

플라스틱 자와 지우개를 이용한 고분자재료의 환경응력파괴(ESC) 가속실험 방법에 관한 연구

박준형* · 안원배** · 유진성** · 김경문* · 남경현***

한국화학융합시험연구원 신뢰성본부* · 세종과학고등학교** · 경기대학교 응용정보통계학과***

Accelerated the environmental stress cracking (ESC) study of polymer materials using a plastic ruler and a PVC eraser

Joon Hyung Park* · Won Bae Ahn** · Jin Seong Yoo** · Kyoung Mun Kim* ·
Kyoung Hyun Nam***

Korea Testing & Research Institute HQ of Reliability* · Sejong Science High School** ·
Kyonggi University Department of Applied Information Statistics***

Abstract

The study of environmental stress cracking (ESC) by contact with plastic rulers and PVC erasers which was artificially added to the external stress was carried out in order to accelerate the chemicals crack. To analyze a blooming plasticizer that migrates from the inside of blended eraser to the surface of the eraser, the ESC experiments were carried out at room temperature and 50°C conditions. The chemicals crack shape caused by the plasticizer and the brittle fracture shape resulted from the external stress were observed in consequence with the cross-sectional surface analysis of the ruler crack by the ESC. The bending strength of the plastic rulers were fractured prior to the yield point and it had low bending flexure stress. We presented that ESC of polymer materials was affected by the polarity of the chemicals and polymer, the exposure time to chemicals, the exposure temperature and the level of strain on the polymer.

Keywords : Environmental stress cracking (ESC), Environmental stress-cracking resistance (ESCR), plastic ruler, PVC eraser, crack, craze

1. 서 론

고분자 첨가제에 의한 화학약품파괴 현상을 가속화시키기 위해서 기계적인 외부응력을 추가한 환경응력파괴(Environmental Stress Cracking(ESC)) 실험이 엔지니어링 플라스틱을 중심으로 연구되었다(Jones(2000), Jasen(2004)). 환경응력파괴 실험결과는 해당 고분자 물질의 환경응력파괴저항(ESC Resistance)을 향상시키고, 궁극적으로는 ESC 자료를 집적화함으로써 고분자 부품·소재의 내구성을 강화시킬 수 있는 기초자료로 활용할 수 있다.

본 연구에서는 생활주변에서 손쉽게 접할 수 있는 문구류 플라스틱 자와 지우개의 접촉에 의한 화학약품파괴(Chemicals crack)현상을 가속화시키기 위해 외부응력을 추가한 환경응력파괴 실험을 실시하였다. 단시간에 지우개 중의 고분자 첨가제가 플라스틱 자로의 이행에 의한 화학약품파괴를 재현하였으며, 고분자 탄성체의 파괴에 대한 선행연구 고찰을 통하여 ESC 연구에 따른 플라스틱의 파괴 원리, 파괴 메커니즘을 연구하는데 활용하였다.

2. 관련문헌 연구

지우개는 고분자량의 PVC에 액상의 저분자량 플라스틱 가소제를 첨가하여 만들었기 때문에 일정 시간이 지나면 가소제 성분이 PVC 지우개의 외부 표면으로 석출되는 블룸(Bloom) 현상이 나타나게 된다. 일반적으로 플라스틱 가소제의 블룸 속도는 주변 온도에 영향을 받게 되며, 지우개로부터 블룸 된 가소제는 플라스틱 자로 이행되어 플라스틱 자와 지우개의 접촉과 같은 화학약품파괴(Chemicals crack)를 유발하게 된다. 화학약품파괴 실험에 외부 응력을 가한 환경응력파괴(ESC) 실험은 단시간 내에 크랙발생 유무를 확인 할 수 있기 때문에 고분자 제품의 고장분석, 신규 고분자재료의 적용성 검토 및 인공장기 등과 같은 의료분야에서도 고분자 재료의 수명을 예측하기 위한 유용한 방법으로 활용되고 있다(Jones(2000), Jasen(2004)).

고분자는 어느 정도 이상의 한계응력이 작용하면 국부적으로 분자가 배향(연신되어 한 방향으로 배열한 상태)되어 크레이즈 현상으로 나타나게 된다. 크레이즈는 균열과는 달라서 크레이즈 면이 변형된 재료에 의하여 서로 연결되어 있다. 고분자 파괴의 응력방향으로 크레이즈가 형성되며, 응력이 완화되면 액체상의 유기물질의 존재 하에서나 가열에 의해서 크레이즈가 복원되는 특성을 지니고 있다(Kambour(1968), Kramer(1983)). 또한, 크레이즈 부분에 거시적인 파괴가 발생해 균열로 진행하게 된다. 따라서 ESC에서는 환경응력에 의해 고분자물질의 분자간 van der Waals force가 약화됨으로서 화학약품파괴의 작용 메커니즘에서와 같이 화학약품이 고분자 내부로 침투해 크랙이 발생하며, 거울면상의 형태로 나타나게 된다[大武義人(2005), Schapery(1975), Gent(1970), Lagaron et al(1999)].

본 환경응력파괴 실험결과에서와 같이 고분자의 ESC거동은 응력파괴물질의 접촉시간, 폭로 온도, 약품 농도, 고분자에의 응력부하정도에 따라 복합적으로 영향을 받으며, 특히 온도와 응력부하에 의한 영향을 받게 된다(Jones(2000), 大武義人(2005)). 또한, Jones(2000)는 플라

스틱 환경응력파괴(ESC) 발생에 대하여 고분자 자체의 결정성(Crystallinity)에 의한 영향, 플라스틱과 화학약품의 극성(Polarity) 특성에 의한 환경응력파괴(ESC)의 메커니즘(Mechanism)을 제안하였다. 화학약품파괴에 있어서 화학약품과 고분자간에 극성이 일치하는 경우에는 양쪽 분자는 결속하기 쉽게 되고, 화학약품열화를 일으키게 된다. ESC는 상대적으로 화학구조가 느슨한 비결정성 고분자에서 발생하며, 고분자 재료의 열적특성으로 주위온도가 고분자의 T_g (유리전이온도)에 근접하게 되면 고분자의 Free volume이 증가되어 환경응력파괴를 유발하게 된다. 따라서 고분자의 가교도에 따른 열적 특성을 나타나게 되며, T_g 이하에서는 선형고분자 재료(PS, ABS 등)의 균열 선단에 크레이즈가 형성되고 변형률에 민감한 균열성장 거동을 한다(김엄기(1994), Williams et al(1995), Kramer and Hart(1984)). 고분자의 파괴현상은 고분자의 이화학적 특성과 관련된 새로운 파괴 메커니즘과 파괴 패턴을 보이고 있기 때문에 고분자재료의 파괴에 대한 다양한 이론적, 실험적 연구가 필요한 분야이다. 따라서 고분자 재료의 환경응력파괴저항(ESCR, Environmental Stress Cracking Resistance)을 향상시키고, 고분자 부품·소재의 내구성을 강화하기 위해서는 선형연구결과를 데이터베이스화하여 플라스틱 가공, 사용용도 등에 활용함으로써 고분자 부품·소재의 내구성을 향상시킬 수 있는 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다(김주권 외(2002), Jasen(2005), Lagaron et al(1999)).

3. 실 험

3.1 플라스틱 자와 지우개를 이용한 온도별 환경응력파괴(ESC) 실험

<그림 1>은 플라스틱 자에 외부응력을 가한상태에서 지우개 중의 첨가제의 이행이나 플라스틱 가소제의 접촉에 의한 환경응력파괴를 실험하기 위한 실험편의 장치도이다. ESC 장치에서 30cm 자의 지점간 거리는 200mm로 하고, 굽힘 변형을 20mm로 하여 최대 굽힘 응력 대비 50% 정도로 플라스틱 자에 일정한 응력이 가해지도록 하였다.



(a) ESC 실험장치(bent strip 방법) (b) 지우개, 시험편의 위치

<그림 1> 플라스틱 자와 지우개의 접촉에 의한 환경응력파괴(ESC) 실험

<표 1> 실험에 사용된 플라스틱 자와 지우개

구 분	재 질	제품명	이화학적 특성		
			$T_g(^\circ\text{C})$	$T_m(^\circ\text{C})$	극성(δ)
자	폴리스티렌(PS)	명성 30cm 방안직자	100	240	비극성
지우개	폴리염화비닐(PVC)	Ain White와 Jumbo Pink	82	100-260	극성

실험에 사용한 플라스틱 자는 폴리스티렌(PS, Polystyrene) 재질의 30cm 일반 문구용 플라스틱 자로 통일해 환경응력파괴 실험을 하였고, 문구용 지우개로는 폴리염화비닐(PVC, Polyvinyl chloride) 플라스틱 재질에 프탈레이트계 가소제가 포함된 것으로 기재된 Ain White(펜텔, 일본)와 Jumbo Pink(화랑고무, 한국) 지우개를 병행하여 실험하였다. 또한, 실험온도별 지우개 중 가소제 성분의 이행에 의한 플라스틱 자의 환경응력파괴 변화를 알아보기 위해 실온 조건(실내방치, 20°C 기준)과 ESC 실험 장치를 50°C로 조절되는 건조기 내에 넣어 실험하였다. 온도별 환경응력파괴(ESC) 실험은 PS, PVC의 유리전이온도(T_g), 녹는점(T_m)을 참고하여 재료의 물성에 영향을 주지 않는 80°C 이하의 조건인 실온과 50°C에서 ESC 실험을 수행하였다.

3.2 지우개 중의 가소제 성분의 추출

실온에서 ESC의 재현 유무를 단시간에 판단하기 위해 지우개 중의 가소제 성분만을 추출하여 환경응력파괴 실험을 실시하였다. 추출 용매로는 비극성 용매에 의한 ESC실험의 영향을 방지하기 위해 극성 용매를 선택하였으며, 메탄올(Methanol, OCI, 한국)을 사용해 선별적으로 지우개 중의 가소제성분을 추출하였다.

3.3 지우개 중의 프탈레이트계 가소제성분 분석

지우개 중의 프탈레이트계 가소제의 성분을 분석하기 위해 한국산업표준 KS M 1991(고분자 재료 중의 가소제 정량방법)에 따라 지우개 중의 가소제 성분을 정량 분석하였다. 가소제 정량분석은 지우개를 THF(Tetrahydrofuran, OCI, 한국)에 녹인 후, 다량의 메탄올을 넣어 THF와 층 분리를 시킨 후, 메탄올로 추출된 가소제성분을 HPLC(고성능 액체 크로마토그래피, High-Performance Liquid Chromatography)로 정량분석을 실시하였다.

3.4 환경응력파괴(ESC)에 의한 크랙발생 부위의 표면분석

환경응력파괴(ESC) 실험에 의한 크랙발생 부위의 표면을 분석하기 위해 광 조사에 의한 확대관찰이 용이한 실체현미경(BX51, Olympus, 일본)으로 크랙발생 부위의 표면, 단면의 형상을 분석하였다.

3.5 플라스틱 자로 이행된 가소제성분의 FT-IR 분석

환경응력파괴(ESC) 실험에서 플라스틱 자로 이행된 지우개의 가소제성분을 분석하였으며 플라스틱 자의 재질분석과 플라스틱 자의 표면부위로 이행된 유기물질의 분석방법으로는 FT-IR/ATR 분석방법으로 수행하였고, 지우개로부터의 추출한 액상 추출물의 분석방법으로는 FT-IR/Microscope 분석방법으로 유기물질의 관능기 분석을 수행하였다.

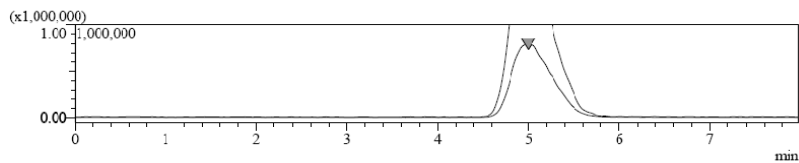
3.6 플라스틱 자의 굽힘 응력 측정 실험

플라스틱 자의 환경응력파괴(ESC) 실험 시 플라스틱 자에 가해지는 응력정도를 알아보고, 지우개 종류별로 플라스틱 자에 지우개를 밀착시켜 가소제 성분의 전이에 의한 플라스틱 자의 물성저하를 알아보기 위해 한국산업표준 KS M ISO 178(플라스틱-굴곡성 측정)에 의한 굽힘 응력을 측정하였다.

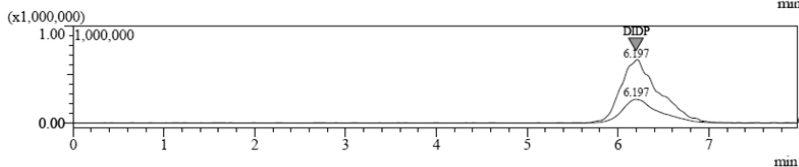
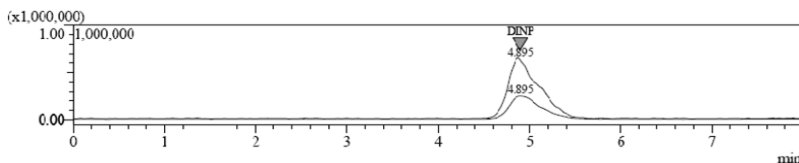
4. 결 과

4.1 지우개 중의 프탈레이트계 가소제성분의 정량분석

지우개 중의 가소제성분의 분석결과 <그림 2> (b)의 표준용액 스펙트럼에서와 같이 DINP (Diisononyl phthalate)로 정성분석 되었으며, Ain White, Jumbo Pink 지우개 중의 가소제 성분을 (a)에서와 같이 정량분석 한 결과 DINP 가소제는 각각 17.0%와 27.6%로 정량분석되었다.



(a) 지우개 중의 가소제 성분 DINP의 HPLC 스펙트럼

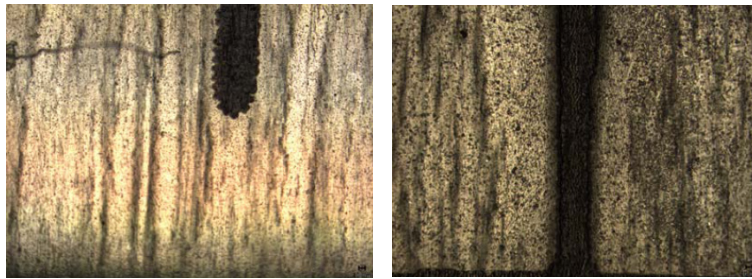


(b) DINP, DIDP(Diisodecyl phthalate) 표준용액의 HPLC 스펙트럼

<그림 2> 지우개 중의 가소제 성분의 HPLC 스펙트럼

4.2 플라스틱 자와 지우개를 이용한 온도별 환경응력파괴(ESC) 실험

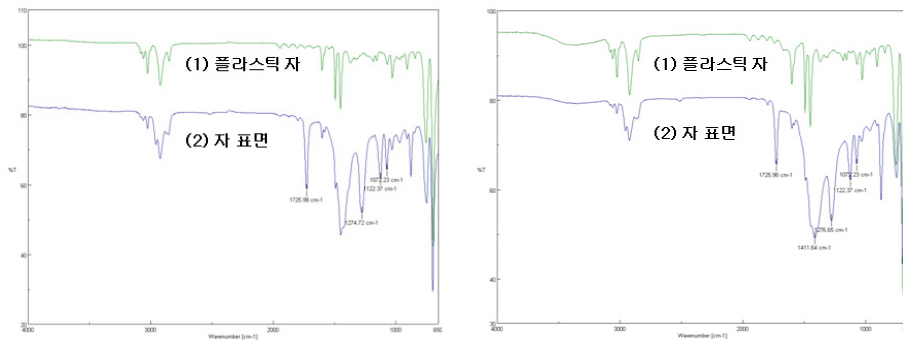
실온에서 환경응력파괴(ESC) 장치에 플라스틱 자를 거치한 후 2주가 지난 후에도 크랙현상은 관찰되지 않았으나, 유관관찰 결과 투명한 플라스틱 자 표면의 불투명한 물질의 이행과 부분적인 크레이즈가 관찰되었다. <그림 3>에서와 같이 지우개와 접촉하고 있는 플라스틱 자의 인장력이 작용하는 상부 지우개 접촉면의 반지름 방향으로 크랙발생 전의 다수의 크레이즈(Craze)가 관찰되었다. 크레이즈는 응력부위의 모든 부분에서 관찰되었으며, 지우개와 접촉되었던 플라스틱 자의 표면부위에 집중되어 나타남을 알 수 있었고, 비접촉 부위에서는 크레이즈가 관찰되지 않았다.



(a) Ain White 지우개 접촉 (b) Jumbo Pink 지우개 접촉

<그림 3> ESC 실험시편 플라스틱 자의 표면 실체현미경 사진
(크레이즈 실선방향↑, 실온×17일 후, 50배)

<그림 4>는 플라스틱 자의 표면부위를 ATR(Attenuated total reflection) 방법을 이용한 FT-IR 스펙트라이머, Ain White 지우개와 Jumbo Pink 지우개의 접촉부위의 관능기 스펙트럼이 일치함을 알 수 있었다. 지우개로부터 플라스틱 자의 표면부위로 이행된 유기물질의 분석결과 일반적으로 플라스틱 가공 시 플라스틱 제품의 유연성을 부여하기 위해 첨가되는 플라스틱 가소제인 프탈레이트계 가소제와 같은 관능기를 갖는 것으로 분석되었다.

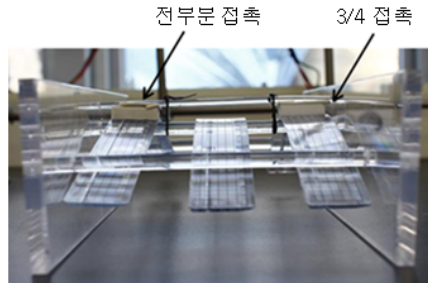


(a) Ain White

(b) Jumbo Pink

<그림 4> 실온조건 ESC 실험 후 플라스틱 자 시편 표면의 FT-IR 스펙트라(ATR 방법)

이며, 플라스틱 자와 Ain White 지우개의 접촉은 플라스틱 자의 폭 전부를 접촉시킨 것과 폭의 3/4 만을 접촉시킨 시편을 비교실험을 실시하였다. 실험결과 지우개를 전부 접촉시킨 플라스틱 자 시편에서 24시간 내에 크랙이 관찰되었으며, 일부분만을 접촉시킨 플라스틱 자에서는 120시간 후에도 크랙현상은 관찰되지 않았다. 실험 후 해체 작업 시 일부분만을 접촉시킨 플라스틱 자는 경화되어 부러졌다.

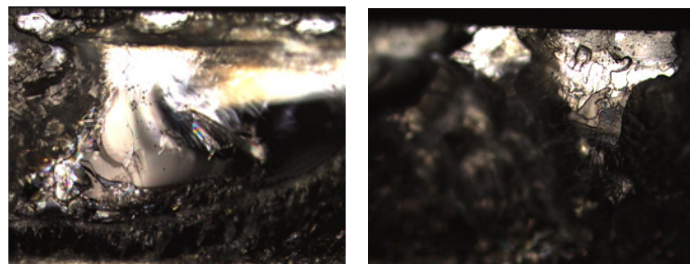


<그림 5> Ain White 지우개의 50℃ 조건에서의 환경응력파괴(ESC) 실험

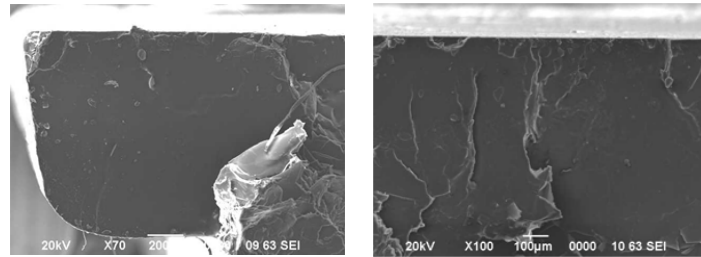
4.3 지우개 추출물을 이용한 플라스틱 자의 환경응력파괴 (ESC) 실험

속슬렛 추출장치를 이용해 추출한 물질의 Microscope 방법을 이용해 측정한 FT-IR 분석결과 프탈레이트계 가소제로 정성분석되어 플라스틱 자의 표면부위로 이행된 물질과 유사한 관능기를 갖는 것으로 분석되었다. 또한, 지우개로부터 추출한 액상의 추출물을 플라스틱 자에 도포하여 ESC 실험을 실시한 결과로 도포 후 수 시간 내에 크랙이 발생하였다.

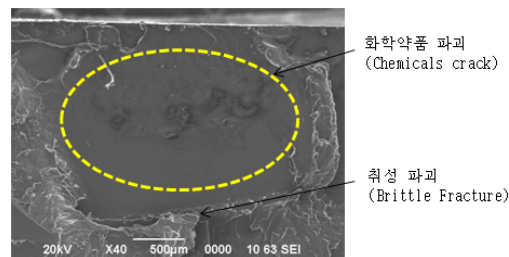
<그림 6>은 지우개로부터 추출한 프탈레이트계 가소제를 플라스틱 자에 도포한 후 발생한 크랙부위의 단면을 실체현미경으로 표면분석 한 결과이다. <그림 7, 8>은 크랙발생 부위의 크랙단면을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 표면분석 사진이며, 배율별로 크랙 단면을 관찰하였다. 실체현미경 분석에서와 같이 평평한 거울면상이 관찰되었으며, 거울면상 주위로 취성파괴에 의한 단면형상이 관찰되었다.



<그림 6> 지우개 추출물의 ESC 실험, 플라스틱 자의 크랙단면 실체현미경 사진(50배)



<그림 7> 지우개 추출물의 ESC 실험, 플라스틱 자의 크랙단면 SEM 사진



<그림 8> 환경응력파괴(ESC) 실험시편의 크랙단면 SEM 사진

4.4 환경응력파괴 실험에 따른 플라스틱 자의 굽힘 강도 측정

4.4.1 플라스틱 자의 굽힘 응력 측정

<표 2> 대조 시험편 플라스틱 자의 기계적 강도

항 목	단위	시험편 1	시험편 2	시험편 3
최대 하중(load)	N	28.16	19.00	36.11
지점간 거리	mm	200	200	200
시험편의 너비	mm	34.95	34.88	34.91
시험편의 두께	mm	2.65	2.54	2.59
최대 굽힘 응력	MPa	34.42	45.71	36.11
굽힘 응력 ¹⁾ (20mm 굽힘 변형(extension))	MPa	18.82	25.33	26.40
ESC 장치 굽힘 응력 비율 (최대 굽힘 응력 대비)	%	55	55	57

1) KS M ISO 178, 굽힘 응력(σ_f , MPa):

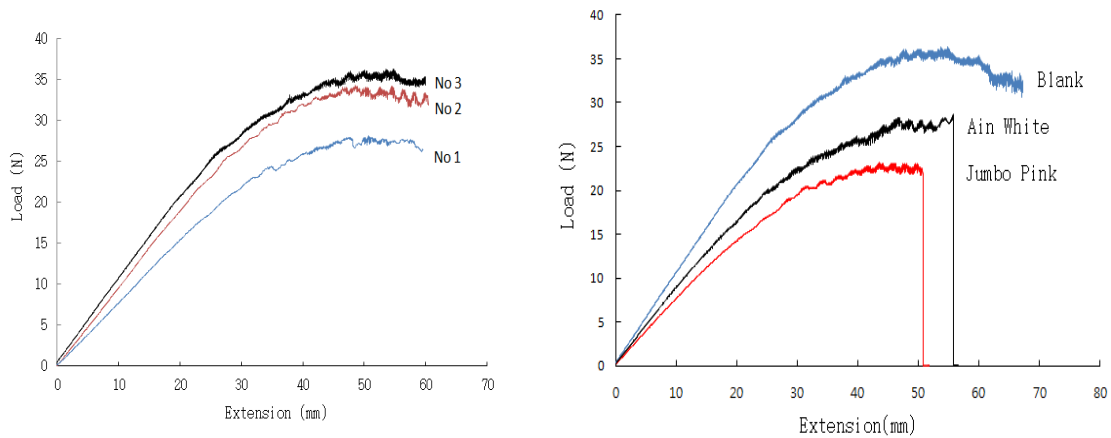
$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2}$$

F : 하중(N), L : 지점 간 거리(mm), b : 시험편의 너비(mm), h : 시험편의 두께(mm)

<표 2>에서와 같이 플라스틱 자의 환경응력파괴(ESC) 실험 시 ESC 장치에서 플라스틱 자에 가해지는 외부응력정도를 알아보기 위해 ESC 장치를 치구로 이용하여 플라스틱 자에 가해지는 굽힘 응력을 측정하였다. 대조시편으로 사용된 플라스틱 자의 굽힘 응력 측정 시 파괴는 관찰되지 않았다. 대조시편으로 사용된 플라스틱 자의 굽힘 강도 곡선으로 플라스틱 자의 두께, 폭 등의 치수 안정성이 떨어져서 시료별 하중(load)에 대한 굽힘 변형(extension) 그래프의 패턴 차가 큰 것으로 나타났다. ESC 장치의 굽힘 변형 20mm에서의 플라스틱 자는 시편 1, 2, 3 각각의 최대 굽힘 응력은 34.4MPa, 45.7MPa, 36.1MPa로 분석되었다. 플라스틱 자 자체의 기계적강도 값은 치수 안정성에 기인한 문제로 시편마다 차이를 갖는 것으로 나타났으나, ESC 장치에서 플라스틱 자 각각에 가해지는 상대적인 굽힘 응력 비율은 최대 굽힘 응력 대비 56% 정도로 플라스틱 자 별로 일정한 응력이 가해지고 있는 것으로 계산되었다.

4.4.2 환경응력파괴(ESC) 실험 후 플라스틱 자의 굽힘 강도 측정

플라스틱 자에 지우개를 밀착시켜 응력과 가소제 성분의 전이에 의한 플라스틱 자의 물성저하를 알아보기 위해 환경응력파괴(ESC) 실험 후 굽힘 강도 측정실험을 실시하였다. 지우개를 플라스틱 자에 밀착시켜 실온에서 1주일간 방치시킨 폴리스틸렌재 플라스틱 자의 표면관찰 결과 자의 바깥 면 반지름 응력방향으로 다수의 크레이즈가 관찰되었으나 균열은 관찰되지 않았다. ESC 실험에 사용된 플라스틱 자의 굽힘 강도 실험결과 일정응력에 도달하면 파괴되었다. Jumbo Pink, Ain White 지우개를 밀착시킨 플라스틱 자의 굽힘 파괴응력은 각각 27.9MPa, 35.8MPa로 측정되었으며, 대조시편은 굽힘 강도 실험결과 파괴가 일어나지 않았고 최대 굽힘 응력은 45.9MPa로 측정되었다.



<그림 9> ESC 실험 전(좌) 후(우)의 플라스틱 자의 굽힘 강도 곡선

5. 결 론

고분자 부품·소재의 내구성 향상을 목적으로 플라스틱 자와 지우개의 접촉에 의한 파괴현상을 가속화시키기 위해, 인위적인 외부응력을 추가한 환경응력파괴(ESC) 실험을 수행하였다.

지우개로부터 가소제성분의 표면석출 속도는 지우개에 첨가된 저분자 가소제물질의 블룸 특성에 기인하기 때문에 고온에서 지우개 중의 가소제 성분의 표면석출 속도가 증가되었고, 이행된 가소제와의 접촉에 의해 플라스틱 자의 환경응력파괴가 빠르게 진행되었다. 플라스틱 자 표면의 FT-IR 분석 결과 프탈레이트계 가소제가 분석되어 지우개에 첨가된 프탈레이트계 가소제가 자로 이행되었음을 알 수 있었다.

환경응력파괴는 화학약품과 고분자의 극성, 고분자에 가해지는 외부응력의 세기, 화학약품 접촉시간, 화학약품 농도, 폭로온도 및 고분자의 결정성 등 여러 가지 요소에 의해 결정되기 때문에 ESC 장치를 이용한 가속 실험결과를 데이터베이스화하여 활용함으로써 고분자 소재·부품의 내구성을 증대시킬 수 있을 것이다. 전자제품의 하우징재료로 광범위하게 사용되는 ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene) 공중합체 고분자는 본 ESC 연구에서와 같이 비극성의 프탈레이트계 가소제에 취약한 특성을 지니게 되므로 가소제가 첨가된 PVC 전선 피복제와의 직접접촉을 방지함으로써 ESCR을 향상시킬 수 있다.

고분자 물질의 환경응력파괴저항(Environmental Stress Cracking Resistance (ESCR))을 향상시키고, 고분자 부품·소재의 내구성을 강화하기 위해서는 선행연구결과를 체계적으로 DB화하여 제품설계, 플라스틱 가공 등에 활용하는 것이 중요하다. 또한, DB화 되지 않은 고분자의 경우는 외부응력을 가한상태의 ESC장치를 활용하여 화학물질과의 접촉에 의한 크랙발생 유무를 단시간 내에 재현함으로써 크랙발생을 방지하고, 고분자 부품·제품의 내구성을 향상시킬 수 있다.

참고문헌

- [1] S. Jones(2000), *Compositional and failure analysis of polymers: A practical approach*, John Wiley and Sons, pp.452-478
- [2] J. A. Jasen(2004), Environmental stress cracking-the plastic killer, *Advanced Materials and Processes*, pp.50-53
- [3] R. P. Kambour(1968), Stress-strain behavior of the craze, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 8, pp.281-289
- [4] E. J. Kramer(1983), Microscopic and molecular fundamentals of crazing, *Advances in Polymer Science*, Vol. 52, pp.1-56
- [5] 大武義人(2005), 고무·플라스틱 재료의 트러블과 대책, 일본 일간공업신문사, pp.95-105

- [6] R. A. Schapery(1975), A theory of crack initiation and growth in viscoelastic media I. theoretical development, *Intl. J. of Fracture*, Vol. 11, No. 1, pp.141-159
- [7] A. N. Gent(1970), Hypothetical mechanism of crazing in glassy plastics, *J. Mater. Sci.*, Vol. 5, pp.925-932
- [8] J. M. Lagaron, N. M. Dixon and W. Reed(1999), Morphological characterization of the crystalline structure of cold-drawn HDPE used as a model for environmental stress cracking (ESC) phenomenon, *Polymer*, Vol. 40, pp.2569-2586
- [9] 김엄기(1994), 고분자 재료에서의 파괴역학, 대한기계학회지, 제34권 5호, pp.384-391,
- [10] M. L. Williams, R. F. Landel and J. D. Ferry(1955), The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids, *J. of the American Chemical Society*, Vol. 77, pp.3701-3707
- [11] E. J. Kramer and E. W. Hart(1984), Theory of slow, steady state crack growth in polymer glasses, *Polymer*, Vol. 25, pp.1667-1678
- [12] 김주권, 박성진, 윤경환(2002), 냉장고 ABS Inner Case 진공성형품의 환경응력파괴, 유변학의 이론과 응용, 제6권 1호, pp.77-80
- [13] J. A. Jasen(2005), Environmental stress cracking-examples from the automotive industry, ANTEC 2005 Plastics: Annual Technical Conference Vol. 2, pp.1-6, Society of Plastics Engineers
- [14] J. M. Lagaron, J. M. Pastor and B. J. Kip(1999), Role of an active environment of use in an environmental stress crack resistance (ESCR) test in stretched polyethylene: A vibrational spectroscopy and a SEM study, *Polymer*, Vol. 40, pp.1629-1636