

## 임펄스 추진장치 점화전류 신뢰성 확보에 관한 연구

김대준\*, 김건수\*, 이태경\*\*  
 \*넥스원 퓨처, \*\*국방과학연구소

### A Study on Reliability of Impulse Thruster Ignition Current

Kim Dae Joon\*, Kim Geon Su\*, Lee Tae Kyung\*\*  
 \*NEX1 Future, \*\*ADD

#### ABSTRACT

다수의 소형 추진모터가 배치된 유도탄의 자세를 제어하기 위해서는 유도탄 비행 중 추진모터를 선택적으로 점화할 수 있는 추력 점화제어기가 필요하다. 점화제어기가 추진모터 점화를 제어하기 위해서는 수십 채널의 많은 펄스 전류전원이 요구되며, 유도탄 특성상 소형으로 구현되고 고 신뢰성이 보장되어야 한다. 본 논문에서는 다채널 펄스 전류원의 고밀도 소형화 회로를 구현함에 있어 6Sigma 방법을 통하여 신뢰성을 분석하였고, 점화전류 확보를 위하여 필요한 회로경로의 최적화된 설계를 다루었다. 통계적 시뮬레이션을 이용한 설계 최적화는 실험결과를 통하여 그 유효성이 확인되었다.

#### 1. 서 론

유도탄은 1회 사용을 위해 제작되지만 장기간 보존 및 신뢰성이 확보되어야 하고, 탑재장비는 작동 중 가혹한 충격, 진동, 급격한 온도변화 등을 견뎌내야 하므로 내환경성이 보장되어야 한다.

다수의 소형 추진모터가 배치된 유도탄의 자세를 제어하기 위해서는 유도탄 비행 중 추진모터를 선택적으로 점화할 수 있는 추력 점화제어기가 필요하다.

본 논문에서 대상으로 하는 추진장치는 유도탄의 고기동성을 제공하는 다수의 개별 추진모터로 구성되어지며, 점화제어기의 점화신호 명령으로부터 추진모터가 점화되어져 짧은 시간동안 유도탄에 임펄스 추진력을 발생시키는 장치이다. 점화제어기는 유도조종장치로부터 점화명령 및 관련정보를 수신/해독하여 추진장치에 점화명령 신호를 발생하고, 유도조종장치에 점화제어기 점점신호를 송신하는 장치이다.<sup>[1]</sup>

통상적인 전력 전자회로 설계는 소자 선정 시 온도

및 정격전력 등을 고려하여 충분한 여유마진을 가지고 설계할 수 있다. 하지만 유도탄의 경우 공간, 무게 등의 제약조건으로 인하여 충분한 여유마진을 가지고 소자 선정 및 회로 설계를 할 수 없는 경우가 많다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 본문에서는 첫째, 부품의 신뢰성 분석을 통한 하드웨어의 최적설계 및 소형화 부품 선정에 대하여 언급하였고 둘째로 회로의 특성분석을 통한 점화전류의 신뢰성 분석에 대하여 언급하였다.

신뢰성 검증을 위하여 본 논문에서는 6 sigma방법을 사용하였다. 6 sigma는 80년대 Motorola에서 시작하여 90년대 GE에서 발전시켰으며, 결함 없는 작업을 수행할 수 있는 프로세스 능력을 통계적 방법으로 정량화하여 분석하는 방법으로서 본 논문에서는 Monte Carlo Simulation<sup>[2]</sup> 과 Chai Square방법<sup>[2]</sup> 을 사용하여 점화전류 신뢰성 분석 및 최적의 전류제한 저항을 선정하였고, 통계적 Simulation을 이용하여 유효성을 검증하였다.

#### 2. 하드웨어 최적 설계

점화전류를 발생시키기 위해서는 DC전압, 스위치, 전류값을 결정해 주는 저항으로 구성이 된다. 이 중에서 특히 저항의 선정은 점화전류의 값에 가장 큰 영향을 미치며 스위치 개수만큼의 저항이 필요하기 때문에 전체 공간에 있어서도 중요한 인자로 작용한다.

##### 2.1 전류제한 저항 선정

점화제어기에서 전류제한 저항은 모터개수만큼의 파워저항이 필요하다. 따라서 저항의 크기는 전체 공간에 있어서 중요한 인자로 작용하며 요구되는 점화조건 (5A/10ms 이상)을 만족하는 최적화된 저항 선정이 요구된다.

### 2.1.1 저항기 종류 선정

일반적으로 Wire Wound 저항은 Weighted 전류에는 강하지만 Pulse 전류에는 Film Type 저항이 강하다고 알려져 있으므로 Metal Glaze Type의 저항을 사용한다.

다음 그림 1.과 그림 2.는 6A의 전류가 50ms동안 각각의 전류제한 저항에 흘렀을 때의 전류파형이다.

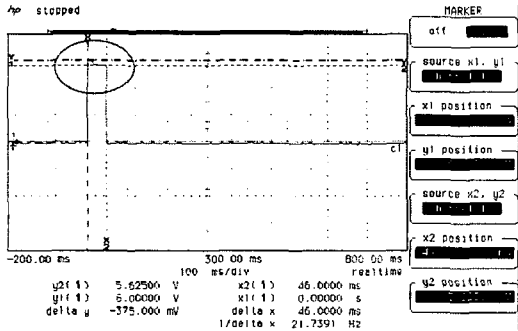


그림 1 Wire Wound Type 저항의 전류파형  
Fig. 1 Current of Wire Wound Type Resistance

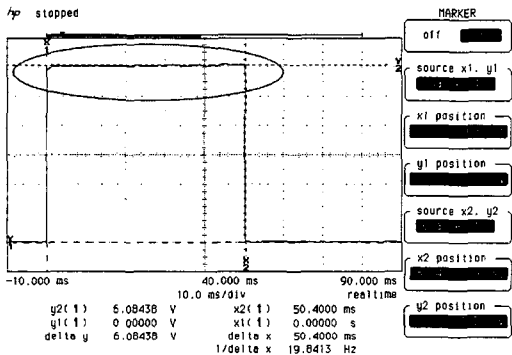


그림 2 Metal Glaze Type 저항의 전류파형  
Fig. 2 Current of Metal Glaze Type Resistance

위 파형에서 알 수 있듯이 Wire Wound Type의 저항은 인가시간에 따라 6%정도의 전류감소가 발생하였다. 하지만 Metal Glaze Type의 저항은 시간에 따른 전류파형에 거의 변화가 없다. 이는 내부저항 값이 거의 변화가 없다는 것을 의미하며, 전류제한 저항으로서 Metal Glaze Type이 적합함을 알 수 있다.

### 2.1.2 저항 수명 확인

그림 3.은 25ms동안 73배의 Over Current를 19초 간격으로 인가할 때의 인가횟수에 따른 저항변화를 나타낸 것이다. Graph의 끝은 저항이 타서 끊어졌을 경우이다.

200회까지의 기울기는 저항수명과 관계가 있다는 가설을 세우고 Chi Square 검정을 통하여 이를 확인하기 위하여 저항 3개를 수명시험 하였다.

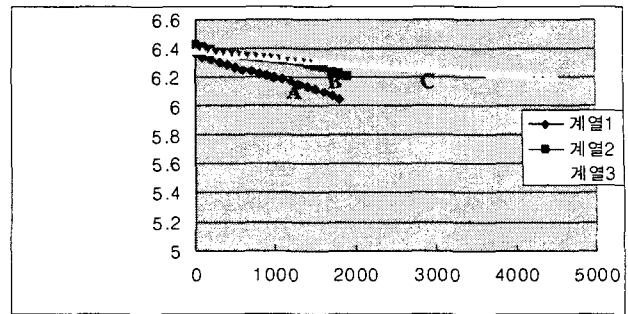


그림 3 저항 수명 확인  
Fig. 3 life of resistance

시료 A, B, C의 기울기의 역수는 각각 4597, 5466, 11828이고 각각의 인가회수는 1750, 1950, 4531이다.

#### Chi-Square Test: A, B, C

Expected counts are printed below observed counts

	A	B	C	Total
1	4597	5466	11828	21891
	4612.65	5389.54	11888.81	
2	1750	1950	4531	8231
	1734.35	2026.46	4470.19	
Total	6347	7416	16359	30122

$$\text{Chi-Sq} = 0.053 + 1.085 + 0.311 + 0.141 + 2.885 + 0.827 = 5.303$$

$$\text{DF} = 2, \text{P-Value} = 0.071$$

A, B, C 저항의 200회까지의 기울기와 인가회수와와의 관계를 Chi Square검정을 통하여 확인한 결과 P-Value가 5%보다 커서 예측치와 실제치가 일치한다고 볼 수 있으며 인가회수에 따라 저항변화가 완만한 것은 수명이 길다고 볼 수 있다. 이상의 결과를 토대로 인가시간을 10ms로 하고 3개의 시료를 200회 시험한 결과는 표1.과 같다.

표 1 200회 인가 후의 전압변화

Table 1 Variation of Voltage after 200 iteration

시료	초기치	200회 인가 후
A	6.35000V	6.35000V
B	6.40313V	6.40313V
C	6.37504V	6.37504V

시험 결과200회 후의 전압변화가 모두 0이므로 선택한 Metal Glaze Type의 저항에 대한 신뢰도는 충분히 높다고 할 수 있다.

## 2.2 기타 부품 선정

점화제어기의 소형화를 위하여 최소공간을 점유하는 연결기 선정 및 소형화된 구동회로 설계 시 부품 선정을 다음과 같이 하였다.

### 2.2.1 연결기 선정

점화제어장치는 연결기 개수가 많아서 기존의 연결기를 사용하여 할당된 공간에 조립성 및 제작성을 고려하여 부착하는 것이 불가능하다. 따라서 조립성과 제작성을 고려하여 와이어 굵기가 26번이고 기존 연결기 크기의 절반 정도 되는 Micro Miniature 연결기를 선정하였으며, 실제 도통시험을 통하여 적합성을 검증하였다.<sup>[1]</sup>

### 2.2.2 구동회로 부품 선정

구동 스위치 소자는 전압 구동형 소자로서 게이트에 전류를 흘릴 필요가 없어 같은 용량의 파워 트랜지스터보다 소형화가 용이한 파워 MOSFET을 사용하였으며, 구동신호와 출력신호의 절연을 위해 옵토커플러를 사용하였다. 옵토커플러는 전기적 사양에서 기존의 같은 패키지에 2개가 들어있는 소자로서 점유면적이 작고, PCB소형화를 가능하게 하였다.<sup>[1]</sup>

## 3. 점화전류 신뢰성 검증

### 3.1 구동명령신호 정확도 CTQ MAP

다음 그림 4.는 점화제어기 점화성능에 영향을 미치는 인자에 대한 FAST(Function Analysis System Techniques) Diagram을 나타낸 것이다.

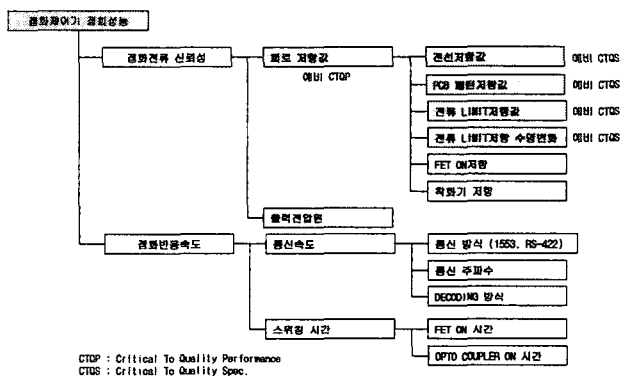


그림 4 FAST 도표  
Fig. 4 FAST Diagram

### 3.2 점화회로 설계

점화회로는 착화기에 5A 이상의 전류를 공급하여야 한다. 이 전류를 공급하는 방식은 전류제한 저항을 사용하여 전류를 공급하며 저항값은 공급선로저항 성분 및 전압원을 고려하여 5A 이상이 되도록 선정한다.

다음 그림 5.는 점화전류 공급회로의 블록 다이어그램을 나타낸 것이고, 그림 6.은 점화전류 공급회로의 각 저항성분을 표시한 것이다.

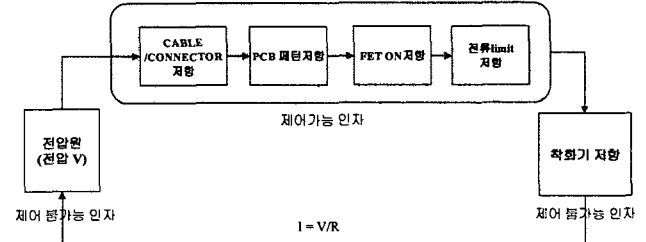


그림 5 점화전류 공급회로 블록도  
Fig. 5 Block Diagram of Ignition Current Circuit

위에서 고려되어야 하는 인자들은 그림 5.에서 보는 바와 같이 전압원, 전송선로 저항, 부하저항(착화저항)이며 제어 불가능한 인자는 전압원과 착화기 저항이다. 제어 가능한 인자(전송선로 저항)에 대한 경로별 저항성분은 그림 6.에서 보는 바와 같다.

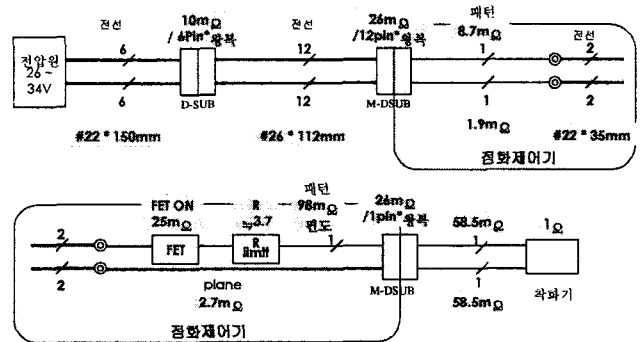


그림 6 점화전류 공급회로 저항성분  
Fig. 6 Resistance of Ignition Current Circuit

착화기는 한번에 최대 6개까지 동시에 점화된다. 아래 그림 7.에서 보는 바와 같이 개별 Path의 저항오차로 인해 저항값의 분포에 따라 공통 Path에는 항상 같은 전압강하가 발생하지 않는다. 예를 들어 최악의 경우 5개는 최소의 저항값을 1개는 최대의 저항값을 가지는 경우 저항값이 최대인 저항에는 상대적으로 낮은 전류가 흐르게 된다.

즉, 공통 Path에서 Drop되는 전압을 감안하여 6 Sigma 수준의 점화전류를 확보하여야 한다.

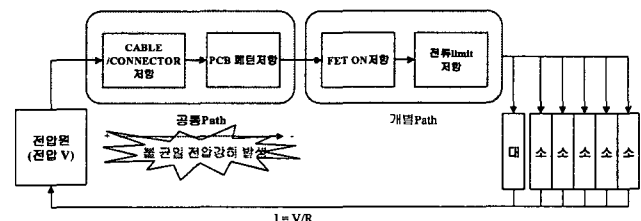


그림 7 불균일 전압강하 발생 블록도  
Fig. 7 Block Diagram of different Voltage Drop

### 3.3 통계적 시뮬레이션

제어인자 중에서 전류제한 저항의 값 및 허용오차를 선정하기 위하여 전송 선로상에 존재하는 Cable저항, 패던저항, 연결기 접촉저항, FET On저항 및 이들의 오차를 파악하고 5A이상의 전류를 6 Sigma 수준으로 공급하기 위하여 Monte Carlo Simulation을 실시한다.

#### 3.3.1 공통 Path Modeling

점화제어기에서 공통 Path에 해당하는 저항값은 아래 표 2와 같다.

표 2 공통 경로 모델링  
Table 2 Common Path Modeling

WFE 저항/M (AWG#26)/M	공통 Path 모델							
	연압원 - D-SUB	D-SUB - 접착제 머지	D-SUB (10mm)	MODULE IN (20mm max)	접착 제	RELAY ON 저항	제어저항 (POWER PLANE)	공통 Path 값
0.13								0.06
0.0030	0.0024	0.0017	0.0022	0.0010	0.0030	0.0133	0.0281	
20	20	100	100	20	20	20		
3	3	3	3	3	3	3		
0.0002	0.0002	0.0006	0.0007	0.0001	0.0002	0.0009	0.0010	
0.0033	0.0024	0.0025	0.0029	0.0010	0.0032	0.0132	0.0284	
0.0031	0.0022	0.0016	0.0016	0.0011	0.0029	0.0139	0.0263	
0.0032	0.0023	0.0016	0.0021	0.0012	0.0032	0.0126	0.0262	
0.0030	0.0023	0.0020	0.0017	0.0011	0.0031	0.0139	0.0270	

#### 3.3.2 개별 Path Modeling

착화기는 한번에 최대 6개까지 동시에 점화가 가능하므로 6개의 전류제한 저항이 병렬로 연결되어 있다고 가정하고 표 3과 같이 각각에 저항에 대하여 Random 함수로써 저항값을 발생시키고, 저항에 걸리는 Path 저항값도 각기 다르므로 Random하게 저항값을 발생시켰다.

표 3 개별 경로 모델링  
Table 3 Individual Path Modeling

제어인자 변동 계수	MODULE OUT	제어인자 계수	FET ON 계수	SOLAS 계수	LIMIT계수	개별저항 값	LIMIT계수	개별저항 값
0.1170	0.0265	0.0362	0.0250	1	3.70	4.97		
20	100	20	20	10	1	1		
3	3	3	3	3	3	3		
0.0070	0.0037	0.0065	0.0017	0.0033	0.0123	0.0123	0.0123	0.0123
0.1256	0.0151	0.0262	0.0239	1.0336	3.7109	5.0254	3.6868	5.0008
0.1254	0.0162	0.0261	0.0237	0.9517	3.7110	4.8680	3.7106	5.0150
0.1241	0.0335	0.0368	0.0222	1.0193	3.7080	4.8293	3.7060	4.9727
0.1165	0.0279	0.1003	0.0250	1.0094	3.6971	5.0056	3.7087	4.9480
0.1194	0.0273	0.1023	0.0225	1.0498	3.7089	4.9638	3.7156	4.9953

표 4 점화전류 계산  
Table 4 Calculation of Ignition Current

공통 Path 값	개별저항					
	개별저항 변동계수	연압원	공통PATH 연압강화	개별PATH 연압	전류 (MAX 저항)	전류 (MIN 저항)
		LOW				
		28.0				
		HIGH				
		34.0				
0.0281	0.83	30	0.97	28.58	5.87	5.04
		13.3	14.68	9.91		
		6	6.0	6.0	6.15	6.15
0.0015	0.6667	0.0475	0.9757	0.1912	0.2000	
0.0268	0.8302	29.7968	0.88	28.91	5.75	5.86
0.0282	0.8234	29.3381	1.00	28.34	5.68	5.77
0.0304	0.8283	28.1526	0.83	27.32	5.44	5.58
0.0286	0.8299	29.0272	0.99	28.03	5.58	5.67
0.0255	0.8263	28.7369	1.00	27.74	5.51	5.69

개별 Path와 공통 Path의 저항값을 구하여 모두 합하고 연압원을 전체 저항값으로 나누어주면 표 4에서

보는 바와 같이 점화전류의 값을 구할 수 있다.

#### 3.3.3 공정능력 분석

Monte Carlo Simulation을 1000번 실시하고 이에 대한 표준편차를 구하고, 전류제한 저항값을 구하여 저항성분 각각에 대한 공차를 부여하면서 공정능력을 확인한 결과 표 5와 표 6에서 볼 수 있는 바와 같이 Zlsl = 6.099, Zუსl = 7.348로서 6 Sigma 수준의 점화전류를 확보하였다. (공정규격의 USL(상한값) = 7A, LSL(하한값) = 5A)

표 5 LSL측의 공정능력  
Table 5 Process Capability of LSL

	LSL		5 Zlsl		6.099	
	연압원	공통PATH 연압강화	개별PATH 연압	전류 (MAX 저항)	전류 (MIN 저항)	
	LOW			LOW	LOW	
	28.0			5.86	5.99	
	HIGH			HIGH	HIGH	
	34.0			6.59	6.71	
MEAN	30	0.94	29.03	5.79	5.90	
오차(%)	13.3	16.18	6.62			
시그마 공정능력	6	6.0	6.0	6.15	6.15	
시그마	0.6667	0.0508	0.6402	0.1361	0.1395	
	30.2912	0.93	29.36	5.86	5.97	
	30.8435	0.92	29.92	5.98	6.08	
	31.0690	1.01	30.06	6.02	6.12	
	29.8404	0.92	28.92	5.75	5.80	

표 6 USL측의 공정능력  
Table 6 Process Capability of USL

	USL		7 Zუსl		7.348	
	연압원	공통PATH 연압강화	개별PATH 연압	전류 (MAX 저항)	전류 (MIN 저항)	
	LOW			LOW	LOW	
	28.0			5.86	5.14	
	HIGH			HIGH	HIGH	
	34.0			6.71	6.84	
MEAN	30	0.95	29.00	5.88	5.99	
오차(%)	13.3	15.69	6.70			
시그마 공정능력	6	6.0	6.0	6.15	6.15	
시그마	0.6667	0.0495	0.6474	0.1351	0.1375	
	29.6087	0.91	28.70	5.85	5.94	
	30.8921	0.98	29.91	5.97	6.17	
	29.5510	0.96	28.59	5.78	5.92	
	30.1246	0.89	29.23	5.91	6.06	

## 4. 결론

본 논문에서는 6 Sigma 기법을 이용하여 점화전류의 신뢰성 분석 및 최적의 전류제한 저항을 선정하였으며, 점화전류 공급회로의 저항성분의 오차를 부여하여 오차의 한계 내에서 점화전류의 공정능력을 확인함으로써 우리가 최적설계한 전류제한 저항 및 점화전류의 값이 신뢰성이 있음을 확인하였다.

## 참고 문헌

- [1] 이태경, "축추력 점화제어기의 소형화 설계/제작에 관한 연구", 유도무기학술대회 논문집, 2003, 11.
- [2] LG이노텍, "R&D 6 Sigma BB과정"