

특 집

철근콘크리트 구조물의 피복두께

콘크리트의 피복두께와 내화성 Concrete Cover & Fire Resistance



박현준*



권영웅**

1. 서 언

표현할 수 있다.

1.1 일반사항

1.2 규제사항

화재로 인한 피해는 대단히 큰데, 특히 인명과 재산의 손실 및 직·간접적인 서비스 시설의 붕괴, 사업장의 파손, 무역거래의 장애등 많은 결과를 초래한다. 이것을 경제적으로 환산하면 실질적인 화재 피해는 천문학적인 결과를 낳는다.

화재시에 콘크리트구조물에서 문제가 되는 현상은 급격한 온도상승에 따르는 폭열(爆裂), 온도응력에 기인하는 부재의 파괴, 콘크리트와 철근의 강도 및 탄성계수의 저하에 따르는 부재의 처짐 등이다.

콘크리트의 내화성은 화재로부터 보호되고 화재에 견디는 재료적 특성을 말한다. 한편, 구조물의 내화성능은 어떠한 한계상태에 도달하지 않고 화재의 영향에 저항하는 부재성능의 수단이라고

일반적으로 화재 발생시 콘크리트 구조물의 법적 규제사항으로는 (1) 점유 형태에 따른 시공상의 내화성 정도 (2) 재산에 있어서의 점유위치 (3) 바닥면적, 층고, 용적률 그리고 저장물들을 구체적으로 명기하고 있다. 또한, 가까운 소방서나 소화전으로부터 건물까지의 거리, 스프링클러의 설치 및 유사한 능동적인 수단도 때때로 매우 중요한 사항으로 취급된다. 화재에 대한 법적 규제사항은 국가마다 각각 다르다.

우리나라는 화재에 노출된 구조체 또는 구조부재에 대해 내화성능을 판정하는 방법으로서 KS F 2257의 '건축에서 구조부분의 내화시험방법' 표준온도-시간곡선을 제안하고 있다. 이는 온도곡선에 상응하는 내화용재료가 소정의 성능을 만족

* 정회원, (주)합 건설방재기술단 연구원

** 정회원, 인천대학교 건축공학과 교수

하고 있는나의 여부를 판단하는 내화성능의 척도를 말한다.

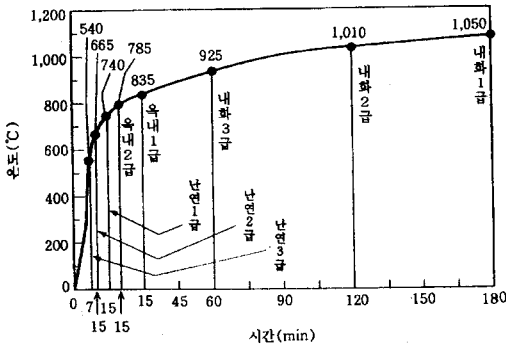


그림 1 표준가열온도-시간 곡선(KS F 2257)

내화설계의 기본은 화재하에서도 구조물이 하중에 대해 견딜수 있어야 하며, 나아가 화재후에도 재사용이 가능할수 있게 하는데 있다. 이러한 조건을 만족하는 재료와 공법을 선택하는 것은 매우 중요한 일이다.

2. 화재하의 구조거동

휨부재는 구속되지 않으면, 팽창이 저항없이 발생할 수 있으며, 또한 구속력이 없으므로 반력도 없다. 온도가 상승함에 따라 콘크리트와 철근의 강도는 계속적으로 감소한다. 철근의 온도가 증가하는 범위는 콘크리트내에서의 철근 위치, 화재의 세기(fire severity), 노출 표면수, 그리고 사용된 콘크리트의 열전도 특성에 따라 결정된다.

연속 휨부재에서는 열적 차이 때문에 모멘트 재분배가 빠르게 일어나고, 이때 상부철근의 항복과 지점이 소성화될 때까지 하향 처짐이 발생한다. 처음에는 노출면으로부터 떨어져 있는 상부철근은 거의 본래강도를 유지한다. 하지만, 중앙부의 정(+)모멘트로 인해 지점에서 부(-)모멘트가 증가하여 철근이 충분하게 연속되지 않고 변곡점에서 변화를 가지면, 화재로 인한 균열은 초기 파괴하중으로 작용한다. 그러나, 지점에서 상부철근이 연속적이고도 충분한 정착길이를 가지면, 막인장상태(membrane tension state)나 서스펜션 효과하에서도 상당한 저항력을 가진다.

기둥의 과도한 횡이동은 지붕과 기둥상부 바닥

에 팽창을 발생시킨다. 기둥에서 일종의 힌지를 형성한 후, 상대적으로 휘지 않으면 이러한 횡이동은 전단비틀림으로 인해 기둥에서 매우 큰 응력을 야기하며, 마침내 파괴한다.

열전달과 열전도에 대해 콘크리트 단열 성능은 사용된 골재의 형태에 따라 매우 다르다. 석회질계나 경량골재는 열전도가 매우 낮고, 일반 골재보다는 확산성이 좋으며 규산질계 골재와 유사하다. 고온에서 석회질계는 균열과 박락을 일으키는 물리적이고 화학적인 변화에 매우 적은 영향을 받는다. 또한, 고온에서 압축강도는 경량골재나 탄소질계 콘크리트의 경우와 마찬가지로 감소한다.

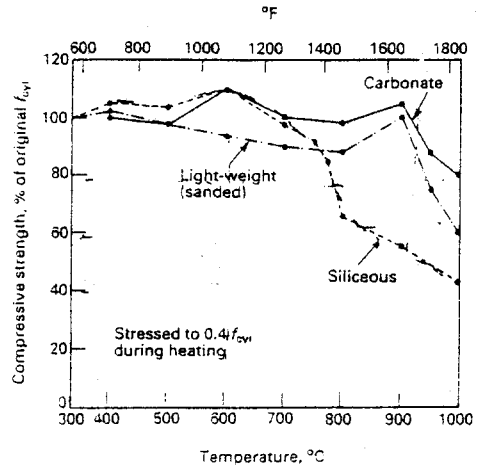


그림 2 온도에 따른 콘크리트 강도

내화성은 일반적으로 실험이나 국부적인 요소에 전도되는 실험 결과의 해석에 의해 평가된다. 전체 구조체의 성능평가는 종종 국부적인 부재의 그것과 다를 수 있다. 이것은 다양한 부재의 부적합한 상호작용과 하중 전달의 경로가 다를수 있기 때문이다. 따라서, 단면상세는 구조체의 내화등급을 결정하는데 있어서 매우 중요하다.

3. 구조재료 특성

3.1 일반사항

화재시 철근콘크리트 구조의 거동은 고온에서 구성재료의 특성에 영향을 받는다. 콘크리트와 철

근은 열효과에 의해 강도와 물리적 성질 및 강성에 상당한 변화를 보이며, 냉각후에도 약간의 변형을 남기게 마련이다. 특히 규산질계 콘크리트는 열로 인한 화학적 변화도 일어날 수 있다.

3.2 콘크리트

콘크리트의 내화성은 배합, 시공 정도 등에 따라서 다소의 차이는 있지만, 각종 건축 재료 중에서 내화성이 가장 뛰어난 재료 중의 하나라고 할 수 있다.

콘크리트는 골재와 콘크리트 매트릭스로 구성되어 있는 복합재료이다. 고온에서 이러한 복합재료는 각각 또는 전체적으로 콘크리트의 거동을 상호 억제한다.

온도의 상승은 골재의 팽창과 매트릭스의 수분증발에서 오는 건조수축에 의해 어느정도 보상된다. 그러나, 화재로 인한 팽창이 남게 되는데, 이는 콘크리트의 내부균열을 발생시키고 강성을 저하시킨다. 이러한 현상은 골재의 형태에 따라 상당히 다르고, 규산질계 골재를 갖는 콘크리트는 고온(575℃ 이상)에서 갑작스런 체적 팽창을 하여 때때로 골재의 쪼갬과 박락을 야기한다.

경량골재와 석회질계 골재를 사용한 콘크리트는 모두 낮은 열전도성을 가지고 있고, 그 결과 화재에 노출된 이후에는 규산질계 골재를 사용한 콘크리트보다 온도상승이 더 작다.

경량골재 콘크리트는 500℃까지 본래강도(20℃에서의 강도)를 유지한다. 그후, 강도감소가 일어나고 800℃에서는 본래강도의 40%만을 유지한다. 보통콘크리트(규산질계를 사용한 콘크리트)의 강도 감소는 350℃에서 시작되고, 800℃에서 본래강도의 20%정도 유지한다. 석회질계 및 탄소질계 골재 콘크리트의 경우, 강도 감소는 경량골재 콘크리트와 비슷하다. (그림 3)

콘크리트의 탄성계수 E 값은 온도가 증가함에 따라 급격히 감소되는데 특히 높은 W/C를 가진 콘크리트의 경우 더욱 심하다. 또한, 습윤양생된 시편은 일반적으로 공기중에 양생된 시편보다 더욱더 감소가 심하다.

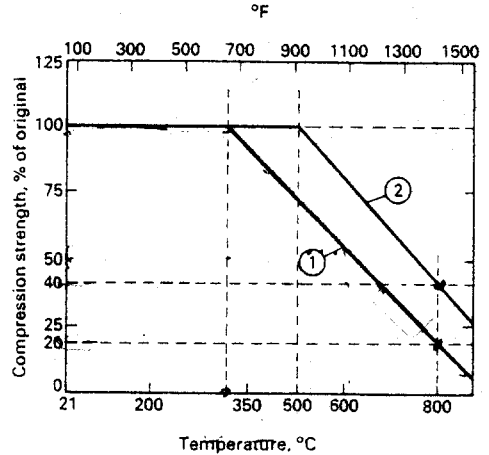


그림 3 온도에 따른 이상화된 콘크리트 강도

콘크리트 크리프는 고온에서 속도가 빠르게 증가하고, 재령 및 습기량, 콘크리트 강도와 형상 그리고 응력/강도 비에 영향을 받는다. 화재시 노출시간이 길면 길수록 부재의 변형은 상당히 커진다. 반면에, 열과 다른 응력은 완화되고 열에 의한 구속력으로 인해 발생한 추력(推力, thrust)의 크기를 쉽게 판단할 수 있다.

일축압을 받는 콘크리트의 응력-변형곡선은 상승된 온도에서 일반적인 형태와 같지만 최대 응력값의 경우에 변형 범위는 길게 나타난다. (그림 4)

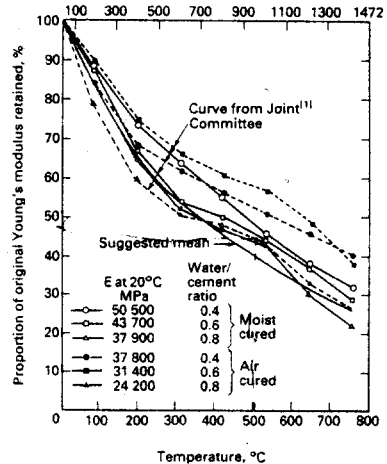


그림 4 온도에 따른 콘크리트 E 값

3.3 철근

동일한 콘크리트에서의 철근이라도 온도의 증가에 따라 강도가 손실된다. 손실의 크기와 손실율은 철근의 형태와 철근의 제조 과정에 따라 결정된다. 연강과 열간 압연 고장력 철근은 대략 600°C에서 항복응력이 상온(20°C)에서의 50% 정도 유지한다. 그러나, 대략 300°C까지는 항복응력이 상온보다 약간 높게 나타난다. 냉간압연 고장력 철근의 경우는 일반 항복응력의 50% 정도의 감소가 550°C에서 일어난다. 300°C에 이르기까지 강도상승은 적게 일어난다.

철근의 탄성계수는 600°C까지 점차적으로 상온의 80%까지 감소하지만, 그 이후 감소율은 급격히 커진다. 철근의 E 값의 변화는 실질적으로 모든 형태에 대해 같다.(그림5)

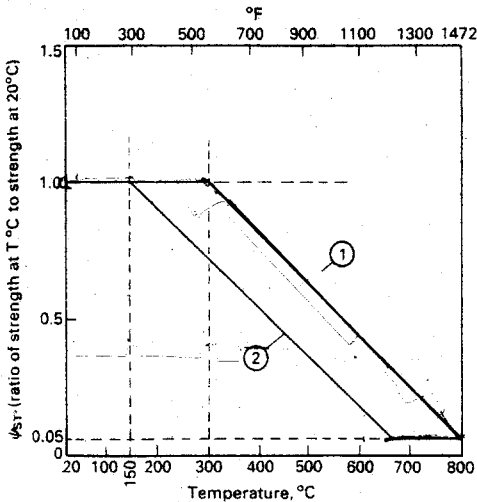


그림 5 온도에 따른 철근의 강도-항복응력

4. 콘크리트 부재의 온도분포

콘크리트 부재 단면에 있어서의 온도분포는 콘크리트 부재의 내화성을 평가하는데 필요하다. 온도분포는 노출된 부재의 기하학적 형상, 화재의 세기, 콘크리트에 사용된 골재의 형상에 따라 결정된다. 또한, 함수량과 콘크리트의 수분증발(moisture-vapour movement)에 따라서도 좌우된다.(그림6, 그림7, 그림8)

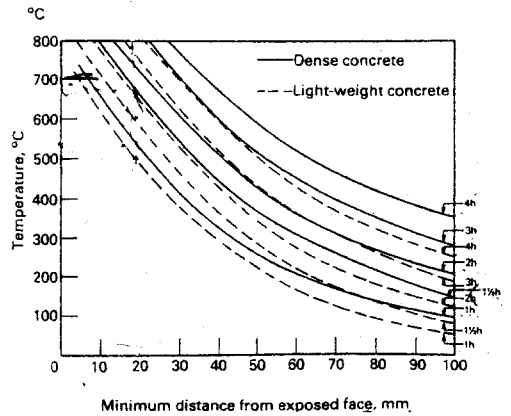


그림 6 슬래브 온도 분포

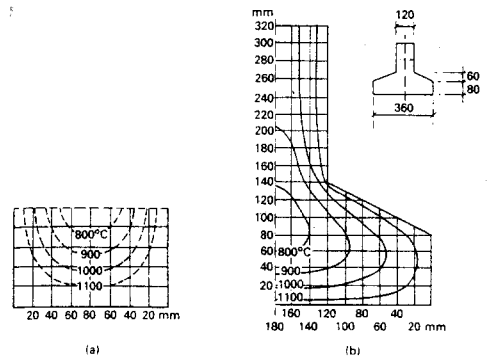
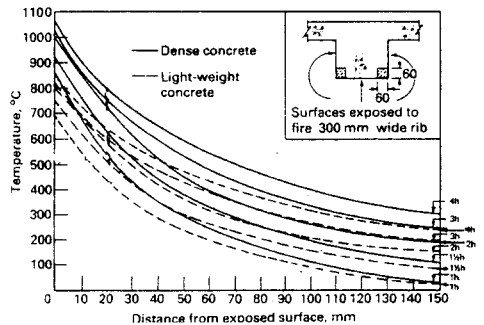


그림 7 2시간 노출후의 온도 분포
(a)T-형보의 단면 (b)I-형보의 단면



<빋금친 부분은 10%정도 더 높다>
그림 8 보의 온도분포

5. 내화설계법

5.1 실험에 근거를 둔 설계

콘크리트 부재들의 내화성은 다음의 영향을 받는다.

- (a) 부재의 크기와 모양
- (b) 철근의 종류와 상세 및 재질
- (c) 하중지지 조건 및 가력 방식
- (d) 콘크리트와 골재의 종류
- (e) 단부 및 지점 조건
- (f) 피복두께

위의 모든 변수들을 동시에 평가하는 것은 불가능하며, 보통 모형실험을 통해 반영한다.

5.2 표를 이용한 설계

대부분 국가들의 규준은 화재 온도시간에 따라 구조 부재들의 피복두께 및 최소치수를 규정하고 있다. 이러한 방법은 내화성을 검토하고 설계하는데 가장 빠른 방법이다. 그러나, 이러한 방법에는 예외를 인정하지 않으며, 결과적으로 개개 편차들을 고려하기가 불가능하다.

5.2.1 BRE 권장사항

표1은 BRE가 추천하는 내화설계 도표로서 콘크리트구조물에 적용되며, 시공상에 있어서 전체적인 편차범위를 단순한 도표로 나타내고 있다.

5.2.2 FIP-CEB 보고서

FIP-CEB는 최소피복과 폭은 철근콘크리트와 프리스트레스트 부재간에 구별없이 만들었으며, 온도상승에 따른 프리스트레싱 와이어와 스트랜드간의 강도손실 비율은 철근의 강도손실에 비해 상당히 높다. 특히, 경량골재 콘크리트의 경우 FIP-CEB규준은 매우 안전하다.

FIP-CEB의 표에서의 특이한 점은 단면의 폭이 증가함에 따라 혹은 내화성능시간이 동일함에 따라 피복의 감소를 보인다.

5.2.3 PCI 지침

PCI는 기둥이나 벽체를 제외한 표의 본질적인

표 1 BRE의 구조부재의 내화최소치수와 피복두께

부재	단부 조건	최소치수 (mm)	내화시간				
			4시간	3시간	2시간	1½시간	1시간
완전 노출 기둥		폭	450	410	300	250	200
		피복	35	35	35	30	25
50% 노출 기둥		폭	350	300	200	200	160
		피복	35	30	25	25	25
한쪽면 노출 벽체		폭	240	200	160	140	120
		피복	25	25	25	25	25
보	단순 지지	폭	280	240	200	150	120
		피복	80	70	60	40	30
	연속	폭	240	200	150	120	80
		피복	70	60	50	35	20
바닥 하부면	단순 지지	폭	170	150	125	110	95
		피복	55	45	35	25	20
	연속	폭	170	150	125	110	95
		피복	45	35	25	20	20
개구부가 있는 바닥 하부면	단순 지지	두께	150	135	115	105	90
		폭	175	150	125	110	90
	연속	두께	150	135	115	105	90
		폭	150	125	110	90	80
		피복	55	45	35	25	20

표 2 FIP-CEB의 보통콘크리트 구조부재의 내화최소치수 및 피복

내화시간	최소치수 (mm)	내화시간				최소폭부 (mm)
		4시간	3시간	2시간	1½시간	
½시간	폭	80	120	160	200	80
	피복	25	15	10	10	
1시간	폭	120	160	200	200	100
	피복	40	35	30	30	
1½시간	폭	150	200	280	400	100
	피복	55	45	40	35	
2시간	폭	200	240	300	500	120
	피복	65	55	50	45	
3시간	폭	240	300	400	600	140
	피복	80	70	65	60	
4시간	폭	280	350	500	700	160
	피복	90	80	75	70	

결점 때문에 미국에서는 그다지 사용되지 않는다.

PCI 지침에서 프리스트레스트 연속보의 경우, 중심에서 가까운 곳까지 일정하게 유지하였고, 피복과 폭에 관한 영향은 상당히 감소시켰다. 즉 짧은 간격을 유지하고 있는 연속보의 내화성능은 비슷한 조건에서 연속보의 간격이 긴 경우보다 매우 높게 책정하고 있다.

5.3 경험에 의한 방법

경험에 의한 방법은 위에서 언급한 2가지 방법 (실험과 표를 이용하는 방법)과 거의 유사하다.

이는 실제경우에 있어서 실험에 사용된 재료나 경계조건, 지지조건 및 하중의 변화에 의한 평가를 제한하며, 특별한 부재에서의 실험에 근거를 둔 표나 실험결과에 따라 평가를 내린다.

5.4 해석적 접근방법

모든 조건을 합리적으로 가정하거나 알고 있을 때, 부재의 내화성은 해석적 기법으로 확실히 계산할 수 있다. 철근콘크리트 부재의 온도분포를 얻기 위해서는 상승온도, 화재에 대한 노출상태, 부재 구성재료 및 다른 구조적 특성을 고려한 수치해석 방법이 이용된다. 이러한 해석적 방법의 장점은 표를 이용한 한계를 극복할 수 있고, 개개의 조건 및 상세와의 상관관계를 고려할 수 있어 더욱더 현실적인 평가가 가능하다.

설계원리의 응용이나 해석방법은 아직도 주로 휨부재(보 및 슬래브)에 한하여 한정되어 있으며, 휨부재의 파괴는 인장철근의 항복에 의해 결정된다. 그러나 지금까지는 기둥과 벽체와 같이 압축이 지배적인 구조부재는 수치해석 방법이 정립되어 있지 않다.

5.4.1 휨부재 설계의 권장사항

Concrete Society와 Joint Committee of the Institution of Structural Engineers에 의해 주어진 Interim Guidance는 휨부재에 일어날 수 있는 모든 파괴모드에 대한 이해와 내화성에 대한 설계방법을 제안하고 있다. 구조부재는 국제적인 규준에 맞게 상온에서의 수직하중과 횡하중에 대해 먼저 고려하고, 내화성에 대해 나중에 검토한다. 극한한계상태는 내화설계의 경우에만 고려한다.

5.4.2 ACI 216에 의한 내화설계

Committee 216에서 제안하고 있는 방법은 ACI 318의 극한강도설계법에 기초를 두고 있다. 이 방법은 휨강도에 한하여 적용하고 있다. ACI Building Code에서는 재료에 대한 부분적인 안전계수는 없지만, 계산된 저항력은 감소계수를 곱해 사용하고 있다.

내화설계의 경우, 하중은 고정하중이나 활하중

의 어느쪽의 경우에도 어떠한 계수없이 실제사용하중을 가정하여 사용한다.

실제실험에 근거를 둔 일련의 곡선은 노출후 문헌 철근에서의 온도와 피복사이의 상관관계가 주어져 있다. 슬래브의 경우 그림6과 비슷하게 나타난다. 차이가 나는 보의 경우는 온도분포에 대해 다양한 폭을 가진 콘크리트 단면에 따라 확실한 노출후 임의점에서 온도를 평가해 도표화하고 있다. 또한, 압축역에서의 콘크리트 강도감소를 그림1로 얻고 있으며, 나아가 평균온도분포로 판단하고 있다.

6. 박락

박락은 열에 노출된 콘크리트 표면이 파손되어 떨어져 나가는 것을 말한다. 이러한 현상은 화재로 인해 보호된 표면의 손실로 철근이 노출되고, 극한상태에서는 강도의 약화를 촉진하기 때문에 실험 및 실제 화재하에서의 급속한 파괴상태에서는 예상할 수 없다.

박락은 석회암과 가공된 경량골재들과 비교해 보면, 규산질계 골재에서 자주 발생한다.

박락은 대개 3가지 유형으로 분류할 수 있다.

(a) 폭발성 박락: 이것은 통상 열을 가하는 초기단계 및 화재후 처음 30분이내에 자연적으로 일어난다. 이러한 것은 아무런 경고 없이 갑자기 일어나 모든 부재를 완전히 파괴할 수 있다.

(b) 국부적 박락: 이러한 종류의 박락은 국부적인 표면 또는 외부의 모서리부분에서 일어나는 재료의 탈락을 말한다. 이것은 때때로 심하게 그리고 광범위한 손상을 일으킨다.

(c) 벗겨짐 : 이것은 고온에서 단면 감소의 점진적인 단계, 표면층의 주구조와 분리현상으로 나타난다. 따라서 이러한 단면은 강도와 강성을 떨어뜨린다.

박락의 정확한 원인은 아직 명확히 밝혀지지 않고 있지만, 개개 및 복합적 요인에 기인한다고 알려져 있다. 다음은 박락을 일으키는 원인으로 볼수 있다.

(a) 열을 받았을 때 임의 형태의 골재가 물리적, 화학적 변화로 인해 체적팽창을 하는 것을 들 수 있다.

(b) 작용하중이나 프리스트레스를 통해 콘크리트 압축응력과 결합하여 수증기 팽창 때문에 생기는 간극압에 의해 발생한다.

(c) 균질하지 않은 단면의 온도분포로 인해 생기는 부수적 응력, 열구축 및 팽창에 의한 매트릭스와 골재와의 불완전성에 의해 발생한다.

구산질계 골재를 사용한 콘크리트는 용적의 5%, 경량골재 콘크리트는 용적의 35%이하의 함수량에서 폭발성 박락을 방지할 수 있다고 한다. 따라서, 콘크리트 함수량을 조절하고 표면에 약간의 보강재를 추가하면 박락의 위험을 감소시킨다.

7. 단면상세

콘크리트구조의 내화성능은 단면상세에 의해 지배를 받으므로 단면상세의 중요성은 아무리 강조해도 지나치지 않는다.

전통적으로 권장되고 있는 단면상세는 다음과 같다.

(a) 하중 지지부재에 대해 적절한 지압면적의 설치 조항, 특히 프리캐스트부재.

(b) 적절히 정착이 된 지점 상부에 하부철근을 충분히 연결(단순보의 경우 적어도 경간 길이의 50% 또는 연속보의 경우 30%).

(c) 지점에서 철근지름×12 또는 유효단면깊이 중 큰 값만큼 묻힘길이를 갖는 상부철근.

(d) 적절히 정착된 횡철근의 조항(고강도철근의 경우 0.12%, 연강철근의 경우 0.2%).

(e) 전체구조체가 함께 거동할 수 있는 모든 부재와 상호 연결된 수평 및 수직방향에서의 적절한 묶음철근의 배근 조항.

상온에서는 비록 훌륭한 상세라고 할지라도 화재시에 저항하려면 화재에 대비한 부가적 고려사항이 필요하다. 고온에서는 콘크리트의 부착강도가 상당히 감소한다. 따라서, 철근을 정착할 필요가 있고, 특별한 경우 정확한 단부정착보다 묻힘길이를 규정하는데 더 신중하여야 한다. 또한 박락이 발생하는 곳에는 겹침이음이 필요하다. 화재가 매우 민감한 부분은 나선형으로 이음하는 것이 권장 되고 있는데, 이는 국부적인 박락후에도 구조체가 하중에 견디기 때문이다.

9. 결 언

국가 경제가 발전하고 공업화가 되면 될수록 화재 발생의 빈도와 그 피해 정도는 점차로 증가하는 추세를 보이고 있다. 특히, 구조적으로 많이 사용되고 있는 철근콘크리트는 화재라고 하는 특수환경하에서 예외없이 사용되고 있다. 지금까지 우리는 화재에 대한 철근콘크리트의 내화성능을 향상시킴에 있어서 콘크리트의 피복두께 영향과 그 중요성을 알아보았다.

이렇듯, 화재시 구조적으로 불리한 변형, 파괴, 박락 및 중성화 촉진등으로부터 화재하에서도 하중에 대해 견딜 수 있고 화재후에도 재사용이 가능하게 하는 철근콘크리트의 최소피복두께를 확보하는데 관심을 기울여야 할 것이다.

참고문헌

1. F.K.Kong, R.H.Evans, CBE and E.Cohen, F.Roll, "Handbook of Structural Concrete", Pitman, Vol.1, 1983, pp.14.1-14.6
2. Mark Fintel, "Handbook of Concrete Engineering", Van Nostrand Reinhold Company, 1974, pp.252-267
3. 대한건축학회, "철근콘크리트구조", 기문당, 1998, pp.122-163
4. 한국산업규격, "건축 구조 부분의 내화 시험 방법 KS F 2257", 한국공업진흥청, 1993. 