

폴리카보네이트 사출성형에 따른 금형과 사출품에서 표면거칠기의 재현성 예측

홍수룡^{*,**}, 김승수^{**}, 이상선^{**}, 이지호^{**}, 최원준^{**}, 강명창^{*,#}

^{*}부산대학교 융합학부, ^{**}에스엘 생산기술센터

Reproducibility Prediction of Surface Roughness in Mold and Injected Parts through Polycarbonate Injection Molding

Su Yong Hong^{*,**}, SungSu Kim^{**}, Sang Sun Lee^{**}, Ji Ho Lee^{**}, Wong Jun Choi^{**}
Myung Chang Kang^{*,#}

^{*}Graduate school of convergence science, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

^{**}SL Production Technology center, 77, Gongdan 6-ro, Jillyang-eup, Gyeongsan-si,
Gyeongsangbuk-do, 38470, KOREA

(Received 9 May 2017; received in revised form 1 June 2017; accepted 12 June 2017)

ABSTRACT

In this study, we evaluated the surface roughness of mold and injected parts manufactured by polycarbonate (PC) injection molding. The mold surface was polished to produce six differentiated roughnesses with 12 areas using stones (#800, #1200), sandpapers (#800, #1200), and diamond compounds (#8000, #14000). Injected parts were created using 20mm/s injection speed, 80 bar holding pressure for 5 seconds, and 70°C cooling water. Injected parts surface roughness (Sa) was measured randomly in 10 of 30 using an interferometer (NewView8000, zygo, USA). In the same way, mold surface was measured randomly 10 times on 12 polished areas. Surface roughness of molds and injected parts were compared, and a regression equation to predict mold surface roughness was proposed for specific injection molding parameters.

Key Words : Surface roughness(표면거칠기), Polycarbonate(폴리카보네이트), Injection molding(사출성형)
Regression equation(회귀식), Reproducibility(재현성)

1. 서 론

최근 자동차 전조등은 할로젠 전조등에서 LED 전조등으로 보편화가 되어가고 있다. LED 전조등은 일반 할로젠램프 전조등이나 High intensity

discharge (HID) 전조등에 비해 전력 효율이 높고 수명도 길다. 또한 램프별 색온도(Color temperature)를 보면 할로젠램프는 통상 3000K의 색온도를 지니고 있고 HID 램프는 4600K, 그리고 LED 램프는 6000K이상의 색온도를 지니고 있다. 조도(Illumination) 또한 높아져 최근에는 소형차에서도 LED 전조등을 장착하여 출시하는 추세이다^[1].

LED는 반도체 소자로 광량증대 및 수명유지를

Corresponding Author : kangmc@pusan.ac.kr
Tel: +85-51-510-2361, Fax: +82-51-510-7396

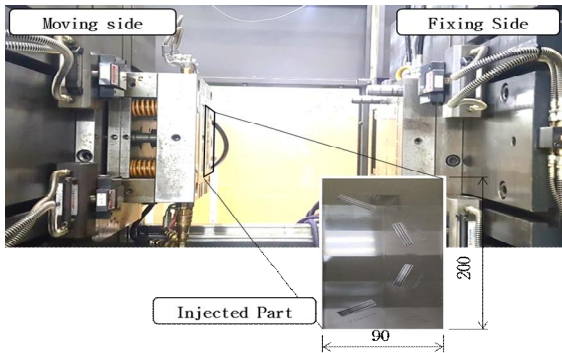


Fig. 1 Actual mold and injected part

위해 열적 영향의 고려가 반드시 필요하다. 이를 위해 방열성능을 향상하는 방법으로, 방열판 형상을 최적화, 열전도가 높은 소재의 사용 그리고 LED에 공급되는 전력 최적화에 관한 연구가 선행되었다^[2-3]. 또한 반사율(Reflectivity)을 향상하여 상대적으로 소비전력이 적은 LED로 원하는 광량을 확보할 수 있어 방열량의 감소가 가능하다. 광량 증대를 위하여 Heng Wu^[4]는 프리폼 반사경(Freeform reflector)형상 최적화를 통하여 로우빔(Low beam)의 광효율(Optical efficiency)을 80.29%로 개선하였다. 또한 반사경의 크기 제약으로 추가적인 효율 개선방향은 반사표면의 최적화가 될 것이라고 주장했다. 이에 사출품에 반사물질을 증착하여 사용하는 현 기술에서 사출품의 표면거칠기 개선효과에 대한 검토가 요구되고 있다.

마이크로이하 스케일의 표면거칠기를 가지는 사출품은 금형에 가공된 마이크로 형상이 사출성형 과정에서 재현이 되었는지 형상을 평가하고 재현성을 높이기 위하여 금형온도, 사출압력, 사출속도 및 보압 압력을 최적화하는 연구가 진행되었다^[5-6]. 종래 재현성 연구는 마이크로 형상에 대하여 한정되어 있어 나노스케일을 가지는 고풍택면이 요구되는 표면특성의 재현여부를 확인하기엔 다소 제한적이다.

따라서 본 연구에서는 자동차 램프용 소재인 폴리카보네이트(Polycarbonate)로 사출성형하고, 마이크로에서 나노스케일의 금형표면을 폴리싱으로 제작하였다. 금형과 사출품에 있어서 각각의 표면거칠기를 측정하여 실험계획법으로 비교 평가하였다.

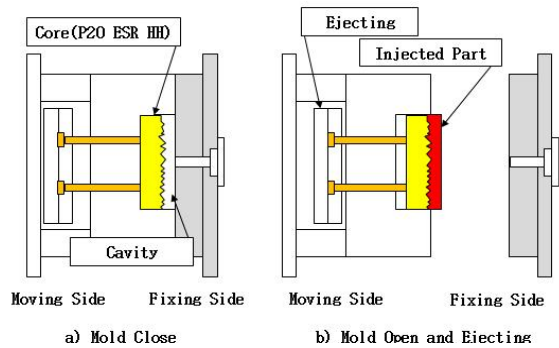


Fig. 2 Plates mold for Injected part following mold surface roughness

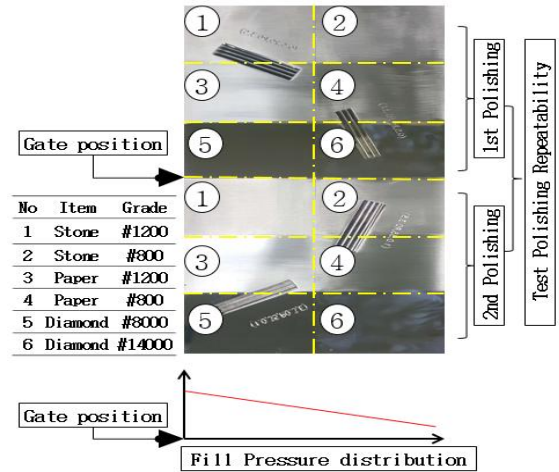


Fig. 3 Polished layout to test polishing repeatability and injection reproducibility following fill pressure distribution

이를 통하여 사출품에 요구되는 표면거칠기를 금형제작시에 예측할 수 있는 선형 회귀방정식을 제안하고자 한다.

2. 사출성형 실험장치 및 실험방법

2.1 폴리카보네이트 사출성형 장치

사출금형은 Fig. 1과 같이 300톤 유압사출기(ENGEL AUSTRIA GmbH)를 사용하여, 고정측(Fixing side)과 가동측(Moving side)으로 구성된 2단

Table 1 Injection parameter

Stroke (mm)	Injection		Holding Pressure (bar)	
	Max Pressure (bar)	Speed (mm/s)		
44.72	77.9	20	80.0	
Time(sec)		Temperature(°C)		
Injection	Cooling	Hold ing	Barrel	Cooling
2.23	30	5	300	70

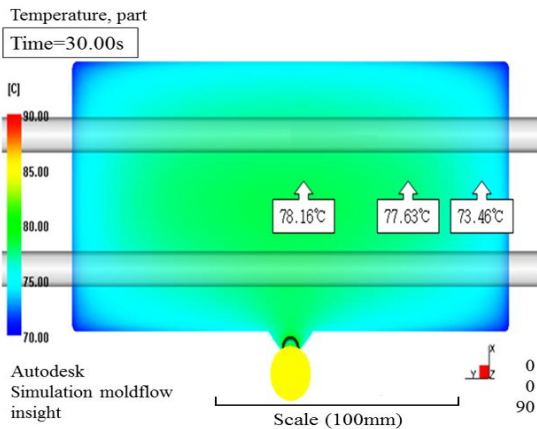


Fig. 4 Mold surface temperature at 30sec later from injection start

금형으로 제작하였다. Fig. 2(a)는 폴리카보네이트를 사출하기 위하여 금형이 닫혀있는 상태이고, Fig. 2(b)는 사출 과정에서 표면거칠기가 사출품에 재현이 되어 취출(Ejection)되는 과정이다. 표면거칠기가 성형되는 Fig. 3 코어는 가동측에 설치되어 금형이 닫히면서 고정측과 폐공간이 형성되고 용융된 수지가 주입, 냉각이 되어 금형표면의 거칠기가 폴리카보네이트 사출품으로 재현된다. 사출이 완료되면 취출기구와 함께 시편을 취출하는 구조로 제작되었고, 실제 사출품 형상은 Fig. 1과 같다.

C.A. Griffiths^[7]는 사출성형시 금형 표면 품질효과에 대하여 에이비에스(ABS), 폴리프로필렌(Polypropylene), 폴리카보네이트를 사용하였다. LED 반사경에 널리 사용되는 엔지니어링 플라스틱이

폴리카보네이트(Polycarbonate, Lexan LS1, Sabic)이므로 3개중에 폴리카보네이트를 선정하였다.

폴리카보네이트의 권장 사출조건에 따라 120°C에서 2시간이상 건조하였다. 사출조건 변화 및 사출성형 중 캐비티 표면온도 변화를 줄이기 위하여 사전에 20개를 사출성형하면서 Table 1의 사출조건을 확정하였다. 사출기 바렐 온도는 300°C, 사출속도는 직경이 55mm인 스크류를 20mm/s의 속도로 균일하게 사출하였고, 보압은 80bar에서 5초를 인가하였다. 사출진행중 보압전환 단계에서 최고압력 77.9bar에 도달하는 것을 확인 하였고, 냉각시간은 30초다. 폴리카보네이트의 권장 사출금형온도는 80~100°C 이나, Fig. 4와 같이 냉각수 온도 70°C로 설정된 사출성형해석 결과 사출시작으로부터 30초 지점에서 표면온도가 73.46~78.16°C 수준을 유지하고 있고, 연속사출시 상승을 고려하여 해석조건인 냉각수 70°C로 설정했다. 보압시간은 열변형 온도인 HDT(Heat deflection temperature) 122°C 보다 게이트 온도가 떨어지는 시점을 감안하여 5초로 설정하였다. 본 연구는 특정 사출조건에서 시행이 되었으며 표면재현성을 향상을 위한 성형조건 최적화에 대해서는 본 기초연구를 통하여 향후 진행할 것이다.

2.2 표면거칠기 시편준비 및 실험방법

폴리카보네이트 사출성형에서 평가할 수 있는 표면거칠기를 선정하고 폴리싱 작업의 반복성과 사출의 재현성을 고려하여 폴리싱 위치를 선정하였다. 폴리싱 작업 후에 사출성형이 진행되었고, 금형과 사출품의 표면거칠기를 측정하였다. 각각의 측정결과를 ANOVA(Analysis of Variance)^[8-9]를 통하여 폴리싱 작업 반복성과 사출 재현성을 평가하였다. 금형과 사출품의 표면거칠기를 비교하여 사출품의 표면거칠기를 사전에 예측할 수 있는 회귀방정식을 도출하는 순서로 진행이 되었다.

코어의 재질은 P20 ESR HH(SF-2000 LQ, SOREL FOGE Co, Canada)를 사용하였으며, 경도는 HrC 34~38이다. 코어의 표면은 평면으로 연마공정을 통하여 마무리 되었고, Fig. 3과 같이 12개 구역으로 분할하였다. 게이트 위치를 중심으로 상/하로 동일하게 폴리싱을 진행하였으며, 이는 작업자의 폴리

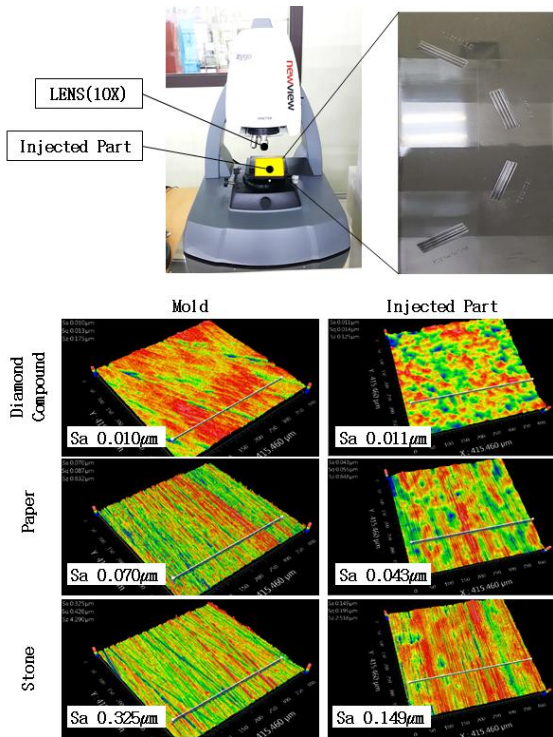


Fig. 5 Roughness measurement of mold and injected parts

싱 작업 반복성과 게이트 위치로 부터 사출압력 분포(Fill Pressure Distribution)차이에 따른 재현성을 평가하기 위함이다^[8]. 폴리싱 공정중 숯돌, 사포 및 다이아몬드 컴파운드를 각 2개로 좌/우 분할하여 진행하였다. 폴리싱은 숯돌(#800, #1200), 사포(#800, #1200)와 다이아몬드 컴파운드(#8000, #14000) 순서로 진행하였다. 작업된 순서에 따라 ①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥으로 Fig. 3에 도시하였다.

2.3 금형과 사출품의 표면거칠기 측정

거칠기 측정시 접촉식의 경우 표면과 물리적 접촉으로 인하여 경면 폴리싱이 된 금형표면에 손상을 유발하여 적용이 불가하다^[9]. 본 실험에서는 Fig. 5과 같이 비접촉식 측정방식으로 측정이 되는 NewView 8000(Zygo Co., USA)을 사용했다. 거칠기는 3차원공간상의 평균높이를 기준으로 표면 높낮이의 절대치를 모두 합하여 측정대상 면적으로 나

는 산술평균값인 표면 평균거칠기 Sa를 사용하였고 단위는 μm 이다. 측정에 사용한 장비는 빛을 이용한 방식으로 빛간섭이 발생하는 모양으로 미세 표면을 연속적으로 측정한다^[10]. 본 장비는 10배, 20배, 50배의 대물렌즈가 구비되어있고 숯돌, 사포, 다이아몬드 컴파운드 각 사출시편을 배율별로 측정하였다. 그중에서 10배의 대물렌즈가 배율에 따른 표면거칠기의 변화 없이 측정을 할 수 있었다. 또한 본 실험에서 거칠기의 평가 및 비교에 필요한 마이크로에서 나노스케일의 금형표면 거칠기를 측정할 수 있었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 금형표면 폴리싱 반복성 검증

게이트위치를 기준으로 상/하로 측정포인트 12곳에 대하여 금형을 랜덤하게 10회 반복 표면거칠기를 측정하였다. 미니텡 17(Minitab Inc. USA)을 이용하여 방향 2수준, 랩핑공정 6개수준으로 Table 2와 같이 실험배치 하였다. 래핑작업의 반복성을 검증할 목적으로 ANOVA(Analysis of Variance)분석^[11~12]을 실시하여 Table 3과 같은 결과를 얻었다. A(Direction), B(Position), A*B 모두 P값이 0.05보다 작기 때문에 금형 표면의 폴리싱 작업 반복성에 영향이 있다^[13]. 따라서 상/하의 래핑작업이 균일하게 진행되지 못하였다. 하지만 F검정값이 9.66으로 가장 낮으므로 상대적인 영향도는 떨어진다.

3.2 사출품의 표면거칠기 편차

사출조건의 변화는 사출제품 변동을 유발하기 때문^[5~8]에 수치 사출압력(Fill Pressure)의 변화를 I-MR 공정관리도^[14]를 이용하여 사출조건 변화에 따른 사출품의 변동을 Fig. 6과 같이 평가하였다.

Table 2 Factors and level using test polishing repeatability and injection reproducibility

Sign	Factor	Level					
		0	1	2	3	4	5
A	Direction	Upper Lower					
B	Position	1	2	3	4	5	6

Table 3 ANOVA Result of mold surface roughness direction and position

Item	DF	Seq SS	Adj SS	Adj Ms	F	P
A	1	0.00074	0.00074	0.00074	9.66	0.002
B	5	1.60525	1.60425	0.32085	4217	0.000
A*B	5	0.00890	0.00890	0.00178	23.41	0.000
Error	108	0.00822	0.00822	0.00008		
Total	109	1.62211				

개별값의 변화량과 개별 이동량이 중심치에서 3σ 범위로 표시되는 붉은 경계선 내에 존재여부^[14]로 이상여부를 판단한다. 30개의 사출품 중 1번째가 개별값의 변화량에서 3σ 범위 상한선(UCL=81.967)밖에 있어 표면거칠기 측정은 이를 제외한 29개에서 랜덤으로 10개를 선정하여 평가하였다. 그리고 개별 이동량은 3σ 범위(LCL=0-UCL=4.247)내에 존재하여 급격한 압력 변화는 발생하지 않았다.

선별된 사출품 12곳에서 표면거칠기를 측정하였다. Table 2와 같이 실험배치를 하여 Table 4과 같은 결과를 얻었다. A인자(Direction)가 0.05보다 P값이 크므로^[13] 사출품의 표면거칠기에는 영향이 없음을 반영하고 있다. 또한 Fig. 7은 사출성형해석 결과의 사출압력 분포로 게이트 입구가 57.06Mpa에서 사출말단부가 0Mpa로 사출압의 차이를 나타내고 있다. 앞선 Fig. 4는 사출시작 30초 후 표면온도로 73.46~78.16℃ 차이가 있고 사출초기 더욱 편차가 증대하였을 것으로 사료된다. 이런 사출압력

Table 4 ANOVA Result of injected part surface roughness direction and position

Item	DF	Seq SS	Adj SS	Adj Ms	F	P
A	1	0.000044	0.000044	0.000044	1.23	0.271
B	5	0.388300	0.388300	0.077660	2144	0.000
A*B	5	0.001151	0.001151	0.000230	6.36	0.001
Error	108	0.003912	0.003912	0.000036		
Total	109	0.393408				

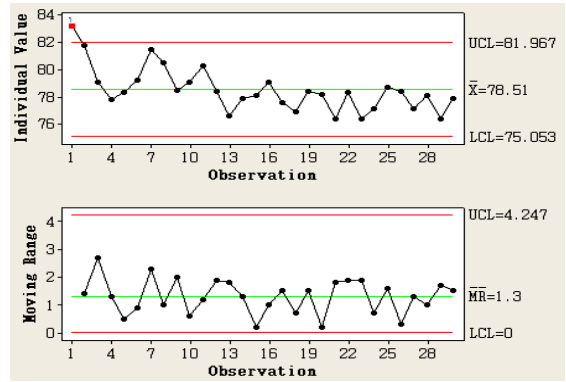


Fig. 6 I-MR Control chart for checking stability about injected part through fill pressure

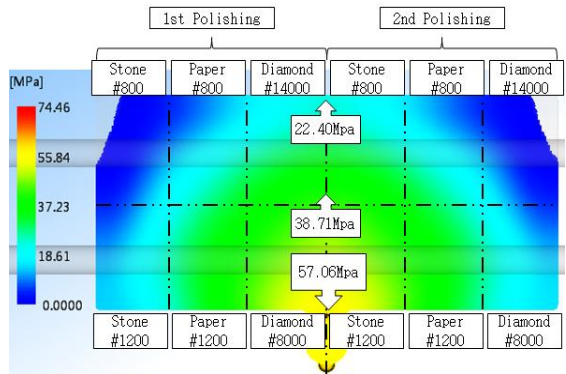


Fig. 7 Injection pressure distribution on different roughness grade

과 금형온도의 사출공정 조건 차이에도 A인자는 사출물의 표면거칠기에 차이를 유발하지 않았다. 금형에서는 표면거칠기에 유의한 인자였으나 사출품에서는 그 영향도가 떨어졌다. 이는 주어진 사출 조건에 한정된 결과로 추후 사출 속도와 금형온도, 보압 압력, 보압 유지시간에 대한 최적화^[7]를 통하여 사출조건에 따른 재현성 차이점에 대하여 추가적인 실험이 필요하다.

3.3 금형과 사출품의 표면거칠기 비교

금형과 사출된 시편의 표면거칠기 각 120개를 미니탐을 활용한 회귀분석을 통하여 식 (1)과 같은 수학적 모델을 도출하였다.

$$y = 0.01055 + 0.4813x \quad \dots\dots\dots(1)$$

사출품 표면거칠기 : y, 금형표면거칠기 : x

수학적 회귀 모델이 유효한지 판별하기 위하여 분산분석의 F검정과 결정계수(R²)을 이용하였고, 회귀모델에 관한 ANOVA 분석은 Table 5과 같다.

사출공정에서의 사출압, 사출수지온도, 금형온도 및 보압 압력과 같은 여러 변수를 감안하여 F-검정의 일반적인 기각치인 P값 0.05를 적용하였다. P값이 0.000으로 기각치 0.05보다 작으므로 도출된 회귀모델은 유의하다. 또한 결정계수(R²)은 95.6%수준에서 유의하다고 판단할 수 있다. 즉 도출된 선형 회귀모델은 실험을 통하여 도출된 120개의 실

제 값에 대하여 95.6%를 설명할 수 있다^[13].

회귀 모델은 Fig. 8와 같이 금형 표면거칠기가 증대할수록 사출품의 표면거칠기가 증대되는 양의 비례관계를 가지고 있다. 표면거칠기가 커질수록 개별값의 분포가 퍼지는 현상을 나타내고 있어 금형표면으로부터 사출물의 표면거칠기 재현성이 떨어지는 것을 사료된다. 수식(1)을 살펴보면 금형거칠기에 대하여 평균적으로 48.13%가 감소하는 것을 예측할 수 있고, 상수항 0.01055가 있어 금형표면의 거칠기가 0으로 수렴하더라도 사출성형의 영향으로 사출물의 표면 평균거칠기는 0으로 수렴하지 않을 것으로 추정한다.

Table 5 Regression analysis of roughness prediction equation from mold surface roughness

Source of variance	Degree of freedom	Sum of squares	Mean of squares
Regression	1	0.37618	2575.89
Error	118	0.01723	0.00015
Total	119		
p-value	R ²	F	
0.000	95.6%	2575.89	

4. 결론

자동차 램프용 금형표면으로부터 나노스케일의 표면 평균거칠기 재현성에 대한 예측을 위하여 폴리카보네이트 사출성형으로 제작된 사출품의 금형 표면거칠기를 평가, 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 금형표면 거칠기가 적용되는 램핑공정이 수작업으로 진행되므로 반복성에 편차가 발생하였고, 사출시 금형표면 재현성이 떨어져 사출성형후 사출품에서는 차이가 발생하지 않았다.

2. 금형 표면 거칠기와 사출품 표면거칠기를 평가, 비교하여 선형 회귀방정식을 도출하였고, 선형 회귀모델을 적용하여 금형표면 거칠기로부터 사출품의 표면거칠기를 95.6%로 예측로할 수 있었다.

3. 폴리카보네이트를 적용한 특정사출조건인 금형온도 70℃, 사출속도 20mm/s, 최대 사출압 77.9bar, 보압 80bar에 5초유지, 냉각시간 30초에서 사출품의 표면거칠기는 금형 표면거칠기 대비 48% 감소하였다.

4. 본 사출조건은 일반 사출(Conventional injection) 공법으로 사출과정에서의 압력 및 냉각온도의 차이는 사출물의 표면거칠기 재현성에 있어서 별 다른 차이를 보이지 않았다.

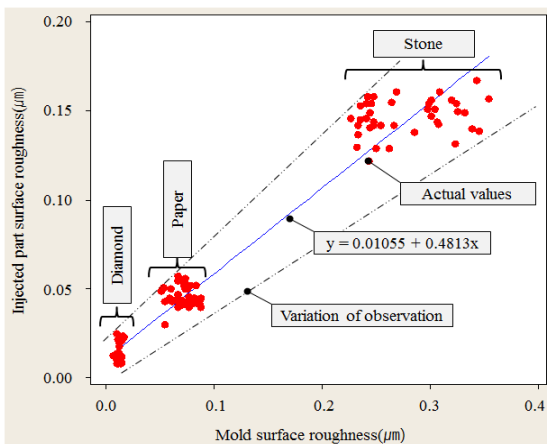


Fig. 8 Fitted line plot about regression analysis of roughness prediction equation from mold surface roughness

REFERENCES

1. Choi, G. G., Cho, J. U., "Convergence Study due to the Configuration of Radiant Heat Panel of Automotive LED Heat Lamp," J. of KCS Vol. 8. No. 3, pp. 199-204, 2017.
2. Kang, M. G., Her, I. S., Yu, Y. M., and Choi, H. L., "A Study on the 150W High-power Flood LED Lighting Engine using Heat Spreader," J. of KIIEE, Vol. 31, No. 1, pp. 26-34, 2017.
3. Jeong, J. Y., Kang, M. G., Kim, S. J., and Yu, Y. M., "Design and Characterization of LED Engine Module for the Application of Thermoelectric Device," J. of KIIEE, Vol. 30, No. 7, pp. 32-40, 2016.
4. Heng Wu, Xianmin Zhang, Peng Ge, "Modular design of a high-efficiency LED headlamp system based on freeform reflectors." Optics & Laser Technology, Volume 72, , pp. 79-85, 2015.
5. Kang, S. H., Oh, Y. S., and Lee, H. W., "Frictional sensitivity and effect of surface roughness in boss and rib test," Tribology International, Vol. 112, pp. 108-116, 2017
6. Woo, S. W., and Park, S. H., "Effects of Packing Pressure and Time on Injection Molding of Plastic Micro-channel Plates," J. of KSMPE, Vol. 25, No. 3, pp. 224-229, 2016.
7. Saladino M. L., Armetta, F., Sibeko, M. A., Luyt, S. A., Martino, D. F. C., and Caponetti, E., "Preparation and characterisation of Ce:YAG -polycarbonate composites for white LED," Journal of Alloys and Compounds, Vol. 664, pp. 726-731, 2016.
8. Woo, J. W., Hong, J. S., Kim, H. K., and Lyu, M. Y., "Analysis of Residual Stress and Birefringence in a Transparent Injection Molded Article for Molding Condition," Polymer(Korea), Vol. 40, No. 2, pp. 175-180, 2016.
9. "Knowledge Roughness (3D) parameter,"(2017) http://www.olympus-ims.com/ko/knowledge/metrology/roughness/3d_parameter/(accessed 3, May., 2017)
10. Wu, T., Hui, Y., Yan, Z., Li, Z., and Li, Q., "Zygo interferometer for the precious measurement of tiny refractive index change of two laser crystals," Optics & Laser Technology, Vol. 89, pp. 196-199, 2017.
11. Kwon, D. K., and Wang, D. H., "A Statistical Study on the Blasting Conditions when Micro Blasting for Rotating Aluminum Rod," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 2, pp. 135-141, 2017.
12. Ratnam, Ch., Arun Vikram, K., Ben, B. S., and Murthy, B. S. N., "Process monitoring and effects of process parameters on responses in turn-milling operations based on SN ratio and ANOVA," Measurement, Vol. 94, pp. 221-232, 2016.
13. Bae, M. I., and Rhie, Y. S., "Regression Equation Deduction for Cutting Force Prediction during Interrupted Cutting of Carbon Steel for Machine Structure (SM45C)," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 4, pp. 40-45, 2016.
14. Ohtani, H., Ellwood, K., Pereira, G., Chinen, T., et al., "Extensional Rheology: New Dimension of Characterizing Automotive Fluids," SAE Technical, Vol. 01 No. 0364 pp. 4271-4281, 2017.