

# 열처리 생략강의 인발특성 향상을 위한 윤활제와 피막제의 기계적 거동 고찰

이상준\*, 유위경\*, 이영석\*\*, 변상민#

## An Investigation on the Mechanical Behaviors of Lubricant and Coating to Improve the Drawability of Non-heat Treated Steels

Sang-Jun Lee\*, Ui-Kyung, Yoo\*, Young-Seog Lee\*\*, Sang-Min Byon#

### ABSTRACT

In this research, we developed a pilot wire-drawing machine as well as wire end-pointing roller. Using these machines, we performed a pilot wire-drawing test at different coating material and lubricant when the reduction ratio is 10 %. To inversely compute the friction coefficient between the coating layer of wire and the surface of die for a specific lubricant, we carried out a series of three dimensional finite element analysis. Results show that the drawing force is varied with the coating material of wire at the same reduction ratio and lubricant. It is noted that the frictional coefficient in drawing is dependent on the coupled property of coating material and lubricant, indicating the best coating material for a given lubricant.

**Key Words** : Drawability(인발특성), Lubricant(윤활), Coating(피막), Wire-drawing(인발), Finite element analysis (유한요소해석)

### 1. 서 론

열처리 생략강(Non-heat treated steels)은 공형 압연(Groove rolling)으로부터 생산된 선재(Wire)를 별도의 열처리 없이 인발(Drawing)공정을 통해서 더 직경이 작은 와이어로 가공할 수 있도록 설계된 소재를 의미한다. 이것은 열처리 없이도 성형성이 우수해 다이스(Dies)의 수명을 떨어뜨리지 않으면서 성형이 잘 되

는 금속적 특성을 가지고 있다.<sup>[1,2]</sup>

이러한 금속적 특성 이외에 인발가공 공정중 양호한 성형성을 유지하기 위해 금속표면에 피막(Coating)을 입히고 윤활제(Lubricant)를 도포한다. 인발공정은 통상 직경이 큰 원형 단면소재를 직경이 작은 원형 단면소재로 출측 인발력(당기는 힘)을 이용하여 소성 변형 시키는 가공공정이다. 따라서, 소재와 다이스 사이에 큰 소성변형력이 작용하므로 기계적 현상을 결정짓는 피막과 윤활제의 선택에 신중을 기해야 한다. 그동안 마찰재의 고체 윤활제에 대한 연구<sup>[3]</sup>와 탄소강의 미세조직의 인자가 신선 가공된 강선의 연성에 미치는 영향을 고찰<sup>[4]</sup>하는 연구가 진행되어왔다.

위의 연구결과들은 일반강에 대한 피막과 윤활제

\* 중앙대학교 대학원 기계공학부

\*\* 중앙대학교 기계공학부

# 교신저자: 동아대학교 기계공학부

E-mail: smbyon@dau.ac.kr

에 대한 연구가 대부분이고 열처리 생략강에 대한 피막 및 윤활제에 대한 연구는 거의 없는 상태이다. 열처리 생략강의 경우에는 일반강의 경우보다 인발시 인발력이 많이 발생하고 또한 후가공인 냉간 압조공정(볼트 성형 공정)에서 압조력이 급격히 증가하는 어려운 점이 존재한다. 따라서 이에 대한 연구가 절실히 요구된다.

본 연구에서는 피막 및 윤활류가 인발특성에 미치는 영향성의 지표로 인발력을 선정하였다. 인발력은 소재표면 피막의 상태(불규칙 피막 두께 혹은 피막 벗겨짐)와 윤활제의 특성(불규칙 윤활제 도포와 윤활제 상실)에 따라 매우 민감하게 나타나는 값이기 때문이기 때문에 지표로써 타당하다. 인발력의 급격한 증가는 소재표면 상태를 불량하게 하여 다이스 내부의 마모를 촉진시키고 또한 피막과 마찰 상태를 불균일하게 한다.

본 연구에서 인발력을 측정하기 위해서 파이롯드 인발 시험기(Pilot drawing machine)를 직접 제작하였다. 인발을 하기 위해서는 소재 끝을 테이퍼 형태로 가공하여 소재의 일부분이 다이스 밖으로 빠져 나가 있도록 해야 한다. 이를 위해서 소재 끝을 테이퍼 형태로 압연가공하는 포인터 압연기(Pointing rolling machine)를 또한 제작하였다.

개발된 포인터 압연기와 파이롯드 인발 시험기를 이용하여 인발소재의 종류, 피막 종류 및 소재와 다이스 사이에 도포하는 윤활제의 종류에 따라 인발테스트를 수행하였다. 인발소재는 일반 탄소강(SWRCH45F)과 열처리 생략강(ULCB) 두 종류를 선택하였으며, 피막제는 인산염 피막의 화학성분을 다르게 하여 4 종류를 사용하였다. 윤활제는 고급제와 일반제의 2가지 경우를 사용하였다.

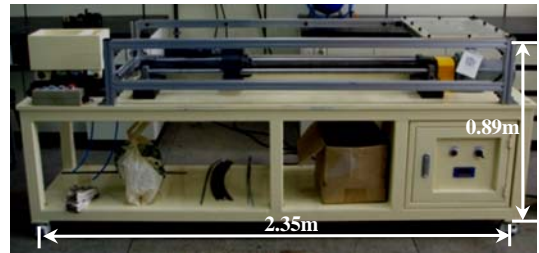
실험을 통하여 인발소재, 피막 및 윤활제의 종류에 따른 인발력을 시간에 따라 측정하였다. 소재와 다이스 사이의 마찰계수를 정량적으로 평가하기 위해 3차원 유한요소해석(Finite element analysis)을 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

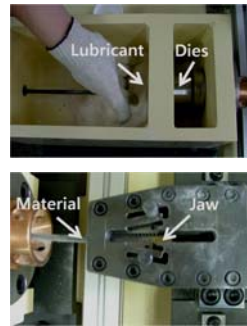
### 2.1 장치의 구조 및 작동

인발 강종, 피막 및 윤활제의 종류에 따른 인발력

을 측정하기 위해서 Fig. 1(a)과 같은 파이롯드 인발 시험기를 개발하였다. 또한 인발소재를 다이스 끝으로 유출하여 인발시키기 (Fig. 1(b)) 위해 끝 부분을 테이퍼로 다듬는 포인팅 압연기도 Fig. 1(c)와 같이 개발하였다.



(a) Pilot drawing machine



(b) Operation of drawing machine



(c) Pointing rolling machine

Fig.1 Device for measuring drawing force

파이롯드 인발 시험기를 이용하여 인발력을 측정하는 절차는 다음과 같다.

(i) 포인팅 압연기를 이용하여 인발시편의 끝단을 테이퍼로 가공한다. 압연기 롤의 측면에 다양한 크기의 공형이 있고 한 공형 내에서도 원주방향으로 사이즈가 다르게 설계되어 있어서 선제 시편을 반복적으로 롤갯에 투입함으로써 쉽게 테이퍼 형태로 만들 수 있다. 이때 유의할 점은 Fig.1(b)에서 보는 바와 같이 소재가 다이스를 통과해서 척(CHUCK)에 물리는 데까지는 거리가 필요하므로 충분한 테이퍼 길이를 확보해야 한다는 점이다.

(ii) 테이퍼 형태로 만든 시편 끝을 윤활제 박스 및 다이스를 통과시켜 척에 물릴 수 있도록 밀어 넣는

다. 척의 조(Jaw)를 오픈하여 선재시편 끝을 안정되게 물린다. 선재시편이 윤활제 박스를 통과시킬 때 시편 표면에 윤활제가 잘 묻을 수 있도록 박스에 충분히 윤활제를 준비한다. 본 연구에 사용한 윤활제는 파우더(Powder)형태의 건식 윤활제이다.

(iii)인발하중을 측정하기 위한 로드셀(Load cell)이 인발 모터에 장착되어 있다. 로드셀에서 측정된 실시간 데이터를 컴퓨터에 전송하기 위해 컴퓨터와 터미널을 서로 연결 하고 데이터 전송 테스트 및 셋팅을 완료한다.

(iv)인발시편 끝이 장착된 인발척을 후진하여 로드셀을 통해 실시간으로 나가는 인발력 신호를 컴퓨터에 저장한다. 인발시편이 다이스를 모두 통과하게 되면 실험이 완료된 것으로 판단한다.

(v)실험조건별로 위의 (i)~(iv) 단계를 반복하여 인발력을 컴퓨터에 저장한다.

**Table 1 Specimen geometry and material parameter**

	ULCB (Non-heat treated steel)	SWRCH45F (Carbon steel)
Diameter(mm)		7.8
Length(mm)		280
Yield stress (0.5% offset, MPa)	575	453
Modulus of elasticity (GPa)	291	204

## 2.2 인발 강종

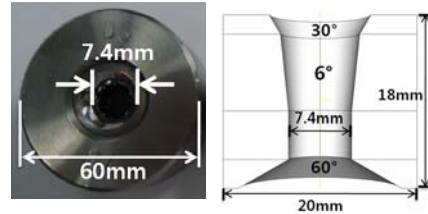
실험에는 열처리 생략강인 ULCB(Ultra Low Carbon Banite)와 이것의 비교강종으로 SWRCH45F(중탄소강)을 사용하였다. 시편의 치수와 물성은 Table 1에 나타내었다. ULCB는 가공성이 우수하여 봉강 및 선재제품에 주로 이용되고 있고 SWRCH45F는 일반 공작기계나 금형에서 많이 사용되고있다.

## 2.3 실험조건

### 2.3.1 단면적 감면율 조건

소성변형 중 발생하는 피복제 및 윤활제의 거동을 고찰하기 위해서 소재 단면적의 감면율을 10%로 설정하였다. 다이스의 입측 직경은 소재의 직경과 같은

7.8mm이고 출측 직경은 원추각도 6°의 경사로 접근하여 7.4mm로 설계되었다. 실험에 적용한 다이스 실제 형상 및 기하학을 Fig. 2에 나타내었다.



**Fig. 2 Dies geometry used in experiment**

### 2.3.2 피막조건

피막은 인발시편을 피막 용융액이 담겨 있는 욕조에 침수시키고 또한 꺼낸 후 별도의 열처리를 통해서 인발시편 표면에 침착시킨다. 인발시편 표면에 실험을 위해 코팅한 피막은 4가지 종류이다. 피막제 중 3670은 일반적인 인발강종인 탄소강(45F)에 가장 많이 쓰는 피막제이고, 나머지는 이것을 기준으로 약간 성분을 변화시킨 것이다. 본 연구에서는 탄소강(45F)와 피막제 3670을 비교 기준 조합 시편으로 택하고 열처리 생략강(ULCB)과 나머지 3가지 피막제의 조합을 인발시편으로 선택하였다. Table 2는 각 조합에 따른 인발시편의 종류를 보여준다.

**Table 2 Specimen type composed of coating material and drawing steel**

Specimen Type	Coating Materials	Drawing Steels
A	3675	ULCB
B	181X	ULCB
C	3670	SWRCH45F
D	3670X	ULCB

### 2.3.3 윤활조건

신선되는 소재의 직경이 8mm이하 일 때에는 분말(Powder)형태의 건식 윤활제를 사용하고 8mm이상인 경우는 습식 윤활제를 주로 사용한다. 본 실험에서는 소재의 직경이 7.8mm이므로 건식 윤활제를 사용하였다. 윤활제가 인발력에 미치는 영향을 알아보기 위하

여 2종류의 건식 윤활제를 사용하였다.  $\delta$ -Type 윤활제는 스테인레스강을 인발할 때 사용하는 윤활 특성이 우수한 고급 건식 윤활제 이고  $\beta$ -Type은 탄소강 혹은 합금강을 인발할 때 사용하는 일반 건식 윤활제이다.

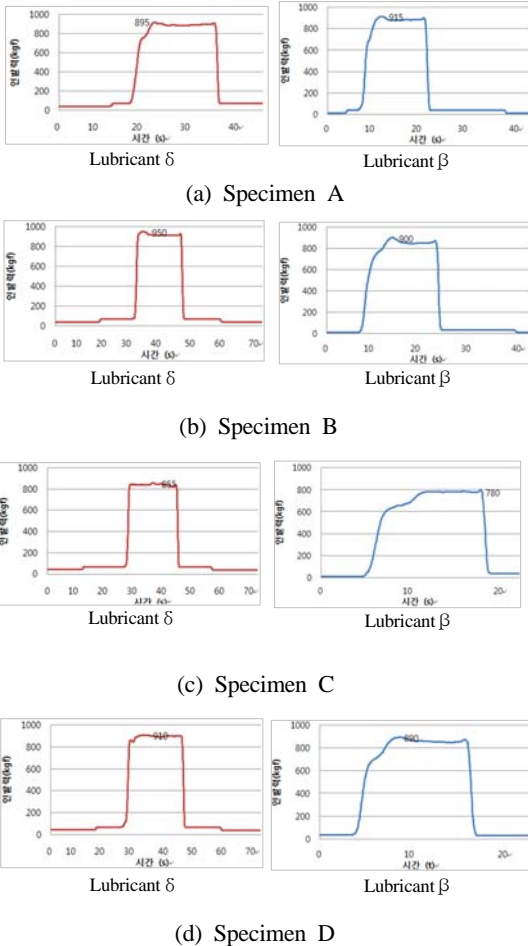


Fig. 3 Measurement of drawing force

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 인발력 측정결과 분석

Fig. 3은 인발진행에 따른 인발력의 변화를 로드셀로부터 측정한 결과이다. 인발강종/피막제로 이루어

져 있는 시편 A,B,C,D의 윤활제에 따른 거동을 인발력을 통해 비교해 볼 수 있다.

인발진행에 따른 인발력의 거동은 크게 2구간으로 나누어 진다. 즉, 소재가 다이스에 취입되고 또한 빠져나가는 비정상구간과 소재가 다이스에 완전히 접촉되어 공정조건의 변화없이 일정하게 변형하는 정상구간으로 구분된다. 윤활제에 따른 인발력 분석은 비정상구간과 정상구간으로 나누어서 분석하는 것이 필요하다.

비정상구간에서 인발력을 관찰해 보면, 고급 윤활제인  $\delta$ -type은 비정상영역이 거의 없는 것을 관찰할 수 있다. 즉, 소재가 다이스에 취입되는 것과 동시에 소재와 다이스 사이의 마찰상태가 안정되어 정상적인 변형이 이루어지는 것을 의미한다. 이에 비해 일반 윤활제인  $\beta$ -type의 경우에는 비정상영역이 전체 가공영역의 30%~50% 정도 차지하는 것으로 나타나고 있다. 비정상영역에서는 소재 및 피막제가 길이방향으로 불균일 변형이 이루어지므로 표면품질 불량률의 확률이 높다. 따라서,  $\delta$ -type의 윤활제가  $\beta$ -type의 윤활제 보다 소재의 가공 실수를 측면에서 훨씬 우수한 것을 알 수 있다.

정상상태 구간에서의 인발력 특성을 고찰하기 위해서 Fig. 2에서 인발력의 변화가 거의 없는 영역의 인발력 평균치를 Table 3으로 정리하였다. 결과를 보면,  $\delta$ -type이 고급 윤활제 이지만 일반 윤활제인  $\beta$ -type를 사용했을 때 보다 인발력의 저감효과는 별로 없는 것으로 나타나고 있다. 오히려 다소간의 인발력을 상승시키는 경우도 있는 것으로 나타나고 있다. 같은 변형기하학을 가지고 있기 때문에 인발력에 영향을 미치는 것은 소재와 다이스 사이의 마찰특성으로 귀결된다.

Table 3 Average drawing force in steady-state

Drawing Force(kgf) Specimen	Specimen A	Specimen B	Specimen C	Specimen D
$\delta$ -type	895	950	855	910
$\beta$ -type	915	950	780	890

열처리 생략강(ULCB)의 피막제 및 윤활제가 인발 하중에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 먼저 비교강

중인 일반탄소강 시편 C를 고찰하였다. 이 경우에는 피복제 3670이 사용되었는데,  $\beta$ -type 윤활제와 좋은 마찰특성을 나타내는 것을 알 수 있다. ULCB의 경우에 이와 같은 피막제와 윤활제의 상호작용을 살펴보면,  $\delta$ -type의 윤활제의 경우에는 피복제 3675가 사용된 시편 A의 경우가,  $\beta$ -type 윤활제의 경우에는 피복제 3670X가 사용된 시편 D의 경우가 다른 피막제에 비해 마찰력 저감효과가 있는 것으로 나타나고 있다.

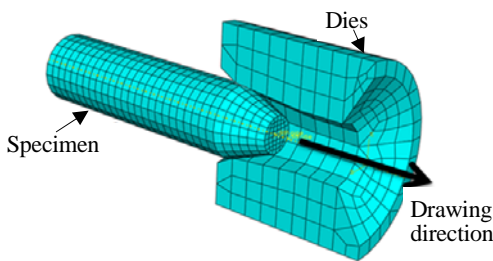


Fig. 4 Process geometry and finite element mesh

### 3.2 유한요소 해석에 의한 피막/윤활제의 마찰특성 분석

동일한 강종 및 동일한 인발 감면율에서는 동일한 인발력이 이론적으로는 얻어진다. 그러나 앞에서의 시편 A, B, D에서는 다양한 인발력이 측정되었다. 이것은 피막 및 윤활제의 특성에 의해 소재와 금형이 접촉하는 부분의 마찰조건이 다르기 때문에 나타나는 현상이다.

피막 및 윤활제의 특성에 의해 마찰조건이 얼마만큼 틀려지는지 알아보기 위해서, 실험조건과 같은 기하학으로 3차원 유한요소해석 영역을 구현하고 실험적으로 측정된 인발력이 얻어지도록 하는 마찰계수를 역으로 산정하였다. 계산을 위해 상용 유한요소해석 소프트웨어인 ABAQUS®를 사용하였다.

Fig. 4는 시편을 인발다이 안으로 유입시켜 소성변형을 해석하기 위한 3차원 유한요소를 나타낸다. 시편의 요소크기는 1mm이고 3차원 8절점 요소를 적용하였다. 해석 시 사용한 인발속도는 인발실험기속도와 같은 1.7m/min으로 설정하였다.

Fig. 5는 유한요소해석 결과로 얻어진 등가 응력분포를 보여주고 있다. 이것은 소재를 변형시킬 때 소

재내부에서 변형에 저항하는 정도를 나타낸다. 확연히 열처리생략강(ULCB)의 경우가 탄소강(SWRCH45F)의 경우보다 유동응력이 큼을 알 수 있다. 따라서, 같은 인발 기하학에 대해 큰 인발력이 소요된다.  $\delta$ -type의 윤활제의 경우, 인발력의 실측치에서는 SWRCH45F가 ULCB에 비해 크게 떨어지지 않으므로(Table 3), SWRCH45F의 마찰력이 상대작으로 더 크게 작용하고 있다는 것을 의미한다. 두 경우의 마찰 기하학이 같기 때문에 SWRCH45F의 마찰계수가 더 큰 것으로 귀결된다. 이에 반해,  $\beta$ -type 윤활제의 경우에는 등가응력이 떨어지는 만큼, SWRCH45F의 인발력이 ULCB에 비해 크게 떨어지므로 마찰계수는 비슷하던지 혹은 낮을 것으로 예상된다.

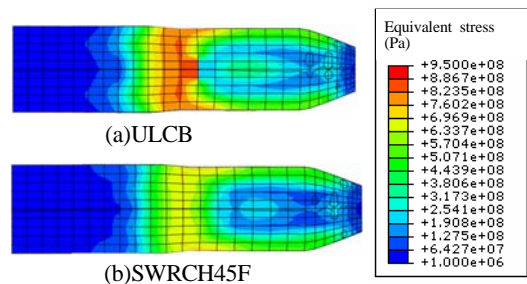


Fig. 5 Equivalent stress distribution

예상한 바와 같이, Table 4에서 윤활제 종류에 따라 ULCB의 마찰계수와 SWRCH45F의 마찰계수의 상대적 차이가 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나, 마찰계수 값 자체는 건식 윤활제를 사용하여 소재를 인발했을 때 소재와 다이스 사이에서 산정되는 일반적인 값이다.<sup>[5]</sup>  $\delta$ -type의 윤활제의 경우에는 SWRCH45F의 마찰계수가 ULCB의 마찰계수보다 상대적으로 높고,  $\beta$ -type 윤활제의 경우에는 비슷한 경향을 보인다. 같은 강종(즉, ULCB) 내에서는 인발력 측정치(Table 3)의 상대적 크기 순서와 마찰계수의 크기 순서가 일치한다. 변형기하학에 의한 순수 변형저항량은 같은 강종 내에서는 같기 때문에 피막 및 윤활제 복합거동에 의한 마찰특성으로 각 시편 마다 차이가 발생한다. Table 4를 살펴보면 ULCB의 경우에 시편 A(즉, 피막제 3675)와 윤활제  $\delta$ -type의 조합이 가장 양호한 마찰특성으로 보여주고 있다.

**Table 4 Friction coefficient predicted by the finite element analysis and the measurement of drawing force**

Friction coefficient( $\mu$ ) Lubricant	Specimen A	Specimen B	Specimen C	Specimen D
$\delta$ -type	0.075	0.080	0.087	0.076
$\beta$ -type	0.076	0.080	0.076	0.075

## 4. 결 론

본 연구에서는 성분을 달리한 피막제 및 윤활제를 표면 처리한 탄소강과 열처리 생략강의 인발공정에 적용시켜서 기계적거동을 고찰하였다. 그리하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 열처리 생략강의 마찰특성은 피막제와 윤활제 조합의 상호작용에 의해 결정되며 마찰계수 계산을 통하여 이를 확인하였다.
2. 윤활제의 역할은 가공 정상부 보다 비정상부에서 더 중요하며 윤활성이 좋은 윤활제를 사용할 경우 비정상부 영역을 30~50% 정도 줄일 수 있다.
3. 탄소강의 경우 윤활제 선택에 따른 정상부 마찰계수의 영향이 열처리 생략강에 비해 크며, 윤활성보다 피막제에 맞는 윤활제를 선택하는 것이 마찰계수를 줄일 수 있다.

## 후 기

이 논문은 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

1. 박경수, 박용규, 이덕락, 이종수, “신선 가공된 열처리 생략강의 냉간 성형성에 대한 연구”, 한국소성가공학회지, 제12권, 제4호, pp. 364-369, 2003.
2. 박경수, 최상우, 이덕락, 이종수, “신선 가공된 이상 조직강의 냉간 성형성에 대한 연구”, 한국소성

- 가공학회지, 제13권, 제1호, pp. 84-89, 2004.
3. 김성진, 배은갑, 윤호규, 장호, “두 종의 고체윤활제에 따른 마찰제의 마찰성능에 관한 실험적 고찰”, 한국윤활학회 학술대회, pp72~78, 2001.
4. 남원중, “신선가공한 고탄소 강선의 연성에 영향을 주는 미세조직 인자”, 한국소성가공학회지, 제13권, 제8호, pp710~715, 2004.
5. Large, Kurt, Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill, pp14.4, 1985.