

# 고연성을 갖는 초고강도 콘크리트 (Ductal)

민 경 소 (라파즈한라시멘트(주) 기술연구소 소장)

## 1. 서 론

콘크리트는 가장 널리 사용되어지는 건축재료이지만 휨강도, 인장강도 및 무게에 비해 비강도가 작고 균열에 대한 저항성이 매우 약한 취성재료(Brittle material)라는 단점을 가지고 있다. 이러한 콘크리트의 단점을 개선하기 위한 노력으로서 철근을 사용하기도 하고, 시멘트계 매트릭스중에 섬유(Fiber)를 첨가하여 인장강도를 보강하기도 하며, 혼화제등을 개발하기도 하였으나 획기적인 방법이 되지는 못했다. 그러나 최근 건축재료, 건설, 화학업종에서 각각 세계적인 회사들인 Lafarge, Bouygues 및 Rhodia 社가 「고연성을 갖는 초고강도 콘크리트(제품명 Ductal)」를 공동으로 연구·개발하였으며, 이에 대한 설명회를 9월 22일 서울에서 개최하였다. 본 필자는 Ductal 개발의 기본개념이 초고강도를 나타내기 위한 DSP 개념과 연성을 나타내기 위한 fiber 첨가라는 두 개의 이론으로 부터 출발하지 않았나 생각한다. (그러나 10월 프랑스 리옹에 있는 Lafarge의 R&D center에서 본 제품의 개발 주역인 Dr. Casanova를 만났을 때 그는 DSP와 fiber가 함께 공존하는 새로운 개념을 도입해야 할 것이라고 말했다.)

따라서 본稿에서는 fiber 첨가 및 DSP화에 따른 각각의 콘크리트 성질의 개선과 이들 개념이 합쳐져 만들어진 Ductal의 물성에 대하여 Paul Acker 씨가 발표했던 내용을 기초로 살펴보고자 한다.

## 2. 섬유보강 콘크리트 (Fiber Reinforced Concrete)

콘크리트는 본래 취성재료이며 취성이라는 것은 일반적으로 재료나 구조물이 파괴에 이르기까지의 에너지 흡수능력으로 정의되는데 소성변형 능력을 표시하는 연성(Ductility)과는 상반되는 특성이며 큰 취성을 얻기 위해서는 고강도에서 고연성이 필요하다.

섬유보강 콘크리트는 이러한 문제점을 해결하는 좋은 방법이 되는데 steel fiber 보강 콘크리트와 보통콘크리트의 물성을 비교하면 <표-1>과 같다. 표에서 보여지는 바와 같이 섬유보강 콘크리트의 인장, 휨, 압축 및 전단등의 각종 하중에서의 물성은 보통 콘크리트의 경우에 비하여 우수한데 이것은 주로 섬유의 균열에 대한 저항성에 의존한다. 즉 섬유보강 콘크리트에서는 초기 균열발생 이후 극한 변형 영역에 달하기까지 섬유가 인발됨으로써 균열이 지지되고 균열의 급격한 진행을 저지·분산시키는 효과가 있다. 더욱이 휨 재료에서는 상기의 현상이 인장영역에서 중립축으로 향해 서서히 생기기 때문에 일반적으로 고변형 영역에서도 보통 콘크리트보다는 급격한 내력 저하는 나타나지 않는다. 일반적으로 섬유보강 콘크리트의 물성에 영향을 미치는 인자들로서는 다음과 같은 것들을 들 수 있다.

- ① 섬유의 치수 (직경과 길이)
- ② 섬유의 기하학적 형상
- ③ 섬유의 혼입률

〈표-1〉 SFRC와 보통콘크리트와의 물성비교 (Vf=2%의 경우)

제원	보통 콘크리트에 대한 비
초기 균열강도	1.5 ~ 2.0배
인장, 휨강도	1.5 ~ 1.8배
압축강도	1.0 ~ 1.3배
전단강도	2.5 ~ 3.0배
취성	400 ~ 200배
피로강도	개선됨
내충격성	1.5 ~ 2.0배
내열성	현저히 개선됨
동결융해 저항성	비슷함
균열 저항성	2 ~ 10배
신장능력	약 2배

\* Vf: 용적 혼입률

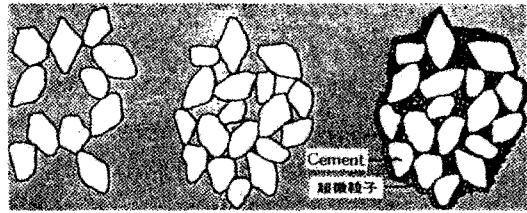
- ④ 섬유와 매트릭스간의 부착강도
- ⑤ 섬유의 분산과 배향

### 3. DSP 시멘트

효과적으로 경화체의 치밀화가 이루어질 수 있도록 시멘트와 초미분말을 배합하고 분산제(고유동화제)를 사용하여 분산효과를 높이며 적은 수량으로 유동성을 확보하여 치밀하게 성형하므로써 공극을 줄인 것을 DSP (Densified system containing homogeneously arranged ultra-fine particle)라 칭한다. 〈그림-1〉에 DSP paste의 모식도를 나타내었다.

초미립자로서는 통상의 시멘트 입자크기 (약 10 ~ 30um)에 비해 작은 입자크기를 가진 것으로 실리카 흙(silica fume), 고로 slag 미분말, 플라이 애쉬(fly ash)의 분쇄·분급품이나 meta kaolin 등이 이용되고 있다. DSP 시멘트의 성형은 주입성형이 주체이지만 press, 압출등의 성형방법도 이용될 수 있다.

DSP 시멘트 paste는 수화시 포졸란반응이 진행되어 강도가 지속적으로 발현된다. 실리카 흙은 대



시멘트 paste    고강도시멘트 paste    DSP paste

〈그림-1〉 DSP paste의 모식도

표적인 포졸란 물질이며 시멘트에 비해 수화가 느리고 많은 양의 유동화제로 인해 초기반응이 지연된다. 이러한 초기반응의 지연은 양생온도를 올림으로써 개선할 수 있다.

DSP 경화체는 미수화물 입자가 치밀하게 충전되어 있고 그 사이의 공극을 수화물이 메꾸고 있으며, 이 수화물은 주로 시멘트와 공극에 있던 실리카 흙의 포졸란반응에 의한 생성물로 되어 있다고 생각할 수 있다. 즉, inner filler로서의 미반응 입자를 Ca/Si 비가 낮은 치밀한 수화물들이 연결되어 경화체를 이루고 있어 이 inner filler의 작용과 치밀한 조직이 crack의 진행을 방해하여 DSP 경화체의 강도가 커지는 것이다.

### 4. 고연성을 갖는 초고강도 콘크리트 (제품명 Ductal)

#### 가. 개요

1988년 세계적인 건축회사인 Bouygue는 초고강도 콘크리트에 대한 연구를 시작하여 1993년 reactive powder concrete에 대해 특허를 출원하고 1994년 10월 Bouygue-Lafarge-Rhodia 사이에 5년간 예정으로 연구를 시작하였다. 그 결과 1997년 11월 금속섬유를 첨가한 Ductal FM에 대하여, 1998년 4월 유기섬유를 첨가한 Ductal FO에 대하여 특허를 출원하였다.

Ductal은 일반 portland cement와 quartz sand, quartz flour, silica fume, mineral filler 그리고 superplasticizer 등으로 만들어 지는 초고강도, 고연

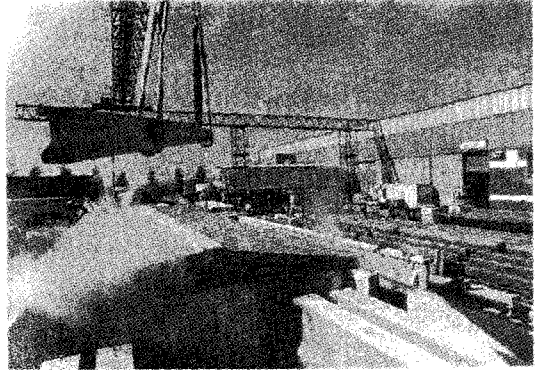
〈표-2〉 특정 배합설계에서의 각종 물성

	3-days with 90°C-curing for 48h	28-days wet room curing
Slump flow (ASTM shock-table) (mm)	> 200	> 200
Compressive strength 3 cylinders, dia. 7-cm (Mpa)	235	195
Flexural strength (1x1x16cm bending test) (Mpa)	45	40
Modulus of Elasticity (GPa)	60	57

성, 고내구성 및 미려함을 갖춘 섬유-시멘트 매트릭스 건축재료(fiber-cement matrix construction material)이다. 초고강도와 고연성을 동시에 가지고 있으므로 철강이나 철근과 같은 추가적인 보강자재 없이도 초고강도를 목적으로 사용 할 수 있다. 또한 Ductal은 단일제품이 아닌 여러제품이 있는 제품 群이다. 즉, 강도가 중요시 되는 곳에는 금속섬유를, 내구성이 중요시 되는 곳에는 유기섬유를 사용하고 또는 두 섬유를 혼합사용하기도 하는 등 사용자의 요구에 의해 다양한 제품을 만들 수 있다.

### 나. 고강도

Ductal의 가장 큰 특징은 초고강도를 나타내며 동시에 고연성을 가지고 있다는 것이다. 〈표-2〉에 2%의 steel fiber를 함유한 Ductal의 압축강도 및 휨강도를 나타내었다. Slump flow 200mm 이상에서 일반양생의 경우 28일 압축강도가 약 2,000kg/cm<sup>2</sup>를 나타내며, 90°C에서 2일 양생한 경우에는 3일강도가 무려 2,400kg/cm<sup>2</sup> 까지 올라간다. 앞서도 언급한 것처럼 포졸란 반응성을 갖는 실리카 흙의 반응성이 포틀랜드 시멘트 보다 낮고 유동화제와 같은 혼화제의 다량 첨가에 의해 초기 반응성이 떨어지나 고온 양생에 의해 빠른 시간에 강도를 발현 시킬 수 있다. 즉 양생초기에 온도를 올려줌으로서 신속한 반응과 더욱 높은 강도를 나타낼 수 있으므로 일반 시공 뿐 아니라 precast concrete나 prestre-ssed



〈그림-2〉 Prestressed concrete의 적용 예  
(Cattenom 핵발전소용 prestressed beam)

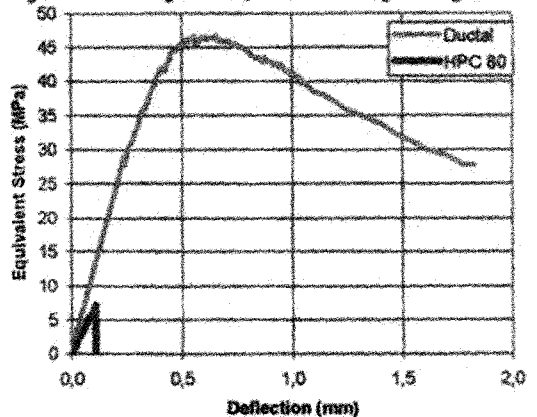
concrete로 적용해도 좋을 것이다.

(적용 예 : 〈그림-2〉 Cattenom 핵발전소용 prestressed beam의 조립모습)

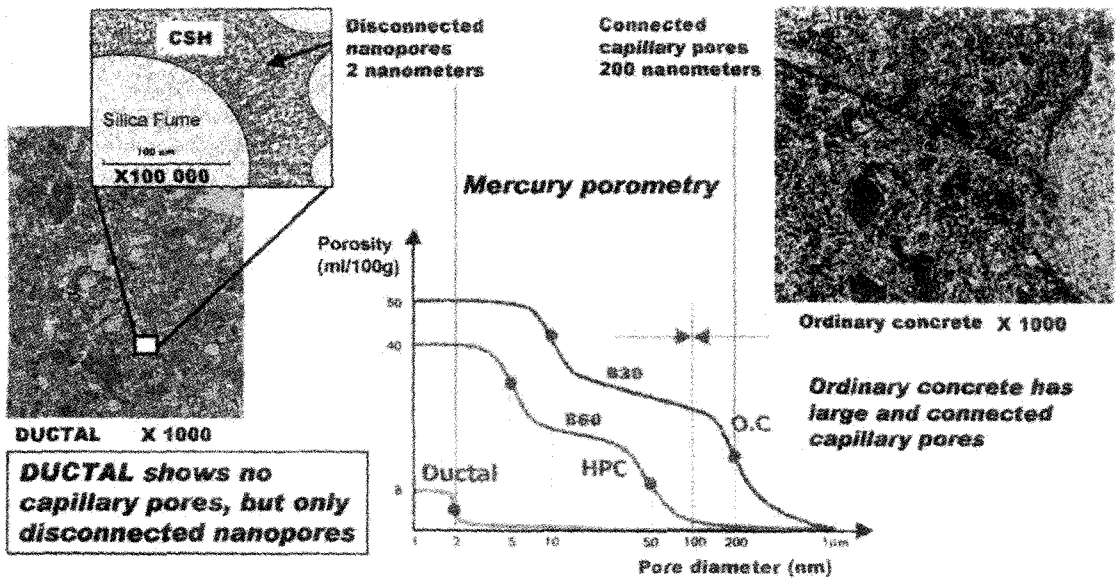
### 다. 고연성

〈그림-3〉에 보강 철근없이 휨 강도에 대한 특성을 high performance concrete와 비교하여 나타내었다. 이러한 연성은 1차 crack 이후 깨어짐 없이 큰 변형을 받아들일 수 있는 능력으로 특징지을 수 있다.

Performance in flexure, without reinforcing steel



〈그림-3〉 휨강도 특성 (보강 철근 없음)



〈그림-4〉 Porosity와 미세구조의 비교

## 라. 내구성

콘크리트의 내구성은 porosity, permeability, diffusivity 등과 같은 물리적인 변수에 의해 좌우된다. Ductal의 내구성능은 일반 콘크리트와 고성능 콘크리트와 비교하여 5년간 측정, 평가되었으며 이들 실험에서 얻어진 결과는 탁월한 내구성을 증명해 준다.

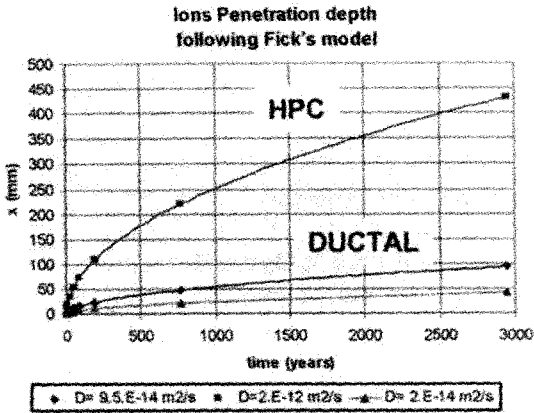
먼저 porosity 측면을 살펴보기 위해 〈그림-4〉에 수은압입법에 의해 측정된 porosity와 미세구조를 나타내었다. 기존의 일반 콘크리트가 200 nanometer 정도의 크기를 갖는 연결된 capillary pore로 되어 있는 것에 반해 Ductal은 2 nanometer 이하의 연결되지 않은 pore들로 이루어져 있으며, 그 양도 매우 작음을 볼 수 있다.

〈표-3〉에는 양생조건이 다른 2종류의 Ductal과 각종 콘크리트의 permeability 특성을 비교하여 나타내었다. 앞에서 보았던 연결되지 않은 nanopore들과 작은 porosity로 인하여 Ductal의 permeability가 다른 콘크리트에 비해 작은 것을 알 수 있다.

〈그림-5〉는 고성능 콘크리트와 각각 다른 조건으로 양생한 2종류의 Ductal 구조물에 대해 Ficks의 모델로부터 구한 확산계수로부터 시간에 따른 tritium 이온의 침투깊이를 추정한 것이다. Tritium 이온이 50mm의 Ductal 층을 통과하는데는 약 800년의 시간이 걸리는 것으로 추정되는데 비해 18년이면 같은 깊이의 고성능 콘크리트 층을 통과할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 치밀한 구조 때문에 동결융해, 탄산화, 황산염, 염화물 등에 대한 저항성이 고성능 콘크리트에 비해 20~100배정도 높음이 실험적으로 증명되었다.

〈표-3〉 각종 콘크리트의 Permeability 비교

Concrete	DUCTAL		HPC	OC
Curing mode	20°C (28d)	20°C (2d) + 90°C (2d)	20°C (28d)	20°C (28d)
W/C	0.20	0.20	0.35	0.50
Permeability				
N <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (no drying)	1.0×E-22	1.0×E-22	1.0×E-19	2.0×E-18
N <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (severe drying)	<1.0×E-20	<1.0×E-20	5.0×E-18	3.5×E-17

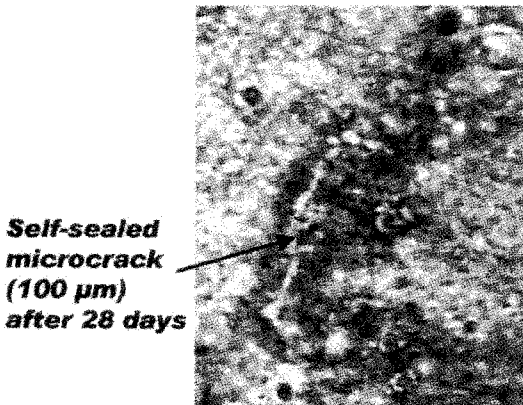


〈그림-5〉 시간의 경과에 따른 Tritium이온의 투과 깊이

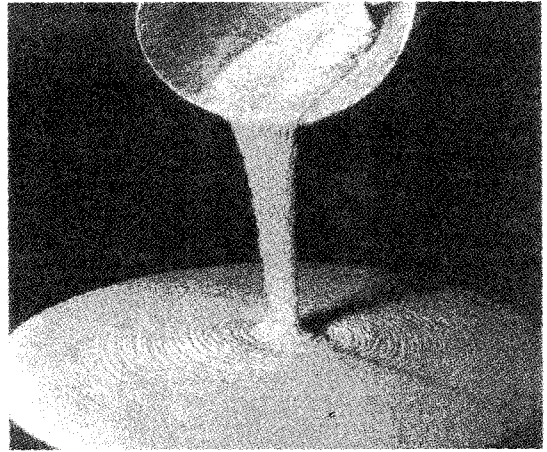
일반적으로 DSP 시멘트의 경우에는 미수화물이 많다. 예를 들어 W/C가 0.18~0.22인 경우 35~50% 정도가 수화를 한다. 미수화 입자들은 micro-filler로서 작용을 하며 microcrack으로 물이 스며들 경우 수화되어 microcrack을 채우는 자기봉합 (self-sealing) 효과를 나타낸다. 이러한 현상을 보여주는 미세구조 사진을 〈그림-6〉에 나타내었다.

### 마. 작업성

Ductal은 각각 다른 크기의 미세한 분말로 되어 있으며 시멘트와 superplasticizer와의 적절한 조화



〈그림-6〉 self-sealing 효과를 나타내는 미세구조 사진

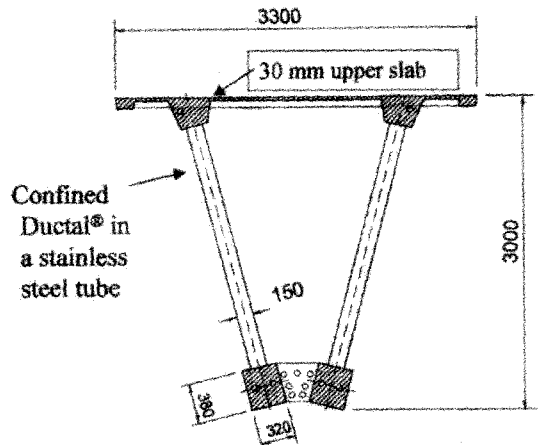


〈그림-7〉 Ductal의 고유동성

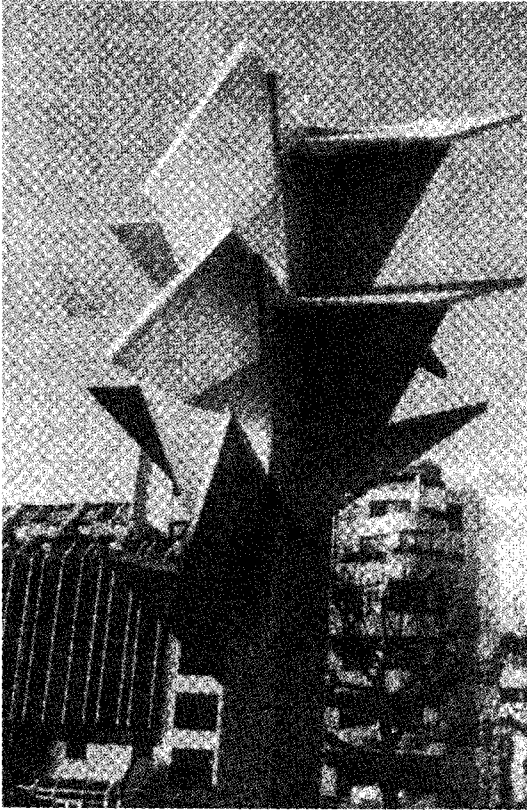
에 의해 낮은 w/c로도 자기타설 (self-placing)이 가능하므로 타설시 vibrating이 필요없는 초유동 콘크리트이다.〈그림-7〉)

최근 콘크리트를 강관에 충전시켜 부재내력이 상승하고 뛰어난 변형능력을 발휘하여 각광을 받고 있는 concrete filled steel tube 방식의 공사에도 적당하다.

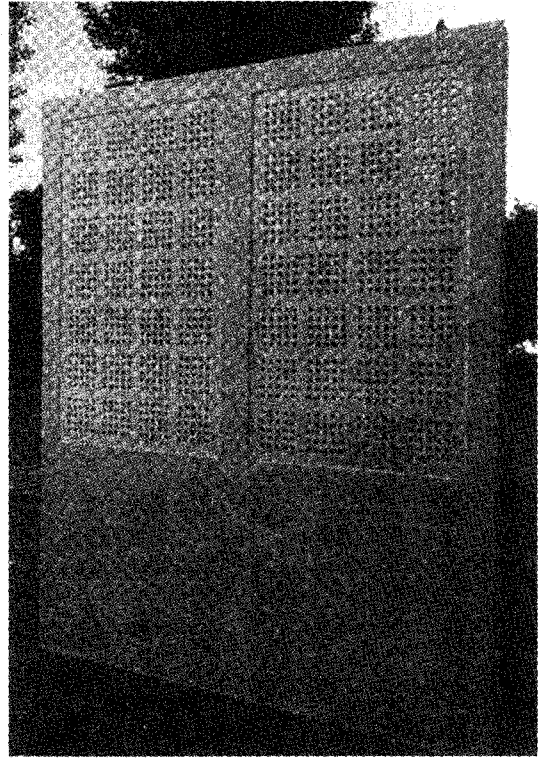
〈그림-8〉에 concrete filled steel tube 방식을 적용한 Canada의 Sherbrooke 인도교의 적용 예를 나



〈그림-8〉 concrete filled steel tube의 적용 예 (Canada의 Sherbrooke 인도교)



〈그림-9〉 Boulogne-Billancourt 광장에 있는 조형물



〈그림-10〉 Monaco 지하철역에 설치된  
Acoustic wall panel

타내었다.

또한 자가다짐에 따른 유동특성은 ASTM shock table에 의한 flow가 250mm, Abrams cone에 의한 flow가 50~70cm 이다.

## 바. 기타

Ductal의 미려한 외관을 이용하여 조형물(〈그림-9〉)에 이용되기도 하며, Monaco 지하철 역에 시공된 acoustic wall panel 처럼 방음벽으로 사용되기도 한다. 이 panel은 2.3m×1.9m, 두께 20mm의 판에 15×15mm 크기의 사각형 구멍을 낸 것으로 총 430개가 소요되었다.(〈그림-10〉)

## 5. 결 론

지금까지 고연성을 갖는 초고강도 콘크리트인 Ductal에 대하여 간략히 기술하였다. 아직도 우리나라는 특수한 목적에 맞는 시멘트의 사용 보다도 1종 보통 시멘트가 차지하는 비중이 너무 큰 실정이다. 그러나 최근 건축물의 초고층화 및 특수 구조물들의 출현으로 인해 특수한 목적에 맞는 시멘트 및 콘크리트에 대한 요구가 절실히 요구되어지고 있다. 이제 학계, 산업계 모두가 소비자가 요구하는 특수 기능을 발휘할 수 있는 재료와 시공기술을 개발하여 고품질의 건축물을 건설하는데 힘써야 할 때가 아닌가 한다. ▲