

효율적인 알고리즘에 의한 초고층건물의 비탄성 해석 연구

Investigation on Inelastic Behavior of Tall Buildings Based on Efficient Analysis Algorithm

주 영 규¹⁾ · 홍 원 기²⁾ · 김 상 대³⁾ · 박 칠 림⁴⁾
Ju, Young Kyu Hong, Won Kee Kim, Sang Dae Park, Chil Lim

요 약 : 철골조 초고층건물의 설계에 있어서 구조물의 극한상태는 탄성해석으로는 구할 수가 없다. 현재의 비탄성 해석프로그램은 중대형에서 수행되고 있으며 사용하기가 복잡하고 그 결과값을 분석하는데 많은 노력과 시간이 요구되기 때문에 실무분야에서 비탄성 해석은 사용성에서 어려움이 있다.

본 연구에서는 잔여용력계수를 사용한 방법을 이용한 PC용 비탄성 해석법을 실제 초고층 건물에 적용하여 탄성설계된 구조물에 대한 비탄성해석을 수행하였다. 또한 시스템 연성을 증대시키기 위한 구조시스템 변경방법에 관해 제시하고 있다.

ABSTRACT : In design of tall buildings, the flows of stress and ultimate strength of structures cannot be obtained by the elastic analysis alone. The current inelastic analysis are very impractical for practical engineer due to the amount of work involved in engineering calculation.

In this paper, the PC-based inelastic analysis by the residual strength ratio concepts is introduced. The efficiency of inelastic analysis is evaluated by comparing the results of inelastic analysis with those of elastic analysis for the existing tall building located in Seoul. Some modification in terms of lateral resisting structural system is proposed to improve the system ductility.

핵심용어 : 비탄성 해석, 소성힌지, 초고층 건물, 잔여용력계수

KEYWORDS : Inelastic Analysis, Plastic Hinge, Tall Building, Residual Strength Ratio

-
- 1) 정회원, 대우건설기술연구소, 주임연구원
고려대학교 건축공학과, 박사과정
 - 2) 정회원, (주) 삼성중공업건설, 부장, 공학박사
 - 3) 정회원, 고려대학교 건축공학과, 부교수, 공학박사
 - 4) 정회원, 대우건설기술연구소, 소장, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 1998년 9월 30일까지 학회로 보내
주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

건축물의 구조설계에 있어서 구조설계 실무자들은 대부분 부재의 탄성거동에 근거하여 수행하고 있다. 그러나 초고층 건물의 구조설계에 있어서는 건물의 최종 비탄성 내력도 점검하여야 한다. 즉 건물이 내구년한 동안 받을 것으로 예상되는 최대하중에 대한 건물의 지지능력을 점검하여야 한다.

이러한 비탄성 해석은 국내외에서 여러 연구가 활발히 진행되고 있다. 해석방법도 정적해석(Pushover analysis, Reinhorn, 1996)과 동적해석인 단계적 직접적분법에 의한 시간이력해석(Powell et al., 1988)과 반응스펙트럼을 이용하는 방법(Meyer, 1991)들이 연구되고 있다.

그러나 이러한 방법들은 실무자들이 익숙한 구조해석 프로그램들과 입력 및 출력에 있어서 상이하여 쉽게 사용하기 어려우며 그 결과값도 그 양이 방대하여 학술적으로만 사용되고 있다. 또한 초고층 건물과 같이 많은 부재들로 이루어진 구조물에서는 해석에 소요되는 시간이 길어서 상당히 비효율적이며 많은 기억용량 및 고성능의 중앙처리장치가 요구되어 개인용 컴퓨터로 작업하기가 쉽지 않다. 이러한 이유로 탄성해석에 대한 비탄성 해석의 효율성이 쉽게 이해되지 않고 있어 실용적으로 사용되지 못하고 있다.

이러한 문제점들을 해결하기 위하여 본 논문에서는 실무자들이 쉽게 사용할 수 있는 PC용 비탄성 해석프로그램을 사용하여 탄성해석에 대한 비탄성 해석의 효율성을 분석하고 구조시스템의 변형으로 시스템 연성(System ductility)을 향상시키는 기법을 제안하고자 한다.

2. 하중중분해석에 의한 비탄성 해석

탄성한계 내에서의 해석으로는 구조물의 응력 상태 및 힘의 흐름을 파악하는데 한계가 있으며 소성힌지, 비탄성 에너지로서의 전환과 점진적인

에너지로서의 소멸 등 구조물의 탄소성 메카니즘을 적절하게 설명할 수 없게 된다. 따라서 이를 극복하기 위해 붕괴모드 형성시까지 고층구조물의 탄소성 거동을 살펴보기 위해 다음과 같은 알고리즘을 사용하였다. 소성힌지가 발생하는 순간의 잔여항복내력을 계산, 모델내에 고려하여 초기하중을 증가시키지 않아도 하중중분의 효과를 얻을 수 있도록 하여 탄성해석 프로그램(SUPER-ETABS)에 연결시킨 후 계산을 수행토록 하였다. 이를 통해 각 하중상태시마다 잔여 부재응력을 산정토록 하였으며 그 순간의 층소성율, 최대층간변형각, 밀면전단력, 전도모멘트, 수평보유내력 등을 계산할 수 있도록 하였다.

2.1 잔여응력계수⁴⁾

고층 철골구조물에 초기횡하중 작용시 각 부재가 보유하고 있는 잔여응력에 대한 항복응력의 비를 잔여응력계수라고 정의하며 다음과 같이 구한다.

$$\lambda_{1,i} = \frac{\pm\{F_w\}_i}{\{F_o\}_{1,i}} \quad (i = \text{부재의 수}) \quad (1)$$

여기서, $\{F_w\}_i$: 부재의 항복응력

$\{F_o\}_{1,i}$: 부재의 응력

이 때 최초의 힌지가 형성되기 위해 필요한 추가횡하중의 외력과 위치는 잔여응력계수 중 최소가 되는 $\lambda_{min,1}$ 이 되며 이 순간의 각 응력상태는 다음과 같이 된다.

$$\text{절점외력} \quad \{P_p\}_1 = \lambda_{min,1}\{P\}_1 \quad (2)$$

$$\text{부재응력} \quad \{F_m\}_1 = \lambda_{min,1}\{F_o\}_{1,i} \quad (3)$$

$$\text{절점변위} \quad \{d_p\}_1 = \lambda_{min,1}\{d\}_1 \quad (4)$$

여기서 아래첨자 p, m은 각각 절점 및 부재를 나타낸다. 이 후 각하중중분 단계에서의 응력상태를 동일한 방법으로 구하게 된다.

2.2 부재의 항복곡선⁴⁾

첫 힌지를 형성시키기 위하여 필요한 외력은 잔여용력계수 λ 로부터 계산된다. 잔여용력계수는 식 (1)에 의해 구해지는데 그림 1의 경우 초기하중에 의한 부재의 용력상태를 A_1 로 나타낸다. 이 때 잔여용력계수 λ_1 은 $(OG)/(OA_1)$ 으로 계산되며 각 부재에서 계산된 잔여용력계수들과 비교되어 첫 힌지형성 위치를 예측한다. 다른 부재에서 계산된 잔여용력계수에 의해 항복부재가 결정되면 첫 하중증분단계 완료후 기둥부재는 A_1' 에 위치하게 되고 다음 식이 성립하게 된다.

$$OA_1' = \min \lambda_1 OA_1 \quad (5)$$

첫 힌지 발생이후 두 번째부터 힌지형성을 위한 용력경로는 바뀌게 된다. 이 경우에 부재에 작용하는 모멘트(M)와 축력(N)의 크기에 따라 부재의 용력경로는 축력의 영향이 존재하는 부분(Line d)과 축력의 영향이 미치지 않는 경우(Line c)의 두 경로로 나누어 고려해야 한다. 용력경로가 Line (a) (즉 A_2') 및 Line (b) (즉 B_2')로 향하는 경우 다음과 같이 잔여용력계수를 구할 수 있다.

$$\lambda_2 = \frac{CX_1}{CE} = \frac{OX_1 - OC}{OE - OC} \quad (6)$$

$$\lambda_2' = \frac{CX_2}{CE'} = \frac{OX_2 - OC}{OE' - OC} \quad (7)$$

보 및 가새 부재에 대해서도 잔여용력계수를 계산하여 현하중 상태하의 힌지 위치를 결정하게 된다. 붕괴모드 형성시까지 이와 같은 계산을 반복하여 구조물의 탄소성 거동을 구할 수 있다.⁴⁾

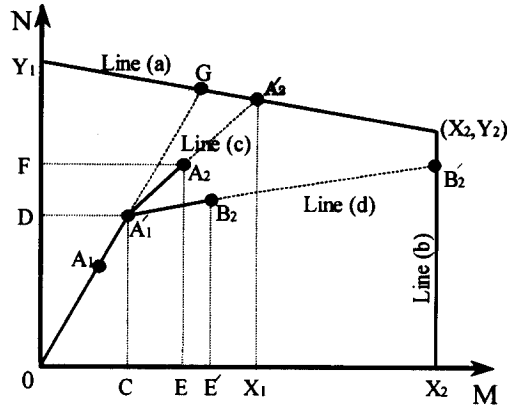


그림 1. 기둥 부재의 잔여용력계수

<참고> Line(a) : 축력의 영향이 존재하는 부분

Line(b) : 축력의 영향이 존재하지 않는 부분

길이 = 0, 조밀단면

3. 초고층 건물 해석

3.1 탄성해석

전술한 비탄성 해석법의 탄성해석에 대한 효율성을 검토하기 위하여 서울에서 건설되고 있는 36층 S 초고층 건물을 모델로 하였으며 이 건물은 한국기준에 의해 설계되었다. 이 모델은 그림 2, 그림 3과 같으며 이 때의 부재특성은 표 1과 같다. $P_{y,max}$ ($=A_g F_y$, A_g : 단면적, F_y : 항복용력), $P_{y,min}$ ($=A_w F_y / 2$, A_w : 웨브의 단면적)은 각각 그림 1의 Y_1 , Y_2 를 의미하며 일본 강구조소성설계지침의 값을 사용한다.⁷⁾

이 건물의 수평구조시스템은 풍하중 및 지진하중에 대하여 지지하도록 하였으며 횡강성을 확보하기 위하여 단변방향으로 중앙부에 x형 가새를 설치하였다. 이 건물은 바람에 의하여 수평구조시스템이 결정되었으며 이 때 건물의 높이에 따른 층전단력의 분포는 그림 4와 같다.

특이한 것은 2개층마다 층전단력이 급격히 변하고 있다. 이것은 집중가새가 2개층에 걸쳐 설치되어 있으므로 집중가새의 하단부와 만나는 보-기둥 접합부에서 가새를 타고 전달된 힘이 집중되어

전단력이 증폭되었기 때문이다.

표 1. 부재특성

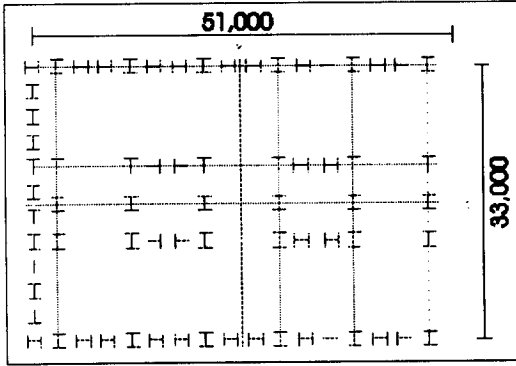


그림 2. 건물모델의 평면

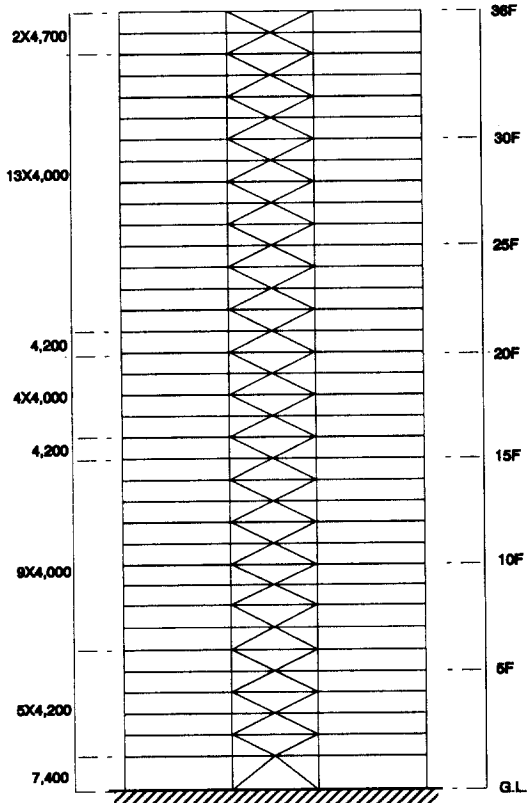


그림 3. 건물모델의 입면

부재	H (cm)	D (cm)	t_r (cm)	t_w (cm)	M_p (ton-cm)	$P_{y,max}$ (ton)	$P_{y,min}$ (ton)
기둥	60	60	7.5	6.1	5342.6	2818.8	329.4
	60	60	6.3	4.5	4565.2	2326.3	256.0
	60	60	5.5	4.2	4101.2	2077.9	247.0
	50	50	5.8	4.66	2907.2	1821.5	214.7
	50	50	4.9	4.05	2537.2	1566.7	195.4
	50	50	4.6	3.7	2396.4	1466.3	181.2
	45	45	3.5	3.0	1523.9	1029.6	136.8
	45	45	4.5	3.6	1873.5	1283.0	155.5
	45	45	3.0	3.0	1362.2	928.8	140.4
	45	45	4.0	3.8	1736.1	1201.4	168.7
	45	45	2.5	1.7	1092.3	703.2	81.6
	45	45	2.0	1.3	883.3	559.9	64.0
	60	60	10.0	9.0	6720.0	3744.0	432.0
	60	60	9.0	8.0	6213.6	3398.4	403.2
	60	60	8.5	7.0	5900.2	3170.4	361.2
	60	60	8.0	6.0	5572.8	2937.6	316.8
	60	60	7.0	5.0	4981.0	2568.0	276.0
	60	60	6.0	4.0	4348.8	2188.8	230.4
60	60	5.0	4.0	3800.0	1920.0	240.0	
60	60	4.5	3.5	3452.2	1724.4	214.2	
60	60	4.0	3.0	3093.6	1526.4	187.2	
60	60	3.5	2.5	2724.1	1326.0	159.0	
60	60	3.0	2.0	2343.6	1123.2	129.6	
60	60	10.0	10.0	6800.0	3840.0	480.0	
보	75	25	1.9	1.2	998.6	433.1	
	49.6	19.9	1.4	0.9	367.2	234.8	
	65	20	1.5	1.0	573.2	292.8	
	75	25	2.8	1.5	1372.0	585.8	
	100	30	3.5	1.9	2848.2	928.1	
	100	30	1.5	1.0	1357.0	448.8	
	90	25	2.8	1.5	1755.1	639.8	
	75	20	2.8	1.1	1073.5	452.0	
	75	20	1.9	1.1	834.4	370.4	
	65	20	2.8	1.5	961.3	482.6	
가새	30	25	3.5	3.5	556.3	806.4	
	30	25	3.0	3.0	491.4	705.6	
	30	25	3.0	3.0	491.4	532.8	
	30	25	2.5	2.5	421.9	450.0	
	30	20	2.0	2.0	291.6	316.8	

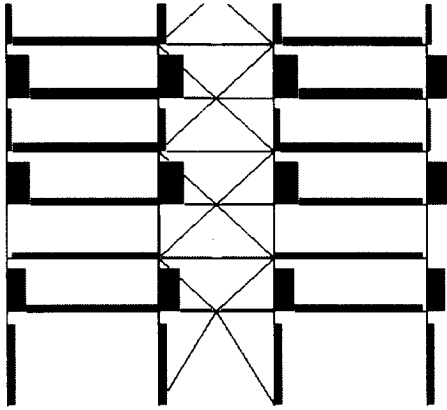


그림 4. S초고층 건물의 탄성해석결과 (층전단력 분포)

3.2 초고층 건물의 비탄성 해석

S초고층 건물은 단변 및 장변에 대해서 평면이 대칭이다. 그래서 단변방향의 해석으로 구조물의 비탄성 거동을 논할 수가 있다. 비탄성 해석은 일반적으로 풍하중보다는 지진하중에 대하여 고려되고 있다. 즉 건물의 내구연한 동안에 발생될 수 있는 최대지진하중에 대하여 건물이 어느 정도까지 견딜 수 있는가를 확인한다.

그래서 이 건물은 풍하중에 대하여 탄성설계가 되었지만 비탄성 해석에서 작용하는 횡하중의 분포는 반응스펙트럼 해석에 의한 하중분포를 적용하였다.

구조 부재에 소성힌지가 형성되어 가는 과정은 그림 5와 같이 나타낼 수 있으며 그림에서 번호는 소성힌지의 형성순서를 나타낸다. 소성힌지는 18층의 보에서 발생되기 시작하여 상하로 퍼져나가고 있다. 이것은 모멘트가 재분배되어 가고 있는 과정을 나타낸다고 볼 수 있다.

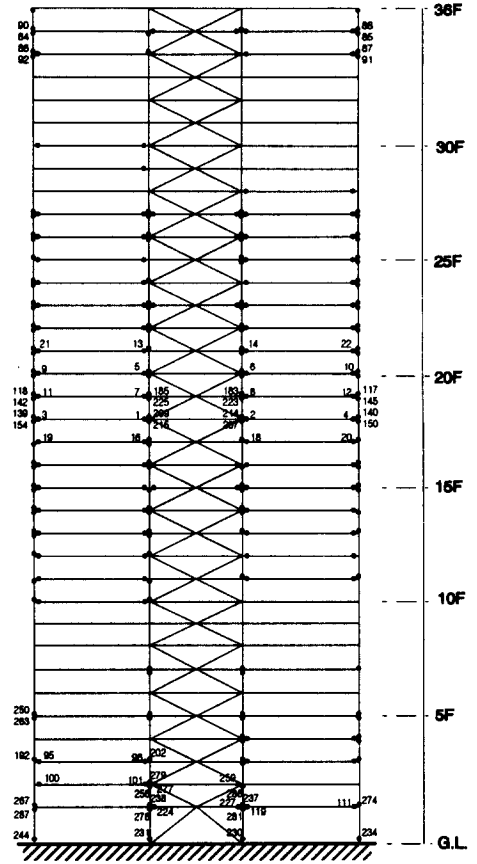


그림 5. S초고층 건물의 소성힌지 발생과정

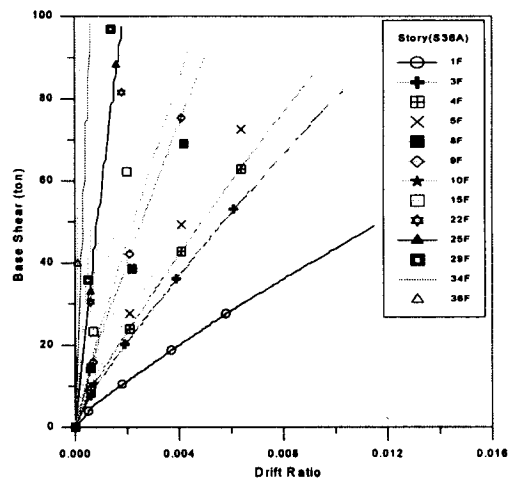


그림 6. S초고층 건물의 비탄성해석(감성변화)

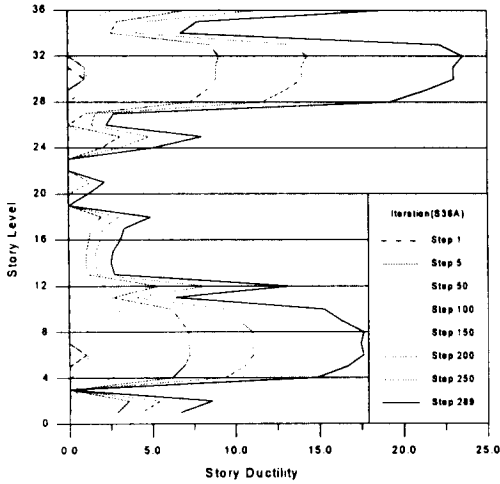


그림 7. S초고층 건물의 비탄성 해석 (연성율)

이 때 비탄성 해석결과 구한 횡변위와 층전단력의 관계(즉 강성변화)는 그림 6과 같으며 횡변위, 층간변형률, 층전단력, 전도모멘트 분포도 구해진다. 여기서 구조물의 연성율은 구조물의 임의의 i 층에 최초의 소성힌지가 형성된 때의 횡변위를 탄성한계로 하고 이에 대한 이후의 구조물의 횡변위 비로 정의하며 식 (8)과 같고 연성율 변화는 그림 7과 같다.

$$\mu = \frac{d_{\max,i}}{d_{y,i}} \quad (8)$$

여기서 $d_{\max,i}$: i 층에서 최대변위

$d_{y,i}$: i 층에서 항복변위

3.3 비탄성 해석의 효율성 분석

탄성해석의 경우 바람하중에 대해 설계되어 있으며 비탄성해석은 지진하중의 분포를 따르고 있다. 이 때 최대 횡변위는 그림 8과 같이 비교할 수 있다. 횡변위 분포변화는 상층부로 갈수록 급격히 증가하고 있다. 탄성해석결과 12.8cm이었던 것이 극한상태에서는 약 10배 정도 증가되고

있다. 이것은 구조물의 강성이 지나치게 커서 비탄성 해석으로 횡변위가 급격히 증가할 수 있음을 나타내고 있다.

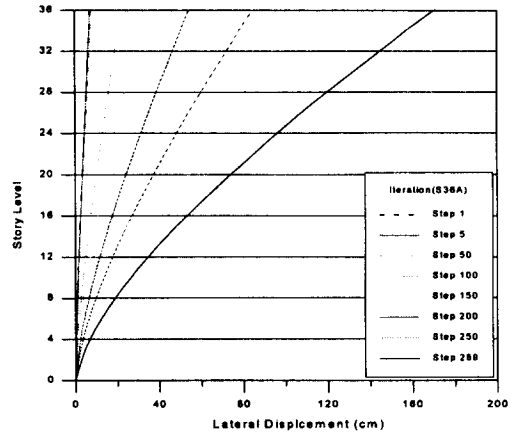


그림 8. 횡변위 비교

그림 9에서와 같이 S건물의 탄성해석에 의한 최대층전단력은 68.6 ton이었다. 그러나 비탄성 해석결과 소성힌지가 90개 정도 발생하였을 경우 최대 층전단력이 66.3 ton으로 탄성해석과 비슷한 결과를 나타내고 있으며 최대층간변형률이 1/80인 경우 즉 구조물의 최대내력시 최대 층전단력은 494.1 ton이었다. 이것은 구조물이 탄성해석에 비해서 7.2배(494.1/68.6) 정도의 층전단력을 더 받을 수 있음을 의미한다.

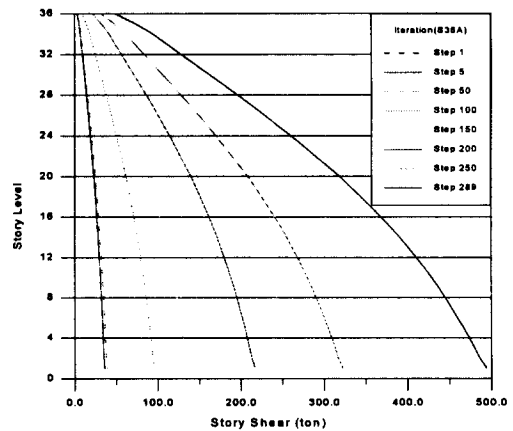


그림 9. 층전단력 비교

비탄성 해석을 통하여 탄성해석에서는 파악할 수 없는 구조물의 소성힌지 형성과정 그리고 취약한 부재들을 명확하게 파악할 수 있었다. 또한 탄성설계에서는 안전한 구조물이 어느 정도의 안전율을 가지고 있는가를 확인할 수 있었다. 그러므로 비탄성 해석에서 구한 취약한 부재를 일부 보강함으로써 전체 구조물의 성능을 쉽게 향상시킬 수 있으며 반대로 과도하게 설계된 부재들의 단면을 변경함으로써 전체구조물의 물량을 줄일 수 있다. 이러한 모든 과정은 비탄성해석에 의한 값으로만 결정되지 않고 재설계시 각 부재의 설계조건을 재검토하여야 한다.

4. 재설계된 S초고층 건물의 비탄성 해석

전체적으로 이 건물은 비교적 좋은 탄성 성능을 나타내고 있으나 전체 구조물의 강성이 과도하게 설계되어 있다. 그래서 비탄성 성능은 잘 나타나고 있지 못하다.

이 구조물 전체를 재설계하지는 않고 횡하중저항 시스템에 대한 수정으로 이 구조물의 비탄성 성능을 개선하려고 한다. 이 구조물은 횡하중 저항시스템으로 채택되어 있는 중앙스팬의 2개층에 걸쳐 설치되어 있는 X가새를 비탄성 성능이 우수한 각층 K편심가새⁶⁾로 대체하여 전체 구조물의 비탄성 해석을 수행하여 초기상태와 비교하고자 한다.

가새형태를 제외한 전체건물의 형상 및 제원은 동일하며 비교의 편의를 위해 편심가새를 기준에 따라 재설계하지 않고 집중가새의 경우와 동일한 단면특성을 가지는 것으로 가정한다. 그러므로 편심에 따른 양만큼 철골물량이 줄어들게 된다.

재설계된 S초고층 건물의 비탄성 해석결과 소성힌지의 발생위치는 그림 10과 같다. 초기 소성힌지 발생위치가 하부로 내려갔으며 이에 따라 초기설계시에는 건물의 중간층에 집중되었던 소성힌지 위치가 중하층부로 내려가고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 11에서와 같이 층간변위-층전단력 관계에서 일부층에서 비탄성 상태가 되고 있음을 알 수 있다.

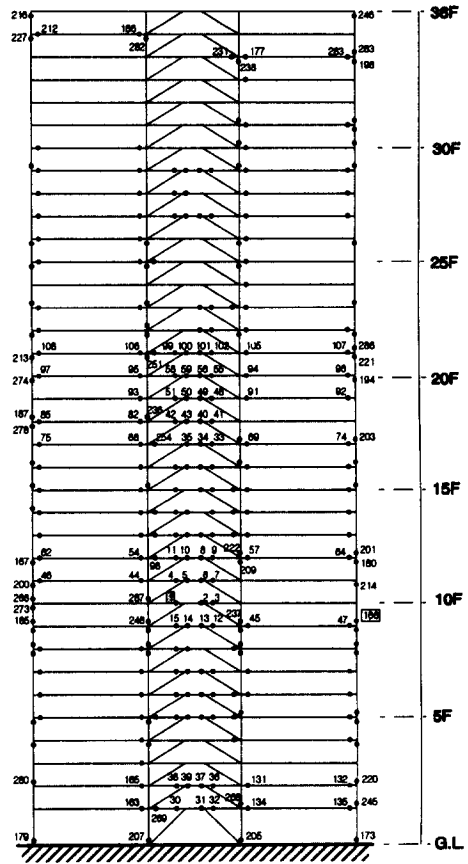


그림 10. 재설계된 S초고층 건물의 소성힌지 발생과정

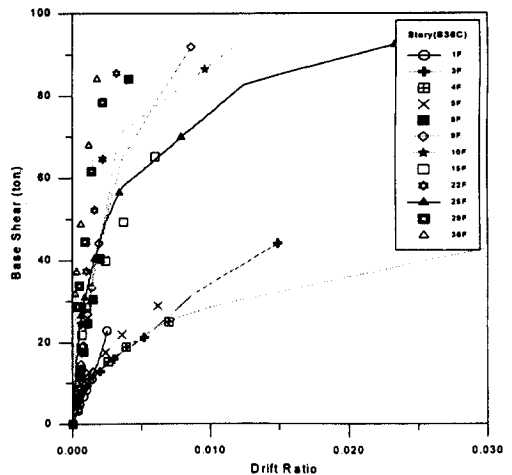


그림 11. 재설계된 S건물의 비탄성 해석 (강성변화)

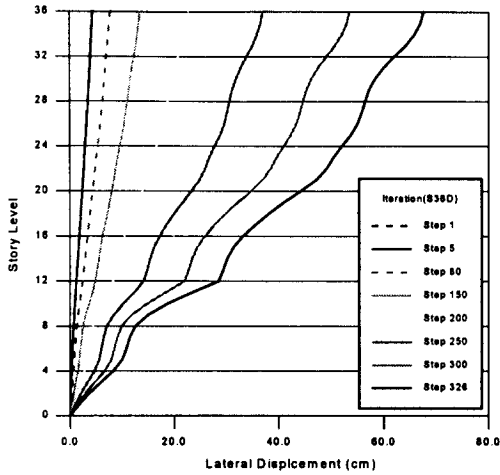


그림 12. 재설계된 S건물의 비탄성 해석(횡변위)

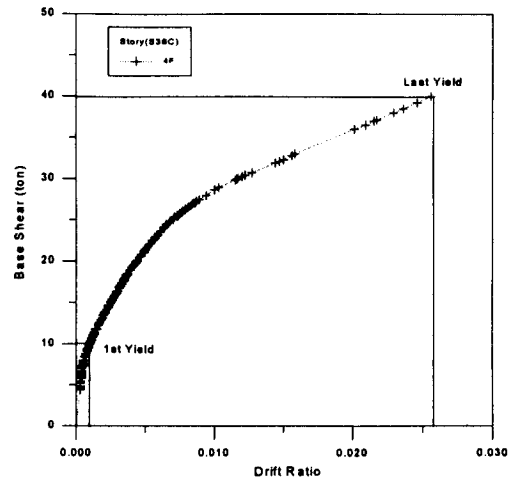


그림 14. 재설계된 S건물 비탄성 거동(4층)

이러한 관계는 그림 12의 횡변위 변화와, 층간 변형률, 층전단력, 전도모멘트의 변화에서도 살펴 볼 수 있다.

해당층의 초기항복변위에 대한 비탄성변위에 대한 비로 정의한 시스템 연성율은 그림 13과 같다. 초기 구조물에 비해서 중앙스팬의 횡하중 저항시스템의 변경만으로 구조물의 연성이 증가되고 있으며 소성힌지의 위치가 낮아지고 보 및 링크보에서 주로 형성되고 있고 기둥에서의 형성은 줄어들고 있음을 알 수 있다.

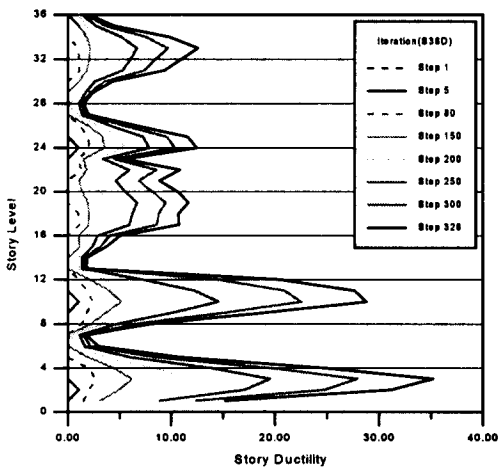


그림 13. 재설계된 S건물의 비탄성 해석(연성율)

되고 있음을 알 수 있다.

그림 14는 4층에서의 하중-변형관계를 나타내고 있으며 4층의 부재 중 최초의 소성힌지가 발생할 때와 전체구조물의 붕괴시까지의 과정을 나타내고 있다. 층소성율이 25를 나타내고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 잔여용력계수를 이용한 비탄성 해석법을 사용하여 실제 초고층 건물을 대상으로 탄성해석에 대한 비탄성 해석의 효율성을 검토하고 비탄성 성능을 향상시키는 방법을 제안하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 비탄성 해석으로 구조물의 취약부재 및 과도한 강성분포를 확인할 수 있으며 구조물 재설계에 유의한 정보를 제공한다.

2) 비탄성 해석으로 구조물이 탄성해석에 비해서 층전단력을 7.2배 정도 더 받을 수 있는 것을 확인하였으며 소성힌지의 발생순서 및 위치를 알 수 있어서 구조물의 취약부분을 파악할 수 있었다.

3) 강성을 저하시키고 연성을 증가시키기 위해

X형집중가새를 K형편심가새로 교체하여 재설계한 구조물을 비탄성 해석한 결과 각 층의 강성-변형관계가 탄소성 특성을 잘 나타내고 있으며 소성힌지가 보에서 우선 발생되고 있다. 또한 거의 전층에 걸쳐 소성힌지가 발생되고 있으며 층간변형각은 12층에서 최대가 되고 연성도는 3층에서 최대값을 나타내고 있다.

4) X형 집중가새 구조물은 강성이 과대하게 설계되어 있으며 소성힌지의 분포도 30층과 8층 주변에서는 발생되지 않고 있다. 이에 비해서 편심가새를 이용하여 재설계된 구조물에서는 소성힌지가 전층에 걸쳐 고르게 발생되고 있으며 연성도가 초기구조물보다 1.5배 증가되고 있다. 따라서 가새시스템의 변경에 의한 비탄성 거동의 향상을 확인할 수 있다.

5) 비탄성 해석에 근거하여 초기에 소성힌지가 발생되는 몇몇 부재의 재설계만으로 전체 구조물의 극한내력을 증진시킬 수 있다. 그러나 이러한 경우에도 각 부재에 대한 설계규준을 검토하여야 하며 비탄성 해석만을 고려한 재설계로는 위험한 구조물이 설계될 위험성이 있다.

감사의 말

이 과제는 한국과학재단 및 한양대 초대형 구조 연구센터(과제번호 94K3-1402-06-03-3)의 지원금으로 수행한 내용입니다. 관계자 여러분들에게 감사의 말씀을 전합니다.

참 고 문 헌

- (1) A.M.Reinhorn, 1996, Introduction to Dynamic and Static Inelastic Analysis Techniques, Los Angeles Tall Buildings Structural Design Council.
- (2) G.H.Powell, R.Allahabadi, 1988, DRAIN-2DX : User Guide, UCB/EERC-88/06, University of California of Berkeley.
- (3) C.Meyer, 1991, Computation of Inelastic Response, SP-127, ACI, pp.199-238.
- (4) 홍원기, 1993, 비탄성 모멘트 재분배를 이용한 고층건물의 탄소성 해석과 최적설계, 한국강구조학회지, 제5권 1호, pp.32-39.
- (5) J.C.Jeing, 1991, Three-Dimensional Inelastic Analysis of High Rise Buildings, Proceedings of 2nd Conf. on Tall Buildings in Seismic Region.
- (6) 주영규, 홍원기, 김상대, 1995, 초고층건물의 비탄성해석에 관한 연구, STRESS 보고서.
- (7) 日本建築學會, 1985, 鋼構造塑性設計指針.

(접수일자 : 1997. 11. 27)