

분말직송압연 티타늄의 치밀화 거동[§]

강동환* · 홍재근** · 박노광** · 김태원*†

* 한양대학교 기계공학부, ** 한국기계연구원 부설 재료연구소

Densification Behavior of Titanium in Direct Powder Rolling Process

Dong-Hwan Kang^{*}, Jae-Keun Hong^{**}, Nho-Kwang Park^{**} and Tae-Won Kim^{*†}

^{*} School of Mechanical Engineering, Hanyang Univ., ^{**} Korea Institute of Materials Science

(Received February 29, 2012 ; Revised August 14, 2012 ; Accepted August 17, 2012)

Key Words: Direct Powder Rolling(분말직송압연), Titanium Powder(티타늄 분말), Finite Element Analysis(유한요소 해석), Process Variable(공정변수), Densification Behavior(치밀화 거동)

초록: 분말직송압연에 따른 티타늄 분말 집합체의 치밀화 거동을 연구하였다. 이와 관련하여 실험 시 나타나는 롤-밀림 현상을 분석하기 위한 이론적 모델을 개발하였으며, 이를 통해 보다 실질적인 유한요소 해석을 수행하였다. 개발된 롤-밀림 모델을 통해 공정변수에 따른 롤-밀림의 경향을 정량적으로 파악하였으며, 분말직송압연 공정의 유한요소 해석을 통해 판재의 위치 별 최종 상대 밀도를 비교적 정확히 예측할 수 있었다. 아울러 공정 시 분말집합체의 치밀화 현상을 이해하기 위해 분말-롤 간 접촉 압력 및 전단응력을 계산하였으며 이를 통해 분말의 물림현상이 나타나는 영역을 보다 명확히 확인할 수 있었다.

Abstract: The densification behavior of titanium powder in the direct powder rolling process was investigated. An analytical model for the roll-backlash phenomenon during this process was proposed to conduct a realistic finite element analysis. Furthermore, the roll-backlash was quantitatively analyzed, and the relative densities of the green-strip along the rolling direction were precisely estimated. Finally, the slip and nip phenomena were identified by calculating the contact pressure and shear stress between the titanium powder and the roller in order to understand the densification behavior of the powder during the rolling process.

1. 서 론

티타늄은 경량, 고강도, 부식에 대한 저항성과 같은 기계-재료적 성질이 우수함에 따라 항공우주, 발전, 석유화학, 해양플랜트 등 다양한 산업 분야에서 그 사용량이 지속적으로 증가하고 있다.⁽¹⁾ 뿐만 아니라 스포츠용구, 의료기기 등 많은 산업 분야에서 그 활용 범위를 넓히기 위한 노력이 이루어지고 있다.⁽¹⁾ 그러함에도 불구하고 티타늄은 원광석으로부터 금속 혹은 합금 형태로 변환 되기 까지 다양하고 복잡한 공정을 거치면서 가격이 증가하고 따라서 그 사용분야가 제한되고

있는 실정이다.^(2,3)

이에 따라 티타늄의 산업화 적용을 촉진시키기 위한 상용화 기술 연구가 널리 수행되고 있으며 그 중 티타늄 분말을 이용하여 직접 판재나 호일을 제조하는 분말직송압연(direct powder rolling, DPR) 공정에 대한 기술개발이 활발히 이루어지고 있다.^(4,5) Fig. 1(a)는 DPR 공정을 개략적으로 나타내고 있으며, 그림에서 보듯이 분말(powder), 스펀지(sponge)형태의 티타늄 원소재를 압연롤 사이로 통과시킴으로써 분말사이의 공극을 최소화하는 치밀화 과정을 거쳐 일정한 두께의 판재로 성형하는 것이 가능하다.

본 논문에서는 DPR 공정 개발과 관련하여, 초기분말의 상태, 롤 간격, 분말 적층 높이 등 공정변수 연구와 이를 이용한 성능평가를 수행하였으며 아울러 미시역학적(micro-mechanics) 이론에 기반한 유한요소모델과 다공성재료(porous

§ 이 논문은 2012 년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2012. 2. 16.-17., 제주대) 발표논문임

† Corresponding Author, twkim@hanyang.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

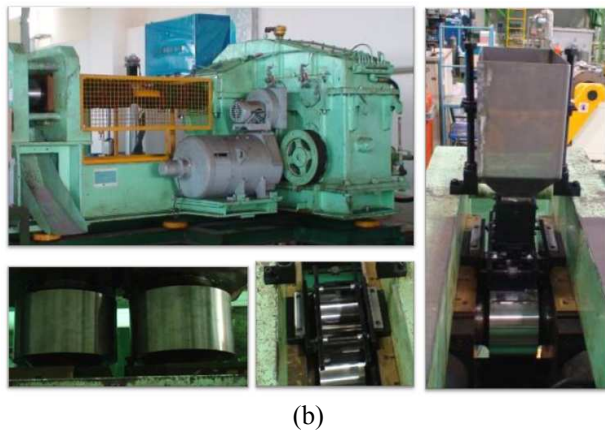
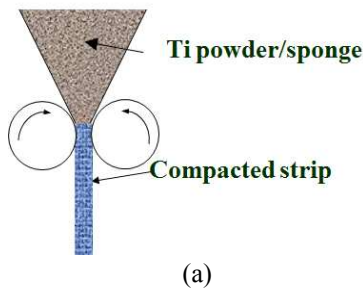


Fig. 1 (a) Schematic diagram showing DPR process and (b) photographs showing DPR equipment (Korean Institute of Materials Science, KIMS)

materials)의 변형거동에 대한 구성방정식을 바탕으로 DPR 공정 시 나타나는 압연력의 예측과 함께 분말체의 물림현상과 치밀화 거동(densification behavior)을 고찰하고자 하였다.

2. 분말직송압연 공정시험

2.1 분말직송압연(DPR) 시험

Direct powder rolling 공정에 대한 시험을 수행하기 위해 한국기계연구원 부설 재료연구소에서 개발한 장치를 이용하였으며 해당장치는 Fig. 1(b)에 나타내었다. 개발된 시험장비의 압연롤은 폭 70 mm, 반경 100 mm 로 제작되었다. 원활하고 일정한 티타늄 분말의 공급을 위해 이송기(feeder)가 장착되었고, 압연 롤 사이의 간격은 시험 초기에 0.2~0.4 mm 로 설정하였다. 초기 분말상태에 따른 차이를 고찰하고 이에 따른 공정 적합성을 평가하기 위해 100-mesh 및 200-mesh 의 티타늄 분말이 사용되었으며 평균입도는 각각 36 μm 및 72 μm 이다.

2.2 롤-밀림 현상(roll-backlash phenomenon)

양산공정에 있어서 압연공정은 다수의 압연롤과 함께 백업롤이 사용됨에 따라 밀림현상이 크게 나타나지 않으나 압연롤의 탄성계수에 따른 밀림현

Table 1 Experimentally measured roll-backlash and thickness of green-strip after DPR process

Powder	100-mesh		200-mesh	
	Powder height (mm)			
Roll-gap (mm)	38	63.2	38	63.2
0.2	¹⁾ 0.43/1.12	0.51/1.28	Crack	Crack
0.3	0.42/1.14	0.49/1.31	0.49/1.19	0.56/1.32
0.4	Leak	Leak	0.48/1.12	0.54/1.38

¹⁾Backlash/thickness

상이 다소 나타나게 된다.⁽⁶⁾ 한편, 본 연구의 DPR 공정 시 feeder 를 통해 공급되는 분말이 양측 압연 롤 사이에 적층 되는 높이에 따라 제작된 판재의 치밀도 및 성능에 차이가 나타나게 된다. 이에 대한 원인으로서는, 적층된 분말의 높이에 따른 압연력의 변화 및 이러한 압연력에 따라 롤-밀림(backlash) 현상이 나타나는 것으로 확인되었다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 현상에 기인된 판재의 성능 평가를 위해 초기분말의 적층 높이를 38 mm 와 63.2 mm 로 유지하여 시험을 실시하였다. 이는 다수의 실험을 통해 경험적으로 선정된 값으로, 불량(누설, 균열 등) 없이 양호한 품질의 판재를 얻을 수 있는 공정조건이다.

본 연구에 사용된 분말 종류, 롤 간격 및 분말 높이에 따른 롤-밀림 양은 Table 1 에 나타내었다. 결과에서 볼 수 있듯이 100-mesh 분말의 경우 롤 간격 0.4 mm 에서 누설 현상(leadk)이 발생하였으며, 200-mesh 분말의 경우 0.2 mm 롤 간격에서 균열(crack)이 발생함을 확인하였다. 아울러 롤-밀림 양은 분말 적층 높이가 높을수록, 롤 간격이 좁을수록 많이 나타나고 있다. 이는 분말 적층 높이가 높을수록 동시에 투입되는 분말의 양이 많아지므로 보다 강한 압연력이 작용함에 따라 롤-밀림 양이 커지는 것으로 판단되며, 롤 간격이 좁은 경우에도 이와 마찬가지로 압연력이 커짐에 따른 결과로 판단된다. 또한, 최종 판재의 두께는 초기분말의 적층 높이가 높을수록, 롤 간격이 넓을수록 두껍게 나타나는 것을 확인하였다. 이는 분말 적층 높이가 높으면 동일한 단면에서 동시에 투입되는 분말의 양이 많아지므로, 국부적인 밀도가 높아짐에 따라 롤-밀림 양을 증가시키고, 이에 따라 최종 판재의 두께에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Fig. 2 는 100-mesh 분말에 대한 롤-밀림 양 및 두께 결과를 나타내고 있으며 2(a)는 롤-밀림 양과 두께의 차(B-T), 그리고 2(b)는 롤-밀림 양과 두께의 비(B/T)를 나타내고 있다. 롤-밀림 양과 두께

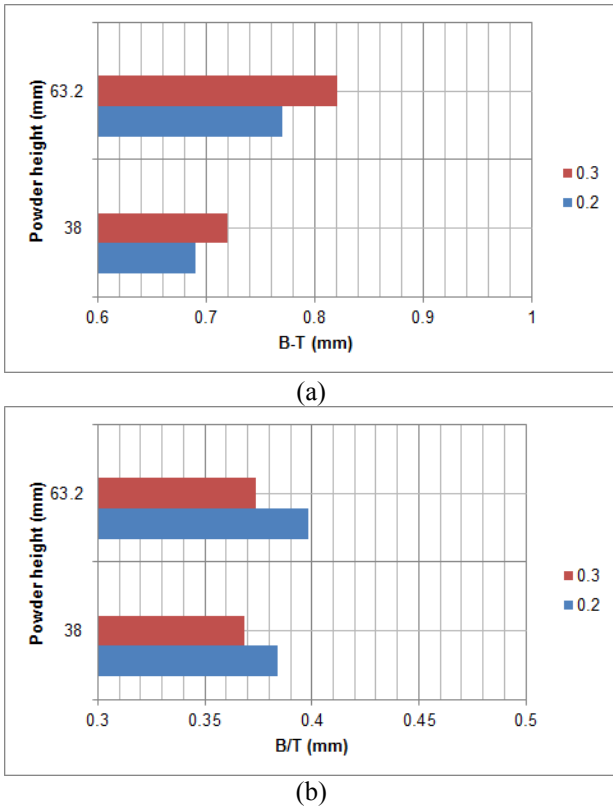


Fig. 2 Experimentally measured roll-backlash for 100-mesh powder; (a) B-T, and (b) B/T. B and T respectively means backlash and thickness

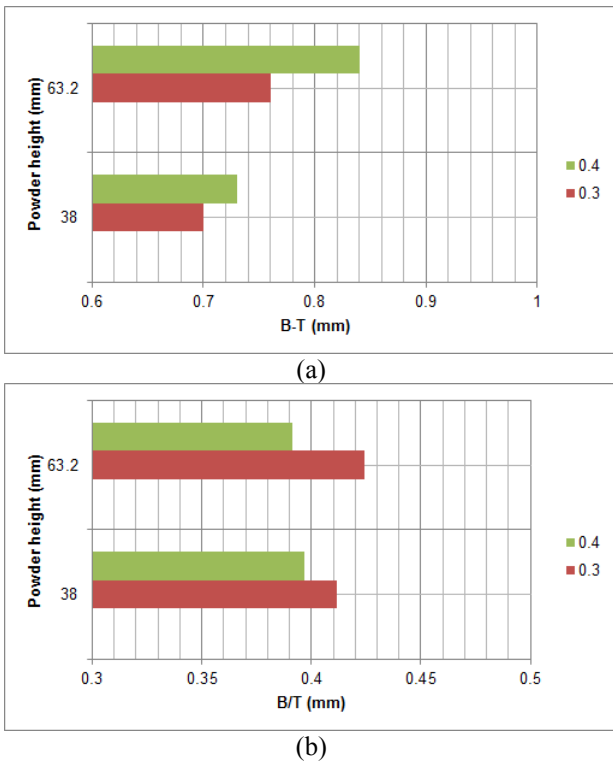


Fig. 3 Experimentally measured roll-backlash for 200-mesh powder; (a) B-T, and (b) B/T. B and T respectively means backlash and thickness

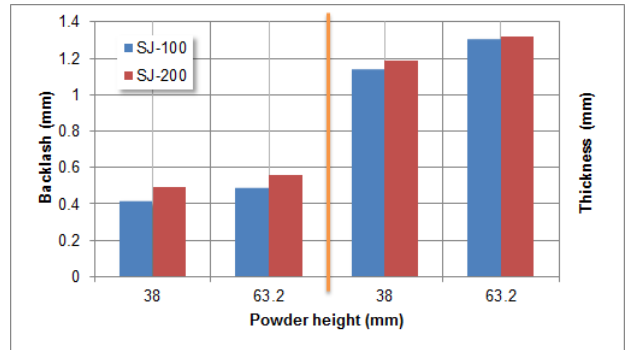


Fig. 4 Experimentally measured backlash and thickness of 100-mesh and 200-mesh powders

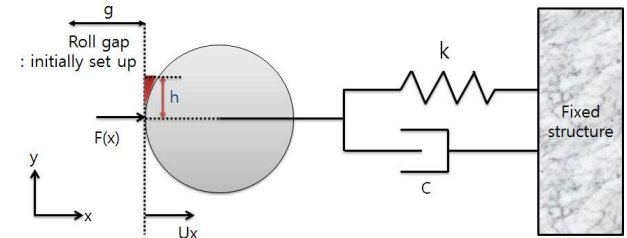


Fig. 5 Schematic diagram showing the analytical model for roll-backlash in DPR

의 차(B-T) 결과와는 달리, 그 비율(B/T)을 나타낸 결과에서는 동일한 롤 간격인 경우, 분말 적층 높이에 상관없이 비교적 유사한 값을 나타냄을 확인할 수 있는데, 이는 롤 간격이 일정할 경우, 분말 적층 높이의 변화에도 불구하고 일정한 비율로 롤-밀림 양과 두께가 변화하는 것으로 판단할 수 있다. Fig. 3의 경우 200-mesh 분말을 이용한 결과로서, 100-mesh 에서 나타난 경향과 동일한 양상을 나타냄을 확인하였다. 한편, Fig. 4는 100-mesh 분말과 200-mesh 분말의 결과를 상대 비교하여 나타낸 것으로, 분말의 입도가 상대적으로 작은 200-mesh 분말을 사용했을 경우 롤-밀림 양과 두께에서 모두 약간 큰 값을 나타내었다. 이는 분말의 크기가 미세할 경우 보다 큰 압연력을 발생시켜, 롤-밀림 양을 크게 하는 것으로 생각된다.

2.3 롤-밀림 이론 모델

초기 분말상태, 분말 적층 높이, 롤 간격에 따라 나타난 롤-밀림 양을 정량적으로 분석하기 위해 롤-밀림 모델을 다음과 같이 제시하였다.

Fig. 5는 롤-밀림 현상을 분석하기 위한 $m-c-k$ 요소모델을 나타내고 있으며 그림에서 $F(x)$ 는 압연력, h 는 분말적층높이, g 는 롤 간격, k 는 압연롤 시스템의 강성, c 는 감쇠상수를 나타낸다. 식 (1)은 상기 기계시스템의 압연력 $F(x)$ 를 나타내고 있

Table 2 Material constants

α	β_1	β_2	k	d_1	d_2
0.00057	3.21	5.86	1	0.11	0.074
N	N/mm	N/mm	N/mm	mm	mm

Table 3 Experimentally measured roll backlash and thickness of strip after DPR process

Roll gap	SJ-100 powder		SJ-200 powder		Unit
p-height	38	63.2	38	63.2	
0.2	exp.	0.43	0.51	-	-
	eqn.	0.45	0.52	0.54	0.61
0.3	exp.	0.42	0.49	0.49	0.56
	eqn.	0.41	0.46	0.51	0.55
0.4	exp.	-	-	0.48	0.54
	eqn.	0.4	0.43	0.49	0.52

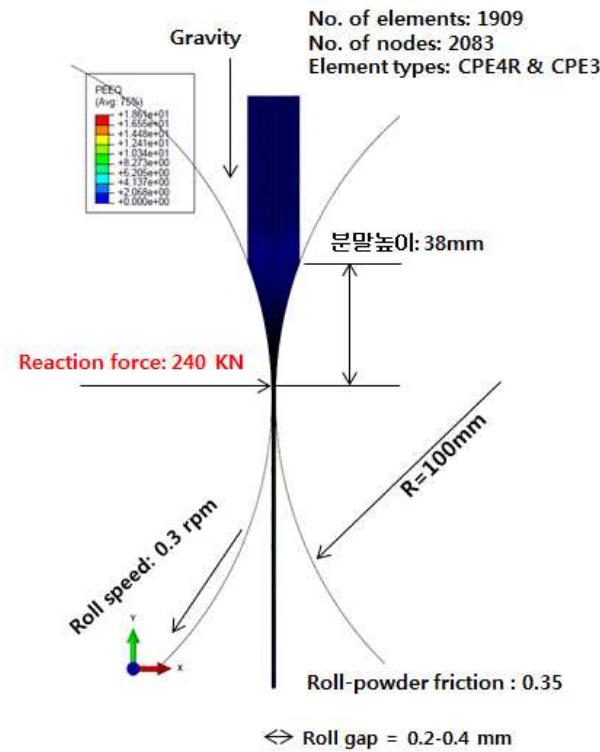


Fig. 6 Finite element model for DPR process.

있으며, $G(h)$ 는 압연력을 분말 적층 높이 h 에 대한 함수로 가정한 변수이다.

$$F(x) = kx + c\dot{x} = G(h) \quad (1)$$

한편, 앞서 확인한 실험결과를 바탕으로 압연력 $G(h)$ 를 롤-밀림 양, x , 분말 높이, h , 롤 간격, g , 분말 입도, d 에 관한 함수로서 다음 식 (2)와 같이

정의하였다. 이 때, 감쇠상수 c 는 0으로 가정하여 시스템에서 배제하였다.

$$G(h) = Ah + B = \frac{\alpha}{g}h + \beta d = kx \quad (2)$$

여기서 A, B, α, β 는 재료상수를 나타낸다. 위 식 (2)를 x 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$x = \frac{G(h)}{k} = \frac{\alpha}{k} \frac{h}{g} + \frac{\beta}{k} d \quad (3)$$

이때 사용된 재료상수는 Table 2에 나타내었다. Table 3는 제시한 이론식을 통해 계산된 롤-밀림 양과 실험결과를 비교하여 나타낸 것으로 결과에서 알 수 있듯이 제시한 모델이 롤-밀림 현상을 비교적 정확하게 예측하고 있음을 확인할 수 있다.

3. 유한요소해석

3.1 재료거동 모델

DPR 공정에서 티타늄 분말의 치밀화 거동은 분말 내부에 존재하는 기공의 효과로 인해 체적 변화가 수반되고 따라서 von Mises 항복이론식과 그에 상응하는 구성방정식(constitutive equation)이 바로 적용될 수 없다. 본 연구에서는 식 (4)과 같이 기공의 영향을 고려한 Gurson⁽⁷⁾ 형태의 구성방정식 적용을 통해 분말체의 치밀화 거동 및 변형거동을 해석하였다.

$$\phi = \left(\frac{q}{\sigma_y} \right) + 2q_1 f \cosh \left(-q_2 \frac{3p}{2\sigma_y} \right) - (1 + q_3 f^2) \quad (4)$$

여기서 q 는 유효응력이고, σ_y 는 완전히 치밀화된 기지재료의 항복응력, f 는 기공체적분율, p 는 정수압, q_1, q_2, q_3 는 재료상수이다. 또한 분말체의 상대 밀도, RD 는 $RD=1-f$ 로 계산할 수 있다.

3.2 유한요소해석 모델

상술한 구성방정식을 적용하여 유한요소해석 모델(finite element model)을 개발하였으며 상용프로그램인 ABAQUS를 이용하여 Fig. 6과 같이 2-D 모델로서 1909개의 요소와 2083개의 절점을 갖는 모델을 구성하였다. 요소 형태(element type)는 CPE4R과 CPE3을 사용하였으며 롤-분말 마찰계수는 0.35, 롤 회전속도는 0.3 rpm으로 설정하였다. 이외의 롤 간격, 분말 높이, 분말 상태 등의 주요 공정조건은 Table 1의 시험조건에 대응하여 동일하게 설정하였다.

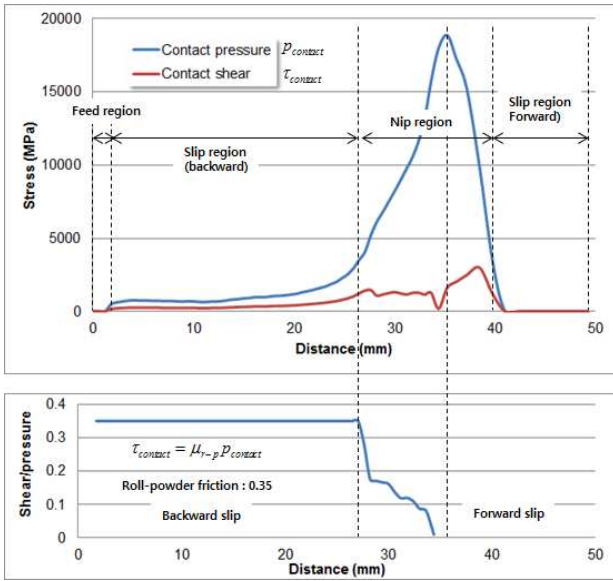


Fig. 7 Contact pressure and contact shear histories of strip regarding the distance from feed during DPR process

4. 결과 및 고찰

DPR 공정에서 초기 투입된 분말은 두개의 압연롤 위에 적층 되어 있다 압연 롤이 일정한 속도로 회전하면 롤 간격을 통해 압축되어 판재로 형성되게 된다. 이 때 롤 위에 쌓여있던 분말이 압연 롤에 말려들어 가면서 물리는 것을 nip 현상으로 나타낼 수 있으며 이러한 nip 이 발생하기 이전에는 분말이 롤 위에서 미끌어지는 slip 현상으로 구분할 수 있다. 이러한 구간의 명확한 구분을 위하여 유한요소 해석을 통해 Fig. 7 과 같이 DPR 판재 위치별 접촉 압력(contact pressure)과 접촉 전단응력(contact shear stress)를 계산하였다. 결과에 따르면, 판재 전반에 걸쳐 접촉 압력이 전단응력보다 크게 나타나며 분말 적층 높이에서부터 압연 롤 중심(롤 간격 구간)으로 갈수록 그 값이 증가함을 알 수 있다. 아울러 롤 중심부를 벗어난 판재는 다시 압력 및 전단이 제거되어 압연 롤에서 완전히 빠져나감을 알 수 있다. 이때, 분말이 압연 롤 사이에 물리기 시작하는 영역 즉, nip 구간은 접촉 압력과 전단응력의 비로써 명확히 확인할 수 있는데, 즉 nip 이전의 slip 영역에서는 이 비율이 마찰계수인 0.35로 유지되다가 그 값이 급격히 줄어드는 지점을 nip 영역의 시작점으로 판단할 수 있다. 결과에 따르면, 분말높이 38 mm 조건의 경우, 분말 적층 높이로부터 하부방향으로 약 27 mm 지점에서 nip 현상이 시작되어 약 41 mm 지점까지 유지됨을 알

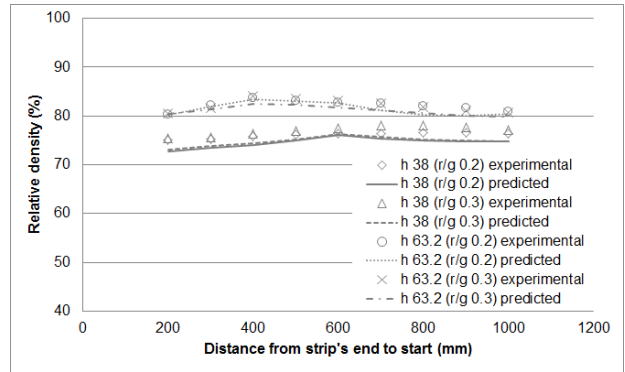


Fig. 8 Experimental and predicted relative densities of DPR strip for 100-mesh powder; h: height, r/g: roll-gap (unit: mm)

수 있다. 또한 압연 롤 중심부인 38 mm 약간 이전에 압력이 최대치가 됨을 알 수 있으며, 판재가 압연 롤에서 완전히 빠져나간 후에는 접촉 압력 및 전단성분 모두 0 이 됨을 알 수 있다.

Fig. 8 은 실험 및 유한요소 해석으로부터 얻어진 100-mesh 분말을 이용한 DPR 판재의 압연길이 방향 위치별 상대밀도를 나타내고 있다. 결과에서 알 수 있듯이 개발된 유한요소해석 모델이 전반적인 해석조건에 대해 비교적 정확한 예측결과를 나타내었다. 따라서, 앞서 고찰한 롤-밀림 현상에 대한 이해와 이를 적용한 유한요소해석 모델 개발이 DPR 공정 해석에 적합한 방법임을 확인할 수 있다.

5. 결론

티타늄 분말을 이용한 DPR 공정 개발을 위해 시험 및 유한요소 해석을 실시하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 개발된 DPR 시험장치에서 나타나는 압연 롤 backlash 현상과 초기 분말의 상태가 판재의 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해, 분말 적층 높이와 roll-gap 에 따른 공정성을 평가하였다. 그 결과, 분말 입도가 작으면서 roll-gap 이 좁을 경우 판재에서 균열이 발생함을 확인하였고, 분말 입도가 크면서, roll-gap 이 넓을 시 분말이 흘러내려 판재가 제대로 제작되지 못함을 확인하였다.

(2) 또한 이론적 모델을 통해 분말 적층 높이와 backlash 의 상관관계를 정의하였으며, 이를 실험결과에 적용함으로써 개발된 모델의 정확성 및 경향성을 고찰하였다. 그 결과, 두 종류의 분말 모두에서 적층 높이가 높아질수록 backlash 의 양이 커지는 경향을 확인하였으며, 아울러 분말 입도가 작을수록 backlash 양이 커짐을 확인하였다.

(3) 유한요소 해석 모델을 통해 DPR 공정 시 나타나는 분말-롤 간의 접촉 압력 및 전단 이력을 계산하였으며, 이를 분석하여 분말 압연시 나타나는 slip, nip, re-slip 현상을 규명하였다. 아울러, 개발된 유한요소 해석 모델을 통해 roll-gap 및 적층 높이에 따른 완성 판재의 치밀도를 정확하게 예측할 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부 소재원천기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Shim, J.-D., 2011, "Trend of High Performance Titanium Alloy Development and Manufacturing Technology," *Korea Institute of Science and Technology Information*
- (2) Hideki, F., Kazuo, F., Kazuhiro, T. and Tatsuo, Y., 2002, "Development of Low Cost Powder Metallurgy Process of Titanium Alloy Products," *Nippon Steel Technical Report*, No. 85, pp. 77~81.
- (3) Park, N. K., Hong, J. K., Kim, J. H. and Yeom, J. T., 2009, "Characteristics of Titanium Powder Metallurgy Manufacturing," *Machine and Materials*, Vol. 21, No. 2, pp. 137~145.
- (4) Moxson, V. S., Senkov, O. N. and Froes, F. H., 2000, "Innovations in Titanium Powder Processing," *Journal of the Minerals*, Vol. 52, No. 5, pp. 24~26.
- (5) Moxson, V. S., Duz, V. A., ADMA Products Inc., 2005, "The Direct Powder Rolling Process for Producing Titanium and Titanium Alloy Foils, Sheets, and Plates," *Materials Science & Technology 2005 Conference and Exhibition*, pp. 2968~2976.
- (6) Lee S.-H., Song G.-H., Lee, S.-J. and Kim B.-M., 2011, "Study on the improved accuracy of strip profile using numerical formula model in continuous cold rolling with 6-high mill," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, No. 8, pp. 2101~2109.
- (7) Gurson, A. L., 1977, "Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I - Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 99, No. 1, pp. 2~15.