

다단 미세 치형 허브기어의 프레스 성형기술개발

김동환#, 고대철*, 이상호**, 변현상**, 김병민***

Development of Press Forming Technology for the Multistage Fine Tooth Hub Gear

Dong Hwan Kim#, Dae Cheol Ko*, Sang Ho Lee**, Hyun Sang Byun** and Byung Min Kim***

ABSTRACT

This paper deals with the aspects of die design for the multistage fine tooth hub gear in the cold forging process. In order to manufacture the cold forged product for the precision hub gear used as the ARD 370 system of bicycle, it examines the influences of different designs on the metal flow through experiments and FE-simulation. To find the combination of design parameters which minimize the damage value, the low gear length, upper gear length and inner diameter as design parameters are considered. An orthogonal fraction factorial experiment is employed to study the influence of each parameter on the objective function or characteristics. The optimal punch shape of fine tooth hub gear is designed using the results of FE-simulation and the artificial neural network. To verify the optimal punch shape, the experiments of the cold forging of the hub gear are executed.

Key Words: Cold forging(냉간 단조), Hub gear(허브 기어), Metal flow(금속 유동), FE-simulation(유한요소해석)

1. 서론

고도의 경제성장에 따라 생활 및 건강 유지의 수단으로 일반자전거 뿐만 아니라 Health 용 자전거의 보급률이 증가하고, 남녀노소 구별 없는 운전 계층의 확산으로 운전이 용이하고 신체적으로 피로가 덜한 이상적인 자동 자전거 튜브 공기압 유지 및 정 구동 및 정·역 구동 등의 고품격 자전거의 보급이 급격히 높아지고 있는 추세이다. 이에 일반자전거(Bicycle), Health 용 자전거(Exercise Bike),

휠체어(Wheel Chair) 및 각종 재활 기구 등의 구동 장치에 기존 제품의 변형 없이 장착할 수 있는 정 구동 허브(Hub) 내장 다단 변속기 및 정·역 구동 전진주행장치(Bi-Directional Pedaling System : BDP system)등이 국내업체에 의해 개발되었으나, 장치의 핵심 부품인 다단 미세 치형 허브 기어의 무절삭 프레스 성형기술이 부족하여 양산 적용을 못하고 있는 실정이다.

현재, 금형을 이용한 프레스 가공에 의한 치형 부 성형기술은 개발 초기 상태이며, 특히 금형설

☞ 접수일: 2006년 2월 14일; 게재승인일: 2006년 4월 6일

교신저자: 진주국제대학교 자동차공학과, 교수

E-mail dhkim@jju.ac.kr Tel. (055) 751-8190

* 부산대학교 동남권 부품소재 산학협력 혁신사업단

** 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

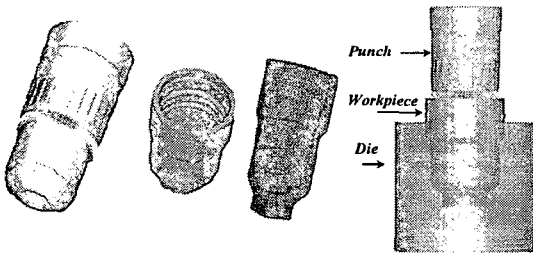
*** 부산대학교 기계공학부, 교수

2.2 치형부 냉간단조 공정해석 및 결합

본 연구에서는 현장 경험을 토대로 냉간단조공정과 사이징 공정이 결합된 단조공정의 치형 생성 타당성을 평가하고자 해석을 수행하였다. 내장형 다단 변속 허브 기어의 치형부 성형을 위해서는 먼저 금형의 형상이 정의가 되어야 하며, 이를 위하여 Fig. 2의 펀치 및 하부 금형 다이를 Pro-E의 치형 생성 프로그램을 이용하여 금형 형상을 정의하였다(Fig. 3).

사용된 소재는 SM20C 이며 인장시험으로부터 응력-변형률 관계식 ($\sigma = 745e^{0.2} \text{MPa}$) 을 획득하였다. 금형과 소재의 마찰조건은 일반적인 냉간단조 공정으로 하여 정의 하였고($m=0.12$), 해석 시간을 고려하여 1/4 단면으로 상용 유한 요소 코드인 DEFORM 을 이용하여 해석을 수행하였다(Fig. 4).¹³

치형부 냉간단조 공정의 성형해석 결과로부터 Fig. 5에 나타난 바와 같이 치형 성형에 있어서 금속 유동이 불 균일하게 발생하고 특히 미세 치형부를 중심으로 전·후방 금속 유동이 동시에 발생됨을 알 수 있었다. 이것은 치 끊어짐 발생이 문제



(a)Punch (b)Mesh shape (c)Forging condition
Fig. 3 Punch and workpiece shape for FE-simulation

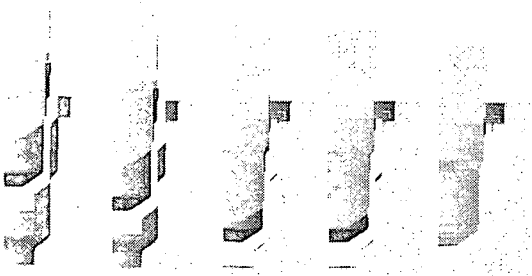


Fig. 4 The sequence of gear forging with sizing process

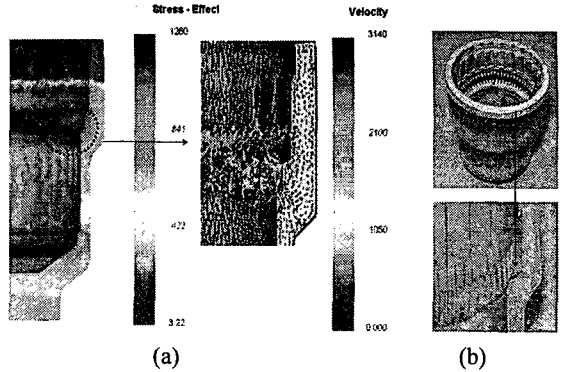


Fig. 5 (a) The results of FE-simulation and (b) defects in cold forging process

시 되는 현장의 결과(Fig. 5(b))를 그대로 반영하는 단적인 예가 되며, 따라서 이 공정을 개선하기 위한 예비성형체 형상의 재설계가 필수적이고, 형상의 재설계를 통하여 치형부 연성파단의 억제, 미세 치형부 접합의 최소화 그리고 치형부의 집중 응력의 저감 및 균일한 금속유동을 갖는 성형공정 설계가 되어야 할 것이다.

3. 다단 미세 치형 공정설계

3.1 설계변수의 선정

현장의 경험으로 제시된 내장형 허브 기어 공정에 대한 성형해석 결과로부터 미세 치형부 금속 유동의 불 균일 및 연성 파괴 값이 크다는 것을 알 수 있었다. 또한 이 공정으로 성형된 내장형 다단 변속 허브 기어 부품은 미세 치형 단 부에서의 크랙이 발생하여 제품에 치명적인 결함이 되고 있으며 양산되지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 냉간단조공정의 예비성형체 설계 방안을 제시하기 위하여 Fig. 6의 설계변수를 고려하였다. 먼저 ①의 하단 치형(Low Gear Length: LGL) 부분은 미세 치형이 성형되는 길이이며, ②의 상단 치형(Upper Gear Length: UGL) 부분은 상단 치형이 성형되는 길이이다. 또한 ③의 내부 직경 (Inner Diameter: ID) 부분은 미세 치형부가 성형되는 내경으로 미세 치형의 산 높이에 해당된다. 본 연구에서 이 세 가지를 설계변수로 설정한 것은 먼저 현장에서의 예비성형체 형상변경이 용이하며, 현장의 경험으로부터 이 세 가지 치수변화로 제품의 성형특성이 크게 변하여 본 연구에서는 현장

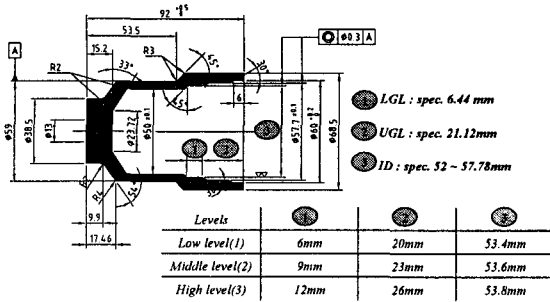


Fig. 6 Design variable for hub gear forging process

경험을 토대로 세 가지 변수를 주 설계변수로 설정하였다. 설계변수의 치수 범위는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 LGL 부분은 6~12mm, UGL 은 20 ~ 26mm 그리고 ID 부 치수는 53.4~53.8mm 까지 고려하였다.

3.2 설계변수조합에 따른 성형해석

설계변수에 따른 설계변수조합을 Table 1에 나타내었다. 이 표의 형식은 실험계획법의 직교배열표에 따른 것으로 실험 및 해석의 회수를 최소화 하여 변수 범위내의 모든 가능한 조합에 대한 영향을 예측할 수 있는 장점을 가진다. 14~17 본 연구에서는 설계변수조합에 따른 목적함수로 파단 및 크랙 발생 예측에 정량적인 값으로 평가할 수 있는 연성파단 값(damage value)으로 하여 Table 1의 설계변수조합에 따른 유한요소해석을 수행하였다. 설계변수조합의 변화에 따라 예비성형체 체적은 Table 1에 나타난 바와 같이 차이가 발생한다. 이 범위는 최종 제품 체적 범위내의 허용범위에 속하나 부위별 체적에 의한 금속유동특성 차이는 발생하리라 생각된다.

성형해석의 전 단계 공정에서 소재에 소재물성을 입력하고, 금형과 소재의 경계조건을 입력한 다음, 해석 수행 직전의 금형의 위치를 각 공정별로 나타낸 그림을 Fig. 7에 나타내었다. 다이의 형상은 모두 동일하나, 펀치의 위치는 각 공정별로 차이가 있다. 금형과 소재의 접촉 위치는 각 공정의 설계변수조건에 따라 접촉지점의 차이가 발생하게 된다. 본 연구에서는 미 해석설계변수 조합에 대한 연성 파단을 예측하기 위하여 직교배열표를 이용한 신경망을 적용하였다. 18~23 적용된 신경망의 입력값은 Table 1의 각 공정에 대한 설계변수값들이며 학습값은 각 공정의 연성 파단 값으로 하였다.

Table 1 Orthogonal array and results of FE-simulations

No.	Design variables			Error	Volume (x10 ⁴ mm ³)	Damage
	①	②	③			
1	6	20	53.4	1	2.6259	0.93
2	6	23	53.6	2	2.5716	0.77
3	6	26	53.8	3	2.5173	1.13
4	9	20	53.6	3	2.5985	0.61
5	9	23	53.8	1	2.5430	0.59
6	9	26	53.4	2	2.5075	0.96
7	12	20	53.8	2	2.5685	1.54
8	12	23	53.4	3	2.5356	0.81
9	12	26	53.6	1	2.4789	0.69

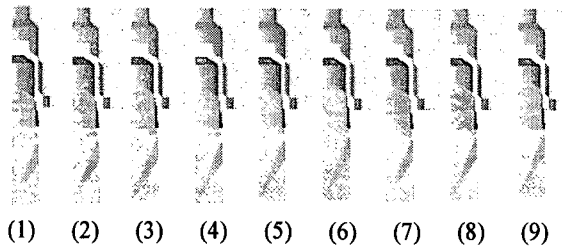
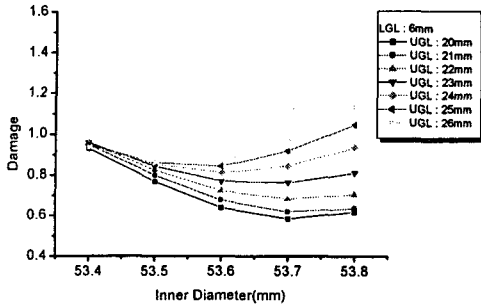


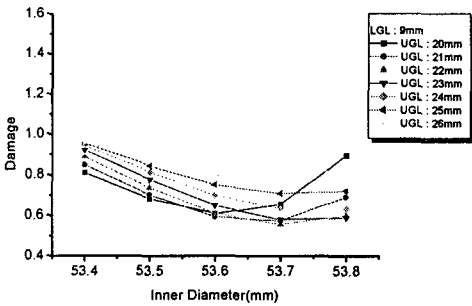
Fig. 7 Position of punch depending on design parameters (matching the No. in Table 1)

신경망 학습 후 예측된 결과치를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8(a)에서 알 수 있는 사실은 미세 치형 단부길이(LGL)가 작은 조건(6mm)에서 상단 치형부(UGL)가 크면(ex: 25, 26mm) 내부 직경이 약 53.6mm 를 기점으로 연성 파단 값은 다시 증가한다는 것이다. 이러한 변곡점은 Fig. 8(c)에서 알 수 있듯이 LGL 길이가 증가할수록 역전되어 가장 낮은 연성 파단 값을 가졌던 UGL 20mm 일 때 내부 직경이 약 53.5mm 에서 변곡점을 가지며 연성 파단 값은 급격히 상승한다는 사실이다. 이상의 결과로부터 Fig. 8의 모든 조건을 종합해 보면, 각 설계변수 간에 상관관계가 있음을 알 수 있으며, LGL에 길이에 따라 최소의 연성 파단 값을 가지는 UGL 및 ID 값은 다르다는 사실이다. 현장에서는 이러한 상관관계를 고려하여 예를 들어 UGL 길이를 고정한다면 이 길이에서 연성 파단 값을 최소로 하는 LGL 및 ID가 결정되어야 할 것이다.

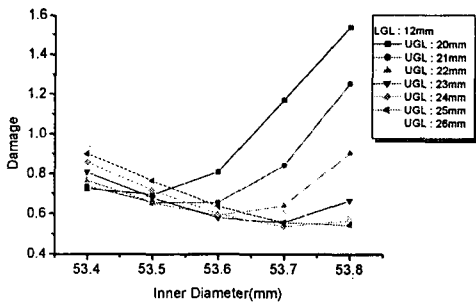
신경망의 예측으로부터 최소의 연성 파단 값을 갖는 조건 순으로 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 알 수 있듯이 최소의 연성파단 값을 가지는 설계변수조합은 LGL =12mm, UGL=24mm, ID=53.7mm의 조건이다.



(a) Low gear length (LGL): 6mm



(b) Low gear length (LGL): 9mm



(c) Low gear length (LGL): 12mm

Fig. 8 Predicted damage value using ANN for combination of design parameters

Fig. 9의 LGL 길이에 따른 유동 특성을 살펴보면, LGL 길이가 비교적 짧은 6mm 인 경우 (Fig. 9(a)) 미세 치형부 치수와 거의 일정한 관계로 치형부 형상이 완성되는 시점에서 아랫부분이 접히는 결함이 나타나며, LGL 길이가 비교적 긴 12mm 인 경우 (Fig. 9(c))에는 미세 치형부 치수에 거의 2 배에 해당되며 미세 치형이 완전히 성형되는 시점에서 접힘 및 미세 치형 시작부에서의 금속 유

동 불 균일이 발생하였다. 이 또한 최종 제품 형상에 결함이 없다 하더라도 접힘에 의한 강도 저하 및 부품에 장착 사용 시 많은 하중을 견디어야 할 기어 장치 특성 상 크랙 발생을 내포하고 하는 결과가 된다. 따라서 미세 치형부의 길이는 6mm 또는 12mm 인 경우는 미세 치형부 연성 파단 값은 작다 하더라도 접힘을 발생시키므로 피하는 것이 좋을 것이라 생각한다. Fig. 9(b)의 미세 치형부 기어의 치수에 약 1.5 배적인 9mm 인 경우에는 전·후방 금속 유동 경계가 치형부에서 발생되나, 비교적 균일하게 이루어지고 있음을 알 수 있다. 또한 Table 2에서 다른 변수 값은 약간의 차이를 보이나 ID 값은 거의 53.7 mm 값에서 최소의 연성 파단 값을 가진다. 이상의 결과를 종합해 보면 Table 2의 랭킹 5번 공정인 LGL=10mm, UGL=23mm, ID=53.7mm의 설계변수조합이 결함을 피할 수 있으며, 동시에 미세 치형부 연성 파단 값을 최소로 할 수 있는 조건이라고 판단된다.

Table 2 Ranking for damage value according to combination of design parameters

Rank	LGL (mm)	UGL (mm)	ID (mm)	Damage	Defect
1	12	24	53.7	0.537	Folding
2	11	23	53.7	0.545	Folding
3	12	25	53.8	0.546	Folding
4	11	24	53.7	0.552	Folding
5	10	23	53.7	0.553	No Folding
6	12	25	53.7	0.557	Folding
7	10	22	53.7	0.557	No Folding

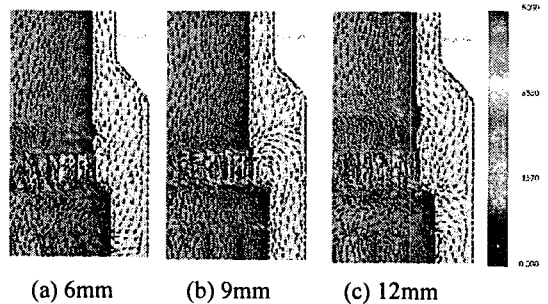


Fig. 9 Characteristics of metal flow according to LGL

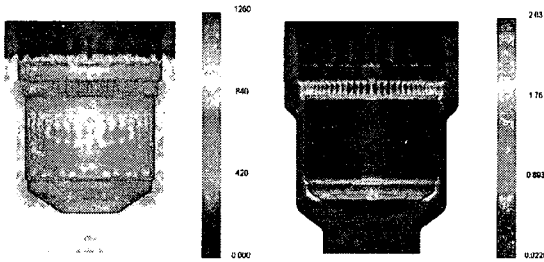
3.3 치형부 최적공정설계

CAE 해석 결과 및 직교배열표를 이용한 신경망 해석결과로부터 결합방지 및 최소의 연성 파단 값을 갖는 조건(LGL=10mm, UGL=23mm, ID=53.7mm)에 대한 성형해석을 수행하여 금속 유동 특성 파악하기 위하여 해석을 수행하였고 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 이 검증해석 결과에서 알 수 있듯이 미세 치형부에서의 금속 유동은 양방향 이 아닌 동일 방향으로 균일한 양상을 나타내었고 최대 연성 파단 값은 신경망으로 예측된 0.553 값과 거의 일치하는 0.56 값을 가지는 것으로 나타났다. 여기서도 알 수 있는 사실은 미세 치형부 금속 유동이 균일하고 전·후방 금속 유동 경계가 미세 치형부가 아닌 윗단 치형부에서 발생되고 있으므로 미세 치형 생성 및 단부 결합 발생 위험이 크게 줄어들 것임을 알 수 있다.

본 연구에서 선정된 설계변수조합으로 다단 치형부 냉간단조공정이 재설계 되면 기존 공정에서 발생하는 미세 치형부 크랙 발생 및 접합 발생을 크게 방지할 수 있으리라 생각되며 양산 적용이 고품질 제품의 대량 생산이 가능하리라 판단된다.

4. 실험 및 적용결과

본 연구 결과에서 제시된 설계방법 및 결과의 검증은 위하여 냉간 단조 실험을 수행하였다. 다만 미세 치형 허브 기어의 치형부 무결함 성형을 위하여 Fig. 6의 ①LGL, ②UGL 및 ③ID의 길이를 Table 3의 조건으로 하여 냉간 단조 실험을 수행하였고 실험은 모든 조건에 대하여 최소 50회 이상 수행 되었다. 실험 결과 Table 1의 No. 1 ~ 5의 경우 금속 유동의 불 균일로 인한 치형부 밑단에서 끊어짐(Fig. 5(b)) 및 치형 접합이 발생하였다. No. 6 번의 경우에는 양호한 치형을 얻을 수 있었으나, 40회 이상 실험이 진행되면서 미세한 치 끊어짐이 발생하였고, 따라서 양산적용에는 부적합함을 알 수 있었다. 그러나 CAE 및 신경망해석으로부터 금속 유동이 균일하고 무결함조건으로 예측된 No. 7의 경우에는 결함이 발생하지 않았고, 따라서 해석 결과를 검증 및 양산 적용이 가능함을 알 수 있었다. 최적 조건(No. 7)으로 성형 실험된 제품의 치형부 사진을 Fig. 12에 나타내었다.



(a) Effective stress (b) Effective strain

Fig. 10 The result of simulation for selected conditions

Table 3 Ranking for damage value according to combination of design parameter

Test	Dimension(mm)			EA
	①	②	③	
No.1	6	23.5	53	50
No.2	7	23.5	53.2	50
No.3	8	23.5	53.4	50
No.4	9	23.5	53.4	50
No.5	10	25	53.8	50
No.6	10	24	53.6	100
No.7(Opt.)	10	23	53.7	100

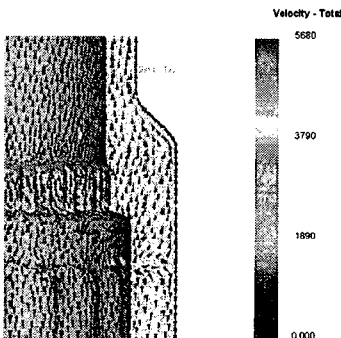


Fig. 11 The metal flow of selected conditions

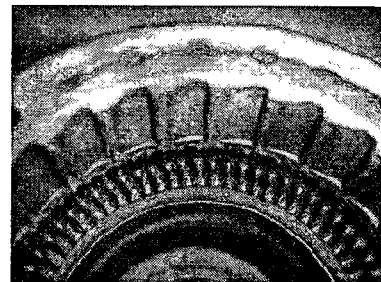


Fig. 12(a) metal flow according to LGL

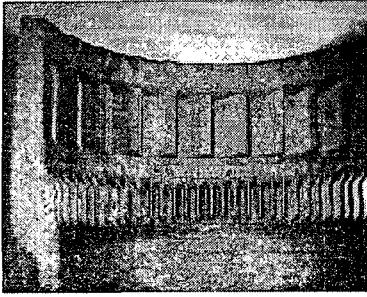


Fig. 12(b) metal flow according to LGL

5. 결론

본 연구에서는 CAE 해석 기법 적용을 통하여 내장형 다단 변속 허브 기어의 냉간단조 시에 발생하는 미세 치형부 파단 및 접합 등의 발생 원인을 규명하고 설계 인자들의 영향 파악을 통한 제품 불량 발생을 최소화함으로써 품질 안정화 및 제품의 생산성을 향상시키고자 하였다. 그 결과를 요약하면 아래와 같다.

- (1) 치형의 CAE 해석을 통한 최적 예비성형체 설계를 위하여 본 연구에서는 현장의 경험을 기본으로 하여 하단 치형부(LGL), 상단 치형부(UGL) 그리고 내부 직경(ID)를 설계변수로 하고, 설계변수조합에 따른 성형해석을 수행하였다. 사용된 해석기법은 실험계획법의 직교배열표를 이용한 신경망이다.
- (2) 신경망을 이용하여 미 해석설계변수 조합에 대한 불 균일 금속 유동을 예측한 결과, 각 설계변수 간에 상호관계가 있음을 알 수 있었고, 최적의 설계변수조합은 LGL=10mm, UGL=23mm, ID=53.7mm 인 조건임을 예측하였다.
- (3) 선정된 설계변수 조건에 대한 해석 및 실험을 수행한 결과, 미세 치형부에서 금속 유동이 균일하고 양산 적용에도 결함이 발생되지 않음을 실험으로 검증하였다.
- (4) 본 연구를 통하여 개발된 내장형 다단 변속 기어 허브 냉간 단조공정의 CAE 해석기법 및 최적 설계기법은 향후, 설계 인자가 제품 특성에 미치는 상호 영향도를 이용한 최적 설계변수조합의 선정 및 예비성형체 설계에 활용 가능할 것이다.

후 기

이 논문은 2004 년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었으며(KRF-2004-002-D00030), 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Choi, J. and Cho, H. Y., "A Study on the Forging of Spur Gears with Internal Serrations," Journal of KSPE, Vol. 15, No. 2, pp. 81 - 89, 1998.
2. Choi, J., Cho, H. Y. and Jo, C. Y., "Forging of Spur Gears with Internal Serrations and Design of the Dies," Journal of MPT, Vol. 104, pp. 1 - 7, 2000.
3. Lee, Y. K., Lee, S. R., Lee, C. H. and Yang, D. Y., "Process Modification of Bevel Gear Forging Using Three-dimensional Finite Element Analysis," Journal of MPT, Vol. 113, pp. 59-63, 2001.
4. Nakano, T., "Modern applications of complex forming and multi-action forming in cold forging," Journal of MPT, Vol. 46, pp. 201-226, 1994.
5. Park, J. N., Kim, D. H. and Kim, B. M., "Experimental Investigation on the Flow Control of Hub Clutch for Automobile," Journal of KSTP, Vol. 11, pp. 430-438, 2002.
6. Dean, T. A., "The Net-shape Forming of Gears," Materials and Design, Vol. 21, pp. 271 - 278, 2000.
7. Cai, J., Dean, T. A. and Hu, Z. M., "Alternative Die Designs in Net-shape Forging of Gears," Journal of MPT, Vol. 150, pp. 48 - 55, 2004.
8. Alves, M. L., Rodrigues, J. M. C. and Martins, P. A. F., "Cold Forging of Gears: Experimental and Theoretical Investigation," Finite Element in Analysis and Design, Vol. 37, pp. 549 - 558, 2001.
9. Park, J. J. and Lee, J. H., "FEM Analyses of Hot Forging and Cold Sizing of a Spur Gear," Journal of KSTP, Vol. 5, pp. 105 - 114, 1996.
10. Su, D., Wakelam, M. and Jambunathan, K., "Integration of a Knowledge-based System, Artificial Neural Networks and Multimedia for Gear Design," Journal of MPT, Vol. 107, pp. 53 - 59, 2000.
11. Kim, D. H. and Kim, B. M., "Evaluation of Formability for warm Forging of The Bevel Gear on The Lubricants and Surface Roughness," Journal of

- KSPE, Vol. 22, pp. 21-28, 2005.
12. Kim, D. H. and Kim, B. M., "Preform Design of the Bevel Gear for the Warm Forging using Artificial Neural Network," Journal of KSPE, Vol. 20, pp. 36-43, 2003.
 13. Altan, T., Oh, S. I. and Gegel, H. L., "Metal Forming -Fundamentals and Application," American Society for Metals, OH44073, 1983.
 14. Box, G. E., Hunter, W. G. and Hunter, J. S., "Statistics for Experiments," New York, John Wiley, 1978
 15. Montgomery, D. C., "Design and Analysis of Experiments," 3rd edition, New York, John Wiley, 1991.
 16. Taguchi, G., "Introduction of Quality Engineering, White Plans," NY: UNIPUB/Kraus International, 1986.
 17. Ross, P. J., "Taguchi Techniques for Quality Engineering," McGraw-Hill, 1998.
 18. Rumelhart, D. E., Hinton, G. E. and Williams, R. J. "Learning Internal representations by error propagation," Parallel Distribution Processing Cambridge MA:MIT press, pp. 318-362, 1986.
 19. Kim, D. H., Ko, D. C. and Kim, B. M., "Application of Artificial Neural Network and Taguchi Method to Preform Design in Metal Forming Considering Workability," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 39, No. 5, pp. 771- 785. 1999.
 20. Kim, D. H., Ko, D. C., Kim, B. M. and Choi, J. C., "Methodology of Preform Design Considering Workability in Metal Forming by the Artificial Neural Network and Taguchi Method," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 80-81, pp. 487-492, 1998.
 21. Kim, D. H., Kim, D. J. and Kim, B. M., "The Application of Neural Network and Statistical Method to Process Design in Metal Forming Process," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 15, pp. 886 - 894, 1999.
 22. Kim, D. H., Kim, B. M., Lee, Y. and Min, B. H., "Friction Characteristics for Surface Finish and the Stoning Direction of Stoning Dies," Proc. Instn. Mech. Engrs. Part B: J. Engineering Manufacture, Vol. 216, pp. 531 - 542, 2002.
 23. Kim, D. H., Kim, D. J., Ko, D. C., Kim, B. M. and Choi, J. C., "The Application of Artificial Neural Network and Taguchi Method to Process Sequence Design in Metal Forming Processes," Metals and Materials, Vol. 4, No. 3, pp. 548-553, 1998.