

# 해양환경에서의 내구성 향상을 위한 고성능 콘크리트의 적용과 전망

오 병 환 (서울대학교 토목공학과 교수)

## 1. 서론

지금까지 콘크리트는 보통강도 콘크리트(NSC, Normal Strength Concrete)와 고강도 콘크리트(HSC, High Strength Concrete) 등 주로 압축강도에 따라 분류되어 왔다. 그러나, 이러한 분류방식은 이제 고성능 콘크리트(HPC, High Performance Concrete)의 등장과 함께 바뀌어야 할 것이다. 왜냐하면, 강도 뿐 아니라 콘크리트의 여러 특성이 모두 콘크리트의 성능에 결정적인 영향을 미치며, 이러한 특성들은 개별적인 것이 아니라 서로 긴밀한 상관성을 갖고 있기 때문이다. 따라서, 고강도 콘크리트라 하더라도 단순히 강도가 높은 것만을 의미하는 것이 아니라 유동성(Flowability), 수밀성(Water Tightness), 부피안정성(Volumetric Stability), 내구성(Durability)을 비롯한 여러 가지 요구특성이 모두 향상된 콘크리트를 의미하는 것이라야 한다. 이런 의미에서 고강도 콘크리트보다는 고성능 콘크리트가 보다 포괄적이고 적합한 용어가 될 것이다.

최근에는 콘크리트의 강도에만 의존하지 않고 내구성을 설계의 한 요소로 반영하고자 하는 노력이 꾸준히 이루어지고 있으므로, 향후 고성능 콘크리트는 이러한 강도 및 내구성 설계요건을 모두 충족시킬 수 있는 유일한 해답이 될 것이다.

특히, 항만, 교량, 발전소, 해상구조물(Offshore Structures)과 같이 해양환경 하에 건설되는 콘크리트 시설물은 철근부식과 같은 심각한 성능저하

(Deterioration)의 위험에 노출되기 때문에 내구성에 대한 검토가 반드시 필요하며, 고강도를 갖는 고성능 콘크리트의 적용이 필수적으로 요구된다.

여기서는 콘크리트의 성능저하와 내구성의 기본 개념과 해양환경에서의 콘크리트 성능저하 사례를 살펴본다. 그리고, 해양환경에 적용 가능한 고성능 콘크리트의 강도 및 내구성을 분석하고 아울러, 고성능 콘크리트의 경제성을 고찰하여 향후 고성능 콘크리트의 적용방안과 전망에 대해 기술하고자 한다.

## 2. 콘크리트의 내구성

### 가. 성능저하와 내구성

구조물의 성능저하(Deterioration) 현상은 재료의 내부적 영향과 외부 물리적, 화학적 환경요인에 의해 재료의 품질, 기능이 시간이 지남에 따라 서서히 저하됨으로써 구조물의 내구성능이 감소하는 현상을 의미한다. 성능저하의 원인은 대부분 외부 환경요인과 재료자체의 내적 요인이 복합되어 나타나는 데, 외부 환경요인은 극단적인 온도변화와 마찰, 수분, 이산화탄소, 황산염, 염소이온의 침투 등을 들 수 있으며, 내적 요인은 주로 재료 내부의 수분분포, 조직의 치밀성 등이 주된 요소가 된다. 또한, 성능저하의 유형으로는 염해, 중성화 및 철근부식, 황산염해, 용출 등의 화학적 성능저하현상과 동결융해작용, 마모, 충격 등과 같은 물리적 성능저하현상이 있

다. 구조물의 성능저하는 많은 복합적인 요소가 관계되는 현상으로 이러한 여러 요인들에 대한 종합적인 검토와 함께 상호연관성에 대한 폭넓은 고찰이 필요하다.

## 나. 콘크리트의 내구성과 투과성

대부분의 콘크리트의 성능저하는 수분, 이온, 가스와 같은 물질이 콘크리트의 공극(Pores)을 통해 콘크리트 내부로 침투하면서 발생하기 때문에, 콘크리트의 내구성을 결정짓는 가장 기본적인 요소는 콘크리트의 투과성(Permeability)이라 할 수 있다. 따라서, 콘크리트의 투과성을 감소시키는 것이 내구성을 증대시키는 기본적인 방법이 된다.

콘크리트의 투과성을 결정하는 요소는 콘크리트의 공극률(Porosity)과 미세구조(Microstructure) 등에 의해 결정되는 재료자체의 투과성과 하중, 균열분포, 부재치수, 수분분포 등 재료외적인 요소가 있다.(〈그림-1〉)

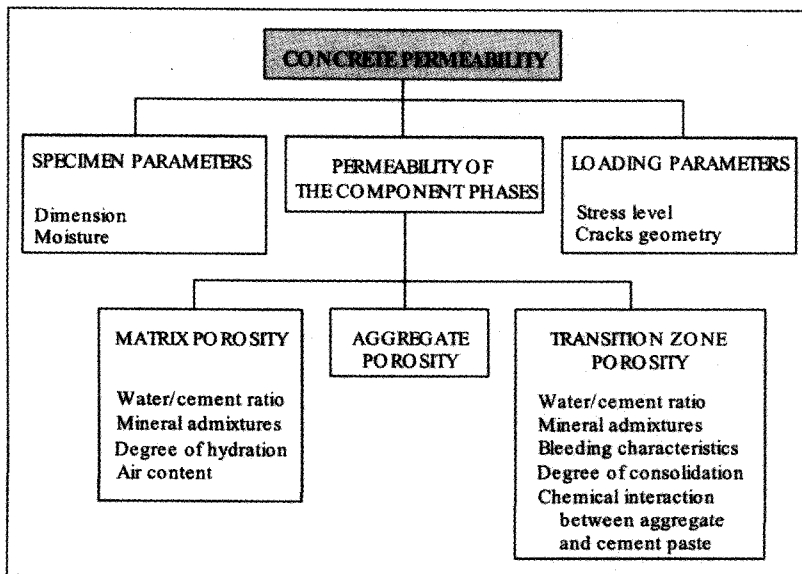
콘크리트의 미세구조를 살펴보면, 시멘트 페이스

트, 골재, 그리고 전이영역(Transition Zone)으로 나눌 수 있는데, 모세공극률(Capillary Porosity)이 커짐에 따라 콘크리트의 투과성은 급격히 증가한다. 공극률 뿐 아니라 공극분포도 콘크리트의 투과성에 큰 영향을 미친다. 즉, 상대적으로 큰 공극률이 많을수록, 서로 연결된(Interconnected) 공극률이 많을수록 투과성은 커진다.

즉, 콘크리트의 공극구조와 투수성은 직접적인 연관성을 갖기 때문에 콘크리트의 공극구조와 관련되는 요소, 즉, 물-결합제비, 포졸란 혼화재료, 강도, 수화도(Degree of Hydration), 양생, 공기량, 다짐도 등이 모두 투과성에 영향을 미치는 주된 요소가 된다.

## 다. 해양환경에 노출된 콘크리트 구조물의 성능저하 사례

해양환경에 노출된 콘크리트의 성능저하 사례를 살펴보면 다음과 같다. 다음의 내용은 Mehta의 조사자료를 참고하여 기술한 사례이다.



〈그림-1〉 콘크리트의 투과성

(1) 1953~55년에 걸친 400개 이상의 20~50년 경과된 덴마크 지역의 해안 구조물에 대한 조사결과, 조사대상 구조물의 40%가 다소의 성능저하를 나타냈다. 이 가운데 가장 심각한 성능저하를 나타낸 구조물은 Oddesund Bridge의 7번 교각, North Jutland의 고속도로 교량, Lim Ford의 콘크리트 방파제(Barrier)로 나타났다.

Oddesund Bridge의 7번 교각은 동결융해 작용과 알칼리-실리카 반응, 황산염해의 복합작용으로 인한 균열과 강도저하를 나타냈다. 일반적으로 이와 같은 구조물은 온도응력에 의해 초기에 균열이 발생하고, 이것이 콘크리트의 투과성을 증가시키는 결과를 초래하여 결국 화학적 침해(Chemical Attack)가 가속화되는 과정을 겪은 것으로 나타났다.

두번째로, North Jutland의 고속도로 교량은 교각 콘크리트에서 균열과 박리가 발견되었고, 조수간만대 중간부(Mid-tide Level)에서 (마모에 의한) 최대의 질량손실이 발생하였으며, 종방향 거더에서 철근부식이 빈번히 관찰되었다. 콘크리트 샘플의 분석결과, 이 교량의 콘크리트는 품질이 매우 낮은 (높은 물-시멘트비) 것으로 나타났다. 그리고, 동결융해작용이나 알칼리-실리카 반응 등의 균열발생으로 인한 기타 유해한 작용은 모두 철근부식을 더욱 가속시키는 결과를 초래했다.

세번째, Lim Ford의 콘크리트 방파제는 시멘트량이  $220\text{kg}/\text{m}^3$ 으로 매우 투과성이 크고, 강도가 낮은 콘크리트로 시공되어, 강한 파도의 충격과 더불어 건설의 반복에 견디기에는 적합하지 못한 것으로 나타났다. 일부 콘크리트 블록은 20년간의 해수에 노출되면서 완전히 파괴된 것도 관찰되었다.

(2) 1962-64년에 Gjørv는 노르웨이 해안선을 따라 700개이상의 콘크리트 구조물을 조사했다. 이 구조물 가운데 60%는 얇은 기둥형식의 철근콘크리트 부두였다. 조사 당시 구조물의 약 2/3는 20~50년 경과된 것이었는데, 조수 최저선 이하(Below the Low-tide Level)와 최고선 이상(Above the High-tide Level)의 콘크리트 기둥은 일반적으로

양호한 상태를 유지하고 있었으나, 비말대(Splashing Zone)에서는 많은 기둥이 손상을 입은 것으로 나타났다. 약 14%의 기둥은 단면적의 약 30% 또는 그 이상의 단면손실을 보였고, 24%의 기둥은 단면의 10~30%가 감소된 것으로 나타났다. 비말대에서의 구조물의 성능저하는 주로 동결융해 작용에 의한 것으로 추정되며, 철근부식에 의한 과도한 손상이 약 20%의 상판 들보에서 발견되었다.

(3) Mehta와 Gerwick은 1980년에 캘리포니아주 샌프란시스코 근교에 있는 San Mateo Hayward Bridge에 몇 개의 Spandrel Beam을 조사한 결과, 이들이 철근부식에 의해 유발된 심각한 균열로 인해 매우 시급한 보수가 필요하다는 사실을 발견했다. 17년 전에 고품질의 콘크리트(시멘트량  $370\text{kg}/\text{m}^3$ , 물-시멘트비 0.45)가 들보 제작에 사용되었으며, 일부는 증기양생된 프리캐스트(Precast)로 만들어졌고, 나머지는 현장타설로 자연양생으로 제작되었다.

현장타설 들보에서는 철근부식이나 균열이 발견되지 않았으나, 증기양생 들보는 해수가 직접 분무되어 접촉되는 아랫면, 바람을 맞는 면에서 균열과 철근부식을 나타냈다. Mehta 등에 따르면, 들보의 크기가 매시브(Massive)하기 때문에 (약  $8 \times 3.75 \times 1.8\text{m}$ ), 다량의 철근량과 증기양생에서 냉각속도의 차이가 복합적으로 작용하여 눈에 보이지 않는 미세균열을 만들어냈을 것으로 추정된다. 그리고, 이 미세균열은 매우 심한 풍화작용(Weathering Action)에 노출되면서 점차 전파되어 연속된 균열을 만들게 되었을 것이며, 해양환경에 노출되면서 점차 투과성이 커지면서 철근부식→균열→철근부식으로 이어지는 연속된 사이클을 반복하면서 마침내 심각한 구조적 손상으로 이어졌을 것으로 추정된다.

(4) Gjørv와 Kashino는 오슬로 항만의 60년 경과된 교각 콘크리트를 정밀조사하였다. 이 콘크리트는 공기연행하지 않았고,  $350\text{kg}/\text{m}^3$ 의 시멘트량과 0.53의 물-시멘트비(설계강도 30MPa)를 사용하도록 당초에 계획되었다. 상판에서 채취한 콘크리트

코어는 60년간 해수에 노출되었으나, 황산염해나 기타 화학적 침해가 발견되지 않았고, 우수한 강도와 낮은 투과성을 나타내었다(압축강도 42~45 MPa, 투수계수  $2.5^8 \times 10^{-13}$  kg/Pa·ms). 이 콘크리트는  $C_3A$  량이 많은 포틀랜드 시멘트를 사용하였으므로, 이 결과는 시멘트 구성성분보다는 투과성이 콘크리트의 해수에 대한 화학저항성에 있어서 가장 중요한 인자임을 명확하게 보여준다. 예를 들어, 에트링자이트(Ettringite)의 생성과 연관된 황산염해는 콘크리트 표면으로부터 5mm까지만 제한적으로 나타났다. Gjørv 등은 10~35mm 깊이에서 일부 미세균열을 발견하였으나, 이것은 시공 시에 발생한 온도균열로 추정되었다. 중성화 깊이는 해중대(Submerged Zone)와 조수간만대에서는 낮았지만(1~7mm), 트레미(Tremie)-타설된 콘크리트 기둥의 윗부분은 상대적으로 높았다(~24mm). 이것은 포화된 콘크리트에서 기체의 확산속도는 급격히 감소한다는 여러 연구자들의 관점과 일치한다.

상판의 하부에서 염소이온은 약 80mm 깊이까지 침투한 것으로 나타났고, 철근깊이에서 염소이온량은 콘크리트 중량의 0.05~0.1%로 조사되었다. 완전 침지된 부분에서의 철근위치의 염소이온량은 0.3~0.35%였다. 교각은 사용수명동안 주로 동해작용과 철근부식으로 인해 종종 보수를 받았다. 첫 번째 보수는 10년간 해수에 노출된 후였고, 그 다음은 16년 후였다. Gjørv 등은 박리구간에서 균열이 다시 발생한 콘크리트를 없애고 다시 타설하는 것은 불과 몇 년후에 다시 그 근처에 새로운 균열이 발생하기 때문에 부식의 진행을 막을 수 없다는 사실을 보여 주었다. 상판의 들보는 콘크리트가 제대로 보호되는 교각의 안쪽에서는 대체로 양호한 상태를 유지하고 있었으나, 해수의 풍화작용에 노출되는 바깥쪽에서는 모든 들보가 철근부식에 의해 발생한 균열이 육안으로 관찰되었다. 몇몇 기둥들은 구조물의 상부(조수간만대 위쪽)에서 철근부식으로 인해 균열이 발생되었으나, 완전 침지된 부분에서는 특기할만한 균열이나 녹 발생이 관찰되지 않았다.

(5) 투과성이 낮은 콘크리트는 해수에 대한 적절한 화학저항성을 나타낸다고 할 수 있지만, 추운 기후에서 공기연행으로 보호하지 않은 콘크리트는 동해에 의해 균열이 유발될 수 있고, 결과적으로 철근 부식에 의해 성능저하가 가속될 수 있다. Khanna 등에 조사에 따르면, 이 같은 사실을 확인할 수 있다. 그들은 캐나다의 New Brunswick, Saint John 의 Rodney Terminal의 콘크리트 파일을 조사한 결과로부터 파일제작과정에서 발생한 온도균열이 부족한 연행공기량으로 인해 동결융해에 의한 균열을 유발시키는 전조가 된다는 사실을 밝혀냈다. 따라서, 이 경우 철근부식에 의한 균열은 2차적인 성능저하 요인이 된다.

(6) 더운 기후에서는 전기화학적 부식반응이 매우 빨라진다. 결과적으로 추운 기후에서 적절한 성능을 나타낸 콘크리트 배합이라 하더라도 더운 기후에서는 만족할 만한 성능을 나타내지 못할 수도 있다. 특히, 중동지역은 환경이 매우 열악하여 그 지역 전체가 마치 실제 규모의 실험실과도 같다고 여길 정도이다. Gerwick에 따르면, 1973~75년 건설된 두바이 터널은 1986년에 초기 건설비용의 두 배의 비용을 들여 전면보수하였으며, 해수로 냉각하는 운하 건설계획에서는 철근부식으로 인한 균열이 발생하여 운하가 완전 개통되기 전에 이미 보수를 해야 했다. 아부다비의 새로 건설된 건조 도크(Dock) 또한 심각한 손상을 입은 것으로 보고되고 있다. 이처럼 더운 기후에서 건설의 반복은 특별히 유해한 조건을 포함하는 것으로 생각된다.

1974년에서 1986년까지의 걸프지역 해안 구조물의 조사결과, Normand는 많은 콘크리트 구조물이 약한 표면 풍화에서부터 철근부식에 의한 심각한 박리에 이르기까지 다양한 손상을 겪었음을 밝혀냈다. 이런 손상은 시공 후 불과 3~10년의 짧은 사용기간 내에 발생했다. 현재의 기준에 비추어 볼 때, 이 구조물은 상대적으로 저품질의 콘크리트(30MPa)로 만들어 졌고, 50mm의 피복두께를 가지고 있었다. 일부 경우에는, 특히 국부 공식이 명확히 보

이는 부분에서는, 철근은 심각한 단면손실을 나타내었다. Normand은 다른 철근을 포함하지 않은 이와 비슷한 품질의 무근 콘크리트에서는, 전체 성능저하 정도가 약간의 표면 풍화가 관찰되었을 뿐 매우 낮다는 사실을 또한 발견했다. 결과적으로, 그는 해양 구조물에서는 철근 콘크리트를 적용하기 전에 매스 콘크리트를 적용할 수 있는지를 면밀히 검토할 필요가 있다고 제안하고 있다. 그는 또한 내구성의 부족 원인에 대해 좀 더 많은 지식을 갖고 이를 Code에 반영했던 1980년대에 건설된 철근 콘크리트 구조물은 만족할만한 성능을 나타낼 것이라는 의견을 제시했다. 그의 이와 같은 의견은 고품질의 콘크리트로 건설된 북해지역의 콘크리트 해상 플랫폼(Offshore Concrete Platform)의 경우로 입증될 수 있다. 이 구조물들은 걸프지역의 매우 더운 건설이 반복되는 기후 대신에, 매우 추운 극한의 기온에 노출되었다. Hoff는 동결융해작용과 철근부식, 화학적 침해, 해양 유기물의 침해, 그리고 충격하중에 대한 관점에서 북해 콘크리트 플랫폼의 성능을 검토하였다. 지금까지의 사용기간은 상대적으로 짧지만, 그는 북해에 위치한 구조물의 전체적인 성능이 매우 양호하며, 앞으로 오랜 기간동안에도 만족할 만한 수준의 성능을 유지할 것으로 내다봤다. 이상 살펴본 바에 따르면, 해양환경에 노출된 콘크리트의 성능저하 양

상은 환경에 따라 다소의 차이는 있으나, 대체로 황산염해, 염해, 알칼리-실리카 반응 등에 의한 화학적 침해와 동결융해작용, 충격, 마모, 온도균열 등과 같은 물리적 성능저하작용이 복합되어 초기의 미세 균열에서 연속된 균열로 전파되고, 이로 인해 철근 부식→균열→철근부식으로 이어지는 순환과정을 거치면서 성능저하가 가속화됨을 알 수 있다.

### 3. 고성능 콘크리트의 적용과 향후 이용방안

#### 가. 고성능 콘크리트의 특성

앞서 해양환경에 노출된 콘크리트 구조물의 성능저하 사례를 살펴보았다.

각 사례들에서 알 수 있듯이, 해양환경에서 구조물의 내구성을 충분히 확보하기 위해서는 고성능 콘크리트의 적용이 필수적이다. 본 장에서는 필자들의 연구에 기초하여 실제에 적용가능한 고성능 콘크리트 배합의 일례를 제시하고, 이 콘크리트의 강도, 내구성과 경제성에 대해 간략히 고찰하고자 한다.

필자 등은 시멘트 종류, 압축강도(물-결합재비), 혼화제 종류, 공기연행제량 등을 변수로 하여 유동성, 강도 및 내구성 실험을 통해 고성능 콘크리트 배합을 개발하였으며, 여기서는 그 일부를 <표-1>에

<표-1> 고성능 콘크리트 배합비

배합번호	결합재(B), kg/m <sup>3</sup>			물 kg/m <sup>3</sup>	잔골재 kg/m <sup>3</sup>	굵은골재 kg/m <sup>3</sup>	AEA %×B	HRWRA %×B
	시멘트	Fly ash	Silica Fume					
N1-Control	380	-	-	164	850	1040	-	1.7
N1-F15	323	57	-	164	850	1040	0.04	1.3
N1-S10	342	-	38	164	850	1040	0.04	1.5
N1-F15,S10	285	57	38	164	850	1040	0.04	1.6
N1-Control	550	-	-	154	609	1142	-	1.8
N1-F15	467.5	82.5	-	154	609	1142	0.04	1.7
N1-S10	495	-	55	154	609	1142	0.04	1.7
N1-F15,S10	412.5	82.5	55	154	609	1142	0.04	1.6
N5-Control	380	-	-	164	850	1040	-	1.2
N5-F15	323	57	-	164	850	1040	0.04	0.6
N5-S10	342	-	38	164	850	1040	0.04	0.8

주) N1, H1 : 1종시멘트 배합, N5 : 5종시멘트 배합

AEA : 공기연행제(air-entraining agent), HRWRA : 고성능감수제(high-range water-reducing admixture)

〈표-2〉 슬럼프, 공기량, 단위중량

실험변수	슬럼프, cm		공기량 %	단위 중량 ton/m <sup>3</sup>
	배합 직후	1시간 후		
N1-Control	19.0	9.0	1.8	2.39
N1-F15	16.0	6.5	3.6	2.37
N1-S10	18.5	7.5	3.5	2.37
N1-F15,S10	19.0	12.5	4.1	2.40
N1-Control	19.5	9.0	1.6	2.37
N1-F15	19.0	11.0	4.2	2.36
N1-S10	20.5	10.5	4.0	2.39
N1-F15,S10	18.5	9.0	3.8	2.42
N5-Control	19.5	11.0	1.6	2.41
N5-F15	20.5	11.5	4.1	2.42
N5-S10	21.0	10.5	3.9	2.43

제시하였다. N1, H1은 1종 시멘트, N5는 5종 시멘트를 사용한 배합으로서 N은 물-결합재비 0.45, 결합재량 380kg/m<sup>3</sup>의 보통강도 콘크리트를 나타내고, H는 물-결합재비 0.28, 결합재량 550kg/m<sup>3</sup>의 고강도 콘크리트를 나타낸다. 공기연행제와 고성능 감수제는 18cm내외의 고유동성과 4%의 공기량을 갖도록 예비실험을 통해 혼입량을 결정하였다.

(1) 굳지않은 콘크리트의 특성

고성능 콘크리트의 굳지않은 특성을 〈표-2〉에 나타냈다. 슬럼프는 대체로 배합직후 18cm 이상, 1시

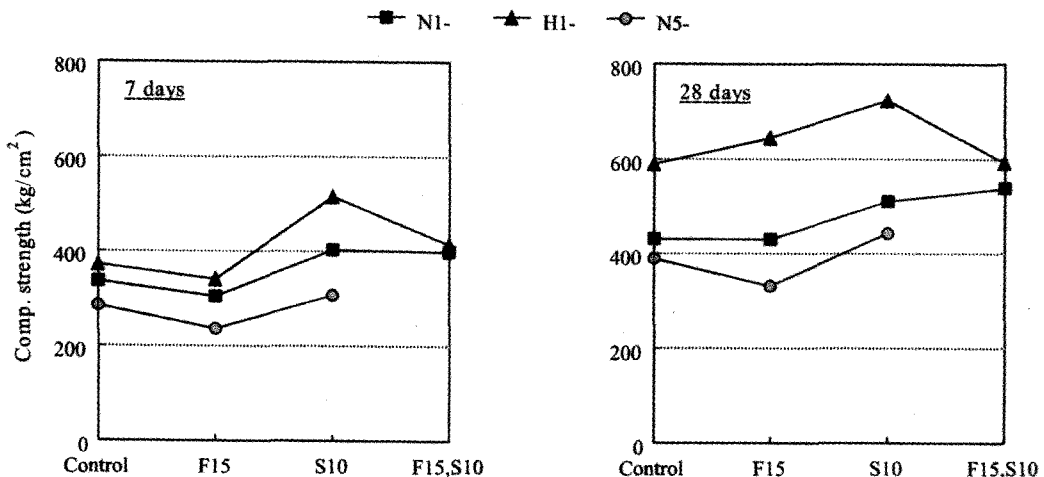
간 경과 후 10cm 내외로 매우 우수한 유동성을 나타냈으며, 심각한 재료분리는 관찰되지 않았다. 그러나, 재료분리와 블리딩에 대해서는 고성능 감수제의 종류에 따라 다소 차이를 나타낼 수 있으므로, 반드시 사전에 고성능 감수제의 적합성에 대한 고려가 필요할 것으로 사료된다. 공기량은 목표 공기량인 4% 내외로 나타났으며, 단위중량은 대체로 보통 콘크리트와 큰 차이를 나타내지 않았다.

(2) 압축강도

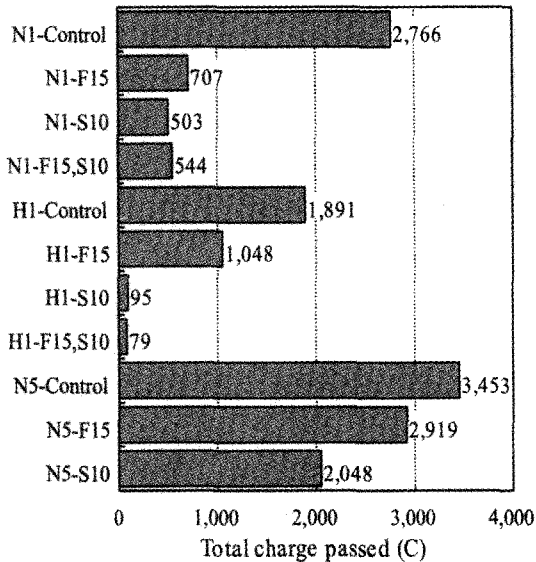
〈그림-2〉에 나타낸 바와 같이 압축강도는 N5 < N1 < H1의 순으로 나타났다. 모든 경우에 대해 실리카흙 10%를 사용한 배합의 강도가 가장 우수하게 나타났다.

(3) 염소이온투과성(Chloride Permeability)

콘크리트의 투과성은 앞서 서술한 바와 같이 내구성의 가장 기본적인 척도가 된다. 이를 측정하는 방법으로 Water Permeability를 측정하는 방법, Gas Permeability를 측정하는 방법 등이 있으나, 두 방법 모두 오랜 시간이 소요될 뿐 아니라 고성능 콘크리트의 경우 침투량이 매우 적기 때문에 소요의 기간에 투과성을 측정하기는 매우 어렵다. 반면, 염소



〈그림-2〉 압축강도



Charge	Permeability (ASTM C1202)
< 100	negligible
100 to 1000	very low
1000 to 2000	low
2000 to 4000	moderate
> 4000	high

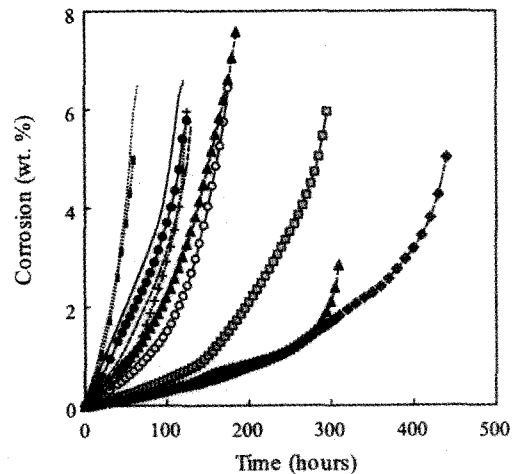
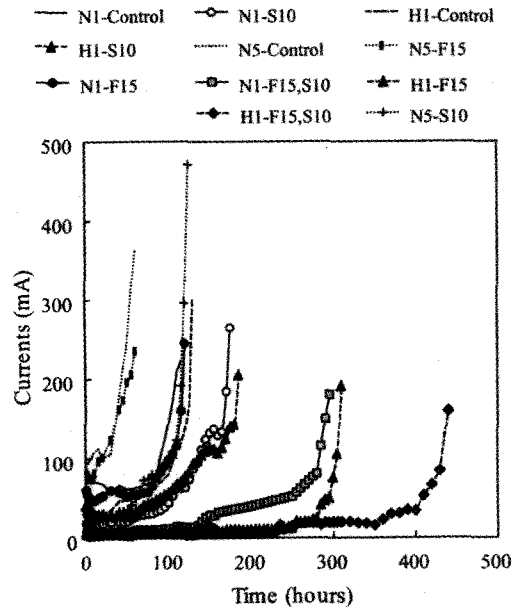
〈그림-3〉 염소이온투과성

이온을 전기적으로 촉진침투시키는 방법(RCP, Rapid Chloride Permeability Test)은 상대적으로 이런 단점을 극복할 수 있다. 다만, 이 실험방법으로 측정된 전하량으로부터 직접 투수계수를 추정하기 어렵다는 점이 가장 큰 단점으로 지적된다.

〈그림-3〉은 RCP에 의해 측정된 전하량을 배합 변수별로 나타내고 있다. 압축강도의 결과와 유사하게 실리카흙 10%를 사용한 배합과 실리카흙 10%+플라이애쉬 15%를 사용한 배합이 가장 낮은 전하량을 나타냈으며, 모든 배합이 'Moderate' 이하의 투과성을 보이고 있어 양호 또는 매우 우수한 내구 성능을 확보할 수 있음을 보여주고 있다.

#### (4) 부식 저항성과 동결융해 저항성

〈그림-4〉와 〈그림-5〉는 각각 전위차에 의한 염

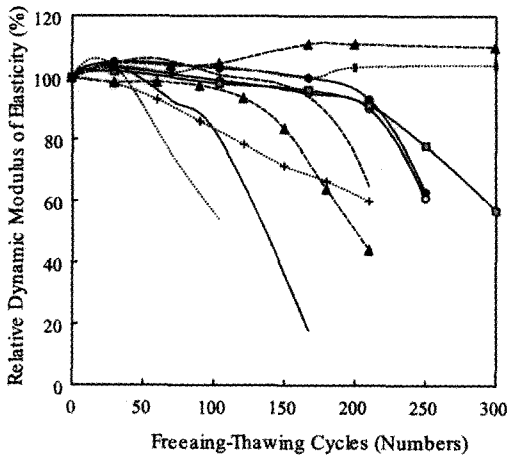


〈그림-4〉 전위차 촉진부식 양상

소이온의 침투로 유발된 부식 저항성 실험결과와 동결융해 저항성 실험결과를 나타내고 있다. 대체로 우수한 저항성을 보여주고 있으며, 실리카흙 배합의 경우 매우 우수한 내구성을 보이고 있다.

#### (5) 황산염해 저항성(Resistance to Sulphate Attack)

고성능 콘크리트의 황산염해 저항성 실험결과, 모



	Durability index	Air content (%)
N1-Control	25.0	1.6
N1-F15	52.0	3.6
N1-S10	51.0	3.5
N1-F15,S10	57.0	4.1
H1-Control	44.0	1.6
H1-F15	105.0	4.2
H1-S10	36.0	4.0
H1-F15,S10	-	3.8
N5-Control	19.0	1.8
N5-F15	104.0	4.1
N5-S10	42.0	3.9

— N1-Control    ▲ H1-F15  
 ● N1-F15    ▲ H1-S10  
 ○ N1-S10    ..... N5-Control  
 ■ N1-F15,S10    + N5-F15  
 --- H1-Control    + N5-S10

<그림-5> 동결융해 저항성

든 배합이 6개월 이상의 침지 후에도 이렇다 할만한 부피변화를 나타내지 않아 매우 우수한 황산염해 저항성을 보여주고 있다.

### 나. 경제성 분석

필자 등은 연구보고서(「고품질 시공을 위한 고내구성 콘크리트의 개발 및 실용화 연구」)에서 개발

된 고성능 콘크리트의 경제성을 간략히 분석하고 있다. 그에 따르면, 고성능 콘크리트의 적용은 약 2.5 배까지의 콘크리트 재료비의 증가를 가져오지만, 이는 초기 건설비용의 대체로 5% 이하의 증가에 그친다고 보고하고 있다.

그러나 이러한 건설비용의 증가는 구조물의 내구수명의 증대로 인해 유지보수비용의 상당한 수준까지 줄일 수 있을 것으로 기대되므로 구조물의 총비용의 측면에서 볼 때는, 결국 훨씬 더 경제적인 구조물의 시공 및 관리가 가능할 것으로 사료된다.

## 4. 맺음 말

### - 고성능 콘크리트의 향후 이용방안 및 전망 -

해양 콘크리트 구조물의 내구성 향상을 위해서는 고성능 콘크리트의 적용이 반드시 필요하며, 따라서 현재의 설계기준에서도 해양 콘크리트의 물-결합재비를 45% 이하로 규정되는 등 이러한 요구를 이미 반영하고 있다. 뿐만 아니라 앞으로 내구성 설계기준이 확립된다면, 내구성에 대한 요건이 점차 더 강화될 것으로 예상되며, 따라서 고성능 콘크리트의 적용이 더욱 가속화될 것으로 보인다.

앞서 고성능 콘크리트 배합의 예를 간략히 살펴본 바와 같이 유동성, 강도 및 내구성이 모두 우수하면서도 상대적으로 초기 건설비용의 증가는 그리 크지 않으므로, 고성능 콘크리트의 우수성은 명확하다고 할 수 있을 것이다. 반면, 해양 콘크리트 구조물의 내구성 확보를 위해

- ① 내구성 설계 및 해석기법 확립
- ② 내구성 평가기법
- ③ 내구성을 고려한 설계기준의 정립

등을 비롯하여 아직도 해결해야 할 과제는 많이 남아 있으며, 앞으로 이를 위해 더 많은 노력을 경주해 나가야 할 것이다. ▲