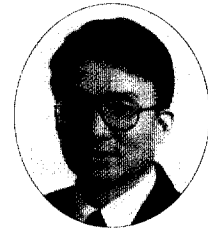


## 고성능 콘크리트의 시공프로세스

Processing of HPC



윤영수\*

### 1. 머리말

최근 들어 각광을 받고 있는 고성능콘크리트(HPC)에 관한 흥미로운 기사가 Ferraris와 Lobo에 의해 1998년 4월호 Concrete International에 실려 본 지에 소개한다. 본고는 고성능콘크리트의 제조로부터 타설, 마감, 양생에 이르기까지의 HPC 시공프로세스를 레미콘회사로부터의 설문조사와 여러 문헌조사들을 토대로 작성하였다. 내용면에서는 그다지 새로운 부분이 눈에 띄지 않으며, 오히려 국내의 고성능콘크리트에 관한 수준이 더 높지 않나 하는 느낌마저 있지만, 원 저자들의 내용을 수정 없이 소개하며 복미를 주축으로 한 서구의 고성능콘크리트가 어느 정도 실용화되었는지를 판단하는데 도움이 되었으면 하는 바램이다.

### 2. Introduction

고성능콘크리트(HPC)는 구조물의 사용수명을 늘리고 유지관리비용을 저감시키는 등 내구성 콘크리트의 수요증가로 인하여 최근 널리 사용되고 있다. 현장에서 있을 수 있는 HPC의 생산과 관련된 문제 유형들을 규명하기 위하여, 미국레미콘협회(NRMCA)에서는 레미콘 생산자들을 대상으로 설문조사를 수행하였고, 미표준기술연구소(NIST)에서는 결과분석과 문헌수집을 통한 연구를 수행하였다. 본 고에서는 조사를 통해 얻어진 결과와 문헌수집을 통한 조사결과를 소개하였으며, 또한 연구결과로부터 타당한 값을 추천하였고 조사의 필요성도 수록하였다. HPC의 정의는 표준화되어 있지는 않다. 그러나 "중래의 일반적인 배합비와 배합과정과 양생작업을 통해서는 얻어질 수 없는 특정한 목적과 균질한 조건을 충족시킬 수 있는 콘크리트"라고 Zia에 의하여 정의된 것을 일반적으로 사용한다.

이 조사에서 사용된 정의는 공종과 연방도로국(FHWA)에 의하여 제안된 것과 연계되어 있고,

\*정회원, 고려대 토목환경공학과 교수

이러한 콘크리트는 41MPa(6000psi)의 최소 콘크리트 압축강도, 0.4이하의 물-시멘트비, 그리고 ASTM C 1202의 규준을 토대로 3000쿨롱 이하의 염화이온 침투와 같은 하나 이상의 조건을 요구하고 있다.

이러한 규정들은 생산과정 뿐아니라 콘크리트 조성의 균질성과 특성에 대해서 면밀히 분석함으로써 얻어질 수 있는 것이다. HPC 사용을 위한 결정적인 단계는 유동화, 이동, 타설, 마감 및 양생을 들 수 있다.

### 3. Ready-mixed concrete industry survey

미국레미콘협회(NRMCA)는 두 가지 조사를 수행하였다. 첫 번째 조사는 HPC를 생산하고 HPC의 생산에 관한 자세한 질문에 대답할 수 있는 회사들을 확인하는 간단한 질문사항이다.

두 번째 질문사항은 조금 더 상세한 것으로 배합설계, 품질관리, 작업설명서, 구조물의 종류, 사용된 재료, HPC 공정, 취급관리, 타설, 양생 및 콘크리트 실험을 포함하여 작업목록, 구조물의 종류, 사용된 재료 등을 다루었다.

첫 번째 설문조사를 통하여 48개의 회사로부터 108가지 공중에 관한 내용을 알 수 있었으며, 표 1에 요약되어 있다. 한 종류를 제외한 모든 콘크리트가 앞에서 규정한 HPC의 정의에 상응하고 있으나, 염소이온침투 요구조건은 단지 24%만이 만족하였다. 일반적으로 염소이온침투 관련규정을 만족시키는 것은 힘들다고 하며, 이러한 주요한 원인으로는 시험 결과의 변동성이 상당히 크고, 콘크리트의 배합에 있어서 적당한 지침서가 없으며, 특별한값을 얻기 위한 생산공정이 진보되지 않았기 때문이다.

두 번째 질문사항은 17개의 회사로부터 24개의 응답을 받아내었다. 그에 대한 콘크리트의 규정이 표 2에 나타나 있으며, 일반적인 결론을 내리면 다음과 같다.

염소이온침투실험은 일반적으로 주차장이나 교량상판 콘크리트를 제외하고는 규정되어있지 않았으나, 회사들은 물-시멘트비나 압축강도에 대해서는 확실히 문제가 없다고 대답했다.

모든 HPC 배합은 광물질 혼화재 그리고 화학적 혼화제를 포함하고 있으며, 많은 콘크리트 배합에서 플라이에쉬나 실리카흄 같은 하나 이상의 부가적인 접착 재료를 포함하고 있었다.

표 1 첫 번째 설문조사 결과

압축강도 MPa(ksi)				염화물 침투 103 Coulombs			물-시멘트비			
41-55 (6-8)	55-69 (8-10)	69-97 (10-14)	>97 (>14)	3-2	2-0.8	<0.8	1	2	3	4
응답률										
49	23	14	1	1	12	11	39	29	7	3

총 응답수는 48개의 회사로부터 108가지가 된다. 7개의 참가회사는 HPC를 취급하지 않는다고 대답하였다. 응답들은 강도, 염소이온침투로 나누었고, 물-시멘트비는 다음의 4가지로 구분하였다.

- 1=0.40-0.35
- 2=0.35-0.30
- 3=0.30-0.27
- 4=<0.27

대부분의 콘크리트는 압축강도나(22%) 물-시멘트비(16%), 또는 양쪽 모두(63%)에 의하여 정의되고 있었으며, 따라서 내구성과 관련하여 유일하게 수행하는 염화이온 침투실험조차 항상 수행되는 것은 아니며 단지 강도와 물-시멘트비라는 두가지 요건만이 기록되고 있음을 알 수 있다.

표 2 두 번째 설문조사 결과

압축강도 MPa(ksi)				염화물 침투 103 Coulombs			물-시멘트비*			
41-55 (6-8)	55-69 (8-10)	69-97 (10-14)	>97 (>14)	3-2	2-0.8	<0.8	1	2	3	4
Percent										
59	32	9	0	0	18	4	59	23	4	14

17개의 회사로부터 24개의 응답수를 조사하였으며, 첫 번째 조사결과와 같은 방식으로 분류하였다. 몇몇 다른 특성을 보면:

- 모든 참가회사로부터 콘크리트 시험결과를 받아보았으나, 단지 5개(22%) 회사만이 염화이온 침투시험에 대한 결과를 포함하고 있었다.
- 모든 콘크리트는 강도, 물-시멘트비, 슬럼프값으로 명시되어 있었다.
- 전체 콘크리트의 약 68%정도가 공기량을 명시하고 있었다.
- 거의 모든 콘크리트(90%)가 혼화제를 포함하고 있다.
- 고성능 감수제는 하나를 제외한 나머지 콘크리트에서 사용되었고, 보통 32%의 시간지연이 있었고 경우에 따라 67%의 지연도 나타났다.
- 공기 연행제는 콘크리트의 32%가 사용하였다.
- 응답수의 45%는 콘크리트용 트럭 믹서를 사용하였다고 답했으며, 54%는 중앙믹서를 사용하였다.
- 응답수의 50%는 트럭이나 믹서기 속에서 혼합이 경화는 현상이 나타났다.
- 응답수의 77%는 콘크리트가 마감하기에 어려운 것으로 나타났다.

\* 표1의 물-시멘트비 참조

조금 더 확장된 이러한 두 번째 질문사항은 워커빌리티, 마감성 그리고 양생의 세 가지 주요한 부분으로 나누어지며, 본 고에서는 설문조사와 여러 문헌으로부터 연구한 것을 분석하여 이러한 세 가지 주요부분을 상세히 다룰 것이다.

#### 4. The specification issue

고성능콘크리트의 제조공정은 이상적으로는 배합처방을 갖고 시작하는 접근방법과 실제 실험 수행에 의한 시행착오를 경험하며 시작하는 접근 방법 둘 중 하나를 따라야 하며, 이 두 가지 접근 형태는 서로 병행해서는 안된다. 배합처방을 갖는 접근방식에 있어서 콘크리트 생산자는 콘크리트 배합설계를 어떻게 할 것인지를 미리 지시를 받는다. 예를 들어 최소 시멘트량, 최소 물-시멘트비, 혼화제량 또는 경우에 따라 콘크리트 재료의 배치량 등을 알아야 한다. 이와는 반대로 실험 수행에 의한 접근은 강도, 워커빌리티와 투수성 등의 특성값을 필요로 하게 된다. 첫 번째 조사에서 108가지 공종 중에서 80%가 강도 요구 조건을, 물-시멘트비 요구조건은 73%가, 염화이온침투

조건은 24%가 만족하였다. 단지 13%만이 물-시멘트비만 규정한 채 첫 번째 접근 방식을 따랐다. 강도와 투수성에 있어서는 28%만이 엄격한 규정을 통과하였다. 배합에 있어서는 강도를 표시한 공사 중 72%, 염화 이온과 투수성을 나타낸 공사의 84%만이 최대 물-시멘트비에 대하여 서술하였다.

#### 5. Workability

워커빌리티와 투수성은 보통 콘크리트의 슬럼프로 나타내거나 몇몇 유럽국가에 있어서 슬럼프 시험 후 콘크리트의 퍼짐 정도(DIN 1045)로 나타낸다. 다른 한편으로 워커빌리티는 취급, 타설, 마무리하는데 쉬운 정도로 나타낼 수 있으며 HPC 워커빌리티의 초기 감소가 종종 주요한 문제점이 되고 있다. 감독자는 이러한 현상을 슬럼프 감소 때문이라고 말하며, 조사결과 특정 슬럼프 값에 맞추는 것은 어려운 것으로 나타났다. 대부분의 감독자들은 워커빌리티를 조절하기 위하여 고성능 감수제(HRWRA)를 어느 정도 넣거나 현장에 따라 혼화제의 양을 조절한다.

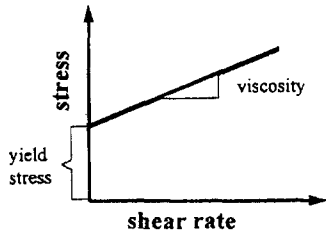


Fig. 1 Definition of a Bingham fluid

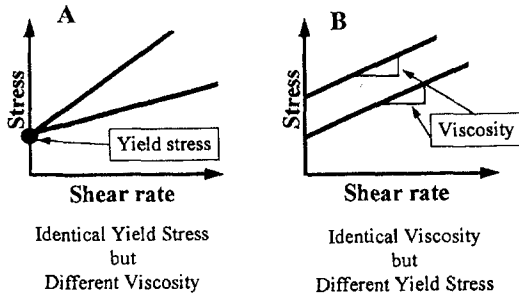


Fig. 2 Concrete Rheology

몇몇 논문에 의하면 적은 양의 물을 조절함으로써 HPC의 위커빌리티를 조절할 수 있는 것으로 보고되었다.

조사 결과 적절한 위커빌리티를 맞추기 위하여 절반 이상이 슬럼프 시험을 수행하였으나 이보다 더욱 확실한 시험이 필요하다는 것으로 나타났다. 슬럼프 시험은 HPC의 위커빌리티를 맞추기 위한 시험으로는 부적절하다는 것은 인식하고 있으나 현재 이보다 수행하기 쉽고 객관성 있는 시험은 없는 실정이라고 볼 수 있다.

슬럼프 시험 결과와 실제 감지된 콘크리트의 위커빌리티 또는 펌프능력이 일치하지 않는 이유는 콘크리트가 Bingham 용액처럼 거동한다는 데 있다(그림1 참조). 콘크리트 유동학 측면에서 볼 때 두가지 변수는 항복응력과 소성점성이다. 항복응력은 초기 거동에 필요한 응력이고 소성점성은 항복응력을 초과한 응력 후의 전단비 곡선의 기울기이다.

항복응력은 슬럼프 측정과 관련지을 수 있으며,

점성 측정은 콘크리트가 움직이는 동안 수행되기 때문에 더욱 정교하게 진행되며, 단지 몇몇 기구만이 점성값과 점성에 관련된 값을 측정할 수 있다.

항복응력과 점성, 이 두 가지를 구별함의 중요성은 그림 2에 나타나 있다. 두 콘크리트의 유동학적 특징에서의 차이는 항복응력과 점성의 측정에 의해 구별될 수 있다. Punkki et al.의 연구에서 항복응력과 점성은 혼화재료 첨가시간과 혼화재료에 의해 결정되기 때문에 다른 방법으로 변화된다. 구체적으로, 슬럼프의 손실현상은 항복응력의 증가를 야기하는 반면 점성은 미소 변화를 나타낸다.

콘크리트의 유동학적인 특징의 다른 문제는 재료분리이다. 고성능콘크리트는 점성이 있는 반면에 골재의 입도나 함수비처럼 재료특성이 약간만 변해도 분리가 생긴다. 조사결과 콘크리트의 슬럼프가 76~127mm를 유지하면 재료분리는 피할 수 있으나, 진동다짐이 부적절하게 행해지면 재료분리를 증가시킬 수 있다. 반면에 시멘트 풀의 점착성의 조절은 재료분리의 문제를 방지하지만 불행하게도 슬럼프의 측정처럼 점착성의 차이는 실제 측정에 의한 것이 아니라 혼합의 정도를 비교하여 간접적으로 측정한다. 그러므로 재료분리의 예측은 현장에서 일상적으로 행하는 방법으로는 불가능하다. 실험실에서의 혼합방법은 현장과 동일하지 않으며 따라서 실험실에서의 시험 배합은 현장의 상황과는 다르다.

## 6. Finishability

콘크리트의 마감성은 공중에 따라 판단기준이 다르며 슬래브나 교량의 상판과 같은 구조형태에서는 더욱 문제가 된다. 마감성을 시험하는 특별한 방법은 없으며, 고성능콘크리트는 점성이 있고 견고하다라고 표현함으로써 마감하기가 어려운 것으로 알려져 있다. 높은 시멘트질의 함유물질, 화학적 혼화재료의 사용, 공기의 함유 등은 이러한 콘크리트의 마감을 어렵게 한다. Rostam은 고성능콘크리트는 철근과 마감 흠손을 포함한 모든 것에 점착성을 가진다고 하였고, 조사결과 응

답의 75%가 콘크리트의 혼합은 점착성이 있다고 응답했다. 사실, 일부 시공자는 점착성의 문제 때문에 매끈한 면을 위해 슬래브의 경우 고성능콘크리트를 사용하지 않는다. Malier는 콘크리트의 그러한 어려움을 방지하기 위해 타설후에 30분 안에 마감해야한다고 추천한다.

고성능콘크리트의 끈적함은 혼합의 높은 점착성, 증가된 미세 입자의 양에 기인된 블리이딩의 부족, 낮은 물-시멘트비 때문이다. 고성능콘크리트는 일반적인 콘크리트와는 다르게 마감 역시 특별한 일련의 단계를 요구한다. 블리이딩의 부족으로 표피막이 빠르게 형성될 것이며, 이러한 표피막의 형성은 균열발생과 연속된 콘크리트의 두층의 섞임에 어려움을 줄 것이므로, 마감시 완료시간의 세심한 주의가 요구된다. 사실 끈적함은 슬럼프 시험에서 마감성의 결정을 불가능하게 하는 잔모래와 시멘트 풀과 같은 콘크리트의 바깥층의 점착성과 관련이 있다. 고성능콘크리트는 마감성의 예측을 위한 시험방법이 절실히 요구됨을 알 수 있다.

## 7. Curing

고성능콘크리트는 높은 시멘트질의 요소를 사용한 결과 낮은 물-시멘트비, 높은 수화열 때문에 블리이딩이 부족한 특징이 있다. 블리이딩의 부족은 표면의 빠른 건조를 유발시키고 건조로 인해 균열이 발생한다. 이러한 균열은 평행이거나 그물 형태를 나타내며 치기 후에 처음 10분 안에 발생하는데 때로는 틀이 형성된 후 30분 안에 발생한다.

이러한 균열을 방지하기 위해 정확한 시간 조절에 의한 적절한 양생은 중요하다. 사용되는 3가지 방법으로는 젖은 부직포 또는 유사한 양생포, 양생 도포제 등이다. 극단적인 경우에는 한가지 이상이 동시에 사용되기도 한다. 소성수축균열을 방지하기 위해서는 적절한 시간조절이 요구된다. Rostam은 모든 자유표면은 물이 증발하는  $0.5\text{kg}/\text{m}^2/\text{hr}$ 전에 보호되어야 하고, 증발율은  $0.3\text{ kg}/\text{m}^2/\text{hr}$ 를 초과하지 말아야한다고 제안했다. ACI는 증발율이  $0.5\text{kg}/\text{m}^2/\text{hr}$ 를 초과하면

대비책이 필요하고 그것은 특히 실리카흙을 사용한 혼합의 경우는 충분한 대비가 아니다.

조사결과 계약자의 62%는 물뿌리개 또는 젖은 양생포를 사용하고, 16%는 양생 도포제를 사용한다. 또 1% 미만은 처음 24시간 동안 아무 것도 사용하지 않는다고 알려졌다. 양생시간은 24시간(16%)부터 7일(20%)로 다르고, 1%는 14일을 사용하고 하였다. 고성능콘크리트는 준비시간과 초기강도를 지연시키는 고성능감수제를 사용한다. 따라서 긴 양생시간은 높은 강도를 얻는데 필요하다.

균열의 다른 종류는 고성능콘크리트의 혼합과 관련된 수화열의 발생 때문에 발생하는 열에 의한 균열이다. 열균열은 콘크리트 덩어리 안의 열성분 또는 이미 만들어진 부분과 새로진 콘크리트 사이의 열성분에 의해 발생한다. 열균열을 방지하기 위해 용매를 사용한다. 첫 번째의 경우 콘크리트의 내부와 대기사이의 온도성분의 접촉을 피해야한다. 많은 연구가들은 온도는 잘 조정되어야하고 콘크리트의 표면의 경화 기간동안 담요나 스티로폼으로 분리시키고 5일 정도 콘크리트를 대기의 온도와 맞춘다. 두 번째의 경우 해결방법은 가능한 새로 타설된 콘크리트의 온도상승을 줄이는 것이다. 그 방법으로는 시멘트질의 물질을 보충함으로써 시멘트를 대치하거나 파이프를 묻어 물을 통과시킴으로서 냉각시킨다.

그것은 온도와 관련된 균열이나 한정된 부분에서만 사용가치가 있다. Tanigawa는 구조물 내부의 콘크리트 압축강도는 높은 온도에서 감소한다는 것을 증명했고 열발생이 적은 시멘트사용을 권했다. 또한 구조물의 적절한 양생을 강조했다. 반면에 고성능콘크리트의 최종강도는 일반적 콘크리트와는 달리 높은 온도에서 덜 민감한 것 같다. 우리의 조사에서 단지 한 계약자가 온도는 최대  $50^\circ\text{C}$  ( $122^\circ\text{F}$ )이하를 유지하라고 지적했다.

조사결과와 보고에 의하면 17%만이 소성수축 또는 건조수축의 문제점을 일으켰다. 조사된 균열의 대부분은 소성수축에 의한 것이다. 이 부분은 매우 흥미 있다. 왜냐하면 문헌에 의하면 균열은 현실적인 문제이지만 어떠한 작업도 균열로부터

완전한 대책을 제공할 수는 없다는 것이다.

소성수축과 온도수축뿐만 아니라 초기 재령시에 다른 종류의 균열이 발견되는데 이는 콘크리트의 자생수축으로 인한 것이다. HPC는 낮은 물-결합재비 때문에 비교적 높은 자생수축을 보인다. 재래의 콘크리트와는 다르게 HPC의 자생수축은 완전히 구속되어 있는 경우 균열을 일으키기 충분하다.

마지막으로 콘크리트가 적절히 양생되었고 휴지기동안 온전했음에도 불구하고 HPC 교량 상판에서 어느 정도의 균열이 발생했다는 보고가 있다. 이는 화학적 수축이 주요 원인이라고 생각된다.

## 8. Recommendation and Conclusions

이번에 수행된 조사와 문헌에 의하면 양질의 고성능콘크리트를 만들기 위해 반드시 조절해야 하는 세 가지 가장 중요한 요소는 혼합재료의 선택과 관리, 배합순서와 배합의 효율성, 양생방법이다. 배합설계는 재료가 적합하게 사용될 수 있게 신중히 계획한 시험 배치가 필요하다. 예를 들어 시멘트나 혼화제는 시방서의 요구사항에 부합

하는 설계 워커빌리티를 얻을 수 있고 분리를 피할 수 있어야 한다.

워커빌리티는 일반적으로 슬럼프시험으로 얻어진다. 그러나 이 시험법은 유동학의 매우 중요한 요소인 소성점성을 측정하지는 못한다. 콘크리트의 표면을 형성하는 모르타르의 소성점성은 점착성과 마감성을 결정한다. 또한 시멘트풀과 모르타르의 점착성은 골재가 정착하는 것을 방해함으로써 배합의 분리에 영향을 준다.

콘크리트의 소성점성은 유동성과 펌핑성을 지배하는 가장 주요한 요소이다. 콘크리트가 거푸집에 타설된 후 소성점성은 타설을 쉽게 한다. 그래서 항복응력과 연계하여 소성점성을 현장에서 측정할 수 있는 간단한 방법이 필요하다.

배합설계에 따른 콘크리트의 워커빌리티의 예상 뿐만 아니라 분리에 대한 진동의 영향을 예상하는 것도 필요하다. 또한 진동의 영향을 고려하는 완벽한 예측 모델의 연구도 이루어져야 한다.

온도와 습도 조절을 포함하는 양생은 균열을 피할 수 있도록 최적화해야 한다. 또한 배합성분과 대기상태에 따른 콘크리트 양생 지침서를 작성할 수 있는 연구도 필요하다. 