

단조와 윤활에 관한 연구

北村 憲彦¹

A study on the Forging and Lubrication

K. Kitamura

1. 윤활/단조 기술

단조에 있어서 형에 의한 구속이 많을 수록 정수압성분도 높아지기 때문에 복잡 형상은 부가적 전단 변형을 일으켜 면압이 올라가기 쉽다. 뿐만 아니라 복잡 형상 단조는 소성변형 발열이나 마찰 발열도 크다. 그리고 재료의 표면적 확대비가 큰 것도 복잡 형상 단조의 특징이다. 윤활제가 공구와 재료 사이에 특히 공급되지 않아 고압 고온 상태가 되어 표면적이 확대되어 윤활막을 얇게 만든다. 매우 가혹한 상황에서 마찰을 낮추기 위해 열접착하거나 비정상 마모를 방지 해야 한다. 이러한 공정을 잘 이용하면 제품의 표면 품질이 양호하고 급형 수명도 연장된다. 이와 같이 윤활은 고정밀도 및 제품의 안정한 양산 목적으로 고려해야 할 기초적 기술의 하나라고 말할 수 있다[1~3].

그래서 필요한 것은 우선 양호한 윤활상태에 있어서의 윤활마찰과 재료유동과의 관계를 정리하는 것이다. 다음은 어떠한 조건으로 엄밀하게 전개 되는가를 예시하고 형과 공정설계자에게 전해주는 것도 중요하다. 현재의 정보를 정리하고 윤활기구의 체계화와 정량적 모델의 검증도 중요하지만 이루어 지지않고 있다. 한편 공업적으로 고성능 윤활제나 윤활기술의 개발에 항상 요구되고 있다. 그러나 윤활기구의 규명이 불완전한 현 상황하에서는 개발에 필요한 직접 쓸모 있는 정보는 제공 되지 않고 있다. 따라서 당면의 개발에서는 실용적인 윤활 시험법도 필요하다. 이상과 같은 과정에서 필자의 연구 테마는 1) 용기후방

압출에서 재료유동과 윤활조건 2) 고성능 냉간 단조유 개발 3) 온간 단조 용 저융점 급 윤활기술 개발 4) 열접착방지 성능평가 기술에 관하여 설명하였다.

2. 용기의 후방 압출 가공의 재료유동과 윤활조건

용기의 후방 압출 가공(후방 천공가공)은 부가가치의 높은 가공형식이다. 그러나 이 가공은 쉽지 않은 기술이다. 즉 대변형이며 높은 면압과 국부적인 고온[4]과 용기 내벽의 현저한 표면적 확대비[5~6] 등의 엄격한 가공조건이 포함되어 있다. 이 가공의 본질적으로 비정상 가공 특성을 포함하고 있기 때문에 상세한 재료유동이나 윤활(마찰)과의 관련은 알려져 있지 않았다. 그래서 본 연구에서는 가공조건(압출비, 펀치 선단각형상, 펀치 돔 반경, 펀치 압출 깊이, 재료의 가공경화특성)의 차이에 의한 재료유동의 변화를 자오단면격자법에 의해 측정해 보았다. 그림1에 후방 압출 용기의 표면적 확대비 R_s 분포의 일례를 표시하였다. 외벽 WE에서는 R_s 는 거의 압출비 $R=2.83$ 와 같은 값, 즉 $\epsilon_0=0$ 의 평면 전신변형과 같은 결과라고 말할 수 있다. 내벽 WI에서는 $R_s=4\sim 40$ 로서 바닥에 가까워 짐에 따라서 급증 하고 있다. 내면에서는 $\epsilon_f = -\ln R_s$ 이기 때문에 외견상의 $\ln R$ 보다 상당히 큰 것으로 된다. 내저면 BI에서는 $R_s \approx 3$ (이 예의 편차는 평평하기 때문에) 펀치 값에서는 거의 균일 압축하고 있다고 판단된다. BI는 $R_s=3$ 에서 WI로 갑자기 $R_s=40$ 이 되고 13배나 되는 불연속이

1. 名古屋工業大學大学院 製造領域 (우)466-8555 名古屋市 昭和區 御器所町, Japan
기술해설: 塑性과 加工(日本塑性加工學會誌) 제46권 제539호 pp. 1132~1136(2005-12)

일어나 이것이 가공의 독특한 현상이다.

그림2에 압출비에 대한 내벽부의 R_s 의 차이를 요약했다. 여기서 l : 행정, 펀치 형상($90-\alpha$: 펀치 반각 r_p : 펀치 돔 반경), O재는 열접착하여 천천히 시킴, F재는 열접착하지 않고 천천히 시킨 재이다. 이 그림은 피마자 기름의 예이며 $R=4$ 에서 R_s 가 최소값을 나타냈다. 윤활의 관점에서는 오히려 조금 큰 듯한 압출비 쪽이 최적이라 판단된다. 또한 큰 R 이 심한 가공이라 하는 것은 그림2에서 말할 수 있으나 역으로 R 가 작을 때에도 R_s 는 증대하고 조건에 따라 심하게 된다. R 가 작을 때에는 펀치 단면에 따른 재료유동이 작기 때문에 벽의 재료가 부족하지 않으면서 펀치 각에서는 상당히 크게 유동하고 전체의 R_s 를 증가시키고 있기 때문이다.

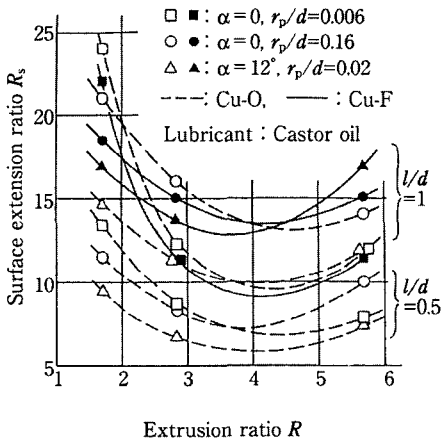


그림 1 후방압출의 용기의 표면적 확대비 R_s 분포의 예[7]

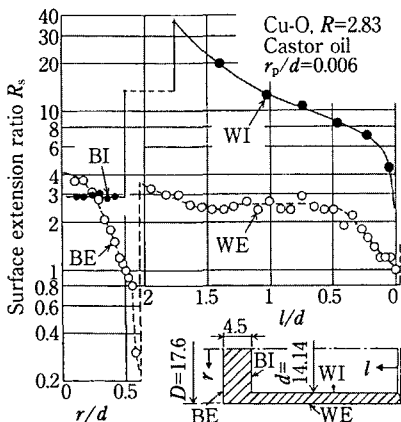


그림 2 압출비에 대한 표면적확대비 R_s 의 변화[7]

이와 같이 가공도(압출비)가 클수록 단순하여 가공조건이 까다롭지 않으며 하중과 R_s 가 최소로 되는 R 는 동시에 일어나지 않는 것에 주의가 필요하다.

이상의 예를 다시 해석하기 위해서 간단한 상계 속도장을 가정하여 정상과 비정상의 두 가지 경우의 재료속도와 표면적 확대비의 Aa 를 넣어 용기 바닥에서 내벽면에 이행하는 때에 생기는 불연속적인 표면적확대를 역산하여 마찰 윤활과의 관계를 추정하였다. 그 결과 윤활의 견지에서 최적가공조건 이를 테면 표면적확대를 최소화 하는 펀치 선단형상은 압출비, 제품용기의 깊이, 재료의 가공경화성 등을 정리하였다[8].

3. 고성능냉간단조용 윤활류의 개발

3.1 일반 탄소강용의 고성능 냉간단조용 윤활류[9]

일반 탄소강의 윤활문제를 공업적인 방법으로 빠르게 해결할 수 있는 방법은 윤활제나 윤활 방법의 고성능화이다. 지금의 개발 품목 과제는 비누인산염피막에 대신하는 고성능 윤활유의 개발이었다. 비누인산화피막은 강의 냉간단조에 필수적인 윤활법으로서 채택되고 있다. 이 처리설비에 의한 확대 공간이 필요하며 처리시간이 길어지고 폐액 처리 등의 문제가 생기었다. 한편 윤활류는 간편하게 사용 되지만 화성피막에 비해서 성능이 낮기 때문에 난가공에는 적용되지 않았다.

우선 인산에스테르계 첨가제 배합류 성능을 조사해 나가는 동안에 불순물로서 무기인산을 함유한 것 가운데에 뛰어난 열접착 방지성능이 있는 것을 알게 되었다. 또 그들의 복합계에서의 상승효과도 확인 되었다. 다시금 가열처리를 하면 시약의 인산이 품고 있던 물이 소실하고 그때까지 유산에는 친하지 않았던 친수성의 인산이 긴사슬의 인산에스테르와 약한 수소결합으로 서로 결합되고 유상에 들어가는 것도 알았다.

그림 3에 그들의 분자 회합체 모식도를 표시한 것이다. 그래서 인산에스테르와 인산을 계통적으로 조합하여 해석하였다. 그림 4에 인산에스테르와 인산의 반을 모델 표시했다. 강력한 인산철의 피복과 강한 흡착성이 있는 긴사슬의 인산에스테르와의 상호작용이 종래의 산화피막처리에 다가 가는 고성능을 윤활류에 가져왔다. 그 결과 윤활류의 적용범위를 간단하게 넓힐 수가 있었다.

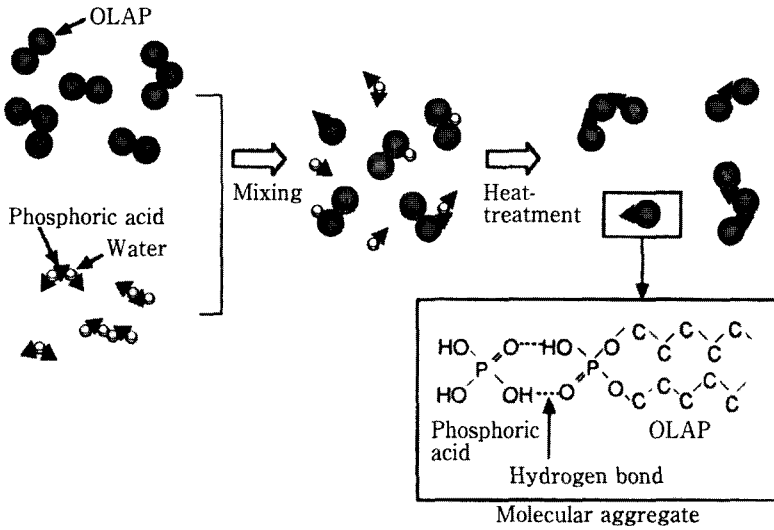


그림 3 인산에스텔과 인산의 분자회합의 모식도[9]

그림 5 에 개발한 윤활류를 적용한 냉간 단조품 예를 나타낸 것이다. 이를테면 용접부의 어느 파이프 모양 부품을 가공하는데 비누인산염피막이었던 것을 개발 윤활류로 바꾸어 순조롭게 제품을 생산하고 있다.

1990 년의 발표논문[10]이 최초의 사외 발표이고 그 후에는 많은 논문이 발표되었다. 전처리 예열 빌렛 또는 예비 윤활유에 의해 생성되는 인산철 얇은 반응피막의 효과 및 후방천공 용기내면의 반응피막분포의 상세에 대하여도 뒤에 발표하였다[11]. 윤활류 개발의 사고범이나 윤활류의 성능 개발에 관한 내용의 발표는 윤활제 메이커의 가능성과 자질을 증대하였다.

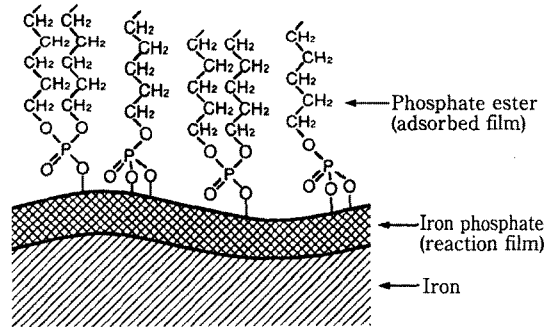


그림 4 인산에스텔과 인산에 의한 반응모델[9]

3.2 스텐리스강용의 윤활유의 개발[12]

일반 탄소강 윤활유 개발법을 스텐리스강 용 윤활제의 개발에도 적용하였다.

각종 첨가제 배합류의 열접착 방지 성능을 조사해 보면 그림 6 에 표시 한 것 같이 인계와 염소계에 단독 첨가에도 종래 이상의 성능을 나타내는 것을 찾아내었다. 이것들의 복합계에서 또 다시 성능이 향상되고 고철의 화성피막과 같은 성능을 나타내는 것도 알았다. 표면분석 결과와 성능을 비교하여 그림 7 과 같은 작용기구를 추정했다. 염소와 인의 복합 첨가제에 있어서는 우선 염소계 첨가제에 의해 크롬 산화물이 부식되어 그 직후 철의 반응에 관해서는 염소계 보다 인계

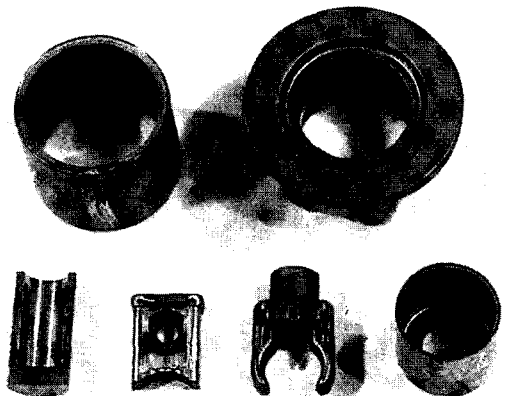


그림 5 개발 윤활류를 적용한 냉간단조품의 예[9]

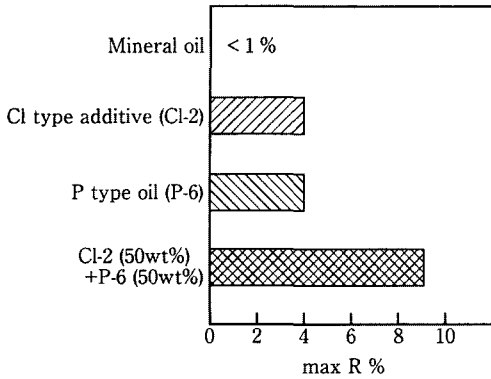


그림 6 Taper Plug 통하는 시험에 의한 각종 첨가제의 성능평가(maxR : 열접착이 생기지 않는 최대감면율)[10]

첨가제가 성능이 뛰어나며 최종적으로는 인(P)계 피막만이 표면을 덮고 있었다. 이 작용기구를 이용하여 종래보다도 뚜렷하게 고성능인 스테인리스강용 윤활유 개발을 실용화 하였다. 이를테면 인발속도 30~50% 증가 등 생산성 향상에 기여하고 있다. 또 스테인리스강인 경우는 후술의 불을 통과하는 시험에서는 조건이 너무 엄격하여 유체의 차를 식별 할 수 없었기 때문에 Taper Plug 라고 불리는 시험을 고안하여 평가했다.

4. 온간 단조용 저융점 B₂O₃ 유리 윤활기술의 개발[13]

온간 단조에는 고강도 고정도품의 단조의 가능성은 있으나 적당한 윤활제가 없다는 문제가 있다. 저융점 유리에 착안한 오사카대학의 사가선생이 선구적인 연구(1975년)를 하고 있었다[14]. 저융점 유리는 마찰감소, 열접착 방지, 열부하의 감소 등의 뛰어난 특성을 가지며 흰색이다. 산화납의 성능은 좋으나 환경 문제가 있으며, 봉사는 고온에서 강과의 부식성이 너무 강하였다. 고체 윤활제와의 혼합도 시도 했으나 목표로 하는 성능은 나오지 않는다는 예비검토결과가 있었다. 다른 산화물과의 혼합계도 있으나 간단하지 않았다.

결국 소정의 온도에서 적당한 점도가 되는 삼산화이붕소 B₂O₃ 로 실험을 성공하였다. 또 깊은 상의 성형은 온간단조 장점을 살리게 하는 부품도 생각했으나 원래 윤활조건이 까다로웠다. 그래서 가공품에 윤활제가 부족 하지 않기 위해서 빌렛에 윤활제를 도포하는 방식을 취했다. 이상과

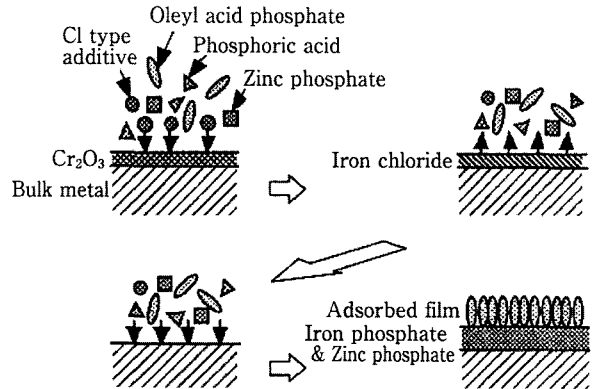


그림 7 스테인리스 강 표면에서의 각종 첨가제의 반응기구[10].

같이 단독의 B₂O₃ 유리 윤활의 실용성을 향상시켜서 쓸 수 있도록 하는 것이 이 개발팀의 과제가 됐다. 그 결과 적당한 가열조건이나 도포조건을 고르면 B₂O₃ 는 단조 후에 간단하게 물로 떨어뜨려 빌렛을 산화에서 보호하고 마치 냉간단조 후의 제품표면과 같이 금속광택이 난다고 하는 점에도 흥미로운 것이었다. 금형에서 X 선 잔류응력의 변화를 측정하기 위해서 연속단조를 하였다. B₂O₃ 가 저마찰로 단열성에도 뛰어나고 금형의 수명 향상에도 기대되었다.

그러나 실용적으로 쓰기에는 많은 문제가 있었다. 마찰면 온도나 재료유동은 같은 모양이거나 균일하지는 않으며 시간과 더불어 급속하게 변화한다. B₂O₃는 단조에 있어서 적당한 점도를 갖는 범위의 온도역이 넓다고는 말할 수 없다. 냉각하기 쉬운 콘테이너 측에는 길게 붙어서 큰 마찰이 생기기도 한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 과제를 정해서 하나씩 실험함으로써 조건을 찾아보았다. 빌렛의 가열조건, 유리분말의 pre-coating 방법 도포량제어, 다시 금형에 도포하는 윤활제와의 적절한 조합 등을 결정해 갔다. 추정하는 조건을 표1에 나타냈다. 이 유리윤활기술을 적용하여 약 800℃의 온간단조에 의해 용수철강 깊은 각통용 기상제품의 생산에 성공하였다.

그림 8 에 단조품의 개관을 표시 하였고 왼쪽이 빌렛이며 오른쪽이 제품이다.

5. 열접착 방지 성능평가기술의 개발

위의 3 의 냉간단조용 윤활유의 개발에 있어서 윤활제를 평가하는 적당한 시험법이 없었다. 기초

표 1 B₂O₃ 유리 윤활 추진조건[13]

빌렛 윤활	B ₂ O ₃ 분말 2단계 도포법 봉입윤활압의 도포법 병용
편치 윤활	금속 비누 또는 H ₃ BO ₃ 비누의 수분산체 도포
컨테이너 윤활	금속 비누의 수분산체 도포
단조온도	700~850(고주파 가열)

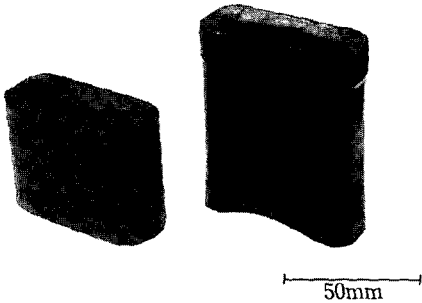


그림 8 고강도 용수철강 깊은 구멍각통용기의 온간후방압출[13]

적인 마찰시험은 가공의 실재를 충분하게 시물레이션하지 않고 한편 소성가공규모시험[15]은 가격이 높아 쉽고 수많은 시험을 실제 하기에는 말지 않았다. 그래서 고안된 것이 볼을 이용하는 시험법[16]이다. 그림 9 에 시험법의 개략을 표시한다. 열접착이 생기지 않는 최대단면 감소율이나 열접착 개시위치, 하중 등 으로 성능을 평가한다. 빌렛의 재질이나 압입속도에 의해도 결과는 영향을 받기 때문에 이를 테면 최고 성능을 보이게 하는 비누인산염피막에 대해서 상대적으로 판정한다. 열접착 방지와 저마찰의 양성이 모두 높은 뛰어난 특성을 가지고 있다고 평가된다.

이것에 의해 윤활유 열접착 방지성능을 종래보다도 값이 싸고 간단하게 평가할 수 있다. 지금까지 여러 회사의 윤활제 제조사, 부품 제조사나 공공의 시험기관에도 활용되고 있다. 간편하게 평가되는 것을 살려서 라인으로 사용중의 윤활류를 빼어 내어 평가시험 하는 것으로 가공수와 윤활유 성능을 조사해 첨가제 추가시점이나 윤활유 갱신에도 쓸 수 있게 되었다.

그러나 이 시험방법 결과에는 물리적인 의미가 불명한 부분도 많고 윤활조건도 잘 알지 못하기 때문에 해석을 계속하고 있다. 그림 10 에 자오단면 면적자법에 의한 볼 시험 재료유동을 표시한 것

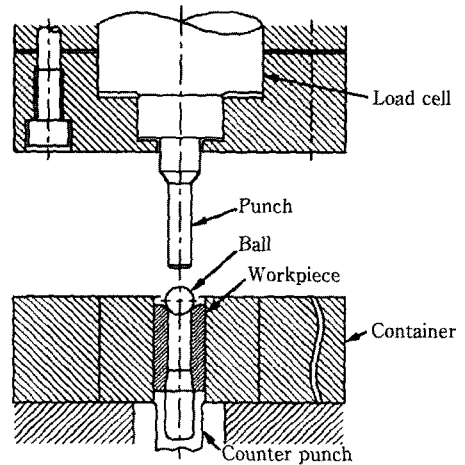


그림 9 볼 통과시험[16]

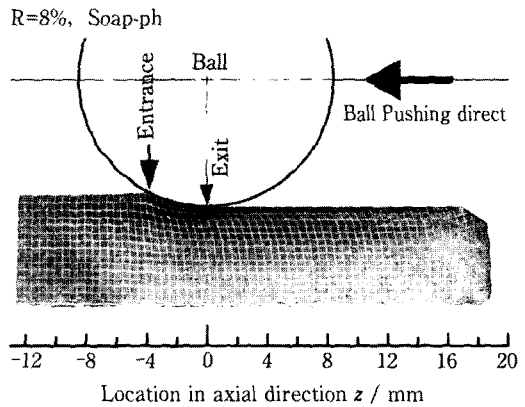


그림10 볼 통과 시험의 자오단면 재료 유동[18]

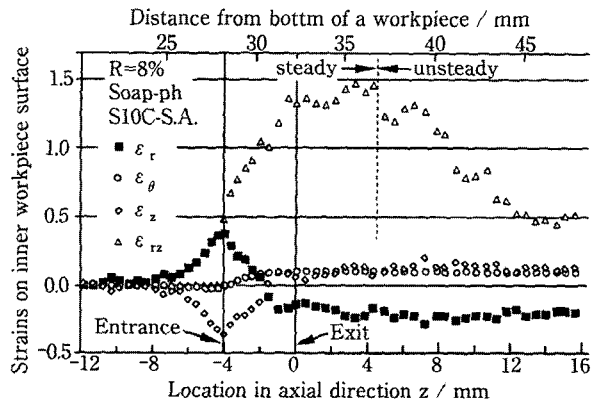


그림11 내면 변형률 분포[18]

이다. 내면의 변형률은 외주등에 비하여 분명히 다르다. 그림 11 에는 내면의 변형률 분포를 표시

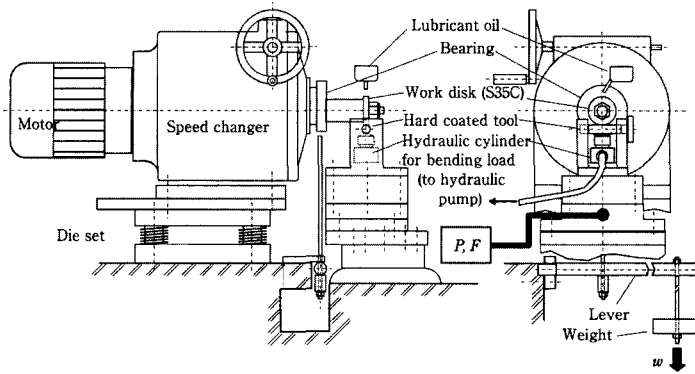


그림12 경질피막의 교차원통식마찰 마모시험[23]

하였다. 이와 같은 분포에 대응하는 상당 변형률은 약 1.5에 도달한다. 감면율에서 한 모양 변형을 가정하는 것 보다도 훨씬 큰 소성변형이 표면에서는 일어나고 있는 것을 알았다. 또 표면적 확대비도 3배 이상이라는 큰 값이었다. 이 시험방법은 의외로 까다로운 조건하의 시험이라는 것을 알았다[18].

재료의 가공경화특성[19], 볼 압입속도 등이 재료 내부유동이나 표면 변형률 및 표면적 확대율에 대한 영향[20]을 주는 가공 분율을 알고 재료 선정이나 유의점도 분명하게 되었다. 또 볼의 재질을 변경하는 것(강구 SUJ2 초경합금 WC, VC 피복강구 세라믹 구 PSZ)에 의해 금형재와 윤활유와의 반응의 유무 및 과다도 확인 하였다[21].

6. 기타 최근 응용

실제의 가공에 있어서 윤활상태에 대한 정보는 아주 적었다. 몇 개 단단의 냉간 단조행정에 대하여 공장의 협력을 얻어 시료를 채취하여 윤활상태 외관상의 유막 두께의 분포나 추이를 조사했다. 공정이 진행되는데 따라 단순하게 접촉률이 높아지든지 표면조도가 작아지는 일은 없었다. 오히려 편치 형상과 전공정으로 만들어진 끝면의 매크로한 기하적인 크리어런스, 편치가 접근할 때의 스퀴이즈 효과, 마이크로인 요철의 잔류나 조화등에 의해 생생하게 표면의 모양이 변화하고 있는 것을 예시하였다[22].

그림12에 표시하는 바와 같은 표면에 인장응력을 가하는 교차 원통식의 마찰 마모시험기를 제작하여 경질표면 피막처리공구의 내마모특성의 조사를 하였다. 공구모재가 SKD 11의 경우에 대하

여는 인장을 크게 하면 공구표면처리의 마모가 촉진되는 경향이 나타났다. 소성가공 공구는 큰 하중을 받는다. 어떠한 면에서 마모에는 부하응력의 영향도 있는 듯 하다. 모재가 SKH 51에 대하여도 같은 조사를 실시 중에 있다[24].

관과 봉재에도 소성이방성이 있게 하고 Hill의 이방성 변수의 비를 구하는 측정시험법을 고안했다. 그 결과 어떤 종의 알루미늄합금에 아주 큰 이방성이 있는 것, 그것이 이를 태면 링압출시험의 재료유동에 영향하는 것을 시사했다[25]. 시뮬레이션의 정도향상에는 이와 같은 이방성 조사도 그 영향의 응용이 필요하게 될 것이다[26].

볼을 통한 시험을 활용하여 다이아몬드 유사 카본 등의 저 마찰형 경질표면피막의 성능조사를 시작했다[27].

또 스테인리스강 냉간가공용 윤활제 개발에서 볼을 이용한 시험을 개량한 Taper Plug 통하기 시험을 활용하여 고강도 Ti 합금 및 가공용 윤활제의 성능 평가 연구도 행하고 있다[28].

7. 결 론

윤활문제는 낮은 수준의 과제라고 판단 된다. 본 원고에서 설명한 것은 모두 실험주체 때문에 실제도 물건을 접촉하고 관찰하여 느끼지 않으면 길은 전혀 열리지 않았다. 또 팀에서 지혜를 짜내서 의논과 시행착오를 거듭하여 연구한 결과이기도 하다. 혼자서는 도저히 안된다. 본원고를 읽는 사람의 흥미를 자극하여 단조와 윤활기술에 적으나마 기여했다고 자부한다고 하면 다행이다.

최근에 은사 水野高爾 선생의 지도를 많이 받았다. 또 당시의 (주)풍전중앙연구소의 川村益彦

박사, 団野敦 박사, 渡邊三千雄 양 野野山史男 양 大森俊英 박사 비롯하여 많은 분들의 지도를 받았다. 또 도요다 자동차(주), 덴슨(주), (주)풍전 케미칼 엔지니어링, 애지제강(주), 아이싱전기(주), (주)태양 등의 협조를 받았다. 1997년 부터 명고옥공업대학에서는 대학원 및 학부의 학생들도 아이디어를 짜내고 있다. 관련자 모두에게 지면을 통해 감사를 표한다.

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

참 고 문 헌

- [1] 日本塑性加工學會編 : 塑性加工에 있어서의 Tribology, (1988), 코로나社.
- [2] 上同 : Process Tribology, (1993), 코로나社.
- [3] 上同 : 단조, (1995), 코로나社.
- [4] T. Kato, K. Nakanisi, Y. Tozawa : Ann. CIRP, 35-1(1986), 177~180.
- [5] J. A. Schey : Tribology in Metalworking, (1983), ASM.
- [6] 団野敦. 何部勝司. 野野山史男: 塑性과加工 24-265(1983), 213~218.
- [7] 水野高爾, 小島之夫. 北村憲彦. 朱偉成 : 上同, 25-285(1984), 929~935.
- [8] 水野高爾. 小島之夫. 朱偉成. 北村憲彦 : 上同, 26-298(1985), 1096~1101.
- [9] 大森俊英. 北村憲彦. 団野敦. 川村益彦 : 豊田中央 研究所 R&D 센터, 28-3(1993), 11~31.
- [10] K. Kitamura, T. Ohmori, M. Kawamura, A. Danno : 3rd ICTP. 1 (1990), 41~46.
- [11] 北村憲彦. 大森俊英: 塑性과加工, 38-442(1997), 991~995.
- [12] 大森俊英. 北村憲彦 : 豊田中央 研究所 R&D 센터, 31-3(1996), 15~25.
- [13] F. Nonoyama, K. Kitamura, A. Danno : Ann. CIRP, 42-1(1993), 353~356.
- [14] 佐賀二郎. 能島博人. 有田恒一郎 : 塑性과加工. 179(1975), 1156~1161.
- [15] 北村憲彦. 大森俊英. 川村益彦. 団野敦: 上同, 29(1996), 1083~1088.
- [16] 上同 : 上同, 34-393(1993), 1178~1183.
- [17] Process Tribology 分科會 : 年報(1999), 130~139.
- [18] K. Kitamura, T. Mizuno, K. Honda : 7th ASPF (2000) 135~138.
- [19] 北村憲彦. 水野高爾. 本田勝也: 平 11 塑加春講論, (1999), 251~252.
- [20] 錦織正樹. 北村憲彦. 水野高爾 : 53 回 塑加春講論, (2002), 375~376.
- [21] 北村憲彦. 大森俊英 : 塑性과加工, 39-448(1998), 452~456.
- [22] K. Kitamura, T. Niimi, : 2nd ICTMP (2004), 419~426.
- [23] 北村憲彦. 服部美技. 水野高爾 : 532(2005), 38~391.
- [24] 余谷直秀. 北村憲彦 : 55回 塑加連講論, (2004), 475~476.
- [25] 水野高爾. 北村憲彦. 夏國洋 : 5 回 塑加連講論, (2004), 475~476.
- [26] 寺野元規. 深津隆明. 北村憲彦 : 平成 16, 塑加春講論, (2004), 245~246.
- [27] 山本隆弘. 遠山榮一. 土屋能成. 北村憲彦 : 平 17, 塑加春講論, (2005), 53~54.
- [28] 都築建. 永田都雄. 北村憲彦 : 日本機械學會圖解支部, 第 53 期總會講演會, (2004), 117~118.