

<논 문> SAE NO. 953789

**피로수명 예측법을 이용한
각 도로가 차량의 내구성에 미치는 가혹도 평가**
Severity Test of Road Surface Profile by Using
the Fatigue Life Prediction Method

정 원 욱,* 강 성 수**
W. W. Jung, S. S. Kang

ABSTRACT

There are several kinds of driving conditions according to the characteristic of each vehicle diver. Automaker produces vehicle strong enough to satisfy this several driving conditions at the point of vehicle durability. In order to develop the car in a short period, Automaker engineer tests vehicle at serveral accelerated durability test roads.

Before testing the vehicle durability, test engineer must know how much this test road severe than general field road which is composed of high way, city road, paved road and unpaved road. This paper suggests two types of road severity test method that is using relative fatigue life prediction method and using absolute fatigue life prediction method, and also present the merits and demerits of two test methods.

주요기술용어 : Fatigue(피로), Life Prediction(수명예측), Road Severity(노면 가혹도), Road Profile(노면 프로파일), Durability test(내구시험)

1. 서 론

새로운 차량이 개발되어 고객에 인도 된 후 여러가지 조건의 도로에서 보통 수년에서 수십년까지 사용되며 그 주행거리도 수십만 km까지 달한

다. 일반운전자에 따른 차량의 사용조건은 대단히 다양하며 이런 운전자의 사용조건에 부합되는 내구신뢰성을 갖도록 차량을 개발하는 것은 당연하다.

도로의 조건은 차체의 피로내구에 미치는 중요한 요소중의 하나이며 특히 포장율이 중요하다. 도로의 확장파 포장율은 나라마다 어느 정도 차이가 있으나 계속적으로 증가하고 있다. 일반적으로 유럽국가의 도로정비가 잘되어 있고, 중남

* 정회원, 현대자동차 승용제품개발1연구소
차량시험 1부

** 부산대학교 기계공학과

미와 아프리카의 국가들은 이방면에 상당히 뒤쳐져 있으며 아시아는 유럽과 아프리카 중남미의 중간이다. 아시아에서는 한국, 대만, 홍콩, 말레이시아등 동남아시아의 도로포장율이 비교적 높다.

차량제작사에서 차량을 개발할 때에는 여러가지 종류의 길에서 주행하는 것을 예상하여 여기에 맞는 목표의 내구성을 갖도록 개발하게 된다. 제작사에서 고객과 같은 조건으로 수십년에 걸쳐 시험해서 차량을 개발해 낼 수 없으므로 수개월만에 정확히 그 현상을 재현해 내어야 하며 이를 위해 일반도로의 수십 내지 수백배의 가혹도를 가지는 가혹한 내구시험로를 구성하여 내구시험을 실시하게 된다. 제작사에서는 각 차종에 따라 어떤 도로를 어떤 비율로 주행할 것인가를 설정하여 일반도로에서의 주행거리 목표를 얼마로 할 것인지 설정하고 여기에 맞춰서 제작사 자체의 내구 시험로에서의 내구시험 주행조건 및 내구시험 목표 주행거리를 설정하게 된다.

차량의 사용 목적이나 조건에 따라 다르나 일반적으로 연간 주행거리가 승용차의 경우 1~2만km, 트럭의 경우 3~4만km, 버스의 경우 5~6만km 이고 폐차시까지의 평균수명은 승용차의 경우 5~10년 버스나 트럭의 경우 10~15년 정도이다. 점차 일반도로의 포장율이 높아지고 있으며, 이에 따라 차량이 받는 피로피해가 감소하게 되고, 포장도로라 하여도 그 형식과 정비상태가 상당히 다르고, 운행차량의 하중조건에 있어서도 나라에 따라 달라, 과적을 주로하는 곳도 있으며, 차량을 개조하여 용도를 바꾸기도 하는 등 달라지므로 내구목표도 일반사용자 조건에 맞춰 수정하여 가면서 차량을 개발하게 된다. 이때 일반사용자의 길과 가속화를 위한 내구시험로의 상관관계를 규명하여 내구 시험로가 일반고객의 몇배나 가혹하게 조합된 길에 비하여 몇배나 가혹하게 되어 있는가에 대한 정확한 평가가 요구되며 이는 차량개발시 중요한 요소의 하나이다. 본고에서는 이에 따라 각 길의 가혹도를 평가하는 여러가지 방법에 대해 설명하고 이에 따른 대표적 길의 내구 가혹도를 제시하고자 한다.

차량이 내구시험로를 주행한 후 받은 각 부분

의 피로피해가 일반도로를 주행한 후 받은 피로피해와 같은 비율의 피로피해를 받도록 내구시험로를 만드는 것은 지극히 어렵다. 내구시험로에서 차량이 주행할때 차량 각각의 부위가 일반도로 주행때와 비교하여 부위와 관계없이 일률적으로 피로피해를 받는 것이 아니라 서스펜션, 차체의 구조특성 및 차량의 크기에 따라 각 부위가 받는 피로피해는 달라지며 차량개발시 일반도로의 주행목표를 만족하기 위하여 각 부위별에 대한 내구 시험시의 목표는 달라질 수 있다. 이때 내구목표를 정하기 위해 각 도로의 각 부위에 대한 정확한 가혹도 평가가 필요한 것이다.

도로의 가혹도를 평가하는 방법에 있어서는 차량 각 부위에 스트레인 게이지를 부착하여 변형을 측정에 의해 평가하는 방법과 진동가속도의 측정에 의한 방법이 있으며 여기서는 차량의 각 부위가 피로파괴와 직접관계가 있는 각 부분의 변형율을 측정함에 의해 평가하는 방법을 다루고자 한다. 직접 변형율을 측정하여 평가하는 방법에 있어서는 사용하는 피로 선도 및 분석하는 방법에 따라 절대수명 평가법과 상대수명 평가법이 있다.

2. 변형을 측정방법

변형을 측정을 위해서는 스트레인 게이지, 신호증폭기, 기록기, 신호분석기등의 장비가 사용되며 시험차의 시험중량은 필요에 따라서 공차, 2명승차, 총원승차 등으로 구분할 수 있으며 상용차량의 경우 적절한 과하중 조건을 부여하여 설정한다. 노면의 영향을 직접적으로 받는 부위등을 선정하여 적절한 스위치에 스트레인 게이지를 부착하여 변형율을 측정하고 이 측정된 변형율을 해석하여 각 부위의 피로 피해도를 구한다음 이를 피로수명으로 환산한다. 스트레인 게이지 부착 위치는 도로의 노면특성을 대표적으로 나타낼 수 있는 부위로 샤시와 차체 부분을 앞쪽과 뒤쪽으로 구분하여 측정한다. 각 부분으로 구분한 것은 차량평가시 크게 4부분으로 구분하여 내구시험의 목표를 정하고 있기 때문이며 너무 세분할 경우 각 차종마다 특성이 다르므로 일반

화 할 수 없다.

시험은 각 도로별, 무게 조건별로 여러차례 측정하여 산술 평균하며 특별히 차이가 많은 부분은 별도로 재측정 한다. 측정결과 변형이 많은 부분을 주요 분석대상으로 선정하며 일정 변형을 이하인 채널은 분석시 오차가 많으므로 제외한다.

3. 피로수명 예측법

3.1 절대수명 평가법

실험실에서 단순시험에 의해 구해진 변형-반복회수 선도($\epsilon-N$)를 그대로 사용하여 실차의 수명을 예측하면 많은 편차가 생긴다. 이것은 실

차에서 받는 하중조건이 실험실에서 주어지는 하중 조건과 다르기 때문이며 형상 또한 일정하지 않아 노치의 효과등을 실험실에서 정확하게 재현해 낼 수 없기 때문이다. 이에따라 차량제작사에서는 하중조건과 노치함수를 모두 포함한 해당부위의 변위를 측정하고 실제주행에 의한 해당부위의 실차 수명을 시험을 통하여 알아낸 후 $\epsilon-N$ 곡선을 이동해 가면서 실차수명을 구할 수 있는 절대 $\epsilon-N$ 곡선을 구하고 이를 비슷한 조건의 타 부위에 응용하여 실제 수명을 예측하고 있다.

절대수명 예측 및 노면가혹도 평가 흐름도는 그림 1과 같으며, 그림 2는 실험실에서 구해진 $\epsilon-N$ 곡선을 이동하여 절대수명 예측용 $\epsilon-N$ 곡선을 유추하는 한 예를 나타낸다.

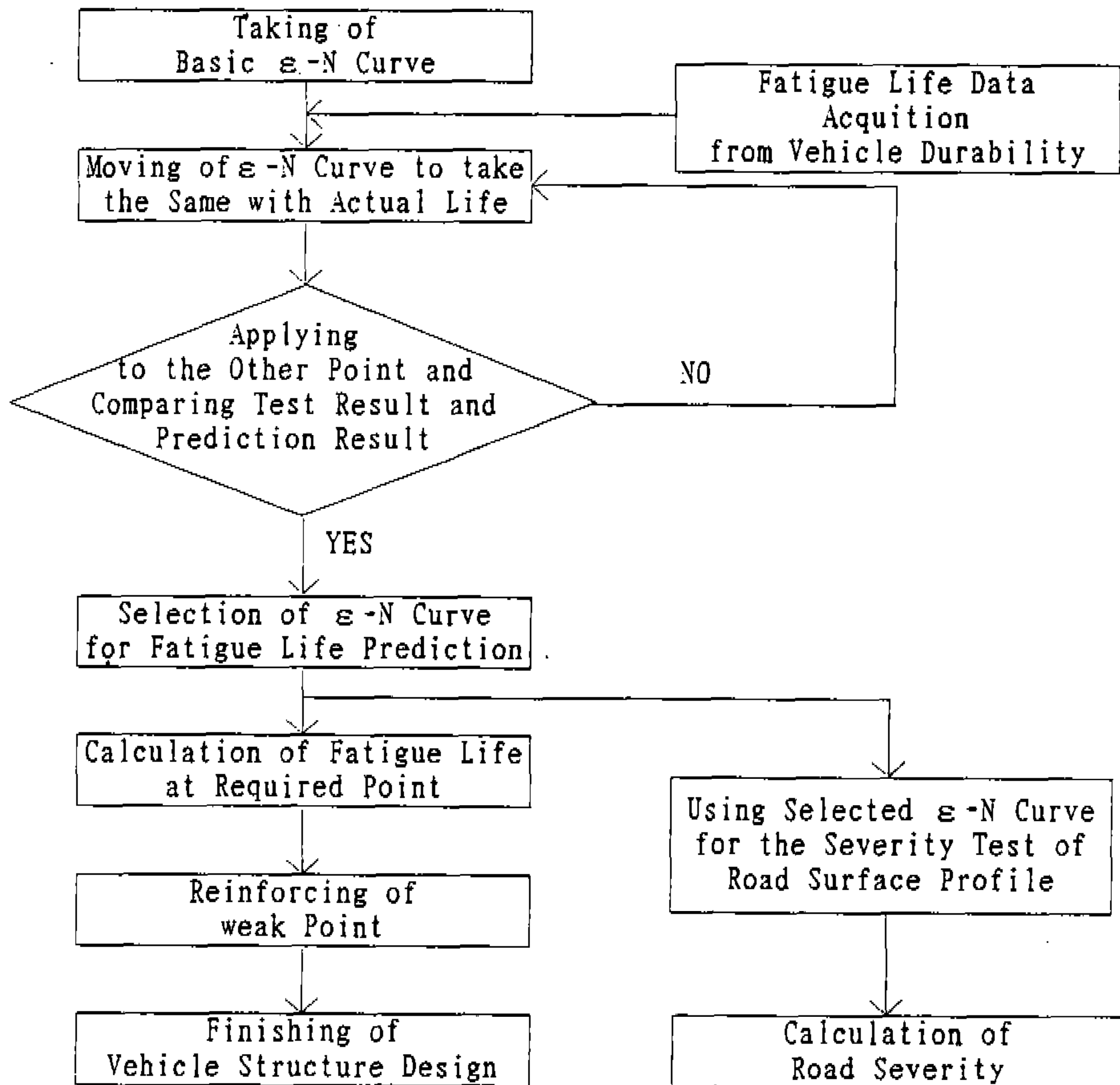


Fig.1 Flow Chart of Fatigue Life Prediction and Road Severity Test Method

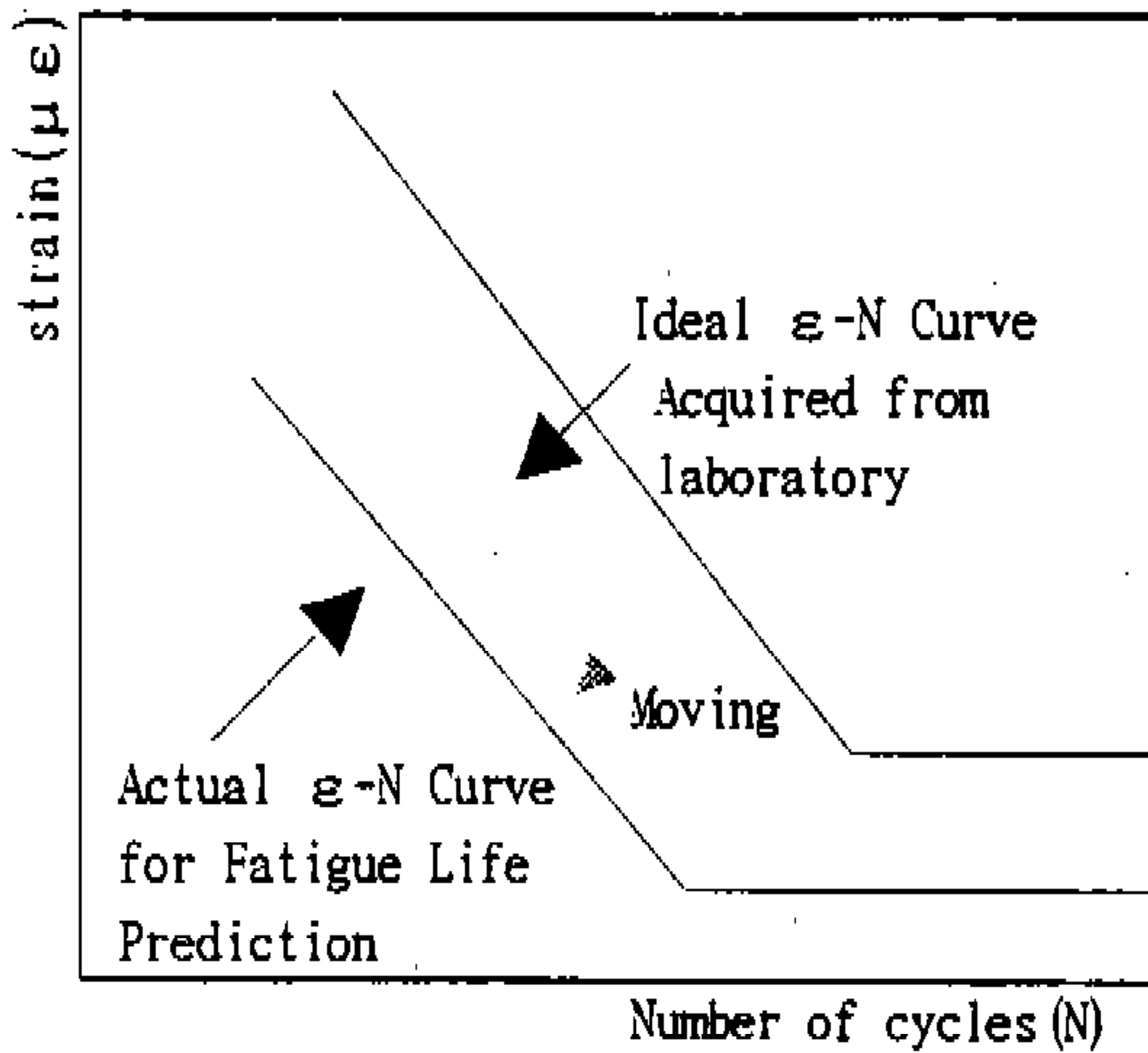


Fig.2 Moving of ε-N Curve

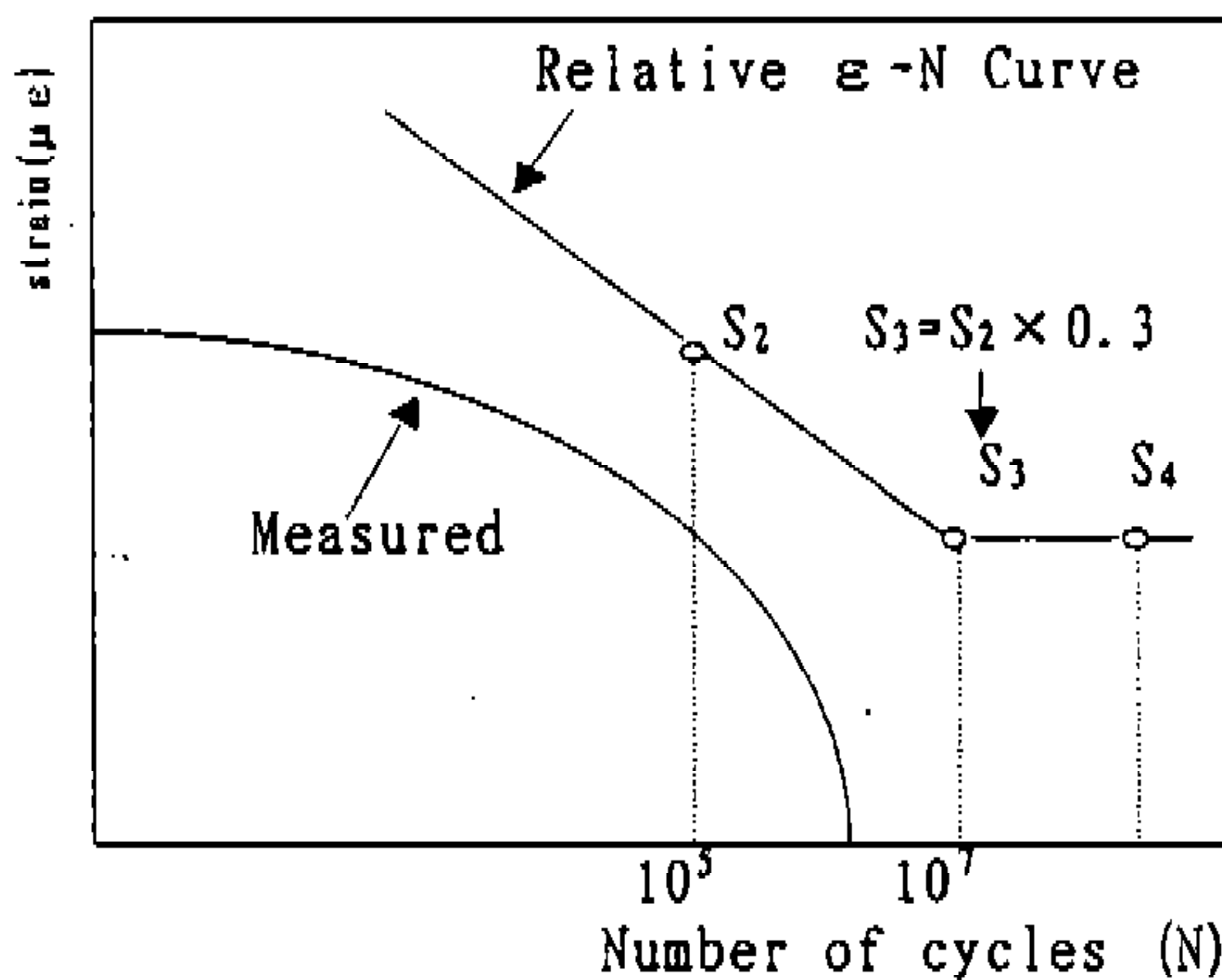


Fig.3 Taking Method of Relative ε-N Curve

이때 얻어진 절대 ε-N 곡선을 이용하여 비교하고자 하는 각종 도로에서의 수명을 비교함으로써 각 도로의 가속도가 구해지게 되며 수명은 Miner의 법칙에 의하여 구한다.

3.2 상대수명 평가법

일정 무게조건외 차량이 정해진 기준도로(불변)를 주행하면서 각 부위의 변형율을 측정하여 변형을 진폭의 갯수를 크기별로 분류하여 히스토그램을 작성한 후 큰 변형을 쪽에서부터 회수를 가산하여 1km당 1회 받는 변형율을 10⁵에 해당하는 피로수명 변형율로 가상하여 그림 3에서와 같이 S₂점을 정하고 S₂의 세로축 값에 0.3을 곱

하여 구하여진 값과 반복회수 축상의 10⁷로과 만나는 점을 S₃로 한다. 점 S₂와 S₃의 연장선 상에서 10³, 10⁴에 해당하는 변형율을 구하고 반복회수 10⁷이후 S₄의 세로축 값은 S₃와 같게하여 ε-N 곡선을 구한다. 이 구해진 ε-N 곡선을 이용하여 Miner의 수명산출 법칙을 적용하여 수명을 구하게 되는 것이다. 이를 통하여 구해진 수명은 절대적으로 몇km 주행후 피로 파단이 일어날 것이라는 예측은 할 수 없으나 상대수명을 서로 비교하여 이 도로가 저 도로에 비해 상대적으로 어느정도 가속하다는 것을 추론할 수 있다.

상대 수명 평가법은 편리성과 절대수명 ε-N 곡선 설정의 어려움으로 가속도 평가시 많이 이용되고 있으나 신뢰성 측면에서는 절대수명 평가법에 비해 떨어진다.

4. 절대수명 예측법을 이용한 각 도로의 노면 가속도 평가

노면상태가 일정한 기준로에서의 정해진 무게, 운행속도 및 운행조건에서의 수명을 기준으로하여 비교도로에서의 각 운행조건에 따른 가속도를 산출하게 된다. 기준로에서의 피로 수명이 Akm로 예측될 경우 이를 가속도 1로하여 비교도로에서의 수명 예측결과 Bkm일 경우 비교도로의 가속도는 A/B가 된다. 즉 가속도가 1보다 크다는 것은 비교도로의 예측 수명이 기준도로의 피로 예측 수명보다 작아짐을 의미한다. 이는 피로 수명 예측거리가 작아지는 것은 그만큼 도로자체가 가속하다는 것과 같다.

일반도로에서 각 도로별 노면의 가속도를 구하기 위해서는 각 도로에서의 특정부위(Front Chassis, Front Body, Rear Chassis, Rear Body)에서의 기준도로에 대한 가속도를 계산하게 된다.

5. 내구 시험로에서의 내구 목표거리 설정 방법

각 도로의 노면 가속도 평가법을 이용하여 내구 시험로에서의 내구 목표거리를 설정하게 되는

데 우선 일반주행자의 노면별 표준 주행비율, 폐차시까지의 목표거리 및 각 도로의 가혹도 측정 결과가 필요하다. 일반 고객차량의 각 도로별 주행비율 및 목표거리는 통계연감 혹은 고객을 통한 설문 조사를 실시하여 얻는다.

도로의 가혹도 측정은 시기나 지역에 따라 주행도로 및 주행비율을 변화시켜 가면서 측정하고 필요에 따라 지하철 공사구간, 도로 보수 구간등도 추가 할 수 있다. 일반 승용차와 영업용 택시의 경우 폐차시 까지의 주행거리는 현저한 차이를 보이는데, 한예로 일반 사용자 조건 20만km를 차량의 개발목표로 할 경우는 20만km 주행시까지 차량의 주요한 부분에 피로파괴가 일어나지 않도록 설계하는 것을 의미하는데, 이때 20만km 주행시의 탑승무게조건 및 적재하중등도 사용자 조사결과나 통계에 따라 정한다.

일반도로 운행차량의 무게조건을 2명승차, 정원승차, 50% 과적재, 100% 과적재 4가지로 나눈다면 각 도로에서의 내구가혹도는 다음식에 따라 구해진다.

$$\begin{aligned} \text{선정된 도로의 내구가혹도} &= \text{선정된 도로의 2UP} \\ &\text{가혹도} \times \text{2UP 적재비율} + \text{GVW 가혹도} \times \\ &\text{GVW 적재비율} + 50\% \text{ 과적재 가혹도} \times \\ &50\% \text{ 과적재 비율} + 100\% \text{ 과적재 가혹도} \times \\ &100\% \text{ 과적재 비율} \end{aligned}$$

같은 방법으로 여러가지 다른노면의 내구가혹도를 구하게 된다. 즉 적재비율이 포함된 시내도로 내구가혹도, 고속도로 내구가혹도, 국도 내구가혹도, 비포장도로 내구가혹도, 지하철공사로 내구가혹도 등이 구해진다. 다음으로 적재비율 및 주행비율이 포함된 사용자조건 일반도로의 전체가혹도(기준도로에서의 수명기준)가 구해진다. 즉 일반도로의 전체가혹도는

$$\begin{aligned} \text{전체 가혹도} &= \text{시내도로 가혹도} \times \text{시내로 주행비율} \\ &+ \text{지하철공사로 가혹도} \times \text{지하철공사로 주행비율} \\ &+ \text{고속도로 가혹도} \times \text{고속도로 주행비율} \\ &+ \text{국도 가혹도} \times \text{국도 주행비율} \\ &+ \text{비포장도로 가혹도} \times \text{비포장로 주행비율} \end{aligned}$$

로 구해지며 이를 이용하여 A, B내구 시험로에서의 목표거리는 다음식에 의해 구해진다.

$$\text{A 내구시험로 목표거리} = (\text{일반도로 전체 가혹도} \times \text{설계 목표거리}(20\text{만km등}) / \text{A내구시험로 가혹도}$$

$$\text{B 내구시험로 목표거리} = (\text{일반도로 전체 가혹도} \times \text{설계 목표거리}(20\text{만km등}) / \text{B내구시험로 가혹도}$$

6. 내구 시험로에서의 내구 목표 설정에

차량제작사에서 사용하는 시험로에서의 내구 목표 주행거리를 설정하기 위해서는 다음과 같은 단계로 실시하게 된다.

제 1 단계 : 일반주행로의 내구목표 주행거리를 설정하게 된다.

표 1에서와 같이 일반승용차 영업용택시등 용도를 구분하여 목표주행거리 및 차량수명을 설정하게되는데 제작사별로 어느정도의 신뢰도를 갖게 할 것인가에 따라 달리 설정될 수 있다. 본예에서는 20만km를 승용차의 일반도로 주행목표로

Table 1 Average driving mileage before destruction

Driving Mileage at Destruction	Passenger Car	Taxi
100,000km Below	15%	
100,000km ~ 150,000km	45%	
150,000km ~ 200,000km	25%	2%
200,000km ~ 300,000km	15%	15%
300,000km ~ 400,000km		44%
400,000km ~ 500,000km		34%
500,000km Above		5%

Table 2 Average driving mileage per year

Nation	Korea	Japan	France	Germany	U.S.A
Driving Mileage per Year	24,100km	10,200km	13,400km	14,600km	15,900km

Table 3 Average vehicle life(Automotive Yearbook, Japan 1994)

Year	Passenger car		Commercial Vehicle	
	Composition rate %	Residual rate %	Composition rate %	Residual rate %
0.1 ~ 0.3 Years	3.3	99.96	2.46	99.91
0.4 ~ 1.3 Years	12.23	99.68	10.18	99.45
1.4 ~ 2.3 Years	12.87	99.09	11.76	98.52
2.4 ~ 3.3 Years	13.16	97.02	11.95	97.02
3.4 ~ 4.3 Years	11.93	96.22	11.58	94.1
4.4 ~ 5.3 Years	10.14	93.38	10.51	88.91
5.4 ~ 6.3 Years	8.6	90.41	8.17	80.14
6.4 ~ 7.3 Years	7.58	83.85	6.64	70.63
7.4 ~ 8.3 Years	6.4	72.98	5.83	60.03
8.4 ~ 9.3 Years	4.96	57.51	4.69	48.12
9.4 ~ 10.3 Years	3.16	36.34	3.41	35.81
10.4 ~ 11.3 Years	1.91	24.06	2.81	23.34
11.4 ~ 12.3 Years	1.33	16.33	2.37	21.83
12.4 ~ 13.3 Years	0.72	8.96	2.17	17.73
13.4 Years above	1.71		5.47	
Total	100		100	
Averaging present year	4.58 Years		5.38 Years	
Average destruction year	9.36 Years		9.46 Years	

Table 4 Pavement rate of each nation(%)

Nation/Year	80	85	88	89	90	91	92	93
Korea	33.2	49.9	61.4	66.4	71.5	76.4	80.8	84.7
U.S.A		55	57	58.2				
Japan		57.9		68	69.2			
Germany	99	99	99					
England		100		100	100			
France		93.5		93.5	93.5			

Table 5 Driving rate at each road

Road	City road	Paved road	High way	Unpaved road
주행비율	53.60%	26.80%	18.10%	1.50%

Table 6 Weight condition of commercial vehicle

Weight	2Up	G.V.W	50% Overload	100% Overload
비율	35%	35%	25%	5%

Table 7 Weight condition of passenger car

Weight	1Up	2Up	3Up	4Up	5Up	Average
Rate	27%	50%	13%	3%	7%	2Up

삼아 내구시험로의 목표거리를 산출해보고자 한다.

일본등에서는 표 2에서 보는바와 같이 차량 1대당 연간 주행거리가 타나라에 비해 적으며 차량사용년수는 표 3과 같으므로 일본수출용 차량은 일본사용조건에 맞춰 목표를 설정해야 할 것이다.

제 2 단계 : 일반주행로의 주행모드를 설정한다.

표 4, 표 5에서와 같이 도로포장을 및 각 도로별 주행비율을 조사하여 표준 주행모드를 설정하게 된다. 본 예에서는 주행모드중 하나인 시내로 53.6%, 국도 26.8%, 고속도로 18.1%, 비포장

Table 8 Strain gage attaching point

Channel	Front Body	Channel	Front Chassis
1	Member Radiator Support	8	Lower Arm L/Hand
2	Radiator Lower Bracket	9	Lower Arm R/Hand
3	Fender Apron L/Hand	10	Cross Member Front L/Hand
4	Fender Apron R/Hand	11	Cross Member Front R/Hand
5	Wheel Housing L/Hand	12	Cross Member Rear L/Hand
6	Wheel Housing R/Hand	13	Cross Member Rear R/Hand
7	Front Pillar	14	Tie Rod End
Channel	Rear Body	Channel	Rear Chassis
15	Rear Pillar	22	T/Arm Stay
16	Package Tray L/Hand	23	T/Arm Reinforce L/Hand
17	Package Tray R/Hand	24	T/Arm Reinforce Lower L/Hand
18	Wheel Housing L/Hand	25	T/Arm Reinforce Upper R/Hand
19	Floor	26	T/Arm Reinforce R/Hand
20	Side Member L/Hand	27	T/Arm Reinforce Upper R/Hand
21	Side Member R/Hand	28	T/Arm Torsion Bar

Table 9 Test equipments

Equipment	Remarks
Strain Gage	Sensor
Bridge Box	Composition of whistone bridge
Strain Amplifier	Amplifying of signal
Tape Recorder	Storage of signal
Stress Wave Analyzer	Calculation of fatigue damage

도로 1.5%를 주행모드로 설정하였다.

제 3 단계 : 표 6, 표 7에서와 같이 일반도로에서의 주행 무게조건을 설정한다.

제 4 단계 : 정해진 주행모드와 주행조건으로 일반주행도로의 가속도를 측정한다.

목표 주행거리, 도로별 주행비율, 주행무게조건이 설정되고 난 후는 가속도를 측정하는데 차량에서 도로의 가속도를 쉽게 감지할 수 있는 부위나 취약부위를 측정하기도 한다. 표 8은 측정치의 예를 보이며 표 9는 측정 및 분석에 사용된 장비를 나타낸다.

표 10은 각 채널에 따른 일반도로의 가속도를 산출한 결과이다. 각 채널에 나타난 데이터는 산술평균하였으며 미미한 입력신호를 받았거나 많은 차이를 나타내는 신호는 재측정하거나 삭제하여 처리한다.

제 5 단계 : 제 4 단계에서 측정된 가속도를 기준으로 내구 시험로에서의 내구 목표거리를 결정한다.

제작사에 따라 시험로의 종류를 여러가지로 하여 그에 따른 장단점을 이용하고 있다. 여기서는 표 11과 같이 2가지 시험로에 대한 내구목표거리를 설정한다.

7. 결 론

절대 피로수명 예측법을 이용한 각 도로가 차량의 내구성에 미치는 가속도 평가법 개발을 통해 일반 주행도로와 시험도로의 상관 관계를 설정할 수 있었으며 이를 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 절대 피로수명 예측법을 이용한 내구시험로의 내구가속도 평가 결과는 차량의 내구

Table 10 Severity measurement at general road.

Part	Weight condition	General road			
		City road	Paved road	Highway	Unpaved road
Front Chassis	2Up	0.001541	0.000366	0.000254	0.189421
	G.V.W	0.001135	0.00059	0.000441	0.192516
Rear Body	2Up	0.000284	0.000059	0.000066	0.138431
	G.V.W	0.000349	0.000114	0.000095	0.284708
Front Chassis	2Up	0.011199	0.002559	0.000535	0.185682
	G.V.W	0.018161	0.007871	0.002638	0.331256
Rear Chassis	2Up	0.005709	0.000441	0.000435	0.321072
	G.V.W	0.006403	0.000484	0.001579	0.370461

Table 11 Decision of requiring test cycle at each durability test road

Test	Part	Passenger car	Taxi
"A" Durability road	Body	1,500 cycle	2,500 cycle
	Chassis	2,000 cycle	3,000 cycle
"B" Durability road	Body	25,000 cycle	50,000 cycle
	Chassis	30,000 cycle	50,000 cycle

력 관련 문제 발생 현황과 잘 일치하였다.

- 2) 차량의 각 부분에 따라 내구목표를 달리 하는것이 요구된다.
- 3) 각 내구시험로에 따라 내구의 목표는 달라 지게 되나 이는 항상 선형적으로 비례해 가는것은 아니다.
- 4) 정기적인 일반도로의 사용조건에 대한 정확한 조사가 요구되며 이에 따른 내구목표의 수정이 필요하다.

적절한 내구시험 목표를 설정하여 차량을 개발한 결과 최적조건외 내구신뢰도를 갖는 차량을 개발해 낼 수 있었다. 또한 절대수명 예측결과가 실제 문제 발생시점의 결과와 잘 일치되고 있으며 이를 토대로 적절한 피로강도를 갖는 차량개발 뿐만아니라 내구시험용 차량의 시험회수를 줄일수 있었다.

참 고 문 헌

1. 1993 자동차산업, 현대자동차, 1993
2. Automotive Yearbook, 일간자동차 신문사

- 일본자동차회의소, 1994
3. 교통년감, 교통신문사, 1994
4. 정원욱, 민병훈, 차량의 가속내구 시험을 위한 TEST ROAD PROFILE 설계방법, 한국자동차공학회 논문집(제 2 권 제 1 호, 1994년 1 월)
5. Thomas S. chelsky, A laboratory fatigue test program for steering components base on field load data, SAE paper 740944, Automonbile engineering meeting, 1974
6. Technical report on fatigue properties, SAE J1099, SAE 1978 Hand Book.
7. Won Wook Jung, Byung Hoon Min, Fa-tigue life prediction using S-N curve modification, SAE paper 912519, The 6th IPC, 1991
8. Won Wook Jung, Byung Hoon Min, Design method of test road profile for vehicle accelerated durability test, SAE paper 931911, The 7th IPC, 1993