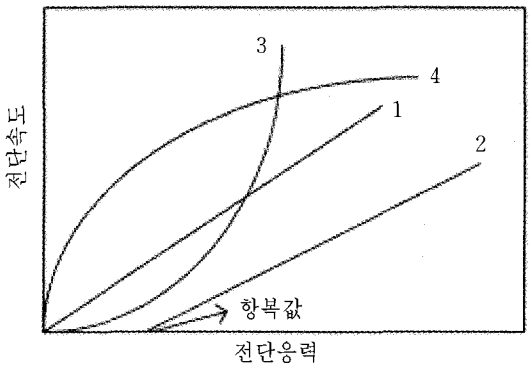
시멘트 콘크리트의 유동성

이 승 헌 (군산대학교 재료·화학공학부 교수)

최근 시멘트 콘크리트 분야에서 고유동화가 주목받고 있다. 이러한 사회적인 요구에 부응하여 새로운 혼화제가 개발되었으며, 시멘트 콘크리트의 재료과학적인 연구도 활성화되었다. 그리고 굳지 않은 상태에서 시멘트 콘크리트의 유동성은 연구개발 분야에서 가장 중요한 과제가 되고 있다. 여기서 우리는 유동성이란 무엇이며, 시멘트 콘크리트는 어떤 유동특성을 나타내는지에 대해 알아보자.

1. 유 동 성

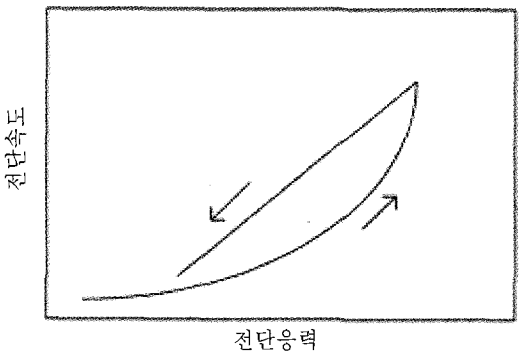
유동이라는 것은 물질에 작용하는 전단응력과 전단속도와의 사이에 일정한 관계를 끄집어내는 것이다. 유동성은 유동곡선으로 나타내며, 점성을 가진 유체의 일반적인 유동곡선은 〈그림-1〉과 같이 나타낼 수 있다. 물과 기름과 같은 물질은 전단응력이 작용하면, 곧바로 전단속도가 발생하여 양자사이에는 직선적인 관계가 나타난다. 이것을 뉴톤유동(①)이라 한다. 그리고 점토와 같이 전단응력이 소정의 값을 넘었을 때에 전단속도가 발생하여, 그 이후에는 직선적인 관계가 성립되는 것을 비뉴톤유동이라 한다. 콘크리트를 비롯하여 시멘트계 혼합물의 유동은 일반적으로 비뉴톤유동과 유사하다. 비뉴톤유동 중에서 유동을 일으키기 위해 필요한 최소 전단응력(항복값)을 필요로 하는 경우를 소성유동(Bingham Flow)이라 한다. 소성유동에서 항복값 이상의 전단응력에서 직선관계(②)가 성립되고, 곡선의 기울기



〈그림-1〉 대표적인 유동곡선

가 소성점도에 해당된다. 곡선③은 혼성유동으로 의소성유동(Pseudoplastic Flow)이라 불리우며, 전단속도가 작은 영역에서는 뉴톤유동에 근사하고, 전단속도가 높은 영역에서는 소성유동을 나타낸다. 이 경우 전단응력에 의해 점도가 변화하고 일정한 값을 갖지 못하므로 이때의 점도를 겉보기 점도라 부른다. 한편 유동곡선 ④와 같이 의소성유동의 역으로 나타나는 유동을 디랏탄트유동(Dilatant Flow)이라 부른다. 의소성유동에서는 전단응력의 증가와 더불어 점도는 감소하는 것에 비해 디랏탄트유동은 증가한다.

위에서 언급한 유동은 전단응력을 증가시킨 후에 하강시켰을 때에 동일한 직선 또는 곡선이 얻어지는 것으로 가정하고 있다. 그러나 일반적인 유동곡선인 경우 이러한 상태는 얻어지지 않고 히스테리시스 현상이 생기는 것을 요변성(Thixotropy)이라 한다.



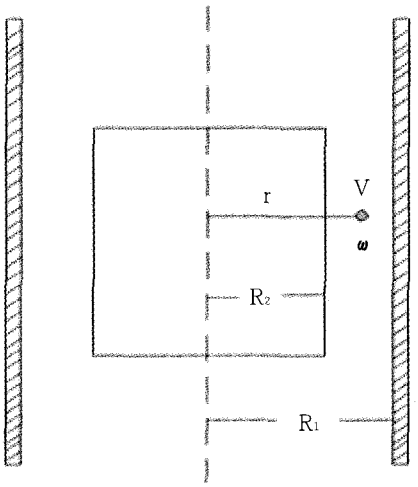
〈그림-2〉 요변성 유동

이러한 상태를 〈그림-2〉에 나타냈다. 요변성이 나타나는 이유는 유체 중에 형성된 구조가 파괴되어 나타나는 것으로, 요변성의 양(구조 파괴의 계량값)은 요변성 곡선에서 둘러싸인 면적으로 평가한다.

2. 원통형 회전점도계에 의한 점도측정 원리

레오로지 정수의 측정은 19세기말 콜로이드화학의 급격한 발전에 의해 측정방법이 시도되었다. 한편 이러한 것을 근간으로 하여 콘크리트의 점도측정은 T.C. Powers 등에 의해 회전점도계를 이용하여 측정하기 시작하여 지금까지 상당한 발전이 있었다. 시멘트계 혼합물의 점도측정에 이용하는 장치는 회전점도계, 인상구식점도계, 평행판 플라스토메타, 이점법 시험장치, 관식점도계 등이 있다. 이러한 것에 의하면 시멘트계 혼합물의 레오로지 정수의 측정값은 측정 장치나 조건에 의해 달라진다.

점도계 중에서 가장 일반적으로 사용하는 것은 회전점도계이다. 회전점도계는 해석이 간편하고, 시료가 장치의 고체면에서 미끄럼이 생기는 경우에 보정이 비교적 간단하다는 특징이 있다. 〈그림-3〉에서 보듯이 반경 R_1이 되는 외통내에 같은 축에 반경 R_2가 되는 내통을 설치하고, 그 사이에 점성이 있는 유체를 채우고, 그 원통을 일정한 속도로 회전시키면 다음과 같은 관계가 성립된다. 반경 R_1과 R_2사이에 임의의 반경 r부분에서 유체의 속도를 V, 각속도를



〈그림-3〉 원통형회전 점도계

ω라 하면, 유체의 속도와 속도구배(D)는 다음 (식-1, 2)와 같다.

$$V = r\omega \quad \cdots\cdots (식\text{-}1)$$

$$D = dV/dr = rd\omega/dr + \omega \quad \cdots\cdots (식\text{-}2)$$

그러나 이 속도구배 식의 ω는 점성저항을 나타내는 것이 아니기 때문에 $rd\omega/dr$는 점성저항을 포함하고 있는 전단속도가 된다. 즉 원통의 내통과 외통이 동일한 각속도 ω로 회전한다면 그 사이에 있는 유체도 동심원상에서 ω로 회전하고, 중심으로부터 멀어질수록 빠른 속도로 회전하니까 ω에 대한 속도구배가 생기지만, 이 경우 점성저항은 생기지 않는다. 외통이 ω_1이라는 각속도, 내통이 ω_2라는 각속도로 회전하고, ㉠~㉢과 같은 조건을 만족한다면 점도는 다음과 같이 구할 수 있다.

㉠ 원통사이의 유체는 층류이다.

㉡ 양 원통은 무한히 길다.

㉢ 유체는 뉴톤유체이다.

중심으로부터 거리 r에 있는 곳의 각속도 ω는 다음과 같은 (식-3)으로 나타낼 수 있다.

$$\omega = \frac{(\omega_1 R_1^2 - \omega_2 R_2^2)}{(R_1^2 - R_2^2)} + \frac{R_1^2 \cdot R_2^2 (\omega 2 - \omega 1)}{(R_1^2 - R_2^2)} \quad \cdots\cdots (식\text{-}3)$$

이 식에 의해 양 원통간의 유체의 속도분포를 알

수 있으며, 반경 r에서의 전단속도 Dr을 다음과 같은 (식-4)를 구할 수 있다.

$$Dr = \frac{r \cdot d\omega}{dr} = \frac{2R_1^2 \cdot R_2^2}{(R_1^2 - R_2^2)} \times \frac{(\omega_1 - \omega_2) \cdot 1}{r^2} \quad \cdots\cdots (식-4)$$

따라서, 외통 또는 내통이 받는 점성에 의한 토크(M)은 다음 (식-5)와 같다.

$$M = (2\pi rh)\eta Dr = \frac{2\pi rhR_1^2 \cdot R_2^2}{(R_1^2 - R_2^2)} \times (\omega_1 - \omega_2) \quad \cdots\cdots (식-5)$$

여기서, h는 원통의 높이이고, 외통과 내통이 같은 방향과 같은 속도로 회전한다면 $\omega_1 = \omega_2$이므로 M=0이 되어 원통이 점성에 의해 받는 토크는 영이다. 외통과 내통이 각속도에 차이가 있다면, 원통은 점성에 의한 토크를 받으므로 토크 M과 유체의 점도 η와는 (식-5)와 같은 관계식이 성립한다. 이것으로부터 각속도의 차와 토크 M을 측정하는 것에 의해 유체의 점도를 구할 수 있다.(식-6)

$$\eta = \frac{M(R_1^2 - R_2^2)}{4\pi rhR_1^2 \cdot R_2^2} (\omega_1 - \omega_2) \quad \cdots\cdots (식-6)$$

그리고, 외통을 고정하고 내통을 일정한 속도로 회전하면 점도는 다음 (식-7)과 같이 된다.

$$\eta = \frac{-M(R_1^2 - R_2^2)}{4\pi rhR_1^2 \cdot R_2^2(\omega_1)} \quad \cdots\cdots (식-7)$$

음의 부호는 내통의 회전방향과 토크의 방향이 반대라는 것을 의미한다. 그리고 외통의 반경을 무한대로 했을 때, 원통의 중심축으로부터 r의 거리에 있는 유체의 각속도 ω는 (3)식에서 $R_1 = \infty$, $\omega_1 = 0$이기 때문에 다음 (식-8)과 같이 된다.

$$\omega = \omega_2 R_2^2 / r^2 \quad \cdots\cdots (식-8)$$

여기서, ω_2는 원통의 각속도이고 R_2는 원통의 반경이다. 그때의 전단속도 Dr은 (식-9)와 같고, 원통이 유체의 점성에 의해 받은 토크 M은 (식-10)과 같다.

$$Dr = r \cdot d\omega/dr = -\omega_2 R_2^2/r^2 \quad \cdots\cdots (식-9)$$

$$M = -4\pi(h + \triangle h)\eta\omega_2 R_2^2 \quad \cdots\cdots (식-10)$$

여기서, h는 원통의 높이이고, △h는 밑면의 영향에 대한 보정값이다. 회전점도계가 유체의 점성에 의한 토크를 스프링의 압축력에 의해 측정한다면, 스프링을 단위각도 만큼 압축하는데 필요한 토크를 TM, 압축각을 θ라고 하면 토크와 압축각도는 다음 (식-11)과 같은 관계가 있다.

$$M = -\theta TM \quad \cdots\cdots (식-11)$$

그리고 (식-10, 11)에 의해 점도는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, K는 점도계가 결정되면 일정한 값을 취하므로 η는 θ에 비례한다.

$$\eta = \frac{T_M\theta}{[4\pi(h + \triangle h)\eta\omega_2 R_2^2]} = \frac{K\theta}{\omega_2} \quad \cdots\cdots (식-12)$$

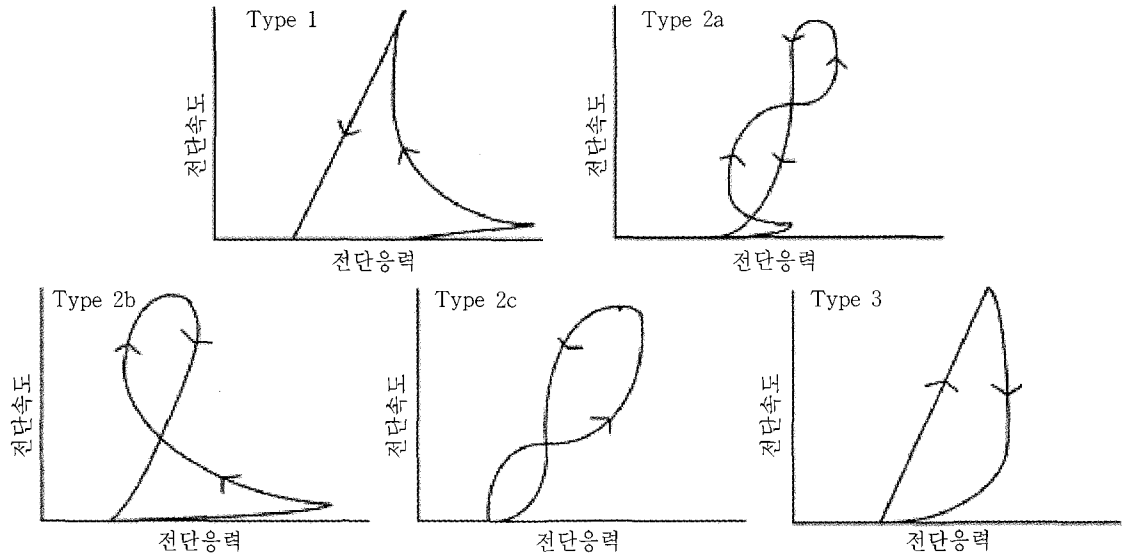
3. 시멘트 페이스트의 유동기구

콘크리트의 구성부분을 크게 나누면 골재부와 시멘트 페이스트 부분으로 나눌 수 있다. 콘크리트의 유동성은 시멘트 페이스트의 유동특성에 크게 의존하므로 시멘트 페이스트의 유동성을 해명하는 것은 콘크리트의 유동특성을 이해하는데에 매우 중요하다.

굳지 않은 콘크리트의 작업성은 운반이나 타설할 때에 유동성, 보수성, 재료분리 등에 대한 안정성, 다짐성 등을 종합적으로 표현하는 용어이다. 그러나 이것은 응력과 변형의 관계라고 말할 수 있다. 시멘트 콘크리트는 종래부터 소성유동으로 정리되는 경우가 많아 유동특성은 항복값과 소성점도로 표현되어 왔다.

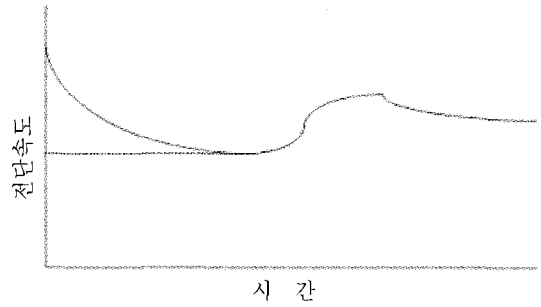
그러나 Tattersall은 시멘트 페이스트의 유동특성은 회전점도계에 의해 조사한 결과, 낮은 전단속도에서는 소성유동을 하지만, 높은 전단속도에서는 시멘트 페이스트의 구조가 파괴되어 소성유동과는 다른 형태를 보인다고 보고하였다. Banfill은 시멘트 페이스트의 유동곡선을 〈그림-4〉와 같이 다섯개의 형태로 나누었다.

회전점도계에 의한 측정 사이클 시간이 짧을수록 구조파괴가 진행되어 Type 1과 같은 유동곡선을



〈그림-4〉 시멘트 페이스트의 전단응력의 경시변화

나타내고, 역으로 사이클 시간이 길수록 수화반응에 의해 새로운 구조가 형성되어 Type 3과 같은 곡선이 된다. 또 유동곡선에는 히스테리시스 현상이 나타나 요변성을 갖게 되며, 물/시멘트 비가 낮은 영역에서는 디랏탄트 현상을 나타낸다. 이와 같이 시멘트 페이스트는 이상유체로서 뉴톤유동을 나타내는 것이 아니라, 수용액 중에 분산된 시멘트 입자가 약한 상호작용에 의해 이차입자 내지는 응집구조를 형성하여 전단응력이나 전단속도에 의해 구조가 파괴되는 것으로 밝혀졌다. 이러한 과정에 시멘트의 수화반응이 가해져서 시간 의존성을 나타낸다.



〈그림-5〉 시멘트 페이스트의 유동곡선

Papo는 전단속도를 일정하게 시간에 따른 전단속도를 측정하여 〈그림-5〉와 같은 결과를 얻었다. 그림에서 보듯이 전단응력에 대해 두개의 극소값이 존재한다. 처음의 극소값은 전단응력에 의해 구조의 파괴된 후, 안정화되는 과정에서 수화반응 등에 의해 입자간의 결합력이 증가하면서 전단응력이 상승하여 극소값이 나타나는 것으로 해석하였다.

4. 맺는 말

시멘트 콘크리트의 유동성은 사용되는 재료의 모든 특성에 의해 영향을 받고, 각각 특성의 상호 작용에 의해서도 영향을 받으므로 매우 복잡하다. 콘크리트의 고성능화, 고품질화 및 특수화가 요구될수록 유동성의 문제는 중요하다. 유동성의 지표로서 레오로지 정수를 구하는 최대의 목적은 콘크리트 시공의 합리화의 추진에 있다. 그렇지만 레오로지 정수의 측정만으로는 불충분하기 때문에 유동성은 레오로지 정수를 활용하여 소정의 시공작업과 연계시키는 것과 이론적으로 관련된 공학적인 양으로 표시하는 것이 매우 중요하다.