표준화재곡선에 의한 고강도 콘크리트 부재의 내부온도 예측

Analysis of Inner Temperture in High Strength Concrete under Standard Temperature-time Curve

송 훈* 이 세 현** 문 경 주*** 도 정 윤**** 소 양 섭*****
Song, Hun Lee, Sea Hyun Mun, Kyung Ju Do, Jeong Yun Soh, Yang Seob

ABSTRACT

With all ensuring the fire resistance structure as a method of setting the required cover thickness to fire, the RC is significantly affected from the standpoint of its structural stability that the compressive strength and elastic modulus is reduced by fire. Normally, the degradation of concrete member exposed to fire is largely dependent on the fire scale and fire condition. There is therefore a need to precisely predict the deterioration and fire damage of the exposed member.

Thus, this work estimated the temperature distribution inside a member taking into consideration of the thermal properties by means of finite element method(FEM). The estimation results in a little higher prediction value than the experimental value in surface layer and is almost coincident with the experiment as the heating depth increase. From this work it can be known that the simulation application of FEM using the thermal properties of concrete member in high temperature gives rise to the confident prediction in the prediction of temperature distribution.

1. 서 론

철근콘크리트의 내화성능에 관한 많은 연구가 이루어져 소정의 피복두께를 유지하고 있으면 내화구조로서 인정되고 있다. 하지만 화재에 의해 콘크리트 부재는 압축강도 및 탄성계수가 저하하는 등 성능저하로 인한 구조안전성에 심각한 영향을 미친다. 또한 단면이 손상되는 박락 및 폭렬 등이 발생하기 쉬우므로 이에 대한 화재안전성을 고려할 것을 권고하고 있으며, 특히 강도가 큰 고강도 콘크리트는 열에 의한 단면손상의 경향성이 크므로 이에 대한 주의가 필요하다. 콘크리트 성능저하는 화재의 성상 및 규모에 따라 크게 좌우되며 화재피해 정도에 따라 등급을 구분하며, 부재가 비 손상된 경우는 부재의 수열온도로서 파악하게 된다. 선진각국에서는 500℃를 전후로 하여 내력을 상실했다 판정하며 내부온도가 500℃가 되는 지점을 열에 의한 열화깊이로 판정한다. 그러므로 콘크리트 부재의 화재피해 정도를 파악하기 위해서는 화재의 지속시간이나 온도 등의 성상파악이 중요하며, 정밀도 높은 온도예

* 정회원, 한국건설기술연구원, 건축연구부, Post-doc, 공학박사
** 정회원, 한국건설기술연구원, 건축연구부, 수석연구원, 공학박사
*** 정회원, 전북대학교 공업기술연구센터, 전임연구원, 공학박사
**** 정회원, 전북대학교 건축도시공학부, 강사, 박사수료
***** 정회원, 전북대학교 건축도시공학부, 교수, 공학박사

측은 불가결하다 할 것이다. 화재시의 콘크리트 부재의 온도예측은 온도상승의 정체가 일어나는 100℃ 전후의 수분 상태 변화를 고려한 모델이나 열이나 공극내의 가스의 확산 및 대류 등을 고려한 정도 높은 모델 등도 보고되고 있다[2),(3)].

본 연구는 온도정체 등의 상태변화를 고온시의 열물성치의 변화로 고려하여 온도 및 시간의존성을 변수로 부재의 온도를 계산하였다. 또한, 비 손상된 60MPa을 넘는 고강도 콘크리트의 온도 변화를 통한 모델의 적용 여부에 대한 검토를 하고자 하였으며, 추후 급격한 온도구배에 따라 발생하는 열응력 및 수증기압 등의 요인들에 대한 연성 데이터 축적을 목적으로 하였다.

2. 시험방법 및 모델의 조건

2.1 사용재료

본 실험에 사용된 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트이며, 잔골재는 강모래를 사용하였으며, 굵은골재는 경질사암의 쇄석을 사용하였으며, 각 사용재료의 물리적 성질은 표1과 같다. 콘크리트의 배합은 표2와 같다. 단위수량은 170kg/m^{3}로 하였으며, 물시멘트비를 25, 55%로 하였다. 콘크리트의 혼합은 100L의 강제식 믹서를 이용하였으며, 시멘트와 잔골재를 투입하여 선 혼합 후, 물과 혼화제, 굵은골재의 순으로 투입하여 각각 90초간 혼합하였으며, 공기량과 슬럼프를 측정하였다.

표1. 사용재료

시멘트	C	보통 포틀랜드 시멘트, 비중 : 3.16
잔골재	S	강모래, 표건비중 : 2.60
굵은골재	G	경질사암의 쇄석, 표건비중 : 2.65
혼화제	S.P	폴리카르본산계

표2. 콘크리트 배합

Series	W/C (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m^3)				Air content (%)	Slump (cm)	Comp. strength (MPa)
			W	C	S	G			
PC-25	25	45	170.0	680.0	672.5	837.0	4.6	18	89
PC-55	55	47	170.0	309.1	845.9	972.2	3.8	17	36

2.2 시험체의 제작

내화시험용 콘크리트 시험체의 크기 및 형상은 그림1과 같다. 시험체의 피복두께는 40mm로 하였고, 가열에 의한 내부온도 변화를 측정하기 위하여 가열면 및 가열면에서 20mm간격으로 10개의 열전대를 설치하였다. 또한, 보조근 및 주근의 온도 상승을 측정하기 위하여 각각 2개의 열전대를 설치하여 철근의 온도 상승을 측정하였다. 또한, 가열면에 입사하는 입사열을 측정하기 위하여 벽식 가열로 프레임의 4개소에 Gardon 타입의 열유속계를 설치하였다.

내화성능 평가는 KS F 2257의 표준화재 곡선에 의해 실시하였다. 시험은 2시간 내화를 상정하여 가열하였고 열원은 도시가스를 사용하였다. 내화 시험시의 시험체의 재령은 3개월이며, 함수율은 PC-25가 3.2% PC-55가 3.4%이다.

2.3 해석부재의 개요 및 조건

콘크리트 부재 모델의 계산은 FEM에 의한 이차원 시간의존성 열전도 해석 프로그램을 이용하여 실시하였다. 변수로서 고온시의 부재의 열물성치가 고려되어 있으며, 단면결손에 의한 온도상승은 고려하지 않았다. 해석부재의 가열조건은 KS F 2257의 건축물 표준화재 곡선을 적용하였으며 1초 간격으로 시간의존성 전열해석을 실시하였으며 해석부재의 조건은 그림2와 같다. 온도예측 이용한 고온 열물성치는 기존의 보고된 문헌 및 실험치를 참고로 설정하였으며 표3과 같다[1),(4),(5)].

표3. 콘크리트 부재의 열물성치[(1),(4),(5)]

	압축강도 (MPa)	함수율 (%)	열전도율 (W/m · K)				밀 도 (g/cm^3)				비 열 (kJ/kg · K)			
			20℃	200℃	400℃	600℃	20℃	200℃	400℃	600℃	20℃	200℃	400℃	600℃
PC-25	89	3.2	1.44	0.92	0.78	0.65	2.341	2.285	2.235	2.198	0.93	1.25	1.23	1.23
PC-55	36	3.4	1.25	0.90	0.73	0.64	2.253	2.190	2.160	2.122	0.91	1.18	1.18	1.18

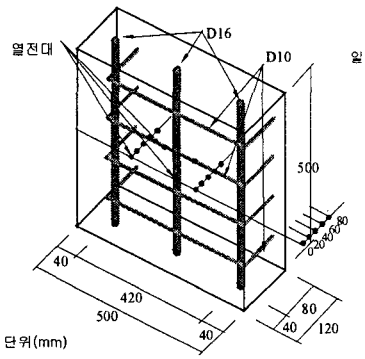


그림1. 시험체 형상

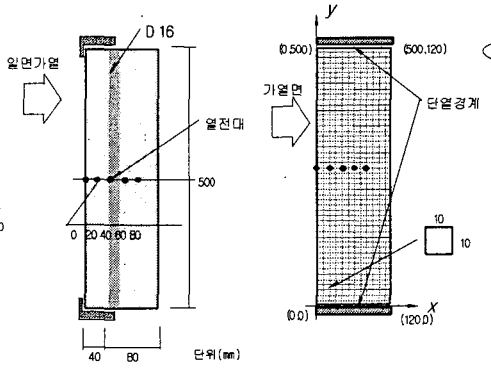


그림2. 해석부재의 조건

3. 실험결과 및 고찰

3.1 입사열 및 내부온도 변화

입사열의 측정은 대류와 복사에 의한 수열량의 합으로 측정하였으며, 가열시간의 경과와 더불어 시험체에의 입사열도 증가하였다. 표준화재곡선에 의한 가열 개시 후 급격한 온도상승에 따라 시험체에 입사한 입사열도 급격하게 증가하였으나 시험체에 따른 차는 보이지 않았다. PC-25, 55 시험체의 표준가열곡선에 의한 온도변화를 그림3에 표시하였다. 시험체 모두 폭렬 등에 의한 단면결손이 보이지 않아 내부온도는 가열시간의 경과에 따라 서서히 상승하였으나, 2시간 가열후의 주근의 온도는 500℃ 이하로 주근까지 열화깊이가 달하지는 않았다. 시험체는 가열면에서 멀어질수록 100℃에서의 온도정체가 길어졌으며 이러한 수분의 상태변화에 따른 온도정체는 내화성능에 유리하게 작용하리라 판단되지만 급격하게 상변화하는 경우는 단시간에 수증기압이 증가하므로 폭렬을 유발할 수 있다. 동일 깊이에서의 온도변화는 강도에 상관없이 약간의 차는 보였지만 거의 동일한 온도분포를 보였다.

3.2 전열해석 결과와의 비교

콘크리트 부재의 온도분포는 고온시의 열물성치를 고려하여 적용하였으므로 콘크리트 부재의 강도에 상관없이 계산치와 실험치가 거의 일치하는 결과를 보였다. 가열개시 후 약 20~30분경의 가열면에서 20~40mm위치의 온도분포에서 다소 차를 보였으며 PC-25의 경우가 약간 높은 결과를 보였다. 철근의 피복두께인 40mm를 전후로 콘크리트의 표층부에서는 계산치가 약간 높은 경향을, 반대면은 실험치가 약간 높은 경향을 보였다. 콘크리트 부재를 모델화하여 고온시의 열물성치를 고려한 결과, 비교적 정확한 온도치를 얻을 수 있었으며 후속 연성해석에의 영향을 미칠만한 요인은 없었다. 실험치와 계산치의 상관관계로부터 단면손실이 발생하지 않는 경우, 고강도콘크리트도 일반콘크리트와 동일하게 내화성능의 검증이 가능하다. 또한 콘크리트 부재의 급격한 온도구배는 열응력 및 수증기압의 생성,

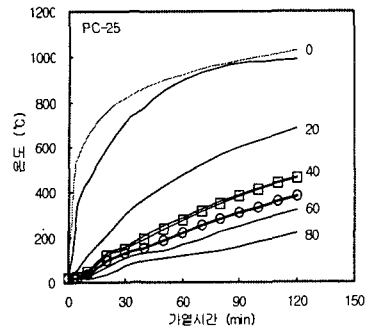


그림3. 부재의 온도변화

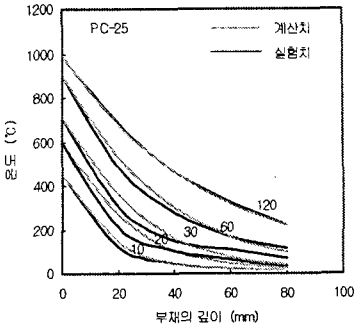


그림4. 부재모델의 온도분포

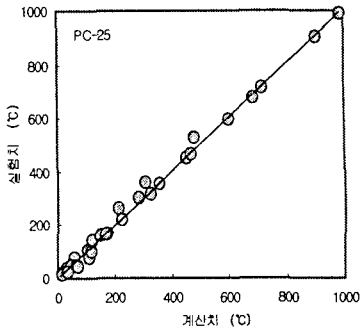
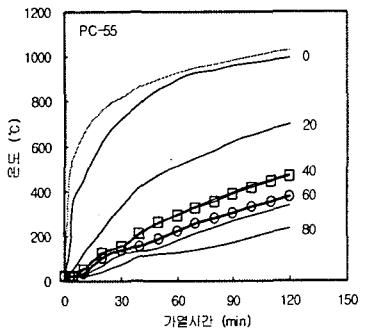
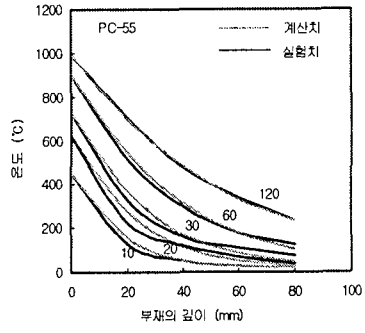
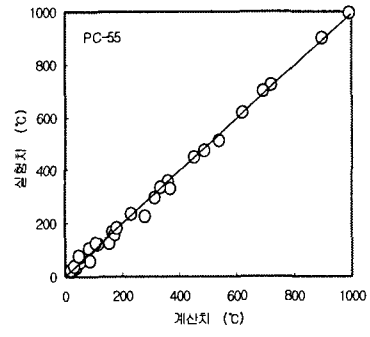


그림5. 실험치 및 계산치와의 관계







폭렬에 의한 단면결손과 밀접한 연관을 지니므로 단면결손에 의한 성능저하를 고려한 연성해석 모델의 개발이 필요하다.

3. 결론

1. 표준화재곡선에 의한 2시간 시험결과 주근의 온도는 모두 500℃이하이며 표층부에서 멀어질수록 100℃에의 상변화에 의한 온도정체는 길어진다.
2. 콘크리트 부재 모델의 계산치와 실험치는 거의 일치하였으며 표층부는 계산치가 약간 높았으나 후속해석에의 영향을 미칠만한 정도는 아니다.
3. 고온시의 열물성치를 고려하여 정밀도 높은 온도분포를 예측하기 위해서는 부재를 구성하는 재료의 열물성치에 관한 데이터 축적이 필요하며, 단면결손에 의한 온도상승의 정량적 평가가 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. 森 實, 建築材料の火災時における高溫性狀に關する研究, 博士學位論文, 東京大學, 1975
2. 原田和典, コンクリート壁の耐火性能に及ぼす調合と含水率の影響, 日本建築學會構造係論文集, pp145~151, 1996.3
3. 松本 衛, 建築壁体における熱·水分の同時移動および水分蓄積に關する研究, 京都大學博士論文, 1988
4. 伝熱工學資料, 改正第4版, 日本機械學會
5. Ulrich Schneider; Behavior of Concrete at High Temperatures, Berlin, 1982
6. ANSYS Thermal analysis guide