

온간압입공정에서 자동차 변속기 단품(축/기어) 치형 변화 예측에 관한 연구

김호윤*, 최창진**, 김철#, 배원병***

A Study on the Prediction of Teeth Deformation of the Automobile Transmission Part(Shaft/Gear) in Warm Shrink Fitting Process

Ho Yoon Kim*, Chang Jin Choi**, Chul Kim# and Won Byong Bae***

ABSTRACT

Fitting process carried out in automobile transmission assembly line is classified into three classes; heat fitting, press fitting, and their combined fitting. Heat fitting is a method that heats gear to a suitable range under the tempering temperature and squeezes it toward the outer diameter of shaft. Its stress depends on the yield strength of gear. Press fitting is a method that generally squeezes gear toward that of shaft at room temperature by press. Another method heats warmly gear and safely squeezes it toward that of shaft. Warm shrink fitting process for automobile transmission part is now gradually increased, but the parts (shaft/gear) assembled by this process produced dimensional changes of gear profile in both radial and circumferential directions. So that it may cause noise and vibration between gears. In order to solve these problems, we need an analysis of warm shrink fitting process, in which design parameters are involved; contact pressure according to fitting interference between outer diameter of shaft and inner diameter of gear, fitting temperature, and profile tolerance of gear.

In this study, an closed form equation to predict contact pressure and fitting load was proposed in order to develop optimization technique of warm shrink fitting process and verified its reliability through the experimental results measured in the field and FEM, that is, thermal-structural coupled field analysis. Actual loads measured in the field have a good agreement with the results obtained by theoretical and finite element analysis and also the expanded amounts of the gear profile in both radial and circumferential directions are within the limit tolerances used in the field.

Key Words : Warm Shrink Fitting Process(온간압입공정), Transmission(변속기), Contact Pressure(접촉면압), Fitting Load(압입하중), Interference(압입공차량), FEM(유한요소해석),

접수일: 2006년 4월 20일; 게재승인일: 2006년 7월 18일

* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

** 부산대학교 기계공학과 대학원

교신저자: 부산대학교 기계기술연구소

E-mail chulki@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-2489

*** 부산대학교 기계공학부

1. 서론

자동차 변속기는 엔진에서 발생하는 동력을 속도에 따라 회전력으로 전환하여 전달하는 장치이다. 자동차 주행 시 속도 변화에 따라 토크나 회전속도가 변화하게 되는데, 이때 엔진의 회전을 일정하게 유지하기 위하여 기어를 사용한다. 이렇게 변속기에 사용되는 4~5 개의 기어는 축에 체결이 되어 있으며, 최근 그 체결방법으로 축과 기어 사이에 일정량의 공차를 두고, 기어를 압입온도까지 가열하여 축에 강제로 삽입하는 온간압입공정(Warm Shrink Fitting)의 사용이 점차 증가하고 있다.

압입공정을 이용한 조립방법은 기어와 축과 같은 단품의 치수 공차가 매우 정밀해야 하며, 단품의 압입 온도 및 가열 시간 등 공정조건이 까다로우를 뿐만 아니라, 조립 후 기어의 팽창량과 치형의 변화, 그리고 압입공정에 의해 발생하는 기어와 축간의 체결력 등 제품의 품질을 정확히 예측하기가 어렵다. 최근까지 수행된 자동차용 변속기에 관한 연구는 대부분 변속기 자체의 성능 향상이나 메커니즘에 관한 것^{1,2}으로, 변속기의 제작이나 단품(축/기어)의 조립 공정에 관한 연구는 거의 없는 실정이며, 압입공정에 관한 연구 역시 대부분 금형 설계에 제한되어 있다.^{3,4}

자동차 변속기 단품(축/기어)의 압입공정은 약 200℃에서 수행되므로 압입온도에 의한 팽창과 압입공차량으로 인한 기어의 팽창이 발생한 후, 압입 후 냉각공정에 의한 수축이 발생한다. 이러한 과정을 통해 기어의 형상은 최종 조립 후 다소 변하게 되며, 이는 기어의 소음과 진동을 증가시키고 마모에 의한 결함을 발생시킬 수 있다. 이에 본 연구에서는 자동차 변속기 단품(축/기어)의 온간압입공정에 대한 축 외경과 기어 내경 사이의 압입공차량에 따른 접촉압력을 이론적으로 구한 후, 자동차 변속기 단품(축/기어)의 치형 변화를 예측 및 분석하여 최적설계를 위한 기초 데이터를 확립하고자 하였다. 이를 위하여 기어팽창량에 대한 3 차원 유한요소해석을 수행하여 이론적으로 구한 접촉압력 값을 검증하고, 또한 현장에서 확보한 기어치형의 반경방향 변위와 비교하였으며 원주방향 변위에 대한 분석도 이루어졌다.

2. 이론적 해석

2.1 접촉면압 및 압입공차량 관계식

본 연구에서는 변속기 단품(축/기어)의 접촉면압을 계산하기 위하여 Lamé 방정식을 이용하여 Fig. 1로부터 식 (1)을 유도하였다.⁵

압입공정을 수행하면 Fig. 1(a)로부터 Fig. 1(b)와 같이 접촉면압이 발생한 축과 기어^{6,7}의 두 부분으로 분할 할 수 있다. Fig. 1(b)에서 P_i 와 r_1 을 0으로 두면 접촉면압이 발생한 중실봉 축이 되고, P_o 를 0으로 두면 접촉면압이 발생한 기어의 형상이 된다. 따라서 두 경우를 조합하여 수식을 전개 및 정리하면 식 (2)와 같이 접촉면압과 공차량의 관계를 유도할 수 있다.

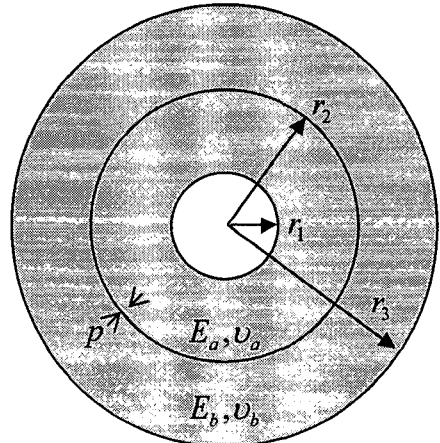


Fig. 1(a) Contact pressure acting equal on both gear and shaft by shrink fitting process

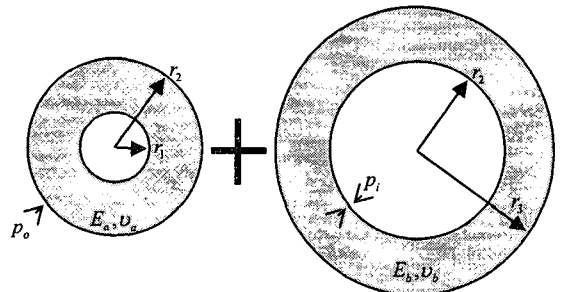


Fig. 1(b) Free body diagram for shaft and gear

식 (2)의 첫 번째 항은 압입에 의해 축에서 발생하는 변위를 나타내며, 두 번째 항은 기어에서 발생하는 변위를 나타내므로, 이 두 항의 합인 δ_{SF} 는 실제 압입공차량과 같다.

$$u = \frac{1-\nu}{E} \frac{r_1^2 p_i - r_2^2 p_o}{r_2^2 - r_1^2} r + \frac{1+\nu}{E} \frac{r_1^2 r_2^2 (p_i - p_o)}{r_2^2 - r_1^2} \frac{1}{r} \quad (1)$$

$$\delta_{SF} = \frac{r_2^2 p_o r}{E_a (r_2^2 - r_1^2)} \left[(1-\nu_a) + (1+\nu_a) \frac{r_2^2}{r^2} \right] + \frac{r_1^2 p_i r}{E_b (r_3^2 - r_2^2)} \left[(1-\nu_b) + (1+\nu_b) \frac{r_3^2}{r^2} \right] \quad (2)$$

여기서 p_i 와 p_o 는 접촉면압(p)으로 동일하며, 단품(축/기어)의 소재가 동일할 경우, E_a 와 E_b , ν_a 와 ν_b 가 같다. 또 r_2 와 r_3 를 반경상수(k)로 바꾸면 식(2)는 식(3)과 같이 된다.

$$\delta_{SF} = \frac{2r_2 k^2}{E(k^2 - 1)} p \quad (3)$$

기어와 축의 소재가 동일할 경우에는 식(3)을, 상이할 경우에는 식(2)를 적용하여, 압입공정에서 압입공차와 접촉면압을 계산할 수 있다.

3. 유한요소해석을 위한 공정 분할

자동차 변속기용 단품(축/기어)은 압입온도까지 가열한 기어를 축에 삽입하여 조립하는 공정으로 다음과 같이 네 가지 공정으로 분할할 수 있다. 자동차 변속기 단품의 온간압입공정은 가공된 기어를 저주파 가열로에서 압입온도까지 가열하는 가열공정(Heating Process), 가열시간 경과 후 기어를 자동적으로 축에 위치시키는 포지셔닝 공정(Positioning Process), 프레스에서 기어를 축에 삽입시키는 압입공정(Shrink Fitting Process), 후속 기어의 조립 직전까지 냉각되는 냉각공정(Cooling Process)의 네 공정으로 분할하였다.

3.1 가열공정(Heating Process)

가공된 각각의 단품 기어는 Fig. 2에서 보여주는 저주파 유도가열로에서 적정 예열온도까지 가열된다. 이를 유한요소법으로 해석하기 위하여 분위기 온도를 압입온도로 설정하여 대류경계조건을 주었으며, 기어와 지지대 사이의 국부 전도는 무시

하였다. 유한요소해석은 가열하는 동안의 열 해석과 그 결과를 구조해석으로 연결시키는 열-구조연성해석(Thermal-Structural Coupled Field Analysis) 기법을 사용하였다.

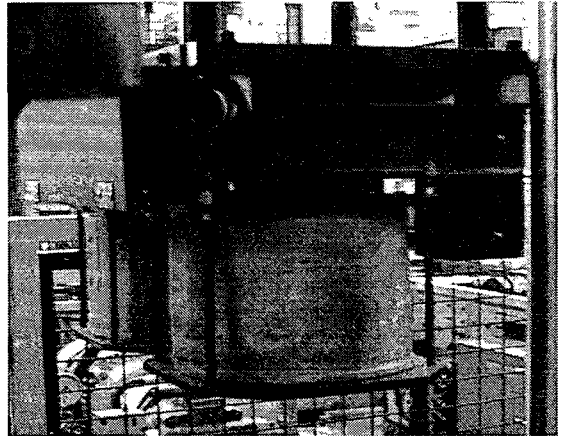


Fig. 2 Low frequency induction furnace used on heating process

3.2 포지셔닝 공정(Positioning Process)

저주파 가열로에서 압입온도까지 가열된 기어는 자동화 장비에 의해 컨베이어 벨트 위의 축까지 옮겨진다. 이때 기어와 자동화 장비 사이의 국부 전도, 기어와 대기 사이의 대류, 압입직전까지의 기어와 축 사이의 전도 등 복잡한 열전달 현상이 발생한다. 그러나 포지셔닝 공정은 별도로 해석하지 않고, 현장에서 획득한 데이터를 이용하여 공정 중 발생하는 냉각량을 고려하여 가열공정에 대한 해석을 수행하는 것으로 그 적용을 대신하였다.

저주파 유도가열로의 가열온도는 200℃이나, 포지셔닝 공정 중 대기와의 대류현상에 의해 순간적으로 기어의 냉각현상이 발생한다. 적외선 온도계를 이용하여 압입공정 직전의 기어 온도를 측정 한 결과 약 180℃로 나타났으며, 본 연구에서는 '3.2 포지셔닝 공정'에 대한 해석을 별도로 수행하지 않고 기어의 가열온도와 압입온도를 180℃로 적용하여 해석을 수행하였다.

3.3 압입공정(Shrink Fitting Process)

축에 기어가 위치하면 압입장비의 램이 하강하면서 순간적으로 성형이 이루어진다. 0.5 초 정도의 순간적인 공정이므로 이때 발생하는 기어

축사이의 전도, 기어 및 축과 대기 사이의 대류 등 모든 열전달 현상은 무시하였다.

Fig. 3 은 압입공정을 수행하는 장치와 공정 중 발생하는 변위 하중 선도를 나타내는 인디케이터의 사진을 보여준다.

3.4 냉각공정(Cooling Process)

압입공정이 끝나면 다음 기어를 압입하기 위하여 컨베이어 벨트가 이동하고, 이때 상온까지 기어와 축이 냉각된다. 열간압입공정 중, 가열과 냉각 공정에서의 치형의 절대변화량은 거의 같고, 또한 냉각공정에서 원주방향의 치형변화량은 압입공정에서의 원주방향의 치형 변화량에 비하여 매우 작다. 본 연구에서는 자동차 변속기 단품(축/기어)의 조립 후 치형 변화에 가장 영향을 끼치는 압입공정에 대한 최적화에 초점을 두고 있어 냉각 공정에 대한 해석은 수행하지 않았다.

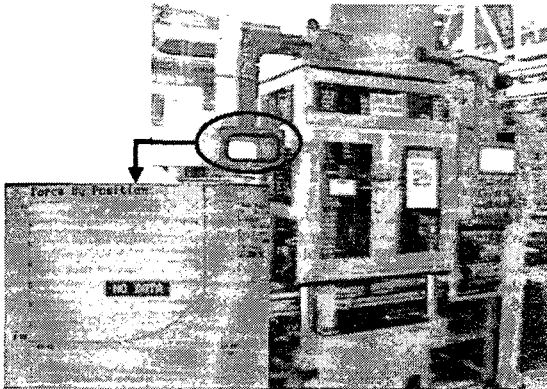


Fig. 3 Manufacturing equipment with indicator displaying

4. 3 차원 유한요소해석

4.1 3 차원 모델링

본 연구에 사용된 제품은 현재 1,500 ~ 2,000cc 급 승용차에 적용되는 변속기로, 총 5 종의 기어 중 3, 4, 5 단의 3 종이 온간압입공정을 통하여 제작된다. 그 중 3 단 기어의 형상은 Fig. 4 와 같으며, 기어가 삽입되는 축의 직경은 30mm 이고 압입공차량은 0.094 ~ 0.083mm 이다. 이때 기어 변형량의 최대값을 구하기 위하여 압입공차량은 0.094mm 를 적용하였다.

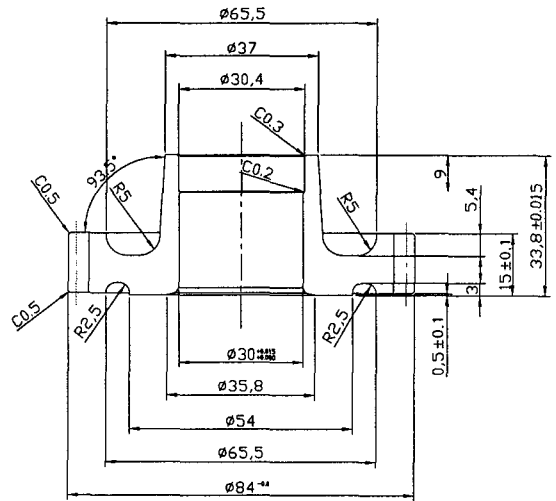
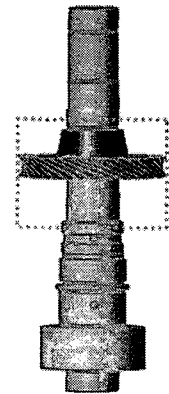


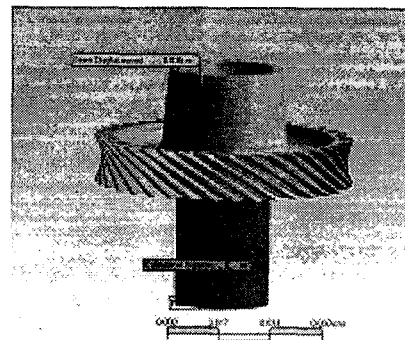
Fig. 4 A 3rd gear sample to be used in analysis



(a) Assembled Parts



(b) 3D modeling



(c) Simplified 3D model

Fig. 5 3D model of 3rd gear for FEM analysis

Table 1 Primary specification of 3rd gear used in FEM analysis

| | |
|-----------------------|---------|
| Material | SCR420H |
| Module | 1.77 |
| Pressure angle | 17.00 |
| No. of teeth | 36 |
| Helical Angle | 36.20 |
| Amount of Dislocation | -0.2488 |

기어와 축이 조립된 상태는 Fig. 5(a)와 같으며, 이를 모델링한 것은 Fig. 5(b)에 나타내었으며, Fig. 5(c)에서는 해석에 필요한 부분만 간략하게 나타내었다. 또한 유한요소해석에 필요한 축 및 기어의 치수와 소재의 기계적 성질 등의 각종 데이터는 Fig. 4 와 기어의 재질로부터 알 수 있는데 이를 Table 1 에 나타내었다.

4.2 유한요소해석

유한요소해석에 사용된 프로그램은 열, 구조, 진동 등 많은 분야에서 사용되고 있는 범용 패키지인 ANSYS Workbench 9.0 이다. 3 차원 유한요소해석을 통하여 현장에서 확보한 치형의 반경방향 변위와 비교하였고 원주방향 변위에 대한 분석도 수행하였다.

4.2.1 가열공정(Heating Process)

기어의 가열공정은 저주파 가열로에서 기어 주위에 가열온도(180℃)만큼의 온도를 가진 대기로부터 기어 표면 사이에서 대류가 발생한 후, 표면의 온도가 기어 내부로 전도되는 과정으로 해석하였다. 이때 기어 표면의 각 노드에 저장된 온도 정보로부터 구조해석을 수행하여 기어 팽창량을 구하였다.

자동차 변속기용 단품(축/기어)의 가열공정을 열-구조 연성해석기법을 이용하여 치형의 반경방향 및 원주방향에 대하여 해석한 결과를 Fig. 6 과 Fig. 7 에 나타내었다.

가열 공정에서 발생하는 치형의 원주방향 변형량은 약 0.193 μm로, 반경방향 변형량의 약 0.03%에 해당된다. 또한 치형의 반경방향 변형량은 이뿌리

원과 이끝원에서 각각 20.2 μm와 56.6 μm로, 이끝원에서 더 많은 변형이 있음을 알 수 있다.

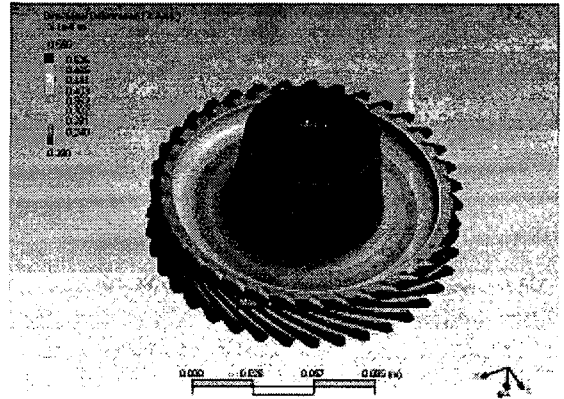


Fig. 6 Radial displacement obtained from FEM simulation for the 3rd gear in case of maximum interference on heating process

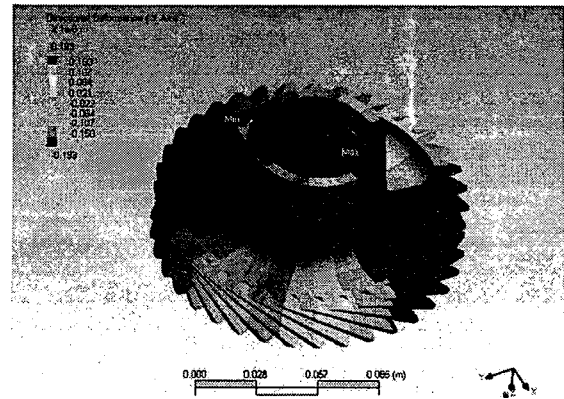


Fig. 7 Circumferential displacement obtained from FEM simulation for the 3rd gear in case of maximum interference

4.2.2 압입공정(Shrink Fitting Process)

저주파 가열로에서 팽창된 기어를 축에 강제압입시키는 과정에서도 기어 및 축과 대기 사이에 열전달 현상이 발생하는데, 기어에서 축으로 발생하는 전도와 기어에서 대기로 발생하는 대류와 같은 열전달 현상이 일어난다.

기어가 축의 상부에서 조립되는 지점까지 프레스로 강제압입되는 과정에서, 기어의 내경과 축

의 외경이 접촉하면서 열전도 현상이 발생하고, 이때 각 단계별 열 및 구조해석결과가 두 가지 해석솔버(solver)로 입력되어 다음 단계의 열 또는 구조해석을 수행한다. 또한 표면에서의 자연대류현상 역시 동일한 방법으로 연성해석을 수행하였다.

해석한 결과를 Fig. 8 과 Fig. 9 에 나타내었으며, 치형의 반경방향 변형량은 이뿌리원과 이끝원에서 각각 6.60 μm 와 2.26 μm 임을 Fig. 8 로부터 알 수 있다.

Table 2 Comparison between maximum circumferential displacements of 3rd gear

| | |
|------------------------|---------------------|
| Heating Process | 0.193 μm |
| Shrink Fitting Process | 2.610 μm |

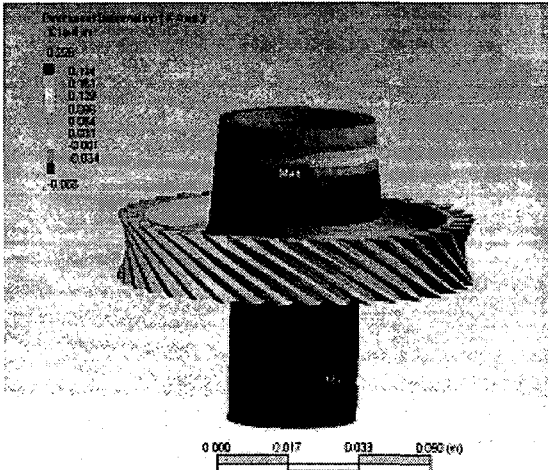


Fig. 8 Radial displacement obtained from FEM simulation for 3rd gear in case of maximum interference on shrink fitting process

압입공정에서 발생하는 원주방향 변형량은 Fig. 9 에 나타내었고, 가열공정에서 발생하는 원주방향 변형량과 비교하여 Table 2 에 나타내었다.

압입공정에서 발생하는 원주방향의 변형량은 가열공정에서의 원주방향 변형량보다 약 13 배에 이를 정도로 크게 나타났다. 따라서 가열 또는 냉각 공정에서 발생하는 원주방향 팽창량은 압입공정에서 발생하는 원주방향 팽창량에 대해 무시 할만 하여, 실제 자동차 변속기 단품(축/기어)에서 발생하는 원주방향 팽창량은 대부분 압입공정에서 발생함을 알 수 있다.

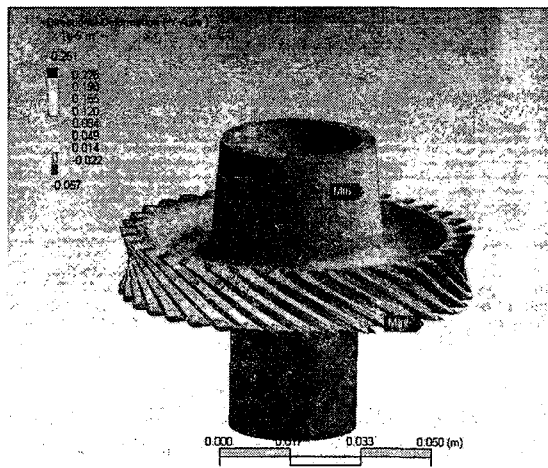


Fig. 9 Circumferential displacement obtained from FEM simulation for 3rd gear in case of maximum interference on shrink fitting process

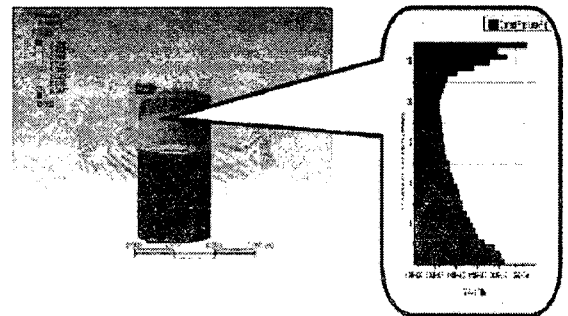


Fig. 10 Contact pressure obtained from FEM simulation for 3rd gear in case of maximum interference on shrink fitting process

Table 3 Comparison of the mean contact pressure between FEM and theoretical analysis

| | Mean Contact Pressure |
|----------------------|-------------------------|
| FEM Analysis | 11.20 kgf/mm^2 |
| Theoretical Analysis | 17.54 kgf/mm^2 |

‘4.2.1 가열공정’의 결과를 이용하여 압입공정을

또한 3 차원 유한요소해석을 통하여 얻은 접촉면압의 분포는 Fig. 10 에 나타내었고, 축 외경과 기어 내경 사이의 압입공차량에 따른 이론적인 접촉압력과 유한요소해석에 의한 평균접촉면압을 Table 3 에 나타내었다.

Table 3 에서 보여준 것처럼 3 차원 유한요소해석의 결과는 이론적인 해석의 결과에 비하여 다소 낮게 나타나는데, 이는 식 (3)을 유도하는 과정에서 Fig. 5 와 같은 실제 형상이 아닌 직사각형 단면을 가정하였기 때문이다. 따라서 현장에서 적용할 경우에는 식 (3)에 단면적 차이를 고려할 수 있는 적절한 보정계수가 필요하며, 자동차 변속기 단품의 열간압입공정에서는 0.6 ~ 0.7 을 적용하는 것이 타당할 것으로 여겨진다.

자동차용 변속기 단품(축/기어)의 전 공정에 대한 유한요소해석의 수행 결과를 Table 4 에 나타내었다. 수행된 결과는 최종공정에서 반경방향으로 8.6 μm 와 원주방향으로 1.32 μm 의 치형 변화가 발생하였으며 이는 현장에서 적용하고 있는 각각의 치형 허용한계치인 9.0 μm 나 5.0 μm 보다 작으므로 적절한 공차량으로 온간압입공정이 이루어짐을 알 수 있다.

Table 4 The Result of displacements of the 3rd gear in the full process(Unit: μm)

| | Radial Disp. | Circum. Disp. |
|-------------------|--------------|---------------|
| Heating Process | 56.54 | -0.19 |
| Fitting Process | 11.48 | 1.32 |
| Cooling Process | -59.42 | 0.19 |
| Final Deformation | 8.60 | 1.32 |
| Limited Allowance | 9.00 | 5.00 |

5. 결론

자동차 변속기 단품(축/기어)에 대한 온간압입 공정에서 발생하는 기어 치형 변형량을 예측하기 위하여 3 차원 유한요소해석을 수행하였다.

1. ANSYS Workbench 9.0 을 이용하여 온간압입공정에 대한 3 차원 유한요소해석기법을 개발하였다.

2. 접촉면압계산을 위하여 제안된 이론식은 유한요소 해석결과와 비교적 잘 일치하였다.

3. 개발된 유한요소해석기법을 사용한 결과, 현재 현장에서 자동차용 변속기 단품(축/기어)에 적용되고 있는 공차량과 가열온도는 적절함을 알 수 있다.

4. 본 연구의 결과는 자동차 변속기 단품(축/기어) 및 유사 제품에 대한 설계 시에 시행착오를 감소함으로써 시간과 비용을 절감할 수 있다.

참고문헌

1. Sung, D. H. and Kim, H. S., "A Study on 3 Shaft Hydromechanical Transmission Design Considering Power and Speed Characteristics," *J. of KSME*, Vol. 26, No. 12, pp. 2615-2623, 2002.
2. Choi, S. H. and Kim, Y. S., "Characteristics on the Output Coupled Type CVT combined Differential Gear Unit," *J. of KSPE*, Vol. 18, No. 3, pp. 205-215, 2001.
3. Yoh, E. G. and Lee, Y. S., "Integrated Analysis for the Shrink-fitted Die with Multi Stress-Ring of Dissimilar Materials," *J. of KSPE*, Vol. 18, No. 3, pp. 40-46, 2001.
4. An, S. C. and Im, Y. T., "Optimal Design of Dimension of Extrusion Die with Multi Stress Rings," *J. of KSME*, Vol. 26, No. 10, pp. 2211-2218, 2002.
5. Ugural, A. C. and Fenster, S. K., "Advanced Strength and Applied Elasticity," Elsevier North Holland, Inc., pp. 234-244, 1981.
6. Kurt, L., "Handbook of Metal Forming," McGraw-Hill Book Company, pp. 13.1-16.66, 1985.
7. Laue, K. and Stenger, H., "Extrusion," American Society for Metals, pp. 356-363, 1981.