

“본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(ME96-E-14)에 의하여 연구되었음”

스피어기어의 단조 공정에 관한 연구

A Study on the Forging Processes of Spur Gears

최재찬(부산대 기계설계공학과), 최영(부산대 대학원), 김경구(부산화력발전소), 탁성준(LG산전 전력연구소)

J. C. Choi, Y. Choi, K. K. Kim and S. J. Tak

Abstract

In this study, the forging process of spur gears has been investigated. The forging process of spur gears has been classified into two type of operations, guiding one and clamping one in this investigation. Two type forgings of spur gears have been analysed by using upper bound method. The predicted values of the forging load were compared with those obtained from the forging experiments. The forging experiments were carried out with a commercial aluminium alloy. The forged parts obtained through the guiding type forging were compared with those obtained through the clamping type forging.

Key Words : Spur Gear Forging(스피어기어의 단조), Guiding Type Forging(안내형 단조), Clamping Type Forging(구속형 단조)

1. 서 론

기어는 강력한 전달력과 정확한 속도비를 가지고 회전운동을 전하기 위하여 사용 되는 기계부품으로 정밀도와 어느 정도의 강도가 요구되는 제품이다. 기어가공은 거의 호빙가공, 셰이빙가공, 밀링가공 등과 같은 절삭가공법에 의존하고 있으며 현재까지도 고정밀도를 요하는 기어는 대부분 절삭가공에 의해 생산되고 있다. 그러나 산업폐기물처리와 같은 새로운 문제가 대두됨에 따라 소성가공과 분말야금, 등의 비절삭가공에 관심을 갖게 되었으며, 특히 소성가공에 의해 성형된 기어는 절삭가공에 의해 제조된 기어에 비하여 재료 및 비용절감, 생산시간 단축 및 강도 증가 등을 기대할 수 있어, 최근 기어 제조에 있어 소성가공에 의한 기어의 성형방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 소형 기어에 대해서 압출과 단조공정에 의한 냉간 성형법 개발과 이에 대한 해석방법의 연구가 활발히 진행되고 있다^[1-15]. 스피어기어는 잇줄이 직선이며 축에 평행한 기어로 그 형상이 축방향에 대해 구제각이 전혀없고 단조성형은 축면방향으로 주로 일어나기 때문에 금형설계상의 문제로 비교적 최근에 연구가 시작되었다. 압출공

정에 의한 기어성형에 대한 연구는 Samanta등^[2]에 의해서 스피어기어와 헬리컬기어의 냉간압출공정이 제시되었으며, Choi등^[3]은 헬리컬기어의 새로운 냉간압출법을 제안하고 상계해석하고, 전극설계 및 금형강도를 평가하였다. 단조공정은 압출공정에 비해 기어의 치폭이 좁은 경우에도 적용이 유리하고 생산성이 높다. 이러한 단조공정에 의한 기어 성형에 관한 연구를 살펴보면, Dohmann과 Traudt^[4]는 냉간단조에 의한 헬리컬기어 성형시 금속유동과 공기하중을 슬래브법으로 해석하였다. Yang^[5]등은 기어단조에 대해 안내형(guiding type) 공정과 구속형(clamping type) 공정으로 단조공정을 분류하고 스피어기어에 대해 각각 단조실험하고 비교하였다. 그러나 안내형과 구속형 공정에 대하여 명확한 비교를 수행하지 못하였다. Choi^[6-8]등은 스피어기어의 안내형 단조에 대해 상계해석을 하고 실험과 비교하였다. 또한 헬리컬 기어의 단조에 대해 안내형 공정에 대한 금형구조를 제안하고 상계해석 및 실험을 수행하였고 헬리컬 기어의 구속형 단조공정에 대해 상계해석하였다^[14-15]. 본 연구에서는 스피어기어를 안내형과 구속형 공정으로 단조실험을 수행하고, 제품의 높이에 따르는 유동형태와 가공력을 비교하고자 한다.

냉간단조는 가혹한 하중조건에서 성형작업이 이루어지므로 금형의 설계가 어려운 문제이다. 그러므로 금형설계시 단조하중과 압력을 예측하는 것이 매우 중요하다. 단조하중과 압력을 예측하기 위한 해석방법은 여러 가지가 있으나 그 중 상계해석법은 실제의 하중보다 적어도 같거나 큰 해를 예측하므로 금형설계시 실용적인 측면에서 매우 유용한 방법이다. 제안되어진 동적가용 속도장^[6, 8, 15]을 이용하여, 가공물의 높이변화에 대응하는 단조하중 및 평균 가공압력을 상계해석하고 실험과 비교하여 그 결과를 고찰하고자 한다.

2. 단조공정

스퍼어 기어에 대해 Fig.1과 같은 치가 가공되어 있는 펀치가 내부에 치형을 갖는 다이속으로 안내되어 가공물을 성형하는 안내형(guiding type) 단조와 치가 가공되어 있지 않은 원통형 펀치를 이용하여 재료가 내부에 치형을 갖는 축방의 다이속으로 재료유동이 이루어지는 구속형(clamping type) 단조으로 분류된다^[5].

2.1 안내형 단조공정

안내형 단조공정은 치가 가공되어 있는 펀치로 가공재료를 가압하여 단조하는 방법이다. 안내형 단조공정은 치형 성형과 가공압력의 감소에는 유리한 방법으로 생각된다. 그러나 치가 가공된 펀치와 다이 사이의 정밀한 안내운동을 위해 고정밀 금형 가공기술을 요한다. 또한 금형의 조립시 동축도를 정밀하게 유지하기 어렵다. 성형시 펀치와 다이사이의 간극사이로 치면을 따라 플래시가 발생한다. 본 연구에서는 이론해석을 위해 제안되어진 스퍼어 기어의 안내형 단조공정에 대한 동적가용 속도장^[6-8]을 이용한다.

2.2 구속형 단조공정

구속형 단조공정은 원통형 펀치로 가공재료를 가압하여 치가 가공된 축방의 다이속으로 재료가 유동되는 축방압출(radial or lateral extrusion) 형의 단조이다. 구속형 단조에서는 수직방향으로 운동하는 펀치에 의해 재료는 수평방향으로 변형함으로써 성형에는 안내형 단조공정보다 불리하다고 생각된다. 그러나 원통형 펀치와 구속다이(clamping die)는 안내형 공정에서 사용되는 치가 가공된 펀치보다 정밀하게 가공될 수 있다. 또한 펀치와 구속다이 및 다이를 정밀하게 조립하기 쉽다. 또한 성형시 단조 최종단계에서 원통형 펀치와 콘테이

너 사이에서 플래시가 발생한다. 구속형 공정의 이론해석을 위해 제안되어진 헬리컬기어의 구속형 단조공정에 대한 동적가용 속도장^[15]을 이용한다. 헬릭스(helix) 각이 없는 헬리컬기어가 스퍼어 기어이므로 제안되어진 속도장으로부터 쉽게 상계해를 얻을 수 있다.

3. 단조실험

3.1 물성시험

본 연구에서 스퍼어 기어의 단조실험에 사용한 소재는 상용 알루미늄 합금이다. 전기로에서 420℃에서 5시간을 유지하고 로내에서 10℃/Hr로 상온까지 냉각하는 방법으로 완전 풀림처리하여 사용하였다. 실제 금속성형에서 일어나는 큰 변형률에 대한 유동응력을 결정하기 위해서, 실린더 압축시험(cylinder compression test)을 수행한다. 또한 공구와 가공물의 마찰상수를 결정하기 위해, 링 압축시험(ring compression test)을 수행한다. 보다 간편하게, 링 압축시험만으로 가공물의 유동응력과 금형과 가공물의 마찰상수를 결정하는 방법이 제안되어졌다^[16-21]. 본 연구에서는 Osakada^[19]등이 제안한 방법으로, 링 압축시험을 이용하여 가공물의 유동응력과 금형과 가공물의 마찰상수를 결정한다.

3.1.1 링 압축시험

링 압축시험의 시편은 외경:내경:높이 비를 6:3:2로 가공하였고, 실제 스퍼어기어의 냉간단조에 사용되는 소재와 같이, 액체 윤활재인 MoS₂를 사용하였다. 링 압축시험의 결과를 Table 1에 나타내었다.

Osakada^[19]등은 응력-변형률 관계를 얻기 위해, 장소성 유한요소 해석을 이용하여 평균응력과 평균변형률을 계산하는 방법을 제안하였다. 제안되어진 방법을 이용하여 평균응력과 평균변형률을 계산하고, 이를 이용하여 최소자승법으로 보간한 상용 알루미늄 합금의 응력-변형률 관계식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 504.051 \bar{\epsilon}^{0.1552} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

또한 마찰상수를 결정하기 위하여 높이 감소율에 대한 내경감소율의 보정곡선을 구하고 마찰 면적분할법(friction-area divided method)^[22]을 이용하여 마찰상수를 결정하면 마찰상수는 0.1275정도이다.

3.2 단조금형

안내형 공정에 있어서 성형용 펀치는 다이 치형의 안내부를 거쳐 소재를 단조하기 때문에 펀치

외경의 치형치수는 다이 내경의 치형치수보다 어느정도 작아야 한다. 본 연구에 사용된 편치는 기어 가공시 전위계수를 - 0.05로 하여 편치와 다이의 기어의 어텐덤 및 디텐덤을 각각 0.2mm 차이가 나도록 제작 하였다. 구속형 공정으로 단조하기 위하여 구속 다이(clamping die)를 제작하였다. 구속 다이는 단조공정 후반기에 다이로부터 재료가 후방으로 변형되는 것을 방지하기 위해 사용된다. 원통형 편치는 유동의 급격한 변화를 억제하기 위해 이뿌리 원의 직경보다 약간 작게 설계하였다.

3.3 단조실험

스퍼어 기어의 안내형 및 구속형 공정의 단조실험은 300톤 유압프레스를 이용하였다. 유압프레스에는 30톤의 이젝터 장치가 되어 있으며, X-Y 기록계를 부착하여 램 스트로크와 가압력을 기록할 수 있게 했다.스퍼어 기어 다이의 재원은 Table 2 와 같다. 본 연구에서는 스퍼어 기어의 냉간단조시, 액체 윤활재인 MoS₂를 소재에 분무하여 단조하였다. Ohga등^[23]은 인산염 피막 처리된 소재와 액체 윤활재를 분무한 소재를 이용하여 스퍼어 기어를 냉간단조하고 실험결과를 비교하였고, 성공적으로 액체 윤활재를 사용하여 냉간단조 하였다. 본 연구에서도 액체 윤활재를 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 가공하중

Fig.2-Fig.3에 상계해석으로 예측된 결과와 실험으로 얻어진 단조하중을 나타낸다. Fig.2은 제품높이가 10mm인 경우이며 Fig.3은 15mm 인 경우이다. Fig.2-3에서 상계하중은 단조 최종단계에서 좋은 근사를 보인다. 편치의 재료는 항복강도가 2150 MPa인^[24] SKD11(Hrc-62)임으로, 실험에서 단조 최종단계의 평균 가공압력을 1800MPa로 같게하여 성형하였기 때문에 제품의 성형정도에서 차이가 난다. 상계해석으로 예측된 단조하중은 실제 실험을 수행시 좋은 참고자료가 된다. 상계해석이 재료유동이 이 끝에 도달한 이후의 유동을 고려하지 못함으로 안내형 단조에서 상계해보다 높은 하중이 측정되었다. 상계해석된 단조하중은 단조초기에 구속형이 조금 높고 단조 최종단계에서는 거의 같은 값이다. 그러므로 평균 가공압력은 편치 단면적이 큰 안내형 공정에서 작은 값을 가진다. 제품 높이가 10mm인 경우, 평균 가공압력은 안내형 공정은 1707.309MPa, 구속형 공정은 2176.632MPa이며 제품 높이가 15mm인 경우, 평균 가공 압력은 안내형 공정

은 1717.207MPa이고 구속형 공정은 2262.076MPa이다. 그러므로 안내형 공정이 금강강도면에서 유리한 공정이다.

4.2 가공물의 변형단계

Fig.4-Fig.7에 안내형 및 구속형 공정으로 냉간단조한 스퍼어 기어를 변형 단계별로 나타내었다. 제품의 우측이 하중이 가해지는 방향이다. 각 경우 단조 최종단계의 평균 가공압력은 대략 1800MPa정도 이다. Fig.4-7에 냉간 성형한 단조품을 나타내었다. Fig.4-5는 안내형 단조에 의한 단조품이며 Fig.6-7은 구속형 단조에 의한 단조품이다. Fig.4와 Fig.6은 직경이 23.05mm, 높이가 14.2mm, 내경이 6.975mm인 초기소재부터 제품 높이가 10mm인 스퍼어 기어로 단조되는 경우이다. Fig.5와 Fig.7은 직경이 23.05mm, 높이가 21.2mm, 내경이 6.975mm인 초기소재부터 제품 높이가 15mm인 스퍼어 기어로 단조되는 경우이다. 안내형 단조의 경우, 단조 초기부터 다이와 편치의 간극으로 재료가 유동되는 플래시가 치면을 따라 발생하였다. 이를 사포로 표면처리한 것을 나타낸다. 플래시는 단조 초기에 발생하여 단조 최종단계로 진행될수록 증가하였다. 구속형 단조의 경우, 단조 초기에는 원통형 편치와 구속다이 사이의 간격으로 플래시가 발생하지 않았고 단조 최종단계에서 플래시가 발생하였다. 이를 사포로 표면처리한 것을 나타낸다.

4.2.3 안내형 공정과 구속형 공정의 비교

Fig.4-7을 통해, 안내형 공정과 구속형 공정에 의해 냉간단조된 제품을 변형단계별로 고찰하고자 한다. Fig4-5 모두 안내형 단조인 경우이며, 치높이가 낮은 Fig.4의 (c)가 Fig.5의 (c)보다 이젝터쪽 (figure의 왼쪽)의 충진이 양호하다. 또한 Fig.4-5 모두, 편치쪽(figure의 오른쪽)이 이젝터쪽 보다 충진이 양호함을 알 수 있다. 이는 냉간단조시 다이 벽면의 마찰이 편치운동 방향과 수직으로 작용하기 때문이라 생각된다. Fig6-7 모두 구속형 단조인 경우이며, 치높이가 낮은 Fig.6의 (c)가 Fig.7의 (c)보다 편치쪽(figure의 오른쪽)의 충진이 양호하다. 또한 Fig6-7 모두, 이젝터쪽(figure의 왼쪽)이 편치쪽(figure의 오른쪽) 보다 충진이 양호함을 알 수 있다. 이는 구속형 냉간단조시 편치운동과 수직방향으로 재료가 급격히 유동되는 편치쪽의 충진이 어렵다고 생각된다. 그러므로, 안내형 공정 및 구속형 공정에 의한 냉간단조로 얻어지는 스퍼어기어는 치높이가 낮은경우가 유리하다. 또한 안내형 공정에서는 이젝터부에 재료가 충전되기 어렵고, 구속

형 공정에서는 편치쪽의 충전이 어렵다. Fig.4과 Fig.6의 최종단계는 평균 가공압력이 같은 경우이며 안내형 공정으로 단조된 제품(Fig.4)이 구속형(Fig.10)보다 치의 성형에 유리함을 알 수 있다.

5. 결론

치가 가공된 편치를 사용하는 안내형 공정과 원통형 편치를 사용하는 구속형 공정으로 상용 알루미늄 합금으로 스퍼어 기어를 냉간단조 하였다. 또한 제안되어진 동적가용 속도장으로 상계해석하였으며, 냉간단조된 제품을 변형단계별로 고찰하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 안내형 공정과 구속형 공정으로 스퍼어 기어를 냉간단조하고 제안되어진 상계해^[6,8,15]를 이용하여 상계해석을 수행하였다. 상계해석 결과, 측정된 단조하중과 예측된 단조하중이 단조 최종단계에서 좋은 근사를 보이며, 두 공정 모두 단조 최종단계에서 거의 같은 값을 나타낸다.
- 2) 상계해석으로 예측된 하중을 평균 가공압력으로 계산하면 편치 단면적이 큰 안내형 공정이 더 작은 값을 보이므로 금형강도면에서 안내형이 유리한 단조공정이다.
- 3) 냉간단조된 제품을 변형단계별로 고찰하면, 안내형 공정과 구속형 공정 모두 치높이가 작은 기어의 성형에 유리함을 알 수 있다. 같은 평균 가공압력으로 가공한 경우, 안내형 공정이 구속형 공정보다 치성형이 유리함을 알 수 있다.
- 4) 안내형 공정에서는 다이변면의 마찰로 인하여 이젝터부에 재료가 충전되기 어렵다. 또한 구속형 공정에서는 편치운동 방향과 수직으로 재료가 급격히 유동되는 편치쪽의 충전이 어렵다.

참고문헌

1. A. R. O. Abdel-Rahman and T. A. Dean, "The Quality of Hot Forged Spur Gear Forms. Part II : Tooth Form Accuracy", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 21, No. 2, pp. 129-141, 1981.
2. S. K. Samanta, "Helical gear: A noble method of manufacturing it", Proc. 4th North American Metalworking Research Conf., Battelle's Columbus Labs, OH, USA, Society of Manufacturing Engineers, pp. 199-205, 1976.
3. Jaechan Choi, Haeyong Cho and Hyukhong Kwon, "A new extrusion process for helical-gears: experimental study", J. Mater. Process. Technol., Vol. 43, pp. 35-53, 1994.
4. F. Dohmann and O. Traudt, "Metal Flow and Tool Stress in Cold Forging of Gear Components", Advanced Technology of Plasticity, Vol. II, pp. 1081-1088, 1987.
5. 심상운, 송기섭, 윤두성, 박용복, 양동열, "자동차용 후진 아이들 기어의 정밀 냉간 단조", 단조기술의 진보, 이동녕·박종진 편, 제2회 단조 심포지움 pp. 145-157, 1995.
6. 최영, 스퍼어기어의 냉간밀폐단조에 관한 연구, 부산대학교 석사학위 논문, 1995.
7. J. C. Choi, Y. Choi, K. D. Hur and C. H. Kim, "A Study on The Forging of Spur Gears", Int. J. Mech. Sci., Vol. 38, No.

- 12, pp. 1333-1347, 1996.
8. 최재관, 허관도, 김창호, 최영, "원호플랫-인벌류트 스퍼어 기어의 밀폐단조에 관한 상계해석", 한국소성가공학회지, 제3권, 제1호, 통권 제6호, pp. 97-109, 1994.
9. K. Ohga, K. Kondo and T. Jitsunari, "Research on Precision Die Forging Utilizing Divided Flow", Bull. of JSME, Vol. 28, No. 244, pp. 2451-2459, 1985.
10. K. Kondo and K. Ohga, "Development of Precision Cold Die Forging Process Utilizing Divided Flow", J. of the JSTP, Vol. 27, No. 300, pp. 121-131, 1986.
11. K. Ohga, K. Kondo and K. Hori, "Investigation into Forming Processes of Various Spur Gears", Advanced Technology of Plasticity, Vol. II, pp. 1089-1096, 1987.
12. K. Ohga and K. Kondo, "Research on Application of the Precision Cold Die Forging Utilizing Divided Flow to Thick Products", Advanced Technology of Plasticity, Vol. II, pp. 1239-1244, 1993.
13. 近藤一義, 櫻井武史 "分流方式による内歯ヘリカルギヤの精密冷間鍛造 (第3報)", 塑性加工春季講演會, pp. 15-16, 1995.
14. 최재관, 최영, 탁성준, "헬리컬 기어의 냉간단조에 관한 상계해석 (I)", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(I), pp. 296-301, 1996.
15. 최재관, 최영, 탁성준, "헬리컬 기어의 냉간단조에 관한 상계해석 (II)", 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 144-149, 1996.
16. Saul, G., Altan, T., and Depierre, V., "A New Method for the Determination of Material Flow Stress Values under Metalworking Conditions", in Metal Forming : Interrelation between Theory and Practice (ed. A.L. Hoffmann), pp.294, Plenum Press, New York, 1971.
17. Douglas, J.R. and Altan, T., "Flow Stress Determination for Metals at Forming Rates and Temperatures", ASME J. Eng. Ind., Vol. 97, pp.66, 1975.
18. K.P. Rao and W.L. Xu, "Neural Evaluation of Friction and Flow Stress Adaptive to Ring Geometry", JSME International Journal, Series A, Vol. 38, No. 4, pp. 506-514, 1995.
19. K. Osakada, M. Shirashi, S. Muraki and M. Tokuoka, "Measurement of Flow Stress by the Ring Compression Test", JSME International Journal, Series A, Vol. 34, No. 3, pp. 312-318, 1991
20. 최영민, 김낙수, "링 압축시험에 의한 유동응력 및 마찰인자의 결정(I)", 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp. 12-22, 1993.
21. 최영민, 김낙수, "링 압축시험에 의한 유동응력 및 마찰인자의 결정(II)", 한국소성가공학회지, 제3권, 제2호, pp. 215-228, 1994
22. Yang-Tai Lin and Jang-Ping Wang, "An Investigation into the constant friction factor with the upper-bound flow function elemental technique", J. of Mater. Process. Technol. Vol. 36, pp. 57-68, 1992.
23. K. Ohga, F. Murakoshi and H. Ando, "Precision Cold Die Forging of Actual Steel Gear Toothed Products Utilizing Divided Flows", Advanced Technology of Plasticity, Vol. I, pp. 331-334, 1996.
24. I.C.F.G., "General aspect of Tool Design and Tool Materials for Cold Forging of Steel", No. 4/70, No. 4/82.

Table 1 Result of ring compression test

Outer diameter [mm]	Inner diameter [mm]	Height, t [mm]	dt [mm]	Load [ton]	Increase in inner diameter [%]	Reduction in height [%]
15.35	7.588	4.75	0.25	5.0	-1.173	5
17.275	8.188	3.75	1.25	7.5	-9.173	25
17.925	8.025	3.4	1.6	10.0	-7	32
19.113	7.888	2.9	2.1	12.5	-5.173	42
21.038	7.888	2.25	2.75	17.5	-5.173	55
22.2	7.85	2.0	3.0	20.0	-4.667	60

Table 2 Specification of spur gear die

no. of teeth	18
module	1.5
pressure angle	20°
modification coefficient	0.0
standard pitch circle diameter	27.0 mm
base circle diameter	25.3667 mm

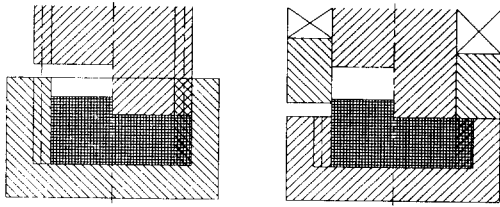


Fig.1 Die design schematics for the gear forging[5]

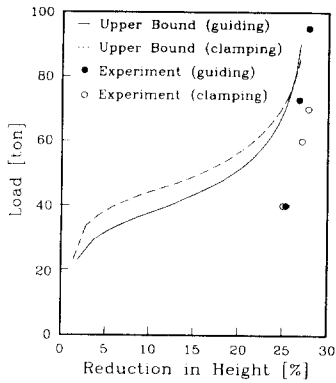


Fig.2 Comparison of the experimental results with the upper bound solutions (h=10mm)

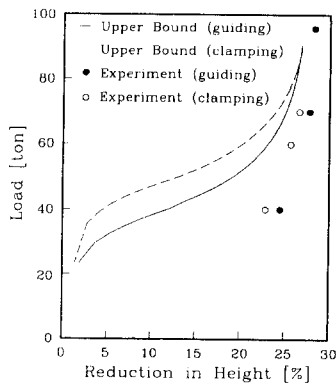


Fig.3 Comparison of the experimental results with the upper bound solutions (h=15mm)

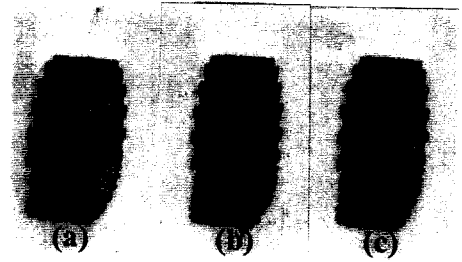


Fig.4 Cold forged spur gear (guiding type, h=10mm)
(a)R.H.: 25.35% (b)R.H.: 26.76% (c) R.H.: 27.80%

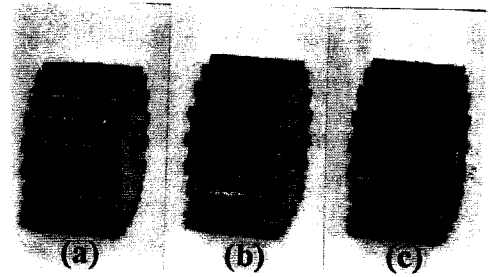


Fig.5 Cold forged spur gear (guiding type, h=15mm)
(a)R.H.: 24.52% (b) R.H.: 27.80% (c)R.H.: 28.30%

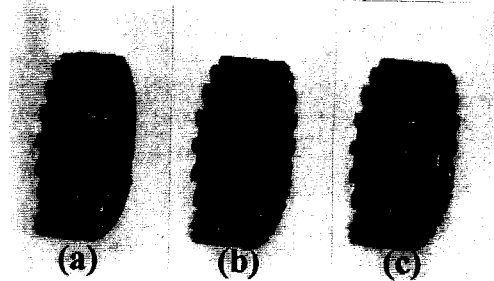


Fig.6 Cold forged spur gear (clamping type, h=10mm)
(a)R.H.: 25.00% (b)R.H.: 27.10% (c) R.H.: 27.80%

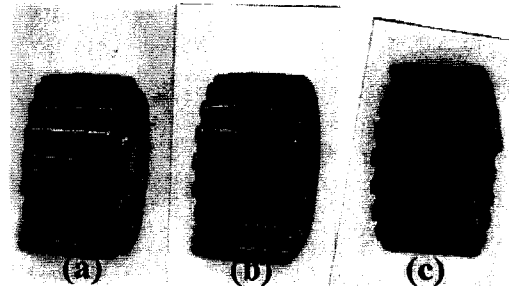


Fig.7 Cold forged spur gear (clamping type, h=15mm)
(a)R.H.: 22.87% (b)R.H.: 25.70% (c) R.H.: 26.65%