Journal of Korea Robotics Society (2020) 15(3):256-268
https://doi.org/10.7746/jkros.2020.15.3.256 ISSN: 1975-6291 / eISSN: 2287-3961

협동로봇 활용을 위한 작업안전 시나리오 설계 방법론 연구

A Design Methodology of Task Safety Scenario for the Application of Collaborative Robots

김 율 희[1] · 김 진 오†
Yull-Hui Kim[1], Jin-Oh Kim†

Abstract: This study is about a design method for deriving task safety scenarios for the application of collaborative robots. A five-step process for deriving task safety scenarios for collaborative robots has been proposed, which focuses on the type of collaboration between human and collaborative robot. The three types of collaboration were classified according to the collaboration workspace and the worktime of human and collaborative robot. Based on these three types of collaboration, task safety scenarios include scenarios that predict risk from unintended use during work. Collaboration with collaborative robot is a human-centered process because human actions can create dangerous situations. Besides, we improved the understanding of this design methodology by presenting examples of the application of task safety scenarios according to the process for each type of collaboration.

Keywords: Collaborative Robots, Safety, Scenarios, Co-Type

1. 서 론

4차 산업혁명 시대로 접어들면서, 산업현장에서의 작업 공정은 더욱 세분화되었다. 이에 따라, 인간의 유연한 대처능력과 로봇의 정확한 반복 작업 능력을 모두 활용할 수 있는 협동로봇에 대한 수요가 점점 증가하고 있으며, 다수의 전문가 집단은 협동로봇 시장의 성장을 급진적으로 전망하고 있다. 그러나 국내의 협동로봇 보급은 시장 전망과 달리 매우 미미한 속도로 이루어지고 있다.

협동로봇은 인간과 로봇의 장점을 모두 활용 가능할 뿐만 아니라, 가장 근거리에서 인간과 작업이 가능한 로봇이다. 그럼에도 불구하고, 아직까지 국내에 활발히 보급되지 못하고 있는 이유는 다음과 같다.

첫째, 협동로봇은 산업안전보건법상 위험·기계류로 분류되기 때문에 협동로봇을 설치하여 사용하는 사업주는 위 법에서 제시한 근로 환경 조성, 위험 예방 안전조치 등의 기준들을 준수해야 한다. 특히 국내 제조 현장에서 협동로봇을 도입하기 위해서는 작업안전과 관련된 인증을 받아야 한다. 하지만 이를 인증해 줄 수 있는 전문인력, 조직, 비용 등 인프라 형성이 미흡한 단계이다[1].

둘째, 기존의 작업공정에 협동로봇을 안전하게 배치하는 데에 경제적, 기술적, 환경적, 시간적 어려움 등이 상존하므로 기업체들이 협동로봇 도입을 주저하고 있다.

셋째, 협동로봇은 작업자와 함께 같은 공간과 시간을 활용할 수 있는 특성이 있으므로 기존 산업용 로봇과 달리 작업자의 행동에 따른 안전이 구체적으로 고려되어야 하지만 관련된 규격 등 가이드가 부족하다.

협동로봇은 작업자와 접촉하거나 지근거리에서 사용이 가능하다는 측면에서 산업용 로봇보다는 의료용 로봇과 유사성이 많다. 의료용 로봇의 경우 사용자의 행동에서 발생할 수 있는 잠재적 위험 또는 위해상황에 대한 예측 시나리오를 구체적으로 작성하고 검토함으로써 로봇과 인간 간에 발생할 수 있는 위해 및 위험을 예방한다.

따라서 협동로봇 활용을 위해서는 산업용 로봇에 적용하는 안전기준은 물론 의료용 로봇에 적용하는 안전 시나리오도 고려하여야 한다.

안전을 고려한 협동로봇의 활용을 위해서는 인간과 로봇의 작업을 고려한 작업디자인, 즉 작업안전에 대한 시나리오가

Received : Apr. 16. 2020; Revised : Jun. 1. 2020; Accepted : Jun. 9. 2020
※ This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Korea and the National Research Foundation of Korea (NRF-2017S1A5B8060156)
1. Principal Researcher, Kwangwoon University, Seoul, Korea (yuls@kw.ac.kr)
† Professor, Corresponding author: Division of Robotics, Kwangwoon University, Seoul, Korea (jokim@kw.ac.kr)

Copyright©KROS

필요하다. 작업안전 시나리오는 인간과 로봇의 협업작업 중 위해나 위험과 관련된 상황이 발생할 수 있는 여러 가지 가상적인 결과를 검토하여 안전한 작업의 구체적인 과정을 미리 글로써 구성하는 것이다.

작업안전 시나리오는 협동로봇 배치, 엔드이펙터나 주변장치의 구성, 인간과 협동로봇의 작업 등을 상세히 표현함으로써 협동로봇시스템 설계 시 시뮬레이션의 대본으로 활용 할 수 있으며, 협동로봇 구축 시 발생하는 시행착오를 최소화 할 수 있다.

따라서 본 연구는 작업안전 시나리오를 설계하기 위해 인간과 협동로봇을 시간, 공간에 따라 3가지 협업형태로 분류하고, 이를 토대로 작업안전 시나리오를 도출하는 프로세스 설계 방법론을 제시하였다.

2. 협동로봇시스템 HRI 형태 관련 선행연구

인간과 로봇은 노동을 공유하거나 분리하는 HRI (Human-robot interaction)를 통해 생산성, 효율성 등을 높일 수 있다.

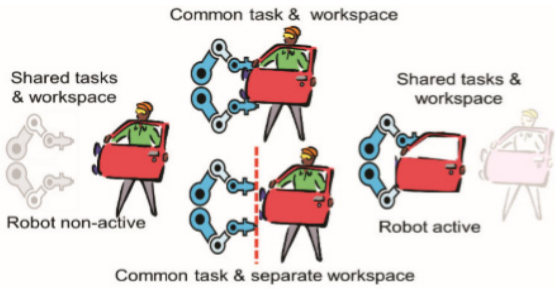
일정한 수준의 협업 기능을 구비한 협동로봇의 경우 작업 · 시간 · 공간을 중심으로 공유하거나 분리함으로써 작업자와 협동로봇시스템의 상호작용이 고려된 작업환경을 구현할 수 있으며, 관련된 선행연구는 다음과 같다.

2.1 작업과 공간에 따른 분류

작업과 공간을 기준으로 한 협동로봇시스템은 [Fig. 1]과 같이 3가지 형태로 나누어 볼 수 있다.

첫 번째 형태는 인간과 협동로봇시스템이 작업을 공동으로 수행하고 공간을 동시에 사용하는 것이다. 이는 인간과 협동로봇시스템이 같은 공간에서 함께 하나의 작업을 수행하는 가장 이상적인 작업 형태이다. 하지만 안전의 문제 또는 기술 구현의 문제로 인해 제한적인 작업만 수행할 수 있다.

두 번째 형태는 인간과 협동로봇시스템의 작업은 각각의 작업으로 나누어지지만, 공간은 공유하는 것이다. 인간과 협동로봇시스템은 순차적으로 각각 맡은 작업을 수행하는 방식으로 진행한다.



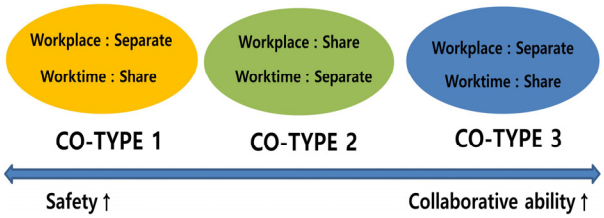
[Fig. 1] Taxonomy of human-robot collaborative tasks and workspaces [2]

세 번째 형태는 인간과 협동로봇시스템이 하나의 작업을 함께 수행하지만, 공간은 분리하는 형태이다. 이 형태는 공간이 분리됨으로써 인간의 안전이 확보되지만, 공동 작업에 대한 제약이 존재한다.

높은 페이로드를 필요로 하는 작업이나 인간과의 협업을 위한 정밀한 위치 제어가 요구되는 작업의 경우 인간과 로봇이 공동으로 작업하기에 기술적인 제약은 존재한다[2].

2.2 시간과 공간에 따른 분류

시간과 공간을 기준으로 한 협동로봇시스템은 [Fig. 2]와 같이 3가지 협동방식(Co-Type)으로 나누어 볼 수 있다.



[Fig. 2] Type of collaborative robot system according to worktime and workspace[3]

Co-Type 1은 인간과 로봇 간의 시간은 공유하고 있으나 공간은 분리되는 것(Coexistance)이며, Co-Type 2는 인간과 로봇 간의 시간은 분리되어 있으나 공간은 공유하는 것(Cooperation)이며, Co-Type 3은 인간과 로봇 간의 시간과 공간을 모두 공유하고 있는 형태(Collaboration)의 협동로봇시스템을 말한다.

Co-Type 1에 가까울수록 인간과 로봇의 협동능력은 다소 떨어지지만, 안전성은 증가한다. 반대로 Co-Type 3에 가까워질수록 안전성은 다소 떨어지지만, 협동능력은 향상한다[3].

3. HRI의 위험성 관련 규격

3.1 협동로봇시스템의 위험원 식별

산업용 협동로봇시스템의 협동운전 시 안전과 관련된 요구사항은 ISO TS 15066으로 규격화되어 있다. ISO TS 15066은 협동로봇시스템의 협업을 위해 파트별로 위험원을 식별하고 이를 토대로 위험성을 평가하도록 아래와 같이 규정하고 있다[4].

3.1.1 협동로봇의 위험원

부하, 속도, 힘, 운동량, 토크 등 협동로봇의 특성, 협동로봇의 정적접촉에 준한 상태(Quasi-static Contact), 협동로봇과 근접 작업 시 작업자 위치 등을 고려하여 협동로봇으로 인해 발생할 수 있는 위험원을 식별해야 한다.

3.1.2 협동로봇시스템의 위험원

협동로봇시스템의 경우 로봇 자체의 위험원보다는 엔드이펙터, 작업대 등 협동로봇시스템으로써 활용될 경우 많은 부분에서 위험원이 존재한다. 부품의 위치에 따른 작업자의 동작이나 위치, 벽·건물 기둥 등 구조물의 방향 및 기구집기류 등의 위치, 고정기구나 클램프의 배치, 핸드가이딩 장치의 도출과 배치, 레이저커터 등 위험한 주변장치와의 거리 등 주변 요소의 영향 등에서 발생할 수 있는 위험원을 식별해야 한다.

3.1.3 협업작업 적용 시 위험원

인간과 협동로봇이 협업을 위한 작동, 즉 협동운전은 다음의 4가지 방법 중 하나 이상의 방법을 포함하여서 발생 가능성이 있는 위험원을 감소시켜야 한다.

첫 번째, 인간의 접근이 감지되는 안전정격감시기능이 협업공간 주변에서 작동해야 한다. 협업을 수행하지 않을 때는 안전정격감시기능이 작동되어 인간의 불필요한 접근을 감시해야 하며, 인간이 협동로봇의 작업공간에서 엔드이펙터나 부품을 교체하거나 작업물을 제공하는 등의 협업작업을 수행할 때에는 안전정격감시기능이 정지해야 한다. 인간이 협업공간을 떠나게 되면 안전정격감시기능이 다시 작동하여야 하며, 다른 작업자 등 인간의 접근을 감시하여야 한다.

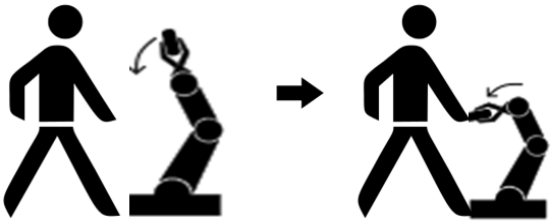
두 번째, 핸드가이딩을 통해 협동로봇에 작업을 지시하는 방법이다. ISO 10218-2의 핸드가이딩을 위한 요구사항을 충족한 경우 협동로봇이 협동운전의 요건을 충족하게 되며, 통상적으로 협동로봇이라 칭하는 제품이 이에 해당한다. ISO 10218-2의 기준을 충족시키지 못하였을 경우 ISO TS 15066의 요구사항에 따라 핸드가이딩을 수행할 수 있다.

세 번째, 속도 및 이격거리를 제어하는 방법이다. 협업공간에서 인간과 협동로봇은 함께 작업을 수행하나, 보호 이격거리를 두고 협업작업을 수행하는 것이다. 협업 시 인간이 보호 이격거리 내로 들어오게 되면 협동로봇은 속도를 제어하거나 멈추어야 한다.

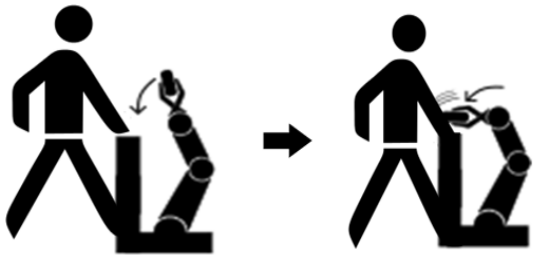
네 번째, 힘과 동력을 제한하는 방법이다. 인간과 접촉이 일어날 경우 협동로봇이 힘과 동력을 제어하여 상해가 발생하지 않도록 하는 것이다. 협동로봇의 힘과 동력은 의도된 접촉상황 외에 비의도적인 접촉상황에 대해서도 제어가 되어야 한다.

협동로봇이 인간과 접촉하는 상황은 순간적인 접촉(Transient contact)상황과 정적접촉에 준하는(Quasi -static contact) 상황으로 나뉜다.

순간적인 접촉은 아래의 [Fig. 3]과 같이 협동로봇시스템의 움직임에 신체 일부가 순간적인 충격을 받는 것으로 협동로봇시스템에 의해 죄이거나 끼이지 않는 상황에서 인간은 뒤로 물러나거나 접촉된 신체 부위를 이동시켜 상황에서 벗어날 수 있다. 동적인 충격은 있으나, 접촉이 순간적으로 이루어지기 때문에 접촉 시간은 매우 짧다.



[Fig. 3] Transient contact



[Fig. 4] Quasi-static contact

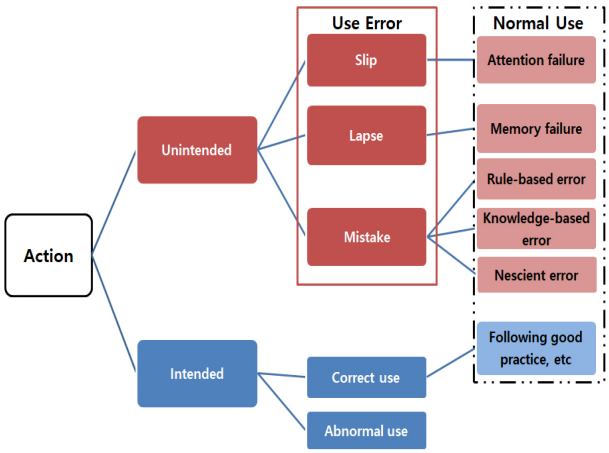
정적접촉에 준하는 상황은 위의 [Fig. 4]와 같이 협동로봇시스템의 움직이는 부분과 고정된 작업대나 물체에 인간의 신체 부위가 죄이거나 끼이는 상황을 말한다. 이러한 접촉상황은 협동로봇시스템이 정상화될 때까지 신체에 지속해서 힘과 압력이 가해질 수 있으며, 협동로봇시스템이 완화될 때까지 죄여 있는 시간이 장시간 소요될 수도 있으므로 인간이 협동로봇시스템에 의해 상해를 입을 위험성이 높은 접촉의 상태이다. 정적접촉에 준하는 상황은 동일한 힘과 속도로 작업을 수행하는 협동로봇일지라도 작업대의 높이, 위치, 면적 등에 따라 인간에 미치는 상해의 정도가 달라질 수 있다.

또한, 동일한 협동로봇과 작업을 수행할지라도 고정 작업대 등이 설치됨으로써 순간적인 접촉상황에서 정적접촉에 준하는 상황으로 변화할 수 있으며, 이에 따라 위험도도 증가할 수 있다.

3.2 의료용 로봇의 위험원 식별

전자의료기기의 경우 의료기기 사용을 위해 이를 조작하는 의료종사자, 의료기기를 신체의 일부 또는 전부에 접촉하거나 삽입하는 환자 등 모든 사용자의 안전을 위하여 IEC 62366-1의 기준에 따라 위험성과 관련된 사용 시나리오를 적용한다.

IEC 62366-1에서는 의료기기의 안전한 사용을 위해 인간공학적 측면에서 위해한 요인은 물론 잠재적 사용오류에 대한 시나리오를 개발하여 사용자와 의료기기 간의 인터페이스상 발생할 수 있는 위험성을 식별하고 사용적합성을 평가하기 위한 프로세스를 규정하고 있다.



[Fig. 5] User action categories[5]

사용적합성 프로세스는 정상적인 사용 중 발생 가능성이 있는 위험을 감소시키기 위한 것으로, 정상 사용의 범주에는 실수, 과실, 착오 등에서 야기 되는 의도하지 않은 행동도 포함된다.

의료용 로봇도 전자의료기기로써 위의 규격을 적용받게 되며, 전자의료기기의 경우 위의 [Fig. 5]처럼 사용자의 행동을 의도한 경우와 그렇지 않은 경우로 나누고 의도하지 않은 경우의 행동에서 야기되는 사용오류 즉 휴먼에러도 위험으로 간주하여 시나리오를 작성한다[5].

또한 IEC 62366-1의 사용자에 의한 조작 실수 등 즉, 휴먼에러는 원격에서 의료기기를 조작하는 운용자와 의료기기에 접촉하는 환자 즉 사용자 모두를 포괄적으로 다루고 있다.

로봇사용자는 로봇을 제어하는 운용자와 근로자로 구별할 수 있지만, 협동로봇은 비교적 제어가 용이하기 때문에 근로자가 제어를 직접 할 수 있다. 따라서 협동로봇에 있어 휴먼에러를 발생시키는 사용자는 운용자는 물론 근로자까지 모두 포괄한다.

4. 협동로봇 작업안전 시나리오 설계 방법

4.1 작업안전 시나리오의 필요성

산업용 로봇의 재해사고 분석에 따르면, 재해자의 다수가 상대적으로 느린 반사 신경, 운전 미숙, 안전 수칙 미준수 등 사용자의 오류에서 야기되었으며, 대부분의 사고는 로봇이 운전 중 이거나 보수 작업 중에 발생하였다. 협동로봇의 경우에도 사용자의 사용오류로 인해 위험상황은 발생할 수 있다[6].

전통적인 로봇의 경우 인간을 로봇으로부터 분리하는 조치를 통해 위험성을 감소시키는 반면 협동로봇은 공간, 시간 등을 고려한 작업디자인을 통해 위험성을 감소시킬 수 있다.

인간과 협동로봇의 작업디자인은 작업자, 협동로봇, 협동로봇시스템, 작업환경, 작업자 외 근로자 등이 중심이 되어 여러 가지 형태의 시나리오를 통해 이루어질 수 있다. 시나리오를 통해 협동로봇과 인간의 작업 과정을 묘사하게 되면, 협동로봇과 인간 사이의 협업 시 발생할 수 있는 위험한 결과가 예측 가능하며 이를 예방할 수 있는 수단이 된다[7].

협업 시 발생하는 모든 위험을 제거할 수는 없지만, 의도하지 않은 사용오류는 시나리오를 기반으로 한 작업디자인을 통해 휴먼에러를 예측하고 이를 최소화하여 위험을 줄이는, 즉 위험의 예측과 통제를 할 수 있다.

협업 시 협동로봇은 프로그래밍에 따라 작업을 수행한다. 그러나 인간은 신체 상황, 작업 습관, 버릇, 의식 등 다양한 행동 및 형태를 작업에 포함한다. 이러한 작업 행태는 의도하지 않은 사용오류를 발생시킬 수 있다.

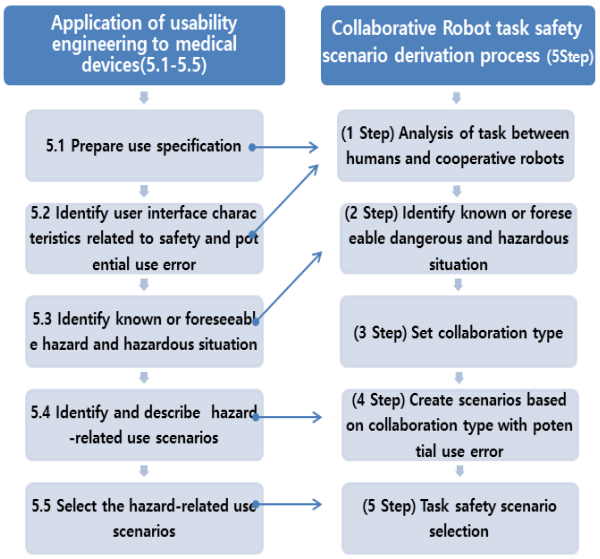
예를 들어, 손에서 작업물이 미끄러지는 것을 방지하고자 장갑을 착용해야 하는 작업의 경우, 다한증이 있는 작업자는 장갑 대신 전용 수건을 사용할 수도 있으며, 장갑 착용에 불편함을 느끼는 작업자는 장갑을 수시로 벗을 수도 있다. 이처럼 작업자의 다양한 작업 전후행태는 협동로봇과 협업 시 의도하지 않은 실수로 연결될 수 있다.

인간이 협동로봇과 협업하는 형태는 작업자에 따라 다양해질 수 있으며, 정상적인 사용의 상황은 물론 의도하지 않은 행동까지 감안 한다면 수많은 시나리오를 고려해야 할 것이다. 그러나 다수의 기업은 협동로봇을 배치하는 데에 경제적, 기술적, 환경적, 시간적 어려움으로 인해 도입을 주저하고 있는 현실이므로 다양한 시나리오를 도출하여 검토하기는 쉽지 않다.

그러므로 인간과 협동로봇의 작업안전 시나리오의 용이한 도출을 위해서는 다음과 같이 협업형태를 유형화하고, 프로세스에 따라 작업안전 시나리오를 도출할 설계방법이 필요하다.

4.2 협동로봇 작업안전 시나리오 도출 프로세스

IEC 62366-1는 국제표준인 ISO 14971의 위험관리방법을 준용하여 위험성 관련 사용자 시나리오 작성 프로세스를 상세히 기술하고 있으며, 의료용 로봇에도 적용하고 있다. 따라서 본 연구는 IEC 62366-1의 항목 중 위험성 요인에 대한 사용자 시나리오 작성 단계를 준용하여 협동로봇 작업안전 시나리오 도출을 위한 프로세스를 제시하였다.



[Fig. 6] Collaborative robot task safety scenario derivation process

프로세스는 [Fig. 6]과 같이 총 5단계로 구성하였으며, 1단계 인간과 협동로봇의 작업 도출, 2단계 예측 가능한 위해요인과 위험상황 파악, 3단계 협업유형 결정, 4단계 협업유형에 따른 작업안전 시나리오 작성, 5단계 작업안전 시나리오 선택으로 구성하였다.

5개의 단계 중 3단계의 협업유형 결정을 제외한 IEC 62366-1의 5.1항목부터 5.5항목까지 본 프로세스에 다음과 같이 준용 및 인용하였다.

1단계는 5.1항목과 5.2항목을 준용하였다.

5.1항목은 사용사양서를 준비하는 것으로 어떤 사용자가 어떠한 환경에서 의료기기를 사용하는 지에 대한 사양을 기재하는 것이며, 5.2항목은 안전성 및 사용오류에 관한 사용자 인터페이스의 특징을 파악하는 것이다.

위의 5.1항목과 5.2항목의 내용을 준용하여 1단계는 인간과 협동로봇의 작업을 도출한다.

또한, 협동로봇의 작업안전 시나리오 도출 프로세스의 2단계와 4~5단계는 위의 5.3항목에서 5.5항목까지 인용하였다.

5.3항목은 알려져 있거나 예측이 가능한 위해요인과 위험상황을 파악하는 것이며, 5.4항목은 위해요인과 관련된 사용시나리오의 파악 및 작성하는 것으로 의도하지 않은 비정상적인 사용을 포함하는 것이다. 5.5항목에서는 총괄평가를 위한 위해요인 관련 시나리오 검토하고 선택한다.

협동로봇 작업안전 시나리오 도출 프로세스의 1단계는 작업안전 시나리오를 작성할 대상체인 협동로봇, 협동로봇시스템, 작업자의 특징을 파악하고 새로운 작업에 대한 요구사항을 정리하며, 이러한 요구사항을 기반으로 인간의 작업과 협동로봇의 작업을 도출한다.

2단계는 작업, 작업환경, 작업물 등 작업을 수행하는 과정에서 발생할 수 있는 예측 가능한 위해요인과 위험상황을 파악한다.

3단계는 1단계와 2단계의 분석 내용을 토대로 협업유형을 결정하는 단계이다.

4단계는 협업유형에 따라 협업공간, 협업시간을 나눈 작업안전 시나리오를 작성하는 것으로 정상적인 사용일 경우의 시나리오와 비정상적인 사용 시 시나리오를 같이 구상한다.

5단계는 4단계의 시나리오를 검토하여 인간의 안전을 지킬 수 있는 작업안전 최종 시나리오로 만든다.

5. 협업유형의 제시

5.1 협업유형의 분류

협동로봇 작업안전 시나리오 도출 프로세스의 3단계에서는 협업유형을 중심으로 도출되므로 협업유형에 대한 분류가 필요하다. 인간과 협동로봇의 협업유형은 위의 협동로봇 시스템의 HRI 형태별 분류를 중심으로 인간, 협동로봇, 협업 3가지로 세분화하여 시간은 인간의 시간, 로봇의 시간, 협업시간으로 나누었으며, 공간은 인간의 공간, 로봇의 공간, 협업공간으로 나누었다.

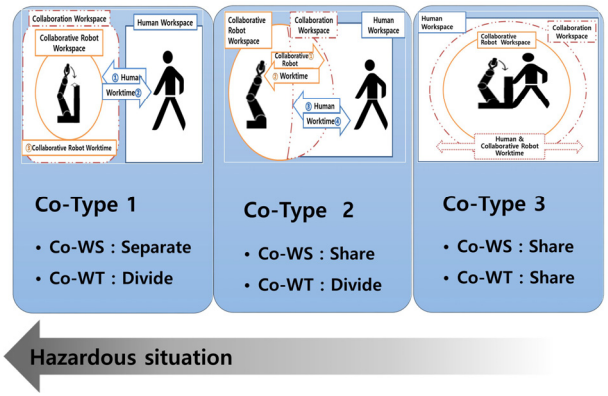
인간의 안전성은 인간을 중심으로 공간과 시간을 어떻게 구분하느냐에 따라 달라질 수 있으므로 본 연구에서 협업의 중심은 인간이며, 인간이 협동로봇과 협업을 위해 주어진 작업공간은 협업공간이라 정의하였으며, 인간이 협동로봇과 협업하기 위한 작업시간은 협업시간으로 정의하였다.

인간이 협동로봇과 협업공간을 공유하는 경우 공간을 전부 또는 일부 공유함으로써 안전성은 달라진다. 따라서 위해요인 및 위험상황이 다수 존재하는 작업에 적용하기는 쉽지 않다.

인간이 협동로봇과 협업공간을 분리하는 경우 인간과 협동로봇은 각자의 공간에서 작업을 수행하게 되므로 안전성이 높아지게 되며 위해요인이나 위험상황이 유발될 수 있는 작업도 협업이 가능하다.

인간이 협동로봇과 협업시간을 나누는 경우 협업공간의 공유 여부에 따라 안전성은 달라진다. 즉 인간이 협동로봇과 협업시간을 나누어 순차적으로 작업을 하는 경우 위해요인 및 위험상황이 있다면 협업공간을 분리하면 안전성이 높아지지만, 협업공간을 공유하면 안전성이 낮아지게 된다.

위와 같이 분류한 협업유형을 3가지 형태로 나누고 위의 선행연구 2.2의 분류 중 일부를 준용하여, 인간과 협동로봇과의 협업유형을 [Fig. 7]처럼 나누었다.



[Fig. 7] Classification of collaboration types

5.1.1 Co-Type 1 : 협업공간 분리, 협업시간 나눔

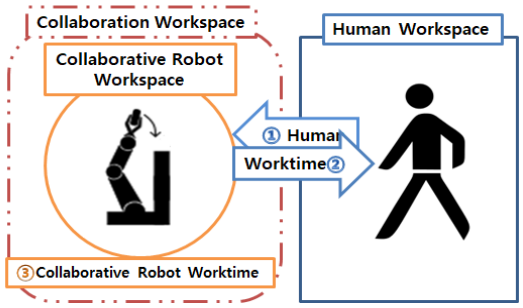
Co-Type 1의 경우, 인간과 협동로봇은 각각 분리된 작업공간이 있으며, 협업이 필요한 최소한의 경우에 한해 인간이 협업공간으로 이동하여 작업하는 협업형태이다.

즉 Co-Type 1의 협업은 협동로봇의 부품장치를 교체하거나 협동로봇의 작업에 필요한 작업물을 제공하는 등 최소한의 협업을 위해 인간이 협업공간으로 이동하고 협동로봇과 협업시간을 나누어 작업하는 것이다.

인간은 협업공간을 인간의 공간과 분리하였고 협동로봇과 협업하는 시간을 나누어 사용하기 때문에 협동로봇과의 접촉은 최소한으로 이루어진다.

따라서 3가지 유형 중 Co-Type 1이 가장 안전하다. 고온이나 저온의 주변 시설, 독성물질이 포함된 작업물 등 위해요인이 있는 작업, 날카로운 엔드이펙터, 발열 부품 등으로 인해 위험상황이 유발될 수 있는 경우 [Fig. 8]과 같이 Co-Type 1을 적용하여 인간의 공간과 협업공간을 분리하고 협업시간을 나눈다.

<Co-type 1 collaboration workspace & worktime>

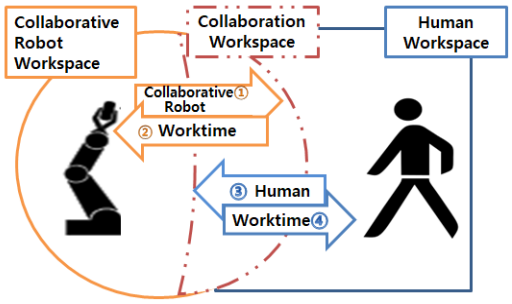


[Fig. 8] Co-Type 1 : Collaboration Workspace Separation, Collaboration Worktime Divide

5.1.2 Co-Type 2 : 협업공간 공유, 협업시간 나눔

Co-Type 2의 경우 인간과 협동로봇은 각각의 작업공간이 있으며, 협업공간은 각각의 공간에서 일정 부분을 공유한다.

<Co-type 2 collaboration workspace & worktime>



[Fig. 9] Co-Type 2 : Collaboration Workspace Share, Collaboration Worktime Divide

협업작업은 협업공간 내에서 전체 협업시간을 나눠서 인간과 협동로봇이 순차적으로 진행하는 형태이다.

[Fig. 9]와 같이 Co-Type 2를 적용하면 인간과 협동로봇은 작업시간을 순차적으로 사용하며 협업할 수 있다.

Co-Type 2는 위해요인 및 위험상황이 존재하는 경우 로봇이 먼저 협업공간에서 위험한 작업을 수행하고 자신의 공간으로 돌아가게 되면 인간이 협업공간에 들어가 작업을 이어가거나, 인간이 협업공간에서 작업하는 동안 협동로봇이 물러나 있거나 일시 정지함으로서 인간과 협동로봇은 순차적인 작업시간을 가진다.

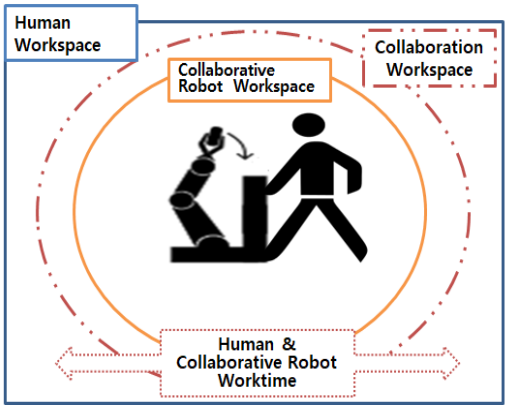
이 협업유형은 어느 정도 작업자의 안전을 보장할 수 있으나, 작업 과정상 위해요인 및 위험상황이 많거나 심하다고 판단되면 적용이 어려울 수 있다.

5.1.3 Co-Type 3 : 협업공간 공유, 협업시간 공유

Co-Type 3의 경우 인간이 협동로봇과 협업공간 및 협업시간을 공유하는 형태의 협업이다.

[Fig. 10]과 같이 같은 공간에서 협업시간을 공유하며 작업을 수행하는 형태로 협업이 이루어진다.

<Co-type 3 collaboration workspace & worktime>



[Fig. 10] Co-Type 3 : Collaboration Workspace Share, Collaboration Worktime Share

Co-Type 3은 인간과 협동로봇 간의 접촉이 빈번하게 발생할 수 있으며, 위해요인과 위험상황이 존재하지 않는 안전한 작업에 적합하다.

인간과 협동로봇의 제어가 정밀하게 이루어져야 하는 경우에는 인간의 신체적인 기능과 협동로봇의 기계적인 기능의 조화가 적절히 이루어져야 하므로 엔드이펙터, 주변 기계 장치 및 시설 등 협업작업 수행 시 협동로봇시스템에 대한 다 양한 고려가 필요하며, 이러한 장치들로 인해 협업공간에서 협동로봇과 접촉상황이 다수 발생할 수 있다. 따라서 Co-Type 3은 위해하거나 위험한 작업이 아닌 경우에 해당되나 의도 하지 않은 실수나 착오 때문에 정적접촉에 준하는 상황이 발생할 가능성이 있는 협업형태이다. 따라서 작업자의 의도 하지 않은 상황에 대해 고려가 요구된다.

5.2 협업유형별 공간설정 기준

5.2.1 협동로봇의 공간설정

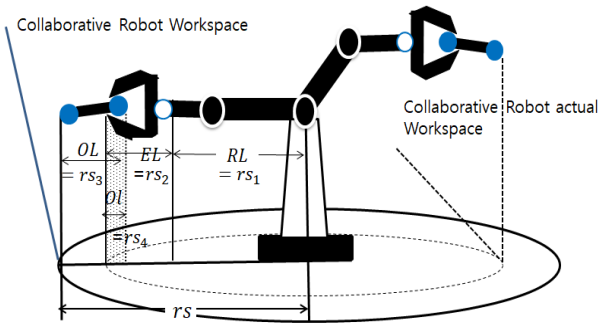
협동로봇의 작업공간은 협업공간의 범위를 정하는 기준이다. 동일한 협동로봇을 사용하더라도 엔드이펙터, 작업물 등에 따라 공간의 범위가 달라지므로 협동로봇시스템의 작업반경으로 협업작업이 가능한 공간의 최대치를 산정해야 한다.

[Fig. 11]과 같이 협동로봇시스템의 공간, 협동로봇의 작업면적, 운영범위 등을 산정하기 위해 협동로봇시스템의 최대길이를 구해야 하며, 협동로봇시스템의 최대길이는 협동로봇의 최대길이(RL), 엔드이펙터의 최대길이(EL), 작업물의 최대길이(OL)의 합이며, 총 길이의 합에서 엔드이펙터와 작업물이 중복되는 부분의 길이를 제외해야 한다.

이를 산출하기 위한 수식은 다음과 같다.

$$rs = rs_1 + rs_2 + rs_3 - rs_4 \quad (1)$$

여기서 rs은 협동로봇시스템의 최대길이이며, rs_1은 협동로봇의 최대길이이며, rs_2는 엔드이펙터의 최대길이이며. rs_3는 작업물의 최대길이이고, rs_4는 엔드이펙터와 작업물 사이에 중복되는 길이의 부분이다.



[Fig. 11] Collaborative Robot Workspace & Actual Workspace

5.2.2 Co-Type 1의 협업공간

Co-Type 1의 경우 위해요인이나 위험성이 높은 협업작업에 해당 하므로, 협동로봇시스템의 부품장치를 교체하거나 협동로봇의 협업작업 시 필요한 작업물을 제공하는 등 최소한의 협업을 위해 인간이 협업공간 즉 협동로봇의 공간으로 이동하여 협업작업을 수행하는 것이다.

즉, Co-Type 1의 협업은 협동로봇이 위해요인 및 위험상황을 유발하는 작업을 담당하고, 인간은 협동로봇의 위험한 작업을 지원하기 위한 것으로 인간의 작업공간 내에서는 협동로봇과 협업이 이루어질 수 없다. 따라서 Co-Type 1의 협업공간은 인간의 공간이 아닌 협동로봇의 공간범위에서 설정이 되어야 한다.

5.2.3 Co-Type 2의 협업공간

Co-Type 2의 경우 다소 위험성이 존재하는 협업으로 협업공간 내에서 협동로봇의 작업과 인간의 작업이 순차적인 시간에 의해 이루어진다. 따라서 협업공간은 협동로봇·인간 각각의 작업공간 일부를 공유하도록 설정해야 한다.

5.2.4 Co-Type 3의 협업공간

Co-Type 3의 경우 인간과 협동로봇이 비교적 안전한 협업작업을 수행하는 형태로 인간과 협동로봇은 같은 공간에서 함께 협업하게 된다. 협업공간은 협업이 이루어지는 범위에서 같은 공간을 공유할 수도 있으며, 상황에 따라 협동로봇의 공간 내에 속하기도 하고 인간의 공간에도 속할 수 있다.

5.3 협업유형별 안전기능 설정

인간과 협동로봇이 협업작업을 수행하기 위해서는 ISO TS 15066에서 기준으로 한 4가지 안전기능인 안전정격감시정지(Safety-rated monitored stop), 속도 및 이격거리제어(Speed and separation monitoring), 힘과 동력 제한(Power and force limiting), 핸드가이딩(Hand guiding) 중 1가지 이상의 안전기능을 충족해야 한다.

협업유형별로 필수적으로 구비 해야 할 안전기능과 선택적으로 구비할 수 있는 안전기능은 다음과 같다.

5.3.1 Co-Type 1의 요구 안전기능

Co-Type 1의 협업작업을 위해서는 다음의 [Table 1]과 같이 4가지 기능 중 안전정격감시정지의 기능이 필수적으로 고려되어야 한다.

Co-Type 1은 위해요인이나 위험성이 높은 작업에 해당되므로 인간의 안전을 우선 시 해야 한다. 따라서 협동로봇시스템 주변의 작업자를 포함한 다른 인간의 접근을 최소화하

[Table 1] Co-Type 1's safety function

Co-Type 1's safety function	
Required safety function	Safety-rated monitored stop
Selectable safety functions	Hand guiding
	Speed and separation monitoring
	Power and force limiting

여야 한다. 협업작업이 이루어지지 않을 때는 인간의 접근을 감시하는 안전정격감시정지기능이 작동해야만 하며, 인간이 협업을 위해 협업공간으로 진입할 경우, 인간의 접근을 감시하는 안전정격감시정지기능만 정지되어야 한다. 안전정격감시정지기능만 정지되기 때문에 협동로봇의 기본적인 기능이나 인간이 협업해야 하는 작업에 해당하는 부분은 작동이 되도록 전원을 유지한다.

협업작업이 끝난 후에는 안전정격감시정지기능을 작동시켜 협업공간에 인간이 진입하는 것을 막아야 한다. 협업작업 시에만 안전정격감시정지기능을 정지시킴으로써 인간이 협업공간에서 협업작업을 할 수 있도록 해야 한다.

그 외의 안전기능인 속도 및 이격거리제어, 힘과 동력 제한, 핸드가이딩은 작업이나 작업환경에 따라 선택적으로 사용한다.

5.3.2 Co-Type 2의 요구 안전기능

Co-Type 2는 협업작업을 위해서는 다음의 [Table 2]와 같이 4가지 방법 중 속도 및 이격거리제어의 기능이 필수적으로 고려 되어야 한다.

Co-Type 2는 인간과 협동로봇이 협업공간을 공유하나 협업시간은 공유하지 않으므로, 협업공간에서 인간이 작업하는 협업시간과 협동로봇이 작업하는 협업시간이 나누어진다.

그러므로 협동로봇은 협업공간 내에서 주어진 협업작업을 하는 시간 동안 인간과 최소한의 보호이격거리를 유지하여야 한다. 또한, 협업작업 시 인간이 실수나 착오로 보호이격거리 내로 들어오게 되면 협동로봇은 속도를 제어하거나 보호 정지를 해야 한다.

그 외의 안전기능인 안전정격감시정지, 힘과 동력 제한, 핸드가이딩은 작업이나 작업환경에 따라 선택적으로 사용한다.

[Table 2] Co-Type 2's safety function

Co-Type 2's safety function	
Required safety function	Speed and separation monitoring
Selectable safety functions	Safety-rated monitored stop
	Hand guiding
	Power and force limiting

[Table 3] Co-Type 3's safety function

Co-Type 3's safety function	
Required safety function	Power and force limiting
Selectable safety function	Hand guiding

5.3.3 Co-Type 3의 요구 안전기능

Co-Type 3의 협업작업을 위해서는 위의 [Table 3]과 같이 4가지 방법 중 힘과 동력을 제한하는 기능이 필수적으로 고려되어야 한다.

Co-Type 3은 인간과 협동로봇이 공간과 시간을 공유함으로써 협동로봇과 인간의 접촉이 빈번하게 이루어지는 협업작업 유형으로 안전한 작업에 활용된다.

비교적 안전한 작업에 해당하나 협동로봇과 충돌이 일어나도 큰 상해로 연결되지 않도록 협동로봇의 힘과 동력을 제어해야 한다. 또한, 인간은 협동로봇과 협업작업을 하면서 착오, 실수, 작업 습관 등에 의해 의도하지 않은 접촉을 발생시키게 되므로 협동로봇과 접촉이 일어날 경우를 대비하여 힘과 동력의 제한을 고려해야 한다.

한편 안전정격감시정지, 속도 및 이격거리제어의 경우 협동로봇과의 접촉으로 인한 상해를 최소화하는 안전기능으로 Co-Type 3과 같이 접촉이 빈번한 경우에는 적용할 수 없으며, 핸드가이딩은 작업이나 작업환경에 따라 선택적으로 사용할 수 있다.

6. 협동로봇 작업안전 시나리오 도출

인간과 협동로봇의 협업작업 시 안전을 고려한 시나리오 도출을 위한 5단계 프로세스는 다음과 같이 구현한다.

1단계는 기존의 작업을 분석하여 인간, 협동로봇의 작업을 도출하고, 2단계는 협동로봇 뿐 아니라 협동로봇시스템 측면에서 예측 가능한 위해요인과 위험상황에 대해 파악을 하고, 3단계는 1~2단계에서 제시된 내용을 토대로 3가지 협업유형 중 하나의 유형을 결정하여, 4단계는 협업유형에 따른 작업안전 시나리오 작성한다. 이때 의도하지 않은 상황에 대한 시나리오도 포함한다. 마지막으로 5단계에는 작성된 시나리오를 검토 수정하여 작업안전 시나리오를 완성한다.

3가지 협업유형에 따른 협동로봇 작업안전 시나리오를 도출한 예시는 다음과 같다.

6.1 Co-Type 1의 작업안전 시나리오 도출 예시

Co-Type 1은 위해요인이나 위험상황에서 작업하는 것으로, 다음과 같은 5단계로 구분하여 시나리오를 도출할 수 있다.

[Table 4]는 위해 약품을 작업물에 도포하는 작업으로 설정한 작업안전 시나리오의 예시이다.

1단계는 작업분석 및 도출단계로 인간은 작업물 이동작업, 협동로봇은 작업물에 유해물질이 도포작업을 수행하는 작업으로 나눈다.

2단계는 위해요인과 위험상황을 파악하는 것으로 위해요인은 유해물질을 포함한 약품이며, 위험상황은 작업물에 약품을 도포한 후 증발 전까지 걸리는 시간이다.

3단계는 협업유형을 결정하는 것으로 작업물에 유해물질을 도포해야 하는 위험성이 다수 존재하므로 Co-Type 1에 해당한다.

4단계는 정상적인 작업인 경우와 의도하지 않은 휴먼에러를 포함한 작업의 경우, 두 가지 상황에 대한 작업안전 시나리오를 작성한다.

정상적인 작업인 경우 다음과 같은 시나리오 구성이 가능하다.

1) 협동로봇은 협동로봇 공간에서 작업물에 약품을 도포
2) 인간은 인간의 공간에서 다음 작업물을 준비하고 대기
3) 인간은 협동로봇이 도포한 작업물에서 유해물질이 증발하였다는 알람 소리를 들은 후 협동로봇의 안전정격감시정지기능을 정지시킴. 협업공간으로 들어가 작업물을 검수한 후 다른 작업물로 교체하고 협업공간에서 나온 후 안전정격감시정지기능을 작동
4) 협동로봇은 다시 1)작업을 실시

[Table 4] Examples of Application of Safety Scenarios by Collaborative Type-1

Stage	Appliance
Stage 1 (Task configuration)	• Human (Operator) Task: Moving the workpiece. • Collaborative Robot Task: Apply chemicals to the workpiece.
Stage 2 (Identify dangerous materials or hazards)	• Hazards Material: Chemicals containing hazardous substances. • Dangerous situation: 1 minute before the chemical evaporates.
Stage 3 (Collaboration type setting)	• Co-Type 1 application : Since there are many risks of applying harmful substances to the workpiece, the workspace should be separated and worktime should divided.
Stage 4 (Create scenarios based on collaboration type)	<For normal operations> 1) The collaborative robot applies chemicals to the workpiece in the collaborative robot workspace. 2) Humans prepare and wait for the next workpiece in a human workspace. 3) The human stops the safety rating monitoring function of the collaborative robot after hearing the alarm sound that harmful substances have evaporated from the workpiece applied by the collaborative robot. After entering the collaborative workspace, inspecting the workpiece, replacing it with another workpiece, and operating the safety monitoring rating function after exiting the collaborative workspace. 4) The collaborative robot performs above 1) task again. <For operations involving unintentional human errors> 1) The collaborative robot applies chemicals to the workpiece in the collaborative robot workspace. 2) Humans prepare and wait for the next workpiece in a human workspace. 3) The human stops the safety rating monitoring function of the collaborative robot after hearing the alarm sound that harmful substances have evaporated from the workpiece applied by the collaborative robot. After entering the collaborative workspace, inspecting the workpiece, replacing it with another workpiece, and operating the safety monitoring rating function after exiting the collaborative workspace. 4) The collaborative robot performs above 1) task again. 5) Humans caused an instantaneous error in the incoming call, stopping the safety rating monitoring function again, and could not detect other workers approaching the collaborative robot. Eventually, other workers approaching the area inhaled harmful substances.
Stage 5 (Scenario completion)	1) The collaborative robot applies chemicals to the workpiece in the collaborative robot workspace. 2) Humans prepare and wait for the next workpiece in a human workspace. 3) The human stops the safety rating monitoring function of the collaborative robot after hearing the alarm sound that harmful substances have evaporated from the workpiece applied by the collaborative robot. After entering the collaborative workspace, inspecting the workpiece, replacing it with another workpiece, and operating the safety monitoring rating function after exiting the collaborative workspace. 4) The collaborative robot performs above 1) task again. 5) When the safety rating monitoring function stopped after the collaboration worktime in the collaboration workspace, an alarm sounded to warn the worker and other workers to prevent the case where the safety rating monitoring function stops due to a mistake.

의도하지 않은 휴먼에러를 포함한 작업시나리오는 다음과 같이 구성할 수 있다.

1) 협동로봇은 협동로봇 공간에서 작업물에 약품을 도포
2) 인간은 인간의 공간에서 다음 작업물을 준비하고 대기
3) 인간은 협동로봇이 도포한 작업물에서 유해물질이 증발하였다는 알람 소리를 들은 후 협동로봇의 안전정격감시정지기능을 정지시킴. 협업공간으로 들어가 작업물을 검수한 후 다른 작업물로 교체하고 협업공간에서 나온 후 안전정격감시정지기능을 작동
4) 협동로봇은 다시 1)작업을 실시
5) 인간은 걸려온 전화에 순간적인 착오를 일으켜 안전정격감시정지기능을 다시 정지시켰고 협동로봇 근처로 접근한 다른 작업자를 감지 못하였으며, 결국 인근에 접근한 다른 작업자는 유해물질을 흡입하였음.

5단계에서는 이 두 가지 상황에 대해 검토한 후 다음과 같이 최종 작업안전 시나리오를 완성한다.

1) 협동로봇은 협동로봇 공간에서 작업물에 약품을 도포
2) 인간은 인간의 공간에서 다음 작업물을 준비하고 대기
3) 인간은 협동로봇이 도포한 작업물에서 유해물질이 증발하였다는 알람 소리를 들은 후 협동로봇의 안전정격감시정지기능을 정지시킴. 협업공간으로 들어가 작업물을 검수한 후 다른 작업물로 교체하고 협업공간에서 나온 후 안전정격감시정지기능을 작동
4) 협동로봇은 다시 1)작업을 실시
5) 협업공간에서 협업시간 이후 안전정격감시정지기능이 정지하게 되면 알람을 울리게 하여 작업자와 다른 근로자들에게 경고함으로써 실수로 인해 안전정격감시정지기능이 정지하는 경우를 예방함.

6.2 Co-Type 2의 작업안전 시나리오 도출 예시

Co-Type 2는 위험의 정도가 다소 완화된 작업을 하는 것으로, 다음과 같이 5단계로 구분하여 시나리오를 도출할 수 있다.

[Table 5]는 소량의 유해성분이 포함된 제품을 포장하는 작업을 수행하는 것으로 설정한 작업안전 시나리오의 예시이다.

1단계는 작업분석 및 도출단계로 인간은 제품을 담을 용기 준비 및 포장 작업을 수행하고 협동로봇은 소량의 유해성분이 포함된 제품을 용기에 주입하는 작업으로 나눈다.

2단계는 위해요인과 위험상황을 파악하는 것으로, 위해요인은 소량의 유해성분을 포함한 제품이며, 위험상황은 소량이지만 유해성분을 포함한 제품에 인간의 신체 접촉이 잦아지게 되면 피부에 위해가 발생 할 수 있다.

3단계는 협업유형을 결정하는 것으로 위험성이 크지는 않지만, 위해요인은 존재하므로 협업공간은 일부 공유하되, 협업시간은 나누는 Co-Type 2로 결정한다.

4단계는 정상적인 작업인 경우와 의도하지 않은 휴먼에러를 포함한 작업의 경우, 두 가지 상황에 대한 작업안전 시나리오를 작성한다.

정상적인 작업의 경우 다음과 같이 시나리오 구성이 가능하다.

1) 인간은 주문이 들어온 제품 개수만큼 제품 용기를 가지고 협업공간으로 이동 후 고정틀에 용기를 꽂아 협동로봇이 작업할 수 있도록 준비하고 협업공간 밖으로 이동
2) 협동로봇은 협업공간으로 이동하여 소량의 유해성분이 포함된 제품을 틀에 고정되어 있는 용기에 주입
3) 협동로봇의 제품 주입 작업이 끝나면 인간은 협업공간으로 들어가고 협동로봇은 보호이격거리를 유지하기 위해 뒤로 물러남.
4) 인간은 주입이 끝난 용기 틀을 내려놓은 후 안전장갑을 착용하고 용기의 뚜껑을 닫음. 그 후 다음번 용기틀에 빈 용기를 꽂아 놓은 후 뚜껑을 닫은 용기가 담긴 틀을 가지고 협업공간 밖으로 이동
5) 협동로봇은 위의 2)작업 실시
6) 인간은 제품을 검수한 후 포장

의도하지 않은 휴먼에러를 포함한 작업시나리오는 다음과 같이 구성할 수 있다.

1) 인간은 주문이 들어온 제품 개수만큼 제품 용기를 가지고 협업공간으로 이동 후 고정틀에 용기를 꽂아 협동로봇이 작업할 수 있도록 준비하고 협업공간 밖으로 이동
2) 협동로봇은 협업공간으로 이동하여 소량의 유해성분이 포함된 제품을 틀에 고정된 용기에 주입
3) 협동로봇의 제품 주입 작업이 끝나면 인간은 협업공간으로 들어가고 협동로봇은 보호이격거리를 유지하기 위해 뒤로 물러남.
4) 인간은 주입이 끝난 용기 틀을 내려놓은 후 안전장갑을 착용해야 하나, 불편함에 종종 안전장갑 착용을 잊어버림. 안전장갑 착용을 잊어버리고 용기의 뚜껑을 닫았으며, 다음번 용기틀에 빈 용기를 꽂아 놓은 후 뚜껑을 닫은 용기가 담긴 틀을 가지고 협업공간 밖으로 이동
5) 협동로봇은 위의 2)작업 실시
6) 인간은 인간의 공간에서 포장 작업을 수행 하다가 이전 작업 시 꽂아두었던 빈 용기 중 한개에 크랙이 있었음이 생각났음. 협동로봇이 제품을 주입하기 직전, 빈 용기의 교체를 위해 협업공간으로 진입하였으며, 협동로봇은 최소 보호이격거리를 유지하기 위해 갑자기 보호정지를 하였음. 이에 협동로봇 엔드이펙터에 남아 있던 제품의 일부가 안전장갑을 착용하지 않은 인간의 손으로 떨어짐. 이로 인해 인간의 손에서 열감이 발생하였으며, 인간은 작업을 중단함.

[Table 5] Examples of Application of Safety Scenarios by Collaborative Type-2

Stage	Appliance
Stage 1 (Task configuration)	• Human (Operator) Task : Product container preparation and packaging. • Collaborative Robot Task : Inject products containing small amounts of harmful ingredients into containers.
Stage 2 (Identify dangerous materials or hazards)	• Hazards Material: Products containing small amounts of harmful ingredients. • Dangerous situation: Slight skin burns due to frequent contact with products containing harmful ingredients.
Stage 3 (Collaboration type setting)	• Co-Type 2 application : It contains small amounts of harmful ingredients, but the risk is not significant, but there is a risk of minor skin burns when there is frequent contact. Hence, the collaboration workspace shared and the collaboration worktime divided required.
Stage 4 (Create scenarios based on collaboration type)	<For normal operations> 1) Humans move the collaborative workspace with product containers, as many as the number of product containers that have been ordered. Put the container in the fixing frame, prepare it for the collaborative robot to work, and then move out of the collaborative workspace. 2) The collaborative robot moves to the collaborative workspace and injects products containing harmful ingredients into a container fixed to the frame. 3) When the collaborative robot's product injection work is finished, the human enters the collaborative workspace, and the collaborative robot retreats to maintain the protection distance. 4) Humans put down the container frame after injection, put on safety gloves, and close the container's lid. After that, put an empty container in the next container frame, and then move out of the collaborative workspace with the container containing the closed container. 5) The collaborative robot performs above 2) task again. 6) Humans inspect and package the product. <For operations involving unintentional human errors> 1) Humans move the collaborative workspace with product containers, as many as the number of product containers that have been ordered. Put the container in the fixing frame, prepare it for the collaborative robot to work, and then move out of the collaborative workspace. 2) The collaborative robot moves to the collaborative workspace and injects products containing harmful ingredients into a container fixed to the frame. 3) When the collaborative robot's product injection work is finished, the human enters the collaborative workspace, and the collaborative robot retreats to maintain the protection distance. 4) Humans forgot to wear safety gloves and closed the lid of the container, and next time they put an empty container in the container frame and moved out of the collaborative workspace with a container with the lid closed. 5) The collaborative robot performs above 2) task again. 6) Humans thought to have cracks in one of the empty containers leftover from the previous work while packing the human workspace. Just before the collaborative robot injects the product, and the collaborative robot suddenly stopped the protection from maintaining the minimum protected distance. 7) Part of the product left on the collaborative robot's end- effector fell into a human's hands without safety gloves. This created a sense of heat in the human hand, and the human stopped working.
Stage 5 (Scenario completion)	1) Humans move the collaborative workspace with product containers, as many as the number of product containers that have been ordered. Put the container in the fixing frame, prepare it for the collaborative robot to work, and then move out of the collaborative workspace. 2) The collaborative robot moves to the collaborative workspace and injects products containing harmful ingredients into a container fixed to the frame. 3) When the collaborative robot's product injection work is finished, the human enters the collaborative workspace, and the collaborative robot retreats to maintain the protective separation distance. While the collaborative robot maintains the separation distance, voice guidance for wearing safety gloves comes out. 4) Humans put down the container frame after injection, put on safety gloves, and close the container's lid. After, put an empty container in the next container and move it out of the collaborative workspace with the container that was put down. 5) The collaborative robot performs above 2) task again. 6) Humans inspect and package the product.

5단계에서는 이 두 가지 상황에 대해 검토한 후 다음과 같이 최종 작업안전 시나리오를 완성한다.

1) 인간은 주문이 들어온 제품 개수만큼 제품 용기를 가지고 협업공간으로 이동 후 고정틀에 용기를 꽂아 협동로봇이 작업할 수 있도록 준비하고 협업공간 밖으로 이동
2) 협동로봇은 협업공간으로 이동하여 소량의 유해성분이 포함된 제품을 틀에 고정된 용기에 주입
3) 협동로봇의 제품 주입 작업이 끝나면 인간은 협업공간으로 들어가고 협동로봇은 보호이격거리를 유지하기 위해 뒤로 물러남. 협동로봇이 보호이격거리를 유지하는 동안 안전장갑 착용에 대한 안내 음성이 나옴.
4) 인간은 주입이 끝난 용기 틀을 내려놓은 후 안전장갑을 착용하고 용기의 뚜껑을 닫음. 이후 다음번 용기틀에 빈 용기를 꽂은 후 내려놓은 용기틀을 가지고 협업공간 밖으로 이동
5) 협동로봇은 위의 2)작업 실시
6) 인간은 제품을 검수한 후 포장

6.3 Co-Type 3의 작업안전 시나리오 도출 예시

Co-Type 3은 위험하지 않은 작업을 하는 것으로, 다음과 같은 5단계로 구분하여 시나리오를 도출할 수 있다.

[Table 6]은 제품에 나사를 조립하는 작업을 수행하는 것으로 설정한 작업안전 시나리오의 예시이다.

1단계는 작업분석 및 도출단계로 인간은 나사조립을 위해 제품 위에 나사를 돌려놓고, 협동로봇은 나사를 조립하는 작업으로 나눈다.

2단계는 위해요인과 위험상황을 파악하는 것으로 위해요인은 없으며, 위험상황은 협동로봇의 엔드이펙터와 제품 사이에 손이 끼이는 것이다.

3단계는 협업유형을 결정하는 것으로 1~2단계 분석결과 위험성이 없으며, 접촉으로 인한 경미한 위험상황이 존재하므로 협업공간과 협업시간을 공유하는 Co-Type 3으로 결정한다.

4단계는 정상적인 작업인 경우와 의도하지 않은 휴먼에러를 포함한 작업의 경우, 두 가지 상황에 대한 작업안전 시나리 오를 작성한다.

정상적인 작업의 경우 다음과 같이 시나리오 구성이 가능하다.

1) 인간은 제품을 작업대에 올려놓고 나사들을 꽂아 놓음.
2) 협동로봇은 나사들을 조임.
3) 인간은 나사가 조여진 것을 육안으로 확인하고 작업대에서 이동 박스로 옮겨 싣고 1)작업을 반복

의도하지 않은 휴먼에러를 포함한 작업시나리오는 다음과 같이 구성할 수 있다.

1) 인간은 제품을 작업대에 올려놓고 나사들을 꽂아 놓음.

[Table 6] Examples of Application of Safety Scenarios by Collaborative Type-3

Stage	Appliance
Stage 1 (Task configuration)	• Human (Operator) Task : Fixing screws on top of product for assembly. • Collaborative Robot Task : Assembly of screws.
Stage 2 (Identify dangerous materials or hazards)	• Hazards Material: None. • Dangerous situation: Hand trapped between end effector and product.
Stage 3 (Collaboration type setting)	• Co-Type 3 application : There is no risk, and there is a slight risk of contact, so share the collaboration workspace and collaboration worktime.
Stage 4 (Create scenarios based on collaboration type)	<For normal operations> 1) The human puts the product on the workbench and puts screws in. 2) The collaborative robot tightens the screws. 3) Humans visually confirm that the screw is tightened and put it on 1) repeat the operation. <For operations involving unintentional human errors> 1) Humans put the product on a workbench and screw it in. 2) As soon as the collaborative robot tried to tighten the screws, the human discovered that the screw position was wrong and judged that the screw position correction was possible before the collaborative robot was screwed. The moment the hand extends between the end effector and the product, the collaborative robot stops, and the hand gets caught between the end effector and the product.
Stage 5 (Scenario completion)	1) It is designed to adjust the height of the worktable in case the hand is caught between the collaborative robot and the product so that when a hand is caught between the collaborative robot and the work, the worktable lowered. 2) The human confirms that the screw is tightened. 3) Move it to the moving box and repeat the operation 1).

2) 협동로봇이 나사들을 조이려 내려오는 순간 인간은 나사의 위치가 틀어져 있는 것을 발견하고 협동로봇이 나사를 조이기 전에 나사 위치 보정이 가능하다고 판단하여 손을 엔드이펙터와 제품 사이로 뻗는 순간 협동로봇이 정지되면서 엔드이펙터와 제품 사이에 손이 끼임.

5단계에서는 이 두 가지 상황에 대해 검토한 후 다음과 같이 최종 작업안전 시나리오를 완성한다.

1) 인간은 제품을 작업대에 올려놓고 나사들을 꽂아 놓음
2) 협동로봇은 나사들을 조임.
3) 협동로봇과 제품 사이에 손이 끼었을 때를 대비하여 작업대의 높낮이를 조절할 수 있도록 설계하여, 협동로봇과 작업물 사이에 손 등이 끼었을 때 작업대를 낮추어 끼인 손을 뺄 수 있도록 함.
4) 인간은 나사가 조여진 것을 육안으로 확인하고 작업대에서 이동 박스로 옮겨 싣고 1)작업을 반복

7. 결 론

본 연구는 협동로봇 활용을 위해 인간의 안전을 고려한 협동로봇 작업안전 시나리오를 도출하는 설계방법을 제시하였다. 본 설계 방법론은 인간과 협동로봇의 협업을 3가지 유형으로 나누고 이에 따라 시나리오를 도출할 수 있는 5단계의 프로세스를 포함하고 있다.

또한, 협업유형별 작업안전 시나리오의 예시를 제시함으로써 작업안전 시나리오 설계방법에 대한 이해를 도왔다.

산업현장에 협동로봇이 투입하기 이전에 작업을 위해요인 및 위험환경에 따른 협업유형으로 나누고 작업안전 시나리오를 도출해 봄으로써 협동로봇을 배치하기 위한 시간과 협동로봇시스템 구축에 소요되는 비용과 시간을 절감할 수 있을 것이다.

인간과 로봇의 협업을 위한 작업디자인은 로봇시스템을 구성할 시 가장 기반이 되는 부분이나 이에 관한 연구가 다양하지 않다. 향후 인간과 로봇의 협업이 증가가 예상됨에 따라 작업디자인 방법에 대한 다양한 연구가 필요하다.

사 사

본 논문은 2019년 광운대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

References

[1] J. Jun, J. Ryu, K. Kim, and H. Kim, “Development of Risk Assessment Method for Cobot Workplace and Regulation Response,” *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 14, no. 4, pp. 333-339, Dec., 2019, DOI: 10.7746/jkros.2019.14.4.333.

[2] G. Michalosa, S. Makrisa, P. Tsarouchia, T. Guaschb, D. Kontovrakisa, and G. Chryssolouri, “Design considerations for safe human-robot collaborative workplaces,” *Procedia CIRP*, vol. 37, pp. 248-253. 2015, DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.014.

[3] G. H. Kang, “A Study on the Design Method of Cooperative Robot System Considering Work Safety,” M.S thesis, Kwangwoon University, Seoul, Korea, 2020, [Online], Available: http://www.riss.kr/link?id=T15551796.

[4] ISO TS 15066 : 2016, Robots and robotic devices–Collaborative robots, [Online], https://www.iso.org/standard/62996.html, Accessed: January 06, 2020.

[5] IEC 62366-1:2015 Medical devices-Part 1: Application of usability engineering to medical devices, [Online], https://www.iso.org/ standard/63179.html, Accessed: January 03, 2020.

[6] H. T. Beak, K. I. Oh, and J. W. Jun, “Study on Risk Assessment Process for Required Performance Level Estimation of Industrial Manipulator,” *31th Conf. Institute of Control Robotics and Systems*, pp. 37-38, Seoul, Korea, 2016, [Online], http://www.riss.kr/link?id=A102993457.

[7] Y. H. Kim, “Human and Task-based Concept Design Methodology for Defense Robots,” Kwangwoon University, Ph.D. dissertation, Seoul, Korea, 2018. [Online], Available: http://www.riss.kr/link?id=T14933539

김 율 희

2011 방위사업청 주무관
2012 방위사업연구소 연구원
2014 광운대학교 대학원 방위사업학과 공학석사
2018 광운대학교 대학원 방위사업학과 공학박사
2019~현재 광운대학교 초빙교수

관심분야: 로봇 시나리오 디자인, 협동로봇, 국방로봇

김 진 오

1985 서울대학교 대학원 기계공학 학사 및 석사
1992 Carnegie Mellon Univ. 로보틱스 박사
1993 일본 SECOM 로봇그룹 연구원
1998 삼성전자 로봇사업부장
1999~현재 광운대학교 로봇학부 교수

관심분야: 로봇학, 협동로봇, 인간중심 작업기반 로봇개발 방법론, 로봇작업디자인