

철근콘크리트 구조물의 피복두께

콘크리트의 피복두께와 철근부식

Concrete Cover & Corrosion of Steel Bar



유환구*



안태송**



김국한***



정영수****

1. 서 언

철근콘크리트 구조물은 시멘트의 강알칼리성으로 인해 일반적인 자연환경 하에서는 강한 내구성을 갖고 있다. 따라서 이러한 환경 하에 놓여 있는 철근의 경우에는 철근 주위에 미세한 산화막(Passive Oxide Layer : 부동태 피막)이 형성되어 철근부식을 막아 준다. 또한 철근 주위를 둘러싼 콘크리트는 산소, 물 및 부식에 유해한 이온의 침투를 차단하기 때문에 철근부식을 방지해 준다.

이론적으로는 콘크리트는 철근부식 방지에 우수한 재료임에는 틀림없다. 그러나, 실제 현장에서 보여지는 철근부식은 콘크리트의 역할에 의문

을 가지게 만든다. 철근의 부식이 발생하는 경로는 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫째는 시공적인 측면에서 시방서에서 규정한 피복두께를 확보하지 못하여 발생하는 경우이며, 둘째는 콘크리트의 내구적인 측면에서 염화물 침투, 중성화 등에 의해서 발생된다. 이중 철근부식에 직접적인 원인은 콘크리트의 부식방지 역할이 손실되기 때문이다. 흔히 내구성 손실이라 하는데 콘크리트의 중성화는 일반환경 하에서도 발생되며 철근의 부식에 있어서 대표적이며 중요한 역할을 한다. 철근부식의 단계는 두 가지 단계로 나눌 수 있는데, 첫째 단계는 콘크리트의 pH 값이 9 이하로 낮아지는 단계이며 둘째 단계는 외부에서 유해한 이온의 침투에 의해 철근 주위의 산화막이 파괴

* 정회원, 한국도로공사 도로연구소 연구원

** 정회원, 한국도로공사 도로연구소 수석연구원

*** 정회원, 한국도로공사 도로연구소 책임연구원

**** 정회원, 중앙대학교 건설대학 토목공학과 교수

되고 철근부식이 유발되는 단계이다.

상기 원인이외에도 철근부식을 유발하는 영향 인자는 여러 가지가 있지만 본 기사에서는 철근의 피복두께와 철근부식의 관계에 대해서 살펴보고자 한다.

2. 철근부식의 개념 이해

2.1 철근부식의 정의

철근의 부식을 정의하기 위해서는 우선 금속 화학적인 접근이 필요하다. 철근은 광물을 이용하여 만든 금속이다. 철근이 광석화합물 상태에서 금속으로 되기 위해서는 외부로부터 에너지가 필요하다. 즉, 에너지 준위가 낮은 광석은 외부로부터 에너지를 받아 에너지 준위가 높은 금속 상태로 존재하게 된다. 그러나 자연상태에서는 에너지 준위가 낮을수록 더욱 안정하므로 금속은 외부로 에너지를 방출하려는 성질을 가지고 있다. 이와 같이 에너지 준위가 높은 물질에서 에너지 준위가 낮은 화합물로 되돌아가는 과정에서 물질 자체가 변질되거나 혹은 물질의 특성이 변질되는 것을 부식이라고 한다. 부식은 화학적 반응에 의한 부식, 전기 화학적 반응에 의한 부식 및 물리적 반응에 의한 부식이 있으며 철근의 경우에는 전기 화학적 반응에 의한 부식에 해당된다. 간단히 정리하면 부식은 "물질이 주위 환경과 반응하여 물질 자체가 변질되거나 혹은 물질의 특성이 변질된 것"을 말한다.²¹⁾

2.2 철근부식의 메카니즘

철근의 부식 메카니즘은 전기 화학적 반응에 의한 부식으로써, 전기 화학적 반응이란 전자의 이동이 포함된 화학반응이다. 이러한 전기 화학적 반응에 의해 부식이 일어나기 위해서는 필수적으로, 양극(Anode, ⊕), 음극(Cathode, ⊖), 전류경로(Electronic Path), 전해질(Electrolyte: 이온경로), 폐쇄회로(Closed Circuit)가 구성되

어야만 한다. 이와 같이 구성된 조합을 부식전지(Corrosion Cell)라고 부른다. 이 부식전지는 음극-전류경로-양극-전해질을 따라 전류의 흐름이 생기며, 전류의 흐름에 따라 양극과 음극반응에 의해 양극, 즉, 철근에서 부식이 발생한다.

철근콘크리트 구조물에서의 철근의 경우, 철근 표면의 부동태 피막이 파괴될 경우 폐쇄회로가 구성되어 위의 5가지 부식조건에 노출되게 된다. 즉 부동태 피막이 파괴되면서 폐쇄회로가 구성되어 부식전지(Corrosion Cell)가 형성되게 된다. 따라서 철근부식 메카니즘은 철근 표면의 부동태 피막 파괴와 직접적인 관계를 가진다.

부동태 피막은 두께 20~60Å 정도의 수산화화물($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)로 구성된 얇은 산화피막으로 형성되어 있다.¹⁷⁾ 콘크리트의 알칼리도가 저하하거나 혹은 콘크리트 속에 유해한 이온이 침투되면 철근 주위의 부동태 피막은 파괴되면서 활성상태가 되어 부식이 진행된다. 철근의 부동태 피막을 파괴하는 유해한 성분으로는 할로겐이온(Cl^- , Br^- , I^-), 황산이온(SO_4^{2-}) 또는 황화물(S^{2-}) 등의 음이온이 있으며 이들 중 염화물 이온(Cl^-)은 콘크리트 속의 철근 부식에 가장 유해한 이온이다. 그림1은 철근의 부식이 발생하는 과정을 모식화한 것이다.

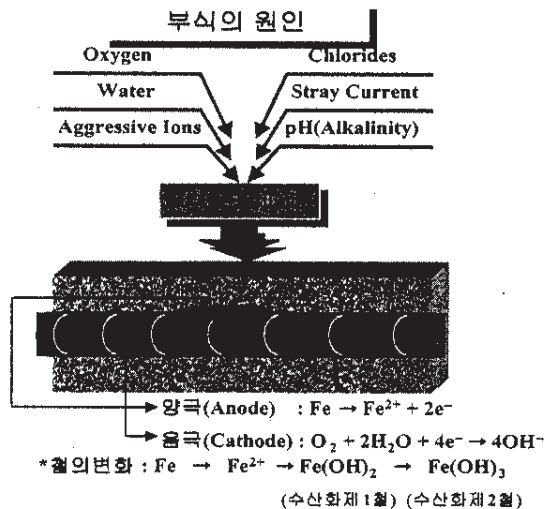


그림 1 철근의 부식 메카니즘 모식도
일단 철근이 활성 상태에 들어가면 철근은 물과 용존 산소의 작용으로 부식을 일으키게 되는

데 전류의 흐름에 따라 다음과 같은 양극반응과 음극반응에 의해 양극에서 부식이 일어난다.

- 양극반응(Anode Reaction)
: $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$
- 음극반응(Cathode Reaction) :
: $O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$
- 전체반응(Total Reaction)
: $2Fe + O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Fe^{2+} + 4OH^{-} \rightarrow 2Fe(OH)_2$

철근의 표면에서는 철이 이온화되는 양극반응(산화반응)이 발생하고 산소가 환원하는 음극반응(환원반응)이 발생하여 부식전지를 형성하게 된다. 양극반응과 음극반응은 철근의 표면에서 동시에 발생하게 되며 콘크리트 내부에 철근보다 에너지 준위가 낮은 금속이 있다면 이때 이 금속에서 음극반응이 발생된다. 따라서 일반적으로 알려진 음극방식의 개념은 철근보다 에너지 준위가 높은 금속을 사용하여 철근을 음극으로 만들어 주는 것이다.

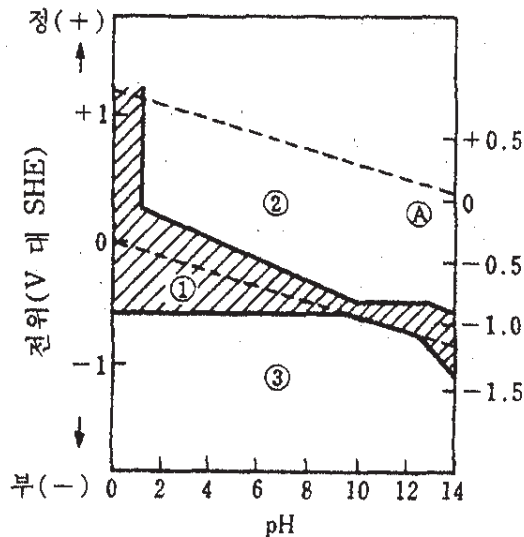
부식의 전체반응은 일단 수산화 제 1철($Fe(OH)_2$)이 철근 표면에 석출되면 이 화합물

은 용존 산소에 따라 산화하고 수산화 제 2철($Fe(OH)_3$)이 된다. 계속하여 이 화합물은 물을 잃어 수산화물($FeOOH$ 또는 Fe_2O_3 (붉은 녹))이 되고, 또 일부는 산화 불충분한 채 Fe_3O_4 (검은 녹)가 되어 철근 표면에 녹 층을 형성한다.

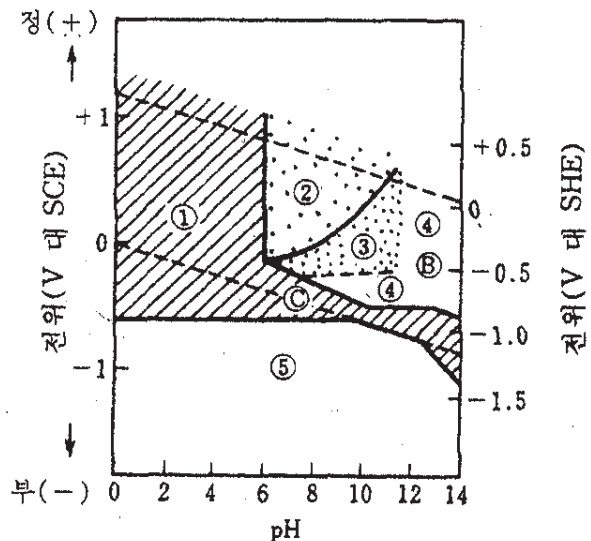
철근부식의 메카니즘을 이해함에 있어 보다 근본적인 관계는 그림 2와 같은 Pourbaix의 전위-pH도이다.¹¹⁾ 그림 2(a)에서 알 수 있듯이 전해질의 pH가 중성 및 산성으로 갈수록 부식 가능한 영역으로 들어갈 확률이 높아지며, 철근의 전위가 일정 값 이하일 경우에는 부식이 발생하지 않는 불활성 영역에 들어가게 된다. 또한 그림 2(b)와 같이 Cl^{-} 이 포함된 전해질에 철의 부식상태를 보면, 부식이 가능한 영역이 매우 확대됨을 알 수 있다. 그러나 부식이 발생하지 않는 불활성 영역은 그림 2(a)와 같다는 것을 알 수 있다.

따라서 모든 철근의 부식을 방지하기 위해서는 철근의 전위를 그림 2에서와 같이 불활성 영역에 위치시키는 것이 가장 확실한 방법이다.

2.3 철근부식의 영향인자



(a) Cl^{-} 를 포함하지 않은 경우
①전면부식, ②부동태, ③불활성(=전기방식)



(b) $Cl^{-}=355ppm$ 을 포함한 경우
①전면부식, ②공식, ③불완전부동태, ④완전부동태, ⑤불활성(=전기방식)

그림 2 철의 전위-pH도¹¹⁾

철근의 부식은 매우 많은 인자들에 의해 영향을 받게 된다. 이들 영향인자들을 효율적으로 분류하면 표1과 같다.

철근의 부식 메카니즘에서 알 수 있듯이 부식 발생의 직접적인 영향인자는 활성태 영역 존재 및 부동태 피막 파괴이다. 표 1에서 알 수 있듯이 누설전류에 의해 철근의 전위가 부식 가능한 영역에 존재할 경우 콘크리트가 아무리 건실하고 염화물 침투가 되지 않더라도 철근은 부식하게 된다. 또한 콘크리트에 균열이 발생되거나 유해물이 침투하고 중성화가 될 경우 철근의 부동태 피막 파괴는 가속화되며 철근부식은 촉진된다. 본 고에서는 이하 3장에서 피복두께와 철근부식에 대해 접근하고자 한다.

에 따라 피복두께의 크기를 결정해야 한다. 그런데 그 크기의 표준을 합리적으로 정하기 곤란하기 때문에 지금은 개정되었지만 1996년에 제정된 콘크리트표준시방서와 1999년 새로이 제정된 콘크리트구조설계기준(건설교통부)에서는 최소값을 정하여 사용하도록 하고 있다.^{15,16)}

철근의 부식측면에서 피복두께를 산정할 경우 기상작용 및 주위환경을 고려하여야 한다. 특히, 해수와 같은 염화물의 작용을 받으면 콘크리트는 쉽게 알칼리성을 상실하게 되고 곧 철근이 산화될 우려가 있으므로 피복두께를 크게 고려하여야 된다. 그런데, 상기의 콘크리트 구조설계기준은 어디까지나 구조물이 건전하다는 판단 하에 정해진 최소값이고 일단 구조물에 균열이 발생하였을

표 1 철근부식 영향인자

직접적인 영향인자	활성태 영역 (전위-pH도)	부동태 피막 파괴		
		콘크리트 균열	유해물 침투	중성화
1차 영향인자	누설전류유입			
2차 영향인자	<ul style="list-style-type: none"> ○ 콘크리트 비저항 ○ 전류공급관 위치 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 철근덮개 ○ 용력발생 여부 ○ 콘크리트 균열 특성 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 염소이온침투 ○ 염화물확산특성 ○ 콘크리트 치밀성 ○ 방청제 ○ 차단막 	<ul style="list-style-type: none"> ○ CO₂ ○ 습도(50%) ○ 공극속의 알칼리성

3. 피복두께와 철근부식

3.1 피복두께의 역할

피복두께(Cover)란 구조물 부재에서 최외단 철근의 바깥표면으로부터 콘크리트 표면까지의 길이로 정의된다. 철근을 소요두께의 콘크리트로 덮은 이유는,^{15,16)}

- 1) 철근이 부식되지 않도록 하고,
- 2) 콘크리트 구조물을 내화구조물로 만들며,
- 3) 철근과 콘크리트의 부착응력을 확보

하기 위해서 이다. 이중에서 가장 중요한 역할은 역시 철근의 부식을 방지하는 것이라 할 수 있다. 따라서, 설계자는 사용재료, 구조물이 받는 기상작용, 콘크리트 표면에 작용하는 유해한 물질, 부재의 치수, 구조물의 중요성과 시공의 정밀도 등

경우에는 철근의 피복두께의 역할에 대한 의문을 가져야 한다. 특히, 해양환경하에서는 철근의 최소 피복두께를 확보하였다 할지라도 구조물의 균열을 통한 염화물 침투는 철근의 부식을 초래할 것으로 판단된다.

3.2 피복두께에 대한 시방규정

철근 피복의 가장 중요한 역할은 기상이나 다른 영향으로부터 철근을 보호하는 것을 목적으로 한다. 그런데, 그 크기를 합리적으로 정하기 곤란하기 때문에 각국 시방서에서는 최소값의 표준으로 정하여 사용하고 있다. 공통적인 것은 구조물이 놓이는 외부환경을 고려하여 정하였으나 최소값의 산정기준은 불명확하다.

미국의 ACI-318의 경우는 구조물이 놓이는

환경조건에 따라 피복두께의 최소치를 정하도록 하고 있는데 이를 표2에 정리하였다.¹⁾

아울러, ACI에서는 흠에 접하거나 기상 노출되거나 혹은 부식환경에 놓인 프리스트레스트 콘크리트로서 허용인장응력을 초과하는 경우 최소 피복두께를 50% 증가시키도록 하고 있고, 플랜트 공장에서 제작된 프리스트레스트 콘크리트 부재에서 프리스트레스트를 주지 않는 철근의 최소 피복두께는 프리캐스트 콘크리트와 동일하게 적용하도록 요구하고 있다. 철근 다발의 최소 피복두께는 다발의 등가지름 이상이어야 하며 영구히 흠에 접하는 경우 3in 이상으로 하는 것을 제외하고는 2in 이상 하지 않아도 되도록 하고 있다.

부식성환경 혹은 혹한 노출환경에서는 피복두께를 적절하게 증가 시켜야 하며 수밀하고 공극이 적은 콘크리트로 보호하거나 다른 보호대책을

고려하여야 한다. 특히 이들 환경 하에서는 최소 공기량, 최대 물-시멘트비, 보통 혹은 경량콘크리트의 최소강도, 콘크리트중의 최대 염화물량 및 시멘트의 종류 등을 고려하여야 함은 물론이며, 추가적으로 피복두께에 대해서도 고려하여야 한다. ACI에서는 철근의 부식을 방지하기 위하여 철근콘크리트 벽체 및 슬래브의 경우 2in 이상, 기타부재의 경우 2.5in 이상을 추천하고 있고, 프리캐스트 콘크리트의 경우 벽체 및 슬래브의 경우 1.5in 이상, 기타부재의 경우 2in 이상을 추천하고 있다. 내화구조물의 경우에는 표 2 및 이상에서 규정한 피복두께보다 크게 하도록 하고 있다.

CEB-FIP의 최소 피복두께 규정은 매우 엄격하게 적용하도록 하고 있으며 철근콘크리트나 프리스트레스트 콘크리트 및 쉬스(Sheathing)에 대해 다음 표 3을 만족토록 하고 있다.¹³⁾

표 2 ACI-318의 피복두께 규정

구 분	흠에 계속해서 접함	흠에 접하거나 기상 노출	기상에 노출되지 않고 흠에 접하지 않음
현장치기 콘크리트 (Cast-In-Place)	3in	-No.6~No.18 : 2in -No.5 철근, W31 혹은 D31 와이어 이하 : 1.5in	<ul style="list-style-type: none"> ○ 슬래브, 벽체, 장선구조 -No.14, 18 : 1.5in -No.11이하 : 3/4in ○ 빔, 기둥 -주철근, 띠철근, 스트립, 나선철근 : 1.5in ○ 셸, 절판부재: -No.6이상 : 3/4in -No.5 철근, W31 혹은 D31 와이어 이하 : 0.5in
프리캐스트 콘크리트 (Precast Concrete)	-	<ul style="list-style-type: none"> ○ 벽체 -No.14, 18 : 1.5in -No.11이하 : 3/4in ○ 기타부재 -No.14, 18 : 2in -No.6~No.11 : 1.5in -No.5 철근, W31 혹은 D31 와이어 이하 : 1.25in 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 슬래브, 벽체, 장선구조 -No.14, 18 : 1.25in -No.11이하 : 5/8in ○ 빔, 기둥 -주철근 : db(단, 5/8~1.5in) -띠철근, 스트립, 나선철근 : 3/8in ○ 셸, 절판부재: -No.6이상 : 5/8in -No.5 철근, W31 혹은 D31 와이어 이하 : 3/8in
프리스트레스트 콘크리트 (Prestressed Concrete)	3in	<ul style="list-style-type: none"> ○ 슬래브, 벽체, 장선구조 : 1in ○ 기타부재 : 1.5in 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 슬래브, 벽체, 장선구조 : 3/4in ○ 빔, 기둥 -주철근 : 1.5in -띠철근, 스트립, 나선철근 : 1in ○ 셸, 절판부재 -No.5 철근, W31 혹은 D31 와이어 이하 : 3/8in -기타 : db(단, 3/4in이상)

표 3 CEB-FIP의 피복두께 규정

노출 등급	최소철근덮개 (mm)
1	10
2	25
3, 4	40
5	*

* 각각의 환경에 따라 고려하여야 함.

CEB-FIP의 피복두께 규정값은 절대 최소값으로 이 값에 대한 허용오차는 인정하지 않고 있고 공칭피복두께 개념을 사용한 허용오차를 고려하고 있으며 다음 식과 같이 계산된다.

$$\text{공칭피복두께(mm)} = \text{최소피복두께(mm)} + \text{허용오차} \quad (1)$$

허용오차의 범위는 일반적인 경우의 콘크리트에는 10mm를 사용토록 하고 있으며, 콘크리트에 대해 집중적인 품질관리가 이루어진 경우도 5mm 이상을 사용토록 하고 있다.

위의 조건은 단지 철근콘크리트와 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 부식방지 및 내구성 확보를 목적으로 한 규정이다. 그러나 다른 이유, 즉, 부착강도를 확보하고 내화구조물을 만들고 굵은골재의 크기가 큰 것을 사용한 경우에는 피복두께를 증가시키도록 하고 있다.

또한, 부착강도를 확보하고 콘크리트의 박리를 방지하기 위해서 피복두께는 철근, 텐던 혹은 쉬스의 직경 이상이 되도록 하고 있다. 프리캐스트 콘크리트의 경우, 철근의 위치 및 다짐에 정확한 품질관리가 이루어진 경우라면 표3에서 5mm 감하여도 무방하도록 하고 있다. 절곡, 구부리기 및 갈고리에 의한 철근 정착부위에서는 최외단 철근직경의 3배 이상을 사용토록 하고 있으며 균열과 콘크리트 박리방지를 위해 내구성 설계나 고강도/고부착강도 혹은 직경이 큰 철근을 사용한 경우에는 철근표면에 특별한 처리를 하도록 하고 있다.

영국의 BS의 경우에는 ACI의 경우와는 달리

노출환경에 따른 등급과 더불어서, 사용되는 콘크리트의 배합조건 즉, 최소 물-시멘트비, 최소시멘트량 혹은 콘크리트 등급(강도)에 따라 최소 피복두께를 규정하고 있다.⁷⁾ 즉, 가장 특징적인 것은 모두 콘크리트의 강도에 관계되는 인자를 고려하였다는 점이며 아울러 철근의 직경에 대한 인자는 고려하고 있지는 않다. 이를 표 4에 정리하였다.

표 4 BS의 최소 피복두께 규정

노출 조건	피복 두께 (mm)					비고
	1	2	3	4	5	
온화한 환경(Mild)	25	20	20	20	20	
보통환경(Moderate)	-	35	30	25	20	
혹한환경(Severe)	-	-	40	30	25	
매우혹한환경(Very Severe)	-	-	50	40	30	
극심한환경(Most Severe)	-	-	-	-	50	
침식환경(Abrasive)	-	-	-	*	*	
최소 물-시멘트비	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45	
최소 시멘트량 (kg/m ³)	275	300	325	350	400	
가장 낮은 콘크리트 등급	C30	C35	C40	C45	C50	

주) * 일반적인 피복두께에 침식에 의한 덮개손실을 추가하여야 한다.

일본의 경우, ACI와 비슷하게 적용하고 있는데, 특이한 점은 철근의 직경별 구분을 짓지 않은 점이다. 소요의 내화성·내구성·구조내력이 얻어지도록 시멘트의 종류, 콘크리트의 종류, 마무리의 유무 및 그 종류, 환경조건 및 시공정도를 고려하여 피복두께를 결정한다. 철근 방식을 목적으로 한 피복두께의 경우 철근 부식으로 인한 콘크리트의 조기 열화가 문제가 된 결과 일본의 토목학회, 건축학회에서도 많이 바꾸었다.

표 5는 1986년 개정된 일본의 토목학회 콘크리트 표준시방서 개정 전후의 피복두께를 비교한 것이다.^{11,19)}

표 5 피복두께의 규정변화
(일본 토목학회 콘크리트 표준시방서, 1986)
(1) 개정전 (최소피복두께 : cm)

상 태	슬래브	보	기 등
비바람에 쐬지 않은 경우	1.0	1.5	2.0
치수가 크고 중요한 구조물 또는 비바람에 쐬는 것	2.0	2.5	3.0
매연, 산, 기름, 염류 등 유해한 화학작용을 받을 염려가 있는 부분인데 보호층으로 보호하지 않은 경우	3.0	3.5	4.0

(2) 개정후 (최소피복두께 : cm)

환 경 조 건	슬래브	보	기 등
일반환경	2.5	3.0	3.5
부식성 환경	4.0	5.0	6.0
심한 부식성 환경	5.0	6.0	7.0

일본 건축학회의 표준시방서 JASS 5에서도 철근 방식 및 콘크리트 조기열화 방지를 위해 피복두께 규정을 변경하여 표 5와 같이 최소 피복두께를 제시하고 있다. 또한, 「일본RC계산기준」 6항의 허용부착응력도에서는 철근뎡개는 1.5d(d는 공칭직경)를 전제로 할 경우 D29 이상의 철근의 경우에는 피복두께가 부족하게 될 것이라 한다. 단, 구조물에서의 피복두께는 측방향 철근의 표면에서 부터이며 띠철근, 사인장철근의 표면에서 시작하는 것이 아니다. 피복두께가 부족하더라도 허용부착응력도×(피복두께/철근직경의 1.5배)의 저감치 이내라면 설계에서 피복두께를 변경할 필요가 없으므로 설계도에 명시하여 혼동을 방지토록 하고 있다.¹⁹⁾

표 6에 최소 피복두께가 규정되어 있는데, 이 값에 시공오차를 더한 것을 상용 피복두께로 했다. 그 시공오차는 +1cm를 원칙으로 하고 있다. 이는 최소 피복두께를 확보하기 위한 것이다. 시공오차는 보·벽의 수직부재, 빔·슬래브의 수평부재 및 시공의 난이도, 부재의 크기, 높이 등에 따라 상이한 것은 당연하다. 이들에 맞춰서 오차의 값을 세분화하는 것은 실용성이 결여되고 시

공을 번잡하게 하므로 +1cm를 목표로 하여 시공하도록 하고 있다. 단, 시공정도의 향상이도 모된다고 판단될 경우는 +1cm 이하를 목표로 해도 된다고 보고 있다.

표 6 피복두께의 규정변화
(일본건축학회 표준시방서 JASS 5의 철근콘크리트 구조물, 1986)
(1) 개정전 (최소피복두께 : cm)

구		분		보통콘크리트	경량콘크리트
흠 에 접하지 않는 구조물	슬래브, 옥내슬래브, 내력벽이외의 벽	마무리 있음		2	2
		마무리 없음		3	3
	기둥, 빔, 내력벽	옥내	마무리 있음	3	3
		옥외	마무리 없음	3	3
		마무리 있음	4 ¹⁾	4	
		마무리 없음			
	옹벽			4	4
흠 에 접하는 구조물	기둥, 빔, 슬래브, 내력벽			4	5 ²⁾
	기초, 옹벽			6	7 ²⁾

주 1) 콘크리트의 품질 및 시공방법에 맞게 감독원의 승인을 얻어 3cm로 할 수 있다.

2) 경량 콘크리트 1종 및 2종에 적용한다.

* 고로시멘트 C종, 실리카 시멘트 C종 및 플라이애쉬 시멘트 C종을 이용할 경우는 조합, 부재의 크기 등에 맞게 결정하고 감독원의 승인을 얻는다

(2) 개정후 (최소피복두께 : cm)

구	분	철근뎡개	
흠 에 접하지 않는 구조물	슬래브, 옥내슬래브, 내력벽이외의 벽	실 내	3
		실 외	4 ¹⁾
	기둥, 빔, 내력벽	실 내	4
		실 외	5 ²⁾
	옹벽	5 ³⁾	
흠 에 접하는 구조물	기둥, 빔, 슬래브, 내력벽		5
	기초, 옹벽		7

주 1) 내구성상 유효한 마감에 있는 경우 담당원의 승인을 받아 3cm로 할 수 있다.

2) 내구성상 유효한 마감에 있는 경우 담당원의 승인을 받아 4cm로 할 수 있다.

3) 콘크리트의 품질 및 시공방법에 따라 담당원의 승인을 받아 4cm로 할 수 있다.

일본에서의 피복두께 개정은 염해나 중성화로 인한 철근콘크리트 구조물의 조기 열화의 문제를 받아드려 실시한 것이며 모두 대폭적인 최소 피

표 7 국내 콘크리트 구조설계기준의 최소 피복두께 규정¹⁾

콘크리트 종류	환경조건과 부재의 종류		피복두께 (cm)	
현장치기 콘크리트	흙에 접하거나 옥외의 공기에 직접 노출되는 콘크리트	D29이상	6	
		D25이하	5	
		D16이하, 지름 16mm이하 철선	4	
	옥외의 공기나 흙에 직접 접하지 않는 콘크리트	보, 기둥	4 ¹⁾	
		슬래브, 벽체, 장선	D35초과 D35이하	4 2
		셀, 절판부재		2
콘크리트를 친 후 영구히 흙에 묻혀 있거나 수중에 있는 콘크리트			8	
프리캐스트 콘크리트	흙에 접하거나 옥외의 공기에 직접 노출된 콘크리트	벽체	D35초과 D35이하	4 2
		기타부재	D35초과	5
			D19이상, D35이하 D16이하, 지름16mm이하철선	4 3
	옥외의 공기나 흙에 직접 접하지 않는 콘크리트	슬래브, 벽체, 장선구조	D35초과 D35이하	3 2
		보, 기둥	주철근 띠철근, 스테럽, 나선철근	철근공칭직경 ²⁾ 1
		셀, 절판부재	D19이상 D16이하, 지름16mm이하철선	2 1
프리스트레스트 콘크리트 ⁴⁾	흙에 접하거나 옥외의 공기에 직접 노출되는 콘크리트	벽체, 슬래브, 장선구조	3	
		기타부재	4	
	옥외의 공기나 흙에 직접 접하지 않는 콘크리트	슬래브, 벽체, 장선	2	
		보, 기둥	주철근 띠철근, 스테럽, 나선철근	4 3
		셀, 절판부재	D19이상 D16이하, 지름16mm이하철선	철근공칭직경 ³⁾ 1
		콘크리트를 친 후 영구히 흙에 묻혀 있거나 수중에 있는 콘크리트		

- 주 1) 이 경우 콘크리트의 설계기준강도 f_{ck} 가 400kgf/cm² 이상이면 규정된 값에 1cm 저감시킬 수 있다.
 2) 다만 2cm 이상이어야 하고, 4cm 이상일 필요는 없다.
 3) 다만 2cm 이상이어야 한다.
 4) 흙 및 옥외의 공기에 노출되거나 부식환경에 노출된 프리스트레스트 콘크리트의 경우 허용인장응력을 초과하는 경우 최소 피복두께를 50%증가시켜야 하고, 공장제품 생산조건과 동일한 조건으로 제작된 프리스트레스트 콘크리트 부재에서 프리스트레스 되지 않은 철근의 최소 피복두께는 프리캐스트 콘크리트와 동일하게 적용한다.

복두께의 증대를 규정하고 있다. 이것은 철근의 부식 방지 목적으로 철근의 피복두께 확보가 중요한 것을 나타낸 것이다.

국내에서의 피복두께에 대한 기준은 미국의 ACI-318을 준용하고 있다¹⁾. 또한 콘크리트 구조설계기준(1999년 건설교통부 제정, 건축·토목 통합설계기준)¹⁵⁾에 제시된 최소 피복두께는 콘크리트 종류별, 구조물이 놓이는 환경에 따라 정한 기준으로 설계자는 사용재료, 콘크리트 표면에 작용하는 유해물질, 부재의 치수, 구조물의 중요성과 시공의 정밀도 등에 따라 피복두께의 크기를 결정하도록 하고 있다. 물론, 표 7에 제시

된 최소 피복두께는 그 크기의 표준을 합리적으로 정하기 곤란하기 때문에 여기에서 그 최소값의 표준을 정한 것이며 그 크기를 결정하는데 있어서 신중하도록 요구하고 있다.

본 규정에서 철근의 직경을 굵이 D35와 D16으로 구분한 이유는, 가는 철근을 사용하면 미세한 균열이 많이 생기는데 반해, 굵은 철근을 사용하면 균열의 수는 적어지지만 폭이 큰 균열이 생기게 되어 철근부식의 가능성이 높아진다. 이러한 경우 피복두께를 충분히 하여 산화를 방지하여야 하는데, 이를 뒷받침하기 위하여 D35와 D16을 경계로 하여 철근 피복두께의 값을 크고

작게 규정한 것이다.

콘크리트 구조설계기준에서는 콘크리트가 심한 침식이나 염해를 받는 해안환경에 노출되거나 심한 화학작용을 받는 경우에는 피복두께를 증가시키도록 규정하고 있으며 일반적으로 현장치기 콘크리트의 벽체 및 슬래브의 경우 5cm, 기타부재의 경우 7cm를, 프리캐스트 콘크리트의 벽체 및 슬래브의 경우 4cm, 기타부재의 경우는 5cm를 기준으로 삼고 있다.

3.3 피복두께와 철근부식과의 관계

서론에서도 언급하였듯이 콘크리트 피복은 강알칼리성으로 철근의 부식 방지에 우수한 재료이나 여러 가지 부식 영향인자로 인해 그 기능을 상실하고 만다. 피복두께와 철근부식을 연관지어 볼 경우 균열폭을 고려하지 않을 수 없다.

철근의 부식을 방지하기 위해서는 상대적으로 철근의 피복두께를 늘려야 한다. 그러나, Gergely-Lutz⁶⁾의 제안식에 의하면, 철근의 피복두께가 증가하게 되면 그 균열폭은 증가하게 되고 철근의 피복두께를 감소시키면 균열의 폭은 감소하게 된다. 그런데, 일반적으로 철근콘크리트 구조물의 내구성적인 입장에서는 균열폭이 큰 소수의 균열보다 균열폭이 작은 다수의 균열이 유리하다.¹⁶⁾ 따라서 무한대로 철근의 피복두께를 증가시킬 수는 없다. 한편, 일단 균열을 가정한다면, 그 균열의 폭이 작다고 할지라도 염화물이 침투하게 되면 철근의 부식은 피할 수 없다. 따라서 이를 방지하기 위해 피복두께를 증가시켜 균열이 철근에 도달하지 않도록 하여야 한다. 따라서 철근의 부식을 방지하기 위하여 철근의 피복두께를 증가시켜야 하는데 이는 균열 폭을 증가시키게 되고 결국에는 균열폭의 감소와 철근의 피복두께 증가, 철근의 부식 방지라는 딜레마에 빠지게 된다.

균열폭과 피복두께 및 철근부식에 관해서는 연구의 결과가 아직까지는 혼란스럽고 서로 상반되는 점이 많이 있다. 예를들면, Pfeiffer, Landgren

과 Perenchio(1986년), Poston⁹⁾(1987년)의 프리스트레스트 콘크리트 실험에 의하면 그리고 Poston, Carasquillo와 Breen⁷⁾(1985, 1987년)의 보통콘크리트 실험에 의하면 철근 부위에서의 염화물 이온 침투는 기본적으로 균열폭에 비례한 것으로 보고되고 있다. 그러나 Dave Mannig^{5,7)}에 의하면 균열폭과 철근부식과는 어떤 관계도 존재하지 않는 것으로 보고되고 있다. 따라서 균열의 폭과 철근의 부식과의 관계는 분명하지가 않다.

따라서, 철근의 부식방지 수단으로 철근콘크리트 표면의 균열폭을 제한하는 방법은 최선의 방법은 아니다.

즉, 극심한 환경하에 노출되는 구조물은 균열의 폭이 작은 구조물을 원한다. 현재의 시방서 기준에 의하면 작은 균열폭은 철근의 피복두께를 낮추면 얻을 수 있다. 그러나 감소된 철근의 피복두께는 철근의 부식을 유발한다.¹²⁾

균열에 의한 철근의 부식에 관해서는 서로 다른 2가지 이론이 있다. 첫째는 균열이 매립된 철근으로 염화물, 습기 및 산소의 침투를 허용하여 구조물의 사용년한을 심각하게 감소시킬 뿐만 아니라 부식 유발을 가속화시키고 심지어 부식물이 모이는 장소가 되어버린다는 것이다. 반대로 둘째는, 균열이 부식의 유발을 가속화 하지만 그와 같은 부식은 국부적이고 철근을 가로질러 한정된 곳에만 발생된다. 염화물은 결국 균열이 발생되지 않는 곳으로도 침투할 것이며 보다 광범위한 철근부식을 유발할 것이며 사용기간 몇 년 안에 철근부식의 양은 균열이 있든 없든 거의 차이가 없을 것이라는 주장이다. 현재는 첫 번째 이론보다는 두 번째 이론이 실제 상황과 맞는 것으로 보고있다.

철근 부식에 대한 균열의 영향은 두가지 부류로 나눌 수 있다. 첫 번째는 균열자체의 역할이다. 여기에는 균열의 폭, 깊이, 모양, 철근에 대한 균열의 방향 및 균열의 시작점을 들 수 있다.^{4,6)} 두번째는 구조물의 형태와 콘크리트의 품질과 연관된 것이다. 여기에는 사용환경, 구조물

자체의 형태, 산화막을 파괴하는 수단, 혹은 콘크리트의 저항과 음극방식의 적용여부도 관련된다.

이들 요인 중 균열의 폭은 많은 연구와 각 시방서에서 다루고 있지만 철근콘크리트 표면에서의 균열폭과 철근의 부식과의 상관성을 보이지 못하고 있다. 사실상 균열의 폭은 균열의 발생 요인(휨응력, 인장응력, 콘크리트의 소성침하), 피복두께, 철근의 응력, 철근비, 철근배근, 철근의 직경 및 인장축의 깊이에 의한 합작품이다.⁸⁾

철근의 방향은 균열의 폭이 1mm 이하인 곳에서는 철근의 부식에 중요한 요소이다. 철근에 횡방향으로 균열이 존재하면 철근의 부식은 국부적인 부식이 된다. 그러나 철근의 방향을 따라 균열이 발생할 경우 산화막은 철근의 많은 부분에서 파괴되고 철근의 부식은 가속화 될 것이다.

종방향 균열의 대부분은 콘크리트의 소성침하에 의해 발생한다. 중요한 사실은 철근의 피복두께가 감소할수록 콘크리트의 침하에 의한 균열이 증가하는 경향을 보인다.^{5,22)} 그림 3은 소성침하의 영향인자별 균열발생 빈도를 나타낸 것이다.

균열폭의 증가와 함께 철근의 부식속도는 커지는 경향은 여러 실험으로도 확인되고 있다. 그러나 균열폭과 철근부식 관계에 대해서는 해명되지 않은 점도 많고, 근래에는 허용균열폭의 규정으로 철근의 부식을 방지하려는 규정이 재평가되고 있고 그중 하나는 허용균열폭을 철근의 피복두께에 따라 달리 적용하자는 움직임이다.

그림 4에 표시하였듯이 철근갹개가 클수록 철근 부식이 잘 진행되지 않는 것은 실험적으로도 확인되었고 이미 잘 알려진 사실이다. 철근의 부

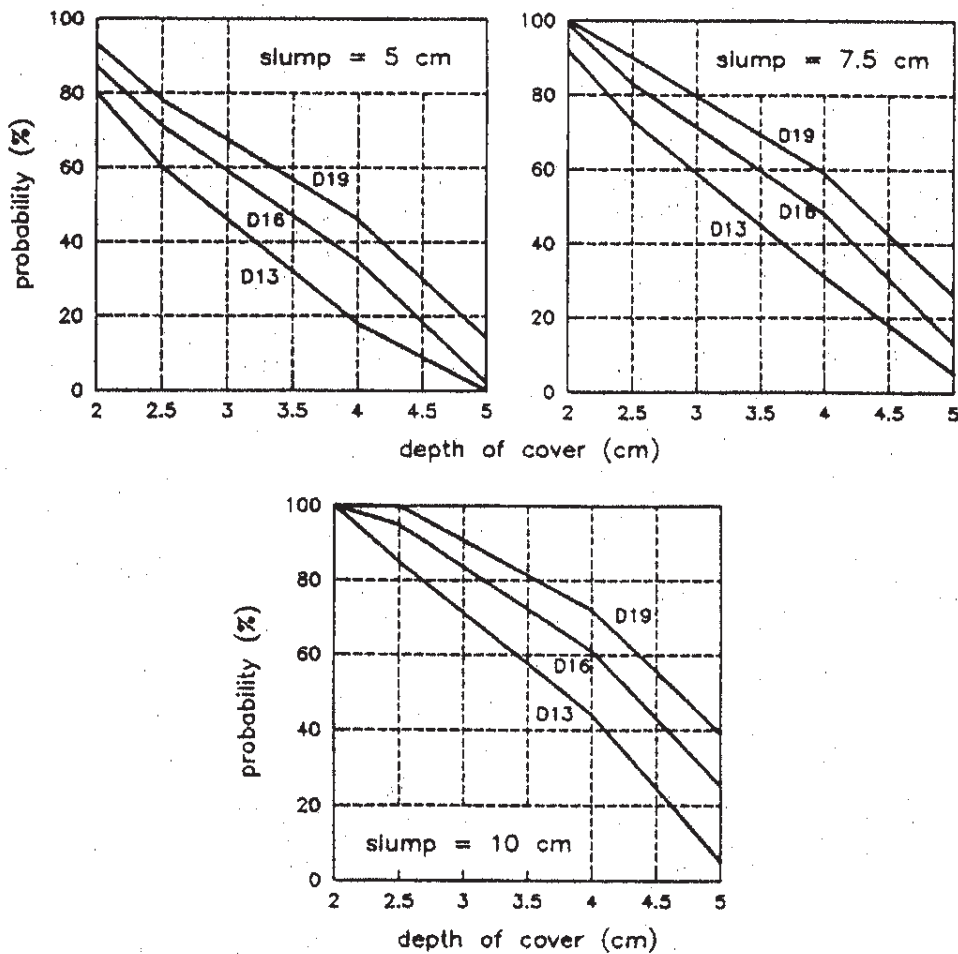


그림 3 철근의 피복두께와 침하균열과의 관계²²⁾

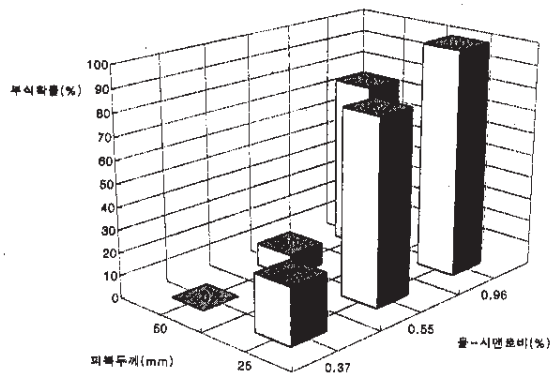


그림 4 피복두께, 물-시멘트비와 철근의 부식과의 관계⁵⁾

식과 피복두께, 물-시멘트비의 관계에서 보듯이 철근덮개의 증가가 혹은 콘크리트의 품질이 철근 부식에 유의한가는 의심의 여지가 없다.

철근의 피복두께 부족이 철근의 부식에 미치는 영향은 균열과는 비교할 수 없을 정도로 크다. 피복두께의 부족은 실질적으로 그 부분에 콘크리트가 없는 것과 같기 때문이다. 그러므로 유해한 염화물 이온이나 산소, 물 등 철근 부식 영향인자가 콘크리트 내부에 침투하는 시간이 짧아지고 영향을 미치는 범위도 넓어진다. 실제로 염해 피해가 발생한 구조물의 거의는 철근의 피복두께 부족 등의 결함을 가지고 있는 경우가 많다. 그러나 피복두께의 부족은 철근의 가공, 조립 등 시공 정밀도 면에서 생각하면 어떤 확률로 발생하는 것은 피할 수 없다. 일본 건설성의 조사 결과에 따르면 벽상 구조물의 경우 철근의 피복두께 오차의 표준편차는 20mm 정도이며 이 오차를 고려하여 설계 피복두께를 정하지 않으면 최소 피복두께의 확보가 곤란해진다고 한다. 근래에 이러한 인식이 높아져 최소 피복두께를 결정할 때에 시공 오차를 고려하거나 조립 정밀도의 확보와 콘크리트를 치기 쉽도록 배근면에서 고려하는 경우가 증가하고 있다.

3.4. 철근부식이 피복두께에 미치는 영향

콘크리트 속의 철근이 부식하면 부식 생성물

로 녹이 발생하며 이것이 철근 피복에 미치는 가장 큰 영향은 균열과 박리라 할 수 있다. 녹을 형성하는 철의 부식 생성물은 산화물 또는 옥시수산화물이다. 이 같은 녹의 체적은 원래 철의 체적보다 상당히 크다. 철이 산화물로 변화할 때 체적 팽창 비율이 약 2배, 옥시수산화물로 변화할 때 약 3배이다. 실제의 녹은 다공질로 구성되어 있어 위의 팽창비율대로 발생한다고 생각할 수 없지만 2~3배 이상의 체적 팽창을 나타내는 것은 분명하다. (그림 5)

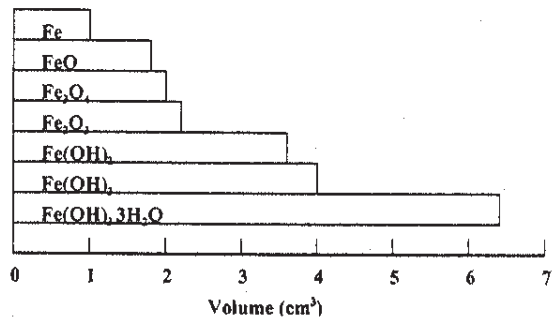


그림 5 철 산화단계별 체적변화(Beton-Bogen, 1981)¹⁸⁾

콘크리트 속에 묻힌 철근이 부식하여 체적 팽창을 일으키면 철근은 주위의 콘크리트에 압력을 가하고 그 결과 콘크리트에 균열과 박리가 생긴다. 철근 부식에 따른 손상이 철근의 팽창압에 의한 것이라면 콘크리트에 생기는 손상 유형을 피복두께, 철근지름, 철근위치, 철근간격, 콘크리트의 역학적 성질, 녹의 역학적 성질, 부식 팽창량 등의 여러 요인으로 지배되게 된다.

Broewne³⁾에 따르면 철근 부식 팽창으로 인한 콘크리트의 손상은 다음의 세가지 유형으로 분류할 수 있다.

- 1) 콘크리트 표면에 직교하는 단독균열
- 2) 콘크리트 표면에 대해서 어떤 각도를 가진 1쌍의 균열(Cone 형태의 박리)
- 3) 인접한 철근 방향으로 진전하는 균열(광범위하게 박리가 발생)

그림 6과 같이 철근의 간격이 좁은 경우는 피복두께에 따라¹⁾의 균열과²⁾의 박리가 생긴다. 구조물의 모서리 부분(우각부)에서는 피복두께에

따라 특유한 균열과 박리가 발생된다. 철근 간격이 넓고 피복두께가 두꺼운 경우에는 철근 주위에 손상이 생겨도 그것이 표면에 이르지 않는 경우도 있다.

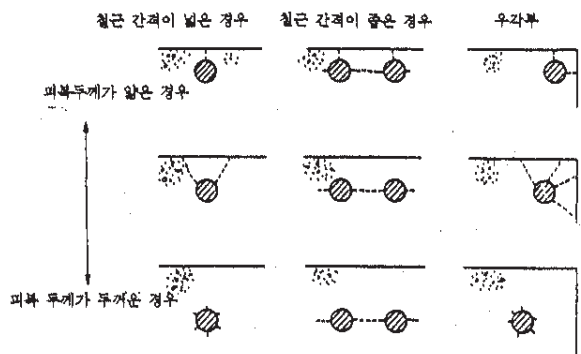


그림 6 철근의 부식 팽창으로 인한 콘크리트 손상¹⁷⁾

균열까지의 부식량은 피복두께와 함께 콘크리트의 강도에 비례하며 철근 지름에 반비례한다. 부식 팽창압에 따라 생긴 용력에 견딜 수 있는 콘크리트의 한계 조건은 기본적으로는 콘크리트의 인장강도이며, 강도가 높은 콘크리트일수록 큰 부식 팽창압에 견딜 수 있다. 철근 부식으로 인한 콘크리트의 손상이 녹의 팽창압이라고 하면 손상 발생 조건은 녹 팽창량과 역학적 성질에 의존하게 된다. 철근 녹의 역학적 성질의 측정에는 매우 적지만 연구자들의 측정 예에서는 영률이 $2\sim 3 \times 10^3 \text{kg/cm}^2$ 정도 이었다.¹⁷⁾

4. 맺음말


이상에서 정리한 바와 같이 철근의 피복두께는 철근의 부식을 방지하는데 있어서 중요한 역할을 한다. 철근의 부식적인 측면에서 피복두께를 증가시키는 것은 유리함에 틀림없다. 그러나 피복두께의 증가는 허용균열폭의 증가를 유발하는 단점이 있다. 국내에서 철근 부식을 고려하여 피복두께와 균열폭을 어떻게 고려하여 할 것인가에 대한 연구는 없고 일부 진행중인 것으로 알려져 있다. 향후 철근의 부식을 고려하여 국내에서도 피복두께에 대한 연구가 활발하게 진행되어야 하

며 지방서에서도 철근의 피복두께에 대한 재고가 있어야 될 것으로 사료된다.

철근 부식방지를 위해 기존의 자료를 보면 철근의 피복두께가 콘크리트의 제 기능을 발휘하기 위해서는 공통적으로 다음과 같이 지적하고 있다. 1) 콘크리트의 품질관리가 철저하게 이루어져야 하는데, 특히, 내구적인 측면에서 물-시멘트비를 낮게 하여야 한다. 2) 적절한 철근의 피복두께가 확보되어야 한다. 이는 설계상의 피복두께와 시공상의 오차를 고려하여 시공완료후 피복두께의 부족함이 없어야 한다. 3) 철근의 피복두께와 균열을 고려하여 배근면에서 충분한 검토가 이루어져야 한다. 4) 염화물 등 철근부식에 유해한 이온의 침투를 억제하여야 한다. 특히, 최근에는 부식억제제 및 방수제 사용은 이러한 일례라 할 수 있다.

참고문헌

1. ACI Committee 318, "ACI Standard Building Code Requirements of Reinforced Concrete", American Concrete Institute, Detroit, 1994.
2. A. M. Neville, "Properties of Concrete", Longman, p. 565, 1995.
3. Broewne, R. D., "The Corrosion of Concrete Marine Structures: The Present Situation", Concrete Structures, papers presented to Professor Inge Lyse on his 80th Birthday, Tapir, pp. 177-209, October 20-21, 1978.
4. C. Arya and F.K. Ofori-Darko, "INFLUENCE OF CRACK FREQUENCY ON REINFORCEMENT CORROSION IN CONCRETE", Cement and Concrete Research, vol.26, No.3, pp. 345-353, 1996.
5. DEBATE, "Crack Width, Cover, and Corrosion", Concrete International, pp.20-35, May 1985.
6. Gergely, Peter and Lutz, LeRoy A., "Maximum Crack Width in Reinforced Concrete Flexural Members", Causes, Mechanism and Control of Cracking in Concrete, ACI SP-20, American Concrete Institute, Detroit, pp. 87-117, 1968.
7. G. T. Halvorson, "Code Requirements for Crack Control", ACI SP 104-15, American Concrete Institute, Detroit, 1985.

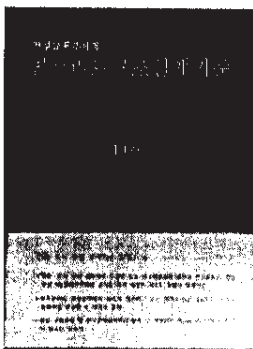
8. Hans Chr. Gran, "FLUORESCENT LIQUID REPLACEMENT TECHNIQUE. A MEANS OF CRACK DETECTION AND WATER-BINDER RATIO DETERMINATION IN HIGH STRENGTH CONCRETES", Cement and Concrete Research, Vol.25, No.5, pp. 1063-1074, 1995.
9. Pfeifer, Donald W., Landgren, J. Robert, and Perenchio, William, "Concrete, Chlorides, Cover and Corrosion", PCI Journal, Vol.31, No.4, pp.42-53, July-August 1986.
10. P. Kumar Mehta and Ben C. Gerwick, Jr., "Cracking-Corrosion Interaction in Concrete Exposed to Marine Environment", CONCRETE INTERNATIONAL, pp. 45-51, October 1982.
11. Pourbaix, M., "Corrosion Science", Vol.14, p. 25, 1974
12. R. Ravindrarajah and K. Ong, "Corrosion of Steel in Concrete in Relation to Bar Diameter and Cover Thickness", Katharine and Bryant Mather International Conference, ACI SP-100, Vol.II-I, pp. 1667-1677
13. Thomas Telford, "CEB-FIP Model Code: Design Code", CEB-FIP, 1991.
14. 岸谷孝一, "鐵筋コンクリートの耐久性", 鹿島建設技術研究所出版部, p. 149, 1963.
15. 건설교통부, "콘크리트구조설계기준", 건설교통부, pp. 96-99, 1999.
16. 건설교통부, "콘크리트표준시방서", 건설교통부, pp. 203-206, 1996.
17. 이종득, "철근부식진단", 일광, p. 1, 1996. 5.
18. 이재봉, "콘크리트 내 철근의 부식 및 방지", 한국도로공사 세미나, 1997. 7. 18.
19. 일본콘크리트공학협회, "콘크리트편람", 일본콘크리트공학협회, 1994
20. 한국가스공사, "전기방식 기술 SEMINAR", 한국가스공사, p. 1, 1996. 11.
21. 한국과학기술원, "콘크리트 구조물의 균열 제어 지침서", 한국과학기술원, p. 30, 1996. 2. 



건설교통부제정 1999년도 개정판

콘크리트표준시방서

- B5 · 246 面
- 회 원 : 10,800원 (우편구입시 12,000원)



건설교통부제정

콘크리트구조설계기준

1999년 6월 제정 (콘크리트표준시방서설계편)

- 철근콘크리트구조계산규준 통합)

- B5 · 319 面
- 회 원 : 13,500원 (우편구입시 15,000원)