

갱도 뒤채움용 광미 페이스트의 유변학적 특성

정문영^{1)*} · 안용현¹⁾

Rheological Characteristics of Tailings Paste for Stope Backfill

Moon Young Jung* and Yong Hyeon An

(Received January 6 2017; Final version Received 22 February 2017; Accepted 24 February 2017)

Abstract : In this work, rheological constants measurement and flow tests on powder slurries and tailings paste were carried out in order to get information needed to recycle tailings into backfiller for an underground stope. The tailings paste was Bingham fluid which can flow from larger stress than critical shear stress(yield stress). Apparent viscosity of the tailings paste demonstrates shear thinning phenomenon which decreases with increasing shear stress. The plastic viscosity and the yield stress of the powder slurries predicted by Bingham equation increased in order of fly ash < cement < ground blast furnace slag(GBFS) < tailings. This indicates that in case of making pastes of four powder systems (cement-fly ash-GBFS-tailings) for the stope backfill, its rheology was most affected by the tailings. Fresh tailings pastes will increase their flowability by adding the fly ash and the GBFS which can enhance long compression strength of harden tailings pastes due to pozzolanic property, thus facilitating transportation to the underground stope.

Key words : Tailings paste, Flow, Efflux time, Yield stress, Plastic viscosity

요약 : 본 연구에서는 선광 광미를 갱도 뒤채움재로 순환자원화 하는데 필요한 정보를 얻기 위해 분체계 슬러리 및 광미 페이스트의 유변학적 정수 측정 및 유동성 실험을 수행하였다. 양양철광산 선광 광미 슬러리는 임계전단응력이 상에서부터 흐름성을 나타내는 병행유체 거동을 하며, 그의 겔보기 점도는 전단응력이 증가함에 따라 감소하는 전단 담화 현상을 보여주고 있다. 병행식으로 파악한 분체 슬러리의 항복응력과 소성점도는 플라이애쉬 < 시멘트 < 고로슬래그미분말 < 광미 순으로 증가하고 있다. 이는 갱도 뒤채움용 4 성분계(시멘트-플라이애쉬-고로슬래그미분말-광미) 페이스트 제조 시, 그의 유변성은 광미에 의해 가장 많은 영향을 받는다는 것을 의미한다. 포졸란 특성이 있어 굳은 광미 페이스트의 장기 압축강도를 증진시킬 수 있는 플라이애쉬와 고로슬래그미분말의 첨가는 굳지 않은 광미 페이스트의 흐름성을 향상시켜 지하 깊은 갱도까지의 수송을 유리하게 만들 것이다.

주요어 : 광미 페이스트, 플로우, 유하시간, 항복응력, 소성점도

서 론

갱내 충전법은 충전 재료와 이송방법에 따라 크게 폐석 충전, 수력 충전, 페이스트 충전으로 구분된다(Grice, 2001; Potvin *et al.*, 2005; Jung, 2008). 이 중에서 페이스트 충전법인 시멘트 광미 뒤채움(cemented tailings backfilling, CTB) 기술은 선광 부산물인 광미를 채굴장 또는 갱도 등의 지하 공간을 충전하는 재료로 사용하기 위해 도입되고 고안되었다(Golder Associates, 1998; Potvin *et al.*, 2005). 이 기술은 지상의 광미 적치장 규모를 감소시키거나 제거할

뿐 아니라 안전한 지하 작업조건을 광부에게 제공하므로 광석 회수율 증진, 지반침하 방지 등 다양한 이점 때문에 세계적으로 광범위하게 적용되고 있다(Fall *et al.*, 2005; Potvin *et al.*, 2005; Fall *et al.*, 2008; Cihangir *et al.*, 2012; Yilmaz *et al.*, 2015). 그러나 국내에서는 광미 페이스트 충전에 대한 사례는 거의 전무하며 최근 연구실 규모의 연구가 일부 이루어지고 있는 실정이다(Song *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2013). 광미, 결합재와 물을 혼합한 굳지 않은 CTB는 상대적으로 높은 밀도를 가진 하나의 페이스트를 형성한다. 굳지 않은 CTB의 주요 특성 중의 하나는 그의 운반성이다. 이는 CTB의 유동성 또는 흐름성과 관련된다. CTB 흐름성은 항복응력과 소성점도와 같은 레올로지 정수에 의해 통제된다. 항복응력은 굳지 않은 CTB가 흘러 유연하게 거동하기 시작하는 임계 응력값이며 그 값은 입자 농도와 온

1) 세명대학교 바이오환경공학과

*Corresponding Author(정문영)

E-mail; myjung@semyung.ac.kr

Address; Department of Bio & Environmental Eng.,
Semyung University, Choongbuk, Korea

도에 의해 영향 받는다. 그러나 입자 농도와 온도 의존과 더불어 그 점도는 여전히 전단속도에 달려있다(Wu *et al.*, 2013). 본 연구의 대상이 되는 페이스트 충전은 총 중량대비 고형물 혼입량이 75~85 wt.%의 범위에 해당하는 충전 기술이다. 수력식 충전과 같이 시추공 및 파이프 라인을 통해 중력식으로 혹은 펌핑 방식으로 적용될 수 있다. 페이스트 충전은 슬러리 충전과 달리 시멘트계열로만 분류되며, 낮거나 높은 함수비 및 결합재의 강도, 강성을 주재료의 특성에 따라 조절하여 적용할 수 있는 장점이 있다. 또한, 이들의 조절을 통해 치밀한 충전특성을 기대해 볼 수 있다. 10%이하의 적은 시멘트량 사용으로 인하여 경제성이 있으며, 갱내 흡수발생 가능성은 낮다. 자본 비용은 수력식보다 다소 높으나, 시멘트계 충전법 범위내에서 저렴한 자본투자 및 운용이 가능하다. 광미 페이스트의 유변학적 특성 및 침강흐름특성을 조절하기 위하여 20 μm 이하의 입자의 비율이 15% 이상을 포함하고 지하갱도에 충전했을 시 블리딩(bleeding) 현상이 일어나서는 않되며, 관로 내에서 고액 분리가 발생되지 않도록 비 뉴턴(non-Newtonian) 유체에 가까운 유체특성을 발현하여야 한다(Potvin *et al.*, 2005). 따라서 품질관리를 위해 낮은 함수율을 관리가 필요하다. 페이스트 충전은 원거리 이송시 관내 저항으로 인해 다소 높은 압력 유지가 필요하므로 수력 충전 보다는 높은 수준의 이송시스템이 요구된다. 충전기술의 적용 실패 형태를 살펴보면 파이프라인의 막힘, 시추공 막힘이 가장 큰 비율을 차지하였다.

본 연구에서는 선광 광미를 지하 갱도 뒤택음재로 순환 자원화하기 위하여 이에 필요한 유동성을 확보하고자 양양 철광산의 선광 광미, 플라이애쉬, 고로슬래그미분말, 시멘트에 대한 레올로지 정수 측정 및 광미 페이스트의 유동성 실험을 수행하였다.

이론적 배경

유변학(rheology)은 흐름을 의미하는 희랍어 ‘Rhec’에서 유래하였으며, Bingham이 ‘유동을 포함한 물질의 변형에 관한 학문’을 레올로지라고 처음 명명하였다. 유변학은 고체와 유체의 특성을 동시에 갖는 슬러리, 현탁액, 페인트, 치약 등의 변형 및 유동을 연구하는 분야로서 흐를 수 있는 물질들의 유변학적 특성은 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다(Jeong, 2014). Figs. 1(a)~1(c)는 각각 흐름곡선, 항복응력과 소성점도 결정방법 및 점도-전단속도 간 상관관계를 나타낸 것이다. 일반적으로 모든 물체는 흐름에 저항하려는 성질을 가지고 있다. 분체와 물이 혼합된 경우 비뉴턴 유체처럼 거동하며 항복응력을 가진다(Coussot and Piau, 1994; Coussot *et al.*, 2002). 흐름곡선은 전단응력과 전단속도 간 상관관계를 나타낸 것으로 빙햄(Bingham), 전단담화(shear thinning), 전단농화(shear thickening) 및 뉴턴 거동을 말하며 흐를 수 있는 모든 물질에 대해 적용된다(Fig. 1(a)). Fig. 1(b)는 유변학적 상수인 항복응력과 소성점도의 산정방법을 나타낸 것이다. 겔보기 항복응력을 기준으로 하여 항복 전 유체저항을 의사뉴턴점도(pseudo-Newtonian viscosity)라 명명하고, 항복 후 유체저항을 소성점도라고 명명한다. 미립자의 슬러리의 경우 겔보기 항복응력(τ_{ya})과 빙햄 항복응력(τ_y -절편값)의 차이는 미미하나 입자크기가 커질수록 그 차이가 커진다. 만약 흐를 수 있는 물질이 비뉴턴 유체라고 할지라도 주어진 전단속도에 대해 유체는 빙햄, 전단담화 그리고 전단농화 형태로 분류된다(Jeong *et al.*, 2010). 여기서 전단담화와 전단농화는 겔보기 점도가 전단속도에 따라 증가 또는 감소하는 현상을 말한다(Fig. 1(c)). 굳지 않은 상태의 시멘트계 페이스트는 여러 재료가 액체에 포함된 현탁액으로 볼 수 있으며, 특정한 응력수준(항복응력) 이하에서는 고체로, 그 이상의 응력에서는 소성점도를 갖는 유체와 같이 거동하게 된다(Tattersall and Banfill,

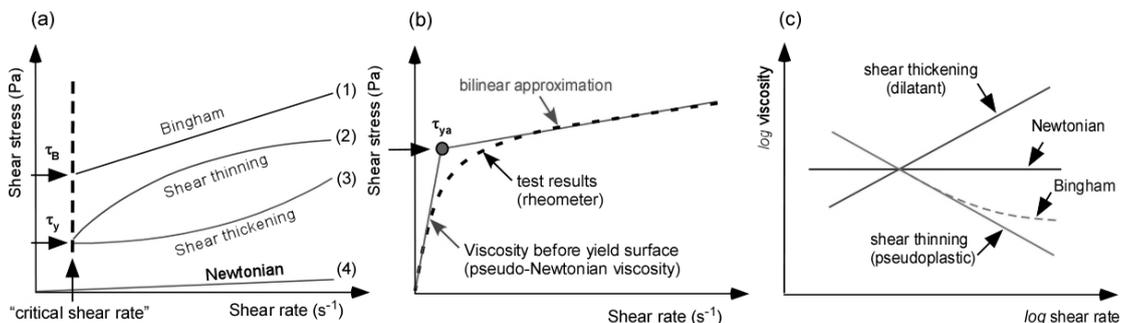


Fig. 1. Flow characteristics: (a) flow curves, (b) determination of viscosity and yield stress, and (c) viscosity as a function of shear rate(Jeong, 2014).

1983). 슬럼프 플로우 실험과 같이 페이스트의 흐름성이 ‘좋다’ 혹은 ‘나쁘다’로 판정하는 것과 달리 주요한 두 개의 상수인 항복응력과 소성점도를 측정함으로써 페이스트의 유동특성을 정량적으로 파악할 수 있다. 여기서 항복응력은 페이스트의 이동거리에 영향을 미치는 유변학적 상수이고 소성점도는 이동속도에 영향을 미치는 유변학적 상수로 알려져 있다.

레올로지의 측정은 ‘Viscometer’ 또는 ‘Rheometer’라 불리는 장비를 사용하여 이루어진다. 측정 대상 재료에 여러 수준의 회전력을 가하면서 동시에 각속도를 측정하고, 이 회전력과 각속도 관계를 다시 전단응력과 전단속도로 환산한 뒤 점도와 항복응력을 산정하게 된다(Tattersall and Banfill, 1983). 모르타르나 페이스트의 경우 관형 또는 실린더형 회전축을 일반적으로 사용한다. 레올로지를 측정함으로써 페이스트 배합을 구성하는 특정 요소가 항복응력과 점도를 얼마만큼 변화시킬 수 있는지 정량적으로 파악할 수 있으며, 반대로 이들 영향인자를 조절함으로써 시공 조건에 적합한 품질을 갖는 페이스트 배합을 설계할 수도 있다. 굳지 않은 페이스트, 모르타르, 콘크리트의 유동성은 비뉴턴(non-Newton) 특성을 나타내는 유체이다. 비뉴턴 유체는 전단응력과 전단속도 사이에 비례관계가 성립되지 않는 모든 유체를 말하며, 전단속도에 따라 점도가 변하는 특성을 보인다. 즉, 특정 전단속도에서의 점도(겉보기 점도)로 유체의 점성을 비교한다(Park *et al.*, 2004; Erdogan *et al.*, 2008). 본 연구에서 사용한 빙햄식(Bingham equation)은 $\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma}$ 와 같다. 이 식에서 소성점도(η_{pl})는 응력-하강곡선의 기울기에 해당하며, 항복응력(τ_0)은 y축(전단응력)의 절편에 해당한다(Fig. 1(b)). 빙햄식은 낮은 전단속

도($\dot{\gamma}$) 영역에서 요변성(thixotropy)현상을 보이는 물질에 대한 전단응력/전단속도의 거동을 묘사하며, 전단응력(τ)이 임계응력(항복응력, τ_0)을 넘을 때까지 흐르지 않는다.

재료 및 연구방법

실험재료

본 연구에 사용한 분체 시료는 시멘트, 석탄회(fly ash), 고로슬래그 미분말(ground blast furnace slag, GBFS) 그리고 광미(tailings)였다. Table 1은 분체 시료의 물리적 특성 및 성분을 나타낸 것이다. 시멘트는 S사의 보통 포틀랜드시멘트, 고로슬래그미분말은 (주)포스화인에서 구입한 것이다. 석탄회는 보령화력발전소 그리고 광미는 양양철광산 선광장에서 입수하였다.

Fig. 2는 양양철광산 선광 광미의 입도분포도를 나타낸

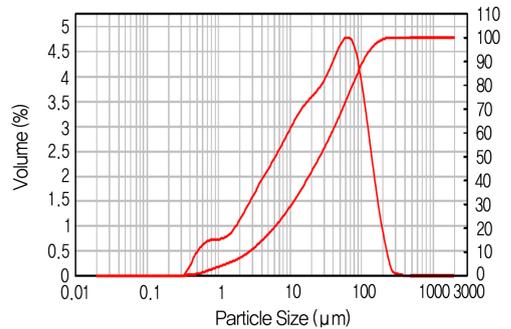


Fig. 2. Particle size distribution of tailings from Yang-yang iron mine.

Table 1. Physical and chemical properties of powders

Powders	Density (g/cm ³)	Median (μm)	Blaine (cm ² /g)	Chemical composition (%)							
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
Cement	3.15	13	3,165	21.6	6.0	3.1	61.4	3.4	1.3	1.1	1.4
Tailings	2.71	28	2,764	57.5	13.4	8.4	3.0	4.5	3.3	1.4	5.7
Fly ash	2.19	12	3,560	51.3	23.5	10.4	6.2	2.1	0.8	0.4	3.7
Ground blast furnace slag	2.90	11	4,475	34.4	15.6	0.6	40.1	6.6	0.1	0.2	0.3

Table 2. Results of KSLT of tailings from Yang-yang iron mine (unit : mg/L)

Item	Cd	As	Cu	Pb	Remark
Standard level of heavy metals	0.3	1.5	3.0	3.0	Implementing Regulations in Waste Control Act (attached table 1)
Tailings	ND*	ND	0.09	0.04	

*ND: Non-detection

것으로 빈도분포곡선에서 알 수 있듯이 최대빈도경은 62 μm , 중간경은 28 μm 이었다. 그리고 누적입도분포곡선에서 알 수 있듯이 20 μm 이하의 입자가 41.7%로 페이스트 충전법에 적합한 광미의 입도분포는 20 μm 이하의 입자가 최소 15% 이상 포함되어야 한다는 조건(Potvin *et al.*, 2005)을 만족시키고 있다.

Table 2는 양양철광산 선광 광미의 위해성 평가를 위한 증금속 용출시험(KSLT) 결과를 나타낸 것이다. 표에서 알 수 있듯이 양양철광산 선광 광미의 증금속 용출량은 폐기물 관리법 시행규칙 별표 1에 규정되어 있는 증금속 용출 기준치보다 낮았다. 광산보안법 시행규칙 제240조(광업폐기물처리기준)4항에 의하면 “유해한 광업폐기물은 갱내에 매립처분하지 아니할 것”으로 명시되어 있다. 따라서 양양철광산 선광 광미는 별도의 무해화 공정을 걸치지 않아도 갱도 뒤채움재로 순환자원화 하는 데는 문제가 없다고 판단되었다.

실험방법

분체계 슬러리 및 페이스트의 레올로지 실험은 실린더형 스피들(Spindle SC4-16)을 사용한 Brookfield 점도계(Model LVDV II+,)를 이용하여 Fig. 3과 같이 전단속도의 변화에 따른 전단응력의 변화량을 측정하였다. 이때, 전단속도는 0~40 s^{-1} 범위로 설정하고 레올로지 곡선의 하강 직선의 기울기를 구하기 위하여 스피들의 회전속도를 변화(10~200 rpm)시키면서 5초 간격으로 측정하였으며, 전단속도에 따라 산출된 전단응력을 직선회귀분석을 통해 빙햄 유체로 가정하여 구한 레올로지 곡선의 기울기로부터 소성 점도를 구하였고 항복응력은 레올로지 곡선에서 하강곡선과 전단응력 축(0/sec)이 만나는 절편으로 가정하여 구하였다(Fig. 1(b)). 그리고 1성분계 슬러리 또는 2성분계 페이스

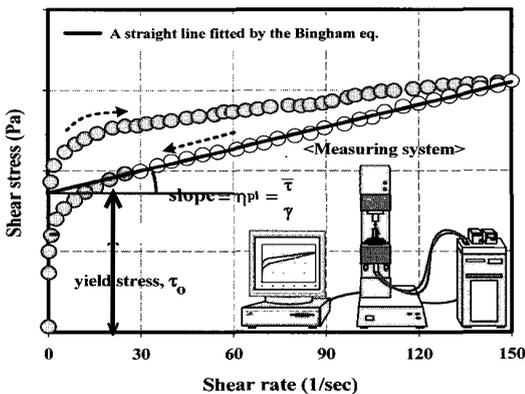


Fig. 3. Typical rheological curve described from the measuring system.

트의 플로우는 KS L 5111에 준하는 flow cone(Fig. 4)를 이용하여 무진동 상태에서 측정하였다. 슬러리 또는 페이스트를 cone에 채우고 1분 후 cone을 조심스럽게 수직으로 들어 올려 퍼짐의 직경(mm)을 측정하였다. 슬러리 또는 페이스트의 유하시간(efflux time)은 시료 100 ml의 배출시간을 나타낸 것으로 KS F 2432(주입 모르타르의 컨시스턴시 시험방법)에 제시된 O-lot flow cone 시험장치(Fig. 5)를 이용하여 측정하였다. 이때 분체계 슬러리 및 페이스트의 혼합은 KS L 5109에 규정된 모르타르 믹서를 사용하였다.

실험결과 및 검토

Fig. 6은 Brookfield 점도계를 사용하여 여러 분체 슬러리의 전단속도 제어를 통한 전단응력-전단속도의 상관관계를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 이때의 측정조건은 물/분체비(W/P) 0.50 그리고 측정온도는 25±1°C이었다. 그 그래프에서 알 수 있듯이 입자 분산계인 각종 슬러리는 흐름이 일어나지 않는 항복응력이 존재하고 있다. 이는 빙햄유체에서 나타나는 현상으로 잘 알려진 여러 유변학적 모델 중에서 본 연구에서 사용한 분체계 슬러리는 빙햄식에 부합되는 것으로 파악되었다. 빙햄식으로 파악한 분체계 슬러리의 레올로지 정수인 항복응력은 플라이애쉬(1.06 Pa) < 시멘트(1.90 Pa) < 고로슬래그미분말(4.43 Pa) < 광미



Fig. 4. Flow cone test.



Fig. 5. O-lot flow test.

(4.88 Pa) 순으로 증가하고 있고, 소성점도는 플라이애쉬 (0.24 Pa·s) < 시멘트(0.48 Pa·s) < 고로슬래그미분말(0.65 Pa) < 광미(0.78 Pa·s) 순으로 증가하고 있다. 이는 4성분계 (시멘트 - 플라이애쉬 - 고로슬래그미분말 - 광미) 페이스트 제조시 그의 레올로지의 특성은 플라이애쉬에 의한 영향을 가장 적게 받고 광미에 의해 가장 큰 영향을 받게 된다는 것을 의미한다. 이처럼 분체계 슬러리의 레올로지 특성은 분체의 특성인 표면특성(젖음성), 입자의 비표면적(입도 및 분포도), 입자의 형상 등에 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Wang *et al.*, 2003; Hwang *et al.*, 2007; Erdogan *et al.*, 2008).

일반적으로 플라이애쉬 및 고로슬래그미분말은 시멘트 페이스트 및 콘크리트의 유동성을 증진시키고 잠재수경성과 포졸란반응에 의해 콘크리트의 장기강도 증진 및 내구성 향상에 기여하는 것으로 알려져 있다(Mindess *et al.*, 2003; Song *et al.*, 2008). 한편 시멘트페이스트나 콘크리트의 항복응력은 슬럼프와 관련되며, 소성점도는 점착성, 성형성, 분출성, 마감성과 재료분리와 같은 특성들과 관련된 유변학적 상수로 보고되어 있다(Ferraris *et al.*, 2001). 따라서 본 연구에서도 분체 슬러리의 레올로지 상수와 그의 유동성과의 상관관계를 규명하고자 유동거리 파악하기 위해 flow cone(Fig. 4)시험과 유동속도 파악하기 위해 O-lot flow cone 시험(Fig. 5)을 수행하였다. Table 3은 물/분체비 (W/P) 0.50 그리고 측정온도는 25±1°C인 조건에서 측정된 각종 분체 슬러리의 레올로지 상수값과 플로우 및 유하시간이다. 표에서 알 수 있듯이 항복응력이 큰 분체 슬러리일수록 플로우값은 작았고 소성점도가 작을수록 유하시간은 짧았다. 즉, 항복응력과 플로우값은 반비례관계를 그리고 소성점도와 유하시간은 정비례관계를 알 수 있었다. 이는 자연사면에서 발생하는 토석류(debris)는 빙행유체로서 그의 흐름특성과 관련하여 항복응력은 이동거리에 영향을 미치는 유변학적 상수이고 소성점도는 이동속도에 영향을 미치는 유변학적 상수라고 발표한 Imran 등(2001)의 연구결과와 잘 부합하고 있다.

이처럼 분체의 종류는 항복응력과 소성점성과 같은 유변학적 특성에 영향을 주는 주요 매개변수임을 알 수 있다. 대

부분의 분체 슬러리는 액상 매개체인 물에 미립의 고�형입자가 분산되어 있는 구조적 특성 때문에 항복응력을 가지고 있으며, 항복응력 이상에서는 전단속도가 증가하면 그 점도가 감소하는 전단담화 거동(Fig. 1(c))을 나타낸다. 본 연구에 사용한 분체 슬러리는 그의 종류에 상관없이 빙행 유체 거동을 보이고 있고 전단속도가 증가함에 따라 겉보기 점도는 감소하는 전단담화 유체성질을 나타내고 있다 (Fig. 7).

Fig. 8은 광미 슬러리의 w/p비에 따른 전단속도 제어를 통한 전단응력-전단속도의 상관관계를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 이때의 측정온도는 25±1°C이었다. 광미 슬러

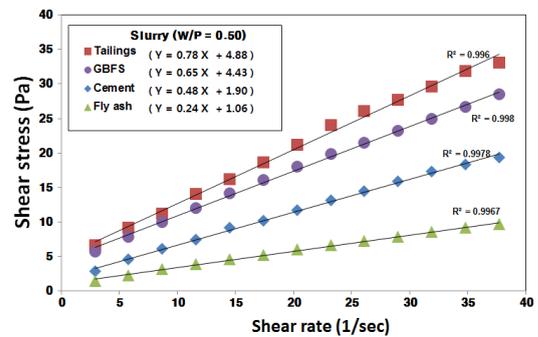


Fig. 6. Shear stress versus shear rate plots of different slurries.

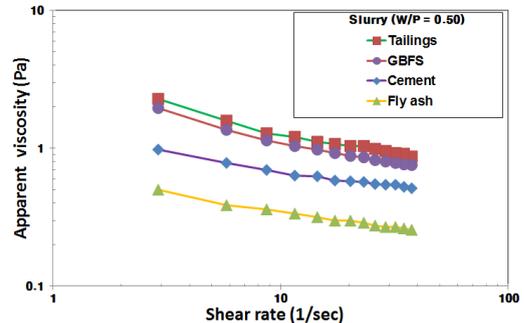


Fig. 7. Shear viscosity versus shear rate plots of different slurries.

Table 3. Rheological constant and fluidity of various powder slurries

Samples	Rheological constant		Fluidity	
	Yield stress(Pa)	Plastic viscosity(Pa·s)	Flow (mm)	Efflux time(s/100 ml)
Tailings	4.88	0.78	160	67
GBFS	4.43	0.65	168	58
Cement	1.90	0.48	190	31
Fly ash	1.06	0.24	220	24

리는 w/p비(슬러리 농도)에 상관없이 병행유체 거동을 보이고 있고 전단속도가 증가함에 따라 겔보기 점도는 감소하는 전단담화 유체성질을 나타낸다(Fig. 9). 이와 같은 유체거동은 입자간 상호작용에 의한 입자들의 응집력으로 설명될 수 있다. w/p비가 감소할수록 즉, 슬러리의 농도가 증가할수록 입자간의 결합이 강할수록 응집된 입자의 수는 증가하게 된다. 따라서 입자간 응집으로 인해 낮은 전단속도에서는 탄성적 성질이 우세하게 작용하여 유동이 발생하지 않으므로 항복응력을 갖게 된다. 그러나 항복응력 이상의 응력에서는 이들 응집 입자수는 감소하기 시작하며, 결과적으로 전단속도가 증가함에 따라 유동에 대한 저항력 감소로 인해 점도가 급격히 감소하는 전단담화 거동을 초래한다. 한편 슬러리 농도가 증가함에 따라 입자간 결합이 보다 강해지기 때문에 겔보기 점도는 증가되는 것으로 설명될 수 있다.

Fig. 10은 양양철광산 광미(TA)를 건식 분쇄한 시료의 슬러리에 대해 물/분쇄비(W/P) 0.60 그리고 측정온도는

25±1°C인 조건에서 측정된 전단응력-전단속도의 상관관계를 나타낸 그래프이다. 이때의 건식 분쇄조건은 세라믹 볼밀(1.5 L)을 사용하여 볼충전율 50 Vol%, 시료충전율은 볼충전율의 45 Vol% 그리고 임계회전수의 70%로 회전하여 분쇄하였다. 건식분쇄시료에 대한 분말도인 블레인값을 KSL 5106(공기투과장치에 의한 포틀랜드 시멘트 분말도시험 방법)에 따라 측정된 결과, 30분 분쇄시료(TA-30)의 블레인값은 2,848 cm²/g, 60분 분쇄시료(TA-60)는 3,065 cm²/g, 90분 분쇄시료(TA-90)는 3,225 cm²/g 그리고 120분 분쇄시료(TA-120)는 3,303 cm²/g이었다. 이처럼 광미 슬러리를 구성하는 입도가 미립화 될수록 비표면적이 증가하고 입자가 밀집화되므로서 그의 항복응력과 소성점도가 증가하였다. 이처럼 동일 광산의 선광장에서 발생하는 광미도 그의 입도분포에 따라 유변학적 특성이 달라지므로 광미 페이스트의 파이프라인 수송시 이에 대한 고려를 반드시 해야만 할 것이다.

Fig. 11은 각종 분체 슬러리의 온도에 따른 전단속도 제

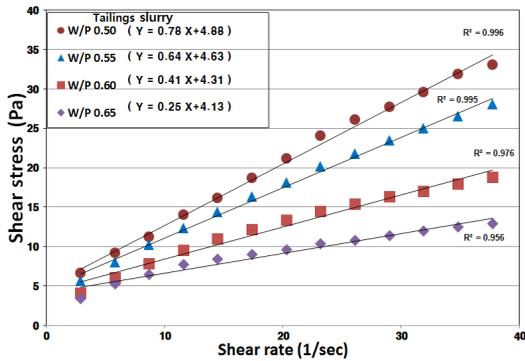


Fig. 8. Shear stress versus shear rate plots according to w/p ratio of tailings slurry.

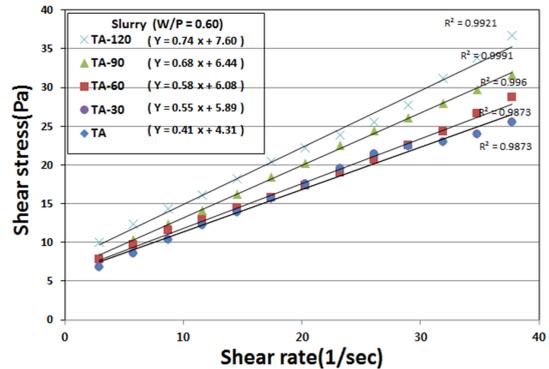


Fig. 10. Shear stress versus shear rate plots according to particle size of tailings slurry.

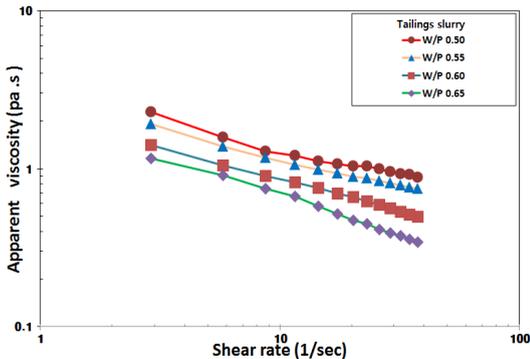


Fig. 9. Shear viscosity versus shear rate plots according to w/p ratio of tailings slurry.

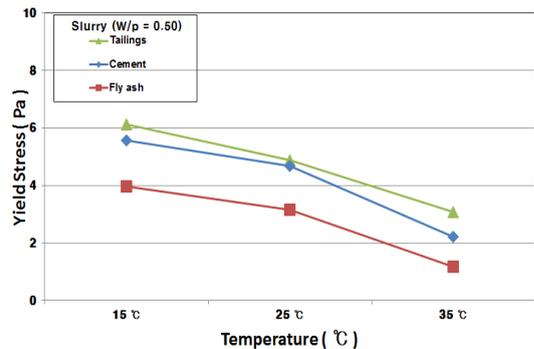


Fig. 11. Yield stress according to temperature of various powder slurries.

어를 통한 전단응력-전단속도의 상관관계를 측정하여 구한 항복응력값과 소성점도값을 나타낸 것이다. 이때의 측정조건은 물/분체비(W/P) 0.50이었다. 분체의 종류에 무관하게 슬러리의 온도가 증가함에 따라 항복응력과 소성점도가 감소하였다. 다성분계 광미 페이스트의 장거리 파이프라인 수송시 지열의 영향을 받아 페이스트의 온도가 상승될 가능성이 있으므로 이는 수송에 매우 좋은 영향을 끼칠 것이다.

Fig. 12는 광미-시멘트 2성분계 페이스트에서 광미 함유율에 따른 전단응력-전단속도의 상관관계를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 이때의 측정온도는 25±1°C이었다. 광미 페이스트는 광미 함유율에 무관하게 병행유체 거동을 보이고 있고 전단속도가 증가함에 따라 걸보기 점도는 감소하는 전단담화 유체성질을 나타낸다(Fig. 13). 2성분계(광미-시멘트) 페이스트에서 광미의 함유율이 증가함에 따라 항복응력과 소성점도가 증가하는 유변학적 특성을 보이고 있다. 다성분계 페이스트에서 그의 소성점도가 클수록 재료

분리 저항성이 우수하다고 알려져 있다(Ferraris *et al.*, 2001; Park *et al.*, 2004). 따라서 광미의 함유율이 증가함에 따라 광미-시멘트 페이스트의 이동속도와 이동거리가 감소하여 광미 페이스트의 원활한 수송을 위해서는 더 높은 압력이 요구되지만 재료분리 저항성은 우수해짐을 의미한다.

Fig. 14는 시멘트-플라이애쉬 2성분계 페이스트의 플라이애쉬 함유율에 따른 전단응력-전단속도의 상관관계를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 이때의 측정온도는 25±1°C이었다. 플라이애쉬 페이스트는 플라이애쉬 함유율에 무관하게 병행유체 거동을 보이고 있고 전단속도가 증가함에 따라 걸보기 점도는 감소하는 전단담화 유체성질을 나타낸다(Fig. 15). Fig. 15에서 알 수 있듯이 시멘트-플라이애쉬 2성분계 페이스트에서는 광미-시멘트 2성분계 페이스트의 유변학적 특성과는 반대로 플라이애쉬 함유율이 증가함에 따라 항복응력과 소성점도가 감소하는 유변학적 특성을 보이고 있다. 이는 플라이애쉬의 함유율이 증가함에 따라 시

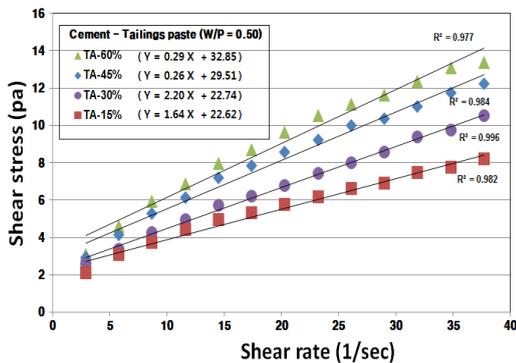


Fig. 12. Shear stress versus shear rate plots according to tailings ratio of cemented tailings paste.

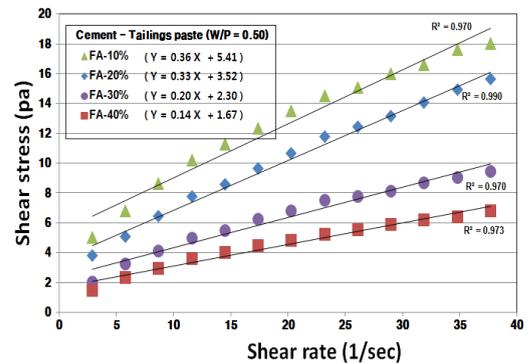


Fig. 14. Shear stress versus shear rate plots according to fly ash ratio of cemented fly ash paste.

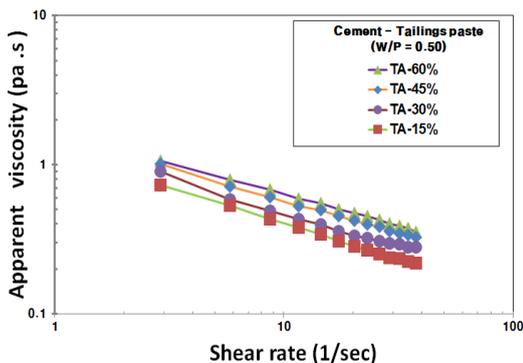


Fig. 13. Shear viscosity versus shear rate plots according to tailings ratio of cemented tailings paste.

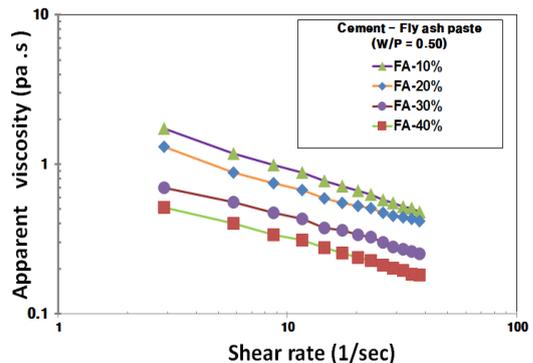


Fig. 15. Shear viscosity versus shear rate plots according to fly ash ratio of cemented fly ash paste.

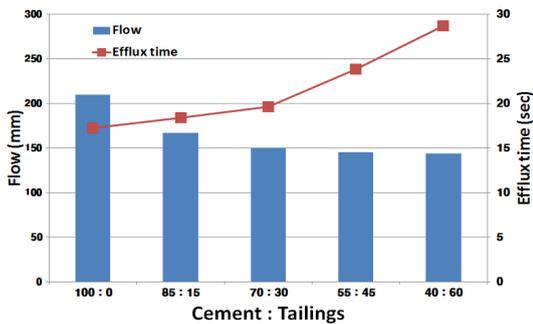


Fig. 16. Flow and efflux time of two powders paste system according to mixing ratio of cement and tailings.

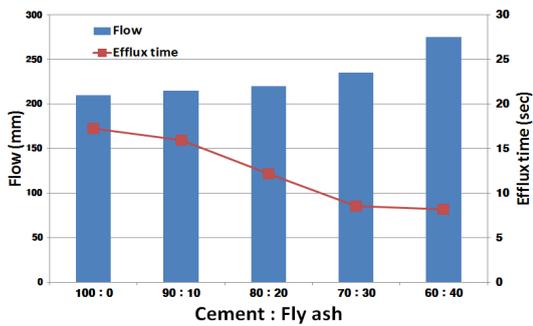


Fig. 17. Flow and efflux time of two powders paste system according to mixing ratio of cement and fly ash.

멘트-플라이애쉬 페이스트의 이동속도와 이동거리가 증가하나 재료분리 저항성은 약해짐을 의미한다(Ferraris *et al.*, 2001; Park *et al.*, 2004).

한편, 2성분계 페이스트의 유동성을 파악하기 위해 flow cone(Fig. 4)시험과 O-lot flow(Fig. 5)시험을 수행하였다. 이때의 측정조건은 물/분체비(W/P) 0.50 그리고 측정온도는 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 이었다. Fig. 16에서 알 수 있듯이 시멘트-광미 2 성분계 페이스트에서 시멘트 대비 광미의 치환율이 증가할수록 페이스트의 플로우값이 감소하였으나 유하시간은 증가하였다. 그리고 Fig. 17에서 알 수 있듯이 시멘트-플라이애쉬 2성분계 페이스트에서 시멘트 대비 플라이애쉬의 치환율이 증가할수록 페이스트의 플로우값은 증가하였으나 유하시간은 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 각종 분체 슬러리의 레올로지 시험 결과(Fig. 6)에서 예상하였듯이 이러한 플로우 결과와 유하시간이 나온 것은 광미와 플라이애쉬의 입자 형상 때문인 것으로 판단된다. 플라이애쉬의 입자는 구형(Fig. 18(a))이므로 flow값이 높게 나오는 반면에 광미의 형상은 각진 모양(Fig. 18(b))이어서 첨가량이 많아질수록 flow 값이 낮아지는 현상을 보이는 것이다. 플라이

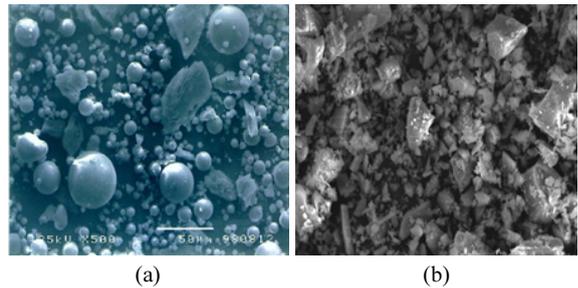


Fig. 18. SEM images of powder (a) fly ash (b) tailings.

애쉬의 함유율이 30% 이상에서 플로우값이 250 ± 20 mm 이 나오기는 하나 블리딩 현상이 나타났다. 이는 Fig. 13에서 알 수 있듯이 시멘트-플라이애쉬 2성분계 페이스트에서는 광미-시멘트 2성분계 페이스트의 유변학적 특성과는 반대로 플라이애쉬 함유율이 증가함에 따라 항복응력과 소성점도가 감소하는 유변학적 특성을 보이고 있다.

결론

양양철광산 선광 광미 슬러리의 유변학적 특성은 일정 전단응력 이상에서부터 흐름성을 나타내는 빙행유체 거동을 하며, 전단응력이 증가함에 따라 걸보기 점도는 감소하는 전단담화 현상을 나타내는 비뉴톤 유체이다. 빙행식으로 파악한 분체계 슬러리의 유변학적 상수인 소성점도와 항복응력은 이동속도인 유하시간에 비례하나 이동거리인 플로우값과는 반비례하였다. 이처럼 빙행식으로 파악한 분체계 슬러리의 레올로지 정수인 항복응력과 소성점도는 플라이애쉬 < 시멘트 < 고로슬래그미분말 < 광미 순으로 증가하고 있다. 이는 갱도 뒤채움용 4성분계(시멘트-플라이애쉬-고로슬래그분말-광미) 페이스트 제조시 그의 흐름성은 광미에 의해 가장 많은 영향을 받으며, 포졸란 특성이 있어 굳은 광미 페이스트의 장기 압축강도를 증진시키는 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말의 첨가는 굳지 않은 광미 페이스트의 흐름성을 향상시켜 지하 깊은 심도까지의 수송을 유리하게 만들 것이다.

사사

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)에서 지원하는 『철산화물기반 복합금속광상 확보를 위한 탐사기술 및 제철소 납품 가능 철광석 선광공정 기술개발』에 관한 일련의 에너지기술개발사업(과제번호 20152510101890)으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

Cihangir, F., Ercikdi, B., Kesimal, A., Turan, A. and Deveci, A., 2012, "Utilisation of alkali-activated blast furnace slag in paste backfill of high-sulphide mill tailings: Effect of binder type and dosage," *Minerals Engineering*, Vol. 30, pp. 33-43.

Coussot, P. and Piau, J.M., 1994. "On the behavior of fine mud suspensions". *Rheologica Acta*, Vol.33, pp. 175-184.

Coussot, P., Nguyen, G.D., Huynh, H.T., Bonn, D., 2002. "Viscosity bifurcation in thixotropic, yielding fluids". *Journal of Rheology*, Vol. 46, pp. 573-589.

Erdogan, S.T., Martys, N.S., Ferraris, C.F. and Fowler, D.W., 2008, "Influence of the shape and roughness of inclusions on the rheological properties of a cementitious suspension," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 30, Issue 5, pp. 393-402.

Fall, M., Benzaazoua M. and Ouellet S., 2005, "Experimental characterization of the influence of tailings fineness and density on the quality of cemented paste backfill," *Minerals Engineering*, Vol. 18, pp. 41-44.

Fall, M., Benzaazoua, M. and Saa, E.G., 2008, "Mix proportioning of underground cemented tailings backfill," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 23, pp. 80-90.

Ferraris C.F., Obla K.H. and Hill R., 2001, "The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 2, pp. 245-255.

Golder Associates, 1998, Paste technology for underground backfill and surface tailings disposal application, *Golder Associates*, Mississauga, Canada, pp. 1-12.

Grice, T., 2001, "Recent mine developments in Australia," *Proc. of international symposium on mining with backfill*, Seattle, USA, September 17-19, pp. 351-357.

Hwang H.J., Lee S.H. and Lee W.J., 2007, "Effect of particle size distribution of binder on the rheological properties of slag cement pastes," *J. of the Korean Ceramic Society*, Vol. 44, No. 1, pp. 6-11.

Imran J., Harff P. and Parker G., 2001, "A numerical model of submarine debris flow with graphical user interface," *Computers & Geosciences*, Vol. 27, pp. 717-729.

Jeong, S.W., Locat, J., Leroueil, S. and Malet, J.P., 2010. "Rheological properties of fine-grained sediments: the roles of texture and mineralogy". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.47, pp. 1085-1100.

Jeong S.W., 2014, "Rheological characteristics and debris flow simulation of waste materials," *J. Korean Soc. of Civil Engineers*, Vol. 34, No. 4, pp. 1227-1240.

Jung Y.W., 2008, "Mining Backfill Method and Application Case," *Mine Reclamation Technology*, Vol. 2, No. 1, pp. 20-28.

Lee H.W., Kim J.D., Yu S.K. and Kim T.H., 2013, "Property evaluation of tailings as the mining paste backfill material," *J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng.*, Vol. 50, No. 1, pp. 124-133.

Mindess S., Young J.F. and Darwin D., 2003, Concrete, Prentice Hall, New Jersey, pp. 93-114.

Park T.H., Noh M.Y. and Park C.K., 2004, "Characterization of rheology on the multi-ingredients paste systems mixed with mineral admixtures," *J. of the Korea Concrete Institute*, Vol. 16, No. 2, pp. 241-248.

Potvin, Y., Thomas, E. and Fourie, A., 2005, *Handbook on mine fill*, ACG, Nedlans, Australia, pp. 1-179.

Song J.T., Park H.S., Byun S.H. and Yoo D.W., 2008, "Rheological properties of cement paste blended blast furnace slag of fly ash powder," *J. of the Korean Ceramic Society*, Vol. 45, No. 6, pp. 336-344.

Song, W.K., Min, J.S., Sun, W.C., Shin, J. H., Lee, D.K., Lim, K.J., Jeon, Y.S., Jung, Y.W., Jung, Y.B., Ji, S.W., Han, K.C., Kwon, H.H., Kim, T.H., Shim, Y.S., Lee, J.S., Jung, M.C. and Cho, W.J., 2007, "A Study on Treatment Sangdong Tailings Yard Permanent," *MIRECO Technology Book 2007-48* pp. 137-215.

Tattersall, G.H. and Banfill, P.F.G., 1983, The Rheology of Fresh Concrete, Pitman Advanced Publishing Program, p. 356.

Wang, A., Zhang, C. and Sun, W., 2003, "Fly ash effects : 1. The morphological effect of fly ash," *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 2023-2029.

Wu, D., Fall M. and Chi S.J., 2013, "Coupling temperature, cement hydration and rheological behaviour of fresh cemented paste backfill," *Minerals Engineering*, Vol. 42, pp. 76-87.

Yilmaz, E., Belem, T., Bussière, B., Mbonimpa, M. and Benzaazoua, M., 2015, "Curing time effect on consolidation behaviour of cemented paste backfill containing different cement types and contents," *Construction and Building Materials*, Vol. 75, pp. 99-111.

정 문 영

현재 세명대학교 바이오환경공학과 교수
(本 學 會 誌 第53卷 第3号 參照)

안 용 현

현재 세명대학교 바이오환경공학과 연구원
(本 學 會 誌 第52卷 第1号 參照)