

소성가공의 표면손상과 미세표면형상의 가공에 관한 연구

池 浩¹

Micro-Damage and Micro-Shape Making on Surface using by Plasticity

H. Ike

1. 서 론

일반적으로 트라이볼로지(tribology)란 용어는 마찰, 윤활 및 마모가 포함된 종합과학이다. 필자는 그 뜻을 확대하여 접촉, 마찰, 윤활, 마모 및 표면손상을 포함한 종합과학으로 생각한다. 이 가운데서 필자가 주로 다루어 온 것은 접촉, 마찰, 피가공재의 표면손상 정도 등을 한정하여 다루어 왔다.

필자의 연구 주제는 판재성형에 있어서 표면손상과 소성가공에서 마찰기구를 기초로 하여 표면돌기의 눌러 찌그러짐, 미세표면형상의 가공 및 제어로 변천해 갔다. 그 과정을 설명하면 소성가공의 마찰을 생각하며 가공에 따른 접촉률의 변화를 파악할 필요가 있었으며 이에 따라 발전해 온 대변형 탄소성 유한요소해석을 적용하여 미세표면돌기의 평활화 과정을 해석하였다. 그러나 미세표면돌기의 눌러 찌그러짐을 일종의 미세한 소성가공으로 생각하면 미세표면형상의 만들기와의 제어라는 일반적인 과제로 발전하였다.

표면손상에서 트라이볼로지와 미세표면형상의 가공은 이론적으로 서로 관계가 있다고 생각되며, 실제로 마이크로한 윤활작용과 연관성이 있다. 뿐만 아니라 일반적인 소성가공의 트라이볼로지 현상은 계면에서 나노미터 크기의 생성, 변형, 파괴 등을 종합한 현상이라고 생각하고 있다. 그 실상을 충분히 해석하고 이용하는 단계에는 아직 도달하지 못하고 있으나 표면 거칠기를 고려하는 차원을 넘어서 재료의 미세 표면형상의 성질을 해석하고 제어하려는 연구 양상을 이 논문에서 소개하고자 한다.

2. 소성가공에 있어서 접힘에 의한 표면손상과 윤활

2.1 표면손상의 분류와 발생기구

필자가 소속된 연구실(이화학연구소 변형공학연구실 吉田清太 주임연구원)에서는 판재의 프레스 가공에 관한 연구를 매우 활발하게 하고 있다. 그래서 재료연구에 참가한 자로서 흥미 있는 현상을 여러 가지 해보고 있으나 판재의 프레스가공에 있어서 표면손상의 발생기구라는 문제에 가장 흥미를 가졌다. 일반적으로 주름과 분할이 발생하여 성형한계에 영향을 주면 이것이 실제로 가공을 계속할 수 없는 조건이 되는 때도 있다. 특히 표면 마무리가 매우 중요한 제품에 대하여는 그 경향이 더욱 강하다. 그리고 종래에는 “표면손상이 발생하면 마찰이 커진다. 마찰력 또는 마찰계수의 측정을 하면 표면손상의 발생상태는 추정이 된다” 라고 생각하였으나 이에 대한 반증이라 고나 할까 “마찰의 대소와 관계없이 표면손상이 성형한계를 결정하는 것도 있기 때문에 현상을 잘 보아야 할 것이다” 라는 주장도 있다.

이들을 현상 면에서 정리하면 필연적으로 표면손상의 종류와 기구의 분류가 우선되어야 한다. 판재와 금형을 여러 가지 재료로 조합하여 건조상태에서 접힘 실험을 수행함으로써 전형적인 현상을 파악하려고 한 결과 1)판 표면이 손상 마모한다, 2)금형 표면이 손상 마모한다, 3)판재와 금형 모두 표면이 손상 마모한다, 4)거의 손상이 되지 않는다 라는 네 개의 형태로 분류하였다[1~3]. 재료의 경도가 이 현상을 지배하는 외에 응착성 또는 친화성 인자, 그리고 알루미늄첨동 재료 등이

1. (獨)理化學研究所 351-0198 和光市廣澤 2-1 Japan
기술해설: 塑性과 加工 (日本塑性加工學會誌) 제46권 제539호 pp. 1116~1120 (2005-12)

보이는 재료 자신의 마모도 인자 등으로 위의 경향을 이해할 수 있다. 접힘 계면에서의 변형과 부착 현상에 대하여는 소성가공 이외의 일반적 연구의 성과[4~5]를 참고하여야 할 것이다. 일반적으로 금형 마모를 피하기 위하여 금형재료가 판재보다 더 높은 경도를 갖는 재료를 선택하여 사용하고 있으나 그 외 조건을 취하면 금형재가 아주 많이 손상되는 것이 관찰되었다. 이것은 금형재 쪽이 경도가 높다고 되어 있는 경우에도 피가공물의 응착물은 가공경화에 의하여 경도가 초기 보다 3 배 정도 증가 되는 가능성이 있어 잠재적으로 금형 마모를 진행 시키는 인자로 되기 때문이라고 생각된다.

표면손상 중에서 체일 문제가 되는 판재의 굽힘 현상의 원인을 추적하면 “마이크로급 부착물이 발생하여 공구면으로 이동하여 붙어 있다가 판재와 공구가 일체가 되어 응착되고 강한 응착력이 작용할 때 칼끝과 같은 역할을 하므로서 판재를 긁어 일으키는 현상” 이라고 알려져 있다. 그러나 지금까지 표면손상 발생 초기 단계의 기술적 검토가 이루어지지 않았다. 그러나 미시적으로 표면손상을 피할 수 없기 때문에 거시적 손상 판정기준을 일반적으로 1 μ m Rz 정도 크기로 정하여 손상의 발전과정에 특히 관심을 가지고 연구하였다. 공구의 강도가 표면손상에 매우 영향을 준다는 것을 알려져 있다 [6]. 또 강도가 높은 경우(부착물이 성장함에 따라 누르는 힘이 급증하는 경우)는 손상이 일방적으로 발전이 되지만 강도가 낮은 경우(부착물의 성장에 따라 누르는 힘의 증가가 작은 경우 정하중적 상태로 누름) 부착물의 탈락 현상이 발생하여 비교적 정상적인 프로세스가 되기 쉽다[6]. 이 판재의 굽힘 과정을 일부 연구자들이 “기본적으로 건조한 윤활조건에서 대규모 손상이 발생하며, 대규모 손상 발생을 윤활이 어떻게 억제하고 있는가” 라는 관점으로 성장과정을 검토하였다[7~9]. 또 불량 판정의 기준은 제품의 용도, 판재나 금형재의 성질, 표면 마무리 등 각종 인자에 의존하고 한편에서는 표면 손상도 수치적으로는 크지 않아도 시각적으로 뚜렷한 것, 국소적으로 나타나는 것, 공학적으로 어디까지 허용한계로 할까 하는 것, 또는 허용한계 내에서 수용할 수 있는 기술 등도 검토할 과제로 남아 있다.

또 이 방면의 연구 성과는 국제학술회의에 보고한 것으로[10~11], 국제학술잡지에 보고가 충분치 못하였다는 것은 필자 자신의 한계이기도 하며, 소성가공 연구가 일본 내에서 어느 정도 폐쇄적으로 발전하고 있다는 시대의 영향도 있다고 생각한다. 표면손상은

그 후 1990년대 전반부 까지 아연계 표면처리 강판의 표면문제에 초점을 맞추어 연구가 진행되었다. 아연계 표면처리 강판은 적층형의 복합재료로서 기판재료의 성질과 표면층의 성질의 차이, 그리고 가공시의 밀착성 등 복잡한 특성을 나타낸다. 필자의 관점로서는 마찰, 굽힘으로 인한 손상(뜯음, 후레이킹)과 자유변형에 의한 손상(바운다링)을 구별하여 각각에 알맞은 실험법으로 평가해야 한다고 제안했다[12]. 또 판재의 성형성이라는 관점에서 표면처리 강판의 슬립성(마찰)을 평가하려면[13] 굽힘변형의 저항 등과 분리가 필요하다고 생각한다. 따라서 종합적으로 평가하는 방법과 분석적으로 평가하는 방법으로 양면적으로 평가하는 것이 필요하다고 생각된다[14]. 1990년대 후반에 이르러 종래와 같이“표면 손상의 발생, 성장과정 연구, 표면손상의 발생 초기 상태가 어떤 모습인가” 라는 연구 방향이었다. 주사전자현미경(SEM)으로 손상의 발생기점을 추적해 보았지만 전자의 가장자리 비충전 때문에 콘트라스트가 낮게 관찰되는 경향이 있었다. 이에 AFM을 이용하여 경계윤활 면에서의 굽힘 형태와 표면손상의 발생 초기 형태를 동정하므로써 얻은 결과를 그림 1[15]에 나타냈다. 여기서 피가공재의 표면 마무리 방향과 실험 중에 공구가 피가공재의 상대 슬립방향이 직교하고 있기 때문에 어느 쪽의 기원에 의한 것인지 명확하게 구별할 수 있다. 굽힘 방향으로 생긴 단의 높이는 수 nm 로써, 일반적으로 어떠한 표면손상이 생기고 있다고는 판단되지 않지만, 이미 거기에 표면손상이 발생되는 나노크기의 굽힘이 생기고 있다. 이것을 고려하면 모든 접촉, 접힘 현상에서 거시적인 표면손상으로 발전되어 가는 일종의 나노크기의 표면 손상이 존재하고 있으며 그것이 발전하는가 억제되는가에 따라서 “발생했다, 발생하지 않았다”라고 평가하는 것이 좋다고 생각된다.

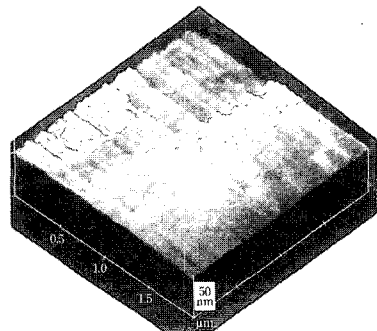


그림 1 경계윤활에서 나노미터 크기의 표면손상 (AFM 상)[15]

2.2 계면의 직접관찰과 윤활기구의 검토

표면손상 발생기구의 연구는 필연적으로 접촉계면에서 무엇이 일어나고 있는가를 사후 관찰하는 것이 아니고 동시관찰해야 한다고 생각된다. 그 하나가 유리 공구를 이용한 접촉계면의 관찰[16]과 제 3장에서 기술한 압력을 감지하는 박막을 응용한 윤활제의 압력 측정[16]이다. 전자에 있어서는 계면의 오목한 부분에 말려든 공기가 어떤 역할을 할 것이라는 것을 암시하고, 후자는 부피 변형이 있어 초기에 윤활제가 정적으로 흘러 나올 수 있다는 것을 알아야 한다. 또 이 연구는 롤에 유리 공구와 CCD 카메라를 묻어 넣어 압연 계면을 직접 관찰하여 압연윤활 기구를 검토한다[17]는 야심적인 연구로 발전하였다. 이 방법은 현상을 동적으로 관찰하여 해석에 어려움이 따르지만 방법적으로는 아주 유망한 분야로 생각된다.

3. 표면 요철의 변형과 부피변형과의 관계[18]

피가공재의 미세돌기 접촉률이 부하에 따라 어떻게 변화하는가 하는 것이 소성가공에서 마찰문제를 생각하는데 기본적인 항목이다. 일반적으로 피가공재의 표면 거칠기가 공구보다 크기 때문에 접촉의 기하학적형상을 주기적인 단면모델로 나타내면 그림 2와 같다고 생각한다. 여기서 접촉률 R 은 b/a 로 정의하였다. 수직력 및 접선력상승에 따른 접촉률의 변화를 종래는 Wanheim과 Bay 등이 제안한 슬립선장이론으로 해석하고 있다[19]. 그러나 여기서는 돌기의 간격이 부하의 증대에 따라서 변화하지 않는다고 가정하였다. 이것은 폐쇄단조와 같은 상황을 암시적으로 가정한 특수한 상황이라고 말할 수 있으나, 일반적으로 소성가공에서는 압축응력이 작용하는 방향에 대하여 수직인 방향으로 늘어남(확대)이 생기는 일이 많다. 역사적[20]으로 표면돌기의 눌러 찌그러지는 해석을 무한히 넓어지는 단일돌기의 끝부분 변형 해석을 이용하여 시작하였으며 여기에 복수 돌기의 상호작용을 고려한 것이 Wanheim 등의 공적이라 말할 수 있다. 이 때 부피 소성변형의 영향을 고려하여 1988년경에 탄소성 유한요소법에 의한 필자 등[21~24]과 Wilson[25]이 상계법으로 또 Sutcliffe 등[26]이 슬립선장방법으로 미세표면돌기의 눌러 찌그러짐에 미치는 부피변형의 영향을 계산한 것이 흥미있는 사실이다. 지금까지의 결과로 보면

성공적인 측면이 있다. 또 참고문헌[20]의 그림 1에 보인 것과 같이 앞으로의 발전 방향은 표면 요철이 있는 피가공재의 소성가공을 전체 변형과 관련 지어 해석하는 것이 있겠지만 연구할 분야가 아직 많이 남아 있다고 할 수 있다.

그래서 표면요철의 눌러 찌그러지는 것에 관한 저자 등의 연구결과를 일부 소개한다. 그림 3[24](마찰 없음)에 보이는 바와 같이 부피 소성변형(횡방향으로 자유로운 확대)할 때 접촉면압이 낮은 단계에서 접촉률이 증대하는 것을 알 수 있다. 한편, Wanheim 등과 같이 횡방향의 부피 소성변형을 억제한다면 같은 크기의 접촉률을 얻는데 필요한 평균 접촉면압은 아주 높아진다. 그러나 완전히 눌러 찌그러짐(접촉률 100%)을 실현하여 평활면을 얻는 것을 시도하면 부피 변형을 구속할 필요가 있다. 부피 소성변형이 있었을 경우 최고 접촉률은 85%정도에서 정지하고 있으나 부피 변형을 구속한 경우, 외관 접촉면압을 7 배에서 10 배정도 가해야 100%의 접촉률을 얻을 수 있다.

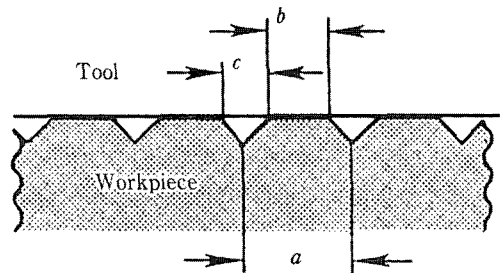


그림 2 접촉률 $R=b/a$ 의 정의

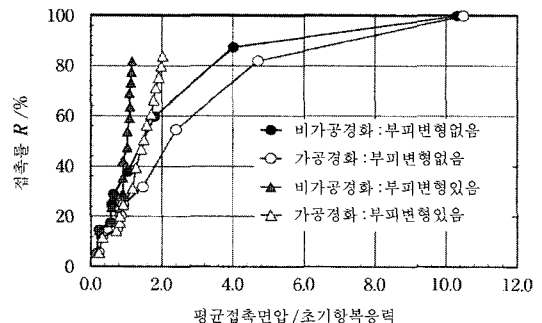


그림 3 접촉률의 변화에 미치는 외관 접촉면압과 부피 소성변형의 영향[24]

4. 미세표면형상의 가공

4.1 표면요철의 눌러 찌그러짐 현상을 이용한 접촉면압 측정

통상은 표면손상은 피해야 할 대상이며 연구개발은 그 방지가 목적으로 초기표면의 유지가 기본적인 목표가 된다. 한편 접촉에 의한 무한 미세요철이 변화되어 평활화되는 것은 바람직한 현상이며 다시 이것을 발전 시키면 소성가공에 의한 미세표면형상의 가공이라는 기술이 된다. 본래 피가공재 표면에 적당한 마이크로 상태를 제공하는 기술로 트라이볼로지적인 관점으로 출발하였던 연구이지만[29,30] 최근에 소성가공에 있어서의 표면변형의 기구에도 미세요철의 기능적인 요소를 이용하고자 하는 관심이 높아지고 있다.

최근에 다룬 것으로 그림 3[24]에서 접촉률을 측정하면 근본적인 접촉면압의 최대값(그것도 소성가공면의 접촉면압이기 때문에 시판되는 압력감지 박판 보다 높은 압력)이 측정 되고 있는 것이 아닌가라는 문제가 발생한다. 앞장의 해석 결과로 봐서 부피 소성변형이 생기면 일정 접촉면압에도 눌러 찌그러짐이 급속하게 진행되기 때문에 이것을 억제 하는 것과 요철면에서 슬립이 생기면 이것도 접촉률의 증대에 영향을 미치므로 이것을 억제하는 것이 필요하다. 그리고 시스템을 미세화하여 얇은 판으로 사용하면 응용할 수 있는 영역이 넓어진다고 생각된다. 실제로 그림 5[31]에 보인 바와 같은 단면구조를 갖는 압력감지 박판을 개발했다. 여기서 압력감지 박판은 3 층 구조를 하고 있으며, 중앙의 요철 판(재질 : 알루미늄 동, 황동 등)이 주된 역할을 한다.

여기서 뒤의 배면 박판 (재질 : 스테인리스 강, STS 304)에 의해 슬립이 억제되므로 부피 소성변형은 매우 억제 된다. 또 요철면에 접하는 대향 박판(재질 : 스테인리스 강, STS 304)은 요철 박판을 덮어 이것에 의해 상대 슬립을 억제하는 동시에 경면과 같은 표면재를 사용하여 결면 마무리되어 있어 후공정의 접촉률 측정을 용이하게 하고 광학적으로 자동계측을 가능하게 했다. 측정 가능한 외관 접촉면압은 50~700MPa 정도이다.

그래서 요철 판을 만드는 것이 미세가공의 연구의 시작이며 일반적인 질삭으로 이것을 만드는 것은 비효율적 이기 때문에 소성가공을 이용하면 롤에 나선상의 도랑을 파고, 이것을 회전시켜 전사하는 일종의 전조에 의해 만들 수 있다[31]. 접

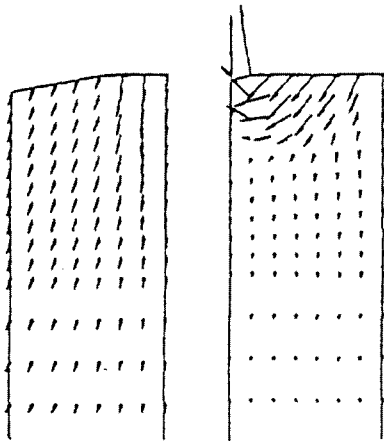


그림 4 재료 흐름의 비교(썩기의 1/2 만 표시) 좌 : 부피 소성변형 있음, 우 : 부피 소성변형 없음[22]

이것을 그림 4[22]와 같이 재료흐름으로 설명하면 부피 변형이 있는 경우 재료 흐름은 비교적 균일하다. 접촉률이 85%가 되면 그 이상의 표면돌기의 찌그러짐이 없이 부피의 눌러 찌그러짐이 진행되는 것을 의미하고 있다. 한편 부피 변형을 구속하면 표면에서 면(깊은)부분에서는 탄성변형하는 것만으로 돌기부분의 소성적 눌러 찌그러짐은 굽은 부위에서 솟아 오르고, 즉 접촉률이 반드시 높아지게 된다. 이것이 접촉률 증가의 기본기구이다. 다만 썩기의 각도가 날카롭고 굽은 부위가 좁을 경우 양측 두 경사면이 뒤따르는 공간을 봉쇄한다(단 만나는 경계면은 잠재적으로는 남는다)라는 변형 모드를 제안하였다[23,27]. 이 형식은 장래 부식이나 균열의 발생원으로 되기 때문에 바람직하지 못할 경우가 있다.

이와 같이 미세표면돌기의 변형이 구속조건에 영향을 크게 받는 것은 소성가공이 경계조건에 크게 좌우되는 재료 흐름을 제어하는 기술이라는 것을 말하고 있다. 그 뒤에 Wilson 은 이들의 실험결과를 간단하게 하는 법칙을 써서 부피 소성변형이 있을 경우의 마찰현상을 평판압연을 이용하여 해석하였다[28]. 한편 필자는 눌러 찌그러짐도 하나의 표면가공으로 생각하여 미세표면형상의 가공을 연구하였다. 이와 같이 어떤 현상을 어느 방향으로 접근 하고 예측하느냐 하는 것은 각각의 연구자가 갖고 있는 연구 취향에 의존하기 때문이다.

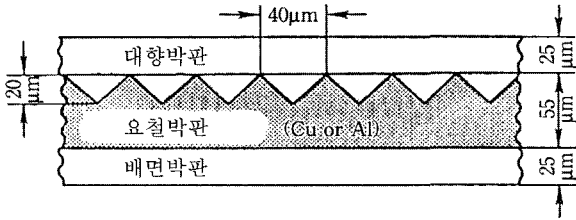


그림 5 압력 감지 박판의 단면구조 (길이 방향은 같음) [31]

촉률과 접촉면압의 관계가 기대대로 상당히 좋은 감도를 나타냈으나 이것을 공구현미경으로 접촉율을 측정할 결과 측정하는데 많은 노력을 필요하기 때문에 단면에서의 계측(1 차원)에서는 사실상 사용할 수 없다. 그러나 자동화하면 2 차원도 계속 측정 가능하도록 만든 것이 광학적 측정 시스템이다. 적당한 조명을 주면서 CCD 카메라로부터 얻어진 요철 판 반사광의 강도가 접촉률에 관계 할 것이라고 생각했다[31]. 이것도 기대대로 거의 선형의 관계가 얻어지며 2 차원 계측 또한 가능하다. 그저 요철 판을 제형성 좋게 대량으로 만드는 것이 실험실 수준으로 어렵고 실용화한 사례가 적기 때문에 아쉬운 점이 있다. 또 본 연구에서 말하는 요철의 찌그러짐으로 접촉면압을 측정 하는 방법은 약간 거시적인 크기의 1 차원측정에 쓰이고 있었다[32]. 필자는 이에 대하여 이미 알고 있었지만 연구가 하기 어렵다고 판단 된다. 그러나 선행연구 결과를 자세히 사전조사 하는 것은 상식이라고 생각한다

4.2 소성가공에 의한 미세 표면형상의 형성법

미세표면형상의 가공은 미시적으로 요부와 철부를 만드는 것이다. 실제로 화폐를 압인으로 만드는 것과 같이 반전형상의 공구를 사용하여 정확히 가공한다면 반대형상의 가공도 원리적으로는 가능하다[33]. 다만 일반적으로 생산성이 높은 압연에 의해 이것을 만들려고 하면 롤과 판재와의 사이의 거시적 슬립으로 전사하여 만든다는 본질적인 문제가 생기기 때문에 압하율의 높은 곳에서 정확한 전사는 불가능 하다[34]. 또 슬립량은 기본적으로 거시적 변형에 의해서 결정된다. 미세표면 형상을 만드는데 미치는 영향을 고려하면 슬립량은 형상의 미세도가 진행하는데 따라 변화한다[35~36].

그런데 요부와 철부의 형성은 닳는 것 같지만 그렇지 않다. 요부의 형성 즉 오목함을 형성하도록 미시적 돌기공구를 눌러 넣으면 공구면도 피가공재 표면과의 밀착하여 공구형상이 전사되는 것이 그 나름대로 가능하다. 그러나 철부를 형성하는 것은 주변부에 작용해서 간접적으로 솟아올라 일어나는 것으로 돌기를 누름으로서 계곡부가 솟아오르는 것도 기본적으로 같은 기구로 생각된다. 또 주목할 정도로 미세 정밀도를 높이려면 그림 6 에 보이는 것과 같이 압자의 밀어넣을 때 정밀한 공구와 피가공재의 밀착을 달성하지 않으면 안되며 피가공재 표면 거칠기의 요부가 공구면에 밀착하기에는 요철의 계곡부의 솟아오름이 필요하다. 따라서 표면 거칠음을 고려한 제품의 만들 경우에는 나노미터 크기의 압자를 밀어 넣을 때 나타나는 솟아오름이 기본 변형 양식이라 말할 수 있다.

4.3 평면의 전사

평행면 전사는 공구 접선방향의 운동을 이용할 수가 있다. 이것은 아주 좋은 평면전사 수단이며 한번 접촉면의 수직방향으로 면압을 가했을 때 보다 현저한 향상이 일어난다[37]. 이것은 마찰 전단응력에 의하여 표면층에 집중적인 전단변형이 생기므로 눌러 찌그러짐이 촉진되기 때문으로 생각된다. 다만 액체 윤활제가 존재하면 마이크로 체적수축에 대한 저항이 생겨서 평활화는 진행이 되지 않는다. 다시금 이 원리를 이용하여 연질박막을 증착한 시험편을 평활화하면 기본재의 계곡부가 표면층의 유동에 의하여 매몰되는 작용을 하므로 공구면과 동등 또는 동등 이상의 표면 거칠기 까지 평활화 할 수 있고 소성가공에 의하여 나노미터급의 평활면을 얻을 수 있다[38].

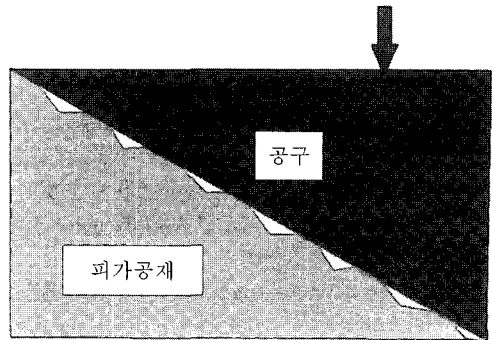
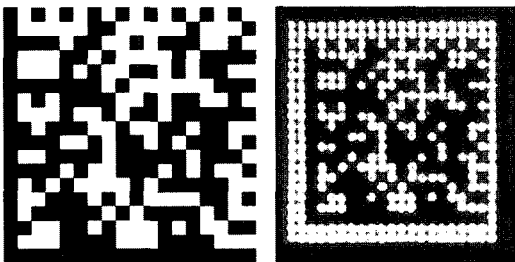


그림 6 나노미터 크기의 전사 특성

4.4 미세표면 형상의 나노가공

소성가공에 의한 미세표면 형상을 나노미터 크기의 3 차원 형상으로 전사하는 것을 시도했다. 공구를 밀어 넣어 삼각추형의 구덩이가 생기게 하려면 거기에 피가공재를 역으로 밀어 올려서 돌기를 만들어야 한다. 이 같은 종류의 가공에서는 마이크로 크기의 계면 슬립을 피할 수는 없으며 상대슬립이 작으면 숫구쳐 오름이 부족하고 상대 슬립이 과잉이면 형상 부정이 생기는 경향에 있어 기술적으로 곤란한 문제가 생긴다[39]. 한 가지 해결법으로는 마크로한 성형과 마이크로한 성형을 분리하여 2 단계로 가공하는 일이었다[40].



(a)

(b)

그림 7 (a) 이화학연구소에서 제작한 6 문자 2 차원 바코드(Data Matrix, ECC 200)로 변환한 심볼 영상, (b) 핀으로 타각한 요철판의 CCD 카메라 영상

4.5 미세표면형상의 응용

재료표면에 직접 바코드를 붙여서 사용하지 않고 소성가공으로 만들어진 미세표면 형상 용도로 보존성이나 내환경성을 고려하고 재료표면에 필요한 정보를 직접 각인하여 (이것을 직접 마킹이라고 한다) 분별, 리사이클링, 폐기하는데 응용할 수 있다고 생각된다. 정보의 용량 또는 밀도가 높은 것에서는 2 차원 바코드가 적당하다고 생각되고 있다. 그림 7(a)는 이화학연구소의 6 문자를 2 차원 바코드(data matrix, ECC 200)로 변환하여 격자상의 심볼 화상(18×18 셀)으로 만든 예이다

이것을 금속 인쇄기로 불리는 가공기를 이용하여 경면 마무리한 스테인리스 강판(STS 304)위에 덮고 한 본의 첩으로 하얀 셀에 해당하는 각 위치를 쫓아 타각한 후 영상 촬영한 예를 그림 7(b)에 나타냈다. 이 가공법은 쇄기를 이용하여 눌러 찌그러지게 하는 방법과 유사하다[41]. 타각의 속도는 한 점당 약 25ms 이며 절삭법에 비해 고속이

며 소성가공 특성을 잘 살린 결과라고 생각된다. (a)의 1 셀이 (b)의 1 타각 점에 해당한다. 원래 정방형 셀이 원형으로 바뀌었으나 조명방법, 조명강도 및 확대률을 조절하여 직접 마킹하면 2 차원 바코드 리더로 문제 없이 읽을 수 있다. 평균 핏치는 120 μ m 이고 틀의 안정영역이라 칭하는 부위의 높이는 2.64mm 이다. 이와 같이 미세요철 정보 전달기능도 실용적으로 이용될 가능성이 있으며 앞으로 많은 발전이 기대된다

5. 결 론

필자의 연구는 트라이블로지에 기초하여 표면의 미세형상 가공이 특수한 형태로 발전해왔다고 생각한다. 미세표면 형상의 가공기술을 나노미터 크기로 들어가면 트라이블로지와 미세표면형상 가공과 매우 연관성이 깊다고 확신하고 있으며 아직까지 연구가 진행 중에 있다. 물론 다양한 형태의 상호작용이 있으므로 표면층의 성질해석이 기대된다. 앞으로 피가공재의 코팅이 하나의 중요한 연구분야로서 관심이 증가할 수 있다. 마지막으로 이상의 연구를 하는데 협조와 조언을 하여 주신 여러분에게 지면상을 통하여 많은 감사를 드린다. 여기서 그림 1 은 참고문헌[15], 그림 4 는 참고문헌[22]에서 전제하였으며 Elsevier 사의 허락을 받은 것이다

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

참 고 문 헌

- [1] 池浩, 高田正和, 宮内访雄, 吉田清太: 理研報告 52(1976), 195~209.
- [2] 池浩, 宮内邦雄, 吉田清太: 上同, 53(1978), 1~17.
- [3] 池浩: 塑性과加工, 20-227(1979), 1094~1100.
- [4] T. Sasada, S. Norse, H. Moshina : Trans. ASME J. Lubr. Technol., 103 (1981), 195~202.
- [5] 加藤康司: 日本金屬學會會報, 22-4(1983), 302~311.
- [6] H. Ike, K. Yoshida, M. Murakawa : Wear, 72(1981), 143~155.
- [7] 池浩: 塑性과加工, 24-265(1983), 179~186.
- [8] 池浩: 上同, 24-272(1983), 933~941.
- [9] 池浩: 上同, 27-300(1986), 63~71.

- [10] H. Ike, K. Yoshida : Proc.3rd Int. Colloquium on Lubrication in metal Working, ed. by Bartz,W. J. & Wolff, J.,(1982), Paper No.18., Technische Akademie Esslingen.
- [11] H. Ike : Metal Transfer and Galling in Metallic Systems, ed .by Merchant, H.D.& Bhansali, K.J(1987), 27-62, TMS-AIME.
- [12] 小野寺建次, 池浩: 塑性과加工, 26-291(1985), 416~423.
- [13] Y. Shimada, H. Ike, et al: Proc.17th I.D.D.R.G (1992),16~23.
- [14] 池浩: 塑性과加工, 35-397(1994), 145~151.
- [15] H. Ike : Wear, 224(1999), 73~88.
- [16] 池浩: 塑性과加工, 29-328(1988), 471~477.
- [17] H. Ike, K. Tsuji, M. Takase : Wear, 252 (2002), 48~62.
- [18] H. Ike : J.Mater.Process.Technol.,138(2003),250~255.
- [19] T. Wanheim, N. Bay, A. S. Petersen : Wear, 28 (1974), 251~258.
- [20] 池浩: 塑性과加工, 42-485(2001), 487~492.
- [21] A. Makinouchi, H. Ike, M. Murakawa, N. Koga : Wear, 128(1988),109~122.
- [22] H. Ike, A. Makinouch, : ibid., 140(1990), 17~30.
- [23] H. Ike, :Contact Mechanics, edited by Raous, M. et al.,(1995), 275-286, Plenum.
- [24] 池浩, 牧野内昭武: 塑性과加工, 32-366 (1991), 848~855.
- [25] W. R. D. Wilson, S. Sheu : Int.J.Mech.Sci., 30-7 (1988), 475~489.
- [26] M. P. F. Sutcliffe : ibid., 30-11(1988), 847~868.
- [27] 濟木弘行, 脇岡勝昭:機論 C, 46-402 (1980), 217~226.
- [28] W. R. D. Wilson, D.-F Chang : Trans. ASME, J. Tribol., 118-1(1996), 83~89.
- [29] H. Ike : J. Mater. Process. Technol., 60 (1996), 363~368.
- [30] H. Ike : Proc. Int. Tribol. Conf. Yokohama 1995, 3(1996), 1743~1748.
- [31] 池浩: 塑性과加工, 33-383 (1992), 1394~1399.
- [32] 松原茂夫, 工藤英明:上同, 32-364 (1991), 589~596.
- [33] 池浩:上同, 36-411 (1995), 369~376.
- [34] 池浩, 錢文軍:上同, 36-411 (1995), 377~383.
- [35] H. Ike, M. Plancak : J. Mater. Process. Technol., 80-81 (1988), 101~107.
- [36] H. Ike, M. Plancak : Advanced Technology of Plasticity 1999, Ed. M.Geiger, (1999), 907~912, Springer.
- [37] 池浩, 井上純: 塑性과加工, 30-336 (1989), 97~102.
- [38] H. Ike : Wear, 258 (2005), 1404~1410.
- [39] H. Ike, S. Kuriyama, A. Kohno : Advanced Technology of Plasticity 2002, 1(2002), 385-390, JSTP.
- [40] H. Ike, M. Plancak : Metal Forming 2000, wd. By M. Pietrzyk, et al., (2000), 63-69, Balkema, Rotterdam.
- [41] 池浩: 塑性과加工, 30-338 (1989), 321~326.