

# Axle Shaft 냉간 단조를 위한 최적 수계윤활조건

## Optimal Water Lubrication Condition for an Axle Shaft Cold Forging

박지원<sup>1</sup>, 이종수<sup>2</sup>, 최용준<sup>2</sup>, 김종호<sup>2</sup>, 이석순<sup>3,✉</sup>  
 Ji Won Park<sup>1</sup>, Jong Soo Lee<sup>2</sup>, Young Jun Choi<sup>2</sup>, Jong Ho Kim<sup>2</sup> and Seok Soon Lee<sup>3,✉</sup>

1 경상대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Gyeongsang National Univ.)

2 경인테크 (kyeong-in Tech.)

3 경상대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Gyeongsang National Univ.)

✉ Corresponding author: leess@gnu.ac.kr, Tel: 055-751-5314

Manuscript received: 2009.7.20 / Revised: 2009.9.28 / Accepted: 2009.9.30

*The cold forging Process applies surface lubricant coating in order to smooth the friction during the cold forging process. Currently, most of the lubrication processes apply the zinc phosphate coating, which requires 11 steps and disposes sludge. But the water based lubrication process, which has been newly developed, takes 3 steps only and does not cause sludge. In this study, we present the optimal condition of water based lubrication for the cold forging of axle shaft by an experimental design method. Experimental results with minitab shall be able to predict the optimum water based lubricating conditions for the cold forging processes*

Key Words: Water Based Lubricant (수계윤활제), Cold Forging (냉간 단조), Zinc Phosphate Coating (인산염 피막)

### 1. 서론

본 연구의 목적은 수계윤활제를 이용한 냉간 단조압출성형 공정자동화 장치의 핵심기술인 최적 윤활 조건에 관련된 공정 데이터를 확보하는 것이다. 이러한 공정 데이터를 확보함으로써 유사 냉간 단조품을 생산, 제조하는 데 적용시켜 윤활도 표처리 자동화 장치의 공정별 작업시간을 표준화하여 최적의 생산공정 설계/제작/조립에 접목시킨 기술을 개발한다. 그리하여 냉간 단조품 제조업체에 한 차원 높은 품질, 환경보존 및 생산능력 향상에 기여하기 위함에 있다. Fig. 1 은 자동차의 동력을 전달하는 부품으로 차축(Axle Shaft)의 원자재를 전달하여 냉간 단조로 압출하여 제조되는 제품이다. 소성가공분야의 하나인 냉간 단조 압출 공정을 원활히 수행하기 위해서는 윤활제 도포 전처리 공정이 필수적이다. 차축의 생산량 증가와 더

불어 환경보존의 측면에서 냉간 단조용 수계윤활제의 필요성이 대두되면서 이전의 냉간 단조용 윤활제인 인산염 피막(zinc phosphate coating)처리 대신 공정이 매우 짧고 간단하며 산업폐기물이 발생하지 않는 친환경적인 수용성 윤활제가 각광을 받고 있다. 현재 일본 자동차회사에서는 협력업체 등을 통하여 이미 수계윤활제 및 윤활 도포처리 자동화 장치를 개발 완료하여 주로 자동차의 냉간 단조 부품 생산에 사용되고 있는 것으로 파악되고 있다.<sup>1</sup>

단조공정에서 윤활제에 대한 연구로는 AI 합금 정밀단조를 위한 윤활제로 유성흑연 혼합제와 에탄올 MoS<sub>2</sub> 혼합제에 대한 연구<sup>2</sup>와 베벨기어의 윤활제와 표면거칠기에 따른 온간단조 성형평가에서 수용성 윤활제와 유용성 윤활제의 특성을 비교하였다.<sup>3</sup>

본 연구는 국내 냉간 단조 업체들도 생산성 향

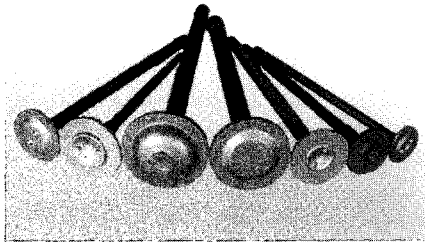


Fig. 1 Axle Shaft

상과 환경보존 예방측면에서 수계윤활제의 필요성이 증가될 것이라 예상하여 최적의 수계윤활조건을 실험계획법을 통하여 제시할 목적으로 연구를 수행하였다.

2. 연구배경

2.1 국내의 냉간 단조 공정

Fig. 2 는 국내 냉간 단조업체에 적용되는 윤활제 도포 전처리 공정은 인산아연 산화피막처리 공정이며 수세에서부터 건조까지 총 11 개 공정으로 이루어져 처리시간이 길고, 피막처리 시 수작업으로 바스켓(Basket)에 작업자가 직접 제품을 넣고 작업 후에는 다시 제품을 수집해야 하는 재래식 공법이다. 이러한 공법은 생산성 저하가 문제시되며, 처리 후 발생하는 슬러지(Sludge)는 산업폐기물로서 환경오염을 유발시킬 뿐만 아니라 이로 인한 산업 폐기물 처리 비용도 증가하고 있는 실정이다.

Fig. 3 은 수계 윤활제 처리 공정으로 공정이 매우 짧고 간단하며 특히 냉간 단조 후에 슬러지(Sludge)가 발생하지 않는 장점을 가지고 있다. 수계 윤활제 처리 공정은 탕세, 윤활도포, 건조 공정으로 이루어져 있다. 탕세부는 윤활도포의 최적의 조건을 수행하기 위한 전처리 공정이며, 샷트 공정에서 발생된 오염물질을 제거하고, 중화시키는 공정이다. 윤활 도포부는 수계윤활제를 차축(Axle shaft)에 도포하는 공정으로 수계 윤활제 부착량의 정량화 및 균일도포기술 확보가 요구된다. 수계윤활제는 조해성이 있어 공기와 장시간 접촉시 수분함량이 증가하여 윤활효과가 저하되므로, 냉간 단조 압출 공정상의 원활한 윤활을 위해 건조 공정이 매우 중요하다. 임은 수계윤활제를 이용한 단조 실험을 수행하여 수계윤활제의 적용성을 보였다.<sup>4</sup>

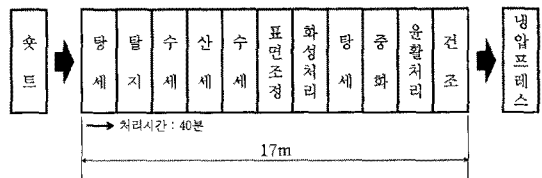


Fig. 2 Zinc phosphate coating process

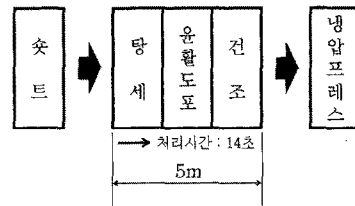


Fig. 3 Lubricating water-soluble lubricant

수계 윤활제를 이용한 냉간 단조 압출 성형 공정은 현재 국내에서는 전무한 상태이며, 이러한 기술적 과제를 해소시킬 체계적인 연구 및 개발실적이 미미한 상태에 있다. 단조 산업이 잘 발달된 일본 및 독일에서는 인산아연 산화피막처리 공정을 거의 적용하지 않고 수계 윤활제 도포처리 공정을 적용하여 생산성을 향상과 산업폐기물 발생을 근본적으로 막고 있다.

국내 냉간 단조 압출 성형 공정의 기술 수준은 일본 및 유럽 등에 비해 성능 면에서 많이 뒤떨어지며, 특히 수계 윤활제를 활용한 도포처리 자동화 장치의 핵심인 수계윤활제의 도포량의 표준화는 국내에선 이루지지 못하고 있다.

2.2 수계윤활제의 특징

인산 염 피막처리는 철 표면과 직접 화학 반응을 일으키는데 비해서 수계윤활제는 압출시의 압력하에서 철의 신생면과 유황 래디컬이 반응하여 유황철이 생성되는 것에 의해 윤활이 되는 것으로 유황 래디컬은 수계 윤활제에 의해 철의 신생면에 계속적으로 반응하고, 필요한 윤활을 부여하는 것이다. 수계윤활제는 수중에 금속착염(Metallic complex) 분자의 미세한 입자를 계면활성제에 의해 분산시킨 것이다. 이것은 철의 표면에 소수 코로이드(Colloid) 입자 윤활피막을 형성한다.<sup>5</sup>

금속표면에 수계 윤활제를 충분하게 부착시키기 위해서는 샷트 블라스트(Shot blast)에 의해 철의 표면을 청결하게 하면서도 충분히 건조되어 있는 것이 좋다.<sup>6</sup> 윤활 도포부는 이 연구의 핵심부분으로 수계윤활제의 도포 조건 분석, 획득을 통한 수

계윤활제 부착량이 정상화된 균일도포가 요구된다.

이러한 이유로 본 연구는 수계윤활제가 어떠한 조건에서 충분히 도포가 되는지 알아보기 위해 다음과 같은 실험을 하였다.

### 3. 예비 실험 및 결론

#### 3.1 예비 실험 수행

예비 실험의 목적은 수계 윤활제의 최적 도포에 영향을 주는 요소와 범위를 알아보기 위해서 예비실험을 한다. 도포 전후의 무게 차이가 극히 적을 것으로 예상하여  $10^{-4}$  g 까지 측정이 가능한 정밀저울을 사용한다. 도포 전후의 무게를 측정 그 차이 값이 클수록 충분한 도포가 이루어 졌다고 가정하여 실험을 수행하였다.

예비실험에 사용될 시편은 정밀저울의 측정 가능한 범위에 적합하면서도 충분한 무게 차이를 보여주는 아이소핑크(Isopink)를 선택하였으며, 크기는 가로 세로 높이가 각각 7.8mm, 72mm, 16mm 이다. 도포는 물체의 표면 상태, 도포 표면온도 즉 윤활제의 온도의 함수로 표현 가능하다.

예비실험에서는 먼저 실험 요소의 범위가 윤활제의 온도와 건조시간을 따르게 주어 실험을 하고 그 결과를 관찰한다. Table 1 은 예비실험에 대한 공정변수들을 표로 요약한 것이다. 윤활제의 온도는 40℃, 50℃, 60℃, 70℃, 80℃ 변화시키고 건조시간은 60sec, 120sec, 180sec 변화하여 각각 5 회 실험하여 그 평균값을 관찰하였다.

그리고 이번 실험이 강(steel)에도 동일하게 적용할 수 있다는 것을 증명하기 위해 아이소핑크(Isopink)에 적용된 실험을 동일한 방법으로 Fig. 4 의 강(steel)시편에 적용하여 실험을 하였다.

#### 3.2 예비 실험 결과

Fig. 5~Fig. 7 은 예비실험의 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 아이소핑크(Isopink)를 시편으로 사용하여 수계 윤활제의 도포온도에 따라 초기 질량에 대한  $\Delta W$  을 건조시간으로 분류한 값이다. 전체적으로 윤활제의 온도가 높을수록, 건조시간이 짧을수록  $\Delta W$  가 크게 나타낸다. 윤활제의 온도가 50℃를 넘게 되면 시편이 윤활제로부터 외부에 노출될 때 온도차이와 윤활제 자체의 변질로 인해 표면에 슬러지(Sludge)가 생기게 된다. 또한 건조시간이 충분하지 않으면 전체 표면에 고르게 도포되지 않은 것도 관찰되었다. Fig. 5 는 건조시간이

60sec 인 경우이며 국부적으로 윤활제 방울이 발생하였다. Fig. 7 은 건조시간이 180sec 인 경우로 윤활제가 증발하는 현상이 발생하였다. Fig. 8 은 실험결과를 윤활제 온도와 질량 변화량 사이의 관계를 건조시간 별로 나타낸 그래프이다. 예비 실험을 통해 건조시간 120sec, 윤활제의 도포 온도 30℃~40℃로 결정하였다.

본 실험을 수행하기 전에 실제 제품과 동일한 재질인 강(Steel)으로 실험 결과의 경향을 관찰해보았다. 이러한 실험을 수행한 이유는 아이소핑크(Isopink)의 재료의 특수성이 강(Steel)과 다른 경향으로 실험에 영향을 주었을 수도 있기 때문이다. Fig. 9 는 강(Steel)으로 실험을 수행한 결과를 나타낸다. 실험결과는 아이소핑크(Isopink)의 경우와 비슷한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 추후에 수행될 본 실험에서 실제제품을 측정 가능한 범위로 축소하여 샷블라스트(Shot blast) 처리한 후 앞서 수행한 실험결과에서 결정한 범위로 실험을 수행 하였다.

실험결과와 같이 전반적으로 윤활제의 온도가 높을수록  $\Delta W$  가 높게 나왔다. 하지만 윤활제의 온도가 50℃을 넘어가면 윤활제 도포 후 외부 온도와 온도 차로 급격히 냉각되면서 표면에 슬러지(Sludge)가 생성되어 표면상태가 좋지 않다. 건조시간이 60sec 일때  $\Delta W$  가 높게 나온 것은 짧은 건조시간으로 충분히 건조 되지 못하고 국부적으로 윤활제 방울이 남아 있기 때문이다. 건조시간이 충분하지 않으면 중력으로 인해 윤활제가 아래로 흘러 내리게 되어 고르게 도포되지 않아 좋지 않다. 반대로 건조시간이 너무 길게 되면 윤활제가 증발하는 현상이 생긴다.

Table 1 Pretest experiment process variable

Process variable					
Lubricant temperature(℃)	40	50	60	70	80
Dry time(sec)	60		120		180

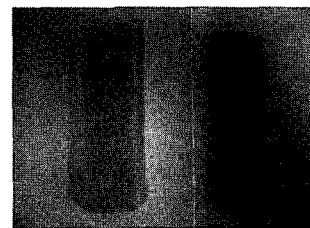


Fig. 4 Pretest samples (Left : Isopink, Right : Steel)

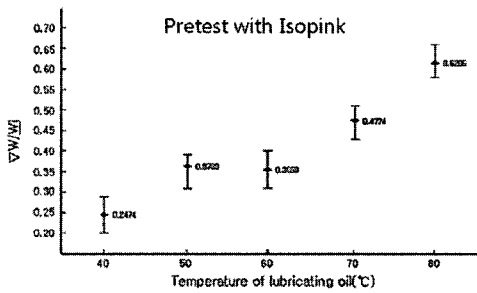


Fig. 5 60sec for dry time

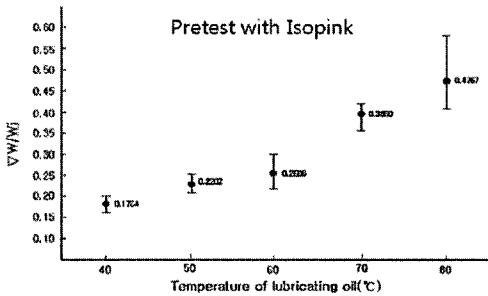


Fig. 6 120sec for dry time

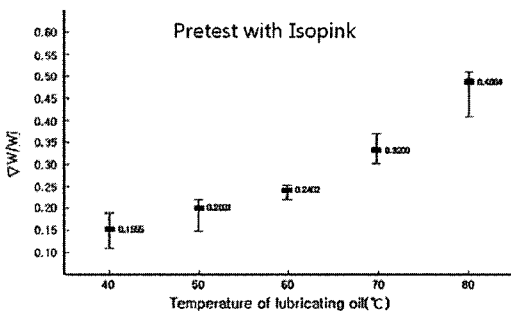


Fig. 7 180sec for dry time

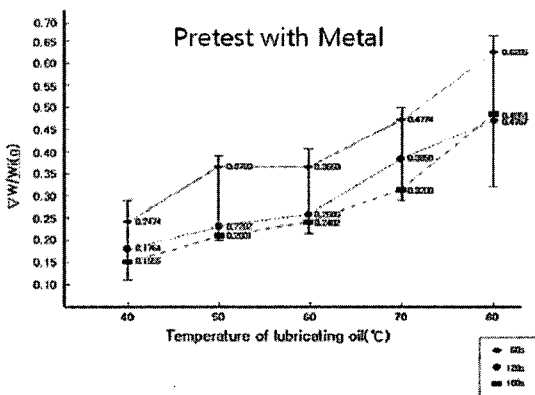


Fig. 8 The change of weight for whole dry time

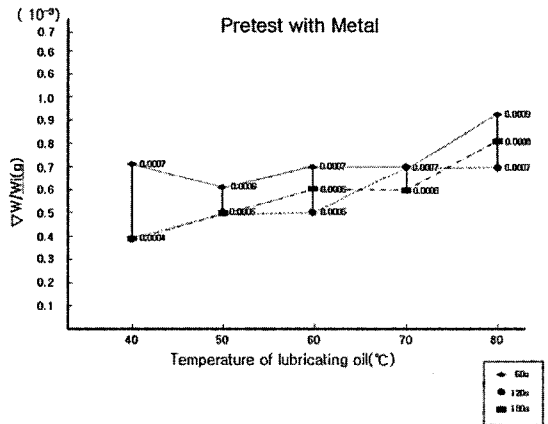


Fig. 9 The change of weight for whole dry time

#### 4. 본 실험 및 결과

##### 4.1 본 실험 수행

예비 실험을 통해 윤활제의 도포온도의 범위를 35°C~40°C, 건조시간을 120sec 로 정할 수 있다. 이번 실험에서는 샷트(Shot), 탕세 온도, 도포 온도를 달리하여 윤활제 도포 전후의 무게를 측정하여 후 최대 값을 갖는 각 요소의 조건을 찾기 위해서 실험을 수행 하였다. Table 2 는 본 실험에 대한 공정 변수들을 표로 요약한 것이다.

실험 방법은 Fig. 10 의 시편을 먼저 0.3, 0.8, 1.0 mm 볼(ball)로 샷(Shot)을 한다. 샷(Shot)된 시편을 65°C, 75°C로 일정한 탕세온도로 120sec 간 탕세를 한다. 35°C, 40°C, 45°C의 일정한 도포온도로 5sec 도포를 하고 120sec 간 건조를 한다. 정밀저울을 사용하여 건조 후 최종 무게를 측정하여 처음 무게와 차이를 구하였다. 초기 무게를 측정하여 Data sheet 에 기록한다. 탕세 시간 2 분, 탕세에서 도포 전까지 1 분 30 초, 도포 시간 5 초, 건조시간 2 분 은 모든 실험에 동일하게 적용한다. 정밀저울을 사용하여 건조 후 최종 무게를 측정하여 처음 무게의 차이를 구하였다. 도포 전 시편 온도는 탕세 온도의 함수이고, 표면 거칠기 및 점도는 샷트볼의 크기와 도포액 온도의 함수이다.

Table 2 experiment process variable

Process variable				
Ball diameter(mm)	0	0.3	0.8	1.0
Contamination wash temperature(°C)	65		75	
Lubricant temperature (°C)	35	40	45	

### 4.2 본 실험 결과 및 분석

Fig. 11~Fig. 14 는 Fig. 10 의 시편을 사용하여 수계 윤활제의 도포온도와 탕세온도에 따라 초기 질량에 대한  $\Delta W$  을 샷트볼의 크기별로 정리한 그래프이다.

Minitab 의 실험계획법을 이용하여 여러 변수의 효과를 동시에 조사한다. 다음의 Fig. 15 는 샷트볼의 크기가 0.8mm 때와 탕세온도가 75℃일 때 확연히 평균(Mean) 값이 최대값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 여기서 평균(Mean) 값은  $\Delta W$  의 평균값을 나타낸다. 도포액 온도의 그래프를 보면 35℃, 40℃의 비슷한 평균(Mean)으로 Minitab 의 실험결과 예측법을 통해 여러 경우의 수를 추가하여 결



Fig. 10 test sample (S50C)

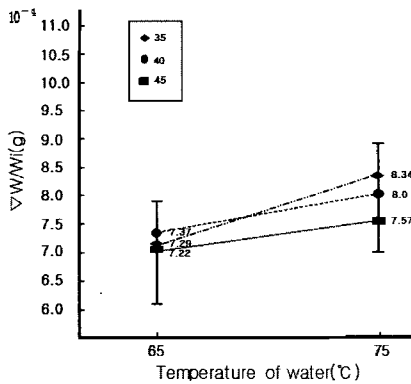


Fig. 11 The change of weight at 0.0 of shot

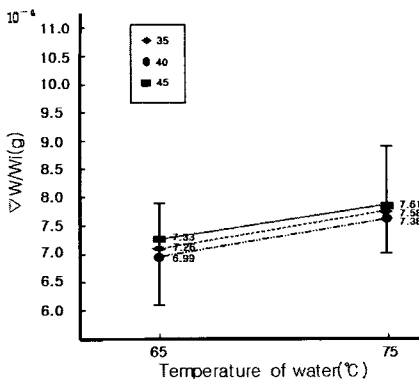


Fig. 12 The change of weight at 0.3 of shot

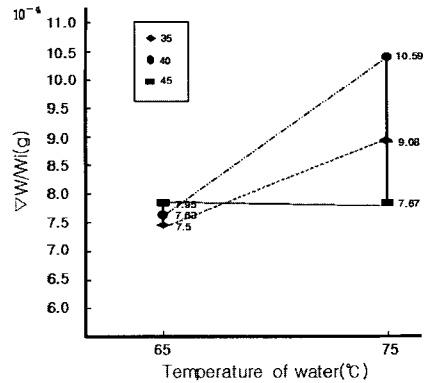


Fig. 13 The change of weight at 0.8 of shot

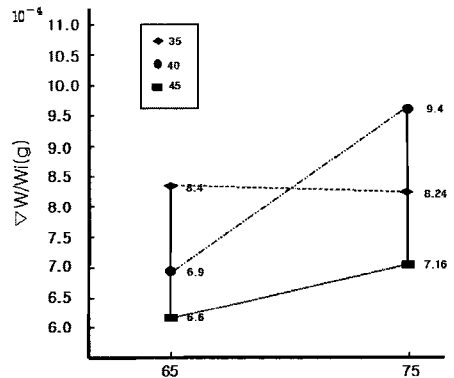


Fig. 14 The change of weight at 1.0 of shot

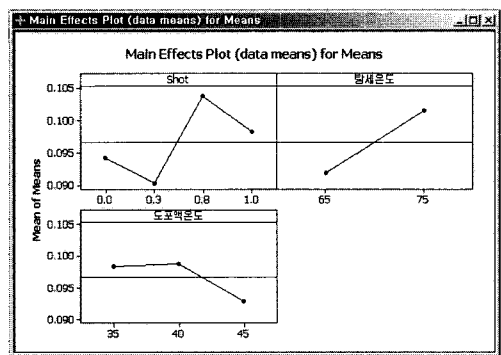


Fig. 15 Main Effects Plot (data means) for Means

과를 예측할 수 있다.<sup>7</sup>

Minitab 의 실험결과 예측을 통해 40℃의 평균(Mean) 값이 35℃보다 높은 것을 볼 수 있다. 최종 실험을 통해 냉간 단조를 위한 수계윤활의 최적 조건은 Shot ball 지름 0.8mm, 탕세 온도 75℃, 도포온도 40℃로 볼 수 있다.

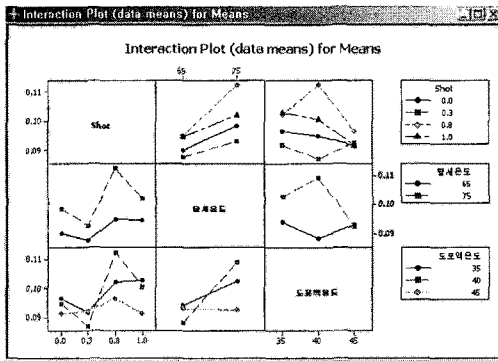
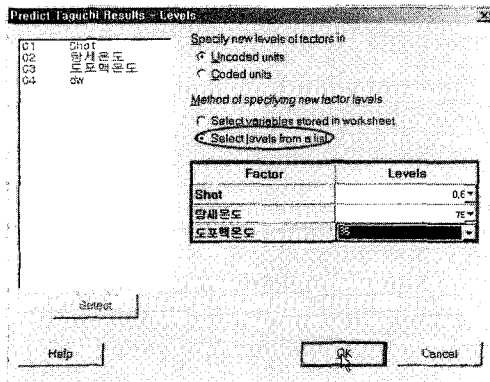


Fig. 16 Interaction Plot (data means) for Means



Taguchi Analysis: dw versus Shot, 탕세온도, 도포액온도

**Predicted values**

- NOTE • The response labeled "Log(StDev)" contains all missing values. No predictions will be computed or stored for this response.
- NOTE • The response labeled "StDev" contains all missing values. No predictions will be computed or stored for this response.

C/N Ratio	Mean
-1.01560	0.110570

**Factor levels for predictions**

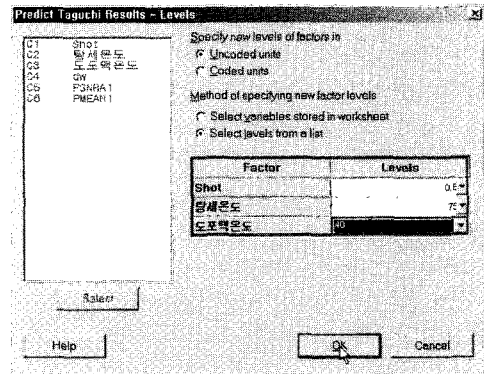
Shot	탕세온도	도포액온도
0.8	75	35

Fig. 17 Predict of Result analyzed (35°C)

Fig. 16 은 Minitab 의 실험계획법을 이용하여 샷트볼 지름, 탕세온도, 도포액 온도의 효과를 동시에 조사한 것이다. Fig. 17~Fig. 18 은 Minitab 의 실험결과 예측법을 이용하여 경우의 수를 추가하여 결과를 예측한 것이다.

**5. 실험 결과 분석**

Minitab 의 실험 결과 분석을 통하여 다음과 같은 차축(Axle Shaft) 냉간 단조용 수계윤활제 도포 처리를 최적화하기 위해 각 단계로 분석할 수 있다.



Taguchi Analysis: dw versus Shot, 탕세온도, 도포액온도

**Predicted values**

- NOTE • The response labeled "Log(StDev)" contains all missing values. No predictions will be computed or stored for this response.
- NOTE • The response labeled "StDev" contains all missing values. No predictions will be computed or stored for this response.

C/N Ratio	Mean
-17.9222	0.126937

**Factor levels for predictions**

Shot	탕세온도	도포액온도
0.8	75	40

Fig. 18 Predict of result analyzed (40°C)

**5.1 샷(Shot)부**

수계 윤활제를 충분히 부착시키기 위해서 먼저 0.8mm ball 로 샷트(Shot)을 한다.

**5.2 탕세부**

탕세부는 윤활도포의 최적의 조건을 수행하기 위한 전처리 공정이며, 샷트(Shot) 공정에서 발생된 오염물질을 제거하고, 중화시키는 공정으로 탱크 내의 탕세수를 일정온도(75°C)로 가열 유지시키는 전열기(Electric Heater), 열전펄프(Thermo couple Pump) 등을 설치한다.

**5.3 윤활도포부**

수계 윤활제의 도포온도(40°C)를 일정하게 유지한다. 윤활 도포부는 보조탱크와 주 탱크로 분류하여 기구부를 구성하여 설계, 수계윤활제의 특성을 고려하여 기포가 발생치 않도록 교반기를 설치하며, 차축(Axle Shaft)에 적정량이 부착되도록 기구부와 전기부를 설계하여 냉간 압출금형에 투입한다.

**5.4 건조부**

수계윤활제는 조해성이 있어 공기와 장시간 접촉시 수분함량이 증가하여 윤활 효과가 저하되므로, 냉간 단조 압출 공정상의 원활한 윤활을 위해

건조 공정이 매우 중요하다.

윤활제 도포 후 강제 건조시키는 장치부로서 환풍기를 이용, 하부에서 바람을 송출하여 상부에서 배기되는 방식으로 상온 강제 건조방식을 활용한다. 건조 시간은 2분으로 적용한다.

## 6. 결론

본 연구는 수계윤활제를 이용한 냉간 단조압출 성형 공정자동화 장치의 핵심기술인 수계윤활제 표준 부착량의 자료를 확보함으로써 유사 냉간 단조품을 생산, 제조하는데 적용하며, 윤활도포처리 자동화 장치의 공정별 작업시간을 균등, 표준화하여 생산공정 설계/제작/조립에 접목시켜 냉간 단조용 수계 윤활제 도포 자동화장치를 표준화하였다. 수계 윤활제 도포 자동화장치의 표준화는 냉간 단조품 제조업체에 한 차원 높은 품질, 환경보존 및 생산능력향상에 기여할 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 2 단계 지역대학 육성 사업(BK21)과 지역혁신 인력양성 사업의 지원에 의해서 연구되었다. 모든 지원에 대해서 감사드린다.

## 참고문헌

1. Gao, F., Kotvis, P. V. and Tysoe, W. T., "The surface and tribological chemistry of chlorine- and sulfur-containing lubricant additives," *Tribology International*, Vol. 37, No. 2, pp. 87-92, 2004.
2. Lee, Y. S. and Lee, J. H., "The Effects of the Process and Die Design for Precision Forging of Al Alloys," *J. of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 166-173, 1999.
3. Kim, D. H. and Kim, B. M., "Evaluation of Formability for Warm Forging of the Bevel Gear on The Lubricants and Surface Roughness," *J. of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 22, No. 3, pp. 21-28, 2005.
4. Lim, W. J., Lee, I. S., Ko, D. C. and Kim, B. M., "Process of Low Energy Water-Soluble Lubricant for Cold Forging," *Proc. of Korean Society for Precision Engineering Autumn Conference*, pp. 381-382, 2006.
5. MEC International Co., "MEC HOMAT 119CR Application User's Manual," pp. 1-2, 2007.
6. Krechetnikov, R. and Homsy, G. H., "Surfactant effect in the Landau-Levich problem," *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 559, pp. 429-450, 2006.
7. Minitab Inc., "Minitab15Statistical Software," 2003.