

SMISMO 밸브 구조를 채용한 유압식 굴삭기의 평탄화 작업을 위한 휴리스틱 접근

A Heuristic Approach for Grading Operation of Hydraulic Excavator Systems using SMISMO Valve Configuration

조중선^{1,✉}, 황철민²
Joongseon Joh^{1,✉} and Cheol Min Hwang²

¹ 창원대학교 제어계측공학과 (Department of Control and Instrumentation Engineering, Changwon National Univ.)

² 창원대학교 제어계측공학과 대학원 (Department of Control and Instrumentation Engineering, Graduate School of Changwon National Univ.)

✉ Corresponding author: jsjoh@changwon.ac.kr, Tel: +82-55-213-3665

Manuscript received: 2013.7.3 / Revised: 2013.10.11 / Accepted: 2013.10.23

SMISMO valve configuration is now starting to draw attention of the researchers of the construction equipment industry to increase the fuel efficiency of their equipment like excavators and wheel-loaders. An open-loop control strategy for grading operation of hydraulic excavator systems using SMISMO valve configuration is investigated in this paper. Tabor's algorithm for 1 d.o.f. SMISMO system under the assumption of quasi-static operation is revealed as not adequate for multi d.o.f. system with large moment of inertia even though the motion of the system is slow. New parameters are proposed in this paper. It modifies Tabor's open-loop control strategy for the grading operation of hydraulic excavators using SMISMO valve configuration. A simulation-based parameter tuning method is also proposed. It uses GA (Genetic Algorithm) to find the best parameter values. Simulation study for a practical hydraulic excavator shows the validity of the proposed open-loop control strategy.

Key Words: SMISMO (독립적 미터-인 및 미터-아웃), Excavator (굴삭기), Grading operation (평탄화 작업), Open-loop control strategy (개루프 제어 전략), GA (유전자 알고리즘)

1. 서론

현재 대부분의 유압식 굴삭기는 스푼(spool) 형태 방향제어밸브 구조로 이루어진 MCV(Main Control Valve)에 의하여 제어된다. 이러한 구조는 오랜 기술적 안정감과 제어장치 구현의 손쉬움으로 유압식 굴삭기 제어의 표준으로 정착되었다. 그러나 요즘에는 스푼 형태 방향제어밸브가 갖는 독립적인 미터-인(meter-in) 및 미터-아웃(meter-out) 오리피스(orifice) 제어의 불가능함으로 인하여 전자유압식(electro-hydraulic) 굴삭기로의 발전을 통한

연비 개선에 장애로 인식되는 시각이 존재한다.¹

Fig. 1과 같이 미터-인 및 미터-아웃 오리피스를 독립적으로 제어할 수 있는 SMISMO(Separate Meter-In Separate Meter-Out) 밸브 구조(valve configuration)는 이미 1990년대부터 알려진 기술¹로써 두 개의 스푼 형태 방향제어밸브를 사용하는 초기의 방식도 있으나,² 기본적으로 네 개 또는 다섯 개의 전자유압식 포핏 밸브(poppet valve)로 구성된다.³⁻⁵ 이러한 기술은 그 내재적 장점에도 불구하고 크게 관심을 받지 못하였으나 유가의 급격한 상승에 의한 연비 개선의 필요에 의해 건설기계 산업 분야의 주목을

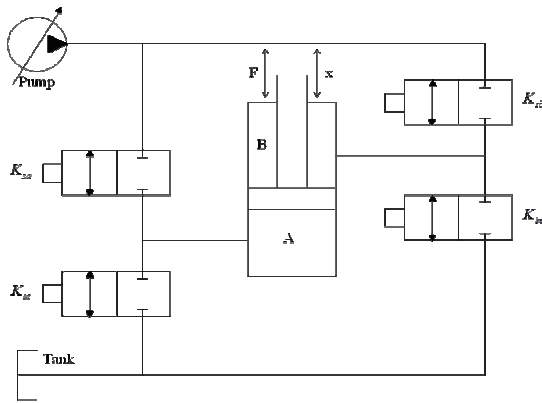


Fig. 1 General SMISMO valve configuration

끝기 시작하고 있다.

SMISMO 밸브 구조를 이용한 유압시스템에 대한 연구는 매우 제한적이다. 스웨덴의 Linköping 대학, 미국의 Purdue 대학, 그리고 미국의 유압 관련 기업인 HUSCO International에서 주로 연구와 개발이 이루어지고 있는 상황이다. 관련 연구 및 개발은 연비 향상과 운동정밀도 향상의 두 가지로 나눌 수 있다. 연비 향상은 주로 회생 유량(regeneration flow)을 효과적으로 이용하는 것으로써 Fig. 1에 보인 바와 같은 브리지 형태의 밸브 구조를 작업 및 부하 조건에 따른 다양한 모드(mode)로 운영하는 것이다⁵⁻¹¹. SMISMO 밸브 구조를 채용한 유압시스템의 운동정밀도 향상을 위한 시도는 펌프 제어와 개루프 제어로 나눌 수 있다. 펌프 제어는 주로 Purdue대학의 Yao 그룹에서 이루어지고 있으며 연비와 운동 정밀도를 동시에 향상시키는 제어 알고리즘을 제시하였다.^{5,6} 그러나 Deboer⁹가 지적한 것처럼 험한 작업환경의 굴삭기시스템에서는 위치 또는 속도 정보 궤환은 비실용적인 문제가 있으며 1자유도 시스템에 제한된 제어 알고리즘이라는 한계를 가지고 있다. SMISMO 밸브 구조를 채용한 유압시스템의 개루프 제어는 Tabor^{10,11}가 제안한 준정적거동(quasi-static motion) 가정하의 제어 전략이 대표적이다. 그러나 이 방법은 거동이 느린 1자유도 시스템에 대해서는 실용적인 장점이 있으나 굴삭기와 같이 2자유도 이상의 구조를 가지며 관성이 상호 큰 영향을 미치는 경우에는 직접적인 적용이 곤란하다.

본 논문은 연비 향상을 위하여 SMISMO 밸브 구조를 채용한 유압식 굴삭기를 대상으로 평탄화 작업에서의 작업 정밀도 향상을 위하여 위치 또는

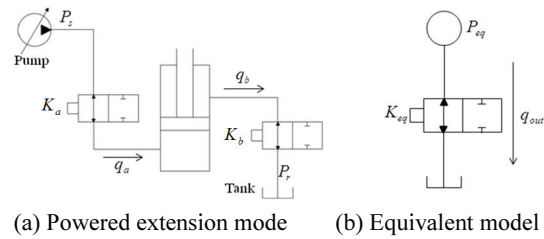


Fig. 2 Powered extension mode of the SMISMO valve configuration

속도 등의 상태 피드백이 없는 개루프 제어 전략을 제안한다. 기존의 Tabor의 방법을 유압식 굴삭기의 평탄화 작업에 특화 시켜 변형 시켰으며 시뮬레이션을 통하여 제안된 방법의 효과를 확인하였다. 2절에서는 Tabor의 제안의 핵심 사항을 간략히 소개하였으며 본 논문에서 제안하는 개루프 제어 전략은 3절에서 설명 되었다. 4절에서 시뮬레이션을 통하여 제안된 방법의 효과를 검증하였으며 5절은 본 논문의 결론이다.

2. SMISMO 밸브 구조 시스템을 위한 Tabor의 개루프 제어 전략

SMISMO 밸브 구조를 이용한 실린더의 방향제어는 Fig. 1에 보인 것과 같은 브리지 형태의 밸브 조합의 적절한 운용으로 이루어진다. Fig. 2(a)는 그 중 한 예를 보이며 피스톤의 길이가 신장되는 운동이다.

Tabor가 제안한 방법의 핵심은 준정적 운동이라는 가정하에 실린더 챔버 내의 작동유의 동적 거동을 무시하고 Fig. 2(b)에 보인 것처럼 등가모델(equivalent model)로 단순화 한 것이다. 이 모델의 오리피스 방정식은 식(1)과 같다.

$$q_{out} = K_{eq} \sqrt{P_{eq}} \tag{1}$$

여기에서 K_{eq} 와 P_{eq} 는 식(2) 및 식(3)과 같다.

$$K_{eq} = \frac{K_a K_b}{\sqrt{K_a^2 + R^3 K_b^2}} \tag{2}$$

$$P_{eq} = (R P_s - P_r) + (-R P_a + P_b) \tag{3}$$

K_a 와 K_b 는 각각 미터-인 및 미터-아웃 밸브 상수이며, P_s, P_r, P_a, P_b 는 각각 펌프, 탱크, 미터-인 측 실

린더 챔버, 미터-아웃 측 실린더 챔버 입력이고, R 은 Piston의 양단 면적 비로써 식(4)와 같이 표현된다.

$$R = A_a / A_b \tag{4}$$

여기에서 주목할 점은 하나의 K_{eq} 값에 대하여 무수히 많은 K_a 와 K_b 의 조합이 가능하며 어떠한 K_a 와 K_b 의 조합도 동일한 K_{eq} 값인 경우 동일한 q_{out} 을 내준다는 것이다. 이는 준정적거동 가정의 결과이며, 이에 따르면 동일한 피스톤 속도를 만드는 수 많은 K_a 와 K_b 의 조합이 존재한다는 것을 의미한다.

Tabor는 이러한 가정 하에서 특정 K_{eq} 값에 대한 K_a 와 K_b 의 선정 방법으로 K_a 와 K_b 의 작은 변화에 따른 K_{eq} 값의 변화(즉, K_a 와 K_b 에 대한 K_{eq} 의 민감도(sensitivity))가 최소일 것을 제안하였으며 다음과 같이 표현된다.

$$K_a = \mu K_b \tag{5}$$

$$\mu_{opt} = R^{3/4} \tag{6}$$

여기에서 μ_{opt} 은 주어진 K_{eq} 에 대한 민감도가 최소인 K_a 와 K_b 의 비(ratio)이다.

따라서 Tabor의 개루프 제어 전략은 주어진 피스톤 속도 명령에 대해 식(1)에 따라 K_{eq} 를 구하고, 식(2), (5), (6)에 의해 K_a 와 K_b 를 결정하는 것이다. 이때 P_{eq} 는 압력 센서 값으로부터 식(3)에 따라 계산된다.

3. SMISMO 밸브 구조 채용 굴삭기의 평탄화 작업을 위한 제안된 개루프 제어 전략

3.1 Tabor의 개루프 제어 전략 적용의 문제점

Tabor의 방법은 2절에서 언급한 것처럼 준정적 거동 가정을 기본으로 한다. 따라서 시스템의 거동이 상대적으로 느린 1자유도 시스템의 경우 매우 유용한 방법이 될 수 있다. Fig. 3은 4절의 대상 시스템인 굴삭기의 직선 추종 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 붐과 암의 2자유도 시스템으로 모델링 하여 동일한 K_{eq} 에 해당하는 세 가지 서로 다른 μ 값으로 시뮬레이션을 수행 하였다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 질량과 관성모멘트가 매우 큰 다자유도 시스템의 경우, 동일한 K_{eq} 라 할지라도 μ 값, 즉, 서로 다른 K_a 와 K_b 의 비(ratio)인 경우 매우 다른 결과를 나타냄을 알 수 있다. 따라서 굴

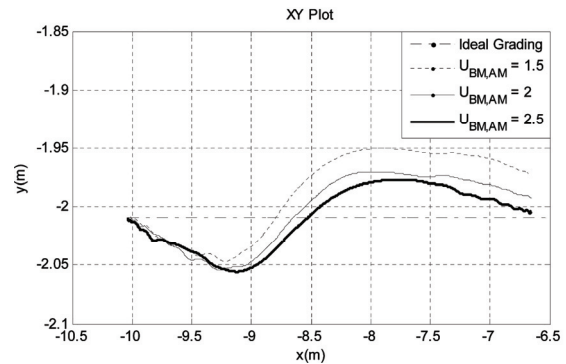


Fig. 3 Straight-line following responses with different μ values

삭기와 같이 다자유도이며 질량과 관성모멘트가 매우 큰 시스템의 경우 준정적거동 가정에 기반한 Tabor의 방법을 단순히 적용하기는 어렵다는 것을 알 수 있다.

3.2 제안된 개루프 제어 파라미터

Fig. 4(a)는 일반적인 평탄화작업 표준속도선도를 나타낸다. 표준속도선도는 직교좌표 상에서의 굴삭기 버킷 선단의 속도선도로써 T_1 의 가속구간과 $(T_2 - T_1)$ 의 등속구간, 그리고 $(T_3 - T_2)$ 의 감속구간으로 설정하였으며 v_b 는 평탄화작업이 진행되는 등속구간의 속도를 나타낸다. Fig. 4(b)와 (c)는 버킷 선단의 표준 속도선도를 만들어 내는 붐과 암 실린더의 속도로서 조이스틱 조작, 즉, 작업자의 조이스틱을 통한 속도명령을 나타낸다.

본 연구에서는 가속구간의 관성이 등속구간 이후의 거동에 큰 영향을 미침을 시뮬레이션을 통하여 확인하였으며 이는 Tabor의 준정적거동의 가정과 크게 어긋나는 요소로 판단하였다. Fig. 4에 보이는 것처럼 표준 속도선도의 가속과 등속 구간 경계는 조이스틱 조작의 변곡점과 거의 일치한다. 따라서 본 논문에서는 이 변곡점을 경계로 Tabor가 제안한 μ 값을 다르게 정의할 것을 제안한다. 그러므로 붐과 암에 각각 하나의 μ_{opt} 값이 정해지는 Tabor의 방법과는 달리 각각 두 개의 μ 값(가속 구간은 μ_1 , 등속 이후 구간을 μ_2 로 정의 함)을 제안한다.

또한 본 논문에서는 Fig. 5에 보인 것과 같이 μ_2 가 적용되는 방법과 관련한 두 개의 파라미터 ΔT_1 과 ΔT_2 를 더 제안한다. 여기에서 좌표 원점은 조이스틱 명령의 변곡점이 발생한 시점이다. ΔT_1

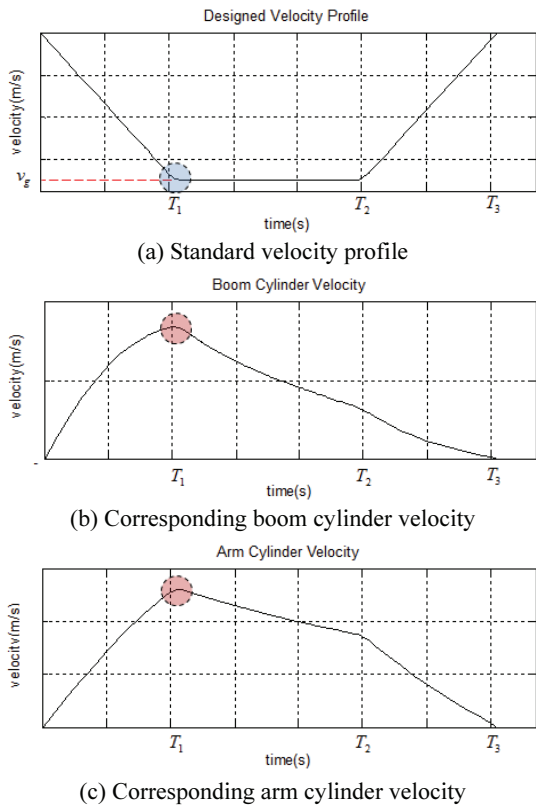


Fig. 4 Proposed standard velocity profile for grading operation

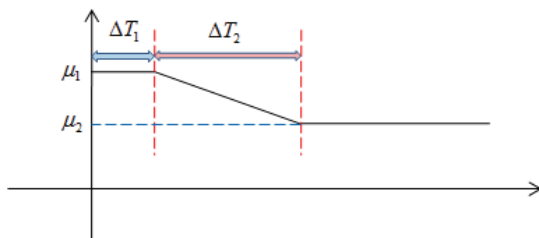
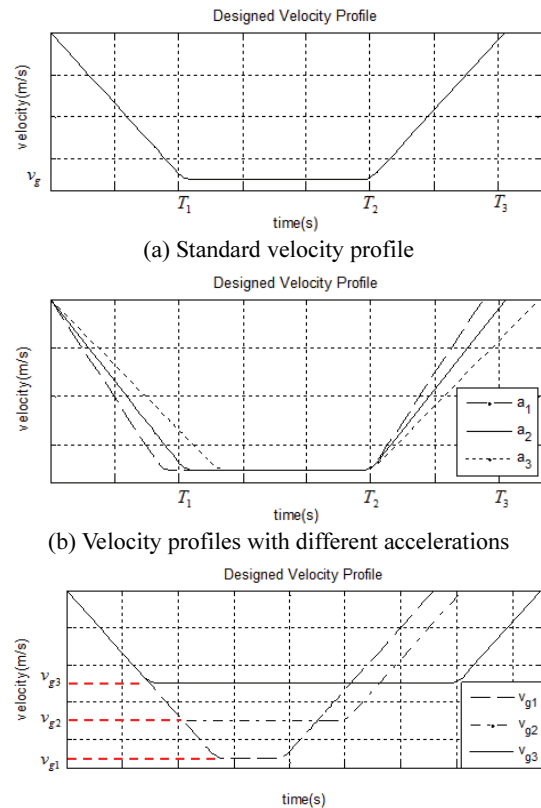


Fig. 5 Concept of the proposed parameters ΔT_1 and ΔT_2

은 변곡점 발생 후 μ_1 이 다른 값으로 바뀌는 시점을 의미하고 ΔT_2 는 μ_1 이 μ_2 로 완전히 전환되는 시간을 의미한다.

ΔT_1 은 조이스틱 명령과 실제 피스톤의 작동 사이의 동적 거동을 고려한 파라미터이고 ΔT_2 는 불연속적인 급격한 μ 값의 변화에서 오는 시스템 거동의 충격을 완화하기 위한 파라미터이며 불필요한 복잡함을 피하기 위하여 붐과 암에 동일한



(c) Velocity profiles with different grading speeds
Fig. 6 Designing velocity profiles for tuning of the proposed parameters

값을 사용한다. 본 논문에서는 μ_1 에서 μ_2 로의 선형적 변화를 제안한다.

이상과 같이 평탄화 작업을 위한 여섯 개의 파라미터를 새롭게 제안하며 이를 특정 모델의 굴삭기에 적용하기 위한 파라미터 튜닝 방법을 다음 절에서 제안한다.

3.3 제어 전략 및 파라미터 튜닝

본 논문에서 제안하는 제어 전략이 실제로 굴삭기의 평탄화 작업에 적용되려면 작업현장에서 이루어지는 평탄화작업 속도 영역을 모두 포함할 수 있어야 한다.

본 논문에서는 Fig. 6과 Table 1에 보인 것과 같은 평탄화작업을 위한 개루프 제어전략을 제안한다. 먼저 작업자의 지식과 작업현장 분석을 통하여 대표적인 직교좌표 상의 표준속도선도를 정의한다. Fig. 6(a)는 표준속도선도를 나타낸다. 이 표준

Table 1 Open-loop control strategy

| Range of vel. \ Range of Accel. | $a \leq \frac{a_1 + a_2}{2}$ | $\frac{a_1 + a_2}{2} < a \leq \frac{a_2 + a_3}{2}$ | $\frac{a_2 + a_3}{2} < a$ |
|--|------------------------------------|--|---------------------------|
| | $v \leq \frac{v_{g1} + v_{g2}}{2}$ | $v = v_{g1}$ $a = a_1$ | $v = v_{g1}$ $a = a_2$ |
| $\frac{v_{g1} + v_{g2}}{2} < v \leq \frac{v_{g2} + v_{g3}}{2}$ | $v = v_{g2}$ $a = a_1$ | $v = v_{g2}$ $a = a_2$ | $v = v_{g2}$ $a = a_3$ |
| $\frac{v_{g2} + v_{g3}}{2} < v$ | $v = v_{g3}$ $a = a_1$ | $v = v_{g3}$ $a = a_2$ | $v = v_{g3}$ $a = a_3$ |

속도선도를 중심으로 가감속 및 평탄화작업 속도를 적절하게 변화시켜 원하는 개수의 속도선도를 정의한다. 이 복수개의 속도선도 들은 평탄화작업 전체 속도 영역을 세분화하여 포함하는데 사용된다. Fig. 6(b)는 표준속도선도 외에 두 가지의 서로 다른 가감속도를 나타내었고, Fig. 6(c)는 표준속도선도 외에 서로 다른 두 가지의 평탄화 속도를 나타내었다. Fig. 6의 경우 표준속도선도를 중심으로 총 9가지의 평탄화 속도선도가 만들어진다.

이와 같이 정의된 각각의 속도선도마다 3.2절에 정의된 6개의 파라미터 값을 적절히 튜닝한 후 Table 1에 보인 것과 같은 제어 전략에 의해 평탄화작업을 수행한다. Table 1에 보인 분할된 각각의 영역에는 위에 정의한 속도 선도가 하나씩 할당되며, 각각의 속도 선도에 대해 최적화된 파라미터에 의해 평탄화작업이 수행된다. 따라서 Fig. 6과 같이 속도선도들을 정의할 경우 총 9종류의 파라미터 세트에 의하여 개루프 제어가 이루어진다. 그러므로 각각의 속도선도에 대해 최적화된 파라미터를 결정하는 방법이 필요하다.

본 논문에서는 제안된 파라미터의 튜닝을 위하여 실제 시스템에 가깝게 모델링 된 시뮬레이션 모델을 대상으로 유전자 알고리즘을 이용하여 최적화된 μ_1 과 μ_2 를 먼저 결정하고, 이를 토대로 최소의 평탄화 오차(Grading error)에 해당하는 ΔT_1 과 ΔT_2 를 선정하는 방법을 제안한다. Fig. 7와 Fig. 8에 μ_1 , μ_2 및 ΔT_1 과 ΔT_2 를 결정하는 과정을 보인다.

굴삭기의 평탄화 작업은 붐과 암의 연동 작업이므로 유전자 알고리즘을 이용하여 붐과 암의 파라미터를 동시에 결정하여야 한다. 따라서 유전자 알고리즘을 위한 크로모솜(chromosome)은 식(7)과 같이 붐과 암의 μ 값으로 구성된다.

$$Chromosome = [\mu \text{ of Boom}, \mu \text{ of Arm}] \quad (7)$$

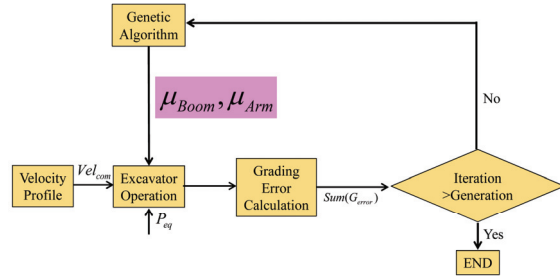


Fig. 7 Block diagram for tuning μ_1 and μ_2

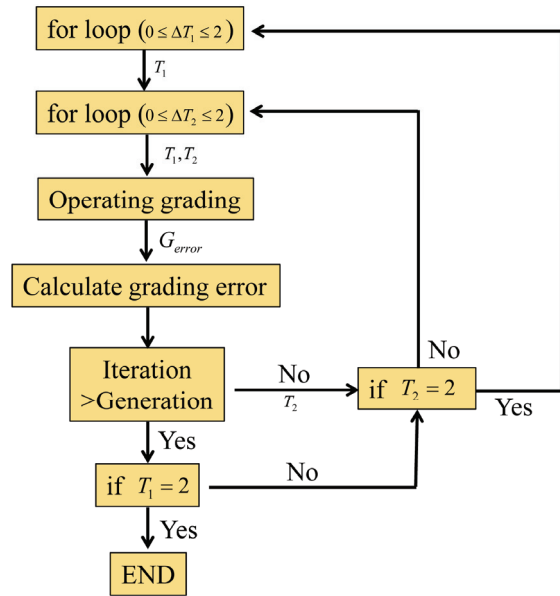


Fig. 8 Block diagram for selecting ΔT_1 and ΔT_2

또한 본 논문에서는 최적화를 위한 적합도 함수(fitness function)로 성능평가지수의 하나인 IAE (Integral of Absolute magnitude of the Error)를 사용하였으며, μ_1 을 위해서는 식(8)과 같이 가속구간만을 평가하였고, μ_2 를 위해서는 식(9)와 같이 등속구간 이후만을 평가하였다.

$$IAE = \int_0^{t_m} |e(t)| dt \quad (8)$$

$$IAE = \int_{t_m}^{t_f} |e(t)| dt \quad (9)$$

여기에서 t_m 은 조이스틱 속도 명령에서 변곡점 발생 시간이고, t_f 는 평탄화 작업(grading operation)이 종료하는 시간을 의미한다.

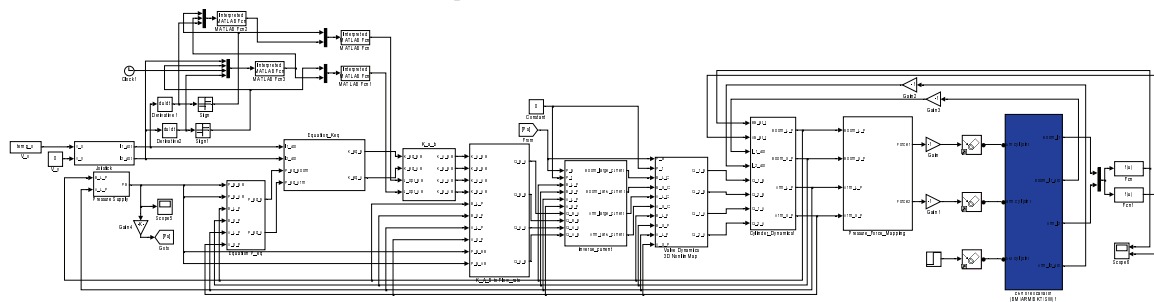
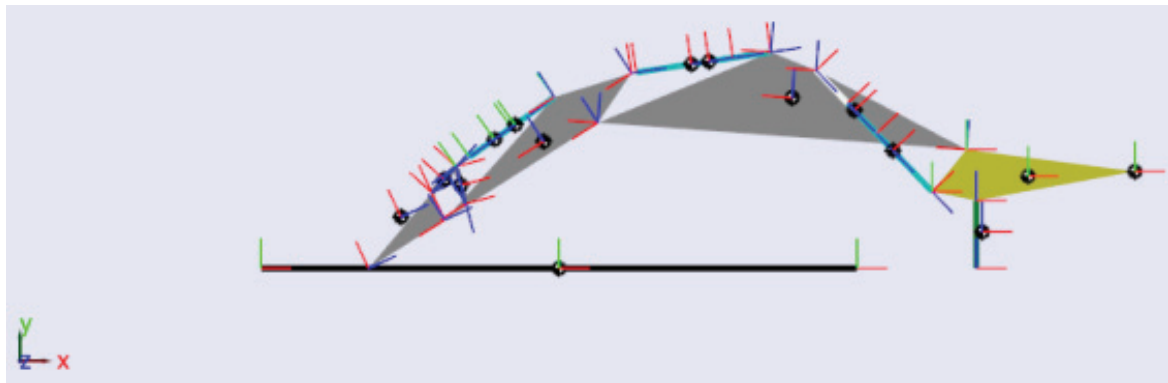
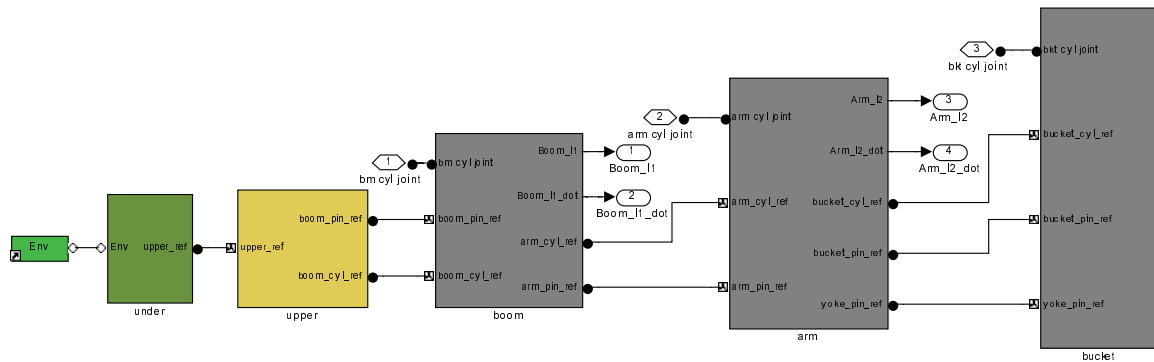


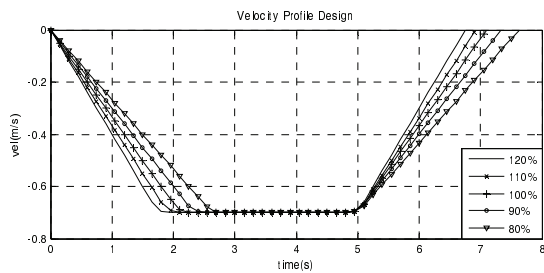
Fig. 9 Modeling of the excavator using SMISMO valve configuration

Fig. 8은 앞에서 결정된 μ_1, μ_2 를 사용하여 ΔT_1 과 ΔT_2 를 결정하는 과정을 보여준다. 최적화의 판정은 식 (10)과 같이 평탄화 작업전체 구간에서의 평탄화 오차를 최소화하는 ΔT_1 과 ΔT_2 로 결정하였으며 ΔT_1 과 ΔT_2 의 상한치(즉, 2초)는 임의로 선정하였다.

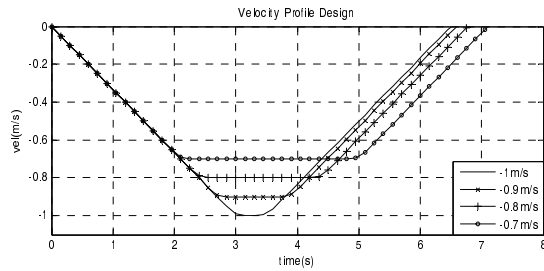
$$IAE = \int_0^{t'} |e(t)| dt \quad (10)$$

4. 시뮬레이션 결과 및 토론

3절에 언급한 바와 같이 본 논문에서 제안하는 방법은 실제 시스템에 가까운 시뮬레이션 모델을 기반으로 하고 있다. 따라서 본 논문에서는 Fig. 9와 같이 굴삭기 기계부는 ADAMS 모델로부터 필요한 데이터를 확보하여 Mathworks사의 SimMechanics를 사용하여 모델링 하였으며, 유압회로를 포함한 나머지 구성 요소들은 Simulink로 모델링 하였다.



(a) Velocity profiles with 5 different accelerations



(b) Velocity profiles with 4 different grading speeds

Fig. 10 Velocity profiles designed for the simulation study (20 velocity profiles in total)

시뮬레이션에 사용된 굴삭기는 붐과 암의 질량은 2,128kg과 1,132kg이고, 관성모멘트(moment of inertia)는 각각 $7.24 \times 10^9 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 와 $1.58 \times 10^9 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 이다. 밸브는 SMISMO 밸브 구조에 많이 사용하는 포핏 밸브(poppet valve)를 사용하였다.^{5,8}

Fig. 9(a)는 시뮬레이션 대상 굴삭기의 기계부를 SimMechanics를 이용하여 모델링한 것이며 (b)는 SimMechanics 모델의 비주얼 표현(visual representation)이다. SMISMO 밸브 구조를 포함한 유압회로 및 제어기 등은 Simulink로 구현하였다. Fig. 9(c)는 Simulink 및 SimMechanics로 구현된 전체 프로그램을 나타낸다.

Fig. 10은 시뮬레이션에 사용된 표준속도선도를 포함한 20가지의 속도선도를 나타낸다. 표준작업 선도는 약 2초간의 가속과 감속 구간(기울기 1/3)을 두었고 약 3초간의 등속 구간(0.7m/s)을 두었으며 이를 통한 평탄화 거리는 약 3.5미터이다. 이를 중심으로 다섯 가지의 가속 및 감속 패턴과 네 가지의 등속 패턴을 정의하였다. 표준속도선도의 가속을 100%로 표현할 때 80%, 90%, 100%, 110% 및 120%의 다섯 가지를 선정하였다. 또한 평탄화속도는 0.7 m/s, 0.8 m/s, 0.9 m/s 및 1.0 m/s의 네 가지를 선정하였다. 따라서 모두 20개의 서로 다른 속도 선도가 파라미터 튜닝을 위해 사용되었다.

Table 2 Parameters tuned for 80% acceleration and 0.7m/s grading speed

| 80 % | Boom μ_1 | Arm μ_1 | ΔT_1 | ΔT_2 | Boom μ_2 | Arm μ_2 |
|---------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| 0.7 m/s | 1.0 | 1.8 | 0.4s | 0.2s | 2.2 | 1.1 |

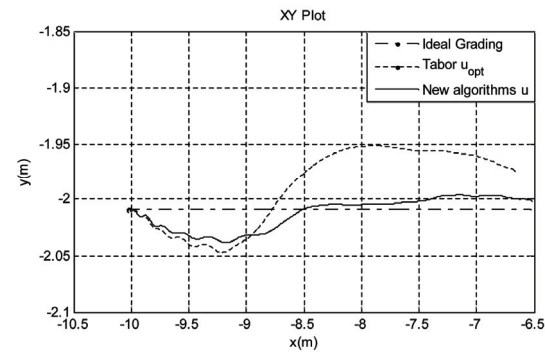


Fig. 11 Comparison of grading errors between Tabor's μ_{opt} and proposed parameters for 80% acceleration and 0.7m/s grading speed

Table 3 Improvement of grading quality over Tabor's algorithm using one constant μ_{opt}

| Acc \ Vel | 120% | 110% | 100% | 90% | 80% |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| -1 [m/s] | 39.9% | 37.5% | 22.8% | 22.2% | 25.6% |
| -0.9 [m/s] | 19% | 30% | 17.6% | 24.5% | 34.9% |
| -0.8 [m/s] | 46.8% | 44.7% | 21.5% | 23% | 17.9% |
| -0.7 [m/s] | 40.8% | 53.8% | 49.2% | 65.8% | 72.3% |

Table 2는 3절에 제안한 방법을 이용하여 80%의 가속과 0.7m/s의 등속구간을 갖는 속도선도에 대해서 파라미터 튜닝을 한 결과이다.

Fig. 11은 Table 2의 파라미터를 적용한 평탄화 작업 결과와 Tabor^{12,13}의 μ_{opt} 값을 적용한 결과를 비교한 예이다. 3절에서 예상한 바와 같이 가속 구간 이후의 평탄화 오차가 크게 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

Table 3은 Fig. 10에 정의된 20가지 속도 선도에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 표의 값들은 식(10)의 성능지수를 사용하여 Tabor^{12,13}의 알고리즘을 적용한 결과 대비 개선된 평탄화 오차의 비를 나타낸다. 평균적으로 30% 이상의 성능 향상을 확인할 수 있다. 이는 상대적으로 운동 속도가 느린 시스템이라 할지라도 질량과 관성모멘트가 매

우 큰 시스템일 경우 Tabor의 준정적 운동 가정을 그대로 적용하기엔 무리가 있음을 의미한다고 볼 수 있다. 따라서 Table 3의 결과는 평탄화 작업의 속도선도에서 가속 구간과 등속 구간을 구분함으로써 가속 구간의 관성이 등속구간에 미치는 영향을 줄임으로써 평탄화 작업의 성능을 향상시킬 수 있음을 보여준다.

개루프 제어의 특성상 폐루프 제어시스템과 같은 일관성 있는 성능 향상을 기대할 수는 없지만 실질적으로 실린더의 위치 또는 속도 센서를 사용하지 않는 굴삭기 시스템의 특성과 연비 향상을 위한 SMISMO 밸브 구조의 채용이라는 기술적 시도를 고려할 때 Table 3의 결과는 매우 의미가 있다고 할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 SMISMO 밸브 구조를 채용한 유압식 굴삭기의 평탄화 작업을 위한 개루프 제어에 관한 새로운 제안을 하였다. 준정적거동의 가정하에 1자유도 시스템을 대상으로 회생 유량의 활용을 통한 연비 향상에 초점을 두고 개발된 Tabor의 개루프 제어 전략 다 자유도를 갖는 무거운 중량의 굴삭기의 평탄화 작업에 적용하였을 경우 발생하는 큰 평탄화 오차를 줄이기 위하여 새로운 개루프 제어용 파라미터를 정의 하였으며 유전자 알고리즘을 중심으로 한 파라미터의 튜닝 방법을 제안하였다. 성능 검증을 위하여 실제 굴삭기를 대상으로 시뮬레이션을 한 결과 본 논문에서 제안한 방법이 Tabor의 개루프 제어 전략을 그대로 적용한 것 대비하여 평균 30% 이상 최대 70% 이상에 해당하는 성능 향상을 볼 수 있었다. SMISMO 밸브 구조를 채용한 시스템에 대한 Tabor의 실용적 알고리즘이 굴삭기의 평탄화 작업에 대하여 가속 구간과 등속 이후 구간의 분리를 통하여 더욱 성능 향상을 기할 수 있음을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2012년도 창원대학교 연구교수연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Jansson, A. and Palmberg, J., "Separate Controls of

- Meter-in and Meter-out Orifices in Mobile Hydraulic Systems," SAE international off-highway & power plant congress and exposition, pp. 1-7, 1990.
2. Aardema, J., "Hydraulic Circuit Having Dual Electro hydraulic Control Valves," Caterpillar Inc., US Patent, No. 5568759, 1996.
3. Aardema, J. and Koehler, D., "System and Method for Controlling An Independent Metering Valve," Caterpillar Inc., US Patent, No. 5947140, 1999.
4. Book, R. and Goering, C., "Programmable Electro hydraulic Valve," SAE Technical Paper No. 1999-01-2852, 1999
5. Liu, S. and Yao, B., "Coordinate Control of Energy Saving Programmable Valves," IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol. 16, No. 1, pp. 34-45, 2008.
6. Yao, B. and DeBoer, C., "Energy-Saving Adaptive Robust Motion Control of Single-Rod Hydraulic Cylinders with Programmable Valves," Proc. of the American Control Conference, pp. 4819-4824, 2002.
7. Shenouda, A., "Quasi-Static Hydraulic Control Systems and Energy Savings Potential Using Independent Metering Four-Valve Assembly Configuration," Ph.D. Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, 2006.
8. Eriksson, B., "Mobile Fluid Power Systems Design: with a Focus on Energy Efficiency," Ph.D. Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, Link openings University, 2010.
9. DeBoer, C. and Yao, B., "Velocity Control of Hydraulic Cylinders with only Pressure Feedback," ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, pp. 1-9, 2001.
10. Tabor, K., "A Novel Method of Controlling a Hydraulic Actuator with Four Valve Independent Metering Using Load Feedback," SAE Technical Paper No. 2005-01-3639, 2005.
11. Tabor, K., "Optimal Velocity Control and Cavitation Prevention of a Hydraulic Actuator Using Four Valve Independent Metering," SAE Technical Paper No. 2005-01-3620, 2005.