

콘크리트충전 강관기둥의 내화특성에 관한 이론적 연구

A Theoretical Study on the Characteristics of Fire Resistance for the Concrete Filled Tubular Steel Columns

정 경 수¹⁾ · 최 성 모²⁾ · 김 동 규³⁾
Chung, Kyung Soo Choi, Sung Mo Kim, Dong Kyu

요 약 : 강관에 콘크리트를 충전하는 경우, 콘크리트 충전강관 기둥은 뛰어난 내력과 변형성능을 발휘한다. 그리고 콘크리트의 축열효과에 의해서 일정시간은 내화피복 없이도 내력을 유지할 수 있다. 화재발생동안 콘크리트 충전강관 기둥의 거동을 알아보고자 강관과 콘크리트의 온도에 따른 특성치 변화를 가정하고 온도 해석 및 축력-모멘트관계에 대한 수치해석을 수행하여 시간변화에 따른 변수별로 비교평가하였다. 온도에 따른 특성치는 기존문헌의 데이터를 이용하였으며 온도해석은 범용 해석프로그램인 ANSYS로 유한요소해석을 하였고 이를 바탕으로 내력에 대한 수치해석을 수행하였다.

ABSTRACT : When steel tube as a column is filled with concrete, it is common that the load-bearing capacities of CFST(Concrete Filled Steel Tube) column are increased substantially. And the CFST column can obtain a capacity of fire resistance without any additional detail on the surface of the steel tube for fire protection.

In order to clarify the behavior of CFST column during fire occurrence, a theoretical study is performed, that is, a thermal analysis is used to find temperature gradient dependent on the time on the steel tube and the infilled concrete. N-M(axial force-moment) interaction curves are summarized under the consideration for time dependent variation. The material properties of concrete and steel in accordance with a temperature variation are referred to the existing general data. Thermal transient analyses are performed by finite element method through ANSYS and then these results are verified by comparing with the existing test results. On the basis of analytical results, load-carrying capacities(N-M interaction curves) are calculated by numerical analysis method.

1) 대림산업(주) 기술연구소, 연구원
2) 정희원, 경민전문대 건축과 조교수, 공학박사
3) 정희원, 서울시립대 건축공학과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 1998년 5월 31일까지 학회로 보내 주시면 토의회답을 게재하겠습니다.

핵심용어 : 내화, 기둥, 콘크리트, 강관, 내력, 콘크리트충전 강관

KEYWORDS : fire resistance, column, concrete, steel tube, load capacity, concrete filled steel tube

1. 서론

콘크리트충전 강관기둥은 강관이 콘크리트에 대해서 구속효과를 지니며 콘크리트는 강관의 국부좌굴을 막는 효과로 고축력 상태에서 뛰어난 구조부재이다. 또한 강관안에 채워진 콘크리트의 축열효과에 의하여 콘크리트충전 강관기둥은 자체로 상당한 내화성능을 확보하고 있다고 평가되어 왔다. 그러나 콘크리트충전 강관기둥에 대한 내화성능을 정량적으로 평가하는 방법이나 기준들이 마련되지 않아 내재하고 있는 성능을 충분히 활용치 못하고 있는 상황이다.

따라서 본 연구에서는 화재 발생시 시간경과에 따른 콘크리트충전 강관기둥의 내력변화를 정량적으로 이론해석을 수행하였다. 기존문헌⁽¹⁾에서 제시한 재료의 열특성을 기초로 부재단면의 시간별 온도분포를 범용 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 해석하고 각 절점의 온도분포에 따른 강도와 단면적으로 구한 내력(축력-모멘트 관계)을 여러 가지 변수별로 비교·분석하여 내화성능을 평가하고자 한다.

2. 온도해석

2.1 온도에 따른 특성

온도해석을 위해 콘크리트충전 강관을 구성하는 강재와 콘크리트의 온도별 특성치(열전도율, 비열, 밀도)는 기존문헌⁽¹⁾을 참고하였다.

2.1.1 강관

온도에 따른 강재의 특성은 표 1과 그림 1에서 보는 바와 같다.

표 1. 온도변화에 따른 강재 특성치

온도 (°C)	비열 (cal/(kg·°C))	열전도율 (cal/(cm·s·°C))	밀도 (kg/cm ³)
0	107.4807	0.131368	0.007850
93.58	115.7756	0.123356	0.007815
105.04	116.7885	0.122375	0.007811
114.59	117.6346	0.121558	0.007807
197.35	124.9673	0.114474	0.007776
398.55	142.7954	0.097250	0.007701
700.57	208.4359	0.071397	0.007588
750.39	249.8925	0.067131	0.007569
827.59	164.2347	0.060522	0.007541
850.03	139.3414	0.061201	0.007532
1200.00	161.2210	0.071784	0.007401

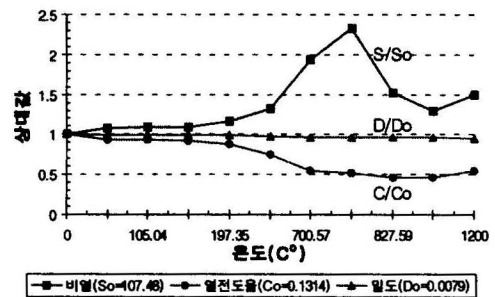


그림 1. 온도별 무차원화된 특성치

2.1.2 콘크리트

온도변화에 대한 콘크리트의 특성치는 표 2와 그림 2에 나타나 있다.

표 2. 온도변화에 따른 콘크리트 특성치

온도 (°C)	비열 (cal/(kg · °C))	열전도율 (cal/(cm · s · °C))	밀도 (kg/cm³)
0	301.0318	0.005613	0.002350
93.58	313.9332	0.004271	0.002327
105.04	1255.733	0.004106	0.002325
114.59	725.398	0.003970	0.002323
197.35	227.9241	0.003877	0.002303
398.55	234.8899	0.003654	0.002255
700.57	288.3586	0.003320	0.002183
750.39	294.3414	0.003265	0.002172
827.59	303.6122	0.003179	0.002153
850.03	306.3113	0.003155	0.002148
1200.00	348.3368	0.002766	0.002065

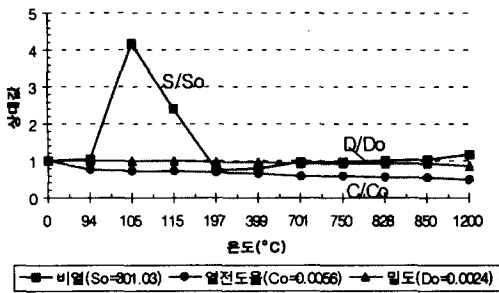


그림 2. 온도별 무차원화된 특성치

2.2 해석방법

시간경과에 따른 콘크리트충전 강관기둥 단면의 온도분포를 알아보기 위하여 범용적으로 사용하는 해석프로그램인 ANSYS를 이용하여 해석하였다. 요소는 4개의 절점(Node)을 가지고 있으며 각 절점은 온도에 대한 1개의 자유도(Degree of Freedom)를 가진 Plane 55를 사용하였다. 강관과 콘크리트는 Homogeneous와 Isotropic으로 가정하였고 강관과 콘크리트는 일체거동으로 보았다. 비정상 열전도방정식⁽⁷⁾은 식(1)과 같으

며 온도별 강관과 콘크리트의 특성치(비열, 열전도율, 밀도)는 표 1과 표 2에 제시된 값을 적용하였다.

$$[C(T)]\{T'\} + [K(T)]\{T\} = \{Q(T)\} \quad (1)$$

C : Specific Heat Matrix

T' : Time Derivative of (T)

K : Conductivity Matrix

T : Nodal Temperature

Q : Nodal Heat Flow Vector

온도하중은 표준가열곡선인 ASTM E-119⁽⁵⁾를 적용하여 강관표면에 직접 가하였다. 시간경과에 따른 가열온도는 식(2)과 그림 3에서 나타내고 있다. 본 해석에서는 내화시간을 2시간으로 하였다.

$$T = 345 \cdot \text{LOG}_{10}(8t+1) \quad (2)$$

t : 분 (min) T : 가열온도(°C)

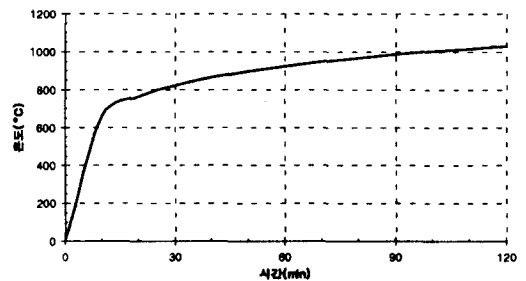


그림 3. 시간경과에 따른 온도변화

2.3 해석결과

□-300×300×9인 콘크리트충전 각형강관 단면의 시간별 온도분포는 그림 4~6에서 보는 바와 같이 강관 경계면에서 열전도가 낮은 콘크리트의 열특성에 의해 중앙부는 외부 온도변화에 대해 크게 영향받지 않음을 알 수 있다.

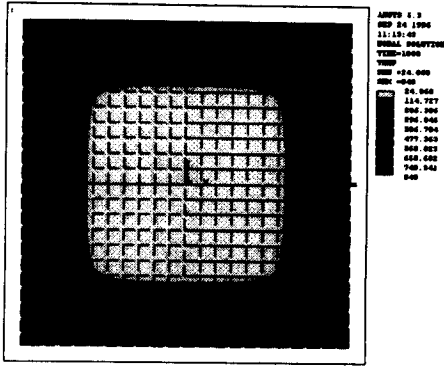


그림 4. 각형기둥 단면내의 온도분포(30분 경과)

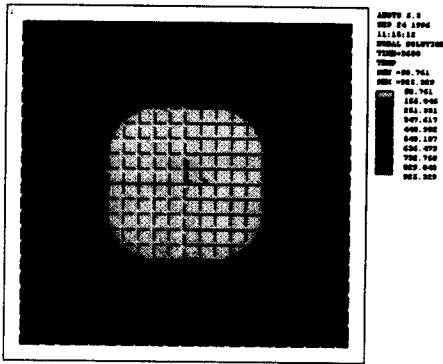


그림 5. 각형기둥 단면내의 온도분포(60분 경과)

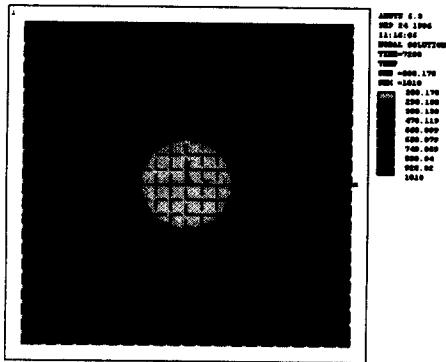


그림 6. 각형기둥 단면내의 온도분포(120분 경과)

2.3.1 기존 실험결과와의 비교

ANSYS를 이용한 온도해석결과에 대한 검증

위해서 일본 구조공학 논문집에 발표된 내화실험 결과⁽²⁾와 비교하였다.

실험결과와 해석치의 비교는 그림 7에 나타난 바와 같이 해석치가 실험결과보다 평균적으로 8.6% 정도 다소 높게 나왔다. 이는 열원에서 강관표면까지 대류열전달로써 도달하는 열량을 구하기 위하여 표면의 기하학 형상, 유동의 성질 및 유체의 열역학적 특성과 열전달 특성치들의 영향이 고려된 대류전달계수(Convection Heat Transfer Coefficient)를 산정해야 하는데 이를 정확히 구하는 것은 현실적으로 불가능하므로 안전측으로 선택한 영향이라 판단된다. 따라서 해석에서는 대류열전달로써 도달하는 열량 대신에 열전도율이 큰 강관의 특성을 고려하여 강관표면에 직접 온도를 가하였기 때문이다.

따라서, 화재발생시 콘크리트충전 강관기둥의 최대내력 예측은 본 해석에서의 가정이 안전측임을 알 수 있다.

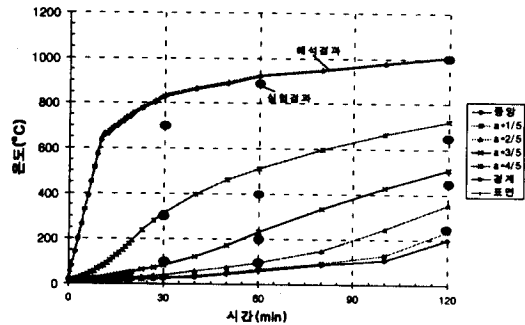


그림 7. 시간별 단면의 온도변화(a:직경)

2.3.2 콘크리트충전 원형강관과 비교

강재량 및 콘크리트량이 동일한 콘크리트충전 원형강관(○-338.5×10.15)의 단면온도분포는 그림 8~10에서 보는 바와 같다.

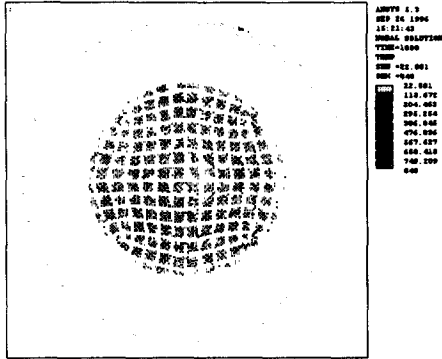


그림 8. 원형기둥 단면내의 온도분포(30분 경과)

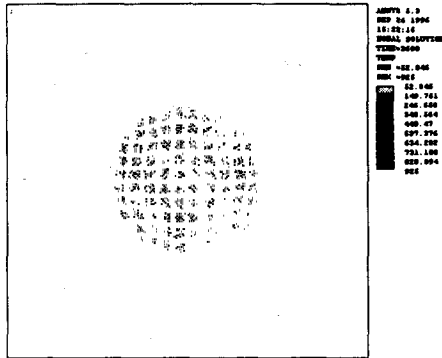


그림 9. 원형기둥 단면내의 온도분포(60분 경과)

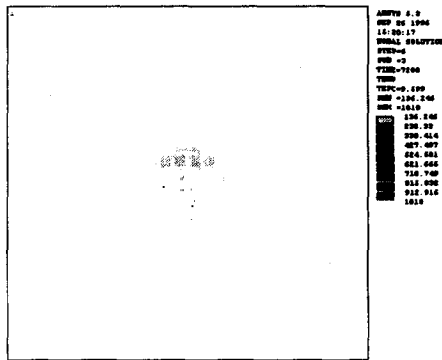


그림 10. 원형기둥 단면내의 온도분포(120분 경과)

시간경과에 따른 원형강관기둥 단면의 온도증가는 그림 11에서 보는 바와 같이 각형강관과 거

의 일치하나 원형강관 중심에서 강관의 표면까지의 최단거리가 각형강관보다 크기 때문에 중앙부의 온도가 약간 낮게 나타남을 알 수 있다.

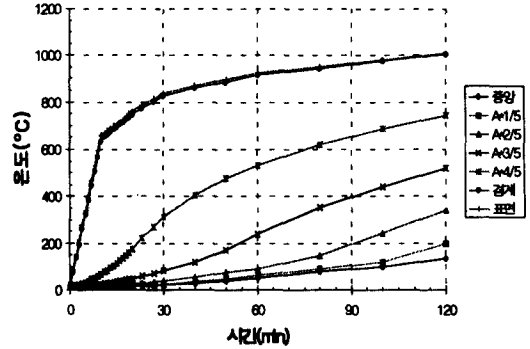


그림 11. 시간별 단면의 온도변화(A:직경)

3. 내력해석

3.1 온도변화에 따른 특성

3.1.1 강관

내력평가를 위한 수치해석에서 온도에 따른 무차원화된 강도의 데이터 중간값은 식(3)에 의한 보간식으로 구하였다. 기존 참고문헌에서 제시한 데이터⁽¹⁾는 그림 12에서 보는 바와 같다. 온도가 400℃이하에서 강재의 강도저하는 작지만 온도가 400℃이상에서는 강재의 강도가 급격히 떨어져 1000℃를 초과할 경우 강재 강도는 0이 됨을 알 수 있다.

$$\frac{F_y}{F_{y0}} = 9.75E - 20t^7 - 4.02E - 16t^6 + 6.40E - 13t^5 - 4.89E - 10t^4 + 1.80E - 07t^3 - 2.92E - 05t^2 + 0.001t + 0.978 \quad (3)$$

F_y : 온도별 강도 F_{y0} : 초기강도

t : 온도(℃)

3.1.2 콘크리트

온도변화에 따른 무차원화된 강도의 데이터 중간값은 식(4)에 의한 보간식으로 구하였다. 기존 참고문헌에서 제시한 데이터⁽¹⁾는 그림 12에서 보는 바와 같다. 400℃이하에서는 콘크리트의 압축강도의 저하가 완만하게 이루어지지만 그 이상에서는 급격히 떨어져 800℃를 초과할 경우 압축강도는 0이 됨을 알 수 있다.

$$\frac{F_c'}{F_{co}'} = 1.33E-11t^4 - 2.60E-08t^3 + 1.60E-05t^2 - 0.004t + 0.997 \quad (4)$$

F_c' : 온도별 강도 F_{co}' : 초기 28일 압축강도
 t : 온도(℃)

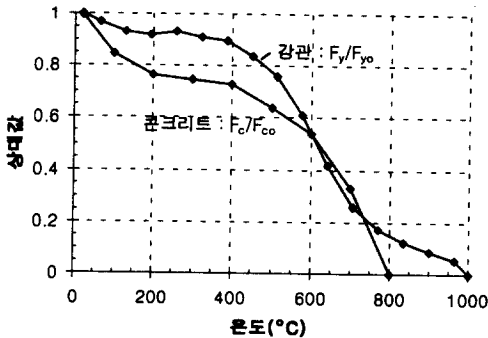


그림 12. 온도별 강도변화

3.2 해석변수

내화성능평가를 위한 기준 해석대상물의 강관 치수는 □-300×300×9이고 콘크리트와 강관의 강도는 300, 3000kg/cm²로 정하였다. 해석변수는 표 3에서 보는 바와 같이 단면의 형상, 직경의 크기, 직경두께비(D/t), 콘크리트의 압축강도이다.

표 3. 해석변수

단면 형상	직경[D] (mm)	두께[t] (mm)	직경두께비 [D/t]	콘크리트강도 (kg/cm ²)			
각형강관	300.0	6.00	50.0	300			
		9.00	33.3	200			
				300			
				400			
	12.00	25.0	300				
	200.0	9.00		22.2			
400.0	44.4						
1000.0	10.00	100.0	원형강관	338.5	6.77	50.0	300
10.15	33.3						
13.53	25.0						
225.7	10.15	22.2					
451.3		44.4					

3.3 해석결과

축력(N)-모멘트(M) 산정은 식(5)에서 보는 바와 같이 일본건축학회의 철골철근콘크리트 설계기준에서 일반화 누가강도의 이론식을 적용하였다. 각 단면의 절점에서 온도분포에 따른 강도를 요소 단면적과 곱하여 축력을 구하며 축력과 중립축 위치에서 절점까지의 거리로 모멘트를 산정한 후, 축력-모멘트 관계를 변수에 대해서 비교 분석하였다.

$$N = \sum_{i,j=1,1} F_i(i,j) \cdot A(i,j)$$

$$M = \sum_{i,j=1,1} F_i(i,j) \cdot A(i,j) \cdot (y(j) - N.A.) \quad (5)$$

F_i : 온도별 강도, A : 절점 단면적
 $(y(j)-N.A.)$: 절점과 중립축과의 수직거리

콘크리트의 압축강도는 $0.85 \cdot F_c'$ (F_c' : 28일 강도)로 하였다.

그림 7을 보면 온도해석 결과에서 시간이 30분을 경과하면 강관은 온도가 840℃ 이상으로 급격

히 증가하여 강도가 거의 0에 가깝게 되어 그림 13에서 보는 바와 같이 내력이 크게 감소한다. 그러나 콘크리트의 경우는 그림 14에서 보는 바와 같이 외부 온도변화에 영향을 크게 받지 않아 상온에서의 강도가 유지된다.

따라서 콘크리트충전 강관에서 온도증가에 의한 강관의 강도상실로 저항모멘트값이 초기값에 비해서 상당히 떨어진다. 그러나 축력에 대해서는 콘크리트가 지지하고 있어 콘크리트충전 강관기둥의 내화성능은 콘크리트 단면의 온도상승과 내력 관계에 의해 결정된다. 그림 15에서 나타나 듯이 콘크리트충전 강관의 내력에서 강관이 차지하는 비율이 크면 시간경과에 따라 충전강관의 내력이 크게 감소함을 알 수 있다.

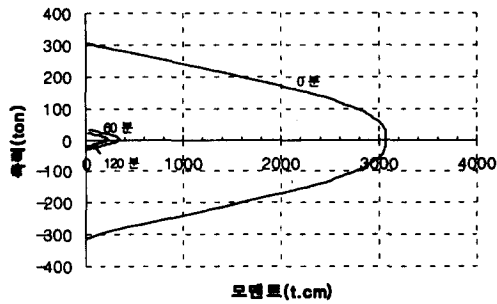


그림 13. 시간별 각형강관의 축력-모멘트관계
(□ - 300×300×9, D/t=33.3)

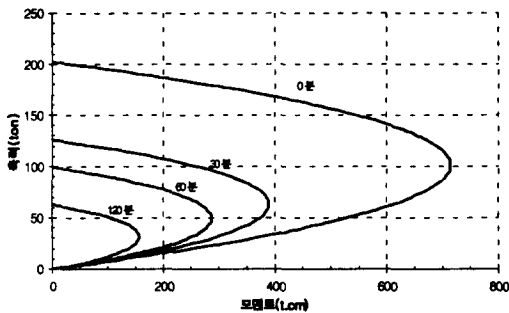


그림 14. 시간별 콘크리트의 축력-모멘트관계
(□ - 300×300×9, D/t=33.3)

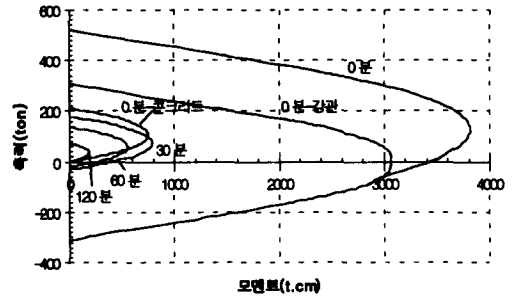


그림 15. 시간별 콘크리트충전강관의 축력-모멘트관계
(□ - 300×300×9, D/t=33.3)

4. 분석 및 고찰

해석변수에 대해서 온도해석을 수행한 후 그 해석결과로 내력을 수치해석하여 내화성능을 결정하는 축력에 대해서 정리하면 표 4와 그림 16, 17에서 보는 바와 같고 각 변수별 비교는 다음과 같다.

(1) 직경두께비(D/t)

직경이 같고 강관의 두께를 변수로 하였을 경우, □ - 300×300×6인 경우는 시간경과에 따라 내력값이 초기값의 40.8, 32.0, 18.3%로 감소하지만, □ - 300×300×12에서는 30.2, 22.8, 11.2%로 크게 감소하였다. 그리고 1시간 경과 후에는 □ - 300×300×12인 기둥의 내력값이 138.94ton으로 □ - 300×300×6의 내력값(136.64ton)과 거의 비슷하게 나타났다. 따라서 강관의 두께가 얇을수록 내화성능이 우수함을 알 수 있다.

(2) 직경크기

강관의 두께가 일정하고 직경을 변수로 하였을 경우, □ - 400×400×9인 경우는 내력이 시간경과에 따라 초기값의 41.6, 34.8, 23.2%로 감소하였다. □ - 200×200×9인 경우의 내력은 시간증가에 따라 초기값의 25.9, 16.6, 1.2%로 크

게 감소하였다. 따라서 그림 17에서 보는 바와 같이 직경이 클수록 시간경과에 따른 내화성능은 상대적으로 크게 향상됨을 알 수 있다. 또한 직경 변수의 증감에 대한 시간별 내력감소의 민감도 (Sensitivity)가 다른 변수보다 크게 나타났다.

(3) 콘크리트 강도

□ - 300×300×9인 강관에 충전된 콘크리트의 강도를 변수로 하였을 경우, 콘크리트 강도가 200kg/cm²인 경우에 시간경과에 따라 내력이 초기값의 26.8, 20.0, 9.5%로 크게 감소하였다. 이는 온도에 따른 콘크리트의 열특성 즉, 강도가 낮게 나왔기 때문이다. 그리고 콘크리트의 강도가 400kg/cm²인 경우에는 내력이 초기값의 35.1, 26.8, 14.6%로 300kg/cm²인 경우보다 내력감소가 다소 작게 나왔다.

(4) 단면형상

원형강관은 동일 강재량과 콘크리트량을 전제로 하여 각형강관과 비교할 경우, □ - 300×300×9의 기둥은 시간경과에 따라 내력값이 초기값의 34.4, 26.5, 14.1%로 감소하였다. 그러나 ○ - 338.5×10.15의 기둥은 37.0, 30.1, 18.5%로 시간증가에 따른 기둥내부의 온도 상승량이 작게 나타나 시간별 내력 감소가 상대적으로 작았다. 따라서 원형강관의 내화성능의 우수함이 뚜렷하게 나타났다.

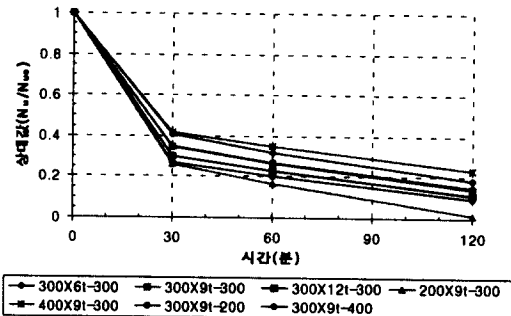


그림 16. 시간별 내력감소

표 4. 해석결과

해석대상 기둥	0 분	30 분	60 분	120 분
	N_{u0} (ton)	N_u/N_{u0}	N_u/N_{u0}	N_u/N_{u0}
□-300×300×6	427.0	0.408	0.320	0.183
□-300×300×9 ($F_c'=200\text{kg/cm}^2$)	441.6	0.268	0.200	0.095
□-300×300×9 ($F_c'=300\text{kg/cm}^2$)	520.0	0.334	0.262	0.126
□-300×300×9 ($F_c'=400\text{kg/cm}^2$)	576.5	0.351	0.268	0.146
□-300×300×12	609.4	0.302	0.228	0.112
□-200×200×9	308.8	0.259	0.166	0.012
□-400×400×9	833.0	0.416	0.348	0.232
□-1000×1000×10	3744.1	0.589	0.562	0.504
○-338.5×6.77	427.5	0.433	0.358	0.233
○-338.5×10.15	507.0	0.370	0.301	0.185
○-338.5×13.53	612.0	0.318	0.253	0.143
○-225.7×10.15	320.6	0.258	0.181	0.021
○-451.3×10.15	876.6	0.408	0.350	0.250

* 주) 콘크리트 강도 : 300 kg/cm²
 강관의 강도 : 3000 kg/cm²
 N_{u0} : 최대축력 (0분)
 N_u : 최대축력

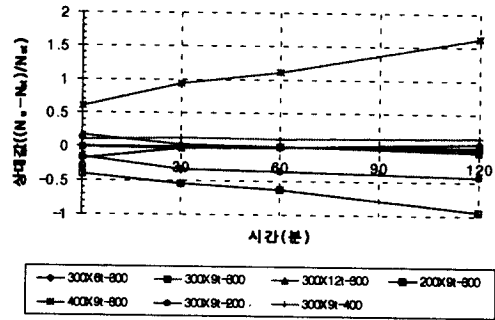


그림 17. 시간에 따른 변수증감별 내력변화

(5) 적용예

변수별 비교·평가를 기초로 콘크리트충전 강관기둥(□-1000×1000×10)을 온도해석과 내력

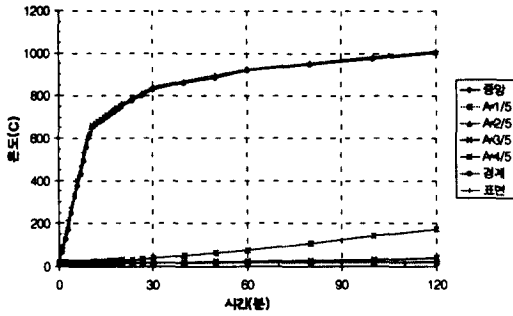


그림 18. 시간별 단면 온도분포(A:직경)

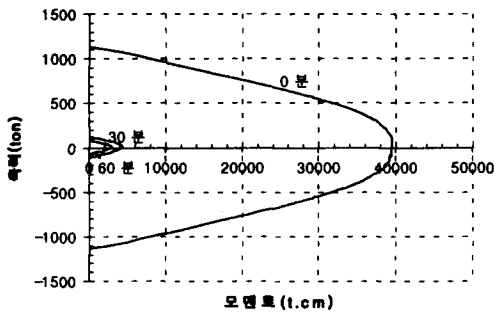


그림 19. 시간별 강관의 축력-모멘트관계
(□-1000×1000×10, D/t=100.0)

해석을 수행하였다. 콘크리트의 압축강도는 다른 해석변수에 비해서 내력의 민감도(Sensitivity)가 적어 압축강도를 300kg/cm^2 으로 하였고 강관의 강도는 3000kg/cm^2 이다.

온도해석결과 그림 18에서 보는 바와 같이 단면의 온도분포에서 강관은 30분 이후에 온도가 800°C 이상이 되지만 콘크리트는 2시간이후에도 온도증가가 거의 없음을 알 수 있다. 내력에서 그림 19, 20에서 보는 바와 같이 강관은 시간이 30분 경과한 후에 초기값의 10%로 크게 감소하여 2시간에는 내력이 0이 된다. 그러나 충전된 콘크리트는 2시간 후에도 내력이 초기값의 73%로 내력저하가 작다. 그래서 그림 21에서 보는 바와 같이 콘크리트충전 강관은 2시간이후에도 내력이 초기값의 50%이상이 되어 내력은 콘크리

트에 의해 결정됨을 알 수 있다.

따라서 콘크리트충전 강관기둥에서 콘크리트의 직경을 키우면서 압축강도를 높이거나, 단면의 온도가 400°C 이하인 곳에 철근이나 강재로 보강을 하였을 경우, 내화피복이 없어도 뛰어난 내화성능을 발휘할 것으로 사료된다.

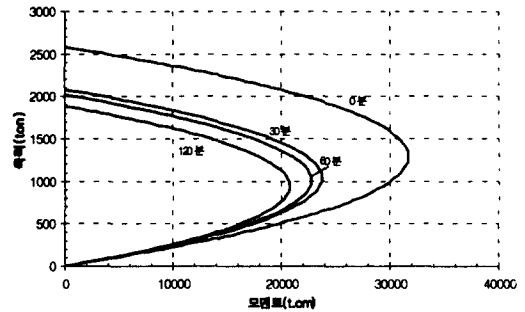


그림 20. 시간별 콘크리트의 축력-모멘트관계
(□-1000×1000×10, D/t=100.0)

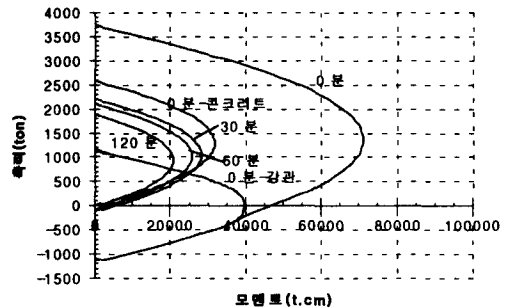


그림 21. 시간별 콘크리트충전강관의 축력-모멘트관계
(□-1000×1000×10, D/t=100.0)

5. 결 론

온도분포해석 및 화재시 시간경과에 따른 내력 평가를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 내화피복이 없는 강관(□-1000×1000×10)인 경우 화재발생후 30분 경과 후에 내력은 초기값의 10%정도로 내력이 감소하지만 콘크리트($F_c=300\text{kg/cm}^2$)를 충전할 경우에는 내력이

2시간에도 초기값의 50%이상을 유지하는 뛰어난 내화성능을 지니게 된다.

(2) 직경두께비(D/t), 직경이 클 수록 그리고 콘크리트의 강도가 높을 수록 시간경과에 따른 내력 감소가 적은 것으로 나타났다. 특히 직경증가에 따른 내력감소가 보다 적게 나타났다.

(3) 강재 및 콘크리트량이 동일한 경우에는 원형강관이 각형강관에 비해 충전콘크리트의 온도가 상대적으로 상승폭이 적었으며, 따라서 온도상승에 따른 내력감소가 적게 나타났다.

(4) 이론해석을 통하여 구한 콘크리트충전 강관 기둥의 화재발생후 시간경과에 따른 온도분포를 기존 실험결과와 비교하면 온도가 평균 8.6% 높게 나타났으므로 해석을 이용한 콘크리트충전 강관기둥의 최대내력 예측은 안전측임을 알 수 있다.

참 고 문 헌

(1) Joseph Zicherman : 1996, Fire Safety in Tall Buildings, McGraw Hill Inc., p229~292.

(2) 中村武 외 1인 : 1994. 3, 充填型角形鋼管コンクリート柱の高温時挙動, 構造工學論文集
 (3) 齊藤秀人 외 1인 : 1994. 4, 充填鋼管コンクリート柱の耐火性能に關する實驗的研究, 日本建築學會構造系論文集
 (4) 齊藤光 : 1995. 6, 最近の鐵骨耐火構造, 建築技術
 (5) 吉田正友 : 1995. 12, 合成構造の耐火性能, 콘크리트工學
 (6) V.K.R. Kodur & T.T. Lie : 1996. 6, Fire Resistance of Circular Steel Columns Filled with Fiber-Reinforced Concrete, ASCE.
 (7) Ansys: 1992. 12, ANSYS user's manual (Heat transfer), Swanson Analysis, Houston, PA.
 (8) 김동규, 최성모, 정경수 : 1997. 10, 콘크리트 충전강관 기둥의 내화특성에 관한 이론적 연구, '97추계학술발표논문집, 대한건축학회
 (접수일자 : 1997. 11. 14)