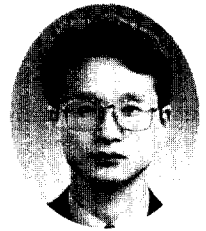


## 시멘트 콘크리트의 충전 특성과 Rheology

Tacking Properties and Rheology of Cement : Concrete



정 연 식\*

### 1. 서론

최근의 사회 동향은 그 변화가 대단히 빠르게 나타나고 있다. 기술의 발전은 배경이 되는 사회의 상황과 밀접한 관계가 있어, 거의 대부분의 기술이 다양화, 고도화되어 가고 있는 실정이다. 시멘트, 콘크리트 분야도 역시 신재료가 개발되어, 새로운 시멘트 콘크리트의 시공 기술이 가능하게 되었고 다른 기술분야와 마찬가지로 급속한 변화가 오고 있다. 또한 실용화의 단계 혹은 그 이상으로 이미 와 있는 실정이다.

시멘트 콘크리트는 범용적이면서도 대단히 복잡해서 현재에도 불투명한 점이 많다. 완전한 기초적 지식을 얻은 후에 사용하는 것이 이상적이지만, 현실적으로는 그렇지 못하고 장시간에 걸친 경험적인 기술 축적에 의해, 큰 결함 없이 실용화 되어 있다.

그러나 현재와 같은 기술 변화의 급속함에서는, 경험적인 기술 축적에 의존한 이용 기술이 한계에 도달했고, 시멘트 콘크리트 재료에서 시공 기술까지 기초 과학에 의존한 이용 기술, 또는 기초 과학화 이용 기술의 간격을 좁히는 노력이 필요하다(그림 1)

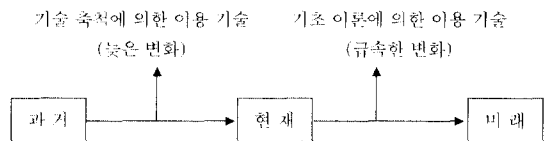


그림 1 시멘트 재료 화학과 콘크리트 공학

시멘트 콘크리트는 특히 아직 굳지 않은 콘크리트는 기체, 액체, 고체로 이루어지는 혼합물이고, 그 대

\* 동양중앙연구소 건설재료 연구실 선임연구원

부분을 차지하는 고체 성분은 미립자에서 조, 세골재 입자까지 넓은 입도 분포를 갖는 입자의 집합체이다.

이와 같이 시멘트, 콘크리트는 세가지 물질의 상태와 함께 다성분계로 이루어진 하나의 복합체이다. 따라서 그 다성분 속에 포함되어 있는 기술은 어느 하나의 기술이 아닌 여러 기술의 복합체라고 말할 수 있다. 최근 이러한 여러 가지 기술이 복합되어, 급속히 변화되는 사회적 요구에 대응하고 있다. 그 예로 고유동, 고강도 콘크리트 더 나아가 초유동, 초고강도 및 수중 불분리 콘크리트, 구형 시멘트, SL 재, 팽창성 콘크리트, 다공성 콘크리트 등 새로운 재료와 새로운 성형 방법(타설 방법) 즉, 새로운 분체(입자, 무기 혼화 재료)와 다양한 유기 혼화 재료, 유동 특성(rheology, 콘크리트에서는 타설 방법, 분체계에서는 성형 방법)을 변화시킨 시멘트 콘크리트가 주류를 이루고 있다.

## 2. 시멘트 분체계와 Rheology

시멘트 페이스트의 유동성에 미치는 주요한 인자로서는 ① 분산 용매인 물 또는 용액의 유동학적 성질, ② 시멘트 입자간의 분산 응집 상태, ③ 입도 분포에 따른 입자의 충전성(특히 고성능 감수제 등의 분산제 첨가제), ④ 초기 수화에 의한 반응 생성물의 종류와 양, ⑤ 시멘트(에라이트)의 수화 가속기 반응 개시 시간 등이 있다.

①, ②, ③번은 분체 공학에서 말하는 고농도의 현탁액내 거동과 거의 유사하지만, ④, ⑤번은 시멘트만이 갖는 특이성이다. 이중에서 ①번은 용액상의 유동학적 성질을 적극적으로 개량한 예로 수중 불분리 콘크리트가 있고, 이것에 대해서는 나중에 언급할 것이고 여기에서는 분체와 관련이 있는 ②, ③번에 대한 내용을 실었다.

### 2.1 시멘트 입자 자체를 조정한 시멘트의 물성

그림 2, 3은 보통 포틀랜드 시멘트에 분산제의 유무에 따른 입도 분포의 경시 변화를 나타낸 결과이다.

이 결과는 분산제를 첨가하지 않은 계에서는 곧바

로 시간 경과에 따라 수화 반응이 진행되어 수화 생성물이 입자를 응집 시켜 입도 분포가 한곳에 몰리는 것을 알 수 있다. 그러나 분산제를 첨가한 계에서는 수화의 진행과 함께 입도 분포 전체가 작은 쪽으로 옮겨가는 것을 알 수 있다. 시멘트 혹은 수화 생성물이 반응의 진행과 함께 효과적으로 액상에 분산되어, 수화물에 의한 응집이 억제된 것이다.

이 결과를 통해 현탁액 내의 입자 집합체가 어떻게 분포되는가에 따라 물리적 특성에 미치는 영향을 예측할 수 있다. 다음 결과가 그것을 입증한다. 표 1.

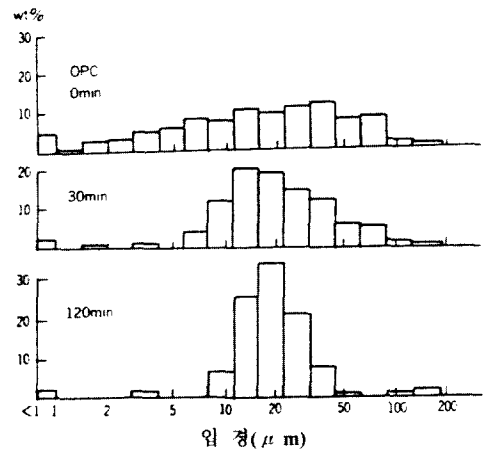


그림 2 혼화제 무첨가 현탁액 중 고체 입자의 입도 분포

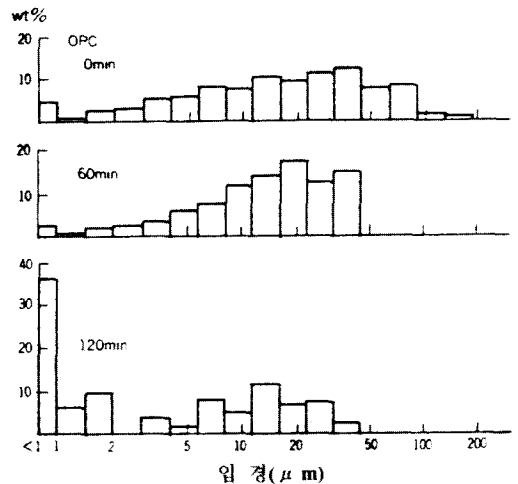


그림 3 혼화제 첨가 현탁액 중 고체 입자의 입도 분포

표 1 시멘트 분체의 입도 조정

	혼합 비율			체가름 잔분(%)				
	조분	중분	미분	80	40	30	20	10
보통시멘트				0.9	8.6	20.1	43.5	67.5
입자 종류	조분			8.7	81.8	98.9	100	100
	중분					0	37.5	95.8
	미분					0	1.6	13.6
입도 조정 시멘트	0.40	0.30	0.30	3.5	32.7	39.6	51.7	72.8

표 2 모르타르의 물성

$$W/C=0.20 \quad S/C=0.6$$

혼합재의 첨가량	시멘트	Flow 값		압축 강도		
		식후	5회	5일	7일	28일
3.0%	보통시멘트	100	112	786	868	1036
	입도 조정시멘트	136	174	806	916	1053

2는 최밀 충전 입자 집합체가 되도록 시멘트 입자를 조절하여 제조한 시멘트와 보통 시멘트를 이용하여 모르타르의 flow 값과 압축 강도를 측정 한 결과이다.

최밀 충전의 상태에서는 flow 값과 압축 강도가 보통 시멘트 입자들을 이용한 모르타르보다 높은 것으로 나타났다. 결국, 유동성이 좋아지고 치밀한 조직을 갖는 성형체의 제조가 가능하게 된다.

이러한 이유로는 입자의 충전성이 입자를 둘러 쌓고 있는 불 막의 두께에 깊은 관계가 있는 것으로 보고되고 있다.

## 2.2 시멘트-슬래그-실리카 흙 혼합물의 물성

시멘트용 혼합재는, 일반적으로 내구성을 포함한 물성의 개량을 목적으로 사용되고 있다. 그러나 최근, 초미분쇄 및 입도 조절한 혼합재의 적극적인 이용은 유동 특성에도 큰 영향을 준다는 것이 알려지기 시작되었다.

더우기 고성능 감수제와의 병용함께 낮은 물시멘트비로 사용하는 예가 점점 늘어나고 있는 추세이다. 이들은 입자계는 충전성이 대단히 높아 종래의 콘크리트와는 그 유동 특성에 상당한 차이가 있다.

그림 4는 시멘트-슬래그 분말의 tapping 시험 결과이고 그림 5에는 진동식 점도계를 이용하여 유동 특성과 그림 6에는 점도를 나타낸 결과이다.

슬래그 혼합율이 20%일 때, 그림 6에서와 같이 겉보기 점도 가장 낮고, 양호한 유동 곡선이 얻어졌고,

그 외의 혼합계에서는 점도의 증가가 나타났다. 유동 곡선 및 겉보기 점도 결과와 그림 4의 충전율 시험과 일치된 결과가 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 이 분체의 혼합계에서는 점도 및 유동 곡선과 분체 충전성과 상관 관계가 있는 것을 알 수 있다. 앞서 이야기한 시멘트 자체의 입도를 조절하여 최밀 충전이 얻어졌을 때와 일치하는 것을 알 수 있다. 이러한 것은 시멘트-슬래그 외에, 시멘트-실리카 흙 및 시멘트-슬래그-실리카 흙의 3성분계에서도 같은 결과가 나타난다. 그림 7에 3성분계 각각의 유동 곡선의 결과에서 겉보기 점도를 구하여, 각 점도를 등고선과 같이 그린 것이다. 가장 낮은 점도를 나타내는 영역에서 충전율과 입자간의 거리를 구하여 그 상관 관계를 유출한 결과, 고충진 밀도가 되도록 하는 것과, 미세 입자가 조대 입자간 거리에 들어가지 않게 분산 거리를 유지 시키는 것이 유동학적인 특성을 향상시키는 것에 매우 큰 인자로 작용한다고 생각된다. 이것은 일본 오카무라씨가 제창한 무다짐 콘크리트의 일련된 시험의 결과와 일치한다.

## 3. 콘크리트의 분체계와 Rheology

아직 굳지 않은 콘크리트의 작업성은 운반과 타설할 때의 유동성, 재료 분리 등에 대한 저항성, 다짐성 등을 종합적으로 표현하려고 하는 용어이다. 그러나 거의 모든 성질도 응력과 변형이라는 관계이고, 작업성을 유동학(rheology)이라는 관점에서 통일적으로 이해하려는 노력이 많이 이루어지고 있다.

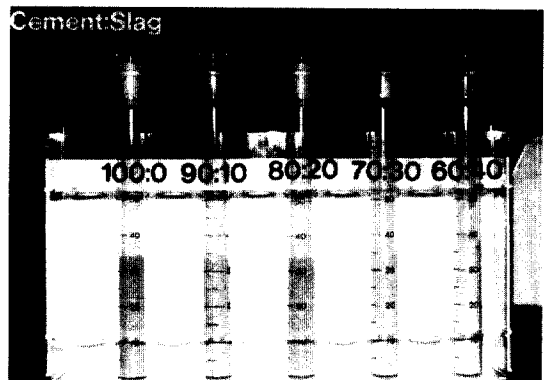


그림 4 시멘트-슬래그 입자의 tapping 시험

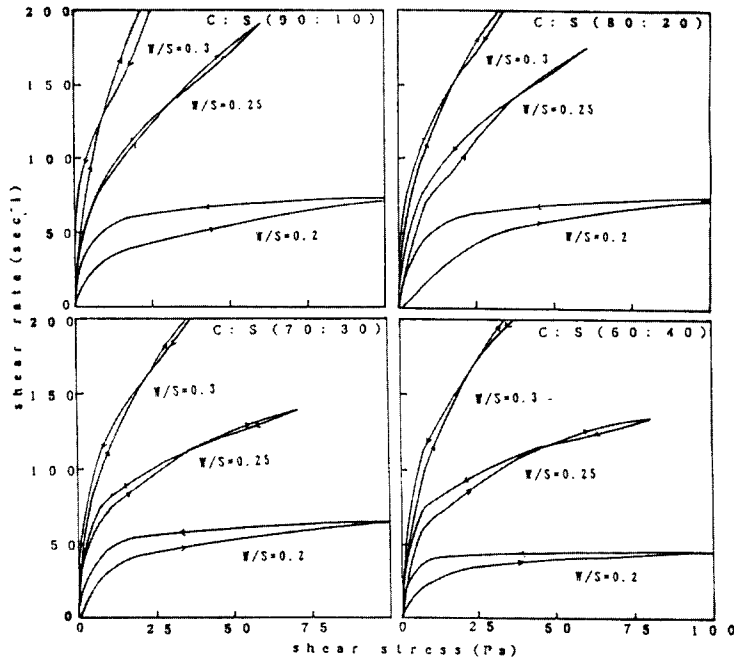


그림 5 각종 물시멘트비에서 시멘트-슬래그의 중량 변화에 따른 유동 특성

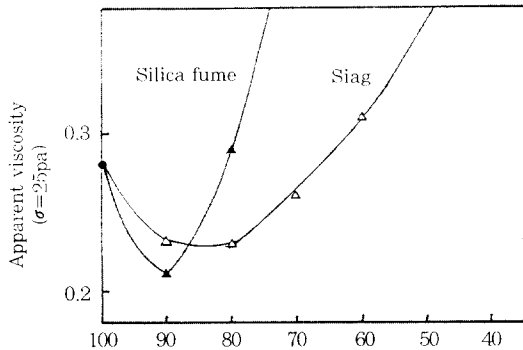


그림 6 전단 응력 25Pa 일 때 시멘트 중량 변화와 겔보기 점도

### 3.1 콘크리트의 입도 분포

경화 콘크리트는 조골재 사이에 분산 분포하는 세 골재, 이들 사이들을 채우는 미수화 시멘트 및 수화

물, 공극으로 이루어진다. 결국 아직 굳지 않은 콘크리트, 즉 구성(고체) 재료가 한 쪽에 치우쳐 있지 않고 이러한 분포가 이루어지면, 양호한 작업성 및 고강도화까지 이루어진다. 콘크리트에 있어서 고체 재료의 입도 분포는 그림 8과 같다. 물론 현장에서 사용하는 조골재 및 세골재가 또는 시멘트가 전부 이속에는 포함되지 않지만, 고성능 감수제 및 시멘트 혼합재를 적절히 이용해 연속적인 입도 분포가 되도록 한다면 고품질의 콘크리트가 얻어질 것이다.

### 3.2 콘크리트의 충진율 배합과 Rheology

콘크리트를 차지하고 있는 고체 입자들을 입자 간에 작용하는 힘과 중력에 작용하는 힘으로 개략적으로 도식화 하면 그림 9와

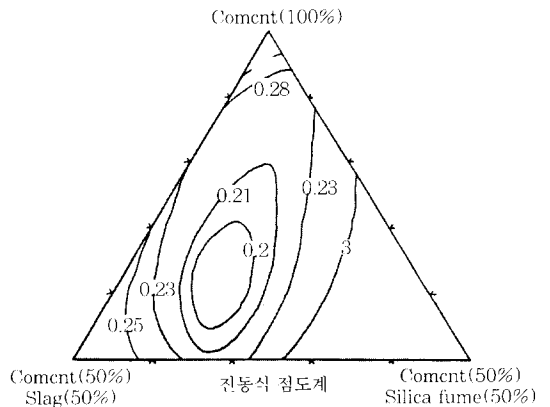


그림 7 진동식 점도계를 이용한 3성분계의 겔보기 점도

같이 나타낼 수 있다. 여기서 모래를 전후한 고체 입자들에 작용하는 힘 및 그것으로 인한 물성에는 상당한 차이가 있다.

고강도 콘크리트의 배합에서 있어서 가장 중요한

것 중의 하나는 세골재와 조골재의 비율, 다시 말해 세골재율을 결정하는 것이다. 공교롭게도 그림 8과 그림 9에서도 세골재의 중요성이 강조 된 것은 어떤 암시를 던져주는 느낌이 든다.

콘크리트에 사용되는 골재의 세골재율은, 그림 10 같이 골재의 밀도가 가장 크게 되었을 때, 즉 최대 밀도일 경우 겉보기 높이가 가장 작아져 골재의 공극이 가장 작고, 이들 골재 사이의 간격을 충전하는 데에 필요한 시멘트 페이스트의 양이 가장 작아진다. 따라서, 동일한 배합에서 유동성에 도움이 되는 시멘트 페이스트 부분이 많아져 유동성이 양호하게 되는 것을 예측할 수 있다.

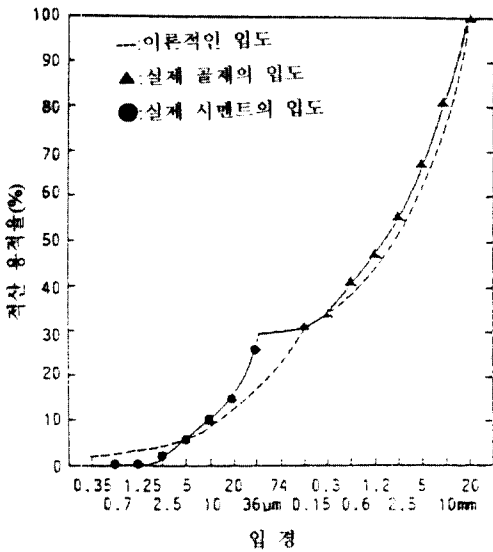


그림 8 콘크리트 중 고체 부분의 입도 분포와 최밀 충전이 되는 입자 분포

그림 11은 고강도 콘크리트의 세골재율과 슬럼프 및 슬럼프 프로 값을 표시한 것으로 슬럼프 및 슬럼프 프로 값은 최대 밀도의 세골재율일 때 가장 큰 값이 나타난다. 또한 이와 같은 최대 밀도일 경우 동일한 유동성일 때에는 골재 간격에 조내재하는 페이스트 양이 적어지기 때문에 골재 간격에서 일어나는 시멘트 페이스트의 수축에 기인하고 미세 균열이 감소한다. 골재의 최밀 충전 세골재율 일 때 내부의 결합이 가장 적어지고, 압축 강도 및 휨 강도의 장기 재령의 증진이 커진다.

이와 같이 세골재와 조골재의 최적 배합 비율은 최

밀 충전에 가깝다고 말할 수 있다. 또한 이 최적 조건에서 유동학적인 측면 역시 양호한 결과가 나타나는 것은 역시 밀집한 상관 관계가 있다. 결국 2.2항에서 논한 시멘트-슬래그-실리카 흙의 3성분계를 확대 연장해가면 조골재-세골재-시멘트라는 3성분계로 함축할 수 있을 것이다. 콘크리트도 분체계의 거동과 같은 측면에서 볼 필요성이 있다.

### 3.3 수중 불분리 콘크리트와 Rheology

한마디로 말해 수중 불분리 콘크리트는 rheology 를 적극적으로 도입한 예이다. 유동화 콘크리트의 슬

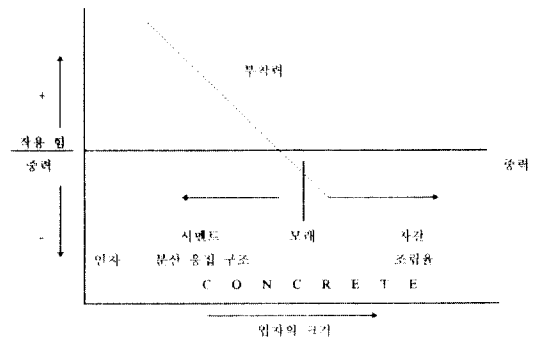


그림 9 분자 입자에 작용하는 힘 및 중력에 대한 비

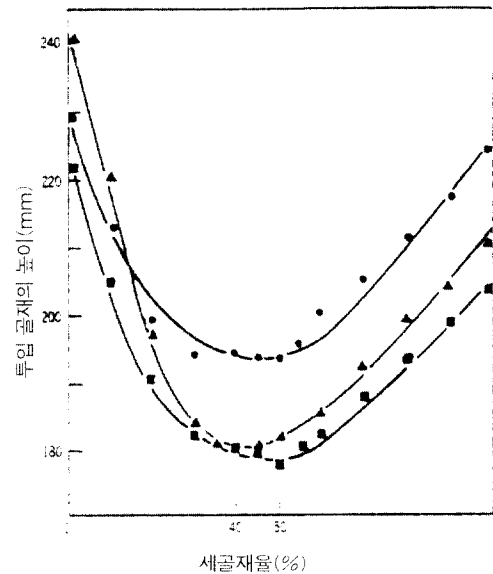


그림 10 각종 골재의 세골재율과 겉보기 높이 세, 조골재 총 용량을 일정하게 한 경우

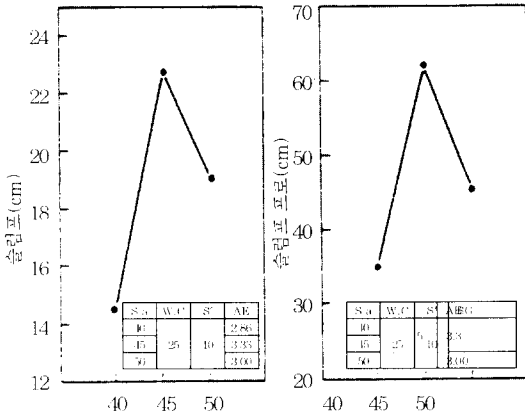


그림 11 세골재율과 슬럼프 및 슬럼프 프로

럼프 프로와 수중 불분리 콘크리트의 슬럼프 프로는 똑같은 값이 나와도 수중 불분리 콘크리트는 콘크리트의 흐름이 정지할 때까지 수분 이상 기다려야 된다. 따라서 종래의 콘크리트와는 전혀 다른 유동 특성(유동 곡선)을 갖는다.

유동학 적으로 여러 가지 형태의 곡선을 그림 13에 실었다. ①번은 종래의 콘크리트로 항복치와 점도 모두 높은 값을 갖는다. 그러나 기술의 진보(고성능 감수제의 출현)으로 항복치와 점도 모두 낮은 값을 갖는 콘크리트가 출현하게 되었다. ①-② ③ 그러나 자칫 잘못하면 점도가 낮아 블리딩 현상과 골재 계면의 부착 강도가 떨어져 저품질의 콘크리트가 얻어지기 쉽다. 따라서 그러한 현상을 해결하기 위해 흐름 속도가 조금 떨어지더라도(점도가 다소 높음) 구석구석까지 흐르는(항복치가 낮음) 콘크리트로 변해가는 과정에 있는 것 같다. ④

수중 불분리 콘크리트는 마치 ①과 ④번을 합친 것(굵은 선)과 같다고 볼 수 있다. 이것은 고농도 현탁액에서 보는 의소성 유체이다. 바로 이것이 높은 분리 저항성과 자기 수평성을 발휘하게 하는 기본 요인인 것이다.

#### 4. Fresh 콘크리트의 평가 방법과 분체의 Rheology

고유동 콘크리트, 고강도 콘크리트 등을 시작으로 종래에는 없는 형태의 아직 굳지 않은 콘크리트가 나

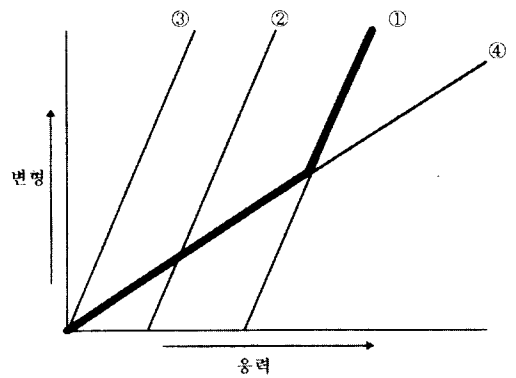


그림 12 아직 굳지 않은 콘크리트의 레올로지

타나, 유동 해석 기술에 대한 기대는 점점 증가하고 있다. 그러나 현재에도, 아직 굳지 않은 콘크리트의 재료 성질에서부터, 그 유동 거동과 시공성을 예측하는 것은 대단히 어려운 과제이다.

아직 굳지 않은 콘크리트의 특성과 그 유동 거동은 예상외로 복잡해서 비행 모델 등의 단순한 역학 모델로 정량화 한 레올로지 정수 만으로 다종 다양한 조건하의 콘크리트의 거동을 표현한다는 것은 어딘지 모르게 부리가 아닌가 생각된다.

재료 성질과 시공 조건이 충분히 파악된다면 아직 굳지 않은 콘크리트 유동 거동을 예측하는 것이 가능할 것이다. 아직 굳지 않은 콘크리트의 rheology적 연구가 바라는 것은 이와 같은 기술 체계의 확립이다. 재료 물성 값에서 콘크리트 공사의 작업 능력을 예측하는 수단을 고안하는 것이 바로 이 분야의 궁극적인 목적일 것이다.

표 3에 각종 시험 방법을 열거하였으나, 현재 하고 있는 또는 개발 단계 및 실용화 되어 있는 그 어느 쪽도 아직 불투명한 점이 많다.

또한 단순히 rheology를 평가 항목으로 보는 경향이 강해 일부에서는 무시하는 경향도 있다. 분체라는 관점에서 특히 시멘트의 경우, 분산 응집 구조로 인한 물성 변화 등을 과연 현재의 cm 단위의 관리로 시멘트 콘크리트를 평가하는 것이 어떤 것인지 이 분야에 있는 종사자들이 한번쯤 생각해야 할 과제가 아닌가 하는 생각이 든다.

예를 들어 수중 불분리 콘크리트의 경우, 슬럼프 프로 및 분리 저항성을 현상학적으로 판단하지만, 시

표 3 아직 굳지 않은 콘크리트 유동 해석의 각종 시험 방법

해석 대상	이론 해석	수치 해석
일반적인 시험	슬럼프 시험 프로 시험 로드 시험	슬럼프 시험 프로 시험 L-Box 시험 VE 시험
그외 시험	경사관 시험	질근 막스 시험 전단 막스 시험
레올로지 시험	회전 및 진동 점도계 일면 전단 시험	회전 및 진동 점도계 일면 전단 시험

공 방법과 관련지어 쿼프 압송인지 트래머 공법인지에 따라 물리적 특성이 변화한다. 이 때 rheology 항목을 도입한다면 단순한 평가 이외에 고품질이면서 경제적인 배합 및 혼화제의 사용량을 결정 지을 수 있다. 이와 같이 평가 항목이 아닌 분체계와의 상관관계로 시멘트 콘크리트를 제조한다면 고성능이면서 경제적인 콘크리트가 쉽게 만들어질 것이다.

## 5. 맺음말

일반적으로 콘크리트는 시멘트, 모래, 자갈 외에 무기 환화 재료, 물 유기 혼화 재료 등이 혼합된 재료라고 말할 수 있다. 따라서 토목, 건축 화학, 재료 더 나아가 철근 과 철골이 들어가므로 금속, 자원 공학 등의 각 분야에 걸쳐 있다. 다시 말해 콘크리트는 복합분야인 것이다.

또한 이들 재료들의 조합 및 재령과 환경의 변화에 따른 재료 특성의 변화, 시공, 2차 제품, 유통의 다양성 등이 얽혀 콘크리트라는 하나의 제품이 탄생한다. 따라서 보다 나은 콘크리트를 만들기 위해서는, 관계하는 분야가 각각 보다 나은 콘크리트를 목표로 서로 버리를 맞댈 필요가 있다.

시멘트 콘크리트는 각 분야에 걸쳐 있어 어느 부분이 정제된다면 보다 나은 시멘트 콘크리트는 기대하기 어렵다. 그 중 한 부분인 분체 및 유동학적 분야도 큰 일익을 담당하도록 건설 관계자 및 학계의 노력이 요구된다. 