

# 자동차 냉각기 호스용 EPDM 고무의 전기화학적 복합노화시험 및 고장메커니즘

곽승범\* · 최낙삼\*† · 신세문\*\*

\* 한양대학교 기계공학과, \*\* 한국화학연구원 신뢰성평가센터

## Electrochemical Combined-Stress Degradation Test and Failure Mechanisms of EPDM Rubber for Automotive Radiator Hoses

Seung Bum Kwak\*, Nak Sam Choi\*† and Sei Moon Shin\*\*

\* Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.,

\*\* Reliability Assessment Center, Korea Research Institute of Chemical Technology

(Received October 11, 2011 ; Revised July 16, 2012 ; Accepted October 10, 2012)

**Key Words:** Electro-Chemical Degradation Test(전기화학적 노화시험), Mechanical Strain(기계적 변형률), EPDM Rubber(EPDM 고무), Coolant(냉각수), Failure Mechanisms(고장메커니즘)

**초록:** 자동차용 냉각기 고무호스는 열과 기계적 하중을 받으면서 국부적으로 형성된 전기적 영향으로 인해 노화와 고장이 발생한다. 본 연구에서는 개선된 시험방법을 이용하여 고무호스의 파괴거동을 재현하였다. 냉각기 고무호스 재료인 카본블랙이 함유된 EPDM 고무를 사용하여 인장응력과 전기화학적 복합 스트레스를 가하여 노화거동을 분석하였다. 노화 시간에 따른 전류 및 저항의 변화거동을 관찰하였으며 인장 변형 스트레스와 전압 및 노화온도 조건에 따른 노화거동을 분석하였다. 고무 시험편을 수직면으로 정밀하게 절단하여 시험편 표면 및 내부의 변화거동을 분석하여 전기화학적 노화거동과 고장메커니즘을 규명하였다.

**Abstract:** Coolant rubber hoses for automotive radiators can degrade under thermal and mechanical loadings and thus fail owing to the influences of locally formed electricity. In this study, an advanced test method was developed to simulate the failure of a rubber hose. The aging behavior of carbon-black-filled ethylene-propylene diene monomer (EPDM) rubber used as a radiator hose material under a combination of electrochemical stresses and tensile strain was analyzed. The changing behaviors of the current and the resistance as a function of the aging time were analyzed in consideration of the tensile strain, voltage, and aging temperature. Sectioned specimens clarified the failure mechanisms of the aged skin layer under the combined electrochemical stresses.

### 1. 서론

자동차용 냉각기 고무호스는 엔진과 라디에이터를 연결하여 엔진 및 엔진오일을 냉각시켜주는 냉각수의 이송 경로로 사용되는 호스로서 상압이상으로 유지되며, 보강층을 삽입한 고무를 사용한다. 엔진의 고성능화에 따라 엔진룸의 온도가 상승하게 되어 내열성 및 내구성능이 향상된 고무호스의 사용을 필요로 한다. 이에 우수한 화학적 안정성과 탄성, 유연성을 가지고 내열성 및

내구성능이 향상된 EPDM(ethylene propylene diene monomer)고무가 냉각기 고무호스에 적용되고 있다.<sup>(1,2)</sup>

자동차용 냉각기 고무호스의 주된 고장원인은 호스 고무재질에 대한 전기화학적 노화(electrochemical degradation, ECD)이며, 고무호스와 엔진/라디에이터 fitting부의 금속부위가 냉각수를 매체로 하여 ‘갈바니 셀’이란 전기회로를 형성하기 때문에 일어난다.<sup>(1-5)</sup>

본 저자는 자동차용 냉각기 고무호스 재질에 대해 시험편 수준의 열화거동을 연구하였다.<sup>(6)</sup> 열 가속 및 산소 스트레스와 전기화학적 스트레스에

† Corresponding Author, nschoi@hanyang.ac.kr

대해 표피층의 열화거동을 평가하고, 이들 결과를 거시적인 인장강도 및 신장률 데이터와 비교하여 냉각기 고무호스의 내구성평가를 위한 고장 분석기술을 제시하였다.<sup>(7,8)</sup> 열가속 및 산소 스트레스의 경우, 노화온도 및 시간에 따른 가교밀도를 측정하여 가교밀도가 고무호스의 물성적 열화거동에 미치는 효과를 분석하였다.<sup>(9)</sup> 기계적 열적 부하를 동시에 가할 수 있는 전기화학적 복합노화시험 장치를 이용해 기계적 변형 스트레스와 냉각수 조건에 따른 고무 시험편의 전류값 변화 거동 및 노화에 따른 물성을 비교 분석하였다.<sup>(10)</sup>

본 연구에서는 선행연구<sup>(10)</sup>에서 설계/제작한 전기화학적 복합노화시험 장치를 이용하여 노화시간에 따른 전류값의 변화거동, 인장변형 스트레스와 전압, 온도 조건에 대한 효과를 분석 평가하였다. 또한 고무 시험편의 표면과 내면을 관찰하여 전기화학적 노화에 대한 고장메커니즘을 규명하고자 한다.

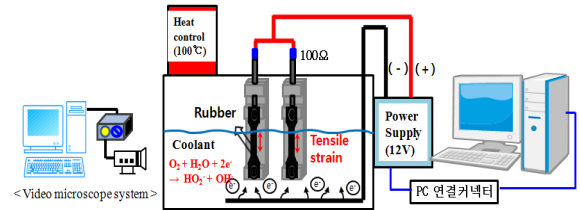
## 2. 실험 방법

### 2.1 시험편의 선정 및 제작

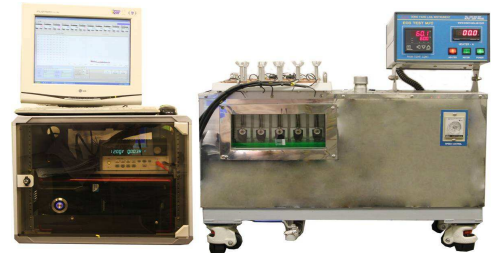
자동차용 냉각기 호스에 많이 사용되는 EPDM 고무를 세명기업(주)를 통해 입수하였다. 세명기업(주)에서 제작된 냉각기 고무호스 부품은 국내에서 생산되는 자동차에 많이 사용되고 있으며 엄격한 품질관리가 이루어지고 있다. 고무호스용 EPDM고무는 카본블랙 120phr으로 소정의 가소제와 노화방지제가 첨가되어 있다. 보통 냉각기 고무호스는 압출성형을 하여 제작하며 내부에 보강 섬유가 들어있는 구조이지만, 본 실험에서는 시험편을 압축프레스로 고온가압하여 두께 2 mm의 판상고무 형태로 압축 성형하였으며, 노화시험 후 인장강도 및 파괴 신장률을 측정하기 위해 dog-bone형 판상시험편으로 절단 제작하였다. 본 시험편은 원형 단면을 가진 고무호스 부품과는 성형후 잔류응력분포가 약간 다르겠지만, 고무호스 기초물성시험용으로 일반적으로 사용되는 것으로 전기화학적 노화거동의 기초특성을 구하는 데에도 이용될 수 있다.

### 2.2 전기화학적 복합노화시험

Fig. 1은 전기화학적 복합노화시험 장치의 계략도(Fig. 1(a))와 시험장치 사진(Fig. 1(b))을 나타낸 것이다. 이 시험 장치는 온도와 전압을 조절할



(a) Schematic of ECD tester design



(b) Photographs of ECD test machine

Fig. 1 Design of ECD tester and its photo

수 있으며 시험편을 고정하는 지그를 별도로 제작하여 기계적 인장변형률을 가할 수 있게 하였다. 또한 컴퓨터와 연결하여 시험편에 걸리는 전류값을 실시간으로 모니터링 할 수 있도록 프로그램을 구성하였다.

시험에 사용된 냉각수의 부동액은 극동제연공업(주)의 ‘클라운 냉각/부동액(Anti-freeze Coolant)’으로 국내 자동차 메이커 신차 충전용 및 A/S용으로 사용되는 제품이다. 종류는 에틸렌글리콜부동액 2종(LLC)이며 주요성분으로 에틸렌글리콜과 부식/산화방지제가 포함되어 있다.

시험 조건은 냉각수를 부동액 50%, 증류수 50%를 혼합하여 다음과 같은 조건으로 168시간(7일)동안 노화시험을 진행하였다.

(1) 시험 온도 60°C, 80°C, 100°C에서 DC 12V, 기계적 인장변형률 0%, 10%를 가하여 온도 조건에 따른 영향을 분석하였다.

(2) DC 0V, 12V에서 시험 온도 100°C, 기계적 인장변형률 0%, 10%를 가하여 전압조건에 따른 영향을 비교하였다.

(3) DC 8V, 10V, 12V에서 시험온도 100°C를 가하여 전압에 따른 기계적 물성의 변화를 비교 분석하였다.

### 2.3 시험편의 물성 측정

EPDM 고무시험편에 대해 RS M0004<sup>(2)</sup>에서 규정하는 물성을 검토하기 위해 인장강도, 파괴 신장률, IRHD(International Rubber Hardness Degrees)

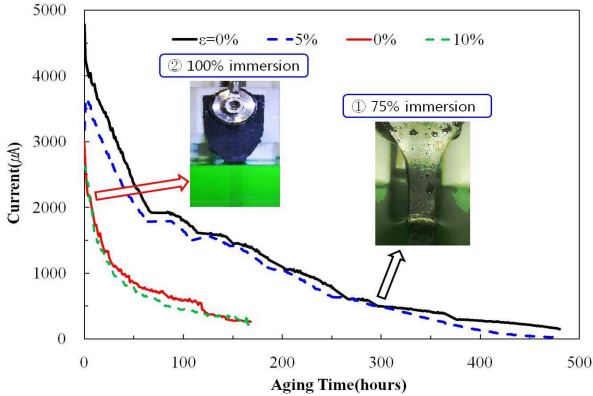


Fig. 2 Variation of the current of EPDM rubber immersed in coolant liquid

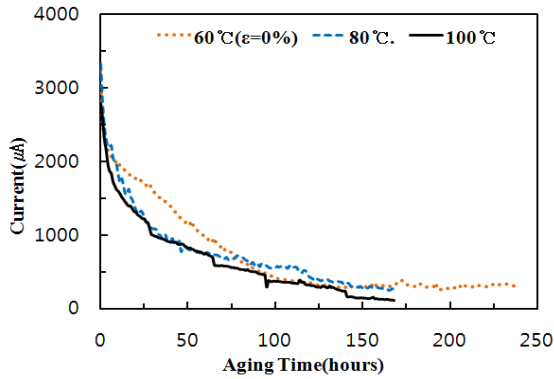


Fig. 3 Variation of the current of EPDM rubber with various temperatures ( $\epsilon=0\%$ )

경도를 측정하였다. 인장시험에서는 RS M0004<sup>(2)</sup>의 인장강도 및 파괴 신장률 측정 방법에 따라 두께  $2.0\pm 0.2$  mm, 게이지 길이 20.0 mm의 dog-bone형 시험편을 사용하였다. 500 mm/min의 변위속도로 시험을 수행하여 응력-변형률곡선을 계측하였으며, 시험편은 시험조건당 5개를 사용하였다.

### 2.4 광학현미경 관찰

전기화학적 복합노화 시험 전-후 시험편의 표면부 및 내부의 변화를 알아보기 위해 광학현미경(OLYMPUS BX60)을 이용하여 관찰하였다. 시험편의 내면은 본 연구실에서 제작한 미세절취용 절단기를 이용하여 두께방향으로 정밀하게 절단하여 관찰하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 시험 온도 조건의 효과

선행 연구<sup>(10)</sup>에서는 U-tube type 시험 방법에 따

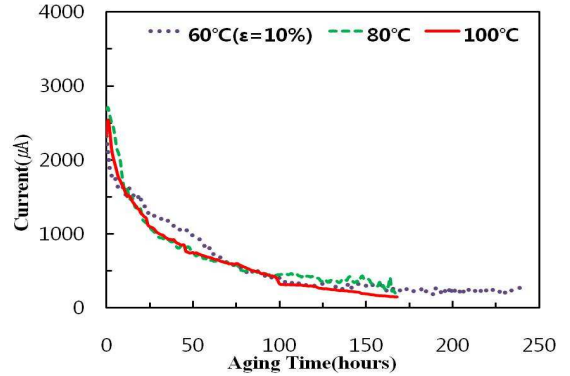


Fig. 4 Variation of the current of EPDM rubber with various temperatures ( $\epsilon=10\%$ )

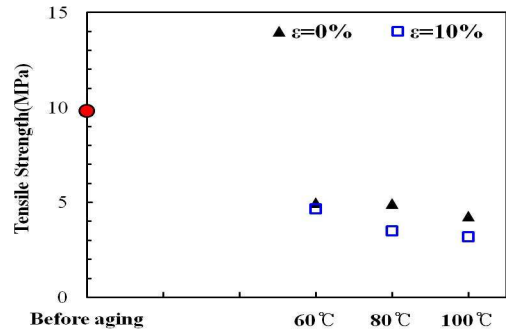


Fig. 5 Tensile strength of EPDM rubber before and after ECD test

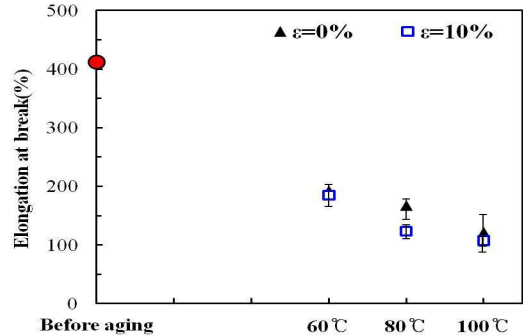


Fig. 6 Elongation at break of EPDM rubber before and after ECD test

라 시험편을 냉각수에 75% 침지시킨 상태에서 시험을 수행하였다. 하지만 이 경우 냉각수 수면 위쪽의 단면이 점차 축소되어 네킹 변형거동을 보였으며 노화시간에 따라 네킹부위가 점차 확장되었다. 이와 같은 네킹 변형거동을 방지하기 위해 본 연구에서는 시험편을 100% 침지시킨 상태에서 시험을 수행하였다.

Fig. 2는 시험편을 75%, 100% 침지시켰을 때 전류값의 변화거동을 나타낸 것이다. 시험편을 100% 침지시킨 경우 75% 침지시켰을 때에 비해

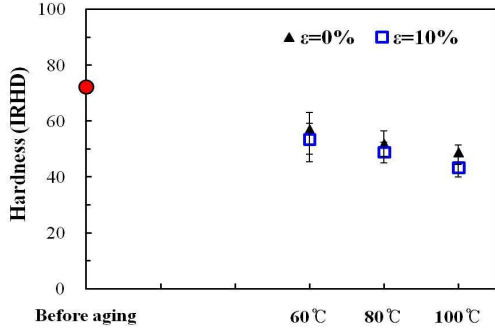


Fig. 7 IRHD hardness of EPDM rubber before and after ECD test

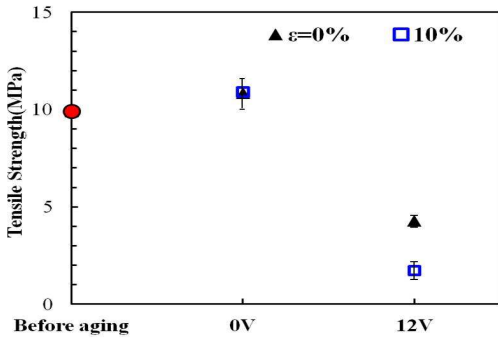


Fig. 8 Tensile strength of EPDM rubber before and after ECD test as a function of voltage conditions

전류값이 전체적으로 낮게 측정되면서 노화수명이 크게 단축되었다.

Fig. 3은 기계적 인장변형률 0%의 조건하에 노화온도 60°C, 80°C, 100°C에서 전류값의 변화거동을 나타낸 것이다. 노화온도가 높을수록 전류값은 낮게 측정되었으나 그 차이가 크지는 않았다. 60°C의 경우 약 130시간 이후 전류값이 거의 일정하게 유지되었다. 기계적 인장변형률 10%를 가한 경우(Fig. 4) 노화온도에 따른 전류값의 차이는 크게 나타나지 않았으며, 전류값이 기계적 인장변형률 0%에 비해 전체적으로 약간 낮게 측정되었다.

전기화학적 복합노화시험 전-후의 인장강도 및 파괴신장률을 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 인장강도와 파괴신장률은 노화 이후 급격하게 저하되었으며 온도가 높을수록 더 낮아지는 경향을 보이고 있다. 또한 기계적 인장변형률에 따른 효과는 60°C에서는 거의 나타나지 않았지만 80°C와 100°C에서는 인장강도와 파괴신장률이 낮게 측정되었다.

Fig. 7은 전기화학적 복합노화 전-후의 IRHD 표면경도를 나타낸 것이다. 노화 이후 경도는 전

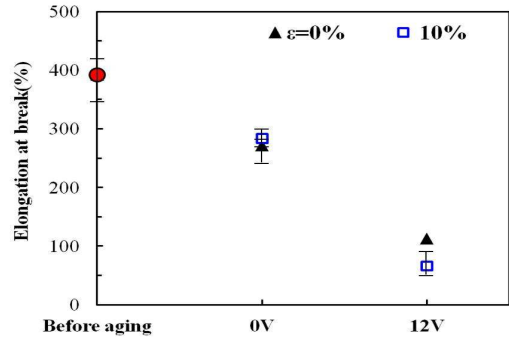


Fig. 9 Elongation at break of EPDM rubber before and after ECD test as a function of voltage conditions

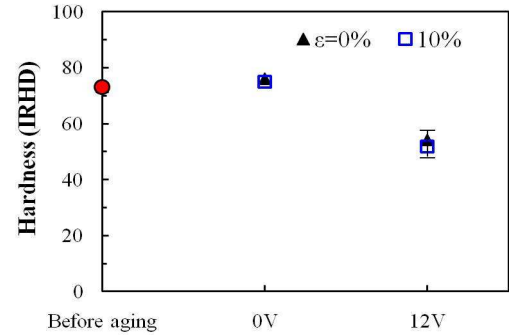


Fig. 10 IRHD hardness of EPDM rubber before and after ECD test as a function of voltage conditions

체적으로 낮아졌으며 온도가 증가함에 따라 경도값은 조금씩 낮아졌다. 기계적 인장변형률 10%를 가한 경우 각 온도조건에서 0%에 비해 경도값이 약간 낮게 측정되었다.

### 3.2 전압 조건의 효과

Fig. 8은 전압조건 0V와 12V에서 기계적 인장변형률 0%, 10%를 가하여 시험한 시험편의 인장강도를 나타낸 것이다. 전압을 가하지 않은 시험편(0V)은 노화전에 비해 인장강도가 조금 높아졌으며 이 때 기계적 인장변형률의 적용에 따른 차이는 거의 없었다. 이와 같은 인장강도의 상승은 전압이 부가되지 않은 상태에서 온도 100°C, 168시간의 유지로 노화시험전에 비해 황가교점이 다소 증가하여 경화가 진행되었기 때문으로 생각된다. 반면에 DC 12V의 전압을 가한 시험편은 인장강도가 급격하게 낮아졌으며 기계적 인장변형률 10%를 가한 시험편의 경우 더욱 낮게 측정되었다. 또한 DC 12V의 전압을 가한 시험편의 파괴신장률(Fig. 9)은 전압을 가하지 않은 경우(0V)에 비해 급격한 저하를 보이고 있으며, 기계적

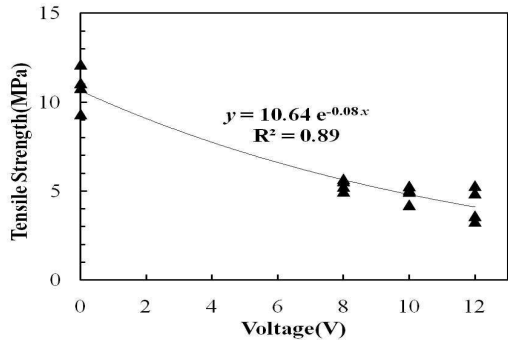


Fig. 11 Tensile strength of EPDM rubber after ECD test as a function of voltage conditions(  $\epsilon=0\%$  )

인장변형률 10%를 가한 시험편의 경우 더욱 낮게 측정되었다.

Fig. 10은 IRHD 표면경도 측정결과를 나타낸 것이다. 전압을 가하지 않은 시험편(0V)의 경우 노화전에 비해 경도값이 약간 상승하였으며 기계적 인장변형률에 따른 차이는 거의 없었다. 이 경우에 온도 100°C의 열노화로 황가교점의 증가로 인한 경화현상이 발생한 것이며, 경도값의 상승은 시험편에 냉각수가 침투하지 못했음을 가리킨다. 반면에 DC 12V의 전압을 가한 시험편의 표면경도는 노화전에 비해 현저히 낮아졌는데 이것은 시험편에 냉각수가 침투하면서 표면경도가 낮아진 것으로 보인다. 따라서 열 스트레스와 전기적 스트레스가 동시에 가해질 때 냉각수가 시험편에 침투하는 것으로 추정할 수 있다.

위의 결과에서 시험온도 100°C, 기계적 인장변형률 0% 조건에서 전압을 가하지 않은 경우(0V)와 전압을 가한 경우(8V, 10V, 12V)의 인장강도 시험 데이터를 Fig. 11에 나타내었다. 8V의 전압을 가한 시험편의 인장강도는 0V의 경우에 비해 약 51% 만큼 감소하였으며 전압이 높아질수록 더욱 낮아지고 있다. 전압(V) 조건에 따른 인장강도( $\sigma_{UTS}$ , MPa) 데이터의 상관관계를 알아보기 위해 회귀분석(regression analysis)한 결과 식 (1)과 같이 지수함수 관계가 나타남을 알 수 있다.

$$\sigma_{UTS} = 10.64e^{-0.08V} \quad (1)$$

이 식의 회귀계수(regression coefficient,  $R^2$ )는 0.89로서 지수함수적 관계가 긴밀하였음을 나타낸다. 시험편에 인장변형률 10%를 추가한 조건에

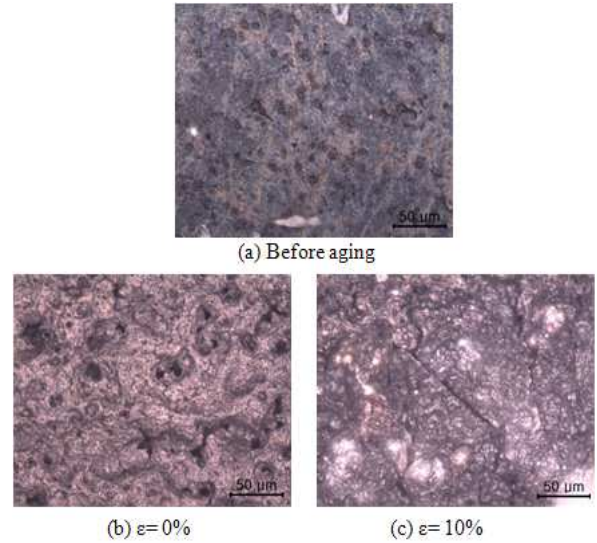


Fig. 12 Surface change of an EPDM rubber specimen after ECD test

서는 Fig. 8과 같이 인장강도의 열화가 더욱 진행되었으므로 식 (1)의 지수함수 계수가 0.08보다 훨씬 커서, 전압의 증가에 따라 더욱 가파르게 인장강도저하가 일어났다.

### 3.3 시편조직의 관찰결과

#### 3.3.1 시험편 표면의 노화거동

Fig. 12는 노화전과 기계적 인장변형률 0%, 10%를 가하여 노화시킨 시험편의 표면을 광학현미경( $\times 500$ )으로 관찰한 것이다. 노화전 시험편(Fig. 12(a))의 표면은 비교적 깨끗한 편이며 검은색으로 보이는 카본블랙이 전체적으로 균일하게 분포되어 있는 것을 관찰할 수 있었다. Fig. 12(b)는 기계적 인장변형률을 가하지 않고 노화시킨 시험편의 표면을 관찰한 것으로 표면이 울퉁불퉁하고 미소기공이 다수 관찰되었다. 이러한 미소기공들은 노화전 시험편의 표면(Fig. 12(a))과 비교해 볼 때 카본블랙 주위의 고무가 전기화학적 스트레스에 의해 약해져 시험 후 시험편의 초음파세척 과정에서 카본블랙이 빠져 나가며 생긴 것으로 생각된다. 또한 기계적 인장변형률 10%를 가한 시험편(Fig. 12(c))의 표면은 울퉁불퉁한 단차가 더욱 심해지면서 작은 크랙이 관찰 되었으며 미소기공은 잘 보이지 않았다. 이것은 카본블랙 주위의 고무가 약해지면서 생긴 미소기공이 인장 스트레스를 받으면서 크랙으로 생성된 것으로 보인다.

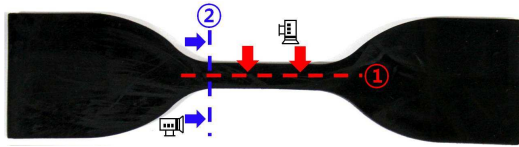


Fig. 13 Sectioning direction of an EPDM rubber specimen

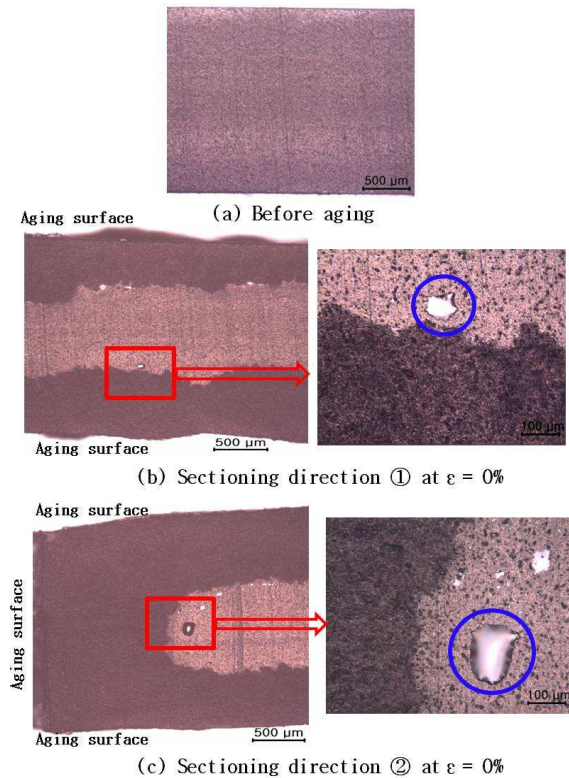


Fig. 14 Morphological changes of the section of an EPDM rubber specimen by an ECD test

3.3.2 시험편 내부의 노화거동

전기화학적 스트레스에 따른 시험편의 내부 변화를 관찰하기 위해 미세 절취용 절단기로 정밀하게 절단하여 광학현미경(×50, ×200)을 이용하여 관찰하였다. 시험편의 절단위치는 Fig. 13에 표시한 바와 같이 길이방향 ①과 두께방향 ②로 절단하였다. 노화전 시험편(Fig. 14(a))의 경우 절단면은 전체단면에 걸쳐 균일하였으며 절단기의 칼날이 지나간 자국이 선명하게 남아있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 검은 점으로 보이는 카본블랙이 비교적 균일하게 분포되어 있었다. 기계적 인장변형률 0%의 시험편이 길이방향(Fig. 14(b))과 두께방향(Fig. 14(c))으로 절단된 면을 보면 노화표피층이 명확하게 구분되어 있음을 알 수 있다. 이것은 전기화학적 스트레스를 받으면

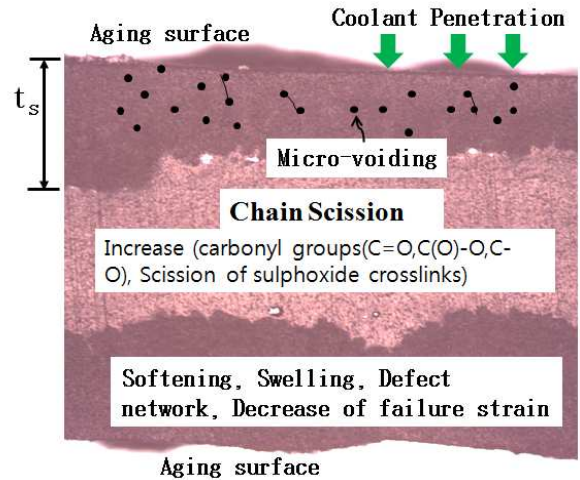


Fig. 15 Schematic failure mechanisms of an EPDM rubber subjected to ECD

서 시험편 표피부에 있던 카본블랙 주위의 고무가 약해지면서 생긴 미소기공과, 전기화학적 반응으로 황가교가 절단되어 생긴 미세공간으로 냉각수가 침투하여 노화표피층을 형성한 것으로 보인다. 내부에 노화되지 않은 곳은 절단기의 칼날이 지나간 자국이 선명하게 남아 있으며 카본블랙의 분산 정도가 노화전 시험편의 내면과 비슷한 형상을 유지하고 있었지만 노화된 표피영역은 냉각수 침투로 인해 연화되어 절단기의 칼날 자국이 남지 않았다. Fig. 14(b),(c)에서 우측 사진의 원으로 표시한 부분은 시험편 내부에 침투했던 냉각수가 절단중에 외부로 나와 부착된 것으로 보인다. 이것은 시험편을 상온에 방치하고 24시간 정도 지난 후 관찰해보면 공기중에 증발되어 크기가 많이 작아지는 것을 확인함으로써 냉각수임을 알 수 있었다.

4. 고장메커니즘

전기화학적 노화 전-후의 기계적 물성 변화, 표면 및 내부 관찰을 종합 분석한 결과 Fig. 15에 도식적으로 나타낸 바와 같이 고무의 표면부와 내부에 걸쳐서 고분자사슬간의 황가교 절단(scission)과 카본블랙의 연화에 따라 생기는 미소기공부에 냉각수가 침투하여 고무재질의 연화(softening)가 진행하였던 것으로 생각된다. 고무의 표피층이 내부보다 더 많은 미소기공이 생성되어 있어서 냉각수를 많이 흡수하고 있으므로 더 큰 결합밀도를 가질 것이며 또한 표피층뿐만 아니라

내부에 이르기까지 부분적으로 많은 망상 미세결함(defect network)이 형성된 상태에 있게 되므로, 고무에 인장 스트레스가 가해질 경우 이들 미세결함에서 크랙이 발생하고 이 크랙이 합체(coalescence)함으로써 거시적인 파단을 보다 일찍 유발시켜 고무 시험편이 끊어지게 되는 것이다.

전기화학적 노화는 시험온도와 전압이 높을수록, 기계적 인장변형률이 클수록 노화정도가 가속되는 것을 알 수 있다. 또한 냉각수 종류에 따른 영향<sup>(10)</sup>이 크게 차이나는 것으로 보아 냉각수에 사용되는 부동액의 첨가제로 인해 전기화학적 노화가 크게 가속됨을 알 수 있다.

광학현미경 관찰을 위한 시험편의 초음파 세척 과정에서 시험편의 표면과 내부에 걸쳐 카본블랙이 빠져나간 자리에 미소기공이 생기는 것으로 보아 전기화학적 스트레스에 의해 카본블랙 주위의 계면부가 상당히 약해졌음을 알 수 있다. 이것은 카본블랙의 종류와 함량에 따라 전기화학적 스트레스에 대한 저항성이 차이나는 것을 보인 Lucchi<sup>(11)</sup>의 연구결과와 일치한다. 따라서 냉각기 고무호스용 EPDM 고무의 전기화학적 저항성을 높이기 위해서는 카본블랙의 종류와 함량을 적절히 조절할 필요가 있으며 내 ECD성을 개선시킨 카본블랙의 개발이 요구된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 기계적 열적 부하를 동시에 가할 수 있는 전기화학적 복합노화 시험 장치를 이용해 EPDM 고무 시험편의 전기화학적 노화거동을 분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 노화 온도가 높아질수록 전류값은 낮게 측정되었으며 기계적 인장변형률을 가한 경우 전체적으로 전류값이 더욱 낮게 측정되었다.

(2) 전압을 가하지 않은 시험편(0V)의 경우 인장강도와 IRHD 표면경도는 노화전에 비해 약간 상승하였으며 파괴신장률은 약간 감소하였다. 이는 냉각수에 침지된 상태에서 기계적 스트레스와 열 스트레스만을 받았기 때문이며 선행연구<sup>(7,8)</sup>의 열가속 산소노화의 결과와 유사하였다.

(3) 광학현미경을 이용하여 표면과 내부를 관찰한 결과, 초음파 세척한 시험편의 표면과 내부에 걸쳐 카본블랙이 빠져나간 자리에 다수의 미소기공이 형성된 것을 확인하였으며, 이는 전기화학

적 스트레스로 인해 카본블랙 주위의 계면부가 상당히 약해져 결합력이 떨어진 것을 의미한다.

(4) 고무 시험편의 내부에서는 냉각수가 침투하면서 형성된 노화층이 선명하게 관찰되었다. 이는 고분자 사슬간의 황가교 절단이 많이 일어나면서 생긴 미세공간에 냉각수가 침투하였음을 가리킨다. 즉, 노화층 영역은 카본블랙 주위 고무의 취약화와 고무기질내의 황가교 절단으로 냉각수가 침투하여 칼날 절단시 생기는 자국이 없는 것으로 확인되었다.

## 후 기

이 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2011-0021764)

## 참고문헌

- (1) 2001, "Coolant Hose for Automotive Radiator Guide Book RS M0004," Korean Agency for Technology and Standards.
- (2) 2001, "Coolant Hose for Automotive Radiator Reliability Standards RS M0004," Korean Agency for Technology and Standards.
- (3) 2000, Test Methods for Evaluating the Electrochemical Testistance of Coolant System Hoses and Materials, SAE J1684.
- (4) Vroomen, G. and Verhoef, H., 1994, "Electrochemical Degradation of EPDM Cooling Water Hoses," *KGK Kautschuk Gummi Kunststoff*, Vol. 48, pp. 749~753.
- (5) Vroomen, G. L. M., Lievens, S. S. and Maes, J. P., 1999, "Influence of Engine Coolant Composition on the Electrochemical Degradation Behavior of EPDM Radiator Hoses," *Engine Coolant Testing: Fourth Volume*, ASTM STP 1335, pp. 183~195.
- (6) Kwak, S. B., Choi, N. S., Kang, B. S. and Shin, S. M., 2005, "Reliability Analysis and Failure Mechanisms of Coolant Rubber Hose Materials for Automotive Radiator," *Transactions of KSAE*, Vol. 13, No. 5, pp. 152~162.
- (7) Kwak, S. B., Choi, N. S., Choi, Y. J. and Shin, S. M., 2005, "Nondestructive Characterization of Degradation of EPDM Rubber for Automotive Radiator Hoses," *Journal of the Korean Society*

- for Nondestructive Testing*, Vol. 25, No. 5, pp. 368~376.
- (8) Kwak, S. B., Choi, N. S., Shin, S. M. and Shin, W. G., 2007, "Degradation Behavior and Micro-hardness Analysis of a Coolant Rubber Hose for Automotive Radiator," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 31, No. 9, pp. 915~923.
- (9) Kwak, S. B., Choi, N. S. and Kim, J. K., 2009, "Cross-link Density Measurement and Thermal Oxidative Degradation Analysis of a Carbon Black Compounded EPDM Rubber Hose," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 22, No. 3, pp. 35~43.
- (10) Kwak, S. B., Seo, B. S. and Choi, N. S., 2011, "An Electro-chemical Combined-stress Degradation Test of Rubber for Automotive Radiator Hoses," *Transactions of KSAE*, Vol. 19, No. 4, pp. 107~113.
- (11) Maurizio Lucchi, 2000, "New CABOT Carbon Blacks for Improved Electro-chemical Degradation Resistance," *IRC 2000 Rubber Conference*.