

고체추진제 절단 시험 화재 피해 저감을 위한 개선 연구

정민철^{1,2}, 구승환¹, 전인범¹, 김일환^{2*}
¹국방기술품질원, ²강원대학교

Solid Propellant Cutting Test Improvement Research to reduce fire damage

Min-Cheol Jung^{1,2}, Seung-Hwan Gu¹, In-Beom Jeon¹, Il-Hwan Kim^{2*}
¹Defense Agency for Technology and Quality
²Kangwon National University

요약 본 논문에서는 유도무기의 저장신뢰성평가(ASRP) 성능시험 수행을 위해 추진기관에서 시편을 추출하기 위한 절단시험의 화재 피해 절감을 위한 개선 방안 연구이다. 유도무기의 추진기관 절단시험은 추진기관의 연소관 부분을 절단하여 시편을 제작하고 분석하기 위한 필수 시험이다. 추진기관은 로켓 모터의 고체 추진제를 연료로 사용함으로써 발화에 특화된 추진제로 절단시험 과정에서 내부의 추진제가 점화될 위험이 있다. 그러므로 절단시험 수행 시 발생할 수 있는 위험요인에 대해 분석·결정 및 개선점 식별 파악하여 화재의 발생 요인을 제거하였다. 본 논문의 결과를 활용하여 본 논문의 결과를 활용하여 절단시험 운용의 안전성 및 효율성을 높일 것으로 판단된다.

Abstract This study evaluated improvement measures to reduce fire damage in cutting tests to extract specimens from propulsion engines to perform storage reliability evaluation performance tests for guided weapons. The propulsion engine cutting test for guided weapons is essential for producing and analyzing specimens by cutting the combustion tube part of the propulsion engine. The propulsion engine uses the solid propellant of the rocket motor as fuel, so there is a risk that the propellant inside is ignited during the cutting test as it is a propellant specialized for ignition. Therefore, the risk factors that may occur when performing a cutting test were analyzed, and improvements were identified to eliminate the cause of fires. The safety and efficiency of cutting test operations can be improved using the results of this paper.

Keywords : Solid Propellant, ASRP, Cutting Test, Propulsion Engine, Test and Evaluation

1. 서론

고체 추진기관은 유도탄을 표적까지 운반하는데 필요한 에너지를 공급하는 주요한 장치이다. 이러한 고체추진기관은 실제 운용(발사)되기 전까지 오랜 시간 동안 저장 또는 이송의 형태로 유지관리 되다가 1회 운용과 동시에 소멸되는 대표적인 One-Shot Device이다. 고체 추진제를 장기 저장할 경우 외적 자연환경 하중과 취급

운용에 따른 인위적 하중 발생과 추진제, 오링 등의 화학적 특성에 변화가 생길 수 있다. Fig. 1은 유도탄 추진기관이 점진적인 응력/변형률 스트레스를 받고 파괴되는 과정을 나타낸다.

수명이 도래한 추진기관의 표본을 추출하여 성능시험을 수행하고 분석하여 신뢰도 및 저장 수명 등을 평가하게 된다[1,2]. 이에 국방기술품질원(국방종합시험센터)은 추진제, 탄체결합체 등의 부품류에 대한 수락시험

*Corresponding Author : Il-Hwan Kim(Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Kangwon National University, Korea)
email: ihkim@kangwon.ac.kr

Received November 29, 2023

Revised December 26, 2023

Accepted February 6, 2024

Published February 29, 2024

(Acceptance Test) 및 저장탄약신뢰성평가(ASRP : Ammunition Stockpile Reliability Program)를 수행한다. ASRP는 저장 탄약의 사용가능성, 안전성, 신뢰성, 성능 등을 평가하기 위해 국방규격 또는 시험 규격 요구 사항으로 시험한다. 이러한 시험결과를 통해 계속 저장, 우선 불출, 폐기 등의 등급판정을 내리게 된다[3].

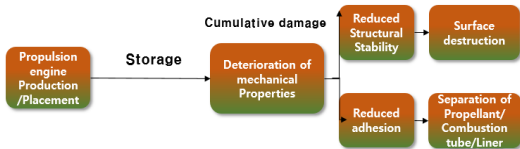


Fig. 1. The Process of Destroying the Propulsion Engine

유도탄 추진기관에 충전되어 있는 추진제는 오링 등 다른 부품들에 비해 보수가 교체가 불가능하기 때문에 추진제의 수명이 추진기관의 수명으로 직결된다. 그러므로 추진기관의 수명을 판단하기 위해 내부 추진제를 획득하여 물성시험을 수행하기 위한 절단시험은 필수적이라 할 수 있다.

고체 추진기관을 절단하기 위한 방법으로 다이아몬드 와이어, 밀링 머신, 드릴 등을 사용하고 있으며, 이러한 방법은 마찰열을 수반하기 때문에 마찰열로 인하여 추진제가 발화할 수 있다. 마찰열에 의해 추진제가 발화되면 인적, 물적 피해가 발생함은 물론 주변 환경에도 큰 손해를 끼칠 수 있다[4]. 따라서 마찰열의 발생을 억제하기 위한 냉각이 필수적이거나, 통상적으로 사용되는 냉각/질삭유를 적용하게 되면 고체 추진제가 습기나 일반 유기용제에 대한 반응으로 물성시험을 수행할 수 없기 때문에 통상적인 방법의 적용이 곤란하다. 따라서 고체 추진기관을 절단하는 경우, 마찰열로 인한 추진제의 연소 및 물성 변화를 방지하기 위하여 자연 냉각 방식을 적용하고 있지만 연소 가능성을 제로화 할 수는 없는 실정이다.

이러한 상황에서 최근 사회적으로 안전에 대한 의식이 향상되면서 증대재해처벌법 등의 관련 법규가 신설되고 안전사고를 예방하기 위한 활동이 중요해 졌다. 절단시험은 산화제를 포함한 고체추진제의 절단작업으로 시험 전 ■ 중 ■ 후 화재 가능성이 상시 존재하고 추진제가 모두 소모될 때까지 연소가 지속 되어 절단장비 및 인명위험까지 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 절단시험에서 발생할 수 있는 화재 위험요인을 사전에 파악하고 시설 개선을 위한 방법을 제안하고자 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 추진기

관 다이아몬드 와이어 절단에 관한 과정을 이해하고 제 3장에서는 위험요인에 대한 내용을 고찰하며 제 4장에서는 본 연구에서 제시하는 위험요인 분석결과에 따라 개선탐다. 마지막으로 제 5장에서는 본 연구의 결과를 요약하고 의의와 한계점 및 향후 연구 방향을 제시한다.

2. 다이아몬드 와이어 절단

국방기술품질원에서는 다이아몬드 와이어를 이용하여 절단시험을 수행하고 있다. 다이아몬드 와이어는 직경이 330 μ m 이며 약 20~50 μ m의 다이아몬드 입자가 위치 분포, 밀도, 크기 및 돌출 높이가 모두 다르게 접착제로 고정되어 있다. 다이아몬드 와이어는 다른 와이어에 비해 높은 절단 효율과 우수한 절단면 품질을 가지며, 작은 크기의 절단이 가능하고 단단하고 부서지기 쉬운 재료를 절단할 때 환경에 대한 오염이 없는 등 많은 장점을 가지고 있다[5]. 절단시험은 수명평가 시 추진제 시편 제작을 위한 필수 사항으로 전체과정은 Fig. 2와 같이 5가지의 추진기관 인수 ■ 이동 및 설치 ■ 절단 ■ 보관 ■ 인계로 작업 분류로 구분할 수 있다.

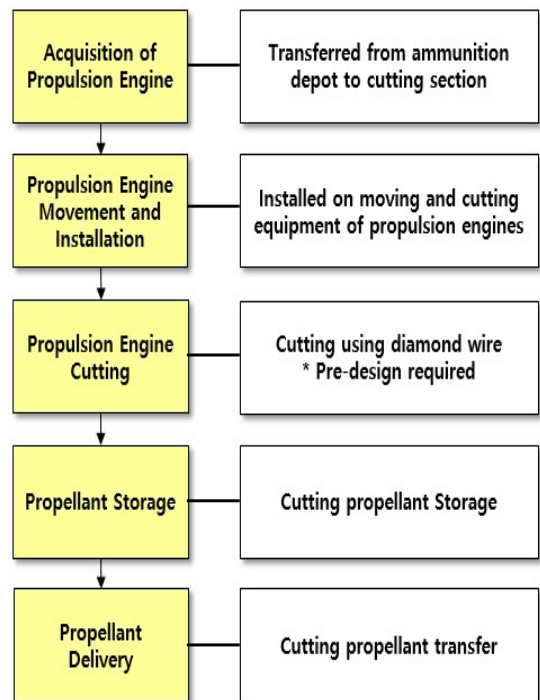


Fig. 2. The Process of Cutting the Propulsion Engine

절단시험을 위해서는 추진기관의 크기, 시편종류 (JANNAF, CUBIC 등), 시험항목 및 위치에 따라 다양한 크기의 시편을 획득해야 한다. Fig. 3은 한정된 추진제에서 최대의 시편을 제작하기 위한 추진제 크기 및 그레인 형상에 따른 사전 설계방법이다.

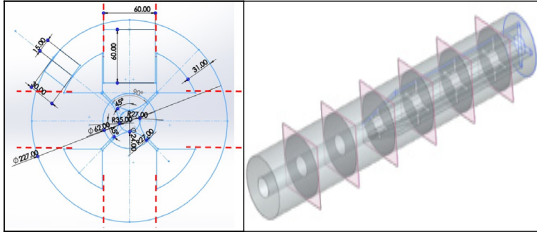


Fig. 3. Pre-Cutting Design

추진기관 각 크기별 절단시험을 진행하기 위해 시험장에서는 시험 전 시험장을 규격에 맞는 요구조건으로 변경하여 설정한다. 추진기관 설치 후 다이아몬드와이어 절단작업이 진행되고 50분 절단, 10분 청소의 1시간 주기로 추진기관 1발 절단시험 시 Fig. 4와 같이 원통절단(a), 배꼽절단(b), Cubic절단(c)은 약 200회 이상 진행된다.

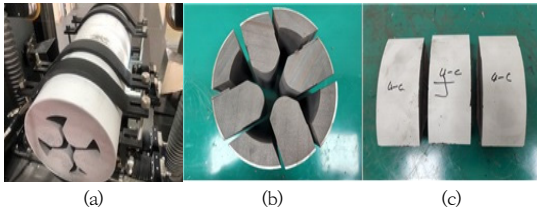


Fig. 4. Cutting Method
(a) cylindrical cutting (b) belly button cutting
(c) Cubic cutting

3. 위험요인 분석·결정 및 개선점 식별

3.1 위험요인 분석

절단시험의 위험요인 분석은 문제의 원인 및 해결해야 하는 과제를 누락 없이 분석하기 위한 위험성평가 도구인 4M 기법을 활용 하였다. 4M 기법은 Fig. 5와 같이 재해로 귀결될 수 있는 최종결과를 가지게 하는 중대한 원인 모두를 식별하여 재해 원인들의 인과관계를 파악하고 개선을 실시하는 방법이다.

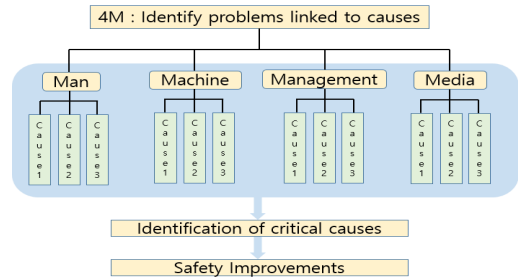


Fig. 5. Process of 4M Risk Analysis

본 연구에서는 절단시험에서 발생할 수 있는 재해의 원인을 분석하기 위해 4M 기법을 통해 인적, 기계적, 물질·환경적, 관리적 요인의 화재·폭발 및 기타 재해 원인을 도출하고 개선점을 식별하였다. 개선점 식별을 위해 화재·폭발 및 기타 재해의 주요 원인이 다수 포함되어 있는 고체추진기관의 이동, 설치 및 절단 과정을 중점으로 위험요인을 도출하였으며, 아래 Fig. 6과 같이 절단시험의 5가지 작업 분류 중 추진기관 이동, 추진기관 설치, 추진기관 절단 과정을 원인 분석 대상으로 결정하였다.

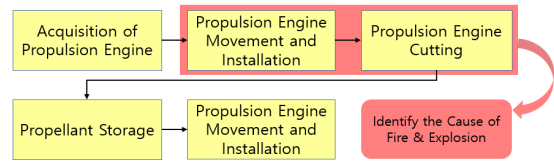


Fig. 6. Fire and Explosion Cause Analysis Part

추진기관 이동, 추진기관 설치 및 추진기관 절단 과정을 중심으로 4M 위험성평가 기법을 실시하여 재해의 원인을 분석한 결과는 Table 1과 같다.

Table 1. Cause Analysis Using 4M Risk Assessment Technique

Category Division	Work Division	Accident Causes and Types
Man Category	Propulsion Engine Movement	<ul style="list-style-type: none"> · Risk of musculoskeletal accidents due to improper working posture, etc. between handling heavy objects · Accidents such as collisions and seizures with propulsion engines and equipment for moving propulsion engines due to one-person work · Risk of test object collision and falling due to crane malfunction (risk of collision due to test object rotation and high-speed operation, etc.)

	Propulsion Engine Installation	<ul style="list-style-type: none"> · There is a risk of the test object breaking away during the cutting test if the test object is not properly secured due to unsafe behavior when placing the test object
	Propulsion Engine Cutting	<ul style="list-style-type: none"> · Insufficient closure of explosion-proof door after installation of test object · After completing the installation of the test object, the external sliding door is not opened. · Risk of constriction, collision, or falling caused by unsafe actions during the process of separating the cutting equipment and propulsion engine after the cutting test · Risk of disaster due to leaving the working position or entering the cutting room during the cutting test
	Propulsion Engine Movement	<ul style="list-style-type: none"> · Risk of test object falling due to separation of crane hook release device · Risk of test object falling due to sling belt damage
	Propulsion Engine Installation	<ul style="list-style-type: none"> · Decreased safety of propulsion engine installation due to malfunction of the cutting equipment binding part
Machine Category	Propulsion Engine Cutting	<ul style="list-style-type: none"> · Risk of test object separation due to insufficient fixation of the test object due to malfunction (breakage, etc.) of the binding part of the cutting equipment · Friction and impact to the test object due to malfunction of the wire moving part of the cutting equipment · If the diamond wire breaks, there is a risk of damage to surrounding cutting equipment, mist nozzles, etc., and damage to workers · Ignition of propellant due to abnormal ignition of propellant during cutting test (spark, problems with propellant, etc.) · After propellant ignition, mist fire extinguishing equipment does not operate
	Clean up after Cutting Operation	<ul style="list-style-type: none"> · Risk of worker cutting accidents due to operation of cutting equipment when cleaning dust after cutting test
Management Category	Propulsion Engine Movement	<ul style="list-style-type: none"> · Risk of fire and explosion due to static electricity when handling test materials
	Propulsion Engine Installation	<ul style="list-style-type: none"> · Improper work due to lack of standard work procedures when installing a propulsion engine
	Propulsion Engine Cutting	<ul style="list-style-type: none"> · Disaster caused by unauthorized entry by outsiders during the cutting test

		<ul style="list-style-type: none"> · Risk of ignition due to static electricity of cutting equipment and test material when handling test material · Risk of fire and explosion due to friction and spark between diamond wire clearance after cutting equipment is complete
Media Category	Propulsion Engine Movement	<ul style="list-style-type: none"> · Slip due to poor work path and workplace floor condition · Risk of musculoskeletal disorders when working in an unstable posture due to small workspace
	Propulsion Engine Cutting	<ul style="list-style-type: none"> · Risk of ignition due to accumulation of fine dust of propellant inside the cutting room
	Clean up after Cutting Operation	<ul style="list-style-type: none"> · When cleaning the propellant dust after the cutting test, health problems are caused by worker inhalation due to the floating of dust

추진기관의 이동, 설치, 절단(정리과정 포함)의 과정에서 총 26개의 재해의 원인이 되는 위험요인이 식별되었으며 4M 구분으로는 인적요인 7개, 기계적 요인 9개, 관리적 요인 6개, 물질·환경적 요인 4개가 식별되었다. 재해형태로는 추진체의 비정상적 점화로 시작되는 화재·폭발과 같은 재해와 불안정한 작업방법, 관리적인 문제에 의해 발생하는 베임, 충돌, 낙하, 미끄러짐, 분진 흡입 등과 같은 재해로 구성되어 있다.

추진기관 이동, 설치, 절단 작업에서는 고체 추진체가 충전되어있는 추진기관의 취급 및 고체추진체가 공기 중에 노출되는 절단시험 공정 때문에 화재·폭발 위험이 가장 높다. 특히, 4M 기법으로 분류한 재해 원인 및 형태 등을 보아도 시험물(추진기관)의 낙하와 충돌 등의 재해는 단순한 중량물과 작업 인원의 사고로 볼 수 없다는 점이 있다. 예를 들어서 인적요인에서 “크레인 오 조작에 의한 시험물 충돌 및 낙하 위험”, 기계적 요인에서 “크레인 훅 해지장치 이탈에 의한 시험물 낙하 위험” 및 “슬링벨트 손상에 의한 시험물 낙하 위험 등은 추진기관(완성탄) 및 절단 시험이 진행 중인 추진기관(고체 추진체 노출) 상황에서 우발적인 점화가 일어날 가능성을 염두 해 두어야 한다는 점이 있다. 화재·폭발 및 건강장해와 연관이 있는 재해원인의 개수는 Table 2와 같다. 총 26개의 재해원인 중 16개의 화재·폭발사고의 직접적인 원인이며, 10개의 원인은 화재·폭발사고의 확대 및 분진흡입에 의한 인체 건강장해 유발 가능성을 높이는 원인이다.

Table 2. Number of Fire, Explosion, Health-related and Other Minor Accidents

Division	Man	Machine	Management	Media
Numbers Related to Causes of Accidents or Accident Expansion (Fire, Explosion, health disorder)	4	7	3	2
Causes of Other Minor Accidents	4	2	2	2
Sum	8	9	5	4

Table 4. Score According to Fire&explosion Frequency

Impact Classification	Impact Level	Detail
Low	1	In case no personal loss due to an accident
Medium	2	In case of a minor injury or material loss
High	3	In case accident by accompanied by temporary rest of worker
Very High	4	In case fatal accident or lose of work

3.2 위험도 결정

본 연구에서는 장비 및 시설 개선 관점으로 개선점을 식별하기 위해 불안정한 작업자세 또는 작업자의 심리, 법규 위반 등에 영향을 받는 재해원인(충돌, 낙하, 협착)과 작업장 정리정돈 미흡 인한 재해(분진, 미끄러짐 등)로 귀결되는 원인 그리고 표준작업을 제외한 화재·폭발 사고 또는 건강장해로 이어질 가능성이 있는 재해원인(16개)에 대한 위험도를 결정하였다. 위험도 결정에는 Fig. 7과 같이 가능성 4단계, 중대성 4단계의 4×4 Matrix를 사용하였다.

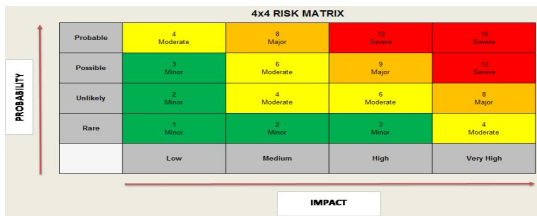


Fig. 7. Risk Matrix (4×4)

위험도는 사고의 발생 가능성(1~4 구분)과 사고 자체의 중대성(1~4 구분)을 곱한 값으로 결정한다. 가능성(빈도) 및 중대성(강도)의 구분은 Table 3 및 Table 4를 적용하여 정성적인 평가로 진행하였다.

Table 3. Risk Score According to Fire&explosion Frequency

Probability Classification	Probability Level	Detail
Rare	1	Less than once per 10 year
Unlikely	2	About once every 5 year
Possible	3	About once every 3 year
Probable	4	About once every 1 year

가능성은 거의 없음(1), 낮음(2), 있음(3), 비교적 빈번함(4)의 점수로 정하였다. 위험성평가 진행 간 가능성 수준은 5년 마다 1회 이하의 발생, 5년 마다 1회 발생, 3년 마다 1회 발생, 1년마다 1회 발생 순서로 가능성 수준이 높아진다. 또한 중대성 수준은 낮음(1), 중간(2), 높음(3), 매우 높음(4) 순서로 정하였다.

위험성평가 진행 간 중대성 수준은 사고로 인한 인적 손실 없음, 사고로 인해 경미한 불휴업 인적재해, 사고로 인해 휴업이 발생하는 인적재해, 사망 또는 노동력 상실을 가져오는 재해 순서로 그 중대성이 높아진다. 본 연구에서는 Table 1에서 확인한 재해의 원인 중 중량물 취급 간 부적절한 작업 자세, 1인 작업에 의한 추진기관 취급, 기계/장비 등 크레인 오 조작에 의한 인원 충격, 작업장 정리정돈 미흡, 표준작업절차 부재로 인한 불안정한 상태, 행동 등의 일반적인 재해 원인들은 표준작업절차와 크레인 조작 시 작업안전수칙 등이 존재하고, 작업인원이 심리적인 영향 및 개인 건강 문제 등 기타 영향을 받지 않고 작업절차를 안전하게 수행한다고 가정하여 위험도 결정에서 고려하지 않았다. 따라서 추진제 발화에 따른 화재 및 폭발에 의한 인명 피해와 추진제 분진흡입에 의한 인체 건강장해를 중심으로 위험도를 결정하였다. 위험도 결정 시 추진기관 절단 중 추진제 접화에 의해 작업인원이 더 큰 피해를 입게 하는 인적요인의 불안정한 행동은 전제조건인 추진제의 점화가 일어나야 재해 정도가 확대 되므로, 전제조건인 가능성도 고려하여 가능성을 계산하였다. 또한 장비 및 시험물(추진기관)의 접지가 잘 되어 있고, 정전화 등 정전기 방호장비가 잘 갖춰져 있다고 가정해야할 경우에도 전제조건을 추가하였다. 위험도 결정 결과는 Table 5와 같다.

Table 5. Determination of Risk due to Fire, Explosion, and Health disorders Accidents

4M Category Division	Work Division	Precondition	Cause of Accident	Accident Causes and Types (Only Ignition or Dust Related Accidents)	Probability Level	Impact Level	Risk Level
Man Category	Propulsion Engine Movement	-	Physical injury Explosion, Fire	· Risk of test object collision and falling due to incorrect operation of overhead crane	1(Rare)	4(Very High)	4(Moderate)
	Propulsion Engine Cutting	Propellant ignition situation	Explosion, Fire (Possibility of casualties)	· Insufficient closing of the explosion-proof door after completing the installation of the test object	1(Rare)	4(Very High)	4(Moderate)
		Propellant ignition situation	Explosion, Fire (Possibility of casualties)	· Sliding door is not opened after completion of test object placement	1(Rare)	4(Very High)	4(Moderate)
		-	Physical injury Explosion, Fire	· Risk of constriction collision, or falling caused by unsafe actions during the process of separating the cutting equipment and propulsion engine after the cutting test	1(Rare)	4(Very High)	4(Moderate)
Machine Category	Propulsion Engine Movement	-	Physical injury Explosion, Fire	· Risk of test object falling due to separation of crane hook release device	1(Rare)	4(Very High)	4(Moderate)
		-	Physical injury Explosion, Fire	· Risk of test object falling due to sling belt damage	1(Rare)	4(Very High)	4(Moderate)
	Propulsion Engine Installation	-	Explosion, Fire	· Decreased safety of propulsion engine installation (Breakdown, etc.) of the cutting equipment binding part	1(Rare)	4(Very High)	4(Moderate)
	Propulsion Engine Cutting	Periodic equipment inspection	Explosion, Fire	· Risk of the test object falling out during the cutting test due to insufficient fixation of the test object due to malfunction(Breakage, etc.) of the binding part of the cutting equipment	1(Rare)	3(Very High)	3(Minor)
		Testing personnel are far away	Explosion, Fire	· During the cutting test, propellant ignition due to test object friction and impact due to malfunction of the wire moving part of the cutting equipment	3(Possible)	3(High)	9(Major)
		-	Explosion, Fire (Possibility of casualties)	· Risk of fire and explosion due to abnormal ignition of propellant during cutting test (Ignition of propellant by spark, etc.)	3(Possible)	3(High)	9(Major)
	-	Spread of fire	· After propellant ignition, mist fire extinguishing equipment does not operate	1(Rare)	4(High)	4(Moderate)	
Management Category	Propulsion Engine Movement	The test object is grounded and the operator wears personal safety equipment	Explosion, Fire (Possibility of casualties)	· Risk of fire and explosion due to static electricity when handling test items (Using anti-static protective equipment such as power outage, ground wire, etc.)	1(Rare)	4(Very High)	4(Moderate)
	Propulsion Engine Cutting	Equipment and test objects are well grounded	Explosion, Fire (Possibility of casualties)	· When handling test items, there is a risk of ignition of the cutting equipment and test items due to static electricity (equipment and test item are grounded)	1(Rare)	4(Very High)	4(Moderate)
		-	Explosion, Fire (Possibility of casualties)	· Risk of disaster at the test site due to fire and explosion due to friction and sparks when arranging diamond wire after completion of operation of cutting equipment	3(Possible)	4(Very High)	12(Severe)
Media Category	Propulsion Engine Cutting	-	Explosion, Fire (Possibility of casualties)	· Risk of ignition due to residual propellant dust	2(Unlikely)	4(Very High)	8(Major)
	Clean up after Cutting Operation	-	Health disorders	· Risk of mid- to long-term health problems due to worker exposure to dust when cleaning propellant dust after cutting test	3(Possible)	3(High)	9(Major)

3.3 위험요인 분석결과

위험요인 분석결과 절단시험 전 추진기관의 이동 및 설치, 추진기관의 절단시험 진행(시험 후 정리 포함)에서 주요 화재/폭발 관련 위험이 식별되었다. Table 5에 따르면 위험도 8(Major) 이상은 절단시험 진행 및 정리 작업 시에 식별되었다. 그 내용은 순서대로 절단 장비의 와이어 동작부분의 오작동으로 인해 시험물 마찰·충격 발생에 의한 추진제 점화, 와이어 절단 작업 시 스파크 등 기타 원인에 의한 비정상적인 점화, 절단장비 가동 전후 다이아몬드 와이어 설치 및 정리 시에 마찰·스파크 등의 발생으로 인한 시험원 재해 발생 위험, 절단실 내 미세 추진제의 분진 축적으로 인한 잔류 추진제 점화, 절단시험 공실 내부 분진의 부유에 의한 작업자 흡입으로 중장기적인 건강장해 발생이 있었다. 위험도가 8(Major) 이

상인 5가지는 건축물 내 화재·폭발 뿐 아니라 시험요원에게 직접적으로 영향을 미치거나 화재·폭발의 확산으로 인한 인원 노출로 인한 사상자 발생 등 중대한 사고의 발생이 될 수 있으므로, 시급하게 개선해야하는 것이다. 따라서 위험도가 높은 5가지를 선제적으로 개선을 진행하였다.

4. 위험요인에 따른 개선

개선의 대상은 크게 첫째 다이아몬드 와이어 및 설치되어 있는 추진기관이 절단장비 작동 중에 흔들리는 등 비정상적인 점착과 다이아몬드 와이어의 끊어짐으로 인해 스파크가 발생하는 상황에 대한 개선, 둘째 절단장비

작동 간 마찰열에 의한 사전에 판단하고 줄일 수 있도록 하는 개선, 셋째 추진기관 절단으로 인해 발생하는 분진의 노출로 점화를 방지하기 위한 효율적인 관리를 위한 시설 개선, 넷째 절단 작업 후 정리 간 절단장비 메인 조작 장비를 절단시험 중 근거리에서 작동해야 되는 문제 점을 해소할 수 있는 개선으로 구분하였다.

4.1 스파크 발생 저감을 위한 개선

금속 재료의 물리적 특성은 스파크 발생에 상당한 영향을 미친다. 마찰이나 충격으로 발생한 열이 처음에는 조그만 입자를 가열시키지만 절단으로 인해 발생하는 추진제 분진과 함께 추진제에 점화에너지를 제공하고 급격한 연소 현상으로 이행된다. 주로 다이아몬드 와이어에 걸리는 부하(장력)가 증가하고 끊어지면서 발생하는 경우와 Fig. 8과 같이 와이어와 추진기관 연소관 간의 비정상적인 접촉으로 인해 발생한다.



Fig. 8. Sparks when cutting

비정상적인 접촉은 와이어의 끼임, 절단 중 와이어의 상하 위치 이동, 절단 완료 마지막 부분의 와이어 튕김으로 구분한다. 절단 중 추진기관 자체에서 발생하는 압축 응력으로 인한 끼임 현상은 금속제가 부착된 날개 부분에 주로 발생하며 마찰면의 증가로 스파크 발생 가능성이 높아 제외 또는 최소화해야 한다. 또한 절단장비 Yoke의 진행방향(상-하)의 반대방향으로 강제이동 및 와이어를 절단 중 뺄 경우 끼임 현상이 발생할 수 있다. 그러므로 한번 시작한 절단 작업은 와이어를 빼지 않고 한 진행방향으로 마지막 절단까지 진행해야 스파크 발생을 최소화 할 수 있다. 절단 마지막 부분의 와이어 튕김은 와이어가 시료물 절단 완료 시 와이어에 걸리는 장력이 해소되어 이탈 시 발생하는 흔들림으로 연소관에 접촉해 스파크가 발생한다. 이를 위해 원통 토막 받침을 절

단부위 하단에 위치시켜 절단 완료 시 와이어의 흔들림을 방지한다. 또한 시험물의 흔들림 방지를 위해 치구와 V-Block을 통해 수평 및 고정하며 Fig. 9와 같다.

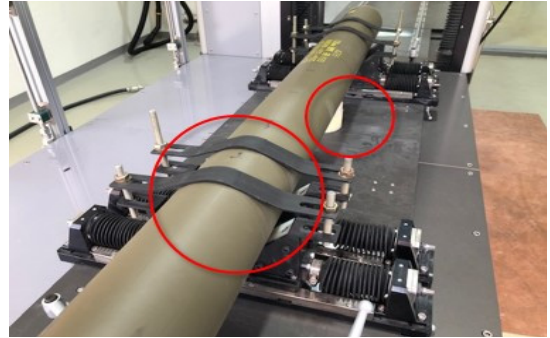


Fig. 9. Fixation Using V-Block

4.2 마찰열 저감을 위한 개선

다이아몬드 와이어의 마모에 따라 마찰열이 발생하고 이를 통해 와이어의 끊어짐이 발생할 수 있다. 이러한 상황을 예방하기 위해 카메라 및 분광기와 함께 다이아몬드 와이어의 상태를 실시간으로 모니터링하여 잔여 수명에 대해 파악하고 교체주기를 잡는 것이 중요하다. Fig. 10과 같이 다이아몬드 와이어의 시각적 확인과 획득 데이터에 대한 세밀한 분석을 위해 고속 카메라를 사용하여 와이어의 정확한 이미지를 얻는다. 카메라를 사용하여 이미지를 획득하는 경우 반사에 의한 와이어의 다이아몬드 분포를 보는 것이 아니라 와이어와 배경의 경계를 명확히 하기 위해 후면에 반사판을 설치하여 색상에 의한 모호한 경계를 최소화하고 빠른 이미지 획득을 위해 컬러가 아닌 흑백 고속 카메라를 사용한다.

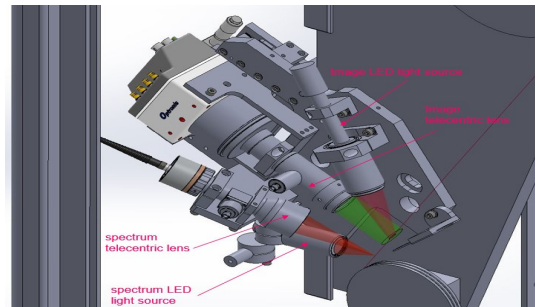


Fig. 10. Experimental System for the diamond wire condition measurement

고속카메라를 통해 획득된 다이아몬드 와이어 영상 데

이터는 실시간으로 처리되며, 이미지 Viewer를 통해 와이어의 형태 확인 및 처리 결과를 확인할 수 있다. Fig. 11은 카메라로 얻은 이미지를 나타낸다.



Fig. 11. Image of the diamond wire using the high speed camera

이진화를 통한 영상 분류 및 Blob analysis 결과를 Fig. 12에 나타낸다. 영상의 1 픽셀은 약 3.425 μ m의 해상도를 가지고 있으므로 Blob analysis에서 나온 픽셀 값을 μ m단위 변환하여 다이아몬드의 크기를 구할 수 있다. 그림 12에 로켓 모터의 실시간 절단 작업을 통해 획득한 와이어의 다이아몬드 크기를 측정할 결과를 나타낸다. 약 40분 후에 다이아몬드 크기가 3 μ m 정도 마모된 것을 확인할 수가 있다.

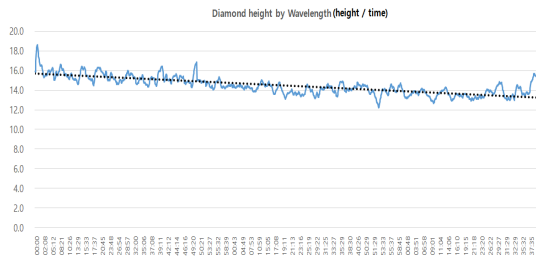


Fig. 12. Diamond wire size variation

Fig. 13과 같이 분광기 실험에서 444nm, 484.5nm 및 620.5nm 파장 구간에서 로켓 모터 절단 작업 시간에 따른 반사율을 그림 13에 나타낸다. 620.5nm 파장에서 약 40분 후에 반사율이 10%정도 감소하여 변화폭이 가장 크게 나타남을 알 수 있다.

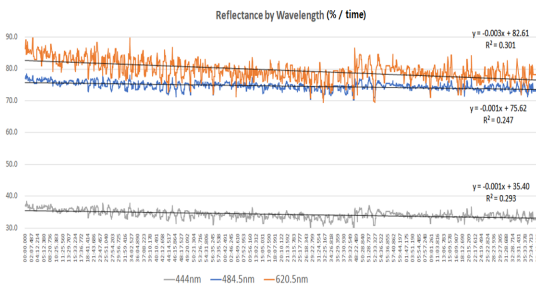


Fig. 13. Spectral reflectance variation

검사 시스템을 절단 장비 내부에 적용함으로써 와이어의 상태를 실시간 모니터링이 가능하다. 낮은 속도에서는 고속 카메라와 분광기를 이용하여 측정하고 높은 속도에서는 분광기를 이용하여 마모도 측정이 가능하다. 이를 통해 고가의 다이아몬드 와이어의 적절한 교체 주기를 확립함으로써 비용 절감 효과와 와이어 마모도 측정을 통한 끊어짐 방지를 개선하여 화재 발생 위험을 줄일 수 있다[6].

4.3 폭발성 분진 저감을 위한 개선

절단 중 발생하는 추진제의 분진은 미세한 가연성의 입자로 작은 점화에너지인 스파크에도 돌발적인 연쇄 산화-연소를 일으키기 때문에 지속적인 제거가 필요하다. 일반적인 절단작업은 윤활유 및 수분을 사용하고 절단 지점을 냉각하여 열을 차단함으로써 화재를 예방한다. 그러나 추진기관 절단은 물리적 특성 평가를 위해 시료의 원형유지가 중요하다. 그러므로 화학적, 물리적 변형을 줄 수 있는 첨가제 사용이 불가하기 때문에 절단지점의 온도 상승을 지속적 공기 분사를 통해 절단지점을 냉각하고 추진제 축적을 방지하며 습식으로 집진한다. Fig. 14는 시험장에 적용한 오일 프리 스크롤 공기압축기 에어시스템을 나타내며 공기를 생성하는 공기압축기와 공기를 보관하는 에어탱크, 수분을 포함하지 않기 위해 냉동식 에어드라이어, 흡착식 에어드라이어, 필터로 구성된다.

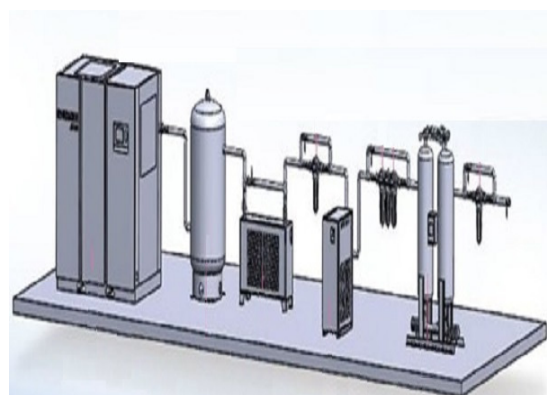


Fig. 14. Oil-Free Scroll Air Compressin Air system Configuration

지속적 공기 분사를 통한 절단지점의 추진제 분진들은 Fig. 15와 같이 와류식 습식집진기를 통해 집진하고 폭발성 물질을 포함한 공기(기체)를 물(액체)과 접촉시켜

폭발성 물질을 제거한다. 집진 효율은 불꽃 함유분진, 폭발성 분진, 흡습성 분진, 고온성 가스, 화재 위험성 분진 등에 대해 95~97%(1㎍분진)의 집진 효율을 발휘한다.

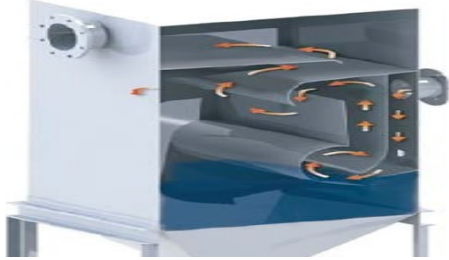


Fig. 15. Vortex Wet Dust Collector Principle

4.4 담당원 위험 저감을 위한 개선

스파크, 마찰열, 분진 등 이러한 위험요소들은 화재/폭발로 인한 작업자의 사망, 근로손실일수 발생 등 산업 재해로 발전할 수 있다. 위험도가 8(Major) 이상인 위험 요소는 주로 절단시험 진행 시 발생이 파악된다. 그러나 대부분의 다이아몬드 와이어 절단장비의 제어시스템은 절단장비 측면 부분에 장착되어 제어 도중 화재/폭발로 인한 담당원의 위험과 직결될 수 있다. 절단장비 제어를 절단시험 중 근거리에서 작동해야 되는 문제점을 해소하기 위해 Fig. 16과 같이 절단부와 제어부를 별도로 구성하고 절단실과 제어된 별도의 공간에서 담당원이 절단시험장비 가동상태를 원격으로 실시간 모니터링 및 제어가 가능하게 해야 한다.



Fig. 16. Cutting Equipment Control through Remote Control

절단 작업 시 추진기관에 접근 횟수는 추진기관 230mm 1발 기준 총 316회로 원통절단(196회:14토막x14회)과 배꼽절단(120회:15토막x8회)을 포함한다. 개

선 전에는 제어 및 설치를 위해 모두 추진기관에 접근하였지만 원격 실시간 모니터링 및 제어를 통해 제어 접근 횟수가 182회 감소하여 134회로 나타났으며 약 57.6% 정도 접근횟수 감소를 보인다.

5. 결론

절단시험은 산화제를 포함한 고체추진제의 절단작업으로 시험 전 ■중■후 화재 가능성이 상시 존재하고 추진제가 모두 소모될 때까지 연소가 지속 되어 절단장비 및 인명위험까지 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 절단시험에서 발생할 수 있는 화재 위험요인을 사전에 파악하고 시설 개선을 위한 방법을 제안하였다.

절단시험에서 발생할 수 있는 재해의 원인을 분석하기 위해 4M 기법을 통해 인적, 기계적, 물질·환경적, 관리적 요인의 화재·폭발 및 기타 위험요인을 도출하였다. 도출된 위험요인은 추진기관의 이동, 설치, 절단(정리과정 포함)의 과정에서 총 26개가 식별되었으며 4M 구분으로는 인적요인 8개, 기계적 요인 9개, 관리적 요인 5개, 물질·환경적 요인 4개가 식별되었다. 도출된 위험요인 중 장비 및 시설 개선 관점으로 개선점을 식별하기 위한 불안정한 작업자세 또는 작업자의 심리, 법규 위반 등에 영향을 받는 재해원인(충돌, 낙하, 협착)과 작업장 정리정돈 미흡 인한 재해(분진, 미끄러짐 등)로 귀결되는 원인 그리고 표준작업을 제외한 화재·폭발 사고 및 분진흡입으로 인한 시험 요원의 건강장해로 이어질 가능성이 있는 재해원인(16개)에 대한 위험도를 결정하였다.

위험도 분석을 통해 위험도 8이상인 5가지를 식별하였으며, 5가지는 건축물 내 화재·폭발 뿐 아니라 시험요원에게 직접적으로 영향을 미치거나 화재·폭발의 확산으로 인한 인원 노출로 인한 사상자 발생 등 중대한 사고의 발생이 될 수 있기에 개선이 시급한 건으로 도출하였다. 5가지 위험요인을 저감 또는 제거하기 위해 개선의 대상 4가지로 선정하였으며, 내용은 다음과 같다. 첫째, 다이아몬드 와이어 및 설치되어 있는 추진기관이 절단장비 작동 중에 흔들리는 등 비정상적인 접촉과 다이아몬드 와이어의 끊어짐으로 인해 스파크가 발생하는 상황에 대한 개선이다. 둘째, 절단장비 작동 간 마찰열에 의한 점화 위험을 사전에 판단하고 줄일 수 있도록 하는 개선이다. 셋째, 추진기관 절단으로 인해 발생하는 분진의 축적으로 점화가 발생할 위험을 방지하기 위한 관리적 측면의 개선이며, 이는 인원의 장기적 분진 흡입으로 인한 건

강장해 위험의 예방과도 연결된다. 마지막으로 절단 작업 후 정리 간 절단장비 메인 조작 장비를 원거리에서 작동하는 개선이다.

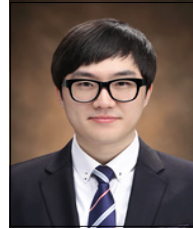
본 연구는 절단시험 시 발생하는 위험요인을 식별하고 위험성을 평가하여 시험 간 안전성을 확보할 수 있는 방안을 제시하였다는 것과 민간이나 다른 분야에서 절단시험 시설 등을 설계하는 경우 효율적인 안전관리와 예방 대책 선정을 수립할 수 있는 방법을 제시하였다는데 의의가 있다. 하지만 이러한 위험요소 분석과 개선에도 불구하고 향후 연구에서 보완해야 할 한계점을 가지고 있다. 절단작업 중 연소관 외부 부분에서 발생하는 위험요인에 대해 해결하였지만 연소관 내부에서 일어나는 스파크, 분진 등에 대한 부분은 시각적, 구조적인 한계점을 해결하지 못했다는 점이다. 또한 개선점을 적용한 결과 저감되는 위험도나 상향되는 안전성에 대한 정량적 분석을 수행하지 못했다는 점이 있다. 향후 연구에서는 이러한 점을 고려하여 연구를 수행한다면 좀 더 의미 있는 결과가 나타나게 될 것이다.

References

- [1] Edward R. Sherwin, "Analysis of "One-Shot" Devices", Selected Topics in Assurance Related Technologies, vol. 7, no.4, pp.1-4, 2004.
- [2] S. J. Back, Y. K. Son, M. H. LEE, "Estimation Methodology for Storage Reliability of One-shot System", The Korean Society of Propulsion Engineers, pp.695-697, 2016.
- [3] M. C. Jung, J. H. Lee, "A Study on the Effects of Relationship Between Copper Crusher Gauge and Internal Piezo Gauge", Journal of the Korea Academia-Industrial, Vol. 21, No. 9 pp. 120-127, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.9.120>
- [4] B. Y. Park, "A Cutting Method of Case Having Solid Propellants and the Same Apparatus" Publication of KR20130003850A, ADD, 2013.
- [5] A. Kumar, S. N. Melkote, "Diamond wire sawing of solar silicon wafers: a sustainable manufacturing alternative to loose abrasive slurry sawing." Procedia. Manufacturing, vol.21, pp. 549-566, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/i.promfg.2018.02.156>
- [6] M. C. Jung, J. H. Lee, I. H. Kim, "Real Time Wire Condition Inspection System Development for Rocket-motor Cutting." The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, 71(11), 1673-1678, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2022.71.11.1673>

정민철(Min-Cheol Jung)

[정회원]



- 2014년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원 국방종합시험센터 선임기술원
- 2017년 2월 : 강원대학교 전자통신공학과 (석사)
- 2022년 2월 : 강원대학교 전기전자공학과 (박사과정)

〈관심분야〉

전자/신호계측, 탄약신뢰성평가, 로켓추진

구승환(Seung-Hwan Gu)

[정회원]



- 2014년 8월 : 서울과학기술대학교 IT정책전문대학원 산업정보시스템 전공 (공학박사)
- 2014년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원 국방종합시험센터 선임연구원

〈관심분야〉

방탄 신뢰성평가, 국방 안전, 금융공학

전인범(In-Beom Jeon)

[정회원]



- 2019년 2월 : 인하대학교 환경안전융합전공 (공학석사)
- 2020년 1월 ~ 현재 : 국방기술품질원 국방종합시험센터 연구원

〈관심분야〉

산업안전, 소방, 위험물, 화재·폭발 방호

김 일 환(II-Hwan Kim)

[정회원]



- 1995년 3월 ~ 현재 : 강원대학교 전기전자공학과 교수
- 1982년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 (학사)
- 1988년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 (석사)
- 1993년 3월 : Tohoku University 기계공학과 (박사)

〈관심분야〉

로봇공학, 메카트로닉스