

## 다단계 혼성근사화에 기초한 대형구조계의 설계최적화

### Design Optimization of Large Scale Structural Systems based on Multilevel Hybrid Approximation

김 경 일\*      박 종 회\*\*      황 진 하\*\*\*  
Kim, Kyeong-Il      Park, Jong-Hoi      Hwang, Jin-Ha

---

#### ABSTRACT

A new optimization procedure with approximate reanalysis module, using the staged hybrid methods with substructuring, is proposed in this study. In this procedure, displacements are calculated with two step mixed procedures. First step is to introduce the conservative approximation, which is a hybrid form of the linear and reciprocal approximation, as local approximation. In the next step, it is combined with the global approximation by reduced basis approach. The quality of reanalyzed quantities can be greatly improved through these staged hybrid approximations, specially for large changes in the design. Overall procedures are based on substructuring scheme. Several numerical examples illustrate the validity and effectiveness of the proposed methods.

---

#### 1. 서 론

구조최적화는 요구된 설계조건을 만족시키면서 최대의 경제성을 갖는 구조계를 도출하는 과정이며, 실행 측면에서 해석과 최적화모듈의 반복결합으로 이루어지는 전산과정이다. 그러나 구조물이 대형화되고 복잡해짐에 따라 대형시스템을 최적화하는 문제는 수많은 거동해석과 민감도해석을 요할 뿐만 아니라, 이러한 해석에 드는 비용이 전체 최적화과정에서 상당한 부분을 차지한다는 점에서 설계지향해석에 관한 연구는 설계최적화에 필수적인 이론적 기반을 제공할 수 있다.

재해석은 설계의 중간과정에서 변화된 설계값에 대하여 매번 전체에 대한 새로운 정해석을 수행하는 대신, 반복연산이나 근사적 접근을 통하여 전체설계에 드는 비용을 줄이는 방법이다. 재해석기법들은 크게 직접법과 반복법 및 근사방법들로 분류될 수 있으며, 이 중 근사 재해석방법들은 대형 구조시스템에 효율적인 방법으로, 부분근사화(local approximation)와 전역근사화(global approximation) 및 혼성근사화(combined approximation)로 분류된다.<sup>1)</sup>

---

\* 정회원 · 충북대학교 토목공학과 박사과정 수료

\*\* 정회원 · 충북대학교 토목공학과 공학박사

\*\*\* 정회원 · 충북대학교 구조시스템공학과 교수

본 연구에서는 대형 구조계의 설계최적화에 있어서 반복되는 재설계 과정에 연계되어 설계변수의 큰 변화에도 정확도와 효율성을 유지할 수 있는 설계지향 구조해석 모델을 제시하고, 이를 최적화과정에 연계한 구조최적화 알고리즘을 제시한다. 제시된 재해석 방법은 대형 구조시스템을 적용대상으로 설정, 전체구조를 몇 개의 작은 부구조로 분할·조합하는 부구조화 방법을 기반으로, 이에 기초한 설계민감도 정보를 이용하여 보존근사화와 전역근사화를 결합한 개선된 합성 근사화 접근방법을 사용한다.

개발된 알고리즘을 트러스 구조에 적용하여 타당성 및 효율성을 검증한다.

## 2. 부구조화 기반 거동 및 민감도해석

부구조화 개념을 도입한 구조해석은 전체 구조시스템을 여러 개의 작은 부구조로 분할하여 시스템방정식을 경계와 내부에 관계된 양들로 나누어 구성한다. 구조시스템의 시스템방정식을

$$KU = P \quad (1)$$

이라 할 때, s번째 부구조에 대한 시스템방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} K_{bb}^{(s)} & K_{bi}^{(s)} \\ K_{ib}^{(s)} & K_{ii}^{(s)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_b^{(s)} \\ U_i^{(s)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_b^{(s)} \\ P_i^{(s)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 아래첨자 b와 i는 각각 경계와 내부자유도에 관계된 양들을 의미하고, s는 부구조 번호이다. 이 식의 응축과정을 거쳐 경계에 대한 평형방정식이 구해진다.

$$K_b^{(s)} U_b^{(s)} = F_b^{(s)} \quad (3)$$

$$K_b^{(s)} = K_{bb}^{(s)} + K_{bi}^{(s)} Q^{(s)}, \quad Q^{(s)} = -[K_{ii}^{(s)}]^{-1} K_{ib}^{(s)} \quad (4)$$

$$F_b^{(s)} = R_b^{(s)} + Q^{T(s)} P_i^{(s)} \quad (5)$$

부구조들에 대한 기본방정식을 합성하므로써 전체구조시스템의 평형방정식을 얻을 수 있다.

$$K_B U_B = F_B \quad (6)$$

$$K_B = \sum_{s=1}^S \beta^{(s)T} K_b^{(s)} \beta^{(s)} \quad (7)$$

$$F_B = P_B + \sum_{s=1}^S \beta^{(s)T} Q^{(s)T} P_i^{(s)} \quad (8)$$

여기서,  $\beta$ 는 Boolean 변환매트릭스이며, S는 총 부구조 수이고,  $K_B$ 와  $F_B$ 는 각각 전체 시스템의 유효경계 합성강성도 매트릭스와 유효경계하중벡터를 나타낸다. 부구조별 내부변위는 식 (2)를 통해 다음과 같이 얻는다.

$$U_i^{(s)} = [K_{ii}^{(s)}]^{-1} [P_i^{(s)} - K_{ib}^{(s)} U_b^{(s)}] \quad (9)$$

s번째 부구조에 대한 응력들은 다음 식에 의해 구해진다.

$$\sigma^{(s)} = B^{(s)} U^{(s)} \quad (10)$$

여기서 B는 응력-변형 변환매트릭스이다.

설계민감도해석은 설계 변화량에 대한 거동량들의 변화량을 산정하는 것으로 설계도함수를 구하는 방법에는 크게 미분법과 변분법이 있으나 이산형 구조에는 주로 음함수 미분법이 적용되며, 이것은 다시 수치적 방법과 해석적 방법으로 나누어진다. 이들은 효율성 면에서 후자가 선호되나, 설계함수들이 설계변수의 비선

형 음함수로 표현되는 구조최적화에서 때로 어렵거나 불가능한 반면, 전자는 시간이 많이 걸리기는 하나 어느 문제나 쉽게 다루어 질 수 있는 양면이 있다.

본 연구에서는 적용성이나 편의성을 높이면서 근사재해석 방법의 효율성과 타당성을 검증하기 위해 많은 계산량들을 요하는 전자의 방법을 취하였다.

### 3. 근사 구조재해석

구조 재해석은 구조최적화과정에서 설계변수가 수정될 때, 새로운 정해석 대신에 초기의 해석정보값을 이용하여 수정된 구조의 거동량을 산정하는 것으로, 설계변화량을 고려한 강성도메트릭스와 변위벡터를

$$K = K^* + \Delta K \quad (11)$$

$$U = U^* + \Delta U \quad (12)$$

라 하면, 식(1)의 시스템방정식은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$(K^* + \Delta K)(U^* + \Delta U) = P \quad (13)$$

여기서,  $\Delta K$ 는 구조 강성도메트릭스의 변화량,  $\Delta U$ 은 변위벡터의 변화량 그리고 \*은 진단계의 해석값을 나타낸다. 즉, 시스템방정식 (1)을 사용하여 전체구조의 거동량을 산정하는 대신 식(13)의 진단계 해석정보값인  $\{U^*\}$ 를 이용하여 새로운 거동량을 구한다.

구조재해석은 크게 직접법, 반복법 및 근사방법으로 분류되며, 이 중 근사방법은 대형 구조계에 적용하기에 보다 적합한 방법으로, 부분근사화와 전역근사화 및 합성근사화 등으로 나누어진다.

본 연구에서는 보존근사화와 차원축소법을 결합한 합성근사화를 근사재해석 방법으로 사용되며, 보존근사화(conservative approximation)는 다음 식으로 표현된다.

$$g_C = g^* + \sum_{j=1}^{N_g} G_j (X_j - X_j^*) \left( \frac{\partial g^*}{\partial X_j} \right) \quad (14)$$

$$G_j = \begin{cases} 1 & \text{if } X_j^* (\partial g^* / \partial X_j) \geq 0 \\ \frac{X_j^*}{X_j} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

차원축소법은 기저벡터들로 이루어진 축소된 부공간에서 거동량을 산출하는 방법으로, 초기 해석정보값들 중 독립된 n개의 기저벡터를 선형결합하여 근사변위 U를 구한다. 제시된 합성 근사화 접근방법은 보존근사화의 각 항들을 차원축소법의 기저벡터로 선정하는 것으로, 각 부구조의 내부변위  $\{U_i\}$ 와 경계변위  $\{U_b\}$ 는

$$\begin{Bmatrix} U_i \\ \dots \\ U_b \end{Bmatrix} \cong \begin{Bmatrix} C_i^* \\ \dots \\ C_b^* \end{Bmatrix} \{u\} \quad (16)$$

에 의해 구해지며, 미정계수벡터  $\{u\}$ 는 다음의 축소된 시스템방정식을 풀어 결정된다.

$$[K_C] \{u\} = \{P_C\} \quad (17)$$

$$[K_C] = \sum_{s=1}^S [K_C]_s, \quad \{P_C\} = \sum_{s=1}^S \{P_C\}_s \quad (18)$$

각 부구조에 대한  $[K_C]$ 와  $\{P_C\}$ 는 다음 식으로 정의된다.

$$[K_C]_s = [C_i^*]^T [K_{ii}] [C_i^*] + [C_b^*]^T [K_{bb}] [C_b^*] + [C_i^*]^T [K_{ib}] [C_b^*] + [C_b^*]^T [K_{bi}] [C_i^*] \quad (19)$$

$$\{P_C\}_s = [C_i^*]^T \{P_i\} + [C_b^*]^T \{P_b\} \quad (20)$$

식(16)의 기저벡터  $C_b^*$ 와  $C_b^*$ 는  $X_j^*(\partial U / \partial X_j) \geq 0$ 인 경우,

$$[C_b^*] = \left[ \{U_b^*\}, \sum_{j=1}^{N_n} \left( \frac{X_j^*}{X_j} \right) \left( \frac{\partial U_b^*}{\partial X_j} \right) (X_j - X_j^*) \right] \quad (21)$$

$$[C_i^*] = \left[ \{U_i^*\}, \sum_{j=1}^{N_n} \left( \frac{X_j^*}{X_j} \right) \left( \frac{\partial U_i^*}{\partial X_j} \right) (X_j - X_j^*) \right] \quad (22)$$

이고,  $X_j^*(\partial U / \partial X_j) < 0$ 인 경우,

$$[C_b^*] = \left[ \{U_b^*\}, \sum_{j=1}^{N_n} \left\{ \frac{\partial U_b^*}{\partial X_j} \right\} (X_j - X_j^*) \right] \quad (23)$$

$$[C_i^*] = \left[ \{U_i^*\}, \sum_{j=1}^{N_n} \left\{ \frac{\partial U_i^*}{\partial X_j} \right\} (X_j - X_j^*) \right] \quad j = 1, 2, 3, \dots, N_n \quad (24)$$

으로 구성된다. 위 식에서  $N_n$ 는 설계변수의 수를 나타낸다.

응력은 합성근사화를 통한 변위에 대한 높은 신뢰성을 바탕으로 이미 구성된 응력-변위만의 기본 관계식을 병용한 혼성 방식으로 구한다.

#### 4. 구조최적화

구조최적화는 전체 구조시스템의 총중량이나 경비를 목표함수로, 구조해석을 통해 산정되는 거동량 등에 관한 등식 또는 부등식 제한조건으로 구성되며, 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\text{Minimize } F(X) \quad (25)$$

$$\text{Subject to } H(X) = 0 \quad (26)$$

$$G_j(X) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, N_c \quad (27)$$

$$X_n^L \leq X_n \leq X_n^U, \quad n = 1, 2, \dots, N_v \quad (28)$$

식 (26)은 등식 제한조건으로서 전체 구조시스템에 대한 평형방정식으로 주어진다. 식(27)과 (28)은 부등식 제한조건으로서 거동제한조건과 설계변수크기 제한조건을 들 수 있다.

본 연구에서 최적화알고리즘으로 사용한 ALM방법은 제한조건의 문제를 비제한조건의 문제로 변환하여 푸는 변환법의 하나로 라그랑지승수를 개선하여 최적해에 도달하는 방법이다. 우선, 주어진 모든 부등식제한 조건들을 등식제한조건들로 바꾸기 위해 완화변수를 도입하여서 제한조건식들을 변환하면, 확장라그랑지함수는 다음과 같이 나타낼 수 있으며

$$A(X, \lambda, Z, r_p) = F(X) + \sum_{j=1}^m [\lambda_j (G_j(X) + Z_j^2) + r_p (G_j(X) + Z_j^2)^2] \quad (29)$$

여기서,  $\lambda$ 는 라그랑지승수이고,  $r_p$ 는 벌칙매개변수이다. 이는 다음과 같은 유사목표함수로 변환할 수 있다.

$$A(X, \lambda, r_p) = F(X) + \sum_{j=1}^m [\lambda_j \psi_j + r_p \phi_j^2] \quad (30)$$

$$\psi_j = \max \left[ G_j(X), \frac{-\lambda_j}{2r_p} \right] \quad (31)$$

따라서, 각 부분이나 과정을 연결하는 수학적인 공유기반을 부구조화에 두고, 유사목표함수  $A(X, \lambda, r_p)$ 을 최소화하는 비제한최적화문제로 형성된다.

## 5. 적용 및 분석

### 5.1 200개의 부재로 구성된 평면트러스

Fig. 5.1은 200개의 부재를 갖는 트러스구조를 보여주고 있으며, Table 5.1은 설계자료를 수록하고 있다. 이 구조는 5개의 부구조로 분할하여 수행하였으며, 제시된 알고리즘의 적용결과는 Table 5.2에 나타내었다.

Table 5.1 Design data of 200-bar plane truss

Variable	Value
Modulus of elasticity	30,000 ksi
Allowable stress limit	$\pm 30.0$ ksi
Displacement limit	$\pm 0.5$ in.
Specific weight	0.1 lb/in. <sup>3</sup>
Upper limit on area	100.0 in. <sup>2</sup>
Lower limit on area	0.01 in. <sup>2</sup>
Loading condition : 1	1.0 kips acting in X-direction at node point 1, 6, 15, 20, 29, 34, 43, 48, 57, 62, 71 -10.0 kips acting in Y-direction at node point 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 24, ..., 71, 72, 73, 74, 75

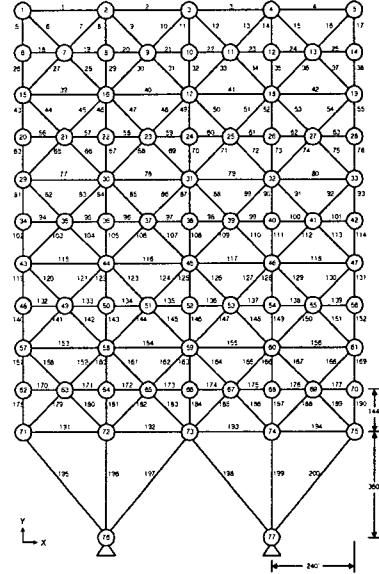


Fig. 5.1 200-bar plane truss

Table 5.2 Results of optimization for 200-bar plane truss

Sub. (s)	D.V No.	Member No.	Present	SUBANA	Ref. <sup>2)</sup>	Sub. (s)	D.V No.	Member No.	Present	SUBANA	Ref. <sup>2)</sup>
1	1	1, 4	0.1687	0.1967	0.1878	2	20	39, 42	0.7742	0.5837	0.1000
	2	2, 3	0.1000	0.1150	0.1000		21	40, 41	0.4873	0.3964	0.1000
	3	5, 17	4.2272	4.4364	4.7832		22	43, 55	7.1905	7.3808	8.1292
	4	6, 16	0.2415	0.2407	0.1703		23	44, 54	1.3199	1.0977	0.2476
	5	7, 15	0.1000	0.1000	0.1000		24	45, 53	0.1000	0.1000	0.1000
	6	8, 14	2.0093	1.9870	2.3462		25	46, 52	4.4080	4.4745	4.4206
	7	9, 13	0.1000	0.1000	0.1876		26	47, 51	0.4807	0.4258	0.2802
	8	10, 12	0.4284	0.1000	0.1000		27	48, 50	0.1271	0.1000	0.2673
	9	11	2.9498	3.0302	2.8809		28	49	4.5160	4.7974	4.7929
	10	18, 25	0.1000	0.1000	0.1000		10	56, 63	0.1000	0.1000	0.1000
	11	19, 20, 23, 24	0.1000	0.1000	0.1000		29	57, 58, 61, 62	0.1000	0.1000	0.1000
	12	21, 22	0.1000	0.1000	0.1000		30	59, 60	0.1000	0.1000	0.1002
	13	26, 38	6.5096	6.5496	6.7767		31	64, 76	8.2920	8.6086	9.3889
	14	27, 37	0.1000	0.1000	0.1000		32	65, 75	0.1000	0.1000	0.1000
	15	28, 36	0.4555	0.3528	0.2361		33	66, 74	1.4106	1.1905	0.3362
	16	29, 35	3.0178	2.9156	3.3133		34	67, 73	5.0599	5.1569	5.0733
	17	30, 34	0.3508	0.1454	0.1732		35	68, 72	0.1000	0.1000	0.3008
	18	31, 33	0.1000	0.1000	0.2227		36	69, 71	0.5045	0.4453	0.3096
	19	32	3.7508	3.9181	4.1473		37	70	5.0519	5.3958	5.5744

Table 5.2 Continue

Sub. (s)	D.V. No.	Member No.	Present	SUBANA	Ref. <sup>2)</sup>	Sub (s)	D.V. No.	Member No.	Present	SUBANA	Ref. <sup>2)</sup>
3	38	77, 80	1.0803	1.7995	0.4967	4	68	141,151	0.1667	0.1000	0.1341
	39	78, 79	0.1000	0.9838	0.3865		69	142,150	3.0742	3.3584	3.3000
	40	81, 93	8.0981	7.9610	9.5196		70	143,149	9.8482	10.7141	9.5771
	41	82, 92	1.8225	2.9093	0.9366		71	144,148	1.0383	0.6966	0.9814
	42	83, 91	0.1000	0.1000	0.1000		72	145,147	0.1000	0.3233	0.2269
	43	84, 90	6.8553	7.0650	6.2617		73	146	7.1694	7.6412	7.0561
	44	85, 89	0.4984	5.7047	0.3508		5	74	153, 156	1.9403	2.1753
	45	86, 88	0.4834	0.4457	0.4835	75		154, 155	0.1000	0.1000	0.6074
	46	87	5.7973	6.2450	5.8679	76		157, 169	7.3955	6.7635	7.5376
	10	94, 101	0.1000	0.1000	0.1000	77		158, 168	3.1011	3.5204	4.1216
	47	95, 96, 99, 100	0.1000	0.1000	0.1000	78		159, 167	0.1000	0.1000	0.1000
	48	97, 98	0.1000	0.1000	0.1000	79		160, 166	1.2390	13.5400	13.3290
	49	102, 114	8.9135	8.8963	10.4800	80		161, 165	1.6715	1.6335	1.8691
	50	103, 113	0.1000	0.1335	0.1108	81		162, 164	0.1000	0.2645	0.3045
	51	104, 112	1.9190	2.9858	1.0313	82		163	7.4359	7.6876	7.4246
	52	105, 111	7.4016	7.6467	6.8203	10		170, 177	0.1000	0.1000	0.1000
	53	106, 110	0.5343	0.4743	0.5012	83		171, 172, 175, 176	0.1000	0.1000	0.1000
	54	107, 109	0.5210	0.6229	0.3754	84		173, 174	0.1000	0.1000	0.1000
	55	108	6.2149	6.6961	6.4768	85		178, 190	7.9579	7.3685	8.2183
	4	56	115,118	1.9177	1.9992	1.9807	86	179, 189	0.1000	0.1000	0.1000
57		116,117	0.8350	1.1243	1.4784	87	180, 188	3.1884	3.7127	4.1916	
58		119,131	8.0777	7.7406	9.1546	88	181, 187	1.2849	14.0092	13.833	
59		120,130	2.9836	3.2684	3.1979	89	182, 186	0.1000	0.3557	0.3354	
60		121,129	0.1000	0.1000	0.1000	90	193, 185	1.7021	1.6748	1.9082	
61		122,128	9.3732	10.2112	9.0271	91	184	7.7754	8.0467	7.8840	
62		123,127	0.1000	0.2185	0.2074	92	191, 194	6.0294	5.4524	5.8649	
63		124,126	1.0240	0.6712	0.9717	93	192, 193	4.0152	3.5035	3.4248	
64		125	6.7812	7.2398	6.5338	94	195, 200	1.1370	10.0032	10.656	
10		94,101	0.1000	0.1000	0.1000	95	196, 199	2.0736	18.8069	17.777	
65		133,134, 137,138	0.1000	0.1000	0.1000	96	197, 198	8.5128	8.1781	7.7140	
66		135,136	0.1000	0.1000	0.1219	Total wight(lb)		29,247.4	29,155.0	28,963.0	
67		140,152	8.7483	8.4734	9.9624	Run time (sec)		20.130	76.280	-	

Table 5.2에서 볼 수 있듯이 제시된 알고리즘을 수행하여 얻은 최적결과치는 문헌<sup>2)</sup>과 비교하여 유사한 결과치를 얻는 것을 볼 수 있다. 또한 정해식에 기초한 구조최적화 알고리즘에 의한 결과와 비교할 때 실행 시간이 확실히 감소하였음을 볼 수 있다.

#### 5.2 1208개의 부재로 구성된 평면트러스

Fig 5.2는 1208개의 부재를 갖는 트러스구조를 나타내며, 설계자료는 Table 5.3에 수록하였다. 이 예제에서도 5개의 부구조로 분할하였으며, 설계변수는 부재 단면적으로 취하여, 총 24개로 연계하여 수행하였다. 제시된 알고리즘을 이용하여 수행한 결과는 Table 5.4에 나타내었다.

표에서 볼 수 있듯이 제시된 알고리즘을 수행하여 얻은 결과가 문헌<sup>4)</sup>과 거의 유사함을 볼 수 있고, 실행 시간면에서 볼 때 상기한 200-bar truss에 비교하여 설계의 차원이 커지면서 정해석에 기초한 구조최적화의 결과에 비해 훨씬 더 많이 단축되는 것을 볼 수 있다. 따라서 설계변수와 제한조건의 수가 많은 대형 구조계에 적용할수록 효율성이 증가할 것으로 생각된다.

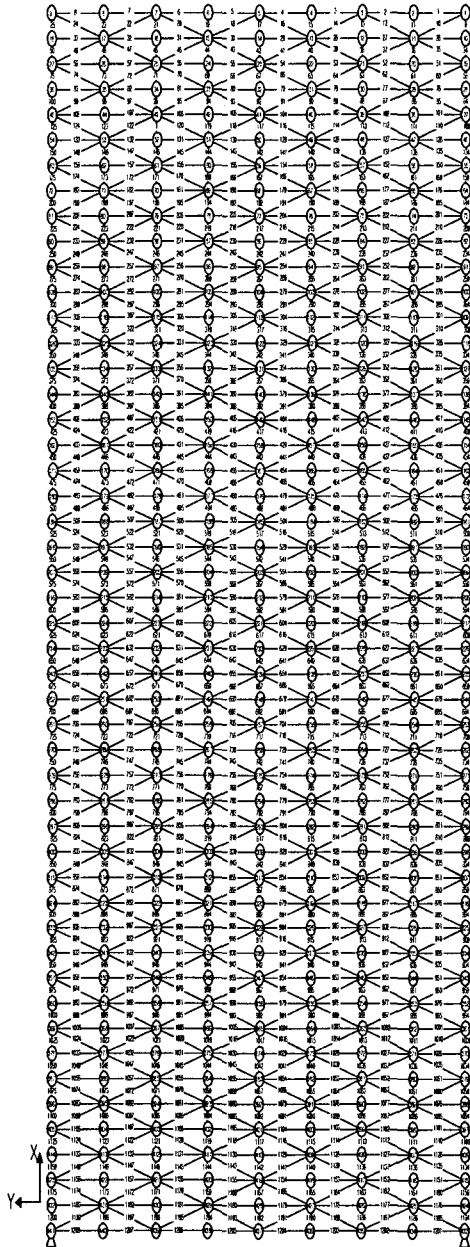


Fig. 5.2 1208-bar plane truss

Table 5.3 Design data of 200-bar plane truss

Variable	Value
Modulus of elasticity	10,000 ksi
Allowable stress limit	$\pm 25.0$ ksi
Displacement limit	$\pm 10.0$ in.
Specific weight	0.1 lb/in. <sup>3</sup>
Upper limit on area	None
Lower limit on area	0.01 in. <sup>2</sup>
Loading condition : 1	1.0 kips acting in Y direction at node point 1,

Table 5.4 Results of optimization for 1208-bar plane truss

Sub. (s)	D.V No.	Member No.	Present	SUBANA	Ref. <sup>9)</sup>
1	1	1~58	0.3002	0.3249	0.3062
	2	59~108	0.1958	0.1980	0.1079
	3	109~158	0.1435	0.2029	0.1295
	4	159~208	0.1680	0.1913	0.1737
	5	209~258	0.2199	0.2151	0.2176
	6	259~308	0.2764	0.3503	0.3622
	7	309~358	0.3079	0.3029	0.3075
	8	359~408	0.3524	0.4289	0.3531
	9	409~458	0.4831	0.5503	0.3990
	10	459~508	0.4401	0.4366	0.4449
	11	509~558	0.4873	0.4883	0.4910
	12	559~608	0.5227	0.5363	0.5371
	13	609~658	0.6287	0.5817	0.5832
	14	659~708	0.8069	0.6849	0.6294
	15	709~758	0.8100	0.7028	0.6756
	16	759~808	0.8235	0.7176	0.7218
	17	809~858	0.7711	0.7735	0.7681
	18	859~908	0.8437	0.8214	0.8144
	19	909~958	0.8579	0.8639	0.8610
	20	959~1008	0.8852	0.9154	0.9087
	21	1009~1058	0.9506	0.9570	0.9606
	22	1059~1108	1.2068	1.0298	1.0310
	23	1109~1158	1.1695	1.1879	1.1900
	24	1159~1208	1.9189	1.7371	1.7380
Total wight(lb)			1105.1	1079.1	1037.4
Run time (sec)			257.39	2401.29	-

## 6. 결 론

본 연구에서는 대형 구조계의 설계최적화에서 반복되는 재설계 과정에 연계되어 설계변수의 큰 변화에도 정확도와 효율성을 유지할 수 있는 다단계 혼성 근사화 접근방법을 제시하고, 이를 최적화 과정과 연계하여 전체 구조설계 과정의 효율성을 제고하였다.

근사재해석 방법은 기본적으로 대형 구조계를 대상으로 한 부구조화의 틀에 보존근사화의 각 항을 차원축소방법의 기저벡터로 선정한 합성근사화에 의하여 변위산정의 정확성과 효율성을 제고하고, 이를 바탕으로 응력산정에서 기 구성된 응력-변위관계식을 정의하는 행렬만을 병용하는 혼성방식을 취하였다.

제시된 알고리즘을 트러스 구조(200-bar, 1208-bar)에 적용한 결과 목표함수 및 개별 설계변수들의 값들이 문헌의 결과와 거의 유사한 결과를 보임으로써 정확성을 검증할 수 있었고, 실행시간에 있어서 정해석에 기초한 구조최적화 알고리즘보다 훨씬 빠른 결과를 보임으로써 효율성도 검증할 수 있었다.

### 참고문헌

1. Kirsch, U., *Structural Optimization : Fundamentals and Application*, Springer-Verlag, Berlin Hiedelberg, 1993.
2. Haug, E. J., and Arora, J. S., "*Applied Optimal Design : Mechanical and structural systems*", John Willy & Sons, Inc., New York, 1979.
3. Ye-Chen Lai., "*Structural Optimization Based on Preconditioned Conjugate Gradient Analysis Methods*", University of California, Los Angeles, 1992
4. Noor, A. K., and Lowder, H. E., "*Approximate Techniques of Structural Reanalysis*", *Computers and Structures*, Vol. 4, 1974, pp. 801~812.
5. Kirsch, U., "*Improved Stiffness-Based First-Order Approximations for Structural Optimization*", *AIAA Journal*, Vol.33, No.1 Tanuary 1995, pp. 143~150.
6. Arora, J. S., "*Survey of Structural Reanalysis Techniques*", *J. Struct. Div. ASCE*, Vol 102, 1976, pp. 783~802.
7. Przemieniecki, J. S., *Matrix Methods in Structural Analysis*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1968.