

차동제한장치용 압력발생장치의 유동해석

Flow Analysis of Pressure Generator for Limited Slip Differential

위성욱¹, 구재민¹, 이정민¹, 석창성^{1,#}
Sung Uk Wee¹, Jae Mean Koo¹, Jeong Min Lee¹, and Chang Sung Seok^{1,#}

¹ 성균대학교 대학원 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)
Corresponding Author / E-mail: seok@skku.edu, TEL: +82-31-290-7446
ORCID: 0000-0002-1205-9996

KEYWORDS: LSD (차동제한장치), Flow analysis (유동해석), Trochoid gear (트로코이드기어), Gerotor pump (제로터 펌프)

The differential gear distributes the power from the transmission shaft to both wheel axles and automatically ensures rotational difference to maintain the speed difference between the two axles. However, when the vehicle travels on a slippery road surface, a slip in the wheel induces improper transmission of the driving force. Therefore, the limited slip differential limits the function of the differential gear by transmitting the driving force to the normal wheel without the slip. The hydraulic differential limiting device is based on the principle that the fluid between the inner and the outer rotors is compressed by the rotation of the trochoidal gear, and the compressed fluid moves to the cylinder to generate sufficient pressure in the side pinion gear to limit the differential. In this study, the pressure is predicted by variation in viscosity and rotational speed through flow analysis.

Manuscript received: December 11, 2017 / Revised: July 10, 2018 / Accepted: July 30, 2018

1. 서론

차동장치는 동력전달 축으로 들어오는 동력을 양쪽 바퀴 축에 분배해주며, 두 축 사이의 속도 차이가 필요한 경우 자동적으로 회전차이를 보정해주는 장치이다.^{1,2} 그러나 미끄러운 노면에서 주행하는 경우 차륜에는 슬립현상이 발생하게 되는데, 이로 인해 구동력이 제대로 전달되지 않는 현상이 발생한다. 차동제한장치는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 차동장치의 기능을 제한함으로써 슬립이 일어나지 않는 차륜쪽으로 구동력을 전달하여 구동불가 상태로부터 벗어 날 수 있도록 해준다.³ 현재 가장 많이 사용되고 있는 다판마찰식 차동제한장치는 가격이 저렴하고 차동제한 성능이 우수하나 스프링을 이용하여 마찰판을 밀어 차동을 제한하는 방식으로 상시 차동제한에 의한 동력손실이 발생하며 마찰판의 수명이 짧고 고온에서는 기능이 저하됨과 동시에 소음을 유발하는 단점이 있다.^{4,5}

반면에, 트로코이드기어를 이용한 차동제한장치의 경우 로터 간 상대운동이 적어 장시간 사용에도 효율의 변화가 적으며 흡입

성능이 우수함과 동시에 체적대비 1회전당 토출량이 크다는 장점을 가지고 있다.⁶ 또한 액추에이터를 사용하여 차동을 제한하므로 차동이 발생할 때에만 마찰이 발생하여 마찰디스크의 수명이 길고 정상 주행 시 마찰에 의한 손실이 거의 없는 장점을 가지고 있다. Fig. 1에 유압식 차동제한장치의 개념도를 나타내었다. 유압식 차동제한장치의 작동 원리는 트로코이드기어의 회전에 의해 내부로터와 외부로터 사이의 유체가 압축되고, 압축된 유체는 유로를 통해 실린더 쪽으로 이동함으로써 사이드 피니언 기어에서 충분한 압력을 발생시켜 차동을 제한한다. 따라서, 차동제한장치에 사용되는 트로코이드기어를 이용한 펌프는 출구의 유량이 아닌 발생하는 압력이 중요한 요소이며 이에 대한 연구가 필수적이다. 일반적으로 트로코이드기어를 이용한 펌프의 경우 형상에 관한 설계 또는 인자에 따른 유량의 변화가 주요 연구내용이며 이에 대한 많은 연구가 수행중이다.⁷⁻¹⁰ 하지만, 본 연구에서는 트로코이드 기어를 이용한 펌프의 형상이나 유량이 아닌 차동제한에 필요한 발생압력에 초점을 맞추어 발생압력을 변화시킬 수 있는 인자인 작동유체의 점도와 회전속도에 따른 발생 압력을 유동해

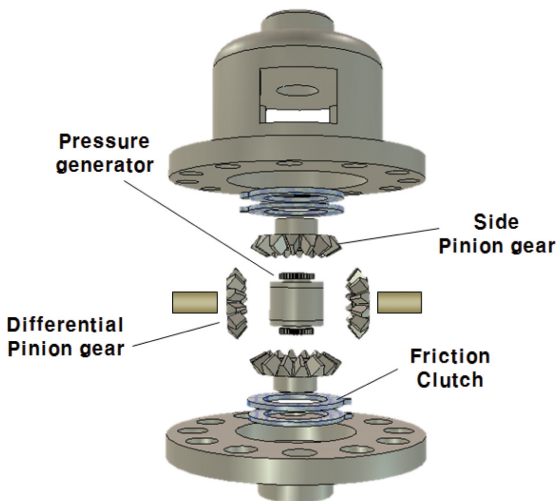


Fig. 1 Concept of LSD for pressure generator

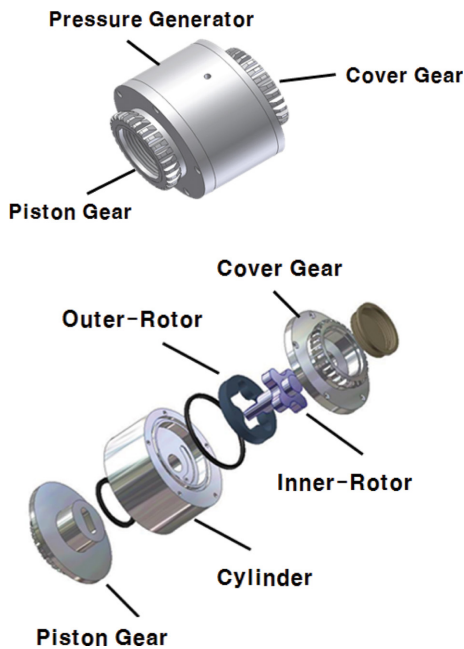


Fig. 2 Pressure generator

석을 통해 예측하고 그 경향을 확인하였다.

2. 트로코이드 기어펌프의 모델링

본 연구에서 사용된 트로코이드 기어펌프를 이용한 압력발생 장치의 구성을 Fig. 2에 나타내었다. 압력발생장치는 크게 커버기어, 피스톤기어, 내부로터, 외부로터, 실린더로 구성되며, 액추에이터 본체와 결합된 커버기어와 트로코이드 내부로터와 연동되는 피스톤 기어는 차동제한장치의 사이드 피니언 기어와 맞물려 회전하게 된다. 커버 기어와 피스톤 기어가 서로 반대방향으로 회전할 경우 트로코이드 기어가 회전하여 압력을 발생시키며, 트로코이드 기어의 회전방향과 무관하게 압축된 유체는 일방향 초크밸

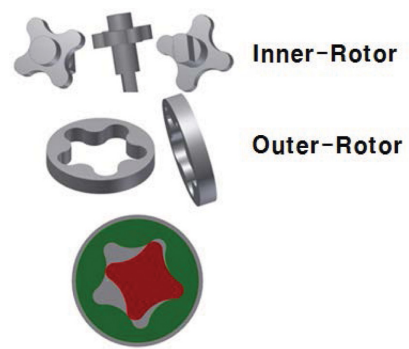


Fig. 3 Modeling of trochoid gear

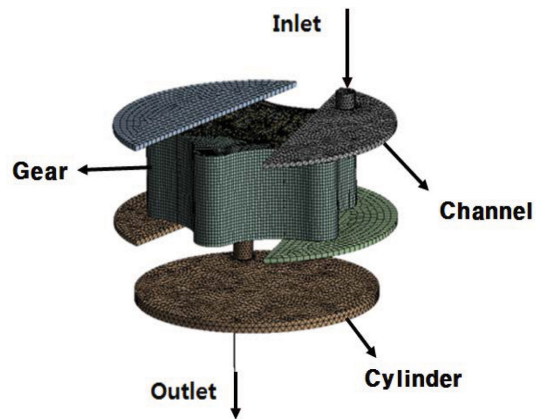


Fig. 4 Modeling of pressure actuator

브를 통해 실린더로 이동하여 피스톤 기어를 밀어주며 차동을 제한하게 된다. 유체의 경로는 Inlet으로 부터 유입되어 Channel에 잔류하게 되며, 트로코이드 기어가 회전함과 동시에 압력차이로 인해 유입 된다. 유입된 유체는 트로코이드 기어펌프의 체적의 변화로 인해 발생하는 높은 압력에 의해 트로코이드 기어로부터 Cylinder쪽으로 이동하여 Outlet을 통해 유출된다.

차동제한장치에서 압력을 발생시키는 핵심부품인 액추에이터 부분을 실제 형상을 적용하여 모델링하였다. Figs. 3과 4에 트로코이드 기어의 형상과 압력발생 장치에 대한 모델링을 나타내었다. 트로코이드 기어는 외부로터와 내부로터로 구성되어 있으며 외부로터의 기어의 이 수는 5개 이며 내부로터는 외부로터보다 하나 작은 4개로 구성되어있다. 트로코이드 기어가 회전 할 때 유압작동유가 유입되는 부분에 유입로를 만들었으며, 유압작동유가 머물게되는 Channel 부분을 반원형태로 모델링하였다. 또한, 외부로터 내부만을 채우게 되는 유체의 형상부분만 모델링하였으며 피스톤 기어를 밀어내는 압력을 만들어내는 직경 25 mm의 원형의 실린더부분을 모델링하였다.

3. 유동해석 조건

본 연구에서는 상용유동해석 프로그램인 CFX 16.1을 이용하

Table 1 Grid test condition and result

Total elements	Outer Rotor elements	Cylinder elements	Pressure (MPa)
301763	88508	201464	3.036~3.037
977765	175674	576072	3.036
3272698	862848	1425637	3.036

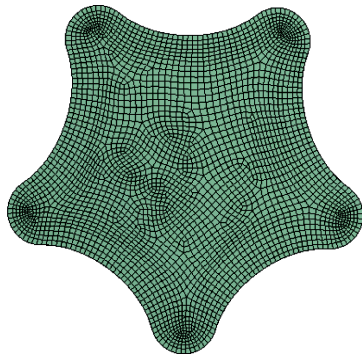


Fig. 5 Grid of outer rotor

였으며, 유동해석을 위해 생성된 격자의 수는 총 301,763개이며, 핵심이 되는 외부로터는 88,508개, 실린더 및 실린더와 연결된 채널은 201,464개로 구성되었다. 격자의 타당성을 판단하기 위해 격자테스트를 속도 60 rpm, 점도 50 Pa·s에서 Table 1과 같은 조건으로 수행하여 실린더에서 발생하는 압력을 측정하였다. 해석 결과 실린더에서 격자수의 증가에 따라 최소압력은 3.036 MPa로 동일하였으며 최대압력은 301763일 때, 3.037로 약 0.03%의 오차를 보였으며 선정한 격자의 수가 타당하다고 판단하였으며 해석에 핵심이 되는 외부기어의 격자단면을 Fig. 5에 나타내었다.

난류모델로는 감쇄함수를 필요로 하지 않아 수학적으로 간단하며, 수렴성이 우수한 Standard K-Omega 모델을 적용하였다.¹¹ 내측기어는 해석조건에서 유일한 고체로써 유체의 안에서 회전함을 고려하여 Immersed Solid Domain을 부여하였으며, 기어가 회전하면서 함께 회전하는 외부기어 내부의 고체를 제외한 유체에 대한 영역은 Rotating Fluid Domain을 적용하였다. Inlet, Outlet 및 Channel에 해당하는 유체는 Stationary Fluid Domain을 적용하였다. 트로코이드 기어의 저압부가 발생하는 영역에 유체가 공급되는 Channel부분에 유입되는 유로의 경계면에 Inlet 조건을 부여하였으며, 실린더에서 발생하는 압력에 의하여 유압작동유의 저장소로 유체가 되돌아 가도록 하기 위해 제작된 리턴홀의 경계면에 Outlet 조건을 부여하였다. Inlet과 Outlet의 경계조건은 대기압인 1 atm으로 설정하였으며 해석모델의 압력상태에 따라 자유롭게 유량이 결정되도록 Opening 조건을 부여하였다. 유압작동유로 사용되는 유체의 밀도는 879 kg/m³으로 적용하였으며 기어의 회전수(rpm)에 따른 실린더의 발생 압력을 측정하기 위해 유체의 점도를 50 Pa·s로 고정하고 내부로터의 기준으로 30 rpm부터 150 rpm까지 증가시키며 해석하였다. 내부로터와 외부로터의 회전 속도는 기어 잇수 역수의 비율과 같아야 하므로 내부로

터와 외부로터의 속도 비율은 5:4로 설정하였다. 또한, 유체의 점도의 변화에 따른 발생압력을 측정하기 위해 rpm을 60으로 고정하고 유체의 점도는 10 Pa·s부터 100 Pa·s까지 변화시키며 해석을 수행하였다. 모델의 대칭성을 고려하여 내부로터가 반바퀴 회전하는 시간인 0.5초 동안의 해석을 수행하였으며 총 300개의 Step으로 나누어 실린더에서 가장 큰 압력이 발생하는 Step에서 압력을 측정하였다. 본 해석에서는 유동에서 발생하는 캐비테이션이나 역류의 발생에 대한 점은 고려하지 않았다.

4. 유동해석 결과

점도 50 Pa·s, 60 rpm의 조건에서 시간에 따른 트로코이드 기어 내부의 압력분포의 변화를 Fig. 6에 나타냈다. 해석조건에서 대칭을 고려하여 내부로터가 반 바퀴 회전하는 시간인 0.5초를 300 Step으로 나누었으므로 30 Step 당 0.05초의 시간이 할당된다. Fig. 6(a)를 기준으로 0.05초의 간격으로 내부로터가 1/4만큼 이동하는 동안의 압력분포를 나타냈다. 우측 상단의 파란색의 원이 Inlet 부분이며 왼쪽상단의 흰색 원이 Outlet을 나타낸다. 형상이 대칭을 이루기 때문에 Fig. 6(e)의 0.05초 후는 다시 Fig. 6(a)와 같게 되며 반복된다. Fig. 6의 우측은 트로코이드 기어내부의 면적이 증가하는 부분으로 Inlet으로부터 유체가 공급되어 낮은 압력을 나타내는 영역이며 좌측 부분은 면적이 감소하면서 압력이 증가하여 실린더 쪽으로 유체가 이동하는 영역이다. Figs. 6(a)에서 6(c)로 변함에 따라 트로코이드 좌측에 해당하는 내부 면적이 감소하면서 압력이 최대가 되는 것을 확인할 수 있다. 트로코이드 기어 내부에서 면적으로만 보았을 때 Figs. 6(d)와 6(e)의 경우 면적이 6(c)보다 더 작아지게 된다. 하지만, Fig. 6(d)로 넘어가면서 기어의 최하단 영역이 Channel부분과 만나면서 압력이 다시 감소하였다. 동일 조건에서 실린더에서 발생하는 압력이 최대인 순간의 압력분포에 대한 유동해석 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 해석결과와 트로코이드 기어가 회전하면서 체적이 증가하는 부분인 Inlet 부분의 압력이 가장 낮게 나타났으며, 반대로 체적이 감소하여 내부 압력이 증가하여 실린더쪽으로 유체가 이동하는 영역에서는 약 2.7 MPa의 압력이 발생하였다. 실린더에서 발생하는 압력은 약 3.1 MPa로 가장 높게 나타났으며 리턴홀을 통해 빠져나가면서 다시 압력의 감소가 발생하였다. 실린더에서 발생하는 압력이 고르지 않을 경우 피스톤기어에 일정한 하중을 가할 수 없다. 따라서 원하는 일정한 하중을 얻기 위해서 실린더에서는 압력이 일정하거나 분포가 적은 형태로 나타나야 한다. 실린더내부의 압력분포를 확인하기 위해서 Fig. 8에 실린더부분만의 압력분포를 국부적으로 나타냈다. Channel로부터 공급되는 유로의 원형부분에서 가장 높은 압력을 나타내며 거리가 멀어질수록 낮아지는 분포도를 나타냈지만 그 차이가 미미하여 실린더에서 동등한 압력을 발생시킨다고 할 수 있다. 유체의 점도에 따른 발생압력 및 하중의 관계를 파악하기 위해 내부로터의 회전속도를 60 rpm으로 고정하고 유체의 점도를 10 - 100 Pa·s로 변화시키며 해석한

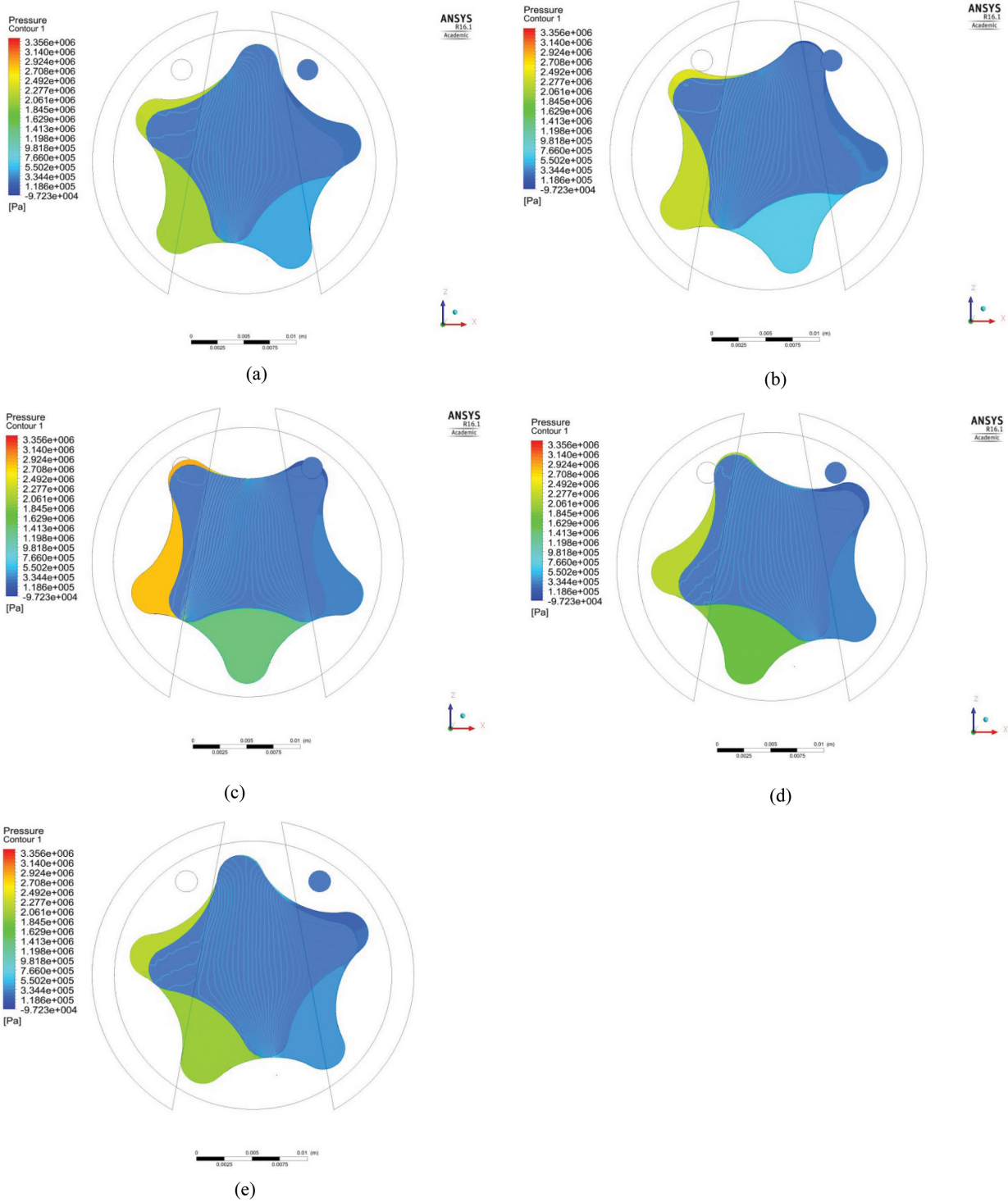


Fig. 6 Pressure distribution in trochoid gear

결과인 점도-압력,하중 그래프를 Fig. 9에 나타냈다. 최소 점도인 10 Pa·s의 경우 발생압력은 0.7 Mpa이며, 발생하는 하중은 약 35 kg이다. 최대 점도인 100 Pa·s의 경우 약 6 MPa의 압력과 300 kgf의 하중이 발생하였다. 점도가 높아질수록 액추에이터에서 발생하는 압력 및 하중이 함께 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 또한 로터의 회전속도에 따른 발생 압력 및 하중을 Fig. 10에

나타냈다. 점도에 따른 유동해석 결과를 바탕으로 점도를 50 Pa·s으로 고정하였으며, 로터의 회전속도에 따른 발생압력의 변화를 도출하기 위하여 회전속도를 30 - 120 rpm으로 변화시키며 해석을 수행하였다. 차동속도가 10 rpm 이하일 경우에는 액추에이터에서 발생하는 하중이 극히 미미하였으며, 최대 회전속도인 150 rpm에서는 압력이 7.2 Mpa, 하중이 360 kg만큼 발생했다. 회전속도

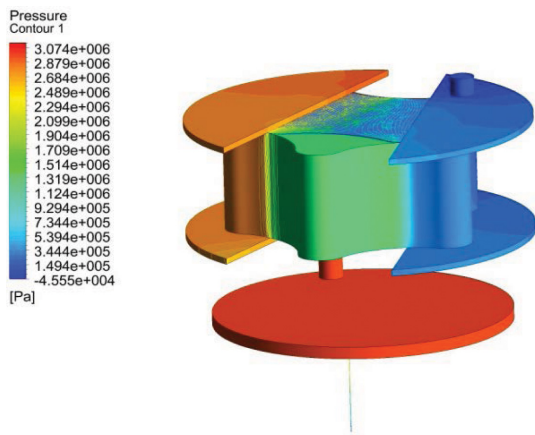


Fig. 7 Result of analysis (60 rpm, 50 Pa·s)

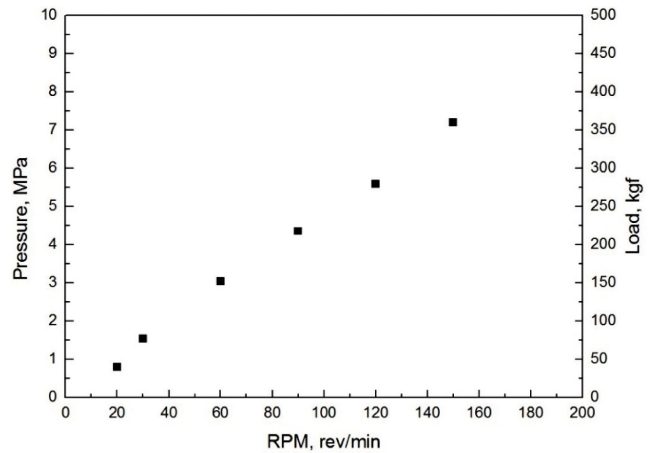


Fig. 10 RPM-pressure, load graph

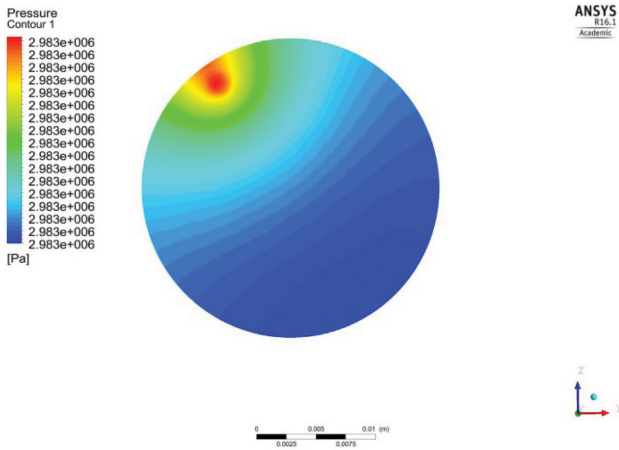


Fig. 8 Pressure distribution in cylinder (60 rpm, 50 Pa·s)

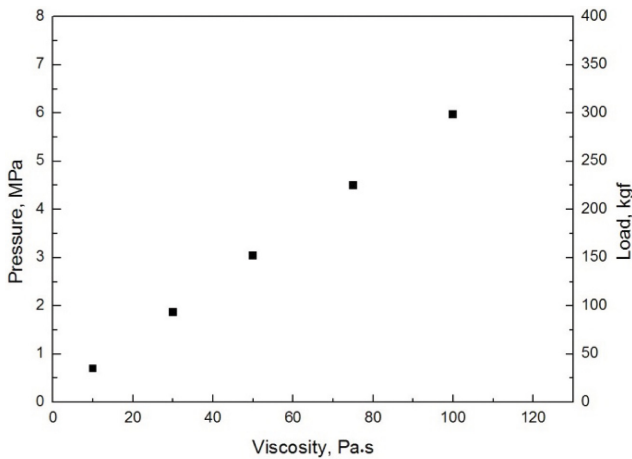


Fig. 9 Viscosity-pressure, load graph

가 증가할 수록 발생압력 및 하중이 증가하는 경향을 보였으며 회전속도가 30 rpm이하에서는 회전속도와 발생압력 및 하중이 비례하는 경향을 보이거나 30 rpm이상에서는 기울기가 더 완만하게 증가하는 경향을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 압력발생용 차동제한장치에 대한 유동해석을 수행하였다. 발생압력에 영향을 주는 인자인 회전속도와 유압작동유의 점도의 변화에 따른 발생압력 및 하중의 변화를 나타내었으며 해석결과 회전속도가 일정할 경우 점도가 증가할 수록 발생압력 및 하중이 증가하였으며, 작동유의 점도가 일정할 경우 회전속도가 증가함에 따라 발생 압력 및 하중이 증가하는 것을 확인하였다. 따라서 회전속도를 고려한 작동유의 선택에 따라 차동제한장치가 작동하기 위한 충분한 압력을 발생 시킬 수 있을 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 한국연구재단(NRF)의 지원(MSIP)(No. 2015R1A2A1A10055230)으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

REFERENCES

- Mimura, K., "Differential Gear," US Patent, No.6056660A, 1996.
- Lee, C., Lee, S., and Lee, K., "Differential Gear Model and Its Influence on Vehicle Dynamics," Proc. of Korea Society of Automotive Engineer Autumn Conference, pp. 21-31, 1994.
- Jarvis, R. P. and Young, A. J., "A New Form of Limited Slip Differential," SAE Technical, No. 6, pp. 1-10, 1993.
- Seok, C., "Differential Gearing Device with Capacity of Limiting Differential," KR patent, No. 67111, 2001.
- Choi, E. and Kim, H., "A Study on the Noise · Vibration Characteristics of Differential Gear According to the Materials,"

Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 6, No. 2, pp. 67-75, 1997.

6. Jang, J., Lee, J., Han, D., and Jo, M., "A Study on Tooth Design Program Development of Gerotor Pump/Motor," Journal of Korean Society Tribology Lubricants Engineer, Vol. 12, No. 3, pp. 100-106, 1996.
7. Tong, S.-H., Yan, J., and Yang, D. C., "Design of Deviation-Function Based Gerotors," Mechanism and Machine Theory, Vol. 44, No. 8, pp. 1595-1606, 2009.
8. Kim, J.-H., Kim, C., and Chang, Y., "Optimum Design on Lobe Shapes of Gerotor Oil Pump," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 20, No. 9, p. 1390, 2006.
9. Jacazio, G. and De Martin, A., "Influence of Rotor Profile Geometry on the Performance of an Original Low-Pressure Gerotor Pump," Mechanism and Machine Theory, Vol. 100, pp. 296-312, 2016.
10. Buono, D., Siano, D., Frosina, E., and Senatore, A., "Gerotor Pump Cavitation Monitoring and Fault Diagnosis using Vibration Analysis Through the Employment of Auto-Regressive-Moving-Average Technique," Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 71, pp. 61-82, 2017.
11. Wilcox, D., "A Half Century Historical Review of the k-Omega Model," Proc. of Aerospace Sciences 29th conference, p. 615, 1991.



Chang Sung Seok

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University. His research interest is Fracture Mechanics.
E-mail: seok@skku.edu



Sung Uk Wee

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University. His research interest is Fracture Mechanics.

E-mail: sinkill2@naver.com



Jae Mean Koo

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University. His research interest is Fracture Mechanics.

E-mail: kjm9000@hanmail.net



Jeong Min Lee

Ph.D. researcher in the Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University. His research interest is Fracture Mechanics.

E-mail: lee5317@hanmail.net