

설계지향 구조 재해석 모델의 비교 평가

Comparative assessment for Design Oriented Structural Reanalysis Models

황진하¹⁾ · 이재석²⁾ · 김경일³⁾

Hwang, Jin Ha Lee, Jae Seok Kim, Kyeong Il

요약 : 본 연구는 반복되는 중간단계의 구조설계과정에 연동되는 근사 재해석 모델을 비교 평가하고, 특히 설계변수가 크게 변화할 때도 일정한 정확도를 유지하여 전체 설계과정에 효율성과 신뢰성을 함께 줄 수 있는 안정된 모델을 찾는다. 이를 위해 대형 프레임구조를 대상으로 설계변수 그룹의 갯수와 변화량을 달리하면서 최대 변위값을 정해와 비교하여 정확도 및 신뢰성을 검토하고, CPU 연산시간 비교를 통해 효율성을 시험한다. 예제를 통하여 부분근사화는 가장 간편하고 빠르기는 하나 설계의 변화가 극히 적은 특정한 경우에만 유용한 반면, 전역근사화는 기저벡터를 효과적으로 취할 경우 설계 변화량을 줄 때에도 비교적 높은 정확도를 유지하나 효율성이 떨어지는 취약점을 갖고 있다. 이들에 비해 전역-부분근사화는 어느 경우에도 높은 정확도와 효율성을 아울러 갖추고 있음을 보여준다. 이 방법들을 구조 재설계 과정에 연계할 때 설계정보에 따라 혼용함으로써 효율성을 증대시킬 수 있다.

ABSTRACT : Design-oriented approximate structural reanalysis models are compared and assessed, particularly with focus on the case of large changes of design variables. The effectiveness and reliability are demonstrated by means of numerical examples. The results of the study suggest the following conclusions relative to the potential of the procedures. (A) local approximation is only appropriate for the case of small changes in design : (B) global approximation is exact for the case of large changes in a small number of design variables, but inefficient : (C) local-global approximation is most effective and reliable for the case of large changes with a large number of design variables. These methods can improve the total efficiency when they are appropriately used according to the design information for the redesign process of large scale structures.

핵심용어 : 재해석, 재설계, 전역근사화, 전역-부분근사화, 민감도해석, 설계변수연계

KEYWORDS : reanalysis, redesign, global approximation, local-global approximation, sensitivity analysis, design variable linking

1) 정희원, 충북대학교 구조시스템공학과 교수, 공학박사
2) 정희원, 충북대학교 구조시스템공학과 조교수, 공학박사
3) 충북대학교 토목공학과, 박사수료

본 논문에 대한 토의를 2000년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

공학에 있어 설계란 해석과 재설계의 반복과정으로 이루어지는 종합 작업이며, 오늘날 이들의 대부분은 전산환경에서 수행된다. 게다가 대형구조의 해석과 설계를 위한 기본 방정식은 대단히 큰 차원을 갖으며, 이러한 설계 해석에 드는 비용이 전체 설계과정에서 커다란 부분을 차지한다. 그러한 점에서 중간단계에서 수행되는 해석과정의 효율성 제고는 전체 설계비용을 크게 줄일 수 있을 뿐 아니라 설계최적화와 자동화의 발전에 중요한 기능을 한다.

재해석의 목적은 수없이 반복되는 설계의 중간과정에서 변화된 설계값에 대하여 매번 전체에 대한 새로운 정해석을 수행하는 대신, 반복연산이나 근사적 접근을 통하여 전체설계에 드는 비용을 줄이는 데 있다. 많은 수의 자유도와 설계변수들을 갖는 복잡한 구조시스템에서 설계변수의 변화량이 큰 경우, 근사화의 정확도가 낮아지는 문제를 갖는다. 더욱이 일반적인 변위법에 의한 구조물의 응력산정은 변위-응력 관계식에 의해 산출된다는 점에서 근사변위의 정확도는 중요한 의미를 갖는다. 따라서 반복되는 중간단계의 재설계 과정에서 설계변수의 큰 변화량에도 정확도와 효율성을 모두 갖춘 재해석기법이 요구된다.

재해석에 관하여 지금까지 비교적 많은 연구들이 발표되었으나 실제 설계에 응용하기 위한 구체적인 비교 연구가 없었던 바, 이러한 측면에서 본 연구는 주요한 근사 재해석기법들을 동일한 환경과 방식으로 비교 분석하여 그들의 특장과 적용성을 구체적 수치로써 평가하여 사용성을 높이고 새로운 연구의 기초가 되도록 한다. 아울러 개선된 전역-부분근사화 루틴을 제시하고 함께 비교하므로써 이러한 의미를 재확인한다.

일반적으로 구조최적화를 실행하는 경우 원문제에 대한 명시적 형태의 근사화를 통하여 실행가능성 및 효율성을 높이게 되며, 이때 거동에 대한 1차 근사화를 취하는 것이 보편적이다.

상기와 같이 기본 해석방법으로 변위법을 쓰는 경우 일차적인 거동은 변위이며 응력은 그에 종속케 된다. 따라서 변위에 대한 정확하고 효율적인 계산이 대단히 중요하며 그것이 제대로 수행될 경우 응력의 재산정 또한 높은 신뢰성을 갖게 된다.

응력의 재해석에는 앞에서와 같은 Taylor 1차 전개를 기본으로 하나, 이 경우 단면 상세 치수에 대한 응력의 높은 비선형성으로 인하여 설계의 변화폭이 커질 때 많은 오차를 유발하는 문제를 갖고 있어, 본 연구에서는 근사 재해석방법들을 통한 변위에 대한 높은 신뢰성을 바탕으로 이미 구성된 응력-변위만의 기본 관계식을 병용한 혼성방식을 취한다.

제시된 알고리즘들의 적용성과 효율성을 검증하기 위해 기존의 연구에서 주로 사용한 소형 트러스 대신 중대형 프레임을 시험 대상으로 하고, 실제 설계과정에 적용을 고려, 설계변수가 크게 변화하는 경우에 초점을 두고 안정성을 검토하였다.

2. 설계민감도해석

구조계를 지배하는 기본 평형방정식은

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

로 정의되고 여기서 K 는 구조강성도매트릭스, U 는 변위벡터, P 는 하중벡터이다.

설계민감도는 설계변화에 대한 설계함수의 변화를 의미하고, 이산모델에 있어 미분에 의한 민감도를 계산하는 방법에는 직접법 또는 설계변수법, 간접법 또는 수반변수법이 있으나 여기서는 활성조건과 같은 갯수만큼의 수반변수를 미지수로 하는 후자를 택한다.

목표함수나 거동조건 등의 설계함수를

$$\phi = \phi(X, U) \quad (2)$$

로 나타내고, 연쇄법칙을 이용하여 설계변수에 대하여 음함수 미분하면

$$\frac{d\phi}{dX} = \frac{\partial\phi}{\partial X} + \left(\frac{\partial\phi}{\partial U}\right)^T \frac{dU}{dX} \quad (3)$$

여기서 변위의 도함수 dU/dX 는 다음과 같이 얻는다.

$$K \frac{\partial U}{\partial X} = \frac{\partial P}{\partial X} - \frac{\partial K}{\partial X} U \quad (4)$$

여기서 우변을

$$V = \frac{\partial P}{\partial X} - \frac{\partial K}{\partial X} U \quad (5)$$

이라 하면, 식 (4)는

$$K \frac{\partial U}{\partial X} = V \quad (6)$$

로 바꿔 쓸 수 있다. 이때 식 (6)은 식 (5)와 같은 계수매트릭스 K 를 갖게 되고 U 와 $\partial U/\partial X$ 를 구하는 과정은 동일하다. 이것은 K 를 분할하는 경우에도 성립하며, 이러한 점에서 P 와 같은 위치에 있는 V 는 의사하중(pseudo load)의 개념을 갖는다.

다음 설계도함수에 대한 식 (6)을 설계변수만으로 표현하기 위해 수반변수 λ 를 미지수로 하는 수반방정식

$$K\lambda = \frac{\partial\phi}{\partial U} \quad (7)$$

을 설정하고 이를 전치하여 식 (6)에 대입하면

$$\nabla_x \phi = \frac{d\phi}{dX} = \left(\frac{\partial\phi}{\partial X}\right) + \lambda^T V \quad (8)$$

를 얻는다.

3. 근사 구조 재해석

구조 재해석은 구조설계 과정에서 설계변수가 수정될 때, 새로운 정해석 대신에 초기의 해석정보값을 이용하여 수정된 구조의 거동량을 산정하는 것이다.

설계변화량을 고려한 강성도매트릭스와 변위벡터는

$$K = K^* + \Delta K \quad (9)$$

$$U = U^* + \Delta U \quad (10)$$

가 된다. 여기서, ΔK 는 구조 강성도매트릭스의 변화량, ΔU 은 변위벡터의 변화량 그리고 *은 전단계의 해석값을 나타낸다. 식(9)와 식(10)을 식(1)에 대입하면,

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

또는

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

을 얻는다. 즉, 구조재해석은 시스템방정식 (1)을 사용하여 전체구조의 거동량을 산정하는 대신 식 (11)의 전단계 해석정보값인 $\{U^*\}$ 을 이용하여 새로운 거동량을 구한다.

재해석방법은 직접법, 반복법 및 근사방법으로 분류되며, 이 중 근사방법은 대형 구조계에 적용하기에 보다 적합한 방법으로, 부분근사화와 전역근사화 및 전역-부분근사화 등으로 나눌 수 있다.

3.1 부분근사화

부분근사화는 설계공간의 특정점 근방에서 계산된 0차 혹은 1차 도함수 정보를 이용한 외적근

사화를 취하는 것으로 설계공간의 한점에서 직접 근사화 또는 상반근사화 등을 취하는 전형적인 방법이 있다.

먼저 선형근사화는 다음 식으로 표현된다.

$$g_L = g^* + \sum_{j=1}^{N_d} (X_j - X_j^*) \left(\frac{\partial g^*}{\partial X_j} \right) \quad (13)$$

여기서 N_d 는 설계변수의 수를 나타낸다. 이 방법은 수행성면에서는 효율성을 가지나 설계변수의 변화량이 상대적으로 큰 경우에는 부적합한 방법이다.

상반근사화(reciprocal approximation)는 이를 개선하기 위한 대안으로 부재단면적 또는 단면 2차모멘트의 역을 설계변수로 취한다.

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

3.2 전역근사화

전역근사화는 수많은 설계점들에 대한 정보를 이용하는 것으로 다항식근사화와 차원축소법(reduced basis method) 등이 이에 속하며, 부분근사화에 비해 정확도는 상당한 개선을 보이나 계산비용이 많이 드는 단점을 갖는다. 이 중 차원 축소법은 기저벡터들로 이루어진 축소된 부공간에서 거동량을 산출하는 근사방법으로, 근사변위 U 를 초기 해석정보값들 중 독립된 n 개의 기저벡터를 선형결합하여 구한다. 여기서 n 은 상태공간의 차원보다 훨씬 작다고 가정된다.

$$U = u_1 R_1 + u_2 R_2 + \dots + u_n R_n = R u \quad (15)$$

기저벡터로 구성된 매트릭스 R 을 전치하여 식 (1)의 양변에 전승하고 식 (15)를 대입하면,

$$K_R u = P_R \quad (16)$$

여기서,

$$K_R = R^T K R, \quad P_R = R^T P \quad (17)$$

을 얻는다. 따라서 이 방법에 의해 구해진 거동량의 정확도는 기저벡터의 선정에 크게 영향을 받는다. 그 중 한가지 대안은 Taylor 급수의 항들을 이용하는 것으로 다음과 같다.

$$R_1 = U^*, \quad R_{j+1} = \frac{\partial U^*}{\partial X_j} \quad (18)$$

$$j = 1, 2, \dots, N_d$$

세분하면 상기 식과 같이 기저벡터를 선정하거나 식 (18)에서 설계변수들에 대한 변위의 민감도벡터만을 기저벡터로 선정한 경우 그리고 2차도함수까지 기저벡터로 선정한 경우 등으로 나눌 수 있다. 식 (16)에 의해 미결정계수벡터 u 를 구하고, 이를 식 (15)에 대입하여 근사변위 U 를 구한다.

3.3 전역-부분 근사화

전역-부분근사화는 전역근사화와 부분근사화를 결합하여 정확성과 효율성을 함께 갖도록 하는 방법으로, 부분근사화의 각 항들을 전역근사화의 기저벡터로 취하게 된다.

이 방법에서 변위벡터 U 는

$$U \approx R^* u \quad (19)$$

에 의해 구해지며, 여기서 기저벡터 R 는 선형근사화의 각항을 기저벡터로 쓰면,

$$R^* = \left[U^*, \sum_{j=1}^{N_d} \left\{ \frac{\partial U^*}{\partial X_j} \right\} (X_j - X_j^*) \right] \quad (20)$$

이 되며, 상반근사화의 경우

$$R^* = \left[U^*, \sum_{j=1}^{N_d} \left(\frac{X_j^*}{X_j} \right) \left\{ \frac{\partial U^*}{\partial X_j} \right\} (X_j - X_j^*) \right] \quad (21)$$

으로 구성된다.

응력의 재해석은 대부분 Taylor 1차 전개를 취하나 설계변화량이 커지는 경우 단면 상세치수에 대한 응력의 높은 비선형성으로 인해 많은 오차가 발생한다. 이러한 문제점을 개선키 위해 내력 또는 합응력을 중간거동변수로 한 간접적인 선형근사화방법⁷⁾이 제시된 바 있으나, 여기서는 이미 구성된 응력-변위관계식을 정의하는 응력매트릭스 변환을 활용한다.

$$T = SU \quad (22)$$

$$T = DBU \quad (23)$$

여기서 T 는 단면력, D 는 응력-변형률매트릭스, B 는 변형률-변위매트릭스를 나타낸다.

4. 적용 및 평가

제시된 근사 재해석 알고리즘들은 프레임구조에 적용하여 정확도 및 효율성에 대하여 비교·분석하였다. 각 알고리즘들은 설계변수를 -90%에서 100%까지 22단계로 변화시켜 수행하였으며, 그 결과치 중 최대회전과 처짐 및 최대축응력과 휨응력 등에 대한 오차를 도표화하였다. 또한 설계변수연계수에 따른 실행시간을 비교함으로써 효율성을 검토하였다.

4.1 30부재 프레임구조

30개의 부재를 갖는 프레임구조는 그림 1에 나타내었다. 이 예제에서 설계변수 X 는 단면 2차 모멘트로 선정하였으며, 설계변수를 6, 18, 30개로 연계하여 실행시켰다.

설계변수와 단면적 A 및 단면계수 Z 의 관계

는 다음 식을 이용하였다.³⁾

$$A_j = 0.58 X_j^{1/2}, \quad Z_j = 0.58 X_j^{3/4} \quad (24)$$

이 구조에 대한 해석자료는 표 1에 수록하였으며, 설계변수를 18개로 연계하여 각 알고리즘을 수행한 결과치와 정해석 결과치의 오차는 표 2에 나타내었다.

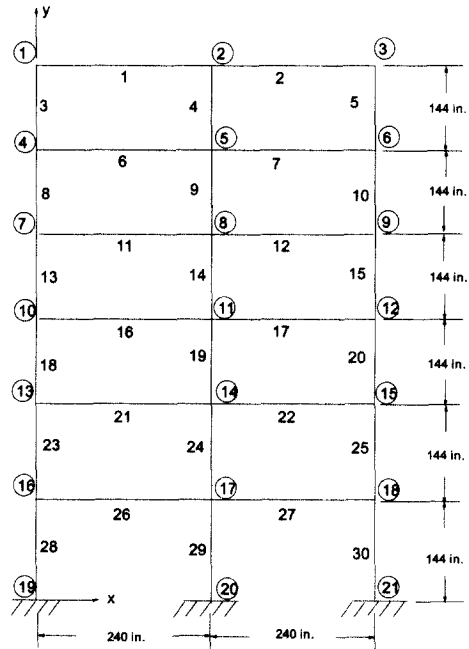


그림 1. 30부재 프레임

표 1. 30부재 프레임구조의 해석자료

Modulus of elasticity : 30,000 ksi		
Loading condition : 1		
(1) -4.0 kips/ft acting in y-direction on member number 1,7,11,17,21,27.		
(2) -1.0 kips/ft acting in y-direction on member number 2,6,12,16,22,26.		
Initial value of design variables : 1000.0in ⁴		
Number of design variable groups : 18		
(1) 1, 2,	(7) 11,12	(13) 21, 22
(2) 3, 5	(8) 13, 15	(14) 23, 25
(3) 4	(9) 14	(15) 24
(4) 6, 7	(10) 16, 17	(16) 26, 27
(5) 8, 10	(11) 18, 20	(17) 28, 30
(6) 9	(12) 19	(18) 29

표 2. 30부재 프레임구조의 결과비교

거동	변화량 (%)	정해	부분근사화		전역근사화		상반 전역-부분 근사화
			선형	상반	I	II	
θ	-90	1.666E-02	3.378E-03	1.735E-02	1.667E-02	1.733E-02	1.633E-02
	-70	5.752E-03	3.033E-03	5.851E-03	5.755E-03	5.900E-03	5.734E-03
	-50	3.526E-03	2.688E-03	3.550E-03	3.527E-03	3.579E-03	3.524E-03
	-30	2.559E-03	2.343E-03	2.564E-03	2.559E-03	2.579E-03	2.559E-03
	-10	2.016E-03	1.997E-03	2.017E-03	2.016E-03	2.021E-03	2.016E-03
	-5	1.916E-03	1.911E-03	1.916E-03	1.916E-03	1.918E-03	1.916E-03
	0	1.825E-03	1.825E-03	1.825E-03	1.825E-03	1.825E-03	1.825E-03
	5	1.743E-03	1.739E-03	1.743E-03	1.743E-03	1.741E-03	1.743E-03
	20	1.536E-03	1.480E-03	1.537E-03	1.536E-03	1.530E-03	1.536E-03
	40	1.329E-03	1.135E-03	1.332E-03	1.329E-03	1.320E-03	1.329E-03
	60	1.172E-03	7.896E-04	1.178E-03	1.172E-03	1.161E-03	1.172E-03
80	1.049E-03	4.445E-04	1.058E-03	1.049E-03	1.037E-03	1.050E-03	
100	9.503E-04	9.937E-05	9.621E-04	9.508E-04	9.381E-04	9.510E-04	
δ	-90	-8.854E-01	-3.924E-01	-1.160E+00	-8.895E-01	-8.631E-01	-9.420E-01
	-70	-5.008E-01	-3.641E-01	-5.956E-01	-5.016E-01	-4.944E-01	-5.086E-01
	-50	-3.829E-01	-3.357E-01	-4.066E-01	-3.831E-01	-3.802E-01	-3.847E-01
	-30	-3.204E-01	-3.074E-01	-3.256E-01	-3.204E-01	-3.192E-01	-3.208E-01
	-10	-2.802E-01	-2.790E-01	-2.806E-01	-2.802E-01	-2.799E-01	-2.802E-01
	-5	-2.722E-01	-2.720E-01	-2.723E-01	-2.722E-01	-2.721E-01	-2.722E-01
	0	-2.649E-01	-2.649E-01	-2.649E-01	-2.649E-01	-2.649E-01	-2.649E-01
	5	-2.580E-01	-2.578E-01	-2.581E-01	-2.580E-01	-2.582E-01	-2.580E-01
	20	-2.402E-01	-2.365E-01	-2.412E-01	-2.402E-01	-2.406E-01	-2.403E-01
	40	-2.211E-01	-2.082E-01	-2.244E-01	-2.211E-01	-2.217E-01	-2.213E-01
	60	-2.057E-01	-1.798E-01	-2.117E-01	-2.058E-01	-2.066E-01	-2.061E-01
80	-1.930E-01	-1.515E-01	-2.019E-01	-1.931E-01	-1.940E-01	-1.936E-01	
100	-1.823E-01	-1.231E-01	-1.940E-01	-1.825E-01	-1.833E-01	-1.831E-01	
σ_A	-90	-5.274E+04	-2.347E+04	-7.649E+04	-5.290E+04	-4.882E+04	-5.560E+04
	-70	-2.990E+04	-2.179E+04	-3.556E+04	-2.993E+04	-2.869E+04	-3.030E+04
	-50	-2.290E+04	-2.010E+04	-2.432E+04	-2.291E+04	-2.235E+04	-2.299E+04
	-30	-1.918E+04	-1.841E+04	-1.950E+04	-1.919E+04	-1.894E+04	-1.921E+04
	-10	-1.680E+04	-1.673E+04	-1.682E+04	-1.680E+04	-1.673E+04	-1.680E+04
	-5	-1.632E+04	-1.631E+04	-1.633E+04	-1.632E+04	-1.629E+04	-1.632E+04
	0	-1.588E+04	-1.588E+04	-1.588E+04	-1.588E+04	-1.588E+04	-1.588E+04
	5	-1.548E+04	-1.546E+04	-1.548E+04	-1.548E+04	-1.551E+04	-1.548E+04
	20	-1.442E+04	-1.420E+04	-1.448E+04	-1.442E+04	-1.451E+04	-1.442E+04
	40	-1.328E+04	-1.251E+04	-1.348E+04	-1.328E+04	-1.344E+04	-1.329E+04
	60	-1.236E+04	-1.083E+04	-1.272E+04	-1.237E+04	-1.258E+04	-1.239E+04
80	-1.161E+04	-9.139E+03	-1.214E+04	-1.161E+04	-1.186E+04	-1.164E+04	
100	-1.097E+04	-7.453E+03	-1.167E+04	-1.097E+04	-1.126E+04	-1.101E+04	
σ_{M+}	-90	-2.119E+05	-2.195E+05	-2.204E+05	-2.111E+05	-2.176E+05	-2.150E+05
	-70	-9.615E+04	-9.749E+04	-9.775E+04	-9.602E+04	-9.700E+04	-9.668E+04
	-50	-6.691E+04	-6.726E+04	-6.736E+04	-6.687E+04	-6.712E+04	-6.705E+04
	-30	-5.279E+04	-5.287E+04	-5.290E+04	-5.278E+04	-5.283E+04	-5.282E+04
	-10	-4.427E+04	-4.427E+04	-4.428E+04	-4.427E+04	-4.427E+04	-4.427E+04
	-5	-4.263E+04	-4.263E+04	-4.263E+04	-4.263E+04	-4.263E+04	-4.263E+04
	0	-4.113E+04	-4.113E+04	-4.113E+04	-4.113E+04	-4.113E+04	-4.113E+04
	5	-3.975E+04	-3.975E+04	-3.975E+04	-3.975E+04	-3.975E+04	-3.975E+04
	20	-3.622E+04	-3.624E+04	-3.625E+04	-3.622E+04	-3.623E+04	-3.623E+04
	40	-3.254E+04	-3.259E+04	-3.263E+04	-3.254E+04	-3.258E+04	-3.257E+04
	60	-2.967E+04	-2.976E+04	-2.982E+04	-2.966E+04	-2.973E+04	-2.971E+04
80	-2.735E+04	-2.747E+04	-2.758E+04	-2.734E+04	-2.743E+04	-2.741E+04	
100	-2.543E+04	-2.559E+04	-2.574E+04	-2.542E+04	-2.554E+04	-2.552E+04	
실행시간(sec)		0.0158	0.0007	0.0010	0.0072	0.0067	0.0019

δ : 처짐, θ_z : 회전, σ_A : 축응력, σ_M : 휨응력

이 예제에서 최대회전은 1번 절점, 최대변위는 2번 절점의 수직변위, 최대축응력은 29번 부재, 최대휨응력은 11번 부재에서 발생하는 것으로 나타났다. 표 2에서 부분근사화는 설계변수 변화량이 증가할수록 오차가 크게 증가하고 있으며, 특히 설계변수 변화량이 $\pm 20\%$ 이상이 되면서 그 폭은 더욱 증가하고 있다. 선형 부분근사화에 비해 상반 부분근사화의 오차가 다소 적게 나타나고 있다.

전역근사화는 기저벡터를 식 (18)로 선정한 방법인 전역근사화 I 과 설계변수에 대한 변위의 민감도벡터를 기저벡터로 선정한 전역근사화 II 로 구분하여 수행하였다.

이 방법들은 모두 설계변수 변화량 -90% 에서 100% 까지 증가하여도 오차가 훨씬 적게 나타났으며, 특히 전역근사화 I 은 정해에 거의 근접한 결과치를 보이고 있다. 다만 다른 알고리즘들에 비해 실행시간이 많이 소비하는 단점을 보이고 있다.

이에 비해 상반 전역-부분근사화는 설계변수 변화량에 따른 오차가 전역근사화 I 보다도 약간 크게 나타나지만 정해에 근접한 결과치를 보이고 있음을 볼 수 있다. 또한 실행시간면에서도 부분근사화와 같게 나타난다는 점에서 정확도와 효율성을 함께 갖춘 근사화 방법이라는 것을 알 수 있다.

그림 2는 설계변수 변화량에 대한 최대회전의 오차를 도시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 부분근사화는 설계변수의 변화량에 따라 급격한 증가를 보이는 반면에 다른 알고리즘들은 설계변수

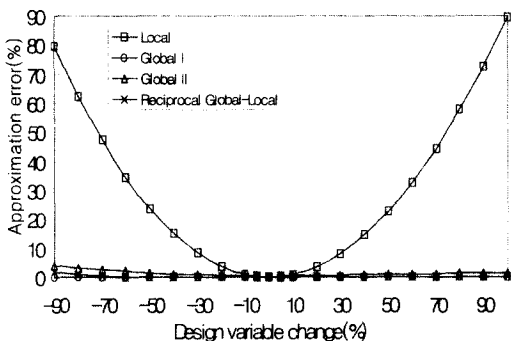


그림 2. 최대회전의 오차비교(30부재 프레임)

변화량이 -90% 에서 100% 까지 증가하여도 5% 이내의 오차를 보이고 있다.

4.2 70부재 프레임구조

그림 3은 70개의 부재를 갖는 프레임구조를 나타내고 있다. 설계변수는 앞의 예제와 마찬가지로 단면 2차 모멘트로 선정하였고, 5, 20, 70개로 연계하여 수행하였다. 설계변수와 단면적 A 및 단면계수 Z 의 관계는 식 (24)를 이용하였으며, 이 구조에 대한 해석자료는 표 3에 수록하였다.

설계변수로 70개 전체 부재를 취하여 각 알고리즘을 수행한 결과와 정해석 결과치의 오차는 표 4에 나타내었다.

최대화회전은 21번 절점, 최대변위는 4번 절점의 수직변위, 최대축응력은 70번 부재, 최대휨응력

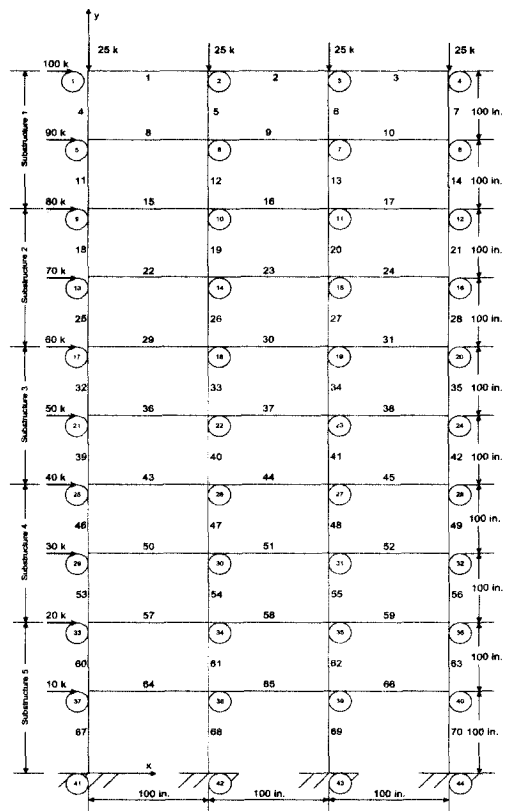


그림 3. 70부재 프레임

표 3. 70부재 프레임구조의 해석자료

Modulus of elasticity : 30,000 ksi
Loading condition : 1
(1) 100.0kips, 90kips, ..., 10kips acting in y-direction at node 1,5,9,...,37.
(2) -25.0kips acting in y-direction at node 1,2,3,4.
Initial value of design variables : 1000.0in ⁴
Number of design variable groups : 70

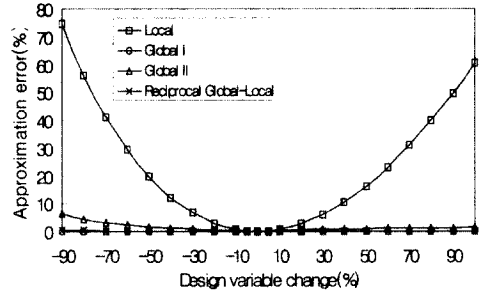


그림 4. 최대회전의 오차비교(70부재 프레임)

은 68번 부재에서 발생하는 것으로 나타났다.

표 4에서 부분근사화는 실행시간이 적게 드는 반면에 설계변수 변화량이 증가할수록 오차가 급격히 증가하고 있으며, 전역근사화 I은 설계변수 변화량이 증가해도 오차가 훨씬 적게 나타난 반면, 실행시간은 다른 알고리즘들에 비해 많이 소요되고 있다. 이것은 설계변수를 부재수와 같은 수인 70개로 취함으로써 특히 그 차이가 두드러진 것으로 사료된다. 상반 전역-부분근사화는 설계변수 변화량에 따른 오차는 전역근사화 I과 유사한 결과치를 보이지만 실행시간면에서는 훨씬 적게 소요되고 있다.

그림 4는 설계변수 변화량에 대한 최대회전의 오차를 도시한 것이다.

상기한 예제들에 대하여 설계변수의 그룹수에 따른 실행시간을 비교하여 표 5에 나타내었다. 표 5에서 볼 수 있듯이 설계변수 연계수가 증가할 때 정해석의 실행시간은 변함이 없으며, 부분근사화와 상반 전역-부분근사화도 비교적 큰 차이가 없음을 볼 수 있다. 그러나 전역근사화는 설계변수 연계수가 증가함에 따라 실행시간도 함께 증가하고 있다.

5. 결 론

구조재해석은 구조설계시 수없이 반복되는 중간해석과정에서 고비용의 새로운 정해석 대신 전단계의 해석정보값을 이용하므로써 전체 설계 시

간과 비용을 줄이기 위한 것이다.

본 연구는 주요한 근사 재해석기법들을 동일한 환경과 방식으로 비교 분석하여 그들의 특징점과 적용성을 구체적 수치로써 평가하고 아울러 개선된 전역-부분근사화 루틴을 제시하였다. 적용성과 효율성을 검증하기 위해 기존의 연구에서 주로 사용한 소형 트러스대신 중대형 프레임을 시험 대상으로 하고, 실제 설계과정에 적용을 고려, 설계변수가 크게 변화하는 경우에 초점을 두고 안정성을 검토하였다.

근사재해석기법 중 부분근사화는 가장 간편하고 빠르기는 하나 설계의 변화가 극히 적은 특정한 경우에만 유용한 반면, 전역근사화는 기저벡터를 효과적으로 취할 경우 설계 변화량이 클 때에도 비교적 높은 정확도를 유지하나 효율성이 떨어지는 취약점을 갖고 있다. 반면에 상반 전역-부분근사화는 설계변수의 수 및 설계의 변화량에 무관하게 정해에 근접하면서 빠른 결과를 보여준다. 여러 경우에 대한 보다 자세한 거동 특성 및 정확도 등은 전장에서 기술하였으며, 이러한 분석에 근거하여 대형 구조시스템의 재설계 과정에 연계될 때 각 알고리즘들을 설계의 상태에 따라 적절히 혼용함으로써 전과정의 효율성을 증대시킬 수 있다.

대형구조의 해석과 설계를 위한 기본 방정식은 대단히 큰 차원을 갖고며, 설계 해석에 드는 비용이 전체 설계과정에서 커다란 부분을 차지한다는 점에서 설계지향 재해석은 설계최적화뿐만 아니라

표 4. 70부재 프레임구조의 결과 비교

거동	변화량 (%)	정해	부분근사화		전역근사화		상반 전역-부분 근사화
			선형	상반	I	II	
θ	-90	6.637E-02	1.666E-02	7.786E-02	6.645E-02	7.068E-02	6.677E-02
	-70	2.583E-02	1.515E-02	2.749E-02	2.584E-02	2.665E-02	2.588E-02
	-50	1.700E-02	1.364E-02	1.741E-02	1.700E-02	1.729E-02	1.701E-02
	-30	1.301E-02	1.213E-02	1.310E-02	1.300E-02	1.312E-02	1.301E-02
	-10	1.069E-02	1.061E-02	1.070E-02	1.069E-02	1.072E-02	1.069E-02
	-5	1.025E-02	1.024E-02	1.026E-02	1.025E-02	1.027E-02	1.025E-02
	0	9.859E-03	9.859E-03	9.859E-03	9.859E-03	9.859E-03	9.859E-03
	5	9.496E-03	9.482E-03	9.500E-03	9.497E-03	9.486E-03	9.497E-03
	20	8.582E-03	8.348E-03	8.600E-03	8.581E-03	8.545E-03	8.581E-03
	40	7.641E-03	6.837E-03	7.701E-03	7.643E-03	7.584E-03	7.644E-03
	60	6.920E-03	5.326E-03	7.026E-03	6.921E-03	6.848E-03	6.923E-03
80	6.346E-03	3.815E-03	6.502E-03	6.348E-03	6.264E-03	6.349E-03	
100	5.877E-03	2.304E-03	6.082E-03	5.878E-03	5.788E-03	5.881E-03	
δ	-90	-2.851E+00	-1.277E+00	-3.975E+00	-2.849E+00	-3.119E+00	-2.849E+00
	-70	-1.619E+00	-1.188E+00	-1.916E+00	-1.619E+00	-1.686E+00	-1.618E+00
	-50	-1.247E+00	-1.099E+00	-1.321E+00	-1.247E+00	-1.274E+00	-1.246E+00
	-30	-1.050E+00	-1.009E+00	-1.067E+00	-1.050E+00	-1.061E+00	-1.050E+00
	-10	-9.238E-01	-9.203E-01	-9.253E-01	-9.238E-01	-9.266E-01	-9.238E-01
	-5	-8.985E-01	-8.980E-01	-8.992E-01	-8.987E-01	-9.000E-01	-8.987E-01
	0	-8.757E-01	-8.757E-01	-8.757E-01	-8.757E-01	-8.757E-01	-8.757E-01
	5	-8.541E-01	-8.534E-01	-8.545E-01	-8.541E-01	-8.530E-01	-8.541E-01
	20	-7.981E-01	-7.866E-01	-8.014E-01	-7.980E-01	-7.940E-01	-7.980E-01
	40	-7.378E-01	-6.974E-01	-7.484E-01	-7.379E-01	-7.314E-01	-7.379E-01
	60	-6.894E-01	-6.083E-01	-7.086E-01	-6.894E-01	-6.812E-01	-6.894E-01
80	-6.494E-01	-5.191E-01	-6.776E-01	-6.494E-01	-6.399E-01	-6.493E-01	
100	-6.156E-01	-4.300E-01	-6.529E-01	-6.156E-01	-6.052E-01	-6.155E-01	
σ_A	-90	-2.001E+05	-8.949E+04	-2.841E+05	-2.000E+05	-1.343E+05	-2.030E+05
	-70	-1.136E+05	-8.320E+04	-1.345E+05	-1.136E+05	-9.531E+04	-1.139E+05
	-50	-8.738E+04	-7.692E+04	-9.263E+04	-8.736E+04	-7.960E+04	-8.743E+04
	-30	-7.350E+04	-7.063E+04	-7.467E+04	-7.349E+04	-7.024E+04	-7.350E+04
	-10	-6.459E+04	-6.434E+04	-6.469E+04	-6.459E+04	-6.377E+04	-6.459E+04
	-5	-6.280E+04	-6.277E+04	-6.285E+04	-6.282E+04	-6.244E+04	-6.282E+04
	0	-6.120E+04	-6.120E+04	-6.120E+04	-6.120E+04	-6.120E+04	-6.120E+04
	5	-5.967E+04	-5.963E+04	-5.970E+04	-5.968E+04	-6.002E+04	-5.968E+04
	20	-5.573E+04	-5.491E+04	-5.596E+04	-5.572E+04	-5.691E+04	-5.572E+04
	40	-5.147E+04	-4.863E+04	-5.222E+04	-5.148E+04	-5.347E+04	-5.149E+04
	60	-4.806E+04	-4.234E+04	-4.941E+04	-4.807E+04	-5.062E+04	-4.808E+04
80	-4.524E+04	-3.605E+04	-4.723E+04	-4.525E+04	-4.822E+04	-4.527E+04	
100	-4.286E+04	-2.977E+04	-4.548E+04	-4.287E+04	-4.614E+04	-4.289E+04	
σ_M	-90	-4.962E+05	-9.658E+04	-5.031E+05	-4.966E+05	-4.947E+05	-4.957E+05
	-70	-2.205E+05	-1.139E+05	-2.218E+05	-2.205E+05	-2.208E+05	-2.204E+05
	-50	-1.516E+05	-1.144E+05	-1.519E+05	-1.515E+05	-1.518E+05	-1.515E+05
	-30	-1.185E+05	-1.081E+05	-1.186E+05	-1.185E+05	-1.186E+05	-1.185E+05
	-10	-9.867E+04	-9.773E+04	-9.870E+04	-9.867E+04	-9.871E+04	-9.867E+04
	-5	-9.484E+04	-9.466E+04	-9.489E+04	-9.487E+04	-9.489E+04	-9.487E+04
	0	-9.142E+04	-9.142E+04	-9.142E+04	-9.142E+04	-9.142E+04	-9.142E+04
	5	-8.822E+04	-8.802E+04	-8.824E+04	-8.823E+04	-8.821E+04	-8.822E+04
	20	-8.010E+04	-7.700E+04	-8.011E+04	-8.008E+04	-8.003E+04	-8.008E+04
	40	-7.162E+04	-6.061E+04	-7.170E+04	-7.164E+04	-7.154E+04	-7.164E+04
	60	-6.504E+04	-4.259E+04	-6.518E+04	-6.505E+04	-6.492E+04	-6.505E+04
80	-5.976E+04	-2.319E+04	-5.994E+04	-5.977E+04	-5.961E+04	-5.977E+04	
100	-5.540E+04	-2.582E+03	-5.565E+04	-5.541E+04	-5.523E+04	-5.541E+04	
실행시간(sec)		0.1609	0.0017	0.0019	0.1540	0.1512	0.0053

δ : 처짐, θ_z : 회전, σ_A : 축응력, σ_M : 휨응력

표 5. 실행시간 비교

(단위 : 0.1sec)

알고리즘 모 델	설 계 변수의 그룹수	정해석	부분근사화		전역근사화		상반 전역-부분 근사화
			선 형	상 반	I	II	
30개의 부재를 갖는 프레임	6	0.1478	0.0048	0.0059	0.0286	0.0238	0.0144
	18	0.1478	0.0072	0.0095	0.0715	0.0668	0.0190
	30	0.1478	0.0119	0.0143	0.1431	0.1335	0.0212
70개의 부재를 갖는 프레임	5	1.6088	0.0096	0.0118	0.0906	0.0763	0.0477
	20	1.6088	0.0128	0.0132	0.2861	0.2671	0.0501
	70	1.6088	0.0167	0.0191	1.5403	1.5117	0.0525

자동화에도 핵심 기능을 하며, 따라서 앞으로
도 많은 연구가 요구된다.

감사의 말

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구과제
(95-0600-03-01-2)의 일부이며, 재단의 지원에
감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Abu Kassim, A. M., and Topping, B. H. V. : "Static Reanalysis : A Review", Journal of Structural Division ASCE, Vol. 113, 1987, pp. 1029-1045.
2. Arora, J. S. : "Survey of Structural Reanalysis Techniques", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol 102, 1976, pp. 783-802.
3. Khan, M. R. : "Optimality Criterion Techniques Applied to Frames Having Nonlinear Cross-Sectional Properties", AIAA Journal, 81-0552, 1981, pp. 233~241.
4. Kirsch, U. : "Improved Stiffness-Based First-Order Approximations for Structural Optimization", AIAA Journal, Vol. 33, No.1 January 1995, pp. 143~150.
5. Noor, A. K., and Lowder, H. E.: "Approximate Techniques of Structural Reanalysis", Computer and Structures, Vol. 4, 1974, pp. 801~812.
6. Przemieniecki, J. S. : Matrix Methods in Structural Analysis, McGraw-Hill Book Company, New York, 1968.
7. Vanderplaats, G. N., and Salagegheh, E.: "A New Approximation Method for Stress Constraints in Structural Synthesis", AIAA Journal, 27, 1989

(접수일자 : 1999년 9월 3일)