호생성 수치해석법을 사용하였다. 이와 같이 확률적 랜덤순서에 의한 불규칙변동하중스펙트럼 계산절차를 요약하면 다음 그림 8과 같다.

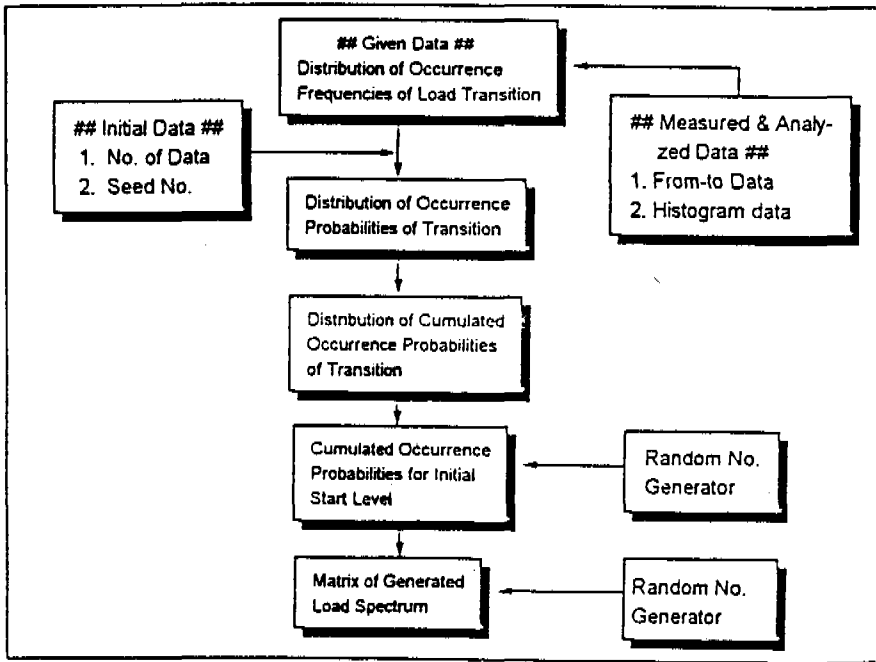


그림8. 불규칙변동하중스펙트럼 구성프로그램의 계산절차

3.3 불규칙변동하중의 측정 및 분석

여기서 실제 구조물에서 발생하는 불규칙하중의 측정자료와 앞에서 설명한 과정으로 재구성된 모사하중스펙트럼 계산결과를 비교해 보기 위하여 실제 자동차의 주행 중 지면의 요철굴곡으로 야기되는 차체 중량중심에서의 가속도변화를 측정하고 이 자료를 분석하여 얻은 랜덤하중스펙트럼 자료로 부터 계산프로그램을 사용하여 모사피로하중스펙트럼을 구성해 보기로 한다.

1) 측정방법

불규칙변동하중의 측정목적은 모사하중스펙트럼을 구성하기 위하여 하중발생 빈도자료를 얻기 위한 것이다. 여기서는 자동차를 이용하여 노면의 불규칙성으로 부터 주행방향에 수직방향으로 차체에 전달되는 가속도의 변화를 가속도계를 사용하여 차체의 중량중심에서 측정하였다. 사용된 측정장비는 TML社의 HR-800 히스토그램기록기와 분석기로 그림 9에서 측정장비를 보여주고 있다. 이 시스템은 스트레인게이지나 센서로부터 아날로그데이터를 받아 디지털로 전환하여 발생신호의 빈도분포를 측정하게 된다. 기록기에 수록된 가속도계 측정데이터를 분석기에서 지원하는 다음 두 가지 신호분석 프로그램은 자료를 분석하였다.

- . Positive Peak/Negative Valley
- . From-To method

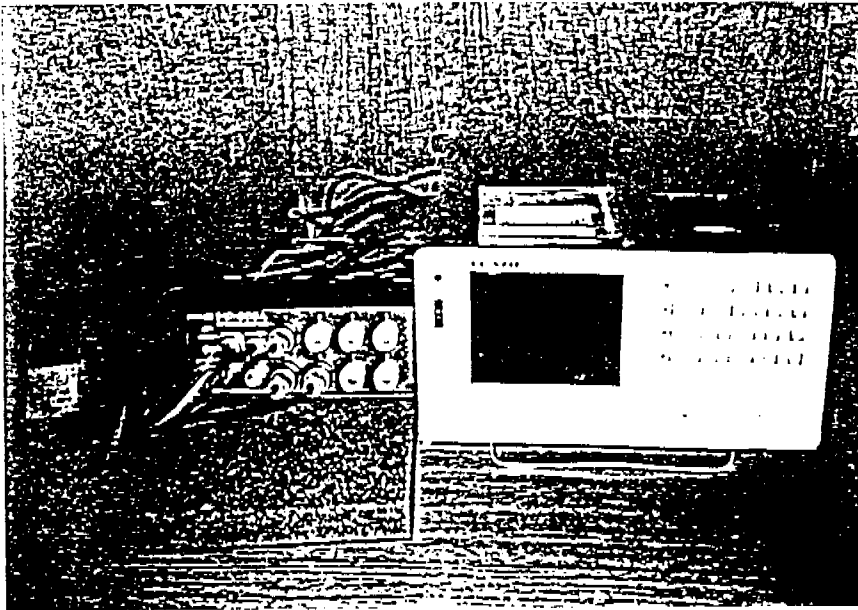


그림9. 측정장비의 구성:히스토그램 분석기, 히스토그램 기록계, 3축 가속도계

2) 측정 및 분석결과

미소변화량의 하중반전신호를 제외시키기 위하여 측정범위를 16단계로 나누고 동일단계 내에서의 반전신호는 무시하고 하중기록기에 수록되게 하였다. 이때 특정구조의 신뢰성 있는 하중발생 빈도분포를 얻기 위하여 충분한 수의 측정자료가 필요하며 여러번 측정을 반복하여 하중자료를 누적시켜 나간다. 여기서는 대개 30만여개의 하중점을 얻도록 측정하였다. 이렇게 수록된 데이터는 다시 분석기를 통하여 peak/valley와 From/To 하중발생 빈도 분포를 얻게 된다. 다음 그림 10과 11은 이렇게 얻은 각 하중수준에 대한 peak/valley 발생빈도히스토그램과 From/To 발생빈도분포 결과의 예를 각각 보여주고 있다. 이러한 측정자료의 분석결과로부터 피로수명해석에 필요한 모사하중스펙트럼 산출에 사용될 30여만개의 하중전환 발생빈도행렬을 얻게 되고 결과는 그림 12와 같다.

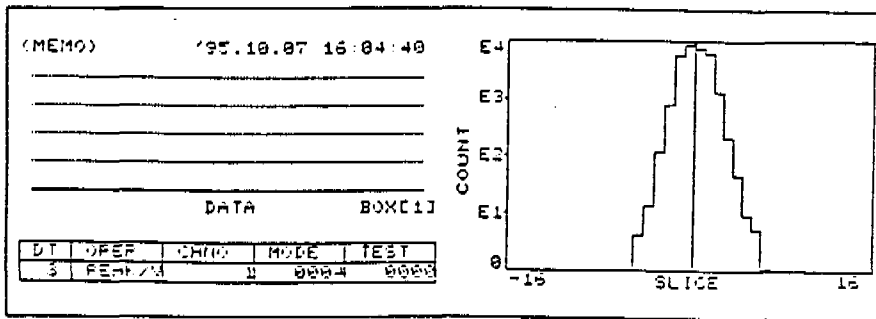


그림10. Peak/Valley 발생빈도 측정결과 히스토그램

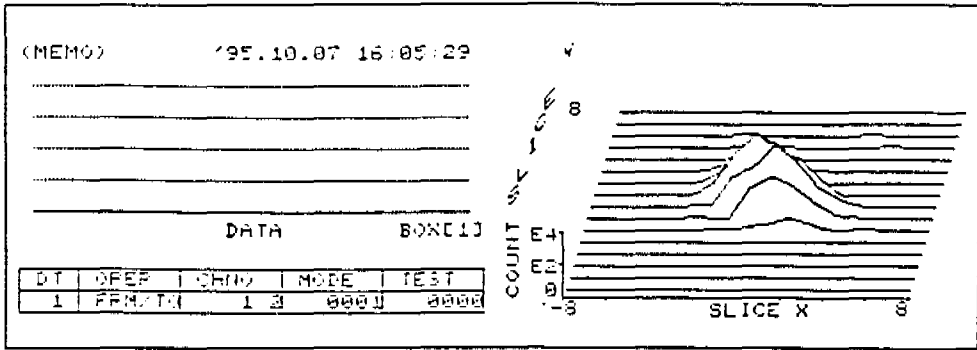


그림11. From/To 발생빈도 측정결과 분포도

3.4 계산결과 및 비교

앞에서 설명한 것처럼 그림 12는 측정자료의 신호분석 결과로 부터 얻은 총 307,898개의 peak 및 valley 하중점을 16단계의 From/To 하중수준 발생빈도 분포행렬로 나타낸 것으로 계산프로그램의 입력자료가 된다. 그림 13은 위의 분포행렬로 부터 계산된 각 하중수준의 peak/valley사이 에 전환되는 발생확률분포를 보여주고 있으며 그림 14에서는 행렬의 대각선 상하 각 열에 대한 발생빈도의 누적확률 분포와 초기하중 위치결정을 위한 전체 빈도에 대한 각 하중위치의 누적확률 계산결과와 랜덤번호 산출에 의한 초기하중 위치 계산결과를 보여주고 있다.

이와같이 누적전환확률분포에 따라 연속적으로 산출된 하중스펙트럼의 결과는 그림 15에서 보여주고 있다. 또한 그림 16은 산출된 하중스펙트럼에 대하여 하중수준 발생빈도 분포행렬을 재구성한 결과이며 그림 17은 그림 12와 그림 16 즉, 입력하중자료인 하중스펙트럼의 측정분석결과와 확률적 랜덤처리를 거쳐 재구성된 하중스펙트럼에 대한 각 하중수준의 peak 발생빈도수 분포를 비교한 히스토그램을 보여주고 있다. 여기에서 보는 바와 같이 계산결과는 초기 측정자료의 분포와 약간의 차이를 보여줄 뿐 매우 근접한 결과를 보여주고 있다. 그러므로 측정하중자료의 분석결과로 부터 확률적 랜덤처리 과정으로 하중스펙트럼을 구성하는 알고리즘은 피로수명이나 균열성장수명을 평가하기 위한 모사하중스펙트럼을 산출하는데 매우 효과적임을 알 수가 있다.

 ** DISTRIBUTION OF OCCURRENCE FREQUENCIES OF LOAD TRANSITION **

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.
1.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
4.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	0
5.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	2	1	1	0
6.	0	0	0	0	0	0	10	20	30	70	30	10	2	1	0	0
7.	0	0	0	0	0	10	0	1050	6300	1500	130	15	2	0	0	0
8.	0	0	0	0	0	50	1050	0	13150	10300	220	32	2	0	0	0
9.	0	0	0	0	0	70	6190	131470	0	2570	120	0	0	0	0	0
10.	0	0	0	2	5	50	1640	10300	2480	0	10	0	0	0	0	0
11.	0	0	1	2	10	30	110	250	110	20	0	0	0	0	0	0
12.	0	0	1	2	10	0	40	10	10	0	0	0	0	0	0	0
13.	0	1	1	2	5	0	10	0	10	0	0	0	0	0	0	0
14.	0	1	1	2	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15.	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16.	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

그림12. 하중수준 발생빈도 분포행렬

 ** DISTRIBUTION OF OCCURRENCE PROBABILITIES OF TRANSITION **

L	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.
1.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
2.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000
4.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.500	0.250	0.250	0.000
5.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.556	0.222	0.111	0.111	0.000
6.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.053	0.116	0.173	0.405	0.173	0.058	0.012	0.006	0.000
7.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.116	0.701	0.165	0.014	0.002	0.000	0.000	0.000
8.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.046	0.954	0.000	0.925	0.073	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
9.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.045	0.955	0.000	0.955	0.045	0.000	0.000	0.000	0.000
10.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.113	0.711	0.171	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11.	0.000	0.000	0.002	0.004	0.019	0.056	0.206	0.469	0.206	0.028	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
12.	0.000	0.000	0.014	0.027	0.137	0.000	0.548	0.137	0.137	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13.	0.000	0.034	0.034	0.069	0.172	0.000	0.345	0.000	0.345	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
14.	0.000	0.071	0.071	0.143	0.000	0.000	0.714	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15.	0.000	0.000	0.500	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
16.	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

그림13. 전환 발생확률 분포행렬

 ** DISTRIBUTION OF CUMULATED OCCURRENCE PROBABILITIES OF TRANSITION **

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.
1.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
2.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000
4.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.500	0.750	1.000	1.000
5.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.555	0.773	0.889	1.000	1.000
6.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.058	0.173	0.347	0.751	0.925	0.983	0.994	1.000	1.000	1.000
7.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.116	0.817	0.984	0.998	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
8.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.046	1.000	0.000	0.925	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
9.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.045	1.000	0.000	0.955	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
10.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.117	0.829	1.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
11.	0.000	0.000	0.002	0.006	0.024	0.081	0.287	0.736	0.952	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
12.	0.000	0.000	0.014	0.041	0.178	0.178	0.726	0.863	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13.	0.000	0.034	0.099	0.138	0.310	0.310	0.655	0.655	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
14.	0.000	0.071	0.143	0.286	0.286	0.286	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000
15.	0.000	0.000	0.500	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000
16.	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000

** CUMULATED OCCURRENCE PROBABILITIES FOR INITIAL START LEVEL **

.000	.000	.000	.000	.000	.001	.030	.491	.500	.500	.500	.500	.500	.500	.500	.500	.500
.500	.500	.500	.500	.500	.500	.504	.951	.998	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

GENERATED RANDOM NUMBER= 0.33620 START LEVEL: 8 SEED VALUE = -2538

그림14. 전환확률 누적발생 분포행렬 및 초기가중 위치 누적확률

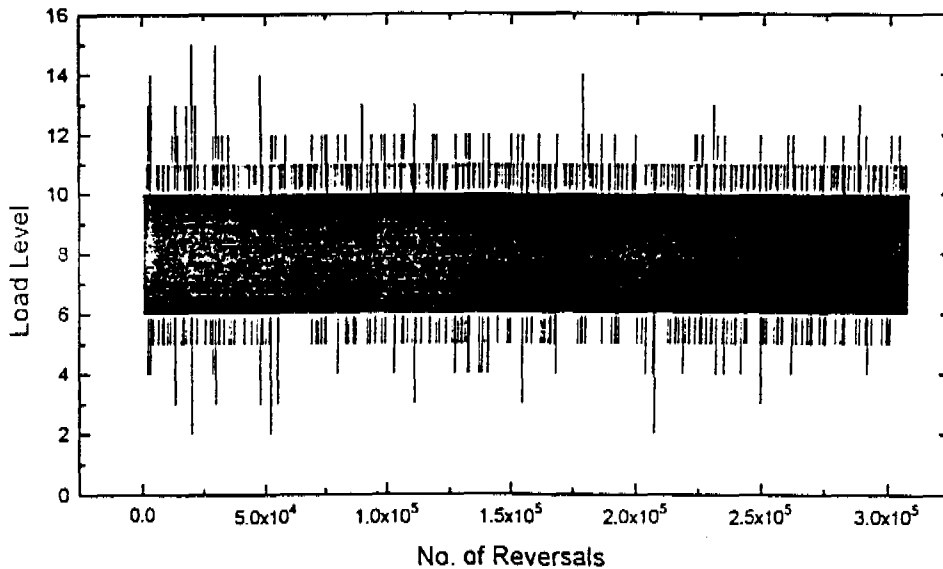


그림15. 산출된 모사하중 스펙트럼의 결과

** MATRIX OF GENERATED LOAD SPECTRUM : N=70728 **

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.
1.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
4.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	2	2	1	0
5.	0	0	0	0	0	0	0	0	2	8	11	2	1	1	0	0
6.	0	0	0	0	0	10	28	43	80	36	10	2	1	0	0	0
7.	0	0	0	0	10	0	1050	6315	1499	129	15	2	0	0	0	0
8.	0	0	0	0	50	1028	0	131487	10330	220	32	2	0	0	0	0
9.	0	0	0	0	70	6190	131585	0	2475	116	0	0	0	0	0	0
10.	0	0	0	2	5	50	1634	10232	2465	0	20	0	0	0	0	0
11.	0	0	1	2	10	30	113	254	111	20	0	0	0	0	0	0
12.	0	0	1	2	9	0	38	10	10	0	0	0	0	0	0	0
13.	0	0	0	1	1	0	3	0	5	0	0	0	0	0	0	0
14.	0	0	0	1	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15.	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

그림16. 산출된 모사하중 스펙트럼의 하중발생 분포행렬

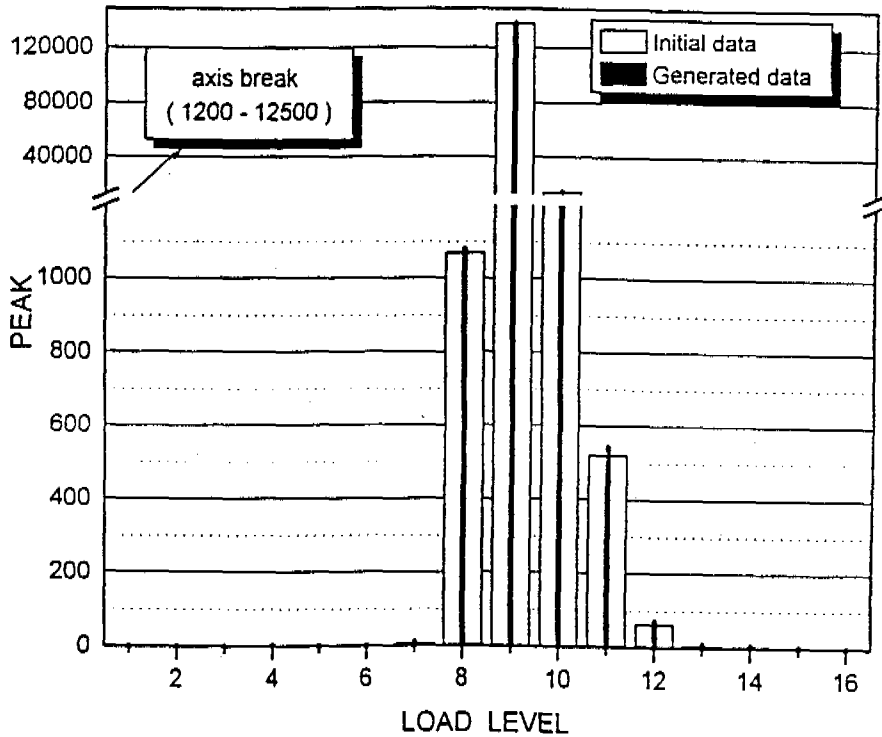


그림17. 하중 측정결과와 재구성된 모사하중 스펙트럼에서 각 하중수준에 대한 Peak하중 빈도의 비교

5. 결 론

항공기 주구조의 설계과정에서 피로하중에 대한 내구성과 손상허용성 평가와 관련된 해석 및 구조시험을 수행하기 위하여는 신뢰성 있는 비행모사하중스펙트럼 산출이 선행되어야 하며 대개 방대한 측정자료의 분석결과로부터 얻게 된다. 이러한 비행하중스펙트럼을 구성하는 요소 중에서 비행중에 발생하는 돌풍이나 활주노면의 굴곡으로 말미암아 야기되는 지상하중 등은 통계적 추론하중의 특성을 가지게 된다. 이러한 불규칙변동하중 하에서의 피로수명이나 균열성장 거동은 작용하중 사이클의 이력, 즉 하중순서의 영향이 크게 작용하는 것으로 알려지고 있다. 그러므로 통계적 추론하중의 경우 신뢰성 있는 하중스펙트럼을 구성하기 위하여 실제 하중발생빈도의 확률분포를 고려한 모사하중스펙트럼을 산출할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 구조물에 작용하는 불규칙변동하중의 측정자료로부터 마르코프기법을 활용하여 모사피로하중스펙트럼을 구성하는 알고리즘을 고찰하고 계산과정을 프로그램화 하였으며 실제 자동차 차체에 발생하는 불규칙 변동하중의 측정치와 모사하중스펙트럼 계산결과를 비교하여 다음의 결과를 얻었다.

-주행노면의 요철굴곡으로 야기되는 불규칙변동하중의 측정자료로부터 From/To 하중전환빈도를 분석하여 하중전환 확률분포를 구하고 확률적 랜덤처리 절차를 거쳐 모사피로하중스펙트럼을 구성하였다. 이렇게 재구성된 모사하중스펙트럼에 대하여 다시 peak/valley 하중수준의 발생빈도 분포를 구하여 초기 측정하중의 발생분포와 비교한 결과 거의 유사한 분포를 가짐을 알 수 있었다.

-즉, 확률적 랜덤처리 과정을 통하여 불규칙변동하중에 대한 피로하중스펙트럼을 구성함으로써 실제 하중스펙트럼의 하중사이클 특성을 유사하게 모사할 수 있었다.

-그러므로 통계적 추론하중의 특성을 가진 피로하중스펙트럼을 받는 구조물에 대하여 피로수명이나 균열성장해석 또는 구조시험을 수행해야 할 경우 이러한 산출기법을 적용함으로써 신뢰성 있는 모사하중스펙트럼을 효과적으로 얻을 수 있다.

*후기: 본 연구는 국방과학연구소에서 지원하는 장기기초연구과제(TEMD-401-950750) 중 대한항공연구원의 위탁연구내용중 일부임.

참 고 문 헌

- [1] Aircraft Structural Integrity Program, Airplane Requirements, MIL-STD-1530A, 11 Dec. 1975
- [2] Federal Aviation Regulation Part 25 - Airworthiness Standards, Transport Category Airplanes, FAA, 1968
- [3] Fatigue and Damage Tolerance Work during the Aircraft Design Process, ICAF Doc, 1490, 1985
- [4] Airplane Strength and Rigidity Reliability Requirement, Repeated Loads and Fatigue, MIL-A-8866B, 22 Aug. 1975

- [5] "Extended Life for Large Jet Transport Aircraft Damage Tolerance Evaluation Criteria and Guidelines," MDC Report No J0176, 1981
- [6] Average Gust Frequencies Subsonic Transport Aircraft, ESDM No. 69023, Royal Aeronautical Society, U.K Sep. 1969
- [7] S. S. Bassa, N. J. Sheth and S. R. Swanson, "Development random load life prediction model", Material Research and Standards, 12, Mar., 1973
- [8] H. P. Lieyrode, "Les essais de fatigue in programme," IRSID Rep. Mar., 1974
- [9] E. C. Naumann, "Fatigue under random and prograded loads", NASA TN D 2629 Feb, 1965
- [10] D. Broek, "Fatigue crack growth analysis", AGARD-LSP-97, 1978
- [11] A. Have, "European approaches in standard spectrum development," ASTM STP 1006, 1989
- [12] K. Sobczyk and B. F. Spence . Jr. , Random Fatigue : From Data to Theory, Academic Pres, Inc. Co. U.S.A, 1992
- [13] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vettering, and B.P. Flannery, Numerical Recipes in FORTRAN, The Art of Scientific Computing 2nd ed., Combridge Univ. Press, 1992