

# 자동차 부품의 강도 신뢰성 평가

한 교 진 · 지엠대우오토엔테크놀로지 기술연구소  
신 현 동 · 지엠대우오토엔테크놀로지 기술연구소

\_e-mail : Kyojin.han@gmdat.com  
\_e-mail : hyundong.shin@gmdat.com

이 글에서는 토크 스트럿 마운팅 브라켓에 걸리는 실차 상태에서의 부하를 측정하고, 실험실에서 인장강도 실험을 수행하여 강도와 부하의 분포를 구한 다음 간섭이론을 이용하여 신뢰성을 평가하고 그 결과를 이용하여 토크 스트럿 마운팅 브라켓의 시험 규격을 설정하는 방법을 고찰한다.

차량에서 파워트레인 마운팅 시스템은 엔진과 차체를 연결하여 주는 시스템으로 파워트레인의 무게를 지지하고, 파워트레인의 모션을 제한하며, 파워트레인 자체가 만들어내는 진동과 도로로부터 기인하는 진동 모두를 절연하는 기능을 수행하는 차량의 중요한 시스템 중 하나이다.

상호 상반되는 구속조건을 적절하게 대응하기 위해 파워트레인 마운트는 유연한 마운팅(flexible mounting)을 적용하고 있으며, 차량의 승차감 및 운동 성능에 많은 영향을 미친다.

파워트레인 마운트는 파워트

레인 자체에서 기인한 진동과 모션(Roll, Pitch, Yaw) 및 도로의 부하와 같은 다양한 형태의 부하를 받게 되고 이를 지지하는 파워트레인 마운팅 브라켓의 경우는 부품의 강도가 중요한 설계변수이며 신뢰성을 결정하는 중요한 변수가 된다.

신뢰성을 높이면 필드에서의 고장은 줄일 수 있으나, 브라켓의 무게와 부피측면에 있어서 필요 이상으로 커지게 되므로 차량의 승차감 및 운동성능과 부품가격 등에는 나쁜 영향을 미치게 된다.

따라서 차량 주행 중에 노출되는 다양한 부하를 견디면서 최적의 신뢰도를 갖는 파워트레인

마운팅 브라켓을 개발하고, 이를 평가하는 시험규격을 결정하는 것은 매우 중요하다.

파워트레인 마운팅 브라켓과 같이 다양한 부하를 반복하여 계속 받고 있는 부품의 내구 시험 규격은 다음과 같은 순서에 의하여 제정된다.

먼저 소비자가 10년 16만 km를 운행하는 것과 동일한 부하를 재현하기 위해 주행성능 시험장(proving ground)에서 차량을 주행하면서 파워트레인 마운팅 브라켓에 걸리는 부하를 측정한다.

이로부터 동일한 손상을 주는 적정 크기의 부하와 사이클을 결

정하고, 부품의 신뢰도 목표를 설정하면 이를 어느 정도의 유의수준으로 검증할 것인가 결정하여 이로부터 시험 규격을 정하게 된다.

파워트레인 마운팅 브라켓 중 하나이며, 주로 파워트레인에서 발생하는 토크 모션과 진동을 제어 및 절연하는 토크 스트럿 마운팅 브라켓은 이와 같은 절차를 밟아 내구시험 규격을 정하고 이를 적용하여 시험하게 된다. 그러나 차량개발 과정 중에(0~100 km 가속시험 등) 파손이 발생하게 되면 이에 대한 신뢰도를 평가하게 된다.

이는 부품의 형상과 재질 및 차량 상태에서의 조합에 따라 내구시험 규격이 가혹한 것인지, 최대부하 조건이 가혹한 것인지 결정되는 것이기 때문이며, 이에 따라 최대부하 조건에서 충분한 신뢰도를 갖는 시험규격을 새로이 제정할 필요가 있는 것이다.

재료 및 부품의 강도(strength)가 여기에 가해지는 부하(stress)보다 낮으면 고장이 발생하게 된다. 여기에서 강도라 함은 외부에서 부하가 걸렸을 때 고장 없이 만족스럽게 기능을 수행하는 재료, 부품 및 장치의 능력을 의미하며, 부하라 함은 재료 부품 및 장치의 고장을 유발시키는 것으로서 기계적 부하(load), 환경, 온도, 전류 등을 의미한다.

강도와 부하는 확률 분포로 나타낼 수 있으나 모든 형태의 강

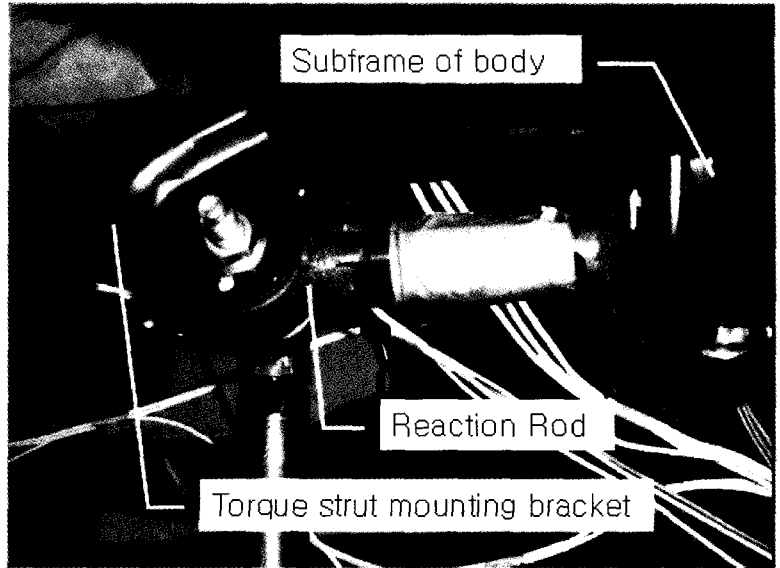


그림 1 차량상태에서의 파워트레인 마운트 브라켓

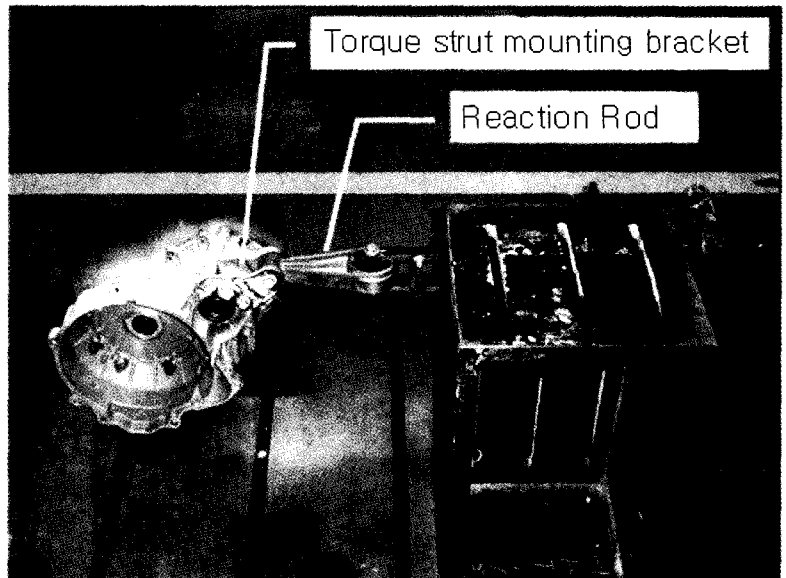


그림 2 파워트레인 마운트 브라켓 시험장치

도와 부하를 현존하는 확률분포로 나타낼 수는 없다. 왜냐하면 재료의 특성 즉 생산공정과 치수의 변동 때문에 동일한 부품일지라도 그의 강도는 기대값을 중심으로 산포를 하게 되지만 그 분

포가 대칭일 수도 있고 비대칭일 수도 있기 때문이다. 그러나 만약 강도와 부하의 확률분포가 정규분포를 따른다고 가정하면 간섭이론에 의해 부품의 불신뢰도나 고장확률은 강도와 부하의 중첩

부분이 된다. 그러므로 간섭이론에 의거 부품의 신뢰성을 추정하기 위해서는 어떤 시간 간격 중에는 부하의 분포와 강도의 분포에 변화가 없어야 한다.

이러한 근거를 바탕으로 토크 스트럿 마운팅에 대한 신뢰성 평가를 위하여는 토크 스트럿 마운팅 브라켓에 걸리는 실차 상태에서의 부하를 측정하고, 실험실에서 인장강도 실험을 수행하여 강도와 부하의 분포를 구한 다음 간섭이론을 이용하여 신뢰성을 평가하고 그 결과를 이용하여 토크 스트럿 마운팅 브라켓의 시험 규격을 설정하는 과정을 거쳐야 한다.

토크 스트럿 마운팅 브라켓과 차체의 서브 프레임을 연결해주는 reaction rod에 스트레인 게이지를 부착하여 주행 시험로에서 정지된 상태에서 100km/h까지 가속하면서 실차 상태에서의 하중 조건을 측정하였다. 이때 최대한 가혹한 조건의 부하를 측정하기 위하여 전문 운전원이 정지된 상태에서 WOT(Wide Open Throttle)로 100km/h까지 최대한 가속하였으며 각각의 운전원에 따라서 부하의 크기가 달라질 수 있으므로 총 3명의 전문 운전원이 같은 조건하에 차량을 운전하였다.

차량의 중량은 공차중량에 217kg을 더 한 적재차량중량 상태에서 시험하였다.

인장 강도 시험은 시험실에서

표 1 부하 분포

No	Max Load(kN)	Probability(%)	Mean Rank
1	7.09	5.0	0.05
2	7.52	10.0	0.10
3	8.40	15.0	0.15
4	8.55	20.0	0.25
5	8.98	25.0	0.25
6	9.20	30.0	0.30
7	9.40	35.0	0.35
8	9.40	40.0	0.40
9	9.43	45.0	0.45
10	9.52	50.0	0.50
11	9.60	55.0	0.55
12	9.80	60.0	0.60
13	10.35	65.0	0.65
14	10.45	70.0	0.70
15	11.20	75.0	0.75
16	11.90	80.0	0.80
17	11.95	85.0	0.85
18	12.55	90.0	0.90
19	13.50	95.0	0.95

R=0.97859

1	Mean	9.94
2	Standard Deviation	1.67

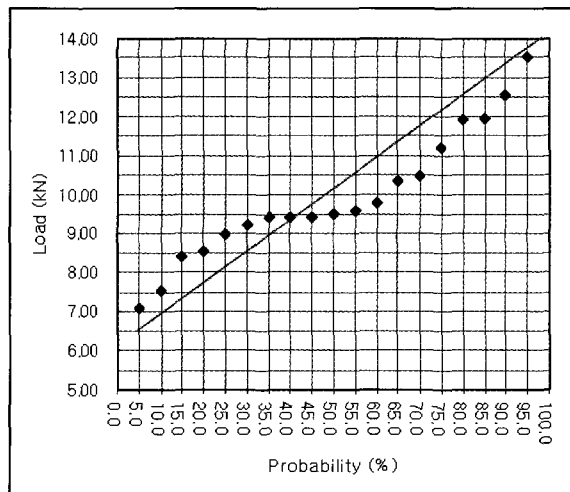


그림 3 부하(load) 정규분포

표 2 강도 분포

No	Max Load(kN)	Probability(%)	Mean Rank
1	12.7	15.9	0.1591
2	14.6	38.6	0.3864
3	15.1	61.4	0.6136
4	15.5	84.1	0.8409

R=0.93174

1	Mean	14.48
2	Standard Deviation	1.24

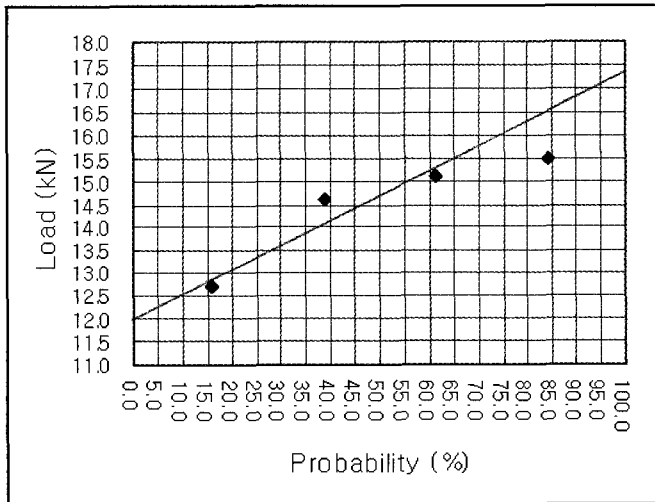


그림 4 브라켓 강도 정규분포

유압 인장 시험기를 이용하여 Jig에 토크 스트럿 마운팅 브라켓을 고정시키고 reaction rod에 인장 하중을 가하는 것으로 인장하중을 천천히 증가시키면서 토크 스트럿 마운팅 브라켓이 파손되는 시점에서의 하중을 측정하여 이 값을 파단하중 또는 부품의 강도로 정의하였다.

그림 1 및 그림 2는 실차 상태와 시험실에서 Jig에 장착된 토크 스트럿 마운팅 브라켓을 비교하여 볼 수 있다.

실차 상태에서 측정한 부하를 표 1에 나타내었다.

Mean Rank를 이용하여 각 경우의 확률을 결정하고 이를 정규분포로 가정하고 상관계수를 구하면 0.98 값을 갖는다. 이러한 부하에 따른 확률은 정규분포를 이용하여 그림 3에 나타내었으며 직선관계를 잘 만족하는 것으로 보인다.

따라서 실차 상태에서의 부하는 정규분포를 따른다고 가정할 수 있고, 이때 평균은 9.94kN이

었고, 표준편차는 1.67kN이었다.

3명 운전원의 운전기술 차이에 의한 엔진 마운팅 브라켓 부하값은 오차 범위 내에서 큰 차이가 없으며 이는 이들 운전원 모두가 차량시험을 전문적으로 하기 때문인 것으로 판단된다.

시험실에서 측정한 브라켓의 강도를 표 2에, 정규분포를 이용하여 브라켓의 강도에 따른 확률을 그림 4에 나타내었다.

브라켓의 강도는 파단 시의 강도이므로 50% Median Rank를 이용하여 누적 고장률을 구하였으며, 이로부터 정규분포를 이용하여 상관계수를 구하면 0.93 값을 갖는다. 따라서 강도분포는 신뢰수준 90%에서 정규분포를 따른다고 볼 수 있다.

파워트레인 마운팅 브라켓의 경우 내구로 인한 크랙이 발생할 경우, 파워트레인의 진동이 심해지게 되어 승차감이 현저하게 떨어지게 되며 이 상태에서 만약 장기간 운행한다면, 파워트레인 주변의 호스류 및 배선 등도 고장을 일으킬 수 있고, 절손에 이를 경우 파워트레인이 주저 앉는 등 차량운행에 지대한 영향을 미치게 된다.

따라서 파워트레인 마운팅 브라켓의 신뢰도는 거의 1에 근접하는 큰 값을 가져야 한다.

본 시험에서 구한 토크 스트럿 마운팅 브라켓의 강도분포와 실차상태에서 구한 부하분포를 이용하여 간섭이론을 적용하여 신

뢰도를 분석 하게 되면 다음과 같다.

토크 스트럿 마운팅 브라켓의 강도가 평균이  $\mu_y$ , 표준편차가  $\sigma_y$  인 정규분포를 따르고, 이 부품에 걸리는 부하도 평균이  $\mu_x$ , 표준편차가  $\sigma_x$ 인 정규분포를 따른다면, 만일  $Z = x - y = (\text{부하}) - (\text{강도})$  라 하면  $z > 0$ 이면 부하가 강도보다 크기 때문에 고장이 발생한다.

따라서,

$$\mu_z = \mu_x - \mu_y, \sigma_z = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$$

라 하면 고장이 발생할 확률은 다음과 같다.

$$P_z(Z > 0) = \int_{\frac{\mu_z}{\sigma_z}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

$$t = \frac{Z + \mu_y - \mu_x}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}}$$

그러므로 이식의 적분 하한 값을 구하고, 표준정규분포표에서 이 값보다 크거나 같은 확률을 구하면 이것이 부하가 강도를 초과할 또는 파손될 확률이 된다.

따라서 본 시험 결과에 따른 적분 하한 값을 구하면

$$\frac{\mu_y - \mu_x}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}} = 2.1827$$

가 되고 정규분포표에서 Z 값이 2.18보다 클 확률은 0.015가 된다. 즉 부하가 강도를 초과할(파손될) 확률은 1,000번 중 15회가 된다.

그러므로 시험한 토크 스트럿 마운팅 브라켓의 신뢰도 R은 0.985이다.

이 정도의 신뢰도는 실차 시험을 전문 운전원이 하였기에 일반 소비자의 운전 모드에 비하여 그 가속도가 매우 크고 그에 따른 부하의 값이 크게 나왔음에도 차량의 중요 부품 신뢰도 값으로는 작다.

전문 운전원의 주행모드가 일반 소비자의 대부분(약 95% 이상)보다 가속하다고 가정하면, 부품의 목표 신뢰도를 0.999999 (1ppm)으로 할 경우 간섭이론에 의한 신뢰도는  $1 - 0.000001 / (1 - 0.95)$ 를 만족하면 된다.

즉 간섭이론에서 신뢰도 0.99998을 만족하면 되므로, 최대부하가 강도를 초과할 확률이 0.0002 이하이면 이 값을 만족하게 되고 이때 정규분포 Z의 적분 하한값이 3.6 이상이면 된다.

샘플의 개수가 많으면 시험의 정확도는 높아지나 비용 및 시험 시간이 많아지므로 그 적정 개수로 6개 정도면 모집단의 평균 및 표준편차의 추정의 범위가 의미 있는 값을 갖게 된다.

50% Median Rank를 이용하여 누적 고장률을 구할 경우 6개를 시험하여 하나도 파단되지 않으면 그 고장률은 10% 이하이다.

국내 대부분의 업체에서도 수시로 품질 평가를 위한 가장 간단하면서 의미 있게 시험하는 규격을 정하기 위하여 샘플을 6개 시험하여 하나도 파단되지 않을

파단강도 규격을 정하게 된다.

브라켓의 경우 목표강도 분포에서 누적확률 10%에서의 강도 값으로 결정하면 된다.

이 경우 정규분포에서  $Z=1.28$  값에 해당하는 파단강도 값이므로 16kN이 되고, 샘플을 6개 이상 시험하여 모두 16kN 이상에서 파단되는 경우에 합격으로 처리한다.

만약 16kN 이하에서 파단이 발생하면 샘플 수를 늘려서 부품의 강도의 분포가 목표 신뢰도를 만족시키는 분포를 갖는 경우에는 합격으로 처리할 수 있다.

부품(토크 스트럿 마운팅 브라켓)에서의 신뢰도 목표를 설정하고 이를 가장 효과적으로 검증하는 신뢰성 시험 규격을 만드는 방법에 대하여 살펴 보았다.

토크 스트럿 마운팅 브라켓에 걸리는 실차 상태에서의 부하를 측정하고, 시험실에서 인장강도 시험을 수행하여 강도와 부하의 분포를 구한 다음, 간섭이론을 이용하여 신뢰성을 평가하고 그 결과를 이용하여 토크 스트럿 마운팅 브라켓의 신뢰성 시험 규격을 설정하게 된다

이러한 과정들을 통하여 비단 토크 스트럿 마운트뿐만 아니라 많은 자동차 부품의 신뢰성을 평가할 수 있으며 이는 보다 높은 신뢰성 향상에 기인할 수 있을 것으로 기대된다.