

研究論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2012.16.4.016>

Impact Test를 통한 케이블커터의 화약량 산정

최창선*

Determination of Explosive Weight for Cable Cutter through Impact Test

Chang Sun Choi*

ABSTRACT

We performed impact test to estimate necessary explosive charge weight for cutting the cable whose diameter is 22 mm. The impact test results were analyzed by Probit method. The cutting energy was calculated 37.7 J with 99.99% probability at 99% reliability compared to the average energy of 24.9 J. The cable was cut 3 times without failure with 150 mg of Zirconium Potassium Perchlorate (ZPP), which was considered to generate 24.5 J of mechanical energy with assumption that only 10% of explosive energy converts to mechanical energy. The calculated energy from measured pressure with 150 mg ZPP was 26.1 J, which is almost same with both impact test result and expected mechanical energy. We can argue that the cable can be cut with 99.99% probability at 99% reliability by 230 mg of ZPP.

초 록

직경 22 mm 정도의 케이블 절단을 위한 케이블커터의 화약량 예측을 위하여 impact test machine을 이용한 낙하충격 시험을 실시하였다. Impact test 시험 결과는 Probit 방법으로 분석하였으며, 99% 신뢰도에서 99.99% 절단하는 에너지는 37.7 J로, 절단 평균 에너지는 24.9 J로 예측 되었다. 150 mg의 ZPP를 사용하여 시험한 결과, 케이블이 3번 모두 절단되었다. 이때 측정된 압력으로부터 계산된 에너지는 26.1 J이었으며 이 값은 impact 시험 결과나 화약에너지의 10%가 기계적 에너지로 변환된다는 가정 하에 ZPP 150 mg이 발생하는 기계적 에너지인 24.5 J과 아주 유사하다. Impact test의 분석결과를 적용하면 ZPP 230 mg의 화약으로 99% 신뢰도에서 99.99% 절단 확률을 보장할 수 있을 것으로 판단 된다.

Key Words: Cable Cutter(케이블커터), Probit(프로비트), Reliability(신뢰도), Cutting Probability(절단 확률), Impact Test(충격 시험)

접수일 2011. 12. 26, 수정완료일 2012. 7. 13, 게재확정일 2012. 7. 19

* 정회원, 국방과학연구소 1기술연구본부 6부

† 교신저자, E-mail: ccs@add.re.kr

1. 서 론

착화기, 폭발볼트, 케이블커터 등의 파이로 부품은 단 일회만 작동하는 부품이므로 작동 신뢰도 예측이 어렵다. 동일 조건과 과정을 통하여 만든 제품에서 일정 수를 시험하고 그 결과로 나머지의 작동 확률을 판단하여야 하며, 부품의 특성상 상당히 높은 신뢰도를 요구하게 된다. 단지 시험 횟수를 늘려 신뢰도를 확보하려고 하면 99% 신뢰도를 확보하기 위해서도 300개 이상의 시험이 실패 없이 성공하여야 하며, 99.9%는 3000개 이상의 시험을 요구하게 된다. 또한 파이로 부품의 실패는 적용된 유도탄이나 발사체 전체의 실패로 직결되기 때문에 고신뢰도를 요구받게 된다.

본 논문의 목적은 화약시험을 최소화하여 충분한 절단 확률과 신뢰도를 보증하는 화약량을 결정하는 방법을 제시하는 것이다. 화약시험에 앞서 인스트론을 이용한 정적 시험을 수행하고 impact test에 의한 절단 시험 결과를 분석하여 절단에 요구되는 에너지와 그에 따른 신뢰도를 얻을 수 있으며, 이 에너지와 화약에너지와의 상관관계를 구명하면 충분한 신뢰도를 보장하는 화약량을 결정할 수 있을 것으로 판단한다.

2. 시험 및 분석

2.1 인스트론에 의한 절단 시험

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

인스트론은 미리 입력한 힘과 속도로 밀어 재료의 물성을 측정하기 위한 장비이다. 인스트론의 피스톤이 케이블커터의 절단날(blade)를 일정한 속도로 밀고 그때 피스톤에 걸리는 힘을 기록하게 된다. 인스트론에 의한 절단 시험 결과는 Fig. 2와 같다. 블레이드가 전진함에 따라 케이블의 절단이 시작되는데, 약 2.5 kN 정도의 힘까

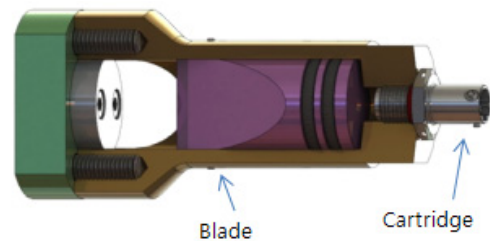


Fig. 1 Cable cutter

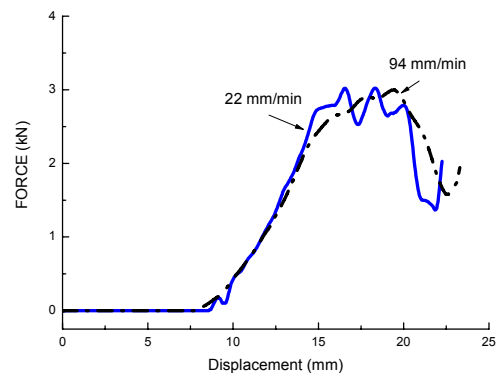


Fig. 2 Cable cutting forces (Instron speed 22 and 94 mm/min)

지는 케이블이 절단되지 않고 압축되는 것 같으며 이후에 외피가 절단되고 케이블이 본격적으로 절단되다가 약 2.8 ~ 3.0 kN 힘에서 절단이 완료되는 것으로 볼 수 있다. 피스톤 속도에 따른 절단력의 차이를 보기 위하여 피스톤 속도를 22 mm/min에서 94 mm/min로 변경하면서 시험을 수행하였으나 속도에 따른 의미 있는 차이는 보이지 않았다. 절단에 필요한 에너지는 Fig. 2의 케이블 절단에 해당되는 부분을 적분하여 계산한 절단 에너지의 평균은 21.3 J, 편차는 0.97 J이었다. 편차가 0.97 J이므로 편차의 3배 범위를 생각하면 절단에너지는 99% 신뢰도에서 24.5 J로 예측된다.

2.2 Impact test

한밭대학교 공동실험실습관에 보유 중인 Universal Impact Testing Machine (Instron Dynatup 8250)를 사용하여 케이블 절단시험을 실시하였다. Fig. 3은 시험 장치를 보여 주고 있

다. 충격자에 부착되는 추는 5.0 kg을 사용하였는데, 로드셀과 추의 무게를 합하면 6.0 kg이 된다. 시험에 사용한 케이블커터는 로드셀 및 추가 케이블커터의 블레이드에 충격을 가할 수 있도록 윗부분을 변형하였으며 케이블커터의 shear pin은 제거하여 시험하였다. 시험은 각 높이에서 8회씩 실시하였다. 로드셀과 추를 일정한 높이로 올려 고정한 후 자유 낙하 시키고 케이블 절단 직전에 포토센서를 이용하여 속도를 측정한다. 이 속도와 무게로부터 케이블커터 충돌 직전의 운동에너지를 계산할 수 있다. Probit 시험에서는 확률 50%에 해당하는 시험 조건을 아는 것이 중요하다. 이 값은 정적시험에서 얻은 값인 21.3 J을 참고로 하여 시험조건을 잡고 기초 시험을 실시하여 대략의 절단 높이를 측정하여 예측한 23 J의 에너지에 해당하는 높이 주위에서 시험을 실시하였다.

케이블은 42.5 cm의 높이에서, 즉 25.0 J의 에

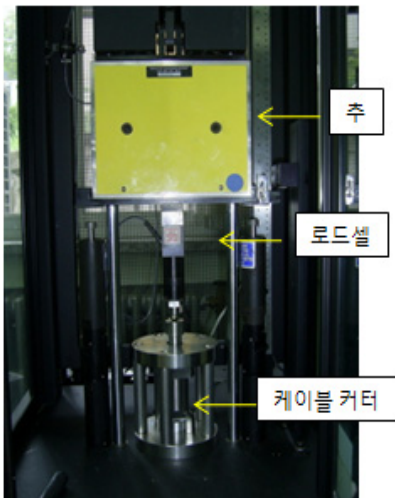


Fig. 3 Universal Impact testing machine

Table 1. Impact test results

Height (cm)	40.5	41.5	42.5	43.5	44.5
Energy (J)	23.8	24.4	25.0	25.6	26.2
# of cutting	1	3	4	5	8
# of non-cutting	7	5	4	3	0

너지에서 50%가 절단 되었고 44.5 cm의 높이, 즉 26.2 J의 에너지에는 8개 전부 절단 되었다. 시험 결과는 Table 1에 정리되어 있다.

Impact test 시험 결과는 Probit 방법으로 분석하였다[1, 2, 3, 4]. 측정치가 정규분포에 따른다고 하면 확률, P와 Probit, Y는 다음과 같이 정의 된다.

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

$$Y = \bar{y} + b(x - \bar{x}) = 5.0 + \left[\frac{x - \mu_p}{\sigma_p} \right] \quad (1)$$

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

여기서 x는 측정값, μ_p 는 정규분포의 평균, σ_p 는 정규분포의 편차를 의미한다. Probit은 확률이 50%인 곳에서는 5.0이 되고 평균치보다 편차만큼 큰 경우는 6.0, 편차만큼 작은 경우는 4.0이 된다. Probit은 각 측정치에서의 확률을 계산하고 그 확률에 해당하는 표준정규분포의 역함수를 계산한 후 여기에 5를 더한 값이다.

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

어떤 값에서의 확률을 P, 작동하지 않을 확률을 Q (= 1 - P)라고 하면, Weighting coefficient는 확률이 중앙인 곳에서는 시험자나 조건에 따라 크게 변하지 않으나 확률이 1에 가깝거나 0에 가까울수록 시험자의 영향을 받기 쉬워지므로 이를 고려한 것으로 Eq. 2와 같다. W 값은 확률이 0.5 일 때는 0.637이나 확률이 0이나 1에 근접하면 0.001로 작아진다. Provisional Probit을 Eq. 2에 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. 3을 얻는다.

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \sum n W x^2, S_2 = \sum n W x y, S_3 = \sum n W y^2 \\
 S_{xx} &= S_1 - (\sum n W x)^2 / \sum n W \\
 S_{xy} &= S_2 - (\sum n W x)(\sum n W y) / \sum n W \\
 S_{yy} &= S_3 - (\sum n W y)^2 / \sum n W \\
 \bar{x} &= \sum n W x / \sum n W, \\
 \bar{y} &= \sum n W y / \sum n W, b = S_{xx} / S_{xy}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Equation 3으로 구한 값들을 다시 Eq. 1에 대입하여 새로운 Y값을 계산한다. 새로 계산한 Y 값이 적절한지의 여부는 Chi-square test를 통하여 결정하여야 하나 이 값들이 먼저 구한 Y값과 비교하여 차이가 작을 때 계산을 종료하여도 Chi-square test에 의하여 판단하는 것과 크게 다르지는 않다[1, 3]. 계산된 결과가 만족스럽지 않으면 위 계산을 반복한다. 최종적으로 얻은 Probit값, Y로 부터 정규분포의 평균인 m과 편차인 s_m 을 구할 수 있다. Eq. 4에서 n은 시험 횟수이다.

$$\begin{aligned}
 m &= \bar{x} + \frac{1}{b}(5 - \bar{y}) \\
 V_m &= \frac{1}{b^2} \left(\frac{1}{\sum n W} + \frac{(m - \bar{x})^2}{\sum n W (x - \bar{x})^2} \right) = s_m^2
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

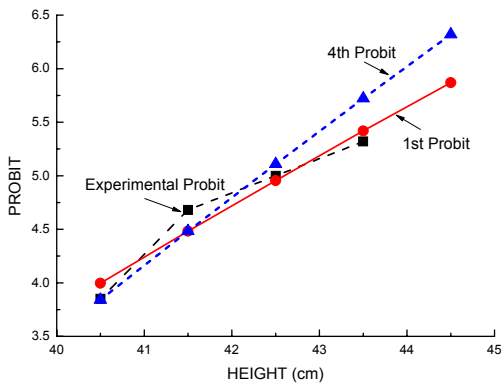


Fig. 4 Probit Values

Figure 4는 측정값에서 계산된 Probit값, 시험 값 들을 일차식으로 fitting하여 얻은 값과 1차 및 4차로 계산된 Y 값을 보여 주고 있다. 측정치의 Probit 값 높이 44.5 cm에서는 절단확률 100%로 나타났으나 확률 100%의 Probit 값은 ∞ 이므로 Fig. 4에서는 제외하였다. 처음 fitting한 Probit 값과 1차로 계산한 Provisional Probit 값은 차이를 보이나 1차와 4차는 값이 아주 유사하며 실지 계산은 4차에서 종료하였다.

시험 자료로부터 계산된 m은 42.375 cm (24.9 J)이고 편차 s_m 은 1.45 cm이다. S_m 은 평균치의 편차이므로 (1- α)의 신뢰도를 가지는 실지 평균 값은 $m \pm z_{1-\alpha/2} s_m$ 과 같이 계산되는데, Probit 에 의하여 계산된 값으로부터 정규분포를 가정 하면 신뢰도 95%와 99%일 때의 확률에 따른 높이와 에너지는 Table 2와 같다. 신뢰도 99%에서

Table 2. Cutting energies at several reliabilities and probabilities

Reliability \ Probability	95%		99%	
	H (cm)	E (J)	H (cm)	E (J)
99%	46.5	27.3	49.9	29.3
99.9%	52.2	30.7	60.5	35.6
99.99%	54.2	31.9	64.1	37.7
* H : Height E : Energy				

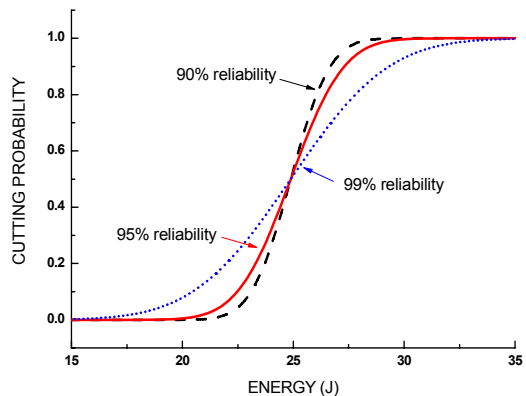


Fig. 5 Cutting probability at several reliabilities

절단 확률 99.99%를 보이는 에너지는 37.7 J이다. 높이와 신뢰도에 따른 절단 확률을 Fig. 5에 나타내었다.

2.3 화약 시험

화약의 연소를 단일 팽창으로 가정하고 처음 가스의 온도를 *adiabatic isochoric flame temperature*와 같다고 가정하면, 화약에너지는 Eq. 5와 같이 표시된다.

$$E = \int_{V_i}^{\infty} P dV = \frac{FW}{\gamma - 1} \quad (5)$$

여기서 E는 화약 연소가스 에너지, P는 화약에 의해 발생하는 압력, V는 가스 체적, F는 화약의 Impetus, W는 화약의 무게, γ 는 C_p/C_v 를 의미한다.

케이블커파에 사용되는 착화기 화약인 ZPP의 Impetus는 약 115,000 lb_r-ft/lb_m (344 J/g)이고 γ 는 1.21이다[5]. 이 값들을 Eq. 5에 대입하면 ZPP 1 g이 발생하는 화약에너지는 1,630 J이 된다. 화약에 의하여 발생한 에너지는 일부는 기계적인 운동에너지로 변환되나 대부분은 내부 가스의 압력을 높이고 열을 발생하는데 사용된다. 화약에너지 중에 10%가 기계적 에너지로 변경되는 것으로 가정할 때에[6] 50% 절단 확률을 보이는 화약량은 152 mg으로, 신뢰도 99%에서 절단 확률 99.99%를 보이는 화약량은 230 mg으로 예상된다.

사용하는 착화기의 기본 화약량은 ZPP 430 mg인데, 케이블 절단에 필요한 적정 화약량을 추정하기 위하여 화약량을 100, 150, 200, 250, 300, 430 mg 등으로 조정하여 케이블 절단 시험을 수행하였다. 케이블커파의 내부 압력은 PCB 압력 센서로 측정하였고, Fig. 6과 7에서와 같이 절단 케이블 상하에 가는 선을 연결하고 이 선이 절단 될 때에 전압이 발생되도록 회로를 구성하여 케이블 절단시간 측정이 가능하도록 하였다. Fig. 6은 시험 장면을 Fig. 7은 케이블을 보여 주고 있다.

ZPP 100 mg을 사용한 경우에는 3번 모두 절

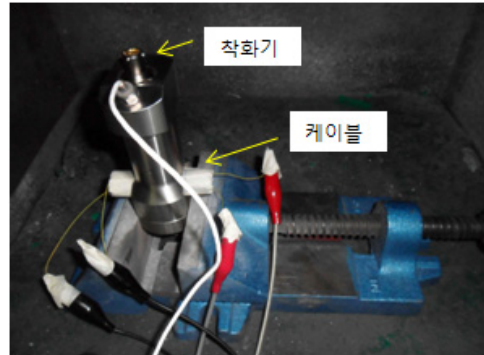


Fig. 6 Experimental setup for cable cutting

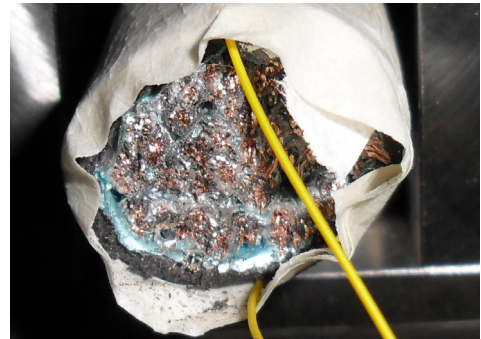


Fig. 7 Cable for cutting (Belden 1091A 300V Power limited tray cable)

단되지 않았고 150 ~ 430 mg의 경우에는 절단 시간의 차이는 있으나 모두 절단 되었다. Fig. 8은 화약량 150 mg 일 때의 측정된 압력값과 케이블 절단 신호를 보여 주고 있는데, 상부 케이블 절단 신호와 하부 케이블 절단 신호의 시간 차이가 케이블 절단 시간이 된다. Fig. 9는 화약량에 따라 측정된 케이블 절단 시간을 보여준다. 착화기 화약량이 150 mg 인 경우에는 평균치가 16.4 ms이나 두 측정치의 편차가 크게 나타났고, 200 mg인 경우에는 절단시간 평균이 약 1.24 ms, 250 mg 과 300 mg은 0.9와 0.8 ms 정도이고, 430 mg일 때는 0.7 ms 정도이다.

2.4 분석

정적 시험 결과로 케이블 절단에너지는 21.3 J, impact test 결과로는 24.9 J를 얻었고, 화약시험에서는 100 mg으로는 절단 되지 않았으며 150

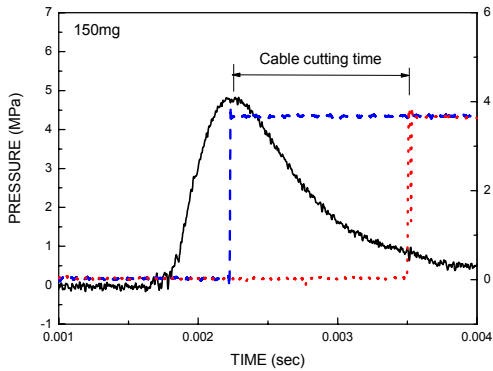


Fig. 8 Measured pressure and cable cutting time

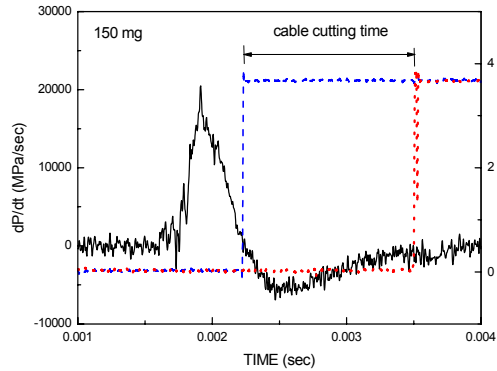


Fig. 10 Pressure rate and cutting time

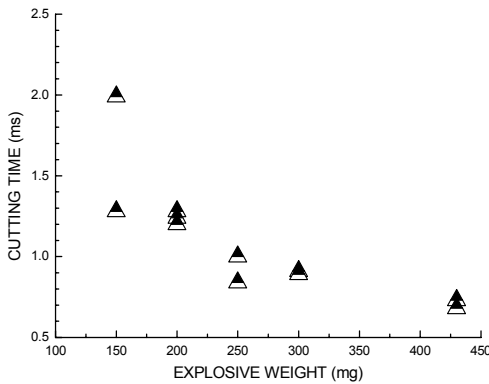


Fig. 9 Cable cutting times

mg에서는 절단되었다. 정적시험 결과 보다 impact test 결과의 값이 크게 나오는 것은 impact test는 추가 낙하하면서 옆의 가이드 레일과의 마찰과 충격 시 에너지 손실 등이 발생하기 때문이다.

ZPP 150 mg이 발생하는 에너지는 245 J이다. 100 mg의 화약에서는 케이블이 절단되지 않았고 150 mg에서는 케이블 절단시간의 편차가 큰 것을 보아 이 부근의 화약에너지가 절단에 필요한 최소치 부근인 것으로 추정할 수 있다. Impact test 결과인 24.9 J은 ZPP 150 mg이 발생하는 화약에너지의 10.1%에 해당되므로 10%의 화약에너지가 기계적 에너지로 사용된다는 주장은 타당한 것으로 판단된다[6].

케이블의 절단 현상은 측정된 압력의 미분값을 분석하면 더 명확해 지는데, Fig. 10에서 볼

Table 3. Calculated energies from measured pressures

Blade moving distance (mm)	Energy (J)	
	150 mg	200 mg
22	26.1	44.8

수 있듯이 압력의 미분값이 증가했다가 다시 감소하여 0이 되는 지점, 즉 압력이 최대인 지점 근처에서 케이블 절단이 시작되고, 케이블이 절단되고 블레이드가 이동함에 따라 커터 내의 내부 부피가 커지게 되어 압력의 감소하게 되고 미분치가 다시 0이 되면서 절단이 완료된다.

측정된 케이블커터 내부 압력으로부터 힘을 계산하고 여기에 블레이드의 질량을 나누어 가속도를 계산 한 후 적분을 하여 속도와 블레이드 이동 거리 계산할 수 있다. 블레이드 이동 거리에 따른 에너지를 계산하였는데, 이 값은 힘을 거리에 따라 적분한 값이다.

실지 케이블의 직경인 22 mm를 이동하는데 소요된 에너지를 Table 3에 나타내었다. 화약량이 200 mg인 경우에는 impact test의 결과로 얻은 24.9 J보다 훨씬 큰 값이나 150 mg인 경우에는 26.1 J로 impact test의 결과와 아주 유사한 것으로 보아 150 mg 정도가 절단에 필요한 최소 에너지 부근이라고 추정할 수 있으며 200 mg은 필요한 에너지의 약 1.8배를 공급하고 있다고 볼 수 있다.

Figure 11은 ZPP 150 mg의 화약을 사용하여 측정된 압력으로부터 계산된 블레이드의 속도와

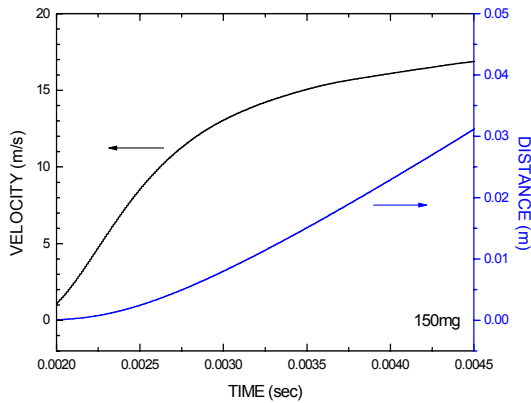


Fig. 11 Calculated velocity and distance of blade with ZPP 150 mg

이동 거리를 보여 주고 있는데, 블레이드가 약 20 mm 이동 하였을 때의 블레이드 속도는 약 15 m/s 정도이다. 여기에서 사용된 측정 자료는 Fig. 9에서 절단시간이 2 ms 정도 걸린 시험 자료를 분석한 것이다.

3. 결 론

인스트론을 사용한 정적 시험만으로도 케이블 절단에 필요한 에너지를 대략적으로 산출할 수 있으며 화약에너지의 약 10%만이 유효하다는 가정 하에 필요한 화약량을 결정할 수 있다. 절단 에너지의 통계적인 계산을 위하여 impact test를 실시하고 측정 자료를 Probit 방법에 의하여 분석하면 신뢰도와 절단 확률을 계산하였다. 인스트론 시험 결과보다 Impact test 결과가 약간 크게 나온 것은 충격 시의 운동에너지 중의 일부가 케이블 절단에 사용하지 못했기 때문인 것으로 추정된다. Impact test 결과 얻어진 케이블 절단에너지는 150 mg의 화약 시험 결과로부터 계산된 케이블에 절단에 사용된 에너지와 잘 일치하였다.

본 논문의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 정적시험 결과, Awg 20과 22번 선 22 가닥으로 구성되어 있고 직경이 22 mm 정도인 케이블 절단에 필요한 에너지는 약 21.3 J로 분석된다.
2. Impact test 결과, 케이블 절단에 필요한 평균 에너지는 약 24.9 J이며, 편차는 0.6 J이다. 신뢰도 95%에서 절단 확률 99.9%인 에너지는 30.7 J이고, 신뢰도 99%에서 절단 확률 99.99%인 에너지는 37.7 J이다.
3. ZPP 100 mg을 사용하면 절단이 되지 않고 150 mg을 사용하면 절단이 되었다. ZPP 150 mg을 사용하여 측정된 케이블커터 내부 압력으로부터 계산된 절단에너지는 26.1 J로 impact test의 결과와 유사하다.
4. ZPP 150 mg 사용 시에 계산된 26.1 J은 예측된 화약에너지의 10.7%로, 화약에너지의 10%가 기계적인 에너지로 변경된다고 가정은 잘 맞는다.
5. 신뢰도 99%에서 절단 확률 99.99%를 보장하기 위해서는 ZPP 230 mg이 필요하다.

참 고 문 헌

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. 최창선, 케이블커터 작동 신뢰도 분석, ADDR-J419-110181, 국방과학연구소, 2011
5. 윤기은, 류병태, 최창선, "SUS304 발열선 착화기의 열전이 특성," 한국추진공학회지, 제 10권, 제4호, 2006, pp.19-25
6. Engineering Design Handbook, AMCP 706-270, Sept. 1975