

건설기계용 성능 시뮬레이터



윤 소 남

(KIMM 산업기술연구부)

- '86. 2 제주대학교 기계공학(학사)
- '90. 2 부경대학교 유압제어(석사)
- '94. 2 부경대학교 유압제어(박사)
- '94. 7 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



이 일 영

(부경대학교, 기계공학부)

- '78. 2 부경대학교 기관공학(학사)
- '80. 2 부경대학교 유압제어(석사)
- '86. 2 동경공대 유압제어(박사)
- '86. 4 - 현재 부경대 기계공학부 교수

1. 기술 개요

1.1 건설 기계의 종류

건설 작업에 사용되는 기계류를 총칭하여 건설기계라 하며, 여기에는 매우 다양한 기계들이 있다. 그 가운데서 대표적인 것들의 명칭과 점유 비율을 보면, 굴삭기가 28.5%, 지게차가 24.2%, 덤프 트럭이 18.9%, 콘크리트 믹서 트럭이 8.7%, 로더가 5.3%이며, 이들 5대 기종이 전체 등록 건설기계의 86%를 차지하여 등록 건설기계의 주종을 이루고 있다.

1.2 건설기계의 기술, 발전 방향

국내 건설기계 제작사들이 제품의 국내·외적 경쟁력 확보를 위하여 갖추어야 할 기술적 과제를 요약하면 아래와 같다.

1.2.1 환경 및 자연에 조화하는 건설기계

- 저소음, 저진동, 저매연형

1.2.2 경제성이 우수한 건설기계

- 고장율의 극소화, 유지 보수비의 극소화, 연료 소비 효율의 개선, A/S의 신속화

1.2.3 인간 존중형 건설기계

- 인간 공학적 거주성 확보, 안락성 개선
- 전자제어화에 의한 조작성, 안정성 개선
- 반복 작업의 Program화로 운전자의 작업효율 제고, 나아가서는 무인화 건설기계의 실현

- 모델의 다양화 및 외관 디자인 증시 설계를 통하여 소비자 선택의 폭 확대

1.3 건설기계용 성능 시뮬레이터의 필요성

1.3.1 건설기계용 성능 시뮬레이터의 정의

만약 건설기계의 전체 시스템 또는 주요 구성 요소의 기능을 실제 시스템의 작동 조건(부하조건)과 매우 유사한 상황 하에서 손쉽게 시험해 볼 수 있으며, 시험 장치의 작동 도중에 시스템 내 각 구성요소의 특성 및 성능을 실시간(real time)으로 계측할 수 있는 모의장치(simulator)가 준비되어 있다면, 대상 시스템 구성요소의 일부를 새로운 요소로 대체 하였을 때 발생할 수 있는 시스템의 성능변화를 손쉽게 예측할 수가 있을 것이다. 이러한 목적으로 사용되는 것이 건설기계용 성능 시뮬레이터(Performance Simulator for Construction Vehicle)이다.

1.3.2 굴삭기 성능 시뮬레이터의 필요성

앞의 1.1에서 언급한 바와 같이, 건설기계 가운데서 가장 수요가 많으면서도 대당 가격이 고가인 것이 굴삭기(excavator)이다. 그런데, 굴삭기는 매우 복잡한 동작, 즉 6자유도의 동작을 실현할 수 있을 정도로 매우 다양한 동작을 일으키면서 작업을 수행하는 것이 특징이다. 따라서, 굴삭기에는 다른 건설기계와 비교하여 다수의 유압 부품들이 복합적으로 결합되어 있으며, 각 부품들이 유기적으로 작동하여 복잡한 제어 기능을 수행하게 된다.

이와 같이, 굴삭기는 다른 건설기계에 비하여 복잡한 구조와 기능을 가지기 때문에 이론 해석에 근거하여 설계를 수행하기가 매우 어렵다. 뿐만 아니라, 굴삭기에는 비선형 특성이 강한 유압 부품들이 다수 사용되는 것도 굴삭기 시스템의 이론 해석을 어렵게 하는 요인이 된다. 따라서, 새로운 굴삭기 모델을 개발할 때에는 실험에 의한 수많은 시행착오를 거치는 것이 일반적이며,

이러한 과정에서 많은 경비와 노력이 소요된다. 그러므로, 굴삭기 설계 과정에서의 경비 및 노력 절감을 위하여 굴삭기 성능 시뮬레이터가 필요하다.

한편, 각종 건설기계 가운데서 불도저, 로더, 기중기 등 대다수의 기종이 유압 동력을 사용하지만, 부품의 수, 제어동작의 복잡성은 굴삭기에 미치지 못한다. 따라서, 굴삭기 성능 시뮬레이터의 설계기술이 개발된다면 이것을 용이하게 불도저, 로더, 기중기 등 건설기계 성능 시뮬레이터에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

이상에서 언급한 바와 같은 이유, 즉 굴삭기가 갖는 경제적인 중요성과 설계 기술상의 난해성 때문에, 다른 건설기계와 비교하여 특히 굴삭기 성능 시뮬레이터에 관한 기술개발이 우선적으로 요구된다. 따라서 이하의 기술(記述) 내용은 굴삭기 성능 시뮬레이터에 한정하기로 한다.

2. 국내·외 기술 수준

2.1 굴삭기 성능 시뮬레이터의 형태

굴삭기는 디젤엔진, 주유압펌프와 같은 동력 발생장치, 주행모터(감속기, 동력 전달장치 포함), 스윙모터, 붐 실린더, 암 실린더, 버킷 실린더 등의 구동 장치, 기계구조부, 각종 제어 밸브, 제어용 전자회로 등의 수 많은 부품들로 구성되어 6자유도의 동작을 일으키면서 주어진 작업을 수행하는 복잡한 형태의 건설기계이다[그림 1].

굴삭기 성능 시뮬레이터의 형태는, 이 시뮬레이터를 구성하는 소프트웨어 부분과 하드웨어 부분의 비율에 따라 다음과 같이 구분할 수 있다.

- ① 순 하드웨어(100% Hardware)식 시뮬레이터
- ② 순 소프트웨어(100% Software)식 시뮬레이터
- ③ HILS(Hardware-in-the-Loop Simulation)식

또한, 시뮬레이터가 총합 굴삭기 시스템을 모두 포함하는 시스템으로 제작되느냐, 또는 주요 서브 모듈(Sub-module), 주요 부품별로 분할된

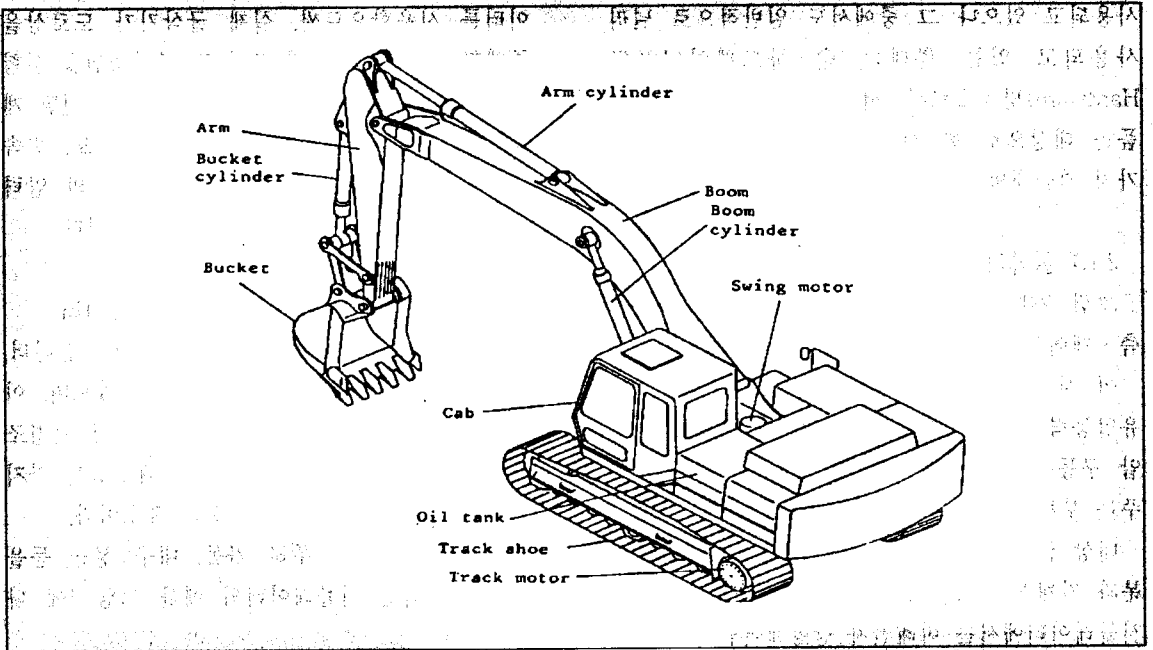


그림 1. 굴삭기의 각부 명칭

형태로 제작되느냐에 따라서 다음과 같이 나눌 수 있다.

- ① 총합 시스템(total system)의 시뮬레이터
- ② 서브 모듈(sub-module)의 시뮬레이터
- ③ 주요 부품(principal component)의 시뮬레이터

2.2 국내·외 굴삭기 성능 시뮬레이터의 기술 수준

2.2.1 국내의 수준

현재까지 국내의 건설기계 제작사들이 개발하여 사용하고 있는 굴삭기 시뮬레이터는 대부분 굴삭기의 서브 모듈 또는 주요 부품을 대상으로 한 순 하드웨어(100% Hardware)식에 머무르고 있다.

2.2.2 외국의 수준

세계적으로 굴삭기 생산량의 제 1위를 점하고 있는 국가는 일본이며, 제 2위는 한국이다. 이와

같이 일본, 한국이 굴삭기 생산량이 많은 이유는 이 두 나라의 지형적 특성상, 토목·건축 공사 과정에서 지반 굴착 작업이 많기 때문인 것으로 생각된다

굴삭기 설계, 제조 기술이 가장 앞선 곳도 당연히 일본의 건설기계 메이커들이며, 대표적인 회사로는 Komatsu(小松) 제작소, Hitachi(日立) 건설기계(주) 등이다. 이들 일본의 건설기계 메이커들에서는 순 하드웨어(100% Hardware)식 시뮬레이터 형태로서, 총합 시스템(total system), 서브-모듈(sub-module), 주요 부품(principal)의 각각에 대한 굴삭기 성능 시뮬레이터를 제작하여 활용하고 있는 것으로 알려져 있다.

3. 국내·외 기술 개발의 동향 및 전망

3.1 현재의 굴삭기 성능 시뮬레이터의 기술

앞의 2.1에서 설명한 바와 같이, 현재 여러 가지 형태의 굴삭기 성능 시뮬레이터가 개발되어

사용되고 있으나 그 중에서도 일반적으로 널리 사용되고 있는 형태는 순 하드웨어(100% Hardware)방식으로서, 서브 모듈 또는 주요 부품을 대상으로 한 시뮬레이터이며, 아래에 몇 가지 기술개발 사례를 소개하기로 한다.

3.1.1 굴삭기 주행계 성능 시뮬레이터

그림 2에 이 시뮬레이터의 유압회로 및 계측·제어부의 구성을 나타내었다.

이 시뮬레이터는 크게 나누어, 굴삭기 주행용 유압동력 발생부와 차량 운전을 모의해주는 유압 구동장치 제어부, 굴삭기 구동부하를 모의해주는 부하 장치 제어부로 구성된다.

대상 굴삭기의 주행용 동력 전달부는 HST 부분과 기계식 변속기가 직렬 연결된 형태이며, 이 시뮬레이터에서는 비례전자 방향제어밸브를 사용한 것을 제외하고는 실차에서의 동일한 기기(유압펌프, 유압모터, 변속장치 등)를 사용하였다. 주행 부하 발생부에서는 관성부하 모의용 플라이휠(fly-wheel)과 등판 부하 모의용 유압 서보 제어 기구(부하용 유압 펌프 및 부하 제어용 비례전자밸브에 의한 기구)를 사용하였다. 이 시뮬레

이터를 사용함으로써, 실제 굴삭기가 도로상을 주행할 때의 각종 운전 조건 및 부하조건을 실험실 내에서 재현함과 동시에 주행용 동력 전달 계통에서의 주요 특성치인 각부의 회전속도, 변속기에서의 전달 토크, 유압장치 각부에서의 압력 등을 실시간(real time)으로 계측할 수 있다.

3.1.2 굴삭기용 실린더의 성능 시뮬레이터

굴삭기에는 붐(boom)실린더, 암(arm) 실린더, 버킷(bucket) 실린더 등의 실린더가 있으며, 이들 실린더는 매우 가혹한 부하 조건 및 환경조건 하에서도 장기간 동안 충분한 내구성을 가지면서 설계 성능을 발휘해야 하는 요소이다.

이들 실린더들의 부하 가동, 내구 성능 등을 시험하기 위한 시뮬레이터의 예를 그림 4에 나타내었다.

3.1.3 굴삭기 캐빈 안락성 및 굴삭기 운전 성능 시뮬레이터

그림 5는 굴삭기 캐빈 안락성 및 굴삭기 운전 성능 시뮬레이터의 구성 예를 나타내었다. 이 시뮬레이터는 굴삭기가 포장 도로 또는 비포장 도

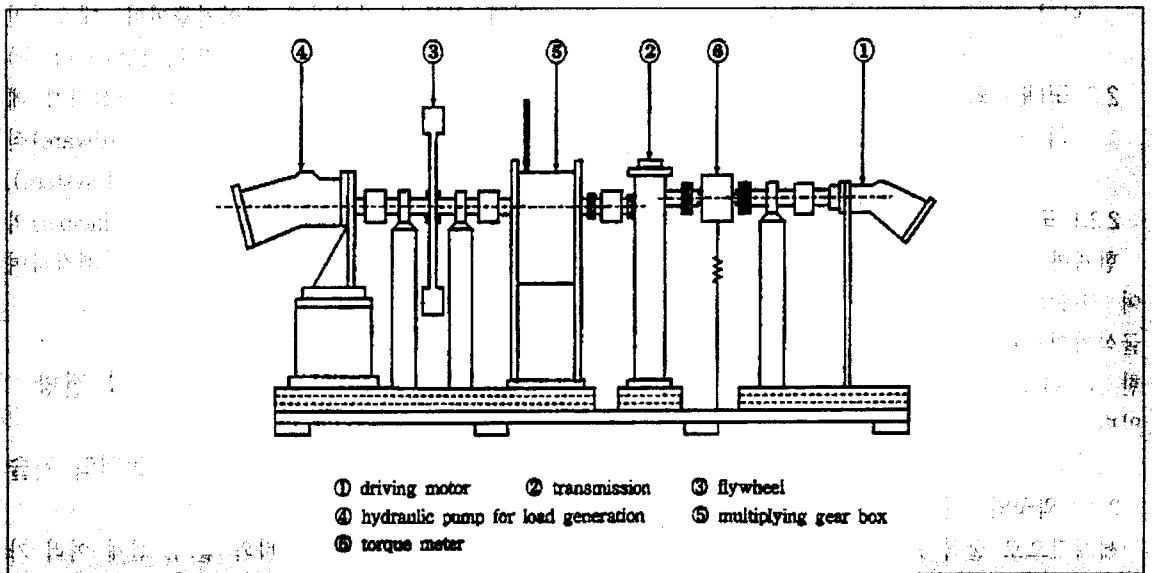


그림 2. 굴삭기 주행장치 성능 시뮬레이터의 구조부

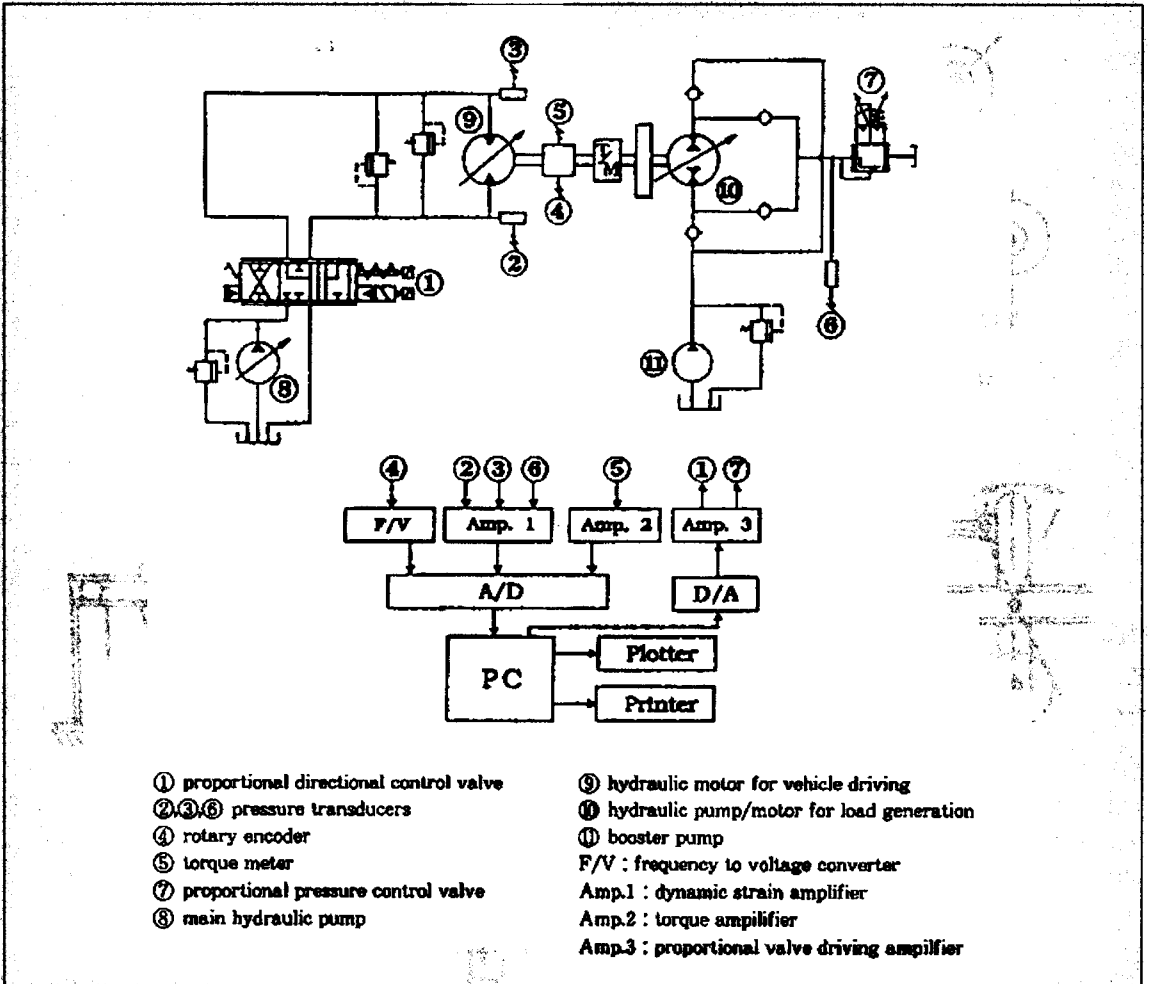


그림 3. 굴삭기 주행장치 성능 시뮬레이터의 유압회로 및 계측·제어부

로를 주행할 때의 굴삭기 캐빈 및 타이어를 포함한 굴삭기 차체의 특성과 운전자의 승차감과 의 상관관계를 시험할 수 있으며, 차체의 충돌, 미끄러짐과 같은 한계 상황에서 차체의 거동이 운전자에게 미치는 영향도 시험할 수 있다.

이 시뮬레이터는 유압식 6자유도 스투어트 플랫폼(Stewart Platform), 유압동력원, 제어용 컴퓨터, 인터페이스 및 영상 주사장치 등으로 구성되며, 시뮬레이터에 탑승한 운전자의 조작에 따라서 실제 굴삭기의 차체 및 캐빈의 운동을 실시간으로 재현해 준다.

이와 같은 굴삭기용 시뮬레이터는 자동차 특

히 승용차 주행 시뮬레이터 설계 기술을 원용하여 개발된 것으로, 건설기계용으로 이와 같은 운전 성능 시뮬레이터를 응용하는 경우는 세계적으로도 아직 연구의 시작단계라 할 수 있다

3.2 앞으로의 기술 발전 전망

앞의 3.1에서도 언급한 바와 같이, 현재까지의 굴삭기 성능 시뮬레이터는 순 하드웨어(100% hardware)식으로 제작되는 것이 일반적이었다. 또한 시뮬레이터가 굴삭기의 전부분을 포괄하는 종합 시스템 시뮬레이터로 제작된 예는 매우 드

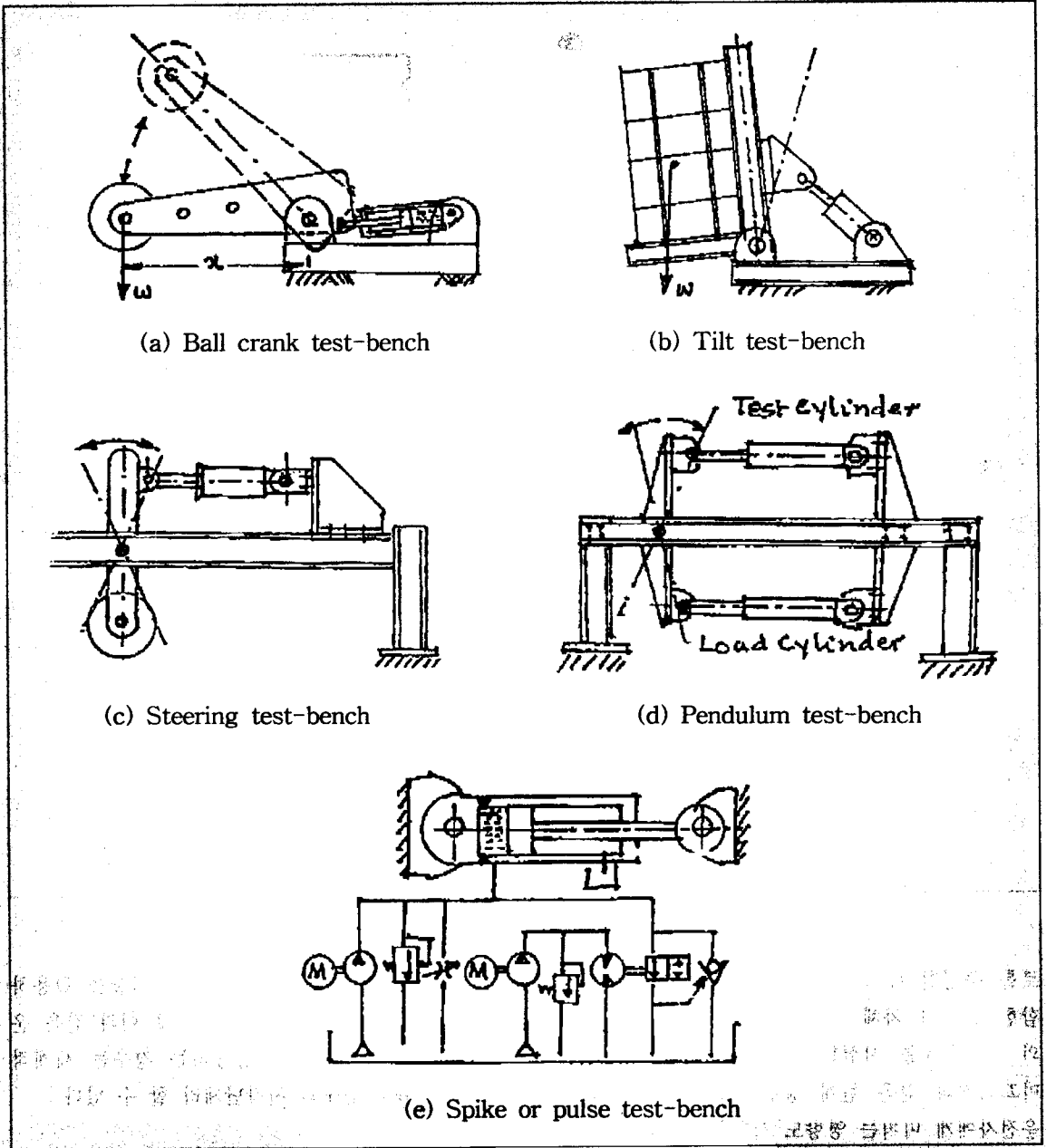


그림 4. 굴삭기용 실린더 성능 시뮬레이터의 예

물며, 굴삭기의 일부 기능만을 재현해주는 서브 모듈 시뮬레이터 형태 또는 주요 부품 시뮬레이터 형태로 제작되었다.

만약, 굴삭기 성능 시뮬레이터를 순전히 소프트웨어만으로 구성하고, 이 시뮬레이터로 굴삭기

의 운전 성능을 실제와 매우 유사하게 모의해낼 수 있다면 가장 경제적으로 신속하게 새롭게 설계된 굴삭기의 성능을 파악하는 방법이 될 것이다. 사실, 시중에는 비교적 신뢰성이 우수한 유압 시스템 시뮬레이션 소프트웨어 패키지들이

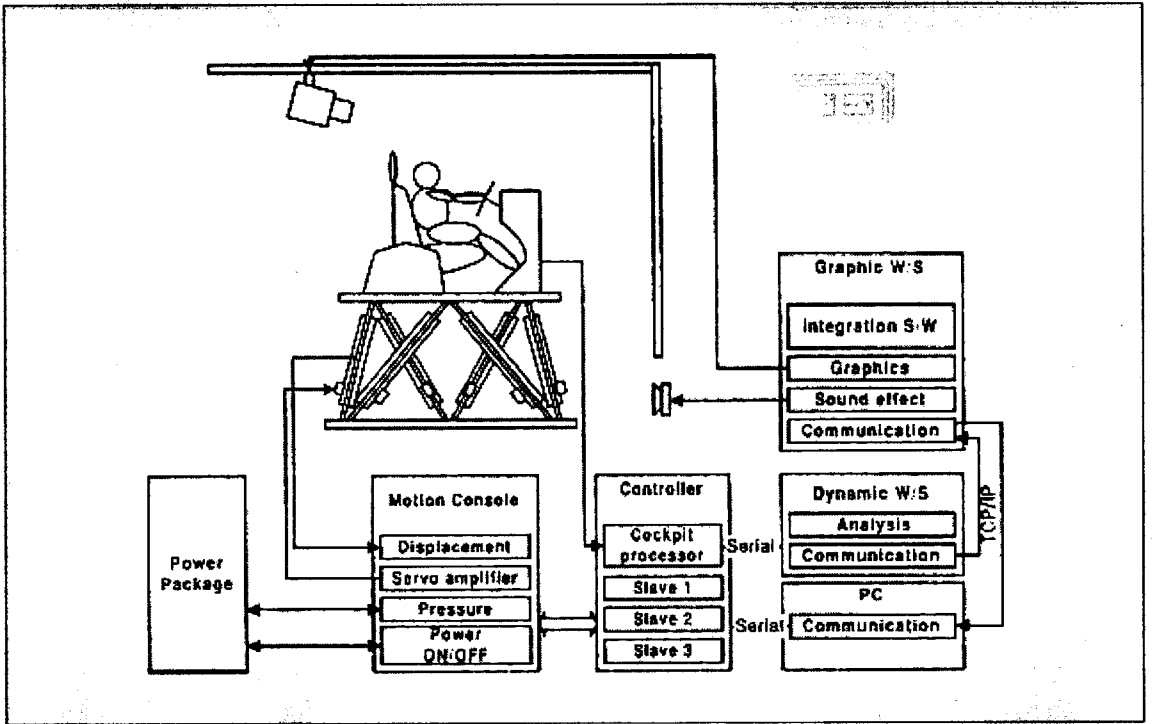


그림 5. 건설중장비 캐빈 성능 시뮬레이터의 예

상업적으로 통용되고 있으므로 이들 소프트웨어 들을 확대 및 발전시킴으로써 순전히 소프트웨어만으로 구성된 굴삭기 성능 시뮬레이터를 구성하는 것도 기술적으로 가능할 것으로 예상된다. 이와 같이 100% 소프트웨어 방식의 시뮬레이터는 다른 방식의 시뮬레이터에 비하여 위에서 지적한 바와 같은 장점을 갖는 반면에 몇가지 취약한 면도 존재한다. 즉, 굴삭기를 구성하는 주요 구성 요소인 각종 유압기기를 수학적으로 정확하게 기술하기란 매우 어려우므로, 100% 소프트웨어로 구성된 시뮬레이터는 아무래도 신뢰성, 현실성의 면에서 하드웨어로 구성된 시뮬레이터에 비하여 한계성을 가질 수밖에 없다. 또한, 설계자가 굴삭기의 특정 구성 요소에 대하여 새로운 설계안을 제안하고, 제안한 요소의 성능을 100% 소프트웨어로 된 시뮬레이터를 통하여 검증하였다 하더라도 이 설계안을 곧 바로 실제 차량에 적용하는 것은 일반적으로 적절하

지 않으며, 실제의 하드웨어 장비를 사용한 별도의 중간 단계 시험을 시행할 필요가 있다. 따라서, 100% 소프트웨어 방식 시뮬레이터를 개발하여 사용하는 것이 매우 바람직하지만, 이 방식이 갖는 한계성을 인식하고 이 방식의 시뮬레이터가 갖는 장점만을 최대한 활용하는 측면에서 이용해야 할 것이다.

한편, 자동차의 ECU 개발 또는 주요 부품 개발 과정에서 자동차 성능 시뮬레이션의 한 방편으로 사용되고 있는 HILS(Hardware-in-the-Loop Simulation) 개념을 굴삭기 시스템에 적용함으로써 보다 활용성이 높은 굴삭기 성능 시뮬레이터를 구성할 수도 있을 것으로 기대된다.

즉, 시뮬레이터의 일부는 실제의 하드웨어로 구성하고, 나머지 부분은 소프트웨어(가상 시스템)으로 구성하는 방법이며, HILS에서의 대표적인 하드웨어-소프트웨어 조합방식을 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 (a)는 주된 고려(개발)

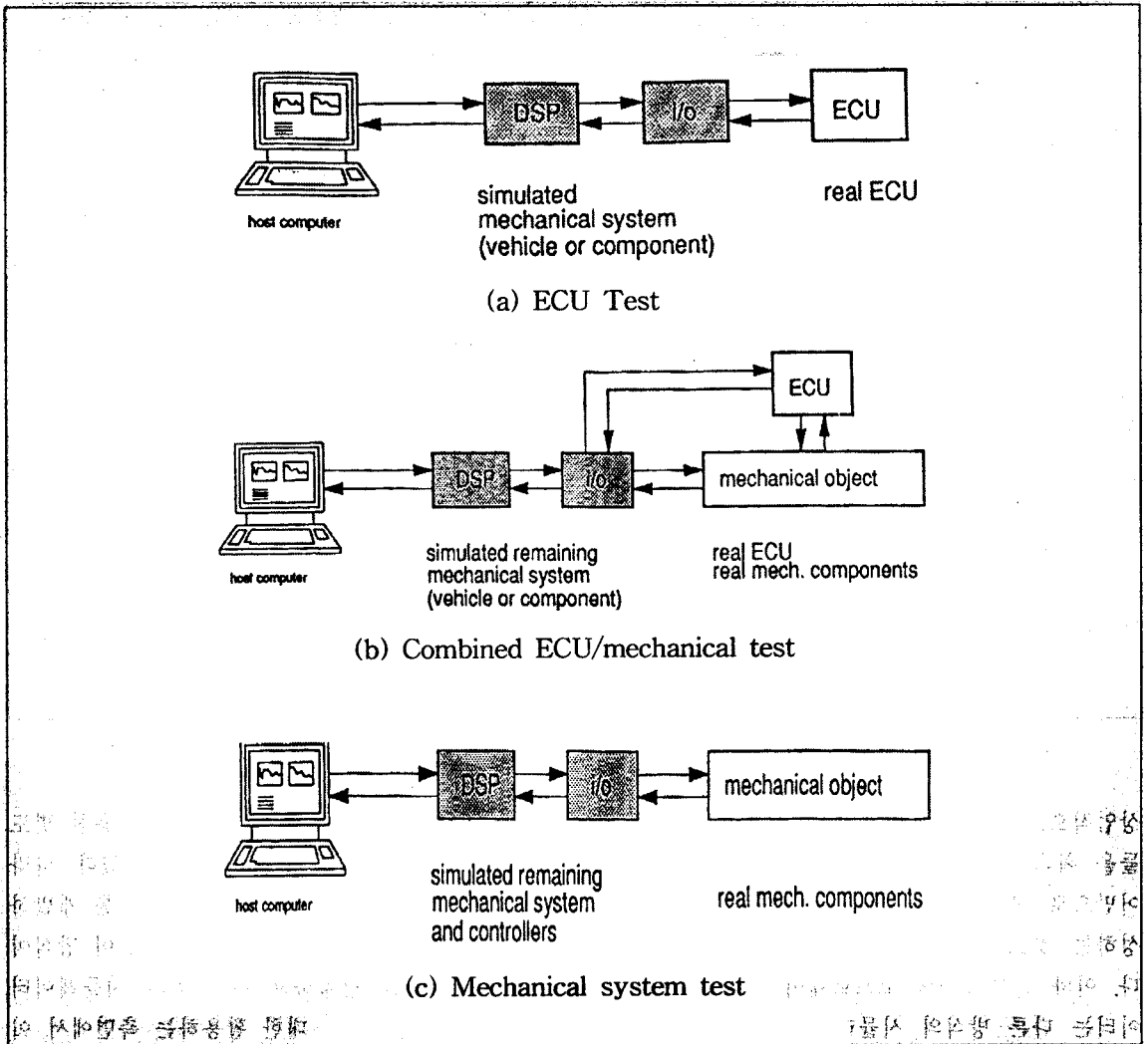


그림 6. HILS에서 하드웨어-소프트웨어 조합 방식

대상이 ECU인 경우, (b)는 ECU 및 일부의 기계장치가 고려 대상인 경우, 그리고 (c)는 기계장치의 일부분만이 고려 대상인 경우에 적용되는 방식이다.

이와 같은 HILS 방식은 굴삭기 등의 건설기계 성능 시뮬레이터로는 현재까지 적용된 바가 없는 것으로 보이지만, 앞으로 HILS 방식을 건설기계용 성능 시뮬레이터에 적용하게 되면 한 단계 높은 수준의 시뮬레이터가 탄생할 것으로 기대된다.

4. 기술의 활용 범위

4.1 관련 제품

건설기계 성능 시뮬레이터는 건설기계 가운데서 경제성, 기술 난이도의 면에서 가장 중요도가 높은 굴삭기를 중심으로 하여 개발, 응용되고 있다. 굴삭기 이외의 건설기계로서 비교적 중요도가 높은 불도저, 로더, 기중기 등의 기계들은 굴삭기와 마찬가지로 주요 부품으로서 유압장치들

을 많이 사용하면서도 구조적, 기술적으로 굴삭기에 비하여 단순한 기계라 할 수 있다. 따라서, 굴삭기를 대상으로 한 성능 시뮬레이터 개발 기술은 유압장치들을 주요 구성 요소로 하는 각종 건설기계의 성능 시뮬레이터 개발에 손쉽게 응용될 수 있다.

4.2 관련 업종

건설기계는 특수한 차량의 일종으로 간주할 수 있는 경우가 많다. 따라서 건설기계는 트럭과 같은 상용차와 공유하는 부품이 많으며, 상용차 제조업은 건설기계업과 매우 밀접한 관련을 갖는다.

또한, 건설기계는 일반 상용차에 비하여 동력의 출력측에서 자유도가 높은 작업을 수행해야 하는 경우가 많으므로 부속장치로서 유압 장치를 많이 활용하게 되며, 여기에 사용되는 유압부품인 각종 유압 펌프, 유압 밸브, 유압 액추에이터들은 건설기계 뿐만 아니라 각종 산업기계 구동용으로도 널리 사용되는 것들이다. 따라서 건설 기계업은 유압 장치를 활용하는 각종 산업기계 업종, 유압 기계 업종 등과도 밀접한 관련을 갖는다. 따라서, 건설기계용 성능 시뮬레이터는 상용차 업종, 유압기계 업종 및 관련 산업기계 업종에서도 활용 가능하다.

4.3 제품의 시장 규모 및 특성

건설기계 제조업은 특히 굴삭기를 중심으로 보았을 때 국제적으로도 우리나라가 일본에 이어 비교적 상당한 경쟁력을 확보하고 있는 업종이다. 그러나 제품 매출액은 아직도 수출에 비하여 국내 시장 의존도가 높은 편이며, 매출액이 국내 경기 특히 국내 건설 경기와 매우 밀접하게 관련되어 있어 매출액 및 생산량의 기복이 심한 것이 현재까지의 실정이다. 따라서, 우리나라 건설 기계업의 지속적 발전을 위해서는 각

건설기계 제조업체가 해외 시장 개척에 더욱 주력할 필요가 있으며, 제품의 국제 경쟁력 확보를 위하여 끊임없이 노력해야 하겠다.

5. 복합 기술 분야

건설기계의 설계·제조 기술은 자동차 특히 상용차의 설계·제조 기술과 공유하는 부분이 많다. 우리나라 자동차 산업의 기술력은 이미 상당한 국제 경쟁력을 확보하고 있기 때문에, 자동차 분야에서 확보된 기술을 잘 활용한다면 국내 건설기계 설계·제조 기술의 발전을 유리하게 전개시킬 수가 있을 것으로 판단된다.

특히, 자동차의 제어용 ECU 설계·제조 기술은 건설기계에서 활용하기에 매우 적절한 기술이며, 이와 같이 자동차 분야에서 이미 확보된 기술을 건설기계 쪽으로 적극 활용하는 것은 제품의 성능, 신뢰성 및 경제성 향상에 큰 도움이 될 수 있을 것이다.

한편, 건설기계에는 각종 유압장치가 다수 활용되고 있으며, 특히 건설기계에서 사용되는 유압기계는 고압, 고속형이어서 아직까지도 일부 품목을 제외하고는 국산화가 이루어지지 않고 있다. 따라서 국내 건설기계 제조업체들은 고가의 외국산 유압기계들을 수입하여 사용하는 관계로 건설기계의 가격 경쟁력 확보에 큰 어려움을 겪고 있다. 따라서, 장기적으로 우리나라 건설 기계업이 국제 경쟁력을 가지려면 국내의 유압기계 설계·제조 기술과 같은 기반 기술의 발전과 유압기계 제조업의 경쟁력 확보가 필수적으로 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] 건설기계 현황, 건설교통부 국립건설시험소, 1995. p.36.
- [2] 건설차량 주행용 동력 전달계의 실시간 시뮬레이터에 관한 연구.
- [3] 이일영, 김진원, 윤소남, 양경욱, 한국자동차

- 공학회 논문집, 제4권 2호, 1996, p.90~105.
- [4] Life Testing of Hydraulic Cylinders, D. Ramesh, Proceedings of the 47th National Conference on Fluid Power, p.313~327.
- [5] 건설 중장비용 주행 시뮬레이터의 구현, 손권 외 4인, 한국정밀공학회지, 제 16권 6호, 1999, p.66~76.
- [6] 건설 중장비의 성능 시뮬레이터 설계 및 제작 기술 개발, 김형의 외, 산업자원부 산업기반기술사업보고서, 1994.
- [7] Hardware-in-the-Loop simulation as a Standard Approach for Development, Customization, and Product Test, H.Hanselmann, 1993 SAE International Congress, Session 1B8, 1993.
- [8] Advances in Desktop Hardware-in-the-Loop Simulation, SAE Technical Paper Series 970932, 1997.
- [9] 가변댐퍼용 ECU의 Hardware-in-the-Loop Simulation, 황성호, 이교일, 허승진, 김홍석, 대한기계학회 1995년 춘계 학술대회 논문집(I), 1995, p.678-682.