



# 협동로봇과 인간-로봇 협동 작업의 이해

정주노(고려대학교(세종) 전자기계융합공학과 교수)

## 1. 서론

로봇이 공장에 투입되어 제조과정에서 역할을 시작한 것은 1960년대 초로 거슬러 올라간다. 당시 미국 제너럴모터스 생산 공장에서 Unimate라는 로봇이 적용되어 다이캐스팅된 부품을 옮기고 용접하는 작업에 활용되었다[1]. 그 후 로봇의 활용이 일대 증가일로에 있다가 잠시 주춤하기 시작했는데 로봇이 인간을 노동환경에서 배제할 수 있다는 위협을 느끼면서 구미 선진국의 노동조합에서 반 로봇 감정이 일어났기 때문이다[2,3]. 반면 일본에서는 문화적 이유로 로봇에 대한 거부감이 적었기에 로봇이 생산 공정에 지속적으로 투입되었고 일본 제조산업의 눈부신 성과와 함께 로봇 기업의 성장도 뒷받침되었다. 그 후로도 로봇은 자동화라는 이름으로 지속적으로 선진국 및 개발도상국 산업현장에 배치되어 생산성을 향상시켜왔다. 그러나 지난 10여년 전부터 글로벌 제조산업에도 많은 변화가 생겨났다. 국가간 무한경쟁, 생산성 향상, 지능화 및 디지털화, 온디맨드 생산이라는 요구에 따라 글로벌 밸류체인이 급속도로 변화하면서 대규모 집적생산 방식에서 이른바 4차산업 혁명의 빠르고 유연한 제조 방식이 미래 산업의 대세로 자리잡은 실정이다[4].

이런 주문자의 요구에 빠르고 유연하게 대응할 수 있는 생산 방식에서 로봇의 활용은 필수 불가결한 요소가 된다. 기존 생산 라인을 쉽게 바꾸고 변화된 제조공정을 빠르게 구현하기 위해서 셀방식 생산공정 도입과 이동로봇을 이용한 공장내 물류 유연화가 요구되며, 더 나아가 로봇과 사람이 작업 공간을 공유하며 서로 협업화하는 공정이 필요하다. 이 과정에서 로봇으로부터 인간의 안전을 지킬 방안을 도출하기 시작했으며 협동로봇

의 개념이 정립되기에 이르렀다. 결국 협동로봇은 인간에게 해를 끼치지 않거나 최소화할 수 있는 제어 기능과 기계적 구조를 담고 있는 로봇을 의미함을 알게 된다[5]. 본고에서는 이런 협동로봇의 개념, 요구조건, 활용에 이르는 제 사항을 리뷰하고 향후 예상 발전 방향을 모색해 보고자 한다.

## 2. 산업용 로봇 vs. 협동로봇

기존의 산업용 로봇은 사람과 분리된 공간에서 시간에 따라 정해진 작업을 수행하여 제품을 대량 생산하는 전통적인 제조 공정에 유리하며, 오늘날까지도 대부분의 공장에서 활용되고 있는 로봇의 대다수가 이에 속한다. 반면 협동로봇은 펜스없는 공간에서 적극적 혹은 소극적 방식으로 인간과 협동 작업하는 파트너 개념의 로봇이며[6], 저속 작업을 수행하므로 대량 생산보다는 중/소량의 온디맨드 생산에 유리하다(그림 1 참고). 비록 협동로봇의 개념은 Colgate와 Peshkin의 Cobot [7]으로 거슬러 가지만, 본격적인 협동로봇은 2008년 덴마크의 고무공장에서 사용된 Universal Robot (UR)을 시초로 보고 있다.

산업용 로봇과 협동로봇을 특징별로 자세히 비교해 보자. 먼저 크기와 구조 측면에서, 산업용 로봇은 대형부터 소형에 이르기까지 다양한 크기로 제작 활용되며 구조적으로 강하고 견고하게 제작된다. 반면 협동로봇은 대체로 최대 가반하중이 10 kg 내외에 불과하여 중형 내지 소형으로 가볍게 제작되며 예상치 못한 인간과의 충돌에 대비해 유연한 구조로 만들어 진다. 따라서 산업용 로봇의 최상위 성능지표가 반복정밀도와 속도라고 한다면 협동로봇은 충돌에 대응하는 기계적 소프트웨어적 성능이 가장 중요한 지표가 되며 작업성능은 다음 단계의 지표 사

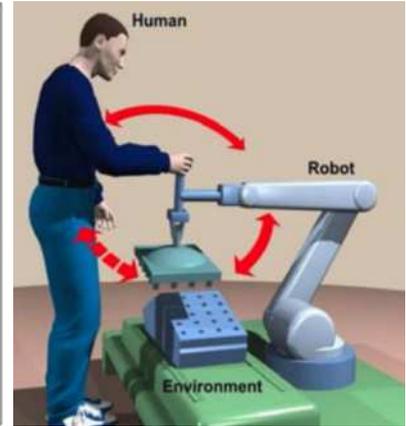
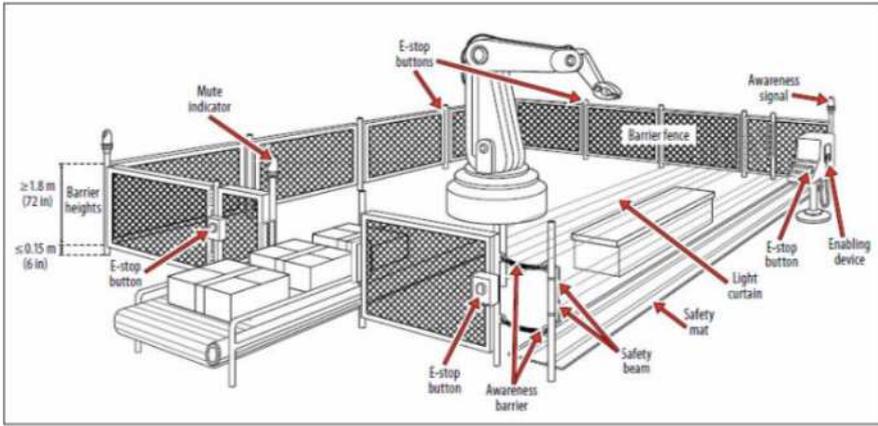


그림 1. (좌) 산업용 로봇, (우) 협동로봇 ([6]에서 발췌).

항이다. 협동로봇은 이런 안전성능이 확보되어 있으므로 사용 시 주위에 펜스없이 사용가능하지만 산업용 로봇은 반드시 펜스 안에서 인간과 분리되어 활용되어야 한다. 배치의 관점에서 산업용 로봇은 특정 위치에 고정된 채로 활용되며 특별한 사유가 없을 경우 정해진 위치에서 이동되지 않는다. 반면 협동로봇은 공정과 작업에 따라 빈번하게 재배치될 수 있다. 또한 산업용 로봇은 펜던트를 이용한 오프라인 또는 제한된 온라인 프로그래밍으로 작업을 티칭하는 데 비해 협동로봇은 주로 온라인 상태에서 사람이 직접 로봇을 잡고 이동시켜 티칭하며 부여된 센싱 모달리티에 따라 다양한 방식의 상호작용을 통해 티칭이 가능하다. 표 1은 여러 기준에 따른 산업용 로봇과 협동로봇의 비교 요약표를 보여주고 있다.

현재 상업적으로 판매되고 있는 협동로봇은 단일 팔의 형태 또는 양팔의 형태로 제품군을 형성하고 있다. 단일 팔의 형태로는 유니버설로봇사의 UR시리즈, KUKA의 LBR시리즈, Fanuc의 CR시리즈, 국내제품으로는 뉴로메카사의 Indy시리즈, 두산로보틱스사의 A, H시리즈, 한화의 HCR시리즈, 그리고 레인보우사의 RB시리즈를 들 수 있다. 이들 협동로봇은 안

전규정 ISO10218-1을 만족하도록 인증된 제품이다. (안전규정에 관한 내용은 다음 3절에서 자세히 다루도록 한다.) 그림 2는 대표적인 몇개의 협동로봇을 보여주고 있다. 양팔 형태의 협동로봇은 ReThink사의 Baxter, ABB사의 Yumi, Kawada사의 NEXTAGE, 윌로우가라지의 PR2를 들 수 있다. 반복정밀도의 관점에서 현재 출시된 대부분의 협동로봇 0.1[mm] 내외 수준을 보이고 있는데, 이는 기존 산업용 로봇의 반복정밀도 수준인 0.02[mm] 내외 수준에 상당히 못 미치는 상황임을 알 수 있다. 따라서 초정밀 작업에서 협동로봇이 산업용 로봇을 대체하기는 어려울 것으로 판단된다. 결국 특정 작업을 구현함에 있어서 산업용 로봇과 협동로봇 중 더 적합한 솔루션을 찾기 위해서는 작업의 특성을 사전에 면밀하게 분석해 보는 과정이 반드시 필요하다.

### 3. 협동로봇 안전 규정 및 협동 작업 모드

협동로봇을 이용한 물리적 인간-로봇 협동 작업의 구현에는 안전성(safety), 공존성(coexistence), 협동성(collaboration) 등

표 1. 산업용 로봇과 협동로봇의 비교([8]를 참고하여 확장함)

항목	산업용 로봇	협동로봇
크기 및 구조	대형/중형/소형, 강건한 구조	대부분 중형/소형, 유연한 구조
최상위 성능지표	반복 정밀도, 속도	안전 성능
배치	고정 방식	유연한 재배치
작업 형태	반복 위주 작업	빈번히 변경되는 작업
작업 티칭	온/오프라인 프로그래밍	온/오프라인 프로그래밍 및 다양한 상호작용 방식 채용
인간 상호작용	거의 없음	빈번한 상호작용
펜스 유무	있음	없음
사용되는 공정	대량 생산 공정	중/소량 유연 생산 공정



Universal Robot UR 10



KUKA IIWA LBR800



뉴로메카 Indy7



두산 H2017



한화테크윈 HCR



레인보우 RB시리즈

그림 2. 대표적인 협동로봇 제품 소개.

세 가지의 특징 요소를 충족해야 한다[9]. 안전성은 충돌을 회피할 수 있는 능력 또는 불가피한 충돌에서 로봇이 충돌을 감지하고 충돌에 따른 위험을 회피할 수 있는 대응 능력을 의미한다. 공존성은 로봇이 안전성 조건을 충족시키면서 자신의 작업공간을 인간 또는 다른 개체와 공유할 수 있는 능력을 말한다. 그리고 협동성은 안전성과 공존성을 충족시키면서 로봇이 인간과 다양한 modality를 써서 소통하고 상호작용하여 공동 작업을 수행하는 능력이다. 따라서 협동로봇의 작업구현에 필요한 이런 세 개의 능력 또는 조건은 일관성 있는 계층화된 개념 구조를 형성하고 있는 셈이다. 본 절에서는 협동로봇의 가장 기본이 되는 안전성 조건과 관련 규정을 중심으로 리뷰한다.

협동로봇이 대 인간 안전성을 보장하기 위해서는 먼저 로봇 자체의 안전 성능 확보가 필요하며 둘째 협동로봇의 사용 현장에서 적합한 조건으로 사용되어야 한다. 이런 제반 사항을 규정한 것이 이른바 ISO10218 협동로봇 안전규정이다[10,11]. 아울러 협동로봇을 포함한 일반 기계류의 포괄적 안전 설계 원칙과 위험성 평가 원칙을 정의한 ISO12100도 협동로봇과 관련된 안전 규정 중 하나가 된다. 좀 더 구체적으로 살펴보면, ISO10218-1은 협동로봇의 제품단위 규정으로서 로봇의 위험성 평가, 제어시스템 신뢰성, 필수 안전기능 및 위험방지에 대한 한국산업표준이자 국제 안전규격에 해당한다[12]. ISO10218-2는 실제 현장에서 협동운전 시 안전성 담보를 위한 운용 조건, 안전관련 제어 신뢰

성, 주요 위험요인에 대한 안전 대책을 담고 있다. ISO/TS15066은 ISO10218의 부속 문서로 안전성에 대한 위험을 평가하기 위해 시간에 따른 힘-압력 제약, 운전속도와 인간관의 이격거리 등을 조건화 시킨 기술 규약에 해당한다. 그림 3(좌)은 TS15066에서 정하고 있는 로봇의 운전속도  $v_r$ , 사람의 이동속도  $v_h$ 이 주어졌을 때 요구되는 이격 거리  $S(t)$ 에 관한 관계를 도식화한 것이고 그림 3(우)은 로봇과 사람 사이의 의도적 혹은 비의도적 충돌시 위험도 평가에 따라 힘과 압력에 관한 안전 범위를 규정할 샘플 커브이다. 힘/압력 커브는 충돌후 50 ms 이내 과도구간에서는 큰 에너지교환과 리액션과정을 동반하며, 그 이후 준정적 구간에서는 사람의 끼임이 발생하는 영역을 의미한다. 이 커브의 상단이 최대 허용 힘과 압력을 의미한다. 준정적 끼임상태에서 신체부의 경우 얼굴은 65[N], 가슴부는 140[N], 등과 어깨는 210[N]으로 최대 허용 외력이 제시되고 있다. 다만 이런 최대 허용 값은 이론적으로 완벽히 결정된 값이 아님을 주지할 필요가 있다.

협동작업에 관한 규정인 ISO10218-2에서는 다음 4가지 유형의 협동작업 동작 모드를 설명하고 있으며 이 중 일부 혹은 전부를 충족시키는 산업용 로봇을 광의의 협동로봇으로 규정하게 된다.

- 모니터링기반 비상 안전정지 모드(Level 1, Safety rated

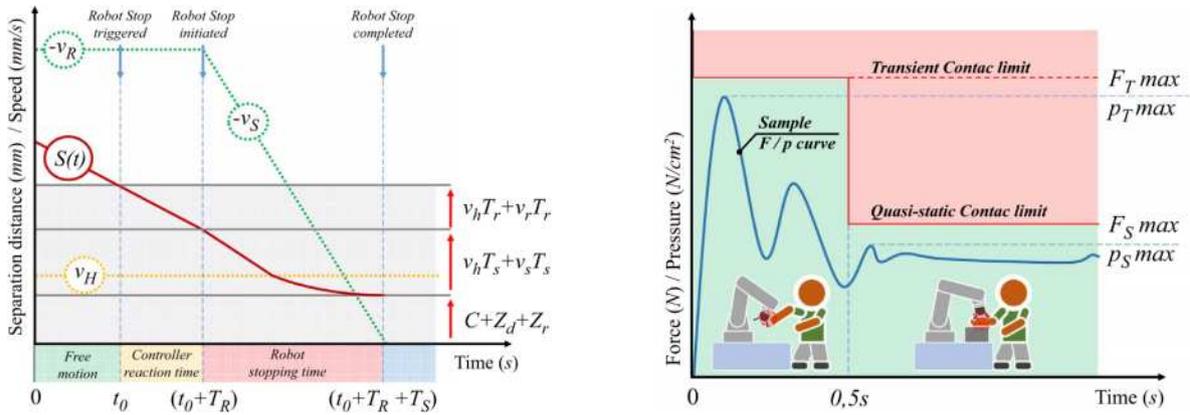


그림 3. (좌) 운전속도 vs. 이격거리 간 추세선, (우) 충돌시 정/동적 허용 힘-압력 샘플 커브(그림은 [8]에서 발췌).



그림 4. ISO10218 & ISO/TS15066에서 규정한 4가지 협동작업 운전 모드(그림은 [9]에서 발췌).

monitored stop): 작업영역 내부에 사람이 없을 때만 일반 산업용 로봇처럼 동작하고 사람이 작업영역에 들어오면 정지

- 핸드 가이드 모드(Level 2, Hand guiding): 사람이 매뉴얼 방식으로 로봇팔을 직접 움직여 작업을 티칭하거나 자세를 만들 수 있음
- 속도 및 이격거리 모니터링 모드(Level 3, Speed and separation monitoring): 로봇과 사람의 속도와 이격거리를 모니터링하여 충분한 안전 거리를 확보
- 힘 및 출력 제한 모드(Level 4, Power and force limiting): 힘과 출력을 모니터링하여 일정량 이상이 감지되면 로봇이 즉각 정지함으로써 사람의 상해를 방지

각 협동작업 유형에 대한 자세한 도식화된 예시는 그림 4를 참조하기 바란다.

#### 4. 협동로봇의 활용 분야

협동 로봇이 활용되거나 활용 가능한 분야는 인간-로봇 협업 작업을 통해 생산성과 노동환경 개선에 이점이 있는 제조 공정이 될 것이다. (제조 환경, 노동여건, 투자 효율성과 같은 비기술적 요인도 협동 로봇활용 여부에 요인으로 작용할 수 있으나 본 고에서는 이에 대해 고려하지 않기로 한다.) 먼저 무거운 물체를 들기, 옮기기, 제품검사와 같은 지루하고 루틴한 작업에서 로봇을 툴이나 물건을 들고 있는 조수의 역할을 수행토록 하되 인지와 판단은 사람의 몫으로 남겨두는 작업에서 협동로봇

이 활용될 수 있다. EU 프로젝트(SYMPLEXITY)에서 이런 종류의 활용 방안에 대해 제안되었다[13]. 용접 작업 분야에서도 협동로봇을 톨로 활용하여 인간-로봇 협업작업을 구현하기도 하였다[14]. 이 작업에서 로봇에 대해 약간의 자율기능과 상호 작용 능력을 부여하여 기존의 오프라인 프로그래밍 방식의 산업용 용접로봇이 수행하지 못했던 실시간 협업을 가능하도록 하였다. 조립작업에서도 로봇과 사람간 협업이 구현되기도 하였다. 예를 들면, 로봇이 먼저 단순한 작업을 수행하면 사람은 이를 이어 받아 복잡한 조립 작업을 구현하는 방식이다. 크고 무거운 물체를 들고 조작하는 작업에서 핸드가이드 조립 작업을 구현한 예도 점점 많아지고 있다[15]. 최근 들어 자동차 조립 공정에서 협동로봇을 활용한 사례도 종종 등장하고 있다. BMW 조립 라인에서 유니버설 로봇을 사용하여 인간-로봇 협업을 적용한 사례가 보고되었으며, 포드자동차에서는 shock absorber를 조립하는 라인에서 KUKA 협동로봇을 도우미로 사용하기도 하였다. 폭스바겐도 광원 플러그를 고정하거나 실린더 헤드를 고정하는 과정에서 협동로봇을 적용하여 도우미로 활용하고 있다.

현재 국내에서도 협동로봇을 활용한 사례가 점점 많아지고 있는 실정이다. 머신텐딩, 폴리싱공정, 불팅, 각종 국내 제조공정, 그리고 최근에는 치킨 요리에도 협동로봇이 활용되는 것을 직간접적으로 보고 있다. 앞으로도 이런 추세는 더욱 확대되어 갈 것으로 보이며 소규모 제조 및 상업 환경에서 더욱 효율적이면서도 안전하게 협동로봇이 활용될 수 있는 방안이 마련될 것이다.

## 5. 맺음말

협동로봇과 기존 산업용 로봇과의 특징을 비교해 봄으로써 협동로봇을 잘 이해할 수 있었다. 인간과 공존해야 하는 협동로봇 특성상 안전성을 확보하기 위한 각종 규정과 위험 평가 방식에 대해서도 이해해 보았다. 전 세계적으로 확산되는 4차산업 디지털 혁명에 변화에 맞춰 속속 활용되고 있는 협동로봇의 사례를 살펴보고 이를 통해 국내외에서 진행되고 있는 유연 혁신 제조 공정 변화의 추세를 관찰할 수 있었다. 기존 산업용 로봇이 인간을 노동 현장에서 배제시키는 경우가 많았다면 협동로봇은 인간을 위한 도구나 도우미로서 인간의 노동활동을 지원하는 상생의 의미를 담고 있다. 열악한 노동환경에서 안전하고 효과적인 방식으로 인간-로봇 협업작업을 적절히 구사할 수 있다면 노동과 생산의 환경이 좀 더 윤택하게 바뀌어질 수 있을 것이다.

## REFERENCES

- [1] J. F. Engelberger, "Die Casting Applications," Chapter 10, *Robotics In Practice*, AMACOM, 1980.
- [2] R. Ayres and S. Miller, *The impact of industrial robots*, Technical Report (rCMU-RI-TR-81-7), 1981.
- [3] T. L. Weekley, "Robotics: Future Factories, Future Workers," *The Annals of the American Academy of Political and Social Science*, vol. 470, pp. 146-151, 1983.
- [4] M. Rüßmann, et al., "Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries," *Boston Consulting Report*, April 09, 2015 ([https://inovas.yon.org/images/Haberler/bcgperspectives\\_Industry40\\_2015.pdf](https://inovas.yon.org/images/Haberler/bcgperspectives_Industry40_2015.pdf)).
- [5] A. Vysocky and P. Novak, "Human-Robot Collaboration in industry," *MM Science Journal*, 903, 906, 2016.
- [6] D. Surdilovic et al., "Development of collaborative Robots (Cobots) for Flexible Human-Integrated Assembly Automation," *IEEE Conf on Int. Symp. on Robotics*, 2010.
- [7] J. E. Colgate et al., "Cobots: Robots for collaboration with human operators," *Proc. of IMECE*, DSC-Vol. 58, pp. 433-439, 1996.
- [8] V. Villani et al., "Survey on human-robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications," *Mechatronics*, vol. 55, pp. 248-266, 2018.
- [9] A. De Luca and F. Flacco, "Integrated control for pHRI: Collision avoidance, detection, reaction and collaboration," *Proc. of the IEEE RAS & EMBS Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechanics*. pp. 288-95, 2012.
- [10] ISO 10218-1:2011 - Robots And robotic devices - Safety requirements for industrial robots - Part 1: robots, ISO, 2011.
- [11] ISO 10218-2:2011 - Robots And robotic devices - Safety requirements for industrial robots - Part 2: robot systems and integration, ISO, 2011.
- [12] 산업용 로봇 시스템의 협동운전 가이드북, 한국로봇산업진흥원, 2020.
- [13] SYMPLEXITY EU project. <http://www.symplexity.eu/>
- [14] B. Takarics et al., "Welding trajectory reconstruction based on the intelligent space concept," *Proc. of the IEEE Conf. Human System Interactions*, pp. 791-796, 2008.

- [15] S. Grahn et al., "Potential advantages using large anthropomorphic robots in human-robot collaborative hand guided assembly," *Proc. CIRP*, vol. 44, pp. 281-286, 2016.

## 저자약력



### 정 주 노

- 1991 ~ 2003 포항공과대학교 기계공학 학사, 석사, 박사
- 2002 ~ 2002 메릴랜드대학교 기계공학과 방문 연구과정
- 2003 ~ 2005 매사추세츠공과대학교 RLE Postdoc 연구원
- 2012 ~ 2013 캘리포니아주립대 (샌디에고) 방문교수
- 2005 ~ present 고려대학교 전자·기계융합공학과 (구 제어계측공학과) 교수