

유압식 동력조향 장치 설계를 위한 해석 모델 개발

장 주 섭^{*1)} · 윤 영 환²⁾

경원대학교 기계자동차공학과¹⁾ · (주)신호시스템²⁾

Analysis Model Development for Designing of Hydraulic Power Steering System

Joosup Jang^{*1)} · Younghwan Yoon²⁾

¹⁾Department of Mechanical & Automotive Engineering, Kyungwon University, Gyeonggi 461-701, Korea

²⁾Shinho-Systems Co., Ltd, B-702 Ssangyong IT Twin Tower, 442-5 Sangdaewon-dong, Jungwon-gu, Seongnam-si, Gyeonggi 462-120, Korea

(Received 9 July 2007 / Accepted 12 September 2007)

Abstract : Hydraulic power steering system has been adopted in seniority passenger and commercial vehicle system for an easy maneuverability and a smoother ride. In this study, hydraulic power steering system analysis model which includes hydraulics and mechanical sub-systems was developed using commercial software, AMESim in order to predict characteristics for various steering components. Each component which constructs system was modeled and verified by experimentally obtained characteristics curves of each components. The agreement between simulation and experimental results shows the validity of the simulation model. The parameter sensitivity analysis such as valve opening area, torsional stiffness for system design are carried out by the analysis and experimental method.

Key words : Hydraulic power steering system(유압식 동력조향장치), Flow rate-pressure gradient(유량 압력구배), Pressure ripple(압력 맥동), Analysis modelling(해석 모델링), Steering gear box(조향 기어 박스)

1. 서론

최근 유압 시스템이 자동차 분야에서는 괄목할 만한 기술성과를 이루고 있으나, 현재까지 대부분의 유압시스템을 개발함에 있어 각 부품의 성능을 개선한 후에 교환하여 실험하는 시행 착오법(Trial & Error method)방식으로 대상시험(Bench test) 및 실차 실험을 통해 문제점을 보완하여 개발하고 있기 때문에 많은 시간과 비용이 크게 발생하고 있다. 특히 독자적인 시스템을 개발할 때 사양선정 및 최적 설계에 어려움을 주고 있는 것이 현실이다. 근래에 신제품에 대한 기술 수출 상담 시, 설계 기준에 대한

근거자료(Back data)의 구체적인 내용을 요구할 때 해석 기술의 부족과 설계 데이터 구축이 미비하여 부품 및 시스템을 수출하는데 많은 어려움이 있는 것으로 보고되고 있다.

자동차에 장착되는 유압식 동력 조향장치 (Hydraulic power steering system)에 대하여 주요한 부품으로 크게 구분하여 나타내면 엔진으로 구동되는 유압 펌프, 조향 휠의 조향력에 대응해서 타이어의 방향을 제어하는 조향 기어 박스, 오일 통 및 배관계로 구성되어 있다.

현재 자동차 보급의 확대와 운전 시간이 길어지게 되면서, 소비자들은 차량 정숙성과 쾌적성에 대한 관심과 요구 조건이 더욱 증대되고 있다. 이에 따

*Corresponding author, E-mail: jsjang@kyungwon.ac.kr

라 자동차 업체들은 차량의 진동, 소음에 대하여 더욱 많은 관심과 연구 노력을 기울이고 있다.¹⁻⁶⁾

본 연구는 승용차의 유압식 동력조향 시스템에서 사용되고 있는 각 부품에 대하여 실험을 통하여 얻은 실험 결과를 모델개발에 이용하고 실험결과와 해석 모델링과 비교를 통하여 개발하고자 하는 해석 모델링의 신뢰성을 확보하고자 한다.

2. 유압부품의 모델링

Fig. 1에 유압식 동력조향장치의 전체 시스템을 나타내었다. 그리고 각 부품의 모델링에 필요한 데이터는 현재 자동차에 장착되어 사용되고 있는 사양을 기준으로 모델링 하였으며, 본 해석에 이용된 AMESim 소프트웨어의 유압부품 설계자료(Hydraulic Component Design library)를 사용한 경우 밸브 내부의 스펴과 하우스 사이에서 발생하는 공차 및 스펴 가장자리의 공차(rounded corner radius)와 펌프 토출구에서 로터리 밸브까지 연결된 유압 라인을 제외한 각 부품사이에서 발생하는 라인 동력학은 무시하였다.

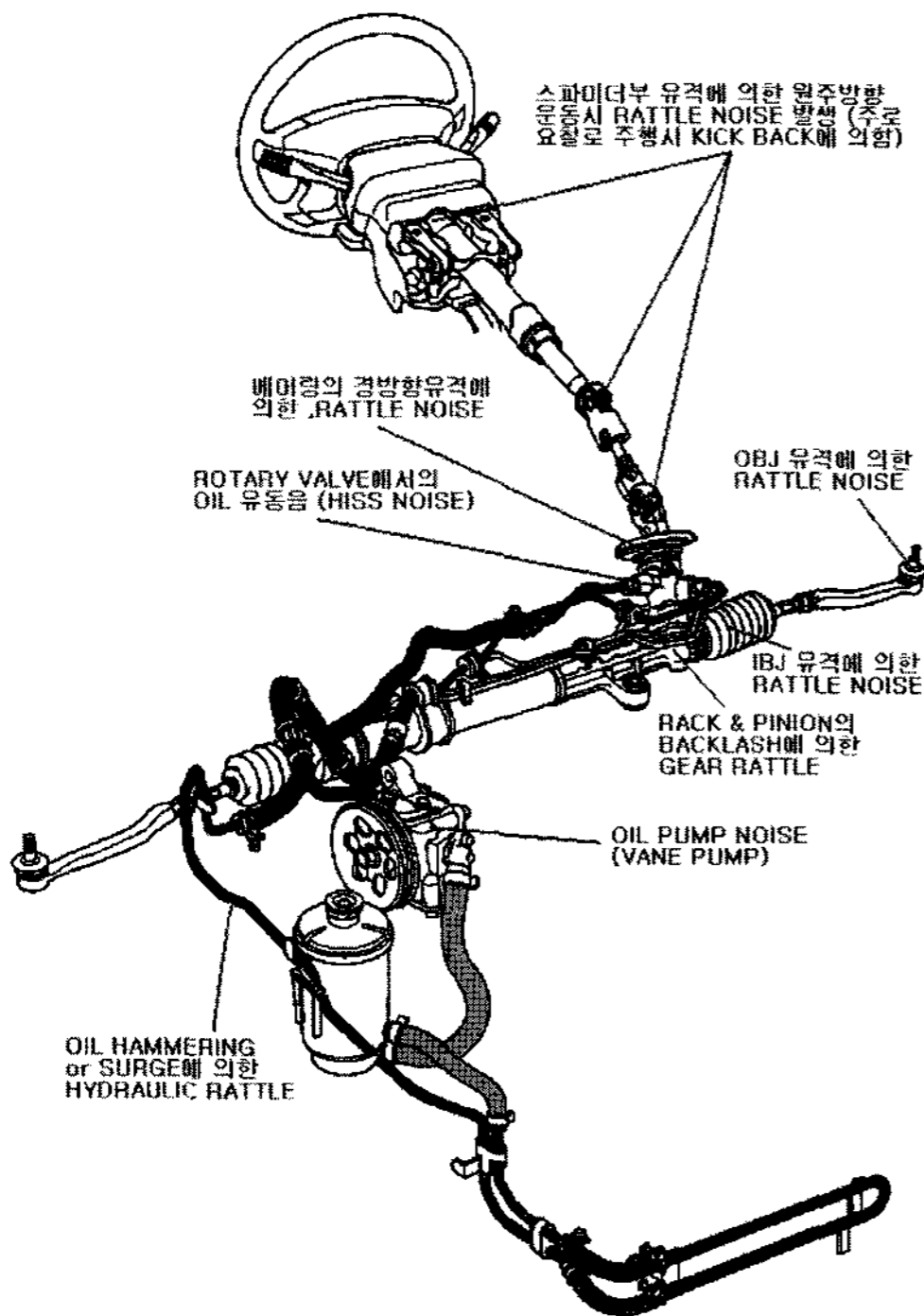


Fig. 1 Layout of hydraulic power steering systems

2.1 Pump 모델링

유압시스템에 대한 신뢰성 있는 모델 개발을 위해서는 에너지 공급원인 유압 펌프의 모델링이 매우 중요하다. 일반적으로 유압 펌프의 경우 온도가 올라갈수록 체적 효율이 감소하고 기계효율은 증가한다. 즉 온도가 올라갈수록 누설 유량 및 간극이 증가하여 체적효율은 감소하고 오일의 점성저항에 의한 토크가 감소하여 기계효율은 증가하게 된다. 따라서 펌프의 정확한 토출 유량을 모델링하기 위해서는 실험 조건인 55°C에서의 펌프 회전수와 부하 압력에 대한 펌프의 실제 토출 유량을 실험을 통해 구한 값을 이용하여 모델링을 하였다.

펌프 해석 모델은 부하압력과 회전수에 따른 누설특성, 맥동특성 실험 결과를 이용하여 해석 모델을 구축하였다.

Fig. 2는 펌프의 회전수와 유량 특성의 관계를 나타낸 것으로 해석모델에서 교축밸브의 직경을 3.0mm로 설정한 상태에서 펌프의 회전수를 500에서 5000 rpm까지 서서히 증가시키며 실험한 결과와 해석한 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 입력 회전수에 따른 토출 유량의 변화에 대하여 해석한 결과, 펌프의 낙하형상(Drooping type)의 특성이 잘 나타나며 실험 결과와 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 3은 부하압력 상승으로 인해 펌프 내부 누유에 의한 펌프의 체적 효율에 대한 실험결과와 해석 결과를 비교한 것이다. 해석결과 부하압력이 증가할수록 누설 유량이 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 실험결과를 이용하였기 때문에 실제 토출 유량과 동일한 해석결과를 얻을 수 있었다.

실험결과 600 rpm으로 고정된 상태에서 부하압력이 상승하면 펌프의 내부 누유가 증가하여 체적 효율이 감소하는 것을 볼 수 있다. 600 rpm일 때, 무부하에서의 이론 토출유량은 5.76 L/min로 실험결과에서 거의 이론 토출유량과 일치하나, 60 Bar부하 조건에서는 내부 누유에 의해 실제 토출유량은 5 L/min으로 감소되었다. 해석모델에서는 릴리프밸브의 최대 압력을 85bar, 유량 압력구배(Flow rate pressure gradient)를 2 L/min/bar로 설정하였다. 릴리프밸브는 유압식 동력조향장치의 압력을 설정하는 것으로 조향 링크에 과도하게 힘이 작용하는 것을

방지한다. 유량 압력구배는 일반적으로 압력오버라이더(Pressure override)라 한다. 압력오버라이더는 전체 유량 압력과 크래킹(Cracking)압력과의 차압을 말하는 것으로 유량 압력구배에 의해 크래킹이 발생한 이후의 기울기를 조정할 수 있다.

2.2 파이프라인 모델링

펌프 출구에서 기어박스에 장착된 로터리 밸브까지 연결된 파이프라인은 나선 파이프(Spiral pipe), 플렉시블 호스, 강관(Steel tube)로 구성되어 있으며, Fig. 4는 나선 파이프의 특성을 평가하기 위한 실험 장치 구성도이며, Fig. 5는 펌프 회전수 700 rpm에서 파이프의 양단 압력에 대한 실험결과로 특정 주파수에서 압력 맥동이 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

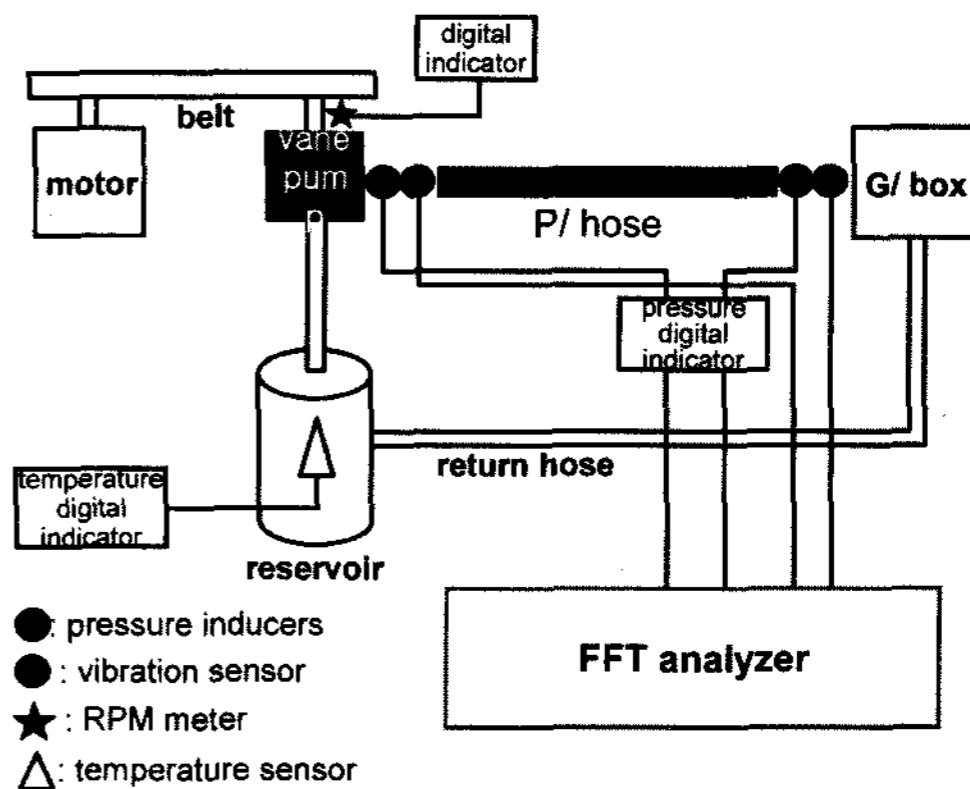
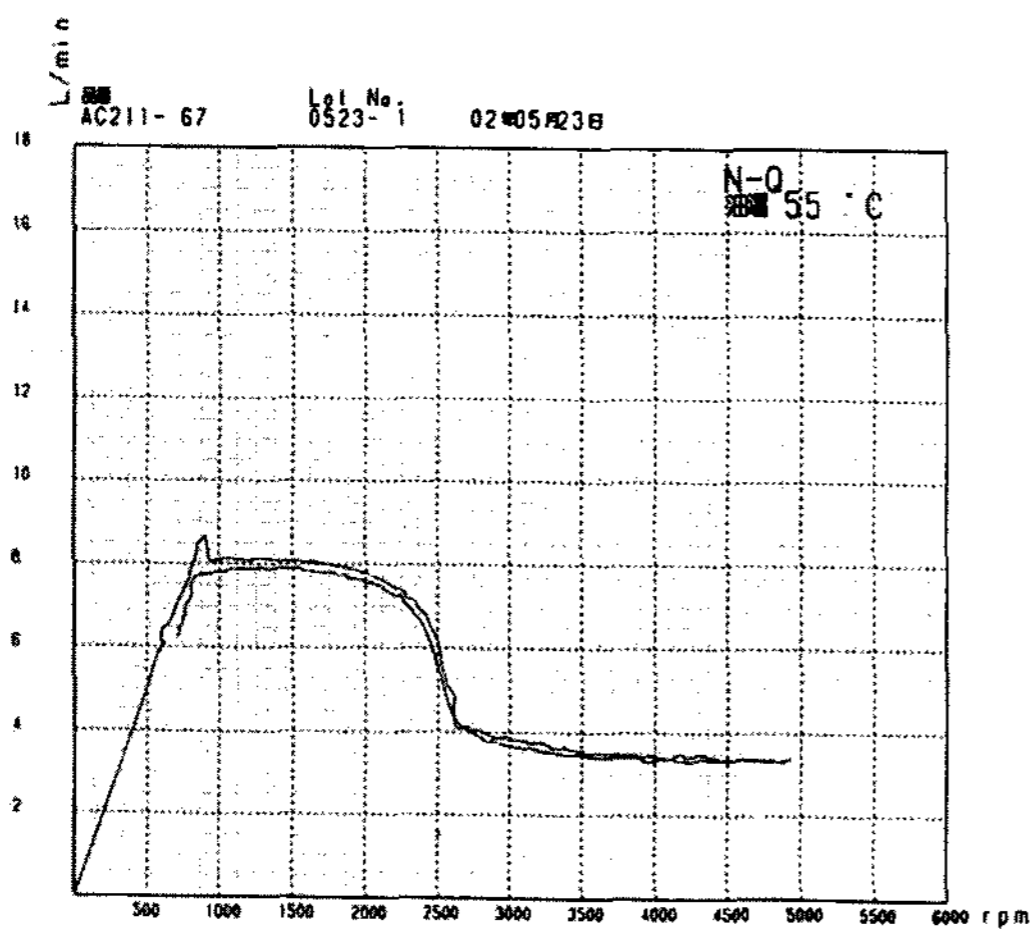
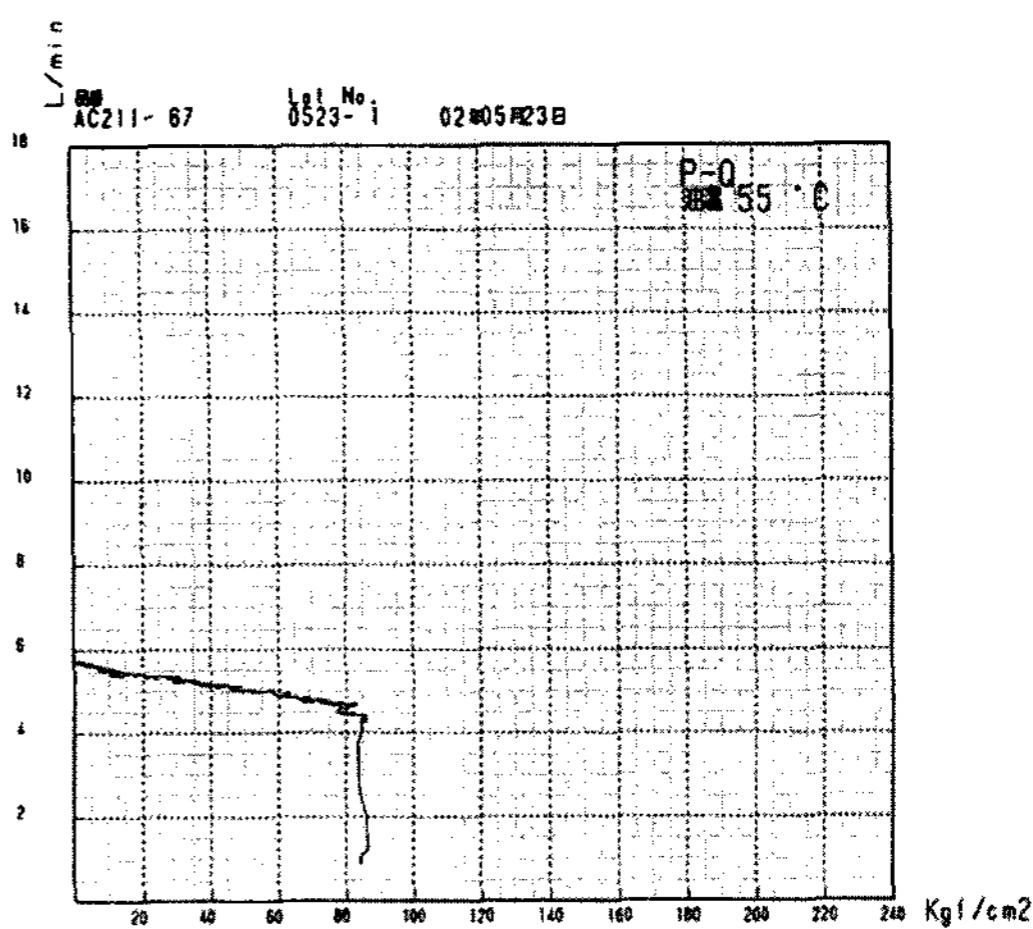


Fig. 4 Circuit for pressure ripple test of spiral pipe

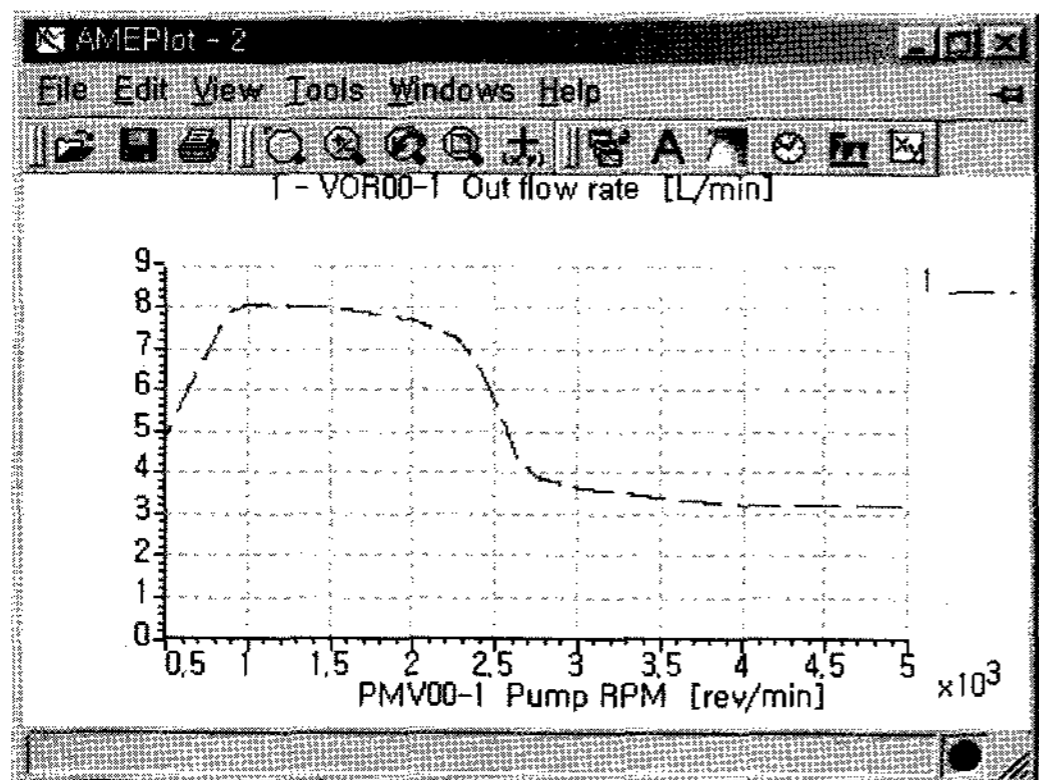
Fig. 6은 맥동을 흡수하는 관로를 개발하기 위해 하나의 나선 파이프와 이중 나선 파이프를 비교하기



(a) Experimental results

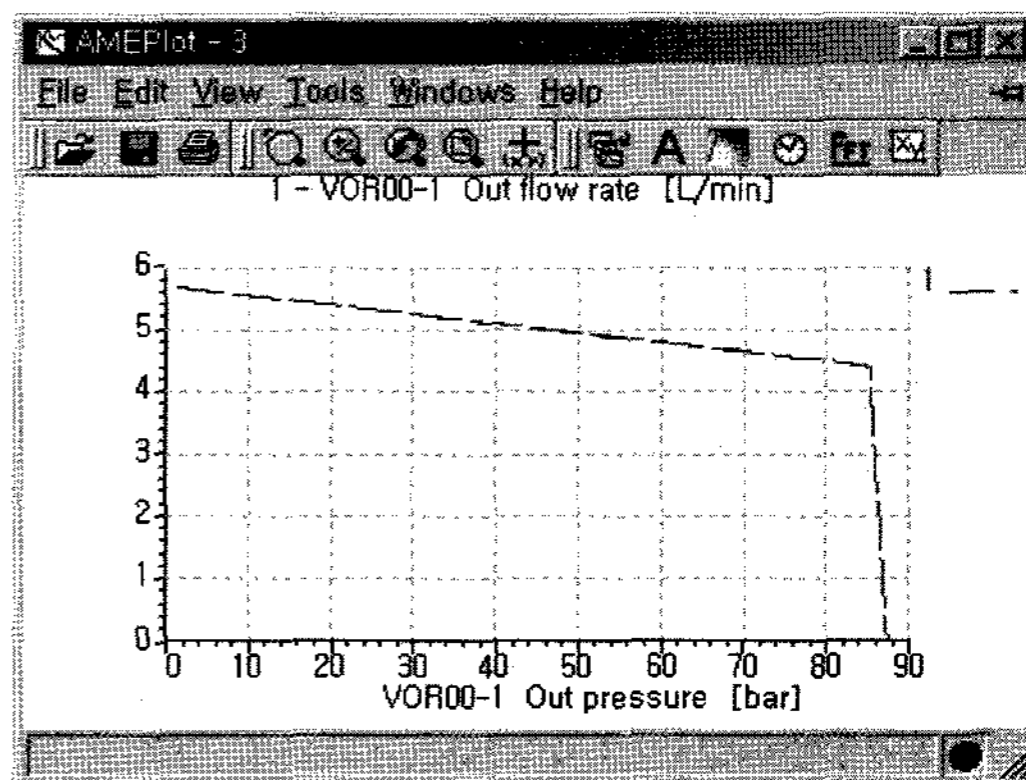


(a) Experimental results



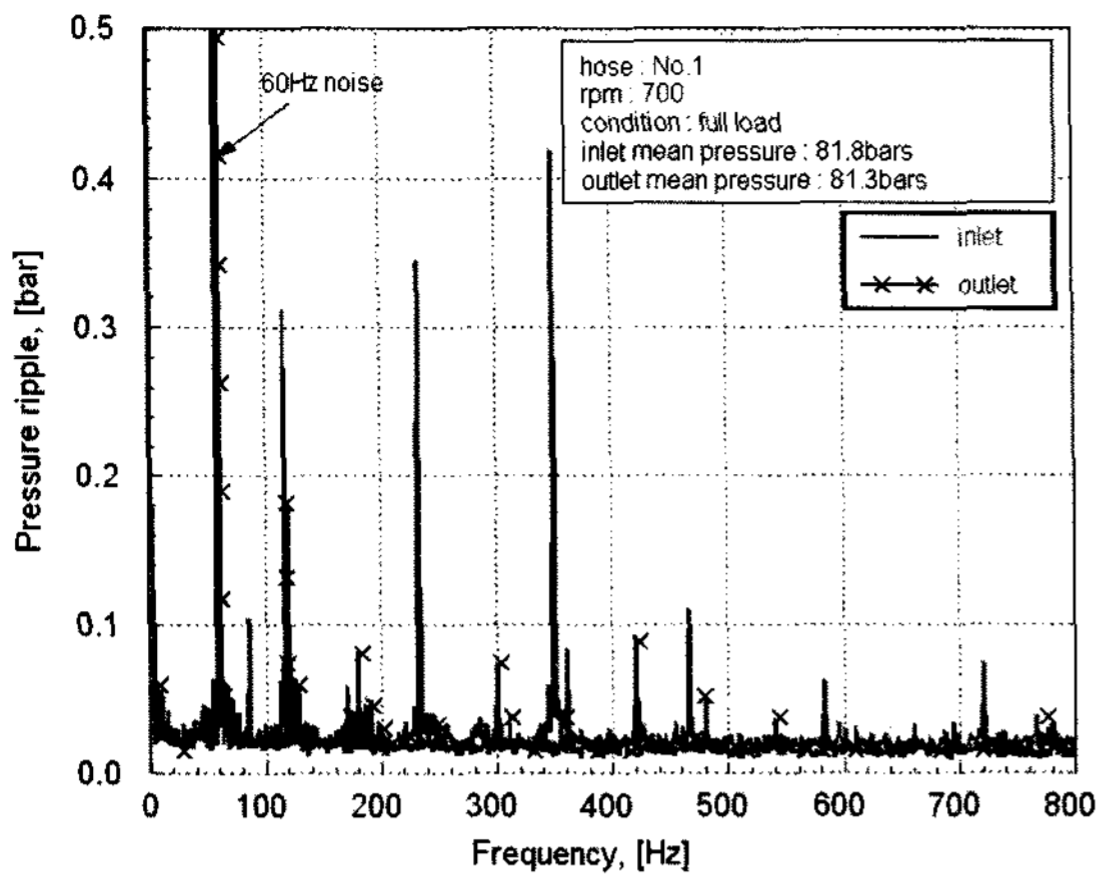
(b) Simulation results

Fig. 2 Comparison of flow rate on the rotational velocity



(b) Simulation results

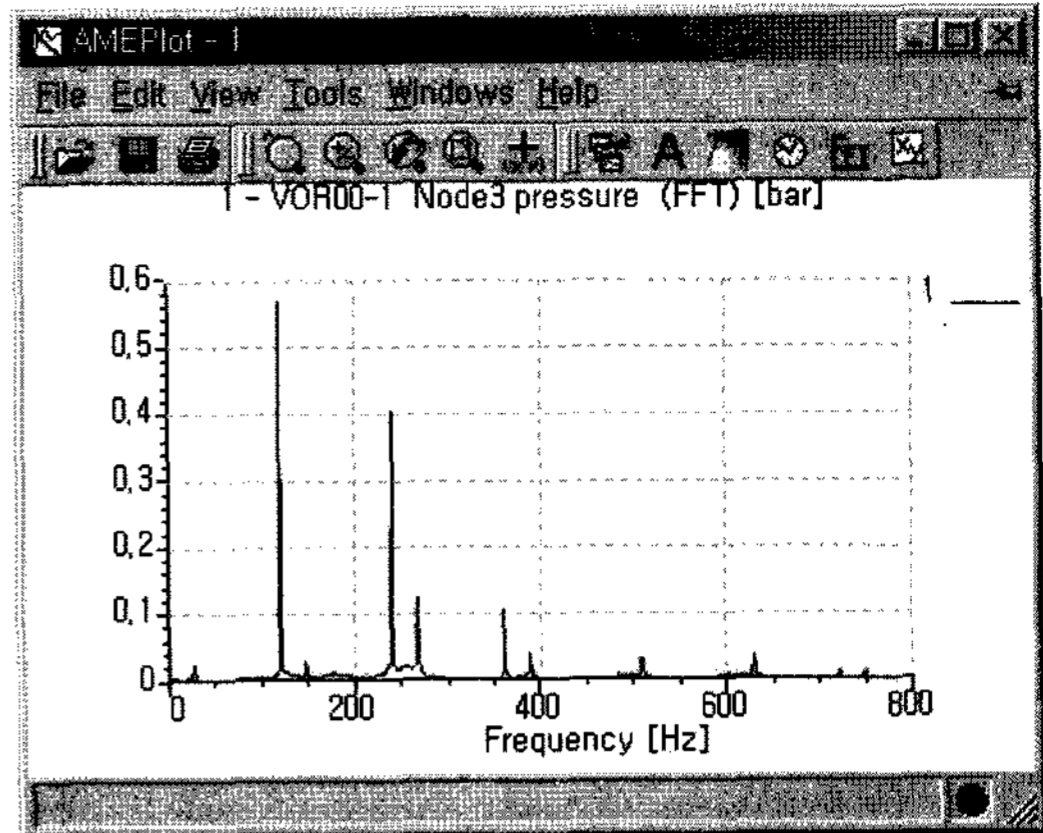
Fig. 3 Comparison of flow rate on the discharge pressure



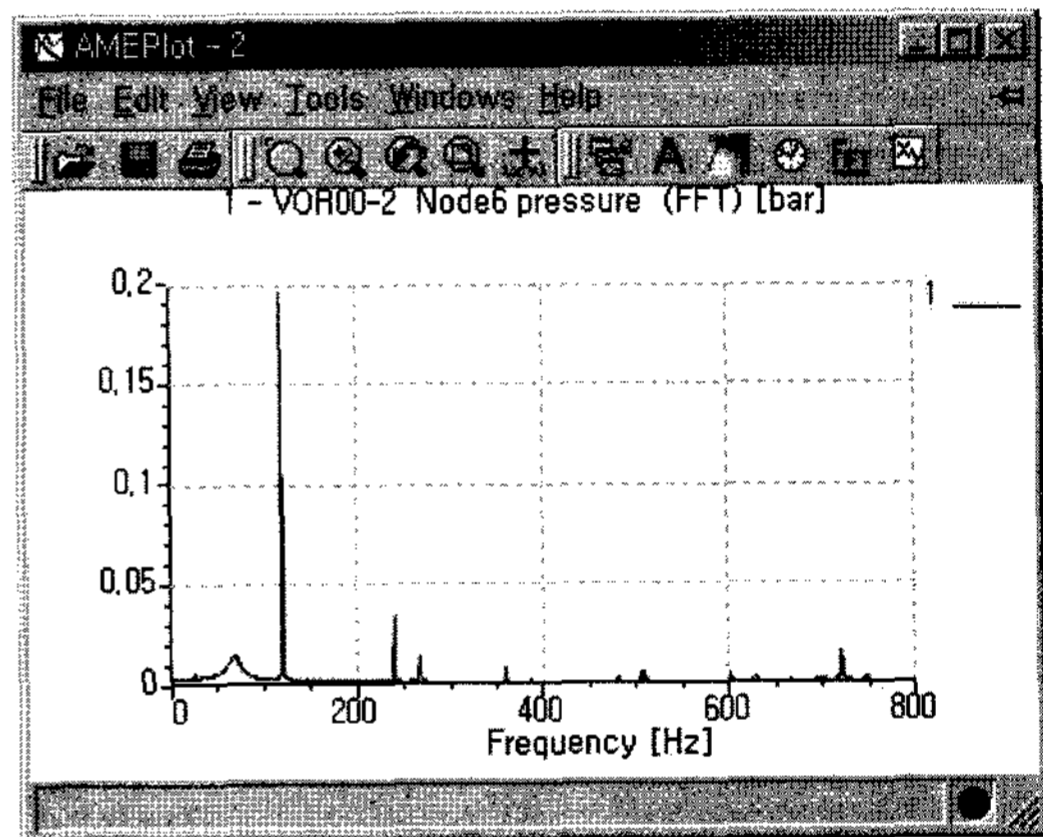
The measured pressure ripple of No.1 hose : 700rpm, full load condition

Fig. 5 Test results on the pressure ripples of spiral pipe

위한 모델로 (a)는 나선 파이프가 하나인 경우이고, (b)는 이중 나선 파이프를 분지 관로 형태로 모델링한 경우로 해석모델은 실험결과를 이용하여 조화 신호의 하위모델(Harmonic signal source sub model)을 이용하였고, 나선 파이프의 입력조건은 실험결과와 동일하게 설정하였다. 특히 나선 파이프는 소음 제어에 가장 효과가 있다고 알려진 나선 구조, 길이에 대한 설계 변수 민감도를 해석할 수 있는 파이프라인을 모델링 하였다. Fig. 7에는 하나의 나선 파이프(a)와 2중 나선파이프(b)에 대하여 해석한 결과를 나타낸 것으로 2중 나선 파이프를 사용하였을 경



(a) Single spiral pipe



(b) Double spiral pipe

Fig. 7 Simulation results on the pressure ripples of spiral pipe

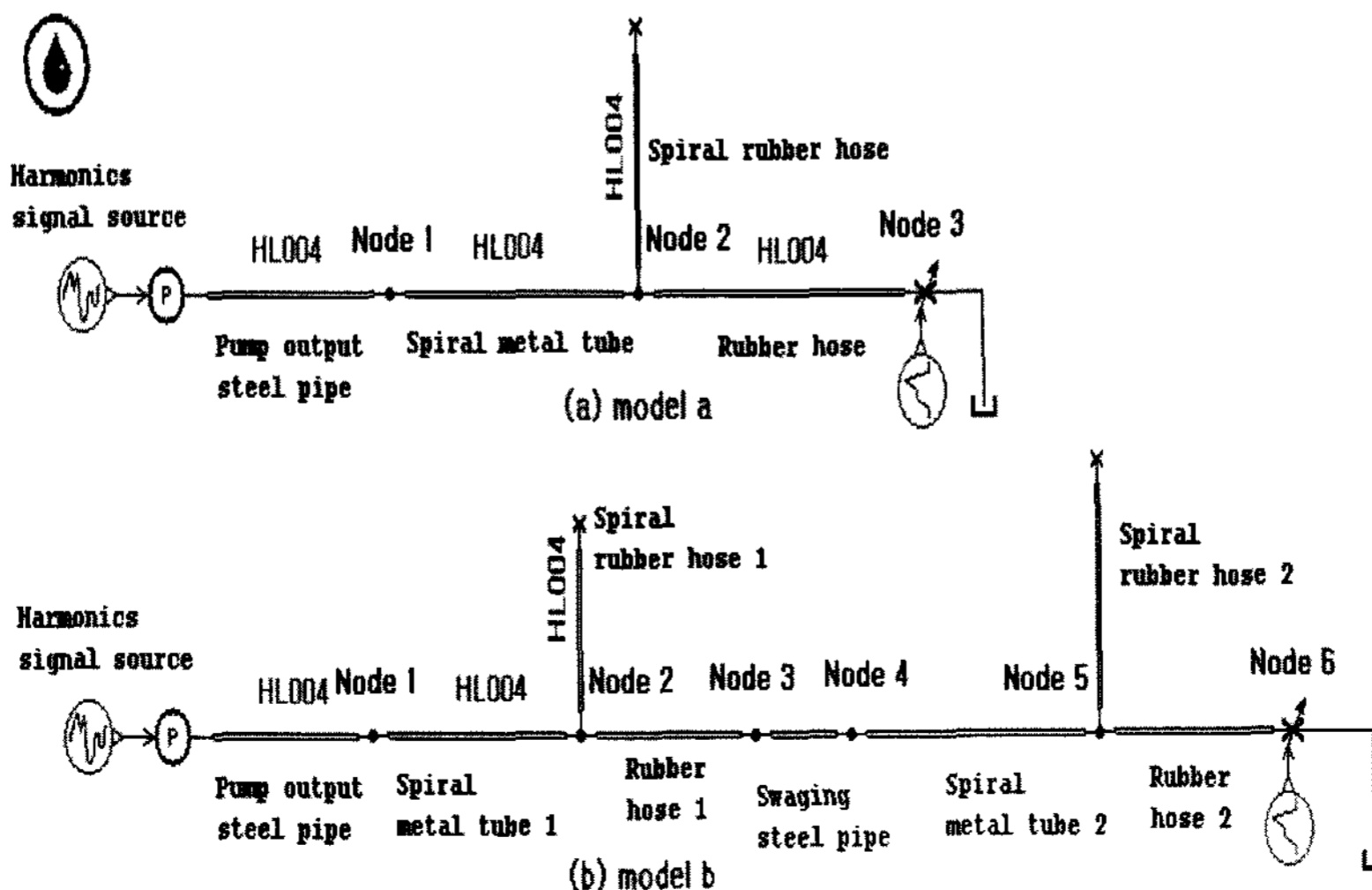


Fig. 6 Simulation modelling for pipe of single and double hole

우 전 주파수 영역에 걸쳐 압력맥동의 감쇠효과가 큰 것을 알 수 있다.

2.3 기어박스 모델링

조향기어박스는 Fig. 8에 나타낸 것과 같이 로터리 밸브, 토션바(Torsion bar), 실린더, 랙과 피니언 기어(Rack & Pinion gear), 타이 로드(Tie rod) 등으로 구성되어 있으며 실린더 내의 내부누설 특성 및 점성마찰 특성은 실험 결과를 이용하여 해석 모델을 구축하였다.

Fig. 9에는 조향기어박스 조립품의 특성을 평가하기 위한 실험의 개념을 나타내었고, 이 계획에 따라 각 실험 모드별 제어요소와 분석데이터를 정리하여 Table 1에 자세히 나타내었고, Fig. 10에는 각 단품의 실험결과와 동작 특성을 고려하여 기어박스 전체의 해석모델을 나타내었다.

기어박스 조립품 해석모델에서 토션바의 모델링

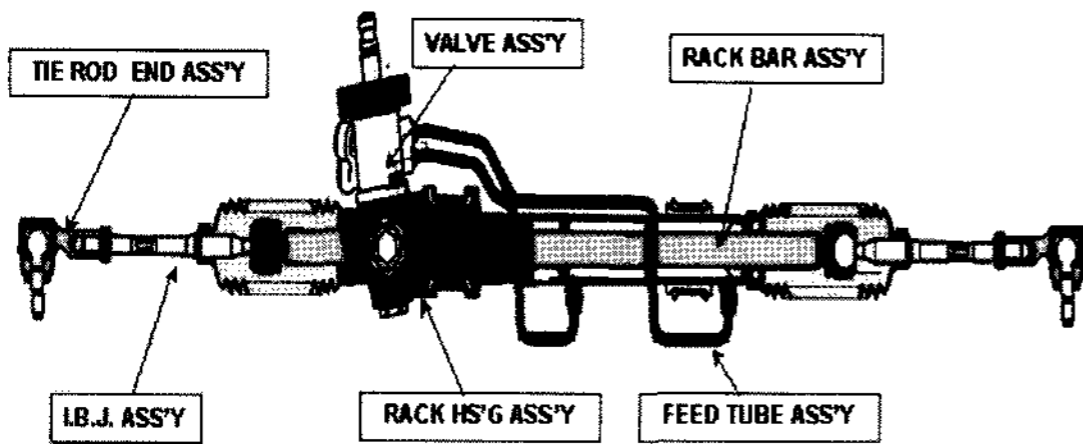


Fig. 8 Gear box assembly for power steering

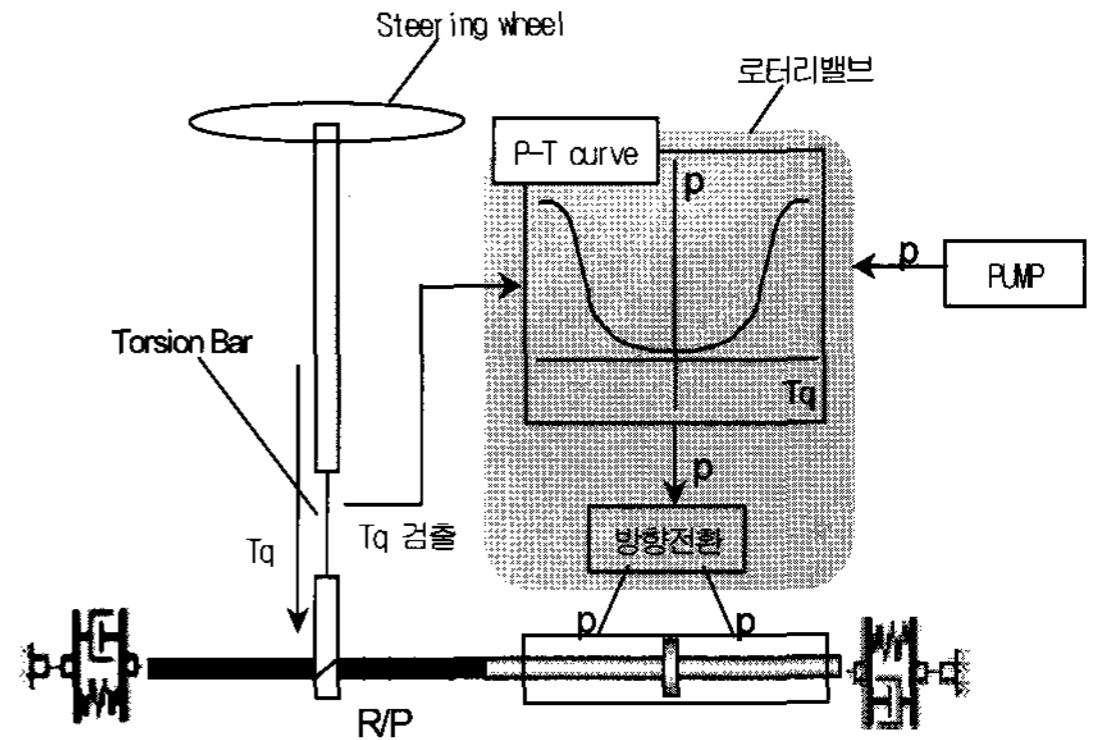


Fig. 9 Schematic circuit diagram for test of gear box ass'y

Table 1 Test mode and analysis data for gear box assembly

Test mode	Pinion feedback	Rack Feedback	Pump rpm	Data
Rack fix test	Angle control	Displacement = 0	Constant	Angle, Torque, Pressure
Rack free test	Angle control	Load = 0	Constant	Angle, Torque, Displacement
Rack force test	U/Joint remove	Displacement = Control	Constant zero	Displacement, Load
Efficiency test	Angle control	Load = Constant	Constant	Angle, Torque, Displacement, Load
Internal leakage test	Torque control	Displacement = 0	Constant	Torque, Flow Rate Small

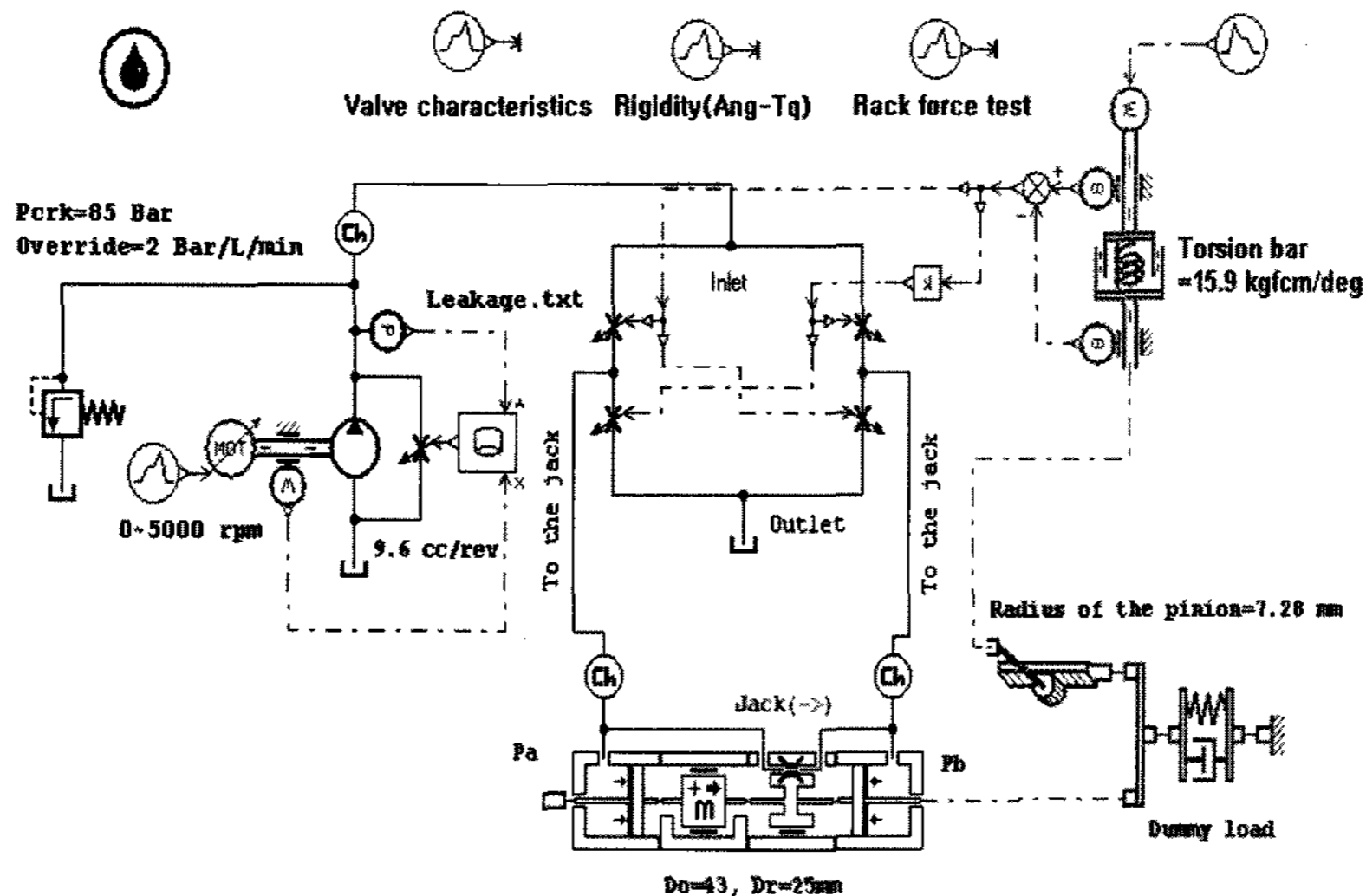


Fig. 10 Schematic circuit diagram for simulation of gear box ass'y

을 검증하기 위해 입력토크에 대한 하중 특성의 실험결과를 Fig. 11에 나타내었고, 민감도 해석 결과를 이용하여 토션바의 보강된 모델에서 감쇠비율(Damping rating)을 0.04 Nm/(rev/min)로 설정한 상태에서 해석결과는 Fig. 12와 같다. 두 그림을 비교하여 보면 히스테리시스는 거의 유사한 경향을 보이고 있으나 기울기가 약간의 차이가 있는 것을 볼 수 있다. 여기서 감쇠비율(Damping rating) [Nm/(rev/min)]은 물리적으로 점성마찰 계수(Coefficient of viscous friction)와 같은 개념으로 토션바의 마찰에 대하여 고려할 필요가 있다. 그리하여 감쇠비율을 0 (run1), 0.02 (run 2), 0.04 (run 3), 0.06 (run 4)으로 변화시키면서 해석한 결과를 Fig. 13에 나타냈다, 여기서 감쇠비율이 커질수록 마찰이 크게 작용하여

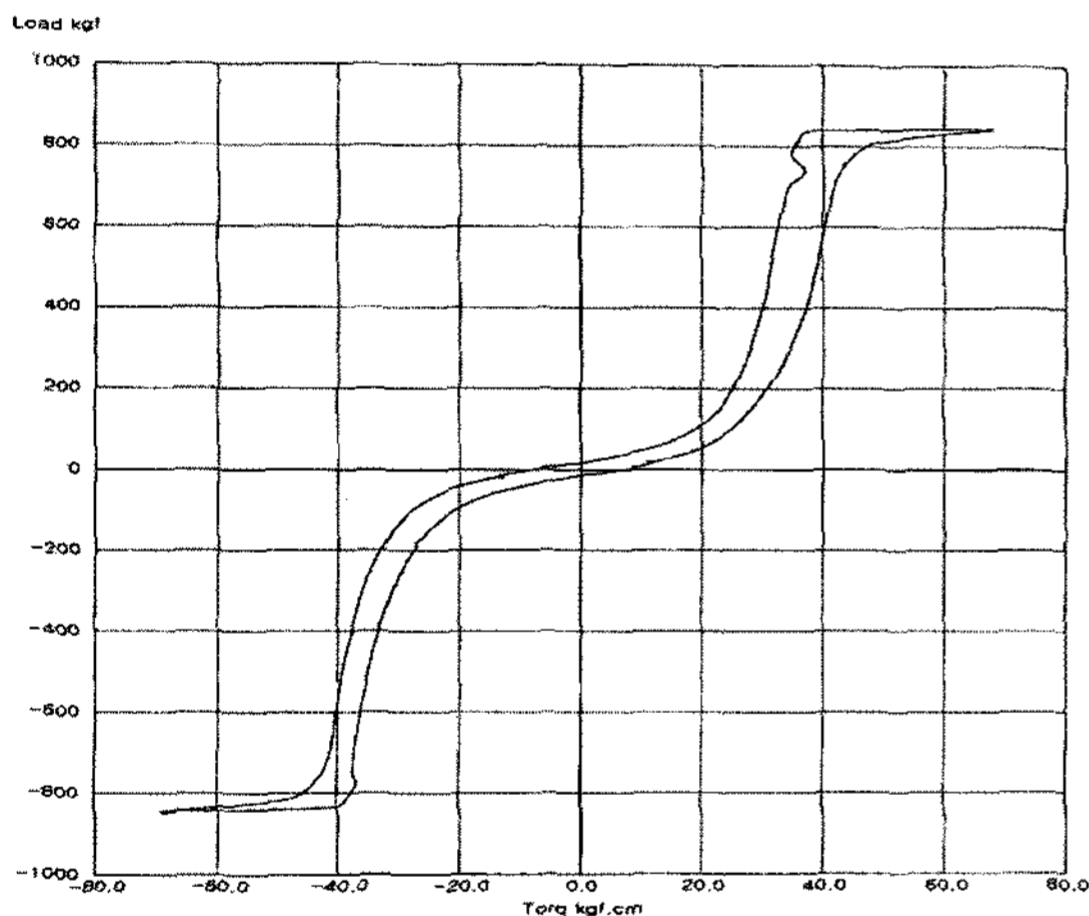


Fig. 11 Test results of load according to input torque

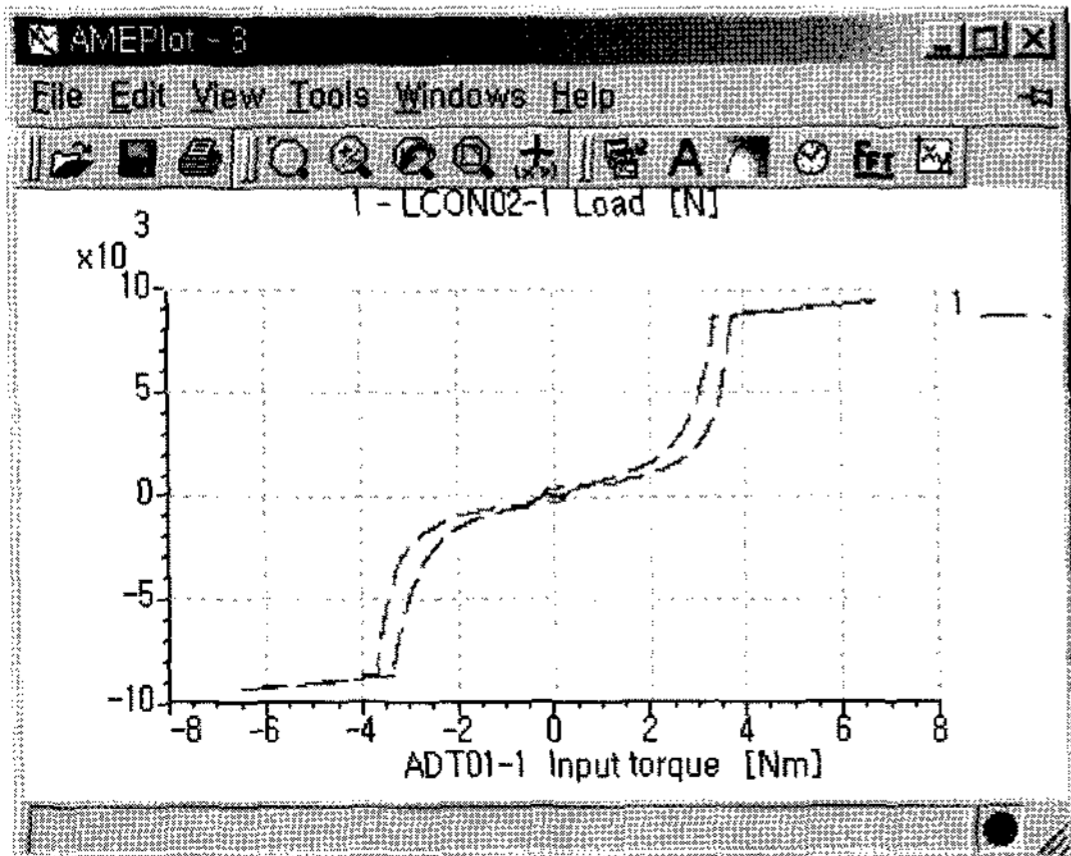


Fig. 12 Simulation results of load according to input torque

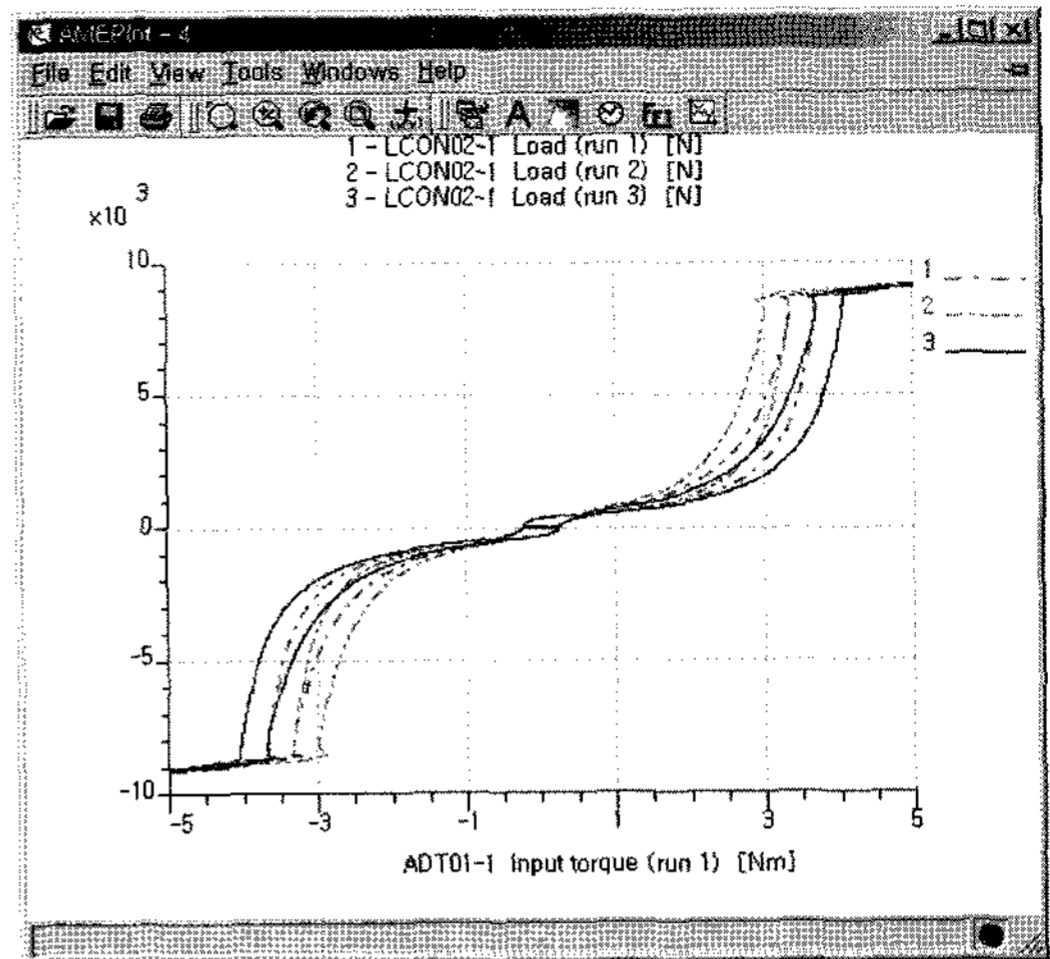


Fig. 13 Sensitivity analysis of torsion bar stiffness

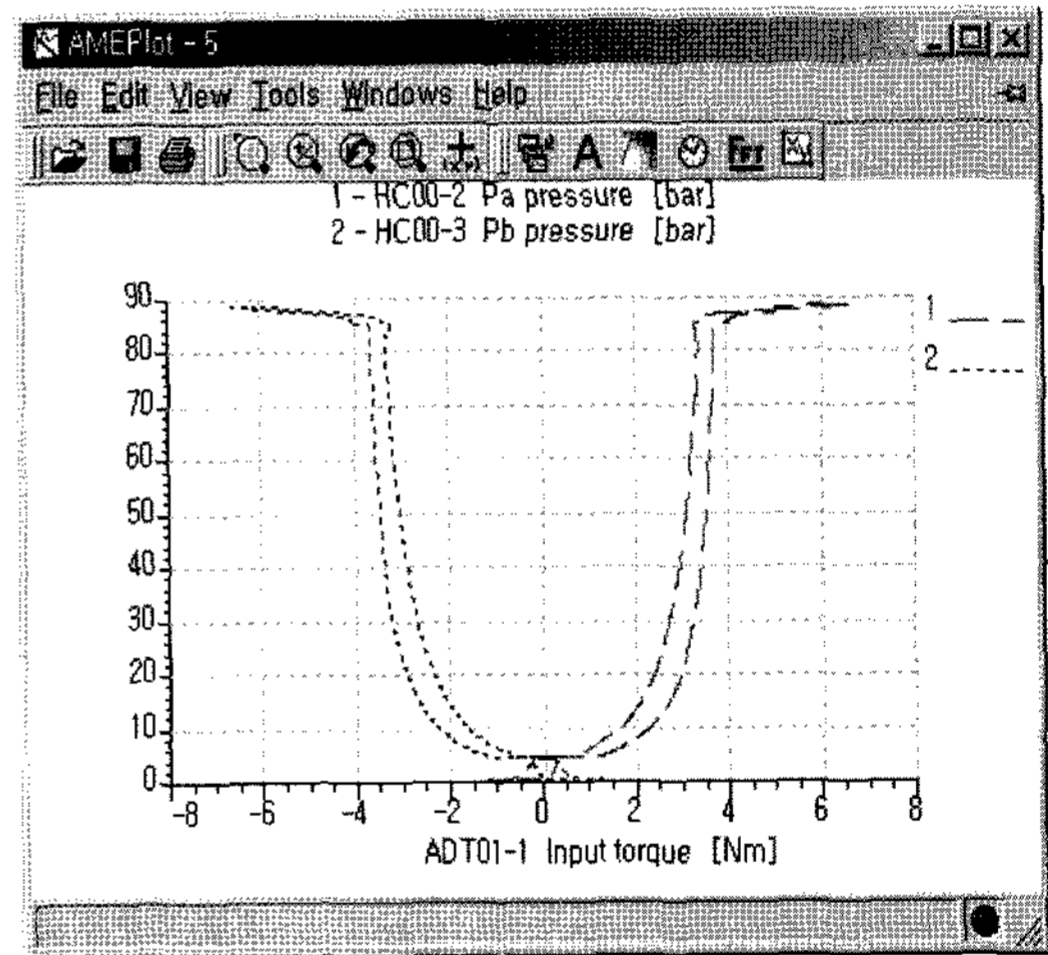


Fig. 14 Simulation results of pressure characteristics according to input torque

히스테리시스가 커지는 것을 알 수 있고, 또한 토션바의 강성이 증가할수록 같은 각도를 돌리기 위해서는 더 큰 토크가 필요한 것을 알 수 있다. 기어 박스의 조립품에서 로터리 밸브의 신뢰성을 검증하기 위해 입력토크에 대한 실린더 양단의 압력 특성에 대한 해석결과는 Fig. 14와 같이 좌우의 대칭이 매우 잘 이루어지고 있는 것을 볼 수 있다. 해석결과는 Fig. 15에 나타낸 실험결과와 비교하여 보면 거의 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

특히, 로터리 밸브의 개도에 대한 자세한 사양은 부품 제조업체의 보안으로 인하여 정확한 설계사양

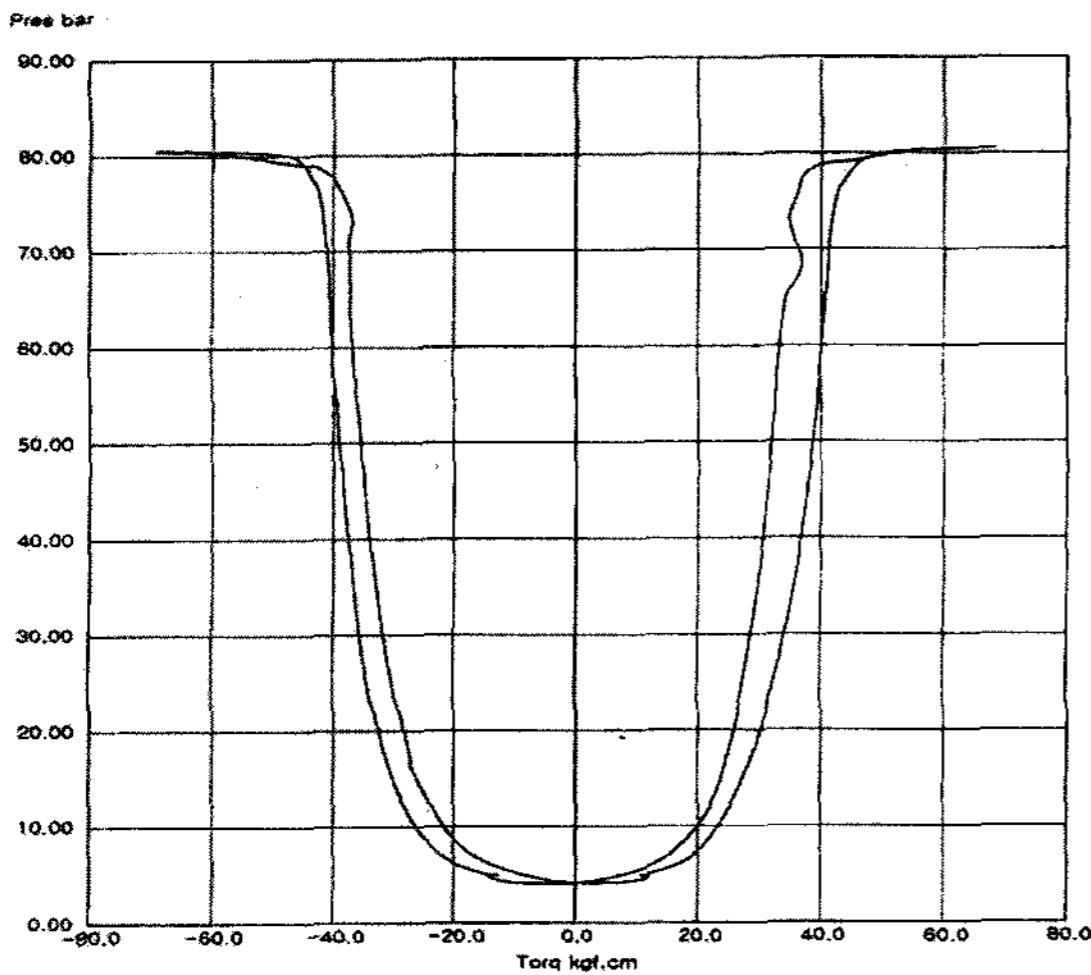


Fig. 15 Experimental results of pressure characteristics according to input torque

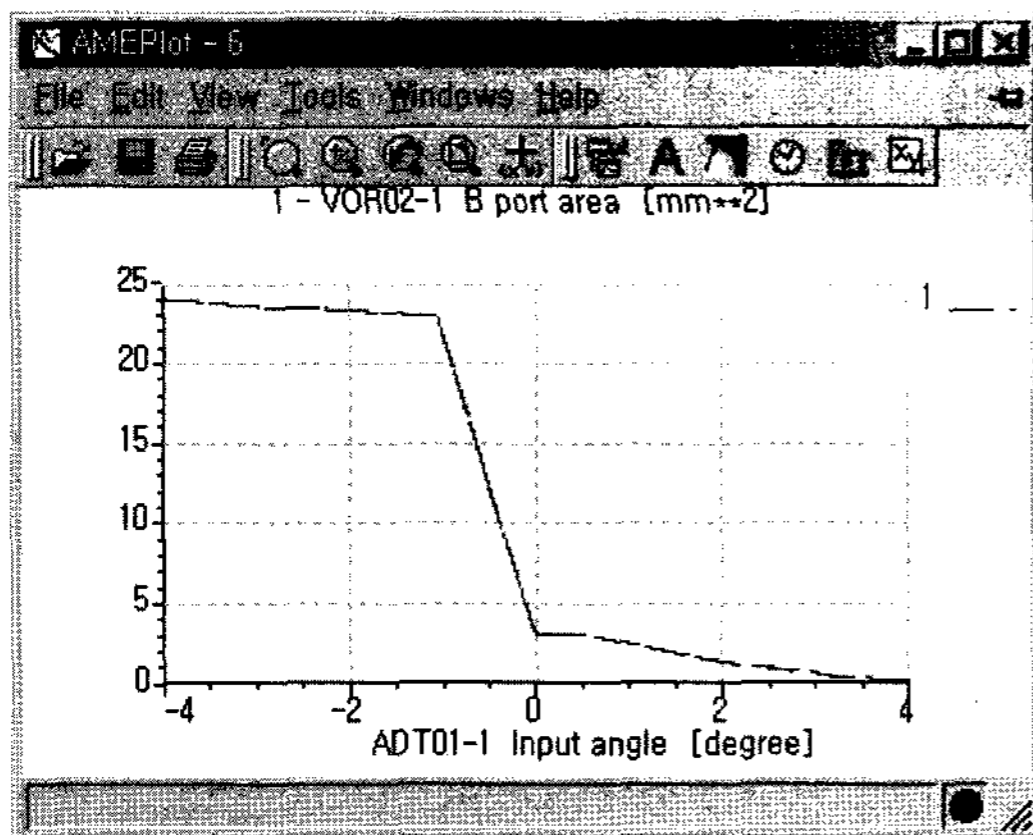


Fig. 16 Open area according to input angle of gear box ass'y

을 입수할 수가 없어 Fig. 15에 나타낸 기어박스의 특성 실험결과를 이용하여 해석하였다. 이때 개도량 예측에 사용한 로터리 밸브의 개도특성 해석 결과는 Fig. 16과 같고, 이것은 토션바의 입력 각도에 대한 개도의 변화량으로 작성된 데이터 파일을 기어박스 조립품에서 실시한 조향 특성 실험결과와 거의 일치하도록 수정하여 해석에 이용하였다.

3. 전체 유압회로와 시스템 모델링

유압식 동력조향장치 시스템에 대한 각 부품 및 하위 시스템에 대한 모델링을 통해 전체 회로에 대하여 Fig. 17과 같이 AMESim을 이용하여 모델링을

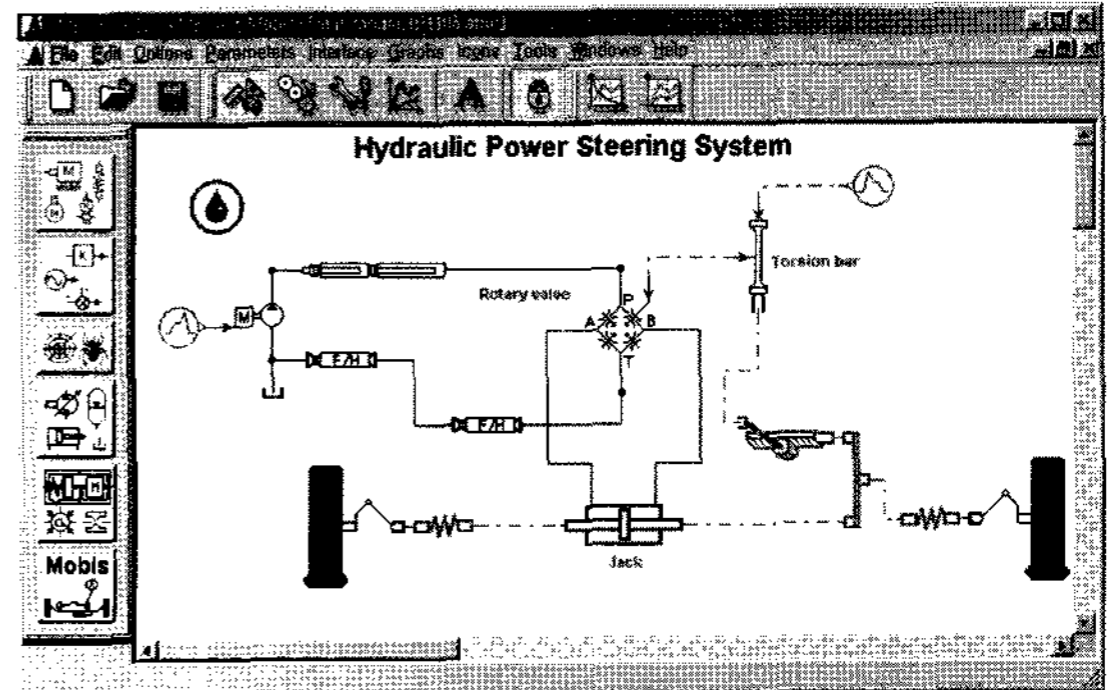


Fig. 17 Full circuits modeling for hydraulic power steering system

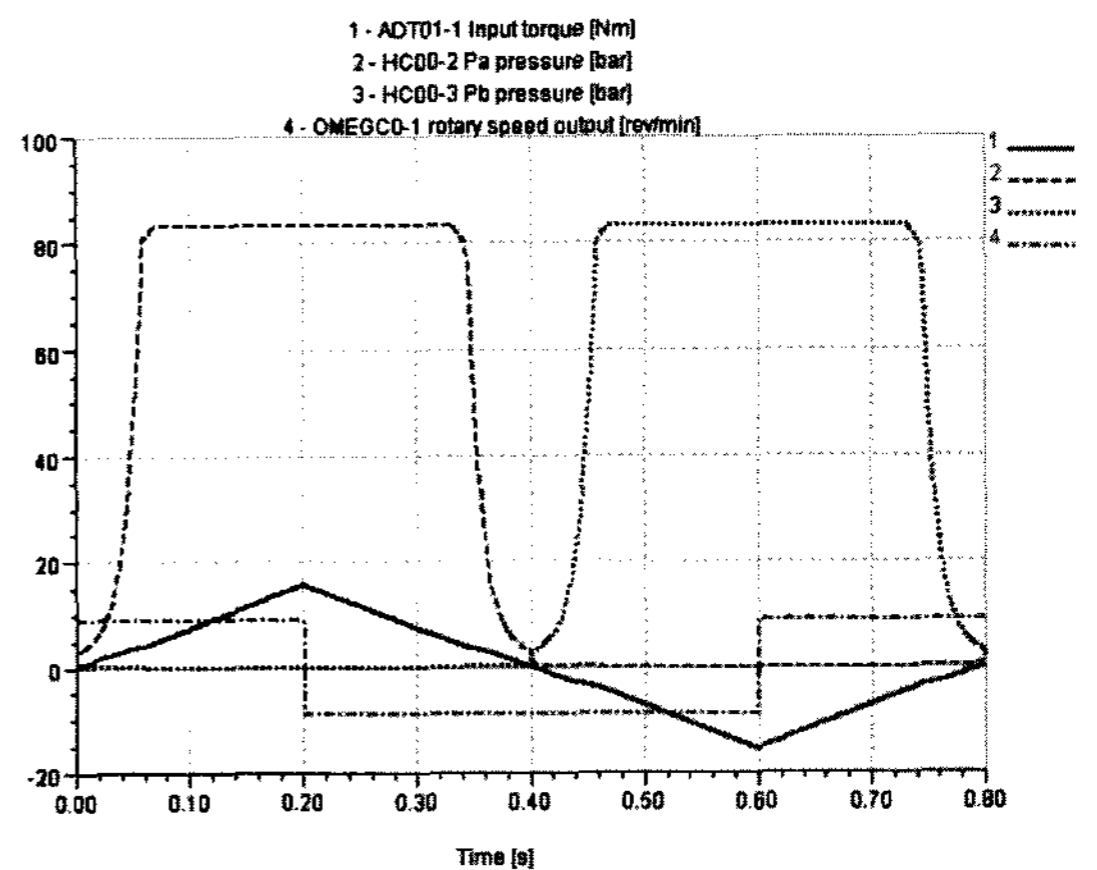


Fig. 18 Dynamic characteristics according to revolution of steering wheel

수행하였다. 이것은 타이어에서 발생하는 관성 등을 포함하여 유압식 조향장치에서 발생할 수 있는 모든 조건을 고려한 모델링이다. 특히 각 부품에 대한 모델링은 사용자의 편의를 위해 AMESim 모델링 환경에서 독립적인 부문유사기호(Category icon)를 만들어 사용자가 다른 제품을 해석할 때 쉽게 모델링을 할 수 있도록 간단한 기호를 사용하여 표현하였다.

Fig. 18에는 조향 휠의 회전속도를 10rpm으로 0.8sec동안에 우회전후 좌회전하였다가 원래상태로 회전하였을 때 토션바에 작용하는 토크와 실린더 내부의 압력 상승 시간관계 등의 동특성 해석결과를 나타내었다. 그림에서 토션바에 작용하는 토크는 거의 선형적인 삼각파형을 나타내고 있고, 실린더 내부의 압력상승 시간이 0.06sec정도로 빠르게 상승

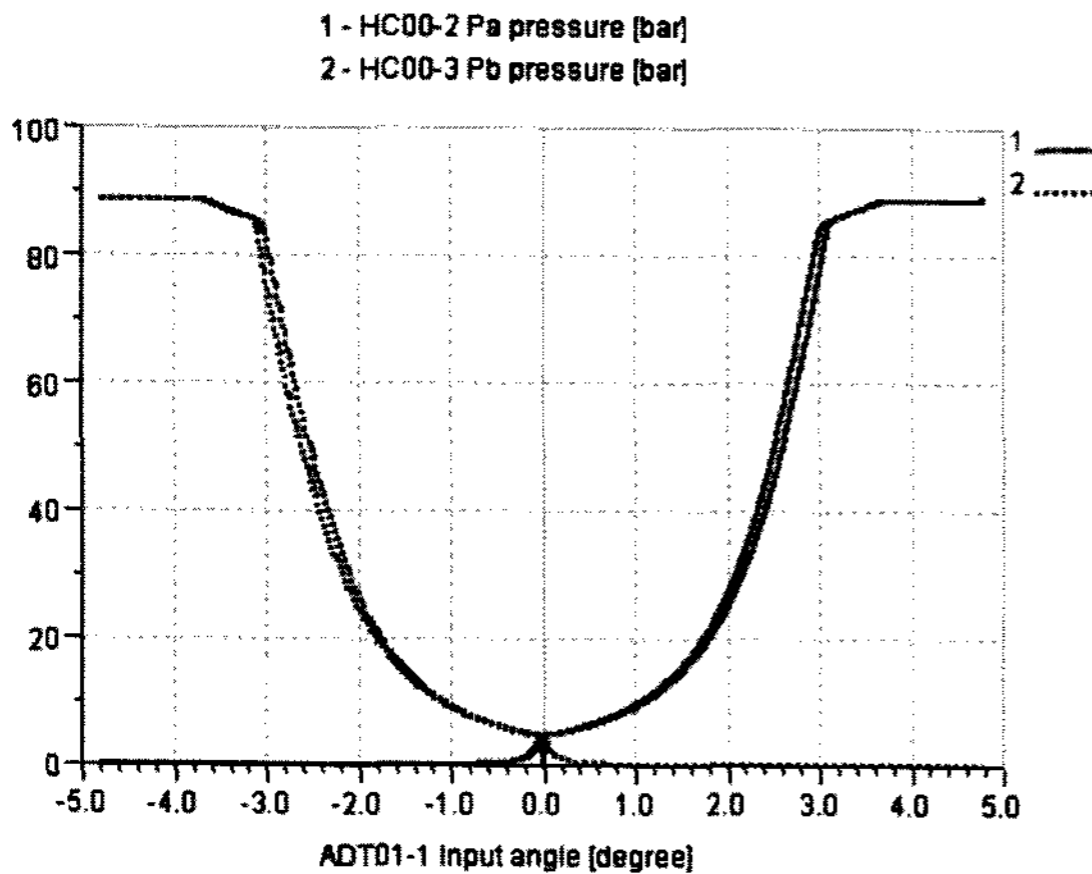


Fig. 19 Pressure rise of cylinder according to input angle of steering wheel

하고 있는 것을 알 수 있다. 그리고 본 해석모델에서는 관로모델이 포함되어 있으나, 일반적으로 관로모델이 있는 경우 해석 시간이 많이 소요되기 때문에 전체 해석에서는 관로가 없는 모델을 이용하여 해석하는 것이 바람직하다, 그 해석예로 Fig. 19에 나타난 조향 휠의 입력 회전각도에 따른 실린더의 압력 상승관계를 해석 하였을 때 관로가 없는 경우는 0.64sec, 관로를 포함한 경우는 512sec로 거의 800배 많은 시간이 소요되었지만 시스템의 특성을 나타내는 정확성에는 차이가 거의 없는 것을 확인하였다. 또한 설계사양 검토 및 문제점을 분석하기 위해서는 부품 및 하위 시스템 모델링 하에서 해석을 수행함으로써 모델링 시간의 감소와 분석이 용이하고, 특히 해석의 신뢰성을 높이는 장점이 있다.

4. 결론 및 제안

유압식 동력조향장치에서 전체 시스템에 대한 신뢰성 있는 해석모델을 구축하기 위해 각 부품의 기능 및 특성분석과 부품 모델링, 하위 시스템 과 전체 유압 회로에 대한 모델링을 실시하여 해석을 수행하였다. 실험결과와 비교를 통해 신뢰성 있는 해석 모델을 개발하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 전체 시스템에서 사용하고 있는 각 부품의 기능 분석과 분석모델 개발을 통해 해석 모델을 개발하였다.
- 2) 시스템 특성 분석을 위해 하위 시스템에 대한 모

델 개발을 통해 기능 및 사양을 분석하였으며, 민감도 해석을 통해서 시스템 사양 및 조정 변수에 대한 해석을 수행하였다.

- 3) 개발된 해석모델을 통해 유압시스템의 제작 이전단계에서 해석을 수행함으로써 설계의 타당성 검증 및 시스템의 거동을 확인하는 것이 가능하며, 이를 통해 개선방안 도출 및 각 부품의 치수 등에 대해 정량적으로 성능을 분석 할 수 있음을 확인하였다.
- 4) 해석 모델링 개발을 통해 향후, 신제품을 개발할 때 기존모델의 재사용 및 문제점 분석이 사전에 가능하여 신제품 개발 기간 단축 및 문제점 분석이 용이하고 해결에 활용이 가능하다.

References

- 1) J. H. Yu., F. Johnson, F. Iwami, N. Verrecchia, and E. KOjima, "Experimental Evaluation for Fluidborne Noise Attenuation in Tuning Cables and Hoses of Automotive Power Steering Hydraulic Systems," SAE 1999-01-1777, 1-6, 1999.
- 2) J. S. Jang and K. H. Kim, "A Study on the Discharge Pressure Ripple Characteristics of Variable Displacement Vane Pump," Transactions of KSAE, Vol.11, No.3, pp.106-114, 2003.
- 3) D. T. Kim and J. Kim, "Measurement of Flow Ripple Generated by Balanced Vane Pumps In Automotive Power Steering Systems," Transactions of KSAE, Vol.8, No.6, pp.70-78, 2000.
- 4) J.-Y. Shin, S.-G. Jeon and H.-J. Hwang, "Development of Hydraulic Power Steering System Dynamic Model for Prediction of Pressure Ripple in Hydraulic Lines," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.527-532, 2003.
- 5) T. O. Tak and B. H. Hwang, "Modeling of Steering Systems for Vehicle Dynamic Analysis," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.741-746, 1997.
- 6) J. S. Jang and Y. H. Yoon, "Analysis Model Developments of Hydraulic Power Steering System," Spring Conference Proceedings, Vol. II, KSAE, pp.674-680, 2007.