

마이크로 · 메조성형의 트라이볼로지

堂田 邦明¹ · 牧野 武彦¹

Tribology of Micro-meso Forming

K. Dohda, T. Makino

1. 서 론

마이크로·메조 이란, 매크로와 마이크로의 중간을 말하며 마이크로·메조 성형은 적어도 두 개의 기본 치수가 1mm이하의 부품의 성형가공을 대상으로 한다.

최근 통신기기나 의료기기가 미소화됨에 따라 마이크로·메조 스케일 부품의 수요가 높아지고 있다[1, 2]. 마이크로·메조 가공은 Table 1에 보이는 것 같이 마이크로의 수법으로 어디까지 작은 부품을 가공하는 지를 과제로 하고 있다. 종래의 마이크로 스케일 가공법을 쓴 경우, 치수효과에 의해 정밀도와 재현성에서 문제가 발생한다. Fig. 1에 보이는 바와 같이 일반적으로 가공 상대정밀도(공차/부품 사이즈)는 스케일이 작아질수록 낮아지기 때문이다.

마이크로·메조 가공은 마이크로 스케일의 가공에 필적하는 상대정밀도를 목표로 하고 재료의 미세조직제어, 트라이볼로지 거동의 제어, 가공기술의 고정밀도화 등의 세 가지의 고도화를 융합시켜서 달성하는 기술 분야이다. 미세 삼차원 형상에서는 체적이 차지하는 표면적의 비율이 높아지므로 특히 성형가공에 있어서는 트라이볼로지의 중요성이 증가한다.

마이크로·메조 성형에서의 치수효과는 피가공체의 사이즈를 작게 해도 그것에 따라서 작게 할 수 없는 요소가 있어서 소성변형과 마찰거동 문제가 나타난다. 즉 소성변형의 치수효과는 피가공

Table 1 Characteristics of part size and forming methods

Type	Forming	Structure	Working materials	Shape
Macro	existing	continuum	metal	3D
Micro·Meso	developed	poly crystal	metal	3D
Micro	Semi-conductor	Single crystal	Si, metal	2D
Nano	Arc, sputtering	Atom Molecule	C, Si, metal oxide	1·2·3D

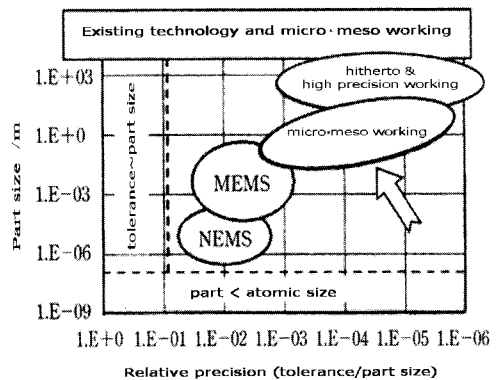


Fig. 1 Part size and working tolerance[1]

체의 조직을 상대적으로 작게 할 수 없는 것의 의해 일어나는 것이다. 연속체로서의 소성변형이

1.名古屋工業大學大学院技能工學專攻 (宇)466-8555 名古屋市昭和區御器所町, Japan
 - 技術解説: 塑性の加工(日本 塑性加工 學會誌) 第49卷 第 570号 pp. 28-32 (2008.7)
 - 번역자: 박정서(자유번역가), 김인수(금오공과대학교 신소재시스템공학부, 교수)

아니고 결정소성의 불연속성이 그대로 외형에도 나타난다.

피가공재 마다 결정의 크기와 방향이 달라지면 변형후의 형상이 따로따로 되어 나타난다. 한편, 마찰거동의 치수 효과는 피가공재 및 공구 등 작게 할 경우 기존의 기계 가공법을 사용하면 양자의 표면현상을 바꿔게 되어 다른 어려운 문제가 발생할 수가 있다. 또 성형시의 마찰은 소성변형 거동에 강하게 영향을 준다.

그래서 본 원고에서는 마이크로·메조 성형의 트라이블로지에 대하여 필자 등의 최근의 연구 결과를 종합하여 연구의 현황을 소개하고 앞으로의 연구 방향에 대하여 제시하였다.

2. 마찰의 평가

마이크로·메조 스케일에서는 마찰을 해석하고, 평가의 하는 범을 매크로 스케일로 할 수가 있는 가라고 생각할 수 있다. 먼저 종래의 매크로 스케일의 마찰 평가법을 그대로 스케일다운 하여 적용한 연구를 소개하고 다음에 마이크로·메조 스케일의 마찰평가에 대하여 설명하였다.

마찰계수의 측정에는 마찰력과 수직력을 직접 측정하여 마찰계수를 구하는 경우와 피가공재의 형상변화에서 간접적으로 구하는 방법이 있다. 전자는 판재를 마찰하는[3] 소성가공 simulate type 에서와 같이 한정된 기하학적 조건과 가공 하중을 줄 수 있는 경우만 가능하다. 후자는 FEM 해석과 비교에 의한 단조를 포함한 광범위한 가공에 적용 가능하지만, 마찰계수가 일정 하다고 하는 가정조건과 견적을 잡는 등, 정밀도에는 문제가 있다. 마이크로·메조 스케일에서는 이 사이즈에서 직접적인 측정은 곤란하며 간접적인 측정이 중심이 되고 있다.

Tiesler 등[4]은 윤활류를 사용한 더블 컵 마찰 시험에 의해 시험편 크기가 작아지게 되면 마찰계수가 커지게 된다는 것을 보였다(Fig. 2). 이 원인으로서 Fig. 3 에 보이는 것과 같이 사이즈가 작아지면 공구와 피가공재의 접촉면적 안에 윤활유가 배출되는 면적비율이 크게 되고 공구와 피가공재의 윤활제 유출면에서 직접 접촉하기 때문에 마찰이 높게 된다고 설명하였다.

Engel[5]은 다시 마이크로·메조 스케일 마찰의 치수효과에 대하여 윤활류를 쓴 경우에 고찰하고 발전시켰다. Fig. 4 에 보이는 것과 같이 사이즈가

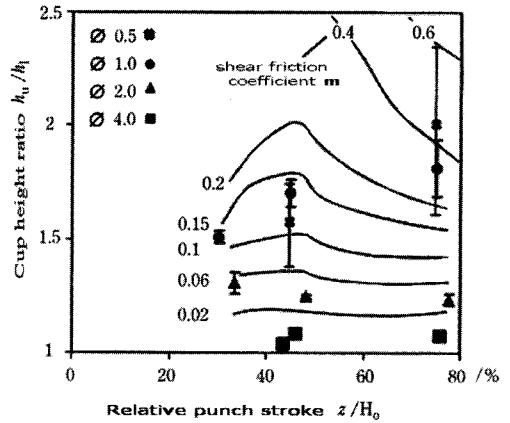


Fig. 2 Shear friction coefficient of double cup test[4]

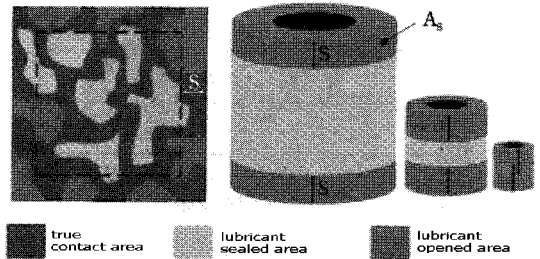


Fig. 3 Model of contact state[4]

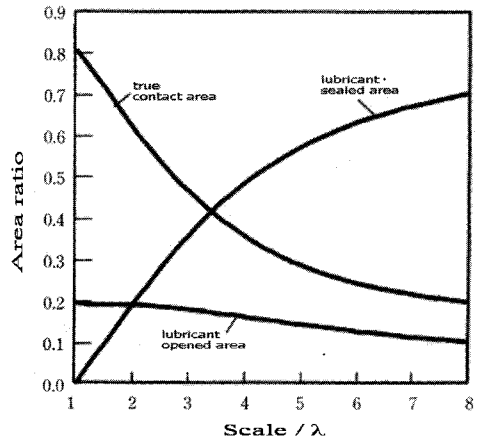


Fig. 4 Dimension effect of true contact area[5]

작아진다(스케일이 작아진다)고 생각하면 진접촉면의 비율이 커지게 되는 것을 보이고 있다.

Krishnan 등[6]은 전방압출에 의한 마이크로 pin의 결정립도와 pin 형상의 관계 및 결정피막 다이에 적용을 검토하였다. 압출 때의 가공력에서 마찰계수를 구하려고 할 때 마찰계수가 가공 중에

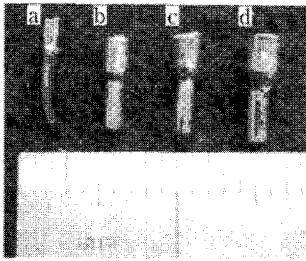


Fig. 5 Bending of small pin after extrusion[6]

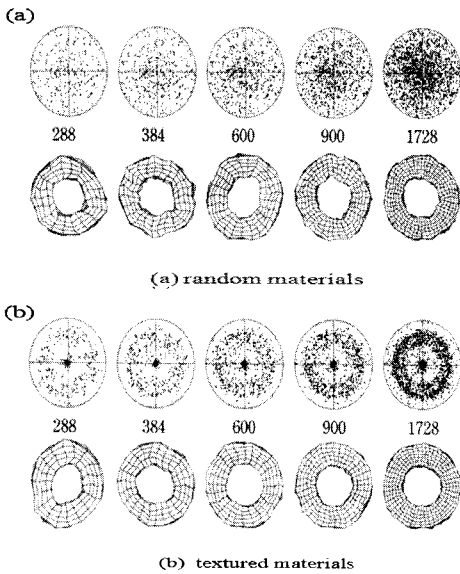


Fig. 6 Crystalline deformation analysis of compression ring shape(number means elements, 50% reduction)[10]

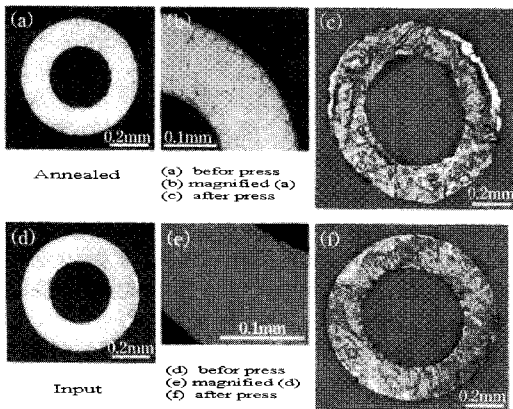


Fig. 7 Experimental result of copper compression ring[10]

일정하다고 가정하는 것은 불완전하다 라는 것을 보여 주고 있다. 실험적으로는 작은 소재 pin 이 압출 할 때에 만곡하는 것을 Fig. 5 에 보여 주고 이 원인이 조직의 차이에 의한 소성변형이 다른 가 아니면 마찰 상태가 다른가를 분명하게 하기 위해, 소성변형을 동반하지 않는 마찰 시험 방법인 Kolsky bar 법에 의해 황동 철강간의 마찰계수를 구했다. 드라이 상태에서는 마찰계수가 제품 사이즈와 결정립경에 의해 변화하지 않는 것을 보이고[7], pin 만곡의 원인이 결정립경의 차이에서 일어난다는 소성변형거동에 의한 것 이라고 결론을 내렸다.

마찰계수를 알아보기 위한 방법으로 링 압축 시험은 잘 알려지고 있다[8]. 이것은 통상 연속체가공중의 마찰계수를 일정하다고 가정하여 압축에 의한 내경의 변화율에서 마찰계수를 구하는 것이다. Messner 등[9]은 사이즈가 다른 원주를 압축시험하고 재료특성을 써서 FEM 계산한 노모그라프를 이용하여 외경 1mm 의 링 압축 시험으로 마찰계수를 구했다. 드라이 상태에서는 링의 크기에 의존하지 않고 마찰계수가 거의 일정하다고 알려 졌다. 그러나 마이크로·메조 스케일 재료의 비등방적인 변형거동을 고려하면 연속체 근사에 의한 형상을 정량할 필요가 있다고 생각된다.

저자 등[10]은 외경 0.6mm 의 동 링의 압축과 유한요소 다결정 모델(FEPM)[11]에 의한 결정소성 해석을 써서 변형거동에 있어서 치수효과를 알아보았다. Fig. 6 은 압축전의 결정방위 분포와 압축 후의 링 형상을 보여준다. (a)는 결정방위가 랜덤한 경우, (b)는 집합 조직을 갖는 경우이다. 결정입경(요소수에 대응하는)과 결정방위를 여러 가지 바꾼 경우의 50% 압축 후의 링 형상을 공구·재료면간의 마찰을 영으로 가정하여 예측 한 결과

(1) 재료 중의 결정립의 수가 어느 정도 작아지면 변형의 비등방성이 강해진다는 것

(2) 직전가공에 의해 결정 방위를 집합시키면 비등방성이 나타나는 결정립 수가 적게 되는 것을 알아냈다. 또 이 결과는 PTFE시트와 고밀정도의 윤활류를 써서 되도록 마찰을 적게 한 실험에 의한 동 링의 압축후의 형상 Fig. 7에 비교하여 모순되지 않는 것을 확인하였다.

성형시의 형상변화를 이용하여 간접적으로 마찰계수를 구하는 방법으로 소성변형의 치수 효과의 영향이 커지게 된다고 생각되어 이 점을 검토해 볼 필요가 있었다. Fig. 8 에 보이는 것과 같

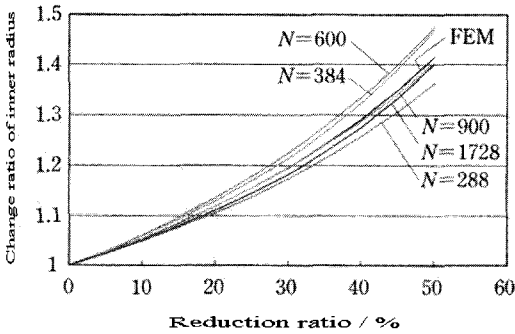


Fig. 8 Crystalline deformation analysis by nomograph (N: number of elements)

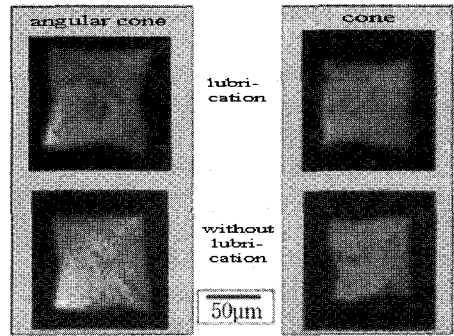


Fig.10 Direct observation of surface shape during metal working[13]

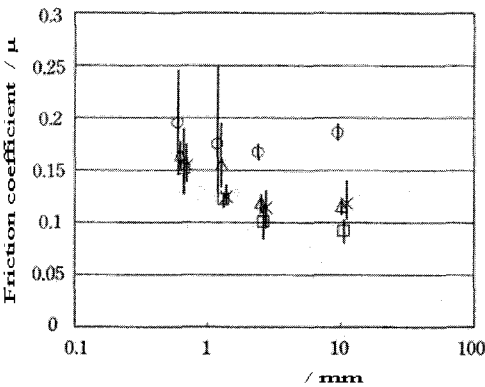


Fig. 9 Friction coefficient in compression ring test[12]

이 결정의 소성을 고려하여 작성된 노모그래프는 결정소성을 고려 하지 않는 경우 값의 $\pm 5\%$ 에 들어가고 있는 것이 분명하게 됐다. 여기서는 이 결과를 이용하여 결정의 소성을 고려 하지 않는 종래의 노모그래프를 써서 마찰계수의 산출을 시도하였다[12]. Fig. 9 에 그 결과를 나타냈다. 윤활유를 쓸 경우 링 사이즈가 작아지며 마찰계수는 커졌다. 드라이한 상태의 평균 마찰계수는 사이즈가 작아져도 변화하지 않고 윤활유를 썼을 경우의 최소 사이즈인 경우에도 거의 같았다. 마찰계수는 사이즈가 작아질 수록 따로따로 떨어짐이 커지게 되어 공구의 표면조도의 영향이 크고, 조도가 클수록 마찰 계수가 커지는 것을 알았다. 여기서 마이크로·메조 성형에서 마찰거동이 보이는 치수효과는 마찰계수가 분산하기 때문에 일어난 것이라고 결론 지었다.

윤활유를 썼을 경우와 드라이 상태에서는 링 외경 0.6mm 의 마찰계수평균치가 거의 같다는 것으로 접촉면의 직접접촉이 이 스케일의 마찰을 결정하고 있다고 추측할 수 있다. 이 경우 접촉면의 표면형상의 불균일이 그대로 마찰거동에 반영하여 마찰 평가 결과에 큰 따로따로 떨어짐 현상을 나타내는 것으로 된다. 그래서 따로따로 떨어짐의 정량화가 구해지게 된다. 다음에는 표면형상에 착안한 연구를 하였다.

3. 표면 형상

마이크로·메조 스케일에서는 접촉면 전체의 마찰상태를 평균적으로 나타내는 것보다는 국소적인 정보가 필요하게 된다.

Engel 등 [13]은 투명한 공구를 이용하여 압축가공 중의 피가공재의 표면형상을 직접 관찰했다. 선단부에 평면을 갖는 각추대형과 날카롭게 원추체형의 변형상태를 윤활유를 쓸 경우와 드라이한 경우에 대하여 조사했다(Fig. 10). Fig. 10 에서 중앙에 검게 보여지는 것이 피가공재 가공구에 직접 접촉하지 않는 부분이다. 윤활유를 써서 각추대를 압축했을 경우 윤활제 밀봉 면이 커지는 것을 알게 된다. 다시 상세하게 SEM 관찰을 하면(Fig. 11), 변형의 초기에 추체의 측면에 생성한 slip 선이 공구 접촉 후에도 남아 있으며 진접촉면이라 하여도 마이크로 스케일에서 보면 표면에는 요철이 존재하고 있는 것을 알 수 있다.

Jeon 등[14]은 Fig. 12 와 같이 공구표면의 조도를 기하학적 요철로써 표현한 공구를 상접한 링 압축의 FEM 해석을 하고 표면조도와 마찰계수의 관계를 조사했다. Barbier 등[15]도 접촉계면을 다루

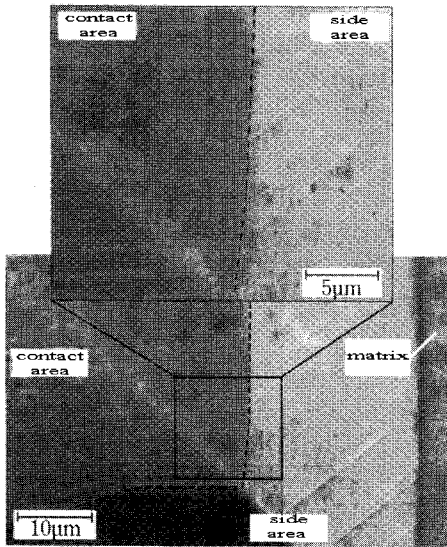


Fig.11 SEM image of the top of compressed cone shape [13]



Fig. 12 FEM analysis of considered surface shape [14]

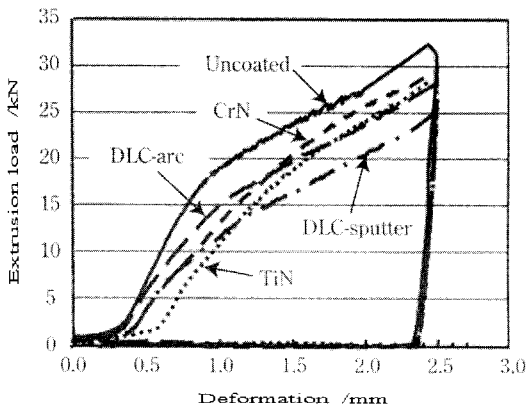


Fig. 13 Effect of hard coating on extrusion load [16]

는 것을 중시하여 공구와 피가공재의 표면의 요철을 FEM 해석하고 마찰력에 가장 영향을 주는 기하학적 인자를 명확히 하였다. 이들의 연구는 접촉계면의 표면상태의 변화에 얼마만큼 마찰이 따라따로 떨어짐이 생기게 하는가를 FEM Level에서 다루는 방법을 보여주고 있다.

4. 윤활

접촉상태의 따라따로 떨어짐이 마찰의 따라따로 떨어짐의 원인이라는 것을 생각하면 공구재료와 피가공편의 직접 접촉을 막는 방법에 마찰상태의 안정화 가능성을 찾아 낼 수가 있다. 이것을 마이크로 스케일과 같이 경질 피막의 적용에 바람직하다.

Krishnan 등[6]은 황동재의 마이크로 압출 공구에 대표적인 여러 가지 경질 피막을 사용하면 가공력을 저하시킨다는 것을 보여주고 있다. Takatsuji 등[16]도 경질피막을 적용한 공구를 쓴 알루미늄(A1050)의 마이크로 압출시험을 해서 Fig. 13과 같은 경질피막의 마찰력 저감 효과를 보았다.

Fuentes 등[17]은 WC-C 막이 알루미늄 박의 드라이 가공시의 응착을 막는 효과가 있다는 것을 알아냈으며 마이크로 성형시에 유용하다는 것을 알아냈다.

5. 새로운 접근

마이크로·메조 성형의 트라이볼로지를 생각하기 위해서는 같은 스케일의 소성변형거동을 분명하게 하는 것이 필요하다는 것을 2장에 기재하였다. 그러나 소성변형거동만을 FEM 계산으로 다룰 수가 있으나 공구와의 접촉면의 경계조건은 종래의 FEM 계산과 같다. 말할 것도 없이 성형 중에는 소성변형과 마찰이 동시에 일어나고 있으며 이것들을 같이 다루는 수법의 개발이 필요하다.

저자 등은 결정피막의 적용을 생각하여 분자동역학 계산을 사용한 마찰계면의 연구도 진행하고 있다. 이 방법으로는 모델화의 대상을 원자 크기까지 작게 하는 것으로 계면 가까이에서 피가공재의 변형거동과 공구-피가공재의 계면 그 자체를 직접적으로 다루기 때문에 마찰계면의 물리현상의 예측이 필요한 경우에 유효하다. 압연 구조를 갖는 각경질피막의 (100)면상의 금속원자 및 가벼운 원소 원자와 피가공재의 금속원자 간의 상호작용을 제일 원리 전자 상태계산의 energy 값에서 도출하여 원자간 potential을 작성하였다. 이 potential을 써서 소성가공을 simulate한 분자동역학 계산을 하였다. Fig. 14(a)는 대표적인 경질피막인 TiC를 공구로 한 경우의 드로잉 가공시의 피가공재의 변형거동을 보이고 있다. 좌에서 우로 피가공재가 이동하여 드로잉이 가해지고 있다. 계

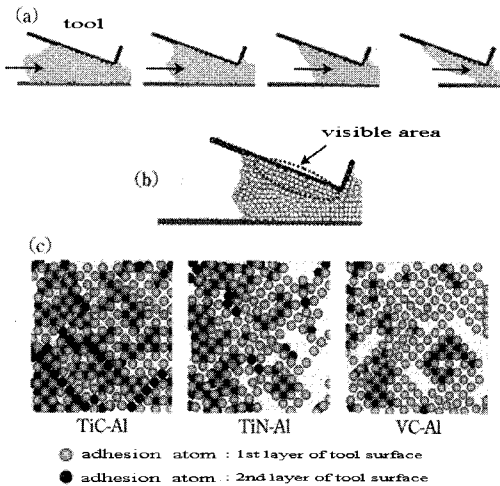


Fig.14 MD analysis result of annealing adhesion on tool surface [18]

면을 관찰하기 위해서 (b)와 같이 계면에 수직방향에서 공구에 응착한 피가공재 원자만을 본 그림을 (c)에 보였다. 경질 피막과 피가공재의 짝맞추기에 의해 공구표면의 피가공재 원자의 응착의 정도가 다른 것을 알 수 있다. TiC-Al 에서는 공구 표면에 2 층 간에 응착 하는 원자수가 많음에 반해 VC-Al 에서는 그것이 적었다. 이것은 공구 표면에 응착하는 1 층의 원자배열의 차이에 기인 한다고 생각된다.

6. 앞으로의 방향

마이크로·매조 성형의 트라이볼로지에서는 피가공재의 사이즈가 작아지는 것에 의해서 마찰상태의 흩어져 있는 것이 문제가 된다. 이 따로 떨어지는 것은 성형의 정도(불균일)와 재형성(따로 떨어짐)에 따라 크게 악영향을 미친다. 소성변형의 결정 소성해석과 등방성 재료를 쓴 마찰시험을 하면 따로 떨어짐을 표현하는 마이크로·매조 성형의 마찰의 평가와 모델화가 가능하게 된다고 생각된다.

그러나 마찰의 따로따로 떨어짐을 감소하는 것을 할 수가 없다. 이것은 고정밀도를 갖는 미세공구의 제작이 가장 유효하다고 생각된다. 마이크로·매조 성형을 대상으로 한 윤활제의 개발 및 공구에의 경질피막의 적용 등도 필요하다. 또 공구와 피가공재의 접촉계면측을 다룰 수 있는 해석수법도 바람직하다. 이것에는 계면의 원자간 상호

작용을 고려한 분자동력학 해석 등의 새로운 시도가 필요하다.

마이크로·매조 가공은 재료의 미시조직제어, 계면 거동의 제어, 가공기술의 고정도화의 3 가지의 영역을 고도로 융합시켜서 비로소 달성되는 기술 분야라는 것을 재차 강조하여 금후의 발전을 기대하고 싶다.

본 논문은 한국소성가공학회와 일본소성가공학회의 번역 게재 협정에 의하여 저자의 허락을 생략하고 번역하여 게재합니다.

참 고 문 헌

- [1] WTEC, 2005, WTEC Panel Report on International assessment of Research and development in micro manufacturing Final Report, World Techonogy Evaluation Center (WTEC) Inc., Boston, USA, pp. 1~7.(<http://www.Wtec.org/micromfg/report/Micro-report.pdf>)
- [2] M. Geigerl, M. Kleine, R. Eckstein, N. Tieslerl, U. Engel, 2001, Microforming, vol. 50, No. 2, pp. 445~462.
- [3] K. Dohda, 1993, Tribo-test for Forming Processes, J. Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 34, No. 393, pp. 1091~1099.
- [4] N. Tiesler, U. Engel, 2000, Proc. 8th ICMF(eds. M. Pietrzyk, J. Kusiak, J. Majta, P. Hartley, I. Pillinger), Taylor and Francis, Krakow, Poland, pp. 355~360.
- [5] U. Engel, 2006, Tribology in Microforming, Wear, Vol. 260, No. 3, pp. 265~273.
- [6] N. Krishnan, J. Cao, K. Dohda, 2007, Study of the Size Effect on Friction Conditions in Micro-extrusion: Part 1-Micro-Extrusion Experiments and Analysis, Trans. ASME, J. Manuf. Sci. Eng., Vol. 129, No. 4, pp. 669~676.
- [7] L. Mori, N. Krishnan, J. Cao, H. d. Espinosa, 2007, Study of the Size Effects and Friction Conditions in Micro-extrusion. Part II: Size Effect in Dynamic Friction for Brass-steel Pairs, Vol. 129, pp. 677~689.
- [8] H. Sofuoglu, J. Rasty, 1999, On the Measurement of Friction Coefficient Utilizing the Ring Compression Test, Tribol. Int., Vol. 32, No. 6, pp. 327~335.
- [9] A. Messner, U. Engel, R. Kals, F. Vollertsen, 1994,

- Size Effect in the FE-simulation of Micro-Forming Process, *J. Mater. Process. Technol.* Vol. 45, No. 1-4, pp. 371~376.
- [10] T. Makino, K. Dohda, A. Ishitani, C. Endo, 2007, Proc. 2th Int. Conf. MicroManuf. (ICOMM 2007), Greenville, USA, pp. 207~212.
- [11] K. Takahashi, 1999, Plasticity in polycrystalline, Corona Co., pp. 24~51.
- [12] K. Dohda, T. Makino, Kasahara, J. Cao, N. Mahayotsanun, 2007, proc. 58th Jpn. Joint. Conf. Technol. Plast., JSTP, Sapporo, Japan, pp. 379~380.
- [13] U. Engel, S. Weidel, 2007, Proc. 3rd Int. Conf. Tribol. Manuf. Process. (ICTMP 2007), CEMEF MINES ParisTech, Yokohama, Japan, pp. 143~150.
- [14] J. Jeon, A. N. Bramley, 2000, A Friction Model for Microforming, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 33, No. 1-2, pp. 125~129.
- [15] C. Barbier, S. Thiboud, P. Picart, J. Chambert, 2007, Proc. 9th Int. Conf. Numer. Methods Ind. Form. Process. (NUMIFORM '07), Porto, Portugal, pp. 437~442.
- [16] N. Takatsuji, K. Dohda, T. Makino, T. Yoshimura, 2007, Proc. 3rd Int. Conf. Tribol. Manuf. Process. (ICTMP 2007), CEMEF MINES ParisTech, Yokohama, Japan, pp. 157~162.
- [17] G. G. Fuentes, M. J. D. de Cerio, R. Rodriguez, J. C. Avelar-Batista, E. Spain, J. Housden, Q. Yi, 2006, Investigation on the Sliding of Aluminium Thin Foils against PVD-coated Carbide Forming-Tools during Micro-forming, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 177, No. 1-3, pp. 644~648.
- [18] T. Makino, K. Dohda, Nishigawa, 2008, proc. 59th Jpn. Joint. Conf. Technol. Plast., JSTP, Hiroshima, Japan, pp. 369~370.