

가속수명시험을 통한 자동차용 파일럿램프의 비교평가

신 민 경 · 위 신 환 · 김 형 민

자동차부품연구원 기업지원신뢰성본부

Comparison to Automobile Pilot Lamp by Accelerated Life Test

Mingyung Shin · Shinhwan Wei · Hyungmin Kim

Korea Automotive Technology Institute

Abstract

In this paper, we compared domestic with foreign pilot lamps installed on the instrument board or electronic modules (car audio, air-conditional system, etc.) of an automotive vehicle by an accelerated life test in order to estimate the life of domestic pilot lamps. An accelerated life test method was developed and the relation of the life and voltage stress was analyzed. The main results are as follows; i) B_{10} life of pilot lamp is above 5,000 hours, vehicle travel time for 10 years. ii) the life of domestic pilot lamp is longer than that of foreign thing. iii) the life distribution of domestic pilot lamp is wider than that of foreign thing. iv) it is possible to promote import replacement of automobile pilot lamp.

Key Words : Accelerated Life Test, Failure Mechanism, Weibull Distribution, Inverse Power Model, Pilot Lamp

1. 서 론

파일럿 램프는 표시등이라고도 하며 주로 내부 필라멘트의 성분에 따라 텅스텐 전구 또는 네온 전구가 사용된다. 전원의 ON/OFF 상태, 스위치나 차단기·밸브 등의 ON/OFF 상태를 표시하는 용도로 쓰이며 소비전력이 적고 가격이 저렴하며 빛이 부드러운 램프계의 중요한 위치를 차지하고 있다. 본 연구에 사용된 자동차용 파일럿 램프는 필라멘트 성분이 텅스텐인

팅스텐 전구이다. 자동차용 파일럿 램프는 오디오 및 에어컨 유닛 등의 전장류, 스위치류 등의 라이트닝에 주로 사용된다. 파일럿 램프의 자체 단가는 수십원 수준이나 고장 발생시 수십만원에 상당하는 자동차 부품 모듈 전체에 클레임이 되므로 제품의 신뢰성 평가를 통해 국내 수준을 파악하는 것이 필요하다. 현재 차량의 표시등은 수입품이 대부분이며 그중 일부는 내구 수명이 반영구적인 LED로 빠르게 대체되고 있는 실정이나 LED가 적용될 경우 모듈의 단가가 동반 상승하게 되는 단점이 있다. 따라서 국내 파일럿 램프 수명이 자동차 수명의 동등 수준 이상 또는 선진사 파일럿 램프 수명 수준 이상으로 확보된다면 그 수요는 꾸준히 유지될 수 있다.

자동차용 파일럿 램프의 수명은 수천 시간에 달하므로 이를 평가하기 위해서는 가속 수명 시험 기법을 통한 시험시간의 단축이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 파일럿 램프의 가속 수명시험 기법을 개발하고 국내 자동차용 파일럿 램프와 해외 선진사 제품의 수명 시험을 통해 수명을 비교 평가함으로써 국내 파일럿 램프의 수준을 가늠하고자 하였다. 또한 수명-스트레스의 관계식을 추정하고 B10 수명을 제시하고자 하였다.

기호설명

L : 고장 시간

V : 전압

K, n : 재료, 제품의 구조 및 시험방법 등에 따른 상수

AF : 가속 계수

Va : 가속조건에서의 전압

Vd : 사용조건에서의 전압

2. 가속 수명 시험 설계 및 시험 방법

2.1 필드 사용 환경에서의 요구 수명

파일럿 램프의 수명을 자동차 수명과 동일하다고 가정할 경우 램프의 수명은 일반적으로 통용되고 있는 자동차 수명 10년 또는 160,000 km를 보증한다고 간주한다. 10년 또는 160,000 km 기준의 필드 사용 시간을 산출하기 위하여 미국의 BTS(Bureau of Transportation Statistics)에서 조사한 자동차 1일 평균 주행거리인 46.4 km/일(29 mile/일)의 통계 자료를 활용하였다.(1) 또한 평균 시속은 미국과 유럽의 대표적인 연비 인증 모드인 FTP-75 모드의 34.1 km/h를 사용하였다. 이들로부터 일일 평균 차량 운행시간은 아래에서와 같이 약 1.36 h/일이고 10년을 기준으로 하면 약 5,000 h으로 산출된다.

일일 평균 차량 운행시간

: $46.4 \text{ km/일} \div 34.1 \text{ km/h} \approx 1.36 \text{ h/일}$

10년 차량 운행시간

: $1.36 \text{ h/일} \times 365 \text{ 일/년} \times 10 \text{ 년} \approx 5,000 \text{ h}$

자동차 운행시간 중에는 파일럿 램프가 켜져 있다는 전제하여 자동차용 파일럿 램프의 10년 또는 160,000 km 기준의 필드 사용시간은 약 5,000시간이다.

2.2 고장 모드 및 고장 판정 기준

Fig. 1은 파일럿 램프를 나타낸 것으로 그 구조는 발열 부분인 필라멘트, 유리구, 필라멘트가 유리구 안의 바른 위치에 있도록 고정시키는 앵커, 필라멘트와 외부 전극을 연결하는 도입선 등으로 되어 있다. 파일럿 램프의 주고장 모드는 텅스텐 필라멘트의 용융 단선이다. 텅스텐 필라멘트에 전류가 흐르면서 열을 발생시키고 이때 텅스텐의 일부가 증발하여 필라멘트가 점점 가늘어지게 되면서 단선이 된다. 그 외에도 백화라 불리는 누설에 의한 고장, 유리구의 파손, 도입선 단선 등이 있으나 이들은 제조 과정에서 발생하는 결함 등의 우발고장에 가깝다.

필라멘트의 용융단선의 메커니즘은 국부온도상승(hot spot burn out)과 처짐변형(sag)으로 나뉜다. 국부온도상승 현상은, 이상적인 필라멘트의 굵기는 동일하나 실제로는 미세한 차이가 발생하여 이러한 가는 부분의 저항이 커지게 되면서 동일 조건에서도 비교적 빠르게 산화가 진행된다고 설명한다. 처짐변형은, 제조과정 중 텅스텐의 재결정 온도를 상승시키며 결정립 성장을 억제하기 위해 도핑을 하게 되는데 이때 발생하는 도핑 농도 불균일로 결정 입계에서 미끌어짐 현상이 발생하게 되는데 이것이 필라멘트의 국부온도상승을 야기시켜 단선이 일어난다고 설명한다.



<그림 1> 파일럿 램프



<그림 2> 자동차용 파일럿 램프

필라멘트의 단선을 가속시키는 인자로는 온도, 습도, 전압, 진동 등이 있지만 램프 수명에 가장 직접적인 영향을 주는 것은 램프 양단에 걸리는 전압으로 사용조건보다 높은 전압은 필라멘트의 온도상승에 인한 단선을 가속시킨다. 따라서 본 연구에서는 가속인자를 전압으로 하고 파일럿 램프의 고장 판정 기준은 필라멘트의 단선에 의한 램프의 완전한 소등으로 하였다.

2.3 가속 모델의 설계

파일럿 램프의 수명추정에 적합한 모델은 온도이외의 스트레스를 이용하여 절연체, 베어링, 백열전구등의 가속수명시험에 널리 사용되는 수명-스트레스 모델인 역승 모델이며, 고장시간 (L)과 전압(V)의 관계는 다음과 같이 가정한다.

$$L(V) = \frac{1}{K \cdot V^n}$$

여기서, K와 n은 재료, 제품의 구조 및 시험방법 등에 따른 상수이다. 상기의 식으로부터 파일럿 램프의 가속수명식을 정립하기 위해서는 가속 수명시험을 통한 K와 n의 규명이 필요하다.

2.4 가속 수명 시험 장치 및 방법

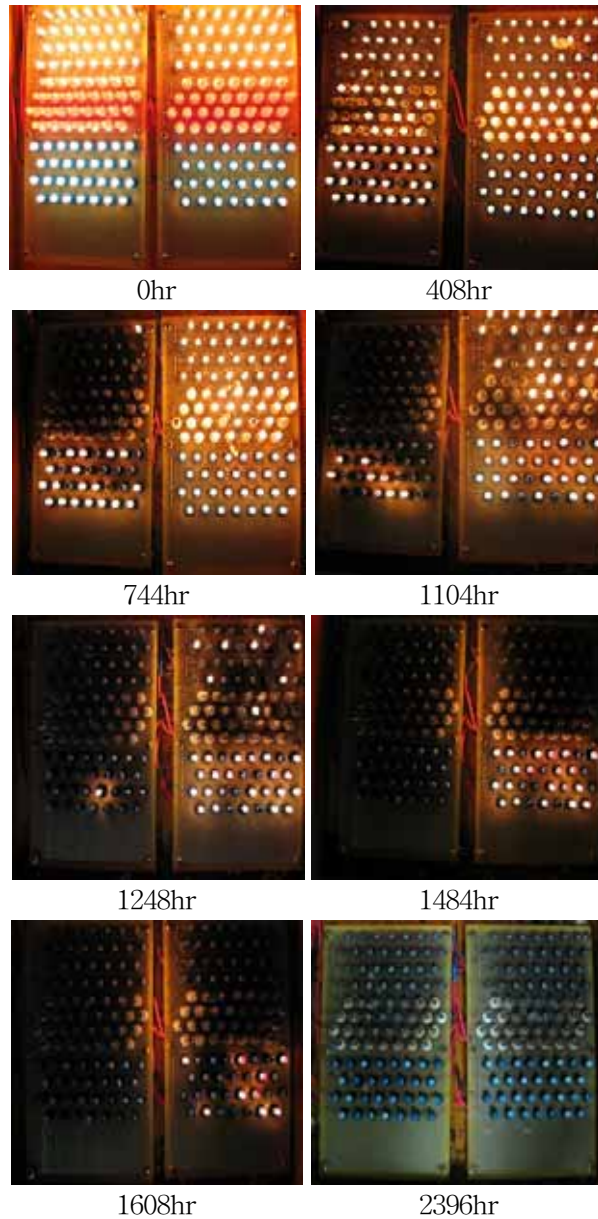
시험에 사용한 시료는 해외 선진사 제품 2종과 국내 제품 1종이다. 각 시료의 세부내용은 Table 1과 같다. 시료 A와 B는 국내 자동차용 파일럿 램프 시장 50%를 장악하고 있으며 국내 자동차 에어컨 컨트롤 유닛용 램프 시장 90%를 점유하고 있다. 시료 C도 국내 파일럿 램프 시장을 50% 장악 하고 있으며 국내 자동차 오디오용 파일럿 램프 시장 90%를 점유하고 있다.

<표 1> 시료 Spec.

구분	제조국	대상 시료	시료수
A	일본	· 정격전압 DC 14 V · 전류 : 121mA	30개
B	일본	· 정격전압 DC 14 V · 전류 : 122mA	30개
C	한국	· 정격전압 DC 14 V · 전류 : 100 mA	30개



<그림 3> 가속 수명 시험 장치 및 시료



<그림 4> 시험시간에 따른 시료변화

시험 수준은 자동차 전장품의 사용자 전압 조건인 13.5V의 30% 과전압인 17.6V와 40% 과전압인 18.9V 두 수준으로 결정하였다.

시험 장치는 Fig. 3에서와 같이 3가지 시료에 대하여 점등상태를 육안으로 관찰할 수 있도록 병렬 회로로 시험회로를 구성하고 17.6V와 18.9V 각각을 인가하여 24시간마다 고장 발생 여부를 확인하였다. 시료 그룹별로 최상단 30개 시료는 시료A, 가운데 30개 시료는 시료 B, 하단 30개 시료는 시료 C를 나타낸다. 시험의 형태는 Fig. 4에서 보여주는 것처럼 한계 내구 시험의 형태로 모든 시료가 고장이 날 때까지 시험을 수행하였다.

3. 가속 수명 시험 결과 및 해석

3.1 수명 분포의 적합성 검토 및 가속성 검증

파일럿 램프의 가속수명시험을 수행하여 텅스텐 필라멘트 단선의 고장을 재현하였다. 시험을 통하여 얻은 결과에 적합한 수명분포를 해석하기 위하여 ALTA 7.0을 이용하여 와이블, 지수, 대수정규 분포의 우도함수(Likelihood function)값을 비교하였다. 어떤 가설 H에 대해 우도란, 어떤 시행의 결과 E가 주어졌다고 할 때, 만일 주어진 가설 H가 참이라면 그러한 결과 E가 나올 정도는 얼마나 되겠느냐 하는 것이다. 따라서 우도함수 값이 가장 큰 분포가 적합한 수명분포이다. 우도함수 그 결과는 Table 2에 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 세 가지 시료 모두 우도함수 값이 가장 큰 와이블 분포가 가장 적합하다는 것을 알 수 있다.

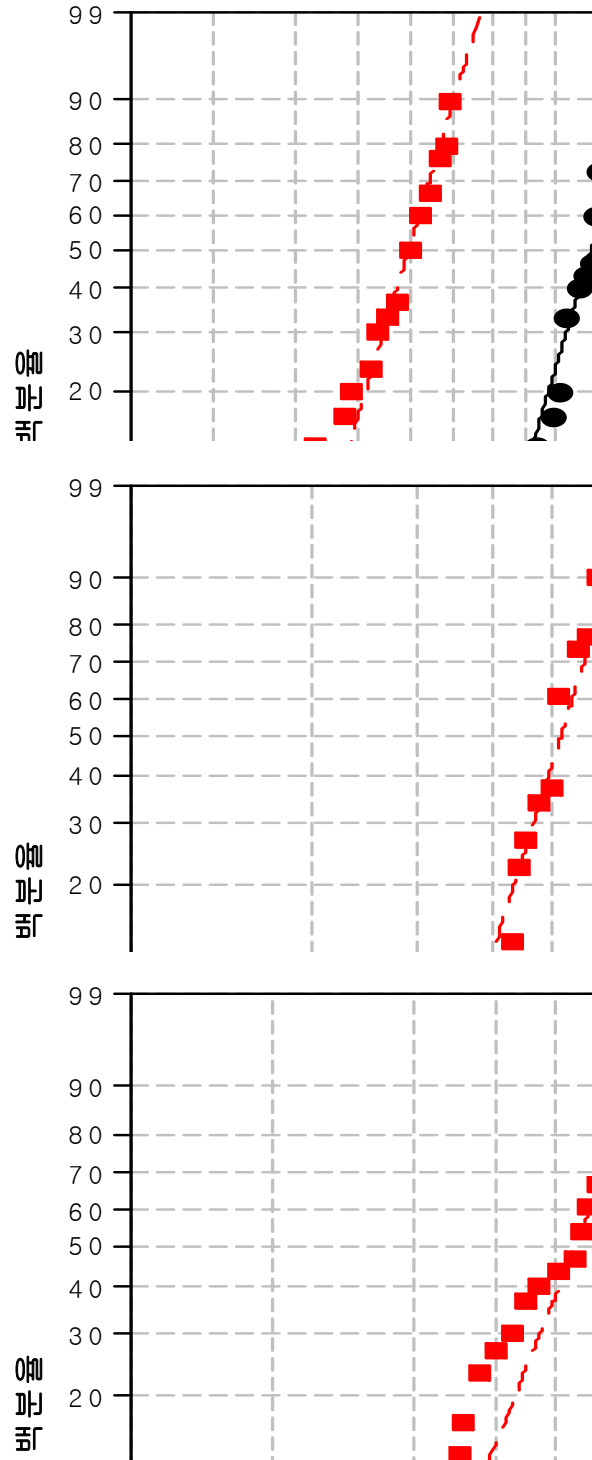
가속수명시험 결과를 Fig. 5와 같이 와이블 확률 용지에 타점하고 사용자 환경인 13.5V에서의 수명을 예측하였다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 각 시료마다 전압별 데이터들이 직선에 가깝고 각각의 수명 분포 추정선 또한 평행하게 나타난다. 또한 각 시료별로 전압에 따른 형상모수가 유사함을 알 수 있다. 따라서 전압 스트레스에 의한 가속성이 성립함을 보여준다.

<표 2> 수명 분포의 적합성 검토

시료구분	수명분포	우도함수	순위
A	와이블	-212.4	1
	지수	-301.6	3
	대수정규	-214.4	2
B	와이블	-214.5	1
	지수	-292.4	3
	대수정규	-218.6	2
C	와이블	-273.9	1
	지수	-322.6	3
	대수정규	-274.7	2

<표 3> 가속수명시험 결과 추정 상수

	A	B	C
형상모수	7.61	6.36	3.80
K	5.66E-15	3.32E-14	5.38E-15
n	8.97	8.41	8.84



<그림 5> 시료별 와이블 분포 선도(순서대로 A, B, C)

3.2 와이블 형상모수와 수명-스트레스 관계

가속수명시험 모델인 역승모델에 적용하여 추정된 형상모수 및 상수를 Table 3에 나타내었다. 이를 이용하여 파일럿 램프의 전압에 의한 수명-스트레스 관계식을 정리하면 아래의 식과 같다.

$$\text{시료 A : } L(V) = \frac{1}{5.66 \times 10^{-15} \cdot V^{8.97}}$$

$$\text{시료 B : } L(V) = \frac{1}{3.32 \times 10^{-14} \cdot V^{8.41}}$$

$$\text{시료 C : } L(V) = \frac{1}{5.38 \times 10^{-15} \cdot V^{8.84}}$$

또한 가속계수 AF는 다음 식으로부터 구해질 수 있다.

$$AF = \frac{L(V_d)}{L(V_a)} = \left(\frac{V_a}{V_d}\right)^n$$

따라서 시료 각각에 대한 가속계수에 대한 식은 아래와 같다.

$$\text{시료 A : } AF(V) = \left(\frac{V_a}{V_d}\right)^{8.97}$$

$$\text{시료 B : } AF(V) = \left(\frac{V_a}{V_d}\right)^{8.41}$$

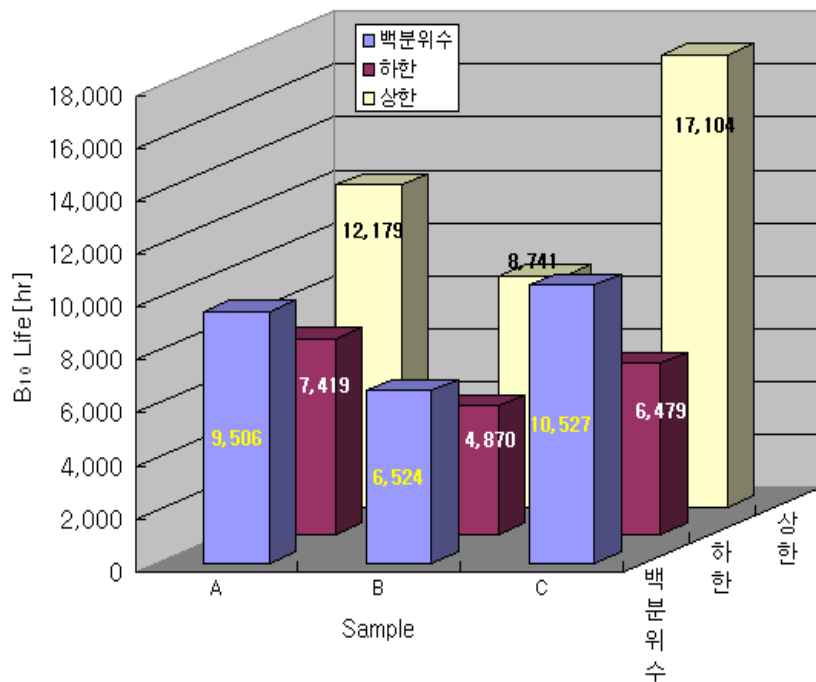
$$\text{시료 C : } AF(V) = \left(\frac{V_a}{V_d}\right)^{8.84}$$

3.3 사용자 환경의 보증 수명 해석

자동차용 파일럿 램프의 사용자 전압인 13.5V에서의 B10(신뢰수준 90%) 수명을 예측하기 위하여 미니탭을 이용하여 10 백분위수를 각 시료 데이터로부터 산출하였다. 그 결과는 Table 4에 나타내었다. 10 백분위수는 누적고장확률이 10%가 되는 시점, 즉 사용자 환경에서의 B10 수명을 의미하며 하한값과 상한값은 신뢰수준 90%일 때의 B10 수명의 범위를 의미한다. 자동차용 파일럿 램프의 10년 또는 160,000 km 기준의 필드 사용시간인 5,000시간과 비교해 볼 때 시료 A, B, C 모두 목표수명을 상회한다. 이는 세 종류 시료 모두 자동차 수명 수준 이상임을 보여준다.

Table 4를 도식화 하면 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 해외 선진 제품인 시료 A와 B에 비해 국산 제품인 시료 C의 B10 수명이 더 길다. B10 수명인 10백분위수를 비교해 볼 때

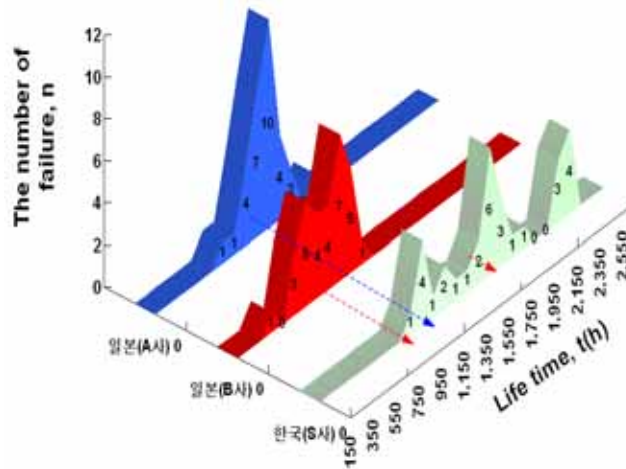
시료 C는 시료 A보다 1,000시간, 시료 B보다 4,000시간 길다. 또한 시료 C의 B10 수명 하한 값은 시료 B보다 약 1,500시간 수명이 길고, 시료 A보다는 약 1,000시간 수명이 짧다. 시료 C 수명의 상한치는 시료 A, B의 수명에 비해 약 1.4~1.9배 정도 길다. 이 결과로부터 국산 파일럿 램프는 수명 측면에서 해외 선진사의 제품과 비교하여 수명이 동등하거나, 일부 제품에 비해서는 우수한 것으로 평가된다. 그러나 Fig. 7에서 보여지는 것처럼 국산 제품의 수명의 경우 상한치와 하한치의 차이가 큰 것으로 보아 제품의 수명 분포가 해외 선진사 제품에 비해 비교적 큰 것으로 평가됨으로 이에 대한 개선활동이 요구된다.



<그림 6> B10 수명 비교 평가 결과

<표 4> 사용자 환경에서의 B10 수명

시료구분	10백분위수	90% 정규 CI	
		하한	상한
A	9,506	7,419	12,179
B	6,524	4,870	8,741
C	10,527	6,479	17,104



<그림 7> 램프 수명 데이터 분포도

4. 결 론

본 연구에서는 자동차용 파일럿 램프의 가속 수명시험법을 개발하고 한계 수명 시험을 통하여 수명 데이터를 얻었으며 이로부터 수명과 전압 스트레스의 상관관계를 분석하고 가속 수명식을 정립하였다. 그 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 자동차용 파일럿 램프의 수명 해석 결과 와이בל 분포를 따른다는 것을 알 수 있었으며 10년 차량 운행 시간인 5,000 시간보다 신뢰수준 90%로 파일럿 램프의 B10 수명이 길다는 것을 증명하였다.
- 2) 국산 제품의 수명을 해외 선진사 제품과 비교분석함으로써 국산 제품의 수명이 해외 선진 제품 수명의 동등 수준 이상임을 알 수 있었다.
- 3) 자동차용 국산 파일럿 램프의 수명 해석 결과 제품의 수명 분포가 해외 선진사 제품에 비해 비교적 큰 것으로 평가되었다. 이를 통해 제품의 불균일성을 가늠할 수 있고 개선 활동이 요구된다.
- 4) 본 연구의 결과로부터 해외 자동차용 파일럿 램프를 국내 제품으로 대체가 가능성이 입증되었고 이를 통해 수입대체 효과를 기대할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] http://www.bts.gov/programs/national_household_travel_survey/daily_travel.html
- [2] Convington, E.J., 1973, "Hot spot burn out of tungsten filaments," journal of IES, JULY, pp.372~380
- [3] Horaesek, O., 1980, "Properties and failure modes of incandescent tungsten filaments," IEEE PROC., 127A(3), pp. 134~141
- [4] Godfrey, T. J. et al., 1976, "On the nature and distribution of defects in tungsten lamp wire," Journal of the less-common meta, 44, pp. 319~326