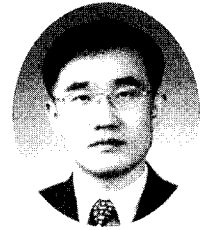


Fiber를 함유한 초치밀질 시멘트의 특성과 그 이용

- Properties and Applications of Highly Densified Cement with Fiber -



민경소*

1. 서론

콘크리트는 현재까지 가장 널리 사용되어지고 있는 건축재료이지만 휨강도, 인장강도가 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 프랑스의 Lafarge, Bouygues 및 Rhodia 社가 "고연성을 갖는 초고강도 콘크리트 (제품명 Ductal)"를 공동으로 연구·개발하였으며, 이 제품은 초고강도와 고연성을 동시에 가지고 있어 철강이나 철근과 같은 추가적인 보강소재 없이 시멘트 자체만으로도 2,000kg/cm² 이상의 초고강도가 요구되는 곳에 사용할 수 있다.

Ductal의 개발과정을 간단히 살펴보면

1988년 세계적인 건축회사인 Bouygue는 초고강도 콘크리트에 대한 연구를 시작하여 1993년 reactive powder concrete에 대해 특허를 출원하고 그 후 1994년 10월 Bouygue-Lafarge-Rhodia 사이에 5년간 예정으로 연구가 시작되었다.

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 super plasticizer등으로 만들어지는 초고강도,

고연성, 고내구성 및 미려함을 갖춘 섬유시멘트 매트릭스 건축재료(fiber-cement matrix construction material)이다.

또한 Ductal은 단일제품이 아닌 여러 제품이 있는 제품 群이다. 즉, 강도가 중요시 되는 곳에는 금속섬유를 내구성이 중요시 되는 곳에는 유기섬유를 또는 두 섬유를 혼합사용하기도 하는등 사용자의 요구에 의해 다양한 제품을 만들 수 있다.

국내에서는 현재 한강 양화지구 시민공원과 새로 조성되는 선유도공원에 이르는 길이 150m의 보행자 전용다리(그림 1)에 최초로 적용되고 있다.

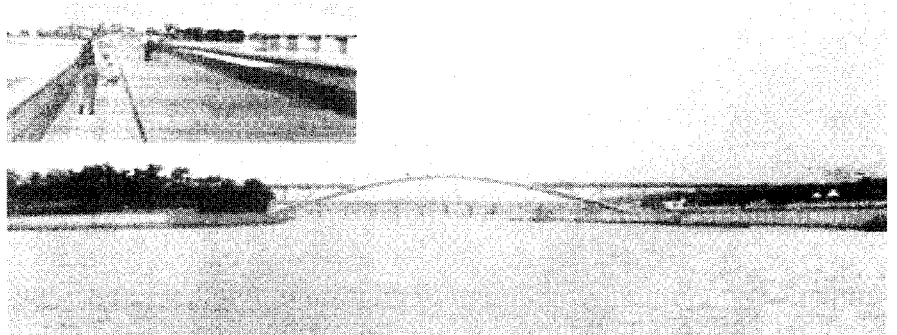


그림 1. Ductal을 사용해 건설중인 평화의 다리 조감도 및 교량완공 후의 가상도
<새서울 뉴스, 2000년 3월호>

* 라파즈한라시멘트(주) 기술연구소 소장

이 보행자 전용다리는 프랑스 2000년 위원회가 새천년 국제 이벤트 사업의 일환으로 서울시에 제안한 것으로 프랑스 측에서 디자인을 제공하고 서울시가 세부설계 및 시공을 맡는 방식으로 오는 2002년 4월 완공될 예정이다. 이하 Ductal의 특징 및 이용 예에 대하여 간단히 살펴보기로 한다.

2. 고강도

Ductal의 가장 큰 특징은 초고강도를 나타내며 동시에 고연성을 가지고 있다는 것이다. <표 1>에 2%의 steel fiber를 함유한 Ductal의 압축강도 및 휨강도를 나타내었다. Slump flow 200mm 이상이 확보된 상황에서 일반양생의 경우 28일 압축강도가 약 2,000kg/cm²를 나타내며, 90℃에서 2일 양생한 경우에는 3일강도가 무려 2,400kg/cm² 까지 올라간다. 앞서서도 언급한 것처럼 포졸란 반응성을 갖는 silica fume의 반응성이 포틀랜드 시멘트보다 낮고 유동화제와 같은 혼화제의 다량 첨가에 의해 초기 반응성이 떨어지나 고온양생에 의해 빠른 시간에 강도를 발현시킬 수 있다. 즉 양생초기에 온도를 올려줌으로서 신속한 반응과 더욱 높은 강도를 나타낼 수 있으므로 일반 시공 뿐 아니라 precast concrete나 prestressed concrete로 적용이 좋을 것으로 보인다.

(적용 예 : <그림 2> Cattenom 핵발전소용 prestressed beam의 조립모습)

<그림 3>은 철강, 일반 콘크리트, 고강도 콘크리트 및 Ductal을 사용했을 경우 같은 하중을 견딜 수 있도록 설계된 구조물의 크기를 비교한 사진이다. 사진에서 볼 수 있듯이 일반 콘크리트, 고성능 콘크리트에 비해 같은 성능을 나타내기 위해 소요되는 재료의 양이 현저히 줄고, 길이 2000m의 4차선 교량시공에 소요되는 비용분석을 비교한 연구사례에 따르면 시공비의 4%, 시공기간 단축에 따른 절감비용 5%등 총 12%에 달하는 공사비용 절감효과를 가져오는 것으로 되어 있다.

표 1. 특정 배합설계에서의 각종 물성

	3-days with 90℃-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 (4x4x16 cm bending test) (Mpa)	45	40
Modulus of Elasticity (GPa)	60	57

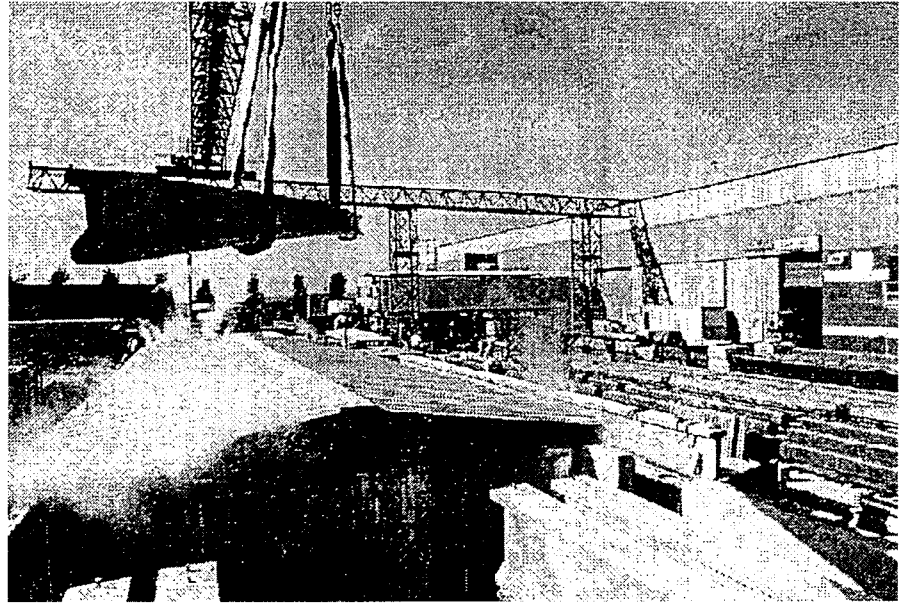


그림 2. Prestressed concrete의 적용 예 (Cattenom 핵발전소용 prestressed beam)



그림 3. 각각 다른 재료를 사용하여 같은 하중을 견딜 수 있도록 제작된 구조물의 크기 비교 <Lafarge 연구소 전시실>

3. 고연성

<그림 4>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 있

다. 일반적으로 섬유보강 콘크리트에서는 초기 균열발생 이후 극한 변형영역에 달하기까지 섬유가 인발됨으로써 균열이 저지되고 균열의 급격한 진행을 저지·분산시키는 효과가 있다. 더욱이 휨 재료에서는 상기의 현상이 인장영역에서 중립축으로 향해 서서히 생기기 때문에 고변형 영역에

Performance in flexure, without reinforcing steel

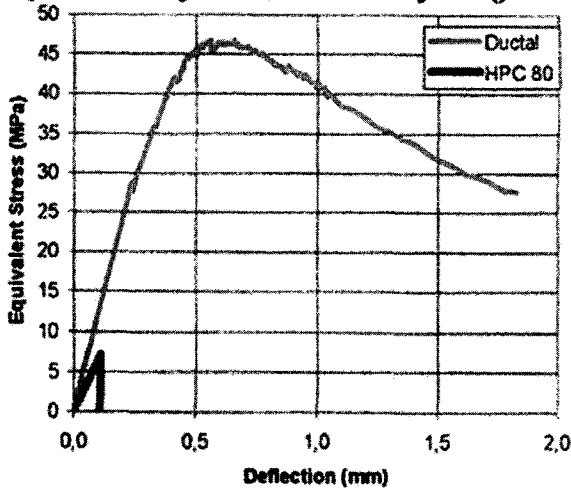


그림 4. 휨강도 특성 (보강 철근 없음)

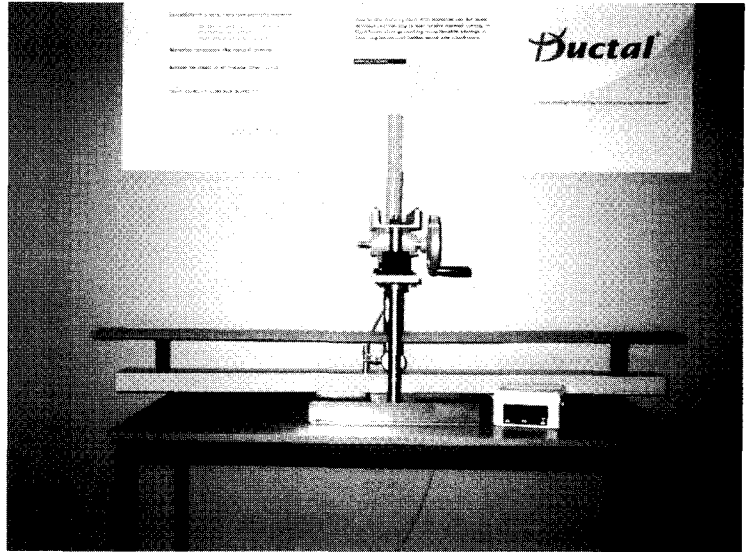


그림 5. Ductal의 연성특성을 보여주는 장치 <Lafarge 연구소 전시실>

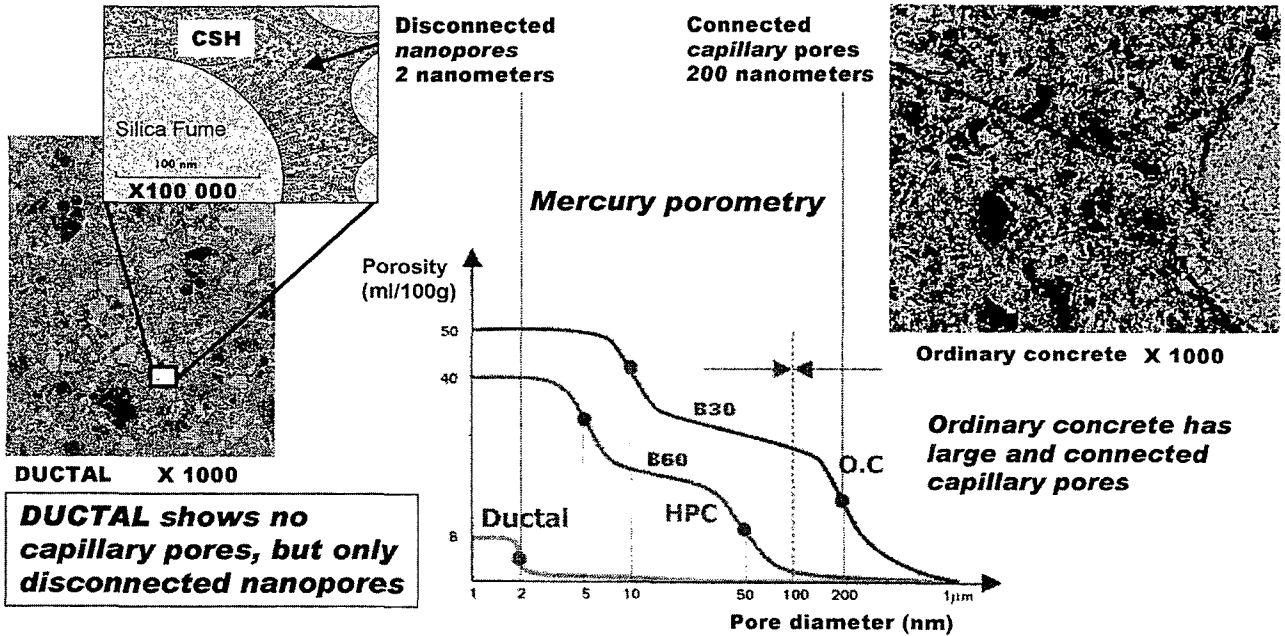


그림 6. Porosity와 미세구조의 비교

서도 보통 콘크리트보다는 급격한 내력 저하는 나타나지 않는다.

〈그림 5〉는 Lafarge 연구소 전시실에 전시되어 있는 Ductal의 연성특성을 보여주는 장치로 Ductal로 만들어진 판재가 압력의 가감에 따라 연성을 가진 철판처럼 휘어졌다 펴지는 현상을 잘 관찰할 수 있다.

4. 내구성

콘크리트의 내구성은 porosity, per-

meability, diffusivity등과 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 6〉에 수은압입법에 의해 측정된 porosity와 미세구조를 나타내었다. 기존의 일반 콘크리트가 200 nanometer 정도의 크기를 갖는 연결된 capillary pore

로 되어 있는 것에 반해 Ductal은 2 nanometer 이하의 연결되지 않은 pore들로 이루어져 있으며, 그 양도 매우 작음을 볼 수 있다.

〈표 2〉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 7〉은 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, 염화물등에 대한 저항성이 고성능 콘크리트에 비해 20~100배정도 높음이 실험적으로 증명되었다.

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 총칭하며 일반적으로 DSP 시멘트의 경우에는 미수화물이 많다. 예를 들어 W/C가 0.18~0.22인 경우 35~50% 정도가 수화를 한다. 미수화 입자들은 microfiller로서 작용을 하며 microcrack으로 물이 스며들 경우 수화되어 microcrack을 채우는 자기봉합(self-sealing) 효과를 나타낸다. 이러한 현상을 보여주는 미세구조 사진을 〈그림 8〉에 나타내었다.

5. 작업성

Ductal은 각각 다른 크기의 미세한 분말로 되어 있으며 시멘트와 super plasticizer와의 적절한 조화에 의해 낮은 w/c로도 자기타설 (self-placing)이 가능하므로 타설시 vibrating이 필요없는 초유동 콘크리트이다.〈그림 9〉 따라서 현장 타설, pumping, injection, extrusion등 어떠한 타설기술에도 적용이 가능하다. 자

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

또한 최근 콘크리트를 강관에 충전시켜 부재내력이 상승하고 뛰어난 변형능력을 발휘하여 각광을 받고 있는 concrete filled steel tube 방식의 공사에도 적당하다. 〈그림 10〉에 concrete filled steel tube 방식을 적용한 Canada의 Sherbrooke 인도교의 적용 예를 나타내었다.

6. 기타

Ductal의 미려한 외관을 이용하여 조형물(그림 11)에 이용되기도 하며, Monaco 지하철 역에 시공된 acoustic wall panel 처럼 방음벽으로 사용되기도 한다. 이 panel은 2.3m x 1.9m, 두께 20mm의 판에 15x15mm 크기의 사각형 구멍을 낸 것으로 총 430개가 소요되었다 〈그림 12〉

표 2. 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 ₂ , O ₂ (no drying)	1.0 x E-22	1.0 x E-22	1.0 x E-19	2.0 x E-18
N ₂ , O ₂ (severe drying)	<1.0 x E-20	<1.0 x E-20	5.0 x E-18	3.5 x E-17

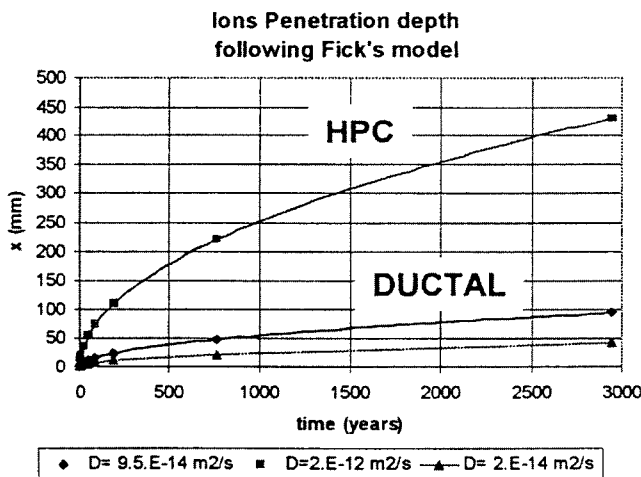


그림 7. 시간의 경과에 따른 Tritium이온의 투과 깊이

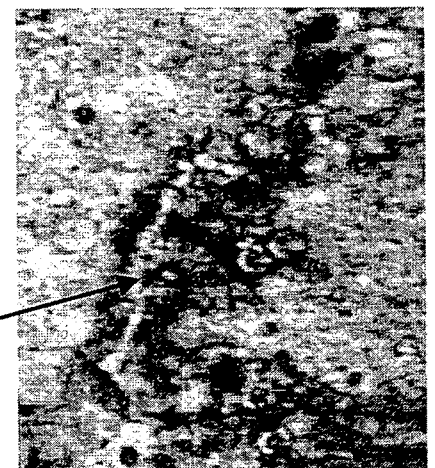


그림 8. self-sealing 효과를 나타내는 미세구조 사진

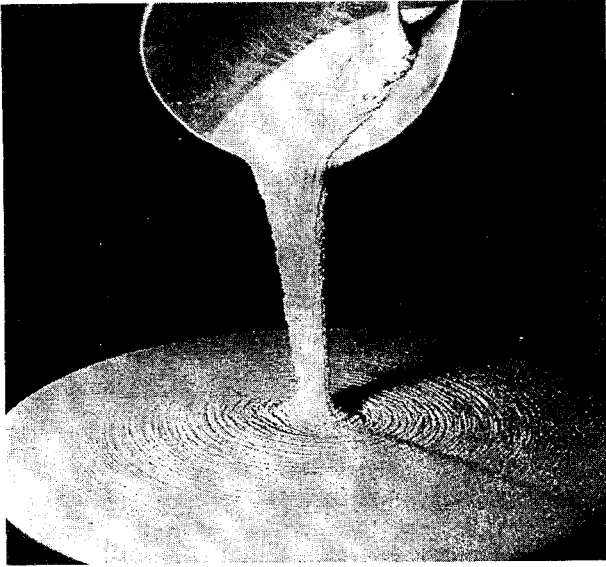


그림 9. Ductal의 고유동성

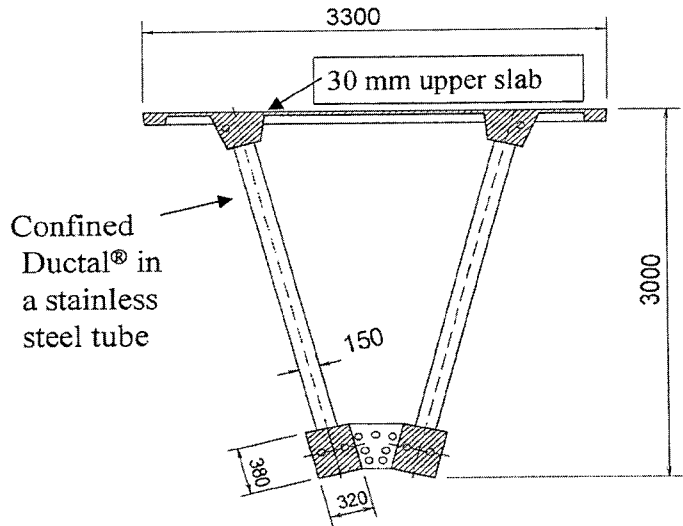


그림 10. concrete filled steel tube의 적용 예 (Canada의 Sherbrooke 인도교)

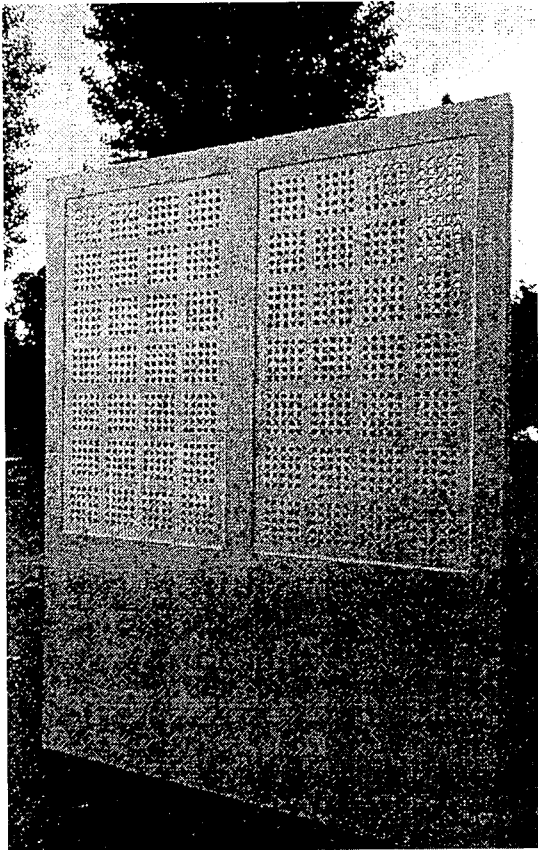


그림 11. Boulogne-Billancourt 광장에 있는 조형물

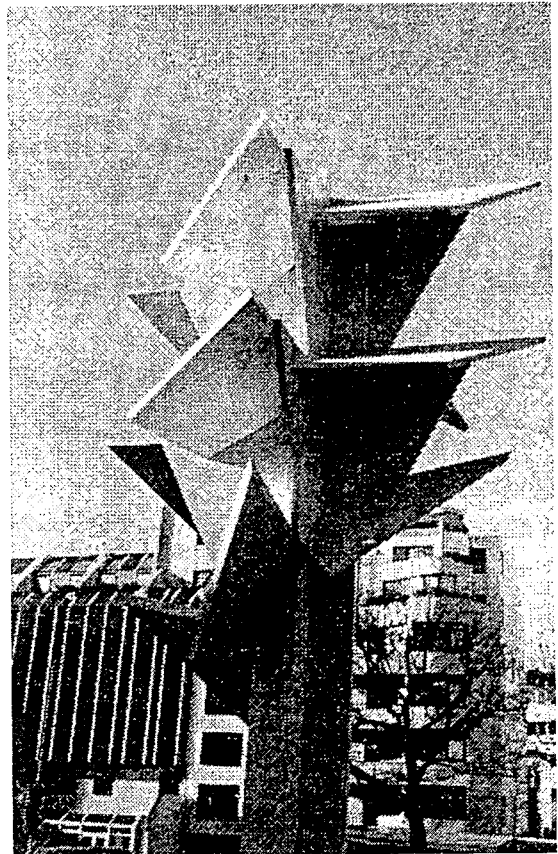


그림 12. Monaco 지하철역에 설치된 Acoustic wall panel

7. 결론

지금까지 고연성을 갖는 초고강도 콘크리트인 Ductal의 특성과 이용 예에 대하여 간략히 살펴보았고 Ductal의 특징에 따른 적용범위를 정리하면 <표 3>과 같다. 현재 우리나라는 특수한 목적에 맞는 시멘

트의 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 있으며, 또한 국가간 무역에서 기술적 장벽을 제거하자는 TBT 협정이 채

결된 이후 모든 규격이 국제규격화 되고 있고 시멘트 또한 ISO 규격으로 126종으로 세분화되고 있는 실정이다. 이제 학계, 산업계 모두가 소비자가 요구하는 특수기능을 발휘할 수 있는 재료와 시공기술을 개발하여 고품질의 건축물을 건설하는데 힘써야 할 때가 아닌가 생각한다. ■

표 3. Ductal의 특성에 따른 적용범위

시장분야	적용분야	적용시설	Ductal의 장점
건물 (구조)	상업, 소매, 사무실, 주거건물의 구조요소	· 기둥 및 전단벽, 빔, 슬래브 · 아치, 돔, 플레이트 구조 · 긴 바닥재 및 장경간 바닥재	· 우수한 지진 저항성 · 충격에 대한 높은 저항력 · 미려함 · 향상된 치수 안정성
건물 (바닥재, 비구조요소)	수평자재나 비구조적 2차 전자재	· 진입로 바닥재 · 바닥도관 · 가로대 · 금고실	· 부차적 보강재 불필요 · 전체적인 비용 절감
건축	미려함을 요하는 건축재	· 벽판 · 지붕타일 · 조각물 · 보안벽	· 고품질 미려함을 갖춘 구성요소 · 형태, 색채, 재질
토목 (구조)	토목공학용 구조요소	· 교량 · 터널라이너 · 관망시설	· 동등한 성능에 있어 자재 감소 · 월등한 내구성 · 지진 하중에 잘 견딤 · 미려함
토목 (산업용건물)	구조 건물 골격 및 토목공학내 선형 구조요소	· 제조설비/제조공장 · 산업용 지붕 및 바닥 · 파이프 · 수로/도관 및 용수로/방수로	· 구조적 설비적인 하중충격, 화학 물질, 마모 및 외부노출등의 상황에서의 높은 저항력
대형토목	하중 및 자연환경에 잘 견디도록 시공할 토목공학	· 선창/부두/해양구조 · 댐 · 해안구조물 · 처리장 · 저장소	· 큰 하중에서의 저항력 · 지진지대에서의 향상된 성능 · 교열에서의 저항력 · 부패, 마모, 화학물질에 강함
핵, 원자력 (구조)	핵, 원자력 산업에 요하는 구조요소 및 전자재	· 냉각탑 · 원자로 · 폐기물저장소	· 월등히 긴 수명 · 치수 안정성 · 충격등에 높은 저항력 및 연성
제한구역	보호 및 안정화 시스템	· 보안벽 · 폐기물 안정화 · 핵원료 보관소 · 산업용 폐기물 보관소	· 동적 충격에 대한 저항력 · 불침투성 · 치수 안정성 · 300년의 긴 수명