

# 공항 포장에서의 허용하중 산출 방법

엄병식\* · 권수안\*\*

## 1. 허용하중의 개념

도로의 차량과 다르게 공항에서 주행하는 항공기의 중량은 약 30,000 lbs 부터 800,000 lbs 까지 범위로 넓게 분포가 되어 있다. 따라서 공항에서의 항공기 하중은 도로 포장에 미치는 영향보다 크기 때문에 항공기의 하중 증감은 도로 포장보다 포장 수명의 영향이 크게 된다. 이러한 개념에서 허용하중은 주로 공항포장에서 사용되고 있다. 즉, 허용하중이란 포장의 공용성능이 파괴기준에 다다를 때까지 항공기가 일정횟수를 주행하기 위한 허용중량을 말한다.

허용하중을 산출하는 방법은 현재 FAA(미연방항공청), AFM(미공군 매뉴얼), 그리고 구조해석을 이용한 방법이 사용되고 있다. 이러한 방법은 설계차트의 차이, 그리고 포장해석의 차이 등이 있지만 산출하는 기본 개념은 같다. 허용하중 산출하는 기본 개념은 그림 1과 같다.

그림 1에서 보는 바와 같이 현재 사용되고 있는 허용하중 산출방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 설계차트에 의한 방법이고 다른 하나는 구조해석에 의한 방법이다. 본 기사에서는 허용하중 산출 방법에 대하여 콘크리트 포장 위주로 설명하였다.

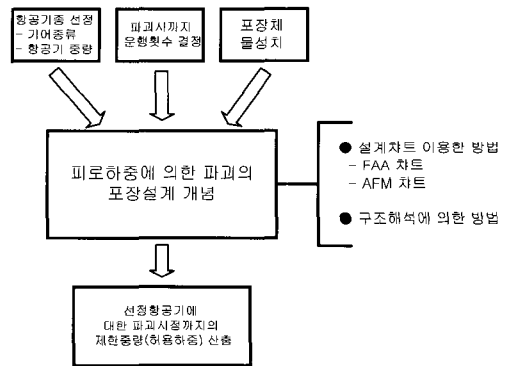


그림 1. 허용하중 기본 산출 개념

## 2. 허용하중 산출 방법

### 2.1 차트에 의한 방법(과거에 주로 사용되었던 산출방법)

차트에 의한 방법은 기본개념이 설계시 이용되었던 차트를 역으로 이용함으로써 산출하는 방법이다. 그림 2는 설계시와 평가시 다르게 사용되는 설계차트 이용차이를 보여준다.

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원(bseom@kict.re.kr)  
 \*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원(sakwon@kict.re.kr)

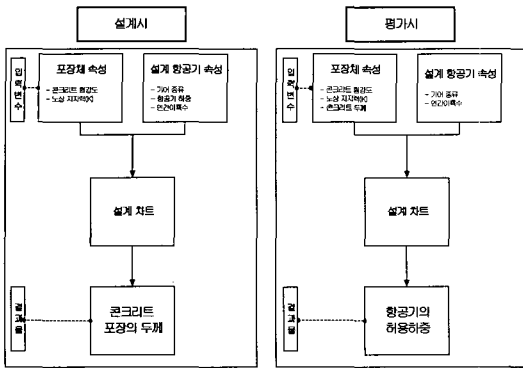
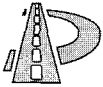


그림 2. 차트에 의한 허용하중 산출 개념

현재 이용되고 있는 차트에 의한 방법은 미연방 항공청(FAA : Federal Aviation Administration)의 포장설계 차트와 미공군 교범(AFM : Air Force Manual)의 포장설계 차트가 있다. 설계 차트를 이용하는 방법은 위에서 언급한 차트에 의한 허용하중 산출 개념을 사용하며, 본 기사에서는 각 차트의 특징과 산출방법을 언급하였다. 각 설계차트에 의한 허용하중 산출 방법은 다음과 같다.

### 2.1.1. FAA에 의한 방법

#### 가. 설계 차트의 특징

설계 차트의 기본 가정은 포장의 수명을 20년으로 하여 설계교통량이 년 출발교통량을 기준으로 만들어졌다. 아스팔트 포장의 경우는 CBR 설계법을 기초를 두었고 콘크리트 포장의 경우는 웨스터 가드의 단부 응력 분석을 통하여 만들어졌다. 각 포장형식별 설계 차트 특징은 다음과 같다.

· 아스팔트 포장 : 아스팔트포장 설계차트는 CBR 값, 항공기의 하중, 년 출발교통량을 입력변수로 하고 포장의 두께를 결정한다. 또한 항공기별 설계차트는 single wheel, dual wheel, dual tandem, A300, B747, B757, B767, DC-10 시리즈, L-1011, C-130을 제공하고 있다.

· 콘크리트 포장 : 콘크리트포장 설계차트는 콘크리트의 휨강도, 항공기의 하중, 연출발교통량, K 치를 입력변수로 하고 포장의 두께를 결정한다. 또한 설계 차트는 두 가지로 나누어 제공하고 있다. 하나는 바퀴하중이 중앙부를 지난다고 가정하여 설계된 차트와 바퀴하중이 조인트 모서리부에서 작용할 때를 기준으로 만들어진 설계차트이다. 전자의 경우는 활주로 중앙부에 사용되어지고 후자는 활주로 holding aprons, 활주로 끝단, 활주로와 유도로의 교차지점, 주기장 등에 이용되어진다. 또한 항공기별 설계차트는 아스팔트 포장과 같은 항공기에 대해서 제공하고 있다.

#### 나. 평가시 설계차트의 이용

평가시에는 단순히 설계의 역으로 이용한다. 즉, 년 교통량, 휨강도, K치(콘크리트포장 경우), 두께, CBR(아스팔트 포장 경우)를 입력변수로 하여 단순히 하중을 구한다. 이때 산출된 하중을 어떤 논리 없이 허용하중으로 그대로 채택하여 사용한다. <그림 3>은 FAA의 설계 차트의 예이다.

#### 다. 산출 방법

절차 1. 평가 항공기종의 기어 파악하여 설계 차트 종류 선정

절차 2. 포장체 두께, 노상반력계수, 콘크리트 휨강도를 입력변수로 하여 선정된 설계차트에 선을 그어 하중 결정

절차 3. 결정된 하중과 평가 항공기종의 M.O.T(Maximum Takeoff Weight)와 비교하여 M.O.T 보다 적을 경우 허용하중으로 결정

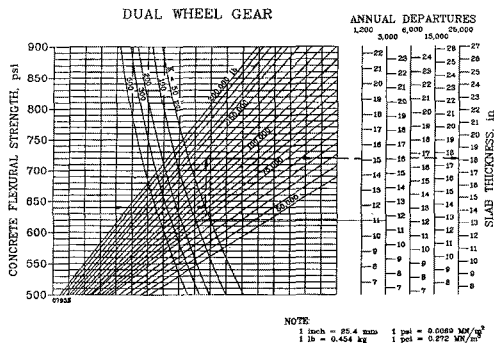


그림 3 콘크리트 포장 Dual wheel 설계차트의 예

### 2.1.2. AFM에 의한 방법

#### 가. 차트의 특징

미 공군에서는 FAA처럼 설계차트만을 제공하는 것이 아니라 설계차트를 역으로 만든 평가차트를 제공한다. 그러나 이러한 것은 평가시 좀 더 편하게 쓸 수 있도록 만든 것이다. 이 차트의 특징으로는 기어별 차트나 몇 개 기종만을 제공하는 FAA 차트와 다르게 유사기종을 그룹(미공군)으로 나누어 제공하였다. 따라서 FAA보다는 항공기에 대한 허용하중 산출에 있어서 각 항공기 기어 특성을 좀 더 나타낸다고 볼 수 있다. 그 미공군에서 분류한 그룹을 보면 표 1과 같다.

또 다른 특징으로는 연이륙 교통량으로 평가하는 FAA 차트와 다르게 설계년수와 상관없이 비행기가 이륙할 수 있는 총 회수로 교통량을 적용한다.

각 포장형식별 특징은 다음과 같다.

· 아스팔트 포장 : 아스팔트 포장에서 입력변수로는 CBR 값, 두께, 일정주행횟수로 허용하중을 구한다. 또한 미공군에서 정한 교통구역 A, B, C, D에 의하여 차트가 달라진다.

· 콘크리트 포장 : 평가하기 위한 입력변수로는 휨강도, 두께, 노상반력계수(K)로 하고 있으며 탄성계수는 4,000,000psi와 포아송비는 0.15로 가정하여 차트를 개발하였다. 아스팔트 평가 차트

와 마찬가지로 교통구역 A, B, C, D에 의하여 차트 사용이 달라진다.

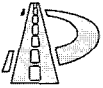
표 1 미공군의 항공기 그룹

GROUP INDEX	항공기종	기준항공기
1	C-23, C-12, C-21, A-37	C-23
2	F-15, A-7, A-10, F-16	F-15
3	F-111	F-111
4	C-130	C-130
5	C-9, C-7, DC-9, C-140	C-9
6	T-43, B737	T-43
7	B727, C-22	B-727
8	E-3, B707, C-135, KC-135, DC-8, EC-18, A-300, B-767	E-3
9	C-141, B-1, B-757	C-141
10	C-5	C-5
11	KC-10, DC-10, L-1011, C-17,	KC-10
12	E-4, B-747, VC-25	E-4
13	B-52	B-52

또 다른 특징으로는 FAA와 다르게 파괴기준을 두 가지로 보고 설계차트가 따로 만들어져 있다. 그 내용은 다음과 같다.

- 첫 번째는 콘크리트 슬래브에 균열이 있는 슬래브의 개수가 전체 슬래브 중 50%까지 발생했을 때(standard evaluation)

- 두 번째는 콘크리트 슬래브가 균열로 인해 6조각이상으로 나누어져 있는 개수가 전체 슬래브 중 50%까지 발생했을 때(extended life evaluation)



위의 두 기준으로 평가 차트를 사용할 수 있으며 첫 번째의 기준은 설계차트를 역으로 해서 만든 것이고 두 번째의 기준은 첫 번째 파괴기준의 상태가 되었을 때 실제로 사용할 수 있음에도 불구하고 사용하지 못하는 것을 가만하여 작성된 기준이다.

### 나. 평가차트의 이용

설계개념을 역으로 이용한다는 기본 개념은 같지만 평가를 위하여 별도의 평가차트를 제공하기 때문에 FAA의 설계차트처럼 역으로 이용하지 않고 필요 입력변수를 사용해서 허용하중을 산출한다.

또한 평가시 허용하중 산출시 특정 교통수준에 대한 기준이 마련되어 있어 포장평가시 다른 공항과 직접적인 비교를 할 수 있다. <그림 4>는 AFM 평가차트의 예를 보여준다.

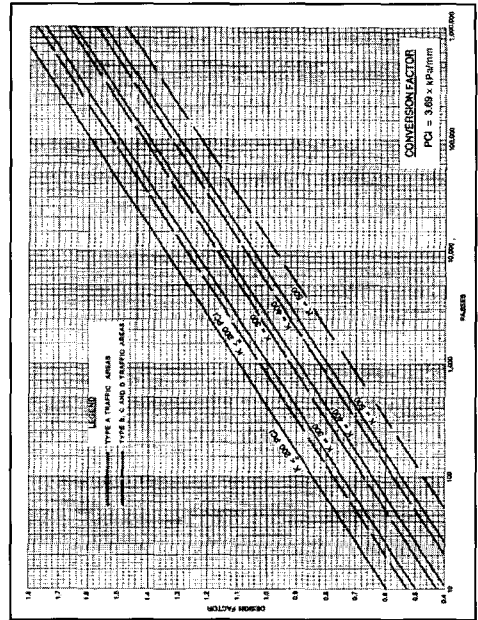
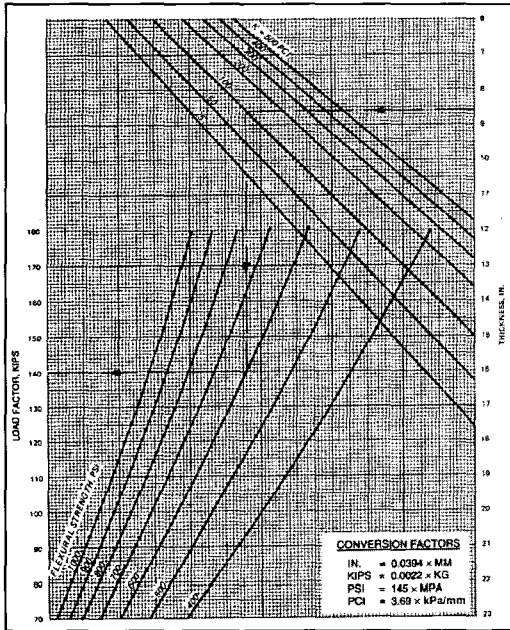


그림 4 콘크리트 포장 평가 Load factor 그래프(좌)와 Design factor 그래프(우)



### 다. 산출 방법

절차 1. 포장체 두께, 노상반력계수, 콘크리트 휨강도를 입력변수로 하여 Load factor를 선정

절차 2. Design factor 그래프를 이용하여 항공기 운항 횟수 및 노상 반력계수 값을 입력변수로 하여 Design Factor를 선정

절차 3. 절차 2, 3에서 얻어진 Load factor와 Design factor를 곱하여 허용하중을 산출

## 2.2 구조해석에 의한 방법

구조해석에 의한 방법은 차트를 이용한 평가 방법보다 좀 더 복잡한 분석이 요구되지만 좀 더 현실적인 접근을 하여 항공기 개개의 특징을 반영할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 개략적인 분석 절차는 그림 5와 같다.

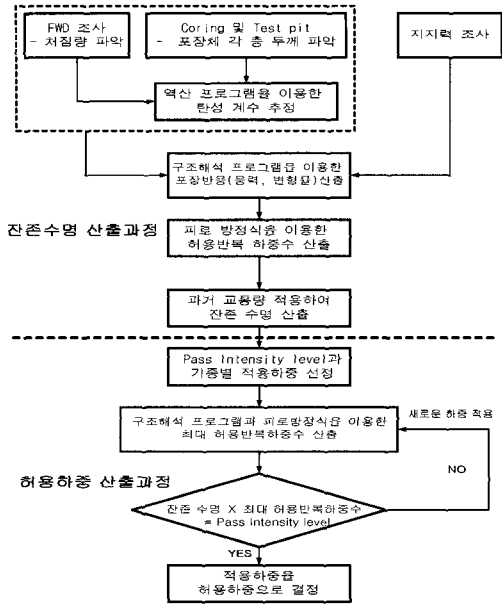


그림 5. 구조해석에 의한 허용하중 산출방법의 절차

구조해석에 의한 허용하중 산출 방법은 그림 5와 같이 두 가지 분석을 통해 얻을 수 있다.

첫째는 잔존 수명 산출 과정으로 과거 누적 교통량을 손상도로 하여 잔존수명을 산출하는 것과,

둘째는 허용하중 산출과정으로 앞에 언급한 잔존 수명을 근거로 미래의 항공기 교통수준에 따라 운행할 수 있는 하중을 결정하는 것이다.

각 과정의 구체적 내용은 다음과 같다.

### 2.2.1 잔존 수명 산출 과정

현장에서 얻어진 포장체의 각종 물성치(지반 반력 계수, 포장체의 탄성계수), 분석 항공기의 특성(기어종류, 중량, 바퀴간격 등)을 입력변수로 하여 구조해석 프로그램으로 포장체에 발생하는 반응(응력, 변형률)을 산출한다.

응력(콘크리트 포장), 변형률(아스팔트 포장)은 피로방정식을 이용하여 최대허용반복하중수

(COV)로 얻어진다.

여기서 얻어진 최대허용반복하중수(COV)는 동일경로를 따라 최대허용반복하중수(COV)만큼의 횟수로 하중이 작용했을 때 50% 피로균열이 발생함을 의미한다. 그러나 실제로 활주로 및 유도로에서는 주행경로에 약간씩 편차가 있게 된다. 따라서 실제 항공기의 주행계적을 조사하여 p/c ratio(pass-to-coverage)를 산정하여 피로 방정식에서 얻어진 COV에 곱해줌으로서 현실적인 허용반복하중수(N)를 구할 수 있다.

$$N = COV \cdot (p/c)$$

여기서, N : 허용반복하중수

COV : 설계하중의 피로허용하중수

p/c : pass-to-coverage

Pass to coverage는 항공기가 저속이동을 갖는 지역 즉, 유도로 및 활주로 끝단부에 대해서 적용하는 집중하중 구간(channelized 구간)과 항공기가 고속이동을 하는 활주로 중앙부의 비집중하중 구간(unchannelized 구간)으로 분류하여 적용한다.

잔존수명(RL)은 허용반복하중수(N)를 이용하여 얻어질 수 있다. 전체수명을 1로 보았을 때 잔존수명(RL)은 일반적으로 1 - 피로도(past damage)의 형태로 사용되며 여기서 피로도는 과거에서부터 현재까지의 누적교통량을 말한다.

과거의 교통량에 대한 수명소모의 계산은 마이너 이론(Miner's hypothesis)을 이용한다. 마이너 이론은 포장체에 하중이 가해짐으로서 발생하는 구조적 손상들을 산술적으로 누적하는 것으로 포장체는 허용반복하중수(N)만큼의 하중이 가해지면 파손한계에 이른다는 가정으로 만들어진 가설이다. 이것을 수식화하면 다음과 같다.



$$\text{Miner's Damage} = \sum \frac{n_i}{N_i}$$

여기서,  $n_i = i$  기종의 항공기 누적 출발 횟수

$N_i = i$  기종의 허용반복하중수

### 2.2.2 허용하중 산출 과정

얻어진 잔존수명은 불확실한 미래 교통량에 대하여 관리자나 정책자가 보수 및 보강 시기를 결정하는데 있어서 필요한 정보를 제공할 수 있도록 바꾸어져 표현되어야 한다.

정보 제공의 한 방법으로 교통량을 일정한 수준으로 정하고 이에 따라 그 수준으로 항공기 운행을 유지시킬 때의 하중제한을 할 것인가 말 것인가에 대한 정보를 제공해야 한다. 여기서 일정한 수준이라고 하는 것을 pass intensity level 이라고 말하며 이 때의 제한하중을 허용하중이라고 부른다.

항공기가 다닐 수 있는 일정한 수준의 횟수를 결정하고 이에 따라 설계항공기의 비행 하중을 바꾸어 가며 잔존수명 산출과정에서의 구조해석을 반복 실시한다.

각 기종의 하중 변화에 따라서 구조해석으로 얻어지는 최대 인장 응력을 피로 방정식에 입력하여 새로운 허용반복하중수를 구하게 된다.

새롭게 얻은 허용반복하중수에 잔존수명을 곱하게 되면 항공기가 다닐 수 있는 횟수가 결정된다. 이 과정(항공기 하중변화→구조해석에 의한 응력산출→피로방정식을 이용한 허용반복하중수 산출)을 반복 실시하여 pass intensity level과 같은 횟수를 나타낼 때까지 실시한다. 이 때의 하중을 허용하중으로 결정한다.

### 3. 국내 공항포장에서 허용하중 산출 방법 사용 현황

국내공항 포장은 민간공항 몇몇을 제외하면 대부분의 공항이 공군에 의해서 시공되고 관리되는 상황이다. 따라서 최초 허용하중의 개념이 도입된 것은 미공군에 의해서 이루어졌으며 1990년부터 한국공항공단에서 자체적으로 포장평가 항목으로 도입하였다. 따라서 1980년대 포장평가는 대부분 미공군에서 실시되었으며 이에 따라 미공군 기준인 AFM 설계차트를 이용하여 허용하중이 산출되었으며 1990년대 부터는 포장평가를 한국공항공단 자체적으로 시행하여 민간 공항 포장 위주로 된 FAA의 설계차트를 주로 이용하여 산출하였다. 그 후 1998년 부터는 비파괴 장비인 FWD가 공항에 도입되면서 구조해석을 통한 허용하중 산출을 실시하게 되었다. <표 2>는 한국공항공단 및 공군의 포장평가 보고서에 언급된 허용하중 산출에 있어서 사용된 방법을 보여준다.

표 2. 포장평가에 사용된 허용하중 산출 방법

평가년도	공항명	산출방법	평가 의뢰 기관
1994년도	사천, 예천, 포항	FAA 설계 차트 이용	한국공항공단
1995년도	속초, 여수, 목포, 김포	FAA 설계 차트 이용	한국공항공단
1997년도	군산	AFM 설계 차트 이용	한국공항공단
1997년도	대구, 강릉	FAA 설계 차트 이용	한국공항공단
1998년도	광주	FAA 설계 차트 이용	공군본부
1998년도	원주	AFM 설계 차트 이용	공군본부
1998년도	김해, 울산	구조해석과 설계차트 방법 병행	한국공항공단
1999년도	사천, 포항, 예천	구조해석과 설계차트 방법 병행	한국공항공단
2000년도	김포	구조해석과 설계차트 방법 병행	한국공항공단



위 표에서 보면 1994년 이후로는 FAA 차트에 의해서 허용하중이 산출되었고 1998년부터는 구조해석을 이용한 허용하중 산출을 설계 차트와 병행하여 실시되고 있는 상황이다.

#### 4. 맺음말

본 기사에서는 허용하중 산출방법에 대해서 설명하였다. 그러나 각각의 방법마다 장단점이 있고 어떠한 방법을 사용하는가 하는 것은 기술자의 판단에 따르며, 이에 대한 기준이 정립되어 있지 않다. 앞에서 언급한 바와 같이 최근에는 구조해석을 이용한 허용하중 산출을 주로 사용하는 추세이다. 허용하중 산출의 용이성 측면에서 볼 때 설계차트에 의한 방법이 더 쉽게 산출할 수 있으나 현실적인 접근측면에서 볼 때는 새로운 항공기종의 평가, 포장상태를 반영할 수 있는 물성치 적용(하중전달)등을 할 수 있는 구조해석을 이용한 방법이 더 좋다.

그러나 구조해석을 이용한 방법론은 포장 물성치 변수의 결정, 피로방정식의 결정 등의 적용 기준이 모호하여 기술자적 판단이 많이 필요하므로 이러한 기준이 정립되면 설계차트에 접근보다는 좀 더 정확한 예측이 될 수 있다.

그러한 예로 구조해석을 통한 허용하중 산출시 결정되어야 하는 요소로는 피로방정식을 들 수 있다. 현재 사용되고 있는 피로방정식은 국내에서 개발된 식이 없기 때문에 미국 공항포장 자료로 개발된 식을 사용하고 있다. 따라서 국내 상황에 맞는 피로방정식이 필요하다. 현재 이러한 구조해석을 이용한 방법의 문제점은 계속적인 연구가 진행중이며 이에 따라 좀 더 현실과 부합된 허용하중 산출을 할 수 있게 될 것이다.

#### 참고문헌

1. AFM 88-24 Chap.1 Airfield Pavement Evaluation Concepts, Departement of the Army and the Air Force, 1988
2. AFM 88-24 Chap.2 Airfield Flexible Pavement Evaluation, Departement of the Army and the Air Force, 1990
3. AFM 88-24 Chap.3 Airfield Rigid Pavement Evaluation, Departement of the Army and the Air Force, 1990
4. Evaluation of the Airside Pavement at Raleigh-Durham International Airport Morrisville, North Carolina Final Report volume I, ERES CONSULTANTS, INC., 1995
5. Advisory Circular No 150/5320-6D, "Airport Pavement Design and Evaluation", FAA, 1995