

구조해석용 물성과 이론 2

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

구조해석용 소재 물성과 이론 (1)에서는 “구조해석을 이해하는 데 필수적인 고체역학과 재료역학의 기본 이론”에 대하여 기술하였고, 이에 이어서 이번에는 “해석의 정밀도를 높이기 위해 엔지니어들이 고민해온 과정 중 물성 입력에 관한 부분”을 이야기 하고자 한다.

일단 구조해석에 필요한 S-S curve, 공칭 응력과 공칭 변형률, 진 응력과 진 변형률, 탄성률, 포와송의 비, 항복 응력 등에 대한 이론을 이해했다면, 이제 실제로 해석을 하는데 필요한 이러한 물성 값들을 어떻게 사용해야 실제와 더 근접한 보다 정확한 해석 결과를 얻을 수 있는지 고민하게 된다. 구조 해석의 분야에서는 해석의 종류에 따라 필요한 물성의 종류가 결정된다.

앞서 얘기했듯이, 일반적인 정 하중 구조해석에서는 탄성률, 포와송의 비, S-S curve가 필수적으로 필요하다. 여기서 재료의 선형 탄성 구간만을 고려한다면 S-S curve가 필요 없으나 당사의 제품과 같이 플라스틱 수지로 이루어진 구조체의 해석에는 S-S curve가 필수라고 생각하면 된다.

그리고 진동 해석을 실시하고자 한다면 탄성률, 포와송의 비, 밀도가 필요하며, 열 전달 해석에서는 열 전도율, 비열, 밀도, 열 팽창 계수 등이 필요하게 된다.

이 외에도 피로 해석, 크립 해석 등등 구조 해석의 분야 별로 꼭 필요한 재료의 물성치가 다르기 때문에 많은 경험과 더불어 미리 물성을 확보해 놓는 것이 중요하다.

우선은 이 중에서 빈도가 높은 정 하중 해석을 기준으로 필요한 물성을 어떻게 얻는지 살펴본다.

(2) 해석의 정밀도를 높이기 위해 엔지니어들이 고민해온 과정 중 물성 입력에 관한 부분

1) 탄성률(elastic modulus)의 보정

S-S curve를 이용한 정 하중 해석이라도 재료의 최초 거동은 선형 탄성 구간이므로 탄성률을 입력해야 한다. 해석에서의 탄성률은 S-S curve상에 잔류 변형률이 남지 않는 비례 한도 내의 기울기(응력/변형률)를 의미한다. 즉, 완전 선형 탄성 구간의 기울기이며 재료가 이 구간에서 거동할 경우 영구 변형이 발생되지 않아야 한다. 그렇기 때문에 이 조건에 부합하는 탄성률을 실제로 측정한다는 것은 매우 어려운 일일 수밖에 없다.

그래서 일단 ISO에서는 인장 시험을 통한 탄성률 구하는 방법을 규정해 놓았다.

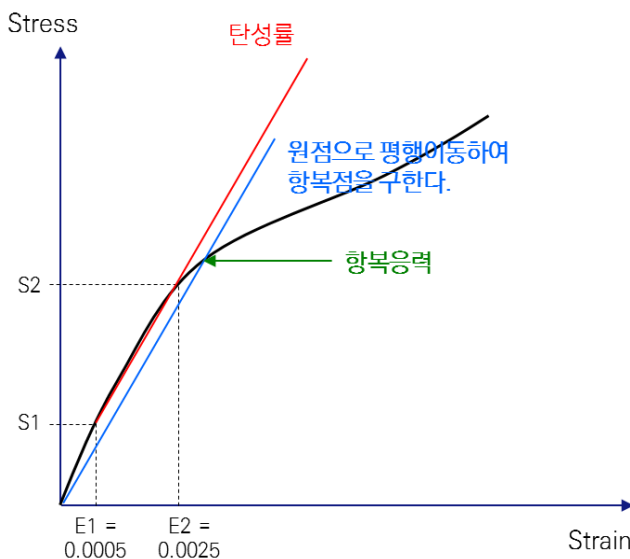


그림 1. ISO규정에 따른 탄성률과 항복응력

좌측 그래프와 같이 시편의 인장 시험을 통한 S-S curve 상에서 변형률 0.0005 ~ 0.0025 사이의 구간의 기울기를 탄성률로 하는 것이다. 이를 식으로 나타내면,

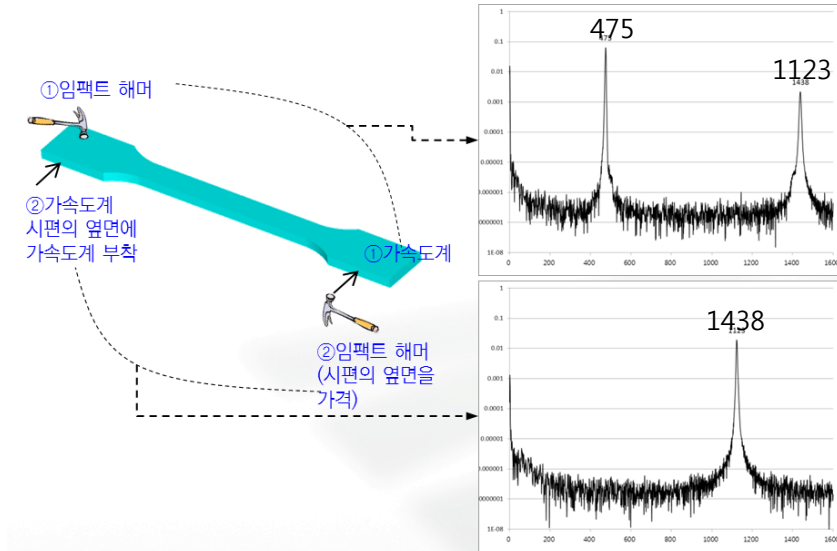
$$\text{탄성률} = (S2 - S1) / (E2 - E1) = (S2 - S1) / 0.002$$

이때 항복점의 정의 방법을 그대로 사용할 경우 탄성률 직선을 다시 원점으로 이동하여 이 직선과 S-S curve가 만나는 지점의 응력이 항복응력이 된다.

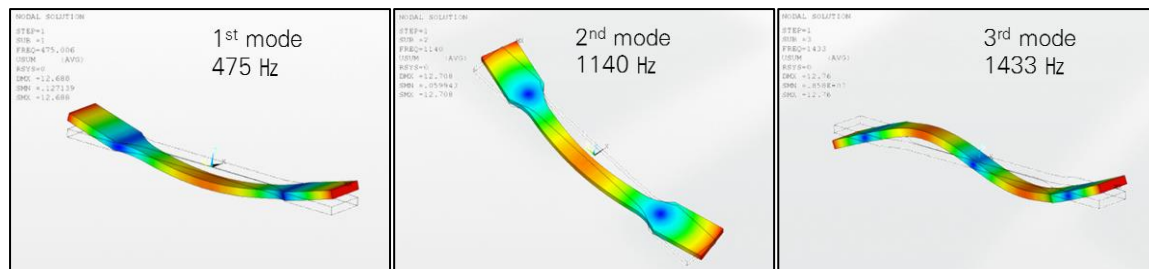
그러나 대부분의 구조 해석에서는 탄성 구간을 넘어 비선형 구간까지 확장되며, 탄성률을 활용하는 해석은 진동해석 정도이다.

그러므로 어차피 진동해석에서만 사용되는

탄성률은 실제 진동 시험에 맞도록 물성을 맞춰주는 것이 합리적인 것이다. 즉, 특정 형상(시편)의 구조물에 대하여 실험을 통한 고유 모드와 해석을 통한 고유 모드를 correlation을 하는 방법으로 탄성률을 파악하는 것이다. 형상에 따라 고유 모드가 달라지므로 쉽게 구할 수 있는 ISO 인장 시편으로 impact hammer를 이용한 FRF를 얻은 다음 최초 3개의 고유 주파수를 추출한다.



그 다음 동일한 ISO 시편 형상을 그대로 FE모델로 만들어 고유 모드 해석을 진행하면 마찬가지로 최초 3개의 고유 주파수와 모드가 나타나는데, 이 값들이 아까의 실제 시험 값과 최소의 오차를 갖도록 탄성률을 변경할 수 있다.



| | 실험 | 해석 | 오차(%) |
|----------------------|------|------|-------|
| 1 st mode | 475 | 475 | 0.00 |
| 2 nd mode | 1123 | 1140 | 1.49 |
| 3 rd mode | 1438 | 1433 | 0.37 |

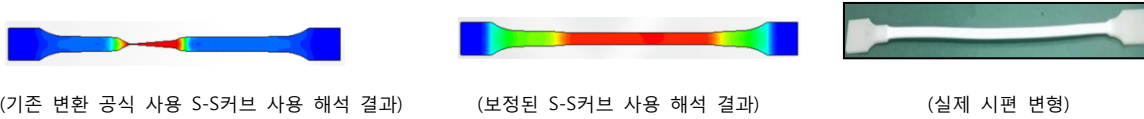
위 표와 같이 해석 결과와 실측의 mode shape 및 주파수 값이 잘 맞고 있으며, 이때 해석에서 사용된 탄성률이 바로 재료의 탄성률이 된다. 사실상 1차 고유 모드가 가장 중요하므로 1차 고유 주파수에 가중치를 가장 크게 부여하여 correlation한다.

2) S-S curve의 보정

앞서 언급한대로 비선형 정하중 구조해석을 하기 위해서는 탄성률과 포와송 비 그리고 소성변형률-진응력 커브(이하 S-S커브)가 필요하다. 탄성률은 위에서 설명된 방법으로 도출하고, 포와송 비는 해석에 큰 영향이 없기 때문에 크게 보정할 필요가 없으며, 지난 호에서 설명한 공식을 이용 F-D커브를 단계적으로 변환하여 최종적으로 해석에 필요한 S-S커브를 사용하면 된다.

그런데 왜 이 S-S curve의 보정이 필요한가? 그것은 시편의 인장 시험을 통해 얻은 힘-변위(F-D)

커브가 같은 인장 시험을 해석으로 얻은 F-D커브와 같지 않기 때문이다. (그림 2 참조)
또한 이제 설명할 보정 프로세스 없이 단순히 인장 시험 데이터를 변환하여 얻은 S-S커브를 사용할 경우, 아래 그림과 같이 실제 변형과 다른 변형을 얻게 되기 때문이다.



위 그림과 같이 공식을 통해 추출된 S-S커브를 그대로 사용하여 시편 인장 시험을 해석하면 실제 시편이 변형된 형상과는 다르게 국부적인 necking현상이 심하게 나타난다.

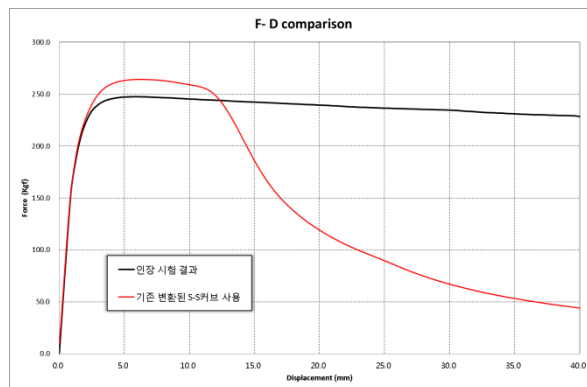


그림 2. 시험 결과와 해석 결과 비교

이러한 현상에는 여러가지 원인이 있는데,

- ① Strain rehomogenization 현상,
- ② UTM 측정 stress는 1축 측정, 실제 시편은 3축 stress 발생.
- ③ 측정 오차 (시편의 슬립, 측정기 오차 등.),
- ④ Yield surface ≠ Von-Mises (압축 항복응력 > 인장 항복응력),
- ⑤ Non-Isochoric(비선형 구간에서는 등체적이 아님),
- ⑥ Shear bands : negative slope in the hardening curve 등이 있다.

이중 가장 큰 원인은 금속과 달리 polymer는 비선형 구간 뿐만 아니라 선형 구간에서도 등체적을 유지하기 어렵기 때문에 사실상 앞서 설명한 공칭응력변형률→진응력변형률 변환 공식을 사용할 수 없음에도 이미 모든 데이터를 이 공식으로 변환하였기 때문에 오차가 있을 수 밖에 없다는 것이다.

그러므로 해석 시 입력하는 S-S커브를 계속 수정하여 동일한 인장 시편 해석을 하여 나온 F-D커브가 실제 측정된 F-D커브와 일치하도록 만드는 것이 S-S커브 보정의 핵심이다.

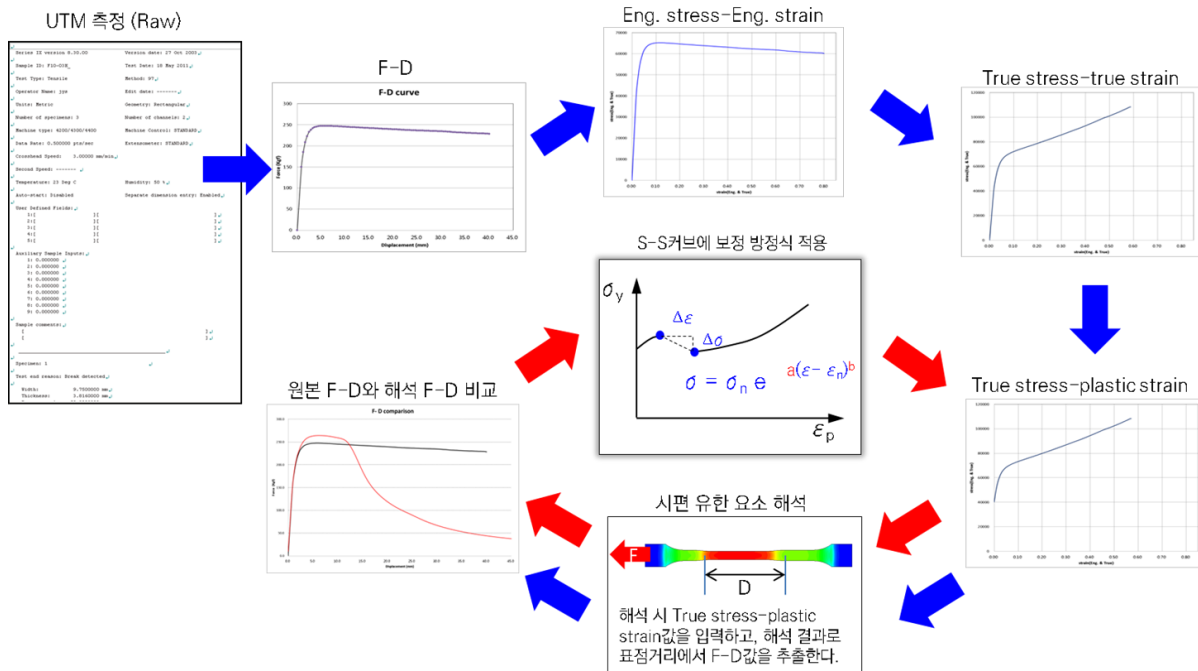


그림 3. S-S커브 보정 프로세스

그림3과 같이 해석용 S-S커브의 necking point 이 후 구간의 모든 데이터 포인트에 보정 방정식을 적용한다.

그리고 이 보정 방정식의 계수값을 변경하면서 실측 F-D커브와 해석에서 나온 F-D커브가 최소의 오차를 가질때까지 반복 해석을 하는 것이다.

이러한 프로세스를 거쳐 보정된 S-S커브를 사용하면 실제 인장 시험 결과와 거의 흡사한 F-D커브를 얻게 되며(그림 5), 기존과 같은 변환 공식을 이용한 S-S커브와 보정된 S-S커브는 그림 4와 같이 소성 구간의 모습에서 많은 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

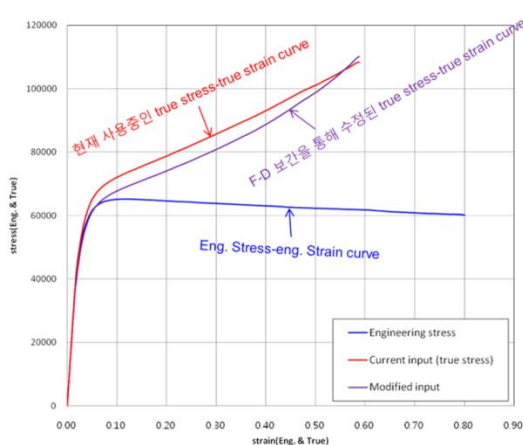


그림 4. 입력 S-S커브 비교

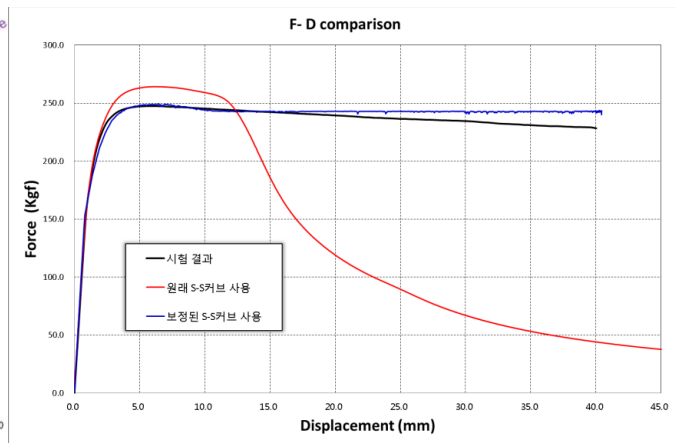


그림 5. 입력 S-S커브에 따른 F-D커브 결과 비교

3) 온도 별, strain rate 별 S-S커브의 사용

일반적으로는 상온 23°C를 기준으로 하기 때문에 1개의 S-S커브만을 사용하여 해석한다.

그러나 일반적인 polymer는 금속과 달리 온도에 따라 강성과 신율 변화가 크기 때문에 온도

변화가 있는 경우 반드시 이에 맞는 S-S커브를 사용해야 한다. 또한 대개의 정하중 해석에서는 strain rate 변화가 거의 없는 것으로 가정하지만 충격해석과 같이 strain rate 가 높고 변화가 심할 경우 가능한 strain rate별로 측정된 S-S커브를 입력해야 정확한 해석 결과를 얻을 수 있다. (주: strain rate는 변형이 발생하는 속도로서, 단위 시간당 strain 값이다. 쉽게 말해 변형이 발생하는 속도이며 인장 시험에서 crosshead speed에 비례한다.)

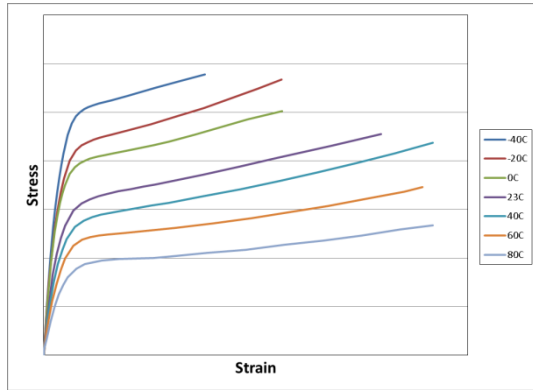


그림 6. F20-03의 온도 별 S-S커브

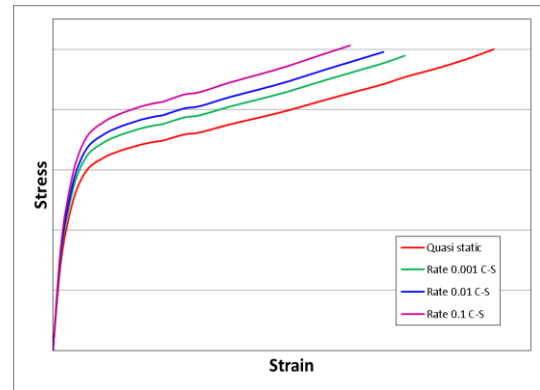


그림 7. F10-03H의 Strain rate 별 S-S커브

그림 6 및 그림 7과 같이 온도는 높을수록 strain rate는 낮을수록, S-S 커브의 기울기는 낮아지고 신율은 늘어나는 경향을 보인다. 온도별 S-S커브는 비교적 구하기 쉬우나, 일반적인 인장 시험기를 이용하여 높은 strain rate를 구현하기 힘든 이유로 strain rate별 S-S커브 데이터는 구축하기도 얻기도 힘들다.

4) 포아송비에 따른 해석 결과

앞서 언급한 바와 같이 대개의 경우 포아송비는 탄성률이나 S-S커브에 비해 구조 해석 결과에 큰 영향을 주지 않는다.(단, 진동해석에서는 영향이 있음.) 일반적으로 강성이 높은 경우 포아송비가 낮은 경향을 보이거나 항상 그런 것은 아니다.

포아송비는 이론적으로 0.5를 초과할 수 없으며 고무는 거의 0.5에 가깝고 금속은 대략 0.3 내외이며, 당사 대표 제품인 POM의 경우 0.35~0.39정도이다.

실제로 포아송비를 다르게 하였을 때 정하중 해석과 충격 해석을 실시하여 그 값을 비교하면 아래 그림 8, 9 와 같이 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다.

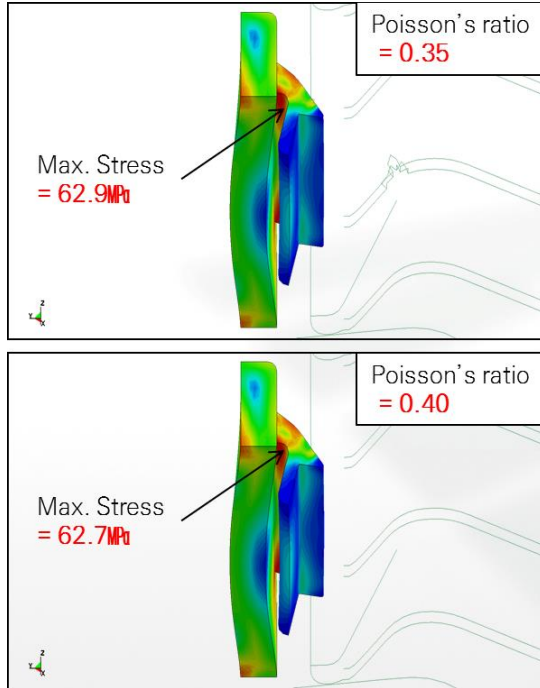


그림 8. 포와송 비에 따른 정하중 해석 결과

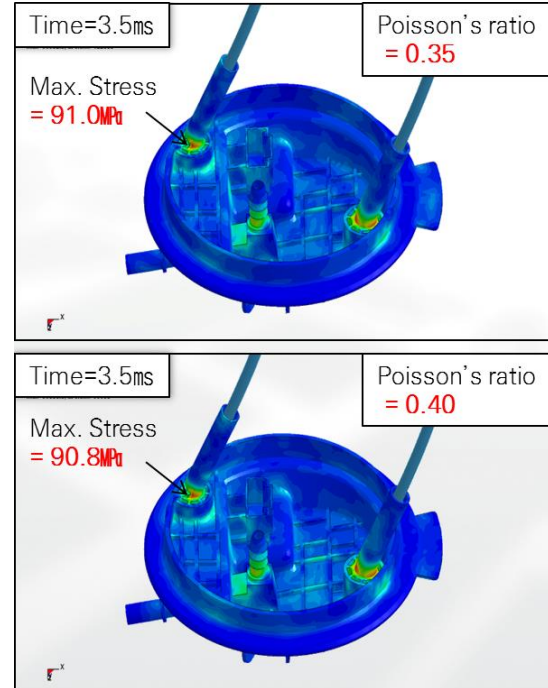


그림 9. 포와송 비에 따른 충격 해석 결과

5) 그 밖에 피로, 크립, 열 해석 관련 물성

정하중 해석에 필요한 물성 이외에, 반복 하중에 의한 수명을 예측하는데 필요한 피로 물성, 특정 하중에 대하여 시간에 따른 변형률이 바뀌는 현상을 해석할 때 필요한 크립 물성, 열원과 전도, 대류, 복사에 따른 제품의 온도 분포를 해석하는데 필요한 열적 물성(비열, 열전달 계수 등) 등이 있다.

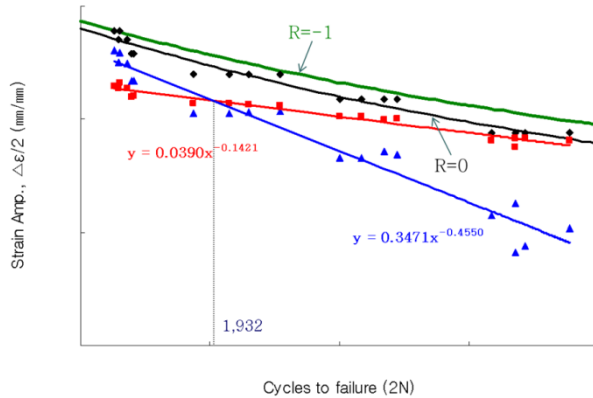


그림 10. F20-03의 변형률 수명 선도(피로 물성)

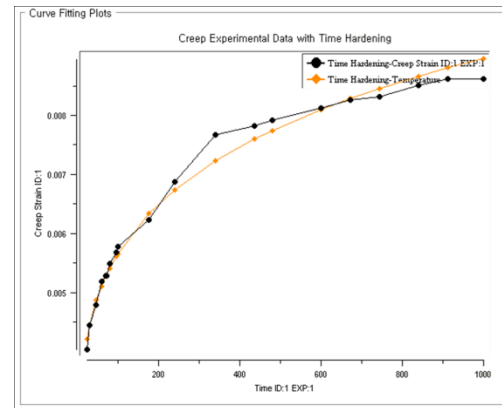


그림 11. F20-03의 Creep 물성(방정식)

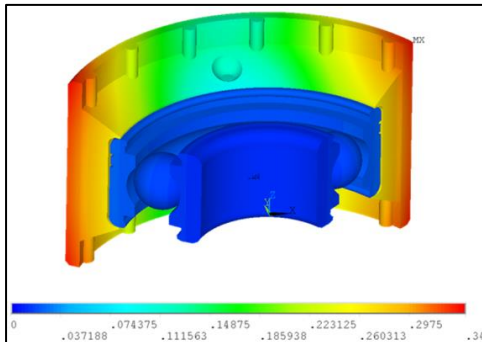


그림 12. 열적 물성을 이용한 온도 분포 해석 결과

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.