

# 주행 감속기 기어 캐리어의 위상 최적설계에 관한 연구 A Study On Topology Optimization of the Traveling Decelerator Gear Carrier

\*김민규<sup>1</sup>, 이상훈<sup>2</sup>, 정일중<sup>2</sup>, 최희식<sup>3</sup>, 권영돈<sup>3</sup>, 편영식<sup>4</sup>, #이석순<sup>5</sup>

\*M. G. Kim<sup>1</sup>, S. H. Lee<sup>2</sup>, I. J. Jeong<sup>2</sup>, H. S. Choi<sup>3</sup>, Y. D. Kwon<sup>3</sup>, Y. S. Pyoun<sup>4</sup>, #S. S. Lee(leess@gnu.ac.kr)<sup>5</sup>  
<sup>1,2</sup>경상대학교 대학원 기계공학과, <sup>3</sup>선진 정공, <sup>4</sup>선문대학교 기계공학부, <sup>5</sup>경상대학교 기계항공공학부

Key words : Finite Element Method(FEM), Topology Optimization

## 1. 서론

2000 년대에 이르러 고성능화된 컴퓨터와 함께 이를 이용한 유한요소 전산해석 Software 가 개발되고 고도성장을 이루었다. 이로 인해서 복잡한 형상을 지니는 기계 부품이나 구조물의 FEA(Finite Element Analysis)기술과 함께 최적설계 이론을 적용한 연구가 다양한 산업분야에서 활발하게 진행되고 있다. 이러한 최적설계는 자동차 등의 일반 기계 부품 뿐만 아니라 선박, 항공 우주 산업 등과 같은 수송기계 산업에서 추구하는 구조 경량화 추세로 인해 보다 적은 무게를 가지면서 부여된 하중이나 경계조건 등을 만족할 수 있는 구조물의 최적 구조설계에 대한 관심이 높아 매우 활발한 연구가 진행되고 있다. 즉 이러한 부품의 무게를 줄임으로써 제품의 생산 원가 절감 효과 및 항공기나 자동차의 전체 무게 감량으로 같은 연료에서 보다 높은 효율을 얻고, 이로 인해서 운행비 절감 등의 효과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 주행 감속기의 운행중에 기어 Carrier 1, 2, 3 및 Housing 에 하중이 가해질 경우 Carrier 및 Housing 이 받는 구조적인 안전성을 검토한 후, 충분한 강성을 가지면서 제품의 무게를 줄일 수 있는 최적설계에 관한 연구를 수행하였다.

## 2. 위상 최적화 기본 이론

위상 최적화의 기법 중 균질화법은 대표적인 이론이다. 일정주기의 미시구조를 지니는 재료의 등가 재료 상수를 예측하여 재료의 분포설계를 이용한 최적의 위상을 찾아내는 방법이 균질화법이다. 균질화법이란 구조물의 치수(Size), 형상(Shape), 위상(Topology)문제를 포함하는 일반적인 최적 구조 설계법을 일컫는다. 적용방법은 설계영역에 무수히 많은 미세 구멍을 분포시켜 구조물을 생성하는 것이다. 즉 최적 설계문제를 최적 재료분포문제로 만들어 해결한다. 균질화법을 이용한 위상 최적화의 목표는 주어진 경계조건 내에서 구조물이 가장 경량화 되고, 충분한 강성을 가지게 하는 것을 목표로 한다. 이러한 방법은 응력집중과 같은 구조물의 국부적인 취약성을 고려하지 못한다. 하지만 국부적 변형은 결함(내부 균열)이나 집중 하중 등에 의해서 결정되므로 초기 개념 설계에서는 일반적으로 고려되지 않는다. 개념설계는 대개 구조물이 전체적으로 가장 강한 구조물의 위상을 갖도록 하는 것이 일반적인데, 이러한 위상을 가지는 구조물은 하중조건에 따라 나타나는 변형이 최소가 되거나 또는 강성이 강하고 굴성이 최소가 되는 구조물이다. 다시 말하면 주어진 하중조건에 대해서 구조물의 컴플라이언스(Compliance)가 최소가 됨을 말한다. 컴플라이언스는 굴성이라고도 표현하는데 휨과 변형력의 비로 표시하는 물질 상수를 일컫는다. 즉 물질이 변형하기 쉬운 정도를 나타내는 양을 의미한다. 컴플라이언스를 최소화 하는 것은 탄성체에 물체력과 표면력이 작용한 경우 최소한으로 변형하는 구조를 구하는 것이기 때문에 강성의 최대화 같은 의미를 지닌다고 할 수 있다. 구조물이 지니는 컴

플라이언스 지수는 다음의 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 그리고 식 (2)에는 각각의 경우에 대한 컴플라이언스를 구하는 식을 나타내었다.

$$Minimize S = \sum_{i=1}^n W_i C_i + NF \frac{\sum_{j=1}^m (\frac{W_j}{\lambda_j})}{\sum_{j=1}^m W_j} \quad (1)$$

$$C_i = \frac{1}{2} U^T K_i U_i = \frac{1}{2} F_i^T U_i \quad (2)$$

위상 최적화는 일반적으로 재료밀도라고 불리는 설계 변수를 최적화를 위한 설계 변수로 사용한다. 재료밀도는 크기나 형상 최적화에서 사용되는 구조물의 좌표와 두께 등을 설계변수로 사용하는 것이 아니라 다공성 물질내에 존재하는 빈 공간의 크기를 최적화의 변수로 사용하는 것으로 정의할 수 있다.

$$\rho_{MAX} = 1 - (1-a)(1-b)(1-c) \quad (3)$$

그리고 솔리드 요소에 대한 재료 밀도는 식 (3)에서 얻을 수 있다. 식 (3)은 최적화 과정에서 변화되면 컴플라이언스 지수가 최소화 될 때 수렴하게 된다.

## 3. 유한요소 해석 결과

사용된 재질에 대한 정보를 Table 1 에 나타내었다. 3D 형상 모델링은 CATIA, 유한요소생성은 HyperMesh 를 사용하였으며, ABAQUS 에서 기 수행한 유한요소해석의 결과 Carrier 1, 2, 3 및 Housing 최대 응력은 각각 232.1MPa, 290.2MPa, 327.3MPa, 748.3MPa 로 재료의 항복응력을 넘지 않는 것으로 나타나 안전한 것으로 판단 되었다.

## 4. 위상 최적화 경계조건 부여

위상최적화를 수행하기 위해서는 최적화 설계 프로그램인 Optistruct 의 해석 결과 파일이 필요하다. 해석을 위해 적용된 경계조건은 유한요소 해석 시 적용 하였던 조건과 동일하게 적용된다.

Optistruct 해석 후 위상 최적화를 위한 구속조건으로 일반적인 재료의 허용응력인 항복응력의 1/2 을 설계영역에 적용하였으며, 목적함수로는 재료의 볼륨을 최저로 가져가도록 설정하였다.

Table 1. Material Properties of Carriers and Housing

Material	Young's Modulus (MPa)	Poisson's ratio	Yield Strength (MPa)	Density (Kg/m <sup>3</sup> )	Part
SM45C	205,000	0.29	505	7850	Carrier1,2
FCD600	170,000	0.275	420	7200	Carrier 3
SCM440	205,000	0.29	830	7850	Housing

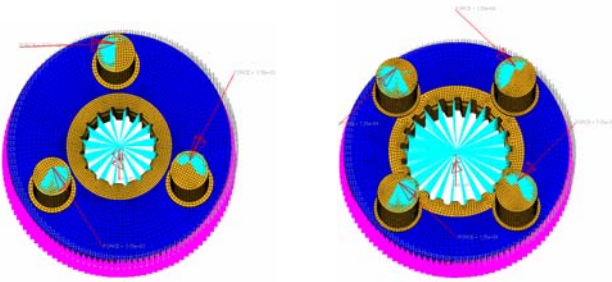


Fig. 1 Design, Non-design domain and Constraint condition for Carrier 1(left), 2(right)

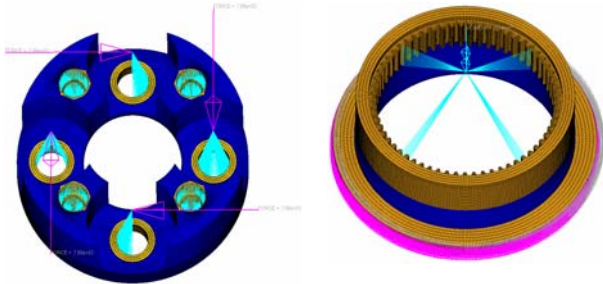


Fig. 2 Design, Non-design domain and Constraint condition for Carrier 3(left), Housing(right)

5. 설계 및 비설계 영역 정의

위상 최적화를 수행하는 동안 재료 밀도의 변화가 없는 부위는 따로 정의해 주어야 한다. 즉 비설계 영역(Non-Design domain)을 의미하는 것으로서 위상 최적화를 위해서 실시한 유한 요소 해석시에는 적용이 되지만 위상 최적화를 수행할 시에는 설계 변수에 의한 형상의 변화가 없는 영역을 의미한다. 그 반대의 의미의 영역이 설계 영역(Design domain)이다. 즉 위상 최적화를 통하여 최적의 재료밀도를 산출하고 최적의 위상을 가질 수 있도록 형상을 변화 시키는 영역을 의미한다. Fig. 1, Fig. 2 는 Carrier 및 Housing 의 구속조건을 포함하여, 파란색으로 표현된 설계 및 주황색으로 표현된 비설계 영역을 적용한 그림을 나타낸다. 비설계 영역으로 지정된 곳은 주로 다른 부품과의 조립으로 인해 설계 변경이 이루어지기 어려운 부분이다.

6. 위상 최적화 설계 결과

각 경우에 대한 위상 최적화 해석 결과를 Fig. 3, Fig. 4 에 각각 나타내었다.

형상의 제작을 고려하여 Optistruct 의 Pattern grouping 기능을 이용하여 정형화된 형상을 찾고자 하였는데 결과를 볼 때 응력이 적게 나타나는 부위의 재료가 많이 제거되었음을 알 수 있다. 빨간색으로 표시된 부분이 Density 가 1 로써 설계 변경이 불가능한 부분을 의미하며, 파란색으로 표시된 부분은 최적형상을 위해 제거 가능한 부분이다.

Carrier 1, 2 번의 경우 Density 가 가운데 Sun gear 와 조립이 이루어 지는 부분을 중심으로 Planet gear 와 연결되는 부위에 원형으로 분포되어 남아있다. Carrier 3 의 경우 거의 모든 부분에서 무게 감소가 생기고, Housing 은 몸체 중간 부위의 설계 영역에서 국부적인 감소가 발생하나, 가공 및 생산을 고려하면 Carrirer3 의 하중이 적용되는 부분과 Housing 의 몸체는 보존하는 것이 효율적일 것으로 보인다.

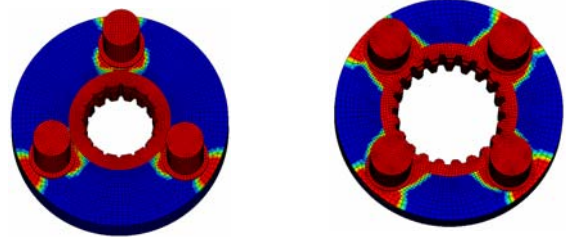


Fig. 3 A result of optimum design for Carrier 1(left), 2(right)

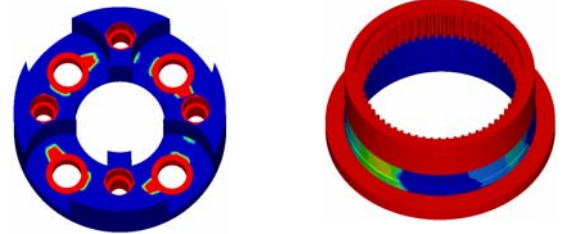


Fig. 4 A result of optimum design for Carrier 3(left), Housing(right))

Table 2 The result of frequency analysis for optimum shape

		Carrier 1	Carrier 2	Carrier 3	Housing
Initial	Hz	5.86	1.33	0.33	
	RPM	351.94	79.99	20	
1mode	Hz	3.41	2.52	49.44	2.27
	RPM	204.6	151.2	2966.4	136.2
7mode	Hz	60.44	28.96	206.11	17.11
	RPM	3626.4	1737.6	12366.6	1026.6

7. 최적 형상의 구조해석 및 진동해석

최적형상의 구조해석 결과 모든 경우에서 초기 모델의 응력 분포와 비슷하지만, 응력이 초기 모델보다 넓게 분포되었다. 최대 응력의 발생 위치는 초기 모델과 동일한 중심부의 Sun gear 와의 연결 부위에서 나타났으며 모든 경우에서 최대 응력 값은 재료의 항복응력을 초과하지 않기 때문에 최적형상이 구조적으로도 안전한 것으로 판단된다. 이렇게 최적화 과정을 통하여 재 생성된 모델의 무게 변화를 살펴 보면, 초기 Carrier 1, 2, 3 및 Housing 의 무게는 7.9kg, 12.21kg, 25.62kg, 84.52kg 이었으나, 최적 설계 후의 무게는 5.02kg, 9.04kg, 16.18kg, 69.69kg 으로 나타났다. 최적형상의 진동모드 해석에서도 Table 2 의 결과를 살펴 보면 모든 경우에 있어 운영되는 RPM 보다 높게 나와 공진에 의한 파괴는 없을 것이다.

8. 결론

제작을 고려하여 위상최적화를 수행하여 도출된 최적형상의 구조해석 결과 구조적으로 안전한 응력 분포를 보였으며, 진동해석에서도 공진에 의한 피해를 없애므로 판단되며, 이에 따라 최적 형상은 각각 36.9%, 25.9%, 36.8%, 17.5%의 무게 감소효과를 기대 할 수 있다.

후기

본 연구는 2 단계 지역대학 육성사업(BK21)과, 첨단기 계사업단(NURI)의 지원에 의해서 연구되었다.

참고문헌

- Altair Engineering, 2007 "Optistruct 8.0 Tutorials", pp. 6-219
- Jasbir s. Arora, 1994 "introduction to optimum design" McGraw-Hill Book Co, Singapore, pp 8-14
- Singiresu S. Rao , 1996 "Engineering optimization theory and practice" Wiley. Interscience, New York, Vol. 3, pp 8-14