

## 초고층 구조물의 기동 축소량 예측에 관하여



김성수 소장  
(주)성진구조 안전기술단

### 개요

인간도 나이가 들면 키가 줄어들 듯이 모든 구조물도 세월이 가면 키가 점점 줄어 든다. 저층 구조물은 축소량이 적어서 별문제가 되지 않으나 초고층구조물은 축소량이 제법 커서 58층규모 구조물의 30년 축소량이 10cm를 초과하는 것으로 나타나 각종 부작용을 경험하게 된다.

근간에 들어서 철근콘크리트를 주 재료로 한 50층 이상의 초고층 구조물이 국내에서 활발히 시공되고 있다. 그동안 초고층 구조물은 대부분 철골이 주재료였으나, 고강도 콘크리트가 일반화 되면서 주거용 건축물을 중심으로 고강도 콘크리트를 이용하기 시작하였다. 특히 Flat Plate 구조를 적용하면 층고를 최소화 하면서 1층당 공기를 4일 내지 5일 정도로 시공할 수 있으므로 경제성이나 공사기간, 주거성 등의 측면에서 유리한 장점을 갖고 있다. 그런데 콘크리트는 물성 자체가 다공질 재료로서 하중이 작용하면 탄성적 축소와 동시에 비탄성적으로 축소변형을 하는 성질을 갖고 있다. 이것을 Creep에 의한 변형이라고 일컫는다. 또한 콘크리트는 내부의 수분이 증발하면서 수축하는 이른바 건조수축(Drying Shrinkage) 현상이 발생된다. 이들 2가지 축소현상은 초고층구조물의 기동에도 어김없이 발생되며 구조물에 여러가지 부작용을 남긴다.

### 1. 탄성적 축소

콘크리트는 탄성 범위 내에서 하중을 받는 만큼 수축하고 하중을 제거하면 변형도 사라지는 것이 물리법칙이므로 기동도 수직하중 크기에 비례하고 탄성계수와 단면적에 반비례하여 수축량을 발생시킨다.

탄성적 축소량은 하중을 제거하면 즉시 복구되는 탄성적 성질을 가지고 있으므로 정확한 하중을 헤아리면 그에 맞는 축소량을 상당히 정확히 계산할 수 있다.

### 2. CREEP에 의한 비탄성적 축소

일반적으로 Creep는 지속적인 Stress에 노출되어 길이가 수축하는 것으로 정의된다.

Creep는 Drying Creep 과 Basic Creep 로 구분된다. Drying Creep는 단면내의 수분이 주변 환경으로 계속 배출되는 상황에서 발생하는 Creep이다. 이러한 조건은 하중재하의 초기단계에서 발생된다. Basic Creep는 콘크리트가 수분의 평형에 도달된 시점 이후에 발생된다. Creep로 인한 움직임은 최초의 하중재하 시점과 이어지는 하중재하 증가속도에 깊이 의존한다. 타설 후 불과 며칠 만에 재하하는 것은 한 달 후 재하하는 것보다 매우 큰 폭의 Creep 량을 발생시킨다. 하중이 장기간 지속되면 해당하중을 제거하더라도 일정부분의 변형이 잔존하는 현상을 Creep로 정의한다. Concrete 라는 재료는 골재와 골재가 Cement로 연결되어진 다공질 재료이므로 Creep 현상은 금속에서보다 훨씬 큰 비중을 차지한다.

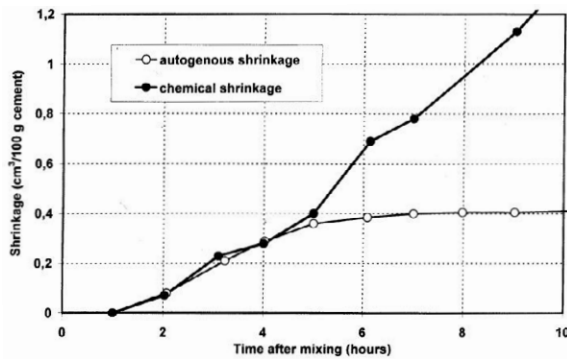
### 3. SHRINKAGE에 의한 비탄성적 축소

콘크리트는 화학작용을 하면서 수분의 이동없이 발생하는 Chemical Shrinkage와 수분이 증발하면서 수반되는 Drying Shrinkage가 발생된다. 고강도 콘크리트에서는 Chemical Shrinkage의 일부인 Autogeneous Shrinkage가 중요한 부분을 차지한다.

Autogeneous Shrinkage의 영향 인자는 표면적/체적비, 물 시멘트 비, 주변 환경요건 등이다. Autogeneous Shrinkage는 수분의 이동 없이 화학적 반응에 의하여 발생하는 수축이므로 유리병 속에 있는 밀폐된 콘크리트에서도 이런 수축현상이 일어나며 저강도 콘크리트 보다는 고강도 콘크리트에서 오래 지속된다.

Drying Shrinkage는 부재의 표면으로부터 수분의 증발이 원인이 된다. 건조수축 속도는 콘크리트 타설 직후가 가장 빠르고 시간이 경과할수록 느리게 진행된다. 고강도 콘크리트일수록 단면의 중심까지 건조가 서서히 진행된다. 콘크리트 강도를 포함하여 강성, 표면적/체적 상대습도, 수분함량 등이 건조 속도에 영향을 미친다. (Fintel And Iyengar 1987)

또한 초고층에서 사용하는 고강도 콘크리트는 조적이 치밀하여 내부의 수분이 외부로 배출되는 증발 속도가 상당히 더디므로 Drying Shrinkage도 천천히 진행되며 Drying Shrinkage가 완성되는데 수십 년이 걸리는 것으로 알려져 있다. 건조수축은 주변 습도와 밀접한 관계가 있으므로 습도가 높은 인천이나 부산지역은 Drying Shrinkage의 속도를 더디게 한다.



〈그림1〉 Chemical shrinkage by bottle test and volumetric autogenous shrinkage by thin rubber membrane test. Cement paste with water-to-binder ratio of 0.40 and 5% silica fume. [Hammer 1999]

#### 4. 기동 축소가 구조물에 미치는 영향

초고층구조물의 기동은 축소한다. 그런데 기동은 압축 응력비에 따라 각각 다른 크기로 축소한다. 특히 압축응력비가 작은 코아월에 비하여 압축응력비가 큰 주변 기동은 아주 크게 축소한다. 기동 축소 현상은 다음과 같은 부작용을 낳는다.

1. 준공 후 수년이 경과하면 바닥이 경사지는 현상이 발생된다.
2. 내부 칸막이가 비틀어진다.
3. 외부 커튼월의 창틀에 부가 응력이 발생되거나 고정 화스나가 탈락한다.

4. 수직배관이 위로 솟는다.
5. 엘리베이터의 가이드 레일의 브라켓이 탈락하여 고속엘리베이터 주행중 사고의 우려가 있다.
6. Outtrigger에 부가응력을 발생시킨다.
7. 수평부재에 부가응력을 발생시킨다.

#### 5. 기동 축소현상에 의한 하자 사례

최근에 시카고에 45층, 준공 12년 된 콘크리트 구조물(높이 165m)의 최상층에서 수직 급수배관이 슬래브에서 8.9 cm 이탈되



〈그림2〉 수직 배관이 슬래브 위로 솟아 오른 모습



〈그림3〉 최상층 기계실 수평배관과 브라켓이 탈락한 모습



〈그림4〉 수직 RAIL과 브라켓의 탈락 1



〈그림5〉 수직 RAIL과 브라켓의 탈락 2

고 기계실의 배관 지지대가 탈락하고 엘리베이터의 Guide Rail이 탈락하는 등의 하자가 발생되어서 이에 대한 조사가 수행되었다. 기둥의 강도는 980 kg/cm<sup>2</sup> 철근비는 0.5% 내지 2%이며, 고강도 콘크리트를 사용하였다.

사고 원인은 바로 기둥 축소현상 즉 구조물의 키가 12년 동안 9cm 정도 줄어든 것이 주요 원인인 것으로 나타났다.

### 6. 기둥 축소현상의 구조적 해결

1. 인접기둥의 수축량을 상호 비슷하게 유지한다.
2. 코아일 주변의 기둥은 코아에서 멀리 배치하거나 Stress를 낮게 유지한다.
3. 철근비를 높게 하여 비탄성 축소변형에 대한 저항성을 향상한다.
4. 배합 설계시 물의 양을 적게 한다.
5. 코아에 인접한 기둥단면은 축소량을 감안한 여유 있는 단면으로 설계한다.

### 7. 축소 예측 모델의 선택

기둥 축소현상은 여러가지 변수가 많이 작용하여서 이를 간단히 구명하는 것은 거의 불가능하다고 할 수 있다. 일반적으로 Creep Strain의 예측정확도는 그다지 높지 않아서 오차가 0 %로 받아들여지고 있다.(Bryan Stafford Smith et al.)

많은 논문들이 정확도를 향상시키기 위하여 예측모델들을 보완 발표하고 있다. 발표된 논문들은 Model 마다 서로 다른 결과치를 생산하므로 어느 Model이 적절한가는 학자들이나 구조기술자들에게 주요 관심사일 것이다.

인터넷 검색사이트에는 이에 대한 비교논문들이 많이 있는데 이를 분석하면 각 Model 마다 예측 특성이 있어서 어떤 Model은 Creep 예측성이 우수하고 또 어떤 모델은 Shrinkage 예측이 우수하고 또 어

떤 모델은 장기간에 걸친 예측이 우수한 것으로 나타나고 있다.

따라서 어떠한 Model을 사용하느냐에 따라서 결과치에 막대한 영향을 미치고 Outtrigger 체결시점이나 Floor Cambering 등을 결정하는 데 중요한 단서가 되므로 Model 선택은 축소량 예측의 성패를 좌우한다고 할 수 있다.

Z. P. Bazant 교수의 논문(2)에는 각 모델별 회귀 분석한 자료를 보여주고 있다. 여기서 그는 여러 평가 기준에서 [B3 Model]이 예측 정밀도(Best Predictor)가 높은 것으로 평가하고 있다.

### 8. B3 MODEL의 소개

이 모델은 미국의 Z. P. Bazant 교수가 B2 Model에 이어 1995년에 발표한 예측 모델이다. 국내에서는 비교적 생소하지만 미국에서는 잘 인정되어진 model 이라 할수있다. 미국의 유력한 구조 설계회사에서는 이를 사용하여 세계각처의 초고층 구조물을 설계하고 있고 시카고에서는 구조물 안전진단에서도 이를 사용하여 수축량을 해석하였다. 초고층의 고강도 High Performance Concrete의 비탄성 수축 예측을 잘 반영하는 것으로 평가되고 있으며, 이미 전 세계적으로 많은 사용실적이 있다. 국내에서도 건대 Starcity(포스코 시공분/ 58층 규모) 및 Starcity(금호 건설 시공분/ 50층 규모)에 이를 적용한 사례가 있다.

〈표1〉 Coefficients of variation of errors (expressed as percentage) of basic creep predictions for various models.

Model	B3	ACI	CEB
Test data	$\bar{w}$	$\bar{w}$	$\bar{w}$
1. Keeton	19.0	37.5	42.8
2. Kommendant et al	15.3	31.8	8.1
3. L' ermite et al.	49.4	133.4	66.2
4. Rostasy et al.	15.2	47.6	5.0
5. Troxell et al.	4.6	13.9	6.2
6. York et al.	5.6	37.7	12.8
7. McDonald	6.9	48.4	22.2
8. Maity and Meyers	33.8	30.0	15.7
9. Mossiossian and Gamble	18.6	51.5	47.3
10. Hansen and Harboe et al. (Ross Dam)	14.1	51.2	31.1
11. Browne et al. (Wyllfa vessel)	44.7	47.3	53.3
12. Hansen and Harboe et al.(Shasta Dam)	22.7	107.8	43.1
13. Brooks and Wainwright	12.6	14.9	15.4
14. Pirtz (Dworshak Dam)	12.5	58.2	32.5
15. Hansen and Harboe et al. (Canyon ferry Dam)	33.3	70.2	56.9
16. Russell and Burg (Water Tower Place)	15.7	19.3	31.5
17. Hanson	14.1	63.3	12.1
$\bar{w}$ all	23.6	58.1	35.0

〈표2〉 Coefficients of variation of errors (expressed as percentage) of shrink-age predictions of various models.

Model	B3	ACI	CEB
Test data	$\bar{w}$	$\bar{w}$	$\bar{w}$
1. Hummel et al.	27.0	30.0	58.7
2. Rüschi et al.(1)	31.1	35.2	44.8
3. Wesche et al.	38.4	24.0	36.1
4. Rüschi et al.(2)	34.7	13.7	27.8
5. Wischers and Dahms	20.5	27.3	35.9
6. Hansen and Mattock	16.5	52.9	81.5
7. Keeton	28.9	120.6	48.3
8. Troxell et al.	34.1	36.8	47.4
9. Aschl and Stökl	57.2	61.3	44.2
10. Stökl	33.0	19.5	29.6
11. L'ermite et al.	66.7	123.1	69.4
12. York et al.	30.6	42.8	8.9
13. Hilsdorf*	11.7	24.7	29.6
14. L'ermite and Mamillan	46.1	58.7	45.5
15. Wallo et al.	22.0	33.0	55.6
16. Lambotte and Mommens	39.1	30.7	31.3
17. Weigler and Karl	31.3	29.6	21.3
18. Wittmann et al.	23.7	65.4	40.0
19. Ngab et al.	20.4	45.3	64.6
20. McDonald	5.1	68.8	21.4
21. Russell and Burg (Water Tower Place)	38.5	51.0	58.1
$\bar{w}$ all	34.3	55.3	46.3

\*Hilsdorf H.K., "unveröffentlichte Versuche an der MPA München," private communication (1980).

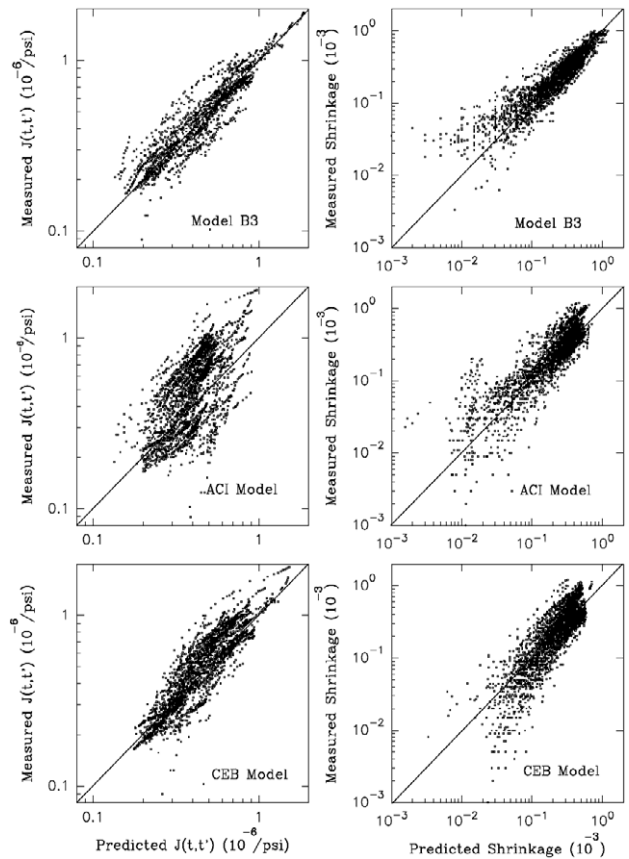
〈표3〉 Coefficients of variation of errors(expressed as percentage) of the predictions of creep at drying for various models.

Model	B3	ACI	CEB
Test data	$\bar{w}$	$\bar{w}$	$\bar{w}$
1. Hansen and Mattock	5.8	32.1	11.9
2. Keeton	31.4	46.3	37.9
3. Troxell et al.	5.9	33.0	7.9
4. L'ermite et al.	14.0	55.8	25.5
5. Rostasy et al.	6.5	20.9	14.8
6. York et al.	5.8	42.1	45.1
7. McDonald	10.9	40.4	38.9
8. Hummel	15.3	46.2	24.6
9. L'ermite and Mamillan	20.6	62.5	15.2
10. Mossiossian and Gamble	11.3	71.7	30.8
11. Maity and Meyers	62.8	45.9	83.7
12. Russell and Burg (Water Tower Place)	10.7	41.2	19.1
13. Weil	23.9	42.1	30.2
14. Hilsdorf et al.*	22.7	40.4	25.4
15. Wischers et	22.3	44.3	17.4
16. Wesche et al.	28.1	38.6	24.0
17. Rüschi et al.	17.6	24.4	15.4
$\bar{w}$ all	23.0	44.5	32.4

\*Data with curing duration less than one day are excluded.

〈표4〉 Statistics of errors of various models for basic creep and creep at drying, calculated separately for different ranges of age at loading and creep duration (in days).

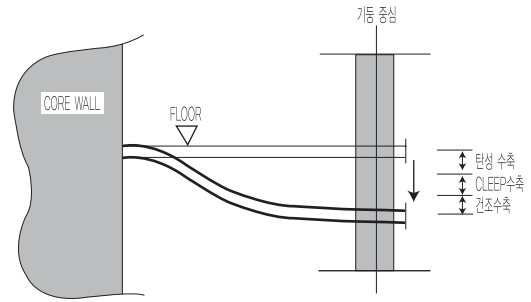
Model B3				
$\bar{w}$	$t-t' \leq 10$	$10 < t-t' \leq 100$	$100 < t-t' \leq 1000$	$t-t' > 1000$
$t-t' \leq 10$	17.8	24.0	19.8	
$10 < t-t' \leq 100$	13.7	23.1	25.3	29.3
$100 < t-t' \leq 1000$	13.9	20.5	22.6	33.6
$t-t' > 1000$	12.7	14.6	17.8	
ACI Model				
$\bar{w}$	$t-t' \leq 10$	$10 < t-t' \leq 100$	$100 < t-t' \leq 1000$	$t-t' > 1000$
$t-t' \leq 10$	60.3	30.7	33.3	
$10 < t-t' \leq 100$	45.7	36.7	49.9	97.1
$100 < t-t' \leq 1000$	34.6	39.9	51.7	93.9
$t-t' > 1000$	36.8	39.9	40.9	
CEB Model				
$\bar{w}$	$t-t' \leq 10$	$10 < t-t' \leq 100$	$100 < t-t' \leq 1000$	$t-t' > 1000$
$t-t' \leq 10$	40.5	23.1	11.2	
$10 < t-t' \leq 100$	25.8	23.5	21.2	40.8
$100 < t-t' \leq 1000$	17.5	22.8	25.0	41.3
$t-t' > 1000$	11.6	20.5	24.7	



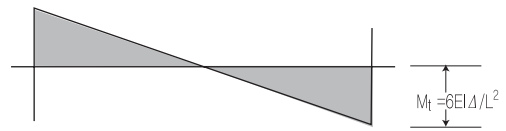
〈그림6〉 Scatter plots on logarithmic scales (showing relative error) of the measured versus predicted values of creep and shrinkage

〈표5〉 Statistics of errors of various models for shrinkage, calculated separately for different ranges of drying duration (in days).

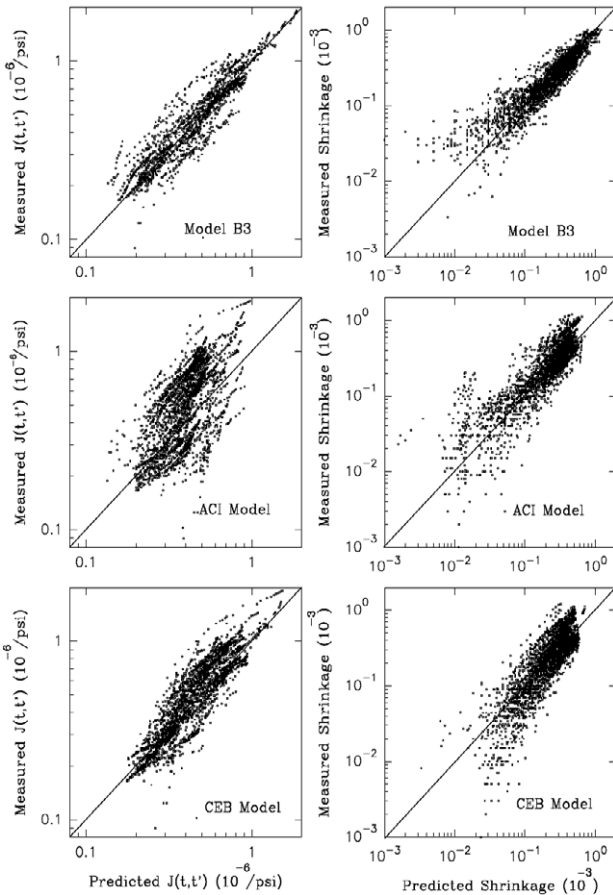
모델	$t-t_0 \leq 10$	$10 < t-t_0 \leq 100$	$100 < t-t_0 \leq 1000$	$t-t_0 > 1000$
B3	38.5	29.3	22.4	19.6
ACI	67.8	50.4	43.3	44.8
CEB	53.5	40.2	44.7	37.4



〈그림8〉 기둥 수축 및 수평재 변형 개념



〈그림9〉 기둥 수축으로 인한 수평재의 추가 Moment



〈그림7〉 Scatter plots of the measured versus predicted values of creep and shrinkage with coordinates multiplied by  $(\bar{f}_c/5000)^{1/2}$  (dashed lines are regression lines).

### 9. ACI MODEL과 B3 MODEL의 비교 분석

많은 학자들은 ACI Model의 예측 정확성에 대하여 부정적인 견해를 갖고 있다. M. Nadim Hassoun And Akthem Al-Manaseer는 다음과 같이 말하고 있다.

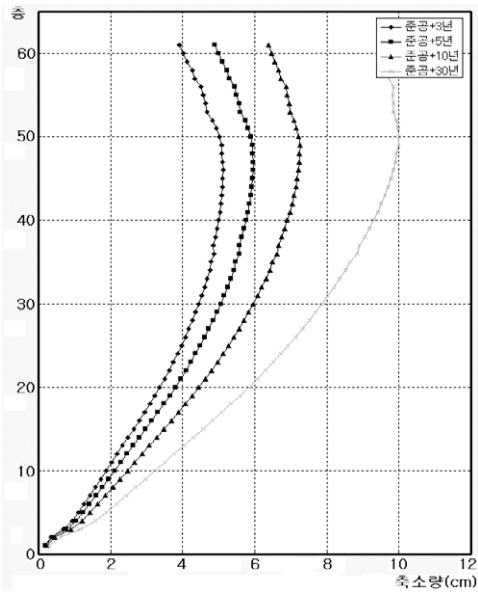
“The Model is simple to use but limited in its accuracy”

현재 진행중인 Project를 선택하여 국내에서 많이 사용중인 ACI209 Model에 의한 결과치와 B3 Model에 의한 결과치를 비교

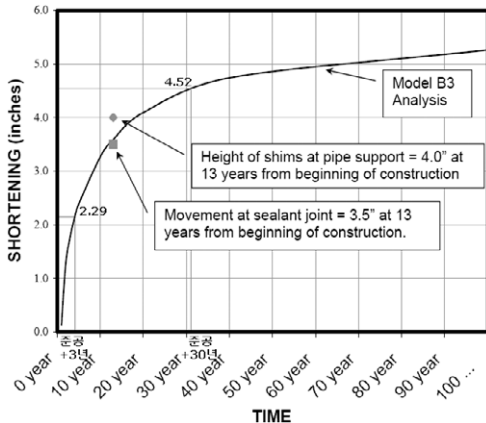
하였다. 대상 구조물은 서울에 위치한 58층 규모의 RC+Flat Plate 구조물로서 고강도 Concrete를 사용하여 이미 완공단계에 있고 근간에 시공중인 여타 구조물을 대표할 만한 규모를 선택하였다. 모든 검토 자료는 시험자료, 배합 설계, 기상청 온습도 자료, 시공사 제공 공정표 등을 기초로 하였다.

ACI209 Model(그림12)은 준공후 3년 만에 95% 정도의 수축량이 발생되고 3년 후부터 30년 까지는 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 이에 비해 B3 Model은 3년 수축량이 전체 수축량의 50% 정도로서 3년경과 후에도 꾸준히 수축이 진행되는 것을 보여주고 있다. ELEVATOR RAIL을 2년 경과시 설치한다면 B3의 경우 잔여 수축량이 90mm 정도이고 ACI209의 경우 잔여 수축량이 20mm 정도로서 많은 차이를 보이고 있다. 어떤 MODEL을 선택하는가에 따라 엉뚱한 예측이 나오는 것이다. 시카고 건물의 사고는 준공 후 12년 경과하여 발생된 것을 미루어 보면 기둥 수축은 3년이 지나서도 꾸준히 진행되다가 12년쯤에야 한계에 이르러서 외부로 불거져 나타난 것으로 짐작된다. 시카고 건물 안전진단시 사용된 B3 Model은 실제 구조물의 수축량과 근사하게 일치하고 있음을 보여주고 있다.(그림 11).

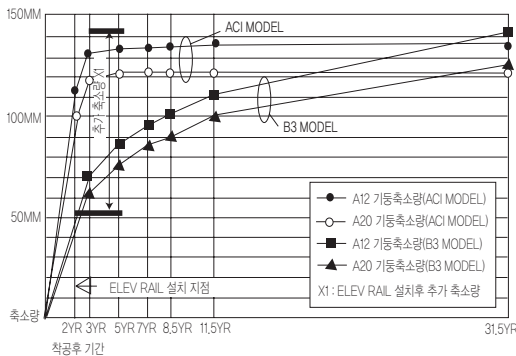
전체 수축량으로 볼수 있는 30년 수축량의 관점에서 보면 ACI보다 B3 MODEL이 4% 내지 5%정도 큰 것으로 나타났다. 결과적으로 보면 수축량 총량은 상호 유사하나 ACI MODEL보다는 B3 MODEL이 고강도 콘크리트의 시간에 따른 수축현상을 적절히 반영하고 있는 것으로 평가된다.



〈그림 10〉 B3에 의한 서울 58층 구조물의 축소량 예측



〈그림 11〉 B3 Model에 의한 시카고 빌딩 기둥 축소량 예측



〈그림 11〉 ACI209 와 B3 Model의 비교(서울 58층구조물)

### 10. 최대 수축 발생층

최대 수축 발생층은 절대적으로는 최상층이 될 것이다. 그러나 시

공과정이 1개층씩 단계별로 구조물을 시공하므로 상부층 시공 시 이미 하부층은 변형이 어느 정도 진행된 상태에서 시공이 된다. 따라서 구조적으로 의미 있는 수축량은 수평재가 타설된 시점 이후에 발생하는 것이다. B3 Model 해석에 의하면 서울 58층 구조물의 최대 수축 발생층은 47층이며 30년 축소량은 9.9 cm 인 것으로 나타났다.

### II. 수평재의 RELAXATION 및 균열 단면 고려

수직부재가 부등 수축하면 당연히 수평부재는 Stress를 받게 된다. 수평부재는 기둥에 비하여 두께가 얇고 표면적이 넓고 기둥에 비하여 저항도이므로 건조 속도가 상당히 빠르게 진행된다. Creep 속도는 시간 의존성이어서 Relaxation도 기둥에 비하여 이른 시기에 지속적으로 이루어진다. 따라서 기둥의 축소가 진행됨과 동시에 수평부재는 더 빠른 속도로 Creep가 진행되며 단면의 일부에 Relaxation이 나타난다. 실험에 의하면 중국 Relaxation은 대체로 50%에 이르는 것으로 보여주고 있다. 수평재는 기둥의 축소과정에서 여전히 부등 축소를 억제하는 구조부재이므로 Relaxation과 Cracked Section을 고려한 하중의 Redistribution 해석이 필요할 것이며 시공 단계별로 이를 반영하면 상당히 실제와 근접한 기둥 Strain을 얻을 수 있을 것이다.

### 12. TARGET DAY 의 설정

기둥 수축량 변화는 시간 의존성이어서 시간경과에 따라 변형이 지속적으로 이루어진다. 따라서 적정한 예측을 위해서는 어느 일정 시점을 기준으로 하여 예측량을 추정하고 이를 시공에 도입하는 과정이 필요하다. 이러한 Target day는 예측 기술자마다 다른 견해를 보일 수 있는 부분이다. Target day를 너무 조기에 설정하면 Floor Cambering과 같은 번거로운 부분을 줄일 수 있으나 Target day 이후에 발생하는 후속 수축량으로 인하여 여러 가지 구조적 하자를 경험하게 될 것이다. 반대로 너무 장기간(30년)으로 설정하면 Floor Cambering량이 많아지고 그 기간에 이르기까지 사용성이 저하하므로 입주자가 불만일 수 있을 것이다.

60층 구조물의 최대 예측변형의 50% 발생 시점은 준공후 5년이 되고 구조물의 잔여 변형 50% 완성되는 데는 25년 이상 소요되는데 이때라면 구조물의 사용성 및 잔존가치를 고려할 때 가장 합리적인 Target Day로 보인다. 단 수직 배관재, Elevator Rail Outrigger의 체결 시점시 응력 산정 등은 30년 수축량을 고려하여 설계한다.(다시 한번 상기하면 시카고 구조물의 하자는 준공 후 12년 만에 발생

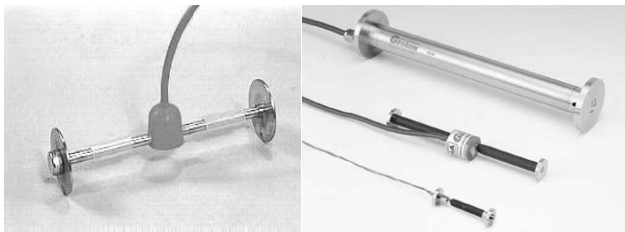
되었음을 강조한다)

### 13. 계측 관리

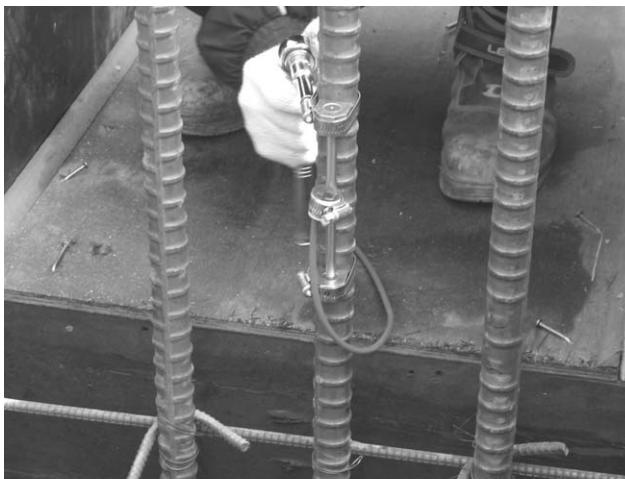
사전 축소해석 시 예상되는 수축량과 실제계측기를 통하여 얻어지는 수축량과는 당연히 차이가 발생된다. 실험실에서 얻은 단기간의 Creep 및 Shrinkage Data를 바탕으로 하여 장기간의 수축예측 Model의 수정을 거치면 예측 정확도를 높일 수 있다. 초기에 계측되는 값들은 예상값과 많은 차이를 보이고 어떤 특정 곡선만을 수렴하는 경우가 없으므로 이로부터 어떤 Model이 적정한가를 판단하기는 쉽지 않다. 만약 당초부터 해석 Model의 선택에 문제가 있으면 시공 현장의 수많은 변수가 개입되는 계측 값들을 기초로 한 여러 예측들이 무의미하기 때문이다.

#### 13.1 STRAIN GAGE

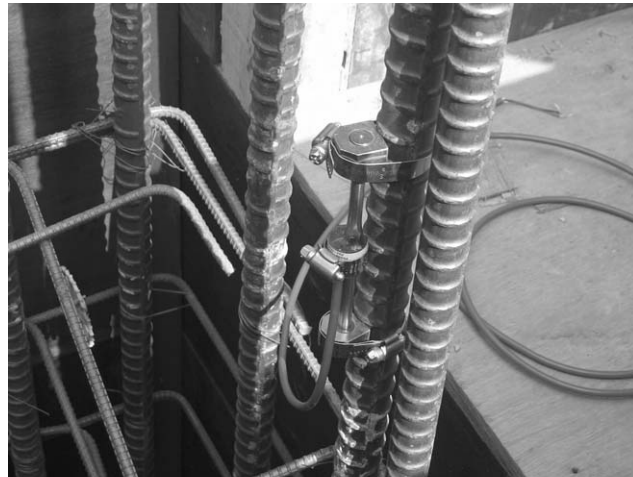
실제의 기둥 수축량은 해석 예측모델과 근접하는지 확인하기 위하여 Strain Gage를 사용한다. Gage의 종류에는 전기저항식과 Vibrating Wire Strain Gage(진동현식)가 있다. 전기저항식은 건설현장과 같은 험한 환경에서는 내구성에 문제가 있으므로 주로 토목 현장에서 사용하는 진동현식 Gage를 사용한다. 또한, 기껏 설치한



〈그림13〉 STRAIN GAGE



〈그림14〉 Strain Gage 설치 사진



〈그림15〉 Strain Gage 설치 완료

Gage가 먹통이 되어 기능을 상실하는 경우가 적지 않으므로 이에 대한 대비도 필요하다.

Gage의 설치 위치는 구조적으로 관심있는 지점을 선택하며 이때 태양열에 오래 노출되는 기둥은 건조속도에 영향을 미치므로 주의가 필요하다.

Strain 측정범위는 3000 Micro Strain 이상인 것을 사용한다. 계측 대상층은 매 층마다 하는 것이 좋을 것이나 대체로 5개 층 내지 7개 층 정도가 무난하다. Outrigger 층이 있는 경우 OutRigger 체결 전과 체결후의 Strain 변화를 Monitor 하기 위하여 Outrigger의 주요 부재에도 철골용 Gage를 용접하여 설치하여야 한다.

#### 13.2 TILT METER

기초형식이 RCD 기초인 경우 거대하중이 재하되므로 부동침하량에 의한 기초 회전변형을 계측하여 기둥 축소량 해석에 반영하는 것이 중요하다. 특히 암반상에 정착되는 직접기초와 달리 RCD 기초는 주변마찰력이나 선단지저력에 의해 하중을 지지하는 현장타설 말뚝이므로 개개의 구조적 성능이 동일하지 않아서 기초 부동침하가 중요한 요소가 될 것이다. 기준층에는 부동침하 계측자를 설치하면 Strain 계측값을 보정하여 사용하는데 유용할 것이다.

#### 13.3 OUTRIGGER Stress 계측

초고층에는 구조물의 stability를 높이기 위하여 Outrigger를 설치하는 경우가 있다. Outrigger는 Core Wall과 인접기둥을 묶어서 횡력 저항능력을 향상하고 동시에 외부층 기둥의 축소량을 분산하는 역할을 수행한다. 따라서 최대한 수직 수축이 완료된 상황에서 Connection을 하여야만 부가응력을 최소화할 수 있다. 이런 목적으로 Outrigger Truss에는 Slot-Hole를 갖는 Delay Joint를 설치하여

긴결 시점을 조절하도록 하고 있다. 따라서 시간별 잔여 수축량을 정확히 예측하여야만 Connection 시점을 결정할 수 있다. Connection 후에는 Outtrigger에 Stress가 발생되기 시작함과 동시에 하층의 재분배가 진행되므로 Outtrigger의 해당부재에 Spot Weld 형 Gage를 설치하여 실제로 Outtrigger에 작용되는 Stress의 변화를 구조계산과 비교 확인하고 지속적으로 Monitor 하여 이를 시공에 반영한다.

### 13.4. 다립추 설치

시카고 구조물의 사례에서 보듯이 구조물의 수축은 12년이 넘도록 진행된다. 국내의 Concrete 초고층 시공분야가 초기단계라서 아직 기동수축에 의한 국내의 실패사례가 보고되지 않고 있다. 그러나 향후 현재 시공중인 구조물들이 예측대로 거동할 것인지 또 해마다 얼마만큼 변형할지는 구조기술자로서 걱정과 동시에 관심사이다. 따라서 준공이후에도 이러한 축소계측이 쉽게 이루어지도록 제도적 장치를 건의한다. 축소계측은 고층부 Elevator Shaft 내부에 철선으로 추를 매달아 지하 Pit 층에서 관찰하도록 하면 매우 간단히 설치될 것이다. 현재 몇몇 구조물에는 이러한 장치의 설치를 시도중이다. 초고층 구조물은 1종 구조물로서 3년에 1회 이상 안전점검을 받도록 되어 있으므로 이때 다립추에 연결된 측정장치로 쉽게 수축량을 측정할 수 있을 것이다. 근간에 시공되는 초고층구조물에 모두 이러한 자료를 구축하면 해석 Model 선택에 훌륭한 근거가 될 것으로 믿는다.

### 맺음말

초고층의 원조라고 할 수 있는 미국과 같은 나라에서 기동 수축으로 인한 사고가 발생되었다는 것이 너무 의외이다.

시카고 구조물 사진을 보면 Elevator Rail과 Bracket가 떨어진 것으로 나타났는데 고속 주행중인 Elevator에는 아무 문제가 없었는지 걱정스럽다. 시공사에서는 기동수축 현상에 대하여 보다 세심한 관심이 요망된다고 할 수 있다. 현재 우리나라에서도 많은 초고층 구조물이 시공 중이어서 향후 10여년 후에 이와 유사한 사례가 발생되지 않도록 이 분야에 많은 연구가 이어지고 계속 자료가 구축되어 많은 구조기술자들이 우리의 실정에 맞는 보완된 Model을 가지고 고층 구조물을 설계할 수 있기를 기원한다.

### REFERENCES

1. William D. Bast, SEAOL, "Measured Shortening and Its Effects in a Chicago High-rise Building"
2. Z. P. Ba ant and Sandeep Baweja, "Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures: Model B3"
3. Bryan Stafford Smith, Alex Coull, "Tall Building Structures Analysis and Design"
4. M. Nadim Hassoun, Akthem Al-Manaseer, "Structural Concrete, Theory and Deign"
5. ACI Manual of Concrete Practice 1992 "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures" Reported by ACI Committee 209