

# 고내구성 콘크리트와 고성능 콘크리트의 개발 및 적용(Ⅱ)

오 병 환

〈서울대학교 공과대학 토목공학과, 공학박사〉

## 4. 고내구성화 메카니즘

- 4.1 콘크리트의 고밀실화 및 내투수성 증진
- 4.2 황산염 저항성
- 4.3 동결융해 저항성
- 4.4 철근의 방청
- 4.5 건조수축의 제어

## 4.6 수화열의 제어

- 5. 고내구성 콘크리트와 고성능 콘크리트
- 5.1 고성능 콘크리트의 제조 및 제반 특성
- 5.2 고내구성 콘크리트의 적용과 향후 과제
- 6. 맺는말

## 4. 고내구성화 메카니즘

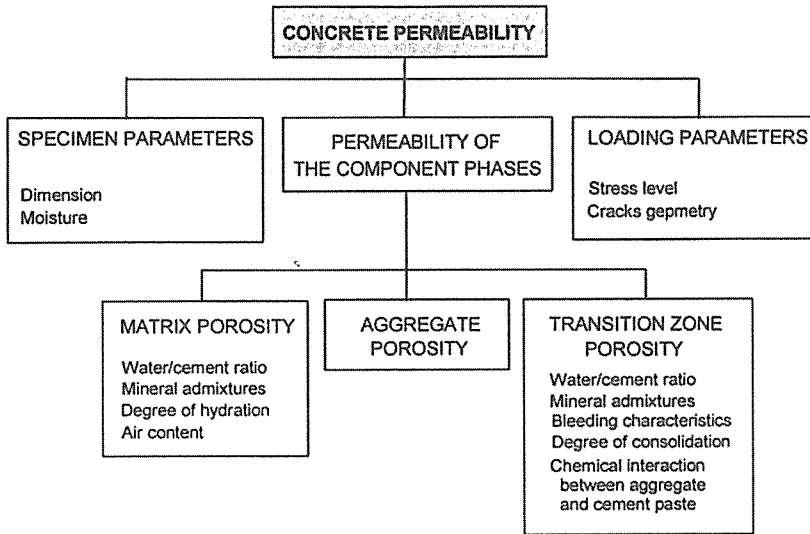
### 4.1 콘크리트의 고밀실화 및 내투수성 증진

콘크리트의 내구성을 증진시키기 위한 방안은 크게 두 가지 측면으로 나누어 볼 수 있다. 우선 첫째로 콘크리트가 처한 환경의 성능저하 요인을 최소화할 수 있는가하는 외적측면을 들 수 있다. 근래 들어 콘크리트는 해양 콘크리트, 한중 콘크리트(극지기지 건설), 서중 콘크리트(열대 구조물), 내화학적 콘크리트(폐기물 처리), 내열 구조물(원자로 격납 구조물)등 가정할 수 있는 거의 모든 건설현장에 투입되고 있다. 따라서, 이러한 외부환경의 성능저하요인을 정확히 파악하여 이를 최소화시킬 수 있는 방안을 모색하는 것이 무엇보다 우

선되어야 할 문제라 할 수 있다.

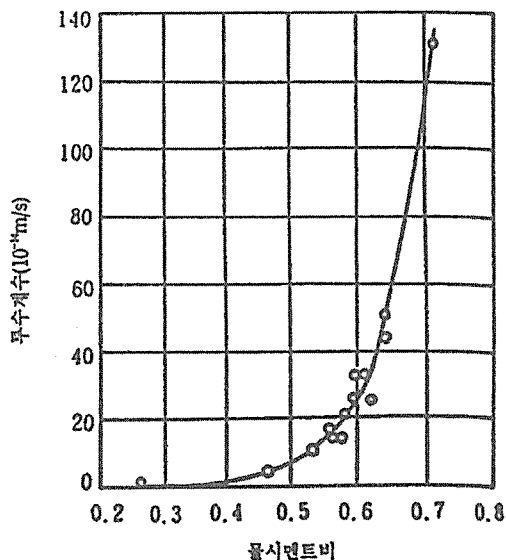
둘째로는 콘크리트 내부에서의 성능저하 메카니즘을 제어하여 성능저하요인을 어떻게 저감시키는가 하는 내적 측면을 들 수 있다. 앞서 서술한 바와 같이 성능저하 메카니즘은 크게 보아 콘크리트의 수밀성 문제로 귀착된다고 할 수 있다. 즉, 콘크리트의 수밀성을 높임으로써 외부환경에 존재하는 성능저하를 유발하는 요인들의 침투를 효과적으로 제어할 수 있다. 따라서, 콘크리트의 고밀실화를 통해 콘크리트 조직을 견고하게 하는 것이 내구성 증진의 가장 중요한 요소가 된다.

콘크리트의 고밀실화를 위해서는 우선 소요의 강도를 가지면서 투수성이 매우 낮은 콘크리트를 설계하거나 동등의 투수성을 갖는 콘크리트라면 피복두께를 증가시켜야 한다. 콘



(그림 4.1) 콘크리트의 투수성에 영향을 미치는 요인<sup>(3)</sup>

콘크리트의 투수성에 영향을 미치는 요인은 여러 가지가 있으나(그림 4.1), 투수성이 낮은 콘크리트를 만들기 위한 가장 적절한 방법은<sup>(1)</sup> 물-시멘트비를 줄이는 방법과<sup>(2)</sup> 혼화재료를 사용하는 방법이 있을 수 있다.



(그림 4.2) w/c와 콘크리트의 투수계수<sup>(6)</sup>

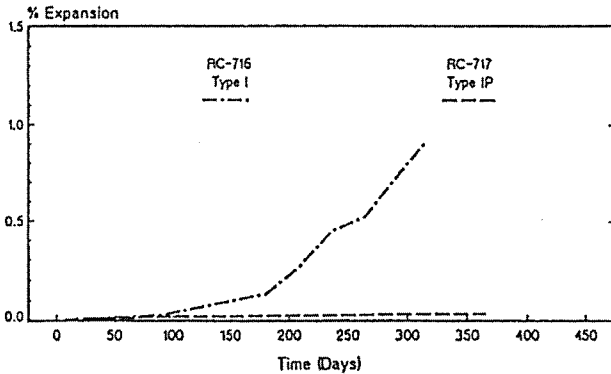
물-시멘트비의 감소는 콘크리트의 투수성을 낮출 뿐만 아니라 콘크리트의 강도자체의 증가를 기대할 수 있으므로 전반적인 콘크리트의 내구성을 높일 수 있다(그림 4.2). 그러나, 물-시멘트비를 감소시키기 위해서는 고성능 감수제의 사용량을 늘려야 하므로 고성능 감수제의 염소이온함량에 대해 세심한 주의를 요하

며 경제적인 측면을 아울러 고려해야 한다. 또한, 콘크리트의 밀실화는 물-시멘트비의 감소와 함께 콘크리트의 재료, 배합, 운반, 타설, 다짐, 양생 등 콘크리트기술 전반에 관련하는 것이므로 재료, 배합, 시공에 대한 철저한 관리가 수반되어야 한다.

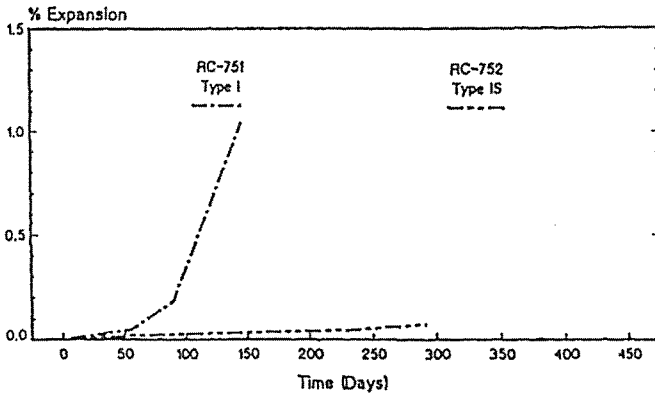
콘크리트의 수밀성을 높이는 또 다른 방법으로 적절한 시멘트와 혼화재료를 선정하는 방법을 생각할 수 있다. 일반적으로 슬래그, 플라이 애쉬, 실리카 흙 등의 혼화재료는 콘크리트의 조직을 치밀하게 하여 산소나 수분의 침입을 물리적으로 억제하는 작용을 한다. 그러나, 혼화재료의 경우는 품질의 변동성이 매우 크기 때문에 주의 깊은 품질관리가 필요하다.

## 4.2 황산염 저항성

황산염 반응에 대한 콘크리트의 저항성을 높이는 기본적인 메카니즘은 황산염과 반응하는 시멘트의 C<sub>3</sub>A 함량을 줄이는 것이다. 이를 위해서는 C<sub>3</sub>A 함량이 낮은 시멘트를 사용하는



(그림 4.3) 포졸란 재료를 첨가한 포틀랜드 시멘트(Type IP)의 황산염해 제어효과



(그림 4.4) 고로 슬래그를 첨가한 포틀랜드 시멘트 (Type IS)의 황산염해 제어효과

것이 가장 쉬운 방법이 될 것이다. ASTM C 150<sup>(7)</sup>에서는 C<sub>3</sub>A의 함량이 최대 5%를 가지는 Type V의 내황산염 시멘트, C<sub>3</sub>A의 함량이 최대 8%를 가지는 Type II의 moderate 내황산염 시멘트에 대하여 규정하고 있다. 그러나, 최근 들어 5종 시멘트의 사용에 대해서는 논란이 많은데, 그것은 C<sub>3</sub>A 함량을 낮추게 되면 그만큼 콘크리트 조직이 약해질 뿐 아니라 염소이온의 고정화 효과가 감소하기 때문에 염소이온의 침투가 우려되는 환경에서는 5종 시멘트에만 의존하는 것은 피하는 것이 좋다.

다른 방법으로는 콘크

[표 4.1] 황산염해의 제어를 위한 시멘트 및 혼화재료 선정 방안 (ACI 201.2R<sup>(8)</sup>)

폭로조건	가수용성 황산염 <sup>(a)</sup> 토양, percent	가수용성 SO <sub>4</sub> , ppm	시멘트	물/시멘트비, 최대값 <sup>(b)</sup>
완만	0.00-0.10	0-150	-	-
보통 (해수포함)	0.10-0.20	150-1,500	Type II IP (MS) IS (MS) <sup>(c)</sup>	0.50
심각	0.20-2.00	1,500-10,000	Type V <sup>(d)</sup>	0.45
매우 심각	2.00이상	10,000 이상	Type V + 포졸란 또는 슬래그 <sup>(e)</sup>	0.45

(a) SO<sub>4</sub>로서 표시된 황산염과 SO<sub>3</sub>로서 표시된 황산염의 관계는 시멘트의 화학분석에서 SO<sub>3</sub> × 1.2 = SO<sub>4</sub>로 알려진 바와 같다.

(b) 더 낮은 물/시멘트비가 콘크리트 내에 매립된 철근의 부식을 방지하기 위해 요구 될 수도 있다.

(c) 시험에 의해 동등한 내황산염 특성을 줄 수 있다고 이미 알려진 Type I 시멘트와 고로슬래그나 포졸란의 혼합.

(d) 시험에 의해 동등한 내황산염 특성을 줄 수 있다고 이미 알려진 Type II 시멘트와 고로슬래그나 포졸란의 혼합.

(e) Type V 시멘트를 함유하는 콘크리트에 사용되었을 경우 내황산염 특성을 개선시킨다고 시험에 의해 이미 알려진 포졸란이나 슬래그의 사용.

리트에 포졸란 또는 고로 슬래그를 첨가하거나 이들을 혼합한 시멘트를 사용하는 방법이 있다. 포졸란과 고로슬래그 등의 혼화재료들은 콘크리트의 수화작용시 발생하는  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 반응하여 칼슘 실리케이트 수화물(calcium silicate hydrate,  $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )을 생성하여 콘크리트의 투수성 및 모세관 작용을 억제하기 때문에 황산염의 침투를 효과적으로 제어할 수 있다(그림 4.3, 4.4). ACI 201.2R<sup>(8)</sup>에서는 이러한 황산염해의 제어를 위한 시멘트와 혼화재료의 선정방안을 [표 4.1]과 같이 제안하고 있다.

### 4.3 동결융해 저항성

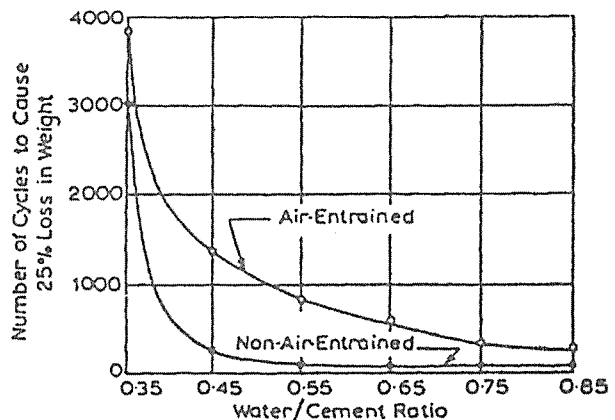
동결융해 손상에 대한 콘크리트의 저항은 여러 가지 성질에 의해 변동되나 가장 중요한 요인은 콘크리트의 포화도(degree of saturation)와 시멘트 경화체의 간극구조(pore structure of the cement paste)이다.

수분함유량에 따른 동결융해 저항성은 포화도가 일정값이하일 때, 매우 높고 포화도의 변동에 따른 저항성의 변화가 작다. 이때의 포화도를 임계포화도라 한다. 대부분의 콘크리트 구조물은 사용기간 동안에 최소한 얼마간이라도 부분적으로 건조되게 되는데 다시 물이 접하게 되었을 때 잃었던 모든 수분을 단번에 흡수하지는 않는다. 따라서 동결융해환경 즉, 겨울이 되기 전에 건조시키는 것이 필요하고 그렇지 않을 경우 적절한 대비를 하지 않으면 동결융해에 의한 손상이 더욱 심화된다. 임계포화도를 구하기 위한 연구결과에 따르면, 폐수조 구조물에서는 91.7% 이상이 수분으로 채워진 경우 동결 시에 구조물이 얼음으로 가

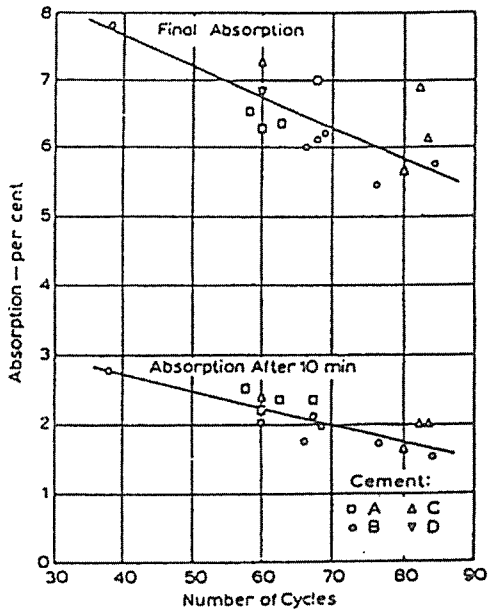
득차고 파열응력(bursting stress)이 작용한다. 따라서, 폐수조 구조물에서는 임계포화도를 91.7%로 간주할 수 있다. 그러나, 콘크리트와 같은 공극성 재료(porous material)에서는 이 임계값을 적용하기 어려우며, 구조체의 크기, 등질성, 동결속도 등에 따라 달라진다.

콘크리트가 동결될 때에는 동결된 간극으로부터 방출된 간극수의 여유공간이 얼음결정이 형성된 간극과 충분히 가까워야 손상을 적게 받을 수 있다. 만약에 경화체가 공기간극에 의해 충분히 얇은 층을 형성하고 있다면 임계포화도는 존재하지 않는다. 따라서, 공기연행(air entraining)을 통해 충분한 공기간극을 형성하는 것이 동결융해 저항성을 높이는 가장 근본적인 대책이 될 수 있다. [그림 4.5]는 공기연행한 경우와 공기연행하지 않은 경우의 동결융해 저항성을 잘 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 물-시멘트비 또한 동결융해 저항성에 큰 영향을 미치는데, 이것은 물-시멘트비가 낮을수록 간극이 적어지고 투수성이 감소하므로 수분의 침투와 이동을 억제하기 때문이다. 이는 콘크리트의 흡수율과 동결융해 저항성의 상관관계와도 일치한다(그림 4.6).

골재의 크기도 동결융해 저항성에 상당한



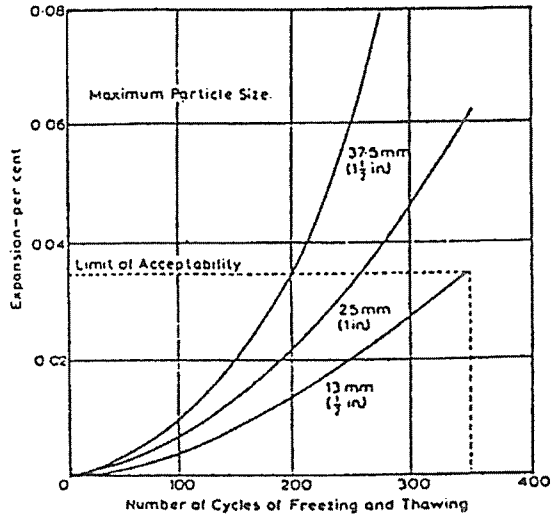
(그림 4.5) 콘크리트의 동결융해 저항성에 관한 물-시멘트비의 영향<sup>(6)</sup>



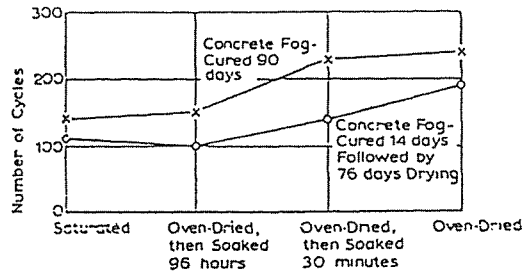
[그림 4.6] 콘크리트의 흡수율에 따른 동결융해 저항성<sup>(6)</sup>

영향을 미친다. [그림 4.7]에 의하면 동일한 포화도를 가진 골재의 경우 크기가 작을수록 동결융해 저항성은 커진다. 콘크리트에서와 마찬가지로 골재에서도 매우 낮은 공극률 (porosity)과 충분히 얇은 대간극에 의해 모세관 현상이 제어 된다면 임계골재의 크기는 존재하지 않는다. 일반적으로 콘크리트 내부의 골재는 밀폐된 용기로 간주되는데 주위의 시멘트 경화체의 낮은 투수성으로 인하여 간극수가 충분히 빨리 공기간극으로 이동하지 못하기 때문이다. 보통의 골재는 0~5%의 공극률을 갖고 다공성은 동결융해 저항에 불리하지만, 반드시 이러한 골재의 사용이 동결손상을 일으키는 것은 아니다. 현재까지의 연구는 일반적 골재에서조차 명확한 골재의 공극률과 동결저항성에 관한 관계가 확립되어 있지는 않다.

배합 전 골재의 건조정도에 따라서도 콘크리트의 동결융해 저항성이 달라진다. [그림



[그림 4.7] 동결융해 시험시 부피팽창과 최대골재치수의 상관관계<sup>(6)</sup>



[그림 4.8] 배합전 골재상태와 25% 중량감소를 일으키는 동결융해 횟수<sup>(6)</sup>

4.8]에 의하면, 포화된 골재, 특히 크기가 큰 골재가 포화된 경우, 공기연행의 유무에 상관 없이 콘크리트는 손상을 입게 된다. 반면에 배합시 골재가 포화되어 있지 않거나 타설이후 부분적으로 건조되고 경화체 안의 모세관이 불연속적이 되면 다시 포화되기가 쉽지 않고 콘크리트가 다시 습윤상태에 이를 때, 세립질의 경화체가 더 큰 모세관 흡입력을 갖기 때문에 골재보다 시멘트 경화체의 포화도가 더 크게 되므로 결과적으로 시멘트 경화체는 더욱 손상을 입기 쉽게 되지만, 이 경우에는 적절한

[표 4.2] 내동해성 콘크리트에 대한 공기량의 추천치(ACI 201.2R<sup>(8)</sup>)

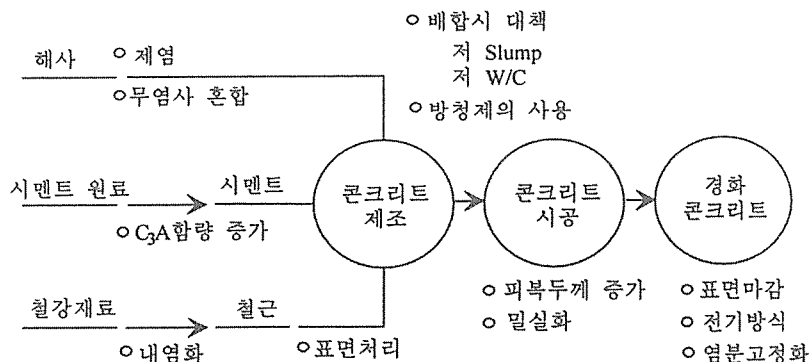
공칭 최대 골재 치수 ,mm(in)	평균 공기량 ,percent <sup>(a)</sup>	
	극심한 노출 <sup>(b)</sup>	완만한 노출 <sup>(c)</sup>
9.5 (3/8)	7.5	6
12.5 (1/2)	7	5.5
19 (3/4)	6	5
38 (1.5)	5.5	4.5
75 (3)	4.5	3.5
150 (6)	4	3

- (a) 현장 시공시의 합리적인 공기량 허용치는 1~1/2%이다.
- (b) 콘크리트가 동결하기 이전에 거의 대부분 수분과 연속적으로 접촉하거나 제설염이 사용고 추운 외기에 노출되는 경우
- (c) 콘크리트가 동결하기 이전에 때때로 수분에 접촉하거나 제빙용 염이 사용되지 않고 추운 외기에 노출

공기연행에 의하여 보호될 수 있다. ACI 201.2R(8)에서는 [표 4.2]와 같이 내동해성 콘크리트의 공기량을 추천하고 있다.

#### 4.4 철근의 방청

철근부식의 제어방안으로는 우선 일차적인 방법으로 콘크리트 품질을 향상시키거나 피복두께를 증가시키는 등의 방법과 이차적인 방법으로서 콘크리트의 표면마감처리, 방청제의 사용, 철근의 금속도금, 수지도막철근의 사용 등이 있다(그림 4.9).



[그림 4.9] 부식제어방안

#### 1) 내투수성의 증진

앞서 서술한 바와 같이 내투수성의 증진을 통해 염소이온 등 부식을 유발하는 유해물질의 침투를 억제할 수 있다. 따라서, 해양환경 하의 콘크리트의 내구성을 향상시키기 위해서는 적절한 물-시멘트비와 단위시멘트량의 표준값을 정해야 한다. 우리나라 콘크리트 시방서<sup>(9)</sup>에는 환경조건을 해중, 해상 대기중, 물보라지역 (splash zone)으로 구분하고 그에 따른 물-시멘트비의 최대치를 [표 4.3]과 같이 규정하고 있다.

#### 2) 콘크리트 표면처리법

콘크리트표면에서 산소, 이산화탄소, 수분, 염소이온 등을 차단하는 방법으로서 콘크리트 표면에 수지계의 도료를 바르거나 타일을 붙이는 등의 방법이 있다. 특히, 바다로부터 바람이 직접 불어오거나 염소이온이 시공 후에 외부로부터 침입해오는 장소에서는 염소이온의 투과억제작용을 가진 마감재를 사용하는 것이 유효하다. 건축물인 경우는 부재두께 등의 관계로 너무 큰 피복두께를 가질 수 없는 경우가 많으므로 이러한 종류의 마감재가 염해 대책의 결정적인 수단이 되는 경우가 많다. 콘크리트의 표면처리법으로는 도장, 코팅, 라이닝, 함침 등의 방법이 있다.

#### 3) 방청제의 사용

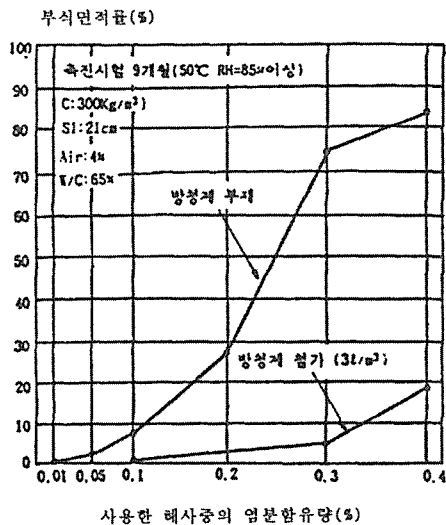
방청제에 의한 방청의 기본원리는 전기화

학적 부식반응의 진행을 억제 또는 지연시키는 것으로서, 부식억제작용에 따라 양극반응을 억제하는 양극방청제(anodic corrosion inhibitor)와 음극반응을 억제하는 음극방청제(cathodic corrosion inhibitor), 방청피막을 형성해서 양극반응과 음극반응을 모두 억제하는 혼합성방청제(mixed corrosion inhibitor)등으로 나눌 수 있으며, 반응물질에 따라서는 유기계 방청제(organic-based corrosion inhibitor)와 무기계 방청제(inorganic-based corrosion inhibitor)로 나누어진다.

[표 4.3] 내구성으로 정해진 AE콘크리트의 최대 물-시멘트비(콘크리트 표준시방서<sup>(9)</sup>)

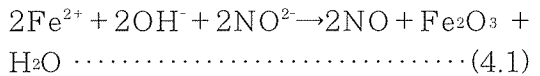
시공조건 환경구분	일반 현장 시공의 경우	공장제품 또는 재료의 선정 및 시공에서 공장제품과 동 등 이상의 품질이 보증될 때
(a) 해중	50	50
(b) 해상 대기중	45	50
(c) 물보라지역	45	45

(주) 실적, 연구성과 등에 의해 확증이 있을 때에는 물-시멘트비를 위의 값에 5~10 정도 더한 값을 사용해도 좋다.

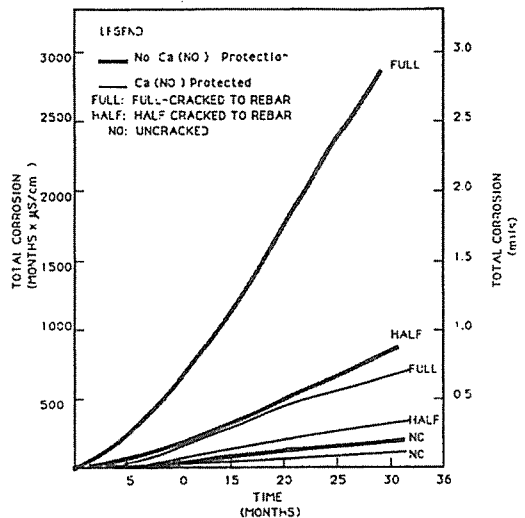


(그림 4.10) 방청제를 혼합한 콘크리트의 방청효과

이 중 콘크리트용 방청제의 가장 기본이 되는 것은 양극방청제로서 철근표면에 부동태피막을 형성하여 부식반응을 억제함으로써 방청효과를 발휘하기 때문에 부동태화제라고도 한다. 가장 널리 사용되는 양극방청제는 아질산칼슘계 방청제(calcium nitrite-based corrosion-inhibitor)이다. 아질산칼슘의 방청원리는 식 (4.1)로 설명될 수 있다. 식에 의하면 아질산이온이 철이온과 반응하여 기체상태의 질소산화물을 발생시키면서 철근표면에 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 불투과성을 갖는 부동태피막을 형성한다. 즉, 염소이온이 부식반응을 촉진시킨다면 반대로 아질산이온은 부식반응을 방해하는 역할을 하는 것이다.



일반적으로 아질산이온은 염소이온과 경쟁적으로 반응하기 때문에 철근 주위에 아질산이온의 양이 염소이온의 양에 비해 얼마나 많이 존재하느냐가 부식억제효과를 결정하게 된다.



(그림 4.11) 균열깊이에 따른 방청제의 방청성능<sup>(10)</sup>

[그림 4.10]은 방청제를 사용한 콘크리트 중의 철근의 부식발생량을 관찰한 연구결과이다.

여러 연구결과에 따르면, 균열이 발생한 콘크리트에서도 방청제는 우수한 방청성능을 나타낼 수 있다. N.S.Berke<sup>(11)</sup>의 연구결과에 의하면 아질산칼슘계 방청제는 균열이 발생한 콘크리트에서도 우수한 방청성능을 나타냄을 알 수 있다. 그는 특히 균열의 깊이를 철근까지 도달한 경우와 덮개의 절반정도 깊이까지 도달한 경우, 균열이 없는 경우로 나누어 부식실험을 수행하였다(그림 4.11). [그림 4.11]에서 방청제를 사용한 콘크리트는 균열이 철근 깊이까지 도달한 경우에도 부식량이 약 1/4정도까지 감소됨을 알 수 있다.

#### 4) 철근의 표면처리법

##### 가) 에폭시수지 도막철근

수지도막 철근은 수분, 산소, 염분 등의 부식성 물질을 철근 표면에서 차단시키기 때문에 균열 등 콘크리트에 결함부가 생기더라도 유효하게 방지할 수 있는 새로운 방식 방법으로써 많은 기대를 모으고 있다. 철근의 방식용도료로서 지금까지는 폴리염화비닐, 폴리프로필렌, 폴리우레탄 등의 수지도료가 검토되어 왔으나 에폭시 수지계의 도료가 가장 좋은 결과를 나타내고 있기 때문에 세계 여러나라에서 해양 철근콘크리트 구조물과 교량 구조물 등 주요 구조물에 에폭시 도막철근이 사용되고 있다.

에폭시수지 도막철근은 도막두께가 두꺼울수록 내식성이 증대하지만, 콘크리트와의 부착성능이 저하하는 문제점이 있기 때문에 방식성능과 부착성능의 균형을 적절히 고려해야 하며 따라서 두께는 150  $\mu$ m 전후가 가장 적당하다고 보고되고 있다. 실제 해상 방치시험 결과, 이 정도의 도막두께를 가진 에폭시도막 철근은 농도가 매우 높은 염수중이나 건조습윤

의 반복작용이 심한 부식 환경하에서도 우수한 내식성을 나타내는 것으로 보고되고 있다.

##### 나) 아연도금

금속 도금의 종류에는 아연도금, 알루미늄도금, 니켈도금, 구리도금, 카드뮴도금 등이 있는데 콘크리트 중의 강재에 대해서는 주로 아연도금(galvanizing)을 사용한다. 아연도금은 콘크리트의 수소이온 농도에 가까운 pH 12~12.5에서 용해속도가 매우 느리고, 아연의 부식 생성물은 용해되기 쉽기 때문에 콘크리트에 균열을 발생시키기 어렵게 한다.

또한 보통의 강재와 거의 같은 방법으로 사용할 수 있으며 시공이 용이하기 때문에 콘크리트 중의 강재의 방식에 매우 적절한 방법으로 기대되고 있다. 포화칼슘 용액중에서 염분의 공식임계농도가 0.2%인 것에 비해 아연도금철근을 사용한 경우에는 0.5%정도라는 연구결과가 있다.

아연도 콘크리트의 수화 초기단계에서 수소를 발생시켜 콘크리트와의 부착을 저해할 가능성은 있지만 산화크롬을 믹싱수중에 혼합하거나 아연도금을 크롬 처리함으로써 이를 방지할 수 있으며, 장기재령에서는 아연도금 철근의 콘크리트와의 부착강도는 보통 철근과 거의 다르지 않는 것으로 보고되고 있다. 아연도금 철근에 관해서는 최근 일본토목학회 및 건축학회가 각각 콘크리트 구조물에 이용할 경우 설계시공지침(안)을 내놓고 있다. 양지침에서 도금 방법과 도금 부착량은 JIS H 8641(용융아연 도금)에 정한 것으로 하고 부착량은 3종 55C(550g/m<sup>2</sup>)가 적당하다고 규정하고 있다. 그러나 아연도금철근의 방식효과에 관해 비말대 등의 격렬한 부식환경에서는 반드시 평가가 일정하지는 않다. 해수의 비말이 도달하는 장소에 건조후 21년 경과한 교량상판에서 철근의 부식이 발견되지 않으며



부착 아연이 초기의 60~70% 잔존하고 있는 예도 있지만 아연도금 철근을 사용한 공시체를 비말대에 11년간 폭로한 결과 철근의 부식에 의해 균열이 발생한 예도 있다. 따라서 아연도금 철근은 콘크리트의 밀실성이 낮은 경우, 피복두께가 불충분한 경우 혹은 콘크리트에 균열이 있는 경우에는 큰 방식 효과를 기대할 수 없다고 생각된다. 때문에 매우 심한 부식환경하에서는 라이닝, 폴리머 콘크리트 또는 폴리머 함침 콘크리트 등 기타의 방식방법과 병용하는 것이 합리적이다.

#### 다) 징크 실리케이트 도장

실리케이트액과 아연분말을 혼합하여 도포하면 두 성분간의 화학반응에 의하여 도막이 형성되며 도막이 형성되는 과정에서 강재면과 화학적인 결합을 이루게 된다. 이 과정을 거쳐 형성된 도막내의 아연금속은 시간이 경과함에 따라 산화되어 산화아연(ZnO)으로 변화하기 때문에 도막내의 빈 공간을 충전시켜 더욱 견고하고 조밀한 도막을 형성하게 된다. 수용성 징크실리케이트 도장의 방식원리는 아연금속에 의한 희생보호방식, 즉 음극보호원리와 아연도금원리를 합한 것으로 도막속에 존재하는 아연금속은 희생보호방식에 의하여 철재면의 부식을 방지하며, 아연금속과 실리케이트액과의 반응에 의하여 형성된 견고한 도막은 외부 부식환경을 차단시켜주는 기능을 가지게 된다. 이 도장의 특징은 철재면과의 접착이 물리적 접착이 아니라 화학 반응형 결합이므로 경화가 완료되면 1500psi 이상의 힘을 가해야만 철재면과의 결합이 파괴되며, 도막에 국부적인 손상이 발생하더라도 손상부위 주변의 도막의 화학작용으로 형성되는 아연-실리케이트 산화물에 의하여 손상부위가 자체치유되는 능력이 있다는 것이다. 또한 불순물이 전혀 첨가되지 않은 순수한 실리케이트액을 사용한 수

용성이므로 휘발성 유기용제를 포함하지 않는 무공해형으로, 밀폐된 공간내부에서도 작업이 용이할 뿐만 아니라 다른 도장방법에 비해 도장수명이 훨씬 길고, 도장비용도 저렴하므로 경제적으로도 유리하다(표 3.2). 그러나, 아직은 주로 강재의 방식에만 적용되고 있으며, 현재 철근콘크리트 구조물에 적용하기 위한 노력이 계속 진행중에 있다.

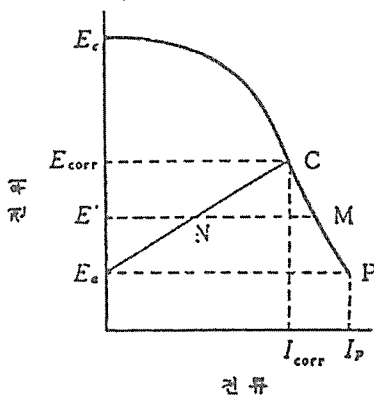
#### 5) 전기방식법

전기방식은 강재의 피복두께나 콘크리트의 밀실정도에 관계없이 콘크리트에 결합부가 생기는 경우에도 강재를 효과적으로 방식할 수 있기 때문에 해양콘크리트 구조물의 방식방법으로서 기대가 크다. 전기방식은 양극방식(anodic protection)과 음극방식(cathodic protection)이 있으나 염분을 함유하는 환경에서는 주로 음극방식에 한정된다. 음극방식의 방법으로는 외부전류에 의해 방식전류를 공급하는 외부전원법과 이종금속간의 전위차를 이용하여 방식전류를 공급하는 유전양극법(의성양극법) 등이 있다. 방식전위는 [그림 4.12]에 표시한 양극분극곡선으로부터 추정될 수 있으나, 양극분극곡선도 주위의 pH, 이온 등의 영향을 받기 때문에 콘크리트 중에서는 통상의 피복되지 않는 강재의 방식전위(-0.85V VS CSE)와는 다르게 된다.

외부전원방식은 정전압 또는 정전류의 외부 전류전원 장치를 사용해 새로 설치한 양극으로부터 콘크리트에 삽입된 강재에 방식전류를 공급하는 방식이다. 이 방법은 방식전압 또는 방식전류를 자유로이 조절 가능하기 때문에 콘크리트 자체의 전기저항이 높은 대기중의 구조물에도 적용이 충분히 가능하며, 이제까지 검토된 전기방식 시스템의 대부분은 이 방법이다. 전기방식을 적용할 때는 방식전류밀도를 적절히 선정하는 것이 경제적으로 중요

하다. 방식전류밀도는 콘크리트의 전기저항, 강재의 종류, 온도 등의 각종 인자의 영향을 받지만 콘크리트 중에 염분이 있는 경우에는  $5\text{mA}/\text{m}^2$ , 염분이 없는 경우에는  $1\text{mA}/\text{m}^2$ 로 한 예가 있다.

유전양극방식은 강재에 대해서 비전위를 갖는 금속(예를 들면 아연 등)을 양극재로 하여 이것을 강재와 전기적으로 접속해 양자의 전위차에 의한 전지작용을 이용해서 강재의 방식전류를 공급하는 전기방식 방법이다. 이 방법은 바다속에 있는 강구조물의 전기방식 방법으로서 일반적으로 사용되는데 바다 속에 존재하는 콘크리트구조물에서는 적용이 가능하고, 외부 전원을 필요로 하지 않는 장점이 있지만 대기 중에 존재하는 콘크리트 구조물의 적용은 방식전류 밀도를 조절할 수 없고, 건조상태에서는 방식에 필요한 전류량이 불충분하며, 아연판의 부식에 의해 전류밀도가 저하될 수 있어 적용이 매우 어렵다.



(그림 4.12) 음극방식의 원리

#### 4.5 건조수축의 제어

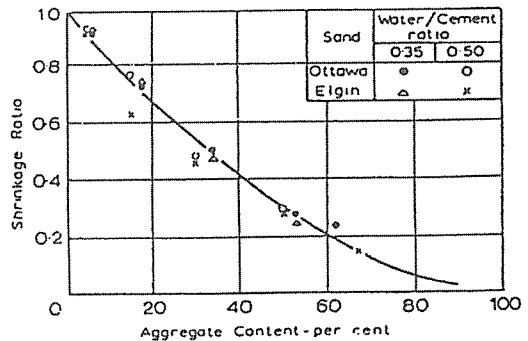
건조수축에 영향을 주는 중요한 인자로는 시멘트, 골재형태, 함수비, 배합성분 등이 있고, 콘크리트의 수분손실율, 수축율, 콘크리트

부재의 크기와 형상, 환경요인, 건조에 노출된 시간 등에 따라서도 큰 영향을 받는다.

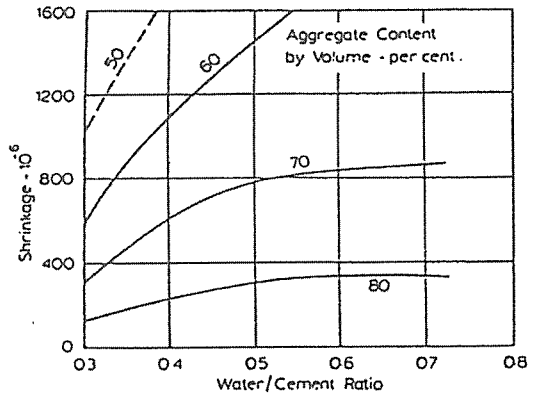
시멘트의 분말도도 건조수축에 다소 영향을 미치지만 그 영향은 그다지 크지 않다.

연구결과에 의하면 분말도가 높은 시멘트가 일반적으로 큰 콘크리트 수축을 초래하는 것으로 나타났으나 그 차이가 별로 크지 않고 오히려 시멘트의 화학성분에 의한 영향이 더 큰 것으로 보고된 바 있다.

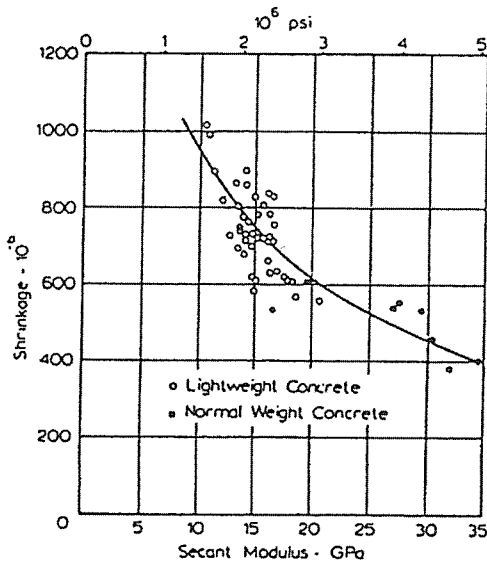
콘크리트 체적의 상당부분을 차지하는 골재는 시멘트 경화체의 수축, 팽창을 억제하여 콘크리트의 수축팽창을 시멘트 경화체 수축팽창의 1/4-1/6로 경감시킨다. 아래 [그림 4.13]에 의하면이 골재량에 따라 건조수축이 감소



(그림 4.13) 골재함량에 따른 건조수축비<sup>(6)</sup>



(그림 4.14) 물-시멘트비와 골재량의 수축에 대한 영향<sup>(6)</sup>



(그림 4.15) 건조수축량과 콘크리트의 탄성계수(secant modulus)와의 관계<sup>(6)</sup>

하는 경향을 나타낸다. 그리고, 콘크리트의 물-시멘트비에 따라서는 [그림 4.14]와 같이 물-시멘트비가 낮을수록 건조수축이 감소한다. 콘크리트의 탄성계수에 따른 영향은 [그림 4.15]에서 살펴볼 수 있는데, 시멘트 탄성계수의 커질수록 수축량이 감소함을 알 수 있다.

#### 4.6 수화열의 제어

수화열에 의한 온도응력 및 균열폭은 구조 형식, 경계조건, 재료, 배합, 시공, 양생, 기상 조건 등 복합적인 요인의 영향을 받는다. 현재까지의 온도균열 제어대책으로는 재료, 배합, 시공을 적절하게 선택하여 실시함으로써 균열 발생을 방지하려는 것이 주를 이루었으나, 균열 발생을 완전히 방지하려고 하면 오히려 불합리 또는 비경제적인 설계, 시공이 이루어지는 경우도 있게 된다. 따라서 줄눈부의 간격, 배근 등을 통해 온도균열을 제어한다는 관점에서 발생온도, 응력, 균열폭 등을 사전에 예

측, 계산하여 이에 따른 적절한 제어대책을 수립하는 것이 바람직하다.

초기 재령 시 매스콘크리트의 온도 및 온도응력에 영향을 미치는 요인은 온도상승량, 구조물의 구속도, 콘크리트의 역학적 특성 등 크게 세 가지로 분류할 수가 있다. 온도상승량에 영향을 미치는 요인으로는 부재치수 및 구조물의 형상, 콘크리트의 열적 특성, 타설 조건 및 주변환경 요인 등이 있다. 구속도는 크게 내부구속과 외부구속으로 나눌 수 있고, 내부 구속의 경우 구조물 단면 내 위치가 가장 큰 영향을 미치며 외부구속의 경우 구속체의 피구속체 간의 탄성계수와 접촉면적 및 피구속체의 크기(L/H비)가 큰 영향을 미친다. 또한 매스콘크리트의 온도응력은 콘크리트의 물성이 급격히 변화하는 초기재령에서 유발되므로 초기재령에서 콘크리트의 역학적 특성이 온도응력에 큰 영향을 미친다. 이러한 역학적 특성은 탄성 및 크리프, 건조수축거동과 강도특성, 열팽창 및 수축 특성 등을 들 수 있다.

결국 매스콘크리트의 온도균열은 타설 후의 시멘트의 수화열에 의한 온도상승 및 강하에 따라 생기는 체적변화가 내부 또는 외부적으로 구속을 받아 발생하는 것으로, 온도균열의 기본대책은 다음과 같이 요약된다.

- ① 콘크리트의 최대 상승온도를 낮게 한다.
- ② 온도응력을 유발하는 구속도를 완화시킨다.
- ③ 온도응력에 대한 저항력을 증가시킨다.

### 5. 고내구성 콘크리트와 고성능 콘크리트

#### 5.1 고성능 콘크리트의 제조 및 제반 특성

지금까지 주로 콘크리트의 성능저하 메커니즘과 내구성의 증진방안에 대해 논의하였으

나, 전술한 바와 같이 고성능 콘크리트는 기본적으로 강도, 유동성, 내구성의 세 가지 요건을 만족시켜야 한다. 그러나, 이 세 가지 요건은 개별적인 요소가 아니라 상호 밀접한 연관성을 가지고 있다. 이미 서술한 바와 같이 내구성의 증진의 기본 메카니즘이 콘크리트의 품질의 향상을 통한 고밀실화이며, 이는 곧 고강도 콘크리트의 개발로 이어진다. 또, 고강도 콘크리트의 개발을 위해서는 필수적으로 유동성의 증진이 동반되어야 할 것이다. 따라서, 건설여건과 상황에 맞게 적절한 목표를 설정하고 이에 따라 어떤 요소에 중점을 둘 것인가를 결정하는 것이 바람직하다. 다음은 고성능 콘크리트의 일반적인 제조 및 제반 특성에 대해 기술한다.

### (1) 고성능 콘크리트의 구성재료

#### 1) 시멘트

고성능 콘크리트의 제조에 있어서 시멘트의 적절한 선정은 가장 큰 관건이라고 할 수 있다. 우선 고성능 콘크리트의 경우 단위 시멘트량이 보통 콘크리트에 비하여 상대적으로 많으므로 시멘트의 미세한 변화에도 품질의 변동이 심하고, 감수제의 사용량이 많기 때문에 배합수와 감수제 등의 복합된 효과를 감안했다. 혼화제는 시멘트 페이스트와 상호작용하기 때문에 혼화제와의 적합성이 매우 중요한 문제가 된다.

#### 2) 골재

골재는 고성능 콘크리트에서 매우 중요한 역할을 한다. 잔골재는 콘크리트의 표면마감, 소요단위수량, 굵은 골재량에 영향을 미치기 때문이다. 또, 굵은 골재는 소요단위수량과 압축, 인장강도 뿐 아니라 건조수축, 크리프, 탄성계수, 내마모성 등에 큰 영향을 미친다. 뿐만 아니라 굵은 골재의 경우 알칼리 골재반응

등과 같이 내구성 측면에도 중대한 역할을 하기 때문에 골재의 선정과 품질관리가 매우 중요하다.

#### 3) 혼화제(chemical admixtures)

고성능 콘크리트에 사용되는 혼화제는 감수제, 고성능 감수제, AE제, 응결지연제, 경화촉진제, 방청제 등 매우 다양하며, 사용량 또한 보통 콘크리트보다 더 많은 경우가 대부분이므로 적절한 혼화제의 선정이 관건이 된다.

#### 4) 혼화재(mineral admixtures)

##### • 플라이애쉬(fly ash)

플라이애쉬는 포졸란계를 대표하는 혼화재로서 화력발전소 등의 미분탄 연소보일러에서 생긴 폐가스 중에 포함되어 있는 미분입자를 집진기로 포집한 것이다. 양질의 플라이애쉬를 적절하게 사용하면 콘크리트의 워커빌리티를 개선하여 단위수량을 감소시킬 수 있고, 수화열로 인한 온도상승이 작게 되며, 수축이 적어지고, 수밀성이나 화학적 침식에 대한 내구성을 개선시키고, 장기재령에서의 강도가 커지는 우수한 효과를 얻게 된다. 플라이애쉬를 사용할 경우의 단점은 물-시멘트비가 낮은 범위에서 포졸란 반응을 더디게 한다는 점이다. 따라서 고성능 및 고강도 콘크리트 제조에 있어 플라이애쉬의 적용은 대략 압축강도가 60MPa에서 90MPa 정도일 경우로 제한하고 있다. 플라이애쉬 사용시의 또 다른 유의점은 제조공정상 품질의 균일성 확보가 쉽지 않다는 점이며, 따라서 정확한 생산치를 주의 깊게 알아보는 것이 매우 중요하다.

##### • 고로슬래그(pulverized blast furnace slag)

제강시 생기는 부산물로 만들어지는 고로슬래그는 다른 혼화제에 비하여 그 품질이 균일한

편이며 장기강도발현 양상도 우수한 편이나 초기재령(28일 이전)의 강도발현이 상당히 떨어지는 경향이 있으므로 사용 시에 이를 고려해야 한다. 양질의 고로슬래그 미분말을 사용하면 콘크리트의 장기강도를 증진시키고, 수화열 발생속도를 늦추며, 수밀성의 콘크리트를 만들어 염소이온 등의 콘크리트 침투를 억제하고, 황산염이나 해수에 대한 화학저항성을 개선시키며, 아울러 알칼리-골재반응을 억제시키는 우수한 효과를 갖고 있다. 또한 워커빌리티를 해치지 않고, 아주 곱게 분쇄된 것이라도 단위수량을 증가시키지 않는다. 그렇지만 그 효과는 화학적 성분이나 급랭의 정도, 분말도, 석고첨가량의 유무, 사용하는 시멘트의 성질이나 단위 결합재량 등에 따라 상당히 달라질 수 있다.

• 실리카흄(silica fume)

실리카흄은 실리콘, 페로실리콘, 실리콘 합금 등을 재련하여 생긴 폐가스 중에 포함된 SiO<sub>2</sub>를 집진기로 채집하여 얻은 초미립자의 분말이다. 실리카흄은 강도발현이 플라이애쉬나 슬래그에 비해 대단히 우수할 뿐 아니라 투수성을 감소시켜 고내구성 콘크리트의 제조에도 매우 유리하다. 실리카흄의 일반적인 대체량은 시멘트 중량비 5%~10%정도이지만 특별한 경우에는 더 많은 양을 사용할 때도 있다. 실리카흄의 사용시 가장 까다로운 문제는 경제성의 확보로 기본적인 가격차체도 높은 편이지만 가격의 변동성 역시 상당히 큰 편이다.

(2) 고성능 콘크리트의 배합

고성능 콘크리트의 배합은 실제적으로 보통 콘크리트와 크게 다르지는 않다. 단, 원재료의 선택에 있어 강도, 내구성, 유동성과 아울러 경제성까지 고려해야 하며, 시험배합(trial batch)을 보통 콘크리트보다 좀더 많이 시행할 필요가 있고, 특히, 시멘트-혼화제의 적합

성 문제를 신중히 검토해야 한다.

고강도 콘크리트를 제조할 경우는 일반 콘크리트와 배합강도의 결정방법이 다소 달라져야 한다. 그것은 원재료의 작은 변화에도 강도의 변동이 보통 콘크리트에 비해 크기 때문에 강도의 표준편차가 더 크기 때문이다.

(3) 고성능 콘크리트의 제조

고성능 콘크리트의 제조에는 몇 가지 다른 점이 있다. dry batch에서 콘크리트를 제조할 경우, mixing은 반드시 트럭에서 이루어져야 한다. 고성능 콘크리트 배합은 점착력이 더 크고 낮은 단위수량으로 인해 mixing이 더 어려운 경우가 많다. 따라서, 적합한 mixing을 보장하기 위해서는 batch나 트럭에서의 컨시스턴시를 고려하는 ASTM C 94<sup>(11)</sup> 등의 규정을 반드시 준수해야 한다. 이 규정은 고성능 콘크리트 배합에대한 트럭의 적정용량을 결정하는 데에도 사용된다. 현장에서의 혼화제 추가 혼입까지 포함해서 적절한 mixing이 되도록 하려면 최대 트럭용량보다 다소 적은 양을 제조하는 것이 바람직하다.

(4) 고성능 콘크리트의 운반 및 관리

고성능 콘크리트의 운반 및 관리에는 세심한 주의와 추가적인 관리시간이 필요하다. 보통 콘크리트에 비해 슬럼프 손실이 크기 때문에 고성능 감수제를 현장에서 투입하거나 추가로 혼입할 필요가 있으며, 방청제를 사용할 경우에는 슬럼프 손실을 막기 위해 현장에서 혼입하는 것이 좋다.

감수제의 추가혼입은 같은 양의 감수제를 혼입하더라도 다른 효과를 나타낼 수 있다. 이러한 영향이 고유동 콘크리트의 제조에 그다지 큰 영향을 미치지 않지만, 저슬럼프 콘크리트의 경우에는 동일한 슬럼프를 얻기 어려울 경우가 있다.

또, 추가로 감수제를 혼입하는 경우에, 빠른 슬럼프손실과 높은 점착력으로 인해 소요의 공기량을 유지하기 어려울 수 있으므로 주의해야 한다.

이상과 같이 고성능 콘크리트의 운반과 관리에는 많은 주의를 요하므로 시공, 운반, 관리방법을 결정하기 전에 시험시공을 통해 전 과정을 검증한 후 이를 실제 적용하는 것이 바람직하다.

#### (5) 고성능 콘크리트의 타설 및 양생

물-시멘트비 0.3이하의 실리카흙을 사용한 콘크리트의 경우에는 습윤양생을 적용하면 7일 이후 강도발현이 나타나지 않는다는 연구결과가 있다. 이것은 콘크리트의 투수성이 초기에 낮아져서 수화에 필요한 수분의 공급이 원활하지 못하기 때문이다. 이러한 현상은 F급 플라이애쉬와 같은 다른 혼화재에서는 나타나지 않는 현상이다. 또, 실리카흙을 사용한 콘크리트는 같은 물-시멘트비를 가진 보통 콘크리트에 비해 강도손실이 큰 경향이 있으며, 양생조건에 매우 민감하다.

블리딩이 없는 콘크리트를 사용하는 경우에는 양생을 빨리 시작하거나 기타 다른 방법을 적용하여 수분 손실을 보충해야만 강도의 발현과 건조수축 균열의 발생을 줄일 수 있다.

콘크리트의 성형이후의 온도는 방습포를 사용하여 관리하는 것이 바람직하다. 따뜻한 날씨라 하더라도 방습포를 사용하는 것이 콘크리트의 표면과 내부의 온도차에 의한 균열을 줄일 수 있으며, 방습포를 사용하더라도 조인트 시공을 검토할 필요가 있다.

### 5.2 고내구성 콘크리트의 적용과 향후 과제

구조물이 건설될 환경에 맞는 고내구성 콘크리트를 적용하기 위해서는 반드시 고려해야

할 점이 있다. 아래의 사항들은 아직은 완전히 확립된 내용이 아니므로 현재로서는 어려움이 있으나 향후 반드시 해결해야 할 점들이기도 하다.

#### ① 내구성 설계법의 확립

고내구성 콘크리트를 적용하기 위해서는 먼저 구조물의 한계상태와 목표 내구년한을 명확히 설정해야 하며, 설정된 내구년한에 맞게 구조물의 소요강도 및 배합을 결정해야 한다. 현재 일본이나 유럽의 경우, 내구성 설계법이 어느 정도 확립되어 가는 단계에 있으며, 우리나라도 내구성 설계법을 개발하고자 하는 노력이 상당한 진전을 거두고 있는 상황이므로 가까운 장래에 이러한 내구성 설계법의 확립이 가능할 것으로 보인다.

#### ② 적절한 재료의 선정

적절한 재료의 선정은 주어진 내구성 설계에 가장 적합한 재료를 선정하는 과정으로서 앞서 서술한 바와 같이 원재료의 품질에 매우 민감한 고성능 콘크리트의 제조에서는 특히 중요한 문제가 아닐 수 없다.

#### ③ 내구성 증진방안의 결정

내구성 설계와 원재료의 선정의 다음 단계로써 외부 환경조건에 적합한 내구성 증진방안을 선정해야 한다. 그러나, 내구성 증진방안을 선정하기 전에 먼저 재료의 배합만으로 내구성이 획득될 수 있는지, 그렇지 못한지를 판단하기 위해서는 내구년한을 합리적으로 예측해야 한다. 내구년한의 예측모델의 개발은 결국 내구성 설계기준을 확립하는 것에도 밀접한 연관을 가지고 있으므로 그만큼 내구년한 예측의 중요성이 크다고 하겠다. 현재 전세계적으로 내구년한 예측모델에 대한 연구가 활발히 진행 중이며, 상당한 진전을 이루고 있는

것으로 보고되고 있다.

④ 내구성 평가기법 및 품질관리 방안의 확립  
선정된 재료와 내구성 증진방안을 적용하더라도 콘크리트의 내구성을 정확히 평가할 수 없었다면 소용이 없을 것이다. 따라서, 소오의 내구성을 가질 수 있는가의 여부를 정확히 평가하고 콘크리트의 제조 및 운반, 관리, 양생에 이르기까지의 품질관리방안을 명확히 확립해야 한다. 나아가, 구조물의 완공 후에도 지속적인 유지관리를 위해서도 구조물의 내구성 평가기법의 확립은 매우 중요한 문제이다.

#### ⑤ 내구성 설계기준의 정립

내구성을 고려한 설계와 시공의 중요성이 매우 시급한 문제임에도 불구하고 내구성 설계와 고내구성 콘크리트를 적용함에 있어 현재까지 내구성 설계기준(code)이 정립되어 있지 않은 상황이다. 따라서, 지속적인 연구와 현장적용을 통해 체계적인 내구성 설계기준의 정립이 절실히 요구되는 실정이다.

## 6. 맺는말

최근 들어서 급속한 경제성장과 함께 인구 과밀화와 시설물 집중현상이 나타나고 있으며, 또한 사용자의 고급화 경향에 의해서 공공 시설 및 주거구조물의 건설은 새로운 추세에 직면하고 있다. 따라서, 구조물의 건설은 대형화, 장대화, 초고층화 그리고 특수화 경향을 나타내고 있으며 동시에 사용성, 내구성, 안전성 등에의 지속적인 향상을 요구받고 있으므로 이에 상응하기 위한 콘크리트 재료성능의 획기적인 발전이 그 어느 때보다도 절실히 요구되고 있는 실정이다.

그 결과 진보된 콘크리트의 총화 개념인 고성능 콘크리트(High Performance Concrete)

와 관련된 여러 가지 시급한 연구과제들이 전세계적으로 떠오르고 있다. 즉, 콘크리트의 초유동성 측정에 대한 방법과 이론, 고성능 콘크리트의 Workability-based Design, 초기 재령에 있어서의 콘크리트 균열과 그 거동에 대한 규명 등이 주로 논의되고 있는 내용들이다. 더불어 새로운 혼화재료와 신소재를 사용하는 콘크리트에 대해서는 그 적용 방법, 그리고 시공상의 특성에 관한 기준들이 각국의 현실에 맞게 시급하게 제정되어야 할 것이다.

또한, 고내구성화의 추세는 세계적인 문제이므로 이에 대한 연구도 시급하고 중요한 문제이며, 고강도, 고성능 콘크리트를 사용한 구조부재에 대한 구조적 거동을 명확히 규명하여, 보통강도의 콘크리트에 적용되던 해석 및 설계이론을 개선하여 고강도 콘크리트에 적합한 해석 및 설계 이론을 개발하는 것이 또 하나의 중요한 연구과제로 부각되고 있다.

지난 수십여년간 콘크리트 관련기술은 양적으로나 질적으로 놀라운 발전을 거듭하여 왔으며, 이러한 추세는 앞으로도 더욱 가속화되리라 예상된다. 이는 새로운 구조시스템의 창출을 가능하게 하여 해양, 깊은 바다, 지하공간, 우주기지 건설 등 모든 공간에서의 콘크리트 구조시스템의 적용은 더욱 늘어날 전망이다. 경제적이고 내구적이며 자연친화적인 재료인 콘크리트는 앞으로의 그 발전 가능성이 고성능 콘크리트 및 고내구성 콘크리트의 개발과 함께 더욱 커질 것으로 확신한다.

## 참고문헌

1. P.Zia, M.L.Leming, S.H.Ahmed, "High Performance Concrete," SHRP-C/FR-91-103, National Research Council, Washington, D.C., 1991.
2. ASTM C 666, "Standard Test Method

- 
- for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing," ASTM, 1997.
3. P.K.Mehta, Concrete: Structure, Properties, and Materials, Prentice-Hall, Inc., 1986.
  4. J.Kdroff, H.K.Hilsdorf, "Performance Criteria for Concrete Durability," Rilem report 12, Rilem, E & FN Spon, London, 1995.
  5. P.Schiessl, "Corrosion of Steel in Concrete," Report of Rilem Report Technical Committee 60-CSC, Rilem, Chapman & Hall, London, 1988.
  6. A.M.Nevile, "Properties of Concrete," Addison Wesley Longman, 4th ed., 1995.
  7. ASTM C 150, "Standard Specification for Portland Cement," ASTM, 1997.
  8. ACI 201.2R, "Guide to Durable Concrete," ACI Manual of Concrete Practise, 1992.
  9. 콘크리트 표준시방서, 건설교통부, 1996.
  10. N.S.Berke, "Corrosion Inhibitors in Concrete," Concrete International, July, 1991, pp. 24-27.
  11. ASTM C 94, "Standard Specification for Ready-Mixed Concrete," ASTM, 1997.
  12. Mays, G., Durability of Concrete Structures: Investigation, Repair, Protection, E & FN SPON, 270pp, 1992.
  13. "고내구성 콘크리트의 개발 및 실용화 연구." 1996, 건설교통부.
  14. J.R.Clifton, L.I. Knab, "Service Life of Concrete", NISTIR 89-4086, National Bureau of Standards U.S. Department of Commerce, 1989.
  15. J.R.Clifton, "Predicting the Remaining Service Life of Concrete", NISTIR 4712, National Bureau of Standards U.S. Department of Commerce, 1991.