

## 다물체 시스템에서의 허용하중 집합의 구현과 적용

김재현\*. 곽병만\*\*

## **Construction of Allowable Load Set for Multi-body Systems and Application Cases**

J. H. Kim and B. M. Kwak

**Key Words :** Uncertainty(불확실성), Multi-body system(다물체 시스템), Robustness(강건성)

### **Abstract**

A concept called Allowable Load Set (ALS) is introduced and methods of finding its boundaries are developed. The resulting diagram allows an easy understanding of load and strength characteristics of a structure in relation to structural integrity under uncertain loading conditions. An allowable load diagram for an ALS visualizes the relation between a prescribed load and a degree of safety of the structure. During the application of the algorithms, critical areas of the structure are identified. A systematic method of finding the allowable load sets for multi-body mechanical systems is especially presented and applied to an excavator as a realistic case.

적용하기 위한 체계적인 방법을 제안하였다.

1. 서론

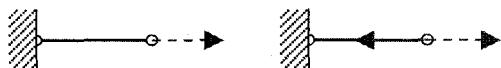
구조물에 가해지는 하중의 경우, 일부 일정한 하중만을 받는 시스템을 제외하고는 대부분의 경우 하중조건을 명확히 나타내기 어렵거나, 비록 명확히 있다고 하더라도 설계에 제대로 반영하기 어려운 경우가 많다.

구조물의 불확실성은 많은 연구자들에 의해 고려되었다. 대표적인 방법으로 확률적인 방법인 신뢰도 고려 설계(reliability based design)를 들 수 있다[1-3]. 이 방법을 실제적인 문제에 사용하기 위해서는 정확한 확률 데이터가 필요하나, 그러한 자료들은 대부분의 경우에는 구하기 어렵다. Ben-Haim [4, 5]은 불확실성을 볼록(convex) 모델로 근사하는 비 확률적인 방법을 제시하였다.

본 연구에서는 본 연구자에 의해서 제시된[6] 새로운 개념인 허용하중 집합(Allowable Load Set, 이하 ALS)을 소개하고 몇 가지 예제를 통하여 그 유통성을 보이고자 한다. 특히 다물체 시스템에

## 1.1 허용하중집합 ALS의 정의

구조물이 안전한지를 평가하는 기준이 되는 제 한조건이 있을 때 이 제한조건을 만족하는 하중들의 집합을 ALS라 한다.



(a) String (b) Truss  
**Fig. 1** ALS in simple structures

Fig.1 은 ALS 의 간단한 예이다. 응력과 변위를 구조물의 안전성을 평가하는 척도로 하면, 줄은 인장하중만 견딜 수 있으므로 줄의 ALS 는 Fig.1(a)의 점선과 같다. 즉, 하중의 점선 안의 범위에 있으면 이 구조물은 안전하다는 것이다. 트러스는 인장하중과 압축하중을 다 받을 수 있으므로 트러스의 ALS 는 Fig.1(b)와 같이 나타낼 수 있다. 이러한 예제들은 단순하여 쉽게 ALS 를 추측 할 수 있으나 일반적인 문제에서 직관적으로 ALS 를 구하기는 어렵다.

\* 한국과학기술원 기계공학과 박사과정

\*\* 한국과학기술원 기계공학과 교수

위와 같은 새 개념인 ALS 는 다양한 하중에 대해서 구조물의 안전성을 평가할 수 있게 할 뿐만 아니라 취약부위 및 구조물의 특질을 파악하는 데 도움이 될 것이다.

## 1.2 수식화

구조물이 안전한지 그렇지 않은지를 판단하는 척도들은 많다. 응력과 변위는 그러한 척도의 대표적인 것으로 대부분의 안전평가에 활용되어진다. 응력과 변위를 제한조건으로 하는  $m$  개의 제한조건식이 있다면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g_i(\sigma, \delta, \mathbf{X}) \leq 0, \quad i=1, 2, \dots, m \quad (1)$$

여기서  $\sigma$ ,  $\delta$  과  $\mathbf{X}$  는 각각 응력, 변위 그리고 구조물에 가해지는 하중 요소들이다. 하중이  $n$  개의 자유도를 갖고 있다면  $\mathbf{X} \in R^n$  이다. ALS 는 모든 제한조건식을 만족하는  $\mathbf{X}$  의 집합이므로 ALS  $K$  는 다음과 같이 나타내어진다.

$$K = \{\mathbf{X} | G(\mathbf{X}) \leq 0\} = \bigcap_{i=1}^m \{\mathbf{X} | g_i(\sigma(\mathbf{X}), \delta(\mathbf{X}), \mathbf{X}) \leq 0\} \quad (2)$$

## 1.3 제한조건식의 구성

하중  $\mathbf{X}$  는 기지벡터  $\{\mathbf{e}_i\}$  를 이용하여  $\mathbf{X} = x_i \mathbf{e}_i$  로 나타내어진다. 하중 지점에  $j$  번째 기지벡터 방향으로 단위하중을 가했을 때  $p$  지점에서의  $i$  번째 응력과 변위 요소를 각각  $S_{ij}^p$ ,  $d_{ij}^p$  라 표기하고 이를 응력영향계수와 변위영향계수라 정의하자. 구조물이 선형성을 만족한다면 하중지점에  $\mathbf{X}$  라는 하중이 가해지면 중첩의 원리에 의해  $p$  지점에서의 응력과 변위는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma^p = \mathbf{S}^p \mathbf{X} \quad (3)$$

$$\delta^p = \mathbf{d}^p \mathbf{X} \quad (4)$$

허용하중 과 허용변위가 각각  $\sigma_a$ ,  $\delta_a$  이면 제한조건식은 다음과 같다.

$$g_1(\sigma^p) = \frac{V(\mathbf{S}^p, \mathbf{X})}{\sigma_a} - 1 \leq 0 \quad (5)$$

$$g_2(\delta^p) = \frac{D(\mathbf{d}^p, \mathbf{X})}{\delta_a} - 1 \leq 0 \quad (6)$$

여기서,  $V(\cdot)$  는 폰미세스(Von-mises) 응력과 같은

일반적인 응력기준이고,  $D(\cdot)$  는 변위기준에 관한 함수이다.

## 1.4 허용하중선도

허용하중선도 (Allowable Load Diagram, 이하 ALD)는 ALS 의 경계를 말하며 ALD 를 구함으로써 ALS 를 구할 수 있다. 어떤 하중이  $\alpha \mathbf{X}$  로 나타내어질 때, 조건함수  $V(\cdot)$  와  $D(\cdot)$  는  $\alpha$  에 대하여 단조증가함수이다. 따라서 하중  $\mathbf{X}$  가 ALS 에 속한다고 하면  $0 \leq \alpha \leq 1$  인  $\alpha$  에 대해  $\alpha \mathbf{X}$  또한 ALS 에 속하게 된다. 이러한 성질로부터 절단 콘(chopped cone or truncated cone)을 정의할 수 있다. 선형 벡터 공간의 집합  $C$  가 있을 때  $x \in C$  인 임의의  $x$ 에 대해  $0 \leq \alpha \leq 1$  인 모든  $\alpha$  에 대하여  $\alpha x \in C$  이면  $C$  는 원점에 대한 절단 콘이다. ALS 는 절단 콘의 형태이며, 따라서 ALD 는 단일 폐곡선이라 할 수 있다.

## 2. ALS 의 유용성 – 트러스 예제

ALS 의 유용성 및 특질을 보이기 위해 Fig.2(a) 과 같은 트러스 구조물을 고려하였다. 각각의 트러스의 단면은 동일하며 면적은  $A_0$  이다. 절점 A 와 B 는 고정되어있고 C 점에 하중이 가해지고 있다. C 점에 가해지는 하중이  $(x_1, x_2)$  이라고 하면 정적해석을 통하여 각 요소에 걸리는 하중을 구할 수 있다.

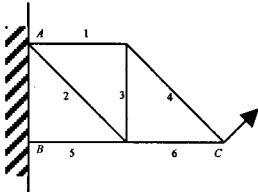
$$\begin{aligned} f_1 &= -x_2, & f_2 &= -\sqrt{2}x_2, & f_3 &= x_2 \\ f_4 &= -\sqrt{2}x_2, & f_5 &= x_1 + 2x_2, & f_6 &= x_1 + x_2 \end{aligned} \quad (7)$$

각 트러스의 생기는 응력이 항복응력보다 작은 것을 안전조건으로 하면 다음과 같이 제한조건식을 나타낼 수 있다.

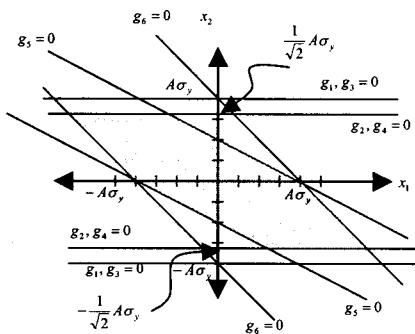
$$g_i(x_1, x_2) = \frac{|f_i|}{A_i \sigma_y} - 1 \leq 0, \quad i=1, 6 \quad (8)$$

여기서  $A_i$  는  $i-th$  요소의 단면적이고 그 값은  $A_0$  이다. ALS 는 식(8)을 만족하는 영역으로 Fig.2(b)와 같이 나타내어진다. Fig.2(b)와 같은 선도로부터 설계자는 구조물의 특성을 쉽게 알 수 있다. 각 ALS 의 경계는 제한조건식이 활성화 되는 하중을 나타낸다. 이에 해당하는 요소들, 즉 ALS 의 경계를 구성하는 제한조건식들과 관련된 요소들을 취약요소라고 한다. 이 예제에서는 요소 2, 4, 5 와

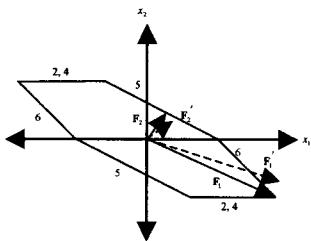
6이 취약하다. 즉 이 구조물이 파괴가 된다면 요소 2, 4, 5와 6를 중 하나에서 발생하게 된다. 바꿔 말하면 요소 1과 3은 파도 설계되어 있다고 할 수 있다.



(a) Truss structure



(b) ALS



(c) ALS and robustness

Fig. 2 The property of ALS

선도로부터 구조물이 잘 견디는 하중방향과 취약한 하중방향을 쉽게 알 수 있다. 예를 들면, 이 구조물은 Fig.2(c)에서  $\mathbf{F}_1$  방향의 하중을 가장 잘 견디고  $\mathbf{F}_2$  방향의 하중에 가장 취약하다.  $\mathbf{F}_2$  방향의 하중에 대해 가장 취약한 요소는 5라는 것을 알 수 있다.

ALS는 하중의 불확실성에 대한 강건성과도 관련이 있다. Fig.2(c)와 같이 하중  $\mathbf{F}_1$ 과  $\mathbf{F}_2$ 이 각각 작용하는 두 가지 경우를 고려하자. 두 경우 모두 안전계수는 1로서 같다. 그러나 강건성 측면에서 다르다.  $\mathbf{F}_1$ 과  $\mathbf{F}_2$ 가  $\mathbf{F}'_1$ 과  $\mathbf{F}'_2$ 와 같이 방향이

변할 수 있다고 했을 때  $\mathbf{F}_2$ 는 안전하나  $\mathbf{F}_1$ 는 그렇지 않다. 이것은 이 구조물이  $\mathbf{F}_2$ 에 대해 보다 강건함을 의미한다.

### 3. ALD를 구하는 알고리즘

2장의 식(1)에서 하나 이상의 제한조건식이 활성화되고 사용영역에 있을 때 그 값은 ALD에 존재한다고 할 수 있다. 이 알고리즘의 기본적인 아이디어는  $\mathbf{X}^0 = (0, 0)$ 에서 어느 일정한 방향으로  $\mathbf{X}$  값을 변화 시켜 ALD 상의 시작점  $\mathbf{X}^1$ 을 찾은 후 오일러-뉴튼[7] 방법으로 ALD를 따라 모든 해를 찾는 것이다. ALD는 단일 폐곡선이므로 이러한 방법이 가능하다. Fig.3에 대략적인 개념을 나타내었다.

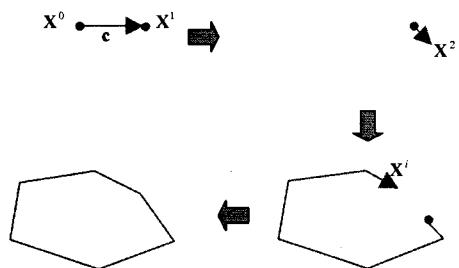


Fig. 3 The procedure of finding ALS

### 4. 다물체 시스템에의 적용

일반적으로 공학시스템은 여러 물체로 이루어진다. 3장에서 해석하였던 예제와 같은 단품들은 대부분의 경우 공학시스템의 한 부품으로 사용되며 궁극적으로 시스템의 입력하중에 대해서 분석을 시도하여야 한다. 이러한 시스템은 다양한 하중조건에서 작동하는 경우가 많으며 자세에 따라 받을 수 있는 하중도 달라지는 등 안전성을 평가하는데 어려움이 많다. 본 장에서는 그러한 다물체 시스템에서 ALS를 구하는 방법론에 대해 소개하고 몇 가지 예제에 대해 그 유효성을 보이고자 한다.

#### 5.1 수식화

그림 4와 같은 대상 다물체시스템의 한 요소에서 다른 요소나 또는 힘이나 경계조건이 부여되는 점들을 편의상 절점으로 정의하자. 일반적으로 요소는 다양한 하중조건 및 경계조건을 경험하게 된다.

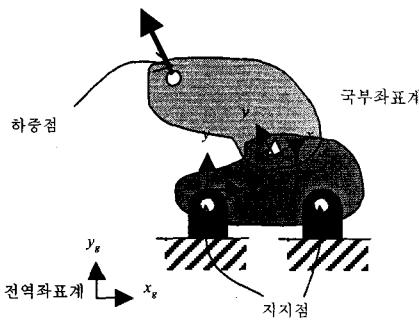


Fig. 4 Multi-body system

그런데 그 때마다 다시 응력해석을 하는 것은 비효율적이다. 그러나 임의의 한 점을 고정시키고 각 절점에 자유도만큼의 단위하중을 가하여 응력을 계산한다면 원하는 부위의 응력은 중첩의 원리로부터 구할 수 있다. 이 때 각 절점에 걸리는 하중은 힘-평형 조건을 만족해야 하므로 고정점의 절점력은 0이 된다. 즉 p 점의 응력  $\sigma^p$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma^p = \mathbf{S}^p \mathbf{F} \quad (10)$$

여기서  $S_j^p$ 는 j 번째 단위 하중에 대한 p 점의 i 번째 응력요소(stress component)이다. 변위도 마찬 가지 방식으로 나타낼 수 있는데 변위에는 강체변위를 더해주어야 한다.

유한요소해석이 끝나면 힘-평형 관계식과 다른 요소와의 관계를 통해서 각 절점에 걸리는 하중과 변위를 얻을 수 있게 된다. 이 값을 각 요소별로 구성되어 있는 제한조건식에 대입하게 되면 하중점에 걸리는 하중의 값으로 표현되는 제한조건식을 구할 수 있게 된다.

#### 4.1.1 힘-변위 관계식

한 요소에서 절점의 변위와 절점에 가해지는 힘과의 관계를 나타낸다. 요소 b에서의 힘-변위 관계식의 일반적인 형태는 다음과 같다.

$${}^b\mathbf{u} = \mathbf{C}_1 {}^b\mathbf{F} + \mathbf{D}_1 {}^b\mathbf{u}^* \quad (11)$$

여기서  ${}^b\mathbf{u}$ 는 요소 b에서의 각 절점의 변위를 나타내며 2 차원의 경우 절점당  $u_x, u_y, \theta_z$ 가 된다.

${}^b\mathbf{F}$ 는 각 절점에 가해지는 외력으로 2 차원의 경우 절점당  $F_x, F_y, M_z$ 가 된다.  ${}^b\mathbf{u}^*$ 는 강체변위이다.  $\mathbf{C}_1$ 의 열(column)은 한 절점에 가해지는 기저

벡터 방향의 단위하중으로 야기되는 각 절점의 변위가 된다. 이때 절점의 개수가 k개이고 각 절점의 자유도가 n이라면  $\mathbf{C}_1$ 는  $kn \times kn$  행렬이다.

$\mathbf{D}_1$ 은 요소에서 절점의 위치로 결정이 된다. 요소의 전역좌표계를 국부좌표계로 변환하는 행렬을  $\mathbf{T}$ 라 하면 위의 식은 다음과 같이 전역좌표에 대해 나타낼 수 있다.

$$[\mathbf{I} | -\mathbf{T}^{-1}\mathbf{C}_1\mathbf{T} | -\mathbf{T}^{-1}\mathbf{D}_1] \begin{Bmatrix} {}^b\mathbf{u}_g \\ \mathbf{F}_g \\ {}^b\mathbf{u}_0 \end{Bmatrix} = \mathbf{L}_1 {}^b\mathbf{U} = \mathbf{0} \quad (12)$$

여기서  ${}^b\mathbf{u}_0$ 는 강체변위를 전역좌표계로 변환한 것이다.  ${}^b\mathbf{U}^T = {}^b\{\mathbf{u}_g^T, \mathbf{F}_g^T, {}^b\mathbf{u}_0^T\}$ 이고  $\mathbf{L}_1$ 은  $kn \times (2kn + n)$  행렬이다.

#### 4.1.2 힘 평형 관계식

2 차원의 경우 일반적으로 3 개의 힘 평형 관계식이 존재한다. x 방향 및 y 방향의 힘 평형 및 모멘트 평형이 그것이다. 일반적으로 나타내면 다음과 같다.

$$\mathbf{C}_2 {}^b\mathbf{F} = \mathbf{0} \quad (13)$$

여기서  $\mathbf{C}_2$ 는  $n \times kn$ 의 행렬이다. 전역좌표계로 변환하여 정리하면 다음과 같다.

$$[\mathbf{0} | \mathbf{C}_2\mathbf{T} | \mathbf{0}] \begin{Bmatrix} {}^b\mathbf{u}_g \\ \mathbf{F}_g \\ {}^b\mathbf{u}_0 \end{Bmatrix} = \mathbf{L}_2 {}^b\mathbf{U} = \mathbf{0} \quad (14)$$

여기서  $\mathbf{L}_2$ 은  $n \times (2kn + n)$  행렬이다.

#### 4.1.3 연결 관계식(connecting relation equation)

연결 관계식은 다른 요소, 경계조건 또는 하중과의 관계를 나타낸다. 연결 상태에 따라 회전에 대한 제약이 있는 고정 결합과 그렇지 않은 편 결합으로 크게 둘로 나눌 수 있다.

시스템에 포함되어 있는 요소의 개수가 1일 경우 위의 연결 관계식을 다시 정리하면 다음과 같은 형태로 나타내어질 수 있다.

$$\mathbf{L}_3 \mathbf{U} = \mathbf{B} \mathbf{X} \quad (15)$$

$\mathbf{U}^T = \{{}^1\mathbf{u}_g^T, {}^1\mathbf{F}_g^T, {}^1\mathbf{u}_0^T, \dots, {}^l\mathbf{u}_g^T, {}^l\mathbf{F}_g^T, {}^l\mathbf{u}_0^T\}$ 이고  $\mathbf{X}$ 는 하중점에 작용하는 외력이며  $\mathbf{B}$ 는  $\mathbf{X}$ 를  $\mathbf{U}$

와 같은 차원으로 확장 시키는 연산자다.

#### 4.1.4 선형 연립방정식의 구성

힘-변위 관계식, 힘 평형 관계식 그리고 연결 관계식을 같이 정리하면 다음과 같은 형태의 식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{L}\mathbf{U} = \mathbf{B}\mathbf{X} \quad (16)$$

요소의 개수가  $I$ 이고 요소  $i$ 의 절점의 개수 자유도가 각각  $k_i$ ,  $n_i$ 라면  $\mathbf{L}$ 은 크기가  $\sum_{i=1}^I (2k_i + n_i)$ 인 정방 행렬이다. 하중점의 하중

에 대해 각 절점의 하중과 변위가 유일하게 구해 지므로  $\mathbf{L}$ 은 역행렬이 존재한다. 따라서 식 (16)은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\mathbf{U} = \mathbf{L}^{-1}\mathbf{BX} \quad (17)$$

식 (17)로부터 각 절점의 변위와 하중은 하중점의 하중으로 나타내어진다.

#### 4.1.5 제한조건식의 구성

먼저 응력에 대한 제한조건식을 고려하여 보자. 응력요소는 식 (10)와 식 (17)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma^p = \mathbf{S}^p \mathbf{F} = \mathbf{S}^p \mathbf{T} \boldsymbol{\pi}_{F_g} \mathbf{U} = \mathbf{S}^p \mathbf{T} \boldsymbol{\pi}_{F_g} \mathbf{L}^{-1} \mathbf{BX} \quad (18)$$

여기서  $\boldsymbol{\pi}_{F_g}$ 는  $\mathbf{U}$ 에서  $\mathbf{F}_g$ 를 추출하는 연산자이다. 응력함수를  $V(\sigma^p)$  라 하고 허용응력을  $\sigma_a$  라 하면 응력제한조건식은 다음과 같다.

$$g(\mathbf{X}) = \frac{V(\mathbf{X})}{\sigma_a} - 1 \leq 0 \quad (19)$$

#### 4.2 예제

다물체 적용 방법의 유효성을 보이기 위해 다양한 요소를 포함하는 몇 가지 문제를 풀어보았다. 변위계수와 응력계수를 구하기 위한 유한요소해석은 ANSYS 5.5를 이용하였다.

##### 4.2.1 트러스와 보로 이루어진 구조물

Fig.5 과 같은 구조물을 고려하였다. 본 논문에서 제시된 방법을 이용하면 요소의 교체에 따른 해석이 매우 용이하다. 1과 2는 보 요소이고 3은 트러스 요소, 4는 보강재 부분으로 트러스이다. 점은 점은 고정 결합이고 하얀 점은 핀 결합이다. 각 요소의 국부좌표계는 Fig.5 의 오른쪽 그림과

같이 정의하였고 유한요소해석은 절점 1을 고정 시켜 해석하였다. 각 요소의 물성치는 모두 동일하고 그 값은 높이 0.05m, 단면적  $0.0025m^2$  그리고  $I_{zz} = 5.21 \times 10^{-7} m^4$  이다. 제한조건식은 각 요소의 응력이 허용응력을 넘지 않는 것으로 하였다. 이때 2개의 보의 허용응력은  $200MPa$ 이고 요소 3의 허용응력은  $5MPa$ 로 하였다.

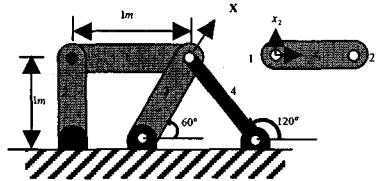


Fig. 5 A truss and beam structure with reinforcement

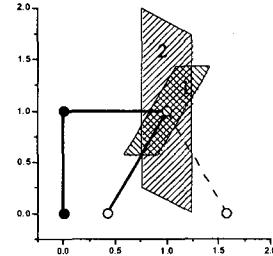


Fig. 6 The ALS of a reinforced structure

Fig.6의 벽금천 부분이 이 구조물의 ALS이다. 이 때 비례계수는 0.0004이다. 즉 그림에서 크기 1은 힘으로는 2500N이다. 영역 1은 보강재가 없을 때의 ALS이고 영역 2는 보강재가 있을 때의 ALS이다. 특이한 점은 후자가 전자보다 항상 더 안전한 것은 아니라는 것이다. 즉 구조물의 안전성을 높이기 위해 보강재 등을 부착하는 것이 오히려 특정 하중 조건에서는 더 취약해 질 수 있다는 것이다.

##### 4.2.2 굴삭기

굴삭기의 구조와 명칭은 Fig.7과 같다. 총 8개의 요소로 이루어져 있다. 베켓과 암 그리고 봄 모두를 유한요소해석을 수행해야 하지만 봄을 제외한 나머지는 강체요소로 가정하였다. 그리고 봄의 경우에도 2차원으로 단순화 시켜 해석하였다. 봄의 유한요소 모델은 Fig.8과 같고 사용된 요소는 ANSYS의 SHELL 63 요소이고 총 9개의 단위 하중조건에 대하여 해석을 하였다. 그러나 강성행렬이 변하지 않으므로 해석시간은 1개의 하중조건에 대해 구한 것과 큰 차이를 보이지 않는다.

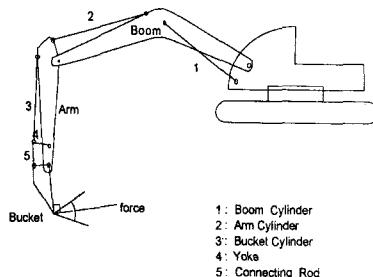


Fig. 7 Excavator [8]

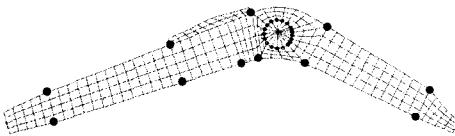


Fig. 8 FE model of a boom

제한조건식은 Fig.8에서 점으로 표시된 지점을 포함하는 총 15 개 지점에서의 폰미세스 응력과 각 실린더에 걸리는 하중이 허용치를 넘지 않는 것으로 하였고 총 18 개이다.

Fig.9는 3 가지 자세에 대해 ALS를 구하여 도시한 것이다. 각 자세에서의 ALS는 부가적인 유한요소해석 없이 바로 구할 수 있어 자유롭게 시스템의 특성을 확인할 수 있다.

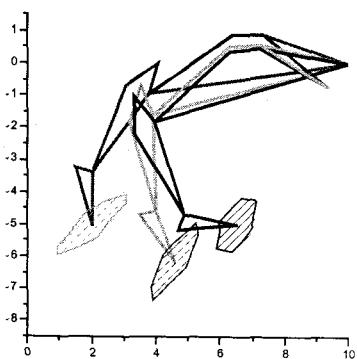


Fig. 9 ALS of the excavator

## 5. 결론

본 연구에서는 구조물의 하중조건이 다양하거나 명확치 않을 경우에 대해 ALS라는 개념을 제시하고 구현방법에 대해 논의하였다. ALS는 크게 세가지 측면에서 활용될 수 있는데, 첫째로는 안전성 평가이고, 둘째로는 취약부위 파악, 그리고 마지막으로는 구조물의 하중적 특성의 이해이다.

트러스, 보 그리고 연속체 등 다양한 구조물에 적용하여 효과적을 ALS를 구하였고 취약부위를 파악할 수 있었다. 얻어진 ALS를 통해서 구조물의 하중적 특성을 알 수 있었고 이를 이용하여 보강재의 설치가 어떤 하중상태에서는 더 좋지 않은 결과를 줄 수 있음을 보였다. ALS 해석을 통한 취약부위의 파악은 구조물의 유지 보수 측면에서 관리 또는 감시해야 할 부위를 크게 줄여 시간과 경비 절감의 효과를 줄 수 있다.

다물체 시스템의 ALS를 효과적으로 구할 수 있는 방법을 제시하였다. 다양한 요소로 이루어진 문제에 대해 ALS를 구하였다. ALS 해석이 점 하중에 국한되어 있어 실용성이 낮을 것으로 생각할 수 있으나 많은 경우에 공학시스템에 가해지는 하중은 단일 점 하중으로 나타낼 수 있는 경우가 많다.

이상과 같이 ALS 개념의 도입은 설계자가 구조물을 이해하는데 도움을 주고 설계에 대한 새로운 시각을 제공할 수 있다.

## 참고문헌

- (1) S. S. Rao, 1992, Reliability-Based Design; McGraw-Hill: New York.
- (2) D. W. Kim and B. M. Kwak, 1996, "Reliability-based shape optimization of two-dimensional elastic problems using BEM," Computers & Structures, 60 (5), 743-750.
- (3) Y.-T. Wu, 1994, Computational methods for efficient structural reliability and reliability sensitivity analysis. AIAA J., 32, 1717-1723.
- (4) Y. Ben-Haim, 1997, "Robust reliability of structures," Advances in Applied Mechanics, 33, 1-41.
- (5) Y. Ben-Haim, 1999, "Design certification with information-gap uncertainty," Structural Safety, 21, 269-289.
- (6) B. M. Kwak and J. H. Kim, 2000, "A concept of allowable load set and algorithms for finding its diagram," submitted to Mechanics of Structures and Machines, an International Journal.
- (7) E. L. Allgower and K. Georg, 1990, Numerical Continuation Methods: An introduction, Springer-Verlag.
- (8) 김재현, 1996, 형상과 치수를 동시에 고려한 굴삭기 봄의 최적설계에 관한 연구, 석사학위논문, 한국과학기술원.