

論文

자동차 유압브레이크용 고무호스의 내구성 시험 및 미세손상에 관한 연구

곽승범*, 최낙삼**+, 임영한***

Durability Test and Micro-Damage Formation of Rubber Hose for Automotive Hydraulic Brake

Seung-Bum Kwak*, Nak-Sam Choi**+, Young-Han Lim***

ABSTRACT

Rubber hose assembly for automotive hydraulic brake during operation is subject to combined stresses of cyclic pressure, cyclic bending and torsion as well as thermal load. The rubber hose is composed of ethylene-propylene diene monomer(EPDM) rubber layers reinforced by polyvinyl acetate(PVA) braided fabrics. A durability tester with loading rigs for inducing the above cyclic stresses was used to investigate failure mechanisms in the rubber hose assembly. Failure examination was performed at every 100 thousands cycles of bending and torsion. Hose samples were sectioned with a diamond-wheel cutter and then polished. The polished surface was observed by optical microscope and scanning electron microscope (SEM). Some interfacial delamination with a length of about 1mm along the interface between EPDM rubber and PVA fabrics was shown at the test cycles of 400,000. The delamination induced some cracking into the outer rubber skin layer to leading the final rupture of the hose.

초 록

자동차용 유압브레이크 고무호스 어셈블리 제품은 자동차에 장착되어 실제로 사용 중에 가압, 굽힘, 비틀림, 열하중 등의 복합적인 스트레스를 받는다. 고무호스의 재질은 EPDM(ethylene-propylene diene monomer)고무와 PVA(polyvinyl acetate)섬유 보강층 그리고 중간고무로 NR(natural rubber)고무가 사용되고 있다. 고무호스 어셈블리 제품의 내구성과 파괴 메커니즘을 조사하기 위해 굽힘과 비틀림의 반복하중 사이클 수가 10만, 20만, 30만, 40만, 최종파열 사이클 수까지 되도록 시험하였다. 유압브레이크 고무호스의 초기크랙 발생을 알아보기 위해 제품 시험편을 다이아몬드 휠커터를 이용하여 수직 절단하여 폴리싱 한 후 광학현미경과 주사형 전자현미경(SEM)으로 단면을 관찰하였다. 40만 사이클의 피로하중을 받은 시험편을 보면 외면고무와 PVA섬유 사이의 계면을 따라 길이 1mm의 층간분리가 일어났으며, 이러한 손상은 외면고무의 표피층으로 균열을 진전시켜 고무호스를 최종적으로 찢어지게 하는 것이다.

Key Words : 유압브레이크 호스(Hydraulic brake hose), 열하중(Thermal-load), 층간분리(Interfacial delamination), 주사형 전자현미경(SEM : scanning electron microscope), 광학현미경(Optical microscope)

1. 서 론

자동차 유압브레이크용 고무호스는 캘리퍼(Caliper)와 회전

디스크 사이에 마찰력을 유발하는 작동유체(Brake Oil)의 연결 통로이다. 전륜 브레이크호스는 바퀴의 상하운동(Bumping), 조타(Cornering), 그리고 제동(Braking) 시 캘리퍼(Caliper)와의

* 한양대학교 기계공학과

**+ 한양대학교 기계정보경영공학부(E-mail:nschoi@hanyang.ac.kr)

*** 화승 R&A(주)

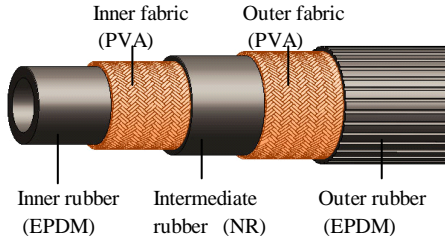


Fig. 1 Structure of rubber hose for automotive hydraulic brake.

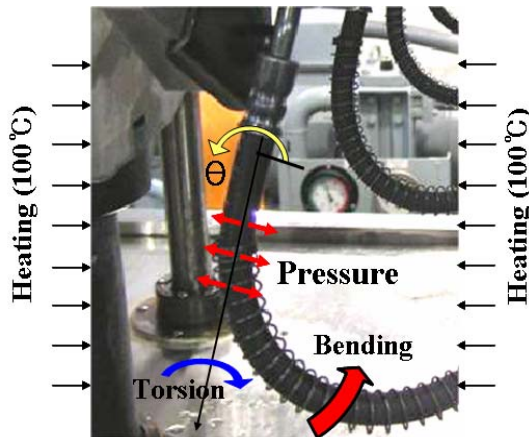


Fig. 2 Various stresses in the hydraulic brake hose.

상대변위가 발생하게 된다[1]. 이로 인하여 브레이크호스에서 굽힘, 비틀림, 인장 등의 복합적인 하중에 기인한 변형과 응력이 발생하게 되며, 이로 인해 피로파괴(Fatigue Fracture)가 발생한다. 이런 배경하에 자동차 유압브레이크용 고무호스 어셈블리의 신뢰성 평가기준 RS R 0043[2]이 2004년도에 기술표준원 규정으로 제정된바 있다.

자동차 유압브레이크용 고무호스의 구조는 Fig.1에 나타낸 바와 같이 내면고무와 외면고무에 EPDM (ethylene-propylene diene monomer)고무를 사용하고 있으며, 보강층으로 편조 1층, 편조 2층이 있다. 편조 1층과 편조 2층 사이에는 중간고무로 천연고무(NR)를 삽입하여 경계를 이룬다. EPDM고무는 불포화도가 낮아 산화나 오존에 대한 저항성이 매우 강하고 고온에서도 안정한 절연특성을 나타내며 비극성구조로서 낮은 유전 손실값을 갖는다[3-5].

본 연구에서는 자동차 유압브레이크용 고무호스 제품의 내구성 시험을 위해 자동차의 운전중에 가해지는 가압, 굽힘, 비틀림, 열하중이 반복되는 시험조건 하에서 국내 자동차 완성체 제조 회사의 실차 상당 액압 내구성시험규격에 따라 반복 피로시험을 하였다. 이를 통해 고무호스 완제품의 응력집중에 따른 취약부위를 검토하고 이 부위의 내부에서의 균열 발생 및 전파 메커니즘을 구하고자 하였다.

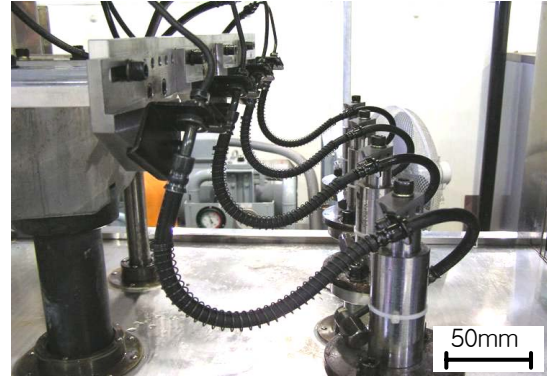


Fig. 3 Durability tester of the rubber hose assembly for automotive hydraulic brake.

Table 1 Dimensions and materials of the brake hose

	mm	Material
Inner diameter of brake hose	3.4	
Outer diameter of brake hose	10.5	
Thickness of inner rubber layer	1.27	EPDM
Thickness of outer rubber layer	1.25	EPDM
Outer diameter of inner fabric	6.5	PVA
Outer diameter of outer fabric	8.0	PVA

2. 실험 방법

2.1 시험편의 선정 및 내구성시험

자동차 유압브레이크용 고무호스 어셈블리는 화승 R&A (주)를 통해 입수하였다. Table 1에 본 연구에 사용된 유압브레이크용 고무호스의 치수와 재질을 나타내었다. 이 고무호스는 자동차에 장착되어 실제로 사용중에 가압, 굽힘, 비틀림, 열하중을 함께 받게 되는데, 특히 금속 고정구로 압착되어 있는 부위(Fig. 2의 좌표축의 원점 부근)에서 굽힘모멘트와 비틀림모멘트가 최대조합하중으로 작용할 것으로 생각된다. 이와 같이 복합하중을 받는 유압브레이크용 고무호스 완제품의 내구성 시험을 위해 Fig. 3과 같은 시험 장치를 이용하였다. 시험조건은 실제로 자동차에 사용되는(미국 연방자동차 안전규격(FMVSS No.116)을 합격한 극동제원(주)회사의 DOT-4제품) 브레이크액을 사용하였으며, 본 내구성 시험기 전체가 항온조 내에 있도록 하여 30분 이상 주변 온도 100℃, 브레이크액 온도 100℃로 유지한 후에 시험하였다. 액압은 0~9.8MPa(0~100 kgf/cm²)로하며 액압 사이클은 42cycle/min으로 Fig. 4와 같다. 그리고 FULL BUMP/REBOUND의 80%의 스트로크와 FULL TURN의 80%의 조향각으로 Fig. 5와 같이 100cycle/min의 속도로 동시에 가진한다. 브레이크 호스 어셈블리의 장착은 실차

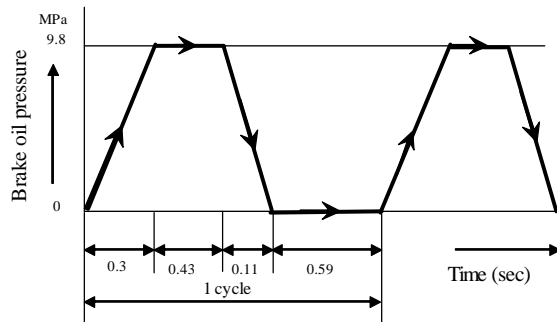


Fig. 4 Brake oil pressure cycle

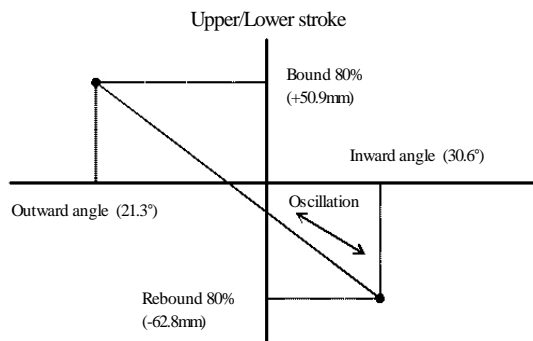


Fig. 5 Mechanical oscillation cycles

Table 2 Durability test stage of the rubber hose assembly

Test stage	Loading cycles of bending and torsion	Loading cycles of hydraulic pressure	Remark
A0	—	—	Before test
A1	100,000	42,000	—
A2	200,000	84,000	—
A3	300,000	126,000	—
A4	400,000	168,000	—
Af	611,790	256,952	Final rupture

장착상태를 따른다. 이와 같은 시험방법에 따라 보강사 또는 내면 고무로부터 균열이 발생하여 호스가 파열될 때까지의 가진회수를 기록하며 내구시험을 수행하였다. 시험에 사용한 시험편의 개수는 각 조건당 2개씩 이다. 본 연구에서 사용한 시험방법은 자동차 회사의 실차 상당 액압 내구 시험법에 따른 것이다. Table 2는 노화 시험단계에 따라 고무호스를 분류한 것이다. 이 고무호스제품의 내구성 허용 사이클 수가 370,000 사이클임(실제 환경에서 약 10만km의 주행거리에 해당하는 수명 사이클로 간주함)을 감안하여, 굽힘과 비틀림의 조합적인 반복하중 사이클수가 무부하 제품, 10만, 20만, 30만, 40만, 최종파열 사이클 수까지 각각 시험한 호스제품에 대해 거시적 및 미시적인 파손분석을 하였다.

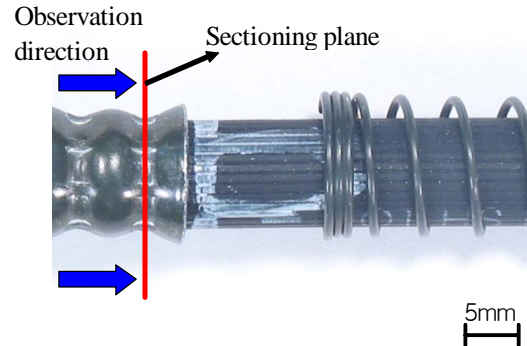


Fig. 6 Sectioning the rubber hose assembly for failure observation.



Fig. 7 Fractured part of the rubber hose assembly.

2.2 유압브레이크 고무호스의 절단 및 관찰

유압브레이크 고무호스의 초기크랙 발생을 알아보기 위하여 피로 시험조건 A0 ~ A4를 받은 제품 시험편을 수직 절단하여 내면의 구조변화를 관찰하였다. 파열제품(Af)의 파열 위치로부터 고무호스 끝단의 금속 고정구 부위에서 초기크랙이 발생했음을 추정할 수 있었으므로, 금속고정구의 조임 부위(Fig. 6)를 다이아몬드 휠커터를 이용하여 정밀절단한 후 시험편을 마운팅 처리하여 연마 및 폴리싱한 후 광학현미경으로 호스단면을 관찰하였다. 관찰부위는 Fig. 6의 절단선으로부터 약 0.5mm 오른 쪽에 위치한 호스부위 단면으로 일정한 위치가 되도록 정하였다. 또한 파열제품의 파열된 부위(Fig. 7)를 절취하여 주사형 전자현미경(SEM)으로 관찰하여 파단면을 정밀 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 파열제품 파단면의 정밀 관찰 결과

Fig. 8의 파열제품의 SEM사진과 같이 편조 2층과 외면고무가 분리되면서 외면고무 안쪽에 초기크랙이 성장하고 이것이 점차 외곽 쪽으로 전파함으로써 외면고무층이 찢어지게 된다.

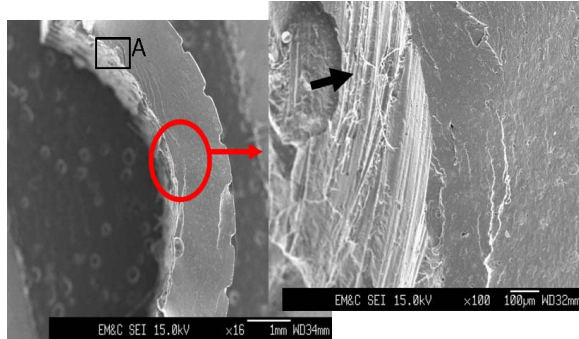


Fig. 8 SEM micrograph of the fractured region in Fig. 7.

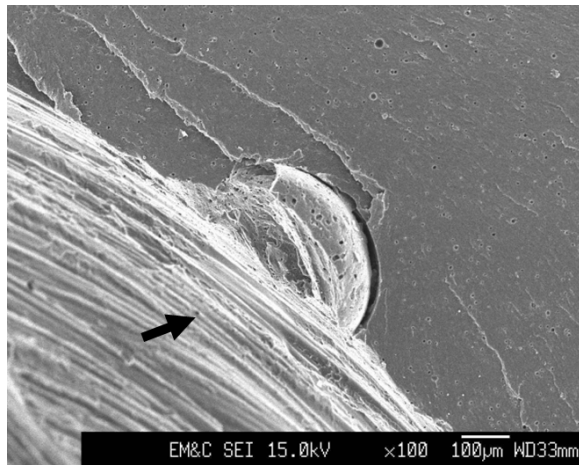


Fig. 9 Enlarged micrograph of zone 'A' in Fig. 8

Fig. 9는 Fig. 8에서 'A' 부위를 확대한 사진이다. 외면고무층 내에 볼록한 타원체로 튀어나온 부위는 편조 1층과 편조 2층 사이의 중간층의 NR고무가 편조 2층의 틈사이로 빠져나오면서 형성된 영역으로 적지 않게 생성되어 있었으며, 이 부위의 파면은 비교적 연성적인 파괴를 보여주었고 PVA편조 섬유층의 표면형상이 잘 드러나 있어(Fig. 8, 9의 화살표) EPDM고무모재-PVA섬유 사이의 계면간 접착파괴(adhesive fracture)를 보여주고 있다. 이는 고무모재-PVA섬유 사이의 계면강도가 고무층 자체보다 낮아서 층간박리가 진행했음을 의미한다. 또한, Fig. 9에서와 같이 타원체 상태의 NR고무의 표면이 깨끗하게 박리하고 있으므로 외면 EPDM고무와 중간층 NR고무의 경계면에서도 계면강도가 약했음을 보여 준다. 따라서 이 유압브레이크 고무호스 완제품의 파열수명을 현저히 높이기 위해서는 각 층간의 계면접합을 보다 강하게 처리해야 할 것이다.

3.2 고무호스의 내부단면 관찰결과

Fig. 10과 Fig. 11은 각각 유압브레이크 고무호스의 내구시험

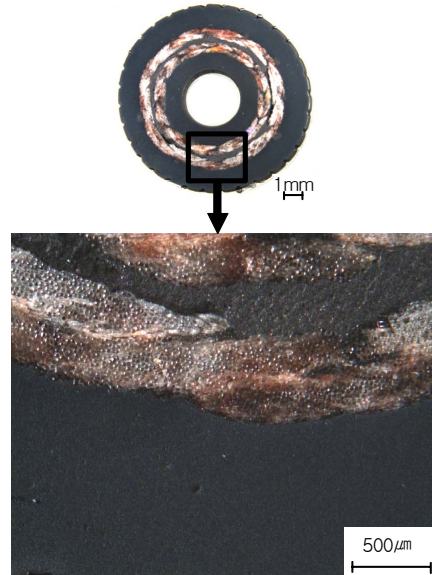


Fig. 10 Photographs of the sectioned surface of the rubber hose before the test.

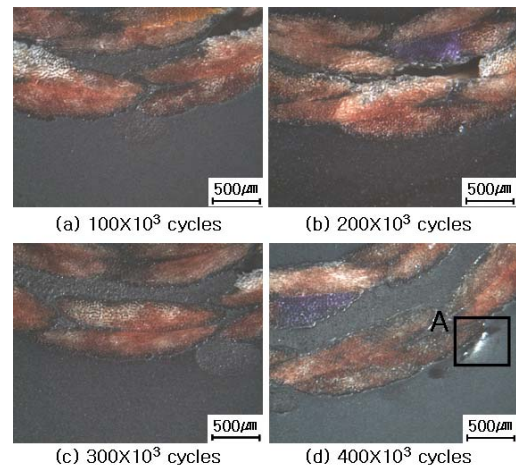


Fig. 11 Photographs of the sectioned surface of the rubber hose after the durability test stage (A1, A2, A3, A4) of Table 1.

전후의 절단면 사진이다. 이 사진들은 금속 고정구 압착부위 절단면을 연마한 후 광학현미경을 이용하여 관찰한 것으로, 균열 발생이 예상되는 부위(Fig. 6 고무호스의 절단 위치)의 단면을 찍은 것이다. 앞에서 설명한 바와 같이 본 고무호스는 내면고무, 편조 1층, 중간고무, 편조 2층, 외면고무로 구성되어 있음을 확인할 수 있다. 사진에서 외층과 내층의 EPDM고무와 중간층의 NR고무는 고무재료의 특성이 서로 다르기 때문에 색이 약간 다른 명도로 나타났다. 중간층 고무는 다른 층에 비해 두께가 매우 얇으며 일부에서는 고무가 없는 곳도 관찰된다.

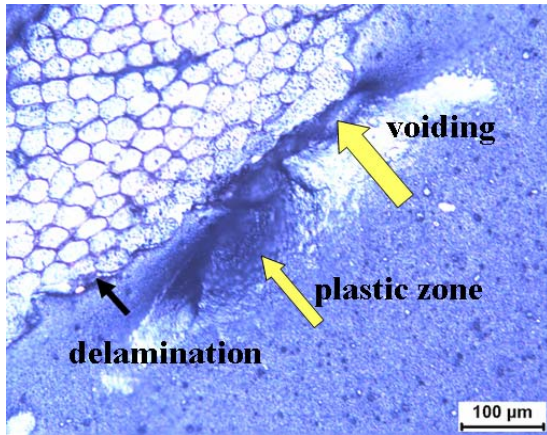


Fig. 12 Enlarged SEM micrograph of the initial damage formation of the region A in Fig. 11(d).

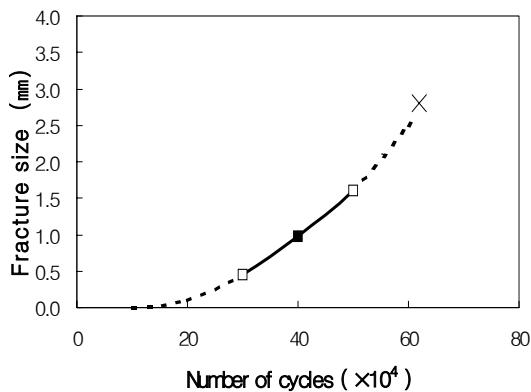


Fig. 13 Damage zone size versus the number of loading cycles of the rubber hose assembly.

전체적으로 유압브레이크 고무호스의 단면관찰 결과, 굽힘과 비틀림의 기계적 반복하중이 100,000cycle, 200,000cycle, 300,000cycle(Fig. 9(a)~(c))까지는 균열형성이 명확히 보이지 않았으며(본 연구자가 설정한 Fig. 4의 절단위치에서는 균열성장이 실제로는 금속고정구의 가압에 의해 억제되어 현재의 관찰로서는 잘 보이지 않았을 가능성도 배제할 수 없다), 내구시험 전의 시제품 단면과 비슷한 모양을 보이고 있다.

Fig. 11(d)와 같이 400,000cycle의 기계적 피로하중을 받은 고무호스의 절단면을 보면 우측에 형성된 초기손상 모습이 보인다(Fig. 11(d)의 A). 손상부분을 좀 더 고배율로 확대하여 보면(Fig. 12) 편조 2층과 외면고무 사이에서 층간분리(interfacial delamination)가 일어났으며 한편으로 외면고무 속으로 균열진전이 시작하고 있음을 알 수 있다. 본 사진에서 보이는 균열길이는 약 1mm였다. Fig. 8과 Fig. 9의 파단면관찰 결과와 연계하여 고찰할 때 위와 같이 형성된 손상은 외면고무와 PVA 섬유

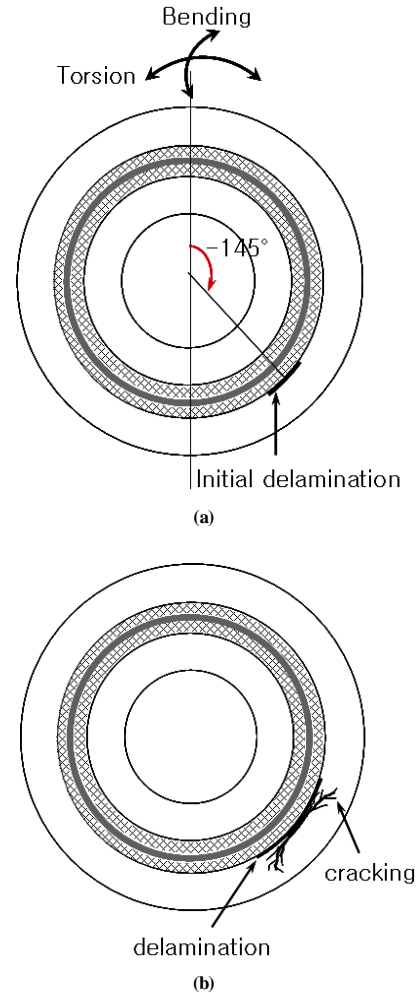


Fig. 14 Failure mechanism of rubber hose assembly for automotive hydraulic brake.

사이의 계면을 따라 층간박리(adhesive delamination) 형태로 진전하면서 다른 한편으로 외면고무 속으로 균열방향을 분지(crack branching)시켜 최종 파열을 일으켰던 것으로 생각된다.

이와 같이 형성된 초기균열은 처음 예상했던 금속고정구 압착 부위에서 발생한다는 사실을 확인 하였으나 그 크기가 1mm 정도로 상당히 크게 존재하는 것으로 보아 400,000cycle 이전 단계에서 이미 초기균열이 발생했을 것이므로 300,000cycle과 400,000cycle 사이의 단계에서 최초의 층간박리가 형성되었을 것으로 추정된다.

Fig. 13은 내구시험 사이클 수에 따른 유압브레이크 호스의 손상크기 성장을 위의 관찰 결과를 기반으로 나타낸 것이다. 고무호스 균열의 진전속도는 40만 사이클수를 전후로 하여 커졌을 것이며, 부하사이클이 커짐에 따라 초기 손상은 Fig. 2

의 위치기준에서 약 $\theta = -145^\circ$ 부근에서 발생하여 점차 계면박리나 외피층의 고무속으로 진전하여 최종 파열에 이른 것이다.

3.3 고무호스의 파괴메커니즘

브레이크 고무호스의 파열 제품과 내구성시험 후의 절단면을 관찰 분석한 결과를 종합하여 브레이크 고무호스의 파괴 메커니즘을 Fig. 14와 같이 도식적으로 나타내었다. 굽힘모멘트와 비틀림모멘트가 최대조합하중으로 작용하는 $\theta = -145^\circ$ 부근에서, 금속 고정구가 최대로 압착하고 있는 근처 부위에서 Fig. 14(a)와 같이 편조 2층과 외면고무 사이에서 층간분리와 함께 미세 기공이 발생하게 된다. 하중이 계속해서 반복 작용함에 따라 Fig. 14(b)와 같이 편조 2층과 외면고무 사이의 층간분리는 점차 넓게 확대되고 외면고무에 생성된 초기의 미세 크랙으로부터 외면고무 바깥쪽으로 균열이 진전되어 최종적으로 외면고무가 찢어지면서 브레이크 고무호스가 파열되는 것이다.

4. 결 론

본 연구에 사용된 유압브레이크용 고무호스 어셈블리제품은 기준 내구한도 370,000사이클을 95% 신뢰도로 초과하고 있어 현실적으로 즉시 해결해야 할 문제로 대두되고 있지 않지만, 기준 내구한도 근처에서 내부적으로는 크기 1mm 정도의 초기 손상이 금속 고정구의 압착부위 약 $\theta = -145^\circ$ 부근에서 발생하여 점차 계면박리나 외피층의 고무속으로 진전하고 있었다. 즉, 외면고무와 PVA섬유 사이의 계면을 따라 층간박리(adhesive delamination) 형태로 진전하면서 다른 한편으로 외면고무 속으로 균열 분지(crack branching)가 일어나 최종 파열을 일으키고 있던 것이다. 이와 같은 손상의 형성은 겨울철의 저온 환경에서 브레이크 파열을 가속화하여 수명을 크게 감소시킬 수 있는 위험성이 있다.

후 기

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국과학진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-041-D00007)

참고문헌

- 1) S. G. Jeon, J. G. Choi, J. H. Kim, H. S. Kim, C. S. Woo, "Motion Analysis of Brake Hose According to

Vehicle Steering," *KSAE* 06-S0151, 2006, pp. 947-952.

- 2) Hose assemblies for automotive hydraulic brake reliability standards RS R 0043, *Korean Agency for Technology and Standards*, 2004.
- 3) K. J. Lee, H. J. Bae, S. T. No, W. T. Kim, "Studies on the Mechanical Properties of Silane Crosslinked EPDM," *Polymer*, Vol. 11, No.6, 1987, pp. 547-556.
- 4) Yeong-Soon Gal, "EPDM Rubber and Its Applications," *Polymer Science and Technology*, Vol. 109, No. 3, 1999, pp. 325-333.
- 5) J. K. Kim, H. K. Lee, "Study on Manufacturing and Characteristics of Silicone/EPDM Rubber Blend," *Polymer*, Vol. 25, No. 3, 2001, pp. 406-413.