

# 복합단조공법을 이용한 자동차 트랜스미션용 클러치 기어 개발

이광오<sup>#</sup>, 김정민<sup>\*</sup>, 제진수<sup>\*\*</sup>, 강성수<sup>\*\*\*</sup>

## Development of precise clutch gear for automobile transmission by compound forging process

Kwang-O Lee<sup>#</sup>, Jung-Min Kim<sup>\*</sup>, Jin-Soo Je<sup>\*\*</sup> and Sung-Soo Kang<sup>\*\*\*</sup>

### ABSTRACT

A manufacturing process for a clutch gear which demands high strength and wear resistance, was developed by means of computer simulation. A preform was made by hot forging process and subsequent cold sizing process is applied to complete precise tooth part. Processes to obtain high dimensional accuracy and superior mechanical properties are analyzed and optimal heat treatment cycle to improve cold forgeability is introduced. Prototype was produced and the dimensional accuracy of the prototype was inspected to verify proposed process.

**Key Words** : Forging simulation, Clutch gear, Compound forging process, Normalizing heat treatment, Spheroidizing heat treatment

### 1. 서론

단조가공법은 가장 오래된 소성가공법의 하나로 산업의 발전과 더불어 전 세계적으로 사용되고 있으며, 대량생산뿐만 아니라 뛰어난 기계적 특성을 가진 제품의 생산이 가능하기 때문에 자동차 산업과 더불어 발전해왔다. 최근, 자동차 산업에서는 내구성, 고강도뿐만 아니라 고정밀의 부품을 요구하게 되었고, 이에 따라 내구성과 고정밀도를 동시에 만족시킬 수 있는 성형법에 대한 요구가 높아지게 되었다.<sup>1-5</sup> 특히, 스피기어, 베벨기어, 헬리컬기어, 클러치 기어 등 기어류 부품의 경우, 성형량도

많고, 높은 정밀도의 최종제품을 요구하기 때문에 절삭가공 혹은 '열간가공+절삭가공'에 의해 주로 생산이 되어 왔다. 그러나 최근에는 우수한 기계적 성질과 높은 생산성을 위해 대변형은 온간단조 혹은 열간단조공정으로, 형상을 조정해서 정밀도를 내기 위한 사이징공정을 냉간단조로 행하는 복합단조가 널리 행해지고 있다.<sup>6</sup>

일반적으로 금속성형공정 및 금형설계는 설계자의 경험과 여러 차례의 시행착오를 통해서 이루어지며, 이러한 시행착오 방법은 시간적·경제적 손실을 가져오게 되며, 특히 성형이 실패한 경우에는 공정의 수정과 이에 따른 금형 재설계 및 수정

<sup>#1</sup> 접수일: 2005년 5월 25일; 게재승인일: 2005년 11월 10일

<sup>#</sup> 교신저자 : 부산대학교 정밀기계공학과

E-mail royalko@empal.com Tel. (051) 510-1454

<sup>\*</sup> 부산대학교 정밀기계공학과

<sup>\*\*</sup> 경상대학교 수송기계공학부

<sup>\*\*\*</sup> 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구센터

을 위하여 적지 않은 비용이 필요하게 된다. 따라서 이러한 문제점들을 극복하기 위하여 금속성형공정의 설계에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 활용하여 경제성과 효율성을 높여가고 있다.<sup>7-9</sup>

따라서 본 연구에서는 이러한 컴퓨터 시뮬레이션을 활용하여 자동차 트랜스미션용 클러치기어의 최적 성형공정을 낮은 성형하중, 균일한 변형을 분포 및 적은 손상도(Damage)측면에서 설계하고자 하였으며, 성형재료의 가공성(Formability)을 향상시키기 위한 노르말라이징(Normallizing) 및 구상화(Spheroidizing) 열처리 공정에 대해서도 연신율 측정 및 조직사진 촬영을 통해 검토하였다. 개발된 성형공정 및 열처리 공정에 의해 시작품을 제작하였고, 시작품의 치수정밀도 측정을 통해 개발된 공정의 타당성을 입증하였다.

## 2. 3차원 유한요소 해석

### 2.1 대상 제품

재질은 대표적인 고강도-저합금강(HSLA: High Strength Low Alloy)으로서 자동차 기어용 소재로 널리 사용되고 있는 크롬-몰리브덴강(SCM420(AISI 4120))이며, 아래의 Table 1에 그 화학조성을 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of SCM420

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.18 ~ 0.23	0.15 ~ 0.35	0.60 ~ 0.85	0.03 below	0.03 below	0.90 ~ 1.2	0.15 ~ 0.3

유동응력곡선(Flow stress curve)는 인장실험을 통해 얻어졌으며, 커브피팅(Curve fitting)을 통해 구성식(Constitutive equation)을 다음과 같이 구하였다.

$$\sigma = 1275\epsilon^{0.245}$$

최종제품의 형상을 Fig. 1에 나타내었으며, 치형부의 기어사양은 Table 2에 나타내었다. 제품 형상이 축대칭이므로 1/12만을 성형해석의 대상으로 하였다.

### 2.2 해석 조건

냉간단조 성형공정의 유한요소해석은 상용 소프트웨어인 DEFORM을 사용했으며, 상세 해석 조건을 Table 3에 나타낸다. 마찰계수의 경우, 일반적으

로 냉간단조 전 표면윤활처리(인산염 피막)를 행하기 때문에 대단히 낮은 마찰계수값인 0.07을 사용하였다.

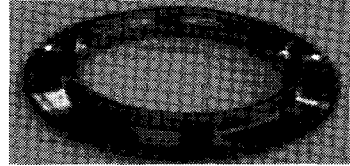


Fig. 1 Final product(Clutch gear)

Table 2 Specification of gear

Items	Value
Module(m)	1.5
Pressure angle( $\alpha$ )	30°
Number of tooth	66
Standard Pitch circle Diameter(mm)	99(mm)
Over Ball Diameter(mm)	106.1429
Material	SCM420

Table 3 Conditions of FEA

Items	Value
Stroke(mm)	9.385
Friction coefficient(Shear)	0.07
Number of elements	40,000
Temperature(R/T):Isothermal	20 °C
Stress-Strain relationship	$\sigma = 1275\epsilon^{0.245}$

### 2.3 공법 제안

클러치 기어와 같이 전체 제품은 커지만, 높은 정밀도를 요구하는 부분이 특정부위에만 국한되는 경우, 열간 혹은 온간단조로 대변형을 실현하고, 정밀도가 높은 부분만 냉간 사이징(Cold sizing)공정

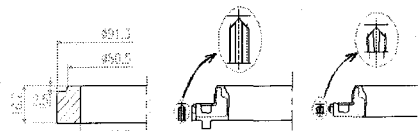


Fig. 2(a) Upsetting process

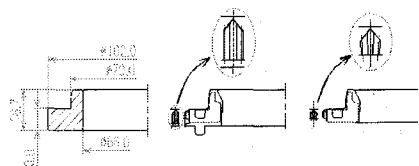


Fig. 2(b) Forward Extrusion process

을 적용함으로써 원가절감과 고정밀도를 동시에 달성하고 있다. 본 연구에서도 열간단조에서 예비성형체(Preform)를 만들고, 냉간단조에서 기어형상을 정밀하게 만들어내는 복합단조(Compound forging) 공정을 적용하고자 한다. 그러나, 열간단조에 의한 예비성형체의 설계에 대해서는 검토하지 않으며, 냉간정밀단조 공정에 대해서만 업세팅(Upsetting) 공정(Fig. 2(a))과 전방압출(Forward extrusion) 공정(Fig. 2(b))에 대해서 검토하고자 한다.

냉간사이징뿐만 아니라 냉간 성형공정의 경우, 제품성형 시 높은 응력이 발생하게 되며, 이러한 응력으로 인해 금형에도 대단히 높은 압력이 작용하게 된다. 이로 인해 금형의 탄성변형(Elastic deflection)이 발생하게 되어 최종 단조품의 치수정밀도에 나쁜 영향을 미치게 된다. 또한 클러치 기어와 같이 치(tooth)가 대단히 작은 경우, 제품의 완전 충전도 어려울 뿐만 아니라 국부적으로 대단히 큰 응력이 발생하게 되어 금형수명(Service life of dies)에도 악영향을 미치게 된다. 따라서 성형하중, 변형을 분포 및 손상도를 설계기준으로 업세팅 공정 및 전방압출 공정에 대해 검토하였다.

#### 2.4 해석 결과

업세팅 공법과 전방압출 공법의 상대적 비교를 위해 모두 동일한 조건으로 해석을 수행하였으며, Fig. 3에서는 업세팅 공법에서의 초기 세팅형상, 최종단계에서의 유효변형률(Effective strain) 및 손상도를, Fig. 4에서는 전방압출 공법에서의 초기 세팅형상, 최종단계에서의 유효변형률 및 손상도를 각각 나타내고 있다. 업세팅 공법의 경우, 그루부 부분(Fig. 3(b)의 Groove)이 성형되면서 금속이 아랫 방향으로 흘러가기 때문에 그루부 부분에 있는 치(tooth)부분(Fig. 3(b)에서 Q부분)에서는 상대적으로 많은 변형이 일어나야 완전 충전시킬 수 있으므로 상대적으로 높은 변형률이 나타나는 것이며, 이에 따라 다른 치부분과의 변형률의 편차가 생긴다는 것을 알 수 있다. 그러나 전방압출 공법의 경우, 치부분이 어느 정도 성형되고 난 후부터 그루부 부분의 성형이 일어나기 때문에 이러한 각 치마다의 변형률 편차가 거의 없는 것으로 나타나고 있다. 그러나 전방압출의 경우, 면취가 없는 부분(Fig. 4(b)의 P부분)의 유효변형률이 상당히 높는데 이것은 이 부분이 가장후에 성형이 되기 때문이며, 이 부분은 후가공에 의해 잘려나가는 부분이므로 문제가

되지 않는 것으로 생각된다. 손상도값의 경우, 전방압출공법의 경우, 치형부에서 전체적으로 균일한 변형을 받고 있기 때문에 손상도값도 균일하며 그 값도 업세팅 공법에 비해 낮은 값을 유지하고 있음을 알 수 있다. 각 공정에서의 성형하중은 Fig. 5에서 나타내고 있으며, 이로부터 업세팅 공법이 전방압출공법보다 상당히 높은 성형하중이 요구된다는 것을 알 수 있다. 이러한 해석결과를 Table 3에서 비교하였으며, 3가지 측면에서 모두 우수한 전방압출공정을 채택하였다.

Table 4 Comparison of FE simulation results for two processes

Items	Forward Ext.	Upsetting
Forming Load	603ton	735ton
Effective strain near the back tapered tooth(max)	1.55	2.48
Damage value near the back tapered tooth(max)	0.271	0.313

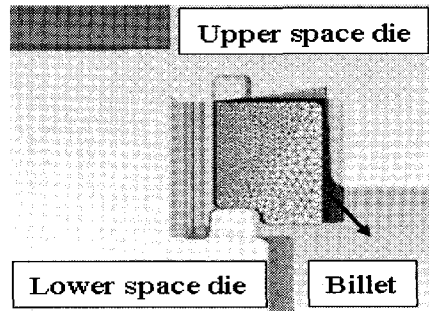


Fig. 3(a) Initial setup for simulation of upsetting process

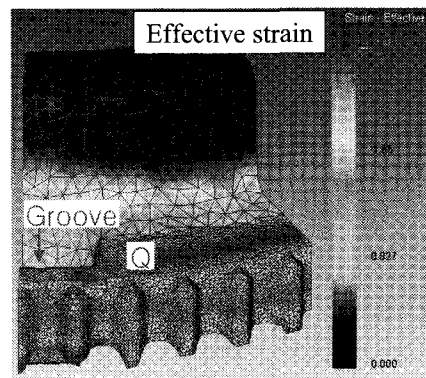


Fig. 3(b) Effective strain of final stage of upsetting process

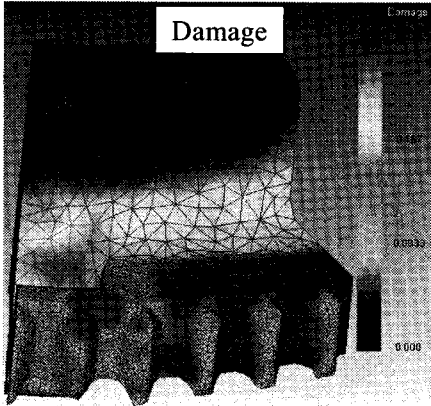


Fig. 3(c) Damage of final stage of upsetting process

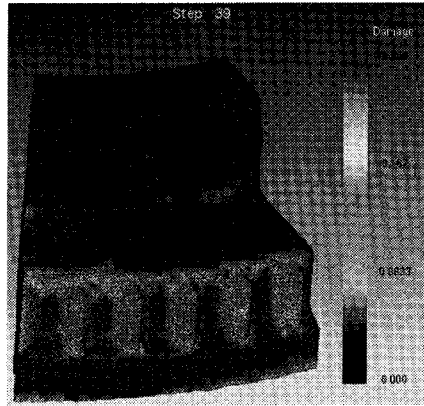


Fig. 4(c) Damage of final stage of forward extrusion process

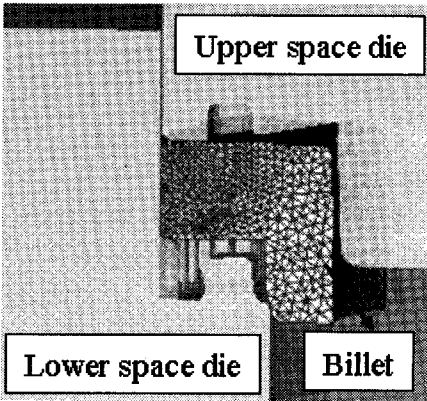


Fig. 4(a) Initial setup for simulation of forward extrusion process

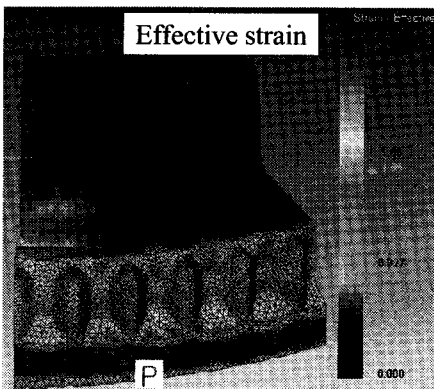


Fig. 4(b) Effective strain of final stage of forward extrusion process

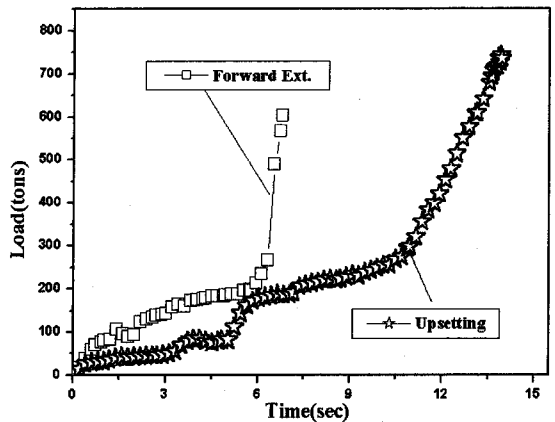


Fig. 5 Comparison of forming load of upsetting and extrusion process

### 3. 성형성 향상

클러치 기어와 같은 기어류의 경우, 치부에서의 국부적 변형이 대단히 심하기 때문에 단조성형 시의 결함을 피하기 위해 구상화 열처리를 행하는 것이 일반적이며, 이러한 구상화 열처리의 효율을 높이기 위해 노르말라이징 열처리를 선행하게 된다. 잘 알려진 바와 같이 이러한 열처리의 경우, 온도와 시간에 따라 그 결과가 대단히 큰 차이를 보인다. 따라서 본 연구에서는 냉간단조 성형성 향상을 위한 열처리 사이클을 개발하고자 하였다.

### 3.1 열처리 실험

#### 3.1.1 노르말라이징 열처리

일반적으로 노르말라이징 열처리의 경우, Fe-Fe<sub>3</sub>C상태도에서 상부임계선(Upper critical line)보다 약 55℃정도 높은 온도에서 행해지며, SCM420 강에 대한 노르말라이징 온도는 925℃ 전후이다.<sup>10</sup> 노르말라이징의 경우, 가열부분에서 균질한 오스테나이트상을 만드는 것이 중요하기 때문에 충분한 유지시간이 필요하다. 냉각은 서냉에 의한 입자조대화 급냉에 의한 마르텐사이트 조직의 생성을 막기 위해 공랭(Air cooling)방식을 취하였다. 이러한 사실을 바탕으로 두 가지 노르말라이징 열처리 사이클을 택하였으며, 이를 Fig. 6에 나타내었다.

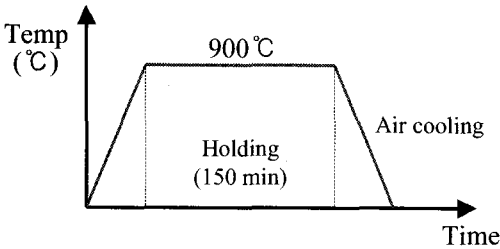


Fig. 6(a) Candidate of normalizing heat treatment cycle (I)

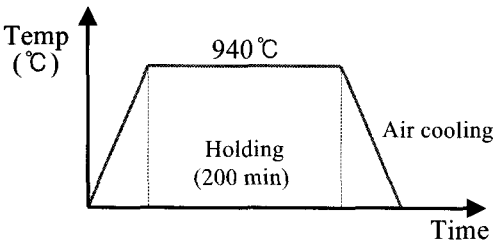


Fig. 6(b) Candidate of normalizing heat treatment cycle (II)

#### 3.1.2 구상화 열처리

구상화 열처리는 입자의 형태를 구형으로 만들어 냉간 단조시 유동응력(Flow stress)을 감소시킴으로써 냉간단조성을 향상시키는 것으로 일반적으로 평형온도(Equilibrium temperature ; A<sub>e1</sub>)보다 높은 온도로 가열하였다가 노내에서 서냉하거나 평형온도 이하에서 장시간 유지하는 것이다. 이러한 개념을 바탕으로 세 가지 구상화 열처리 사이클을 택하

였으며, 이를 Fig. 7에 나타내었다.

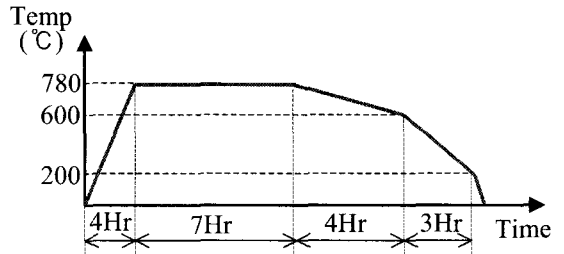


Fig. 7(a) Candidate of spheroidizing heat treatment cycle (I)

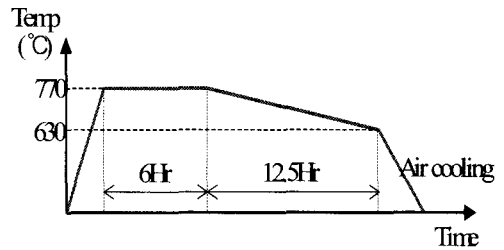


Fig. 7(b) Candidate of spheroidizing heat treatment cycle (II)

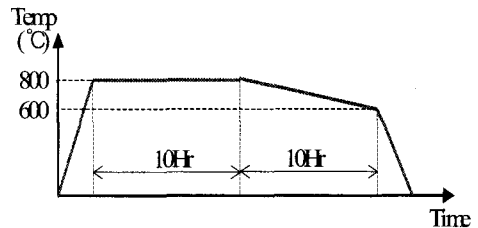


Fig. 7(c) Candidate of spheroidizing heat treatment cycle (III)

### 3.2 성형성 평가

앞에서의 노르말라이징 열처리와 구상화열처리를 조합하여 총 6가지 열처리 방식(Table 4)을 택하였으며, 각각의 열처리 방식이 적용된 인장시험편(ASTM E8M)의 인장시험을 통해 항복강도와 연신율(Elongation rate)을 측정하였다. 각 경우에 있어서의 항복강도(YS), 극한인장강도(UTS) 및 연신율(Elongation)값을 Table 5와 Fig. 8에 나타내었으며, 결과로부터 알 수 있듯 case ④와 case ⑤의 경우가 가장 낮은 유동응력값과 높은 연신율값을 나타내고

있다는 것을 알 수 있다.

Table 5 Several candidates for heat treatment

Normallizing	Spheroidizing	Symbol
I	I	case ①
	II	case ⑥
	III	case ③
II	I	case ⑤
	II	case ④
	III	case ②

Table 6 Mechanical properties of all cases

	YS (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)
case ①	709	821	40.7
case ②	656	750	42.3
case ③	583	702	40
case ④	669	585	45.9
case ⑤	610	720	44.8
case ⑥	577	697	37.8

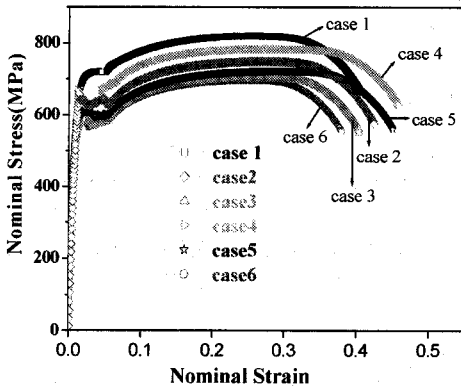


Fig. 8 Flow stress of all cases

### 3.3 조직 사진 분석

각 경우 열처리 후 시편의 광학현미경 사진을 통해 미세조직을 관찰하였다(Fig. 9). case ③과 case ⑥의 경우, 구상화열처리시 높은 온도와 오랜 유지 시간으로 인해 입자가 조대화되고, 탄화물(carbides)이 뭉쳐있는 것을 알 수 있다. 이로 인해 유동응력은 낮은 값을 보이나 연신율도 낮게 나타남을 Fig.

8에서 확인할 수 있다. case ④, case ⑤의 경우가 구상화가 가장 뛰어나며, case ⑤의 입자가 좀 더 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 case ⑤의 경우가 가장 우수한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

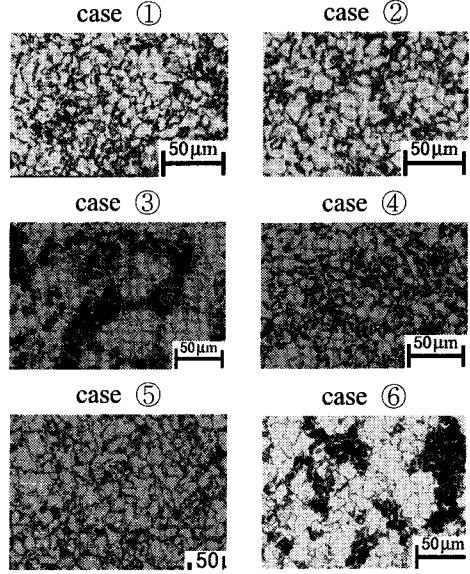


Fig. 9 Microstructure with each heat treatment

## 4. 시작품 제작 및 검사

### 4.1 시작품 제작

유한요소해석 결과를 바탕으로 단조 공정을 결정하였고, 열처리 실험결과를 기초로 최적의 열처리 조건을 결정하였으며, 이에 따라 클러치 기어 시작품을 Fig. 10과 같이 제작하였다. 열간단조공정에 의해 예비성형체(Preform)를 만들었고(a), 제 1 냉간단조 공정(전방압출)에서는 기어형상과 그루부를 만들고(b), 제 2냉간단조 공정(사이징 공정)에서 기어부에 역테이퍼(back taper)형상을 만들었다(c).

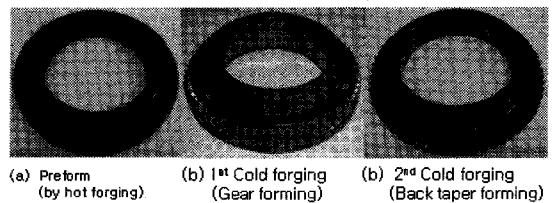


Fig. 10 Prototypes by proposed processes

### 4.2 시작품 검사

제작된 클러치 기어 시작품의 치수정밀도를 조사하기 위하여, 기어의 외경, 치형 각도, 치형형상 및 역테이퍼(Back taper)각도등을 검사하였다. Fig. 11에 검사할 세부항목 및 검사항목번호를 나타내었으며, Table 6에 검사결과를 나타내었다. 클러치 기어의 중요치수인 역테이퍼 각도, 치각도, 외경 및 내경 모두 검사규격을 만족시키는 결과를 얻고 있음을 확인 할 수 있다.

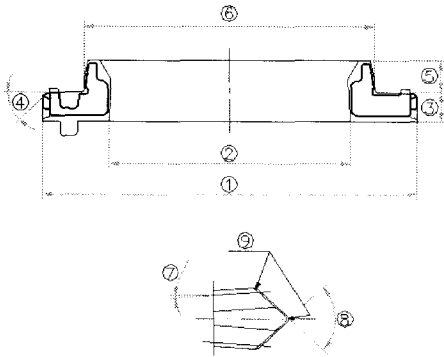


Fig. 11 Inspection items and Symbols

Table 7 Results of inspection

Symbol	Specification	Result	Remark
①	Ø102.2 +0.4 -0.2	Ø102.0	Outer Diameter
②	Ø65.5 +0.2 -0.5	Ø65	Inner Diameter
③	6.8 +0.1 0.0	6.9	Tooth thickness
④	4° ±2°	4°21'	Chamfer angle
⑤	Min 8.8	9.9	Height
⑥	Ø80.0 +0.4 -0.4	Ø79.7	Outer diameter
⑦	4° +50' +10'	4°21'	Back taper angle
⑧	84° ±1°30'	84°53'	Angle of tooth
⑨	Max 0.3	0.23	Unfilling

### 5. 결론

복합단조 공법에 의한 자동차 트랜스미션용 클러치기어의 개발에 관한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 클러치 기어 단조공법으로 업세팅 공정과 전방 압출 공정을 제안하고, 각 공법에 대한 3차원 유한요소해석 결과를 비교·검토함으로써 전방압출 공정을 선택할 수 있었다.
- 2) 냉간단조 소재의 성형성을 향상시키기 위한 노르말라이징, 구상화열처리 사이클을 제안하고, 제안된 각각의 사이클에 대해 연신율 및 미세조직 특성을 조사함으로써 최적의 열처리 사이클을 얻을 수 있었다.
- 3) 제안된 단조공정과 열처리 공정에 따라 클러치 기어 시제품을 제작하였으며, 제작된 시작품의 검사결과 모든 규격을 만족시키고 있음을 확인할 수 있었다.

### 참고문헌

1. Dean, T. A., "The net-shape forming of gears," Materials and Design, Vol.21, pp. 271-278, 2000.
2. Kang, M. S., Jeon, M. S., Kim, J. U., Kang, S. M. and Jeon, B. R., "Forging Simulation, Pulley-Type Forging, Compound Forging Process, Spring Attached Die, Rigid-Plastic Finite Element, Method," KSTP, Vol. 14, No. 1, pp. 66-71, 2003.
3. Onodera, S, Sawai, K. "Modern cold forging applications for the manufacture of complex automotive parts," J.Mater.Process.Technol, Vol.46, pp. 169-183, 1994.
4. Onodera, S., Sawai, K., "Current cold-forging techniques for the manufacture of complex precision near-net-shapes," J.Mater.Process.Technol, Vol.35, pp. 385-396, 1992.
5. Cho, H. Y., Min, G. S., Jo, C. Y. and Kim, M. H., "Process design of the cold forging of a billet by forward and backward extrusion," J.Mater.Process.Technol, Vol.135, pp. 375-381, 2003.
6. Behrens, B. -A., "Cold Sizing of Cold- and Hot

- Formed Gears," *Annals of the CIRP*, pp. 239-242, 2004.
7. Kim, H. K., Sunami, F. and YAMANAKA, M., "Computer Simulation and Tool Manufacturing Technology which support Net shape Manufacturing in Forging Industry," *J. Japan Society for Technology of Plasticity*, Vol. 41, No. 477, pp. 1014-1020, 2000.
  8. Li, G., Jinn, J. T., Wu, W. T. and Oh, S. I., "Recent development and applications of three-dimensional finite element modeling in bulk forming processes," *J.Mater.Process.Technol.*, Vol.113, pp. 40-45, 2001.
  9. Lee, S. M., Wnag, S. I., Kim, H. R. and Bae, W. B., "A Study on the Production of a Compressor Piston for an Automobile Air-Conditioner using Aluminum Casting/Forging," *J. of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol.17, No. 8, pp. 53 -59, 2000.
  10. ASM HANDBOOK, Vol. 4 Heat Treating