

HyPneu와 동역학 해석 프로그램의 통합 시뮬레이션에 의한 설계 유연성 증대 Enhanced Design Flexibility with HyPneu Co-Simulation to Other Dynamic Analysis Programs

이재천 · Ing T. Hong
J. C. Lee and I. T. Hong

1. 서론

대부분의 공학 엔지니어링 문제는 여러 가지 서로 다른 법칙들이 상호 연관된 시스템을 다룬다. 유공압이 포함된 동역학 시스템은 크게 나누어 기계기구, 유공압, 그리고 제어기의 세 가지 부분시스템(sub-system)으로 구성된다. 기계기구 장치는 물리적 성능과 운동법칙에 따라 작동하는 각종 부품들로 구성되어 기계적 작업을 수행하며, 유공압 시스템은 유체역학적 법칙에 따른 유압과 공기압 부품들로 구성되어 기계 기구 장치에 필요한 유체 에너지를 전달한다. 그리고 컴퓨터 혹은 마이크로컨트롤러를 중심으로 구성된 제어 시스템은 센서와 각종 전기전자 기기를 이용하여 계측 및 제어 명령을 수행한다.

이와 같이 기계·유공압·제어기가 복합된 통합 시스템을 효과적으로 예측 설계하기 위한 노력들이 최근 들어 주목받고 있다. 즉, 기계기구, 유공압, 제어

기의 각 부분 시스템을 해석하는 전문 프로그램들을 통합 시뮬레이션(co-simulation)함으로써 각 부분 시스템의 설계를 전문화하고, 전체 통합시스템의 설계의 유연성을 증대시키는 방안이다. 통합 시뮬레이션은 각 부분의 전문 프로그램들의 장점을 최대한 활용하고, 모든 부분의 물리적 법칙들을 누락 없이 적용하며, 매개변수 값들을 임의적으로 조정할 수 있을 뿐만 아니라, 삼차원(3-D) 그래픽 애니메이션으로 결과를 나타낼 수 있다. 이와 같은 3-D 통합 시뮬레이션 모델은 실제 시스템의 원형을 그대로 재현할 수 있으므로 가상 원형(virtual prototype)이라 불리운다.¹⁾

유압구동 메커니즘에 대한 통합시뮬레이션에 대한 연구로는 Keskinen,²⁾ Krus³⁾, Davison,⁴⁾ Ellamn⁵⁾ 등의 결과가 있으며, 3-D 가상원형에 대한 연구로는 Kappi와 Ellman이 다자유물체 동역학(multi-body dynamics) 프로그램인 ADAMS와 유공압해석 프로

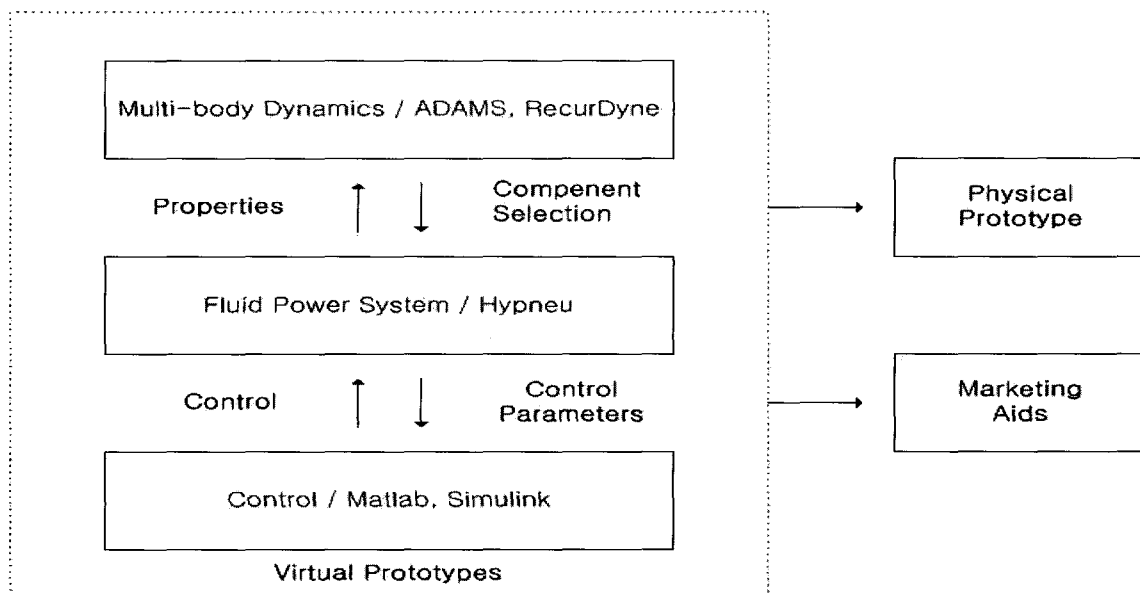


그림 1 가상 원형 통합 시뮬레이션의 구조

그램인 WinSIMUM를 통하는 방안을 제시하였다¹⁾. 또한 Deeken과 Murrenhoff는 트라이블로지 (tribology) 해석 프로그램인 DSHplus와 ADAMS를 통합하여 사축식 피스톤 펌프를 설계하는 방안을 제시하였다.⁶⁾

국내에 소개된 유공압 시뮬레이션 프로그램의 원조격인 HyPneu는 1980년대 미국 오클라호마 주립 대학의 유공압연구소(FPRC)에서 초기 모델이 개발된 이후, BarDyne Inc.에서 상용화되어 세계 여러 분야의 유공압 엔지니어를 위한 가상실험실 (virtual laboratory) 역할을 수행하고 있다. 본 해설에서는 HyPneu와 다른 해석 프로그램과의 통합 시뮬레이션을 중심으로 HyPneu V.9의 새로운 기능과 적용 사례를 소개한다.

2. HyPneu의 주요 기능

HyPneu는 약 600여종의 유압(hydraulic), 공기압(pneumatic), 기계(mechanical), 전기/신호(electric/signal) 부품 모델을 제공하고 있으며 아래와 같은 해석 기능을 제시한다.

- 정역학 해석(static analysis)
- 동역학 해석(dynamic analysis)
- 주파수 해석(frequency analysis): 임펄스 시험에 의한 bode plot 및 power spectrum density
- 열 해석(thermal analysis)
- 오염도 해석(contamination analysis)

또한 다음과 같은 기능과 도구를 갖고 있다.

- Super icon: 여러 개의 세부 부품을 하나의 아이콘으로 묶음
- User's model: C 언어의 HPLIC(HyPneu Scripting Language)를 이용하여 사용자 스스로 독자적인 부품 모델 개발
- Magi: 체적탄성계수(bulk modulus), 유량계수(flow coefficient), 펌프, 모터, 실린더 등 각종 시스템/부품 매개변수의 산출에 이용.
- Batch run: 최대 8개의 회로를 동시에 시뮬레이션 할 수 있음.
- Pack & Go: 지정된 시스템 회로에 관한 모든 파일을 zip파일로 만들어줌.

HyPneu V.9은 지능형 수치적분 알고리즘을 사용함으로써, 정확도의 조정에 따라, 현재 시판 중인 어떠한 유공압 해석 프로그램보다 빠른 실행 속도를

제공한다. 또한 HyPneu는 통합 시뮬레이션을 위해, HyPneu Linx 모듈과 클라이언트/서버(client/server) 모듈의 두 개의 모듈을 제공하고 있다.

2.1 HyPneu Linx 모듈

HyPneu Linx 모듈은 Simulink를 통하여 HyPneu와 제 3의 소프트웨어와 통합 시뮬레이션을 구현한다. Simulink는 미국 Mathworks, Inc.의 제품으로 동역학 시스템의 모델 기반 설계의 플랫폼이다. 즉, Simulink는 사용자가 그래픽 방법을 통해 모델 시스템의 블록순도를 나타낼 수 있도록 다양한 블록들을 제공한다. 따라서 사용자는 HyPneu Linx를 사용하여 강력하고, 다양하며, 정확한 각종 유공압 시뮬레이션 기능을 Simulink 블록과 접목할 수 있다.

2.2 HyPneu 클라이언트/서버 모듈

HyPneu의 내부구조는 다른 해석 프로그램의 클라이언트 혹은 서버의 기능으로 사용될 수 있도록 설계되었다. 따라서 HyPneu는 여러 가지 방법의 효율적 통합 시뮬레이션이 가능하다. 첫 번째 방법은 소프트웨어 대 소프트웨어의 방법이다. 이것은 소프트웨어 프로그램 간의 직접적인 데이터 교환 방법으로 시뮬레이션 속도와 정확도를 높일 수 있다. 두 번째 방법은 소프트웨어와 하드웨어를 병행(S/W in parallel with H/W)시키는 것으로써, 소프트웨어(유공압 모델)와 하드웨어(기계장치 및 제어기)가 동시에 상태진단이나 제어 보상을 위한 명령이나 외란을 받을 수 있다. 마지막 방법은 HIL(Hardware-in-the-Loop) 시뮬레이션이다. 이것은, 일부 중요한 하드웨어 부품과 데이터를 교환하면서, 복잡한 기계·유공압·제어기 시스템의 실시간 시뮬레이션을 HyPneu의 모델로 수행하는 것으로써 쾌속 시제작(rapid prototype) 평가 및 최적화에 활용된다.

2.3 HyPneu와 동역학 프로그램의 인터페이스 원리

유공압 프로그램과 ADAMS, RecurDyne등의 다자유물체동역학 프로그램 간의 통합 시뮬레이션의 기본 원리는 다음과 같은 2 가지 방법이 있다.

첫째는 유공압 해석 프로그램인 AmeSim과 ADAMS간에 채택하고 있는 일반 상태방정식(general state equation) 방법이다. 이것은 AmeSim으로 구성된 유공압회로의 상태방정식을 ADAMS로 전송하여 ADAMS의 기계기구부와 통합된 상태 행렬식을 구성하고 ADAMS/Solver로 푸는 방법이다.

그러나 이것은 그 과정이 복잡할 뿐만 아니라, 유압 시스템의 매우 큰 수치경도(numerical stiffness)로 인해 실행속도와 안정성면에서 불리하다.¹⁾

또 다른 방법은 HyPneu, MOSISH,⁷⁾ Win-SIMU¹⁾ 등에서 채택하고 있는 방법이다. 이것은 유공압 프로그램과 동역학 프로그램이 각각 유공압부분과 기계기구부의 동역학을 자체적으로 수치 적분하는 과정에서 서로 간에 필요한 변수의 값을 교환하는 방법이다.

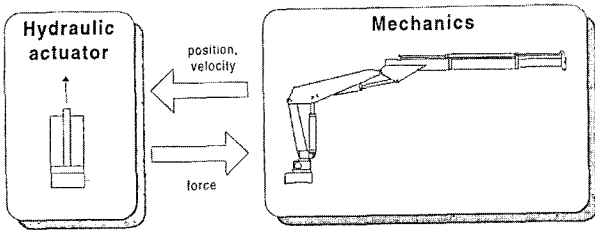


그림 2 유공압과 기계기구부의 상호전달 변수

그림 2는 유공압과 기계기구부의 상호 변수교환의 한 예를 보여준다. 그림 2에서 보듯이 HyPneu는 동역학프로그램으로부터 변위 값을 전달받아 종속변수인 압력을 수치 적분한 후 힘 값을 동역학 프로그램에 넘겨준다. 동역학 프로그램은 HyPneu로부터 전

달받은 힘 값을 바탕으로 기구부의 속도를 계산한다.

3. HPLinx의 예제

다음 예제는 비행기의 항공제어(flight control system)의 정확한 시뮬레이션을 위해 Simulink와 HyPneu를 통합한 예로써, F5 Tomcat의 g-시뮬레이션에 실제 적용하였다. 그림 3에서 보듯이 비행제어시스템의 각 부분 동역학은 Simulink의 블록선도로 구성되었으며, 유압액추에이터와 서보밸브는 HyPneu로 모델링되었다. 그림 3에 표시된 HyPneu 블록은 HyPneu에 의해 생성된 것으로서 Simulink 상으로는 마치 2개의 외부 참고파일(reference files)과 연결된 서브블록(sub-block)처럼 사용되었다. 2개의 참고 파일은 HPLinx에 의해 생성된다. 그림 3의 블록선도는 조종사의 제어입력과 유압시스템으로의 입출력, 이에 따른 항공기 동역학을 모델링하고 있다. 시뮬레이션이 진행됨에 따라 액추에이터 변위, 피치각(pitch), 수직 속도, 공격각도(angle of attack) 등의 변수 값의 변화가 Simulink의 출력 창을 통하여 표시된다.

그림 3의 HyPneu 블록 부분의 내부 유압 회로도 는 다음 그림 4와 같다.

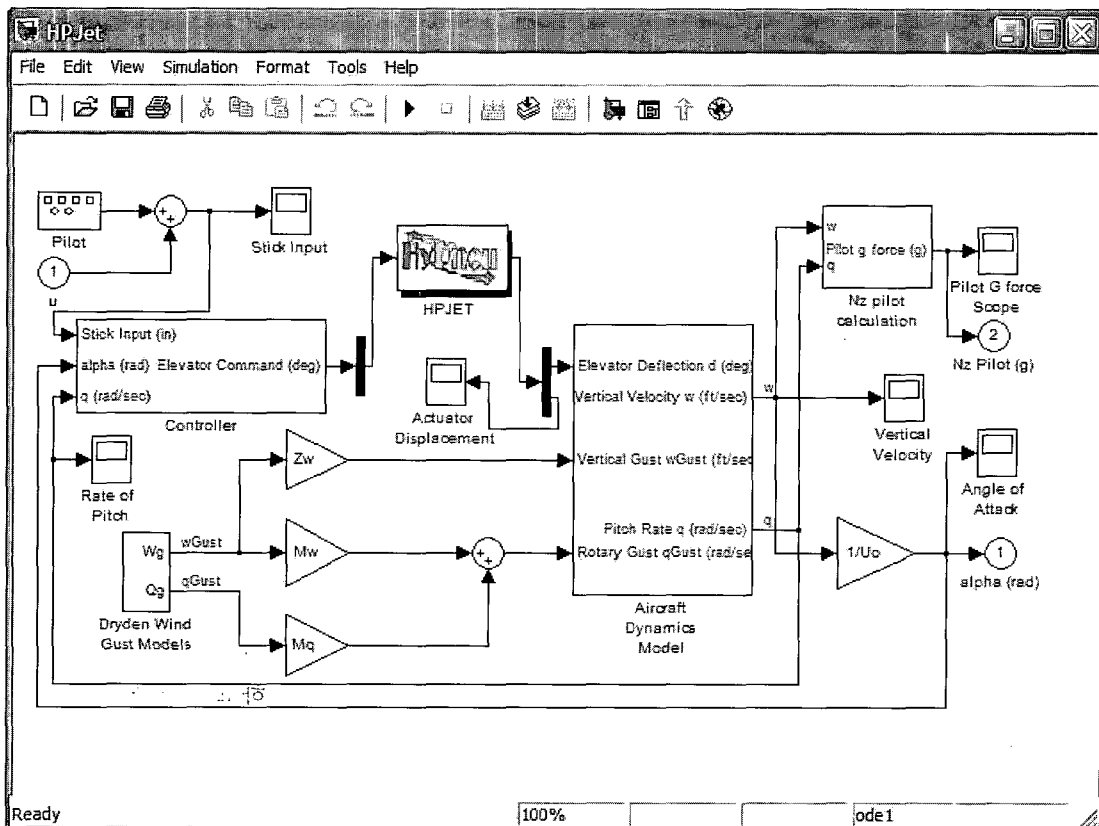


그림 3 비행 제어 시스템의 Simulink/HyPneu 블록선도

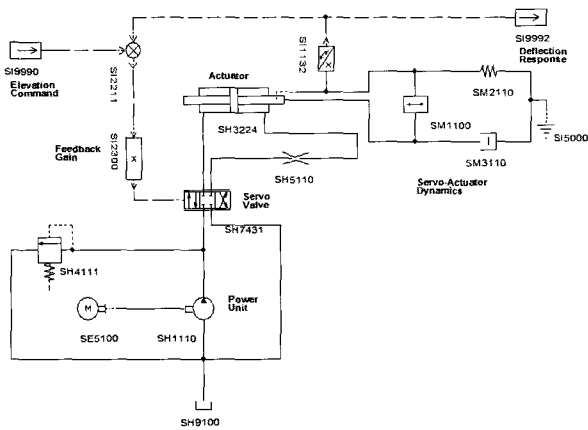


그림 4 항공기 유압서보 HyPneu 회로

HyPneu 회로를 Simulink 블록과 통합하기 위하여 HyPneu 회로가 Simulink 블록과 주고받을 정보를 먼저 결정하여야 한다. 그림 3의 항공기 비행 제어 시스템의 경우 제어신호인 상승 명령(elevation command)이 그림 4의 유압서보 HyPneu 회로의 입력신호로 사용되었다. 그리고 그림 4의 편향응답(deflection response)로 표시된 액추에이터의 변위가 출력으로 사용되었다. 그림 2에서 보듯이 입력신호 SI9990은 Simulink 블록으로부터 입력 값을 받는다.

이와 같은 입력 신호는 서보밸브 SH7431 스펴의 변위를 결정하며, 서보밸브 스펴의 변위는 결국 유량을 조정하여 액추에이터 SH3224의 변위를 제어한다. 그리고 액추에이터의 변위 값은 출력신호 SI9992를 통해 Simulink 블록으로 전달된다. 회로가 형성된 후 HyPneu를 한번 실행함으로써 HPLinx는 두 개의 보조파일을 형성하고 HyPneu 블록이 Simulink와 통합 시뮬레이션 하는 동안 사용된다.

통합 시뮬레이션은 Simulink 환경에서 실행된다. 그림 5는 그림 3의 비행 제어 시스템의 시뮬레이션 결과이다. 그림 5의 액추에이터 변위에 대한 그래프는 HyPneu가 액추에이터의 이차 동역학(second order dynamics) 특성을 정확히 시뮬레이션하고 있음을 보여준다. HPLinx는 HyPneu 시뮬레이션 데이터를 계속적으로 Simulink에 공급함으로써 비행 제어 시스템의 여러 가지 다른 변수들의 변화를 계산 가능케 한다. 또한 그림 3의 HyPneu 블록을 단순한 1차, 혹은 2차 전달함수 블록으로 대체하여 시뮬레이션한 결과와 비교하면 HyPneu 블록을 사용함으로써 서보밸브의 읍셋, 포화(saturation), 실린더의 누유 등 비선형 특성을 쉽게 적용할 수 있음을 알 수 있다.

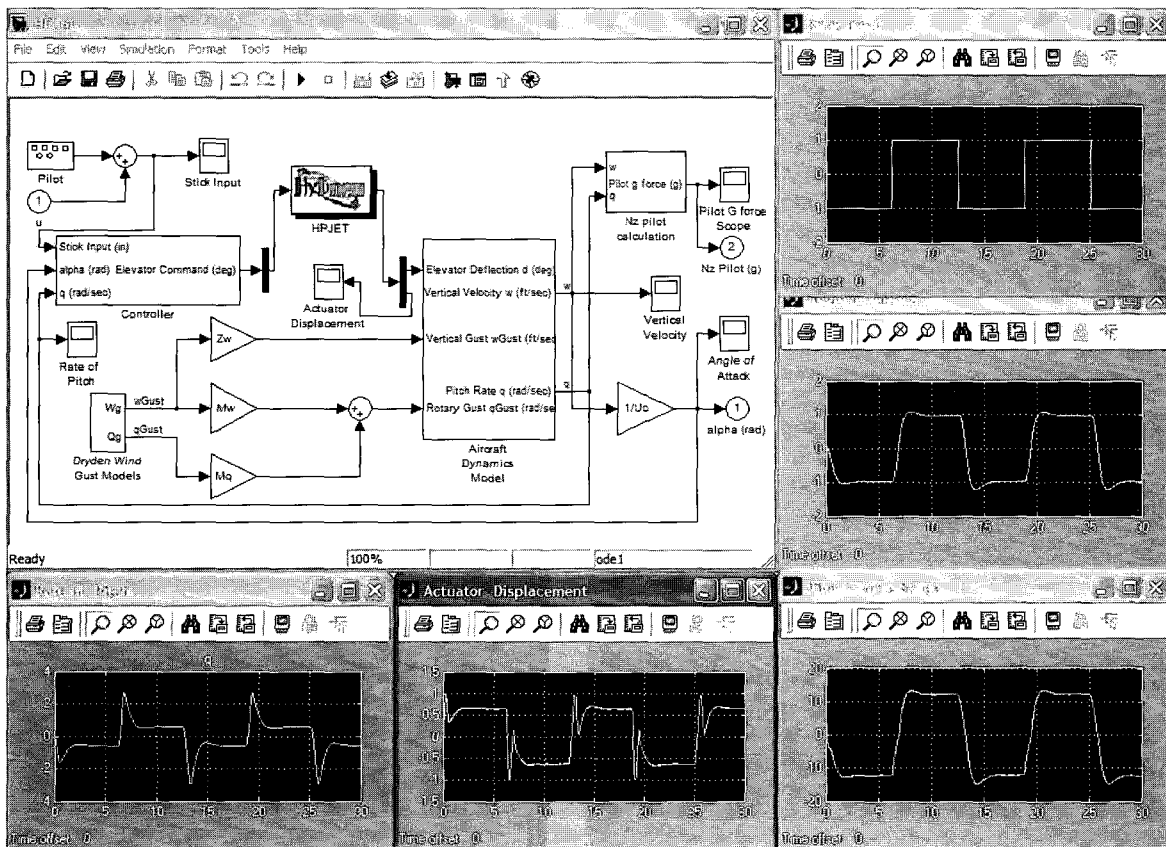


그림 5 비행 제어 시스템의 통합 시뮬레이션 결과

4. 동역학 프로그램과의 통합 시뮬레이션 예제

4.1 HyPneu와 RecurDyn의 현가시스템 모델링

아래 그림 6~8은 HyPneu와 RecurDyn을 이용하여 쇼크업쇼버(shock absorber)와 궤도차량의 현가시스템을 모델링한 예이다. 두 소프트웨어 간의 데이터 전송은 2장에서 설명한 HyPneu 클라이언트/서버 모듈이 사용되었다. 그림 6에서 보듯이 쇼크업쇼버 실린더에 외부 속도변위로 주어진 입력신호에 따라 쇼크업쇼버 내부의 압력과 유량이 변화하며, 전체 쇼크업쇼버의 운동모습은 RecurDyn의 3-D 애니메이션으로 나타내어진다.

또한 그림 7은 RecurDyn으로 구현한 궤도차량 동역학에 HyPneu의 능동형 현가시스템 모델을 포함시켜 통합 시뮬레이션하는 모습이다. 그림 7에서 궤도차량은 범퍼 주행로(bumper road)를 주행하고 있으며, 그림 8은 범퍼에 부딪치는 순간의 차량의 수직방향 속도변화를 보여준다. 그림 8에서 보듯이 HyPneu와 RecurDyn의 통합시뮬레이션은 궤도차량의 동역학적 애니메이션과 각종 상태변수의 그래프를 통해 가상 원형을 성공적으로 구현함과 아울러, 설계의 유연성을 증대시킬 수 있음을 알 수 있다.

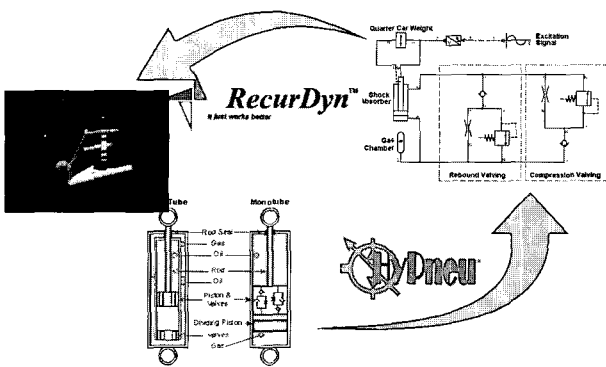


그림 6 HyPneu와 RecurDyn의 쇼크 업쇼버 모델

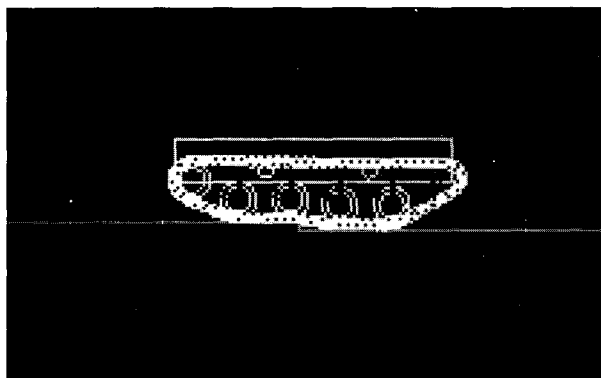


그림 7 범퍼 주행로의 궤도차량 모델

4.2 HyPneu-RecurDyn-Simulink의 유압서보밸브 통합 시뮬레이션

그림 9는 힘-피드백(force-feedback) 2단 전기유압서보밸브(2-stage electro hydraulic servovalve)의 동역학을 HyPneu, RecurDyn, Simulink를 이용하여 모델링한 모습이며, 그림 10은 통합시뮬레이션의 결과이다. HyPneu와 RecurDyn과의 데이터 교환은 2장에서 소개한 HPLinx 모듈을 이용하여 Simulink를 통하여 이루어졌다. HyPneu는 1단 토크 모터와 플랩퍼-노즐(flapper nozzle)을 포함한 유압부분을 모델링하였으며, RecurDyn은 스펴과 스프링 로드(spring rod)의 힘-피드백 부분을 모델링하였다. 통합시뮬레이션 중에 스펴과 스프링 로드의 움직임은 RecurDyn의 애니메이션으로 표현되며, 스펴의 변위와 압력을 비롯한 각종 변위 값들은 Simulink 출력창의 그래프로 나타내어진다.

이와 같이 설계자는 HyPneu와 여타 동역학 프로그램의 통합시뮬레이션을 통해 유공압시스템의 3-D 가상원형을 손쉽게 구현할 수 있다.

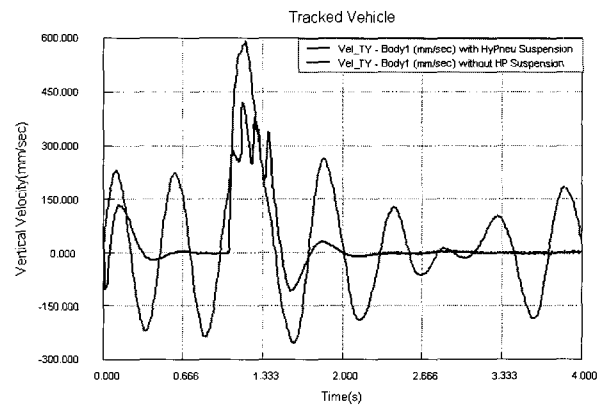


그림 8 HyPneu 현가모델 유무에 따른 성능비교

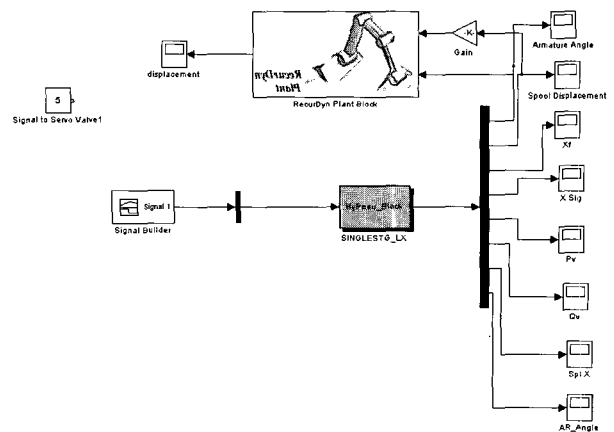


그림 9 유압서보밸브 통합 시뮬레이션 모델

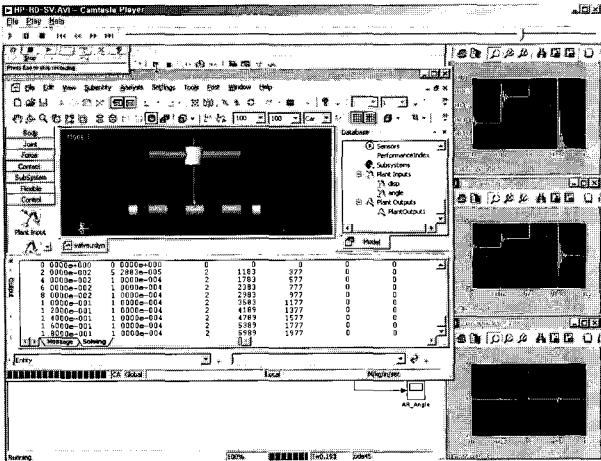


그림 10 서보밸브 통합 시뮬레이션 결과

5. 기타 HyPneu 응용 예제

HyPneu를 이용한 유공압 부품 및 시스템 설계, 고장진단 및 수리(failure diagnosis and retrofit)의 사례는 무수히 많으나 본 해설에서는 주파수 응답해석, 유공압·열전달의 복합해석 사례를 다음과 같이 각각 하나씩 요약 제시한다.

5.1 주파수 응답해석: 서보밸브 동역학

아래 그림 11은 HyPneu 회로로 구성된 전기유압 서보밸브의 동역학이다. 그림 11에서 보듯이 2단 서보밸브의 동역학은 HyPneu에 의해 손쉽게 재구성되며, 그림 12의 Bode 선도는 2차 시스템의 동특성을 나타낸다. HyPneu 주파수응답 특성 해석은 임펄스시험(impulse testing) 방법⁸⁾에 의해 단 시간 내 완료할 수 있다.

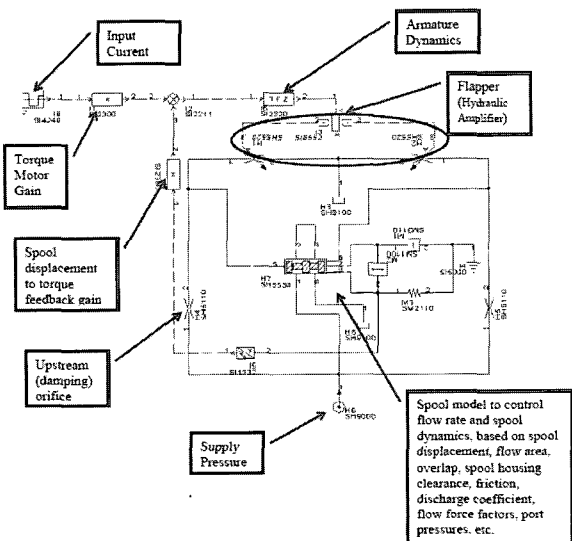


그림 11 서보밸브의 HyPneu 모델

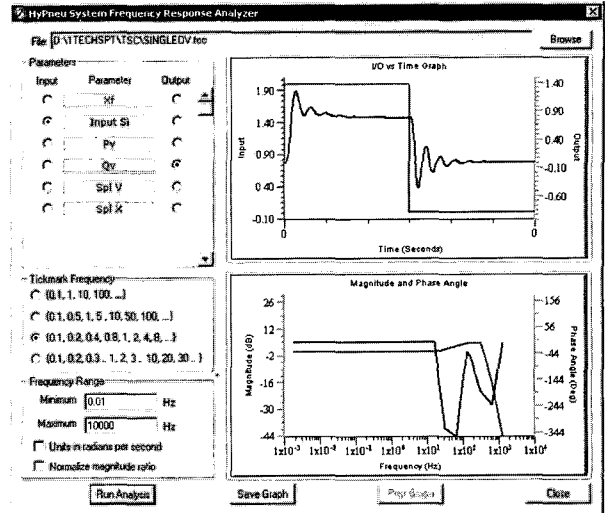


그림 12 서보밸브의 주파수응답해석 결과

5.2 유공기압·열전달의 복합 해석: 증발가스 제어 시스템

유압·공기압·열전달이 복합된 시스템의 설계 개발에 HyPneu가 사용된 전형적인 사례로서 Ford 자동차의 증발가스 제어시스템(아래 그림 13)⁹⁾ 개발을 들 수 있다. 미국에서 1997년부터 범규화된 증발가스 제어 기준을 만족하기 위해서는 비회유 연료공급(returnless fuel delivery)과 연료탱크 내 증발가스 억제 및 캐니스터(canister) 포집이 필수적이다. 이와 같이 액상연료(유압), 증발가스(공기압)와 증기화(열해석)가 복합된 시스템의 모델링 및 해석이 HyPneu에 의해 수행되었다.¹⁰⁾

그림 14는 단순화한 증발가스제어시스템의 HyPneu 모델(실제 모델은 보안상 사용치 못함)이며, 그림 15, 16은 4기통 엔진이 2,000 rpm으로 회전하고 15msec의 주기로 인젝터가 분사할 때의 시뮬레이션 결과이다.

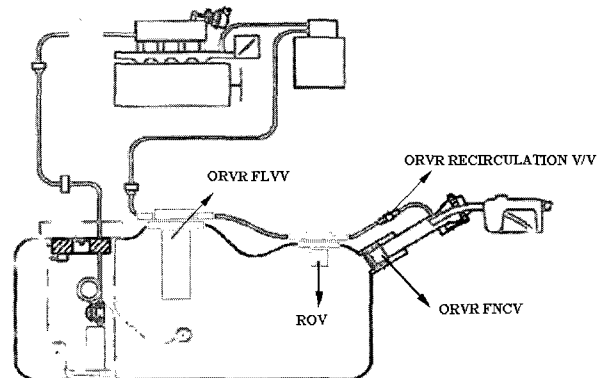


그림 13 증발가스 제어시스템 회로

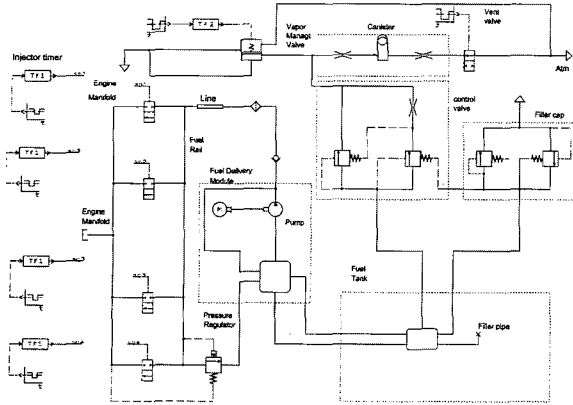


그림 14 증발가스제어시스템의 HyPneu 회로

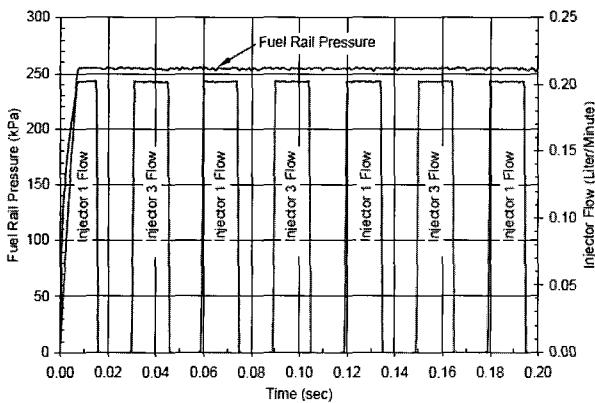


그림 15 연료레일압력과 인젝션 시뮬레이션

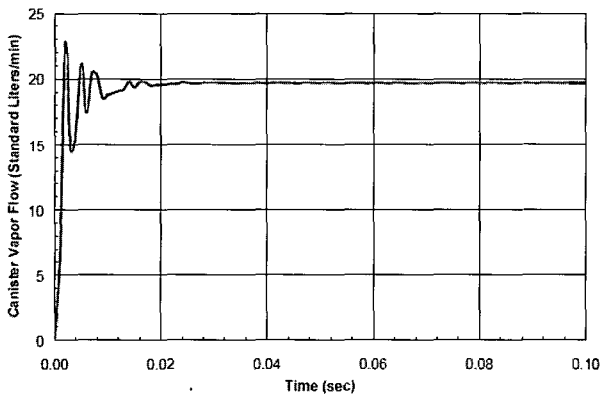


그림 16 캐니스터 유량 해석

한편 그림 14의 연료탱크 모델은 연료의 성분 및 배합에 따른 증기압과 연료의 온도변화를 고려하여 액상연료와 증발가스의 분포 식을 구하고, 2장의 소개한 User's 모델에 의해 개발되었다.

6. 결 론

본 해설에서는 유공압전용 해석 프로그램인 HyPneu의 최근 버전의 주요 기능과, Simulink 및 다른 동역학 프로그램과 통합된 3-D 가상 원형 시

뮬레이션에 대해 소개하였다. 향후 각 분야별 해석 소프트웨어의 장점을 최대한으로 활용하는 통합시뮬레이션에 대한 보다 많은 연구와 응용이 기대된다.

참 고 문 헌

- 1) T. J. Kappi and A. U. Ellman, "Integration of ADAMS and WinSIMU simulation software", 10th Bath International Fluid Power Workshop, pp. 30~40, 1997.
- 2) E. Keskinen, "Modeling of flexible manipulators by field and interface elements - a new contact dynamics formulation", IFToMM-jc International Symposium on theory and machines and mechanisms, 1992.
- 3) P. Krus, "Modeling of mechanical systems using rigid bodies and transmission line joints", Fluid Power Systems and Technology, Winter Annual Meeting of ASME, 1995.
- 4) P. Davison, D. Longmore and C. Burrows, "Generation of complex mechanical models in hydraulic systems applications", Proc. 3rd Scandinavian Int. Conf. Fluid Power, 1993.
- 5) R. Piche, A. Ellman and M. Vilenius, "Integration of numerically stiff fluid power circuit models using an L-stable Runge-Kutta method", 7th Bath International Fluid Power Workshop, 1994.
- 6) M. Deeken and H. Murrenhoff, "Advanced simulation of fluid power components using DSHplus and ADAMS", Bath Workshop on Power Transmission and Motion Control, 87-101, 2001.
- 7) M. Piechnick, "Simulation hydraulic-driven mechanical systems", 10th European ADAMS User's Conference, 1995.
- 8) 이재천, 임문혁, 황태영, "상태공간 모델과 임펄스 시험에 의한 발전소 배관지지용 유압완충기의 동특성 해석", 한국정밀공학회지, 제19권, 제10호, pp. 130~138, 2002.
- 9) 김성훈, 이재천, "주유중 증발가스제어 펠리넥 체크밸브의 유동해석", 한국정밀공학회지, 제20권, 제10호, pp. 105~111, 2003.
- 10) I. T. Hong, D. W. Tessmann and R. K. Tessmann. "Computerized analysis of fuel systems performance dynamics", SAE Paper, 03P-388, 2003.

[저자 소개]



이재천(책임저자)

E-mail : ljcds@kmu.ac.kr

Home: www.hylab.pe.kr

Tel: 053-644-5522

1980년 서울대 학사, 1985년 한국과학기술원 석사, 1996년 Oklahoma State Univ.에서 Ph.D. 취득, 현대 정공(85-88), FESInc. (88-93), 삼성전기(96-98) 근무, 1998년 이후 계명대학교 기계자동차공학부, 현 부교수, 관심분야: 동역학 통합 시뮬레이션, 유압서보진단 및 제어, 오염제어(contamination control), Flutronics

[저자 소개]



Ing T. Hong

E-mail: ITHong@bardyne.com

Home: www.BarDyne.com

Tel: +(1) 405-743-4337

대만 출생, 1986년 Oklahoma State Univ.에서 Ph.D(지도교수: E. C. Fitch), HyPneu 개발자, 현 BarDyne Inc. 사장, Oklahoma State Univ., Purdue Univ. 겸임교수, "Hydraulic System Modeling and Simulation" 의 저서 및 특허 다수