

성형폭약 설계변수의 통계학적 검토

박경준¹⁾, 양형식¹⁾

Statistical Analysis of Design Parameters of Shaped Charge

Kyung-Jun Park and Hyung Sik Yang

초 록 성형폭약의 설계변수인 폭약 종류, 폭약 량, 라이너 각도, 라이너 두께, 라이너 재질들을 다원배치법으로 분석하였다. 교호작용이 있는 설계변수는 강건 설계를 통하여 기여비를 산정하여 정량적으로 평가하였다. 연구결과 폭약 종류와 라이너 각도는 비교적 독립적인 설계변수였고 약량과 라이너 재질, 라이너 두께는 교호작용이 있었다. 강건설계에 의해 산정된 설계변수의 기여비는 약량이 73.3%, 라이너의 재질이 19.4%, 라이너의 두께가 7.3%이다.

핵심어 : 성형폭약, 설계변수, 다원배치법, 강건 설계

1. 서 론

선형 성형폭약(linear shaped charges)은 발파해체를 비롯하여 그 적용 범위가 점점 늘어나고 있다. 국내에서도 발파해체에 관한 연구가 이루어졌고(이병일 외, 2000, 박근순, 2001) 초기 단계지만 상용화가 되었다. 그러나 제품의 수준을 높이고 절단 능력을 개선하기 위하여 성형폭약의 설계 요소들에 대한 평가가 더 필요하다고 판단된다.

성형폭약의 절단효과에 영향을 미치는 요소는 크게 라이너, 폭약 및 기폭, 고속기류(jet)의 형성 등을 들 수 있다. 라이너의 영향은 라이너의 재질, 두께, 기하학적 형상 즉 오목한 각도 등이며, 폭약 및 기폭으로는 폭약의 종류, 장약량, 형상 등을, 그리고 고속기류의 형성으로는 이격거리 등을 들 수 있다. 이 외에도 절단 대상 철판의 재질 및 강도와 그 특성을 고려하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 성형폭약의 절단효과에 영향을 주는 설계변수(인자)들 중 폭약 종류, 약량, 라이너 각도, 라이너 두께, 라이너 재질을 통계적 분석 방법인 실험계획법의 다원배치법을 통하여 각 수준간의 차이를 비교하여 독립적인 설계변수와 교호작용이 있는 설계변수를 구분하고 교호작용이 있는 설계변수는 다시 강건 설계로 기여비를 산정하여 정량적으로 평가하였다.

1) 전남대학교

접수일 : 2004년 2월 28일

2. 기초이론

2.1 성형 폭약의 원리

성형 폭약은 1888년 Charles E. Munroe에 의해 처음으로 제안되고 시험되었는데, 그의 이름을 따라 명명된 먼로 효과(Munroe effect)를 이용하여 폭약 아래 부분을 곡선형으로 하고 금속제 라이너(liner)를 부착하여 기폭시킴으로써 폭약의 힘을 곡선부 중앙에 집중시켜 목표물을 관통 또는 절단시키는 폭약이라 정의할 수 있다.

2.2 성형폭약의 절단 원리

오목한 부분의 반대쪽에서 뇌관으로 기폭 시키면 먼로 효과에 의해 방출되는 화약 에너지는 라이너의 작용으로 집중된다. 즉, 성형폭약의 밑 부분에서 나온 충격파의 수평요소는 서로 충돌되어 상쇄되지만 수직성분은 서로 축적되어 장약량의 중심선에 집중되고 이들이 중심축을 따라 증첩되어 압력이 극한 상태에 도달한다.

화약의 분해로 형성된 에너지 집중과 라이너에서 생긴 금속 분자들의 조합으로 이루어진 고속기류 즉, 충격파는 일정한 방향으로 방출되면서 목표물을 절단하는 작용을 한다. 목표물의 변형은 충격파가 전면을 통과한 후 극히 짧은 순간 즉 1 μ s 내에 시작된다. 그림 1은 고속기류가 완전히 형성되어 적당한 이격거리를 유지할 때 철 구조물을 절단하는 모식도이다.

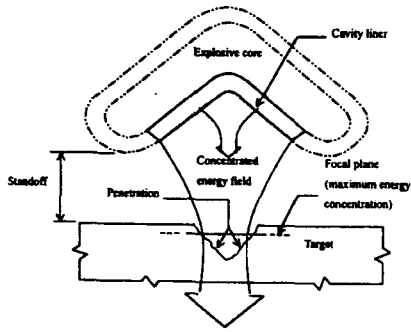
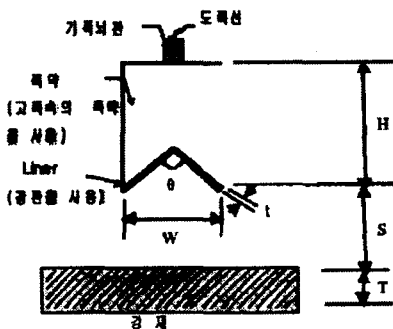


그림 1. 성형폭약의 절단원리



θ : Liner의 정각(90°전후) W : 약폭
 H : 화약의 높이 S : 이격거리
 T : 강재의 판두께 t : Liner의 두께
 그림 2. 성형폭약 설계요소

성형폭약의 관통효과나 절단효과는 여러 가지 요소에 의해 영향을 받게 되는데 크게 라이너, 폭약 및 기폭, 고속기류의 형성 등을 들 수 있다. 라이너의 영향은 라이너의 재질, 두께, 기하학적 형상 즉 오목한 각도 등이며, 폭약 및 기폭으로는 폭약의 종류, 장약량, 형상 등을 그리고, 고속기류의 형성으로는 이격거리 등을 들 수 있다. 이 외에도 절단 대상 철판의 재질 및 강도와 그 특성을 고려하여야 한다. 그림 3은 절단효과에 영향을 주는 요소들을 표시한 그림이다.

2.3 실험계획법

분산 분석은 1920-1930년대에 R. A. Fisher가 불

안정한 시험장에서 수행된 실험결과를 평가하는 과정에서 실험오차를 줄이기 위한 방법으로 연구하기 시작하면서 그 유래를 찾을 수 있다.

실험계획법과 분산분석은 동시에 고려해야할 통계적 기법이다. 실험계획법은 최소의 재원으로 최대의 정보를 얻을 수 있도록 처리계획과 배치방법을 다루는 분야라고 하면 분산분석법은 실험계획하에 수행된 실험의 자료를 통계적으로 분석하여 모집단의 추론과 결론을 도출하는 분야라고 할 수 있다.

분산분석(Analysis of variance, ANOVA)이란 특성의 산포를 제곱합(변동)으로 나타내고 이 제곱합을 실험과 관련된 요인마다 제곱합으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 요인이 무엇인가를 찾아내는 분석방법이다. 각 요인의 제곱합을 그 요인의 자유도로 나누면 그 요인의 제곱평균(불편분산)이 되며, 오차분산에 비해 얼마나 큰가를 검토하게 된다. 따라서 분산분석이란 특성의 산포를 요인별로 분해하여 어느 요인이 큰 산포를 나타내고 있는가를 규명하는 방법이라고 할 수 있다.

3. 다원배치법에 의한 설계변수 영향분석

다원배치법은 특성치에 영향을 미치고 있다고 생각되는 인자가 3개 이상 있을 경우, 모든 인자의 수준조합에서 실험하는 실험계획법이다. 각 인자의 수준간에 차이가 있는지, 교호작용이 존재하는지 등 인자의 특성을 알아보는 실험이며 본 연구에서는 다원배치법 중 모수 모형을 적용하였다.

본 연구에서는 여러 개의 설계변수 중 폭약의 종류, 폭약 량, 라이너의 각도, 라이너의 재질, 라이너의 두께 등 다섯 개의 설계변수를 실험하였다. 다원배치법에 사용된 실험값은 박근순(2001)이 실험한 자료의 결과 값을 재편성하여 사용하였다.

표 1. 폭약류의 물성

화약류	Emulsion	PETN	RDX
폭굉속도 (m/sec)	5,900	8,400	8,500
비중 (g/cc)	1.20	1.77	1.816
폭발에너지 (kcal/kg)	1,100	1,450	1,300
가스비용 (l/kg)	830	780	798
분자량 (g/mol)	-	316.2	222.13
발화점 (°C)	-	202~205	230
낙추감도 (cm)	100	17	20

표 2. 라이너 재질의 물성

선형재료	Cu	Al	Pb
밀도 (g/cm ³)	8.93	2.69	11.34
용융점 (°C)	1,083	660.2	327.4
비등점 (°C)	2,630	2,060	1,750

표 3. 시료의 제원과 단면

Type	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	비고	
성형 폭약	길이(mm)	200	200	200	200	200
	높이(mm)	22	26	34	56	
	폭(mm)	29	32	40	56	
폭약	폭 W(mm)	9	13	19	27	
	높이 H(mm)	9	14	20	27	
	높이 C(mm)	4.5	6.5	9.5	13.5	
라이너	두께 t(mm)	0.4	0.5	0.8	1.0	
		1.2	1.5	2.2	4.2	소성화
	폭 E(mm)	12.7	18.4	26.9	38.2	e1+e2
	각도(°)	90	90	90	90	
	약량 (g)	14.5	32	70	133	

표 1은 실험에 사용된 폭약류의 물성이고, 표 2는 라이너 재질의 물성이다. 표 3은 제작된 시료의 제원과 단면을 표기하였다.

실험에 취급된 인자는 라이너의 각도, 라이너의 재질, 폭약의 종류 등 세 개이며, 각 인자의 수준은 표 4와 같다. 라이너의 각도는 45°, 60°, 90°, 120° 등 4수준이고, 라이너의 재질은 Cu, Al, Pb 등 3수준이며, 폭약의 종류는 뉴에멀전과 PETN의 2수준이다. 각 수준의 조합은 표 5와 같다.

표 4. 분석 수준 조합

인자	라이너재질		
	A	B	C
수준			
1	45°	뉴에멀전	Cu
2	60°	PETN	Al
3	90°		Pb
4	120°		

표 5. 실험 수준의 구성

실험번호	인자		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	1	3
4	1	2	1
5	1	2	2
6	1	2	3
7	2	1	1
8	2	1	2
9	2	1	3
10	2	2	1
11	2	2	2
12	2	2	3
13	3	1	1
14	3	1	2
15	3	1	3
16	3	2	1
17	3	2	2
18	3	2	3
19	4	1	1
20	4	1	2
21	4	1	3
22	4	2	1
23	4	2	2
24	4	2	3

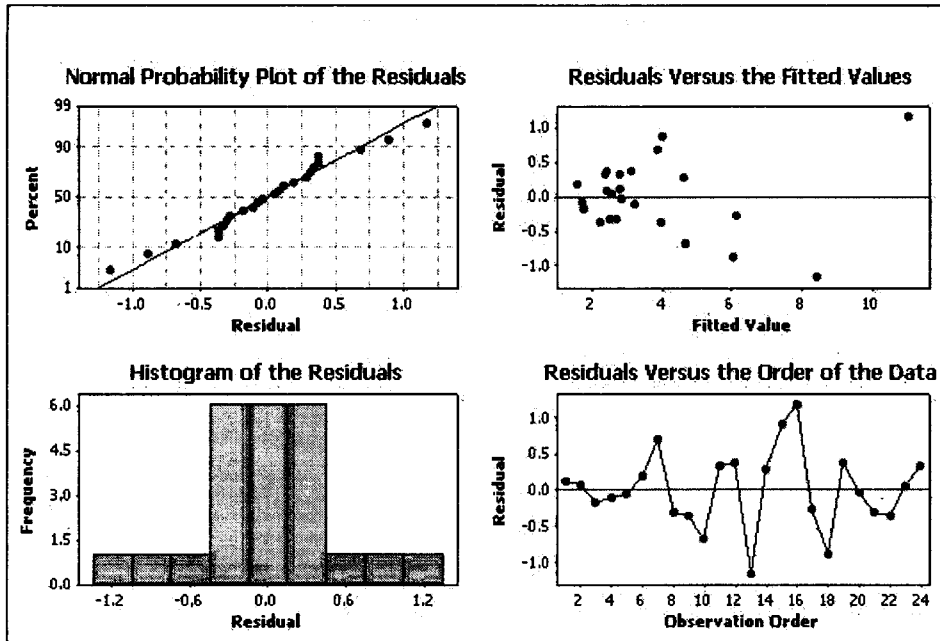


그림 3. 잔차 분석 1

삼원배치법에 의한 분석 결과는 다음과 같다. 그림 3은 잔차 분석을 통하여 오차의 정규성 검토, 등분산 검토, 독립성 검토를 수행하고 분산분석이 잘 되었는가를 확인하기 위한 그림들이다. 잔차의 정규 확률도와 잔차의 분포도를 보면 오차가 정규 분포를 가짐을 보여준다. 잔차에 대한 회귀값의 대비를 보면 오차가 등분산임을 보여준다. 잔차와 자료의 차원 대비표는 오차가 서로 독립임을 보여준다. 따라서 분산분석이 올바르게 진행되었음을 알 수 있다.

분산분석의 결과표는 표 6과 같다. P 값의 분석 결과 세 인자의 유의 수준을 비교하여 절단깊이에 영향을 미치는 정도를 보면 세 인자 중 라이너 각도와 라이너 재질의 유의 수준이 폭약의 종류보다 상당히 작은 값을 보임을 알 수 있다.

이는 세 인자 중 라이너 각도와 라이너 재질이 절단깊이에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

교호작용효과에 대해서는 표 6의 분석결과표와 그림 4의 교호 작용 효과도처럼 각 인자가 서로 독립적임을 알 수 있다. 따라서 본 실험에서 세 인

자의 최적조합을 그림 5에 의해 예측할 수 있다. 라이너의 각도는 90°, 화약의 종류는 PETN, 라이너의 재질은 Cu일 때이다.

표 6. 분산분석 1

요인	제공합 (S)	자유도 (Φ)	불편분산 (V)	검정 통계량(F)	F>F0 확률(P)
A	72.921	3	24.307	22.23	0.001
B	2.214	1	2.214	2.03	0.205
C	23.854	2	11.927	10.91	0.010
A*B	4.412	3	1.471	1.35	0.345
B*C	1.285	2	0.642	0.59	0.585
A*C	11.377	6	1.896	1.73	0.260
Error	6.560	6	1.093		
Total	122.623	23			

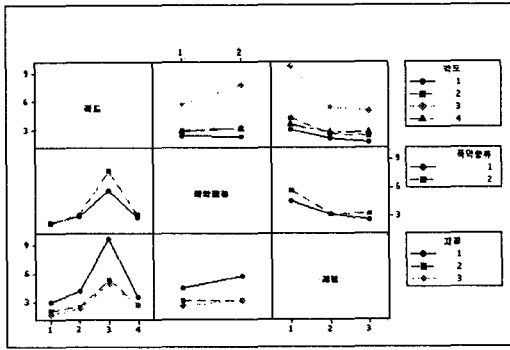


그림 4. 교호도 1

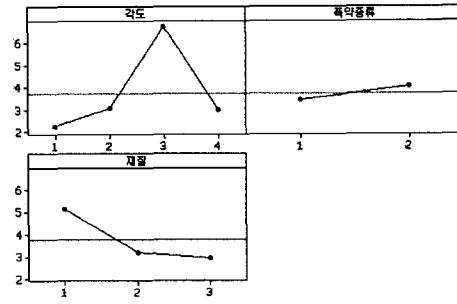


그림 5. 주인자효과

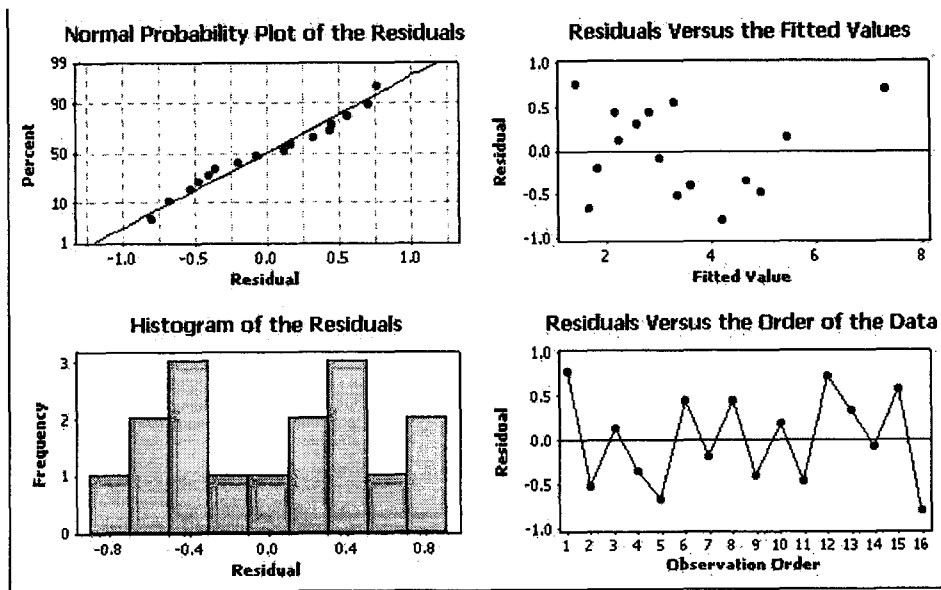


그림 6. 잔차 분석 2

다원배치법의 실험에 취급된 인자는 라이너의 각도, 라이너의 재질, 폭약 량, 라이너의 두께 등 네 개이며, 각 인자의 수준은 라이너 각도, 라이너 재질, 폭약 량, 라이너 두께 모두 각각 2수준으로 하였다. 수준의 범위는 각 인자의 작은 값을 기준으로 라이너 각도는 50%, 폭약 량은 90% 라이너 두께는 60%였다. 잔차 분석을 통하여 오차의 정규성 검토, 등분산 검토, 독립성 검토를 수행하고 분산분석이 잘 되었는가를 확인하였다.

그림 6을 보면 오차가 정규분포를 가지고 등분산하며 독립적임을 알 수 있다. 따라서 분산분석이 올바르게 진행되었음을 알 수 있다.

분산분석의 결과표는 표 7과 같다. A는 폭약 량, B는 라이너 재질, C는 라이너 각도, D는 라이너 두께이다. P값의 분석 결과 네 인자의 유의 수준을 비교하였다. 네 인자의 유의 수준이 조금의 차이는 있었지만 모두 절단깊이에 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

표 7. 분산분석 2

요인	제곱합 (S)	자유도 (Φ)	불편분산 (V)	검정 통계량(F)	F>F0 확률(P)
A	12.5139	1	12.5139	2380.77	0.013
B	8.2368	1	8.2368	1548.02	0.016
C	4.0703	1	4.0703	774.37	0.023
D	8.0798	1	8.0798	1537.18	0.016
A*B	1.5563	1	1.5563	296.08	0.037
A*C	0.3053	1	0.3053	58.07	0.083
A*D	0.0068	1	0.0068	1.29	0.459
B*C	0.4193	1	0.4193	79.76	0.071
B*D	2.0521	1	2.0521	390.40	0.032
C*D	0.2377	1	0.2377	45.21	0.094
A*B*C	0.2328	1	0.2328	44.29	0.095
A*B*D	3.1241	1	3.1241	594.35	0.026
A*C*D	0.0315	1	0.0315	5.99	0.247
B*C*D	0.5148	1	0.5148	97.94	0.064
Error	0.0053	1	0.0053		
Total	41.2865	15			

라이너 각도와 라이너 재질의 분석값이 앞의 결과분석 값과 차이를 보였는데 이는 라이너 각도의 수준 범위가 앞의 실험에서는 110%로 많은 차이를 갖기 때문이다. 교호작용효과에 대해서는 표 7의 분석결과표와 그림 7의 교호도처럼 약량과 라이너 재질, 라이너 두께가 서로 교호작용이 있음을 알 수 있고 라이너 각도는 나머지 세 인자와 교호작용이 없음을 알 수 있다.

따라서 교호작용이 있는 약량과 라이너 재질, 라이너 두께의 정량적 평가를 위하여 강건설계를 이용하여 기여비를 산정하였다.

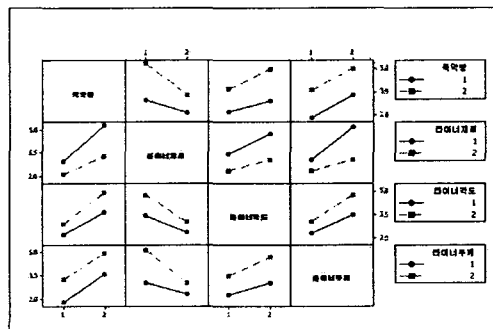


그림 7. 교호도 2

4. 강건설계에 의한 설계변수의 기여비 산정

4.1 강건설계

공학적 설계 작업은 제품의 구성, 설계에 이용되는 인자(factor), 공정의 구성 등 결정해야 할 사항이 많다. 성형폭약을 설계함에 있어서도 절단효과에 영향을 미치는 요소나 그 요소들의 최적조합 등을 결정하기 위하여 고려해야 할 인자들은 매우 많으며 그 변동 또한 크다. 이렇게 설계 조건이 복잡한 경우 최적 결과를 얻기 위해 유용하게 사용할 수 있는 방법 중 하나가 행렬실험을 이용한 강건설계이다.(김호성 외, 1992) 강건 설계는 제품의 기획 단계에서 생산단계까지 성능, 품질, 가격 등을 결정하기 위한 설계 최적화법이다. 행렬실험은 연구하고자 하는 제품 또는 공정의 다양한 인자를 변화시켜가면서 실시하는 일련의 실험들로 구성된다. 직교배열과 신호 대 잡음비(S/N 비)라는 품질 측정법 및 분산분석 등을 사용하여 행렬실험을 하면 여러 인자들의 역할을 효과적으로 결정할 수 있다.

본 연구에서는 다원배치법으로 분석한 다섯 개의 설계변수 중 폭약의 종류, 라이너의 각도를 제외한 약량, 라이너 종류, 라이너 두께를 실험에 필요한 인자로 하고 각 인자별로 수준을 결정한다. 다음 성형폭약의 절단 깊이에 미치는 영향의 기여도를 정량적으로 산정하였다. 인자가 변화할 수 있는 수준은 박근순(2001)의 원자료와 비교하기 위하여 세 가지로 하였다. 따라서 L9(33)의 직교배열을 선택하였다. 표 8은 해석에 사용된 인자들의 수준을 나타낸 것이다.

표 8. 실험 인자의 수준

Factors / Levels	라이너의 재질 A	라이너의 두께 B	약량 C
1	Cu	0.4 mm	32 g/ea
2	Al	0.8 mm	70 g/ea
3	Pb	1.0 mm	133 g/ea

이러한 각 인자별 수준을 정하여 행렬 형태로 표시한 L9(3³)의 직교 배열표는 표 9와 같다. 실험 번호 1번의 경우는 라이너의 재질 Cu, 약량 32 g/ea, 라이너의 두께 0.4 mm의 수준에 해당하는 절단 깊이가 입력된다.

표 9. 직교행렬 L9(3³)

실험번호	인자		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

신호 대 잡음 비는 각 실험에서 구해진 절단깊이를 대상으로 다음과 같이 정의한다.

$$\eta_i = 10 \log \left(\frac{1}{\text{절단 깊이}^2} \right) \quad (1)$$

인자수준에 의해 정의되는 실험영역에 대한 전체평균은 (2)식과 같다.

$$m = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \frac{1}{\eta_i} \quad (2)$$

성형폭약의 절단효과에 가장 영향을 미치는 인자를 구하기 위한 분산분석에서 S/N비와 자유도로부터, S/N비의 총 제곱합

$$\text{총 제곱합} = \sum_{i=1}^9 \eta_i^2 \quad (3)$$

과 제곱 평균으로부터 인자의 기여도 F를 구하게 된다.

$$F(\%) = \frac{\text{제곱 평균}}{\text{총 제곱 합}} \quad (4)$$

4.2 실험

본 연구에 사용된 시료는 폭약류, 라이너, 케이스(외피), 절단 시험편으로 나눌 수 있다.

성형폭약으로는 기폭속도가 4,570m/s 이상인 폭약이 요구된다. 본 연구에서는 현장에서 쉽게 구할 수 있는 뉴에멀전 폭약을 사용하였다. 기폭뇌관은 8호 전기뇌관을 사용하였다. 실험에 사용된 폭약류의 특성은 표 1과 같다.

라이너 각도는 90°가 되도록 제작하였다. 실험에 사용된 라이너의 물성은 표 2와 같다. 케이스의 재질은 성형폭약의 절단효과에 미치는 영향이 거의 없다. 아크릴을 사용하였다.

절단 시험편으로 사용된 철판은 일반구조용 강재인 SS41 및 SSC41의 형강 등을 사용하였으며, 이때 사용한 시험편의 강도는 표 10과 같다.

실험 후 성형폭약의 폭발에 의해 절단된 시험편은 그림 8과 같다.

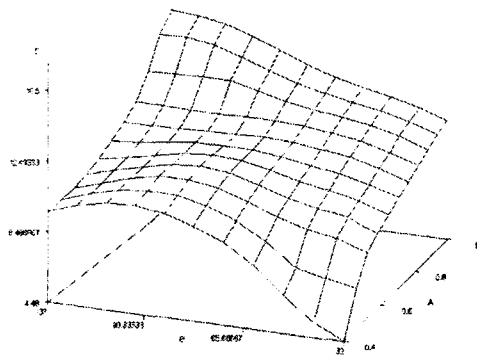
표 10. 절단시험편의 강도

시료 물성	SS41	SSC41
인장강도 kgf/mm ² (MPa)	41 (402)	41~55 (402~539)
항복강도 kgf/mm ² (MPa)	25 (245)	25 (245)

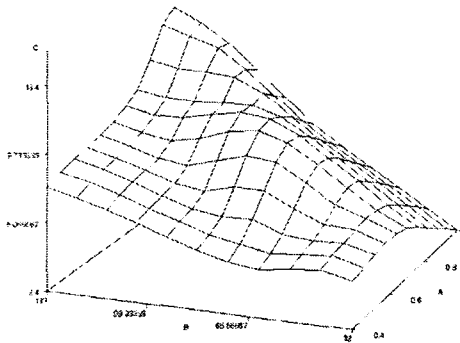


그림 8. 강건설계 실험결과 일례 (32g Cu)

강건설계 실험에 의해 얻어진 결과와 원자료를 비교한 결과 약량과 라이너의 두께가 성형폭약의 절단효과에 영향을 미치는 정도를 그림 9에 비교하였다. a는 원자료의 그래프이고 b는 강건설계실험 결과의 그래프이다. X축은 약량, Y축은 라이너의 두께, Z축은 절단 깊이이다. 실험의 횟수가 더 적은 b의 그래프가 a보다 정확하게 약량과 라이너의 두께가 성형폭약의 절단효과에 미치는 영향을 표현하였다. 이는 강건설계에 의한 실험이 시행착오적인 실험으로 시간과 경비가 많이 드는 일반실험보다 경제적이며 설계 조건이 복잡한 경우 최적 결과를 얻기 위해 유용하게 사용할 수 있음을 보여준다.



(a) 일반 실험



(b) 강건설계 실험

그림 9. 일반 실험과 강건설계 실험의 비교

표 11은 분산분석 결과 절단효과에 대한 기여비

F(%)이다. 세 개의 설계변수 중 성형폭약의 절단효과에 가장 영향을 미치는 요소는 73.3%의 기여비를 보인 약량이고 라이너의 재질과 두께는 각각 19.4%와 7.3%의 기여비를 보였다.

표 11. 절단깊이에 대한 기여비 ANOVA 분석

Factor	기여비(F%)
A. 라이너의 재질	19.4
B. 라이너의 두께	7.3
C. 약량	73.3

5. 결론

본 연구에서는 성형폭약의 절단효과에 영향을 미치는 설계변수 중 폭약의 종류, 약량, 라이너의 각도, 라이너의 재질, 라이너의 두께에 대해 통계적 분석 방법인 실험계획법을 통하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 폭약의 종류, 라이너 재질, 라이너 각도의 영향정도를 삼원배치법으로 비교한 결과 교호작용 없이 각각 독립적으로 절단 효과에 영향을 미치고 있음을 알 수 있고, 라이너 재질과 라이너 각도가 폭약의 종류보다 더 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

(2) 약량, 라이너 재질, 라이너 각도, 라이너 두께의 영향정도를 다원배치법으로 분석, 비교한 결과 약량과 라이너 재질, 라이너 두께는 서로 교호작용이 있고 라이너 각도는 독립적으로 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

(3) 강건설계를 이용하여 약량과 라이너 재질, 라이너 두께가 성형폭약의 절단효과에 영향을 미치는 기여도 F(%)를 평가한 결과 약량이 73.3%, 라이너의 재질이 19.4%, 라이너의 두께가 7.3%를 보였다.

참 고 문 헌

1. 이병일, 박근순, 공창식, 김광태, 2000, 성형폭약에 의한 폭발절단기술에 관한 연구, 터널과 지하공간, 제10권 제4호, pp. 516~525
2. 박근순, 2001, 가소성 선형 성형폭약의 국산화를 위한 설계변수에 관한 연구, 강원대학교 대학원 공학박사 학위논문
3. 김호성, 양형식, 임균택, 전태준, 전창복, 1992, 강건설계를 이용한 품질공학, 민영사