

고등어 자동 선별기 개발을 위한 고등어 선별 성능 분석

전철웅*, 손정현*[#], 최명구**

*부경대학교 기계설계공학과, **CM코리아(주)

Analysis of Mackerel Sorting Performance for Development of Automatic Mackerel Grader

Chul-Woong Jun*, Jeong-Hyun Sohn*[#], Myung Gu Choi**

*Mechanical Design Engineering, Pukyong Nat. Univ., **CMKOREA CO., LTD.

(Received 9 April 2016; accepted 20 April 2016)

ABSTRACT

A mackerel grader is a machine for sorting mackerel according to size. In this study, the dynamic deflection and optimal sorting simulation of a mackerel grader was carried out by using multi-body dynamics. To analyze the dynamic deflection of the roller, RecurDyn, a multi-body dynamics analysis program, was used. The dynamic deflection of the roller pipe was analyzed according to the inclination of the roller pipe. When the inclination of the roller pipe was 30 degrees, the roller indicated the maximum deflection of about 6.3 mm at the center of the mass. To simulate the mackerel sorting, the mackerel grader machine was modeled, and the contact simulation between the mackerel model and the rotating roller pipe was carried out. When the inclination of the roller frame was 7 degrees, the mackerel grader indicated optimal sorting performance.

Key Words : Mackerel Grader(고등어 선별기), Multi-Body Dynamics(다물체 동역학), Dynamic Deflection(동적 처짐), Contact Simulation(접촉 시뮬레이션)

1. 서 론

한국에서 고등어 산업^[1]은 국민들의 웰빙식품 및 건강식에 대한 관심이 높아지면서 고등어 수요증가 및 고등어 가공품이 다양화 되고 있다. 하지만 생산, 유통, 가공 등을 둘러싼 국내외 여건변화에 의해 고등어 산업의 경쟁력이 약화되고 있다. 특히 최근 FTA 등 수산물 시장 개방이 진전됨에 따라 노르웨이, 캐나다 등으로부터 고등어 수입이 증가하면서, 상품의 규격화 및 등급화의 측면에서 경쟁력이 약화되고 있다.

고등어 산업에 있어 선진국은 선별 및 포장 등의 작업을 자동화로 처리하는 반면에 한국은 거의 모든 작업이 사람 손에 의해 처리되고 있다. 뿐만 아니라 시설 또한 노후화되어 비효율적이고 위생적으로 문제가 많다. 이러한 이유로 인해, 고등어를 선별하고 포장 하는 작업에 대한 개선이 필요하며, 시스템의 자동화를 위해 사용되는 기계들에 대한 구조적이고 역학적인 연구가 동반되어야 한다. 본 연구에서 대상으로 하고 있는 고등어 선별기는 고등어를 크기별로 분류하는 기계로서 여러 개의 롤러가 일정한 간격으로 배치 되어 있고, 고등어를 크기별로 선별하기 위해서 부채꼴 형태로 펼쳐져 있다. 고등어 선별기의 선별 능력은 롤러의 길이

Corresponding Author: jhsohn@pknu.ac.kr

Tel: +82-51-629-6166, Fax: +82-51-629-6150

및 개수 증가 그리고 롤러의 경사도에 의해서 결정될 수 있다. 이러한 롤러의 길이 및 개수 증가는 롤러의 처짐 및 전체 프레임에 작용하는 하중의 증가가 불가피하게 발생한다. 이에 대한 롤러의 변형을 수치적으로 해석할 필요가 있다. Kim은 FEM 기법을 이용하여 원통형 중공롤러의 응력 및 변형거동을 분석하였다^[2-3].

본 연구에서 해석에 사용된 고등어 선별기 모델은 길이 4500mm의 롤러 파이프가 15개로 이루어져 있다. 본 연구에서 설계된 고등어 선별기는 선별 속도 향상을 위해 기존 선별기보다 롤러 길이가 길고 롤러 개수를 증가시켰다. 따라서 롤러의 길이와 롤러 개수가 증가하면서 발생할 수 있는 롤러의 처짐에 대한 수치 해석적 분석이 필요하다. 또한 롤러의 길이와 개수 증가뿐만 아니라 선별기의 고등어 선별 속도를 결정하는 중요한 요소이기 때문에 경사도에 따른 선별 속도 예측이 필요하다.

본 연구에서는 ANSYS^[4]를 이용하여 단일 롤러의 자중에 의한 정적 처짐을 해석하고, 다물체동역학 해석 프로그램인 RecurDyn(리커다인)^[5-6]을 이용하여 단일롤러 파이프를 대상으로 회전할 때의 동적 처짐을 해석하였다. 최종적으로 15개의 롤러 파이프로 구성된 고등어 선별기와 3개의 크기를 가지는 고등어 형상을 모델링 하고, 선별기와 28개의 고등어의 접촉 시뮬레이션을 수행하였다. 롤러의 경사도에 따라서 해석을 수행하여 고등어 크기에 따른 선별 구간 및 선별 속도를 예측하였다.

2. 동역학 모델링

2.1 운동방정식

고등어 선별기의 다물체 동역학 모델링을 위해서 RecurDyn 다물체 동역학 해석 프로그램을 이용하였다. RecurDyn은 강체(rigid body)와 유연체(flexible body)를 통합하는 MFBFD 시스템을 통해 유연체를 포함하는 다물체 모델을 해석한다. 본 연구에서 단일 롤러 파이프에 대해서 회전시의 처짐을 해석하는데 있어 매우 적합한 방법이다. 강체와 유연체의 통합 시스템에 대한 운동방정식은 각각의 운동방정식을 통합함으로써 정식화된다. 결과적으로 유연체

를 고려한 강체에 대한 운동방정식은 유연체 조인트(joint)에 의해 추가되는 구속조건이 함께 고려가 되어 식(1)과 같이 표현된다.

$$F^r = B^T(M^r \dot{Y}^r + \Phi_z^{rrT} \lambda^{rr} + \Phi_z^{erT} \lambda^{er} - Q^r) = 0 \quad (1)$$

식(1)에서 첨자 r은 강체에 대한 식, rr은 강체-강체 사이의 식, er은 유연체와 강체 사이의 식을 나타낸다. B는 속도변환행렬(velocity transformation matrix)이다. 식(1)과 반대로 유연체에 대한 운동방정식은 식(2)와 같이 표현된다.

$$F^e = M^e \ddot{q}^e + \Phi_z^{eeT} \lambda^{ee} + \Phi_z^{erT} \lambda^{er} - Q^e = 0 \quad (2)$$

식(2)에서 첨자 e는 유연체 노달 바디(nodal body)에 대한 식을 의미하며, q^e 는 유연체 노달 바디에 대한 일반 좌표계를 나타낸다. 그리고 첨자 ee는 유연체 노달 바디사이의 식을 나타낸다. Q^e 는 유연체 노달 바디에 적용되는 힘이다. 강체-강체, 강체-노달, 노달-노달 바디 사이의 구속조건은 각각 식(3)-(5)와 같다.

$$\Phi^{rr}(q^r) = 0 \quad (3)$$

$$\Phi^{er}(q^e, q^r) = \left[\theta \left(\begin{matrix} r_j^e - r_j^r \\ (A_j C_j)^T A_j - I \end{matrix} \right) \right] = 0 \quad (4)$$

$$\Phi^{ee}(q^e) = 0 \quad (5)$$

MFBFD 시스템의 해석은 식(3)-(5)를 만족되도록 하는 것이다. RecurDyn에서는 강체와 유연체가 통합된 비선형 방정식을 풀기 위해서 식(6)과 같은 뉴턴-랩슨(Newton-Rhapson) 방정식을 사용하여 암시적 접근법(implicit method)으로 통합 MFBFD 방정식을 해석한다. F는 힘을, Φ 는 구속조건식을 q는 물체의 일반좌표를 뜻하며, λ 는 라그랑지 곱수(Lagrange multiplier)이다. 각각의 첨자 r은 강체에 대한 식을 나타내며, e는 유연체 노달 바디에 대한 식을 의미한다.

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} \frac{\partial F^e}{\partial q^e} & \Phi_{q^e}^{eeT} & \frac{\partial F^e}{\partial q^e} & 0 & \Phi_{q^e}^{erT} \\ \Phi_{q^e}^{ee} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial F^r}{\partial q^e} & 0 & \frac{\partial F^r}{\partial q^e} & B^T \Phi_z^{rrT} & B^T \Phi_z^{erT} \\ 0 & 0 & \Phi_{q^e}^{rr} & 0 & 0 \\ \Phi_{q^e}^{er} & 0 & \Phi_{q^e}^{er} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta q^{ee} \\ \Delta \lambda^{ee} \\ \Delta q^{rr} \\ \Delta \lambda^{rr} \\ \Delta \lambda^{er} \end{bmatrix} \\
 & = - \begin{bmatrix} F^e \\ \Phi^{ee} \\ F^r \\ \Phi^{rr} \\ \Phi^{er} \end{bmatrix} \quad (6)
 \end{aligned}$$

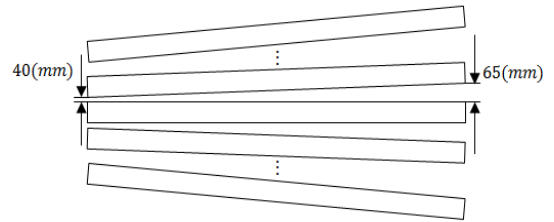


Fig. 2 Fan shape arrangement of roller pipe

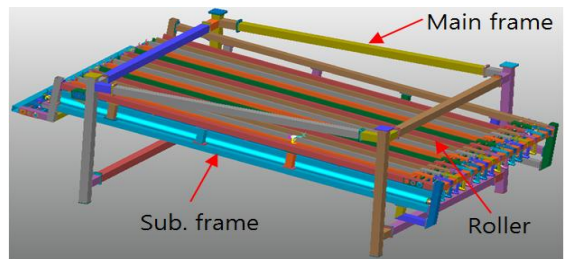


Fig. 3 Model of mackerel grader

2.2 선별기 모델링

롤러의 회전에 의한 동적 처짐 해석을 위한 선별기 롤러 파이프 모델은 Fig. 1과 같으며 Table 1은 롤러 파이프의 사양을 나타낸다. 선별기에 사용되는 롤러 파이프는 얇은 두께를 가지는 중공 파이프로 내경과 외경은 Table 1과 같으며 두께는 2.5mm이다.

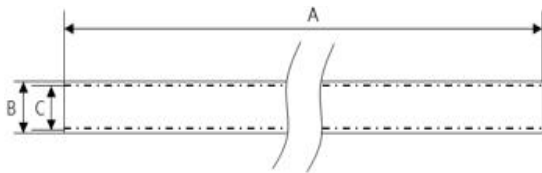


Fig. 1 The roller pipe of mackerel grader

Table 1 Specification of roller pipe.

| Spec. | Value |
|-------------------|-----------|
| Length(A) | 4500(mm) |
| Outer Diameter(B) | 114(mm) |
| Inner Diameter(C) | 109(mm) |
| Material | C/S Steel |

본 연구에서 고려하고 있는 선별기 모델은 길이 4500mm의 롤러 파이프가 총 15개로 구성된다. 선별기는 크게 메인 프레임과 서브 프레임으로 구성되어 있다. 메인 프레임(Main frame)은 서브 프레임(Sub. frame)을 지지하는 프레임이다. 서브 프레임은 메인 프레임을 제외한 15개의 롤러 어셈블리 모델을 의미한다. 각각의 롤러는 Fig. 2와 같이 고등어 투입부의 사이 간격을 40mm, 반대쪽 끝 부분의 사이 간격을 65mm로 하였다. Fig. 3은 전체 선별기 모델을 보여주고 있으며 서브 프레임이 메인 프레임 안에 놓여져 있는 모습과 기울어진 모습을 확인할 수 있다. 고등어를 선별하는 과정에서 각각의 롤러는 일정한 속도로 회전하기 때문에 각각의 롤러에 회전(Revolute) 조인트를 적용하였다.

3. 선별기 롤러 처짐 해석

3.1 ANSYS를 이용한 정적 처짐 해석

단일 롤러의 자중에 의한 정적 처짐 분석을 위해 구조해석 ANSYS Workbench를 사용하였다.

Table 2 Static deflection of roller pipe

| Inclination Angle | Max. deflection(mm) |
|-------------------|---------------------|
| 0° | 0.28 |
| 10° | 0.27 |
| 20° | 0.26 |
| 30° | 0.24 |

정적 처짐 해석을 위해 메쉬 크기를 3e-002(m)로 하여 메쉬 작업을 수행하였으며, 노드의 수는 22650, 요소의 수는 3600개로 구성되었다. 롤러 파이프의 양 끝단은 Fix 구속을 부여하였다. 롤러 파이프 도심에 중력방향으로 자중 만큼의 힘을 부여하였고, 정적 처짐은 롤러 파이프의 경사를 0도에서 30도 까지 10도 간격으로 해석을 수행하였다. 모든 경우에서 최대 처짐은 롤러 파이프의 중앙에서 발생하였으며, 경사각이 증가할수록 처짐이 작아지는 경향을 확인하였다. Table 2는 롤러 경사에 따른 롤러의 정적 처짐 결과를 보여준다. 정적 처짐 해석 결과 롤러 처짐에 자중이 주는 영향이 매우 적음을 확인하였다.

3.2 RecurDyn을 이용한 동적 처짐 해석

단일 롤러에 대해서 회전시의 처짐을 분석하기 위해서 동역학 해석 프로그램인 RecurDyn의 FFlex Toolkit을 이용하였다. 롤러에 회전운동을 적용하기 위해서 양 끝단에 회전 조인트를 적용하였으며, 상단 회전 조인트에 150rpm의 회전운동을 적용하였다. 단일 롤러 파이프의 메쉬 작업을 위해서 FFlex Toolkit에서 지원하는 메쉬 툴을 이용하였다. Shell4(Quad4) 요소를 사용하여 메쉬 크기 0.02(m)로 구성하였으며 노드 수는 8139, 요소 수는 8136로 메쉬화 하였다. 회전 구속을 롤러 파이프 유한요소모델에 적용하기 위해서 양단 조인트에 FDR(Force Distributing Rigid)요소를 생성하였다. 롤러의 처짐은 질량 중심 위치에서 측정하였다. Table 3은 동적 처짐 해석 결과를 보여주며, 해석은 4도에서 7도 까지 1도 간격으로 수행하였다.

Table 3 Dynamic deflection of roller pipe

| Inclination Angle | Max. deflection(mm) |
|-------------------|---------------------|
| 4° | 1.175 |
| 5° | 1.176 |
| 6° | 1.177 |
| 7° | 1.172 |

정적처짐 해석 조건과 다른 이유는 해석에 사용된 고등어 자동 선별기 모델이 0도에서 최대 7도의 경사를 가지도록 설계되었기 때문에 4, 5, 6, 7도의 경사각에 대해서 해석을 수행하였다. 정적처짐의 경우에는 롤러가 큰 경사각을 가지더라도 처짐량이 작음을 나타내기 위해 0도에서 30도까지의 경사각에 대해 해석을 수행하였다. 해석 결과 롤러의 경사각에 따라 처짐량의 변화량은 거의 없었으며, 모든 경사각에서 약 1.17mm의 처짐량을 나타내었다. 경사각을 가질 때 롤러 파이프의 처짐은 정적처짐 상태에서 롤러 회전에 의한 원심력으로 인해 정적처짐량 보다 큰 처짐량을 보이는 것을 확인하였다. 또한 롤러가 회전할 때 경사각이 증가할수록 중력방향으로 더 큰 힘이 작용한다는 것을 알 수 있다. 실제 고등어를 선별할 때 롤러 사이의 간격을 결정할 때 동적 처짐 결과를 고려하여 반영할 필요가 있다.

4. 고등어 선별 성능분석

고등어 선별 시뮬레이션을 위해서 세 가지 크기의 고등어 모델을 사용하였다. 고등어 모델의 형상은 Fig. 4과 같이 구성하였으며, 해석에 사용된 세 가지 크기는 Table 4와 같다. 고등어 형상은 CATIA 프로그램을 이용하여 모델링하였다. 선별 시뮬레이션을 위해서 총 28개의 고등어를 사용하였고, 고등어간의 접촉과 고등어 롤러와의 접촉은 솔리드-솔리드 접촉 요소를 사용하였다. 접촉에 사용된 파라미터는 Table 5와 같으며 시뮬레이션 조건은 Table 6와 같다. 실제로 고등어는 대부분이 선별되기 전에 Fig. 5의 (a)자세를 가진다. 선별

기는 보통 고등어의 폭을 기준으로 선별 조건을 설정하기 때문에 고등어를 세워주는 것이 중요하다. 롤러의 회전은 고등어의 선별을 위해 세워주는 역할을 한다. 본 연구에서는 롤러를 150rpm으로 회전시켰으며 Fig. 5의 (a)~(d)에서 롤러 회전에 의해서 고등어의 자세가 변하는 모습을 확인할 수 있다. 선별 시뮬레이션은 롤러의 경사도를 5, 6, 7도로 각각 해석을 수행하였다. 각각의 경사각에 대해서 해석을 수행하고, 해석 시작 시간부터 제일 마지막 고등어가 최종적으로 선별되어 떨어지는 시점을 기준으로 선별 시간을 계산하였다. 각 경사각에 대한 선별시간은 Table 7과 같으며, 경사각이 7도일 때 가장 빠른 선별속도를 보였다. 경사각이 클수록 선별속도의 단축은 예측 가능한 부분이지만, 이러한 선별 시뮬레이션을 통해서 목표로 하는 선별속도를 얻기 위한 다양한 설계 변경에 대해 손쉽게 선별 속도 및 선별 구간 예측을 할 수 있다. 본 연구에서 정한 조건에서 시뮬레이션을 수행하였을 때 각 경사각에 대해서 고등어 크기에 따라 선별되는 구간은 Table 8과 같이 계산되었다. 실제 고등어 선별과정에서 선별후의 고등어는 크기별로 호퍼를 통해 컨베이어로 이동하게 된다. 이 때 고등어를 크기별로 컨베이어를 통해 이동시키기 위해 호퍼의 입구 간격을 결정할 필요가 있고 Table 8의 결과는 고등어 크기별로 구분하기 위한 호퍼의 간격을 결정하는데 활용될 수 있다. 선별 구간은 롤러 상단 끝부분을 기준으로 Fig. 6의 x 축 방향으로의 거리를 계산하였다. 전체적으로 제일 작은 고등어 크기(M-1)와 중간 크기(M-2)사이의 거리가 비교적 긴 반면에 중간 크기(M-2)와 제일 큰 크기(M-3) 사이의 거리는 좁은 경향을 보였다. 이는 고등어가 경사에 의해 내려오면서 떨어지는 속도의 증가와 고등어 M-2와 M-3가 Fig. 5의 (d)와 같은 자세를 가지면서 생기는 결과로 판단된다.

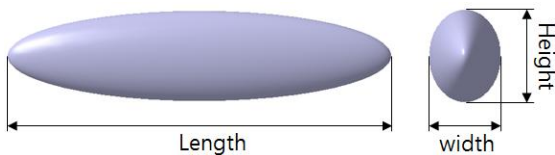


Fig. 4 Shape of 3D mackerel model

Table 4 Mackerel model size of three type

| Type | Length(mm) | Height(mm) | Width(mm) |
|------|------------|------------|-----------|
| M-1 | 280 | 70 | 40 |
| M-2 | 290 | 80 | 47 |
| M-3 | 300 | 90 | 55 |

Table 5 Solid contact parameter

| Parameter | Value |
|------------------------|-------|
| Spring Coefficient | 1e+5 |
| Damping Coefficient | 100 |
| Stiffness Exponent | 2 |
| Rebound Damping Factor | 0.25 |

Table 6 Simulation condition

| Condition | Value |
|--------------------|-----------------|
| End Time | 5(sec) |
| Step | 10000 |
| Roller velocity | 150(rpm) |
| Roller inclination | 5, 6, 7(degree) |

Table 7 Sorting time according to the inclination

| Inclination | Sorting time(sec) |
|-------------|-------------------|
| 5° | 2.16 |
| 6° | 2.11 |
| 7° | 2.00 |

Table 8 Sorting range according to mackerel size.

| size Incl. | M-1(mm) | M-2(mm) | M-3(mm) |
|---------------|----------|-----------|-----------|
| | 5° | 676~1289 | 2351~2799 |
| 6° | 681~1079 | 2411~3310 | 3157~3409 |
| 7° | 677~1029 | 2186~2875 | 2993~3295 |

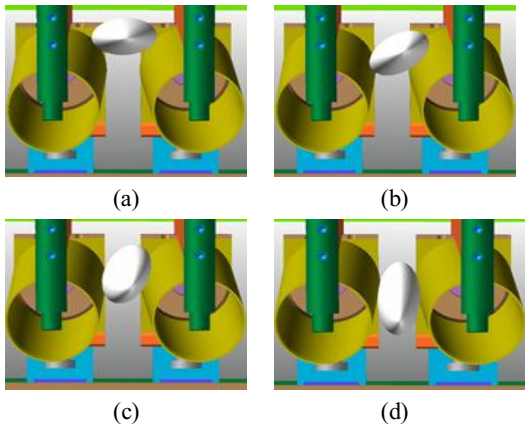


Fig. 5 Posture of mackerel by roller rotation

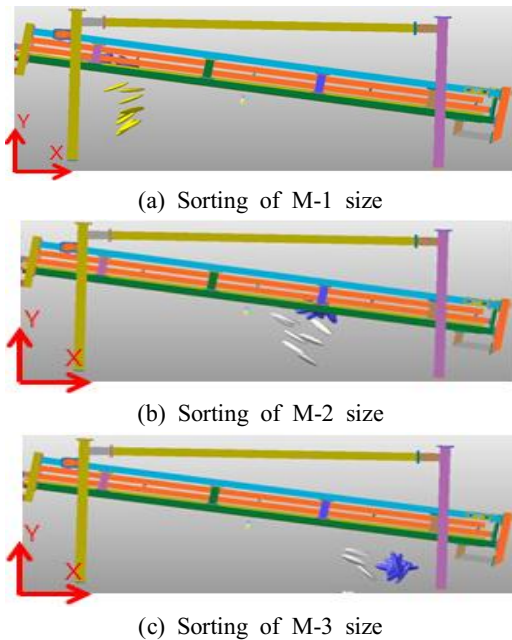


Fig. 6 Sorting according to the mackerel size

5. 결론

본 연구에서는 고등어 선별기의 단일 롤러에 대해서 ANSYS와 RecurDyn을 이용하여 정적 처짐 및 동적 처짐 해석을 수행하였다. 또한 15 개의 롤러 파이프를 가지는 고등어 선별기를 모델링 하

고, 세 가지 크기를 가지는 고등어 총 28개에 대해서 롤러 경사각에 따른 고등어 선별 시뮬레이션을 수행하였다.

1. 롤러 파이프의 자중에 따른 정적 처짐은 경사각에 따라서 작아지는 경향을 보였지만, 크기가 매우 작아 선별기 구조에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

2. 롤러 파이프의 회전에 따른 동적 처짐은 실제 선별기의 설계를 고려 4, 5, 6, 7도에 대해 해석을 수행하였으며, 경사각에 따른 변화량은 거의 없고, 약 1.17(mm)의 처짐량을 나타내었다. 실제 고등어를 선별할 때 롤러 사이의 간격을 결정할 때 동적 처짐 결과를 고려하여 반영할 필요가 있다.

3. 고등어 선별 시뮬레이션을 통해서 고등어가 크기별로 특정 구간에서 선별되는 것을 확인하였다. 경사각 5, 6, 7도에 따른 선별속도 계산하였으며, 7도일 때 가장 빠른 선별 속도를 보이는 것을 확인하였다. 고등어 선별 시뮬레이션을 통해서 향후 고등어 선별기의 성능 개선을 위한 설계 변경에 따른 성능예측에 활용 될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2015년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (한국형 피쉬펌프와 연계된 양륙자동화 시스템 국산화)

REFERENCES

1. Kim, D. Y. and Kang, J. H., "Comparison of Distribution Competitiveness of the Mackerel Industry between Korea and Norway", Journal of Fisheries and Marine Sciences Education, Vol. 27, No. 6, pp. 1685-1692, 2015.
2. Kim, C., K., "Finite Element Analysis of Stress and Deformation behaviors in Cylindrical Hollow Rollers," Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 19, No. 1, pp 23-27, 2015.

3. Kim, C., K., "A Study on the Displacement and Stress Analysis of Hollow Rollers for a Wire Saw Machine," Journal of The Korean Institute of Gas, Vol. 18, No. 2, pp 10-15, 2014.
4. TSNE, ANSYS Workbench, SigmaPress, Korea.
5. Choi, J. H. and Choi, J. H., "Analysis method for Multi-flexible-Body Dynamics Solver in RecurDyn", Transactions of the KSME C: Industrial Technology and Innovation, Vol. 3, No. 2, pp. 107-115, 2015
6. Lee, J. W., Jang, J. S., Kang, H., Jeong, M. S., Lee, S. K., Cho, Y. J., Cha, K. J., and Yoo, W. S., "Design and Performance Evaluation of a Dedicated Demolition Equipment for urban Regeneration", KSMPE Autumn Conference, pp. 108-109, 2015.