

## 나노분말이 함유된 온간단조용 윤활제 마찰특성

김대원<sup>1</sup> · 김영량<sup>2</sup> · 이근안<sup>1</sup> · 최호준<sup>1</sup> · 윤덕재<sup>1</sup> · 신영철<sup>1</sup> · 이준균<sup>1</sup> · 임성주<sup>#</sup>

# Friction Characteristics of Warm a Forging Lubricant Containing Nano Graphite Powder

D. W. Kim, Y. R. Kim, G. A. Lee, H. J. Choi, D. J. Yun, Y. C. Shin, J. K. Lee, S. J. Lim  
(Received August 18, 2011 / Revised December 8, 2011 / Accepted December 21, 2011)

### Abstract

During warm forging, materials are formed in the temperature range of 300°C ~ 900°C. In this temperature range, the friction between the forging die and the material is very high and has a negative effect on the forming process causing severe die wear and possible defects in the component because of stick-slip. Thus, lubrication characteristics are a very important factor for productivity during warm forging. In this paper, ring compression experiments were conducted to estimate the friction factor between the die and the materials as the main factor in characterizing the lubricant. Also, ring tests using normal graphite powder as a lubricant coating system were compared with tests using nano graphite powder. The results confirm that the nano graphite is superior to the normal graphite in view of its lubricating effect. In addition, the friction factor ( $m$ ) was estimated with respect to the amount of the nano graphite content in the lubricant. With 10 % nano graphite the friction factor had the lowest value as compared to other amounts. It can be concluded that the amount of the nano graphite in the coating system can be optimized to obtain the best lubrication condition between the die and the material using ring test experiments.

**Key Words** : Warm Forging, Warm Forging Lubricant, Lubrication Characteristics, Ring Compression Test

## 1. 서 론

온간단조(Warm forging)는 온도영역 300°C~900°C의 범위에서 성형하는 단조법이다. 온간단조는 냉간단조에 비해 낮은 유동응력으로 소재의 대변형이 가능하여 자동차 부품 및 기계부품에 적용되어지는 생산 공법이다. 온간단조의 경우는 열간 단조보다 소재가열 온도가 낮음에도 불구하고 별도로 개발된 윤활제가 없는 관계로 열간 이형제를 그대로 사용하고 있기때문에 그로 인한 금형과 소재간의 마찰상수가 크고, 높은 열전달이 발생하여 상대적으로 낮은 금형수명 및 소재 소착

등이 발생 등 단점이 되는 요소들이 있다. 또한 열간 이형제 분사 시 슬러지(Sludge)와 같은 부생성물이나 분진 등이 많이 발생하고 있어 환경적인 측면에서도 여러 가지 치명적이고 금형의 더러워짐 및 부생성물을 제거하기 위한 세척공정을 추가적으로 진행해야하므로 생산량을 떨어뜨리는 문제점도 함께 발생되고 있어 온간단조공정의 발전과 활성화를 위하여 온간단조용 전용윤활제 개발이 절실히 요구되고 있다[1~2].

온간 단조용 윤활제는 금속의 표면에 낮은 전단강도를 지니고 있는 막을 형성하여 소재와 금형이 소착 되는 것을 방지하는 이형제의 역할을

1. 한국생산기술연구원 정밀성형기술센터  
2. 삼영화학  
# 교신저자: 한국생산기술연구원, E-mail:lim@kitech.re.kr

하며 단조 과정 중 마찰상수를 감소 시켜준다. 또한 성형 온도에서 금형과 소재 사이의 반응을 최소화 시켜주며 금형 표면의 부식과 마모를 방지시켜 주고 표면이 우수한 단조품을 생산하는 보조역할도 한다. 따라서 새로운 윤활제를 개발하는 경우 개발된 윤활제가 요구했던 마찰특성을 갖는지 평가하는 것은 매우 중요하다.

금속성형 공정에서 금속 유동은 금형으로부터 소재로 전달되는 압력에 의해 일어난다. 또한 재료와 금형 접촉면에서의 마찰조건은 금속유동, 표면형성, 내부결함, 금형 내부에 작용하는 응력, 성형에너지 등에 큰 영향을 미친다. 그러므로 금속성형 공정에서의 마찰조건을 판단하는 것이 중요한 문제가 된다. 이러한 마찰조건과 윤활 상태를 평가하기 위하여 전후방압축시험, 스파이크 테스트, 링 압축 시험방법 등이 있는데 일반적으로 링 압축시험이 많이 이용되고 있다. 본 연구에서는 링 압축 실험을 통하여 중간 윤활제의 마찰상수를 측정하였다.

링 압축 실험으로 마찰 상수로 정의된 윤활성을 얻게 된다. 링 압축실험은 평평한 원통형상의 링 시편에 어떤 일정한 변형을 가하여 성형 전·후 높이의 변화율에 따른 내경과 외경 변화율은 금형과 시편 접촉면의 마찰과 밀접한 관계가 있다. 링의 내경 변화율은 접촉면의 마찰상수를 결정하는데 가장 간단한 방법이다. 즉 윤활성이 우수한 윤활제일수록 Fig. 8의 우측 사진처럼 압축 후 내경이 커지고 소재유동이 외부 방향으로 진행된다[3~8].

본 논문에서는 일반입자(Normal graphite powder)와, 나노입자(Nano-particle-sized graphite powder) 및 부재료의 배합조건에 따른 윤활제 마찰특성을 평가하였다. 주재료인 흑연분말 입자의 크기가 마찰특성에 어떠한 영향을 주는지 분석하기 위하여 링 시편을 디핑 시스템(Dipping System)에서 코팅 처리 후 마찰특성 평가를 위한 압축실험을 수행하였다. 마찰특성 평가를 위한 기준 그래프는 링 압축성형 해석과 링 압축 실험 결과를 바탕으로 도출하였으며 이를 근거로 링 압축 실험 후 높이변화율에 대한 내경변화율비를 고려하여 다른 중간 윤활제의 마찰상수(Friction factor :  $m$ )를 제시하였다.

## 2. 링 압축 실험 조건

본 논문에서 마찰평가를 위하여 실험에 사용된 링 시편크기는 높이 : 내경 : 외경비가 2 : 3 : 6

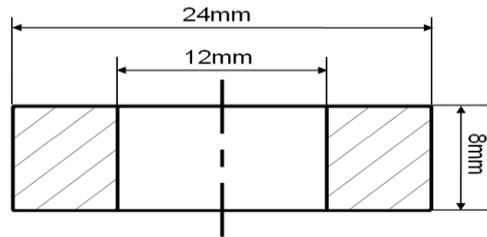


Fig. 1 Specimen for ring compression test

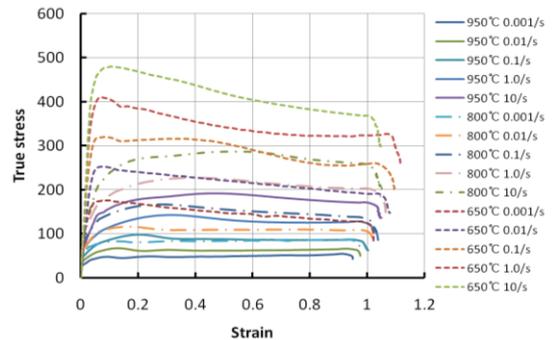


Fig. 2 Stress-strain curve using SM45C

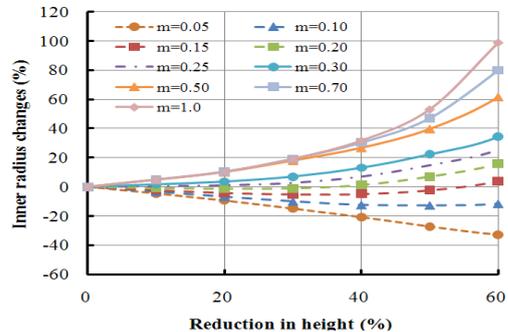


Fig. 3 Curve of friction factor obtained from the ring compression using FEM analysis

비율로 링 시편을 Fig. 1 과 같이 제작하였다. 소재의 재질은 SM45C 이며, 마찰상수 표준 그래프는 DEFORM 2D 를 이용한 성형해석을 통하여 획득하였다. 소재의 물성치는 Fig. 2 와 같이 SM45C 를 고온고속 압축시험(Gleeble test)을 통해 얻은 데이터를 물성치로 입력하였다. 링 압축 해석 시 부여된 조건은 링 소재와 금형면간 열전달 및 마찰 조건과 소재의 외부와 접촉은 대류조건을 적용하였으며, 소재온도 약 800℃, 금형 온도는 약 300℃ 범위로 설정하였다. 링 압축 성형해석은 마찰상수 범위를 표준 진단 마찰 그래프의 마찰상수와 동일한 조건에서 성형해석을 수행하였다.

**Table 1 Lubricant mixing ratio**

Case	1	2	3	4	5
Graphite (%)	8.0	10.0	12.0	13.3	16.7
Water based solvent (%)	84.0	82.0	80.0	78.7	75.3
Etc. (%)	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0



**Fig. 4 Lubricant coating system**

링 압축 성형해석을 수행한 결과 Fig. 3와 같이 온간 단조용 마찰상수 그래프를 얻을 수 있었다.

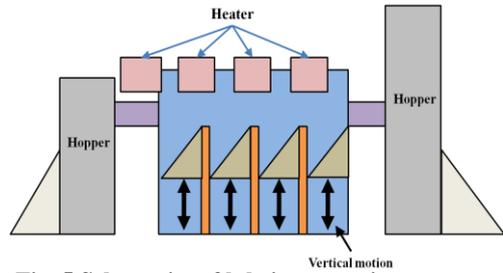
온간 단조용으로 개발된 온간 윤활제의 조성비는 Table 1과 같이 나노입자 흑연분말의 배합량에 따라 수성용제(Water based solvent) 이용하여 각 윤활제 종류를 나누었다. 그리고 소포제 2%, 분산제 3.2%, 레벨링제 2.8%로 5가지 윤활제 모두 동일하게 배합되었다. 윤활제 약품을 약 30분 가량 교반 후 Fig. 4와 같이 개발된 디핑 시스템에서 링 소재에 윤활 코팅을 하였다. 링 소재에 윤활제 코팅된 두께는 약  $6\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ 이다. 링 소재 코팅용으로 사용된 장치의 코팅 공정 도식도는 Fig. 5와 같이 나타났다.

링 소재 가열 시 사용한 가열로는 Fig. 7와 같이 고주파 유도 가열로(Induction heater)를 사용하였으며,  $800^{\circ}\text{C}$  가열 시 소요되는 시간은 약 20sec~23sec 정도이며 가열시간과 전류를 조절하는 것이 가능하다. 가압 프레스는 Fig. 6과 같은 50ton 유압 프레스를 사용하였으며 압하율 10%, 30%, 50% 조건으로 링 압축 실험을 수행하였다.

실험 시 압하율을 정밀하게 제어하여 데이터의 신뢰도를 높이기 위하여 표준 기준 블록 링을 사용하여 항상 일정한 높이로 가압이 진행되도록 하였다.

### 3. 링 압축 실험 결과

일반 입자 흑연분말과 나노입자 흑연분말로 링



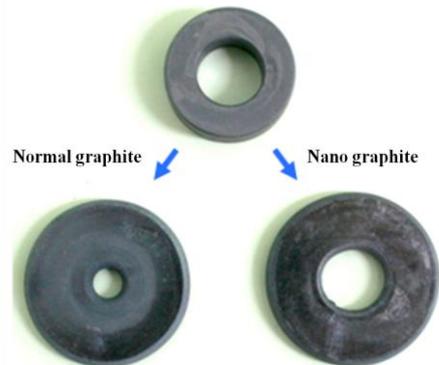
**Fig. 5 Schematics of lubricant coating system**



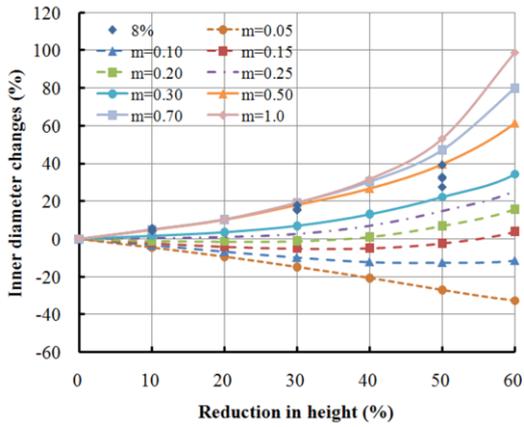
**Fig. 6 Experimental set up of ring compression**



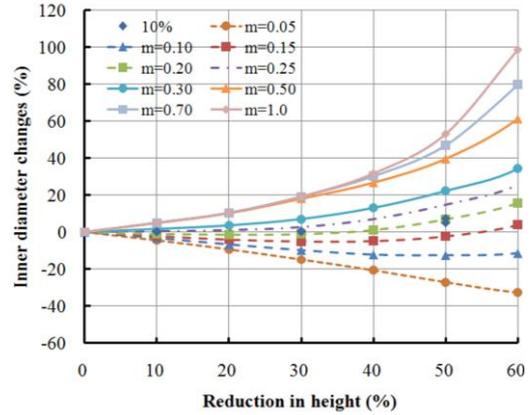
**Fig. 7 The experiment using high frequency induction heating furnace**



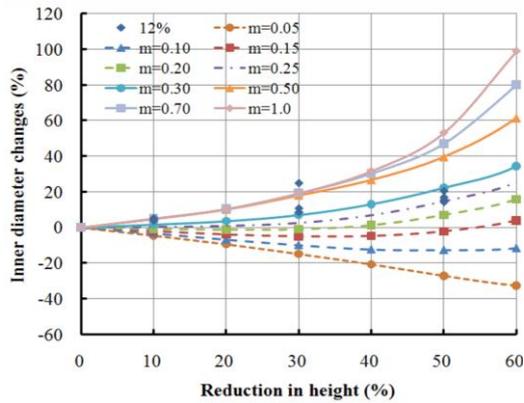
**Fig. 8 Deformed shapes of the ring with the normal graphite and the nano graphite content**



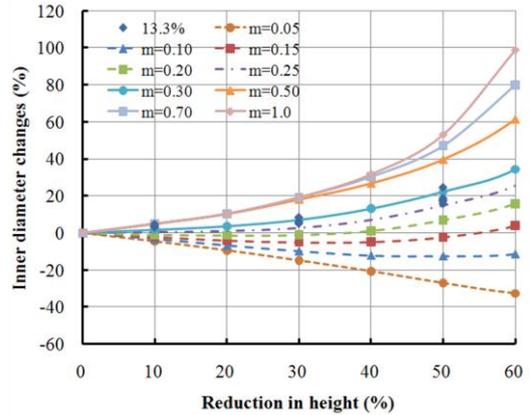
(a) 8%



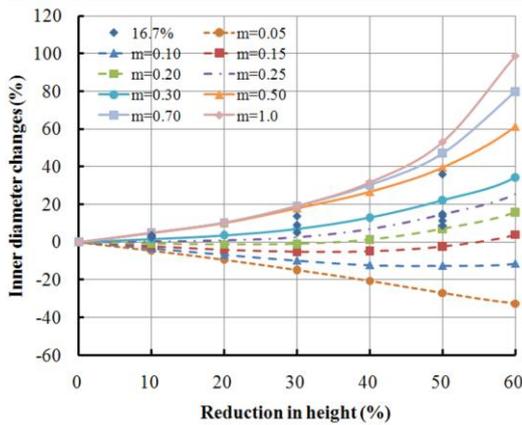
(b) 10%



(c) 12%



(d) 13.3%

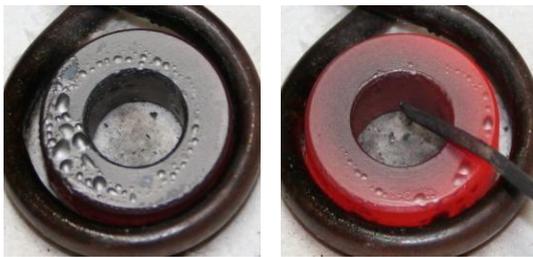


(e) 16.7%

Fig. 9 Experimental results for ring compression test

**Table 2 Measured values of constant shear friction through ring experiments**

Case	Nano graphite (%)	Friction factor ( $m$ )
1	8.0	0.30 ~ 0.50
2	10.0	0.15 ~ 0.20
3	12.0	0.25 ~ 0.30
4	13.3	0.25 ~ 0.30
5	16.7	0.20 ~ 0.30



(a) 16.7%

(b) 8%

**Fig.10 Air chambers generated at heating process using the induction furnace**

압축 실험을 하였을 때 Fig. 8 과 같이 마찰특성에 상당한 차이가 나타남을 알 수 있었다. 입자가 200nm 이하인 나노입자 흑연분말을 윤활제로 배합하는 경우 소재에 접착성도 높으며 압축 시 윤활제 벗겨짐 현상도 적기 때문에 일반 윤활제보다 우수한 윤활 효과가 나타나는 것으로 판단된다.

나노입자 흑연분말량에 따른 링 압축 실험 결과는 Fig. 9 와 같이 나타났다. 배합된 윤활제 Case 중에서 가장 마찰상수가 낮게 나타난 것은 나노입자 흑연분말량이 10% 일 때 마찰상수( $m$ )가 0.2 이하로 나타남을 확인하였다. 나노입자 흑연분말량이 12%, 13.3%, 16.7% 일 때 각 마찰상수는 대략 0.2~0.3 범위의 값으로 나타났다. 마찰상수가 가장 크게 나타난 경우는 나노입자 흑연분말량이 8%일 때 마찰계수가 0.3~0.5으로 나타남에 따라 나노입자 흑연분말량이 적거나 너무 많은 경우 오히려 윤활특성이 저하 됨을 알 수 있었다.

각 윤활제 Case 별로 마찰 상수의 범위는 Table 2와 같이 나타났다. 나노입자 흑연분말량에 따라 소재 가열 시 나타나는 현상도 다르게 나타났다. Fig. 10과 같이 나노입자 흑연분말량이 많으면 많을수록 윤활효과는 조금씩 개선이 되지만 소재

가열 시 기포가 발생되었고, 나노입자 흑연분말량이 적을수록 링 소재 가열 시 기포가 적게 발생하였으나 나노입자 흑연분말량이 적기 때문에 상대적으로 윤활효과는 떨어짐을 확인 할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 나노입자 흑연분말의 함유량에 따라서 마찰특성이 어떠한 결과를 나타내는지 평가하기 위하여 윤활제에 대한 링 압축 실험을 수행하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

일반 입자흑연이 포함된 윤활제와 200nm 급의 나노입자흑연분말이 포함된 윤활제를 비교 하였을 때 나노입자 흑연분말이 배합된 윤활제가 우수한 윤활효과를 나타냈음을 알 수 있었다. 나노입자 흑연분말량이 10% 일 때 마찰상수가 0.2 이하로 나타남에 따라 최적의 윤활제 배합비를 도출 하였다.

나노입자 흑연 분말 함유량이 많으면 많을수록 윤활효과는 증가하지만 소재 가열 시 기포가 발생할 수 있고, 나노입자 흑연분말량이 적을수록 링 소재 가열 시 기포가 적게 발생하나 나노입자 흑연분말량이 적기 때문에 상대적으로 윤활효과는 떨어짐을 확인 할 수 있었다. 따라서 요구하는 윤활특성을 얻기 위해서는 적당한 함량의 나노입자 흑연분말량이 필요함을 제시하였다

본 연구결과를 통하여 마찰특성이 우수한 온간단조용 윤활제가 개발 됨 으로서 향후 이를 바탕으로 열간단조 공정의 온간단조 공정대체와 이를 통한 단조품의 생산성 향상과 품질향상으로 고부가가치 산업 전환이 기대되던 지속적인 온간단조 공정의 활성화를 위하여 이 분야에 더 많은 연구가 계속적으로 진행되어야 할 것이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] M. Knoerr, 1996, Fatigue Failure of Cold Forging Tooling : Causes and Possible Solutions Through Fatigue Analysis, J. Mater. Process. Technol., Vol. 46, No. 1, pp.57~71.
- [2] J. A. Schey, 1983, Tribology in Metalworking Friction, Lubrication and Wear, American Society for Metals, Ohio, pp.32~73.
- [3] X. Tan, P. A. F. Martins, N. Bay, W. Zhang, 1998, Friction Studies at Different Normal Pressures with

- Alternative Ring-compression Tests, J. Mater. Process. Technol., Vol. 80, pp. 292~297.
- [4] P. Hartley, C.E.N. Sturgess, G. W. Roew, 1979, Friction in Finite-element Analyses of Metalforming Process, Int. J. Mech. Sci., Vol. 21, No. 5, pp. 301~311.
- [5] N. T. Rudkins, P. Hartley, I. Pillinger, D. Petty, 1996, Friction Modeling and Experimental Observation in Hot Ring Compression Tests, J. Mater. Process. Technol., Vol. 60, No. 3, pp. 349~353.
- [6] A. N. Levanov, 1997, Improvement of Metal Forming Processes by Means of Useful Effect of Plastic Friction, J. Mater. Process. Technol., Vol.72, No. 2, pp.314~316.
- [7] K. Andersson, S. Kivivuori, A.S. Korhonen 1996, Effect of the Heat-transfer Coefficient in Ring-Compression Tests, J. Mater. Process. Technol., Vol. 62, No. 1, pp.10~13.
- [8] M. Chandrasekaran, A. William Batchelor, S. Jana, 1997, Friction Surfacing of Metal Coatings on Steel and Aluminum Substrate, J. Mater. Process. Technol., Vol. 72, No. 3, pp. 446~452.