J. Korean Ind. Eng. Chem., Vol. 20, No. 6, December 2009, 685-691

단일 및 혼합 용매계 실리카 분산체의 점도 특성 및 유변학적 거동

안재범 · 노시태†

한양대학교 공학대학 재료화학공학부 화학공학과
(2009년 10월 9일 접수, 2009년 10월 15일 채택)

The Rheology of the Silica Dispersion System with Single and Mixed Solvent

Jae-Beom Ahn and Si-Tae Noh†

Department of Chemical Engineering, College of Engineering Sciences, Hanyang University, Gyeonggi-do 426-791, Korea
(Received October 9, 2009; accepted October 15, 2009)

하이드록시기 유무, 극성도, 분자 크기가 서로 다른 용매 6종의 단일 용매 또는 혼합 용매계 흄드 실리카 분산체를 제조하고 각 분산체의 점도 및 유변학적 거동을 용매계의 특성의 관점에서 고찰하였다. 하이드록시기 포함 용매에 실리카를 분산하였을 때 안정적이고 저점도의 sol을 형성하였고 하이드록시기가 없고 비극성인 용매는 고점도의 gel을 형성하였다. 비극성 용매계 실리카 분산체에 하이드록시기 함유 용매를 첨가하면 일정 함량까지는 점도 감소 현상을 관찰할 수 있었으며, 더 이상의 점도 변화가 발생하지 않는 최소 임계함량이 있었다. 최소 임계함량은 하이드록시기 미포함 용매의 극성도가 클수록 줄어들었다. 하이드록시기 포함 용매계 실리카 분산체가 안정적인 저점도의 sol을 형성하는데 이는 실리카 표면의 실란올기와 용매의 하이드록시기간의 수소결합을 통한 용매화로 저점도 sol을 형성하는 것으로 볼 수 있다. 비극성용매에 실리카를 분산하였을 때는 실리카 표면의 실란올기 사이의 수소 결합을 통해 응집이 일어나 고점도의 gel이 형성되었다.

Dispersions of fumed silica are made in 6 kinds of mono-solvents and mixed solvents which have hydroxyl group, non hydroxyl group, different polarity, and different molecular size. The viscosity and rheology behaviors of the each dispersion are investigated according to the viewpoint of solvent characteristic. The silica dispersion in polar solvent with hydroxyl group is stable and low viscous sol. The silica dispersion in non-polar solvent with non-hydroxyl group is high viscous gel. When the solvent with hydroxyl group is added to the silica dispersions with non-polar solvents, they show the reduction of viscosity with solvent content. They have minimum critical content which shows no viscosity change. The minimum critical solvent content is decreased according to the polarity of solvents with no hydroxyl group. The solvation layer which is formed on the silica surface through hydrogen bonding between hydroxyl-containing solvent and the silanol group of silica surface is the reason of stable and low viscous sol. In case of non-polar solvent, silanol on adjacent silica particles interacted directly by hydrogen bonding show high viscous and flocculated gel.

***Keywords**: silica, silica dispersion, rheology, hydrogen bonding, solvation effect*

1. 서　　론

현탁액 또는 액체상의 입자 분산계는 연속상인 용매에 용질의 분산상이 존재하는 것을 말하며 도료, 잉크, 시멘트, 음식, 화장품에서부터 nanocomposite와 같은 신종 물질에 이르는 범위의 매우 다양한 형태로 존재한다. 다양한 콜로이달 입자 중에서도 여러 형태의 실리카(SiO_2)가 가장 많이 사용된다고 볼 수 있다. 이 영역은 유변학 창설의 직접적 요인이 된 콜로이드 화학에 그 기원을 두고 있으며 매우 복잡한 유변학적 성질을 나타내기도 한다[1]. 그 중에서도 본 연구에 사용할 실리카는 흄드 실리카로서 도료분야에서 소광제, 증점제, 최근에는 UV코팅제의 강도나 스크래치와 같은 물성 강화 목적으로 사용되고 있다[2]. 흄드 실리카 표면의 실란올기(Si-OH)은 비록 약산성이고 반응성이 낮다고 하나 chlorosilane, akoxysilane, silazane, siloxane, isocyanate로 처리하는 것이 가능하다고 많은 보고가 있었다. 이렇게 처리된 후에는 다른 유기물을 반응시켜 유, 무기 hybrid 재료로서 이용이 가능하다[3].

흄드 실리카는 $SiCl_4$의 열가수분해를 통해 얻어진 무정형의 공극이 없는 실리카이다. 흄드 실리카의 1차 입자는 SiO_2의 구형 입자가 융합하여 형성된 분지화된 집합(branched aggregate)로 구성되어 있다. 이러한 복잡한 집합구조의 결과로 실리카는 높은 표면적(> 100 m^2/g)을 나타낸다. 흄드 실리카의 표면구조는 표면의 하이드록시기에 의해 친수성을 나타낸다. 비극성 용매에 분산되었을 때 실리카 집합구조는 실리카 표면의 하이드록시기와 수소 결합을 할 수 있다. 이것은 floc이라 불리는 좀 더 큰 구조가 될 수 있으며, 3차원 망상구조를 형성할 수 있다. 이러한 구조는 점도 상승을 가져오며 gel과 같은 거동을 할 수 있다. 그러나 용매가 극성이면 그것의 분자들은 silica aggregate 표면의 하이드록시기와 수소 결합을 우선적으로 할 수 있다[4].

실리카 분산체에 관한 기본적인 연구는 1920년대에 수행되기 시작

† 교신저자 (e-mail: stnoh@hanyang.ac.kr)

했으며 대부분이 물에 대해 분산된 분산체에 관한 것이다[5-7]. 그러나 현재에는 전하 안정화의 DLVO 이론(Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek theory)은 물에 분산된 실리카 sol에서 관찰되는 모든 거동은 설명할 수 없다는 것은 잘 알려진 사실이다. 수용성 계보다 매우 적은 연구가 수행 되었지만, 유기 용제에서 실리카의 거동은 수 십 년 전부터 조사되기 시작하였다. 30년 전에 Benitez 등은 친수성 흄드 실리카가 메탄올, 에탄올, 아세톤, 다이옥산 등에 안정적인 분산체를 형성한다고 발표하였다[8]. 또한 stober법으로 제조된 실리카 입자에 대하여도 유사한 결과인 안정한 분산체가 형성된다고 알려졌다[9,10].

실리카 sol의 특이한 안정성은 실리카 표면 사이의 근거리 범위 반발력과 서로 상관관계가 있다. 이것은 표면력 측정을 통해 알 수 있으며 이러한 반발력은 주로 수용액에 대해서 연구되었다[11]. 비록 최근에는 몇 가지 극성 유기 용매에 대한 보고[12]가 있기는 하지만 근거리 범위 반발력의 근원에 대해서는 여전히 논란의 대상이다. 용매의 고정된 표면층(용매화 또는 수화층)이 용매 분자와 실리카의 실란올 그룹 사이의 수소 결합을 통하여 실리카 표면에 형성된다고 기본적으로 알려져 있다. 그리고 이러한 층들이 관찰된 반발력에 기인한다고 알려져 있다[11,13].

실리카(특히 흄드 실리카)는 유기물의 점도를 증진시키는 능력이 있다. 이것은 안정성과 반대의 개념으로 이해할 수 있으며 흄드 실리카의 많은 응용은 그것의 증점이나 겔화시키는 변수는 안정성을 이해하는 것만큼이나 중요하다. 본 연구에서는 실리카 분산체의 유변학적 물성을 흐름장 하에서 미세구조의 변화와 관련하여 분석하였다. 실리카 분산체에 대한 진동스펙트럼(즉, 진동에 따른 저장탄성률(G′)과 손실탄성률(G″)의 변화)은 계에 존재하는 미세구조를 증명할 수 있다[14].

실리카 분산체의 동적거동을 사용하면 분산체의 근원적인 구조를 붕괴시키지 않고 미세구조에 대해 정상전단흐름에 비해 보다 정확한 상관관계를 제공받을 수 있다[15].

도료 및 코팅재료의 물성 향상 및 다양한 기능을 부여하기 위하여 나노 입자를 이용한 유·무기 하이브리드에 관한 연구들이 많이 진행되고 있고 여러 산업 분야에 적용되고 있다. 나노 입자를 고분자 matrix 내에 균일하게 분산시키거나 용매에 분산하여 코팅재에 혼용하여 사용하기 위하여 수 나노미터에서 수 마이크론의 비드를 이용한 ball mill이나 해외의 분산제 전문 업체의 분산제를 이용한 분산 방법의 연구는 많이 진행되어 오고 있다. 그러나 나노 입자(특히 실리카의 경우)를 이용하여 코팅재나 도료를 제조할 시 발생되는 점도의 상승 및 점도의 하강을 유변학적 측면에서의 연구는 많이 부족한 실정이다. 최근 실리카 분산체의 거동을 분산매의 관점에서 해석하려는 시도가 여러 연구진들에 의해 진행되고 있으나 단일 분산매에 관한 연구가 주로 이루어지고 있으며[14,15], 좀 더 다양한 관점에서 분산매 환경을 변화시킨 실리카 분산체에 거동에 관한 연구가 필요하다. 본 연구는 흄드 실리카를 흄드 실리카의 실란올기와 수소 결합이 가능한 하이드록시기 유무, 분자량 및 극성이 다른 용매를 단독 또는 혼합 분산하였을 때의 유변학적 거동을 연구하였다.

2. 실 험

2.1. 물질

흄드 실리카는 Aerosil 200 (Si ; Evonik Degussa corporation)을 사용하였다. 이것은 친수성 실리카로서 BET 표면적이 200 ± 25 m^2/g이며 1차 구형 입자(primary spherical particle)는 12 nm, 약 2.5 [SiOH] group/nm^2 또는 0.84 mmol/g^3의 당량 특성을 가진다. Si는 120 ℃ 진공 oven에서 24 h 동안 건조하여 수분을 제거한 후 사용하였다. 실리카 분산체를 제조하기 위해 사용된 용매는 Butyl Cellosolve (BC, 대정화금), Butyl Acetate (BA, 대정화금), Isopropyl Alcohol (IP, 대정화금), Ethyl Acetate (EA, 대정화금), Isobutyl Isobutylate (IB, Eastman 社), Toluene (T, 대정화금)을 4 Å 분자체에서 24 h 동안 보관 수분 제거 후 사용하였다.

Table 1에 본 연구에 사용된 용매의 구조 및 특성을 표시하였다.

2.2. 실리카 분산체의 제조

본 연구에서는 실리카 입자를 2단계 방법을 사용하여 분산체를 만들었다. 분산하고자 하는 용매에 Si를 비산먼지 형성을 최소화하면서 투입하고 dissolver를 이용하여 저속 교반으로 예비 분산을 시킨다. 그 다음은 냉각 자켓이 달린 beads mill을 사용하여 5000 rpm에서 20 min 동안 분산하였다. 이때 사용된 bead는 1 mm zirconia bead를 사용하였다. 분산도는 grindometer를 이용하여 그 측정값이 5 μm을 넘지 않도록 하여 분산을 종료하였다.

시료의 표시는 용매성분 A A의 함량 용매성분 B B의 함량-Si 실리카 함량의 의미로 AxBy-Siz의 형태로 나타냈다. 실리카 분산체 제조는 실리카 포함 총량을 항상 100으로 조정하였다.

2.3. 측정

실리카분산체의 분산은 beads mill형태인 BYK Gardener사의 Dispermat CV을 사용하였고 직경이 1 mm인 Yttria-stabilized zirconia bead를 사용하였다. 실리카 분산체의 점도 거동은 Brookfield LVDV-Ⅱ+Pro를 사용하여 25 ℃에서 분산 직후 측정하였다.

실리카 분산체의 유변학적 거동을 조사하기 위하여 TA instrument 사의 TA-AR-2000를 이용하여 전단속도에 따른 전단점도의 거동인 정상전단흐름을 조사하고, ARES (Advanced Rheometric Expansion System)기능을 사용하여 주기적 진동흐름 하에서 동적 거동을 조사하였다. 모든 시험은 peltier plate를 사용하여 25 ℃에서 측정하였다. 실리카 분산체의 점도에 따라 두 종류의 cone and plate geometry를 사용하였다. 저 점도에서는 직경이 60 mm이고 cone angle이 1°인 큰 fixture를 사용하였고 고 점도에서는 직경이 40 mm이며 cone angle이 2°인 작은 fixture를 사용하였다. 정상전단흐름은 전단속도(s^{-1})의 범위를 $10^{-1} \sim 10^3$으로 하여 측정하였다. 동적거동은 전단변형률값을 1로 고정하고 진동을 $10^{-1} \sim 10^2$로 증가시키면서 저장탄성률(G′)과 손실탄성률(G″)을 측정하였다. 동적거동을 측정하기 전에 1 s^{-1}에서 60 s간 먼저 전단력을 주었고 120 s 동안 정치시켰다. 이러한 공정은 시료에 존재하는 전단 이력을 제거하기 위해 필요하며 시료가 평형 상태가 되게 한다[16].

3. 결과 및 토론

3.1. 단일 용매계의 유변학적 거동

Figure 1은 단일 용매계에서 실리카 함량에 따른 실리카 분산체의 점도 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 하이드록시기를 가진 IP 및 BC의 경우 실리카 함량이 4 wt%일 때는 9.24 cps, 12.3 cps, 6 wt%일 때는 11.2 cps, 15.7 cps, 8 wt%일 때는 13.9 cps, 19.7 cps를 각각 나타내며 실리카 함량이 증가되어도 점도 변화는 거의 없다는 것을 알 수 있다. 하이드록시기를 포함하지 않은 용매의 경우 EA는 실리카 함량이 4 wt%, 6 wt%, 및 8 wt%로 증가함에 따라 29.2 cps, 670 cps, 2280 cps로 급격한 점도 상승을 나타내며 BA의 경우도 7.29 cps, 11.5 cps,

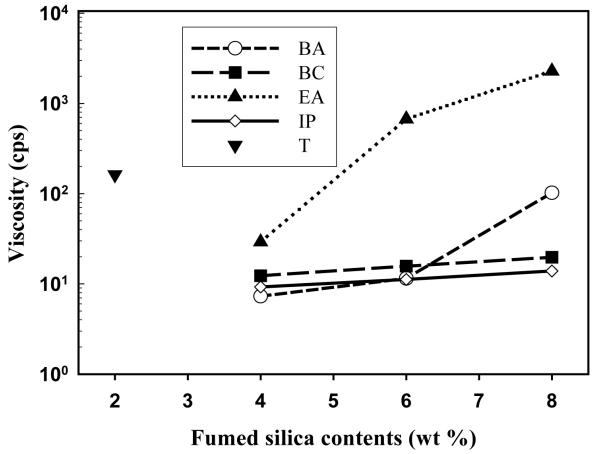

Figure 1. Log scale viscosity of silica dispersions with various solvent and different fumed silica contents.

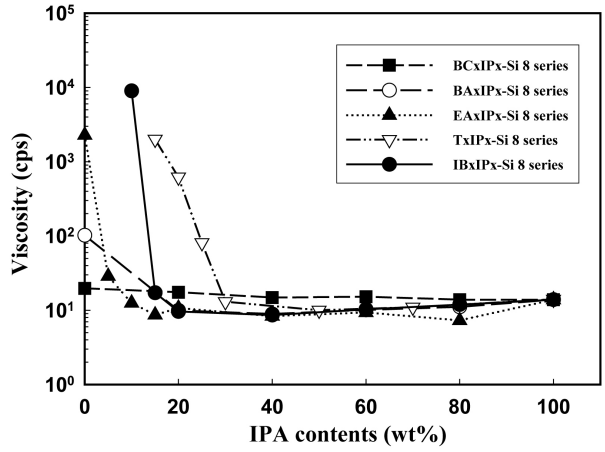

Figure 2. Log scale viscosity of silica dispersions with mixed solvent system as a function of IPA contents.

102 cps의 점도 상승을 나타내었다. 또한 T의 경우는 실리카 함량이 2 wt%일 때 162 cps의 점도를 나타냈으며, 그 이상 함량이 되면 유동상이 형성되지 않아 분산과 점도 측정이 어려웠다. 하이드록시기 유무가 실리카 분산체의 점도거동에 영향을 준다는 것을 알 수 있었으며 이러한 현상은 Khan 등이 제시한 용매화 효과로 설명이 가능하다. 그들은 실리카 분산체의 sol과 gel의 구분은 분산매의 수소 결합 능력이라고 밝혔다. 그들의 연구 결과에 따르면 흄드 실리카 입자는 수소결합을 할 수 있는 용매 내에서는 안정한 sol을 형성하고 반대로 수소결합 능력이 낮은 용매 내에서는 실리카 표면의 실란올기 사이의 수소결합에 의한 망상구조의 gel을 형성한다. 용매 분자가 실리카 표면의 실란올기와 수소 결합을 형성함으로써 용매 분자가 실리카 분자 표면에 배열을 하게 된다. 이것으로 실리카 입자를 코팅하는 용매화층을 만든다. 이 용매화층 내부에서 용매 분자의 강한 결합력은 입자가 서로 접촉하는 것을 막는 근거리 반발력을 나타낼 수 있다. 그러나 수소 결합 능력이 적은 용매의 경우는 콜로이드 실리카 gel을 형성하는데 용매 분자와 실리카 표면의 친화력이 좋지 않아 실리카 입자 표면의 실란올 그룹간의 직접적인 수소 결합을 통하여 gel이 형성된다[17]. 그리고 BC의 경우 IP보다 높은 점도를 나타내는 것은 분산 후에 실리카 입자를 둘러 싸고 있는 용매의 분자량 차이라고 볼 수 있다. 즉 분자량이 큰 BC의 경우가 IP에 비해 더 높은 점도를 나타낸다. Korn 등은 흄드 실리카에 대해 다양한 유기물질의 흡착에 대해 연구하였다. 그들의 결과에 따르면 n-alkanol은 실리카에 대하여 수소 결합 주개로 작용하여 실리카 표면에 강하게 흡착을 하게 된다. 이러한 흡착 경향은 n-alkanol 사슬 길이가 증가됨에 따라 줄어든다고 하였다[18]. 이러한 결과는 사슬이 긴 BC가 IP에 비해 점도가 높아지는 결과와 일치하는 결과이다. 하이드록시기가 없는 용매인 T, EA, BA의 경우는 그 용매의 극성을 차이로 실리카 분산체의 점도를 설명할 수 있다[19].

3.2. 혼합 용매계의 유변학적 거동

Figure 2는 본 연구에서 사용된 용매중에서 δ_h가 가장 큰 용매인 IP와 여러 용매를 함량을 변화시키면서 혼합한 후에 실리카 함량은 8 wt%로 고정 분산한 실리카 분산체의 점도 변화를 나타낸 것이다. BC과 IP 혼합 용매를 사용하여 실리카를 분산을 하였을 경우에는 IP함량에 따라 점도가 13~20 cps로 변화가 없었다. EA의 경우에는 IP가 10 wt% 이상 혼합되었을 때 IB의 경우에는 IP가 15 wt% 이상, T의 경우 IP가 30 wt% 이상 혼합 되었을 경우 점도가 IP 단독 점도인 15 cps로 일정해 짐을 알 수 있다. Table 1의 용매의 극성치인 δ_P가 커짐에 따라 IP 혼합 시 점도가 낮고 안정한 sol의 형태가 된다. 용매를 혼합하였을 경우에도 앞에서 설명한 δ_h가 크고 하이드록시기를 함유한 용매인 IP가 먼저 실리카 입자에 용매화 효과를 부여하여 실리카 분산체가 안정화 된다는 것을 알 수 있었다. 일반적으로 흄드 실리카는 도료 및 코팅재에서 증점효과를 주거나 소광효과, 최근에는 디스플레이 산업에서 광학적 성질을 부여하기 위해 많이 사용되고 있다. 그러나 실리카의 함량을 높이거나 잘못된 용매 선택으로 과도하게 점도가 올라가 제조 및 응용에 제한을 받는 경우가 많다. 위의 결과를 이용하여 단순히 용매의 극성을 조절하더라도 실리카의 표면 개질과 같은 방법을 사용하지 않고 사용 점도를 용이 조절할 수 있다. 이러한 점도 변화 결과를 토대로 IP와 T, IB, EA를 각각 혼합하여 제조한 실리카 분산체의 유변학적 거동을 측정해 보았다.

Figure 3는 δ_P가 0.7인 T와 IP 혼합 용매를 사용한 실리카 분산체 TxIPx-Si 8계의 전단속도에 따른 전단 점도의 거동을 나타낸 것이다. Figure 4는 TxIPx-Si 8계의 주기적 진동흐름 하에서의 동적 거동을 나타낸 것이다. 즉, IP함량이 증가함에 따라 본 연구에서 사용된 모든 용제가 뉴톤 흐름의 거동을 나타내는 용매임에도 불구하고 낮은 전단속도에서 높은 점도를 높은 전단속도에서 낮은 점도를 나타내는 전단담화 현상을 보인다. 그러나 IP함량이 30 wt%가 되면 전단 속도가 10 s^{-1}이 되는 지점부터는 전단속도와 높은 전단속도의 차이가 없는 뉴톤 흐름의 거동을 나타내고 있다. 이는 Figure 2에서 나타나는 결과와 유사한 경향을 나타낸다.

Figure 4는 실리카 분산체 TxIPx-Si 8계의 저장탄성률(G′)과 손실탄성률(G″)을 진동에 따라 나타낸 것이다. (a)에서 (c)로 갈수록, 즉 T와 IP의 혼합 용매 계에서 IP의 함량이 늘어날수록 전체적인 탄성률은 진동에 따라 독립적으로 움직이며 10^3 Pa에서 10 Pa로 낮아지고 저장탄성률(G′)이 손실탄성률(G″)보다 높은 gel과 같은 동적 거동을 나타낸다. 그리고 IP함량이 가장 높은 (d)의 그래프는 진동에 따라 탄성률이 증가하며 손실탄성률(G″)이 저장탄성률(G′)보다 높은 sol 형태의 동적 거동을 나타낸다. IP함량이 낮은 경우는 실리카 표면의 실란올기 사이의 수소 결합이 먼저 일어나 3차원 망상구조가 만들어져서 나타나는 현상이다. 이러한 gel은 전단력을 주면 점도가 낮아지고 전단력을 주

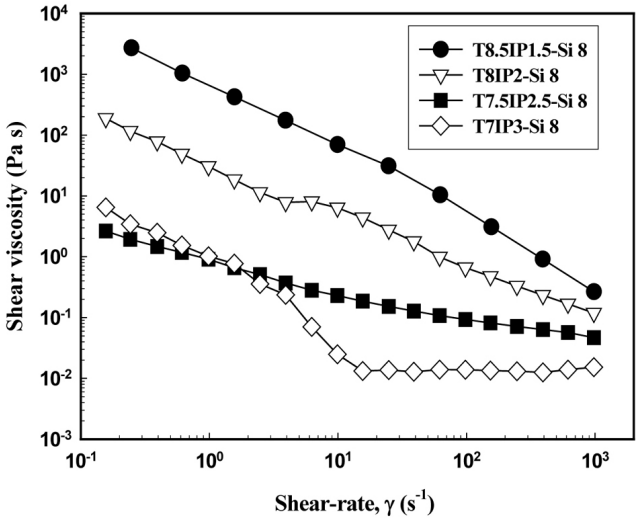

Figure 3. Shear viscosity as a function of the shear rate for TxIPx-Si 8series.

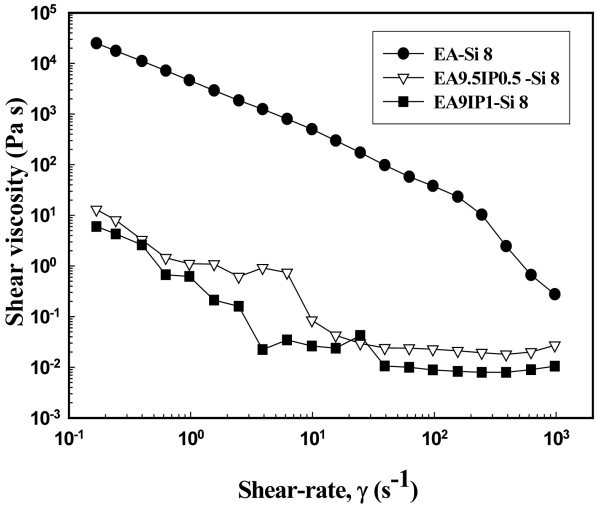

Figure 5. Shear viscosity as a function of the shear rate for EAxIPx-Si 8series.

지 않으면 점도가 상승하는 상태를 의미한다[1]. 그러나 IP함량이 높아질수록 손실탄성률이 높은 점성거동을 나타내는 실리카간의 3차원 망상구조가 형성되지 않는 IP용매에 의한 안정한 sol의 거동을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 이것은 점도거동 및 정상전단흐름 결과에서도 동일한 결과를 나타내고 있으며 IP 함량이 높아져 25 wt%되면 저장탄성률과 손실탄성률이 유사한 거동을 나타내다 IP 함량이 30 wt%이상이 되면 손실탄성률(G″)이 저장탄성률(G″)보다 높아지는 안정한 sol의 거동을 나타내는 것을 의미한다.

Figure 5은 δ_P가 2.6인 EA와 IP 혼합 용매를 사용한 실리카 분산체 EAxIPx-Si 8계의 전단속도에 따른 전단 점도의 거동을 나타낸 것이다. Figure 6은 EAxIPx-Si8계의 주기적 진동흐름 하에서 실리카 분산체의 동적 거동을 나타낸 것이다. Figure 5에서 IP함량이 10 wt%인 EA9IP1-Si8은 전단속도가 3.5 s^{-1}되는 시점부터 점도가 일정해지는 뉴톤 흐름의 거동을 보여주고 있으며 gel의 형태에서 sol의 형태로 전환

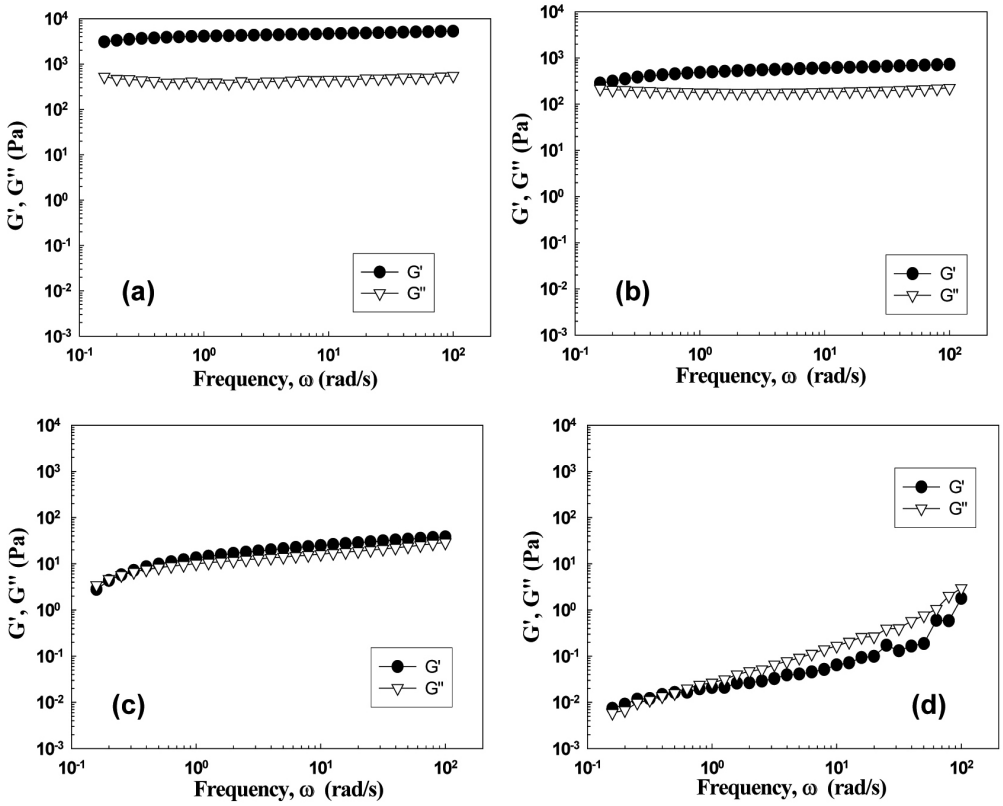

Figure 4. Elastic (G′) and viscous (G″) moduli as function of the frequency for TxIPx-Si 8 dispersion series : (a) T8.5IP1.5-Si 8 dispersion, (b) T8IP2-Si 8 dispersion, (c) T7.5IP2.5-Si 8 dispersion, (d) T7IP3-Si 8 dispersion.

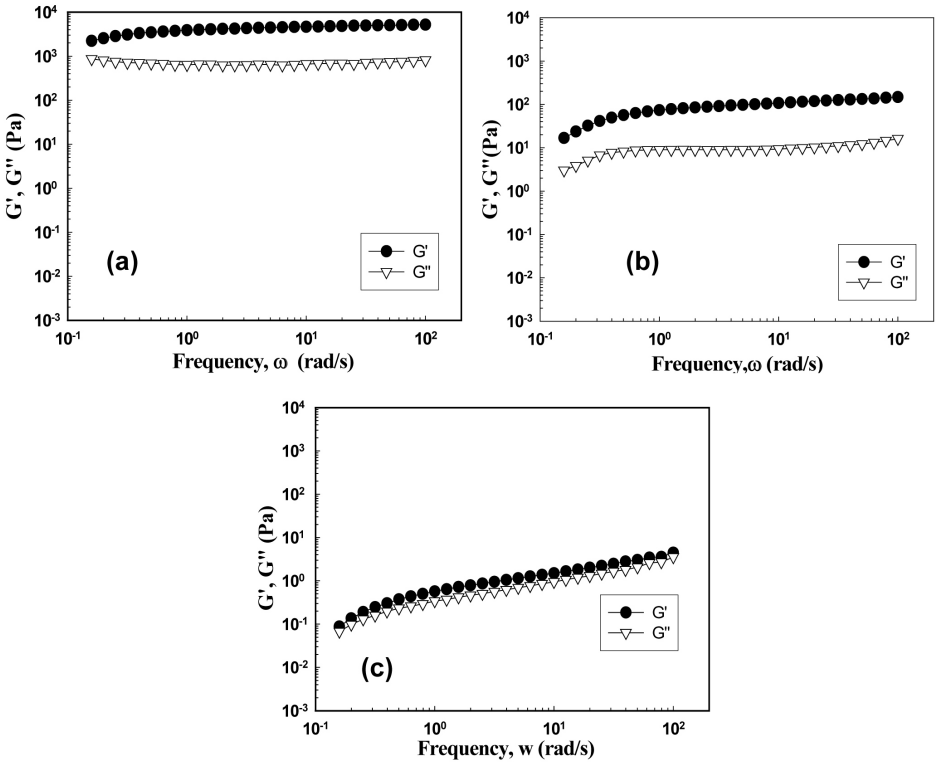

Figure 6. Elastic (G′) and viscous (G″) moduli as function of the frequency for EA-Si 8 dispersion: (a) EA-Si 8 dispersion, (b) EA9.5IP1.5-Si 8 dispersion, (c) EA9IP1-Si 8 dispersion.

Table 1. Characteristics of Solvents Used in this Study

Chemical description of solvent	Abbreviation	Hansen solubility parameters $(cal/cm^2)^{1/2}$				Molecular structure	Molecular weight
		Total (δ)	Non-polar (δ_d)	Polar (δ_p)	Hydrogen bonding (δ_h)		
Isopropyl alcohol	IP	11.5	7.7	3.0	8.0	$(CH_3)_2CHOH$	60.1
Butyl cellosolve	BC	10.2	7.8	2.5	6.0	$CH_3(CH_2)_3OCH_2CH_2OH$	118.2
Ethyl acetate	EA	8.8	7.7	2.6	3.5	$CH_3COOC_2H_5$	88.11
Butyl acetate	BA	8.5	7.7	1.8	3.1	$CH_3COOC_4H_9$	116.16
Isobutyl isobutylate	IB	8.1	7.4	1.4	2.9	$(CH_3)_2CHCOOCH_2(CH_3)_2$	144.22
Toluene	T	8.9	8.8	0.7	1.0	$C_6H_5CH_3$	92.13

된다는 것을 알 수 있다. 이것은 T과 EA의 극성 차이에서 오는 것이라고 판단되며 Table 1의 δ_P를 비교해보면 EA가 T보다 3배나 높은 극성을 가지고 있다. 동적 거동의 결과도 유사한 것을 알 수 있다. 즉 IP함량이 늘어남에 따라 탄성률이 낮아지다가 EA9IP1-Si8부터는 진동에 탄성률이 의존하는 sol의 형태를 나타낸다. 점도거동, 정상전단 흐름 거동, 진동에 따른 탄성률의 결과가 일치되는 것을 결과를 나타낸다.

Figure 7은 T (δ_P; 0.7)과 EA (δ_P; 2.6)의 중간 정도의 δ_P를 가지는 IB (δ_P; 1.4)와 IP와 혼합 용매를 사용한 실리카 분산체의 전단속도에 따른 전단 점도 거동을 나타낸 것이다. IP함량이 20 wt%까지 늘어남에 따라 전단 속도에 따라 전단 점도가 낮아지는 전단 담화 현상을 나타내다. 특히 IB8IP2-Si 8의 경우 전단 속도가 25 s^{-1} 이상이 되면서부터 전단 점도가 일정해지는 경향이 나타나고 IP 함량이 그 이상으로 늘어나는 IB6IP4-Si8부터는 전단점도가 0.01 (Pa s)로 일정한 뉴

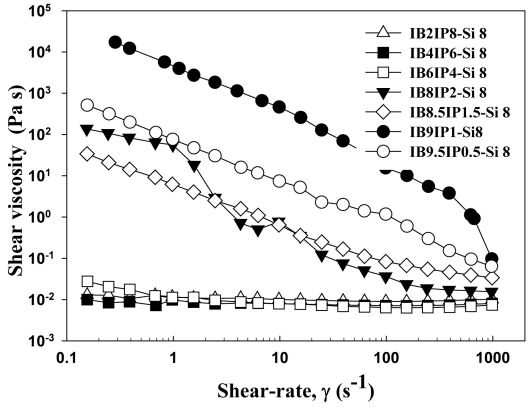

Figure 7. Shear viscosity as a function of the shear rate for IBxIPx-Si 8series.

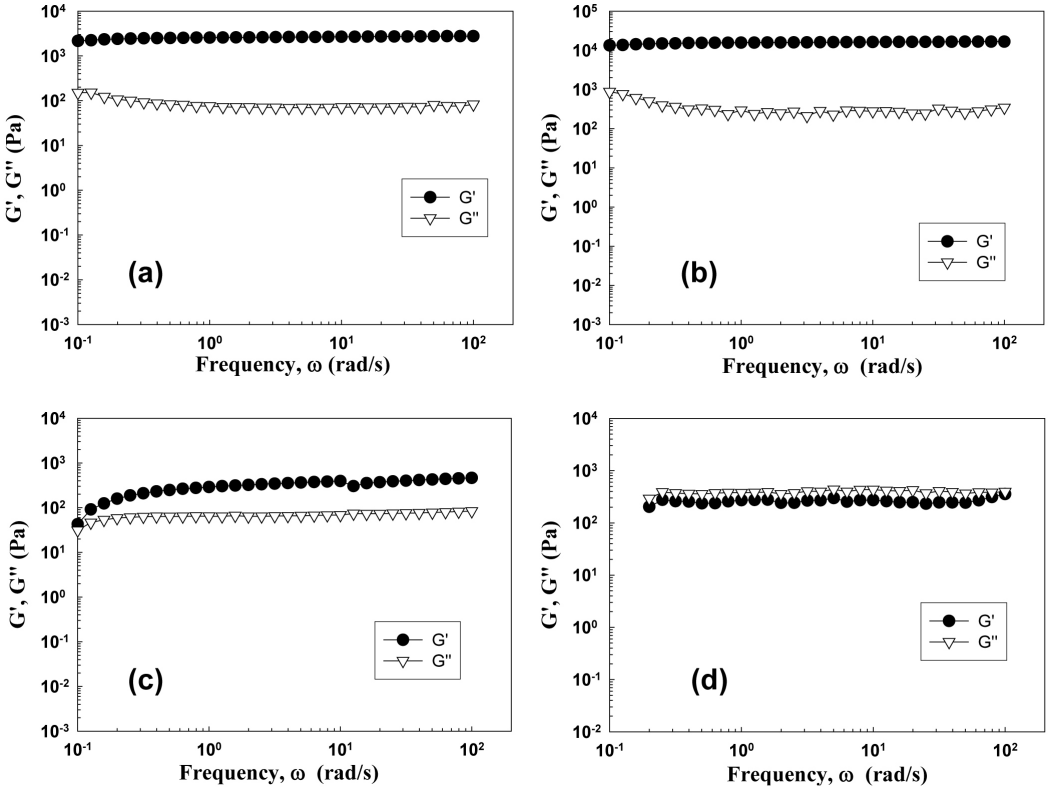

Figure 8. Elastic (G′) and viscous (G″) moduli as function of the frequency for IBxIPy-Si 8 dispersions: (a) IB9.5IP0.5-Si 8 dispersion, (b) IB9IP1-Si 8 dispersion, (c) IB8.5IP1.5-Si 8 dispersion, (d) IB8IP2-Si 8 dispersion.

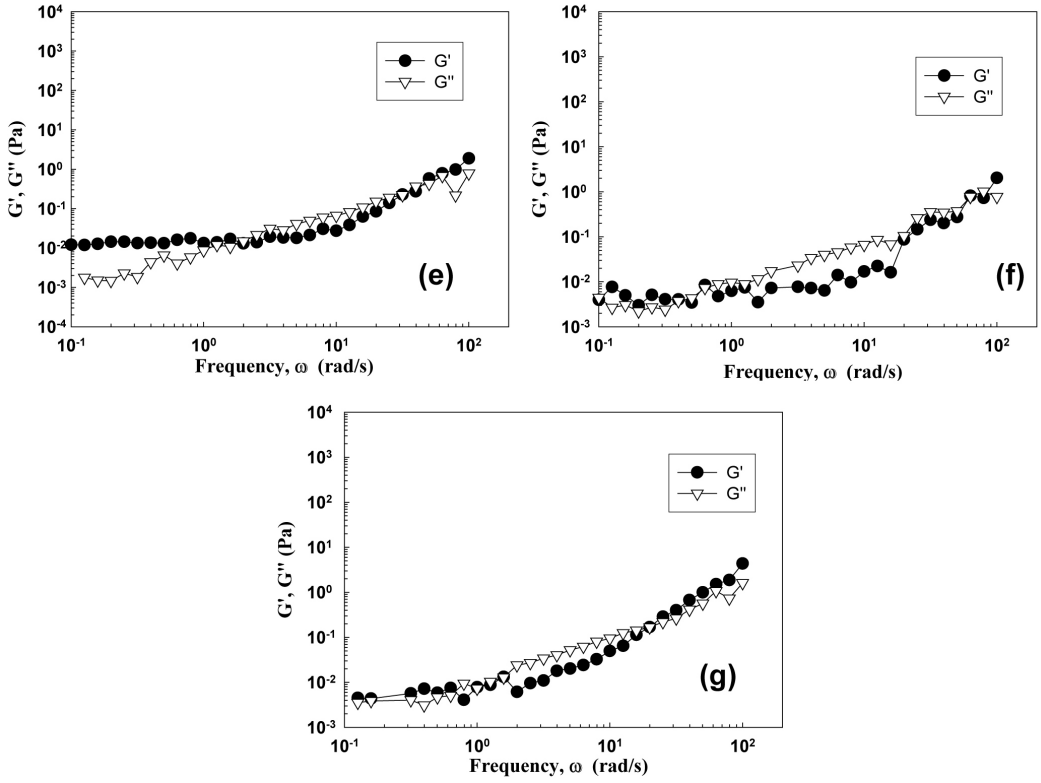

Figure 9. Elastic (G′) and viscous (G″) moduli as function of the frequency for IBxxIPyy-Si 8 dispersions: (e) IB6IP4-Si 8 dispersion, (f) IB4IP6-Si 8 dispersion, (g) IB2IP8-Si 8 dispersion.

톤 흐름의 거동을 나타내기 시작한다. 이 결과는 용매의 극성 차이인 δ_P의 경향과 일치하는 결과를 나타낸다. 즉, T의 경우는 IP가 30 wt% 함량 이상이 될 때 IB의 경우는 IP가 20 wt% 이상, EA는 IP가 10 wt% 이상 혼합되면 전단 속도에 따라 전단 점도가 일정해지는 뉴톤 흐름의 거동을 나타내기 시작한다.

이 결과는 Figure 8 및 9의 진동에 따른 동적 거동에서도 동일한 결과를 나타내고 있다. IP함량이 20 wt%인 IB8IP2-Si8까지는 진동에 따라 저장 탄성률(G′)과 손실탄성률(G″)이 독립적인 경향과 저장탄성률(G′)이 손실탄성률(G″)보다 높은 gel의 형태를 나타낸다. 그 이상의 IP가 혼합되었을 경우 진동에 따라 전체 탄성률이 변하는 안정한 sol의 형태를 나타낸다. IB와 IP혼합 용매의 경우도 실리카 분산체가 점도 거동, 전단속도에 따른 점도 거동, 진동에 따른 탄성률 거동이 동일한 결과를 보여준다.

4. 결 론

단일 용매 또는 혼합 용매계 흄드 실리카 분산체의 점도 및 유변학적 거동은 구성 용매의 하이드록시기 유무, 극성도, 분자 크기의 영향을 받으며, 용매의 하이드록시기 유무가 가장 큰 영향을 미쳤다. 단일 용매계에서는 수소 결합이 가능한 극성 용매에 실리카를 분산하였을 경우 안정한 sol의 형태를 나타내고 수소 결합의 능력이 떨어지는 비극성 용매에 실리카를 분산하였을 경우 gel의 형태를 나타내었다. 일정함량 이상의 하이드록시기 포함 용매를 비극성 용매에 혼합하여 제조한 실리카 분산체는 안정한 sol의 거동을 나타내었다. 비극성정도가 클수록 안정한 실리카 분산체를 형성하는데 소요되는 하이드록시기 포함 용매의 함량은 증가하였다.

참 고 문 헌

1. Th. F. Tadros, *Adv. Colloid Interface Sci*., **68**, 97 (1996).
2. L. Gabriele, L. Thorsten, V. Vlasta, F. Stephanie, and M. Jurgen, *Prog. Org. Coat.*, **45**, 139 (2002).
3. I. Motoyuki, T. Mayumi, and K. Hidehiro, *J. Colloid Interface Sci*., **305**, 315 (2007).
4. Degussa Technical Bulletins: Basic Characteristics of Aerosol (No.11); Degussa Corp., Akron, OH (1993).
5. S. A. Greenberg, R. Jarnutowski, and T. N. Chang, *J. Colloid Sci.*, **20**, 20 (1965).
6. L. H. Allen and E. Matjevic, *J. Colloid Interface Sci*., **31**, 287 (1969).
7. R. D. Harding, *J. Colloid Interface Sci*., **35**, 172 (1971).
8. R. Benitez, S. Contreras, and J. Goldfarb, *J. Colloid Interface Sci*., **36**, 146 (1971).
9. B. Vincent, Z. Kiraly, S. Emmett, and A. Beaver, *Colloids Surf.*, **49**, 121 (1990).
10. Z. Kiraly, L. Turi, I. Dekany, K. Bean, and B. Vicent, *Colloid Polym Sci*., **247**,779 (1996).
11. G. Peschel, P. Belouschek, M. M. Muller, R. Muller, and R. Konig, *Colloid Polym. Sci*., **260**, 444 (1982).
12. D. T. Atkins and B. W. Ninham, *Colloids Surf*., **129**, 23 (1997).
13. J. P. Chapel, *Langmuir*., **10**, 4237 (1994).
14. W. B. Russel, D. A. Saville, and W. R. Schowater, Colloidal Dispersions, Cambridge University Press, Cambridge (1989).
15. C. W. Macosko, Rheology : Principles, Measurements and Application, VCH Publishers, New York (1994).
16. S. R. Raghavan and S. A. Khan, *J. Rheol*., **39**, 1311 (1995).
17. S. R. Raghavan, S. A. Khan, and H. J. Walls, *Langmuir*, **16**, 7920 (2000).
18. M. Korn, E. Killmann, and J. Eisenlauer, *J. Colloid Interface Sci*., **76**, 7 (1980).
19. M. Ettlinger, T. Ladwig, and A. Weise, *Prog. Org. Coat*., **40**, 31 (2000).