

재료 및 윤활제에 따른 전단 마찰 상수값의 평가

정덕진*, 김동진*, 김병민**

The evaluation of friction factor according to materials and lubricants

D. J. Jeong*, D. J. Kim*, B. M. Kim**

Abstract

Quantitative evaluation of the tribological conditions at the tool-workpiece interface in metal forming is usually accomplished by the ring-compression test. This paper describes an experimental investigation into shear friction factor under cold and hot forming conditions according to materials and lubricants using the ring compression test. Six different materials and five different lubricants were applied in the experiments. Calibration curves with the friction coefficient were obtained using FEM analysis and verified by the experimental results. The influence of materials and lubricants level on friction are discussed. In the ring compression test the shear friction factor has a different from steels and aluminum, water base and oil base graphite lubricants on cold working conditions and hot working conditions.

1. 서론

소성가공 중에 발생하는 마찰은 재료가 성형되는 과정 중에 금형과의 접촉으로 인하여 발생하는 현상으로서, 외력이 작용하는 조건하에서 한 개의 물체 또는 다른 표면에 상대적으로 이동하려고 하는 경향을 나타내는 두 개의 물체 사이의 일반적인 경계조건에 저항하는 법선력 이다[1].

링 압축 시험은 온도, 변형률 속도, 변형량 및 외경:내경:높이가 일정한 비율로 구성된 초기 소재의 형상 등으로 주어진 조건하에서 압축시험을 실시하여 높이 감소율에 따른 내경 감소율의 변화를 유한요소 해석 결과 또는 상계법등을 이용하여 얻은 곡선과 비교하여 전단마찰상수 또는 마찰계수를 측정하는 방법으로, 여기서 얻은 전단마찰상수 또는 마찰계수 값을 유한 요소 해석에 이용하고 있다.

링 압축 시험을 실시한 결과를 분석하여 높이 감소율에 대한 내경 감소율의 변화를 그래프를 이용하여 전단 마찰 상수 또는 마찰상수 값을 구한 것을 Male 과 Cockcroft 가 처음으로 도입하여 지금까지 사용하고 있다[2]. 링 압축 시험을 사용해서 열간 소성 가공에서의 마찰에 대한 연구를 이전에 연구가 행해져 왔으나 경험적으로 해결하기

에 많은 변수들로 인하여 직접적으로 비교하기에 상당히 어려운 문제점들이 있었다.

링 압축 실험을 통하여 많은 연구자들이 실험 온도, 가공 속도, 금형의 표면처리 등에 따른 윤활제의 마찰 특성에 대해 연구하였으나[3-6] 소재의 재질이나 윤활제에 따른 체계적인 연구는 거의 이루어 지지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 현장에서 열간 단조 윤활제로 널리 사용되고 있는 윤활제를 연강, 합금강, 초합금(superalloy) 및 알루미늄 재료를 냉간가공과 열간가공에 적용하였을 때의 전단 마찰 상수 값을 비교하고, 열간 단조 윤활제를 냉간 가공에 적용하였을 때의 변화를 관찰하는 것이다. 또한, 재료에 따른 윤활제의 전단 마찰 상수 값의 변화를 예측하여 각각의 재료에 대해서 적합한 윤활제를 선정하는 것이다.

2. 실험

2.1 실험소재

링 압축실험을 위해서 연강인 AISI 1010, 합금강인 AISI 4340, SCM 420H, 초합금인 INCONEL 718, 알루미늄으로는 Al 2014-O, Al 6061-O, Al 7075-O를 준비하였다. 소재 가공은 표면조도 Ra=3.5 μm 및 가공에 따른 균일성을 확보하기 위하여 동일한 가공조건에서 동일한 장비와 동일한 작업자가 가공을 실시하였다. 실험에 사용된 시편 규격은 외경;

* 부산대학교 대학원

** 부산대학교 정밀 정형 및 금형 가공 연구센터

내경:높이 비가 6:3:2로, 외경 30mm, 내경 15mm 및 높이 10mm, Male 과 Cockcroft[3]가 제안한 표준 규격으로 하였다.

2.2 실험용 윤활제

본 실험에 사용된 윤활제는 현장의 열간 및 온간 단조에 주로 사용되고 있는 흑연계 유용성 미강유+흑연, Acheson 사의 Oildag, 수용성 윤활제로는 Acheson 사의 Deltaforge #31, Renite 사의 Renite S-26-X 및 수용성 백색계 코팅제인 Acheson 사의 Deltaglaze #151 을 사용하였다.

2.3 냉간 링 압축 실험

본 실험에서는 150 톤 크랭크 프레스를 사용하였고, 금형은 재질이 열간단조용 공구강인 SKD61 으로서 상·하부 소성가공 영역이 편평한 형상으로 하였다. 실험결과의 균일성을 확보하기 위하여, 먼저 한가지 재료에 대하여 한가지 윤활제의 실험을 종료하는 방식으로 실험을 실시하였다. 윤활제는 상부 금형과 하부 금형에 스프레이를 이용하여 균일하게 윤활제를 도포하고 높이 감소율이 20%, 30%, 40%, 50% 및 60%가 되도록 압축하였다.

냉간 링 압축 실험에 대한 결과를 Fig. 1 에 나타내었으며, 연강과 합금강은 내경 감소가 적게 일어났으나, 알루미늄은 연강과 합금강에 비해 내경 감소가 심하게 일어난 것으로 관찰되었다. 또한, 연강, 합금강 및 알루미늄 모두 윤활제에 따라 내경 감소의 차이가 거의 없는 것으로 관찰되었다. 링 압축 실험이 종료된 후 각 시편에 대하여 내경 및 높이를 측정하여 내경 감소율 및 높이 감소율을 구하였다. 초합금 인 Inconel 718 은 냉간 소성가공성 및 장비 용량관계로 인하여 냉간 링 압축 실험을 실시하지 않았다.

2.4 열간 링 압축 시험

열간 링 압축에 사용된 장비는 냉간에서 사용된 장비 및 금형을 그대로 사용하였으며, 소재 가열은 Lindberg Co. 전기 가열로를 사용하였다. 소재 가열로는 최대 가열 온도가 1,200℃로 열전대에 의해 온도가 균일하게 제어되는 실험실용 장비이다. 또한, 상·하부 금형 가열을 위하여 액화석유가스 버너를 준비하였으며, 균일한 온도 제어를 위하여 금형 상·하부에 열전대를 삽입하여 온도를 측정하여 규정된 온도 이하가 되면 실험을 중지하고 금형을 재 가열하여 실험을 실시하였다.

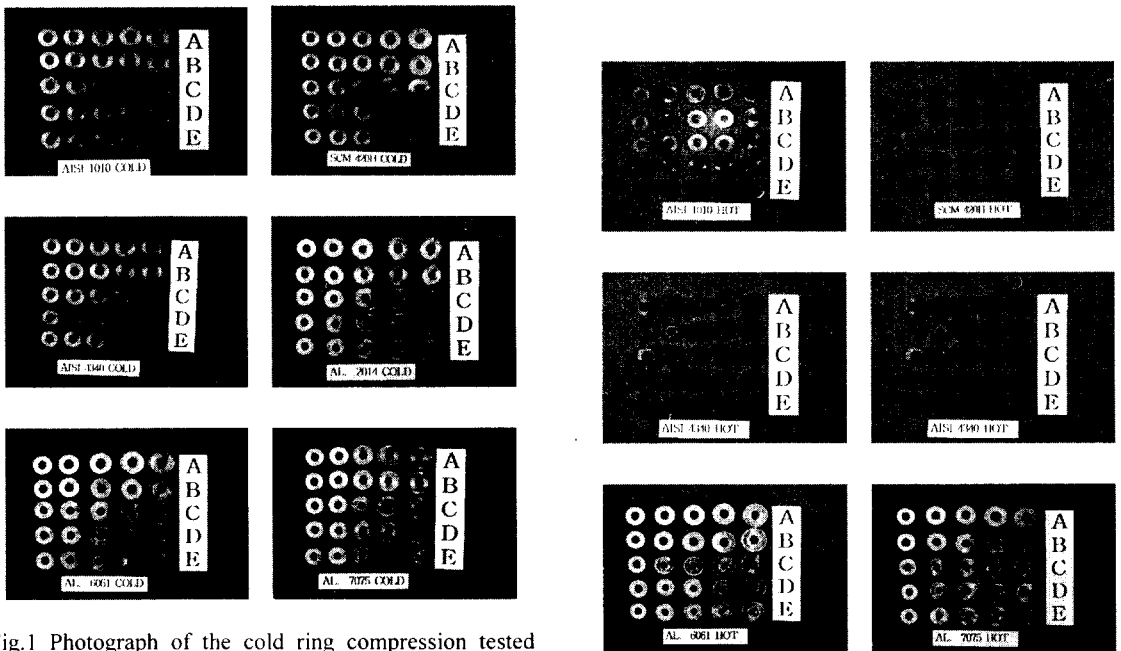


Fig.1 Photograph of the cold ring compression tested specimen ((A) soy bean oil+graphite, (B) oildag, (C) deltaglaze #31, (D) renite S-26-X, (E) deltaglaze #151)

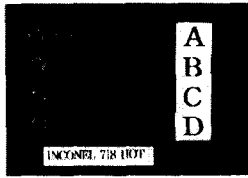


Fig.2 Photograph of the hot ring compression tested specimen ((A) soy bean oil+graphite, (B) oildag, (C) deltagraze #31, (D) renite S-26-X, (E) deltaglaze #151)

냉간 링 압축 실험에서와 같이 한개 재료에 대하여 한가지 윤활제씩 실험을 실시하였고, AISI 1030, AISI 4340, SCM 420H 및 Inconel 718 은 850℃로 소재를 가열하였고, 알루미늄인 Al 2014, Al 6061, Al 7075 는 450℃로 가열하였다. 실험전 상·하부 금형은 400℃가 되도록 가열하였으며, 300℃이하가 되면 재 가열하여 실험을 실시하였다. 실험 결과를 Fig. 2 에 나타내었으며, 냉간 링 압축 실험에서와는 다른 양상이 관찰되었다. 연강과 합금강의 내경 감소량이 냉간보다 심하였고 윤활유에 따라 내경 감소량의 차이가 많은 것으로 관찰되었다. 알루미늄도 철강류와 동일하게 윤활제에 따라 내경 감소량의 차이가 많은 것으로 관찰되었다. 내경 및 높이 감소율은 냉간 링 압축 실험에서와 같은 비율로 하였으며, 실험을 실시한 후, 내경과 높이를 측정하여 내경 및 높이 감소율을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 보정(calibration) 곡선

각 재료별 보정 곡선은 강소성 유한요소해석 코드인 DEFORM-2D 를 사용하였다[7]. 냉간에서는 각각의 재료에 대한 각각의 전단마찰상수 값의 높이 감소율에 따른 내경을 측정하여 보정곡선을 만들었다.

열간에서는 각 재료에 대하여 열용량 및 열 전도전율 등을 고려하여 해석을 실시하였으며, 냉간에서와 동일하게 각각의 재료에 대한 각각의 전단마찰상수 값의 높이 감소율에 따른 내경을 측정하여 보정곡선을 만들었다. 각 재료별 유한요소 해석시 풀딩을 고려하지 않았으며 내경은 최대경을 측정하였고, 전단마찰상수 값은 일정하다는 가정

을 하였다.

3.2 냉간 과 열간의 마찰 상수 값의 변화

보정곡선을 이용하여 각 재료별 전단 마찰상수 값의 변화를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 3 에 나타내었다.

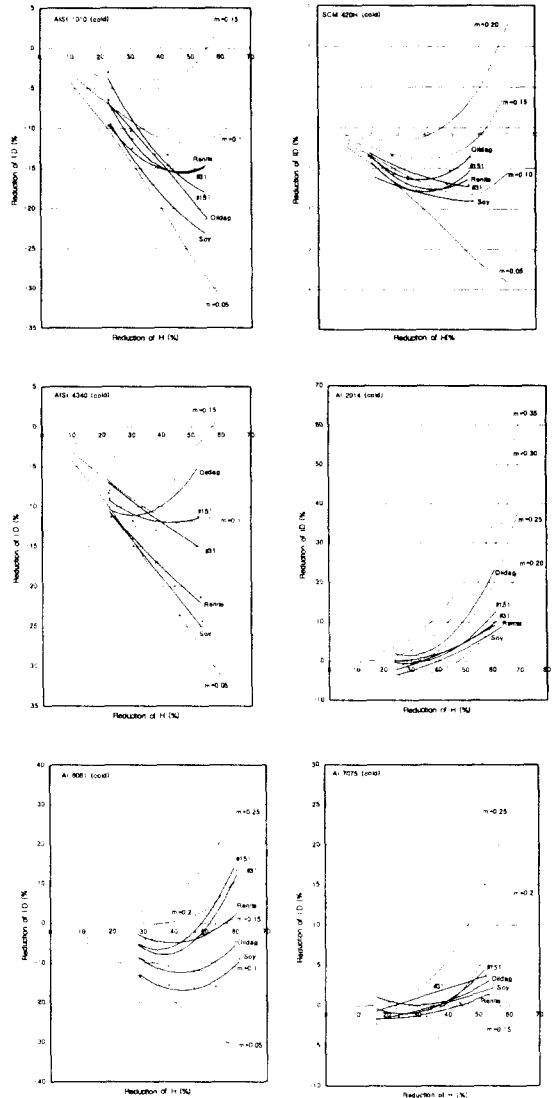


Fig.3 Calibration curves and the plot curves after cold ring compression test

Fig. 3 의 냉간 링 압축 실험에서, 철강류인 연강

과 합금강은 전단 마찰 상수 값 $m=0.05\sim 0.14$ 범위로 윤활제에 따라 큰 차이를 보이지 않고 있으나, 알루미늄 3종은 모두가 상당히 높은 전단 마찰 상수 값 $m=0.08\sim 0.22$ 로 큰 차이를 보이고 있다. 철강류와 비교하여 약 2 배의 높은 전단 마찰 상수 값을 나타내고 있다. 연강류와 합금강의 전단 마찰 상수 값의 차이는 유동응력-변형률 관계식의 차이에 따른 유동특성 차이에 의해 변화를 보인 것이 아닌가 생각되고, 알루미늄과 철강류의 전단 마찰 상수 값의 차이가 큰 것도 알루미늄과 철강류의 냉간에서의 유동특성이 약간의 영향을 미치는 것이 아닌가 생각된다.

Fig. 4에 열간 링 압축 실험의 결과를 나타내었다. 열간에서는 냉간 압축 실험과는 달리 윤활제에 따라 전단 마찰 상수 값의 차이가 심한 것을 보여주고 있다. 또한, 냉간 링 압축 실험결과와 반대의 현상을 나타내고 있다. 냉간에서는 철강류의 전단 마찰상수 값이 알루미늄보다 작았으나, 열간에서는 철강류의 전단 마찰 상수 값 $m=0.17\sim 0.62$, 알루미늄이 $m=0.05\sim 0.35$ 로 철강류보다 약 2 배정도 낮게 나타났다. 또한, 철강류에서는 열간 압축 실험한 결과가 냉간 압축 실험한 결과보다 거의 다 높은 경향을 보이고 있으나 알루미늄에서는 열간 압축 실험한 값이 냉간 압축 실험한 값보다 적은 값을 보여주고 있다. 이는 알루미늄의 경우, 냉간 가공에서는 유동응력-변형률 관계식에 의한 유동특성의 차이가 마찰에 약간의 영향을 주었다고 생각되었으나, 열간에서는 철강류보다 알루미늄의 유동성이 우수하기 때문에 낮은 전단 마찰 상수 값을 보인 것이 아닌가 생각된다.

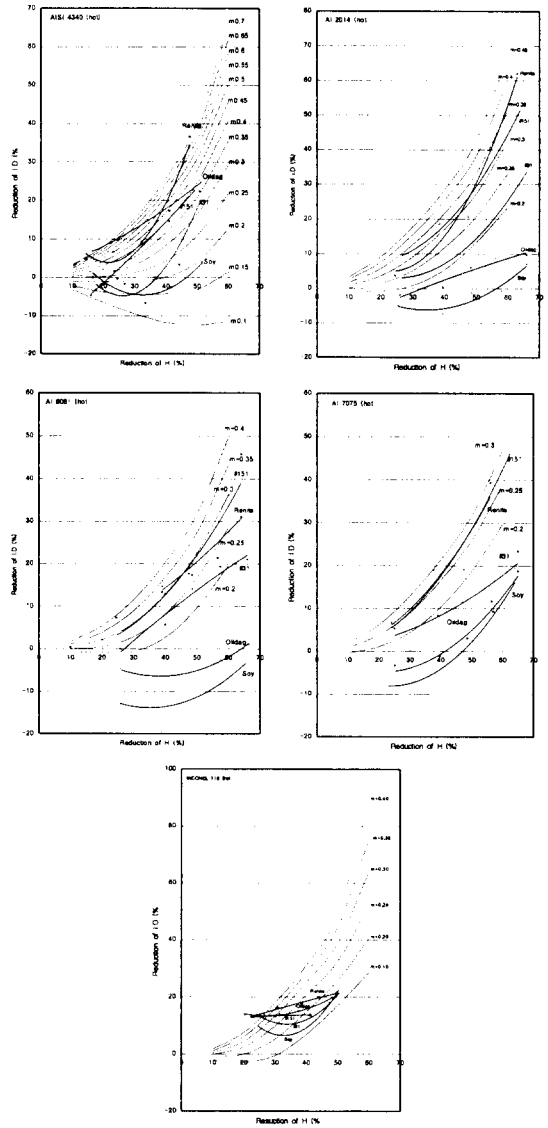
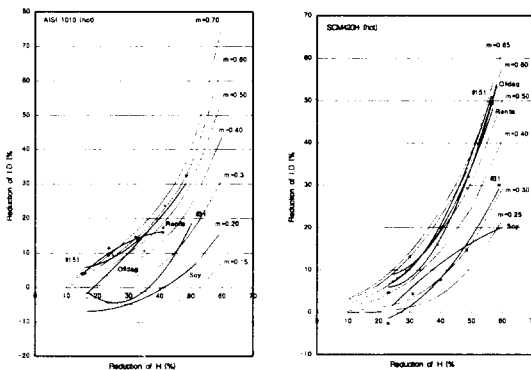


Fig.4 Calibration curves and the plot curves after hot ring compression test

3.3 윤활제에 따른 전단 마찰 상수 값의 변화

본 실험에 사용된 다섯 가지 윤활제 중 두종류는 유용성 흑연계 윤활제, 두종류는 수용성 흑연계 윤활제이고 나머지 한종류는 수용성 백색 코팅제이다.

먼저, 유용성 흑연계 윤활제인 미강유는 냉간에서 $m=0.05\sim 0.18$, 열간에서는 $0.05\sim 0.35$ 범위로 냉간에서는 재질에 따른 변화가 크지 않으나,



열간에서는 냉간에서 보다 변화 폭이 크게 나타나고 있다. Oildag 또한 미강유와 거의 같은 경향인 냉간에서 $m=0.06\sim 0.22$, 열간에서 $m=0.2\sim 0.60$ 으로 냉간 보다 열간에서 큰 변화를 보여 주고 있다. 수용성 흑연계 윤활제인 Deltaforge #31 이 냉간에서 $m=0.08\sim 0.21$, 열간에서 $m=0.15\sim 0.31$, Renite 는 냉간에서 $m=0.08\sim 0.21$, 열간에서 $m=0.25\sim 0.55$ 의 전단 마찰 상수 값을 얻었다. 수용성 백색계 코팅제인 Deltaglaze #15 은 냉간에서 $m=0.07\sim 0.22$, 열간에서 $m=0.2\sim 0.62$ 의 경향을 나타내고 있다. 수용성 윤활제 및 코팅제 또한 유용성 윤활제와 같은 특성인 냉간보다 열간에서 큰 변화를 보여주고 있다.

냉간 링 압축 실험에서 유용성 윤활제, 수용성 윤활제 및 수용성 코팅제는 거의 같은 전단 마찰 상수 값의 특성을 나타내고 있으나, 유용성 윤활제는 철강류, 알루미늄 및 초합금등 재질에 관계없이 낮게 나타난 반면, 수용성 윤활제는 철강류에서는 높고 알루미늄과 초합금에서는 낮게 나타나는 경향을 보이고 있다. 수용성 백색계 코팅제의 경우도 수용성 윤활제와 같은 특성인 철강류에서는 높고 알루미늄과 초합금에서는 낮게 나타나고 있다. 또한, 열간 링 압축 실험에서 철강류에서는 유용성이 $m=0.17\sim 0.60$, 수용성 $m=0.2\sim 0.55$. 코팅제는 $m=0.4\sim 0.62$ 로 나타나고 있다. 알루미늄의 경우, 유용성 윤활제는 $m=0.05\sim 0.13$, 수용성 윤활제 $m=0.15\sim 0.35$, 수용성 코팅제는 $m=0.18\sim 0.30$ 으로 유용성과 수용성이 큰 차이를 보이고 있으며, 이는 유용성 윤활제와 수용성 윤활제의 냉각 속도차이에 기인한 결과로 보인다. 초합금은 윤활제에 따라 큰 차이를 보이지 않고 있다. 따라서, 알루미늄과 같이 열전도도가 큰 재료의 경우에는 유용성 윤활제가 적합하며, 철강류 및 초합금에는 유용성 윤활제가 마찰 전단 강도값을 낮추는 것으로 보인다.

4. 결 론

링 압축 시험을 이용하여 재료 및 윤활제별 마찰 전단 상수 값의 영향을 실험한 결과의 재질별, 윤활제별 냉간 및 열간의 결과를 Fig. 5 에 요약하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

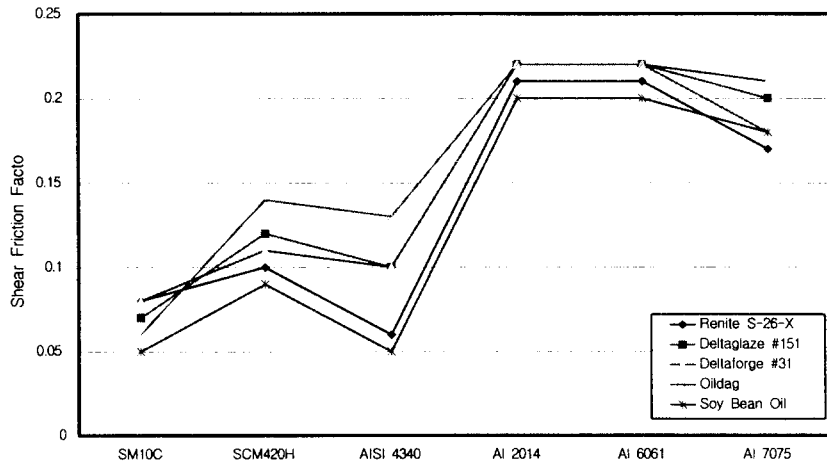
- (1) 냉간에서 철강류의 전단 마찰 상수 값은 윤활제에 큰 영향을 받지 않지만, 알루미늄의 경우에는 윤활제의 영향을 많이 받는다는 것을

알 수 있었다.

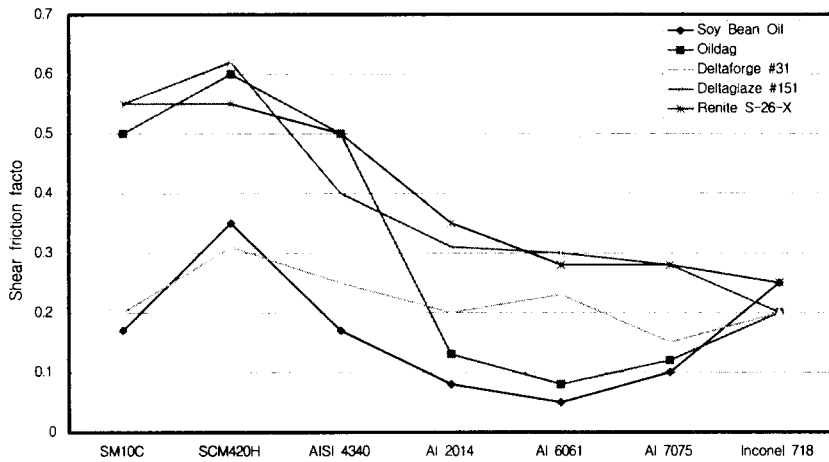
- (2) 열간에서는 냉간에서와 정반대 현상으로 철강류는 윤활제에 따라 전단 마찰 상수 값의 변화가 큰 반면, 알루미늄은 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.
- (3) 냉간에서 유용성 윤활제를 사용한 경우, 철강류, 알루미늄 및 초합금에서는 전단 마찰 상수 값이 낮게 나타난 반면, 수용성 윤활제는 철강류에서는 높고 알루미늄과 초합금에서는 낮게 나타나는 경향을 알 수 있었다.
- (4) 열간에서 유용성 윤활제를 사용한 경우, 철강류, 알루미늄 및 초합금에 관계없이 전단 마찰 상수 값이 낮게 나타난 반면, 수용성 윤활제를 사용한 경우, 철강류 및 알루미늄에서 높게 나타난 것을 알 수 있었다. 알루미늄에서는 수용성 윤활제 보다 유용성 윤활제가 우수하다는 것을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. "Glossary of terms and definitions in the field of friction", Wear and Lubrication : Tribology, OECD, Paris(1969)
2. A.T. Male and M.G. Cockcroft, "A method for the determination of the coefficient of friction of metals under conditions of bulk plastic deformation", J. Inst. Metal., 93, pp38-46(1964)
3. E. Felder and Y.L. Montagut, "Friction and wear during hot forging of steels", Tribology International, Vol.13, pp61-68(1980).
4. S. Venugopal, G. Srinivasan, S. Venkadesen and V. Seetharaman, "A note pf the determination of friction factor by means of the reduction capacity test", Journal Mech. Working Techn., Vol. 19, pp261-266(1989).
5. O. Pawelski, W. Rasp, and C. Hoerster, "The ring compression test as simulation test for the investigation of friction in hot metal forming", Steel Research, Vol. 60, pp395-402(1989).
6. K. H., Song, etal, "금형의 온도와 처리상태에 따른 판재의 마찰특성", 한국소성가공학회, '98 추계학술대회 논문집, pp182-185(1998).
7. SFTC, "DEFORM-2D user's manual"



(a) cold test



(b) hot test

Fig.5 Comparison of the shear friction factor for each materials and lubricants at cold and hot ring compression test