

플라스틱 성형품의 잔류응력

한국폴리아세탈(주)
KOREA POLYACETAL CO., LTD.

KPAC

서울시 중구 소공로 94, 14층 (소공동, OCI빌딩)
14th Floor, OCI BLDG., 94, Sogong-ro, Jung-gu, Seoul, 04532, Republic of Korea
Tel +82-2-728-7400 Fax 82-2-714-9235 www.gpac-kpac.com

1. 개요

사출성형은 플라스틱, 고무 등 고분자 수지를 사용하여 일반적인 생활용품에서 정밀 부품류, 자동차 부품류, 광자기전보저장매체 등 고부가가치 제품을 대량으로 생산하는 방법으로 가장 널리 사용되는 방법이다. 사출성형공정에서 잔류응력과 휨, 수축 등의 변형은 최종 제품의 품질에 지대한 영향을 미치게 되며 이를 해결하기 위해서는 사출성형공정에 대한 정확한 이해와 문제점 해결에 대한 많은 노력이 필요하다.

플라스틱 성형품의 잔류응력(residual stress)은 열에 의한 잔류응력과 흐름에 의한 잔류응력에 기인한다. 그리고 사출 성형품 내의 잔류응력 분포는 두께의 중앙 영역에서는 인장응력, 표면 영역에서는 압축응력을 형성한다고 보고되어 있다.

잔류응력은 잔류 변형에 기인하는 응력이며 외력이 작용하지 않는 상태에서도 성형시의 고화과정에서 발생하고, 완전히 고화된 정상 상태에서도 응력이 잔류하게 된다. 특히 사출 성형품 내의 잔류응력은 사출 성형품이 장기간 사용되거나 높은 온도에 노출되었을 때 플라스틱의 점탄성 특성에 의하여 변형을 일으키는 요인이 되며 이러한 변형은 사출 성형품의 치수 정밀도를 떨어뜨리고 심한 경우에는 크랙을 발생시켜 사출부품에 치명적인 영향을 미치게 한다. 이와 같이 사출성형 공정에서의 잔류응력은 매우 중요한 사항으로 이를 최소화하기 위한 최적 사출 조건의 도출이 필요하며, 이를 위해서는 사출 성형품 내의 잔류응력에 대한 신뢰성 있는 측정이 선행되어야 한다.

잔류 변형의 원인으로는 일반적으로 다음과 같은 요인들이 있는 것으로 알려져 있다.

- (1) 캐비티(cavity) 내를 흐르는 수지의 흐름 속도 또는 흐름속도의 불균일에 의한 변형
- (2) 캐비티 내로 압입되는 압력에 의한 변형
- (3) 캐비티와 코어(core)의 온도 차가 과대할 때 생기는 열 변형
- (4) 형상, 편육 등으로 냉각속도의 불 균일에 의해 생기는 변형
- (5) 이형 시 돌출핀(ejector pin) 또는 이형 불량으로 발생하는 기계적 변형

잔류 변형에는 분자 내 변형과 분자간 변형이 있는 데 상온에서 분자 내 변형은 응력을 동반하고, 분자간 변형은 준 안정하여 분자쇄는 동결되어서 응력을 동반하지 않는다. 하지만 온도를 올리거나 약품에 침지할 경우 동결이 개방되어 응력이 나타난다. 잔류 변형은 결정성 수지 및 비결정성 수지 모두에서 나타나는 현상이다.

2. 잔류응력 발생 원인 및 감소 방법

플라스틱 성형품에 잔존하는 응력은 발생원인에 따라 크게 micro 응력과 macro 응력으로 구분할 수 있다. Micro응력은 cavity의 충전, 보압 과정에서 고분자의 분자 배향이 풀리지 않고 동결된 경우에 발생한다. 반면에 macro응력은 금형 내에서 냉각 과정 중 내압 또는 냉각속도 불균일에 의한 체적수축, insert(또는 outsert)의 열팽창에 의해 발생하는 응력, 외력에 의한 응력(이형 시 간섭에 의한 변형 등) 등에 의해 발생한다.

일반적으로 고온 금형에서 성형된 제품은 상대적으로 잔류 응력이 낮아 큰 문제가 되지 않으나 저온 금형에서 성형된 제품은 잔류응력이 높아 이를 감소시킬 필요성이 있다. 잔류 응력을 감소시키는 방법으로 어닐링(annealing) 처리를 하는 것이 가장 일반적이다. 어닐링은 이론적으로 적용 플라스틱의 유리전이온도(Tg) 이상이 되어야 하며 이 온도에서 스트레스 이완(stress relaxation)이 매우 빠르게 일어난다. 그러나 이 온도는 또한 휨과 비틀림의 원인이 되므로 어닐링은 스트레스 이완에 의한 치수변화의 최대 한도 내에서 신속히 끝내야 한다. 사출품의 어닐링 온도는 성형품이 사용되는 온도 환경에 따라 조정되어야 하며, 각 수지별로 추천된 적합한 환경에서 어닐링을 실시하는 것이 좋다.

3. 잔류응력 측정방법

최초 잔류 응력 측정법은 주로 금속 구조물의 강도 저하의 원인 파악, 특히 용접부위의 강도 평가 목적으로 사용되었다. 잔류응력이 금속뿐만 아니라 플라스틱 성형품에 존재할 경우에도 마찬가지로 구조적 취약점을 지니게 되므로 측정의 중요성은 점차 부각되고 있다. 이러한 플라스틱의 잔류응력 측정법은 시료의 훼손을 수반하는 파괴 방식이 일반적이었으나 점차 시료의 훼손 없이 측정하는 비파괴 방식이 선호되고 있다.

3.1. 잔류응력 측정법 - 비파괴 방식

비파괴 방식의 잔류응력 측정법은 다음과 같이 구분된다.

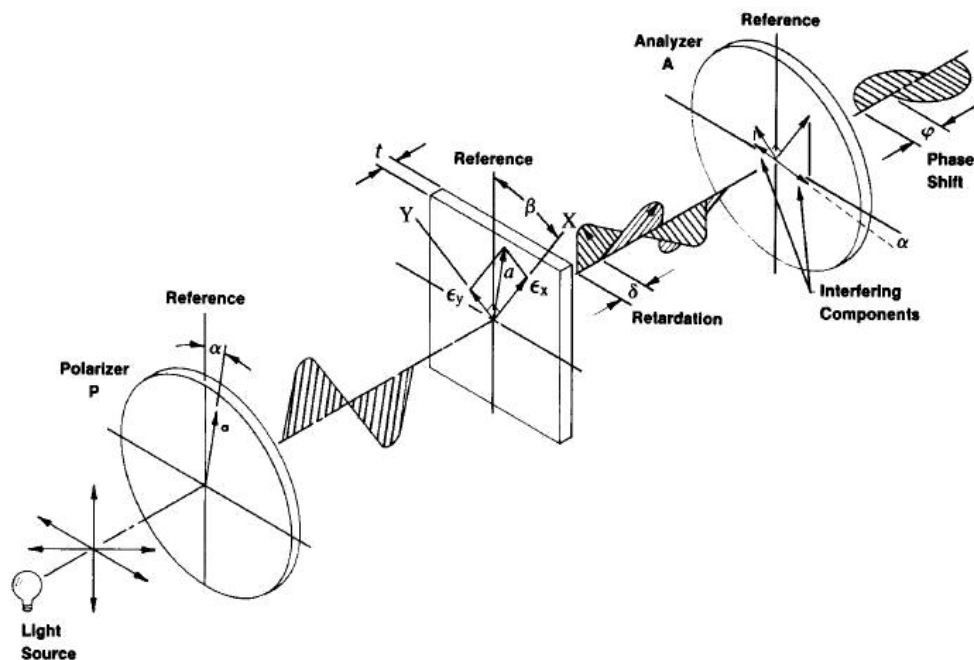
구분	특징	단점
곡률 측정법	계면 구속으로 발생하는 박막 기판 전체의 굽힘변형 정도를 Stoney 식으로 분석 측정	장범위에 걸쳐 하나의 곡률 만을 형성하기 때문에 박막 표면의 평균 응력만을 평가(불균일한 응력 평가 불가능)
X-선 회절법	축응력(잔류응력)에 의한 격자상수의 변화로 나타나는 회절피크의 폭과 발생 위치의 전이 정도로부터 잔류 변형률을 평가	탄성계수, 포아송비 및 무응력 상태, 면간거리에 대한 정보 필요(배향성과 같은 미세조직적 인자에도 측정결과가 영향을 받음), 표면 측정에 국한됨.(30um 깊이)

중성자 회절법	X 선 회절법의 문제점 보완	산란강도가 적고, 중성자 선원을 손쉽게 구하기 힘들.
자기 Barkhausen Noise 이용	외부 자장에 의한 소재의 자화거동이 축응력(잔류응력)에 따라 달라지는 정도를 측정	자기성 소재(ferromagnetic material)에만 적용 가능. 미세조직에 크게 영향을 받음.
초음파 속도	무응력 기준 상태 초음파 초기 속도와 음향탄성상수(acoustoelastic constant)를 이용	국소 영역의 축응력(잔류응력) 분포 확인 불가, 초음파 속도가 미세조직/측정온도에 민감하게 변화함.
Raman 분광법	소재의 고유 phonon 진동과 산란을 일으키는 단파장 레이저 반사파의 진동수 변화를 이용하여 원자결합과 관련된 물성을 측정	다이아몬드 및 실리콘 등의 몇몇 소재에서만 응력 환산인자가 결정된 상태
Brittle coating법	시편 외부에 박막 코팅을 하고 인위적으로 stress를 가하였을 때 발생하는 crack양상으로 파악	Stress에 민감하게 좌우됨, 계수화가 불가, strain-gauge 측정부 결정 목적

(1) 편광법

편광법은 비파괴 방식 중 플라스틱용으로 사용되는 대표적인 측정법이다. 성형품의 색상이 어둡지 않고(가급적 투명한) 두께가 일정해야 분석이 가능하다는 단점이 존재한다.

관련 규격은 ASTM D4093, Standard Test Method for Photoelastic Measurements of Birefringence and Residual Strains in Transparent or Translucent Plastic Materials 이다.



[Polarizer & Analyzer는 Reference에 대해 $\pm 45^\circ$ 방향으로 설치]

광원에 의한 Retardation(δ_{nm})은 아래의 식에 Compensator 측정값과 보정상수를 대입하여 계산이 가능하다.

$$\delta_{nm} = R * b_{nm/division}$$

위의 방법으로 계산된 Retardation 값에 두께(t)와 재료의 온도별 스트레스 상수($C_{Brewster}$)를 대입하면 잔류응력(σ)을 계산할 수 있다.

$$\sigma = \delta_{nm} / (t \times C_{Brewster})$$

3.2. 잔류응력 측정법 - 파괴 방식

파괴 방식의 잔류응력 측정법은 다음과 같이 구분된다. 이 중 Hole-Drilling과 절단법은 strain-gauge를 사용하여 strain gauge법이라 불리기도 한다.

구분	특징	단점
Hole-Drilling	측정 위치에 구멍을 뚫어 잔류응력을 제거하면서 최초 존재하였던 응력을 계산	곡면의 잔류응력 측정 불가능
절단법	측정 위치를 절단하여 잔류응력 평가	절단 시 발생하는 열로 인한 잔류응력 변화 가능성이 있고 절단 위치에 따른 응력 차이가 존재
Tg 발열 Peak	Tg의 발열 Peak가 클수록 잔류응력 大	정확한 측정부위 파악의 어려움 존재
용액 침지법	용액의 농도, 침지 시간을 달리하며 응력 집중 부위의 Crack 발생을 통해 잔류응력 여부를 파악	용액의 농도, 침지시간의 영향을 받으며, 계수화에 어려움이 존재

(1) 염산 침지법(POM)

POM의 경우 염산을 사용하여 잔류응력을 측정한다. 시험 방법은 다음과 같다.

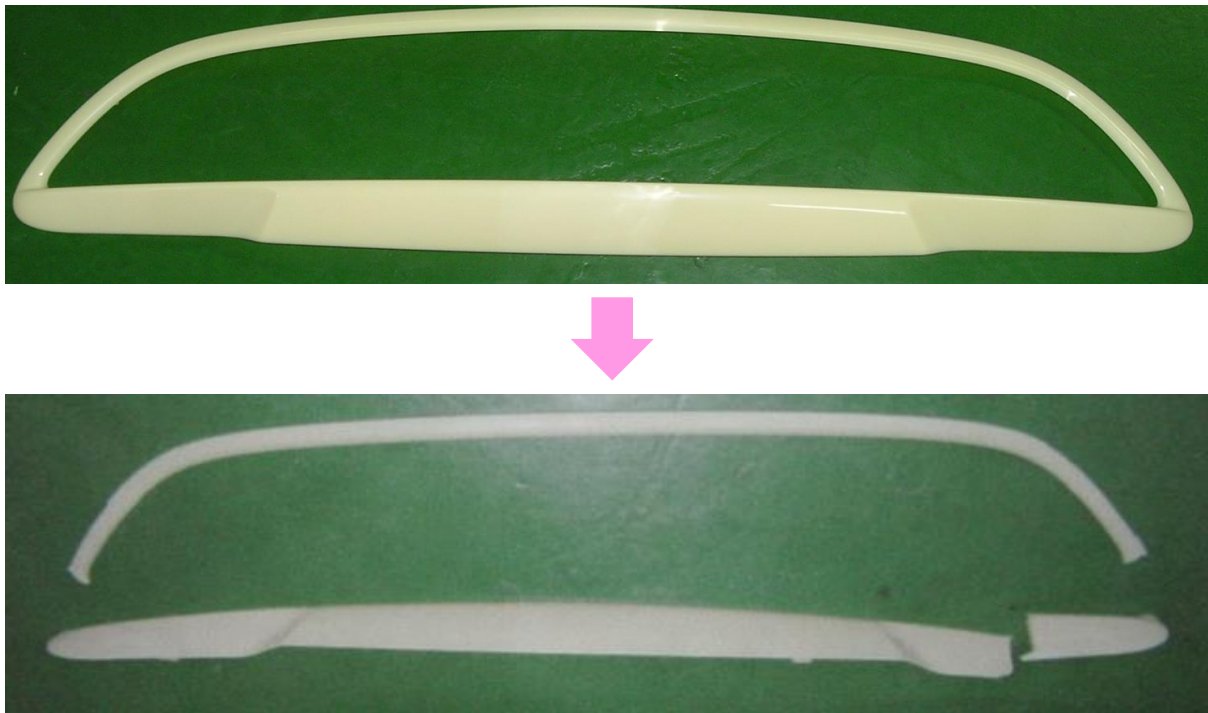
- (1) 검출하고자 하는 응력에 따른 염산 수용액 농도를 결정한다.
- (2) 염산을 희석하여 해당 농도로 수용액을 만든다. 이때 수용액의 온도는 20℃로 조절한다.
- (3) 성형품이 oil 등의 이물질에 의해 오염된 경우 Methanol로 1차 세척한 후 물로 2차 세척한다.
- (4) 성형품을 염산 수용액에 천천히 침지시킨다.
- (5) 60분간 방치한다. (대개 50분 이내에 crack이 발생한다.)
- (6) 성형품을 꺼내어 물로 세척한다.
- (7) Crack 여부를 확인한다.

(2) 용액 침지법

용액 침지법은 파괴방식 중 플라스틱용으로 사용되는 대표적인 측정법이다. 재료에 맞는 적절한 용매를 적정 농도로 사용하여 응력 집중부의 파괴를 가속화하는 방법이다. 산성 용매 사용에 따른 취급상의 주의가 요구되고, 파괴가 가시화되는 적정 농도와 침지 시간 산정을 위해 Trial and Error 방식의 시험이 불가피하다. 최초 적용 플라스틱은 ABS를 목표로 도입되었다.

관련 규격은 ASTM D1939, Practice for Determining Residual Stresses in Extruded or Molded Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) Parts by Immersion in Glacial Acetic Acid 이나, 현재 철회된 상태이다.

[ABS 수지를 빙초산 1분 침지 후 잔류응력 부위 Crack 발생 관찰]



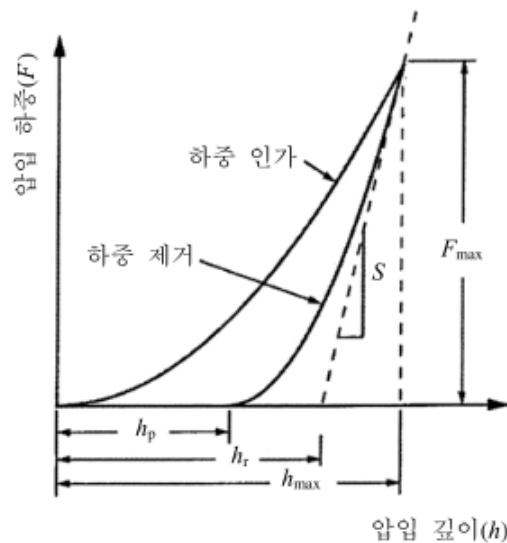
3.3. 기타 잔류응력 측정법

(1) 계장화 압입 시험

최근 비파괴 방식의 한 종류로 계장화 압입 시험이 사용되고 있다. 금속의 경도를 측정하기 위해 도입된 방법으로 플라스틱에도 적용을 확대하고 있다. 시험을 위해서는 측정 부위가 고정되어야 하므로 경우에 따라 예비 조치가 필요하다.

관련 규격은 ISO 14577, Metallic materials - Instrumented indentation test for hardness and materials parameters, KS B0951, 철강 용접부의 계장화 압입시험 - 잔류응력 측정 2건이 있다.

구분	특징	단점
계장화 압입 시험	압입 하중별 압입 깊이변화를 측정하여 잔류응력을 계산(압입 깊이는 200um 미만)	압입 함침과 시험편이 수직이 되도록 고정 필요



하중(F)을 변화하며 압입할 때 생기는 깊이 변화(h)를 통해 재료의 경도(H)를 계산한다. 계산된 경도와 하중의 관계를 통해 계산된 접촉면적 및 재료별 접촉압력/응력 비율 상수를 통해 잔류응력(σ)을 계산한다.

$$hc = 1.04 (h_{max} + \Delta h_a)$$

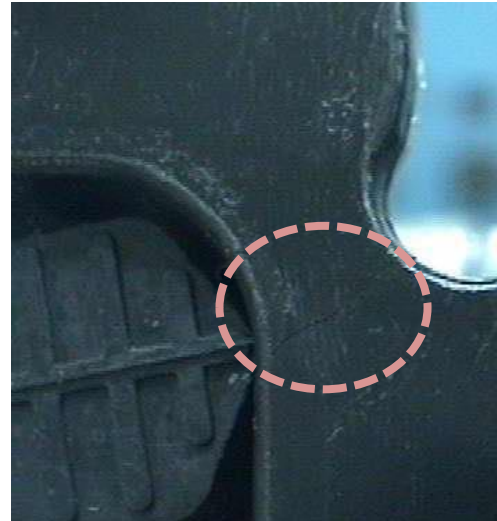
$$H = F / (24.5h^2c)$$

$$A = F/H$$

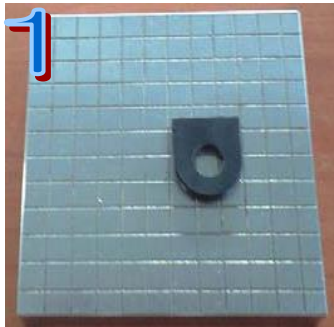
$$\sigma = C \times (\Delta F / A)$$

(2) 계장화 압입 시험 사례(POM)

자동차 inside door handle base 부품에서 깨짐이 발생하였다. 고무 부품 삽입부에 crack이 관찰되었는데, 총 2개 cavity 중 1개 cavity를 막고 사출하였고 외관에 흐름 자국이 존재한 점으로 미루어 잔류응력이 많이 존재하리라 의심되었다. 이에 동일한 금형으로 2개 cavity 모두를 작업한 타 사출처 성형품과 잔류응력을 비교하였다.



측정 순서



Reference 샘플링,
측정 부위와 멀리
떨어진 부위를 절단,
Polishing하여 응력을
제거한다.



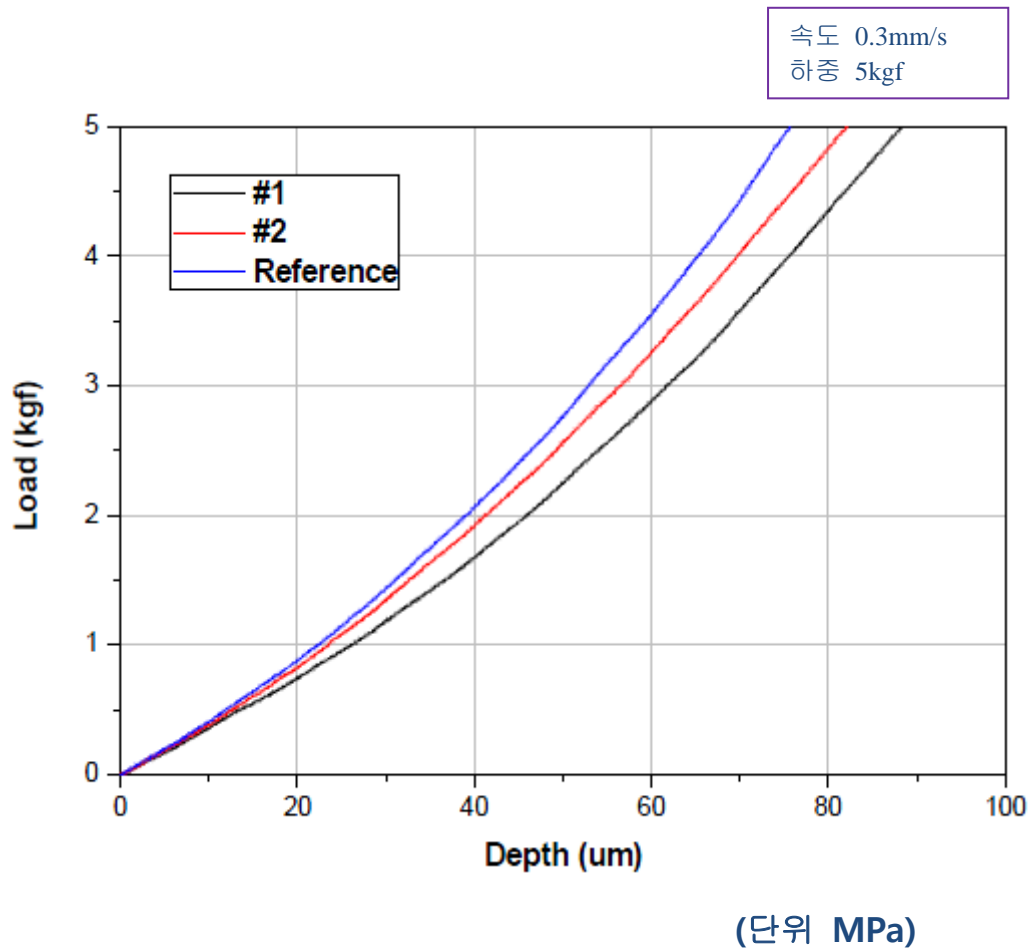
측정 부위를 고정한다.
본 시험에서는 석고에
넣어 고정하였다.

3



측정
측정 포인트당
200um 미만의
깊이를 15회
압입/후퇴하며.
측정한다.

측정 결과는 다음과 같이 나타났다.



구 분	측정	잔류 응력	표준 편차
1 Cavity 작업 (#1)	1	33.20	10.88
	2	24.67	7.39
2 Cavity 작업 (#2)	1	13.91	2.52
	2	13.34	2.60

1개 cavity를 막고 작업한 성형품(#1)이 2개 cavity 모두 작업한 성형품(#2) 대비 2~3배 가량 잔류응력이 크고 측정 시 편차 역시 크게 나타났다.

본사

04532, 서울특별시 중구 소공로 94 (OCI빌딩, 14층)
Tel. 02-728-7481 Fax. 02-714-9235

연구소

15850, 경기도 군포시 고산로 166, 104동 201호 (당정동, SK벤티움)
Te Tel. 031-436-1300 Fax. 031-436-1301

Headquarters

14th Floor, OCI BLDG., 94, Sogong-ro, Jung-gu, Seoul, 04532, Republic of Korea
Tel. +82-2-728-7481 Fax. +82-2-714-9235

EU & America Sales

14th Floor, OCI BLDG., 94, Sogong-ro, Jung-gu, Seoul, 04532, Republic of Korea
Tel. +82-2-728-7467 Fax. +82-2-714-9235

Asia Sales

14th Floor, OCI BLDG., 94, Sogong-ro, Jung-gu, Seoul, 04532, Republic of Korea
Tel. +82-2-728-7491 Fax. +82-2-714-9235

China Sales

上海聚醚醚化工贸易有限公司
上海市长宁区天山路1717号SOHO天山广场2幢T2-903C室(200051)
Tel. +86-21-6237-1977 ; E-mail: cpac.sales@gpac-kpac.com

Disclaimer: 1. 상기 자료는 본 제품에 대해 당사의 현재 기술 수준에서 측정된 것이며, 측정 방법 및 조건에 따라 변경될 수 있습니다. 본 제품에 고객에 의해 안료 및 기타 첨가제가 사용된 경우 상기 자료는 적용되지 않습니다. 본 제품은 (치)의학 Implants 용으로는 적합하지 않으며, 고객은 안전 및 보건 기준에 따라 본 제품을 사용해야 합니다. 제품 사용의 결정 및 책임은 고객에게 있으며, 상기 자료는 법적 소송 및 근거자료로 활용될 수 없습니다.

2. 상기 성형수축률은 당사 시험편 금형을 이용하여 특정 사출조건에 한하여 측정된 수치이므로, 측정조건에 따라 다소 변동될 수 있습니다. 귀사에서 제작하고자 하는 금형의 경우 두께, 디자인, 사출기, 사출조건 등이 당사 시험편 금형과 상이하여 상기 수축률과 차이가 있을 수 있으므로, 귀사의 설계조건, 사출성형조건 등을 충분히 검토하신 후 필요 시 보정하여 적용하시기 바랍니다. 제작하고자 하는 금형과의 수축률 차이가 발생할 경우 당사에서는 어떠한 법적 책임도 질 수 없으며, 모든 책임은 귀사에 있음을 분명히 밝혀 드립니다.