

# 자동차용 head lamp의 수밀원인 분석

조영진<sup>†</sup> · 전종수<sup>\*</sup>

## Failure analysis on the phenomenon of water condensing of automotive head lamp assembly

YoungJin Cho, JongSoo Jeon

**Key Words:** Water Condensing Failure(수밀고장), Failure Anaiysis(고장분석), Hotmelt Degradation(핫멜트 열화), Functional Group(기능기), Void Generation(공극발생)

### Abstract

In this study, we try to find the root cause of water condensing failures in a headlamp using chemical and mechanical analysis. Through the surface inspection by OM, SEM and CT, it was found that water infiltrate into the headlamp through hotmelt adhesive debonding part caused by adhesion force degradation and poor quality. IR spectra shows that adhesion force degradation are characterized by increase of some functional group(1742, 1710, 1649, 1016). Through the ESPI measurement, it is turned out that bonding structural change by thermal expansion and degradation of adhesive can be the cause of void generation. So it is recommended that cooling passage and the bonding part should be redesigned to give a guarantee of less thermal stress and high adhesion quality.

### 1. 서 론

최근의 헤드램프 모듈은 단순히 정해진 광량만을 수동적으로 공급하는 역할에서 벗어나 운전자들이 원하는대로 조명환경을 제어할 수 있도록 하기 위하여 능동적 전자제어시스템화 되어가고 있다. 헤드램프 모듈은 운전자에게 안전한 주행환경을 보장하기 위해 광환경을 제공하는 역할을 하는 부품으로서 일반적으로 한번 장착되면 특별한 이유가(사고, 광특성 저하, 튜닝목적 등) 없는 한 소모품만 교체하고 차량의 수명과 동일하게 사용되는 부품이다.

글로벌 경쟁이 심해지며 저렴하면서도 오래

고장없이 사용할 수 있는 제품에 대한 시장요구와 더불어 자동차 분야의 급격한 전장화가 진행됨에 따라 자동차 부품제조사들은 고내구성제품을 저렴하게 생산하기 위한 핵심설계기술의 확보를 위해 많은 연구가 수행되고 있다.

헤드램프 모듈을 제조하기 위한 핵심기술은 크게 배광설계기술, 내열설계기술 및 내진/수밀설계기술로 구분할 수 있다. 그러나 광원자체가 변경되거나 차종별로 서로 다른 형상의 모듈이 채용되는 관계로 대부분 연구는 더욱 엄격해진 법규를 준수하고 광효율을 높이기 위한 광원자체의 영향평거나 광원의 변화에 따른 배광설계기술개발 분야에 거의 집중되고 있을 뿐<sup>[1-3]</sup>, 고내구성을 보장하기 위한 고장원인규명과 개선에 관한 연구들은 거의 수행되지 못하고 있다.

대부분의 헤드램프 모듈에서 지속적으로 발생되고 있는 필드불량을 Table 1에 정리하였다. 비록 고장 발생건수가 그리 많지 않아 막대한 비용

---

<sup>†</sup> 한양대학교 신뢰성분석연구센터(RARC)

E-mail : me2jin@hanafos.com

TEL : (02)2282-1687 FAX : (02)2220-0218

<sup>\*</sup> 한양대학교 신뢰성분석연구센터(RARC)

---

**Table 1** Field failure mode of head lamp

Failure mode	Proportion(%)
Humidity	18.20
Water condensing	39.9
Bulb failure	13.40
Specular surface delamination	5.60
ETC	24.0

증대를 가져오지는 않지만 기업의 이미지 자체를 악화시킬 수 있는 요인이 될 가능성은 매우 높음으로 시장에서 발생하는 고장을 개선할 수 있는 방안에 관한 연구들도 병행되어 수행되어야 할 것이다.

이렇게 소수 발생하는 고장들은 대부분 품질관리 측면이 아니라 분석과 재현시험을 통해 고장의 원인을 규명하는 측면으로 접근해야만 근본적으로 제거할 수 있다. 필드불량 중 램프에 습기가 차거나 나아가서 물이 고이는 고장현상은 발생비율도 높고, 시기에 무관하게 차종에 따라서 완전히 다른 고장양상으로 지속적으로 발생되고 있음에도 불구하고 명확한 원인규명이 이루어지지 못해 여전히 발생되고 있는 실정이다.

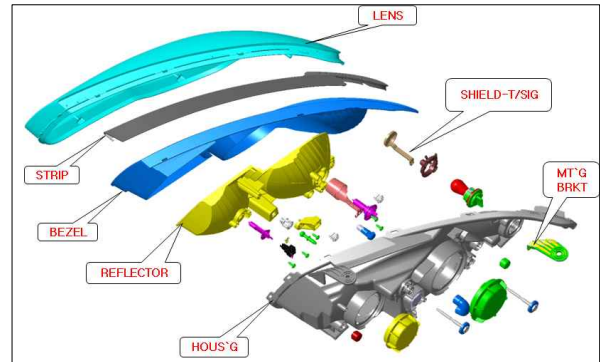
따라서 본 연구에서는 수밀고장이 발생한 헤드 램프 모듈의 고장원인을 분석 및 재현시험을 통하여 규명하고, 이러한 고장을 개선할 수 있는 신뢰성향상대책을 제안해 보고자 하였다.

## 2. 헤드램프의 구조 및 시장고품현황

연구 대상인 자동차 헤드램프 어셈블리의 구성을 Fig. 1에 나타내었다. 전조등은 크게 광학적 기능을 수행하기 위한 구조와 외부로 부터의 오염을 방지하기 위한 밀봉구조 및 전원을 공급하기 위한 배선 및 커넥터로 구성되어있다. 구조에서 알 수 있듯이 고품 내부에 다량의 수분이 있다는 것은 임의의 경로로 외부에서 수분이 유입되었다고 판단할 수 밖에 없다.

수밀고장이 발생한 경로를 파악하기 위하여 시장에서 발생한 고품을 수집하였으며 이 중 수밀고장이 심각히 발생한 고품을 Fig. 2에 나타내었다. 간단한 가압침수시험을 통하여 수밀고장 발생경로를 파악하였다.

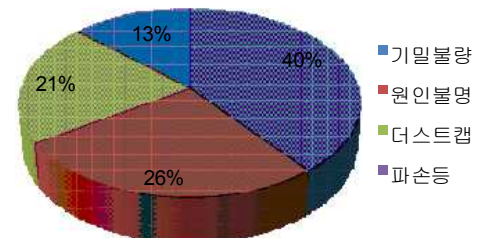
수밀고장 발생경로를 파악한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 고장을 유발시킬 가능성이 있는 누



**Fig. 1** The configuration of automotive head lamp assembly



**Fig. 2** Water condensing failure samples



**Fig. 3** The major cause of leakage failures

설이 발생하는 곳은 크게 접착부, 더스트 캡, 파손 지점 혹은 특정한 누설경로를 알 수 없는 경우로 나타났다. 그림에서 볼 수 있듯이 누설은 약 40% 정도가 기밀부에서 발생하고 그 다음으로는 뚜렷한 침입경로를 찾을 수 없는 호흡구를 통해 발생하는 것으로 나타났다. 다만 호흡구로 인한 수밀불량은 차량모델별로 변경되는 모듈의 발열량 및 형상과 호흡구의 크기 및 위치 등에 따라 매우 유동적인 것이므로, 본 연구에서는 상대적으로 발생 가능성도 상대적으로 높고 대부분의 차량에서 공통적으로 발생하는 접착부 누설현상의 원인 규명에 중점을 두었다.

## 3. 밀봉불량에 의한 수밀고장분석

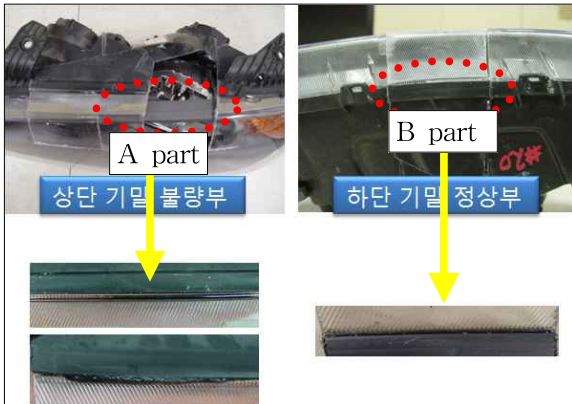


Fig. 4 Examine parts for investigating the cause of water condensing failure

헤드램프는 밸브에서 발생된 광이 반사판을 통해 모여진 후 전면으로 통과하는 PC 재질의 렌즈부와 광을 발생시키고 방향을 조정하기 위한 PP 재질의 하우징부로 구성되어 있다. 접착제는 두 재질을 연결하는 역할과 외부의 이물질이 결합부를 통하여 내부로 유입되는 것을 차단하는 역할을 한다. 접착제로는 상온에서도 완전 경화되지 않고 신축적인 상태를 유지함으로써 진동에 의한  $\mu\text{m}$  수준의 변형에 대처가 가능한 핫멜트 타입의 에폭시가 주로 이용된다. 일반적으로 접착 성능 향상처리를 하지 않은 PC재의 경우 접착 성능이 떨어지며 PP재는 특별한 처리 없이도 우수한 접착성을 보인다. 따라서 헤드램프 밀봉부는 항상 접착 문제가 발생할 가능성이 상존하고 있는 구조라고 할 수 있다.

고장분석은 간단한 밀봉검사를 통하여 고장부위를 확인한 후, 일반적 분석절차[덮개제거  $\Rightarrow$  외관관찰  $\Rightarrow$  절단  $\Rightarrow$  내측면 검토  $\Rightarrow$  결합부 X-CT 촬영  $\Rightarrow$  화학성분변화 검토  $\Rightarrow$  기계적 특성분석  $\Rightarrow$  고장재현 및 메커니즘 확정] 순으로 진행하였다. 고장원인 규명을 위한 검토 지점은 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 사용 환경부하가 상대적으로 커서 밀봉불량이 발생된 상단부 A 지점과 작아 불량이 발생되지 않은 B 지점으로 정하였다.

### 3.1 외형분석

고배율 실체현미경과 SEM 및 CT 장비를 활용하여 수밀발생부의 외적 특징을 상세히 살펴보았다. 먼저 밀봉불량이 발생된 A지점의 내측과 외측 모습을 Fig. 5에 나타내었다. 외부에서 살펴보았을 때, 밀봉불량 발생부위의 하우징과 렌즈

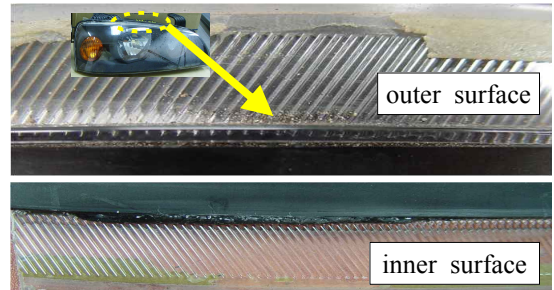


Fig. 5 Inside & outside photo around the leak point

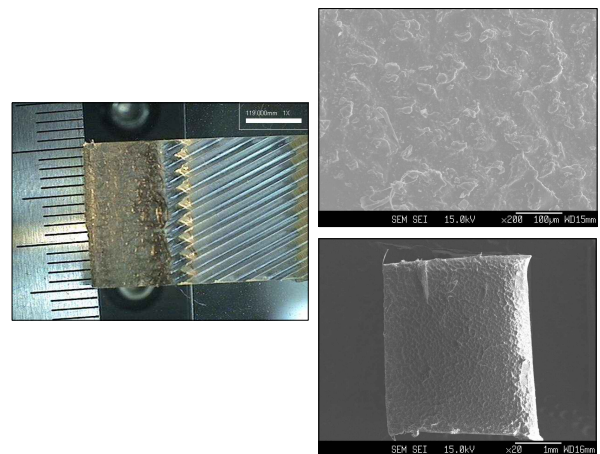


Fig. 6 SEM images of failed surface

부는 2 - 3 mm 정도 벌어져 있었으며 이 벌어진 부위에서도 모래 등의 이물질이 관측되었다. 또한 이 접합면을 수평방향에서 바라보았을 때, 뒤쪽 케이스부분이 조금 부풀어 올라와 있음도 관찰할 수 있었다. 내측면은 에폭시 접착제가 다량 돌출되어 있으며 접착제 표면 형상도 분화구 형상처럼 상당히 거칠어 보였다. 이러한 형태는 다른 기밀불량 고품에서 공통적으로 발견되었다.

PC 재료의 열악한 접착성능과 고장의 연관성을 검토하기 위해 밀봉불량이 발생된 표면의 SEM 이미지를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에 보이듯이 PC재 측에서 계면파괴라고 간주 가능할 정도의 복합 파괴양태가 발생됨을 볼 수 있다. 비록 PC소재가 접착성능이 낮다고는 하지만 초기 대비 상당히 불량한 접착상태를 보이는 원인에 대한 면밀한 관찰이 필요할 것으로 판단된다.

일반적인 외형분석을 통해서도 여전히 밀봉불량이 발생하는 경로의 파악이 어려우므로, CT를 이용하여 누설지점을 중심으로 한 결합부 주위의 실제 결합상태를 분석하였다. CT기기를 통해 분석한 모습을 Fig. 7에 나타내었다. 그림을 통해

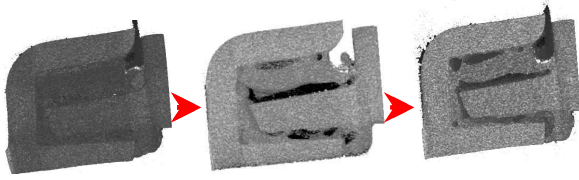


Fig. 7 CT images of leakage part

물이 외부의 벌어진 면을 통해 유입되어 접합면을 따라 수평방향으로 이동 후 접착제 누출부위 끝으로 유출되는 것을 알 수 있었다. 즉 누설고장은 접착제 내부를 통한 것이 아니라 접착제와 피착제간의 공극부를 통해 발생된 것이라고 할 수 있다.

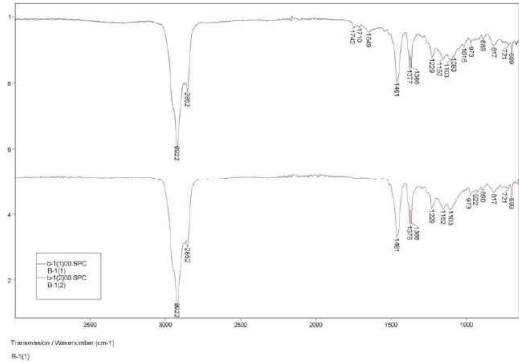
그러므로 누설의 원인인 접착제와 피착제 사이에 공극이 어떠한 메커니즘으로 발생되는지에 관한 점검이 핵심요소로 판단된다. 공극발생가능성이 높아지는 것은 근본적으로 열화로 인한 접착제 자체의 성능저하와 제품에 부가되는 열기계적 부하로 인한 접합부의 거동특성 때문이라 할 수 있다<sup>[4-6]</sup>. 따라서 추가적인 화학적 물성분석과 작동에 따른 결합부의 변형거동의 분석을 수행하여 하였다.

### 3.2. 화학적 물성분석

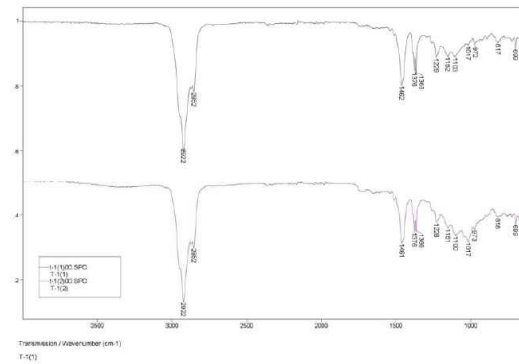
헤드램프 모듈에 가해지는 여러부하로 인한 접착제의 물성변화를 살펴보았다. 열화경향 분석을 위한 미사용품의 확보가 어려워 필드에서 회수된 제품을 대상으로 부가되는 스트레스량이 상대적으로 크게 차이나는 상단부와 하단부의 접착제를 비교·분석하였다. 검토항목은 접착제의 분자량과 접착성능에 관련된 기능기 분포로 제한하였고, 검토부위는 Fig. 4의 A부 2지점과 B부 1지점으로 하였다. 이때, PP재 표면과 PC재 표면의 핫멜트로 각각 구분하여 검토함으로써 피착제와의 연관성도 함께 분석하였다.

분자량 측정결과 측정점 별로 분자량 값은 서로 다르게 나타났다. 그러나 피크값이 이동되지 않은 점과 본 제품에 사용된 핫멜트가 5가지 이상의 성분이 공중결합된 재료임을 감안한다면, 이는 초기부터 완전히 중합되지 못한 여분의 성분들이 오히려 열 부하를 받으며 중합과정에 이르렀기 때문이라 사료된다.

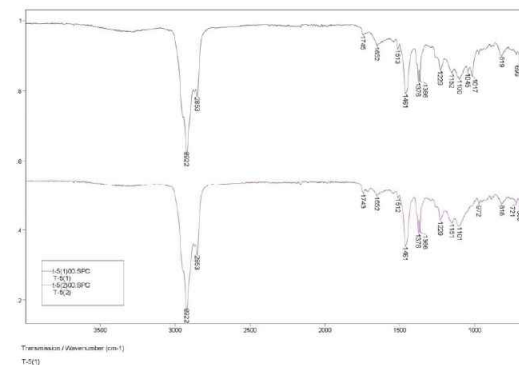
접착성능의 열화과정을 살펴보기 위하여 FT-IR을 이용하여 기능기의 분포를 측정하였으며 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 상단부 그래프는 PC



(a) unfailed part(low thermal stress, B part)



(b) failed part(high thermal stress, A part)



(c) failed part(high thermal stress, A part)

Fig. 13 IR-spectra of epoxy adhesive

재 측에 있던 핫멜트의 기능기분포를 나타낸 것이며, 하단부 그래프는 PP 재 측에 있던 핫멜트의 FT-IR 측정값을 나타낸 것이다.

열화샘플 비교 결과, 헤드램프 하단부에 있어 열부하를 적게 받은 부위의 PP재 측의 핫멜트에서는 열화로 의심되는 IR 피크 변화가 관찰되지 않으며, PC재 측의 핫멜트에서는 열화로 추정되는 새로운 결합(ester, carboxylic acid, ether 등)이 약간 보인다. 이에 비해 큰 열부하를 직접 받은 헤드램프 상단부 지점에서는 PP재 측의 핫멜트에

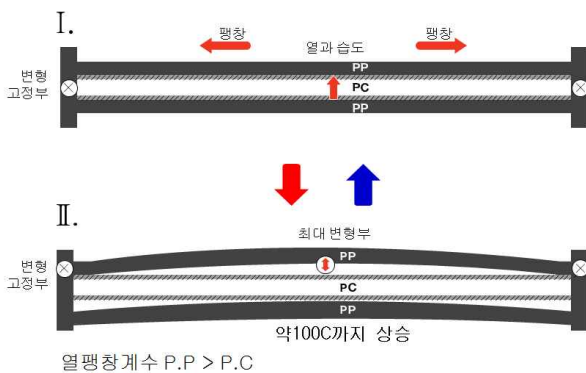
서도 노화 및 열화로 추정되는 새로운 결합(ester, carboxylic acid, ether 등)이 확연히 보이며, PC재 측의 핫멜트에서는 열화로 추정되는 새로운 결합(ester, carboxylic acid, ether 등)이 아주 강하게 나타난다. 따라서 1742, 1710, 1649, 1016 피크를 에폭시 접착성능 노화 및 열화의 판단 인자로 사용 가능하리라 사료된다.

제품에 사용된 핫멜트는 열화가 진행됨에 따라 분자량이 바뀌는 것이 아니라 내부 분자간의 결합구조만 변경되면서 그 접착특성이나 기계적 물성이 변경되는 것으로 나타났다.

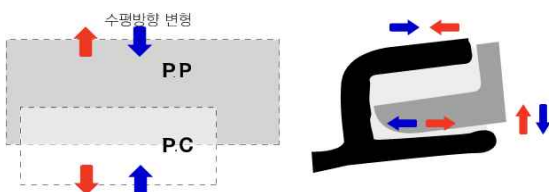
### 3.3. 접착부 변형거동 특성 분석

핫멜트의 특성상 접착제가 사용된 결합부에 아무런 변형이 발생되지 않는다면 재료특성이 열화되었다고 충분히 밀봉성능을 발휘할 수 있다. 따라서 기공의 발생원인을 규명하기 위해서는 자동차 운행으로 인한 결합부의 거동특성 분석도 함께 수행되어야 한다. 특성 분석시 진동과 열팽창계수차이에 의한 변형을 모두 고려하여야 하지만 본 연구에서는 램프모듈의 장착구조와 상대적인 변형량의 크기를 고려하여 열팽창계수 차이에 의한 거동특성만을 평가하였다.

차량운행에 따른 결합부의 거동특성 평가를 위



(a) front view



(b) side view

Fig. 14 Thermal behavior at bonding part as the operation

해 비접촉으로 3차원의 측정이 가능한 ESPI를 이용하여 온도상승시와 하강시 결합부위를 중심으로 계측을 실시하였다.

정상품과 수밀고장품 헤드램프모듈의 결합부를 측정된 결과를 바탕으로 온도상승에 따라 헤드램프모듈에서 결합부의 변형거동 개략도를 Fig. 10에 나타내었다. 모듈이 온도상승과 더불어 풍선이 부풀듯이 커지는 거동<sup>6)</sup>을 보일 때, PP재와 PC재의 열팽창계수 차이 및 내부 프레임에 결합되어 변형될 수 없는 조립특성으로 인해, 고정부 중앙에 있는 결합부에는 상대적으로 큰 변형스트레스가 발생되게 된다. 실제 계측을 통하여 이러한 요인으로 인해 밀봉이 정상인 제품의 결합부와 밀봉불량이 발생된 지점의 거동특성상 약 10배 이상[4 $\mu$ m]의 변형이 발생하는 것을 볼 수 있었다.

주기적 온도변화에 따라 피착제가 상호변형되며 상부중앙 결합부에서 접착제가 아주 얇게 부착되는 구역이 발생되고 이러한 구역에서 열화된 접착제가 피착제에서 분리되어 기공이 발생할 가능성이 충분한 것으로 사료된다.

### 3.4. 가속시험을 통한 고장재현

고장부위 분석과 고분자 내부구조 변화 분석 및 변형거동 측정을 통하여 핫멜트 기밀불량 부위에 존재하는 기공 발생 현상이 고장의 원인임을 알 수 있었다. 또한 접착성 뿐 아니라 열팽창계수차이가 크게 나는 두 재료가 고온에 노출될 때 이러한 현상의 발생 가능성은 더 높아질 것이라 예상되었다.

이와 같은 고장메커니즘이 실제로 발생할 가능성을 평가하기 위하여 현재 결합형태의 밀봉부가 온습도 사이클링 조건에 노출되었을 때, 기공이 발생하는지의 여부를 환경시험을 통해 재현해 보았다. 환경스트레스는 자동차용 접착제의 환경시험을 다루고 있는 ISO 9142의 접착제 환경내구성 시험 기준을 따라 수행하였다. 시험 후 기공이 발생한 시편의 모습을 Fig. 11에 나타내었다.

시험이 진행되며 시험초기와 달리 결합부에 기공이 생기고 표면은 약간 녹아 흐른 형태로 변화된 모습이 발견되었다. 사진은 각각 34사이클과 50사이클에서 발생한 기공의 모습이다. 모든 시편에서 기공이 발견되지는 않았지만 34사이클과 50사이클에서 기공발생시편이 다수 발견되었

다.

이와 더불어 기공의 발생가능성을 만드는 요인으로 언급했던 PP재와 PC재의 어긋남 현상도 발견되었다. 초기 26사이클까지는 어긋남 현상이 크게 관찰되지 않았으나 34사이클 이후는 다수의 시편에서 이러한 현상이 관측되었다. 또한 고품의 IR분석을 통하여 접착성능 열화의 판단인자로 거론된 1742, 1710, 1649, 1016 피크의 발생여부도 살펴보았으며 34사이클 이후의 시편부터 이러한 경향이 보이는 것을 관찰할 수 있었다.

따라서 상기에서 언급했던 고장메커니즘으로 인해 제품에서 접착부 기밀불량이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 신뢰성 향상

수밀고장이 발생하는 부분을 중심으로 고장메커니즘을 바탕으로 현 제품의 신뢰성개선안을 도출해 보았다.

기공발생을 억제하기 위해서는 접착제 자체의 개선과 결합되는 부분의 구조를 변경하는 방법이 있을 수 있다. 현 설계가 정상적인 제품제조시 품질문제가 발생되기 어렵지만, 고온공기가 직접적으로 접착부에 도달하는 구조로 되어 있는 등 장기간 사용시 발생하는 고장요인에 대처하기는 부족한 실정이다. 따라서 이를 보완할 적절한 개선책[i)PC재 결합부 처짐방지 라인 형성, ii)4면 결합구조로 형상변경 및 결속체결부의 턱 생성, iii)배열구조 개선 및 렌즈 상단부 개구부 가리개 설치 등]이 필요한 상황이다.

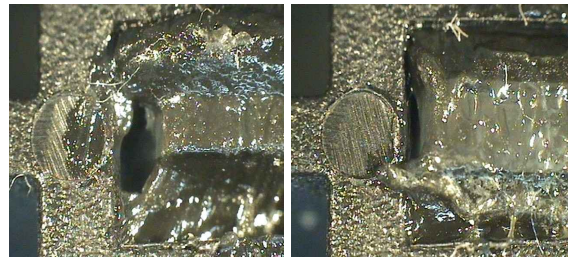
#### 5. 결론

본 연구에서는 헤드램프 수밀고장품의 고장분석 및 재현시험을 통하여 고장원인을 규명하였으며, 이를 개선하기 위한 방안도 검토해 보았다.

또한 현재 고장이 발생되고 있는 부위를 중심으로 즉시 실천 가능한 신뢰성 향상방안을 제시하였다

1. 수밀고장은 밀봉불량과 호흡작용으로 발생되며, 특히 밀봉불량은 접착제의 열화와 열팽창에 따른 기공생성에 의한 것이다.

2. IR분석을 통하여 1742, 1710, 1649, 1016 피크를 예폭시 접착성능 노화 및 열화의 판단 인자



(a)34 Cycle (b)50 Cycle

Fig. 15 Void generation test by EST as the ISO 9142

로 사용가능하리라 사료된다.

3. 팽창계수 차로 인해 상부중앙 결합부에서 접착제가 아주 얇게 부착되는 구역이 발생되고 이 구역에서 열화된 접착제가 피착제에서 분리되어 기공이 발생된다.

4. 내구수명의 향상을 위해서는 기공발생을 억제할 수 있는 구조 채용 및 결합부의 온도스트레스 감소를 위한 배열구조 개선이 추천된다.

#### 참고문헌

- (1) B. Kang, K. Park, B Yong and H Kim, "Application of LED Headlamps in S. Korea," SAE, 2007-01-3516, 2007
- (2) U. Schlöder, "New Optical Concepts for Headlamps with LED Arrays," SAE, 2007-01-0869, 2007
- (3) J. D. Bullough, J. V. Derlofske and Y. Akashi, "Strategies for Optimizing Headlamp Illumination and Visibility Along Curves," SAE, 2006-01-04899, 2006
- (4) Tesfa. Abraha, "Experimental evaluation of the adhesive degradation and corrosion potential of silicon fluids," Report, Battelle, USA. 1995.
- (5) C. J. Lewis, "Quantifying the effects of aging on the mechanical properties of medical grade polycarbonate and UV cured adhesives," M.S. dissertation, Brigham Young Univ., USA, 2004.
- (6) E. W. Liang, K. Yokoyama and J. Willson, "Three dimensional heat transfer & thermoelastic deformation predictions in forward lighting," SAE, 2001-01-1396, 2001.