

관로 청소 로봇의 최적 설계

정창두*, 정원지⁺, 안진수⁺, 신기수⁺⁺, 권순재⁺⁺⁺

(논문접수일 2011. 07. 07, 수정일 2011. 09. 20, 심사완료일 2011. 09. 26)

Optimal Mechanism Design of In-pipe Cleaning Robot

C. D. Jung*, W. J. Chung⁺, J. S. Ahn⁺, G. S. Shin⁺⁺, S. J. Kwon⁺⁺⁺

Abstract

Recently, interests on cleaning robots workable in pipes (termed as in-pipe cleaning robot) are increasing because Garbage Automatic Collection Facilities (i.e, GACF) are widely being installed in Seoul metropolitan area of Korea. So far research on in-pipe robot has been focused on inspection rather than cleaning. In GACF, when garbage is moving, the impurities which are stuck to the inner face of the pipe are removed (diameter: 300 mm or 400 mm). Thus, in this paper, by using TRIZ (Inventive Theory of Problem Solving in Russian abbreviation), an in-pipe cleaning robot of GACF with the 6-link sliding mechanism will be proposed, which can be adjusted to fit into the inner face of pipe using pneumatic pressure(not spring). The proposed in-pipe cleaning robot for GACF can have forward/backward movement itself as well as rotation of brush in cleaning. The robot body should have the limited size suitable for the smaller pipe with diameter of 300 mm. In addition, for the pipe with diameter of 400 mm, the links of robot should stretch to fit into the diameter of the pipe by using the sliding mechanism. Based on the conceptual design using TRIZ, we will set up the initial design of the robot in collaboration with a field engineer of Robot Valley, Inc. in Korea. For the optimal design of in-pipe cleaning robot, the maximum impulsive force of collision between the robot and the inner face of pipe is simulated by using RecurDyn® when the link of sliding mechanism is stretched to fit into the 400 mm diameter of the pipe. The stresses exerted on the 6 links of sliding mechanism by the maximum impulsive force will be simulated by using ANSYS® Workbench based on the Design Of Experiment(in short DOE). Finally the optimal dimensions including thicknesses of 4 links will be decided in order to have the best safety factor as 2 in this paper as well as having the minimum mass of 4 links. It will be verified that the optimal design of 4 links has the best safety factor close to 2 as well as having the minimum mass of 4 links, compared with the initial design performed by the expert of Robot Valley, Inc. In addition, the prototype of in-pipe cleaning robot will be stated with further research.

Key Words : In-pipe Cleaning Robot(관로청소로봇), 6-link Sliding Mechanism(슬라이딩메커니즘), TRIZ(트리즈), Optimal Design(최적설계), RecurDyn®(레커다인), Design Of Experiment (DOE)(실험계획법), ANSYS® Workbench(엔시스 워크벤치)

* 창원대학교 기계설계공학과 (raita110@naver.com)

주소: 641-773 경남 창원시 의창구 사림동 9번지

+ 창원대학교 기계설계공학과

++ (주)로봇밸리

+++ 부경대학교 기계자동차공학과

1. 서론

최근 관로에 대한 작업이 가능한 로봇에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히, 쓰레기 자동 집하시설 등과 같은 관로의 경우 이미 한국의 수도권에서는 설치가 현실화 되고 있는 실정이다.

한국의 자동집하시설은 아직까지는 도입 초기단계로 기존 수거 방식에 의한 환경과 미관상의 문제를 해결함으로써 인하여 주민 만족도는 높게 조사되었으나, 높은 시설 설치 및 운영비용, 음식물 쓰레기의 수거율 및 재활용율 저하 등 안정적인 운영을 위한 기술력 개선 등의 과제를 안고 있다. 이러한 기술력 개선의 하나로서 안정적인 쓰레기 수거를 위한 관로의 청소는 중요한 과제이다.

쓰레기 자동집하시설은 일정 간격으로 설치된 전용 투입구를 두고 지하에 관로를 배설하여 집하장 시설과 연결하여 사용자는 언제나 쓰레기를 투입할 수 있으며 투입된 쓰레기는 투입구 하부에 임시저장 된 후 집하장에서 정기적으로 수거함으로써 수거인력이 필요 없으며 쓰레기가 외부로 노출되지 않는 친환경적인 시스템이다. 쓰레기 자동집하시설은 종래의 인력과 차량에 의한 수거방식과는 달리 쓰레기를 투입구에 버리면 중앙 제어 시스템의 통제에 의하여 지하 매설관로에 흐르는 약 60~70km/h의 고속 공기와 함께 중앙 집하시설로 운반되어 쓰레기의 종류에 따라 소각장에 직접 투입시키거나 컨테이너에 자동 적재 후 최종 처리장까지 운송하는 시스템이다. Fig. 1은 쓰레기 관로 수송방식의 개념도를 보여주고 있다⁽¹⁾.

쓰레기 자동집하시설의 안정적이고 장기간 유지를 위해서는 관로의 청소가 중요하다. 쓰레기 자동집하시설의 300~400 mm 직경의 관로에 쓰레기 이동시 발생하는 관내 불순물 제거를 위해 청소로봇을 사용하여 관내 청소 작업을 한다.

현재 관내 주행 로봇으로는 단순히 관 내부를 주행하며 검사를 목적으로 하는 관내 주행로봇이 대부분이다.

노세곤의 “지하 매설 가스배관용 차동 구동형 배관검사 로봇의 개발(Development of Differentially Driven Inpipe Inspection Robot for Underground Gas Pipeline)”의 논문에서는 단순한

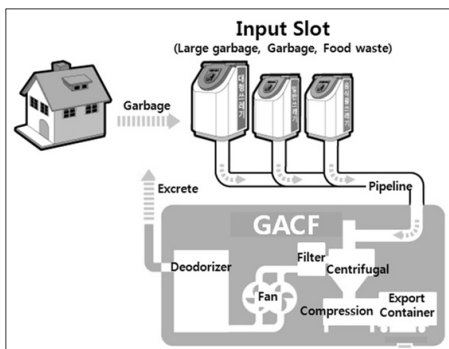


Fig. 1 Key map of garbage automatic collection facilities

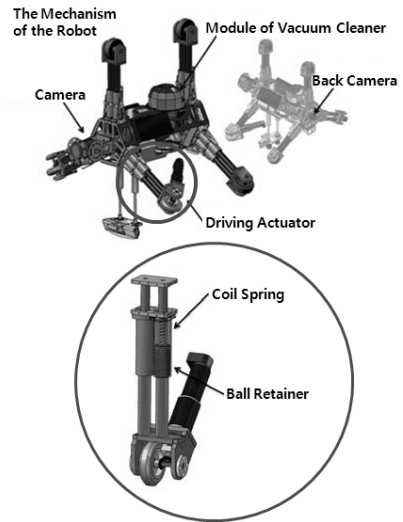


Fig. 2 In-pipe inspection/cleaning robot (Choi et al.⁽³⁾)

가스배관내의 검사를 목적으로 하는 로봇이 개발되어 청소에는 부적합 하다고 여겨진다⁽²⁾.

최형식교수의 “배관 검사 및 청소 로봇의 개발(Development of an In-pipe Inspection and Cleaning Robot)” 논문에서는 로봇의 바디부분 개발이 되어 검사 및 청소방법에 대해서는 언급되지 않아 검사 및 청소에 부적합한 단계로 여겨진다⁽³⁾.

다음의 Fig. 2는 최형식 교수의 배관 검사 및 청소 로봇을 나타낸 그림이다.

위 로봇은 코일 스프링을 이용한 로봇의 직경을 유지하는 방식으로 코일 스프링 링크가 독립적으로 설계되어 분기점 등에서 빠지게 되면 빠져 나올 수 없다는 단점이 있다.

본 논문에서는TRIZ를 이용하여, 로봇의 기초설계를 하고, 로봇이 관의 직경에 맞게 링크가 변할 때 관과 로봇의 링크가 충돌할 때의 충격량을 Recurdyn[®]으로 계산한다. 계산된 값을 ANSYS[®] Workbench로 링크가 받는 응력을 구조해석한다. 그 값을 토대로 실험계획법을 이용하여 로봇링크를 최적 설계한다.

2. TRIZ를 이용한 관로 청소 로봇의 기초 설계⁽⁴⁾

TRIZ(Teoriya Reshniya Izobretatelskikh Zadatch)는 Theory of Inventive Problem Solving(창의적 문제 해결 이론)이라는 뜻의 러시아 약자이다. 이 이론은 여러 가지 문제해결을 위한 방법론(기술진화의 법칙, IFR, 모순, 물질-장 등)들이 있다. TRIZ는 여러 요소들로 이루어진 복잡한 문제의 해결책을 찾는 데 유용하다⁽⁵⁾.

TRIZ란 문제해결을 위한 6단계 창의성(6SC : 6 Step Creativity) 이론이다.

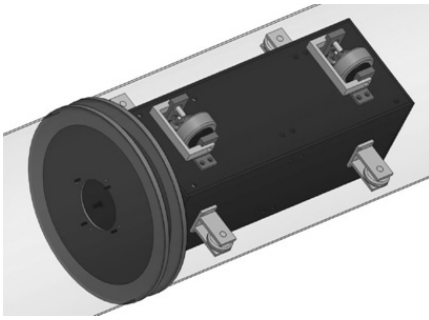


Fig. 3 Simple design of in-pipe cleaning robot

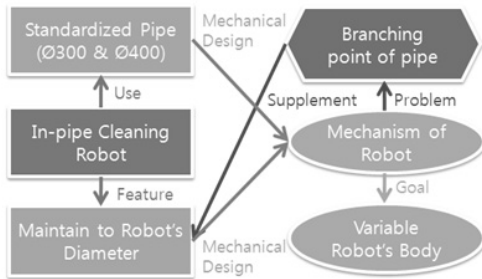


Fig. 4 System functional analysis

2.1 문제의 도식화

로봇의 단순 설계 시 관의 직경 300mm 와 400mm에 맞게 로봇이 가변이 가능하도록 설계함으로 관의 각각의 직경에 맞도록 설계가 필요하다.

2.2 시스템 기능 분석

문제의 로봇 몸통을 기술시스템 분석표로 표현하고 각 관의 직경에 맞도록 가변이 가능한 로봇 설계하는 것을 목표로 정하였다.

2.3 이상해결책(IFR)

“로봇은 한정된 크기로 설계를 하고, 각 관의 직경에 맞게끔 설계를 한다.”고 이상해결책을 제시 하였다.

2.4 모순과 분리의 원리

“직경 300mm와 400mm의 각각의 관에 맞도록 두 개의 로봇을 설계하여야 하고, 각 관의 직경에 맞도록 하나의 로봇으로 설계 되어야 한다.”라고 모순을 제시한다.

모순을 해결하기위한 해결책을 찾기 위해 “300mm관과 400 mm관 각각의 로봇 설계를 하고, 두 로봇을 합쳐 하나의 로봇으로 만든다.”라고 분리의 원리를 적용한다.

2.5 요소-상호작용 분석

분석표 Fig. 5에서 보면, 로봇 바디가 관의 규격화된 직경

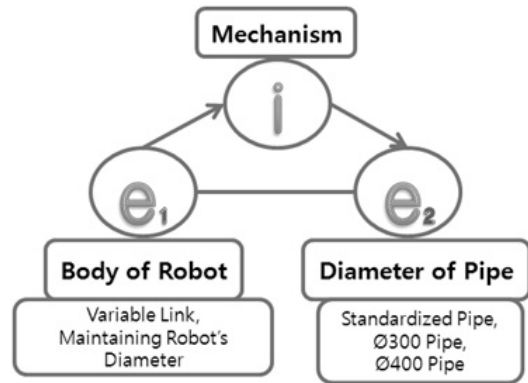


Fig. 5 Elements-interaction analysis

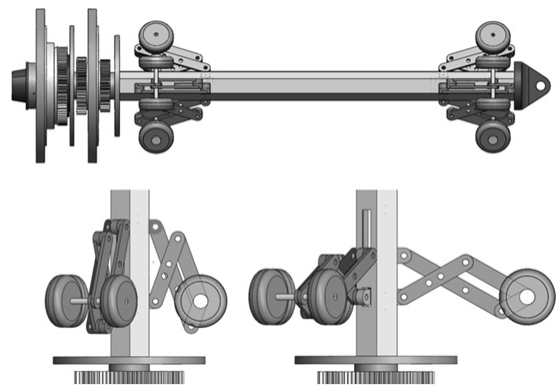


Fig. 6 6-link sliding mechanism

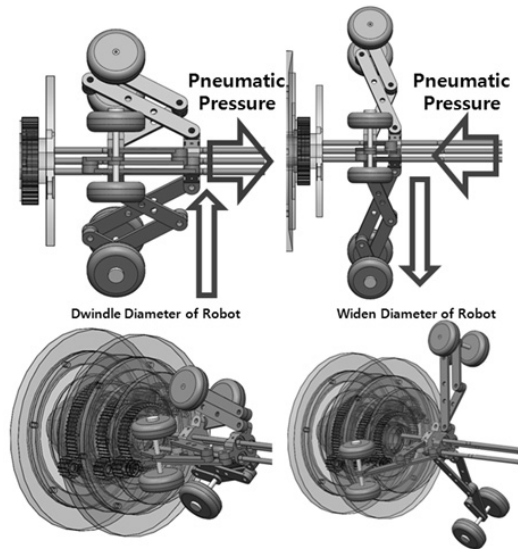


Fig. 7 Three 6-link sliding mechanisms for one slider

(300mm, 400mm)에 하나의 로봇으로 구동이 가능하게 설계하도록 한다. 규격화 된 관에 가변이 가능하며, 분기관에서 하나의 링크가 빠져도 관의 직경을 유지하며 청소가 가능한 설계는 로봇 바디의 메커니즘에 있다는 것을 알 수 있다.

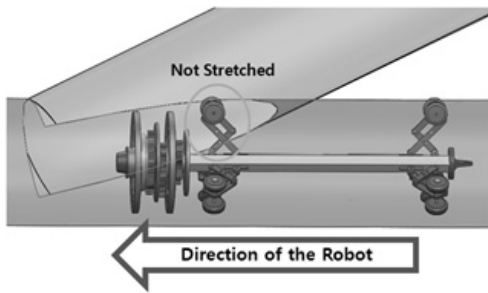


Fig. 8 Appraisal of 6-link sliding mechanism using pneumatic pressure at a branching point

2.6 문제의 해결책과 평가

규격화 된 두 종류의 관에 모두 사용할 수 있게 하기 위해서 로봇의 직경이 가변할 수 있어야 한다. 6-Links of Slide mechanism 으로 설계하여 각 관의 직경에 맞게 변형이 가능하도록 한다.

로봇의 직경 유지를 위하여 공압을 이용한 Slide Mechanism 을 적용하여, 로봇의 링크가 3개중 2개만 고정되어 있으면 로봇의 링크 하나가 분기관 등 관의 이상점에 빠지게 되어도 직경이 유지되어 안정적인 구동이 가능하다.

3. RecurDyn[®]을 이용한 로봇 시뮬레이션

RecurDyn[®]은 다물체 동역학 시뮬레이션 프로그램이다.

관로 청소 로봇이 관내에 고정될 때 슬라이드 메커니즘과 관 내벽이 충돌한다. 공압이 Slide Mechanism을 슬라이드 시켜, 로봇의 링크가 펼쳐져 관 내벽에 고정이 되는데, 이때 관 내벽과 청소로봇의 바퀴가 충돌하게 된다. 이 충돌하는 힘¹⁸⁾을 RecurDyn[®]으로 계산하여, 로봇 링크의 최적설계를 수행 하도록 한다.

관내 청소로봇의 3D 모델링을 간략화 하여 시뮬레이션을 수행한다. 그림 9는 간략화 한 로봇의 슬라이드 메커니즘이다.

Table 1은 6-links Slide Mechanism의 각 링크의 길이와 두께를 표로 나타낸 것이다.

로봇의 링크부를 레커다인에서 로드하여, 제약조건을 준다. 그림의 아래의 방향으로 중력가속도를 적용한다. 로봇은 Ø400의 관에서 로봇이 작동하는 조건으로 시뮬레이션 하였다.

Joint는 Revolute joint로 설정하고 Joint1~6, 총 6개의 Joint를 그림에서 보는 바와 같이 설정한다. 아래의 Joint1에 연결된 부품은 고정되어 있으므로 고정하고 Joint2에 연결된 부품은 슬라이드가 가능하도록 구속조건을 두지 않는다.

로봇과 관의 충돌할 때 충격량을 알아보기 위하여 관과 접촉하는 링크부의 2개의 바퀴와 관에 접촉 조건을 그림 10과 같이 Solid Contact으로 준다. 또한 고정 부품(Joint1에 연결된 부품)과 슬라이드 부품(Joint2에 연결된 부품)이 충돌 할 것을 대비하여 부품끼리의 Solid Contact 조건을 준다.

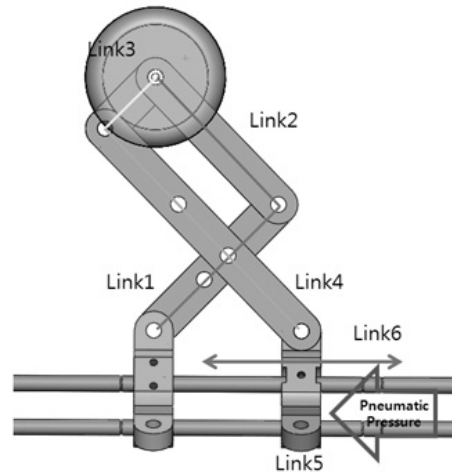


Fig. 9 6-link sliding mechanism using pneumatic pressure

Table 1 Initial design of links

Links	1	2	3	4
Length (mm)	91	91	37	145
Thickness (mm)	10	5	5	10

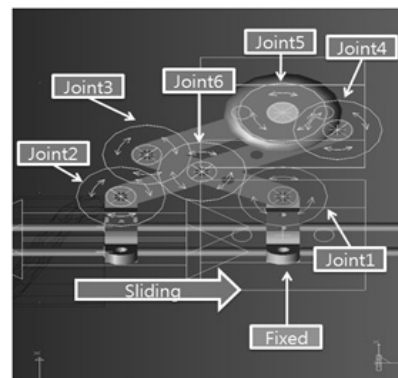


Fig. 10 Constraints of joint and fixed condition

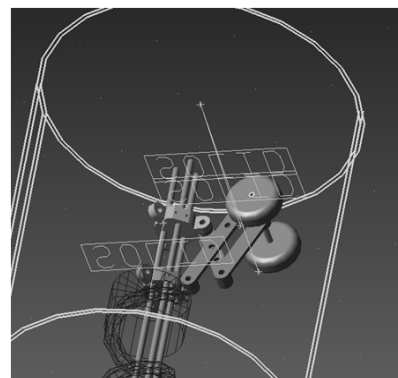


Fig. 11 Contact constraint

Solid Contact은 부품간의 접촉이 가능 하도록 하는 제약조건이다.

로봇의 Slide Mechanism은 공압에 의하여 작동하는데, RecurDyn[®] 프로그램에는 공압 제약조건이 없다. 그래서 현장 실무자의 경험적 조연을 토대로 스프링 force 조건으로 대처하였다. 공압의 경우 2m/s²의 가속도로 sliding한다. 스프링 force의 조건을 스프링 상수 5, 변위 40mm로 조건을 주어 프로그램을 시뮬레이션 해보니 1.97m/s²의 가속도로 sliding 한다는 사실을 알게 되어 스프링 제약조건을 아래와 같이 주고 시뮬레이션을 한다.

Fig. 13은 레커다인 시뮬레이션 결과이다. 그래프는 충격량을 나타낸다. 그래프는 1초 동안 로봇이 슬라이드한 것이며, 1초 동안의 접촉은 바퀴 하나만 접촉하였으며, 로봇의 바퀴와 관 내벽이 충돌한 것으로 최고 충격량이 100N 정도인 것을 확인 하였다.

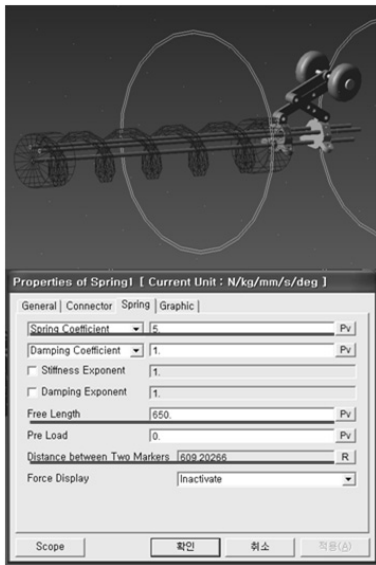


Fig. 12 Spring force condition

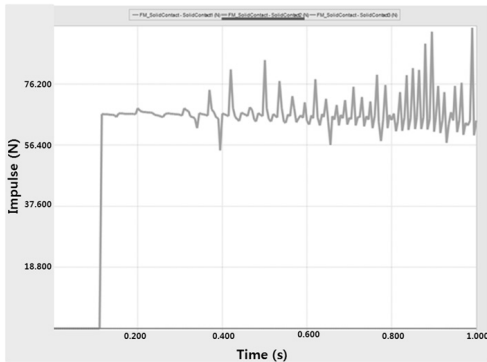


Fig. 13 Simulation result of impulsive force using RecurDyn[®]

4. 6-Link Slide Mechanism의 최적 설계

실험계획법이란 해결하고자 하는 문제에 대해 실험을 어떻게 행하고, 데이터를 어떻게 취하며, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하여 최소의 실험 횟수로 최대의 정보를 얻을 있는가를 계획하는 방법이다. 실험계획법을 통하여 각 인자의 결과에 대한 영향을 정량적으로 파악할 수 있으며 최적값의 조건을 찾을 수 있다⁽⁶⁾.

본 실험에서는 청소로봇 링크부의 최적설계를 하기 위해 링크부에 작용하는 힘을 구하여, 그 힘을 로봇 링크부에 가하여 구조해석을 한다. 구조해석의 결과를 가지고 실험계획법을 이용하여 로봇링크의 최적설계를 한다.

최적 설계를 위해 로봇 링크의 두께를 조절하여 가벼우면서 안전율 2이상의 조건에 만족하기 위하여 실험계획법을 이용하여 문제를 해결하고자 한다. Minitab[®]을 이용하여 로봇 링크의 설계변수들을 직교 배열표를 만들어 구조해석을 수행하며 최적인자를 찾아 최초로 설계된 로봇 링크부의 안전율을 비교 검증 한다.

로봇 링크의 안전율에 영향을 미치는 로봇 링크의 제어인자는 Fig. 14 와 같이 Link1, 2, 3, 4의 두께 개수로 총 4가지로 선정 하였고 혼합 수준 설계이며 Table 2와 같다.

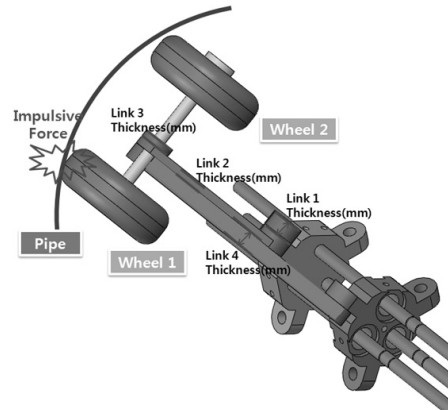


Fig. 14 6-link sliding mechanism (top view)

Table 2 Level of design variables

Level	1	2	3	4
Factor				
Link1 Thickness(mm)	5	10	3	8
Link2 Thickness(mm)	5	10	3	8
Link3 Thickness(mm)	5	10	3	8
Link4 Thickness(mm)	5	10	3	8

Table 3 Orthogonal array

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	Link 1	Link 2	Link 3	Link 4	Safety Factor	Mass	object
1	5	5	5	5	2.7065	0.145	0.09853
2	5	10	10	10	3.2207	0.265	0.29040
3	5	3	3	3	1.1350	0.127	0.15870
4	5	8	8	8	2.7980	0.224	0.12080
5	10	5	10	3	1.8569	0.248	0.23687
6	10	10	5	6	3.0684	0.298	0.28754
7	10	3	8	5	2.9294	0.657	0.19853
8	10	8	3	10	1.2015	0.897	0.18643
9	3	5	3	8	1.1023	0.135	0.10854
10	3	10	8	3	1.2007	0.175	0.15871
11	3	3	5	10	1.1132	0.139	0.10258
12	3	8	10	5	1.7965	0.197	0.20779
13	3	5	8	10	2.9856	0.207	0.15768
14	8	10	3	5	1.6759	0.198	0.16587
15	8	3	10	8	3.1520	0.209	0.31907
16	8	6	5	3	1.2113	0.164	0.10847
17	10	5	5	10	3.6751	0.241	0.27631

직교 배열표는 Minitab®의 L8 직교 배열 표를 이용하였으며 Table 3과 같으며 총 16회의 실험으로 최적의 값을 얻을 수 있다.

최적화 시법을 위해 식 (1)과 같이 여러 목적함수들이 선형 결합한 하나의 목적함수를 지정하고 목적함수는 6-Slide Mechanism의 링크의 두께와 무게를 선택한다. 최적 두께와 무게를 최소로 하는 인자를 찾기 위해 Scale factor와 Weight factor를 적절하게 설정하고 목적함수가 최소가 되는 지점을 찾게 만들어야 한다⁽⁷⁾.

목적함수의 최대값을 1로 만들기 위해 w_1, w_2 의 값으로 둔다.

$$object = w_1 \times \frac{|safetyfactor - 2|}{sf_1} + w_2 \times \frac{mass}{sf_2} \quad (1)$$

Table 3에서 확인할 수 있듯 붉은 아래선이 쳐진 것이 목적 함수 0.09853으로 최소값이 된다는 것을 확인할 수 있다. 이는 최적 설계값을 의미한다. 기존 설계의 푸른 아래선이 쳐진 값, 0.27631과 비교하면 아주 우수한 값을 나타낸다.

최적 설계된 링크를 증명하기 위하여, 6-Link Slide mechanism을 재설계하여, ANSYS Workbench를 이용하여 안정성을 검증한다. 위의 실험에서 한쪽 바퀴의 최대 충격 100N을 Fig. 15와 같이 적용하고, 중력 가속도를 적용한다. 물성치는 Al-7075를 적용하여 구조해석을 수행한다.

구조해석을 수행한 결과 안전율이 2.7065라는 값을 얻을 수 있었다. 이 값은 우리가 목표로 하였던 2이상의 값을 만족하므로, 6-Link Slide Mechanism은 최적 설계가 되었다고 결론을

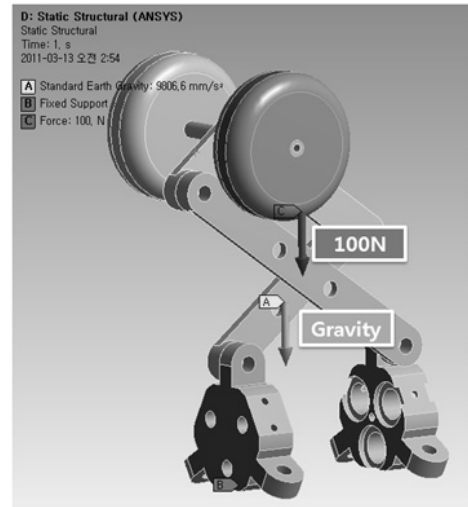


Fig. 15 3-D model of ANSYS® Workbench

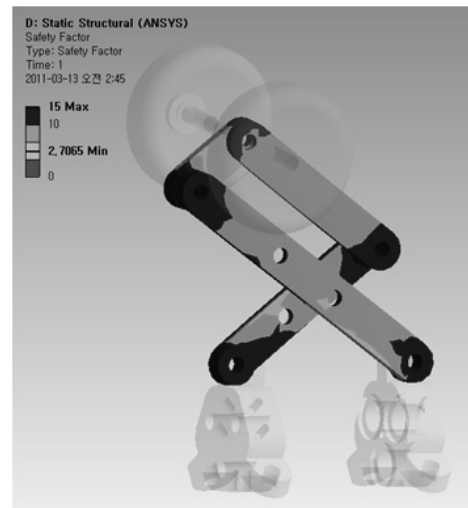


Fig. 16 One result of static analysis using ANSYS® Workbench

내릴 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 관내 청소로봇을 개발하고 실험계획법을 이용하여 각 인자를 분석하고 로봇의 안정성을 검증하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 청소로봇의 초기모델의 문제점을 해결하기 위하여 TRIZ를 이용하여 로봇의 기초설계를 수행하였다.
- (2) 링크부의 최적설계를 위하여 관과 로봇의 링크부의 충격을 RccurDyn으로 시뮬레이션을 수행하여 100N의 충격이 한 개의 바퀴에 받는다는 것을 확인 할 수 있었다.
- (3) 충격값을 토대로 최적설계를 위하여 실험계획법을 이용하

여 각 인자들을 분석하여 각 인자를 ANSYS Workbench로 해석하여 로봇 링크부의 최적인자를 도출하였다. 그 결과 관내 청소로봇의 링크부 안전률이 2.7065로써 최적화 설계가 되었다는 것을 확인할 수 있었다.

로봇의 개발에 있어 진행되지 않는 로봇의 제어가 필요 하고, 기존의 청소들은 역회전 브러쉬의 메커니즘이 복잡하여 재설계 및 검증이 필요로 한다. 전용 소프트웨어를 프로그래밍하여 로봇을 제어하고 역회전 브러쉬의 메커니즘을 간단하게 할 수 있게 재설계를 한다. 앞으로 이 두 가지를 해결하기 위한 연구를 진행해 나가야 할 것이다.

후 기

이 연구에 참여한 연구자의 일부는 「2단계 BK21 사업」의 지원비를 받았음.

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0013902).

참 고 문 헌

(1) Yun, H. Y., and Park, W. S., 2007, *Status of Automated Waste Collection System and Scheme of Management hereafter*, Research Reports of the Incheon Development

Institute, Korea.
 (2) Rho, S. G., Ryu, S. M., and Choi, H. R., 2001, "Development of Differentially Driven Inpipe Inspection Robot for Underground Gas Pipeline," *Journal of the KSME*, Vol. 25, No. 12, pp. 2019~2029.
 (3) Choi H. S., Na, W. H., Kang, D. W., Kang, H. S., and Jeon, J. G., 2007, "Development of an In-pipe Inspection and Cleaning Robot," *Journal of KSME*, Vol. 33, No. 5, pp. 662~671.
 (4) Lee, K. S., 2007, "A Study Development of a Continuously Variable Transmission for Bicycles by Theory of Inventive Problem Solving (TRIZ)," *Journal of the KSPE*, Vol. 24, No. 7, pp. 75~82.
 (5) Kim, H. J., 2006, *Creative Science of TRIZ*, DuYangSa, Korea, pp. 38~68.
 (6) Genichi, T., and Yuin, W., 2001, *TAGUCHI's Quality Engineering Handbook*, Wiley, Japan.
 (7) Ko, S. H., Han, S. Y., and Choi, H. Y., 2001, "Optimal Design for a Structure Using Design of Experiment," *KSMTE Spring Conference*, pp. 34~39.
 (8) Kim, D. G., Park, H., and Kang, S. I., 2011, "A Study on the Shifting Shock of the Automatic Transmission in Tracked Vehicles," *Journal of Manufacturing Engineering & Technology*, Vol. 13, No. 1, pp. 100~106.