

## 유압식 차동제한장치의 유동 및 토크해석

허용\*(성균관대 대학원 기계공학과), 김형익(성균관대 대학원 기계설계학과),  
배봉국(성균관대 기계공학부), 석창성(성균관대 기계공학부)

Flow and torque analysis of hydraulic limited slip differential system

Y. Huh(Mech. Eng. Dept., SKKU), H. I. Kim(Mech. Design. Dept., SKKU)  
B. K. Bae(Mech. Eng. Dept., SKKU), C. S. Seok(Mech. Eng. Dept., SKKU)

### ABSTRACT

The hydraulic LSD which uses the principle of gear pump is packed with viscous oil in tight container. When a slip occurs on one wheel, the hydraulic LSD generates torque caused by high oil pressure in the container. In this study, two dimensional(2-D) side pinion gear model was developed for hydraulic LSD. Using that model the flow analysis was conducted to preestimate pressure distributions of the side pinion gear according to the variations in the design factors such as oil viscosity, gear gap and rpm. Then, applying the obtained pressure distributions on the side pinion gear, finite element analysis was conducted to evaluate the torque characteristics. From the analysis results, the torque characteristics according to the design factor variations were evaluated.

Key Words : Differential gearing device(차동장치), Side pinion gear(사이드 피니언 기어), Limited slip differential(차동제한장치), Hydraulic limited slip differentials(유압식 차동제한장치), Flow analysis(유동해석), Finite element analysis(유한요소해석)

### 1. 서론

차동장치(differential gearing device)는 자동차의 필수 부품으로서, 동력전달 축으로 들어오는 동력을 양쪽 바퀴 축에 분배해 주며, 두 축 사이의 속도 차이가 있어야 할 때는 자동적으로 회전차이를 보정해주는 장치이다.<sup>1,2</sup> 그러나 한쪽 바퀴가 진흙이나 눈길에 빠져 슬립(slip)이 일어나면 다른 쪽 바퀴도 진흙에 빠진 바퀴와 토크가 같아져서, 결과적으로 양쪽 바퀴 모두 구동력이 없기 때문에 차가 움직이지 못하게 된다. 이와 같은 차동장치의 단점을 보완한 것이 차동제한장치(limited slip differential, LSD)인데, 이것은 한쪽 바퀴에서 진흙에 빠진 것처럼 슬립이 발생하면 차동 기능을 일시적으로 제한해서 다른 쪽 바퀴에 구동력이 전달될 수 있게 한 것이다.<sup>3-5</sup>

현재 이러한 차동제한장치는 대부분 구조가 복잡하고 고가이기 때문에 4륜구동 방식의 차량, 군용차, 상용차 및 일부 고급차량에만 적용되고 있으며, 특

히 국내에서는 아직까지 이에 대한 기술 자립도가 거의 없는 실정이다.<sup>6</sup> 이에 따라 본 저자 등은 기존의 차동제한장치와 원리가 다른 유압식 차동제한장치의 개발을 시도하고 있다.<sup>7</sup> 유압식 차동제한장치는 기어펌프의 원리를 차동장치에 응용한 것으로 차동기어를 점성 오일과 함께 밀폐하여 한쪽 바퀴의 슬립 시 밀폐부 내에서 높은 오일 압력이 발생하여 차동을 제한함으로써 다른 쪽 바퀴의 구동축에 토크를 발생시키는 원리이다.

기존 유압식 차동제한장치에 관한 연구에서는 차동기어를 이용하여 유압으로 차동기능을 제한할 수 있는 유압식 차동제한장치를 설계하고 제작한 후 마찰조건별 발생 구동력 측정시험과 실차시험을 수행하여 적용 가능성을 평가하였으며,<sup>8</sup> 본 논문에서는 유압식 차동제한장치가 기어가 맞물려 돌아갈 때 기어에 흐르는 유체의 유동으로 인해 압력이 발생되며, 그 압력으로 인해 기어의 회전에 영향을 주므로 오일 점도, 기어 간극 및 엔진 회전수 등에 의한 유

체의 압력분포를 예측하기 위해 사이드 피니언 기어와 기어고정부 사이를 흐르는 유체에 대한 2차원 평면 모델을 구성하고 유한요소해석 기법을 적용하여 사이드 피니언 기어에 작용하는 압력분포를 구하였고, 이로부터 사이드 피니언 기어에 압력을 주어 토크해석을 수행하여 성능에 영향을 미치는 인자에 대하여 평가하였다.

## 2. 유압식 차동제한장치

일반적인 차동장치에는 2개의 사이드 피니언 기어와 2개의 차동 피니언 기어가 서로 맞물려 회전하도록 되어있다. 본 연구에서 제안하는 유압식 차동제한장치는 여기에 기어가 회전하는데 필요한 공간을 제외한 모든 부분을 밀폐할 수 있는 밀폐부를 추가하고 케이스 또한 오일의 누유를 방지하기 위해 밀폐시킨 것이다. 피니언 기어들이 회전을 할 수 있는 공간을 제외한 모든 부분은 밀폐되어 있으며, 기어의 이(齒) 사이의 공간에는 점도 높은 오일이 충전된다.

사이드 피니언 기어와 결합되어 있는 양쪽 바퀴의 구동축 중 어느 하나의 구동축 바퀴에 마찰력의 차이가 발생할 경우에 차동제한장치 내부의 사이드 피니언 기어가 회전하게 된다. 이 때 사이드 피니언 기어와 차동 피니언 기어의 이(齒)가 맞물려 들어가는 부분에서는 압력이 크게 발생되고, 맞물려 나오는 부분에서는 낮은 압력이 발생되어 압력이 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 틈새의 공간을 따라 오일이 흐르게 된다. 차동 피니언 기어의 회전속도가 느릴 경우에는 오일의 압력이 크게 발생되지 않지만, 차동이 크게 발생되어 차동 피니언 기어의 회전속도가 빨라질수록 압력이 커지게 된다.

따라서 이때에 발생하는 오일의 압력에 의해 사이드 피니언 기어의 회전이 제한을 받게 되며, 사이드 피니언 기어의 제한된 회전수만큼의 동력은 결국 회전 저항이 큰 다른쪽 바퀴의 구동축에 전달된다. 따라서 자동차가 모래밭, 진흙탕 등에 한쪽 구동축이 빠져 슬립이 일어날 때 이렇게 전달된 동력에 의하여 쉽게 빠져 나올 수 있게 된다. Fig. 1은 유압식 차동제한장치의 전체적 구성을 나타낸 것이다.

## 3. 유한요소해석을 이용한 유동 및 토크해석

### 3.1 유동해석

유압식 차동제한장치는 기어가 맞물려 돌아갈 때 기어에 흐르는 유체의 유동으로 인해 압력이 발생되며, 그 압력으로 인해 기어의 회전에 영향을 주므로 조건별 유체의 압력분포를 예측하기 위하여 사이드

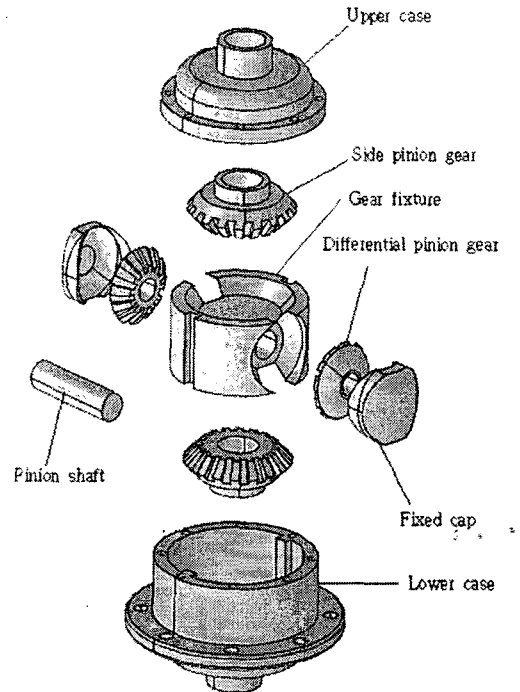


Fig. 1 The configuration of LSD

피니언 기어와 기어고정부 사이를 흐르는 유체에 대한 2차원 평면 모델을 구성하였는데, 사이드 피니언 기어에 두 개의 차동 피니언 기어가 맞물려 작동을 하므로 전체 모델의 절반의 형상을 모델로 결정하였으며, Fig. 2에 구성된 해석모델을 나타내었다. 해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 FLUENT를 사용하였다.

기어가 맞물리기 시작하는 입구(inlet)에서 기어 회전속도에 상당하는 오일의 속도를 가하였으며, 출구(outlet)까지 기어 치면에 작용하는 오일의 유동해석을 수행하여 압력의 분포를 구하였다.

해석은 기어의 2차원 평면 요소에서 유체의 점도 변화, 기어의 간극변화, 엔진 회전수 변화에 따른 유동해석을 수행하였고 기준이 되는 해석조건은 점도 975Pa-s, 간극 0.15mm, 엔진 회전수 1000rpm이다.

해석에 사용된 유체의 물성치는 실제 시제품에 사용한 일본 Shin Etsu사의 KF96 실리콘 오일의 물성치인 비중 0.975, 점도 975Pa-s를 사용하였으나, 점도의 변화에 따른 해석에는 기준이 되는 오일의 점도가 일반적으로 사용되는 오일 중에서 가장 점도가 높으므로 기준점도의 100분의 1부터 2배까지로 점도를 변화시키고, 간극 0.15mm, 엔진 회전수 1000rpm인 조건에서 해석을 수행하였다.

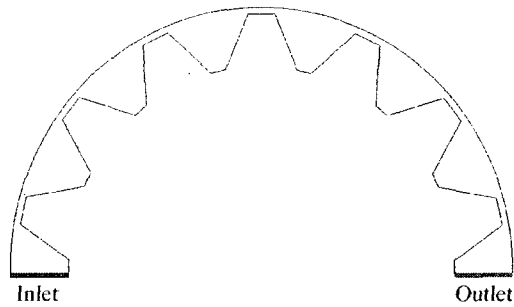


Fig. 2 2D model for fluid analysis

기어의 간극변화에 따른 유동해석은 기어와 기어 고정부 사이 간극의 변화에 따라 유체의 체적이 변하고 그에 따라 발생하는 압력이 달라지므로 기어 간극을, 0.15에서 1mm로 변화시키고, 점도 975Pa-s 엔진 회전수 1000rpm인 조건에서 해석을 수행하였다.

엔진 회전수의 변화에 따른 해석은 점도 975Pa-s, 간극 0.15mm인 상태를 기준으로 하고, 엔진에서 발생하는 회전수에 따라 구동축에 연결된 사이드 피니언 기어의 회전속도가 달라지므로 780에서 3000rpm 일 때의 사이드 피니언 기어의 각속도를 구하여 입력 유체에 속도를 주는 방법으로 해석을 수행하였다.

### 3.2 토크해석

유압식 차동제한장치 내에서 발생한 유체의 압력이 구동축에 연결된 사이드 피니언 기어의 치면에 작용하여 차동제한 토크가 발생한다는 것을 고려하여 사이드 피니언 기어에 대한 모델을 구성하고 유동해석을 이용하여 예측한 유체의 압력분포를 적용하여 토크해석을 수행하였다.

사이드 피니언 기어의 치수는 실제 시제품에 사용한 D사의 P모델 차량에 사용되는 사이드 피니언 기어의 치수를 기준으로 하여 모델링 하였으며, 해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. Fig. 3에 토크해석을 위해 3차원으로 구성된 해석모델을 나타내었으며, 해석에 사용된 재료 물성치는 일반 구조용강의 물성치인 탄성계수(elastic modulus) 200GPa, 프와송 비(Poisson's ratio)는 0.3으로 사용하였다.

유동해석을 통한 압력분포를 기어의 치면에 가할 때 기어의 후면을 구속시켜 압력에 따른 회전력을 구하여 토크를 구하는 해석을 수행하였다.

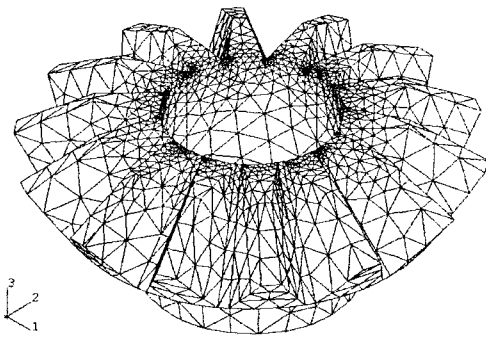


Fig. 3 3D Finite element model for torque analysis

## 4. 해석결과 및 고찰

사이드 피니언 기어와 기어고정부 사이를 흐르는 유체에 대한 2차원 평면 모델의 유동해석 결과, 오일 점도, 기어 간극, 엔진회전수의 변화에 따른 압력분포의 변화는 점도가 기준 점도인 975Pa-s의 100분의 1에서 2배까지, 간극이 기준 간극인 0.15에서 1mm, 공회전 상태인 780rpm 에서 3000rpm까지 변함에 따라 입력측에서 최대 60, 160, 4배 가량의 압력 차이를 보였고, 세 조건 모두 점차 감소하는 경향을 보이다가 출력측에서는 거의 비슷한 압력을 보였다. Fig. 4에 해석 기준인 점도 975Pa-s, 간극 0.15 mm, 엔진 회전수 1000rpm 을 적용하여 해석한 압력분포를 나타내었으며, Fig. 5에 점도, 간극, 엔진 회전수 변화에 따른 압력분포의 변화를 나타내었다.

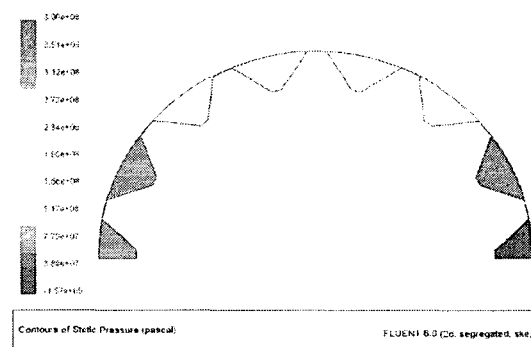


Fig. 4 Pressure distribution of 2D gear model with gap 0.15mm, viscosity 975Pa-s, 1000rpm

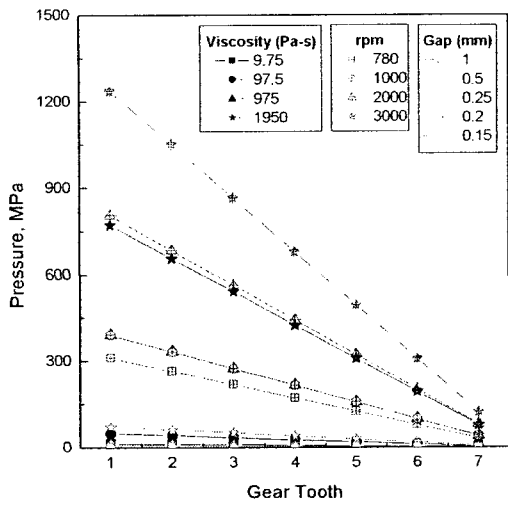


Fig. 5 Pressure distribution according to viscosity, rpm and Gap

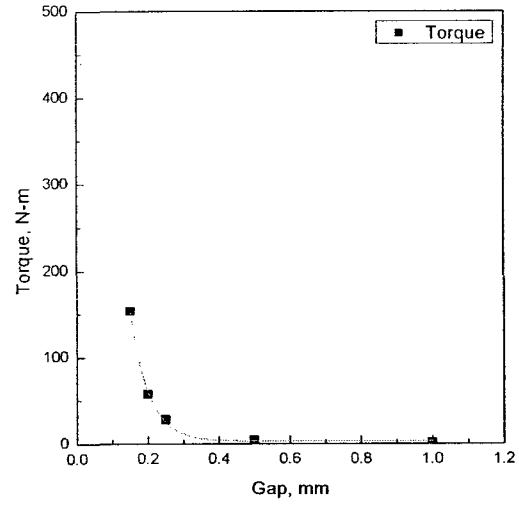


Fig. 7 Result of the torque analysis according to the gear gap

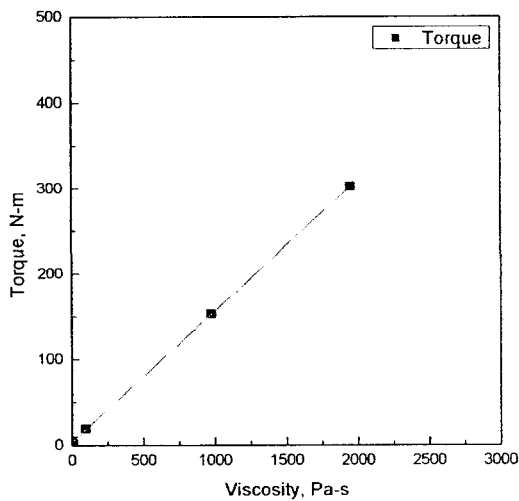


Fig. 6 Result of the torque analysis according to the viscosity

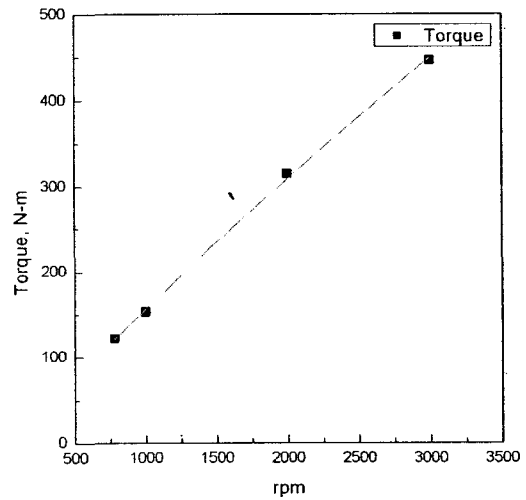


Fig. 8 Result of the torque analysis according to the rpm

유동해석을 통해 얻은 각 조건별 압력분포를 사이드 피니언기어의 치면에 가하여 토크해석을 수행한 결과, 점도가 9.75에서 1950Pa-s까지 변할 때 발생하는 토크는 4.9에서 302N-m, 간극이 0.15에서 1mm까지 변할 때 발생하는 토크는 153에서 1N-m, 엔진 회전수가 780에서 3000rpm까지 변할 때 발생하는 토크는 122에서 446N-m로 발생하였다. Table 1에 각 조건에 대한 토크해석 결과를 나타내었으며, 이를 Fig. 5~7에 그래프로 나타내었다.

그림에서 점도변화, 간극변화, 엔진 회전수 변화의 조건 중에서 기어의 간극이 증가함에 따라 토크가 크게 감소하고 있음을 알 수 있고, 점도 변화와 엔진 회전수 변화에 따른 토크의 변화는 선형적으로 증가하는 경향 보였다.

유체의 점도, 간극, 엔진 회전수의 변화에 대한 유동해석 결과, 엔진 회전수 변화 시에 가장 큰 차동제한력이 발생하였다. 이는 유압식 차동제한장치의 원리가 기어의 회전수가 많을수록 압력이 크게 발생하여 더 큰 차동제한력이 발생한다는 원리와 일치하

Table 1 Result of the torque analysis according to viscosity, gap and rpm

Viscosity (Pa-s)	Torque (N-m)	Gap (mm)	Torque (N-m)	rpm	Torque (N-m)
9.75	4.9	0.15	153.0	780	122.0
97.5	18.3	0.2	56.9	1000	152.7
975	152.8	0.25	27.9	2000	314.9
1950	302.0	0.5	3.9	3000	446.0
-	-	1	1.0	-	-

는 것을 알 수 있고, 간극변화에 있어서는 일정 간극에서는 유압이 발생하여 차동제한 토크가 발생하지만 간극이 커지면 차동제한 토크가 거의 발생하지 않는다. 따라서 유압식 차동제한장치의 설계 시 간극에 대한 고려가 매우 중요함을 알 수 있었다. 또한, 점도에 대한 영향으로는 점도가 클수록 높은 차동제한 토크가 발생하는 것을 알 수 있었다.

### 5. 결론

본 연구에서는 유압식 차동제한장치의 차동제한 성능에 영향을 미치는 인자인 오일 점도, 기어 간극 및 엔진 회전수의 변화에 따른 사이드 피니언 기어에 작용하는 압력분포의 변화를 유동해석을 이용하여 구하고, 이로부터 사이드 피니언 기어에 압력을 주어 토크해석을 수행하였다.

유동 및 토크해석 결과 엔진 회전수 변화 시에 가장 큰 차동제한력이 발생하여 유압식 차동제한장치의 원리가 기어의 회전수가 많을수록 압력이 크게 발생하여 더 큰 차동제한력이 발생한다는 원리와 일치하는 것을 확인할 수 있었으며, 일정 간극 이상이 되면 차동제한 토크가 거의 발생하지 않아 유압식 차동제한장치의 설계 시 간극에 대한 고려가 매우 중요함을 알 수 있었다.

### 후기

본 연구는 BK21 사업의 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. M. Kenji, "Differential gear", United States Patent, No.5, 1999.
2. C. G. Lee, S. J. Lee, K. S. Lee, "Differential Gear Model and its Influence on Vehicle Dynamics", Fall Conference Proceeding of Korea Society of Automotive Engineer, Vol. 6, No. 2, pp 21~31, 1994.
3. H. Ina, H. Izumi., T Itoh, Yan, "Developed of a New Limited Slip Differential". T, JSAE review, Vol. 15, No. 4, pp 209, 1994.
4. B. H. Lee, "Limited Slip Differential and Effect of Transfer Torque on Vehicle Dynamics", KIA Technical Report, No.13, pp. 135~142, 1990.
5. R. P. Jarvis, A. J. Young, "A New Form of Limited Slip Differential", SAE transactions No. 6, pp 1069, 1993
6. J. S. Lee, K. H. Kim, H. J. Kim, H. S. Kim, "Analysis of 4WD Viscous Coupling Characteristics at Steady State", Transactions of Korea Society of Automotive Engineer, Vol. 6, No. 2, pp 21~31, 1994.
7. C. S. Seok, "Differential Gearing Device With Capacity of Limiting Differential", International Patent, No. PCT/KR01/67111, 2001.
8. Y. Huh, H. I. Kim, B. K. Bae, C. S. Seok, "A study on the hydraulic limited slip differential system", Fall Conference Proceeding of KSPE, CD, 2004