



Received: 2024/05/20
Revised: 2024/05/29
Accepted: 2024/06/12
Published: 2024/06/30

***Corresponding Author:**

Hyewon Lee

C4ISTAR Integrated Product Support R&D Lab,
LIG Nex1
255, Pangyo-ro, Bundang-gu,
Seongnam-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea
Tel: +82-31-326-9173
Fax: +82-31-326-9001
E-mail: hyewon.lee2@lignex1.com

군사용 착용형 로봇의 위험관리프로세스 개발 및 적용방안

Development and Application of Risk Management Process for Military Wearable Robots

이혜원^{1*}, 현도경², 이동규¹, 지용기²

¹LIG넥스원 C4ISTAR IPS연구소 선임연구원

²LIG넥스원 C4ISTAR IPS연구소 수석연구원

Hyewon Lee^{1*}, Dokyung Hyun², Dongkyu Lee¹, Woongki Ji²

¹Research engineer, C4ISTAR IPS R&D Lab, LIG Nex1

²Chief research engineer, C4ISTAR IPS R&D Lab, LIG Nex1

Abstract

착용형 로봇의 위험상황은 사용자의 안전에 직접적인 영향을 미치므로 장비 개발 초기 단계부터 체계적인 관리가 필요하다. 군사용 착용형 로봇의 경우 개발 초기부터 임무조건, 임무동작 등의 주요 임무계획을 수립한다. 따라서 임무특성에 기반한 위험분석 및 관리가 수행될 필요가 있다. 본 연구는 국제표준 및 미군 규정 등의 위험관리 프로세스를 검토하였으며, 군사용 착용형 로봇에 적용 가능한 위험관리 프로세스를 개발하였다. 프로세스는 (1) 대상장비 정의, (2) 위험상황 식별, (3) 위험성 평가 (4) 위험 통제로 구성된다. 본 연구의 프로세스는 군사용 착용형 로봇의 임무상황별 구체적 위험요인을 분석하기에 용이하며, 개발초기단계에 있는 다양한 착용형 로봇의 위험관리에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Since wearable robots are directly related to the safety of users, systematic safety management is required from the early stages of development. Military wearable robots are developed based on a basic mission plan that includes mission conditions and mission behavior. Therefore, risk analysis and management should be conducted according to the characteristics of the mission. This study reviewed risk management processes from international standards and developed a risk management process that can be applied to military wearable robots. The process is in the following order: (1) Determination of the limits of wearable robots (2) Hazard Identification (3) Risk Estimation and Evaluation (4) Risk Control Strategy. The process in this study is expected to be useful in analyzing mission-specific risk factors for military wearable robots and can be used for risk management of various wearable robots.

Keywords

위험관리(Risk Management),
위험관리절차(Risk Management Process),
위험통제(Risk Control),
군사용 착용형 로봇(Military Wearable Robot),
위험식별(Hazard Identification)

1. 서론

착용형 로봇은 사용자의 운동을 보조해주는 외골격 로봇 시스템을 말한다. 최근 군 병력은 점점 감소하고 병사가 휴대해야 하는 장비의 중량은 증가하고 있으며, 미래의 전장 환경은 다양한 작전수행이 필요하기 때문에 군사용 착용형 로봇은 방위산업의 핵심기술 중 하나로 관리되고 있다[1]. 군사용 착용형 로봇은 병사의 근력을 보조하기 위한 착용형 로봇 플랫폼을 의미하며, 병사의 빠른 움직임과 로봇 간의 연동을 위한 운동의도 감지/추정 및 제어기술, 착용감 증대를 위한 인체적합 관절 설계 기술, 야외 장시간 운용을 위한 전원 및 고효율 동력전달 메커니즘 기술 등의 핵심기술로 구성된다. 미국의 경우 약 20년 전부터 군사용 착용형 로봇이 개발 및 전력화되었으며, 국내에서도 임무 특화 군용 외골격 플랫폼 다변화 및 인공지능 기반 개인 맞춤형 착용형 로봇 기술 연구를 진행 중이다[2].

착용형 로봇은 사용자가 로봇을 직접 입고 조작/반응하는 시스템으로 로봇이 동작하는 동안 사용자와 지속적으로 물리적 접촉이 발생할 수 있으며, 안전사고 시 사용자에게 직접적인 피해를 줄 수 있다. 특히, 군사용 착용형 로봇의 경우 사용자가 다양한 임무 환경에 노출되기 때문에 예측하지 못한 위험이 발생할 가능성이 높다. 따라서 사용자의 안전을 보장하기 위해서는 개발 초기 단계부터 체계적으로 위험요소를 식별하고 관리할 필요가 있다.

위험관리란 위험을 식별·분석하여 평가·통제하는 활동을 의미한다. 민수 산업 분야에서는 한국산업안전보건공단에서 배포한 ‘설계 및 재설계 과정에서의 재해예방 기술지침[3]’을 적용하고 있으며, 건설분야에서는 시공단계에서 안전관리계획 수립 시 위험요소를 제거하고 시공하도록 하여 건설현장의 재해를 예방할 수 있도록 ‘설계안전성검토(DFS: design for safety)’를 활용하고 있다[4]. 방위산업 분야에서는 무기체계 개발 시 총수명주기관리업무훈령[5]에 따라 고장유형영향 및 치명도분석(FMECA: failure mode effects and criticality analysis)을 통해 고장 및 위험을 식별하여 대응한다[6]. 하지만, 시스템에 대한 고장 및 위험에 초점이 맞춰진 FMECA는 사용자의 안전을 증점적으로 고려해야 하는 군사용 착용형 로봇에 적용하기에 한계가 있다.

현재 기계장치 및 시스템에 대한 위험관리 프로세스를 범용적으로 적용할 수 있는 국제 인증 표준으로는 미국 국방부에서 제정한 MIL-STD-882E[7]와 국제표준화기구에서 제정한 ISO-12100[8] 및 ISO-13482[9]가 있다. MIL-STD-882E는 국방 시스템의 개발, 시험, 양산, 운용 및 폐기 과정에서 발생 가능한 위험을 식별, 평가, 완화하는 방법을 다룬다. 즉, 전수명주기를 고려하여 시스템적인 측면의 위험관리 프로세스를 제시한다. ISO-12100는 기계장치를 안전하게 설계할 수 있도록 개발 과정에서 설계자에게 일관된 표준 지침을 제공하고 위험을 평가/관리할 수 있도록 절차를 제시한다. ISO-13482는 ISO-12100과 위험관리 프로세스는 동일하나 퍼스널 로봇(예: 모바일 서비스 로봇, 신체보조 로봇)에 대한 위험관리 항목을 구체화한 표준서이다. 군사용 착용형 장비에 기존 위험관리 표준서들의 적용성을 고려해 볼 때, MIL-STD-882E는 시스템이라는 범용적 측면에서, ISO-12100는 독립적 기계장치 측면에서 위험관리를 다루기 때문에 특수한 무기체계에 대한 위험관리 프로세스를 적용하기에 한계가 있다. 또한, ISO-13482의 적용 범위에 무기체계는 배제되어 있기 때문에 적용에 한계가 있다.

MIL-STD-882E와 ISO-12100 표준서에서 제시하는 위험관리 프로세스는 개념적으로 동일한 절차를 따른다. Fig. 1에서 나타나는 바와 같이 절차의 수와 표현방법에는 차이가 있으나 개념적으로 (1) 대상 정의, (2) 위험 식별, (3) 위험 평가, (4) 위험 저감 조치 순

서로 진행된다.

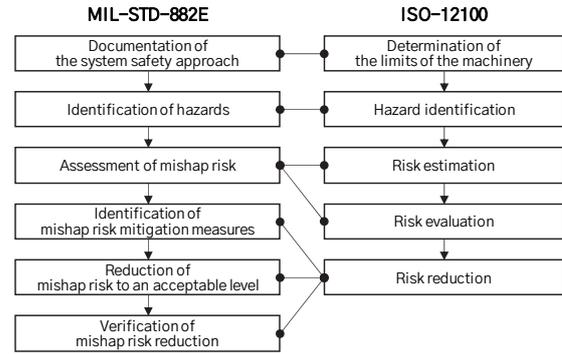


Fig. 1. Risk management process of MIL-STD-882E and ISO-12100

본 연구의 목적은 군사용 착용형 장비의 개발 과정 간 위험관리를 체계적으로 수행할 수 있도록 프로세스를 제안하는 것이다. 본 연구는 기존의 위험관리 관련 표준서를 참고하여 군사용 착용형 장비에 적용할 수 있는 4단계로 구성된 프로세스를 제안하였으며, 시험개발 단계에 있는 군사용 착용형 로봇을 대상으로 프로세스를 적용하여 구체적인 적용방안을 제시하였다.

2. 군사용 착용형 로봇의 위험관리 프로세스개발

본 연구는 군사용 착용형 로봇 개발 시 적용 가능한 위험관리 프로세스를 Fig. 2과 같이 제안한다. 본 연구에서 제안하는 프로세스에는 군사용이라는 특수한 사용 조건을 고려하여 임무 시나리오 및 임무동작 특성 기반의 구체적 위험분석 방법을 포함한다. 또한, 착용형 로봇에서의 위험관리의 중요성을 고려하여 장비 개발 과정에 위험관리 프로세스가 통합되어 진행될 수 있도록 절차를 계획하였다. 특히, 착용형 로봇 개발 과정에서 필수적으로 수행되는 보행성능시험을 통해 위험식별을 할 수 있도록 계획하였다.

첫 번째 단계(S1)에서는 적용 대상 착용형 로봇의 운용조건을 정의한다. 이 단계에서는 로봇의 기본적인 조건(기능, 사용자, 운용 환경 등)을 정의하며(S1-1), 임무 시나리오를 구체화하여 임무별 수행하는 동작 및 특징을 분석한다(S1-2). 두 번째 단계(S2)는 로봇 운용 시 발생할 수 있는 위험상황을 식별하는 단계이다. 위험 상황 식별을 위한 기초자료는 보행성능시험

을 통해 획득된다. 군사용 착용형 로봇의 경우, 장비의 목표 성능 달성을 위해 개발 과정 간 다양한 시험이 수행된다. 그 중 보행성능시험은 사용자가 장비를 착용하고 운용시나리오대로 보행하며 성능을 확인하는 시험으로, 장비의 안정성과 성능을 확인하기 위해 필수적이다[10]. 위험 분석자는 보행성능시험 현장에 참여하여 위험 상황을 관찰하며, 로봇 착용자의 의견을 수집한다(S2-1, S2-2). 그리고 수집된 자료를 바탕으로 위험 유형을 분류하고, 해당 위험과 관련된 구성품을 식별한다(S2-3). 세 번째 단계(S3)는 위험성 평가 단계로서, 식별된 위험 상황들의 위험수준을 판단하는 단계이다. 위험수준은 각 위험상황 별 심각도 및 발생빈도를 평가함으로써 판단되는데, 본 연구에서는 MIL-STD-882E에서 제안하는 평가척도를 활용하였다. 마지막으로, 네 번째 단계(S4)에서는 위험통제 전략을 수립 및 적용한다. 위험통제 전략은 이전 단계에서 도출된 위험수준을 바탕으로 적극적 위험 해소 조치 또는 예방조치 등으로 구분하여 수립된다.

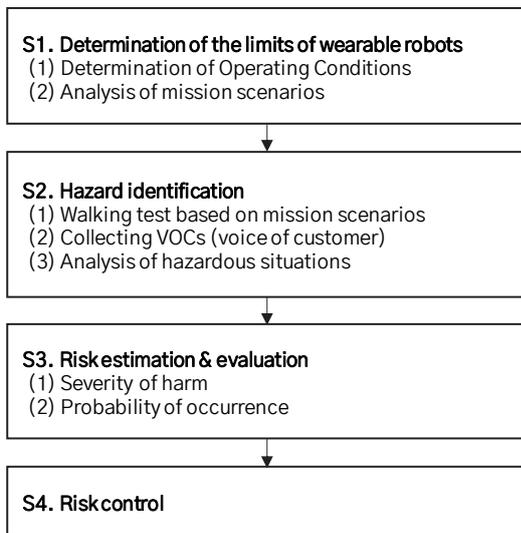


Fig. 2. Risk Management Process for Military Wearable Robots

3. 군사용 착용형 로봇의 위험관리 프로세스 적용

본 연구는 시험개발 단계에 있는 군사용 착용형 로봇을 대상으로 위험관리 프로세스를 적용해 보았다. 프로세스는 앞서 제안한 4단계의 절차에 따라 수행되었다.

3.1 대상장비 정의

3.1.1 운용조건 정의

본 연구의 대상 장비는 시험개발 진행 중인 군사용 착용형 로봇으로, 사용자가 하지에 장비를 착용하면 최대 속도 이내에서 원활하게 보행할 수 있도록 근력을 보조해주는 장비이다. 장비의 보행 환경은 계단 및 바닥이 균일한 비 경사 노면이다. 보안으로 인해 본 논문에서 구체적인 장비의 기능 및 성능은 생략한다. 본 연구는 시험 개발 중인 장비를 대상으로 하기 때문에 눈이나 비와 같은 기후상황은 고려하지 않는다. 또한, 착용자는 장비 교육을 충분히 받은 숙련자로 한정한다.

3.1.2 운용시나리오 분석

대상 장비의 주요 목표 임무는 착용자가 차량에 탑승하여 목적지까지 이동하여 최대 속력으로 보행하고, 지정된 무게의 물건을 지정된 거리에 있는 장소에 운반하는 것이다. 본 연구는 목표 임무를 기반으로 장비의 세부 운용시나리오를 Table 1 및 Fig. 3와 같이 구체화하였으며 각 운용 구간별 요구되는 임무동작을 식별하였다. 예를 들어, 임무 1단계 및 5단계에서는 사용자가 로봇의 전원을 인가/종료하고 착용/탈거하는 과정에서 한 쪽 다리를 들고 서 있는 동작이 발생할 수 있다. 임무 2단계인 차량 탑승 및 이동 과정에서는 걷기, 계단 오르기, 계단 내려오기, 의자에 앉기 및 일어서기 등의 임무동작이 발생한다. 임무 3단계에서는 고속 달리기가 수행되며, 4단계에서는 자리에 쭈그려 앉기 및 일어서기, 물건 들어올리기, 물건 옮기기 등의 임무동작이 발생한다.

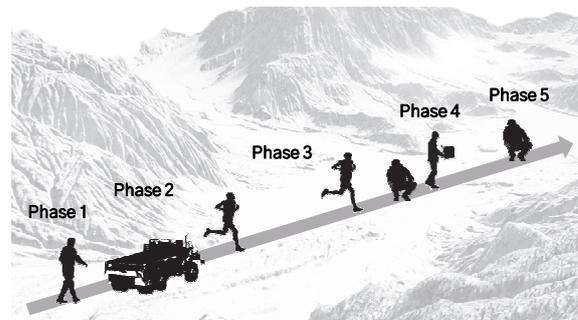


Fig. 3. Operating scenario

Table 1. Analysis of mission scenarios

Mission phases	Operating scenarios (example)	Required motions
1. Preparation	<ul style="list-style-type: none"> Press the button to supply power to the equipment. Wear the robot. 	<ul style="list-style-type: none"> Standing Single leg stand
2. Moving on the vehicle	<ul style="list-style-type: none"> Proceed to the vehicle at a normal walking pace. Use the stairs to get on the vehicle. Get seated/up in the vehicle. Use the stairs to get off the vehicle. 	<ul style="list-style-type: none"> Walking, Up/down stairs Sit down/stand up
3. Running	<ul style="list-style-type: none"> Run on ○○ meters flat ground at a maximum speed of ○○ km/h. 	<ul style="list-style-type: none"> Running
4. Carrying items	<ul style="list-style-type: none"> Bend the knees to pick up an object. Stand up holding the object. Move 00 meters distance holding the object. Bend the knees to place the object down at a designated location. 	<ul style="list-style-type: none"> Sit down / Stand up Walking with an object
5. End of operation	<ul style="list-style-type: none"> Remove the robot hanging on the stand. Turn off the robot system. 	<ul style="list-style-type: none"> Standing Single leg stand

3.2 위험상황 식별

3.2.1 보행성능시험 수행

본 연구는 보행성능시험을 통해 로봇 운용 시 발생할 수 있는 위험상황을 식별하였다. 보행성능시험은 사용자가 장비를 착용하고 운용조건대로 보행하며 성능을 확인하는 시험으로, 개발 과정 간 성능확인 위해 반복적으로 수행된다. 시험은 사용자가 로봇을 착용하고, 앞서 운용시나리오 분석에서 도출된 요구 동작들을 수행하며 진행되었다. 예를 들어, 운용시나리오에서 2번 단계의 시험은 사용자가 러닝머신 위에서 평균 속력으로 보행하고, 3개의 계단을 반복적으로 오르고 내리며 진행되었다. 3번 단계에서는 러닝머신에서 최대 속력으로 달리는 시험을 수행하였으며, 4번 단계는 사용자가 앉았다가 일어서는 동작과 물건을 들고 이동하는 동작을 반복하며 시험을 수행하였다. 1번 및 5번 단계는 보행성능시험의 범위에는 포함되지 않으나, 위험분석자의 관찰 및 사용자 의견 수집을 통해 위험관리 범위에 포함될 수 있도록 하였다.

3.2.2 위험분석자 및 사용자 의견 수집

본 연구에서는 위험 분석자가 보행시험을 현장에서 참관하여 착용자가 임무단계별 요구 동작을 수행할 때마다 발생 가능한 위험 상황을 식별하였다. 또

한, 시험 종료 후 로봇 착용자의 의견 수집을 통하여 위험 상황 및 불편 사항을 확인하였다. 위험은 ISO-12100에서 제시하는 위험유형 9가지 중 5가지를 중점적으로 확인하였다(Table 2 참조).

기계적 위험은 하우징의 날카로운 부분이나 파손 위험과 같은 기구물 관련 위험이며, 전기적 위험은 전기적 부위 접촉 가능성이나 정전기 발생과 같은 위험이다. 열 위험은 과열/과냉각 부위에 대한 위험이며, 인간공학적 위험은 부적절 자세 유발, 신체적/정신적 스트레스에 대한 위험이다. 마지막으로 복합위험은 사용자의 움직임 의도와 로봇의 움직임 간 불일치 또는 사용자 관절 가동범위와 로봇 가동범위 간 불일치 등 비정상적 움직임과 관련된 위험이다. 본 연구에서는 대상 장비가 시험개발 단계에 있으므로 사용자의 직접적 피해보다는 심리적 불편감과 관련이 높은 소음, 진동, 생물학적, 환경적 위험 요소 등은 배제하였다.

사용자의 의견은 매 시험 종료 후 착용자와의 인터뷰를 통해 수집되었다. 다양한 사용자의 의견 수집을 통해 장비를 착용하고 운용하면서 느껴지는 기계적 위험, 열 위험, 인간공학적 위험, 복합위험 등의 위험 상황이 식별되었다. 또한, 본 연구는 해당 위험 상황의 원인이 되는 주요 구성품 또는 부위를 식별하였다. 이는 사용자의 구체적인 의견 및 설계 계통도 분석을 통해 식별되었다. 본 연구는 중복되거나 유사한 의견을 통합하고 각 의견별 위험 유형을 분류하여 정리하였다. 결과 예시는 Table 2와 같다.

Table 2. Identification of hazardous situations based on walking test

Hazard type	Hazardous situation (example)	Related component
1. Mechanical	<ul style="list-style-type: none"> • (H_{M1}) Pressure on the lateral side of the pelvis joint in a seated position • (H_{M2}) Friction between the knee joint and equipment components during walking • (H_{M3}) Clothing getting caught between the hip joint and knee joint components 	<ul style="list-style-type: none"> • (H_{M1}) Pelvic link cover • (H_{M2}) Femoral link lateral housing • (H_{M3}) Multi-link over knee
2. Electrical	<ul style="list-style-type: none"> • (H_{E1}) Physical contact between hip joint cables and the user's body • (H_{E2}) Malfunction and electric shock due to water ingress on the foot assembly 	<ul style="list-style-type: none"> • (H_{E1}) Hip joint link • (H_{E2}) Foot assembly cover
3. Thermal	<ul style="list-style-type: none"> • (H_{T1}) Possibility of battery overheating 	<ul style="list-style-type: none"> • (H_{T1}) Battery, power board
4. Ergonomic	<ul style="list-style-type: none"> • (H_{E1}) Fatigue due to foot pressure during high-speed walking • (H_{E2}) Impact on the knee joint during high-speed walking • (H_{E3}) Discomfort in wearing due to mismatched body shape 	<ul style="list-style-type: none"> • (H_{E1}) Foot assembly footrest • (H_{E2}) Femoral link • (H_{E3}) Skeletal frame, strap
5. Combination	<ul style="list-style-type: none"> • (H_{C1}) Imbalance of weight distribution descending stair • (H_{C2}) Imbalance of weight distribution and overloading at the foot support ascending/descending stair • (H_{C3}) Muscle fatigue/discomfort due to mismatched joint range of motion 	<ul style="list-style-type: none"> • (H_{C1}) Processing board, muscle tension sensor • (H_{C2}) Pressure sensor, motor drive • (H_{C3}) Pelvic link, femoral link

3.3 위험성 평가

본 연구는 식별된 위험 상황별로 위험성 평가를 수행하였다. 평가는 해당 위험 발생 시 사용자에게 영향을 미치는 정도를 나타내는 심각도(severity)와 해당 위험의 발생빈도(probability)를 기준으로 평가되었다. 심각도와 발생빈도는 평가 척도 측면에서 더 세분화된 MIL-STD-882E의 기준을 적용하였다.

표준서에 따르면, 심각도는 4단계의 척도로 구분된다. 가장 높은 수준의 심각도인 Catastrophic(1)은 사용자의 사망이나 영구적 장애를 입는 정도를 의미하며, Critical(2)은 부분적인 영구 장애 또는 직업 상실이 가능한 피해 정도를 말한다. Marginal(3)은 일정 기간 휴식이 요구되는 상해 정도의 피해를 말하며, Negligible(4)은 경미한 상해로 일상생활에 피해가 없는 정도를 말한다.

발생빈도는 5단계 척도로 구분된다. Frequent(A)는 연속적/지속적 발생 가능한 상황, Probable(B)은 빈번한 발생 상황, Occasional(C)은 몇 차례 발생 가능한 상황, Remote(D)는 발생 가능성은 낮으나 사용 환경에 따라 발생 가능한 상황, Improbable(E)은 발생 가능성이 매우 낮은 경우로 정의된다. 심각도와 발생빈도의 평가는 위험분석자의 정성적 판단과 개발부서의 협조로 진행되었다. 심각도는 해당 위험이 발생할 경우 사용자 안전에 영향을 미치는 정도로 평가하였으며, 발생 가능성은 운용시나리오를 기준

으로 해당 위험과 관련된 임무동작의 빈도와 관련 구성품의 고장률 등이 종합적으로 고려되어 평가되었다.

또한, 본 연구는 평가 결과를 바탕으로 각 위험상황별 위험수준을 판단하였다. Table 3에 나타난 바와 같이 심각도와 발생빈도를 기준으로 위험수준을 매우 낮음(very low)부터 매우 높음(very high)으로 분류하였다. 그리고 수집된 각 위험상황에 대해 위험수준을 Table 4와 같이 판단하였다. 예를 들어, 위험유형 H_{M1}은 심각도가 4, 발생빈도가 A로 중간 위험수준으로 판단되었으며, H_{C1}은 심각도 3, 발생빈도 B로 높은 위험수준으로 판단되었다. 주로 전기적 위험과 복합 위험 영역에서 높은 위험수준의 위험상황이 발생 가능한 것으로 나타났다.

Table 3. Risk assessment matrix

Probability	Severity			
	Catastrophic (1)	Critical (2)	Marginal (3)	Negligible (4)
Frequent (A)	Very high	Very high	High	Moderate
Probable (B)	Very High	High	High	Moderate
Occasional (C)	High	High	Moderate	Moderate
Remote (D)	High	Moderate	Moderate	Low
Improbable (E)	Moderate	Moderate	Low	Very low

3.4 위험 통제

본 연구는 위험수준 판단 결과를 바탕으로 위험 통제 전략을 수립하고 장비에 적용하였다. 본 연구에서는 각 위험수준에 대해 위험 저감 조치를 차등적으로 적용할 수 있도록 Fig. 4와 같이 위험 통제 전략을 수립하였다. 위험 저감 조치는 재설계, 예방 설계, 예방 정비로 구분하였으며, 위험 수준에 따라 필수적 또는 선택적으로 적용할 수 있도록 하였다. 재설계(RD: re-design)는 해당 위험상황과 관련 있는 구성품을 전면 재설계하는 것을 말한다. 예방 설계(PD: preventive design)는 해당 위험이 발생하지 않도록 스톱퍼, 가드, 보호장비 등을 추가하는 것을 말한다. 예방 정비(PM: preventive maintenance)는 관련 구성품의 고장, 마모, 위험징후 등을 주기적으로 육안으로 검사하고 필요 시 해당 품목의 교환/수리 등의 조치를 취하는 것을 말한다. 매우 높은 위험수준(very

high)에 대해서는 모든 위험 저감 조치를 필수적으로 적용하도록 하였고, 보통 위험수준(moderate)에 대해서는 위험의 특징에 따라 예방 설계는 선택적으로 적용하고 예방 정비는 필수적으로 적용하도록 하였다. 낮은 위험수준(low)은 선택적으로 예방 정비를 적용하도록 하였다.

본 연구의 착용형 로봇에 위험 통제 전략을 적용한 결과는 Table 5와 같다. 3가지 위험 저감 조치 적용을 통해 위험수준이 1단계 또는 2단계 감소되었다. 예를 들어, 전기적 위험인 H_{E1} 은 고관절 링크 프레임에 커버를 추가하여 사용자와 케이블 간 접촉을 방지하였다. H_{E2} 에 대해서는 발조립체 바닥부에 가스켓을 적용하여 수분유입을 차단하였다. 인간공학적 위험인 H_{Er1} 에 대해서는 발조립체 바닥 내부에 스프링과 패드를 적용하였다. 복합 위험인 H_{C1} 및 H_{C2} 에 대해서는 관련 센서와 보드의 신호 상태를 실시간으로 모니터링하는 시스템을 추가하고, 이상 시 사용자가 긴

Table 4. Risk assessment on identified hazards

Hazard type	Hazards	Related Component	Severity	Probability	Risk Level
1. Mechanical	(H_{M1})	▪ Pelvic link cover	4	A	Moderate
	(H_{M2})	▪ Femoral link lateral housing	4	A	Moderate
	(H_{M3})	▪ Multi-link	3	C	Moderate
2. Electrical	(H_{E1})	▪ Hip joint link	2	C	High
	(H_{E2})	▪ Foot assembly cover	2	C	High
3. Thermal	(H_{T1})	▪ Battery, Power board	2	D	Moderate
	(H_{Er1})	▪ Foot assembly footrest	4	A	Moderate
4. Ergonomic	(H_{Er2})	▪ Femoral link	3	A	High
	(H_{Er3})	▪ Frame, strap	4	A	Moderate
	(H_{C1})	▪ Processing board	3	B	High
5. Combination	(H_{C2})	▪ Pressure sensor	3	B	High
	(H_{C3})	▪ Pelvic link, Femoral link	3	B	High

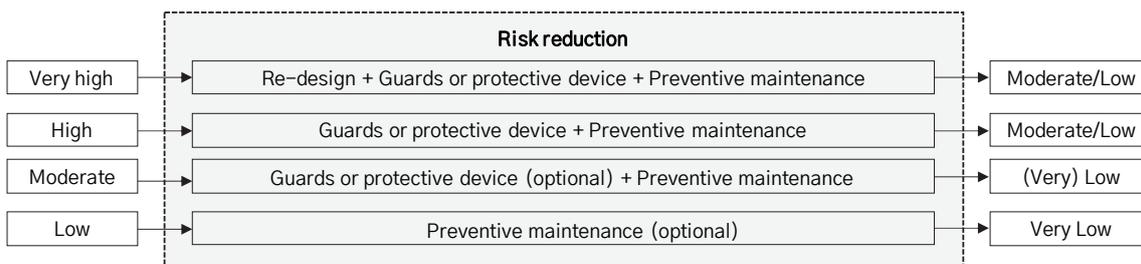


Fig. 4. Risk Control Strategy

Table 5. Risk assessment on identified hazards

Hazard type	Hazards	Level (before)	Risk Reduction	Level (after)
1. Mechanical	(H _{M1})	Moderate	▪ PD (partial redesign), PM	Low
	(H _{M2})	Moderate	▪ PD (added cushion), PM	Very low
	(H _{M3})	Moderate	▪ PD (partial redesign), PM	Low
2. Electrical	(H _{E1})	High	▪ PD (added frame cover), PM	Moderate
	(H _{E2})	High	▪ PD (added gasket), PM	Moderate
3. Thermal	(H _{T1})	Moderate	▪ PD (added pad, device), PM	Low
4. Ergonomic	(H _{E1})	Moderate	▪ PD (added cushion & spring), PM	Very low
	(H _{E2})	High	▪ PD (partial redesign), PM	Moderate
	(H _{E3})	Moderate	▪ PD (added straps), PM	Low
5. Combination	(H _{C1})	High	▪ PD (signal monitoring), PM	Moderate
	(H _{C2})	High	▪ PD (signal monitoring), PM	Moderate
	(H _{C3})	High	▪ PD(added stopper & cushion), PM	Moderate

급정지 할 수 있도록 보완하였다. 그리고 중간 위험 수준 이상에 대해서는 관련 구성품을 운용 전/후로 점검할 수 있도록 계획정비를 부여하였다.

4. 결론

본 연구는 군사용 착용형 로봇 개발 시 체계적으로 위험을 관리할 수 있도록 프로세스를 제안하였다. 본 연구는 기존의 안전 관련 국제 표준서를 참고하여 4 단계(적용 대상 정의, 위험상황 식별, 위험성 평가, 위험 통제)의 프로세스를 제안하였으며, 시험개발 단계의 착용형 로봇을 대상으로 프로세스를 적용함으로써 세부 적용방법을 구체적으로 제시하였다.

본 연구의 위험관리 프로세스는 임무목표 및 운용 시나리오에 기반한 위험 분석 방법을 제시하였다는 점에서 의미가 있다. 군사용 착용형 로봇의 경우 장비 개발 초기부터 임무조건(목표성능, 임무목표, 운용환경 등)이 정의되는데, 본 연구에서는 임무 시나리오를 구체화하고 임무 단계별 발생 가능한 임무동작들을 식별함으로써 위험상황을 유발할 수 있는 상황 및 동작을 보다 구체적이고 실제적으로 정리하였다.

본 연구의 위험관리 프로세스는 장비 개발 과정에서 필수적으로 수행되는 보행성능시험과 통합되어 진행될 수 있다는 측면에서 효율적이다. 본 연구는 장비의 위험요소 식별을 위해 별도의 시험을 수행하지 않고, 장비 개발 과정에서 필수적으로 수행되는 보행

성능시험을 통해 위험상황을 식별하였다. 보행성능 시험은 사용자가 장비를 착용하고 운용조건에 따라 보행하며 성능을 확인하는 시험으로, 개발 중인 장비의 경우 향후 실제 사용될 모습과 사용 시 발생 가능한 위험상황을 가늠하기에 용이하다. 본 연구에서는 위험 분석자가 시험에 참관하여 위험상황을 식별하고 시험 종료 후 사용자 인터뷰를 통해 다양한 위험상황과 불편상황을 수집하였다. 또한, 해당 위험상황과 관련되는 구체적 품목 또는 부위를 식별함으로써 효과적/효율적으로 위험을 관리할 수 있도록 하였다.

본 연구는 위험상황별로 위험수준을 평가하고 수준에 따라 차등적으로 위험 저감 조치를 적용할 수 있도록 효율적 위험통제 전략을 수립하였다. 위험 저감 조치에는 재설계, 예방설계 등 많은 비용과 시간이 요구되는 방법이 있다. 본 연구에서는 모든 위험상황에 공통적인 위험 저감 조치를 적용하지 않고, 위험수준이 낮은 항목에 대해서는 선택적인 예방설계를 적용하거나 주기적 예방점검/정비를 통해 위험수준을 낮출 수 있는 방향을 제시하였다.

마지막으로, 본 연구에서 제안하는 위험관리 프로세스는 군사용뿐만 아니라 다양한 착용형 장비에 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구의 프로세스를 적용하면 임무동작 기반의 구체적 위험상황 및 위험원인 식별이 가능하고, 사용자의 구체적 불편/피해 부위를 식별하여 개선함으로써 체계적이고 효과적인 위험관리가 가능하다.

참고문헌

- [1] D. H. Kim, "A Study on the Development Direction of Weapon Systems Using Wearable Devices for Future Military Combatants", *J. of the Korea Academia-Ind. cooperation Soc.*, 2023, Vol. 24, No. 2, pp. 576-582.
- [2] D. W. Cha, K. T. Lee, and J. E. Kye, "A Study on the Characteristic Method of Wearable Robot by Mission Profile," *J. of Korea Robo. Soc.*, 2023, Vol. 18, pp. 444-455.
- [3] KOSHIA, "Technical Guidance on Risk Prevention in the Design and Redesign Process (P-120-2012)," 2012.
- [4] G. J. Lee, Y. G. Lee, and K. H. Chung, "Application of Design for Safety to improve Safety Environment on Construction Site," *J. of Kor. Ins. of Ecol. Arch. and Env.*, 2018, Vol. 18, No. 5, pp.113-120.
- [5] "Ministry of National Defense, Korea, "Regulation of Total Lifecycle Management," 2022.
- [6] C. H. Lee, K. W. Yang, D. I. Park, I. L. Lee, J. S. Kwon, I. H. Choi, S. B. Kim, "A Study on the Risk Identification Methods for Initial and Mass Production Stage of Military Products Using FMEA", *J. of Korean Soc. Qual. Manag.*, 2014, Vol. 42, No. 3, pp. 311-324.
- [7] Department of Defense, "System safety (MIL-STD-882E)," 2012.
- [8] International Standard, "Safety of Machinery-General Principles for Design-risk Assessment and Risk Reduction (ISO 12100)," 2010.
- [9] International Standard, "Robots and Robotic Devices Safety Requirements for Personal Care Robots (ISO 13482)", 2014.
- [10] H. W. Lee, D. K. Hyun, D. K. Lee, "Estimating the Lifetimes of Harmonic Drives in Military Wearable Robots Through Walking Test Data Analysis," 2023, *J. of Applied Reliability*, Vol. 23, No. 2, pp. 186-194.