

디젤동차용 엔진 라이너 파손 원인에 관한 연구

The Cause Analysis on Fracture of Diesel Locomotive Engine Liner

권성태*
Kwon, Sung-Tae

김정남**
Kim, Jung-Nam

ABSTRACT

In this study, we investigated the cause analysis on fracture of diesel locomotive engine liner, which was trouble assuming the inflow of cooling water. In order to reveal the cause of fracture, we studied the use history of engine, the drawing of production appearance and the stress distribution of engine in use. Also, we conducted experiments such as tension strength test, bending test and hardness test. Next, we observed fractured sections by SEM for the purposed of explaining the fracture mechanism of engine liner. Test results showed that fracture mechanism was brittle fracture due to coarse casting structure and stress concentration caused by manufacturing badness.

1. 서 론

재료의 손상은 일반적으로 부품에 손상을 제방한 소재, 사용조건, 설계적 요인 등에 내포된 각각의 요인들이 복합적으로 작용하여 발생하기 때문에 그 원인을 밝혀내기에는 어려움이 있으나 파손된 재료의 파단면을 조사하면 파괴기구나 원인에 대한 부분적인 추정은 가능하다. 일반적으로 이러한 조사방법을 Fractography라 부르고 있으며 재료의 손상진단에 많이 이용되고 있다.¹⁻⁴⁾

본 연구는 실 운행중인 디젤동차(PMC)의 엔진부에서 냉각수 유입으로 추정되는 고장이 발생하여 엔진을 분해한 결과, 시험품인 2위 라이너의 위측 턱부분에서 약 80mm 정도의 균열이 발생하여 이에 대한 파손 원인을 분석한 사례이다. 일반적으로 파손에 대한 분석은 양산품인 경우에는 많은 시험에 의하여 고장율을 구하고 이를 종합하여 신뢰성을 확립할 수 있다. 그러나 본 시험품과 같은 단품의 경우, 예비 시험이 곤란하고 이에 대한 신뢰성도 평가하기가 쉽지 않아 원인 추정이 어려운 실정이다. 더욱이 시험품의 경우 균열 발생 후 진전된 상태에서 엔진의 계속적인 사용으로 인한 2차 생성물에 의하여 파단면의 일부가 훼손되어 육안에 의한 외관검사만으로는 그 파손 원인을 밝히기에 한계가 있다. 따라서, 먼저 엔진의 사용 이력 및 유사 사고 사례를 검토하여 사용상 문제점을 검토하였고, 라이너 소재 선택의 적합성 여부를 판단하기 위하여 화학분석 및 기계적 특성 시험을 수행하였으며, 파손된 라이너의 파단면의 미세구조를 SEM을 이용하여 관찰하여 파괴 기구를 해석하였다. 또한 제품의 형상 및 구조 등의 제작도면 검사, 주조 제작 공정, 사용시 응력분포 조사 등의 전반적인 검토를 통해 파손 원인을 추정하여 향후 이와 유사한 사례에 대한 자료로 활용하고자 한다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정희원

** 한국철도기술연구원 위촉연구원, 비희원

2. 파손 원인 분석 절차

일반적으로 파손에 대한 원인 분석을 위하여는 양산품인 경우에는 많은 시험에 의하여 고장율을 구하고 이를 종합하여 신뢰성을 확립할 수 있다. 그러나 본 시험품과 같은 단품의 경우, 예비 시험이 곤란하고 이에 대한 신뢰성도 평가하기가 쉽지 않아 원인 추정이 어려운 실정이다. 일반적으로 비파괴성사고의 원인을 추정하는 방법은 Fig.1에 나타난 바와 같이 이루어지고 있다. 본 연구에서는 파손품의 파손 상태에 대하여 외관 검사를 수행하였고, 엔진 사용 상태에 대한 이력조사를 서면 검토하였다. 이어서 소재의 물성 시험, 균열부에 대한 정밀검사 및 과단부 검사를 하였으며, 시험품이 제작도면과 일치하는지를 검토하는 절차로 시험품의 파손 원인을 분석하였다..

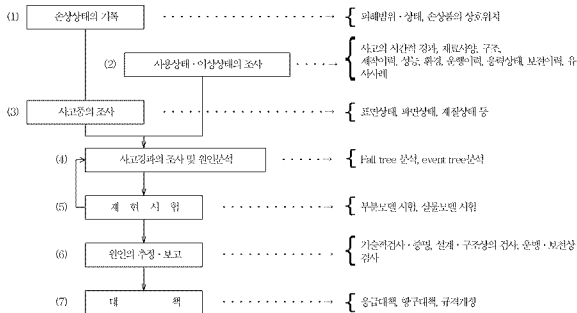


Fig.1 The procedure of fracture cause analysis

3. 파손원인 분석

3.1 시험품의 파손 상태 및 사용 상태

본 시험품은 운행일수 550일 동안 약 450,000km를 운행한 후 이상이 발견되어 사용이 중단되었다. 외관상 검사로는 분석이 어려워 1차 분해검사를 실시한 결과, 2위 실린더에 냉각수가 유입된 것이 확인되었다. 헤드에 대한 수압검사를 실시하여 헤드의 이상 유무를 조사하여 보았으나 헤드에는 이상이 없음이 판명되었다. 라이너에 대한 정밀검사 결과 라이너 외쪽의 헤드를 취부하는 Bolt (냉각수 유입구) 근접 부위에서 결단이 발생하여 결단 시점에서 우측으로 약80mm, 좌측으로 20mm 정도 균열이 전진되어 있음을 확인하였다.

본 시험품이 취부된 엔진에 대한 철도청 감수이력을 조사한 결과 약 8년 정도 운용이 되어왔으며, 라이너 균열로 인한 냉각수 유입 등과 같은 특이 사항이 없었음을 확인하였다. 또한 시험품과 유사한 제품에서 냉각수 유입 현상은 있었으나, 동 시험품과 동일하게 라이너 상부 균열로 인한 파손 사례는 없었던 것으로 조사되었다.

3.2 시험품의 재료 평가

제출된 라이너의 재료 분석을 분석하여 소재 선택의 적합성 여부를 조사하였다. 라이너의 재질은 합금 주철로 Table 1,2에 나타난 바와 같이 화학성분 및 현미경 조직 모두 기준에 적합하였으며, 인장강도, 납입하중 및 경도 역시 기준에 만족하여 충분한 기계적 성능을 지니고 있었다.

Table 1. Chemical composition of test specimen

element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
Standard(%)	2.85~3.40	1.60~2.40	0.60~0.90	0.03이하	0.15이하	0.20~0.60	0.25~1.80	0.20~1.00
Average(%)	2.9840	1.8123	0.7807	0.0312	0.0697	0.3230	0.3271	0.3239

Table 2. Mechanical properties of test specimen

Specimen	Tensile strength(kg/mm ²)	Bend test(kg/mm)	Hardness(HB)	Micro structure
Standard	min.27	min.5/0 / 3.5	187~280	ASTM A 247 A type
Result	34	6% / 3.7	272	No 4 ~ 5 : 1/18 inch

3.3 균열부의 상태

냉각수 유입의 원인 조사를 위하여 헤드를 분해하였으나 사용되고 있는 엔진의 특성상 기름과 인소 Carbon 등으로 인하여 균열 부위가 외관상으로는 구분이 되지 않았으나 해체한 결과 라이너의 턱부분 한쪽이 절손되고 균열이 전진되어 있었으며 절손부의 엔진 블록을 조사한 결과, 헤드의 고정용 Bolt 부근이 절손되어 균열이 진행되고 있었다.

Fig. 2(a)는 균열이 발생한 라이너를 절단하여 절손된 부분부터 파단된 부분을 조합하여 나타낸 것이며, (b)는 절손 부위에 해당하는 엔진블록의 상태로 절손된 부분은 헤드의 고정용 Bolt에서 가장 가까운 부분이었다. 또한 균열 시점에서 밝게 나타난 부분은 가장 넓고 점차적으로 줄어든 현상으로 나타내고 있다. 이와 같은 현상은 라이너가 균열시점으로 표시한 부분부터 가장 먼저 절손된 후 원주방향으로 퍼져나간 것으로 추정된다.

라이너는 엔진 기동시 열에 의한 재질의 열팽창으로 인하여 각부에 열응력이 발생하게 된다. (c)는 엔진이 조립된 상태에서 발생하는 응력 방향을 나타낸 것으로 라이너를 조립시에는 헤드의 Bolt에 의하여 체결되므로 상하로 고정되어 접촉면에서는 상하로 응력이 서로 균형을 이루게 된다. 그러나 라이너의 위주면 방향으로만 자유단으로 되어 라이너 직경방향으로 가장 많은 변형과 응력이 작용하게 된다. 따라서 최초의 절손은(a)에서 균열시점으로 표시한 부분에서 발생되고 앞에서 서술한 (Fig. 2(c) 라이너의 열에 의한 수축력 방향) 바와 같이 수축력에 의하여 라이너 턱의 직경방향에서 원주방향으로 라이너가 수축과 팽창을 반복하여 최초 균열된 시점에서 점차적으로 진행되는 것으로 추정할 수 있으며, 실린더 블록도 절손된 방향으로 다수의 타원형 중첩이 나타나고 있는 것으로 판단된다. 또한 절손되어 떨어져 나가게 되는 조각은 엔진 기동시 발생하는 진동으로 인하여 조각과 엔진블록이 서로 상하로 마찰(또는 떨림)되어 나타난 현상으로 추정된다.

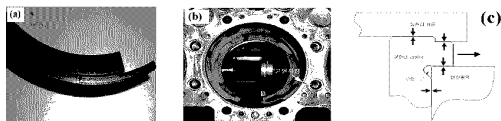


Fig.2 The appearance of specimen: (a)The fractured area of liner, (b)The appearance of engine block, (c)the principal stress direction according to liner's thermal expansion

3.4 파단면 조사

Fig. 3는 결손이 일어난 부위에 대하여 3% HCl과 Alcohol 수용액으로 Carbon 등의 불순물을 제거한 후 파면을 확대한 현상으로 좌우의 45°의 Striations이 교차하는 부분에는 타 부위보다 많은 불결전부가 존재하고 균열 진행 방향의 수평으로 Striations이 존재하고 있다. 또한 우측으로는 위로 미세한 직선부의 흔적이 보이고 있어 이 부위는 헤드의 Bolt 체결로 인한 하중의 증가와 취약한 Notch 효과, 재결의 취약 등이 복합적으로 작용한 것으로 판단된다.

Fig. 4는 균열이 진행되는 부위를 관찰한 것으로서 우측의 공간이 O형이 체결되는 부위이며, 아래측은 헤드와 조립되는 부분이다. 균열이 전파되는 현상으로 보면 일정한 길이방향으로 전진되는 현상이 아니라 부스리지는 현상으로 이러한 현상은 입계 파괴로 취약한 부분으로 전진되는 현상으로 볼 수 있다. 취성 파괴의 경우 소재 자체에 내재하는 취성 파괴 유발요인은 결정립 크기, 석출경화요인, 결정학적인 취약 요인을 들수 있으나, 일반적으로 조대한 결정립은 미세한 결정립보다 균열의 전파를 억제하는 균열 팁의 둔화효과가 작아 파괴인성을 저하시켜 취성 파괴를 유발할 수 있다¹⁾ 따라서 본 시험품은 재결의 취약성, 하중 조건 등이 복합적으로 작용하여 절단부에서 터부가 라이너 직경방향으로 최초의 파괴현상이 발생하고 실손되어 열응력에 의한 수응력 방향으로 전진된 것으로 판단되며, 본 시험품의 주조제작 공정은 라이너 위쪽으로 주형이 제작되므로 부수리지는 현상을 볼 때, 파손이 발생한 부분에서 재결이 조대하여 균열 발생시 파괴인성이 저하된 것으로 예상되며 터부의 경우 윗부분은 중앙부보다는 취약한 것으로 판단된다.

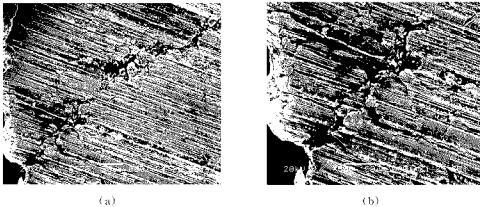


Fig. 3 Micrographs of fractured liner sections: (a) magnification $\times 200$, (b) magnification $\times 500$

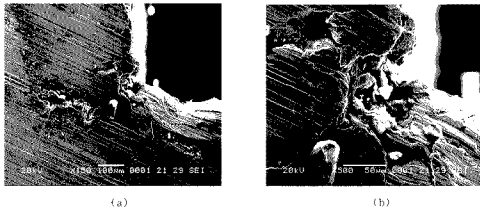


Fig. 4 Micrographs of crack propagation : (a) magnification $\times 150$, (b) magnification $\times 500$

3.5 라이너 행상에 대한 조사

시험용 라이너의 균열 부위의 조사를 위하여 라이너를 절단하여 O링부의 행상에 대하여 조사한 결과, 제작 도면은 Fig. 5(a)과 같이 되어 있으며 도면에는 라이너 턱면에서 위측으로 0.3mm에서 O링 홈이 시작되고, 45° 각도로 모따기 가공을 하는 것으로 되어 있다. 그러나 Fig. 5(b)에서와 같이 라이너 실물의 O링이 휘부하는 부위를 탁본하여 도면 치수를 간접 비교한 결과, 턱면의 경우 턱부분에 다소 Carbon이 잔류하여 차이는 있을 수 있으나 육안으로도 다소 짙게 가공한 것을 알 수 있었다. 따라서 제작된 시험용은 턱면에서 위측으로 0.3mm, O링 홈의 45° 각도로의 가공 비미 등, 도면과 많은 부분에서 일치하지 않게 가공되었으며 이에 대한 영향도 본 라이너의 파손에 많은 부분 기여한 것으로 판단된다. Fig. 5(c)는 손상된 O링 부위를 광학현미경으로 image scan한 결과로 끝단 부위가 불균일하게 손상되어 있음을 확인할 수 있다.

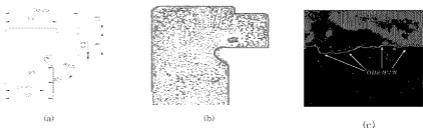


Fig. 5 The Drawing of liner: (a) details of knoll, (b) comparison with actual knoll, (c) damage parts of O ring

4. 결론

본 연구에서는 디젤동차의 라이너에서 발생한 균열 원인에 대한 검토를 수행한 결과 다음과 같은 몇 가지 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 디젤동차의 운용 조건은 운행 후 엔진을 정지, 충분한 기동하는 조건으로 열응력이 많이 받고 있는 열악한 조건으로 이러한 반복적인 응력으로 가장 취약한 부분에서 초기의 균열이 발생하고 전진된 것으로 판단된다.
- 2) 엔진 블록의 사용상 변형은 국내의 운용 사례에서 볼 때, 가능성이 없지 않으나 시험용 휘부 견사 기록에는 이상을 발견할 수 없어 미비한 수준인 것으로 판단되며, 시험용을 제작한 라이너 블록에 대한 검사 결과 사용해도 이내로 파손 당시, 엔진 블록이 타워으로 변형된 것은 라이너의 판방향에 직선으로 인하여 라이너가 주응력 방향으로 휘심 팽창하여 변형된 것으로 판단된다.
- 3) 라이너 초기 균열 발생 시점은 헤드와 조립되는 상부의 휘부에서 일부 발생하고 내부의 취약한 부위와 조합하여 길은 후, 균열이 전진되는 현상이며 시험용의 경우 주철 재질로 조대한 조직으로 파괴인성의 저하로 균열이 발생하면 전진이 더 빠른 것으로 판단된다.
- 4) 시험용 라이너는 재질 도면과 비교시 O링 홈의 제작이 크게 가공되어 O링이 휘할 가능성이 높으며 45° 각도로 가공도 이루어지지 않아 헤드 체결시 집중 응력의 우려가 비교적 높을 것으로 예상되고 있으며 시험용의 파손에도 비교적 크게 작용한 것으로 판단된다.

5) 라이너의 턱부분에서 균열이 발생한 부분은 Notch 효과의 영향을 가장 많이 받고 있는 부분이며, 중력 주조로 제작되어 가장 취약한 부분으로 이러한 부분은 가공에 의한 국부적인 결함도 예상이 되고 있으나 Notch 형상을 파악하기 위한 파손 기결 조각이 손실되어 판단에는 어려움이 있었다.

따라서, 본 시험품의 직접적인 파손 원인은 주조 제작 공정에 따른 재질의 조대화, 가공 불량으로 인한 응력집중 등의 요인이 복합적으로 작용하여 파단 시점에서 최초의 균열이 발생되어 타원으로 라이너가 변형되어 좁은 원주 방향으로는 80mm 정도 멀어지 나가고 넓은 원주방향으로는 20mm 정도 균열이 진전된 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 최병학, “금속손상진단”, 진영사, 1997. 1.
2. 小寺澤 良一, “金屬破斷面 寫眞集”,テクノアイ出版部, 1985. 7.
3. 小寺澤 良一 編著, “フラクトグラフィとその応用”, 日刊工業新聞社, 1983. 1
4. 北川英夫, 小寺澤 良一, “フラクトグラフィ”, 培風館, 1978. 2
5. H.O.Fuchs, R.L.Stephens, “Metal Fatigue in Engineering, John Wiley& Sons. Inc.1980