

재활용품 회수용 환경로봇 수명시험 장치 구성에 관한 연구

강보식[†]

한국기계연구원

A study on the development of life test equipment for eco-robot for collecting recycling products

B. S. Kang[†]

Korea Institute of Machinery & Materials

Abstract

Eco-robot for collecting recycling products is the machine which collects non-industrial wastes such as cans, PET bottles and etc. to reuse them as recycling resources. This eco-robot is operated in the condition that it should compress and hold various products without knowing their geometric shapes and material properties. For this reason reliability problems like malfunction or failure. comes to emerge, but the reliability test conditions to assess its performance and durability have not been founded yet.

Therefore in this research failure mechanism of the eco-robot was analyzed and life test equipment which can reproduce actual usage conditions was developed. The compression levels in the life test were determined by measuring the crushing force acting on test products and . Furthermore the test specimens which have equivalent shape and material properties with those of cans and PET bottles were proposed by simulating the deformation characteristics so that the actual compression conditions were set up in the test.

Keywords : Eco-robot, Reliability, Life test machine, Recycling resources

[†] 교신저자 kbs668@kimm.re.kr

논문접수일 : 2011년 10월 05일 논문수정일 : 2011년 10월 26일 게재확정일 : 2011년 12월 02일

1. 서 론

최근 자원 위기극복 및 자원 순환성 제고와 관련된 친환경, 저탄소 녹색 사업이 전개되고 있으며, 이 중에서도 특히 생활 폐기물의 재활용 촉진을 위한 효율적 수거방식이 거점 배출에서 자동화 회수 장치를 통한 수거방식으로 전환되고 있어, 이의 실용화 운영을 뒷받침 할 수 있는 기술개발이 유럽과 같은 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있다 이명현(2011), 임성린(2011), 오정익 외(2010).

이의 대표적인 개발 장치중의 하나인 재활용품 회수장치용 환경로봇은 일반폐기물로 버려지는 빈 캔, 페트병 등을 재활용 자원으로서의 가치를 높이고 일반 사용자들이 쉽게 사용할 수 있도록 회수의 편리성을 고려하여 만들어지고 있으며, 투입된 회수품은 압축되어 자동으로 재질, 형태 등을 고려하여 감별, 분류하고, 사용자들에게 적립 마일리지 포인트나 탄소 포인트 등을 제공하는 멀티스테이션형 리버스 밴딩머신(Reverse Vending Machine)이다.

하지만 본 장치는 사용자의 다양한 성향과 각종 다양한 캔/페트의 형상과 재질에 관계없이 압축 회수해야 하는 매우 열악한 환경에 노출되어져 있는 것이 현실이며, 이로 인하여 장치의 작동 오류 등 신뢰성 문제가 크게 대두되고 있으나, 일정 수준의 내구성 확보를 증명 할 수 있는 시험조건 결정 및 수명평가 기술 정립이 체계적으로 이루어져 있지 않은 상황이다 명소영 외(2001).

이와 관련하여 본 연구에서는 재활용품 자동처리 장치인 환경로봇의 수명시험을 위한 압축 조건 결정과 다양한 회수제품의 수명시험을 재현할 수 있는 장치 개발 연구를 위하여, 환경로봇의 고장메카니즘 분석과 필드 고장 재현을 위한 예비시험을 통하여 회수 대상제품의 압착력 측정을 수행하였고 박재범 외(2003), 이를 바탕으로 수명시험시 압착력 재현을 위한 최적 더미형상 결정과 이를 바탕으로 실사용 조건을 재현할 수 있는 자동 수명시험 장치의 설계 및 개발 결과를 제시하고자 한다.

2. 환경로봇 구조 및 고장분석

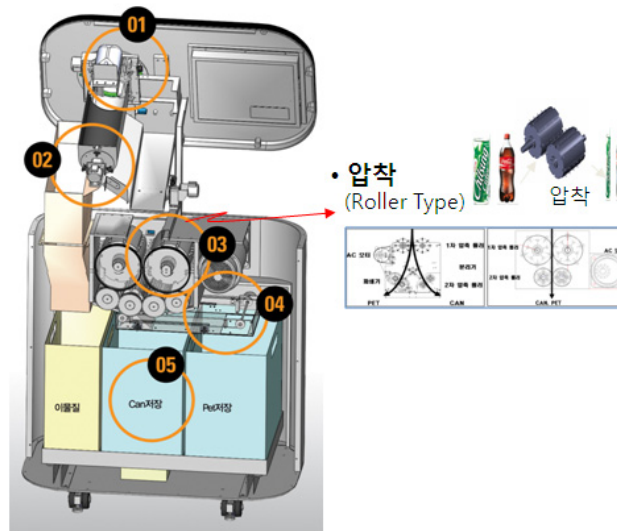
2.1 환경로봇의 기능 및 구조

환경로봇은 크게 투입되는 재활용 대상 용기(빈 캔, 페트)를 분류하는 모듈부와 선별되어 공급된 용기를 압착하여 부피를 감소시키는 압착 모듈시스템, 압착된 재활용 용기를 분리 저장시키는 모듈시스템, 적립마일리지 및 포인트 등을 처리하는 통합운영시스템 제어부로 구성되어 진다.

이 장치에서 핵심부품은 실린더, 분리관 & 고정틀, 압축롤러 등 9개의 핵심부품과 슬라이드 레일, 카드리더기, 바코드 스캐너, 적외선 근접센서 등 16개의 핵심부품 및 베어링, 체인, 커플링 등 총 189개의 핵심단품으로 구성되어 있다. 작동 수명을 좌우하는 가장 핵심되는 부품은 압출롤러가 설치된 압착부로 이들 장치 고장의 대부분은 투입된 압축 대상 제품이

압축롤러 사이에 끼임 등으로 인한 구동장치의 과부하로 나타나고 있으며, 이 부분의 부하 재현 특성 분석이 수명시험 조건 결정에 매우 중요함을 알 수 있다.

<그림 1>은 재활용품 자동 회수장치인 환경로봇의 기본 구조부와 주요 작업 프로세스를 나타내고 있다.



- 자동회수 작업프로세스(Working Process) : 투입(01) ➡ 재질선별(02) ➡ 압착(03) ➡ 분리(04) ➡ 저장(05).

<그림 1> 재활용품 회수장치용 환경로봇의 기본구조

2.2 고장분석

본 연구대상인 환경로봇은 캔/페트 압착을 위한 압축롤, AC기어드 모터, 카드 인식을 위한 카드리더기, 동력을 전달을 위한 샤프트 등의 주요부품으로 이루어져 있으며, 고장모드 및 메카니즘 분석결과 대부분의 고장모드는 <표 1>과 같이 과부하에 의한 파손 및 변형이었다. 그 중에서 가장 고장이 빈번한 압축롤은 분류 모듈부와 압착 모듈부에서 발생하고 있으며, 주요 고장 메카니즘은 재활용품(캔, 페트) 압착시 끼임 등으로 인한 과부하로 압축롤러 변형, 체인 파손, 동력발생 모터의 파손 등 구동장치의 손상이었다.

또한 작은 캔, 페트는 비교적 압축이 용이하여 고장 발생의 경우는 없으나, 간혹 큰 사이즈의 페트의 경우는 형상 등의 문제로 압축롤러 초기 진입이 어려워 고장을 유발하는 경우도 발생됨을 확인 할 수 있었다.

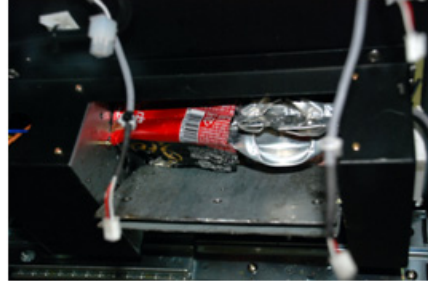
한편 재활용품 투입조건에 따른 고장 분석 결과, 투입 시 병뚜껑을 체결한 상태의 밀폐된 페트병의 경우 압축 후 복원력의 발생으로 압축되지 않고 분리 되거나, 페트 압축과정 중 페트의 압축부 및 2차 분리부에 끼임이 발생하는 경우도 분석 되었다.

환경로봇 주요부인 압축부 및 분리부의 고장발생중 대표적 고장 발생 사례 분석 결과, 캔, 페트의 압축부 및 2차 분리부의 끼임 발생의 대부분은 압축과정 중 과도한 부하증가에 따른

회전력 약화로 인하여 끼임 발생이 발생되었으며, <그림 2>에 고장 사례를 나타내었다.



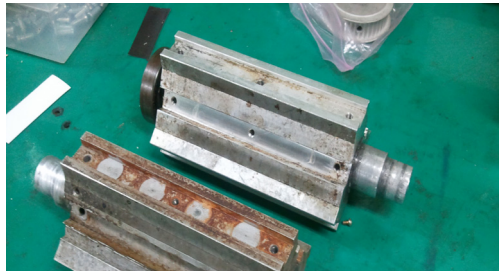
(a) 압축롤러의 페트 끼임 현상



(b) 2분리부의 캔/페트 걸림 현상

<그림 2> 압축부 및 분리부 고장 사례 분석 결과

압축부의 또 다른 고장 사례로는 회전롤러 사이의 과도한 끼임 현상으로 인한 부하증가로 압축롤러 회전 샤프트부의 파손이 발생하는 사례였으며, <그림 3>에 나타내었다.



<그림 3> 압축부 고장의 압축롤러 샤프트 손상

<표 1> 고장모드 및 메커니즘 분석(Failure Modes and Mechanisms Analysis; FMMA)

주요 구성품	기능	고장 모드	고장 메커니즘
압축롤	캔/페트 압착	변형	소성 증가
		파손	과부하
		부식	화학 작용에 따른 부식
AC기어드 모터	동력 발생	마모	과부하
		파손	과부하
적외선 근접 센서	캔/페트 감지	열화	일렉트로마이그레이션
		파괴	절연 파괴
카드리더기	카드 인식	열화	과부하
		변형 및 파괴	과부하
슬라이드 레일	직선 운동 지지	마모	과부하
		변형	소성 증가
샤프트	동력 전달	변형	소성 증가
		파손	과부하
고정 가이드	하중 지지	변형	소성 증가
		파손	과부하

3. 압축조건 및 수명평가 시료 대체용 더미 결정시험 결과

3.1 필드 고장 재현을 위한 예비시험 결과

환경로봇의 수명시험을 위해서는 현재 필드에서 생산되고 있는 다양한 재질 및 형상의 캔, 페트 등을 직접 투입구에 넣어 시험을 수행하여야 하나, 이에 소요되는 시험 샘플 캔, 페트 병들을 지속적으로 공급하여 자동적으로 시험하는 것은 매우 어렵다.

따라서 본 연구에서는 필드에서 유통되고 있는 재활용품인 캔, 페트의 압착력을 측정하고 이들 중 최대값을 분석하여 이를 재현 할 수 있는 수명시험용 샘플 모형(Dummy)을 결정하기 위해 실사용 캔 페트를 수거하여 압착력 측정 예비시험을 수행하였다.

예비시험을 위해 캔/페트의 용량, 형상, 재질별로 대표 시료를 선정하였으며, 선정된 시료는 자동회수기의 수명시험 장치 설계를 위한 기초데이터 확보를 위해 압착강도 시험을 하였다. 이때 시험대상품 결정을 위한 종류 및 재질별 시료 선정 기준과 용량 및 형상에 의한 수량 결정 결과는 <표 2~4>와 같다

<표 2> 시험대상품 재질별 시료선정

	PET	CAN
용량	2L, 500mL	250mL, 355mL
재질	경질, 연질	AL, Fe
형상	사각, 원형	원형

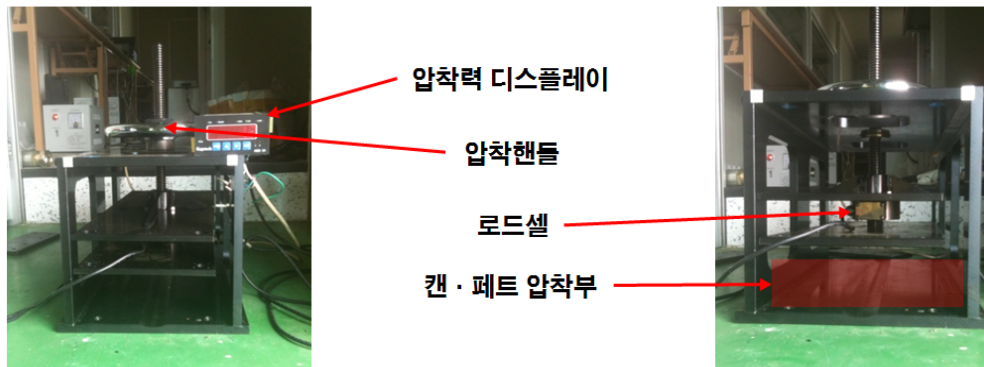
<표 3> PET 구분별 수량

구 분		PET	
		연질 수량	경질 수량
2L	사각	2	4
	원형	2	2
500mL	사각	2	4
	원형	4	4(1L)
맥주		4개	

<표 4> CAN 구분별 수량

구 분		CAN	
		알루미늄 수량	철 수량
250mL		3	2
355mL		4	-

<그림 4>와 같이 필드에서 유통되고 있는 재질 및 압착력 시험장치를 구성하여 캔/페트 압착력을 측정하였다. 시험장치는 크게 압착력 디스플레이, 압착핸들, 로드셀, 캔/페트 압착부로 구성되어 있으며, 캔/페트 압착부에 시험 대상품을 위치한 후 압착핸들을 사용하여 캔/페트의 기준 압착높이까지 압착하였다. 이때의 압착력을 기록함으로써 캔/페트가 압착될 때의 압착 부하를 측정하였다. <표 5>와 <표 6>은 시험대상품에 대한 압착력 시험 결과를 나타낸 것이다.



<그림 4> 캔/페트 시험장치의 구성

<표 5> 캔 종류별 압착력 시험 데이터 측정결과

No	제품명	재질/형상/조건	측정값
1	Q사(250mL)	알루미늄	342.1
3	R사(250mL)	알루미늄	219.5
4	D사(250mL)	알루미늄	184.4
5	O사(355mL)	알루미늄	337.1
6	O사(355mL)	알루미늄	335.1
7	E사(250mL)	철	276.2
8	TOP(250mL)	철	151.2
9	S사(250mL)	철	121
10	G사(250mL)	철	145.5

<표 6> 페트별 압착력 시험 데이터 측정결과

No	제품명	재질/형상/조건	측정값	No	제품명	재질/형상/조건	측정값
1	A사(2L)	연질/사각/Open	402.3	15	I사(500mL)	연질/원형/Close	618.2
2	A사(2L)	연질/사각/Close	443.9	16	D사(500mL)	연질/원형/Close	618.3
3	B사(2L)	연질/원형/Open	640.3	17	F사(500mL)	경질/사각/Close	616.1
4	B사(2L)	연질/원형/Close	640.3	18	E사(500mL)	경질/사각/Close	493.3
5	C사(2L)	경질/사각/Close	634.9	19	E사(500mL)	경질/사각/Open	618.3
6	D사(2L)	경질/사각/Close	633.2	20	J사(500mL)	경질/사각/Close	617.6
7	E사(2L)	경질/사각/Close	577.4	21	K사	경질/원형/Open	614.1
8	F사(2L)	경질/사각/Close	625.7	22	L사	경질/원형/Open	614.3
9	G사(2L)	경질/원형/Open	620.9	23	M사	경질/원형/Close	613.7
10	G사(2L)	경질/원형/Close	602.8	24	N사	경질/원형/Open	613.9
11	A사(500mL)	연질/사각/Open	618.6	25	O사(1L)	경질/원형/Open	621.5
12	A사(500mL)	연질/사각/Close	618.3	26	O사(1L)	경질/원형/Close	616.2
13	H사(500mL)	연질/원형/Open	617.9	27	P사(1L)	경질/원형/Close	620.4
14	H사(500mL)	연질/원형/Close	616.6	28	P사(1L)	경질/원형/Open	618.3

캔/페트의 압착시험 결과, 캔보다 페트에서 높은 압착력이 작용함을 알 수 있었다. 이는 비교적 단순한 형상의 바닥과 균일한 두께를 지닌 캔과 달리 페트의 경우 하단부가 복잡한 형상을 이루고 있고, 하단부의 두께가 다른 부위에 비해 두꺼워 높은 강성을 지니고 있으며, 이로 인해 캔보다 페트에서 높은 압착력이 작용하는 것으로 분석되었다. 이 외에 페트의 마개가 제거되지 않고 체결되어 있는 경우 내부의 공기압이 작용하여 압착력에 상당한 영향을 끼칠 수 있음을 알 수 있다.

3.2 수명평가 시료 대체용 압착 더미 검토 및 선정 결과

환경로봇의 수명시험 시, 장시간의 수명시험동안 상당한 수량의 캔/페트를 공급해야 하므로 실시료(캔/페트)로 수명시험을 진행하는 것은 한계가 있다.

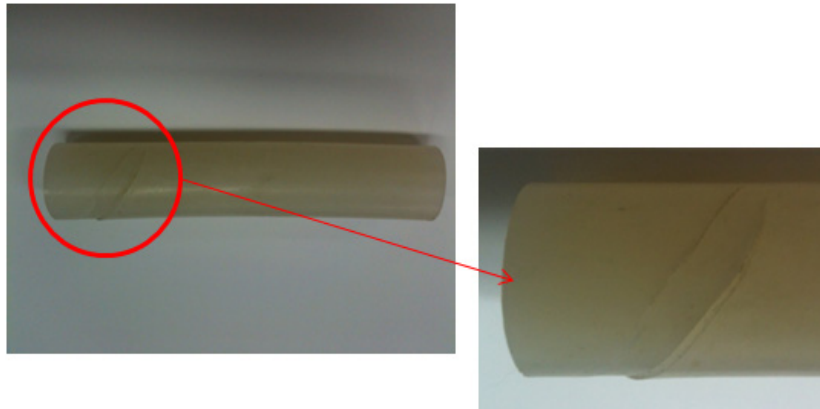
따라서 앞서 시험한 캔/페트의 압착력 시험을 바탕으로 동일한 압착력을 환경로봇에 인가 하면서 압착 사이클을 통과한 후에는 복원되어 지속적으로 사용할 수 있는 수명평가 시료 대체용 더미(Dummy)를 선정하는 시험을 진행하였다. 더미 선정 시험은 시중에서 압축시 깨짐이 없이 복원이 잘되는 <표 7>과 같은 재질들을 선정하여 최대 압착력인 640kgf를 인가하여 압축전후의 변형되었을 경우의 압축 변형량을 측정하고 복원후 찌그러짐 및 변형이 없는지를 확인하였다.

<표 7> 더미의 압착 시험 데이터

재질	압축전(mm)	압축후(mm)	압축량(mm)	시료 지름(mm)
바이톤	6.7	4.7	2	5
실리콘	11.4	6.5	4.9	10
NBR	11.5	6.7	4.8	10
우레탄	11.3	10.2	1.1	10

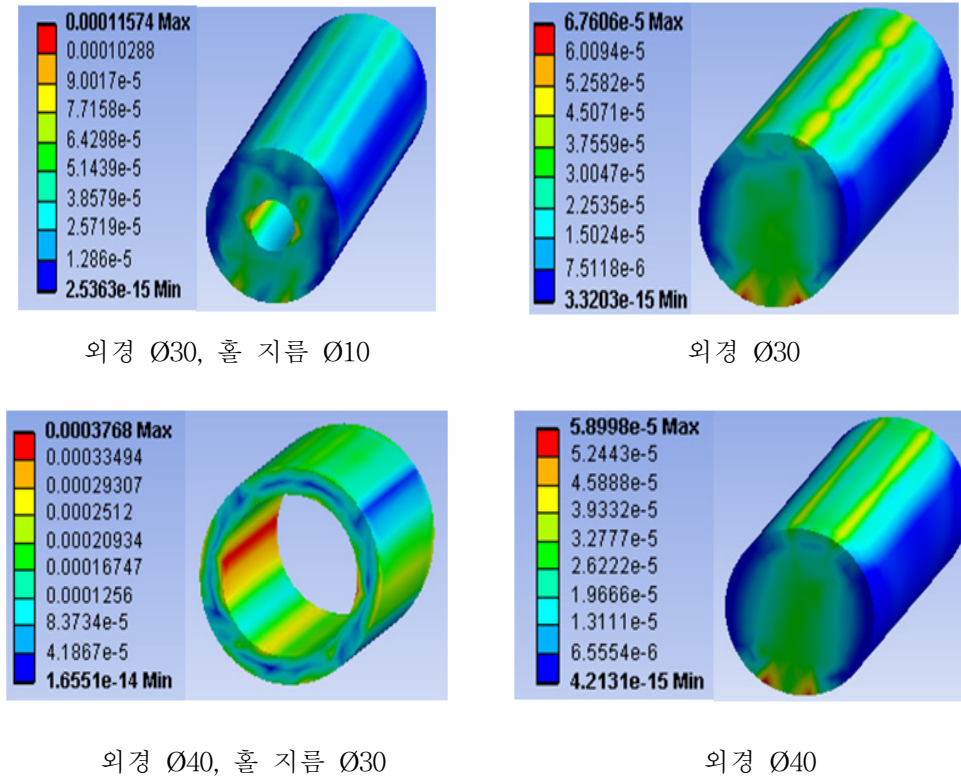
더미의 경우 자체 형상을 유지할 수 있는 충분한 강성을 지녀야 하며 우수한 복원력 보유 및 영구변형이 발생되면 안 되는 기준으로 각 재료별로 확인한 결과, NBR의 경우 압착률을 통과한 후 영구변형이 발생하였으며, 바이톤 및 우레탄의 경우 높은 강성으로 인해 변형량이 작은 결과를 보여 더미 재질로 실리콘을 결정하였다.

중실형 봉(실리콘)으로 더미를 제작하여 연속 작동시험을 실시하였으며, 시험 중에 <그림 5>와 같이 실리콘 봉의 파손이 발생하였다 이는 봉의 내부가 충전되어 있는 환봉의 경우 반복 압축 피로로 인하여 파손됨을 알 수 있다. 이를 근거로 환경로봇 내구 시험용 더미로 선정되기 위한 봉의 형상은 페트 및 캔처럼 중공형 환봉 타입으로 설계 되어야 압착력에 대한 반복사이클을 정상적으로 재현될 수 있음을 확인하였다.



<그림 5> 중실형 봉(실리콘) 더미의 파손

본 환경로봇 수명평가 재현을 위한 압축력을 고려할 때의 중공형 환봉 최적형상 및 사이즈 결정을 위하여 중공형 환봉의 외경 및 내경, 봉의 두께를 확인하기 위하여 <그림 6>과 같이 해석을 하였으며, 이를 통하여 탄성변형이 최적인 외경 $\varnothing 40$ 내부 중공 홀 지름 직경이 $\varnothing 30$ 인 모델과 외경 $\varnothing 30$ 내부 중공 홀 지름 직경이 $\varnothing 10$ 인 모델 2가지 형상의 더미를 선정하였다. <그림 7>은 앞서 해석하여 결정된 사이즈로 제작된 더미를 나타내었다.



<그림 6> 더미(실리콘)의 응력해석 결과



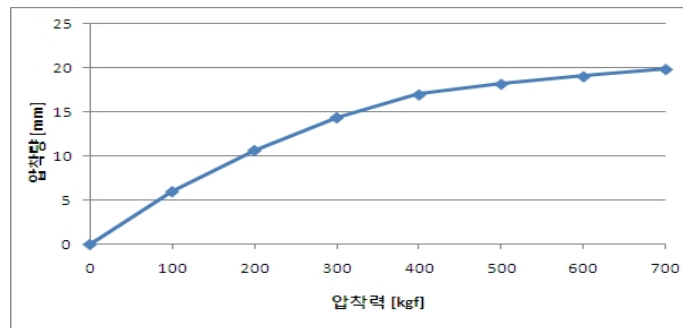
외경 Ø30, 홀 지름 Ø10



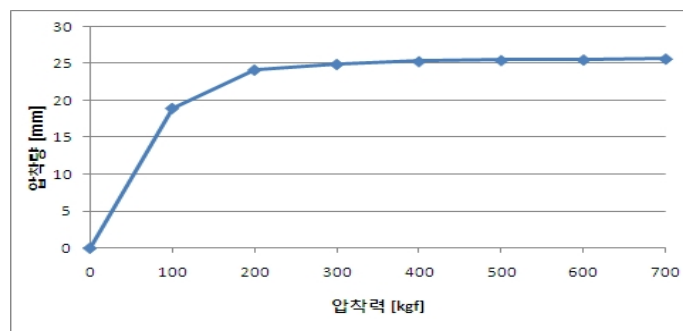
외경 Ø40, 홀 지름 Ø30

<그림 7> 수명시험용 중공형 더미 선정

<그림 8>은 제작된 2개의 더미 모델에 대하여 압착력에 따른 압착량을 측정된 결과를 나타내었다. 캔 압착시의 평균 압착력 260 kgf와 Max 340 kgf는 외경 Ø40 더미로 반복 재현이 가능함을 알 수 있으며, 페트 압착시의 평균 압착력 590 kgf와 Max 640 kgf는 외경 Ø30 더미로 반복 재현 수명시험이 가능함을 확인 할 수 있다.



(a) 더미 1(외경 Ø30, 홀 내경 Ø10)의 압착량 측정 결과



(b) 더미 2(외경 Ø40, 홀 내경 Ø30)의 압착량 측정 결과

<그림 8> 더미(실리콘)의 압착력에 대한 압착량 측정 결과

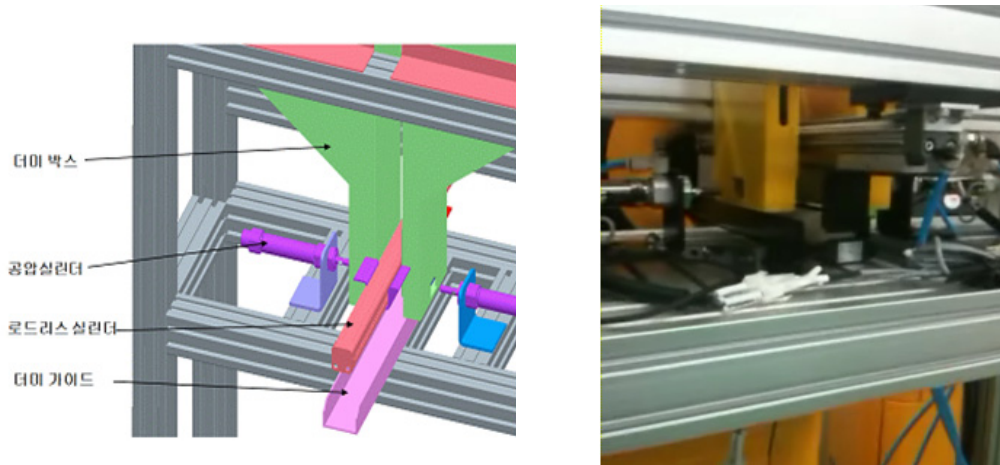
4. 더미 자동공급 환경로봇 수명시험장비 구성 결과

환경로봇의 수명 시험장비는 필드에서 유통되고 있는 캔, 페트 직접 투입하여 시험하여야 하나, 회수용 시험시료의 수집문제와 지속적 자동 내구시험의 제한적 문제가 야기되어, 캔 페트를 대신하여 압축롤러에 걸리는 압착력을 재현할 수 있는 더미 제작과 이를 환경로봇 투입구에 자동으로 더미를 공급 할 수 있는 장치로 구성하여 <그림 9>와 같이 제작하였다.

자동 공급시험장치는 크게 프레임과 더미 공급박스, 더미 투입장치부로 구성 되며, 더미 자동 투입장치부는 공압실린더, 로드리스 실린더, 더미 가이드로 구성되어있다. 더미를 더미 박스에 충전한 후, 공압실린더 및 로드리스 실린더를 통하여 두 형식의 더미를 교차 투입하는 방식으로 구동되어진다. 더미 박스의 충전량을 1 set로 규정하며, 1 set의 더미를 시험 완료한 후에 더미가 충전된 다른 박스를 교체 설치하는 방식으로 하였다. <그림 10>은 더미를 자동 공급할 수 있도록 설계 제작된 투입장치를 나타내었다.



<그림 9> 환경로봇 시험장비



<그림 10> 환경로봇 시험장비

5. 결 론

본 연구는 재활용품 자동처리 장치인 환경로봇의 수명시험을 위한 압축조건 결정과 다양한 회수제품의 수명시험을 자동으로 재현할 수 있는 장치 구성 개발에 관한 연구로서 수행하여 분석된 결과는 다음과 같다.

- 1) 환경로봇 재활용 회수제품의 대표하는 캔/페트의 압착시험 결과, 비교적 단순한 형상의 바닥과 균일한 두께를 지닌 캔과 달리 페트의 경우 하단부가 복잡한 형상을 이루고 있고, 하단부의 두께가 다른 부위에 비해 두꺼워 높은 강성을 지니고 있으며, 이로 인해 캔보다 페트에서 높은 압착력이 작용함을 확인 할 수 있었다.
- 2) 필드에서 유통되고 있는 재활용품인 캔/페트의 압착력을 측정하고 이들 중 최대값을 분석하여 이를 재현 할 수 있는 수명시험용 샘플 모형(Dummy)을 결정하기 위해 실사용 캔 페트를 수거하여 압착력 측정 예비시험을 수행하였으며, 캔 압착시의 평균 압착력은 260 kgf와 Max 340 kgf, 페트 압착시 평균 압착력은 590 kgf 이며, 최대값은 Max 640 kgf임을 확인하여 환경로봇 수명시험시 압착조건을 결정할 수 있었다.
- 3) 환경로봇의 수명 시험장비는 회수용품인 캔/페트를 대신하여 압축롤러에 걸리는 압착력을 재현할 수 있는 더미 제작과 이를 환경로봇 투입구에 자동으로 더미를 공급 할 수 있는 장치를 구성하여 연속적인 내구시험이 가능한 수명평가 장치를 제작 기술을 확보 할 수 있었다.

참고문헌

- [1] 명소영 외(2001), 폐기물의 압축과 공정조건이 열분해 속도에 미치는 영향, 대한환경공학회 춘계 학술대회 논문집 2, 11권, 12호, 49-50.
- [2] 박재범 외(2003), 산업용 로울러기의 협착재해 감소방안, 한국안전학회지, 18권, 2호 22-28.
- [3] 이명현(2011), 저탄소 녹색성장과 산업의 잠재성과에 관한 분석, 자원환경경제연구, 20권 1호, 99-108.
- [4] 임성린(2011), 공정시스템과 제품의 저탄소 및 친환경 설계, News & Information for Chemical Engineers, 29권, 5호, 609-614.
- [5] 오정익 외(2010), 저탄소 녹색성장을 위한 폐기물 제로 청정도시 구상, 대한환경공학회지, 32권, 2호, 131-140.