

케이블 절단에 필요한 에너지 통계적 분석

최창선* · 강원규**

Statistical analysis of the energy for cable cutting

Chang Sun Choi* · Won Kyu Kang**

ABSTRACT

We performed Instron and Impact tests to estimate necessary explosive charge weight for cutting the cable whose diameter is 22 mm. The cutting energy measured by Instron was 21.3 J. Impact test were performed 8 times each at 5 different energies. The Impact test results were analysed by Probit methods. The cutting energy was calculated 37.7 J with 99.99% probability at 99% confidence, which is roughly equivalent to 250 mg of Zirconium potassium Perchlorate (ZPP).

초 록

직경 22 mm 정도의 케이블 절단을 위한 케이블커터의 화약량 예측을 위하여 인스트론을 사용한 정적 절단 시험과 Impact test machine을 이용한 낙하충격 시험을 실시하였다. 인스트론 시험 결과 케이블 절단에 필요한 에너지는 21.3 J로 측정되었다. Impact test는 5종류의 에너지 레벨에서 각각 8번씩 시험하였다. Impact test 시험 결과를 Probit 방법으로 분석한 결과, 99% 신뢰도에서 99.99% 절단하는 에너지는 37.7 J로 예측되었다. 이 에너지는 ZPP 230 mg 이면 발생 가능할 것으로 판단 된다.

Key Words: Cable cutter (케이블커터), Probit (프로빗), Reliability (신뢰도), Cutting probability (절단 확률), Impact Test (충격 시험)

1. 서 론

착화기나 폭발볼트 등의 파이로부품은 단 일 회만 작동하는 부품이므로 작동 신뢰도 예측이 어렵다. 동일 조건과 과정을 통하여 만든 제품에서 일정 수를 시험하고 그 시험치로 나머지의

작동 확률을 판단하여야 하며, 부품의 특성상 상당히 높은 신뢰도를 요구하게 된다. 동시에 시험을 계획함에 있어 시험 숫자를 최소로 하는 것이 요구된다. 단지 많은 숫자를 시험하여 신뢰도를 확보하려고 하면 99% 신뢰도를 확보하기 위해서도 300개 이상의 시험이 실패없이 성공하여야 하며, 99.9%는 3000개 이상의 시험을 요구하게 된다. 본 논문에서는 케이블커터 화약시험에 앞서 인스트론을 이용한 정적 시험을 수행하

* 국방과학연구소 1본부 6부

† 교신저자, E-mail: ccs@add.re.kr

** (주)한화 종합연구소 기술 2실

고 Impact test에 의한 절단 시험 결과를 Probit 방법으로 분석하여 절단에 요구되는 에너지와 그에 따른 신뢰도를 분석하였다. Impact Test 분석 결과, 케이블 절단에 소요되는 에너지를 화약 에너지로 변화하면 충분한 신뢰도를 보장하는 화약량을 결정할 수 있을 것으로 판단한다.

2. 시험 및 분석

2.1 인스트론에 의한 절단 시험

케이블커터의 단면은 Fig. 1과 같으며, 착화기 연소 압력에 의하여 블레이드가 운동하여 직경 25 mm까지의 케이블을 절단하도록 설계되었다. 절단시험에 사용된 케이블은 Belden 1091A 300V Power limited tray cable로 Awg 20과 22 번 선 22 가닥으로 되어 있으며 직경은 약 22mm 정도이다.

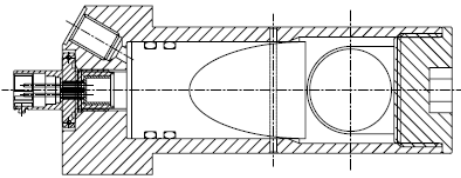


Fig. 1. Cross section of Cable cutter

인스트론에 의한 절단 시험 결과는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 처음 나오는 피크는 피스톤을 잡고 있는 전단편이 절단될 때를 보여 주고 있으며 이 값은 180 ~ 200 kgf 정도이다. 피스톤의 전진함에 따라 케이블의 절단이 시작되는데, 약 100 kgf 정도의 힘까지는 케이블이 절단되지 않고 외피 부분이 압축되는 것 같으며 이후에 외피가 절단되고 약 200 kgf부터 케이블이 본격적으로 절단되다가 약 300 kgf 힘에서 절단이 완료되는 것으로 볼 수 있다. 피스톤 속도에 따른 절단력의 차이를 보기 위하여 피스톤 속도를 22 mm/s에서 94 mm/s로 변경하면 시험을 수행하였으나 속도에 따른 차이는 보이지 않았다. 절

단에 소요되는 에너지는 Fig. 2의 케이블 절단에 해당되는 부분을 적분하면 된다. 절단 에너지는 21.3 J, 편차는 0.97 J로 계산되었다. 편차가 0.97 J 이므로 3 범위를 생각하면 절단에너지는 99% 신뢰도에서 24.5 J로 예측된다.

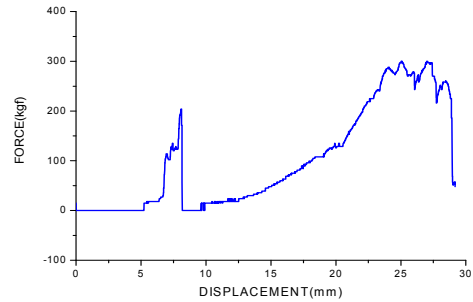


Fig. 2 Cable cutting by Instron (piston speed 22mm/s)

2.2 Impact test

한밭대학교 공동실험실습관에 보유 중인 Universal Impact Testing Machine (Instron Dynatup 8250)를 사용하여 케이블 절단시험을 실시하였다. [Fig. 3] 충격자에 사용하는 추는 5.0 kg을 사용하였는데, 여기에 로드셀과 치구의 무게를 합하면 6.0 kg이 된다. 시험에 사용된 케이블커터의 shear pin은 제거하여 사용하였다. 시험은 각 레벨에서 8회씩 실시하였다. 로드셀과 치구를 일정한 높이로 올려 고정된 후 자유 낙하 시키고 케이블 절단 직전에 포토센서를 이용하여 속도를 측정한다. 이 속도와 무게에서 운동 에너지를 계산할 수 있다.

인스트론 시험에서는 평균 21.3 J로 절단에너지가 측정되었으나 Impact Test 본 시험 실시 전에 기초 시험을 실시하여 대략의 절단 높이를 측정하여 약 23 J의 에너지에서 절단될 것으로 예측하였으며, 이 높이 주위에서 시험을 실시하였다.

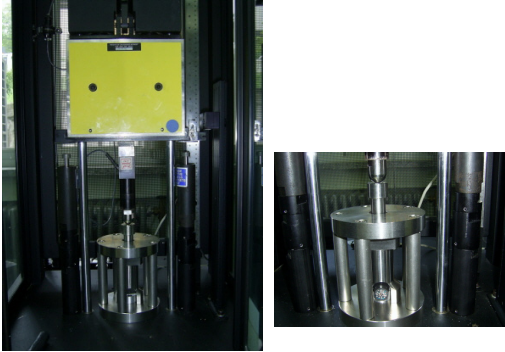


Fig. 3 Impact test

시험 결과는 Table 1에 정리되어 있으며 42.5 cm의 높이에서, 즉 25.0 J의 에너지에서 50%가 절단 되었고 44.5 cm의 높이, 즉 26.2 J의 에너지에는 8개 전부 절단 되었다.

Table 1. Result of Impact test

Height (cm)	40.5	41.5	42.5	43.5	44.5
# of cutting	1	3	4	5	8
# of non-cutting	7	5	4	3	0

Impact test 시험 결과는 Probit 방법으로 분석하였다. [1, 2, 3] 측정치가 정규분포에 따른다고 하면 확률, P와 Probit, Y는 다음과 같이 정의 된다.

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} e^{-\frac{1}{2}u^2} du$$

$$Y = \bar{y} + b(x - \bar{x}) = 5.0 + \left[\frac{x - \mu_p}{\sigma_p} \right]$$

$$= \frac{1}{\sigma_p} x + \left(5.0 - \frac{\mu_p}{\sigma_p} \right) \quad (1)$$

여기서 x는 측정값 μ_p 는 정규분포의 평균, σ_p 는 정규분포의 편차를 의미한다.

Probit은 확률이 50%인 곳에서는 5.0가 되

고 평균치보다 편차만큼 큰 경우는 6.0, 편차만큼 작은 경우는 4.0이 된다. Probit 계산의 첫 걸음은 각 측정치에서의 확률을 계산한 후, 그 확률이 표준정규분포에서 어디에 해당하는가를 계산하고, Probit은 평균치에서 5.0의 값을 가지므로 앞에서 구한 정규 분포 역함수 값에 5.0을 더한다.

Probit 계산 방법은 결국 시험 data와 가장 잘 맞는 Y 값들을 구하는 방법이며, 처음에는 시험 자료를 Eq. (1)에 대입하여 시험 자료와 가장 잘 일치하는 μ_p 와 σ_p 를 구하고 계산된 값들로부터 다시 Y를 구한다. 처음 구한 이 Y 값을 Provisional Probit이라고 부른다.

어떤 값에서의 확률을 P, 작동하지 않을 확률을 Q (=1-P)라고 하면 weighting coefficient W는 확률이 중앙인 곳에서는 시험자나 조건에 따라 크게 변하지 않으나 확률이 1에 가깝거나 0에 가까울수록 시험자의 영향을 받기 쉬워지므로 이를 고려한 것이다. W 값은 확률이 0.5 일 때는 0.637이나 확률이 0이나 1에 근접하면 0.001로 작아진다. Provisional Probit을 Eq. (2)에 대입하여 z_p 를 구하고 z_p 에 따른 정규분포에서의 확률 P를 계산한 후 W를 계산한다.

$$W = z_p^2 / PQ$$

$$z_p = \frac{\partial P}{\partial Y} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(Y-5)^2} \quad (2)$$

계산의 편의를 위하여 $S_1, S_2, S_3, S_{xx}, S_{xy}, S_{yy}$ 등을 정의한 후 계산하면 Eq. (3)을 얻는다. (S_1 등의 정의는 참고문헌 [1] 참고하기 바람)

$$\bar{x} = \sum n W \bar{x} / \sum n W,$$

$$\bar{y} = \sum n W \bar{y} / \sum n W, \quad b = S_{xy} / S_{xx} \quad (3)$$

Eq. (3)으로 구한 값들을 다시 Eq. (1)에 대입하여 새로운 Y 값을 계산하고 이 값들이 먼저 구한 Y값과 비교하여 큰 차이가 없으면 계산을 종료하고 차이가 있으면 위의 과정을 다시 반복한다.

Probit값, Y로부터 정규분포의 평균인 m와 편차인 s_m을 구할 수 있다. Eq. (4)에서 n은 시험 횟수이다.

$$m = \bar{x} + \frac{1}{b} (5 - \bar{y})$$

$$V_m = \frac{1}{b^2} \left(\frac{1}{\sum n W} + \frac{(m - \bar{x})^2}{\sum n W (x - \bar{x})^2} \right) = s_m^2 \quad (4)$$

시험 자료로부터 계산된 m은 42.375 cm (24.9 J)이고 s_m은 1.45 cm이다. s_m은 평균치의 편차이므로 신뢰도를 (1-)의 신뢰도를 가지는 실제 평균값은 $m \pm z_{1-\alpha/2} s_m$ 과 같이 계산되는데, Probit에 의하여 계산된 값으로부터 정규분포를 가정하면 신뢰도 95%와 99%일 때의 확률에 따른 높이는 Table 2와 같다. 신뢰도 99%에서 절단 확률 99.99%를 보이는 에너지는 37.7 J이다.

Table 2. Cutting energies at several reliabilities and cutting probabilities

신뢰도 절단 확률	95%		99%	
	높이 (cm)	에너지 (J)	높이 (cm)	에너지 (J)
0.99	46.5	27.3	49.9	29.3
0.999	52.2	30.7	60.5	35.6
0.9999	54.2	31.9	64.1	37.7

케이블커터에 사용되는 착화기 화약인 ZPP의 Impetus는 약 1,500 J/g이고 이중 10%가 기계적 에너지로 변경되는 것으로 가정할 때에^[4] 50% 절단 확률을 보이는 화약량은 167 mg으로, 신뢰도 99%에서 절단 확률 99.99%를 보이는 화약량은 250 mg으로 예상된다. 실제 화약 100 mg을 사용했을 경우는 3번 시험하여 3번 모두 절단되지 않았으며, 200 mg을 사용했을 경우는 2번 모두 절단되었다.

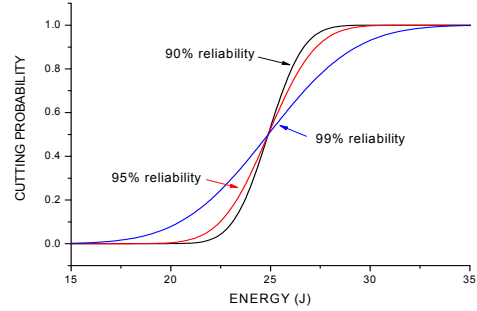


Fig. 4. Cutting probability at various reliabilities

3. 결론

1. 정적시험 결과 절단에 필요한 에너지는 약 21.3 J로 예측된다. 편차가 0.97 J 이므로 3 범위를 생각하면 절단에너지는 99% 신뢰도에서 24.5 J 정도이다.
2. Impact test는 케이블 절단에 필요한 평균에너지는 약 24.9 J이며, 편차는 0.59 J이다. 신뢰도 95%에서 절단 확률 0.999인 에너지는 30.7 J이고, 신뢰도 99%에서 절단 확률 0.9999인 에너지는 37.7 J이다. 화약에너지의 10%가 기계적인 에너지로 변경된다고 가정하면 신뢰도 99%에서 절단 확률 0.9999를 보장하기 위해서는 ZPP 230 mg이 필요하다.

참고 문헌

1. Mary Gibbons Natrella, "Experimental Statistics", Dover, 2005
2. Ch. Tarrieu, "Evaluation of a pyrotechnic actuator concept by means of the Probit statistical method", European Space Agency, 1981
3. D. J. Finney, "Probit Analysis", Cambridge University Press, Digital print version, 2009
4. Engineering Design Handbook, AMCP 706-270, Sept. 1975