

PS-LAP : 피스톤 통합 해석 프로그램

김지영·김지운·조명래·한동철

서울대학교 기계항공공학부 대학원

부산대학교 기계공학부

현대자동차 선행연구소

서울대학교 기계항공공학부

PS-LAP : Piston Skirt Lubrication Analysis Program

Ji-young Kim, Jee-woon Kim, Myung-Rae Cho and Dong-Chul Han

School of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National Univ.

School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.

Hyundai Motor Co. Research Institute

School of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National Univ.

Abstract - This paper reports on the development of the analysis program of the piston skirt system, PS-LAP. It is essential to verify the stability of the design and to improve the performance of the system. In order to do that efficiently, it is required that integrated and interactive simulation analysis program. PS-LAP is developed in the base of the object-oriented, capsulation, modulization, OLE(objected linking and embedding) and variational design theory. So it contain the expandability and flexibility of the structure. In addition to that, it is programed to make the convenient user interface by using the visualization programming. It can support the modification of the piston skirt shape, lubrication condition and so on. It is expected to reduce the money and effort for design the piston skirt system.

Key words : Piston, application program, piston skirt, tribology, lubrication, friction, skirt motion, tilting, eccentricity

1. 서론

현재 환경 문제와 에너지 문제는 차량의 저공해, 고효율의 운전 조건을 요구하고 있다. 이러한 요구와 더불어 소비자들의 고성능, 저 연비 차량에 대한 욕구 상승 및 소비 패턴의 변화는 차량의 설계 및 개발을 점점 더 어렵게 만들고 있다.

따라서 자동차 메이커들은 이러한 어려운 조건 속에서 소비자들의 욕구에 부응하는 자동차 개발과 그에 따른 자동차 시장의 선점을 위해 막대한 연구비를 투자하고 있다. 자동차의 심장이라 할 수 있는 엔진은 차량의 성능에 직접적인 영향을 미치는 핵심 부분으로, 고성능 엔진 개발을 위한

각 사의 경쟁은 치열하다. 새로운 엔진의 개발에는 막대한 예산과 시간이 소요되므로, 각 자동차 메이커에서는 엔진의 개발 단계에서 엔진의 성능 및 특성을 예측할 수 있는 해석 프로그램을 이용하여 엔진 개발에 드는 막대한 경제적, 시간적 비용을 줄이고 있다. 특히 엔진을 구성하는 주요 기계 요소인 크랭크샤프트, 엔진 베어링, 피스톤계 및 밸브 트레인 계에 대한 성능 및 특성 해석을 미리 수행함으로써 엔진의 소형화, 최적화 및 마찰 손실의 저감을 통한 연비 향상 등 성능의 극대화를 꾀하고 있다. 따라서 엔진 요소 설계 및 성능 예측을 위한 통합 해석 패키지 지의 중요성은 점점 더 중요해지고 있으며 이에 따라 선진 자동차 메이커들은 이러한 통합 패키지의 개발

및 활용에 적극적이다. 이에 엔진 요소 설계 및 특성 해석용 통합 소프트웨어 개발의 일환으로 본 연구진에서는 엔진의 피스톤 시스템의 동특성 및 윤활 특성을 예측하고 설계 단계에서 쉽게 활용할 수 있는 해석 프로그램인 PS-LAP (Piston Skirt Lubrication Analysis Program)을 개발중이다.

전체 엔진에서 발생하는 마찰 동력 손실의 약 20%가 발생하는 중요 마찰 부의 하나인 피스톤 스커트 부의 마찰 동력 손실 저감은 엔진의 내구성 향상과 효율 증대에 큰 기여를 할 수 있다. 그러나 피스톤 스커트의 복잡한 형상과 운동 특성은 설계 단계에서 많은 수의 설계 변수에 의해 영향을 받는다. 따라서 마찰 동력 손실을 줄이고 내구성을 높이기 위한 피스톤 스커트 설계 개선을 위해 막대한 양의 실험을 수행해야 하며 이는 거의 불가능하다고 하겠다. 이에 피스톤 스커트의 동역학 해석 및 윤활 해석을 위한 프로그램을 개발하였다.

이 프로그램은 본 연구진에서 현재 개발한 IV-TAP(Integrated Valve Train Analysis Program)과 함께 엔진 해석 및 설계 통합 프로그램인 IEDAP(Integrated Engine Design and Analysis Package)의 한 모듈로써 통합될 예정이다. 본 논문에서는 지금까지 개발된 PS-LAP에 대한 소개를 하고자 한다. 본 프로그램을 통해 피스톤 스커트 설계에 드는 시간 및 비용의 획기적인 향상을 기대하는 바이다.

2. PS-LAP 개발

피스톤 시스템은 일반 기계 요소의 설계와 마찬가지로 많은 요소들을 고려하여 설계하여야 한다. 피스톤 스커트의 운동 궤적, 최소 유막 두께 등의 특성치를 결정하는 여러 요소들을 현재까지는 직렬식, 순차적 방식으로 설계함으로써 설계, 재설계 과정을 수없이 반복함으로써 서로 유기적으로 연결되어 있는 각 요소가 전체 시스템에 미치는 영향을 해석하고 제어하기가 쉽지 않았다. 이러한 설계 방식은 효율적 측면에서나, 최적의 설계치를 결정하는 측면에서 많은 어려움이 있다. 따라서 PS-LAP은 병렬식, 객체 분산형 프로그래밍을 채택하였다. 이는 시스템의 유연한 반응과 각 모듈의 독립성을 확보시킴으로써 각

요소의 설계 인자를 정확히 판별할 수 있다.

이를 위해 각 요소의 모듈화와 계층화, 또한 독립성을 보장하기 위한 캡슐화 기능을 포함하고 있는 C++ 언어의 클래스를 이용하여 구성하였다.

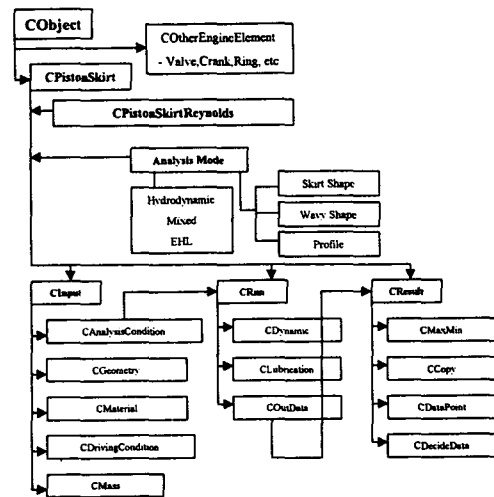


Fig. 1 Structure

PS-LAP 프로그램의 모듈 확장과 엔진 프로그램과의 통합을 위해 COtherEngineElement 모듈과 COtherType 모듈을 이미 구성해 놓았다.

CPistonSkirt 시스템 모듈에는 입력에 관한 모든 계산을 수행하는 CInput, 데이터의 처리 및 실제 해석을 수행하는 CRun, 계산된 결과를 사용자에게 보여주는 CResult로 구성된다.

CInput 객체는 피스톤 시스템의 질량, 물성치, 기하학 형상, 작동조건, 해석 조건으로 입력 사항을 구분하여, 사용자가 원하는 시스템의 사양을 입력할 수 있도록 하였다. 해석을 수행하기 전에 먼저 해석 모드를 결정하여야 한다. 해석 모드는 동수압 윤활 해석과 혼합 윤활 해석 등의 윤활 조건에 대한 고려와 함께 피스톤 스커트 프로파일, 스커트 면의 굴곡 등에 따른 유막의 변화를 포함한다. CRun 객체는 벨브의 거동을 해석하는 CDynamic 모듈과 윤활조건 해석을 수행하는 CLubrication 모듈로 분리되어 있다. CResult 객체는 우리가 자체적으로 개발한 데이터 처리 루틴이 들어가 있다. CResult 객체는 설계에 필요한 여러 결과들을 각각의 데이터 영역에 맞게 그래프로 나타내어 주며, 여러 가지 논문 및 발표 자료에 이용할 수 있게 CCopy 객체에서 윈도우 클

컴포드를 관리하여 기본적인 그림 파일 형식인 비트맵으로 복사가 가능하다.

3. PS-LAP를 이용한 설계

PS-LAP의 실제 적용 사례로서 마찰력을 줄일 수 있는 파라미터 스터디를 한다.

프로그램 메인 메뉴에서 analysis를 선택한다. CInput 객체는 캡슐화되어 있으므로 사용자는 그에 대한 자세한 관리나 구성을 알 필요 없이 쉽게 사용할 수 있도록 프로퍼티시트를 도입하였다.

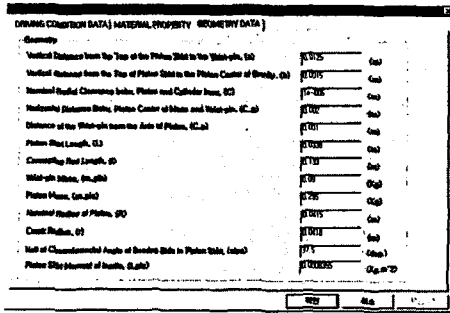


Fig. 2 Input Property Sheet

Fig. 2는 피스톤 스커트 형상에 대한 입력 변수 창을 나타내었다.

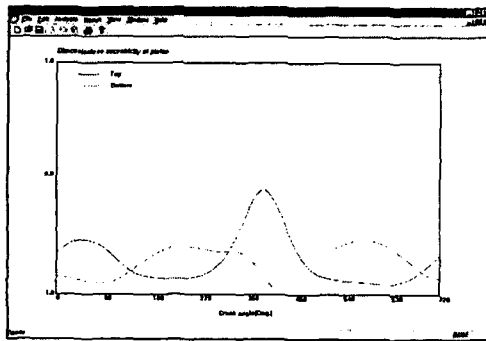


Fig. 3 Nondimensional eccentricity at 1500 rpm, $\sigma=0.5\mu\text{m}$, $C=15\mu\text{m}$, $\eta=0.016$ Pa.s, $m=0.385$ kg

Fig. 3은 1500 rpm에서 피스톤 스커트 면과 실린더 사이의 최소 유효 틈새를 $15\mu\text{m}$, 표면 조도를 $0.5\mu\text{m}$, 오일 점성계수를 0.016 Pa.s, 피스톤 스커트 질량을 0.385 kg일 때 무차원 편심 거리를

나타낸다.

PS-LAP은 720° 전체 크랭크 각도에 대한 피스톤 운동 궤적 및 속도, 변위와 속도를 포함하는 전체 스커트 모션에 대한 그래프뿐만 아니라 마찰력과 손실 동력 등, 설계시 중요하게 고려되는 항목들을 그래프로 나타내어 준다.

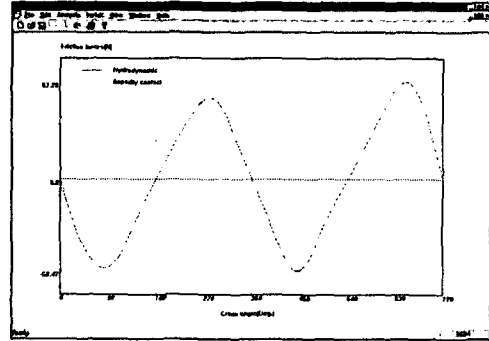


Fig. 4 Total friction force at 1500 rpm, $\sigma=0.5\mu\text{m}$, $C=15\mu\text{m}$, $\eta=0.016$ Pa.s, $m=0.0385$ kg

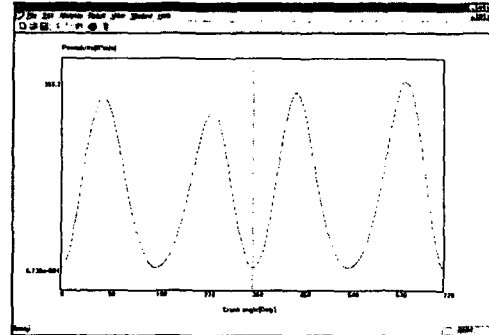


Fig. 5 Total frictional power loss at 1500 rpm, $\sigma=0.5\mu\text{m}$, $C=15\mu\text{m}$, $\eta=0.016$ Pa.s, $m=0.0385$ kg

Fig. 3을 보면 피스톤 스커트가 왼쪽 실린더 라이너 쪽으로 치우쳐서 작동되고 있음을 알 수 있다. 또한 스커트 상부(top eccentricity)와 하부(bottom eccentricity)의 움직임의 볼 때 좌우로 연속적으로 틸팅하면서 움직이는 것을 볼 수 있다. 또한, Fig. 3에서는 피스톤과 실린더 라이너 사이의 간극을 알 수 있으므로 최소 유막 두께를 알 수 있다. Fig. 4는 스커트 면에서 발생하는 마찰력을 나타낸다. 마찰력의 음수 값은 스커트의 방향에 따라 반대 방향으로 마찰력이 작용하는 것을 나타낸다. 그래프에서 최대 마찰력의 크기는 53.26 N 이다. Fig. 5는 크랭크각 한 주기 동안에

발생하는 마찰 동력 손실을 나타낸다.

같은 방식으로 나머지 변수의 값을 고정하고 질량을 0.28 kg으로 바꾸고 실행한 결과는 다음과 같다.

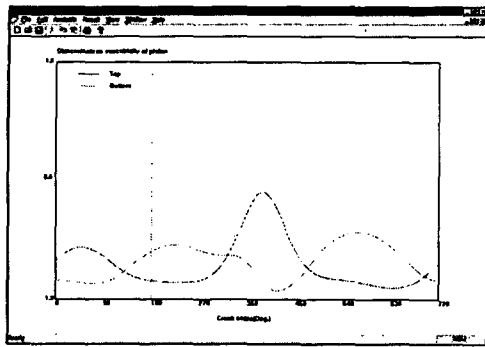


Fig. 6 Nondimensional eccentricity at 1500 rpm, $\sigma=0.5\mu\text{m}$, $C=15\mu\text{m}$, $\eta=0.016$ Pa.s, $m=0.28$ kg

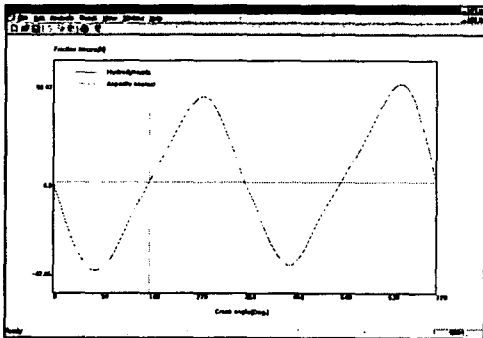


Fig. 7 Total Friction force at 1500 rpm, $\sigma=0.5\mu\text{m}$, $C=15\mu\text{m}$, $\eta=0.016$ Pa.s, $m=0.0385$ kg

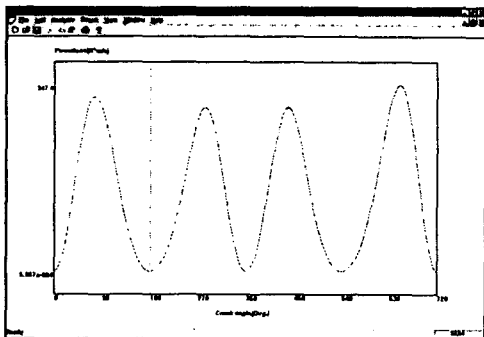


Fig. 8 Total frictional power loss at 1500 rpm, $\sigma=0.5\mu\text{m}$, $C=15\mu\text{m}$, $\eta=0.016$ Pa.s, $m=0.028$ kg

Fig. 3와 Fig. 6을 비교하면 피스톤 질량을 0.28 kg로 줄였을 때 실린더 라이너와 피스톤 스커트 사이의 틈새 거리가 증가했음을 알 수 있다. 이는 유막 두께가 증가하여 내구성이 향상될 수 있음을 나타낸다.

또한 Fig. 7에서 피스톤 스커트 질량을 줄였을 때, 마찰력 최대 값이 50.87 N으로 무거운 질량의 피스톤을 사용했을 때 보다 줄었음을 알 수 있다. 이를 마찰 동력 손실 측면에서 살펴보면 154.01 W에서 145.49 W로 약 5.5 %의 마찰 동력 손실 저감 효과가 있음을 알 수 있다. 이외에 변수를 바꾸어 가면서 피스톤 스커트의 특성에 대한 쉽고 빠른 비교가 가능하다.

4. 결론

기계요소를 설계하는 데 좀더 향상된 방법론인 병렬식, 모듈화 설계 개념을 도입하여, 각 시스템의 통합, 분산이 자유롭고 유연한 설계가 가능하도록 피스톤 스커트 동역학 해석 및 윤활 해석 프로그램을 개발하였다.

실제 사례를 통해 밝힌 바와 같이 어려움 없이 시스템의 문제점 발견이나 그 해결에 사용할 수 있다.

또한 그 결과를 바로 모니터링할 수 있으므로 피스톤 시스템의 개발 설계 및 수정, 보완에 많은 시간과 비용을 절감할 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] Knoll, G. D. and Peeken, H.J., 1982, "Hydrodynamic Lubrication of Piston Skirts," ASME Journal of Tribology, Vol.104, pp.504-509.
- [2] Li, D. F., Rohde, S.M., 1983, "An Automotive Piston Lubrication Model," ASLE Transactions, Vol. 26, pp. 151-160.
- [3] Suzuki, T., Fujimoto, Y., Ochiai, Y., and Fujimura, I., 1987, "A Numerical Study on Piston Slap in Diesel Engines," JSME Transactions, Series B, Vol.53, No.492, pp.2610-2618.
- [4] Oh, K. P. and Li, C. H., 1987, "Elastohydrodynamic Lubrication of Piston Skirt," ASME Journal of Tribology, Vol.109, pp.356-362.
- [5] Zafer, D., et al., 1994, "A Model of Piston

Secondary Motion and Elastohydrodynamic Skirt Lubrication," ASME Journal of Tribology, Vol.116, pp.777-785.

[6] Zhu, D., et al. 1992, "A Numerical Analysis for Piston Skirts in Mixed Lubrication-Part I: Basic Modeling," ASME Journal of Tribology, Vol.114, pp.553-562.

[7] Zhu, D., et al., 1993, "A Numerical Analysis for Piston Skirts in Mixed Lubrication-Part II: Deformation Considerations," ASME Journal of Tribology, Vol.115, pp.125-133.

[8] Liu, K. and Xie, Y. B., 1998, "A Comprehensive study of the friction and dynamic motion of the piston assembly," Proc. Inst. Mech. Engrs., Vol. 212, pp.221-226.

[9] Patir, N. and Cheng, H. S., 1978, "An Average Flow Model for Determining Effects of Three-Dimensional Roughness on Partial Hydrodynamic Lubrication," ASME Journal of Tribology, Vol.100, pp.12-17.

[10] Patir, N. and Cheng, H. S. 1979, "Application of Average Flow Model to Lubrication Between Rough Sliding Surfaces," ASME Journal of Tribology, Vol.101, pp.220-230.

[11] Greenwood, J. A and Tripp, J. H., 1970, "The Contact of Two Nominally Flat Rough Surfaces," Proc. Inst. Mech. Eng, Vol. 185, Part 1, No.48, pp.625-633.

[12] Wu, C. and Zheng, L., 1989, "An Average Reynolds Equation for Partial Film Lubrication with a Contact Factor," ASME Journal of Tribology, Vol.111, pp.188-191.

[13] C. M. Taylor, ENGINE TRIBOLOGY, Elsevier, 1993, pp.89-157

[14] 김지영, 조명래, 신흥주, 한동철, "IV-TAP : 밸브트레인 통합 해석 프로그램", 한국윤활학회, 춘계학술대회 논문집, pp.258~262, 한국윤활학회, 2000.