

열· 온간 단조에서 그래파이트 윤활제의 마찰 특성에 대한 연구

김동진*, 김병민**, T.A. Dean***

Study for Frictional Characteristics of graphite lubricants in hot· warm forging

Dong Jin Kim*, Byung Min Kim**, and T.A. Dean ***

ABSTRACT

At present there are many theories as to how various lubricants used in forging perform the role of reducing friction. Little work has been carried out to determine the validity of these theories for solid lubricants. This paper covers the development and preliminary results of the experiments devised to illustrate the movement of graphite at the work-piece/tool interface in the work forging temperature range. The paper describes the results obtained from upsetting of rings between two flat dies for measurement of lubricant thickness and compaction of graphite for density-pressure relationship. These allowed the lubricant to be exposed to forging conditions and by applying the principles of Male's ring test the simple generation of a value for friction factor could also be determined. The experiments have been undertaken to examine the behavior of lubricant for shot blasted surface and change of surface roughness. A simple computer model of the interface has been constructed characterizing the graphite layer in an attempt to simulate the boundary mechanics.

Key Words : Graphite (그래파이트), Lubricant Thickness (윤활제 두께), Compaction of Graphite (그래파이트 압축), Surface Roughness (표면 조도), Deformation of Surface Roughness (표면 조도 변형)

1. 서 론

소성 가공 공정에서 재료는 금형에 의해 작용된 압력에 의해 유동하여 금형의 형상으로 변형하게 된다. 따라서 금형과 소재의 마찰 조건은 소재 유동에 큰 영향을 주며, 제품의 형상, 내부 결함, 금형에 작용하는 응력 및 성형 하중에 영향을 준다^[1]. 일반적으로 소성 가공에서 마찰의 종류로는 첫번째 무윤활 상태로 소재와 금형 사이의 접촉면

에 윤활제를 사용하지 않고 산화막 만이 금형과 소재 사이에서 분리층으로 존재하여 윤활 역할을 하게 된다. 이 경우 높은 마찰 상수 값을 가지기 때문에 열간 평판 압연, 알루미늄 열간 압출 등의 제한된 공정에만 사용된다. 두 번째 유체 동역학적 상태로 얇은 층의 액체 윤활제가 소재와 금형 사이에 있으며, 마찰 조건은 윤활제의 점성과 금형과 소재 사이의 상대 미끄럼 속도에 의해 결정된다. 윤활제의 점성은 온도가 증가함에 따라 급

* 부산대학교, 기계설계공학과
** 부산대학교, 정밀정형 및 금형가공 연구센터
*** IRC, University of Birmingham, UK

격히 감소하기 때문에 사용하는 공정에 제한이 있다. 마지막으로는 경계 윤활로 대부분의 소성 가공 공정에서 사용한다. 그러나 공정 설계에 필요한 윤활제 정보는 체계화 되어 있지 않다^[2,3].

정형 단조 가공을 위하여 정확한 수치 해석적 방법은 필수적이다^[4]. 이러한 수치 해석적 방법의 정확성을 향상시키기 위해서는 소재와 마찰 사이의 정확한 입력 데이터가 필요하다. 압출이나 인발과 같은 정상 상태 변형 공정에서는 일정 Coulomb 마찰 계수(Constant Coulomb friction coefficient)^[5] 혹은 일정 마찰 상수(Constant friction factor)^[6]를 사용하고 있지만, 일반적인 단조 공정과 같은 비정상 상태 변형 공정에서 이러한 일정 마찰값들을 사용하는 것은 한계가 있다.

Rooyen 등은 알루미늄 업세팅 실험을 수행하여 높이 감소율에 따라 비균일한 마찰 계수값을 구하였다^[7]. Nanneh 등은 온·열간 상태에서 변형율 속도, 온도, 소재의 재결정 등을 이용하여 마찰 보정 곡선에 대한 연구를 수행하였고^[8], Behrens 등은 소재와 금형 사이의 표면 조도에 의한 접촉 상태에 따른 마찰 상수의 변화를 고려하여 압출품에 대한 실험과 유한 요소 해석을 수행하였다^[9]. Azushima 등은 업세팅 동안 폐쇄회로 카메라를 이용하여 액체 윤활제가 소재와 금형사이에서 간혀 있는 것과 표면 조도의 변화를 관찰하여 액체 윤활제의 변형 거동을 연구하였다^[10].

높은 작업온도에서 성형압력이 높을 경우 일반적으로 액체 윤활제는 사용할 수 없게 된다. 따라서 대부분의 온·열간 단조 공정에서는 그래파이트와 같은 고체 윤활제를 사용한다. 그러나 고체 윤활제인 그래파이트에 대한 연구는 마찰 특성에 대한 연구^[11,12], 표면 조도에 따른 연구^[13,14] 등 제한적 연구만이 수행되고 있다. 따라서 본 연구에서는 온·열간 단조 공정에서 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 그래파이트 윤활제에 대한 마찰 특성을 파악하고자 한다. 먼저 그래파이트 윤활제를 소재에 분사 시킨 후 초기 윤활제의 두께를 측정하고 링 압축 실험을 실시한 후 윤활제의 두께를 측정하여 변형 후의 윤활제 두께 분포를 구하여 윤활제의 변형 거동을 분석하였다. 다음으로는 이러한 윤활제의 변형 거동을 유한 요소 법으로 해석하기 위하여 필요한 그래파이트의 변형 특성과 물성치를 구하였다. 그래파이트의 변형 특성을 실험하기 위하여 알루미늄 소재에 윤활제를

적층한 후 압축 실험을 실시하여 윤활제 없이 압축한 결과와 비교하였다. 해석에 필요한 그래파이트의 물성치는 먼저 그래파이트 압축 실험을 통하여 밀도-압력의 데이터를 구하였고 윤활제를 통한 계면 열전달 계수를 실험과 역해석법(Reverse algorithm)으로 구하였다. 본 연구에서 수행한 연구 내용은 Fig.1 과 같다.

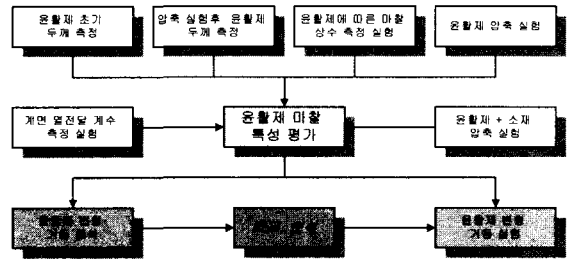


Fig. 1 Contents of research

2. 그래파이트 윤활제

2.1 그래파이트 윤활제의 특성

온·열간 단조 공정에서 그리스(Grease), 이황화 몰리브덴(Molybdenum disulphide) 유리 및 그래파이트(Graphite) 등이 윤활제로 사용되고 있으며, 특히 그래파이트는 물이나 기름 등과 혼합하여 가장 많이 사용되는 윤활제이다. 그래파이트는 결정층 간의 결합이 약하여 결정층 간의 미끄럼이 쉽기 때문에 좋은 윤활 특성을 가지게 되지만(Fig.2) 그래파이트의 순도(Purity)가 높아지면 결정층 간의 결합력이 증가하여 윤활 특성이 나빠지게 된다. 따라서 물과 같은 기저재에 혼합하여 사용하여야 좋은 윤활 특성을 얻을 수 있다^[2,6].

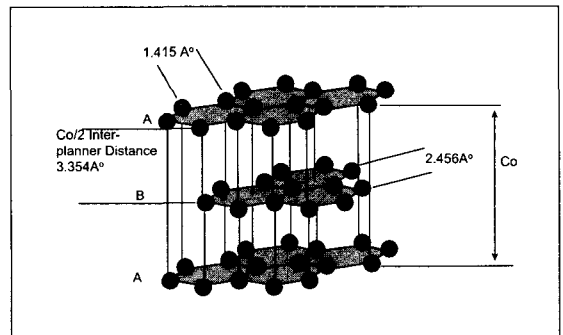


Fig. 2 Structure of graphite crystals

그라파이트 윤활제의 마찰 상수 값은 온·열간 단조 공정에서 일반적으로 0.05 에서 0.15 사이의 값을 가진다^[15]. 200℃ 에서는 물의 증발로 인하여 마찰 상수가 증가하게 된다. 그러나 350℃ 이상에서는 소재 산화막과의 상호 작용으로 인하여 마찰 상수가 다시 감소하게 된다^[15]. 그라파이트 윤활제는 물이나 기름과 같은 기저재와 혼합하여 금형이나 소재에 분사시켜 사용하며 이러한 기저재는 단조 조건과 윤활 조건에 의해서 결정된다. 기저재의 중요한 물리적 특성은 윤활제가 산화되어 남는 잔유물, 점도, 발화점 등이다^[6]. 물의 경우에는 아무런 잔유물도 남지 않지만, 기름의 경우에는 탄소층이 생성된다.

2.2 그라파이트 윤활제 두께 측정 실험

온·열간 단조 공정 동안 윤활제의 변형 거동을 연구하기 위하여 단조 전·후의 윤활제 두께를 측정하였다. 마찰을 평가하는 여러 가지 방법 중 가장 많이 사용되는 방법은 링 압축 실험이다. 따라서 본 연구에서는 링 압축 실험으로 각 윤활제 이 마찰 상수를 구하였고 동시에 윤활제의 두께도 측정하였다.

를 분사한 후 일정한 높이 감소율로 소재를 압축한 다음 금형을 제거하게 되면 금형 표면에 고착되어 있던 윤활제의 일부가 소재와 고착되면서 떨어져 나가게 된다. 이런 경우 금형 표면에 고착되어서 변형된 윤활제의 변형 형상을 정확하게 관찰하기가 어렵다. 따라서 소재와 금형의 접촉면에 있는 윤활제의 변형 형상을 보기 위해서는 금형과 소재가 접촉한 상태로 중심부를 절단한 후 관찰해야 한다. 그러나 금형은 고가이면 또 강도가 매우 높기 때문에 중심부를 절단하는 것은 매우 어렵다. 따라서 Fig.3 과 같이 상금형과 하금형 사이에 금형판(Die plate)을 두어서 이것으로 소재를 압축한 후 소재와 같이 중심부를 절단하여 윤활제의 변형 형상을 관찰하였다. 그리고 금형판은 가열기(Band heater)를 Fig.3 과 같이 설치하여 가열하였고 정확한 양의 윤활제 분사를 위하여 공기/시간 조절기(Air/time controller)를 사용하였다.

윤활제 두께 측정을 위한 실험 조건

- (1) 사용 윤활제 : Deltaforge #31
(수용성 그라파이트)
- (2) 소재 : AISI1010, 850℃ 로 가열
소재의 산화를 방지하기 위하여 FB400 윤활제(수용성 그라파이트)로 소재코팅
- (3) 금형 : SKD61, 300℃ 로 가열
Deltaforge #31 윤활제를 2 초간 2 회 분사
- (4) 프레스 : 150 톤 유압 프레스,
 $\epsilon = 0.5$ 로 유지
- (5) 높이 감소율 : 35%

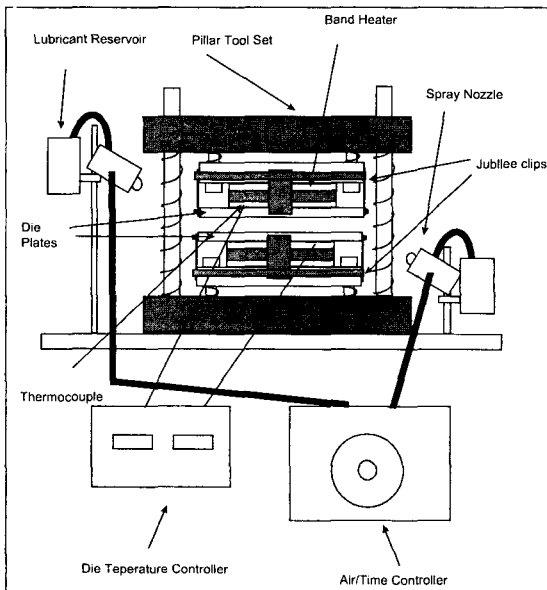


Fig. 3 Schematic of experimental devices

윤활제의 변형 거동을 관찰하기 위하여 Fig.3 과 같은 실험 장치를 제작하였다. 금형에 윤활제

Fig.4 에 금형과 소재 사이의 윤활제 변형에 대한 실험 결과를 나타내었다. 상금형과 소재, 하금형과 소재 사이에 얇은 띠 형태의 윤활제 막이 존재하는 것이 관찰되었다. 윤활제가 상금형과 소재 사이에 존재하여 접촉면 밖으로 나가지 않는 것을 알 수 있었다. 소재와 금형의 요철부(Asperity)에 윤활제가 존재하여 변형이 진행되는 동안 일정량의 윤활제는 접촉면 밖으로 빠져 나가지만, 그렇지 않은 윤활제는 소재와 금형사이에 갇혀서 마치 소재의 일부처럼 소재와 같이 변형하는 것을 알 수 있었다.

그리고 윤활제의 두께가 링의 외경부로 갈수록 얇아지는 것도 확인할 수 있었다. 이것은 Male 의 연구^[16]에서 링 소재의 유동은 중립면을 기준으

로 하여 멀어질수록 빨라진다는 것으로부터 알 수 있듯이 변형이 진행함에 따라 소재의 접촉면이 증가하게 되고, 여기에 분사되어 있던 윤활제도 소재와 같이 변형하여 그 접촉면이 증가하기 때문에 증립면에 비하여 상대적으로 윤활제의 두께가 얇아지는 것이다. 이것을 확인하기 위하여 증립면을 기준으로 윤활제의 두께를 측정하였다(Fig.5). 초기 윤활제 두께는 0.2mm 이었고 높이가 감소할 35% 후의 윤활제 두께는 증립면에서의 상금형의 경우 0.1mm, 하금형의 경우에는 0.12mm 이었다. 상금형의 윤활제 두께보다 하금형의 윤활제가 두꺼운 것은 윤활제 분사 후 소재와 하금형은 접촉 상태로 있지만, 소재의 상부는 상금형이 내려올 때 까지 공기와 반응하여 지속적으로 산화가 이루어져 없어지기 때문이다. 증립면의 경우 윤활제 두께는 상금형의 경우 50%, 하금형의 경우 40% 감소하였고, 외경부에서는 상금형의 경우 윤활제 두께가 0.02mm로 90% 감소하였고, 하금형의 경우에는 윤활제 두께가 0.06mm로 70% 감소하였다.



Fig. 4 Photograph of graphite lubricant

이러한 결과로 윤활제는 일정량만큼 압축된 후 소재와 같이 변형한다는 것을 알 수 있었다. 이러한 현상을 수치 해석 방법인 유한 요소법으로 해석하여 공정 중에 윤활제가 어떻게 변형하며, 어떠한 윤활 역할을 하는지 분석하기 위하여 그라파이트 윤활제에 대한 물성치 실험을 수행하였다.

2.3 그라파이트 압축 실험

그라파이트 윤활제의 변형 거동을 얻기 위하여 압축 실험을 수행하였다. Fig.6 과 같은 그라파이트 압축 실험 장치를 제작하였다. 순수한 그라파이트 분말 상태와 물과 혼합된 그라파이트의 물성치는 다를 것으로 예상되어 물과 혼합된 수용성 그라파이트를 Fig.7 과 같이 적층하여 150℃로 가열하여 시편을 제작하였다. 제작된 시편은 직경이 25.72mm 였고, 높이는 각각, 17.5 mm, 18.4 mm, 19.4 mm, 20.2 mm 로 4 개의 시편을 준비하였다.

그라파이트 압축 실험을 수행한 결과 Fig.8 과 같은 하중-편치행정 선도를 얻었다. 초기 소재의 높이에 따라 약간의 차이는 보였지만, 각각의 하중-행정 선도의 경향은 대체로 일치하였고 전형적인 분말 금속 재료의 압축 결과와 동일하였다. 즉 그라파이트의 밀도가 낮은 상태에서는 하중의 증가 없이 지속적으로 압축되다가, 어느 정도 값에 도달 하게 되면 밀도는 조금씩 증가하는데 반해

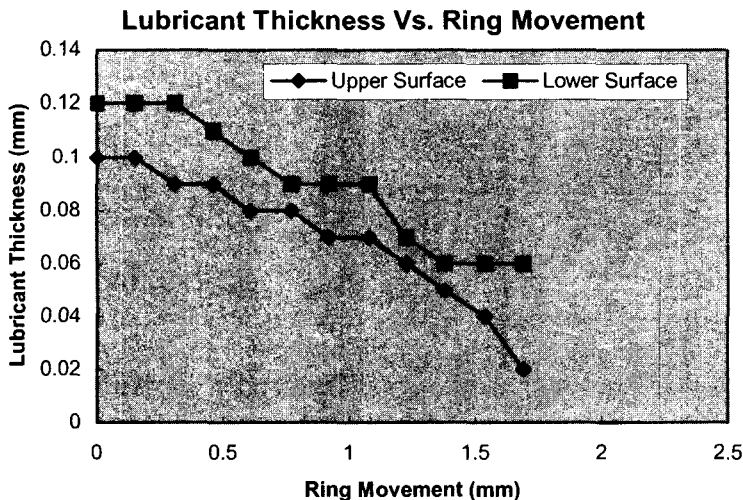


Fig. 5 Distribution of graphite thickness

하중은 급격히 증가하는 하중-편치행정 선도를 얻었다. 이러한 경향을 확인하기 위하여 초기 시편의 높이가 17.2mm와 19.43mm인 두 개의 소재에 대해서 밀도와 성형 압력과의 관계를 구하였다.

그라파이트의 완전 압축된 상태의 밀도는 1.65-1.75 (g/cm³) 이다. 초기 시편의 높이가 19.43mm인 경우에는 약 710MPa에서 완전 압축되었고, 높이가 17.2mm인 경우에는 완전 압축된 상태의 압력이 320MPa 이었다. 이러한 압축 거동과 소재에 분사되었을 때의 압축 거동을 비교하기 위하여 순수 알루미늄 시편에 그라파이트를 분사하여 압축 실험을 수행하였다.

직경이 10mm이고 높이가 10mm인 순수 알루미늄 시편을 제작하여 Deltaforge #31 윤활제를 분사하여 압축실험을 수행하였다. 실제 단조 공정에서의 윤활제 초기 두께는 0.1-0.2mm이다. 그러나 이 두께를 가지는 소재를 압축하여 응력과 변형률 관계를 구하는 것은 매우 어렵다. 따라서 보다 뚜렷한 결과를 얻기 위하여 윤활제를 분사하지 않은 소재와 초기 윤활제의 두께를 각각 1mm, 2mm, 3mm로 적층한 소재로 압축 실험을 수행 하였다 (Fig.9). 실험은 최대 하중 6ton인 INSTRON을 사용하여 실험하였다.

2.4 그라파이트 + 소재의 압축 실험

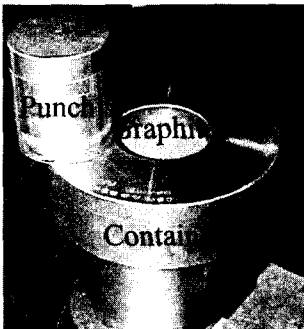
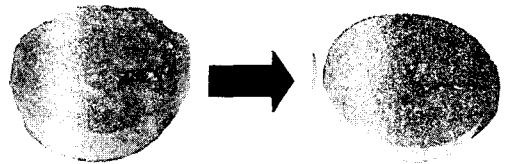


Fig. 6 Photograph of experimental devices



(a) Before Compaction

(b) After Compaction

Fig. 7 Photograph of graphite specimen for compaction

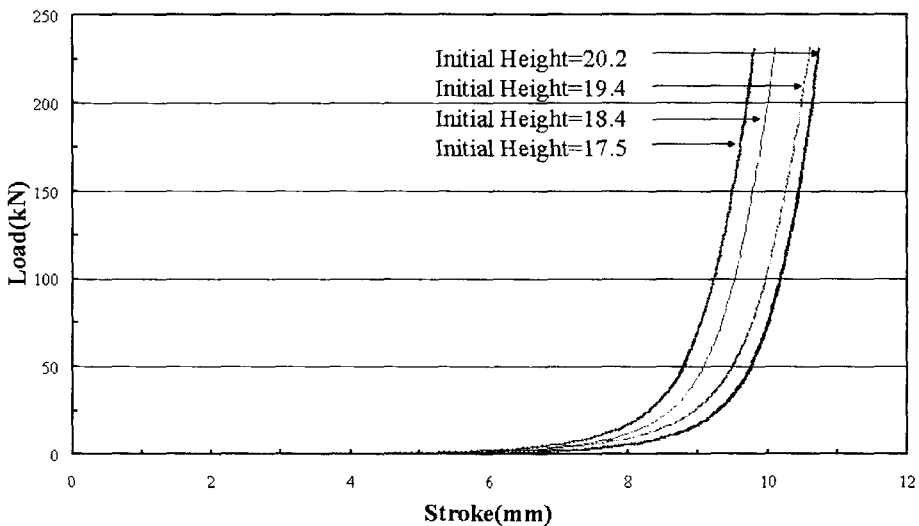


Fig. 8 Diagram of load-stroke of graphite compaction

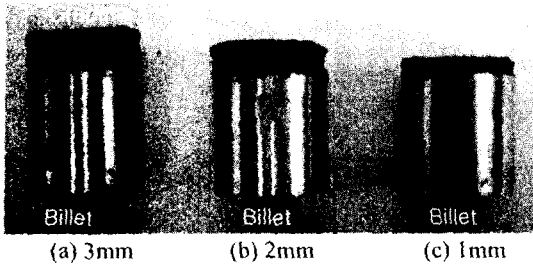


Fig. 9 Photograph of pure aluminium specimen

무윤활 상태의 시편을 압축한 결과, 변형 초기부터 변형률이 증가함에 따라 응력이 증가하는 것을 알 수 있었다(Fig.10). 이에 반하여 초기 윤활제 두께가 2.33mm 인 소재인 경우에는 일정량 만큼의 변형이 진행된 후 응력이 증가 하였다. 변형이 시작되면 먼저 그라파이트 윤활제만이 압축되어 응력 값은 크게 증가하지 않는다. 변형이 계속 진행되어 변형률이 약 0.15에 도달하게 되면 응력 값이 증가하기 시작하는데 이 영역에서는 그라파이트 윤활제가 소재와 금형사이에 갇히게 되면서 소재와 윤활제가 같이 압축되는 영역으로 생각된다. 변형률이 0.25 일때 응력이 알루미늄의 항복 강도인 240MPa에 도달한다. 이때의 높이를 계산해보면 초기 윤활제 두께와 동일한 2.33mm 이었다.

순수 알루미늄의 압축 실험으로부터 압축이 시작되면 먼저 그라파이트만이 압축되면서 일부 그라파이트는 소재와 금형 사이에서 빠져 나가게 된다. 변형이 계속되면 그라파이트는 금형과 소재

사이에 갇히게 되면서 압축 받게 된다. 성형이 계속되면 그라파이트는 더 이상 압축되지 않고 소재만이 압축 받게 된다. 이때의 그라파이트 윤활제는 금형처럼 소재를 압축하게 된다⁽⁶⁾. 그리고 그라파이트의 유동응력은 소재의 유동 응력 이상으로는 증가하지 않고 소재와 같은 값을 가지면서 변형한다. 즉 그라파이트 윤활제는 유동응력이 소재의 유동응력에 도달할 때 까지 증가하지만, 소재의 유동응력 이상으로는 증가하지 않는다는 것이다. 이것은 결국 윤활제를 분사한 소재의 압축에서 윤활제의 거동은 그라파이트의 밀도와 관련이 있다는 것이고, 또 윤활제의 입계 두께와도 연관이 있다는 것이다. 이 부분은 지속적인 연구를 통하여 규명해야 할 부분으로 윤활제의 변형 거동을 밝히는 중요한 것으로 생각된다.

3.윤활제의 변형 거동 실험 및 해석

앞에서 구한 윤활제의 마찰 상수, 변형 특성, 계면 열전달 계수를 이용하여 윤활제가 어떻게 소재와 금형 사이에서 변형하는지를 실험 및 해석을 통하여 분석하였다. 윤활제의 거동을 관찰하기 위하여 소재의 표면을 슛 블러스터(shot blaster) 처리하여 거칠게 하였다. 이 소재에 Deltaforge #31 윤활제를 분사시켜 변형 동안 윤활제의 거동을 관찰하였다.

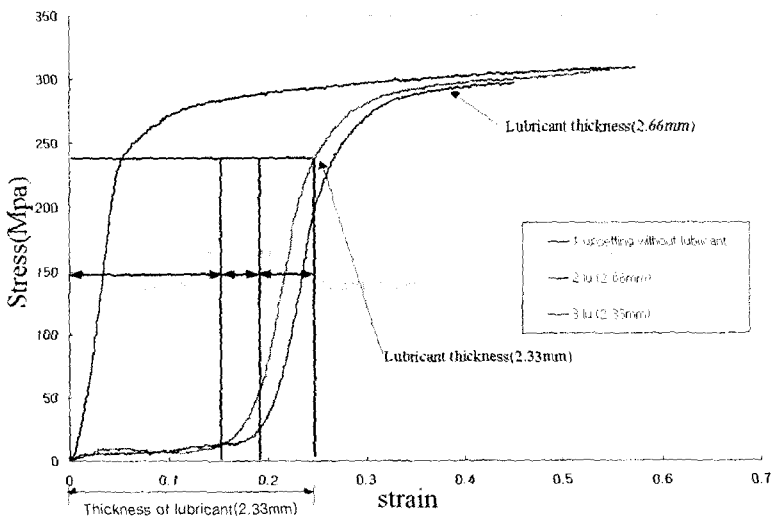


Fig. 10 Comparison of stress-strain of pure aluminium with and without lubricant

먼저 기계 가공한 소재의 표면을 연마하여 매끄럽게 만든 후 0.5mm 인 강철 볼로 슛 블러스터 처리를 하였다. 이 때의 표면 조도는 18.5 Ra 이었다. 이 소재에 Deltaforge #31 을 2 초가 분사시켜 초기 윤활제의 두께가 0.2mm 가 되도록 한 다음 압축 실험을 수행하여 각 높이 감소율에 따른 소재 표면을 관찰하였다. 변형이 진행됨에 따라 표면 조도가 좋아 지는 것을 확인할 수 있었다 (Fig.11). 이것을 확인하기 위하여 표면 조도를 측

정하여 Fig.12 에 나타내었다.

소재의 표면 조도는 시편의 중심으로부터 동일한 위치에서 측정하였다. 변형이 진행되는 동안 소재의 표면 조도가 좋아지는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 표면 요철부에 들어간 윤활제가 요철부를 변형시켜 표면 조도가 좋아진 것으로 생각되었다. 이것을 확인하기 위하여 소재의 표면 요철부를 모델링하여 유한 요소 해석을 수행하였다.

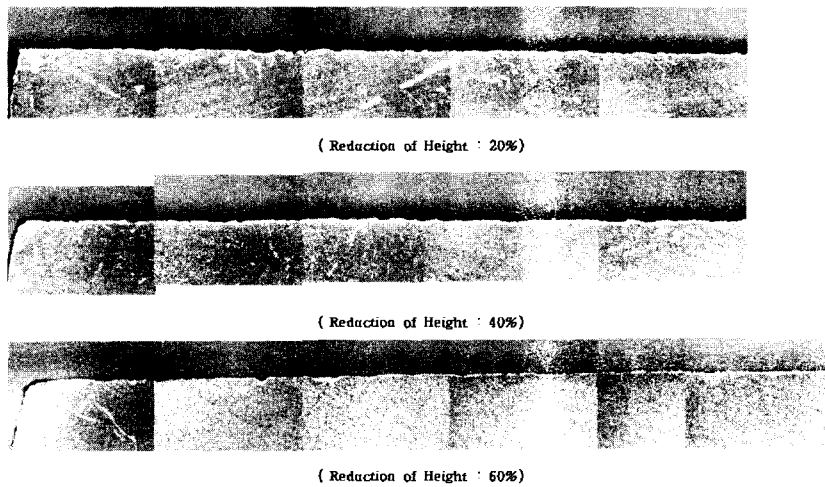


Fig. 11 Photograph of surface change during the compression

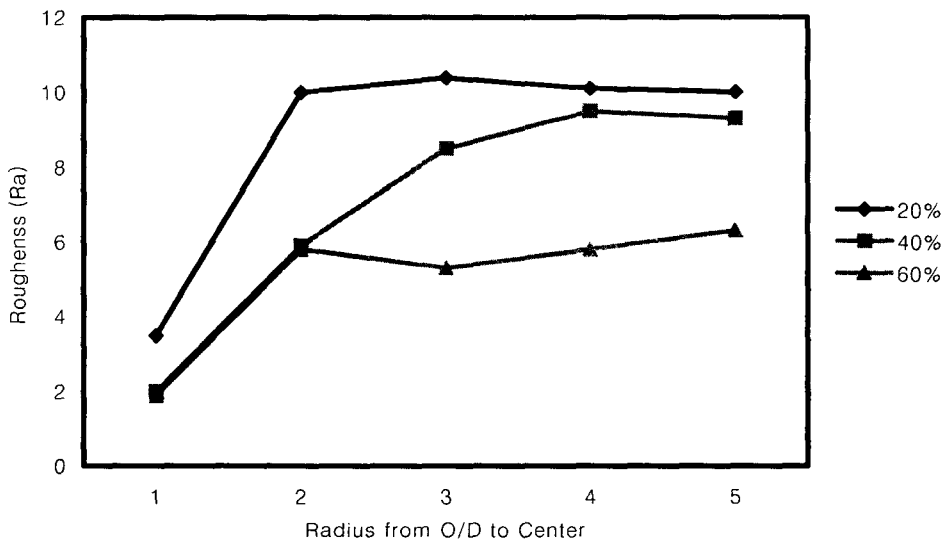


Fig. 12 Measurement of surface roughness according to height reduction

소재의 표면 조도 변화 해석에서도 알 수 있듯이 슛 블러스터한 소재의 표면 요철부에 윤활제가 채워진다(Fig.13). 변형이 진행되면, 이 윤활제는 일정량만큼 소재와 금형 밖으로 빠져나가면서 압축된다. 윤활제의 밀도가 일정량에 도달하면 그때부터 소재가 윤활제와 같이 변형하기 시작한다. 이때 소재 표면의 요철부를 채우고 있던 윤활제가 요철부를 변형시켜 요철부를 완만하게 변형시킨다. 이로 인하여 변형이 진행됨에 따라 소재 표면의 조도가 좋아지는 것이다.

4. 결론

열·온간 윤활제로 가장 많이 사용되고 있는 그라파이트 윤활제의 거동을 연구하기 위하여 그라파이트에 대한 기본적인 물성치 실험을 수행하였고, 이를 이용하여 윤활제 거동에 대한 기본적인 해석을 실시하였다. 이러한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 열·온간 윤활제로 가장 많이 사용되고 있는

그라파이트 윤활제의 거동을 실험 및 해석하기 위해 그라파이트 윤활제의 기본적인 물성치 실험을 수행하였다.

2. 윤활제의 두께를 측정된 결과, 속도 중립면에서의 윤활제 두께가 제일 두껍고, 중립면으로부터 선형적으로 두께가 감소하였다.
3. 그라파이트 윤활제의 압축 실험을 통하여 그라파이트의 밀도에 대한 압력 관계를 구하였다.
4. 순수 알루미늄 소재에 그라파이트 윤활제를 도포하여 압축 실험을 수행한 결과 그라파이트 윤활제는 일정 변형율만큼 압축된 후 소재와 같은 거동을 한다는 것을 알 수 있었다.
5. 소재의 표면 조도에 따른 윤활제의 특성을 실험한 결과 슛 블러스터 처리한 소재의 표면 조도는 변형이 진행함에 따라 낮아졌다.
6. 슛 블러스터 처리한 소재의 경우 윤활제가 소재의 요철부 (Asperity)에 힘을 작용하여, 소재 요철부를 변형시키기 때문에 표면 조도가 변형이 진행함에 따라 낮아졌다.

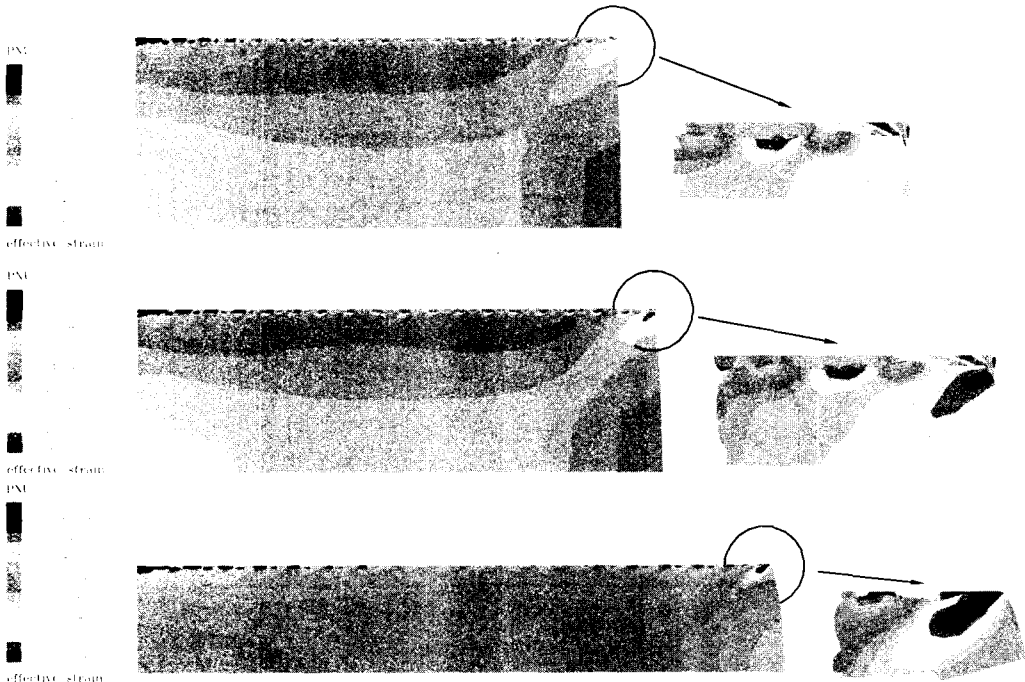


Fig. 13 Results of F. E. simulation for change of surface roughness at 20, 40, 60% height reduction

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단의 우수연구센터의 지원금에 의한 것으로 영국 버밍엄 대학과 공동 수행한 과제입니다.

참고문헌

1. T. Altan, S. Oh, H. Gegel, "Metal forming," ASM, Metal Park, PH44073, 1983.
2. J. A. Schey, "Metal deformation processes : Friction and lubrication," Marcel Dekker, New York, 1970.
3. T. Altan, "Heat generation and temperatures in wire and rod drawing," Wire Journal, March 1970.
4. T. Altan, P. Miller, "Design for forming and other near net shape manufacturing processes," CIRP, Vol. 2, pp. 609-620, 1990.
5. F. Bowden, D. Tabor, "The friction and lubrication of solids," Oxford Clarendon Press, 1953.
6. J. Schey, "Tribology in metal working," ASM, Metal Parks, Ohio, 1983.
7. G. Rooyen, W. Backofen, "A study of interface friction in plastic compression," Int. J. Mech. Sci., Vol. 1, pp. 1-27, 1960.
8. M. Nanneh, F. Dunne, "The role of inhomogeneous deformation in high-temperature ring compression testing," Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol.211, Part B, pp. 215-222, 1997.
9. A. Behrens, H. Schafstall, "2D and 3D simulation of complex multistage forging processes by use of adaptive friction coefficient," J. Mat. Proc. Tech. Vol. 80-81, pp. 298-303, 1998.
10. A. Azushima, S. Yoneyama, T. Yamaguchi, H. Kudo, "Direct observation of microcontact behavior at the interface between tool and workpiece in lubricated upsetting," CIRP, Vol. 45, No. 1, pp. 205-210, 1996.
11. F. Wang, J. Lenard, "An experimental study of interfacial friction-hot ring compression," J. Eng. Mat. Tech. Vol. 114, pp. 13-18, 1992.
12. N. Rudkins, P. Hartley, I. Pillinger, D. Petty, "Friction modeling and experimental observations in hot ring compression tests," J. Mat. Proc. Tech., Vol. 60, pp. 349-353, 1996.
13. A. de Sanctis, A. Forcellese, S. Roberts, P. Withers, "Frictional behaviour of Al359/Sic/20p composite under isothermal and non-isothermal hot-working conditions as a function of surface roughness," J. Mat. Proc. Tech., Vol. 72, pp. 195-200, 1997.
14. R. Bunten, R. Hopp, "Simulation of microscopic surface changes during metal forming operations by finite element method friction and roughness phenomena in metallic contact," 19th IDDRG Biennial Congress, Eger, 10-14, pp. 315-324, 1996.
15. A. Landdown, "High temperature lubrication," Mech. Eng. Pub. Limited, 1994.
16. A. Male, M. Cockcroft, "A method for the determination of the coefficient of friction of metals under conditions of bulk plastic deformation," J. Inst. Metals, Vol. 93, p. 38, 1965.