

주행감각 재현을 위한 휠굴삭기용 Washout 필터 설계 및 한계값 추정

김광석*, 유완석**, 이민철**, 손권**, 이장명**,
최대형***, 박민규***, 박형호****

Suggestion of Cutoff Frequency in the Washout Filter for a Wheel type Excavator

Kwang-Suk Kim*, Wan-Suk Yoo**, Min-Cheol Lee**, Kown Son**, Jang-Myung Lee**,
Dae-Hyoung Choi***, Min-Gyu Park***, Hyoung-Ho Park****

ABSTRACT

In this study, a real-time simulation system and a washout algorithm for an excavator have been developed for a driving simulator with six degrees of freedom. The excavator model consisting of a boom, bucket, upper frame, lower frame and four wheels, has total 11 degrees of freedom.

The suggested washout algorithm consists of high and low pass filters with second order. The high pass filters cut off low frequency of the motion cues limited by platform motion. The cut off frequency for the tilt coordination are suggested for a realistic regeneration of excavator motion.

Key words : Driving Simulator(구동 시뮬레이터), Washout Algorithm(여과 알고리즘),
Vehicle Dynamics(차량 동역학), Real-Time Simulation(실시간 시뮬레이션)

1. 서론

휠굴삭기 시뮬레이터의 유효성은 굴삭기의 동역학적 특성과 운전조건 변화에 따른 운동을 시뮬레이터에 앉은 운전자에게 어느 정도 현실감 있게 재현시키느냐에 달려있다. 일반적으로 굴삭기는 운동영역의 제한이 없지만 그 운동을 모사하는 운동시스템은 기구학적인 운동범위와 시스템의 동특성

에 있어서 한계가 있으므로 완전한 운동 재현이 어렵다. 따라서, 운동시스템의 물리적인 한계 내로 운동영역을 제한하고 운전자로부터 전달되는 명령 큐(cue)에 의한 결과를 인체의 감지영역 내로 유지시키는 washout 알고리즘이 필요하다.

운동플랫폼(motion platform)에서 모사하는 명령 큐는 운전자가 주행 시나리오를 민감하게 체험할 수 있도록 동역학 해석결과로부터 얻어지는 운전석의 각 방향 선형가속도와 각속도를 washout 알고리즘의 입력으로 주게된다.

* 안동과학대학 자동차과
** 부산대학교 기계기술연구소
*** 부산대학교 대학원
**** 볼보중공업(구 삼성중공업)

명령 큐의 성분 중 저주파 신호는 운동시스템의 기구학적인 한계 때문에 운동재현을 불가능하게 하므로, 운전자가 감지할 수 있는 영역의 응답을 고역 통과필터(high-pass filter)를 통해 재현한다. 또한, 고주파 필터링은 임의의 운동을 수행한 뒤 다음 명령 큐를 재현하기 위해 운동 플랫폼을 운동원점으로 되돌리는 역할도 수행한다. Washout 알고리즘에서 고주파 필터링과 함께 중요한 설계요소는 경사 변환(tilt coordination)이다. J-선회와 같은 주행상황에서 발생하는 횡가속도는 저주파 신호이므로 고주파 필터를 거치면 재현할 수가 없다. 필터링된 저주파 가속도를 재현하기 위해 운동플랫폼을 더 기울여 주면 운전자는 지속적인 가속도를 체험할 수 있다. 이렇게 washout 알고리즘을 적용함으로써 실제 굴삭기의 운전특성을 시뮬레이터 상에서 재현하는 것이 가능해진다. 본 연구에서는 휠굴삭기의 실시간 시뮬레이션 프로그램의 내용과 프로그램의 결과로 나오는 운동을 재현시키기 위한 washout 알고리즘의 설계 및 현실감 재현을 위한 주파수의 한계값(cutoff frequency) 추정에 대하여 연구하였다.

2. 실시간 해석용 휠굴삭기의 다물체 동역학 모델링

본 연구의 다물체 동역학 해석에 사용된 휠 굴삭기의 형상은 Fig. 1과 같다. Fig. 1에 나타난 휠 굴삭기의 주요 부품을 모두 고려하면 26개의 물체(body)로 다물체 동역학(multibody dynamics) 모델을 구성할 수 있다^[1]. 굴삭기의 작업부를 고정시킨 상태로 주행한다면, 각각의 바퀴에서 생겨나는 회전자유도 4개, 앞쪽 차축(axle)과 하부프레임 사이의 회전자유도 1개, 차체의 운동자유도 6개를 포함하여 11자유도로 모델링할 수 있다. 그러나, 실시간으로 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 운동에 큰 영향을 미치지 않는 범위 내에서 모델에 포함되는 부품의 수를 줄여야 하므로, 다음의 과정을 거치면서 부품의 수를 줄였다.

먼저, 상부프레임과 브라켓 조인트로 연결된 연료탱크, 유압탱크, 스윙모타, 엔진, 주제어밸브, 카운트 웨이트 및 캡을 상부프레임에 합하였다. 또한 하부프레임과 브라켓 조인트로 연결된 뒷 차축도 하부프레임에 합하였다. 이러한 과정을 거쳐 18개의 부품으로 구성된 모델(Body18 모델)을 만들었다. 그러나, Body18 모델에서도 물체의 수가 많아

실시간 시뮬레이션과는 거리가 멀다고 판단되었기에, 각 실린더(부음실린더, 아암실린더, 버킷실린더)를 2개의 물체가 연결된 것으로 모델링하지 않고 힘만 주고받는 힘요소로 모델링 하였다. 이러한 과정을 통하여 12개의 부품으로 구성된 모델(Body12 모델)을 만들었으나, Body12 모델을 사용하여 실시간 해석이 쉽지 않음을 확인하여 다시 물체 수를 줄였다.

Body12 모델에서는 아암, 요크(yoke), 커넥팅로드와 버킷(bucket) 사이에 있는 폐쇄연쇄(closed loop)인 4절 기구가 존재한다. 폐쇄연쇄가 있으면 동역학 해석에 시간이 많이 소요되므로, 이 4절 기구를 제거하고 버킷이 아암과 일정한 각도를 유지하도록 버킷실린더가 설치되었던 두 지점간의 거리가 일정하게 유지되도록 거리일정구속 조건만 부가하였다. 이러한 과정을 통하여 10개의 부품으로만 구성된 모델(Body10 모델)을 만들었다^[2].

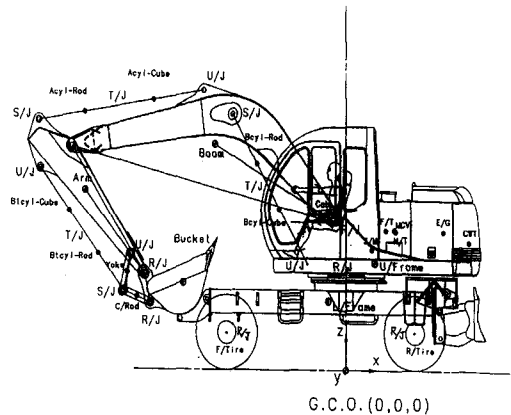


Fig. 1 Wheel type excavator model

3. 실시간 동역학 해석

3.1 실시간 동역학 해석 프로그램의 흐름도

본 연구에서는 휠굴삭기의 실시간 동역학 시뮬레이션을 위하여 보다 실시간에 가까운 Body10 모델을 사용하여 Fig. 2와 같은 흐름도를 따라 동역학 해석 프로그램을 개발하였다. 실시간 동역학해석 프로그램에서는 속도변환법(velocity transformation)을 이용하여 운동방정식을 유도하였으며^[3], 적분방

법으로는 적분간격이 일정한 CONDE 루우틴과 적분간격을 조절할 수 있는 VARDE의 두 종류를 선택할 수 있도록 하였다. 적분 알고리즘으로는 ABAM(Adams Bashforth Admas Moulton) 방법에 기초한 다단계(multi-step) 방법을 사용하였으며, SGI 워크스테이션으로 실시간 동역학 계산이 가능하였기에 일단계(one-step) 방법의 적분은 고려하지 않았다. 적분간격은 화면상에 도로 및 주위 경관을 투영해주는 그래픽 워크스테이션과의 신호처리를 고려해 최고 0.002sec로 하였다.

Fig. 2에 나타낸 흐름도를 따라 개발한 프로그램의 해석결과를 상용프로그램 DADS와 비교하여 개발한 프로그램에 대한 신뢰성을 확인하였다.

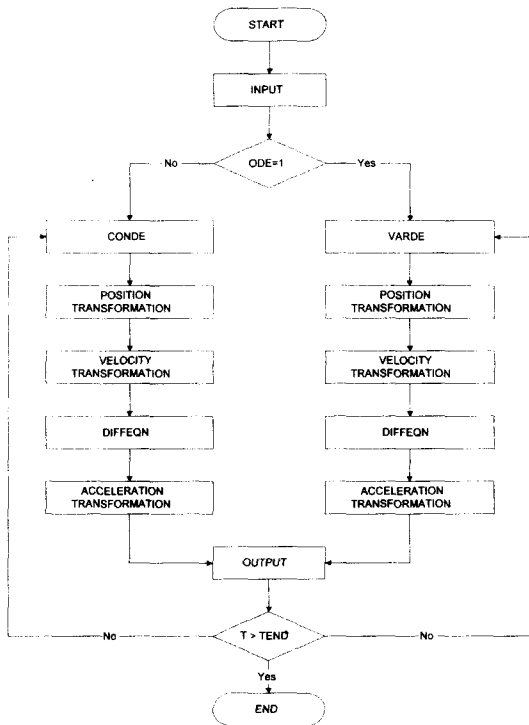


Fig. 2 Flow chart of real time simulation program

3.2 차선변경 시뮬레이션

시뮬레이션에 사용한 휠 굴삭기 모델의 기본적인 제원을 Table 1에 나타내었다. 초기 속도로 4초 동안 직진 주행하다가 이후 6초 동안 앞 타이어에 조향 입력을 주어 차선 변경 해석을 수행하

였다. 차선 변경해석으로 얻어진 결과중 Z축(수직축)에 대한 각속도를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 DADS는 상용프로그램인 DADS의 결과이며 RTSP는 개발된 프로그램의 실행결과를 의미한다. 본 연구에서의 프로그램과 DADS의 결과가 잘 일치함을 확인할 수 있다.

Table 1 Material property of wheel type excavator

	질량[kg]	관성모멘트[kg·m ²] (I _{xx} , I _{yy} , I _{zz})
차체	7338.7	(5696.6, 30715.9, 29187.4)
앞차축	465.0	(83.7, 7.8, 87.4)
타이어	162.5	(13.5, 20.3, 13.5)

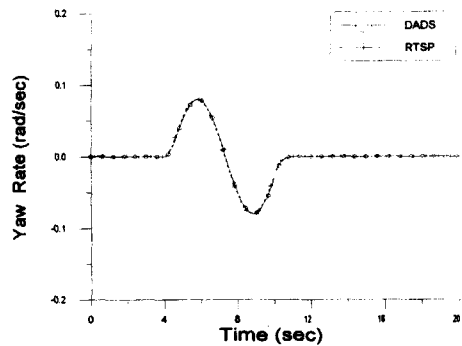


Fig. 3 Yaw rate of main body

4. 굴삭기 주행감각 구현을 위한 Washout 필터 개발

4.1 인체 감각 모델

차량 시뮬레이터는 실시간 차량 시뮬레이션 시스템, 시각 및 음향 시스템, 운동 시스템, 제어 힘 로딩 시스템 등으로 구성된다. 본 연구에서 개발된 휠굴삭기 시뮬레이터에 관한 전체적인 시스템 구성에 관한 개념도를 Fig. 4에 표시하였다.

이러한 차량 시뮬레이터는 기구학적인 구동한계와 더불어 동적성능에 대한 운동한계가 존재한다. 때문에 시뮬레이션을 통해 재현되는 운동입력

에 대한 주파수 제한이 필요하게 된다. Washout 알고리즘에서는 운동 신호의 적절한 주파수 영역만을 선택하여 운동을 재현하게 된다. 이의 성능은 운동 플랫폼의 운동 모사율의 정도로 평가될 수 있는데, washout 알고리즘의 종류나 파라미터에 따른 운동 모사율이 서로 유사하더라도 시뮬레이터 내에 있는 운전자가 느끼는 운동에 있어서는 차이가 클 수도 있다. 즉, 운동플랫폼의 운동 모사율과 함께 실제 운전자의 감각기관에서 감지하는 정도에 따라 운동 재현 성능이 결정되어질 수 있으므로, 인체 감각 모델을 적용해 실제 굴삭기에서와 시뮬레이터내에서 경험하는 운전자의 반응을 분석해 washout 알고리즘을 개발해야 한다.

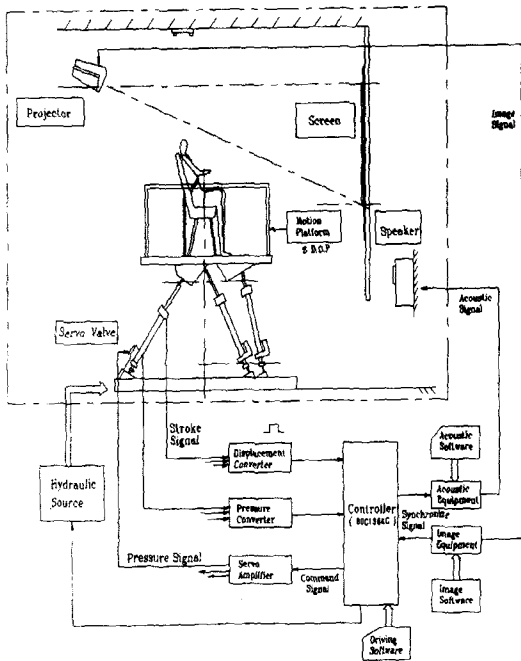


Fig. 4 Block diagram of a driving simulator

운전자가 인지하는 중요한 운동 상태는 비력 (specific force)과 회전 가속도이며, 비력은 평형석 (otolith system)에서, 회전 가속도는 전정관 (vestibular system)에서 인지하게 된다. 운전자가 평형석에 의해 병진 운동을 감지하는 것은 병진 가속도보다는 병진 가속도와 중력 가속도간의 벡터차인 비력을 감지한다. 비력은 다음의 식으로 표현된다.

$$\vec{F}_s = \vec{a} - \vec{g} \quad (1)$$

여기서, \vec{a} 는 병진 가속도 벡터, \vec{g} 는 중력 가속도 벡터이다.

평형석은 스프링·질량·댐퍼 시스템으로 모델링되어 식(2)와 같은 전달함수로 표현되며, 주파수 응답특성을 구해보면 0.2~2rad/sec까지 양호한 감지를 나타낸다^{14, 5)}. 따라서 인체가 감지할 수 있는 비력은 2rad/sec 이하의 영역이라고 볼 수 있다. 회전운동을 감지하는 전정관은 일반적인 기계시스템의 각속도센서와 같이 모델링할 수 있으므로, washout의 회전 운동 명령으로 각속도를 이용해도 무방하며 이의 전달함수 특성은 식 (3)과 같이 표현된다. 전정관의 인지 주파수 범위는 0.2rad/sec에서 시뮬레이션하는 구동체의 대역폭까지 양호하게 각속도를 인지한다고 제시하였지만^{14, 5)}, 본 연구에서는 구동체의 운동한계를 고려하여 응답 특성이 0.2~10rad/sec까지 양호한 감지를 나타내도록 설정하였다.

$$G(s)_{otolith} = \frac{x(\tau_A s + 1)}{(\tau_L s + 1)(\tau_S s + 1)} \quad (2)$$

$$G(s)_{vestibular} = \frac{T_L T_A s^2}{(T_L s + 1)(T_S s + 1)(T_A s + 1)} \quad (3)$$

4.2 제작된 스텐트 플랫폼의 작업영역해석

본 연구에서 개발된 시뮬레이터는 휠굴삭기의 주행상태와 같은 동특성을 유지하면서 좁은 공간에서 실제의 운동과 같은 운동을 재현할 수 있도록 다음과 같은 사양을 만족하도록 설계되었다. Table 2는 운동 플랫폼의 성능을 표시하는 운동한계 값을 나타낸 것이다. 6자유도 병렬형 매니플레이터는 6개의 유압 실린더와 베이스, 그리고 운동플랫폼으로 구성된다. 시뮬레이터를 운영하는 통합환경은 모터프와 OpenGL을 사용하여 구성하였다. 제작된 스텐트 플랫폼의 작업영역을 해석하기 위하여 통합환경 내에 Fig. 5와 같은 그래픽 위젯(widget)을 생성하였다. 동역학해석 컴퓨터에서 생산된 굴삭기의 중심위치와 스텐트 플랫폼의 6개의 좌표값을 가지고 굴삭기의 움직임과 스텐트 플랫폼의 자세를 그래픽으로 보여준다. 이러한 6자유도 스텐트 플랫폼의 작업영역을 시뮬레이션을 통하여 해석하면 다음 Fig. 6과 같은 결과를 얻을 수 있다.

Fig. 6(a)는 히브(heave)를 영(zero)으로 두었을 때 롤과 피치각을 표시한 그림이고, Fig. 6(b)는 히브를 영으로 두었을 때 서지(surge)와 스웨이(sway)를 표현한 그림이다. Fig. 6(c)는 롤을 영으로 두었을 때 히브와 스웨이를 표시한 그림이다.

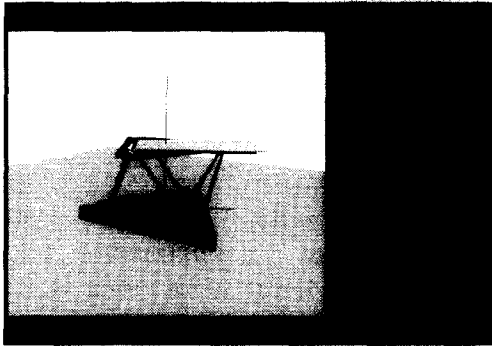
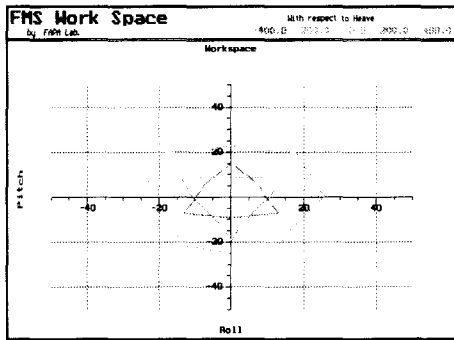
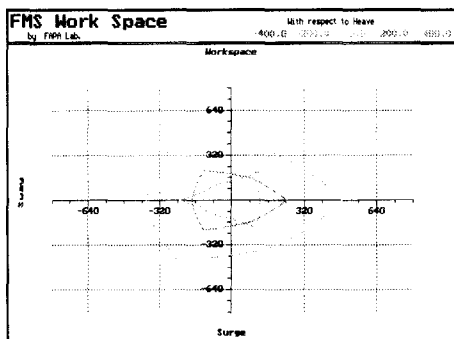


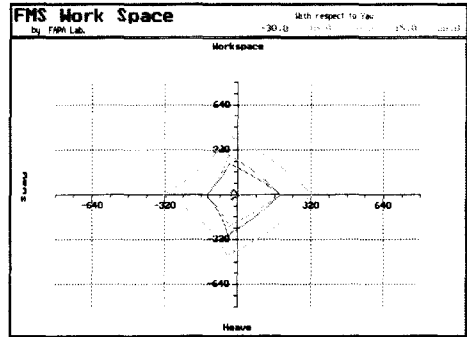
Fig. 5 GUI of the stewart platform



(a) Roll-Pitch (Heave=0)



(b) Surge-Sway (Heave=0)



(c) Heave-Sway (Roll = 0)

Fig. 6 Workspace of the stewart platform

Table 2 Motion system requirements

운동 내용	X	Y	Z
변위	±320 mm	±320 mm	±320 mm
속도	610 mm/s	610 mm/s	610 mm/s
가속도	±1 g	±1 g	±1 g
운동 내용	ROLL	PITCH	YAW
변위	±20°	±20°	±20°
속도	20° /s	20° /s	20° /s
가속도	±60° /s ²	±60° /s ²	±60° /s ²

4.3 Washout 알고리즘의 설계

4.3.1 병진 Washout 알고리즘

운동플랫폼을 구동하기 위해서는 실린더의 길이를 결정하는 역기구학 해석을 통해 운동베이스(motion base)에 고정된 절대좌표계(absolute coordinate)에 대한 시뮬레이터 운전석 국부좌표계(local coordinate)의 위치 및 자세를 결정해야 한다. 운동플랫폼에서 재현하는 운동 큐(cue)인 가속도와 각속도는 굴삭기 운전석에서의 값이므로, 이것을 운동플랫폼의 국부좌표계로 변환시킨 후 운동베이스의 절대좌표계에 대한 운동으로 나타냈다.

좌표계간의 변환은 굴삭기 운전석의 운동을 운

동플랫폼 중심의 운동으로 변환하고, 변환행렬을 이용해 운동베이스의 중심에 고정된 절대좌표계에 관한 운동으로 변환한다.

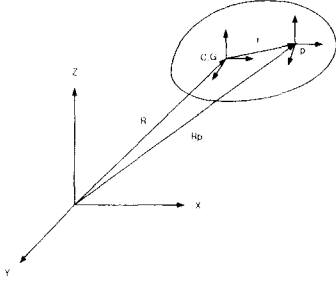


Fig. 7 The coordinate systems

Fig. 7에서 p점의 절대좌표 R_p 는 다음의 식으로 표시된다.

$$R_p = R + r = R + A r \quad (4)$$

여기서, A는 국부좌표계에서 절대좌표계로 변환하는 행렬로서 브라이언트 각(bryant angles)으로 표시하면 다음과 같이 표현된다.

$$A = \begin{bmatrix} c\phi_2 c\phi_3 & -c\phi_2 s\phi_3 & s\phi_2 \\ c\phi_1 s\phi_3 + s\phi_1 s\phi_2 c\phi_3 & c\phi_1 c\phi_3 - s\phi_1 s\phi_2 s\phi_3 & -s\phi_1 c\phi_2 \\ s\phi_1 s\phi_3 - c\phi_1 s\phi_2 c\phi_3 & s\phi_1 c\phi_3 + c\phi_1 s\phi_2 s\phi_3 & c\phi_1 c\phi_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

식(4)를 두 번 미분하면 다음의 가속도 관계식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \ddot{R}_p &= \dot{R} + \dot{\omega} + \tilde{\omega} A r \\ &= \dot{R} + \dot{\omega} + \tilde{\omega} \tilde{\omega} r \end{aligned} \quad (6)$$

따라서, 절대좌표계에 대한 굴삭기 운전석의 가속도는 다음의 식(7)과 같다.

$$\vec{a}_p = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}_{C.G.} + \begin{bmatrix} -r_x(\omega_1^2 + \omega_2^2) + r_x(\omega_1 \omega_3 - \dot{\omega}_2) + r_z(\dot{\omega}_1 + \omega_3 \omega_2) \\ r_x(\dot{\omega}_2 + \omega_1 \omega_3) - r_x(\omega_1^2 + \omega_2^2) + r_z(\omega_1 \omega_2 - \dot{\omega}_1) \\ r_x(\omega_1 \omega_2 - \dot{\omega}_1) + r_x(\omega_1 \omega_2 + \dot{\omega}_3) - r_z(\omega_1^2 + \omega_2^2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

병진 washout의 입력신호인 선형가속도에 저주파 성분이 지속적으로 주어지면 운동플랫폼이 기구학적 한계에 이르게 되어 더 이상 운동을 재현할 수 없게 되므로, 이러한 저주파 신호는 고역 통과 필터를 이용해 제거해야 한다. 이러한 고역 통과 필터는 운동재현율 향상과 회전운동과의 커플링(coupling)감소를 위해 Fig. 8과 같이 플랫폼

washout과 베이스 washout으로 구분되어 진다.

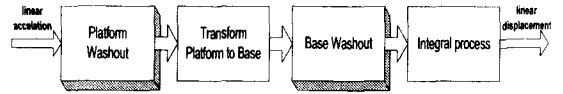


Fig. 8 Block diagram of translational washout filter

본 연구에서 플랫폼 washout은 시뮬레이터 운전석의 좌표계에 입력되는 신호를 직접 처리하는 부분으로 2차 고역 통과 필터로 구성하였으며, 차단 주파수(cut-off frequency)는 제작된 플랫폼의 기구학적인 한계 내에서 재현하기 위해 여러 번의 시행착오를 거쳐 3rad/sec로 설정하였다. 따라서, 플랫폼 washout을 거쳐 가공되어진 고주파 성분의 병진 가속도 성분을 운동 베이스 상에서 처리할 수 있는 신호로 만든 다음, 휠 굴삭기 시뮬레이터의 운동(속도 및 가속도) 주파수 영역이 0.388Hz 이하인 점을 고려해서 1rad/sec (0.1559Hz)의 차단 주파수를 갖는 2차 고역 통과 필터를 사용해서 베이스 washout을 구성하였다.

4.3.2 회전 Washout 알고리즘

회전 washout 알고리즘은 Fig. 9와 같이 굴삭기 모델의 회전 각속도를 직접 처리하는 PQR washout과 식 (8)과 같은 변환에 의해 각속도를 처리하는 브라이언트 washout으로 구성된다. PQR washout은 굴삭기 운전석 고정좌표계에 입력되는 지속적인 저주파 입력에도 변위가 발산하지 않도록 하면서, 인체가 회전 각속도에 대해 민감한 영역을 고려해서 3rad/sec의 차단주파수를 갖는 2차의 고역 통과 필터로 구성하였다.

브라이언트 washout은 시뮬레이터의 짐벌각(gimbal angle)을 제한하면서 병진 washout의 베이스 washout과 동일하게 시뮬레이터의 최대속도 및 최대변위 가능 주파수 영역을 고려하여 1rad/sec (0.1559Hz)의 차단 주파수를 갖는 2차 고역 통과 필터로 구성하였다.

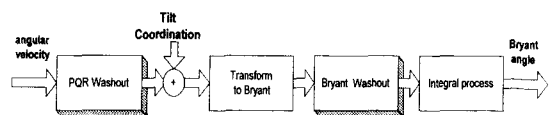


Fig. 9 Block diagram of rotational washout filter

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sec \phi_2 \cos \phi_3 & -\sec \phi_2 \sin \phi_3 & 0 \\ \sin \phi_3 & \cos \phi_3 & 0 \\ -\tan \phi_2 \cos \phi_3 & \tan \phi_2 \sin \phi_3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_\xi \\ \omega_\eta \\ \omega_\zeta \end{pmatrix} \quad (8)$$

식 (8)은 굴삭기 운전석 고정좌표계에 대한 회전각속도 $\omega_\xi, \omega_\eta, \omega_\zeta$ 를 브라이언트(Bryant) 각속도 $\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$ 로 변환한다.

4.3.3 경사 변환(tilt coordination)

굴삭기의 선회운동과 같은 저속적인 가속도를 묘사하기 위하여 병진방향 운동에서 고역 통과 필터에 의해 제거된 저주파성분의 사용은 중요하다. 지속적인 가속도를 운동시스템에서 재현하기 위한 방법으로 저역 통과 필터를 이용해 시뮬레이터 기울임 각을 만들어준다. 저역 통과 필터의 입력신호인 비력과 중력가속도 벡터를 이용해 기울임 각속도를 발생시키는데, 비력이 중력벡터의 반대방향으로 작용하도록 운동플랫폼을 기울여 주면 원하는 저주파성 비력을 생성할 수 있게된다. 이것은 다음과 같은 과정을 통해 구현할 수 있다.

먼저 절대좌표계에 대한 중력가속도 \vec{g} 를 변환행렬 A의 전치행렬(transpose matrix) AT를 곱하여 운동플랫폼에서의 성분으로 변환한다.

$$\vec{g}_p = A^T \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(s\phi_1 s\phi_3 - c\phi_1 s\phi_2 c\phi_3)g \\ -(s\phi_1 c\phi_3 + c\phi_1 s\phi_2 s\phi_3)g \\ -(c\phi_1 c\phi_2)g \end{pmatrix} \quad (9)$$

비력의 저주파 성분을 시뮬레이터에서 재현하기 위한 기울임 각속도는 다음의 식(10)에 의해 구할 수 있다.

$$\omega_i = \frac{\vec{F}_i \times (-\vec{g}_p)}{|\vec{F}_i| |\vec{g}_p|} \quad (10)$$

$$= \frac{1}{|\vec{F}_i|} \begin{pmatrix} F_{y_i}(c\phi_1 c\phi_2) - F_{x_i}(s\phi_1 c\phi_3 + c\phi_1 s\phi_2 s\phi_3) \\ F_{x_i}(s\phi_1 s\phi_3 - c\phi_1 s\phi_2 c\phi_3) - F_{z_i} c\phi_1 c\phi_2 \\ F_{x_i}(s\phi_1 c\phi_3 + c\phi_1 s\phi_2 s\phi_3) - F_{y_i}(s\phi_1 s\phi_3 - c\phi_1 s\phi_2 c\phi_3) \end{pmatrix}$$

경사변환을 개발할 때는 인위적으로 기울여준 기울임 각이나 가속도로부터 생겨난 응답과 운전명령과의 불일치함 때문에 생겨나는 시뮬레이터 멀미(simulator sickness)를 조심하여야 한다.

Fig. 10은 병진 및 회전 Washout 알고리즘과 경사변환 알고리즘으로 구성된 6자유도 굴삭기 시뮬레이터를 구동하기 위한 실린더 길이를 생성해 내는 washout 알고리즘을 MATLAB의 SIMULINK를 이용해서 모듈화시킨 그림이다. xt, yt, zt는 굴삭기의 주행시 동적 해석결과 중 선형 가속도이며, xr, yr, zr은 굴삭기 주행시 동적 결과해석 중 회전 각속도이다. 선형 가속도 성분 중 3rad/sec 보다 낮은 저주파 부분은 경사 변환을 통해 회전 각속도 부분으로 입력된다. 3rad/sec 보다 큰 고주파 성분은 플랫폼 washout과 베이스 washout을 통과하고, 2번의 적분과정을 거쳐 선형 변위를 생성한다.

회전 washout으로 입력되는 회전 각속도 성분도 PQR washout을 통해 3rad/sec 보다 큰 고주파 성분을 검출하고 경사 변환에 의한 회전 각속도와 합한 뒤 브라이언트 각으로 표현하는 변환을 수행한다. 그리고 브라이언트 washout을 통과시켜 저주파 성분을 제거하고 1번의 적분과정을 거쳐서 회전 각을 생성한다. 이렇게 전체 알고리즘을 모듈화시킴으로써 보다 쉽게 washout의 성능평가를 수행할 수 있게 되었다.

4.4 WASHOUT 알고리즘의 성능평가

4.4.1 주행 시나리오

휠굴삭기의 일반적인 주행 시나리오는 굴삭기가 일반 도로를 주행하면서 겪는 차선변경, 범퍼통과 등의 상황을 재현하도록 하였다. 앞쪽 좌·우타이어의 조향입력은 도로의 폭과 선회반경을 고려하여 적절히 가해 주었으며, 장애물 통과시 수직방향 가속도가 비상식적으로 크지 않도록 장애물의 폭과 높이를 적절히 조정하여 Table 3과 같은 주행 시나리오를 만들었다.

주행 시나리오에 대해 시뮬레이션 한 결과 Fig. 11과 같은 휠굴삭기의 운동경로를 얻을 수 있다. 휠굴삭기는 길이방향으로 대략 230m 정도 운동하고 측방향으로 140m 정도 이동함을 볼 수 있다.

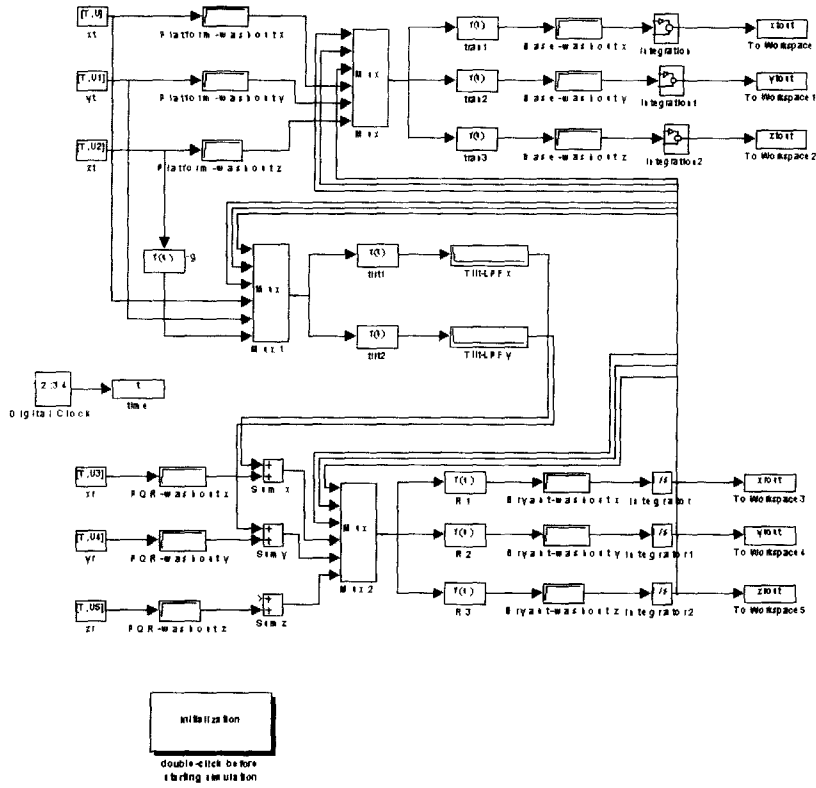


Fig. 10 Block diagram of washout filter

Table 3 Scenario of dynamic simulation

시간, 위치	주행시나리오	조향입력
7.2초	도로를 따라 J-turn	half sine wave
23.0초	차선변경	full sine wave
34.4초	도로를 따라 J-turn	half sine wave
49.5초	2.56 m/s로 감속	
120m 지점	범프(bump) 통과	
135m 지점	웅덩이 통과	
150m~170m	연속장애물 통과	폭 2m, 높이 0.035m

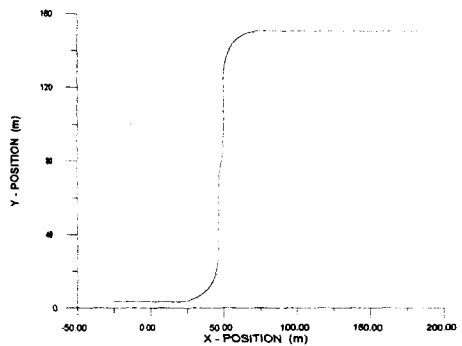


Fig. 11 Displacement of a wheel type excavator in simulation

4.4.2 운동의 재현

Fig. 12는 Fig. 11과 같은 휠 굴삭기의 운동 입력에 대해 washout 필터를 거쳐서 만들어진 운동 플랫폼 중심점의 운동영역을 표시한 그림이다.

앞에서 언급한 기구학적 한계를 벗어나지 않고 원하는 운동이 일어남을 확인할 수 있다. 진행방향의 최대 이동거리는 약 0.17m 정도로 기구학적 한계내에 포함되며, 횡방향 운동은 초기 J-선회, 차선 변경, J-선회, 마지막으로 직진주행시 범퍼 통과 운동이 효과적으로 진행됨을 확인할 수 있다. 각각의 운동에 대하여 운동 플랫폼의 횡방향 이동 변위는 원래의 원점으로 복귀함을 볼 수 있는데, 이는 실제 굴삭기의 운동에서는 많은 변위를 일으키는 저주파 운동이므로 washout 필터를 통하여 제거되었기 때문이다.

Fig. 13은 운동 플랫폼 중심점의 횡방향 변위를 표시한 그림이다. 앞에서 언급한대로 저주파 운동의 제거에 따른 원점 복귀가 일어나며, 운동 시나리오에 의한 운동이 정확히 수행됨을 확인할 수 있다. Fig. 14, Fig. 15, Fig. 16은 각각 운동 플랫폼 중심의 롤(roll), 피치(pitch), 요(yaw) 각을 표시한 그림이다. 각각의 운동에 대한 원점 복귀와 함께 운동 플랫폼의 운동한계 내에서 운동이 잘 일어남을 확인할 수 있다.

4.4.3 운동 재현성의 평가

제안된 주행시나리오를 운행할 때의 동적해석을 수행하고, 이 결과를 설계된 washout 필터를 통과시킨 후 실제로 시뮬레이터를 작동시켰다. 운동의 재현성을 위하여 연구에 참여한 사람들 및 불보중공업(구 삼성중공업)의 기술자들도 시승하여 평가한 결과, 현실감이 있는 것으로 평가되었다.

5. 결론

본 연구에서는 휠굴삭기의 실시간 시뮬레이션 프로그램 내용과 프로그램의 결과로 나오는 운동을 재현시키기 위한 washout 알고리즘의 설계하고 휠 굴삭기에 적용하였다. 설계된 washout 알고리즘의 검증은 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 병진 및 회전 Washout 알고리즘과 경사변환 알고리즘을 MATLAB의 SIMULINK를 이용해서 모듈화 시켰으므로, 고주파 필터의 한계주파수(cutoff

frequency)와 운동 재현성과의 관계를 편리하게 찾아낼 수 있었다.

2) 일정 선회시 연속적으로 발생하는 횡가속도를 재현하기 위해서는 경사변환 알고리즘을 통한 롤각의 보상이 필요함을 확인할 수 있었다.

3) 병진, 회전 washout 모두 운전석 고정좌표계로 입력되는 지속적인 저주파 입력에 대해 발산하지 않도록 1차 고주파 통과 필터를 거친 후, 인체의 민감 영역을 고려한 2차 필터를 구성함으로써 운동한계의 극복과 함께 실제와 유사한 운전 느낌을 재현할 수 있었다.

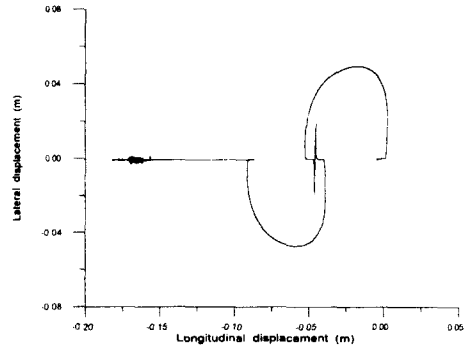


Fig. 12 Displacement of Stewart platform

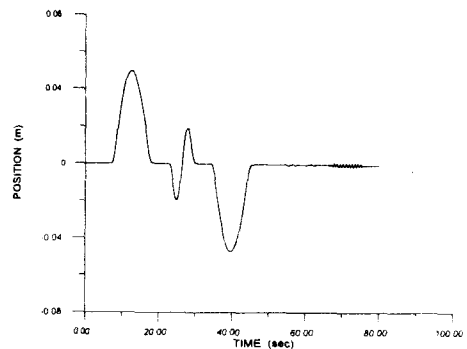


Fig. 13 Washout output - lateral displacement

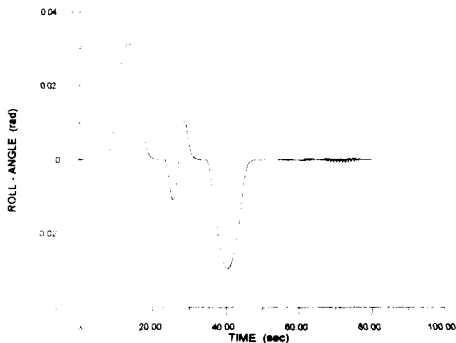


Fig. 14 Washout output - roll angle

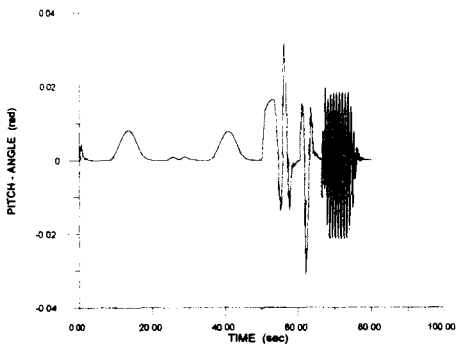


Fig. 15 Washout output - pitch angle

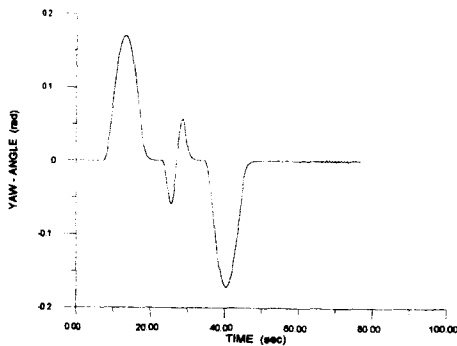


Fig. 16 Washout output - yaw angle

후기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구비(과제 번호 97-0200-1001-5)와 산학협동(삼성그룹-부산대) 연구비에 의해 수행되었음

참고문헌

1. 손권, 유완석, 이민철, 이장명, "휠 굴삭기의 운전 시뮬레이터의 개발," 산학협동연구 최종보고서, 삼성중공업 1998.
2. 최대형, 김광석, 유완석, 정만식, "실시간 시뮬레이션을 위한 휠 굴삭기의 다물체 동역학 모델링," 한국자동제어학술회의 논문집, pp.1763-1766, 1998.
3. Jerkovsky, "The structure of multibody dynamics equations," Journal of guidance and control, Vol.1, No.3, 1978.
4. 전용민, "6자유도 비행시뮬레이터용 구동신호처리에 관한 연구," 석사학위논문, 인하대학교, 1994.
5. 최연철, "차량 시뮬레이터의 실시간 차량시뮬레이션 시스템 및 Washout 알고리즘 개발," 석사학위논문, 국민대학교, 1997.