

방사능 차폐 및 해저 파이프라인 보호를 위한 고밀도 콘크리트의 적용

High-Density Concrete for Nuclear Shielding and Submarine Pipelines Protection



이회근*
Hoi-Keun Lee



박찬규*
Chan-Kyu Park



이승훈**
Seung-hoon Lee

1. 머리말

일반 콘크리트의 밀도인 2,300 ~ 2,500 kg/m³보다 높은 밀도를 갖는 콘크리트를 고밀도 콘크리트(high-density concrete: HDC)라고 하며, 이러한 콘크리트는 원자력 차폐용과 같이 특수한 용도로 유용하게 사용될 수 있다. HDC를 제조하기 위해서는 일반 골재보다 밀도가 큰 골재가 요구되며, 이러한 골재는 사용 목적, 물리적 성질, 이용 가능성 및 비용에 따라 선택, 결정된다. 철광석(iron ore), 철(iron), 중정석(barite) 등과 같은 골재를 사용하면 밀도가 5,600 kg/m³ 정도이고 보통의 워커빌리티를 갖는 고밀도 콘크리트를 제조할 수 있다¹⁾. <표 1>은 다양한 밀도를 갖는 콘크리트의 종류를 나타낸다.

굵은 골재에 비해 매우 낮은 밀도를 갖는 잔골재를 사용하면 모르타르 매트릭스 내에서 굵은골재의 침강이 증가하기 때문에 굵은골재와 유사한 정도의 밀도를 갖는 잔골재의 사용이 추천된다. HDC의 다짐은 일반 콘크리트에 비해 일반적으로 더 어려우며 최대 밀도를 얻고 과도한 골재 침강과 공극 발생을 줄이기 위해서는 특별한 주의가 요구된다.

본고에서는 HDC에 대한 이해를 돕고 그 적용 분야를 알아보고자 HDC의 두 가지 적용 예(방사능 차폐와 해저 파이프라인 보호)를 소개하고자 한다. 참고로, 본 기사는 Betonwerk + Fertigteil-Technik(concrete plant+precast technology) 저널의 2003년 9월호에 게재된 논문을 중심으로 요약 정리한 것이다.

표 1. 골재 종류에 따른 콘크리트의 밀도¹⁾

콘크리트 종류	밀도(kg/m ³)
천연 골재를 사용한 무근 콘크리트	2,300
벽돌파쇄 골재를 사용한 무근 콘크리트	2,000
밀도가 큰 골재를 사용한 철근 콘크리트	2,400
경량기포 콘크리트	641
구조용 경량골재 콘크리트	1,760
Steelshot 골재 콘크리트	5,285

고밀도 골재 Haematite - 원자력 구조물의 적용을 위한 HDC 배합의 물성 평가가 수행되었다. 방사능 차폐 기능으로서의 콘크리트 효율은 콘크리트 밀도에 거의 비례하며, 밀도가 높을수록 차폐율도 증가한다. 이러한 특별한 목적을 위해 Haematite stone이 굵은 골재로 사용되었다(그림 1). Haematite는 철광석으로 채굴되며 보통은 제철 산업에서 원재료로 사용된다. 콘크리트의 골재로 사용하기 위해 Haematite는 여러 가지 크기로 사용할 수 있으며, 비용 상의 이유로 13-26 mm의 굵은 Haematite가 사용되었다.

콘크리트 배합설계에 앞서, Haematite 골재의 강도 및 물리적 성질 등이 조사되었으며 일반 화강암 골재와 비교하여 <표 2>에 나타내었다. 골재의 상대밀도(relative density)는 실제 재료(actual material)의 밀도를 나타내며 일반 화강암 골재의 경우에는 2.5 ~ 3.0 kg/m³ 정도이다. Haematite의 상대밀도는 5.0 kg/m³으로, 이는 방사선 차폐용 콘크리트 제조에 매우 적합함을 의미한다. 골재의 체적밀도(bulk density)는 루즈

2. 방사능 차폐용 고밀도 콘크리트



그림 1. Haematite 굵은골재(13-26 mm)

* 정희원, 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소 선임연구원
hoikeun.lee@samsung.com

** 정희원, 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소 수석연구원

표 2. 골재 시험 결과³⁾

골재 시험	Haematite	화강암
상대밀도(kg/m ³)	5.0	2.64
체적밀도(loose)(kg/m ³)	2,420	1,300
체적밀도(compactd)(kg/m ³)	2,760	1,500
석분량(<0.075 mm)	1.8	0.4
Flakiness 지수	15	13-26
강도(dry)	465	350
강도(wet)	390	340

표 3. 최적 배합비

재료	단위중량(kg/m ³)
물	170
시멘트	140
고로슬래그	140
물-결합재비	0.60
Haematite(26 mm)	2,150
잔골재	790

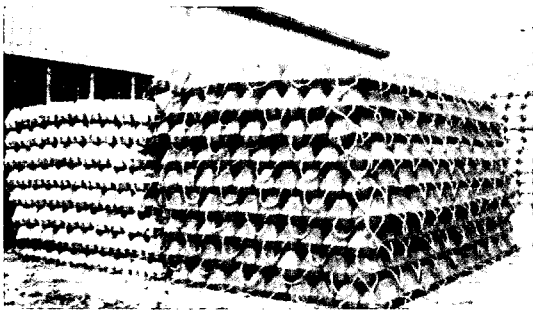


그림 2. 고밀도 콘크리트(황토색)와 일반 밀도 콘크리트(회색)로 만들어진 보호용 덮개(Bi-flexural)

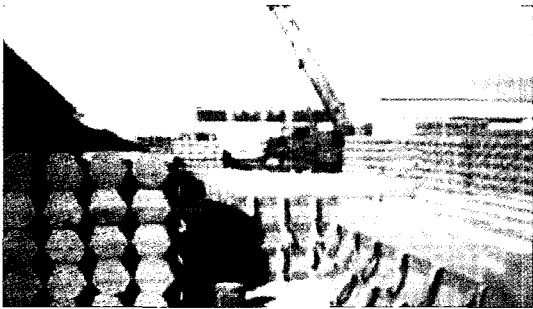


그림 3. 고밀도 콘크리트로 만들어진 보호용 덮개(Uni-flexural)

(loose) 또는 콤팩트한(compactd) 형태의 골재 밀도는 나타내는 데, Haematite의 compactd bulk density는 2,760 kg/m³으로 밀도가 3.4 ~ 3.5 kg/m³인 콘크리트를 만들 수 있음을 나타낸다. 화강암 골재의 compactd bulk density는 1,400 ~ 1,500 kg/m³이었다. 만일 더 높은 밀도를 갖는 콘크리트가 요구된다면 작은 크기의 Haematite 추가 사용이 적절하다. 수분을 함유한 Haematite 표면에는 붉은 색의 석분(dust)이 붙어 있었다. 이러한 석분의 양 (75µm 체 통과량)은 중량비로 약 1.8% 정도로 일반적인 쇄석 골재와 비슷하였다. 이러한 석분의 영향으로 <그림 2와 3>에 나타난 바와 같이 콘크리트의 색깔이 황토색으로 나타난다.

많은 양의 석분은 굳지 않은 콘크리트의 점성(cohesiveness)에 긍정적인 영향을 미치며 특히 밀도가 큰 골재 사용 시 중요한 블리딩과 재료분리 제어를 향상시킬 수 있다. 하지만, 과도한 양의 석분은 워커빌리티를 감소시키며 배합의 요구 수량을

증가시킨다. 이러한 점에서 1.8% 정도의 석분은 점성 및 요구 수량의 관점에서 만족할 만하다. Haematite의 석분 양은 골재의 수분 함유 상태에 따라 변할 수 있다. 건조한 골재의 경우 석분은 더 이상 골재 입자에 붙어 있을 수 없기 때문에 석분의 양은 적게 되며, 건조하고 바람이 부는 골재 저장소 또는 프리캐스트 야드에서는 석분과 관련한 문제가 발생할 수도 있다.

굳지 않은 콘크리트에서 골재의 성능을 결정하는 가장 중요한 요소들 중의 하나가 골재의 모양이다. 각이 지고 모난 골재는 요구 수량이 증가한다. 남아프리카 기준³⁾에 따라 측정된 flakiness(골재의 모양 정도를 나타내는 지수)가 전형적인 화강암의 경우 13-26(서로 다른 배치(batch)에서 6개월 간 측정된 값)으로, 지수가 올라갈수록 flakiness가 증가함을 의미한다. Haematite의 flakiness 지수는 15로 일반적인 골재의 범주에 속하였다. Haematite의 화학적, 물리적 미세구조 조사로부터, 가장 중요한 결과는 불순물이 전혀 없으며 흑규석(chert)의 크기와 양이 무시할 정도로 작아 알칼리-실리카 반응(ASR)과는 무관한 것으로 나타났다. 하지만 일부 철광석에서는 많은 양의 흑규석이 발견되어 ASR이 발생할 가능성이 있기 때문에 이에 대한 조사가 이루어져야 한다.

HDC 배합 최적화 및 굳지 않은 콘크리트의 성질 - 최적의 골재량과 요구 수량을 결정하기 위해 많은 수의 시험 배합이 수행되었다. 잔골재로는 풍화된 석영으로부터 얻은 고품질의 세척사가 사용되었다. 골재량이 1,700 kg/m³인 조건에서 재료분리와 침하량을 조사하였다. 골재량을 증가시킴으로써 양호한 골재 분포와 최소한의 침하량을 나타내어 최종 배합에는 골재량이 2,150 kg/m³으로 결정되었다(표 3). 단위 수량은 약 170 L/m³으로 남아프리카 표준에 비해 상대적으로 낮았다. 슬럼프는 70 ~ 100 mm로 적당한 다짐이 요구되며, 최소한의 블리딩 발생하는데, 이는 Haematite의 적당한 석분 양 때문이 것으로 사료된다.

밀도와 더불어 콘크리트의 방사능 차폐 성능은 콘크리트 부재의 두께에 의해서도 결정된다. 따라서, 이러한 콘크리트는 타설 후 온도 균열의 위험을 최소화하기 위해 상대적으로 낮은 수화열이 요구된다. 물-결합재 비가 감소함에 따라 굳지 않은

표 4. 굳지 않은 그리고 굳은 콘크리트의 성질³⁾

굳지 않은 콘크리트의 성질			
Slump(mm)	75-100	재료분리	none
Water requirement(L/m ³)	ca. 170	Bleeding	minimal
Cohesiveness	good		
굳은 콘크리트의 성질			
총수화열(kJ/kg) - 고로슬래그	230	Compressive strength(28-d)(MPa)	46.5
총수화열(kJ/kg) - 플라이애쉬	170	Modulus of rupture(28-d)(MPa)	3.4
최대 온도(°C) - 고로슬래그	43	Modulus of elasticity(28-d)(MPa)	34
최대 온도(°C) - 플라이애쉬	36	Shrinkage(est. ultimate)(10-6)	475
밀도(28-d)(kg/m ³)	3,479	Creep(est. ultimate)(10-6/MPa)	65

콘크리트의 온도가 증가하기 때문에 상대적으로 높은 물-결합재비(0.60 정도)가 사용된다. 바인더 종류에 따른 수화열을 비교하기 위해 시멘트에 고로슬래그와 플라이애쉬가 각각 사용된 두 가지 서로 다른 바인더가 사용되었다. 두 배합은 주어진 바인더 종류와 물-결합재비에서 전형적인 수화 발열 특성을 나타내었다(표 4). 플라이애쉬가 사용된 배합이 고로슬래그가 사용된 배합보다 총 수화열 및 최대 온도가 낮게 나타났다. 일반적으로, 수화열과 최대 온도가 낮을수록 전체 품질이 좋아지고 치명적인 균열의 위험이 감소한다.

굳은 콘크리트의 성질

습윤 양생된 큐브의 평균 밀도는 재령 3일과 28일에서 각각 3,375 kg/m³, 3,479 kg/m³로 재령이 경과함에 따라 다소 증가하였는데, 이는 수화 반응 진행에 의한 콘크리트의 densification 때문이다. HDC의 강도 발현이 일반 콘크리트에 비해 느린 경향을 나타내었는데 이는 페이스트와 haematite와의 부착이 상대적으로 좋지 않았기 때문이다. 압축 파괴 시 시편은 골재와 골재 사이가 떨어져는 형상을 보였는데, 이로부터 골재가 강도가 상당히 높음을 알 수 있다.

HDC 배합의 휨 강도는 재령 28일에서 3.4 MPa이었으며, 이는 일반 골재를 사용한 콘크리트보다 다소 낮은 경향을 나타내었다. 따라서, HDC 배합의 인장균열에 대한 저항성은 일반 콘크리트보다 낮을 가능성이 있기 때문에 균열에 대한 검토가 요구된다. 재령 28일 탄성 계수는 34 GPa로 예상한 것보다 낮은 경향을 나타내었다. 콘크리트의 탄성 계수에 영향을 미치는 주요 인자로는 페이스트와 골재의 강성(stiffness), 이들의 상대적 비율, 그리고 계면 특성이다. HDC의 상대적으로 낮은 탄성계수는 haematite의 탄성계수가 낮은 것과 관련이 있다. HDC의 비크리프와 수축은 길이가 300 mm이고 직경이 100 mm인 공시체를 이용하여 온도가 22 °C이고 상대습도가 65 %인 조건에서 측정되었다. 시편은 재령 28일까지 습윤양생되었으며 이후부터는 시험 조건에 노출되었다. 골재의 강성이 페이스트보다 큰 경우에 콘크리트

배합에서 골재의 양이 증가하면 상대적으로 페이스트의 양이 줄어들고 골재가 콘크리트의 변형을 구속하기 때문에 크리프와 수축이 줄어든다. 재령 62일에서 HDC의 비크리프는 60×10⁻⁶ /MPa로 일반 콘크리트에 비해 상당히 낮은 경향을 나타내었다. 콘크리트의 수축에 영향을 미치는 주요 인자로는 수량과 물-결합재 비로, HDC의 수축은 비슷한 수량과 물-결합재 비를 갖는 일반 콘크리트와 유사한 경향을 나타내었다.

결론적으로, 본 연구에서 사용한 골재(Haematite)와 이를 사용한 콘크리트의 성질로부터 소요의 기준을 만족하는 고품질의 콘크리트를 만들 수 있으며, HDC의 배합 설계는 일반 콘크리트 배합설계 방법을 따르면 된다. 하지만, HDC 배합의 점성과 재료분리에 대한 특별한 주의가 필요하다.

3. 해저 파이프라인 보호를 위한 고밀도 프리캐스트 콘크리트

해저 파이프라인 및 케이블 보호를 위해 프리캐스트로 만들어진 HDC를 적용할 수 있다. 해저에는 각종 파이프라인이 복잡한 네트워크를 형성하고 있으나 파도, 조류, 파이프라인 신설 시 발생할 수 있는 충격 등에 항상 보호되어 있지는 않다. 이러한 위험으로부터 파이프라인을 보호하는 일반적인 방법으로 튼튼하고 내구적인 커버로 파이프라인을 덮는 방법이 있으며, 프리캐스트 콘크리트 블랭킷(blanket)은 비용과 내구적인 측면에서 장점을 제공한다. 콘크리트 블랭킷과 매트리스(mattress)의 역사는 미시시피 강의 홍수를 막기 위해 여러 개의 사각형 콘크리트 블록을 서로 연결하여 사용한 20세기 초반으로 거슬러 올라간다³⁾. '매트리스'라고 하는 용어는 파이프라인과 케이블 등을 지지하는 데에 사용되며, 보호용 덮개를 블랭킷이라고 한다.

해저 파이프 보호를 위해 다양한 모양과 크기의 프리캐스트 콘크리트 블랭킷이 사용되는 데, 폴리프로필렌(polypropylene) 로프로 서로 연결되어 두 방향으로 잘 움직일 수 있는 육각형의 콘크리트 블럭이 가장 많이 사용 된다(그림 2). 표준 두께는 150, 300, 450 mm로, 전체 치수는 소요의 요구 조건에 따라

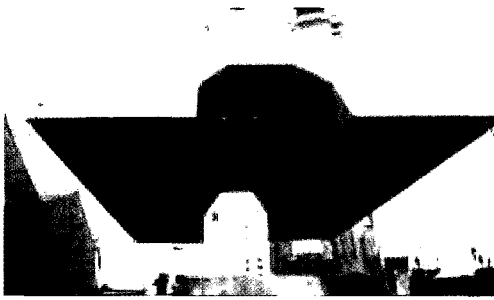


그림 4. 장비 보호용 유닛

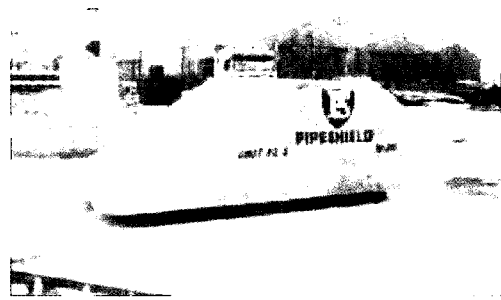


그림 6. 유전 분출 보호용 유닛

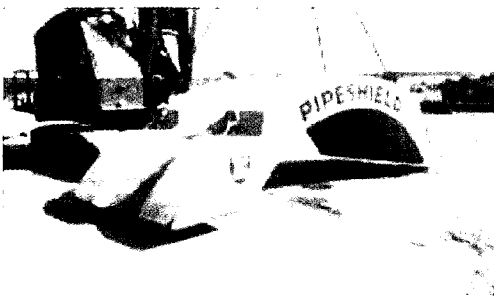


그림 5. 케이블 횡단 브릿지 유닛

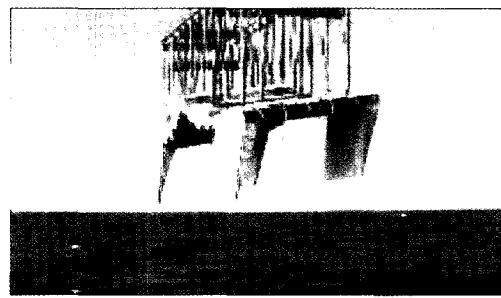


그림 7. 특수 장비를 이용한 보호용 덮개 거치

바뀔 수 있으나 길이는 12m 폭은 4m인 것이 최대치수이다. 블랭킷의 경우 표준 사이즈는 없지만 6×3m가 가장 많이 사용된다. <그림 2>에 나타난 것은 10×10열의 콘크리트 블록으로 이루어져 있는데, 로프를 이용해 x, y 양방향으로 서로 연결되어 있다. 또 다른 형태로는 <그림 3>에 나타난 uni-flexural blanket이 있다. 블랭킷의 안정성을 위해 전체 무게, 크기, 두께 규준에 의거한 설계가 이루어져야 한다. 전체적인 안정감을 결정하는 무게는 주기적인 파도 하중으로 인한 파이프라인의 이동으로부터 블랭킷을 보호할 필요가 있으며, 해저에서의 무게를 증가시키기 위해서는 HDC가 사용될 수 있다. HDC를 이용한 파이프 보호에 대한 최근의 프로젝트 중의 하나는 남아프리카 서해안을 따라 파이프라인을 보호하기 위해 총 146개의 블랭킷을 만드는 것이었다. HDC 프리캐스트 부재는 남아프리카 케이프타운에서 만들어졌으며, 대부분의 부재는 3,800 kg/m³의 밀도를 갖도록 콘크리트 배합설계가 이루어졌다. 한 부재의 평균체적과 무게는 각각 3.6 m³과 13.7 ton이었다. 굵은골재는 최대 치수가 26 mm인 Haematite stone이 사용되었으며, 최대밀도를 얻기 위해 일반적으로 사용되는 모래에 크기가 작고 석분을 포함한 Haematite를 혼합하여 사용하였다.

HDC의 단점은 일반 콘크리트에 비해 단가가 비싸다는 점인데, 예를 들어 남아프리카에서는 일반 레미콘의 경우엔 약 65 ~ 85 Euro/m³ 정도인 반면에, 밀도가 3,600 kg/m³ 정도인 HDC인 경우에는 이보다 약 2.5배 정도 비싸다. 밀도가 3,600 kg/m³ 이상인 콘크리트를 제조하기 위해서는 매우 비싼

골재를 사용해야 하지만, 대부분의 경우에 있어서 높은 제조 비용은 운송비와 타설 비용의 절감에 의해 정당화될 수 있다. <그림 4 ~ 7>은 해저 파이프라인 작업을 위한 또 다른 종류의 프리캐스트 콘크리트 부재를 보여준다.

4. 맺음말

지금까지 고밀도 콘크리트에 대한 간략한 사항과 방사능 차폐 및 해저 파이프라인 보호용 고밀도 프리캐스트 콘크리트의 적용 예를 살펴보았다. 현재로서는 고밀도 콘크리트가 특수한 목적을 위해 제한적으로 사용되고 있지만 고밀도 골재 및 이를 사용한 콘크리트의 물성에 대한 심층적인 연구가 이루어진다면 그 활용 분야는 점차 확대될 것으로 기대되며, 본 기사가 기초적인 자료로 활용될 수 있기를 바란다. □

참고 문헌

1. <http://www.roymech.co.uk>
2. Goodman, H. J., *High-density concrete*, in *Fulton's Concrete Technology*, 8th Edition, Midrand, South Africa, 2001.
3. SABS - South African Bureau of Standards, *Standards and Specifications for the Testing of Concrete and Concrete Materials*.
4. Keel, P., *Choosing your mattress*, *World Pipelines*, May, 2003.