

분말사출재의 점도 측정 시 측정기 표면 조도가 미끄럼 현상에 미치는 영향

이병욱 · 민상준*

아주대학교 기계 및 산업공학부, *화천기공

Effect of Surface Roughness of Rheometer on the Slip Phenomenon in the Viscosity Measurement of PIM Feedstock

Byungohk Rhee and Sangjoon Min*

Mechanical and Industrial Engineering Division, Ajou University, Suwon, Kyunggido 442-749, Korea

*Hwacheon Co. Ltd., Kwangju 506-831, Korea

(Received July 30, 2002 ; Accepted form August 14, 2002)

Abstract In the viscosity measurement of PIM feedstock, slip correction methods require a number of experiments and produce a high level of error. In this study, a rotational rheometer with a parallel-discs configuration having different surface roughness was tried to minimize the effect of the slip phenomenon. Disc surface was prepared in 3 different roughness conditions - a smooth and 2 roughened surfaces. Results with the roughened surfaces were compared with the results obtained with a slip correction method. Relationship between powder characteristics such as size and shape and a surface roughness of the disc was examined for feedstock of 4 different powders with a same binder. As results, the effect of the slip phenomenon could be sufficiently minimized on the roughened surface in most cases. However, the effect of the slip phenomenon could not be sufficiently minimized for a feedstock of a round-particular-shape powder and in the case of very narrow gap size.

Keywords: Powder injection molding, Rheology, Slip phenomenon, Viscosity

1. 서 론

분말사출재는 분말과 결합제의 혼합체로서 유변학적으로 현탁액의 성질을 나타낸다. 현탁액의 여러 가지 특징 중에서 점도 측정에 매우 큰 영향을 주고 있는 것으로서 표면 미끄럼 현상을 들 수 있다.¹⁾ 미끄럼 현상이란 분말사출재가 등온 상태에서 흐르고 있는 동안 표면 근처에서 발생하는 큰 전단율로 인하여 흐름 안쪽으로 부분적인 입자 이동이 발생하며 표면 근처에 매우 얇고 낮은 점도를 가진 층을 형성하면서 마치 표면에서 미끄럼 속도가 존재하는 것처럼 여겨지는 현상이다. 이 현상은 실제 측정되는 전단율보다 큰 전단율이 측정되도록 하여 점도 측정에 오차를 발생한다. 실제로 회전식 점도 측정기 뿐만이 아니라 모세관식 점도 측정기에서도 발생하고 있으며 미끄럼 현상으로 인한 오차를 보정하기 위해서 많은 양의 실험을 하여야 하고 복잡한 보정 계산 과정

에서 발생하는 부차적인 오차 또한 상당하여 많은 연구자들이 보정 작업을 기피하는 원인이 되기도 하다.

대부분의 표면 미끄럼 현상으로 인한 오차의 보정 방법은 플라스틱 수지의 흐름을 연구하는 과정에서 발달하여 왔는데,²⁻⁵⁾ 실제로 분말사출재의 미끄럼 현상은 플라스틱 수지의 흐름에서 나타나는 미끄럼 현상과는 다르다. 플라스틱 수지의 흐름에서 나타나는 미끄럼 현상은 그림 1의 참 미끄럼(True slip) 현상과 같다. 참 미끄럼 현상에서는 표면에서 실제의 미끄럼 속도가 존재하며 측정되는 전단율이 증가되도록 영향을 주고 있으나, 분말사출재의 흐름에서 나타나는 미끄럼 현상은 그림 1의 겉보기 미끄럼(Apparent slip) 현상과 같다고 할 수 있다. 아직까지는 그림 1의 겉보기 미끄럼 현상에 의한 오차를 보정하는 방법은 개발되어 있지 않다. 따라서 플라스틱 수지의 흐름에서 발전된 미끄럼 현상 오차 보정 방법을 분말사출재의 흐름에서 나타나는 미끄럼 현상 오차 보

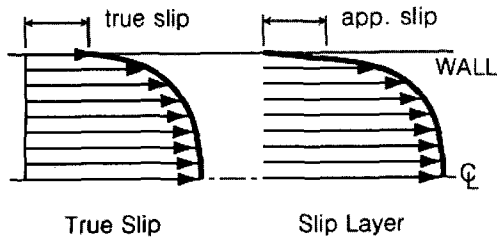


Fig. 1. Illustration of true slip and apparent slip caused by a slip layer between parallel plates.

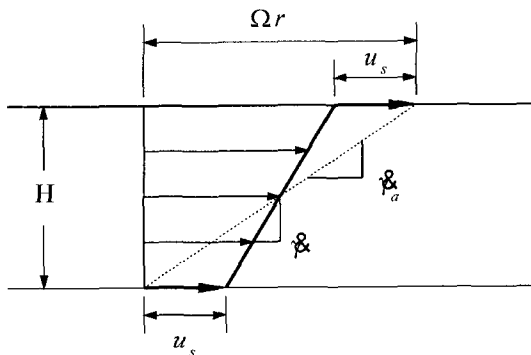


Fig. 2. Modeling of velocity profile between parallel plates in this study.

정에 사용하기 위해 분말사출재의 흐름에서 나타나는 겉보기 미끄럼 현상을 참 미끄럼 현상으로 다루고 있다.

본 연구에서 사용한 오차 보정 방법은 Yoshimura²⁾가 제안한 방법을 사용하였다. 해당 방법에서는 두 평판 사이에서 시료의 흐름을 그림 2 처럼 도식화하였다. 측정기의 위와 아래 표면에서 모두 동일한 크기의 미끄럼이 발생하고 미끄럼 속도의 크기는 전단응력의 함수로 가정하였다. Yoshimura가 제안한 방법에서는 표면에서 발생하는 미끄럼 속도의 크기가 시료 내부에 발생하는 전단응력의 함수라는 점을 기본으로 2가지 원반 간격에서 측정된 값을 이용하여 오차를 보정한다. 그러나, 2가지 원반 간격에서 측정된 값만을 이용하는 경우 실험에서 발생할 수 있는 오차를 확인할 수 없어 적어도 3가지 원반 간격에서 측정된 값을 이용하여 오차 보정을 실시하여야 하므로 매우 많은 실험량을 필요로 한다. 오차 보정 작업 중 측정된 전단응력과 겉보기 전단응력의 관계를 일정한 함수로 근사하여 동일한 전단응력을 가지는 전단

율을 계산하게 되는데, 이 과정에서 발생하는 계산 오차 또한 무시하지 못하는 단점이 있다.

이러한 단점을 가진 오차 보정 방법을 피하고 실험량을 줄이기 위해 다양한 방법들이 연구되어 왔다.⁶⁾ 본 연구도 동일한 목적을 가지고 미끄럼 현상이 분말사출재의 점도 측정값에 주는 영향을 최소화할 수 있는 방법을 개발하기 위해 실시되었다. 본 연구에서는 회전식 점도 측정기를 사용하였으며, 측정구로서 평행원반 방식을 채택하였다. 측정 원반 표면을 샌드 블라스팅 방법으로 투사재의 입도를 달리하여 표면 조도가 다른 2가지의 측정 원반을 만들었다. 기존 측정 원반의 매끄러운 표면은 기존에 사용하던 대로 고운 선삭 표면을 가진 것을 사용하여, 한 가지의 매끄러운 표면 원반과 2가지의 거친 표면 원반을 포함하여 모두 3가지의 표면 조도 변화를 가지는 원반을 실험에 사용하였다. 분말사출재의 분말 형상과 입자 크기 변화에 따라 표면을 거칠게 한 측정 원반이 표면 미끄럼 현상의 점도 측정에 대한 영향을 어느 정도 감소할 수 있는지 조사하기 위해, 동일한 결합재를 4가지의 분말과 각각 혼합하여 4가지의 분말사출재를 제조하여 실험에 사용하였다.

2. 실험

2.1. 실험재료

2.1.1. 표준 점도 시료

평행 원반식 점도 측정기의 원반 표면 조도를 변화하였을 때, 매끄러운 표면에서 측정된 점도와 동일한 점도가 측정되는지를 조사하기 위하여 표준 점도 시료를 사용하였다. 사용된 표준 점도 시료는 Brookfield Engineering Laboratories 사에서 제조된 실리콘 오일을 사용하였다. 사용된 실리콘 오일은 25°C에서 57.6 Pa·s의 점도를 나타낸다.

2.1.2. 분말사출재

본 연구에서 사용한 분말사출재는 입자의 형상과 크기의 변화에 따라 2가지 군으로 선택하였다. 표 1에 나타나 있듯이 첫번째와 두 번째 분말은 동일한 STS316L 분말이며 동일한 평균 입도를 가지고 있으나 입자의 형상이 첫번째 분말은 수분사 제조 분말로서 불규칙하고, 두 번째 분말은 가스 분사 제조 분말로서 구형 분말이다. 세 번째와 네 번째 분말은 17-4 PH 분말로서 동일한 제조사에 의해 동일한 수분사

Table 1. Specification of the powders used in the experiment

분말사출재 기호	분말재료	제조사	평균입도	제조방법	분말형상	분말 체적충전율
F1	STS316L	PAMCO	8 μm	W/A	불규칙	53%
F2	STS316L	ANVAL	8 μm	G/A	구형	53%
F3	17-4PH	Mitsubishi	6 μm	W/A	불규칙	53%
F4	17-4PH	Mitsubishi	10 μm	W/A	불규칙	53%

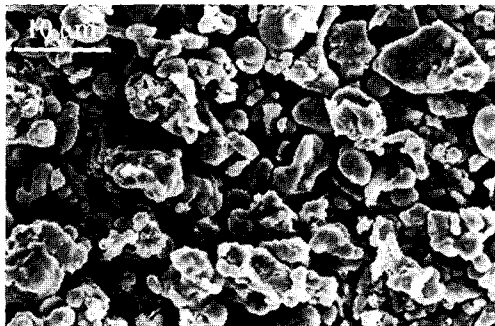


Fig. 3. SEM photograph of the PAMCO STS316L powder.

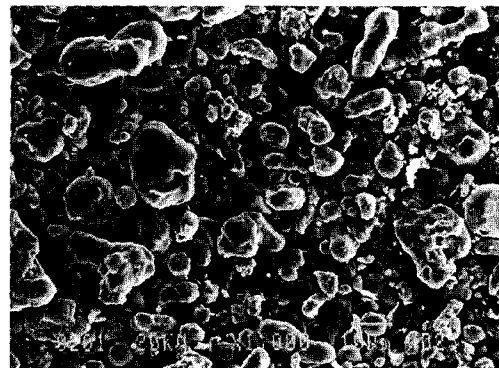


Fig. 6. SEM photograph of the Mitsubishi 17-4PH (10 micron) powder.

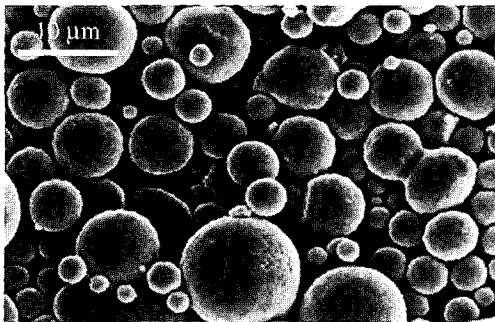


Fig. 4. SEM photograph of the ANVAL STS316L powder.

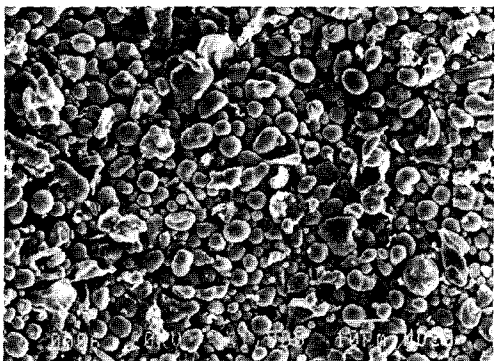


Fig. 5. SEM photograph of the Mitsubishi 17-4PH (6 micron) powder.

방법으로 제조되었으나 평균 입도가 서로 다른 분말이다. 그림 3~6에 표 1에 나타난 분말의 전자현미경(SEM) 사진이 나타나 있다.

결합재의 영향을 최소화 하기 위해 본 연구에서는 왁스를 주성분으로 하는 결합재를 4가지 분말에 대해 동일하게 사용하였고, 분말 체적 충전율도 동일하게 적용하였다. 이후 표 1에 나타난 분말사출재 기호를 이용하여 분말사출재를 구분하도록 하겠다.

2.2. 점도 측정 장치

본 연구에 사용된 점도 측정기는 회전식으로서 평행원반 방식이다. 측정부의 형상은 그림 7에 나타나 있으며, 원반의 반경은 12.5 mm 이고 원반의 간격은 최대 1.2 mm 까지 설정할 수 있다. 원반 간격을 조절하여 측정하고자 하는 전단율 범위를 조절할 수 있다. 측정기는 독일 PHYSICA사에서 제작하였으며 측정 자료는 컴퓨터로 수집되고 해석된다. 평행원반 방식 점도 측정기를 사용하여 비선형 유체의 점도를 측정하는 경우 비선형 유체의 전단율을 보정하여 주기 위한 전단율 보정 작업을 반드시 실시하여야 하며 본 논문에 나타난 모든 자료는 전단율 보정을 거친 자료들이다. 온도 조절은 열풍 방식을 사용하였으

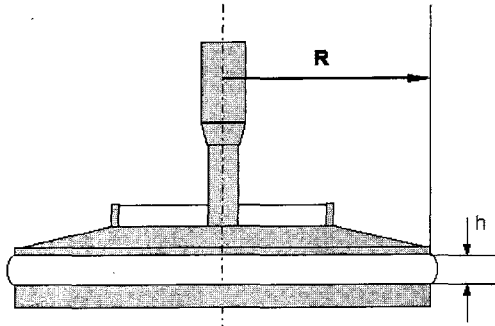


Fig. 7. Parallel-disc type rotational rheometer used in the experiment.

며 원반의 온도 측정은 고정되어 있는 아래쪽 원반의 밑부분에 설치된 Pt-100 온도 센서를 이용하였다.

2.2.1. 표면 조도를 변화한 원반

기존의 평행원반 방식 점도 측정기에서 사용하고 있는 원반은 고운 선삭 표면을 그대로 이용하고 있다. 본 연구에서는 기존 측정 원반에서 사용하고 있는 선삭 표면의 표면 조도는 측정하지 않았다. 일반적으로 측정기 제작 업체에서도 원반 표면의 기준 표면 조도에 대해서 특별한 규정을 제시하지 않고 있다. 본 연구의 목적에 따라 동일한 크기의 원반을 알루미늄으로 제작하여 시료가 접촉하는 표면을 샌드블라스팅법으로 거칠게 만들었다. 사용한 투사재는 산화 알루미늄 분말로써 입도가 각각 #60과 #120을 사용하였으며, 투사 압력은 4 기압이었다.

거칠게 가공한 원반의 표면 조도를 한국표준과학 연구원에 설치되어 있는 접촉식 표면 조도 측정기를 이용하여 측정하였다. 탐침의 측정거리는 5.6 mm 이었으며, 원반 표면을 각각 2회씩 측정하여 평균값을 내었다. 측정된 결과를 Ra 값⁸⁾으로 나타내었으며, 각 원반의 표면 조도를 표 2에 나타내었다. 이후 거친 원반의 호칭을 표 2에 나타난 표면 기호를 사용하여 거친 표면 R1 원반 혹은 거친 표면 R2 원반으로 표시하기로 하며, 선삭 표면은 표면 기호 T를

Table 2. Surface roughness of discs treated by sand blasting in the experiment

표면 기호	사용 투사재 입도	표면 조도, Ra	평균 골의 깊이
R1	#60	3.2 μm	6.4 μm
R2	#120	2.0 μm	4.0 μm

사용한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 선형 유체

표면 조도를 변화한 원반의 점도 측정 신뢰성을 확인하기 위해 이미 점도가 알려진 표준 시료인 선형 유체(실리콘 오일)를 사용하여 점도를 측정하였다. 선삭 표면을 가진 원반과 거칠게 가공한 2가지 원반을 포함하여 모두 3가지 원반을 사용하여 표준 시료의 점도를 본 실험에서 사용한 3가지의 원반 간격에서 각각 측정된 결과, 대부분의 측정 점도는 만족할 만한 오차 범위를 나타내었다. 측정된 결과는 표 3에 나타나 있다. 이 결과는 선형 유체의 경우 측정 원반 표면 조도가 점도에 영향을 주지 않고 있는 것을 보여 준다. 실험에 사용한 3가지 원반 간격은 다양한 예비 실험의 결과 적절한 전단율과 전단응력 범위를 줄 수 있도록 측정기가 허용하는 간격 범위 내에서 선택되었다.

선형 유체를 이용한 점도 확인 실험에서 선삭 표면과 거친 표면 원반의 전단율 변화에 따른 전단응

Table 3. Viscosity of a standard specimen (silicone oil) measured by various discs in 3 gap sizes

원반간격 표면	0.3 mm	0.75 mm	1.2 mm
T (선삭 표면)	56.78(1.4%)	55.22(4.1%)	56.96(1.1%)
R1	57.00(1.0%)	56.83(1.7%)	57.78(0.3%)
R2	56.85(1.3%)	57.38(0.4%)	56.82(1.4%)

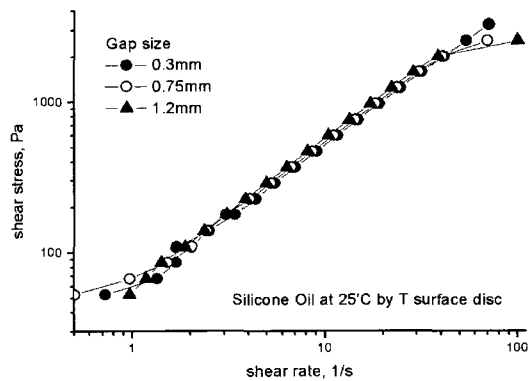


Fig. 8. Shear stress of the silicone oil measured by smooth surface (T) at 3 gap sizes.

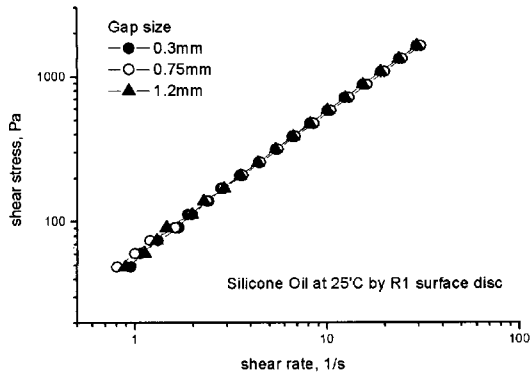


Fig. 9. Shear stress of the silicone oil measured by roughened surface (R1) at 3 gap sizes.

력을 비교하여 보았다. 그림 8은 선삭 표면 T 원반을 이용하여 3가지 원반 간격에서 선형 유체를 측정 한 결과이며, 그림 9는 거친 표면 R1 원반의 결과이다. 두 그림에서 선삭 표면이나 거친 표면 모두 3가지 원반 간격에서 측정된 전단응력 결과들이 완벽하게 겹쳐지는 것은 측정기 표면에서 미끄럼 현상이 발생하지 않고 있다는 것을 보여 주고 있다. 이로써, 거친 표면 원반과 선삭 표면 원반이 선형 유체의 점도 측정에서 특별한 차이를 보이지 않고 동일하게 사용될 수 있음을 보여 주었다.

3.2. STS316L 분말사출재

분말사출재의 점도 측정 실험에서는 플라스틱 수지의 점도 측정에서 나타나지 않는 다양한 현상들이 나타난다. 그 중의 하나가 미끄럼 현상이기도 하며, 미끄럼 현상 이외에도 유동에 의해 발생한 시료 내부 분말 상태의 변화는 매회 측정에 따른 점도 측정값의 변화를 가져오기도 한다. 본 연구에서는 일정 조건에서 측정된 분말사출재의 전단응력 값들은 최소 3회 이상 동일한 조건의 실험에서 얻어진 측정값들이 만족할 만한 오차 범위 내에 있을 때에만 평균값을 취해 사용하였다. 한 가지 예로서 그림 10은 F1 분말사출재를 선삭 표면 T 원반을 사용하여 동일한 조건에서 3회 측정된 결과를 보여주며, 3회의 측정 결과들이 만족할 만한 오차 범위에 들어 있음을 보여 주고 있다.

측정기 표면에서 미끄럼을 확인하기 위해 F1 분말사출재를 선삭 표면 T 원반을 사용하여 측정하였다. 측정 결과가 그림 11에 나타나 있듯이, 서로 겹쳐지

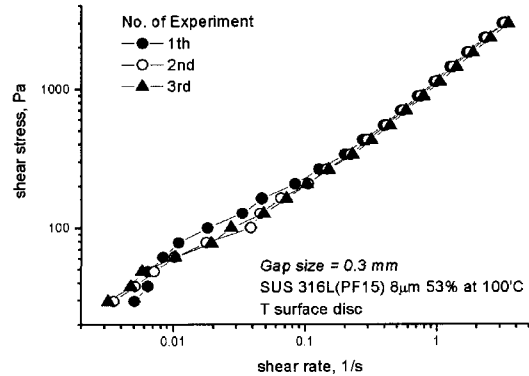


Fig. 10. Shear stresses of F1 feedstock measured 3 times by T surface disc in a same condition.

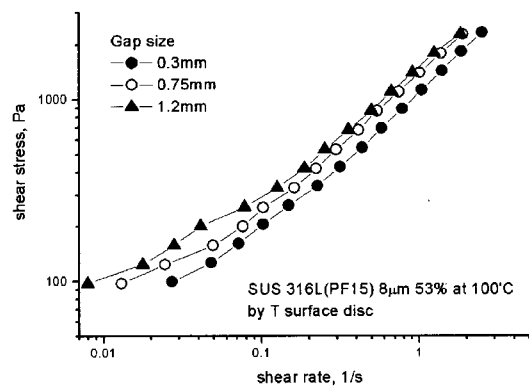


Fig. 11. Shear stress of F1 feedstock measured by T surface disc at 3 gap sizes.

지 않은 전단응력은 측정기 표면에서 미끄럼이 발생 하였음을 보여 주었다. 해당 측정 결과를 미끄럼 오차 보정 방법²⁾을 사용하여 보정한 결과가 그림 12에 나타나 있다. 미끄럼 오차 보정을 할 때, 2가지 원반 간격에서 측정된 결과를 이용하는데 보정 과정에서 발생하는 오차 때문에 정확한 보정이 되었는지를 검사하기 위해 본 연구에서는 3가지 원반 간격에서 측정된 결과 중 각각 2가지 원반 간격에서 측정된 결과를 이용하여 3회의 보정 작업을 한 후 비교하였다. 보정 작업의 결과를 비교하였을 때 그림 12와 같이 큰 오차가 없는 경우 3가지의 보정값들의 평균을 산출하여 해당 분말사출재의 대표적인 점도로 계산하였다.

거친 표면 원반을 이용하여 분말사출재의 점도를 측정 한 결과, 대체로 측정 결과가 작은 오차 범위 내

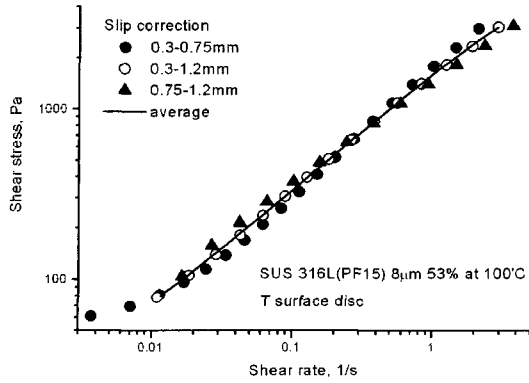


Fig. 12. Slip-corrected shear stresses of F1 feedstock and their average by T surface disc.

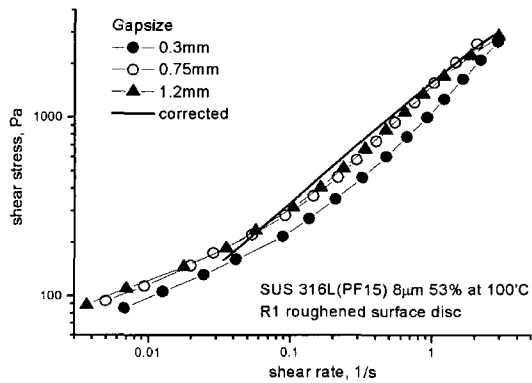


Fig. 13. Shear stress of F1 feedstock measured by R1 surface disc at 3 gap sizes and shear stress corrected from the measurement by T surface disc.

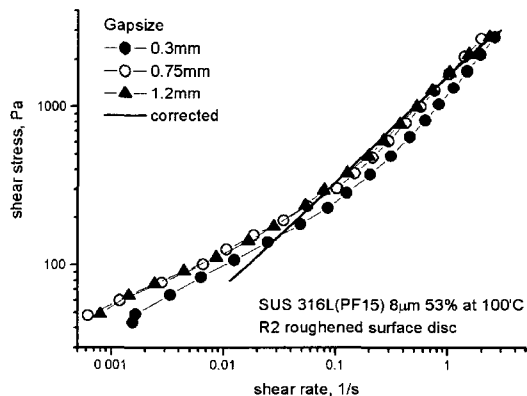


Fig. 14. Shear stress of F1 feedstock measured by R2 surface disc at 3 gap sizes and shear stress corrected from the measurement by T surface disc.

에서 일치하고 있었지만 원반 간격이 작아지는 경우 그림 13과 그림 14에 나타난 것과 같이 다른 2가지 원반 간격에서 측정된 결과와 차이를 보여 주었다. 이는 원반 간격이 작아질수록 두께 방향 전체 시료의 변형량에서 차지하는 원반 표면의 미끄럼 크기가 상대적으로 크기 때문인 것으로 추정된다. 거친 표면 원반에서 측정된 결과를, 선삭 표면 원반에서 측정된 결과로부터 미끄럼 보정을 실시한 값과 비교하였을 때, 그림 13~14에서 보이듯이 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

구형 분말을 사용한 F2 분말사출재의 경우는 측정 과정에서 문제점이 발견되었다. 본 연구에서 실험 목적상 분말 형상에 관계 없이 동일한 분말 체적 충전율을 적용하여 분말사출재를 제조하였으나, 구형 분말을 사용하는 분말사출재의 점도는 동일한 분말 체적 충전율에서 불규칙 형상 분말을 사용하는 분말사출재에 비해 매우 낮다. 실제 공정에서는 적절한 점도를 갖도록 분말 체적 충전율을 높여서 사용한다. F2 분말사출재의 낮은 점도로 인해 점도 측정 도중 원반 사이에서 시료가 원심력에 의해 밖으로 밀려 나오는 유실 현상이 발생하였다. 시료 유실 현상의 그림 설명은 그림 15에 나타나 있는데, 이런 결과로 그림 16과 같이 서로 일치되지 않는 미끄럼 보정된 전단응력을 얻었다. 그러나, 이 보정 전단응력 선도 중에서 원반 간격이 큰 경우에 얻어진 것은 시료 유실 현상이 더욱 커진 상태에서 얻어진 것이라 판단되었기 때문에 3개의 보정 전단응력 선도 중 비교를 위한 목적으로 사용할 보정 전단응력으로서 0.3-0.75 mm 원반 간격에서 얻어진 보정 전단응력을 선택하였다. 이것은 작은 원반 간격에서 측정된 결과가 비교적 오차가 작은 것으로 판단되었기 때문이었다.

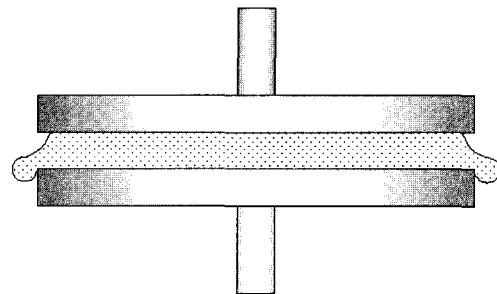


Fig. 15. Specimen loss during measurement due to a low viscosity and a high specific gravity of the specimen.

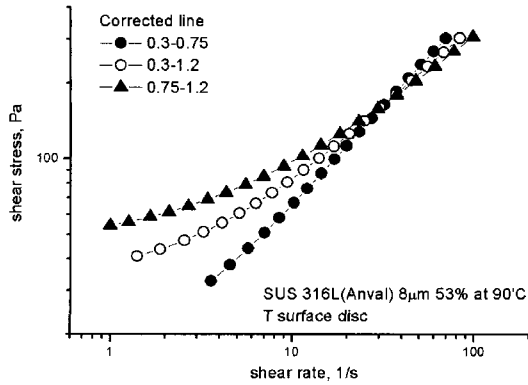


Fig. 16. Shear stress of F2 feedstock measured by T surface disc at 3 gap sizes.

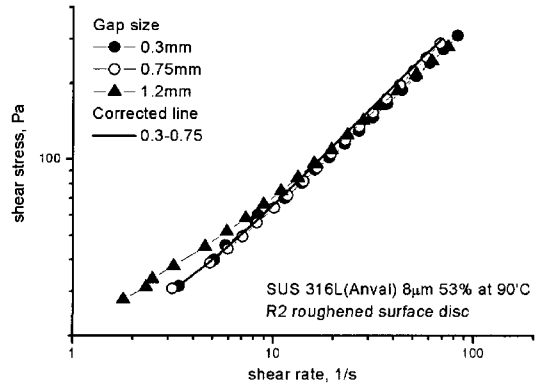


Fig. 18. Shear stress of F2 feedstock measured by R2 surface disc at 3 gap sizes and shear stress corrected from the measurement by T surface disc.

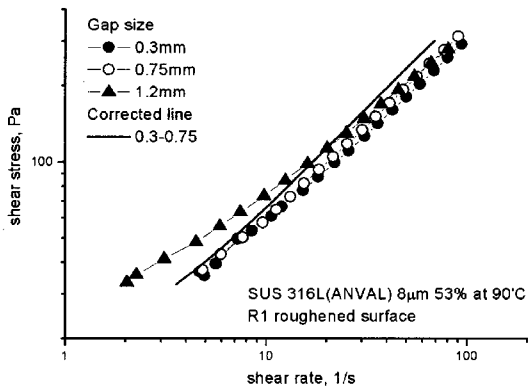


Fig. 17. Shear stress of F2 feedstock measured by R1 surface disc at 3 gap sizes and shear stress corrected from the measurement by T surface disc.

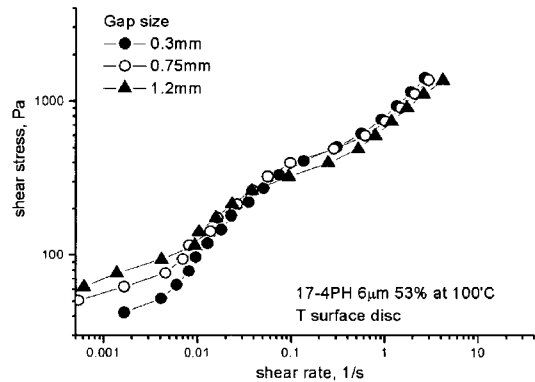


Fig. 19. Shear stress of F3 feedstock measured by T surface disc at 3 gap sizes.

구형 분말을 사용한 F2 분말사출재의 점도를 거친 표면 원반을 이용하여 측정된 결과가 그림 17~18에 나타나 있다. F2 분말사출재의 경우 F1 분말사출재에서 나타난 0.3 mm 원반 간격에서 측정된 결과가 다른 두 원반 간격에서 측정된 결과와 보이는 차이 점은 나타나지 않았다. 그러나, 다른 원반 간격에서 측정된 결과들이 F1 분말사출재와 서로 잘 일치하지 않고 조금씩 차이를 보여 주고 있었다. 이는 구형 분말로 제조된 분말사출재가 일반적으로 큰 표면 미끄럼 현상을 보이고 있는 점으로 미루어 미끄럼 현상의 영향을 만족할 만큼 감소시켜 주지 못하기 때문인 것으로 판단하였다. 보정 전단응력과의 비교는 대체로 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. 거친 표면

R2 원반의 경우에 거친 표면 R1 원반의 경우보다 각각 다른 원반 간격에서 측정된 값들의 차이가 적게 나타나고 있음을 그림 18에서 알 수 있다. 그러나, 두 가지 거친 표면 원반을 사용하여 측정된 결과 모두 선삭 표면보다는 미끄럼 현상의 영향을 크게 줄여 주고 있음을 알 수 있었다.

3.3. 17-4PH 분말사출재

측정기 표면 조도와 분말사출재의 분말 입도의 관계를 알아 보기 위해 사용한 F3, F4 분말사출재의 실험 결과, 측정기 표면 조도는 분말사출재의 분말 입도와 크게 상관 관계가 없는 것으로 나타났다. 우선 그림 19와 그림 20은 각각 F3 분말사출재와 F4 분말사출재를 선삭 표면 T 원반에서 측정된 결과를

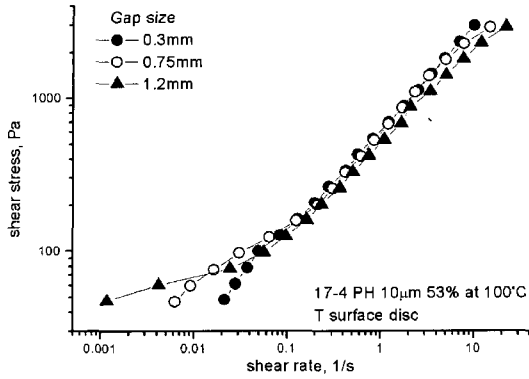


Fig. 20. Shear stress of F4 feedstock measured by T surface disc at 3 gap sizes.

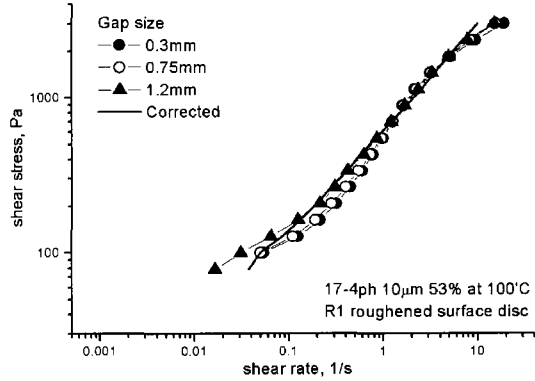


Fig. 22. Shear stress of F4 feedstock measured by R1 surface disc at 3 gap sizes and shear stress corrected from the measurement by T surface disc.

보여 준다. 각 원반 간격에서 측정된 결과들이 다소의 차이를 보여 주고 있으나 큰 차이를 보이고 있지 않은 점으로 미끄럼 현상의 영향이 매우 크지 않은 것을 알 수 있다. 이 결과로부터 보정 전단응력을 구해 거친 표면에서 측정된 전단응력과 비교하는데 사용하였다.

F3 분말사출재와 F4 분말사출재를 거친 표면 R1 원반을 사용하여 측정된 결과가 각각 그림 21~22에 나타나 있다. 두 결과로부터 분말 입자의 크기 변화에 따른 차이점은 두드러지게 나타나지 않고 있음을 알 수 있었다. F3 분말사출재의 경우 원반 간격 0.75mm에서 측정된 결과가 다른 두 원반 간격에서 측정된 결과와 차이점을 보여 주고 있는데, 정확한 오차 발생 원인은 아직 밝혀내지 못하였다. 선삭 표면 T

원반을 사용하였을 때보다 거친 표면 원반을 사용하였을 때 다른 원반 간격에서 측정된 결과들이 잘 일치하고 있는 것으로 보아 미끄럼 현상의 영향을 상당히 감소 시키고 있음을 확인하였다.

F3 분말사출재와 F4 분말사출재를 거친 표면 R2 원반을 사용하여 측정된 결과가 각각 그림 23~24에 나타나 있으며, 이 결과에서도 거친 표면 R1 원반 결과 비교와 같이 분말 입자 크기 변화에 따른 차이점을 볼 수 없었다. F3 분말사출재를 원반 간격 0.75mm에서 측정된 결과가 다른 두 가지 원반 간격에서 측정된 결과와 차이점을 보이는 것은 거친 표면 R1 원반의 경우와 동일하였다.

이상의 실험 결과, 거친 표면을 사용할 때 대부분 분말사출재의 경우 표면 미끄럼 현상의 영향을 상당

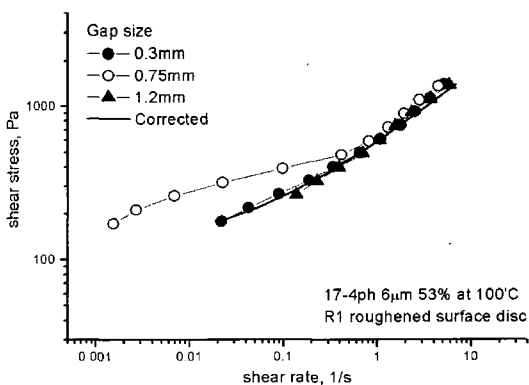


Fig. 21. Shear stress of F3 feedstock measured by R1 surface disc at 3 gap sizes and shear stress corrected from the measurement by T surface disc.

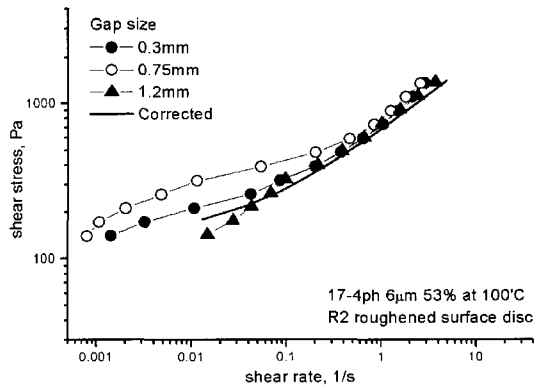


Fig. 23. Shear stress of F3 feedstock measured by R2 surface disc at 3 gap sizes and shear stress corrected from the measurement by T surface disc.

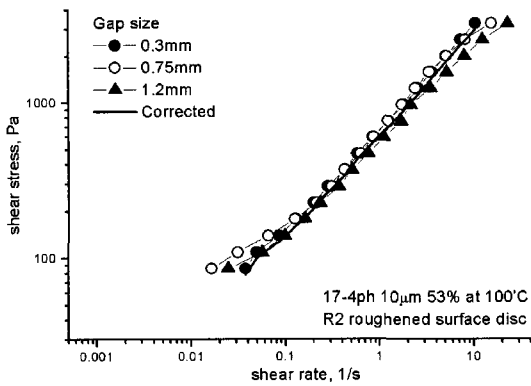


Fig. 24. Shear stress of F4 feedstock measured by R2 surface disc at 3 gap sizes and shear stress corrected from the measurement by T surface disc.

히 줄여 줄 수 있음을 확인하였다. 다만, 구형 분말을 사용한 분말사출재의 경우 미끄럼 현상의 영향 감소 효과가 다소 떨어지는 점을 알 수 있었으며, 이는 공정에 알맞은 점도를 가지도록 분말 체적충전율을 높이는 경우 현재보다 높은 효과를 얻을 수 있을 것으로 추정되지만, 현재로서는 실험적 자료가 부족하여 결론지어 말할 수는 없다. 분말 입자의 크기와 측정기 표면 조도의 뚜렷한 관계를 찾지는 못하였으나, 분명히 거친 표면이 미끄럼 현상의 영향 감소 효과를 보여 주고 있는 점으로 미루어 실험에 사용된 표면 조도의 변화나 분말 입자 크기의 변화가 작기 때문에 명확한 차이점을 밝혀 내지 못하고 있는 것으로 추정되었다. 또한 평행원반 방식 점도 측정기를 이용하여 분말사출재의 점도를 측정할 때 분말사출재의 점도가 지나치게 낮은 경우 원반 사이에서 원심력으로 인한 시료 유실 현상이 발생할 수 있음을 확인하였고, 이는 심각한 측정 오차의 원인이 될 수 있다는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 회전식 점도 측정기를 사용하여 분말사출재의 점도를 측정하면서 발생하는 표면 미끄럼 현상을 보정하기 위해서 필요한 과다한 실험량을 줄이고 측정 점도에 대한 미끄럼 현상의 영향을 최소한으로 하기 위해 측정기 표면의 조도를 샌드블라스팅 방법으로 변화시켜 점도를 측정하면서 미끄럼

현상의 영향 감소 효과를 실험적으로 조사하였다. 분말 형상과 입자 크기의 변화에 따른 영향을 보기 위해 4가지 분말과 동일한 결합제를 사용하여 4가지 분말사출재를 제조하여 실험에 사용하였으며, 측정 원반의 표면 조도를 3가지로 변화시켜 실험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 샌드블라스팅 방법으로 거친 표면을 가지도록 한 측정 원반은 매끄러운 선삭 표면을 가진 측정 원반에 비해 미끄럼 현상의 영향을 크게 줄여 주는 것으로 확인되었다. 다만, 구형 분말을 사용한 분말사출재의 경우 미끄럼 현상의 영향 감소 효과가 다른 시료에 비해 떨어졌다.
2. 거친 표면을 가진 측정 원반으로 측정된 점도는 선삭 표면을 가진 측정 원반으로 측정된 결과로부터 미끄럼 보정을 한 결과와 매우 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었으며, 이로써 거친 표면을 가진 측정 원반을 사용하여 점도를 측정함으로써 실험량을 매우 크게 감소할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.
3. 거친 표면을 가진 측정 원반을 사용하더라도 지나치게 작은 원반 간격에서는 미끄럼 크기가 시료의 전체 변형량에 비해 상대적으로 커지기 때문에 상당한 오차를 발생할 수 있으므로 지나치게 작은 원반 간격에서 측정하는 것은 바람직하지 못하다는 것을 알 수 있었다.
4. 분말 입자 크기와 측정 원반의 표면 조도의 관계는 분명하게 밝혀내지 못하였다. 이는 본 실험에서 사용한 분말 입자 크기 변화와 표면 조도 변화가 원하는 관계를 밝혀내기에 너무 작은 범위를 가지고 있기 때문인 것으로 추정되었다.
5. 구형 분말을 사용하여 제조한 분말사출재와 같이 분말사출재의 점도가 매우 낮은 경우 평행원반 방식 점도 측정기에서 원심력으로 인한 시료 유실 현상이 발생할 수 있음을 확인하였고, 이는 중대한 실험 오차를 발생하기 때문에 지나치게 낮은 점도를 가진 분말사출재를 평행원반 방식 점도 측정기로 점도를 측정하는 것은 바람직하지 못하다는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 포항산업과학연구원에서 주관하여 수행된 민간겸용기술개발사업의 지원을 받아 수행되었으

며, 이에 대해 감사 드립니다.

참고문헌

1. 김성필: 아주대학교 기계공학과 석사학위 논문 (2001).
2. Ann Yoshimura and Robert K. Prud'homme: J. of Rheol., **32** (1988) 53.
3. T. Kiljanski: Rheol Acta, **28** (1989) 61.
4. H. A. Barnes and J. O. Carnali: J. of Rheol., **34**(6) (1990) 841.
5. D. B. Spencer, R. Mehrabian, and M. C. Flemings: Metallurgical Transactions, **3** (1972) 1925.
6. 송기원, 구자승, 장갑식: 유변학의 이론과 응용, **4** (2000) 41.
7. Christopher W. Macosko: Rheology, VCH Publishers, New York, (1994) 218.
8. 김종원, 이건우, 조선휘: 기계공학제도, 문운당, 서울 (1999) 317.