

# 이중 암 작업모듈 유압시스템의 안정성 해석

이재천\*

## Stability Analysis of the Hydraulic System for a Dual Arm Work Module

Jae-Cheon Lee

**Key Words:** Dual Arm Work Module(DAWM), Instability, Fail-Safe, Servovalve, HyPneu

### Abstract

This study provides analytical evaluation of the Dual-Arm Work Module. The current hydraulic system was modeled using the HyPneu and analyzed to find the cause of the instability. The cause of the instability was determined to be primarily an interacting involving the pilot operated check valves and the counterbalance valves for fail safe mode of operation. A new design concept was developed to eliminate the potential for unstable operation while adequately meeting the need for a fail-safe feature.

### 1. 서 론

본 과제는 Oak Ridge National Laboratory에서 개발 중인 이중 암 작업모듈의 유압시스템의 안정성과 연관된 문제에 대해 해석하고 그 개선안을 제시한다. Oak Ridge National Laboratory에서는 오염물의 정화와 제거를 목적으로 각종 로봇을 개발해왔다. 이러한 오염물의 정화와 제거 프로그램의 한 부분으로써 5자유도 기본 상태와 RedZone Robotics의 유압공급 시스템이 설치된 두 개의 6자유도 Schilling TitanII 작동자들로 구성된 이중 암 작업모듈(DAWM)이 개발되었다. 개발의 주목적은 작업부하 용량, 강성, 유압시스템의 정확한 위치 제어를 극대화하고 전체적인 시스템의 중량은 최소화하는 것이다.

실험에 의해 이중 암 작업모듈의 초기 정확도 문제는 대부분 중앙 토르소 작동기의 반동에 의해 발생한다는 것이 밝혀졌다. 또한 로봇 시스템에 페루프 시스템을 구성할 때 안정성 문제들이 현안으로 부각되었다. 이러한 안정성 문제들은 고장 시 안전을 위한 체크 밸브들과 카운터밸런스

밸브의 동특성에 기인한다. 고장 시 안전 모드는 시스템 장치 보호, 또는 시스템 오류로 인한 도구손상, 전원오류 또는 갑작스런 전원차단에 요구되어진다. 고장 시 안전 모드는 체크 밸브와 카운터밸런스 밸브들의 조종자들의 위치와 기본 자유도, 그리고 조종자의 제동력이 잠겨질 때 나타나게 된다.

본 과제의 목적은 HyPneu 프로그램(1)을 이용, 현안으로 부각된 DAWM 유압시스템의 성능과 안정성 문제를 해석하고 개선안을 제시하는 것이다.

### 2. 배경

로봇공학 기술의 발전은 저(低)비용 고(高)효율의 제품을 생산해야 한다는 필요에 의해서 지난 10년 간 급속도로 발전해 오고 있다(2). 그러나 DAWM을 위한 성능요구조건은 일반적인 로봇에 적용되는 것들과 상이하여 전통적인 사업 로봇 디자인 방법으로는 만족시킬 수 없었다.

중량을 최소화하고, 동시에 부하용량 및 강성,

위치의 정확도를 최대화함에 있어서 디자인 요구들은 매우 커졌다. 이중 암 작업모듈은 Schilling Titan II 조종자들이 이용하는 두 개의 6자유도 암들로 이루어져 있다. 이러한 두 조종자들은 5자유도의 위치 베이스에 설치되어 있고, 조종자들과 베이스는 RedZone Robotics 사에 의해 디자인되고 제공되어진 전동 유압 시스템에 의해서 조종되어진다. 현재 유압 시스템에 대한 보다 자세한 서술은 본 논문의 다음 장에서 다루어질 것이다. 베이스는 수평으로부터 전체 로봇이  $\pm 90$ 도 회전하는 중앙 토르소(torso) 액추에이터를 포함한다. 또한 두 개의 선형 액추에이터들은 24에서 60인치의 두 조종자들의 베이스 프레임 사이의 다양한 거리를 제공한다. 회전하는 작동자들은  $\pm 90$ 도 영역을 가지는 두 조종자의 베이스들에 위치한다. 이것은 전체적인 조종자 시스템의 형태가 엘보 상향(elbows-up), 직진(elbows-out), 하향(elbows-down) 되는 것을 가능하게 한다. 위치 정확도는 완전히 인출된 압을 가지고 240 파운드의 부하로 조종할 때 0.1 인치 이내이다. 초기 연구에서 정확도 문제는 중앙 토르소 액추에이터의 반동에 기인함이 밝혀졌다. 또한 안정성 문제를 포함한 유압 시스템의 페루프 제어 알고리즘 개발이 시도되었다. 이러한 안정성 문제들은, 고장 시 안전을 위한 각종 안전밸브의 동특성에 기인한다. DAWM의 작동 고장 시 안전모드는 폐기물들을 처리하는 동안 오염의 확산을 가능한 한 제한하기 위해 필수적이다. 그러므로, 이와 같은 불안정성을 연구하고, 안정적 상태를 유지하기 위한 해석적 방법으로서 Hypneu를 이용하였다. 실험 결과, 기존의 유압 시스템은 로봇 압들에 작은 부하가 걸려있을 때 불안정한 특성을 나타냈다. 다음 장에서 Oak Ridge 에 있는 공장에서 관찰되어진 시스템을 설명할 것이다. 4장에서 부품과 시스템 모델링 결과들을 살펴보고, 5장은 시물레이션, 성능 분석, 그리고 원래 시스템과 연관된 문제 설명을 다루게 될 것이다. RedZone 유압 시스템의 시물레이션에 결과 안정화 문제를 위한 개선안을 6장에서 소개하고, 7장에서 본 연구의 요약과 결론을 서술한다.

### 3. 유압시스템 설명

DAWM 유압 시스템의 회로도에는 그림 1과 같다.

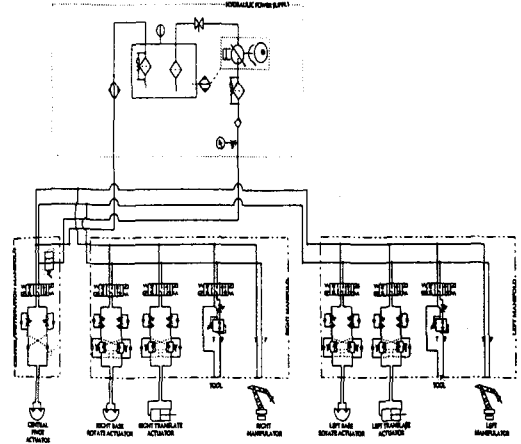


Fig. 1 Schematic of Hydraulic System

Fig. 1에서 보듯이 DAWM의 유압시스템은 중앙 피봇 씨킷, 좌우 베이스 회전 씨킷, 좌우 변환 씨킷, 좌우 도구 씨킷, 좌우 조종자 씨킷 등으로 구성되어 있다. 이러한 다양한 씨킷은 가변유량 압력 보상형 펌프로 연결되어 있다.

중심 피봇 씨킷은 중심 피봇의 작동 방향을 결정하며, 방향 제어 밸브에 의해 작동되는 네방향 세위치(four way three position) 솔레노이드를 포함한다. 또한 중심 피봇은 액추에이터로 향하는 두 라인의 체크 밸브들에 의해 작동되는 파일릿 뿐만 아니라 유량배출(metering out) 오리피스들도 포함한다. 액추에이터의 반대 면에 걸리는 압력은 체크 밸브들을 작동시킨다. 중심 피봇 액추에이터는 회전 실린더 타입이다. 중심 피봇 씨킷에 이용된 방향 제어 밸브는, 밸브 중심 위치에서 액추에이터로부터 탱크로 연결되어지는 라인에서 모터 스펙과 결합한다. 좌우 회전 씨킷은 액추에이터 라인들에 유량배출(metering-out) 오리피스들과 카운터밸런스 밸브들로 구성되어 있다. 액추에이터는 회전 실린더 타입이다.

이 유압 시스템은 일반적으로 비례 작동을 기준으로 편의를 도모하는 디자인으로 설계되었다.

액추에이터의 작동 속도는 유량배출(meter-out) 체크밸브의 셋팅과 방향제어 밸브의 열린 정도에 따라서 결정된다. 체크밸브들에 의해 작동되어지는 파일럿과 카운터밸런스 밸브들은 방향 제어 밸브들이 중심 위치에 있을 때 최대 부하를 지탱한다. 이와 같은 설계는 잠재적 안정성 문제들을 제공한다. 무엇보다도 방향 제어 밸브들은 그 자체들로 피드백 컨트롤 알고리즘의 편리를 위해 유량조정(metering) 특징들을 필수적으로 가지지 않는다. 들어올리는 체크들로 작동되는 파일럿은 뛰어난 고장시 안전(fail-safe) 작동들을 제공한다. 다시 말해서, 체크밸브가 액추에이터들을 닫는 위치에 있다면 그것들은 치명적인 유압 손실을 방지할 수 있도록 액추에이터를 단절시킬 것이다. 그러나 불행하게도 이러한 밸브들은 통상 액추에이터의 출구면이 열리고, 액추에이터의 이동이 허용되어지기 전에 액추에이터의 입구면에 큰 압력을 발생시킨다. 이러한 작동 형태는 액추에이터의 부하가 클 때 매우 효과적이다. 그러나 부하가 가볍고, 유체의 체적이 실제적으로 작을 때 불안정한 작동을 발생시킨다. 액추에이터의 입구 압력이 체크 또는 카운터밸런스에 의해 작동되는 파일럿이 열려지는 값에 도달할 때, 그것은 액추에이터를 이동시키기 위해 필요한 압력보다도 훨씬 높다. 그러므로 액추에이터는 매우 빠르게 이동하게 된다. 그 이동은 액추에이터 입구의 압력을 줄이고 체크와 카운터밸런스 밸브에 의해 작동되어지는 파일럿은 다시 닫혀지고 사이클은 전체적으로 다시 반복된다. 또한, 만약 방향 제어 밸브에 있어서 데드밴드(Deadband)에 있고 피드백 게인이 그 상황에 맞추어져 있지 않다면, 그 시스템은 중립 또는 중심위치에서 불안정의 한계 사이클(Limit Cycle) 형태로 들어갈 것이다.

#### 4. 컴포넌트들과 시스템 모델링

DAWM에서 유압시스템의 Hypneu 모델은 그림 2와 같다.

Fig. 2에서 보듯이 시스템 모델은 단지 좌우 피봇 씨킷과 중심 피봇 씨킷만 포함한다. 각각의 다양한 씨킷들은 위치 피드백 컨트롤 시스템들을 가진다.

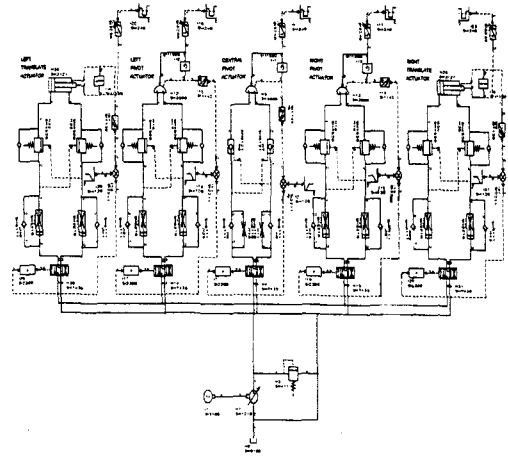


Fig. 2 Hypneu Schematic of DAWN Hydraulic System

#### 5. 시뮬레이션, 분석과 문제 설명

성능 분석을 완성하고 안정성 문제의 값을 구하기 위해서 다양한 씨킷을 시뮬레이션 하는 것은 필수적이다. Fig. 3은 중심 피봇 씨킷의 시뮬레이션 결과를 보여준다.

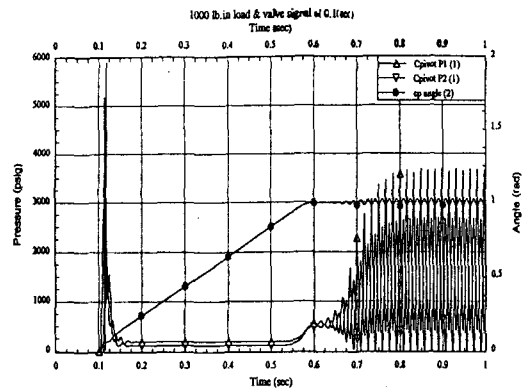


Fig. 3 Simulation Results of Central Pivot Circuit: Original Design Concept

밸브를 초기 작동시키기 위해서 1.0도 에러(error)를 이용하여 0.1초 동안 밸브오픈 하였으며, 시뮬레이션은 1초 동안 실행되었다. 액추에이터는 1000 lbs.-in.의 부하가 주어졌다. 에러가 0으로 갈 때까지 매우 훌륭하게 작동되는 중심 피

붓을 볼 수 있었고, 그 다음에 한계 사이클이 시작되었다. 왼쪽 피봇 썬킷은 중심 피봇처럼 동일한 방법으로 작동하였다. 왼쪽 피봇의 시뮬레이션 결과는 Fig. 4에서 보여진다. 이 썬킷은 작동할 동안과 에러신호가 0으로 줄어 들 때 불안정하다는 것이 드러났다.

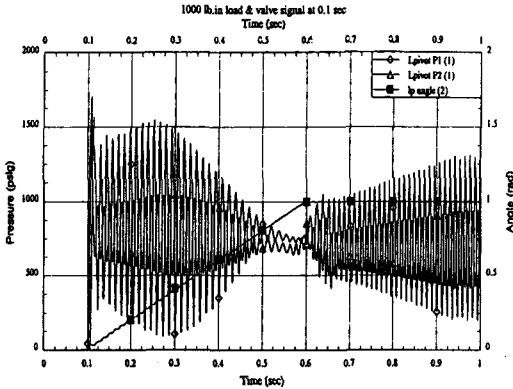


Fig. 4 Simulation Results of Left Pivot Circuit: Original Concept

오른쪽 피봇의 시뮬레이션 결과들은 두 썬킷들이 비슷하기 때문에 왼쪽 피봇을 이용해서 얻은 결과와 동일하다. 이와 유사하게 좌우 변환 썬킷들의 시뮬레이션 결과들은 Fig. 5에서 보여지는 것과 같이 불안정하다.

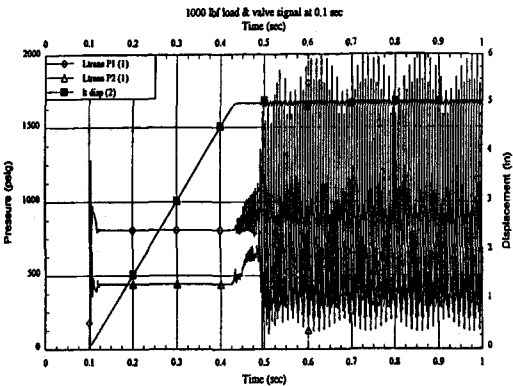


Fig. 5 Simulation Results of Left Transducer Circuit: Original Design Concept

앞의 결과에서 보듯이, 파일럿 체크들과 고장시 안전모드를 향상시키기 위해 결합된 카운터밸런스

스 밸브를 이용함으로써 시스템의 불안정성 문제가 발생하였다. 썬킷들은 일반적으로 부하가 가해진 조건들에서 매우 효과적으로 작동하였다. 그러나 부하는 입구 압력이 매우 작을 때 체크 또는 카운터밸런스 밸브를 열기 위해서 증가한다. 부하가 없다면 매우 작은 압력이 액추에이터를 움직이기 위해 필요로 하다. 체크밸브나 카운터밸런스 밸브가 열릴 때, 액추에이터는 입구 압력을 줄이면서 매우 빠르게 움직이며 카운터밸런스 밸브는 다시 닫혀지고 사이클은 자체로 반복한다. 문제는 체크/카운터밸런스 밸브들에 의해 작동되는 파일럿 사이의 상호작용과 부하라는 것이 추론되어졌다. 따라서 넓은 영역의 변동 부하를 다루기 위해 부하에 민감하지 않은 새로운 유압시스템을 설계할 필요가 있다.

## 6. 문제 해결

새로운 설계 개념에 있어서 두 가지 주요하게 고려될 사항이 있다. 첫째, 광역 부하변동 압력 하에서 안정적으로 작동하여야 한다. 둘째, 방향 제어 밸브에 압력이 없을 때 부하는 피동적으로 유지되어야만 한다. 이러한 두 가지 전제조건에 의해 중심 서보 밸브들이 단척짐으로써 대신하게 되는 모터 스펙들을 가진 방향 제어 밸브를 고려하였다. 체크 밸브들에 의해 작동되는 파일럿은 피동 고장 시 안전 장치들이 밸브 입구 압력 또는 펌프 출구 압력에 연결되어질 때 기능을 한다. 일반적 작동 시 체크 밸브에 의해 동작되어지는 파일럿은 넓게 열려지고 DAWM의 작동에 있어서 부분적인 역할을 감당할 수 없다. 이 모든 것은 전자 제어 시스템이 펌프가 작동하고 있을 때 밸브에 신호를 보내주는 것에 실패한다면 체크 밸브들에 의해 작동되는 파일럿이 열려있을지라도 밸브는 열려지지 않고 시스템은 중심 밸브가 단척짐으로써 유지되는 것을 의미한다. 체크 밸브들에 의해 작동되는 파일럿은 액추에이터에 매우 가까이 위치해야 하고 파일럿들은 용량을 이송할 수 있는 적절한 부하를 보증하는 한 값을 정해야 한다. 그래서 만약 피드백 위치 제어 시스템이 여전히 작동하고 있을 동안에 펌프가 차단되거나 유압 라인이 파열된다면, 밸브 입구 압력이 줄어

들고 체크 밸브에 의해 작동되는 파일럿은 부하를 유지하기 위해 닫힌다.

닫혀진 중앙 밸브들을 통하여 어떤 균열들이 존재한다. 이것은 펌프가 정상작동하고 있는데 고장 시 안전 모드가 작동한다면 부하는 균열 때문에 매우 조금만 움직일 것을 의미한다. 그러나 긴 시간동안 이러한 상황이 지속된다는 것은 매우 특별한 것이고, 그 움직임은 문제를 발생시킬 수 없을 만큼 느리다. 만약 제어 시스템이 고장 난다면, 그 시스템은 작동하기 않을 것이고 체크 밸브들에 의해서 작동되어지는 파일럿에 걸려지는 부하는 완전하게 차단되어지는 것을 보게 될 것이다.

새롭게 설계된 모형도는 그림 6과 같다. 밸브들은 중앙 서보 밸브들이 닫혀짐으로써 대신하게 되었다. 고장 시 안전 모드는 각각의 액추에이터 라인에서 체크 밸브에 의해 작동되는 파일럿의 사용에 의해 만족된다. 체크 밸브들에 의해 작동되는 파일럿은 밸브 입구 또는 펌프 출구 압력으로서 작은 값이다.

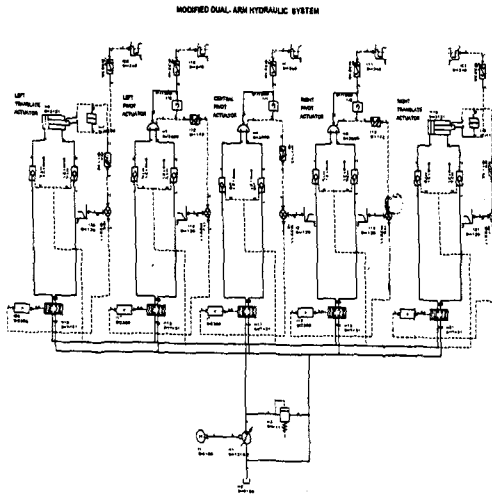


Fig. 6 HyPneu Schematic of the Recommended Hydraulic System for the DAWN

제시된 유압시스템의 성능을 입증하기 위해 현재 시스템과 동일한 조건에서 시뮬레이션 하였다. 그 결과는 Fig. 7, 8, 9와 같다. 그림에서 보듯이 제시된 유압시스템은 기존 유압시스템의 불

안정적인 한계사이클 현상을 제거할 수 있음을 알 수 있다.

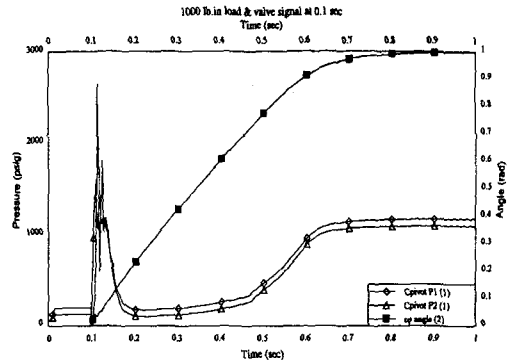


Fig. 7 Simulation Results of Central Pivot Circuit: Proposed Design Concept

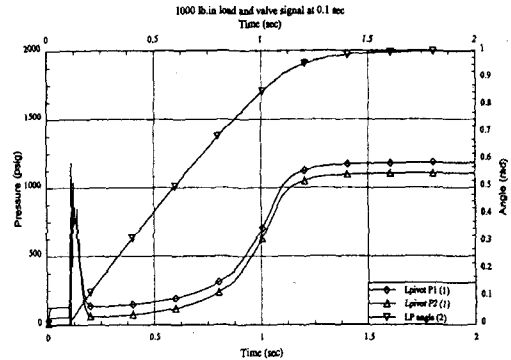


Fig. 8 Simulation Results of Left Pivot Circuit: Proposed Design Concept

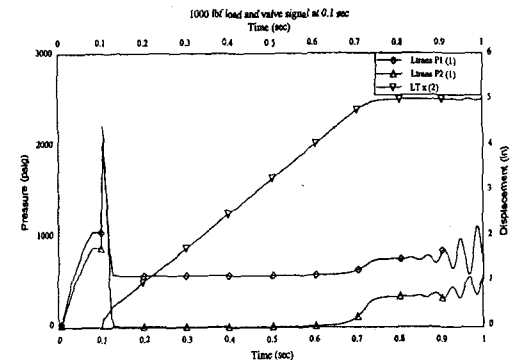


Fig. 9 Simulation Results of Left Translate Circuit: Proposed Design Concept

## 7. 요약 및 결론

본 연구의 주요한 목적은 이중 압 작동모듈의 분석적 평가를 제공하는 것이다. 현재의 유압 시스템을 Hyneu 프로그램을 이용하여 모델화하였고, 이 모델은 유압 시스템의 정보 제공에서부터 성능 분석까지 시뮬레이션에 이용되었다. 성능분석 결과 시스템 불안정 원인을 규명하였다. 불안정성의 원인은 체크 밸브들에 의해서 작동되어지는 파일럿과 고장 시 안전 모드를 위한 카운터밸런스 밸브의 상호 동특성에 기인한다. 고장 시 안전 모드는 기능부전(機能不全)이 발생했을 때, DAWM이 위험물을 처리하게 된 이후 시스템의 안전을 보정하는 매우 중요한 기능이다.

새롭게 설계된 개념은 시스템의 불안정성을 제거하기 위해 제시되었다. 현재 이용되어지고 있는 방향 제어 밸브는 밸브가 중앙 위치에 있을 때 다양한 액추에이터의 양면이 탱크에 연결되어 있는 모터 스플을 이용한다. 이 디자인 형태는 높은 부하에서 액추에이터가 갑자기 멈추면서 발생하는 고압 스파이크를 막기 위한 의도이다. 그러나 이 로봇 시스템은 정확하나 속도가 느리다. 그러므로, 그 액추에이팅(actuating)속도는 밸브 폐점(closure) 때문에 압력 스파이크(spike)가 높게 되어서 절대로 밸브에 도달할 수 없다. 제시된 개선안의 방향 제어 밸브는 전체적으로 닫혀진 중앙 서보밸브들을 대신했다. 부하가 감속되는 위치에서 속도가 문제가 된다면 제어 알고리즘은 밸브 폐점에서(closure) 지연 함수(delay function)와 연합하여 수정될 수 있다.

제시된 디자인은 체크 밸브들에 의해 작동되는 파일럿과 펌프 출구 압력에 의해 작동되는 체크 밸브에 의해 작동되는 파일럿을 가진 액추에이터의 반대 면으로부터 그들의 작동신호가 포함되는 카운터밸런스 밸브 모두를 대신한다. 이것은 액추에이팅(actuating)신호와 다양한 밸브들 사이의 어떤 가능한 상호작용을 제거한다. 고장 시 안전 모드는 닫혀진 중앙 밸브들의 결합과 체크 밸브들에 의해 작동되는 파일럿에 의해 완성되었다. 만약 펌프의 압력이 손실되거나 유압 호스가 파괴되면 펌프 출구 압력이 매우 낮아지고 체크 밸브들

에 의해 작동되어지는 파일럿은 부하를 유지한 채로 닫혀질 것이다. 만약 전기적 위치 제어 시스템이 고장난다면 서보밸브들은 열리지 않을 것이고 닫혀진 중앙 배치(configuration)는 부하를 유지한다. 체크 밸브들에 의해 작동되는 파일럿과 닫혀진 중앙 서보밸브는 일반적으로 매우 낮은 부하가 원인이 되어 생겨난 약간의 누유가 발생할 수 있다. 그러나 이 누유는 매우 작고, 이러한 누유가 원인이 되어 발생하는 어떤 움직임은 거의 인식되지도 않는다. 로봇이 작동자에 의해서 차단되어진다면, 좋은 작동 훈련은 차단하기 전에 부하가 제거되어야 한다고 지시한다. 사용되어지고 있을 때 시스템 기능부전(機能不全)이 발생한다면, 그 상황은 긴 시간 동안 존재하지 않아야 한다. 그러므로 추천된 유압 시스템의 안정성 특징들은 적어도 현재 사용되고 있는 디자인의 성능을 보장한다. 또한 시뮬레이션 결과 제시된 유압 시스템은 아무런 불안정성 현상도 발생하지 않았다.

## 8. 참고 문헌

- (1) HyPneu User's Manual, 2000, BarDyne Inc..
- (2) Robotics and Industrial Electronics, 1983, Heathkit Co.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 지원 계명대학교 저공해자동차부품기술개발 연구소의 후원에 의해 진행되었습니다.