Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 16, No. 11 pp. 7773-7780, 2015

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.11.7773
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

기존 케틀 분석 및 가열 시스템 연구를 통한 16oz 팝퍼 케틀 국산화 기술 개발

이정훈[1], 김경철[1], 오영섭[1], 유범상[2*]
[1]전북대학교 대학원, [2]전북대학교 기계시스템공학부&지능형 로봇 연구소

Localization Technology Development of 16oz Popper Kettle through Existing Kettle Analysis and Heating System Study

Jung-Hun Lee[1], Kyoung-Chul Kim[1], Young-Sub Oh[1], Beom-Sang Ryuh[2*]
[1]**Graduate School, Chonbuk National University**
[2]**Division of Mechanical System Engineering & Intelligence Robot Center, Chonbuk National University**

요 약 팝퍼 케틀의 국산화 개발을 위하여 기존 케틀을 분석하고, 열선 배치에 따른 열전달 해석을 통하여 케틀 국산화 개발을 위한 연구를 수행하였다. 케틀 재료 분석을 위한 시편을 제작하고 Polishing 및 Etching을 수행하였다. SEM을 이용하여 시편의 표면을 관찰하여 페라이트 퍼얼라이트 재질을 디프 드로잉 방식으로 제작하였음을 파악하였다. 도금층 재질 및 두께 분석을 통해 Ni(16%)도금이 16~49㎛임을 파악하였다. 또한 열선 배치에 따른 열전달 특성을 파악하고, 최적 열선 시스템을 개발하였다. 케틀의 장시간 작업 시간 중에 발생하는 케틀 과열 시 작동을 중지하는 제어 시스템을 제작하였다. 케틀 개발 이후 성능 평가를 수행하여 부피팽창률에 대한 평가 규격 KS G3602를 만족하였다.

Abstract Analysis of existing kettle and its heating system has been the topic for localization technology development. Test pieces are made, polished and etched for existing kettle analysis. Surface of test pieces is observed using SEM, the kettle is verified to be made by deep drawing process from Ferrite-Perlite material. The kettle is also identified to be plated 16~49㎛ of thickness with Nickel(16%). Also heat transfer characteristics based on hot wire arrangement is investigated and optimal hot wire system is developed. Developed control system detects overheating and stops the whole system on the long operating time. Developed kettle takes the performance evaluation test for volume expansion and satisfied for standard ‘KS G3602’.

Keywords : Popper, Kettle, 16oz, Hot Wire Arrangement, localization

1. 서론

디지털 매체의 기술 수준과 보급률 증가로 인해 극장에서 영화를 관람하는 소비자들이 늘어나고 있고, 2001년 이후 국내 영화 시장에서 극장 매출은 70% 이상이다.[1] 극장에서 영화를 관람하는 소비자들의 연령대는 10대와 20대가 주를 이루며, 이와 같은 영화 후속시장의 구조 변경에 따라 극장에서 팝콘의 수요 역시 증가하고 있다.

팝퍼는 팝콘을 생산하는 기계를 말하며, 케틀, 제어부, 오일통, 워머, 히터 등으로 구성된다.[2] 국내에서 제작된 케틀은 열 변형이 발생하며, 케틀 밑 부분에서 그을음에 의해 팝콘이 타는 현상이 발생한다. 또한 팝콘을 생산하기 위해 팝퍼를 작동하는 동안에는 케틀을 청소하거나 소독할 수 없어 케틀 안의 그을음이 누적되어 위생적으로 불량하다. Fig. 1은 국내 기업 ㈜코리아하이테크에서

본 논문은 2014년 정부의 재원으로 중소기업청의 ‘산학연협력 기술개발사업’의 지원으로 수행되었음.
*Corresponding Author : Beom-Sahng Ryuh(Chonbuk National Univ.)
Tel: +82-63-270-2480 email: ryuhbs@jbnu.ac.kr
Received July 31, 2015 Revised (1st October 1, 2015, 2nd November 6, 2015)
Accepted November 6, 2015 Published November 30, 2015

제작된 케틀을 팝콘 2~3회 생산 후에 케틀 내부를 찍은 사진이며, 그을음이 발생한 것을 나타낸다.

Fig. 1. Thermal Strain on Kettle Bottom

케틀은 외부 케틀, 내부 케틀, 열선, 열 센서판 등으로 구성되어져 있으며, 열선에서 발생한 열이 내부 케틀로 전달된다. 열선 배치에 따라 케틀 바닥으로의 불균일한 열전달 분포로 내부 케틀 하부에서 열 변형이 발생할 수 있다. Fig. 2에서 케틀의 구성을 나타낸다.[2]

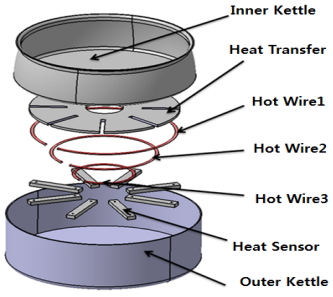


Fig. 2. Components of Kettle

국내에서 제작된 케틀의 경우 열 변형 및 그을음이 발생하여, 현재 16oz이상 케틀은 전량 수입에 의존하고 있으며, 이에 따른 유지보수 비용이 높은 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 기존 해외 케틀을 분석하고, 열선의 배치에 따른 열 분포 연구와 케틀 제어 시스템 설계를 수행하여 케틀 국산화 기술 개발 연구를 수행하였다.

2. 기존 케틀 분석

2.1 케틀 분석 배경

현재 국내에서는 케틀 제작 기술이 전무하여, Gold Medal 社의 Pop-O-Gold 16oz Popcorn Machine에 사용되는 16oz giant Kettle Shell을 분석하였다. 분석 대상 케틀의 선정 이유는, 국내 극장 및 위락 시설에서 최고 점유율을 지니며, 팝콘이 타지 않고 조리되기 때문이다. 기존 케틀의 분석은 성분 분석과 조직 검사를 통하여 확인하는 방법으로 진행되었다.

2.2 Polishing / Etching

기계 부품의 재질과 제조 공법을 확인하기 위한 방법은 성분 분석과 조직 검사를 통한 재료 특성 파악이 있다. 케틀 표면의 스크레치를 물리적으로 제거하기 위해 Polishing을 수행했으며, 재료 표면의 결정립계를 화학적으로 부식시켜 뚜렷하게 관측 가능하도록 Etching을 수행하였다.

먼저 케틀의 재질, 형상, 작동 환경을 고려하여 분석 시편을 케틀의 외부 옆면과 밑면, 내부 옆면과 밑면 각각의 절단면과 도금면을 시편 대상으로 선정하였다. 성분 검사 시편의 규격을 고려하여 각 시편을 30x30x10(mm) 크기로 제작하였고, Fig. 3에서 나타낸다.

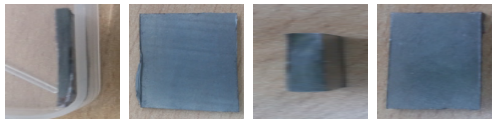


Fig. 3. Test Pieces for Component Analysis

도금면의 경우 도금이 벗겨지면 성분 분석에 의한 도금 재질을 파악할 수 없어, 절단면만을 대상으로 Polishing을 수행하였다.

Polishing을 위해 재료 표면의 가공 상태에 따라 #800, #1,500, #2,000 사포를 차례로 Polishing Machine에 고정하여 Polishing 한 뒤, 1 Alumina Powder, 0.3 Alumina Powder를 이용하여 마무리 작업을 수행하였다. Fig. 4는 Polishing 전과 후의 시편 표면 상태를 나타낸다.

Fig. 4. Changes of Test Piece's Surface

Etching은 에탄올(순도 : 95%) 98%와 질산(1.4, 순도 : 65%) 2%를 혼합하여 제조한 부식액에 Polishing을 완

료한 시편의 표면을 3~5초 동안 수차례 적셔 수행하였다. Etching 단면을 확인하기 위해 EDS방식의 SEM(모델명 JSM-5900, JEOL 社)장비를 활용해 1000배율로 확대하여 관찰하였고, Fig. 5에서 시편의 표면 관찰 결과를 나타낸다.

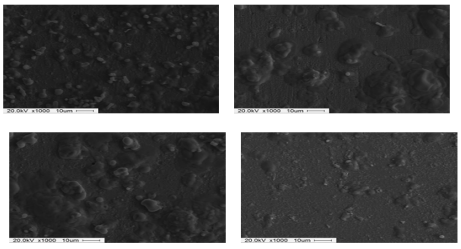


Fig. 5. Microscopic Test Result

Polishing으로 인해 시편 표면의 스크래치가 제거되었으며, Etching으로 인해 이물질이 제거되었음을 확인하였다.

2.3 주 재료 및 도금 분석

성분 분석은 EDS (Energy Dispersive X-ray Spectrometer) SEM(Scanning Electron Microscope, 모델명 JSM-5900, JEOL 社, 배율 70~20000배, 분해능 2~5nm)으로 수행하였다.

EDS방식은 Si(Li) 고체 반도체 소자를 이용하여 X-ray 검출기에서 광전효과를 발생시켜 전자-공공 쌍을 형성한다. 생성된 전자-공공 쌍은 에너지를 발생시키고, ADC를 이용하여 아날로그 에너지 신호를 디지털화한다. 그 후 MCA(Multi- Channel Analyzer)를 사용해 디지털 신호를 스펙트럼화 하여 얻어진 전자-공공 쌍의 에너지 파형을 정성 분석하면 재료의 재질을 파악할 수 있다.[3] Fig. 6는 EDS 방식의 X-ray선 검출 프로세스이다.

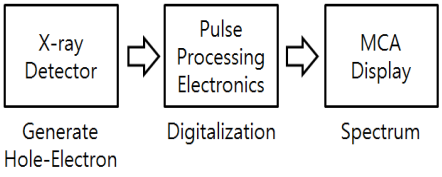


Fig. 6. X-ray Detecting Process of EDS

Fig. 3에서 준비한 시편을 이용하여, SEM EDS 촬영을 수행하였다. 성분분석 결과는 Fig. 7에서 나타내며, Table 1에서 Fig. 7을 정리하였다.

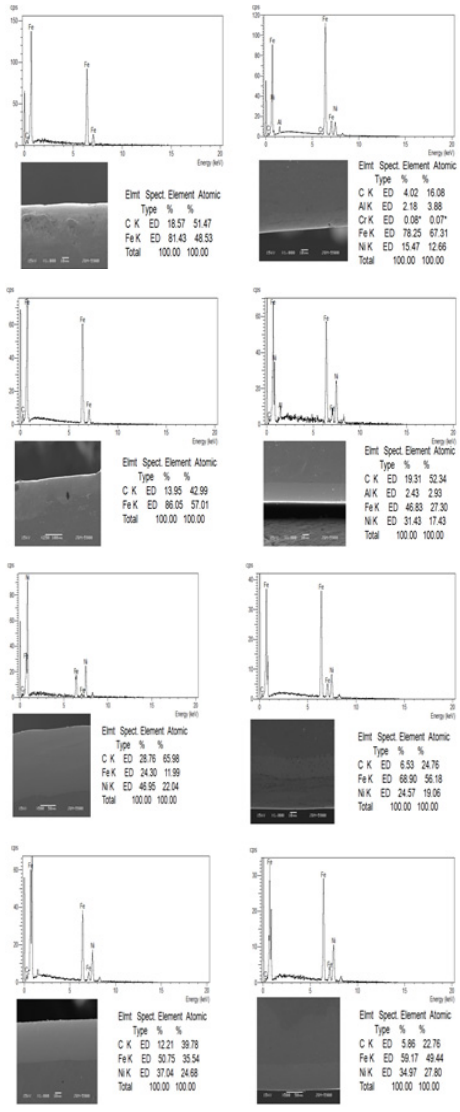


Fig. 7. Component Analysis Result of Cut Surface

Table 1. Component Ratio (%)

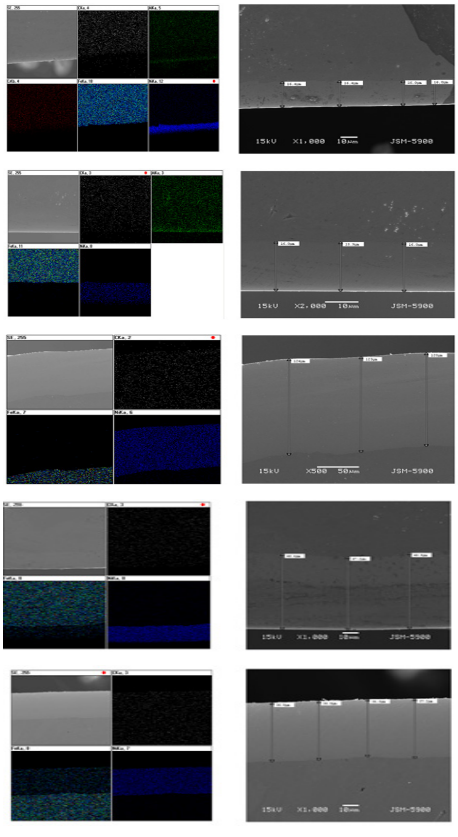
Division		C(%)	Al(%)	Cr(%)	Fe(%)	Ni(%)
Outer Kettle	Inner of Side	18.57	-	-	81.43	-
	Outer of Side	4.02	2.18	0.08	78.25	15.47
	Inner of Bottom	13.95	-	-	86.05	-
	Outer of Bottom	19.31	2.43	-	46.83	31.43
Inner Kettle	Inner of Side	28.76	-	-	24.30	48.95
	Outer of Side	6.53	-	-	68.90	24.57
	Inner of Bottom	12.21	-	-	50.75	37.04
	Outer of Bottom	5.86	-	-	59.17	34.97

정성 분석 결과에서 나타난 외부 케틀의 탄소-철 함유

량 비(14~18% : 86~82%)를 통해 외부 케틀이 정량적으로 0.2 % 미만의 탄소 함유량을 가지는 저탄소강임을 파악하였다. 도금의 경우 외부 케틀은 부식을 방지하고 광택을 내기 위해 바깥쪽 면에 니켈 도금을 수행하였으나, 안쪽 면은 불필요하여 도금을 수행하지 않은 것을 파악하였다. 외부 케틀의 성분 분석 결과에 미량 포함된 Al은 Polishing 작업을 수행하기 위해 사용된 Alumina Powder의 잔류물로 판단된다.

벗겨짐 및 도장 가격, 도금 방식 등을 파악하기 위해 도금 분석을 수행하였다. 도금 두께 분석은 비파괴이면서도 측정 시간이 상대적으로 빠른 형광 엑스선법을 이용하였다.[6]

외부 케틀 및 내부 케틀의 안쪽 및 바깥쪽 절단면 시편을 분석 대상으로 설정하였다. 전자주사현미경(SEM)으로 케틀 절단면을 성분분석 하고, 시편 표면의 조직 크기 및 예상 도금 두께 등을 고려하여 1000배율로 촬영 결과를 Mapping 하여 도금의 두께를 측정하였다. Fig. 8은 각 시편의 도금 두께 분석 결과를 나타내며, Table 2는 Fig. 8의 내용을 정리한 것이다.



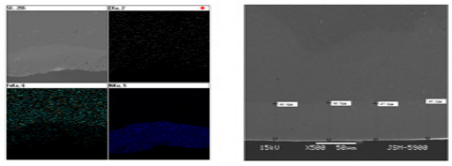


Fig. 8. Mapping Analysis of Cut Surface

Table 2. Mapping Result

Division		Thickness(㎛)
Outer Kettle	Inner of Side	16.0~16.4
	Outer of Side	15.9~16.0
Inner Kettle	Inner of Side	120~124
	Outer of Side	48.6~48.8
	Inner of Bottom	36.0~37.2
	Outer of Bottom	46.4~49.2

도금 두께 분석 결과 케틀은 50㎛ Ni도금이 수행되어졌으며, 케틀을 사용함에 따라 외부케틀과 내부 케틀의 도금 일부가 벗겨진 것을 파악하였다.

2.4 조직 검사

케틀과 같은 탄소강 용기는 일반적으로 제조 단가 및 성형성을 고려하여 프레스 가공으로 제조하게 된다. 이를 확인하기 위해 Polishing 및 Etching을 마친 시편의 표면 조직을 광학 현미경으로 관찰하였고, Fig. 9에서 나타난다.

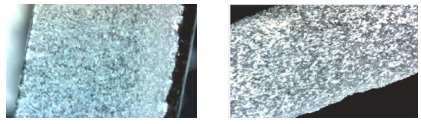


Fig. 9. Observation using Optical Microscope

시편 표면의 조직의 상태 관찰 결과, 페라이트 퍼얼라이트로 구성됨을 파악하였다. 저탄소강의 페라이트 퍼얼라이트 조직의 경우 디프 드로잉성에 유리한 방위를 가지며, 항복점 연신률이 5%수준으로써 케틀 제조에 적합한 재질로 판단하였다.[4]

3. 열 분포 안정화 시스템 해석

3.1 열선 시스템 모델링

실제 팝퍼를 작동하게 되면 케틀의 재료 및 표면 가공 방식뿐 아니라 케틀에 가열하는 열선의 배치에 따라 케

틀의 불균형한 열 변형이 발생한다. 따라서 본 연구에서는 열 해석 프로그램(COMSOL Multiphysics 5.0)을 활용하여 케틀에 가열하는 열선의 배치에 따른 케틀 내부 밑면의 열 분포 해석을 수행하였다.[8]

먼저 기존 케틀의 구조 및 치수를 고려하여 Fig. 10의 내부 케틀과 열선을 모델링하였다. 최 외곽 열선의 최대 반지름은 외부 케틀의 내부 직경을 고려하여 139mm로 고정되며, 최 내곽 열선의 최소 반지름은 열선을 고정하는 기구부의 위치를 고려하여 38.5mm로 고정하고, 3개의 열선 두께는 항상 일정하게 하였다.

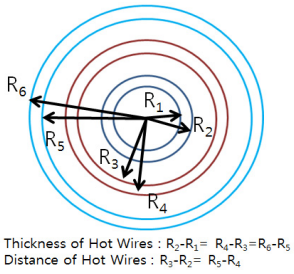


Fig. 10. Kettle Modeling for Analysis

3.2 열 분포 해석

열선의 제조 방법을 고려하여 각 열선의 두께 및 열선 사이의 간격을 0.5mm씩 변화시키며 3가지 변수에 대해 각각 24회의 해석을 수행하여 총 72회의 열 해석을 수행하였다. 해석을 위한 경계조건으로는, 일반적인 아공석강의 열전달 효율인 12.3e^{6}/K를 설정하고, 열원으로서 알루미늄 열선에 300℃의 열을 설정하였다. Fig. 11에서 일부 결과를 나타나며, 이를 이용하여 열선 배치에 따른 케틀 내부 밑면의 열 분포를 파악하였다.

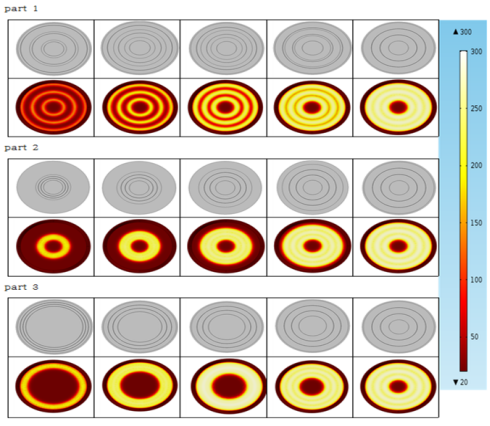


Fig. 11. Heat Transfer Analysis

내부 케틀 밑면에서의 균일한 열 분포가 이루어져야만 팝콘이 고르게 생산되며, 열선을 배치하는 데에 각 열선 간격이 2mm 이하가 되면 각 열선의 중심부에서의 열 집중 현상이 발생한다. 열선의 제조 방법 및 규격을 고려하여 최적의 열선 배치를 도출해냈으며, 이는 Table 3에서 정리하였고, 각 열선의 최적 두께는 33mm, 간격은 0.5mm이다.

Table 3. Hot Wire Arrangement

Division	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
Thickness	38.5	71.5	72	105	105.5	139

4. 제어 시스템

제어 시스템은 케틀 가열, 오일 펌핑, 팝콘 보관 등을 위하여 메인 컨트롤, 히터, 모터, 워머, 온도 계측, 디스플레이를 제어 할 수 있게 제작하였다.

Fig. 12에서 제어 순서도를 나타내며, Fig. 13은 회로도, Fig. 14에서는 제어 보드를 나타낸다. 기존 방식은 릴레이 회로를 사용하여 팝퍼 작동 중 스파크 발생으로 인한 화재가 발생했기 때문에 이를 배재하기 위해 SCR 스위칭 방식으로 변경하였다. 또한 극장에서의 10시간 이상의 연속 작동을 고려하여, 케틀 과도가열 시의 전원 차단 기능을 개발하였다. 제어 보드는 유증기에 의한 고장을 예방하기 위해 PCB 보드에 코팅을 입혀 제작하였다.

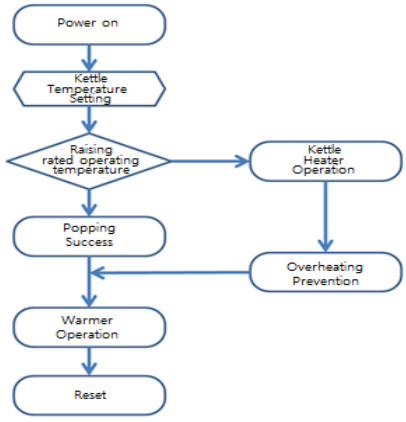


Fig. 12. Control Flow Diagram

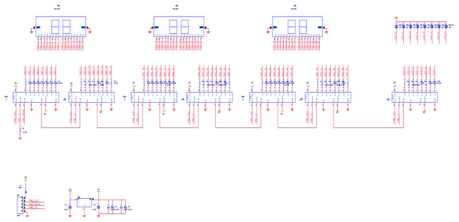


Fig. 13. Control Circuit Diagram

Fig. 14. Control Board

본 연구를 통해 제작된 제어부는 유증기에 의한 스파크 및 제어부 오작동, 케틀 과열 등에 따른 안전사고를 예방하여, 인명 피해 및 재해 손실을 방지할 것으로 기대된다.

5. 성능 평가

5.1 열 팽창 계수 측정

케틀을 제작함에 있어 그 재료에 따라 열 팽창이 일어나게 되는데, 열 팽창 계수를 측정함으로써 열 전달 효율을 파악할 수 있다. 열 팽창 계수를 측정하기 위해 TMA(Thermo Mechanical Analysis, 모델명 : Q400, TA instruments 社, Temperature Range : -150~1000℃, Temperature Precision : ±1℃)를 이용하였다.[5] 열 팽창 계수 측정을 위해 상온에서(23℃) 400℃까지 분당 20℃씩 가열하며 케틀 시편의 부피를 측정하였다. Fig. 15에서 케틀의 외부 및 내부의 옆면과 밑면에 대한 열 팽창 계수 측정 결과를 나타내며, Table 4에서 이를 정리하였다.

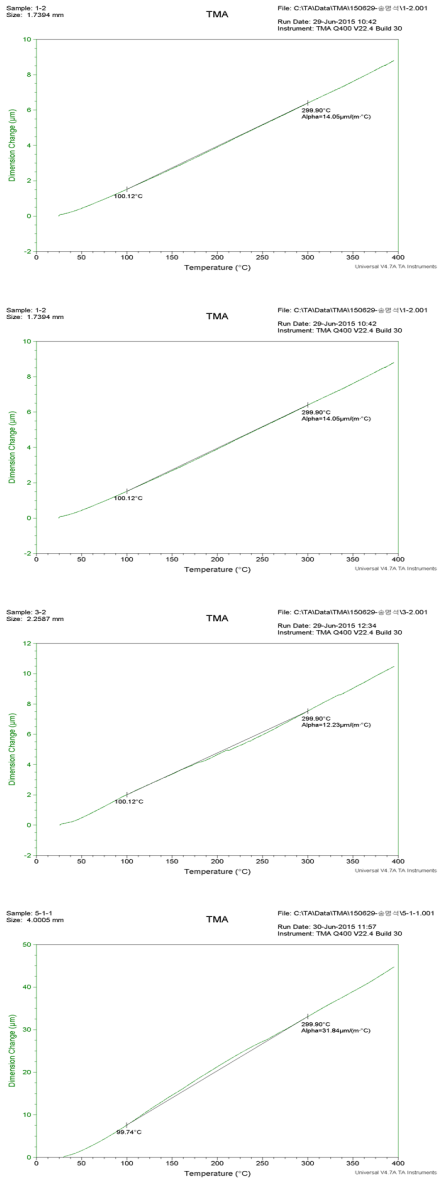


Fig. 15. Dimension Change Ratio

Table 4. Dimension Change Analysis Result

Division		Max(%)	Min(%)
Outer Kettle	Side	2.415	0.259
	Bottom	2.182	-0.160
Inner Kettle	Side	1.948	-0.664
	Bottom	7.268	-4.652

케틀의 열 팽창 계수는 내부 케틀의 밑면에서 최대 7.268%로 나타났으며, 이는 케틀 제작에 관한 KS G3602성능 평가 규격에 만족한다.

5.2 3D 스캔

케틀의 열전달에 의한 실제 변화를 파악하기 위해 3D 스케너 (모델명: MobileScan3D, Wenzel ScanTec 社, Accuracy 0.002°, Line Resolution 512 points / second)를 활용하여 형상 치수를 측정하였다.[7] 케틀의 크기를 고려하여 Sensor는 400mm용 High Mix센서(Accuracy : 0.05, Point Spacing per Line : 0.24~0.38)를 사용하였다. Fig. 16에서 3D 스캔 결과를 나타낸다.

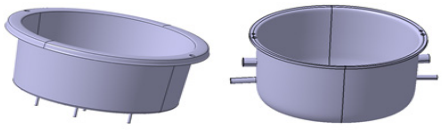


Fig. 16. 3D Scan Result

열 변형의 결과를 확인하기 위해 3D 스캔으로 역설계된 케틀 파트의 단면을 잘라 케틀 내부의 지름의 10% 길이인 37.2mm당 한 개의 Mark를 부여하여 총 10개의 Mark와 케틀 바닥과의 거리를 측정하였다. 이 거리는 각 Mark에서의 케틀 밑면의 단면 두께를 의미하며, Fig. 17에서 비교 결과를 나타난다.

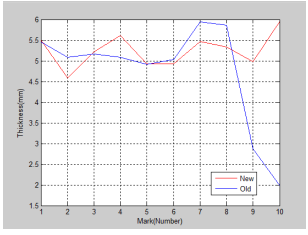


Fig. 17. Comparison of 3D Scan Results

열 팽창 전후 과정을 비교하기 위해 사용하지 않은 케틀과, 실제 작업장에서 사용했던 케틀의 3D 스캔 결과를 비교하였다. 부피 팽창률을 확인하기 위해 각 Mark에서의 두께 오차율을 계산하였고 Table 5에 정리하였다.

Table 5. Volume Expansion Ratio(VER, %)

Division	Mark 1	Mark 2	Mark 3	Mark 4	Mark 5
VER	-0.79	9.83	-0.91	-10.36	-0.24
Division	Mark 6	Mark 7	Mark 8	Mark 9	Mark 10
VER	2.07	8.06	9.17	-73.37	-201.01

케틀 재료의 열 팽창 계수를 고려하였을 때, Mark 9, 10 위치에서의 두께는 3D 스캔 시 빛의 산란과 집중으로 인한 오차가 있음을 판단하였다. 따라서 1~8 Mark 지점에서의 두께 오차 평균을 계산하면 2.10%가 되며, KS G3602에서 명시한 케틀 제작에 관한 성능평가 규격을 만족한다.

6. 결론

현재 국내에서 제작된 케틀의 경우 열 변형 및 그을음이 발생하여 위생적인 사용이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 16oz 팝콘 케틀의 국산화 제작을 위하여 기존의 케틀을 분석하고, 균일한 열전달을 위한 열선 시스템을 도출하였으며, 안전성을 확보하기 위한 제어부를 개발하였다.

Polishing과 Etching을 마친 시편의 SEM 촬영을 통한 성분 분석 결과 케틀은 탄소가 0.02%정도 포함된 페라이트 퍼얼라이트 저탄소강임을 파악하였다. SEM 촬영을 통하여 도금은 Ni 16% 50㎛로 처리 되었으나 일부 손상되어 위치에 따라 16㎛~49㎛ 의 두께를 가진 것으로 파악하였다.

열선 배치에 따른 열 해석을 통하여, 열 전달 분포에 관한 연구를 수행하였으며, 최적 열선 두께는 33mm, 열선 간격은 0.5mm 이다.

제어 시스템을 제작하기 위해 케틀 작동 순서를 모델링 하였으며, 스파크로 인한 화재를 방지하고, 장시간 작업 시간을 고려하여 케틀 과열 시 작동을 중지하는 제어 시스템을 제작하였다.

성능 평가를 위해 TMA를 이용하여 재료의 열 팽창 계수를 측정하였고, 최대 7.268%로 측정되었다. 또한 3D스캔을 이용하여 사용한 케틀과 사용하지 않은 케틀의 치수를 비교한 결과 오차 평균은 2.10%이므로, 성능 평가 지표 KS G3602에 만족한다.

현재 국내에서 제작되는 16oz 케틀의 경우 케틀 내부의 불균형한 열 분포 의해 팝콘이 타는 현상이 발생하여 본 연구진은 16oz이상급 케틀의 국산화 제조 기술에 대한 연구를 수행하였다. 추후 케틀 제조 공정에 관한 연구를 수행한다면, 16oz 케틀의 국산화 제품 제작이 가능할 것으로 보인다.

References

[1] B. S. Chon, "Structures and Characteristics of Movie

Consumption Media", Korean Association For Communication And Information Studies Version 40, pp. 221-248, November, 2007.

[2] GoldMetal. “Pop-O-Gold 32oz Popcorn Machine Export Instruction Manual”, From: http://www.gmpopcorn.com

[3] Fumiya. ONOUE, Kouichi. TSUJI, "X-ray Elemental Imaging In Depth by Combination of FE-SEM-EDS and Glow Discharge Sputtering", ISIJ International, Vol, 53, No. 11, pp. 1939-1942, 2013.

DOI: http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.53.1939

[4] W.C. Jeong, "Effect of Carbon on Microstructure and Texture in Low Carbon Steels", Journal of the Korean Society for Heat Treatment, Vol 22 No. 2, 2014.

DOI: http://dx.doi.org/10.12656/jksht.2014.27.2.79

[5] J. Park, D. H. Kwon, J. M. Yoon, N. Y. Sung, D. M. Shin, "Correlation of XRF thickness Measuring Machine", Korean Society for Precision Engineering Conference, 2007.

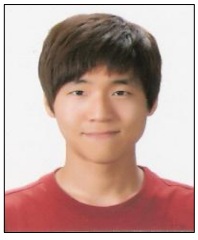
[6] W. S. Ahn and H. S. Lee, "A Study on Compressive Creep Behavior of ACM Rubber using TMA Thermal Analysis", Elastomers and Composites, Vol 48, No. 2, pp. 156~160, 2007.

DOI: http://dx.doi.org/10.7473/EC.2013.48.2.156

[7] WENZEL ScanTec. “The Mobile CNC Measurement and 3D Scanning System WENZEL ScanTec MobileScan3D”, From: http://www.wenzel-scantec.com

[8] M. Tabatabaian. “COMSOL5 for Engineers”, From: http://www.comsol.com

이 정 훈(Jung-Hun Lee) **[정회원]**



- 2014년 2월 : 전북대학교 기계시스템공학부 (공학사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 대학원 기계시스템공학과 석사과정 재학 중

<관심분야>
로보틱스, 자동화 시스템, 다족보행 로봇

김 경 철(Kyoung-chul Kim) **[정회원]**

- 2007년 2월 : 전북대학교 정밀기계공학과 (공학사)
- 2009년 2월 : 전북대학교 정밀기계공학과 (공학석사)
- 2015년 8월 : 전북대학교 정밀기계공학과 (공학박사)

<관심분야>
로보틱스, 모바일 로봇, 자동화 시스템

오 영 섭(Young-Sub Oh) **[정회원]**

- 1995년 2월 : 전북대학교 정밀기계공학과 (공학사)
- 1998년 2월 : 전북대학교 정밀기계공학과 (공학석사)
- 2014년 2월 ~ 현재 : 전북대학교 정밀기계공학과 박사과정
- 2014년 2월 ~ 현재 : 오담 기술경영 대표

<관심분야>
로보틱스, 생산자동화

유 범 상(Beom-Sahng Ryuh) **[정회원]**

- 1981년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학석사)
- 1989년 5월 : Univ. of Purdue 기계공학 (공학박사)
- 1993년 9월 ~ 현재 : 전북대학교 기계시스템공학부 교수

<관심분야>
로보틱스, 농업용로봇, 자동차생산자동화, 공장자동화