JESK J Ergon Soc Korea 2026; 45(2): 79-91
https://dx.doi.org/10.5143/JESK.2026.45.2.79
https://jesk.or.kr eISSN:2093-8462

Development of a Program for the Analysis and Redesign for Composite Lifting Tasks

Yong-Ku Kong, Hyun-Ho Shim, Hyunji Keum, Hyunseok Yang, JaeHwi Lee, Sukyung Cha, Dokyeong Lee

Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 16419

복합 들기 작업 분석 및 작업 재설계 프로그램 개발

공용구, 심현호, 금현지, 양현석, 이재휘, 차수경, 이도경

성균관대학교 산업공학과

Corresponding Author
Dokyeong Lee
Department of Industrial Engineering,
Sungkyunkwan University, Suwon, 16419
Email : yui5523@g.skku.edu

Received : January 26, 2026
Accepted : March 11, 2026

Copyright@2026 by The Human Factors & Ergonomics Society of Korea. All right reserved.

Objective: The aim of this study was to develop a program that calculates the Composite Lifting Index (CLI), an index used to evaluate the physical demands imposed on workers during composite lifting tasks, and proposes an optimal task layout that minimizes physical workloads.

Background: Lifting tasks, which increase the risk of low back disorders, are frequently performed at industrial sites. Recently, the forms of these tasks have become increasingly diverse, as seen in composite lifting tasks. To effectively prevent work-related musculoskeletal disorders (WMSDs), it is essential to accurately assess the musculoskeletal workloads and risk factors associated with the tasks and to derive systematic improvement strategies based on ergonomic evaluations. Although the physical workload resulting from composite lifting tasks is appropriately assessed using the CLI, its highly complex calculation process limits its practical usability by practitioners in industrial settings.

Method: In this study, a CLI Calculation algorithm for composite lifting tasks was systematically developed based on the CLI formula. Additionally, a CLI Solution algorithm was designed to minimize lumbar load in multiple lifting tasks by comparing and analyzing the CLI values of all possible task arrangements and identifying the optimal configuration. The proposed algorithms were implemented in a Python-based program, and the applicability of the program was validated using a hypothetical composite lifting task example.

Results: This study consists of two phases utilizing two main functions: CLI Calculation and CLI Solution. In the first phase, CLI Calculation computes the CLI for a single composite lifting task based on input task variables. The CLI Solution takes location variables and load variables separately as input task variables. Based on these inputs, it automatically generates all possible combinations for assigning loads to specific locations, compares the CLI values for all cases, and proposes the optimal arrangement with the lowest physical workloads. In the illustrative case study, a composite lifting task involving four loads of different weights placed individually on a four-level shelf was analyzed. The CLI value calculated using the CLI Calculation was 7.01. Subsequently, by analyzing the 24 task arrangement combinations generated via the CLI Solution, the optimal arrangement was found, yielding a reduced CLI value of 6.43.

Conclusion: This study developed a CLI-based program to support the evaluation

and task redesign of composite lifting tasks, thereby facilitating the assessment and analysis of lifting operations. In particular, the CLI Solution algorithm enables the proposal of optimal task arrangements capable of reducing workloads.

Application: This study is expected to enable rapid and accurate evaluation of complex composite lifting tasks that are difficult to assess manually in industrial settings, thereby providing practical support for practitioners to perform risk analysis and redesign more efficiently.

Keywords: NIOSH lifting equation, Composite Lifting Index (CLI), Lifting analysis tools, Manual material handling (MMH)

1. Introduction

산업 현장에서 발생하는 작업 관련성 질병 요양자 수는 최근 10년 간 지속적으로 증가하는 추세를 보이고 있으며, 주요 통증 부위는 허리, 목, 어깨 순으로 높게 나타난다고 보고되고 있다(Kim and Kim, 2023). 특히 산업 현장에서 빈번하게 수행되는 들기 작업은 허리의 굽힘 자세 및 반복적인 과부하를 동반하여 요추 질환 발생 위험을 높이는 주요 요인으로 널리 알려져 있다(Punnett et al., 2005; Coenen et al., 2014). 들기 작업은 제조업을 포함하여 물류·유통, 보건·복지, 서비스업 등 다양한 산업 분야에서 보편적으로 수행되고 있으며(Lowe et al., 2019), 작업 환경의 변화와 공정의 다양화로 인해 들기 작업의 형태는 점점 더 복잡해지고 있다.

근골격계 질환을 효과적으로 예방하기 위해서는 작업의 근골격계 부담과 요인을 정확히 평가하고, 이를 바탕으로 체계적인 개선 방안을 도출하는 과정이 중요하다. 들기 작업의 대표적인 평가 방법으로는 NIOSH Lifting Equation (NLE) (Waters et al., 1994), Washington Administrative Code 296-62-051714 (WAC) (Washington State, 2000), Snook Tables (Snook and Ciriello, 1991) 등이 있다.

이 중 NLE는 과도한 들기 작업으로 인한 부상과 요통 발생을 줄이고 예방하는 것을 주요 목적으로 하며, 수평거리, 수직거리, 이동거리 및 비틀림 각도 등 총 6가지 요인을 통합하여 들기 작업의 생체역학적 스트레스 요인을 정량화 한다(Waters et al., 1994). 1994년 NLE가 제시될 당시에는 단순 들기 작업의 평가 지표인 Lifting Index (LI)와 복합 들기 작업을 평가하기 위한 지표인 CLI (Composite Lifting Index)가 함께 제안되었다. NLE는 줄자, 각도계 등과 같은 기본 측정 도구만으로도 평가에 필요한 변수를 수집할 수 있어 사용이 편리하며(Lu et al., 2016), 결과 해석의 용이성과 개선 방향의 가시화 등 여러 장점이 있다(Kee, 2006). 따라서, 이러한 이점으로 NLE는 들기 작업의 평가 수단으로 자주 활용되며(Dempsey et al., 2005; Fox et al., 2019; Lowe et al., 2019), 우리나라를 포함한 여러 국제기관의 인간공학적 표준과 다양한 기업 및 협회의 작업 지침에 인용되고 있다(Fox et al., 2019). 다만, 복합 들기 작업을 평가하기 위한 CLI는 LI에 비해 계산 절차가 복잡하며, 여러 단계의 정렬과 누적 빈도 계산을 포함한다. CLI의 수식은 식(1)과 같다(Waters et al., 1994).

$$CLI = STLI_1 + \sum \Delta LI, \quad \text{---- eq.} \quad (1)$$

where

$$\sum \Delta LI = \left\{FILI_{1,2} \times \left(\frac{1}{FM_{1,2}} - \frac{1}{FM_1}\right)\right\} + \left\{FILI_{1,2,3} \times \left(\frac{1}{FM_{1,2,3}} - \frac{1}{FM_{1,2}}\right)\right\} + \cdots + \left\{FILI_{1,2,..,n} \times \left(\frac{1}{FM_{1,2,..,n}} - \frac{1}{FM_{1,2,...,n-1}}\right)\right\}$$

$STLI_1$: 각 들기 작업의 단일 들기 작업 지수(Single Task Lifting Index; STLI) 중 가장 큰 STLI 값
FILI : FM=1로 적용한, 각 작업에 대한 빈도수와 관계없는 FILI (Frequency Independent Lifting Index)
$FILI_{1,2,...,n}$: STLI 값 기준으로 내림차순 재정렬된 순서 기반, n^{th} 작업의 FILI
$FM_{1,2,...,n}$: STLI 값 기준으로 내림차순 재정렬된 순서 기반, n^{th} 작업의 누적된 빈도에 대한 FM (Frequency Multiplier) 값

그러나 복합 들기 작업 평가를 위한 CLI가 개발되었음에도 불구하고, 실제 산업 현장에서는 평가 도구의 부재나 계산 과정의 복잡성 등으로 인해 단순 들기 작업이 아님에도 단순 들기 지수인 LI 하나로 다양한 들기 작업을 동일한 방법으로 평가하는 경우가 존재한다

(Waters et al., 1999). 실제 산업 현장에서 행해지는 들기 작업의 형태는 매우 다양하며, 복합 들기 작업을 LI의 평균값으로 평가할 경우 들기 작업에 대한 위험을 과소평가하거나 과대평가할 수 있다(Waters, 1991; Kong et al., 2024). 따라서 들기 작업의 정확한 평가를 위해서는 작업 유형에 적합한 평가 지표를 적용해야 함에도 불구하고, CLI와 같은 지표는 숙련되지 않은 사용자가 적용하기엔 어려움이 존재하며(Dempsey, 2002), 산업 현장에서 실무자들이 쉽게 적용하여 활용하기에는 접근성이 떨어진다는 한계가 있다.

단순 들기 작업의 경우, 최근에는 산업 현장의 들기 작업 평가 시 활용성을 높이기 위해 입력 변수를 기반으로 자동으로 LI를 산출하는 프로그램이 개발되었으며(Mohan et al., 2021), 깊이 인식 카메라나 motion capture 데이터를 활용한 LI 자동 계산 프로그램이 제시되고 있다(Spector et al., 2014; Gutierrez et al., 2024). 다만, 이러한 기존 연구들은 단순 들기 작업의 평가 지표인 LI에 초점을 두고 있어, 복합 들기 작업과 같은 단순 들기 작업 외 들기 작업을 평가하는 프로그램에 대한 연구는 미비한 실정이다.

한편, 복합 들기 작업은 수평거리와 수직거리 등 들기 작업 내 작업 변수가 다양하다는 특징으로 인해 작업 배치에 따라 들기 지수 값이 달라질 수 있다. 즉, 동일한 중량물과 작업 조건이라 하더라도 중량물의 배치 위치에 따라 작업 부담 수준이 달라질 수 있으므로, 다수의 작업 조합을 함께 고려해야 하는 특성을 지닌다. 이러한 경우 단순한 들기 지수 계산을 넘어 가능한 모든 작업 대안을 체계적으로 생성하고, 각 대안에 대한 신체 부하를 비교 및 평가하는 과정이 요구될 수 있다. 그러나 이러한 과정은 작업 대안 수가 기하급수적으로 증가하는 특성을 지니며, 이로 인해 실무자가 수작업이나 엑셀 기반으로 분석하기에는 현실적인 한계가 있다. 따라서 복합 들기 작업의 다양한 작업 조건 하에서 가능한 작업 배치를 체계적으로 탐색하고, 그 중 작업 부담을 최소화하는 작업 방안을 도출할 수 있는 분석 프로그램이 필요하다고 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 복합 들기 작업 분석과 작업 재설계를 지원할 수 있는 프로그램을 개발하고자 한다. 이를 위해 (1) CLI 산출 공식에 기반한 calculation 알고리즘을 설계하고, (2) 작업 개선을 지원하는 보조 도구로서 solution 기능을 포함하는 분석 체계를 구축하며, (3) 제안된 프로그램의 적용을 검증하기 위해 들기 작업 사례를 적용하고자 한다.

2. Method

2.1 Design of CLI Calculation algorithm

CLI Calculation은 앞서 제시한 CLI 수식에 기반하여, 복합 들기 작업에 대한 CLI를 산출하는 기능을 수행한다. Step 1에서와 같이, 각 들기 작업에 대한 작업 변수를 입력하면 Step 2에서 CLI 산출에 필요한 계수와 지표, 즉 FILI (Frequency Independent Lifting Index)와

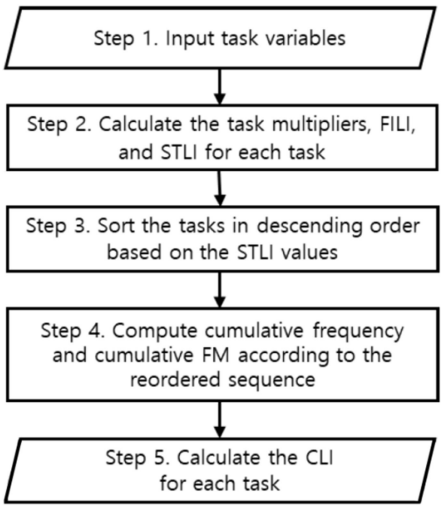

Figure 1. Structure of CLI Calculation algorithm

STLI (Single Task Lifting Index)를 포함한 관련 parameter들이 계산된다. FILI는 FM을 1로 가정하여 산출한 들기 지수이며, STLI는 실제 작업 빈도를 반영한 FM을 적용하여 계산된 단일 들기 작업 지수이다. 각 들기 작업의 STLI 값은 이후 단계에서 작업 순서를 결정하는 기준으로 활용된다.

Step 3에서 산출된 STLI 값을 기준으로 각 들기 작업을 내림차순으로 정렬하고 번호를 재지정한다. Step 4에서는 재정렬된 작업 순서를 기준으로 첫 번째 작업부터 각 들기 작업의 빈도를 누적하여 누적 빈도에 따른 FM 값을 도출한다. 마지막으로 Step 5에서 앞선 단계에서 산출된 parameter들을 CLI 공식에 대입하여, 해당 복합 들기 작업에 대한 최종 CLI를 산출한다. 본 연구에서 사용된 CLI Calculation 알고리즘의 전체적인 처리 절차는 Figure 1과 같다.

2.2 Design of CLI Solution algorithm

CLI Solution은 산출된 CLI 값을 기반으로 작업 부담이 가장 적은 최적의 중량물 배치를 제시하는 기능이다. 해당 알고리즘은 변수 입력 방식과 중량물을 각 작업 위치에 배치할 수 있는 가능한 모든 배치 조합을 자동으로 생성하여 최적의 중량물 작업 배치를 제안한다는 점에서 단일 복합 들기 작업의 CLI를 산출하는 CLI Calculation과 차이가 있다.

먼저, Step 1에서는 변수 입력 단계로, 작업 위치와 관련된 변수와 중량물과 관련된 변수를 구분하여 입력하도록 설계하였다. 작업 위치와 관련된 변수는 수평거리, 수직거리, 비대칭 각도로 구성되며, 중량물에 따른 변수는 중량물의 무게와 작업 빈도, 작업 시간, 손잡이 조건으로 분류하였다.

입력된 변수를 기반으로 Step 2에서 각 중량물을 각 작업 위치에 배치할 수 있는 가능한 모든 작업 배치 조합을 자동으로 생성한다. 이후 생성된 모든 작업 배치 케이스의 CLI를 각각 산출하는데, Step 3부터 Step 6에 해당하는 각 케이스에 대한 CLI 산출 로직은 CLI Calculation과 동일하게 적용된다. 마지막으로 Step 7에서는 생성된 모든 작업 배치 케이스의 CLI 값을 비교하여, 작업 부담이 가장 적은 즉, CLI 값이 가장 낮은 작업 배치를 최적해로 제시한다(Figure 2).

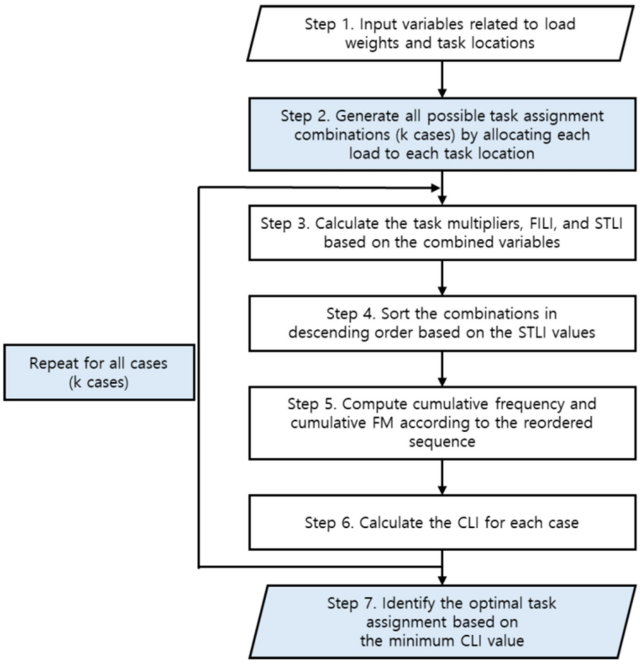

Figure 2. Structure of CLI Solution algorithm

2.3 Apparatus

본 연구에서 제안된 프로그램은 확장성, 유연성, 그리고 간결한 문법으로 인하여 다양한 분야에서 널리 사용되고 있는 Python에 기반하여 개발하였으며(Van Rossum, 2007; Chudoba et al., 2013), 확장 기능을 통해 디버깅, 라이브러리 관리 등의 기능을 제공하여 통합 개발 환경에 준하는 기능을 제공하는 텍스트 에디터인 Visual Studio Code 기반으로 구축하였다.

2.4 Application example setup

본 연구에서 개발된 프로그램의 적용 절차와 분석 결과를 설명하기 위해 8시간 동안 수행되는 가상의 복합 들기 작업 시나리오를 설정하였다. 본 연구는 실제 피실험자를 대상으로 한 실험 연구가 아니라, 설정된 작업 조건을 기반으로 CLI 값을 계산하고 작업 재설계를 지원하는 프로그램의 적용 과정을 제시하는 것을 목적으로 한다. 각 작업 변수는 산업 현장에서 수행될 수 있는 일반적인 들기 작업 조건 범위를 고려하여 설정하였다.

본 예시에서는 무게가 서로 다른 4개의 중량물(A: 7kg, B: 10kg, C: 13kg, D: 17kg)을 4층 선반의 각 층에 한 종류씩 적재하는 작업을 가정하였으며, Figure 3과 같이 1층에 상자 A, 2층에 상자 B, 3층에 상자 C, 4층에 상자 D를 각각 배치하여 작업을 수행하는 상황을 설정하였다.

작업장의 바닥으로부터 상자가 놓이는 1층 선반 바닥까지의 수직 높이는 30cm이며, 해당 위치에는 무게 7kg의 상자 A가 분당 1회 들기 작업으로 수행된다. 2층의 수직 높이는 70cm로 설정하였고, 무게 10kg의 상자 B가 분당 4회 취급되는 것으로 가정하였다. 3층은 수직 높이 110cm로, 상자 C가 분당 2회 들기 작업으로 수행되며, 4층은 수직 높이 150cm로 설정하여 상자 D가 분당 1회 적재된다고 가정하였다. 모든 선반의 각 층 간 수직 높이는 40cm로 설정하였다.

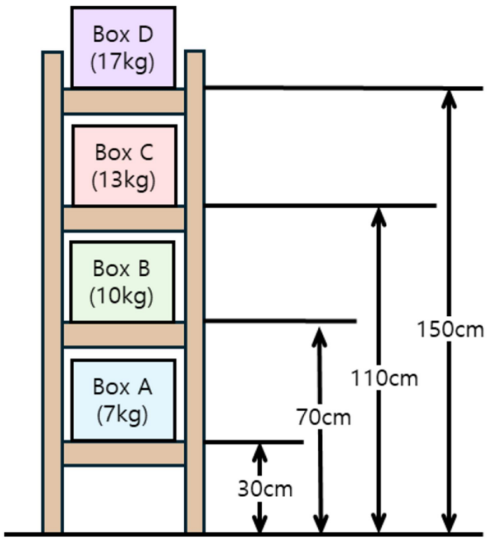

Figure 3. Schematic representation of a composite lifting task example

세부 작업 변수는 Table 1에 제시하였으며, 작업 위치에 대한 변수와 중량물에 대한 변수는 각각 Table 2와 Table 3으로 구분하여 제시하였다. Table 1에 제시된 변수를 기반으로 본 예시의 CLI Calculation을 수행하였으며, Table 2와 Table 3에 구분되어 제시된 변수에 기반하여 CLI Solution을 수행하였다.

Table 1. Example of input variables for CLI Calculation

Shelf level	Object	Weight (kg)	H (cm)	V (cm)	D (cm)	A (°)	F (lifts/min)	C
Level 1	A	7	50	30	10	0	1	Good
Level 2	B	10	50	70	30	0	4	Fair
Level 3	C	13	50	110	70	0	2	Poor
Level 4	D	17	50	150	110	0	1	Good

Note. H = horizontal location; V = vertical location; D = vertical travel distance; A = asymmetry angle; F = lifting frequency; C = coupling classification

Table 2. Example of input location variables for CLI Solution

Shelf level	H (cm)	V (cm)	D (cm)	A (°)
Level 1	50	30	10	0
Level 2	50	70	30	0
Level 3	50	110	70	0
Level 4	50	150	110	0

Note. H = horizontal location; V = vertical location; D = vertical travel distance; A = asymmetry angle

Table 3. Example of input load variables for CLI Solution

Object	Weight (kg)	F (lifts/min)	C
A	7	1	Good
B	10	4	Fair
C	13	2	Poor
D	17	1	Good

Note. F = lifting frequency; C = coupling classification

3. Results

3.1 Program structure

프로그램의 기능과 목적에 따라 Start page, CLI Calculation page, CLI Solution page 총 3개로 구분하여 개발하였다. Calculation과 solution 기능이 독립적으로 수행될 수 있도록 세부 페이지를 분리하였으며, 변수 입력 방식, 결과 산출 절차 및 표현 형식에서 서로 차이를 갖는다. [Start page]는 프로그램의 초기 화면으로서 분석 종류의 선택과 실행 시작 기능을 수행한다(Figure 4).

[CLI Calculation page]는 복합 들기 작업에 대한 CLI 값을 제시하는 기능을 수행하며, 데이터 입력, CLI 계산 실행, 결과 확인 및 데이터 추출의 과정에 따라 총 5개 영역으로 구성하였다(Figure 5). 즉, a 영역에 입력된 복합 들기 작업의 변수들은 b 영역에 저장되어 계산에 반영되며, c 영역의 'Calculate CLI'를 통해 CLI 계산을 시작할 수 있다. 계산 결과는 d 영역을 통해 계수 값, FILI, STLI 및 최종 CLI 값으로 제시되며, e 영역을 통해 해당 결과를 엑셀 파일로 추출할 수 있다.

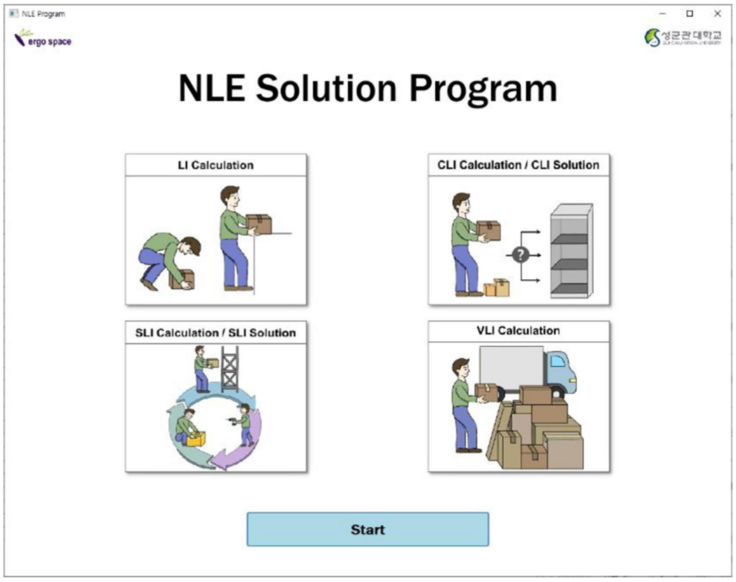

Figure 4. Screenshot of program execution: Start

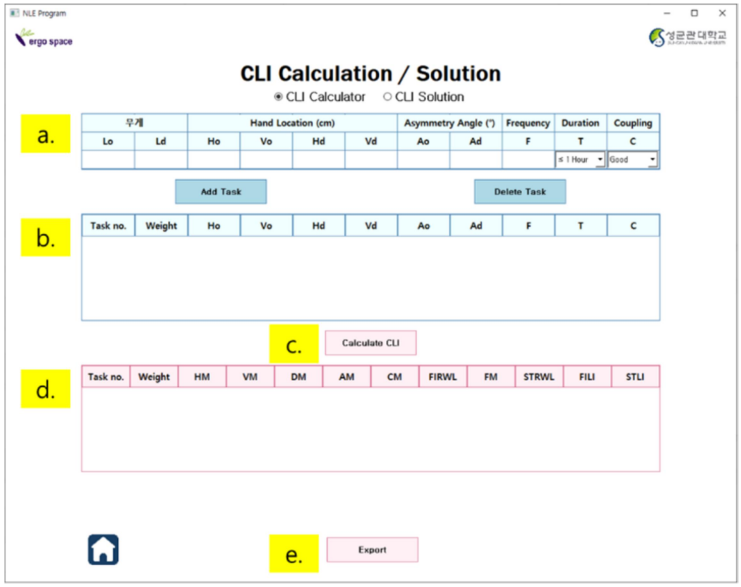

Figure 5. Screenshot of program execution: CLI Calculation page

[CLI Solution page]는 각 작업 위치에 중량물을 배치할 수 있는 모든 작업 배치 중 CLI 값을 기반으로 작업 부담이 가장 적은 최적의 중량물 배치를 제안한다. 즉, a-1 영역에서는 작업 위치에 대한 변수를, a-2 영역에서는 중량물에 따른 변수를 입력할 수 있으며, 입력된 변수는 각각 b-1 및 b-2 영역에 저장된다. 저장된 변수를 기반으로 c 영역에서 CLI Solution을 실행할 수 있으며, 결과는 하단 영역에 표기된다. 또한 e 영역의 'Export' 기능을 통해 생성된 모든 작업 배치 케이스에 대한 결과를 확인할 수 있다(Figure 6).

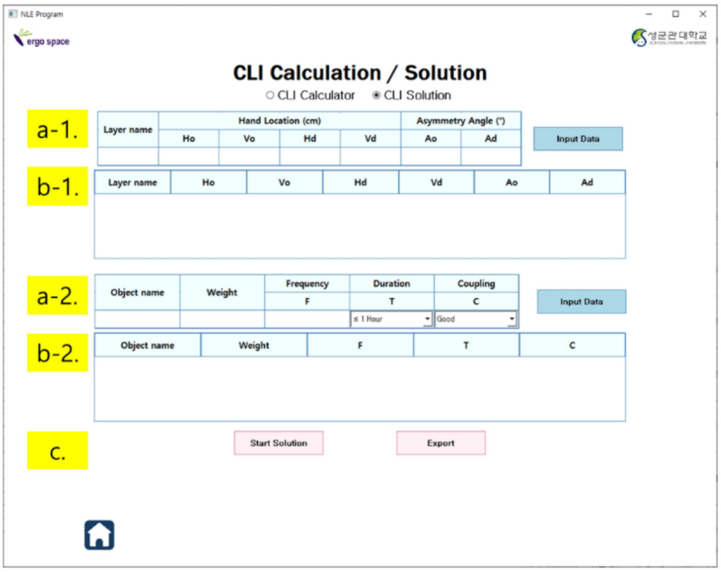

Figure 6. Screenshot of program execution: CLI Solution page

3.2 Program application

3.2.1 Results of CLI Calculation

본 연구에서 구현한 프로그램을 이용하여 설정된 복합 들기 작업에 대한 CLI 값을 계산한 결과, 해당 작업 배치 조건에서 CLI는 7.01로 분석되었다(Figure 7). 해당 값은 Table 1에 제시된 작업 배치와 입력 변수를 기반으로 계산된 결과이다.

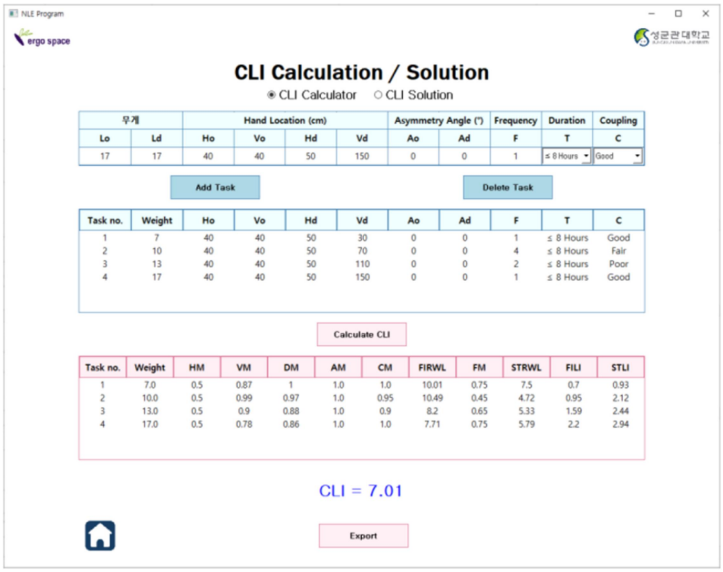

Figure 7. Screenshot of program execution: Results of CLI Calculation

3.2.2 Results of CLI Solution

본 예시에서는 4개 층에 4개의 중량물을 각각 한 종류씩 적재하는 조건을 설정하였으며, 이에 따라 해당 조건 하에 가능한 작업 배치는 총 24개 경우(예: Case 1: 1층-A, 2층-B, 3층-C, 4층-D; Case 2: 1층-A, 2층-B, 3층-D, 4층-C; … Case 23: 1층-D, 2층-C, 3층-A, 4층-B; Case 24: 1층-D, 2층-C, 3층-B, 4층-A)가 가능하게 된다.

모든 24개의 작업 배치들에 해당하는 CLI 분석 결과(Table 4), 작업 배치에 따라 CLI는 6.43 [Case 22]부터 7.69 [Case 13]까지의 범위를

Table 4. CLI Values by task assignment

Case no.	Shelf level				CLI	Case no.	Shelf level				CLI
	1	2	3	4			1	2	3	4	
Case 1	A	B	C	D	7.01	Case 13	C	A	B	D	7.69
Case 2	A	B	D	C	6.70	Case 14	C	A	D	B	7.14
Case 3	A	C	B	D	7.54	Case 15	C	B	A	D	7.01
Case 4	A	C	D	B	6.99	Case 16	C	B	D	A	6.70
Case 5	A	D	B	C	7.27	Case 17	C	D	A	B	7.09
Case 6	A	D	C	B	7.25	Case 18	C	D	B	A	6.79
Case 7	B	A	C	D	7.21	Case 19	D	A	B	C	7.33
Case 8	B	A	D	C	6.90	Case 20	D	A	C	B	7.31
Case 9	B	C	A	D	7.53	Case 21	D	B	A	C	6.73
Case 10	B	C	D	A	7.22	Case 22	D	B	C	A	6.43
Case 11	B	D	A	C	7.23	Case 23	D	C	A	B	6.95
Case 12	B	D	C	A	6.93	Case 24	D	C	B	A	6.65

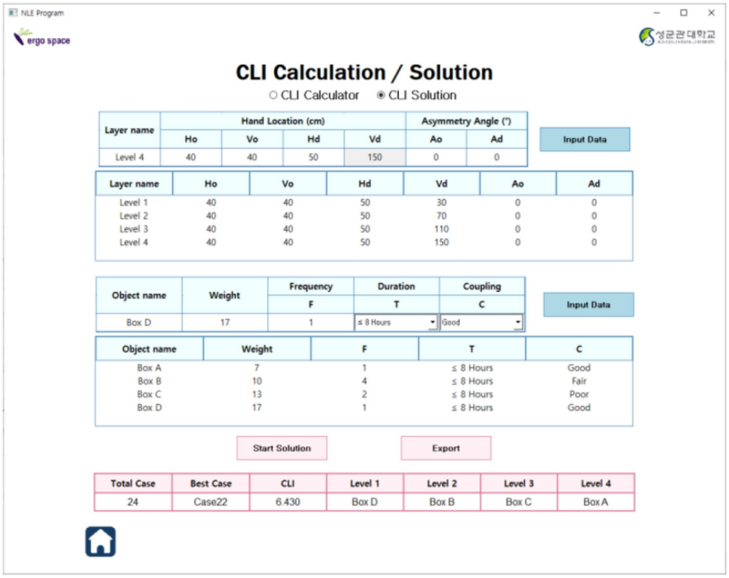

Figure 8. Screenshot of program execution: Results of CLI Solution

보였다. 기존 작업 배치인 Case 1(1층-A; 2층-B; 3층-C; 4층-D)의 경우 CLI가 7.01로 산출된 반면, Case 22인(1층-D; 2층-B; 3층-C; 4층-A) 배치로 작업하는 경우, CLI는 가장 낮은 6.43으로, 기존의 배치인 Case 1보다는 작업자의 작업 부담을 경감할 수 있는 Case 22를 제안하게 된다(Figure 8).

4. Discussion

본 연구는 복합 들기 작업의 평가 지표인 CLI의 적용 한계를 보완하고 실무 활용성을 높이기 위해 CLI 계산과 요추 부담을 최소화하는 최적 작업 배치 제안을 수행하는 프로그램을 개발하였다.

본 프로그램은 CLI 공식과 절차에 기반하여 계산 알고리즘을 체계화하였으며, 들기 작업의 변수를 입력하면 프로그램이 해당 정보를 자동으로 처리하여 CLI 값을 산출하도록 구현하였다. 특히 기존 연구들이 주로 평가 결과 제시에 초점을 두었던 것과 달리(Lu et al., 2014; Garg and Kapellusch, 2016; Pandalai et al., 2017), 본 연구에서는 입력 변수 조건 하에서 가능한 모든 작업 배치를 체계적으로 생성 및 비교하여, 작업 부담을 최소화할 수 있는 작업 대안을 도출하는 solution 기능을 포함하였다. 이를 통해 사용자는 별도의 수작업이나 반복 계산 없이 최적의 작업 설계를 효율적으로 확인할 수 있다.

임의의 복합 들기 작업 사례에 프로그램을 적용한 결과, 기존 작업 배치(1층-7kg; 2층-10kg; 3층-13kg; 4층-17kg) 조건에서 CLI는 7.01로 산출되었으며, 작업 배치를 개선(1층-17kg; 2층-10kg; 3층-13kg; 4층-7kg)했을 때 CLI 값은 6.43으로 감소하여 약 8.27%의 작업 부담 경감 효과가 확인되었다. 이러한 결과는 상대적으로 부하가 가장 적은 중량물(7kg)을 수직 위치가 가장 높은 4층에 배치하고, 높은 빈도로 인해 부하가 가장 큰 중량물(10kg)을 75cm에 가까운 2층에 배치함으로써 전체 작업의 누적 부담이 감소한 것으로 해석될 수 있다.

이는 복합 들기 작업에서 단순히 중량물의 무게뿐만 아니라 작업 배치 조건이 전체 작업 부담에 중요한 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 또한 이러한 결과는 복합 들기 작업의 작업 설계 단계에서 중량물 배치와 작업 위치를 조정하는 것만으로도 작업 부담을 일정 수준 감소시킬 수 있음을 보여준다. 따라서 개발된 프로그램이 단순히 위험 수준을 제시하는 데 그치지 않고, 구체적인 작업 개선 방향을 정량적으로 제안할 수 있음을 시사한다.

한편, 본 연구에서 개발된 프로그램의 계산 정확성은 알고리즘 개발 과정에서 단계별 검증을 통해 확인하였다. 각 단계에서 산출되는 주요 파라미터(FILI, STLI, FM 등)를 임의의 입력 값에 대해 수작업으로 계산한 결과와 프로그램의 계산 결과를 비교하여 알고리즘 구현의 정확성을 확인하였다. 이를 통해 CLI 계산 절차와 작업 배치 생성 및 평가 과정이 의도한 알고리즘에 따라 정상적으로 수행됨을 검증하였다.

다만, 본 연구는 프로그램의 구조와 적용 가능성을 제시하는 것을 목적으로 하였기 때문에 임의로 설정된 작업 조건을 기반으로 적용 사례를 제시하였다. 실제 산업 현장에서 수행되는 들기 작업은 더 복합적인 형태로 나타날 수 있으며, 들기 작업 외에도 작업 자세나 작업 환경, 개인 특성 등 다양한 요인이 요추 부담에 영향을 미칠 수 있다(Kerr et al., 2001; Al Amer, 2020). 또한 특정 중량물이 특정 작업 위치에서만 취급되거나 동일 중량물이 여러 위치에서 반복적으로 사용되는 경우, 또는 작업 순서가 고정되는 경우와 같은 다양한 작업 제약 조건이 존재할 수 있다. 본 프로그램은 가능한 작업 배치를 생성하고 각 배치에 대한 CLI 값을 계산하는 구조로 설계되었으며, 생성된 모든 작업 배치와 해당 CLI 결과를 엑셀 파일 형태로 확인하여 현장 조건에 따라 적용 가능한 작업 배치를 선택하여 비교·평가할 수 있게 하였다. 따라서 향후 연구에서는 실제 산업 현장에서 수집된 작업 데이터를 적용하여 프로그램의 타당성과 실효성을 검증하고, 이러한 제약 조건을 알고리즘 수준에서 반영하는 방안을 추가적으로 검토할 필요가 있다.

또한 본 프로그램의 실무 적용성을 보다 명확히 평가하기 위해, 향후 연구에서는 산업 현장의 실무자나 인간공학 전문가를 대상으로 프로그램의 사용성(usability)과 활용 가능성에 대한 평가를 수행할 필요가 있을 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 제안된 프로그램은 산업 현장의 실무자들이 복잡한 다양한 들기 작업을 수작업으로 분석해야 하는 부담을 줄이고, 작업 설계 및 재설계 단계에서 작업 부담을 고려한 의사결정을 지원하는 데 기여할 수 있을 것이라 사료된다.

5. Conclusions

본 연구에서는 복합 들기 작업에 대한 체계적인 평가와 작업 개선을 지원하기 위해, CLI 공식에 기반한 들기 작업 분석 및 재설계 지원 프로그램을 제안하였다. 이를 위해 CLI 계산 절차를 알고리즘으로 수립하였으며, 가능한 모든 작업 배치를 자동으로 생성하고 평가하여 작업 부담을 최소화할 수 있는 작업 방안을 도출하는 solution 알고리즘을 설계하였다.

본 연구에서 개발한 프로그램은 단순한 들기 지수 산출을 넘어, 작업 개선 및 재설계를 지원할 수 있는 분석 체계로 확장하였다. 특히 solution 기능은 분석 결과를 작업 개선안으로 연결함으로써, 본 프로그램이 단순한 평가 도구가 아닌 작업 개선을 위한 의사결정 지원 도구로 활용될 수 있음을 시사하였다.

본 프로그램은 산업 현장에서 수작업으로 평가하기 어려운 복잡한 복합 들기 작업에 대해 신속하고 정확한 분석을 가능하게 하여, 실무자들이 작업 위험 평가와 작업 재설계를 보다 효율적으로 수행하는 데 실질적인 도움을 제공할 것으로 기대된다. 다만, 본 연구에서 제안한 solution 기능은 가능한 작업 배치 조합을 생성하여 평가하는 방식이므로, 취급되는 중량물의 수가 크게 증가할 경우 조합 수가 기하급수적으로 증가할 수 있다. 그러나 일반적인 산업 현장에서 취급되는 중량물의 종류는 제한적인 경우가 많아 실무 적용에는 큰 제약이 없을 것으로 판단되며, 향후 연구에서는 보다 다양한 실제 작업 조건에서의 계산 효율성을 추가적으로 검토할 필요가 있다.

References

Al Amer, H.S., Low back pain prevalence and risk factors among health workers in Saudi Arabia: a systematic review and meta-analysis, *Journal of Occupational Health*, 62(1), e12155, 2020.

Chudoba, R., Sadílek, V., Rypl, R. and Vořechovský, M., Using Python for scientific computing: Efficient and flexible evaluation of the statistical characteristics of functions with multivariate random inputs, *Computer Physics Communications*, 184(2), 414-427, 2013.

Coenen, P., Gouttebarge, V., van der Burght, A.S., van Dieën, J.H., Frings-Dresen, M.H., van der Beek, A.J. and Burdorf, A., The effect of lifting during work on low back pain: A health impact assessment based on a meta-analysis, *Occupational and Environmental Medicine*, 71(12), 871-877, 2014.

Dempsey, P.G., Usability of the revised NIOSH lifting equation, *Ergonomics*, 45(12), 817-828, 2002.

Dempsey, P.G., McGorry, R.W. and Maynard, W.S., A survey of tools and methods used by certified professional ergonomists, *Applied Ergonomics*, 36(4), 489-503, 2005.

Fox, R.R., Lu, M.L., Occhipinti, E. and Jaeger, M., Understanding outcome metrics of the revised NIOSH lifting equation, *Applied Ergonomics*, 81, 102897, 2019.

Garg, A. and Kapellusch, J.M., The cumulative lifting index (CULI) for the revised NIOSH lifting equation: quantifying risk for workers with job rotation, *Human Factors*, 58(5), 683-694, 2016.

Gutierrez, M., Gomez, B., Retamal, G., Peña, G., Germany, E., Ortega-Bastidas, P. and Aqueveque, P., Comparing optical and custom IoT inertial motion capture systems for manual material handling risk assessment using the NIOSH lifting index, *Technologies*, 12(10), 180, 2024.

Kee, D., Applicability of NIOSH lifting equation to analysis of workload for patient transferring, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 25(2), 43-50, 2006.

Kerr, M.S., Frank, J.W., Shannon, H.S., Norman, R.W., Wells, R.P., Neumann, W.P., Bombardier, C. and Ontario Universities Back Pain Study Group, Biomechanical and psychosocial risk factors for low back pain at work, *American Journal of Public Health*, 91(7), 1069, 2001.

Kim, N.S. and Kim, Y., Analysis of trends in patients with work-related musculoskeletal disorders and literature review of risk factors and prevalence, *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, 33(3), 298-307, 2023.

Kong, Y.K., Shim, H.H., Keum, H.J., Son, S.J., Yang, H.S., Lee, J.H. and Lee, D.K., Development and comparative study of lifting index (LI) and composite lifting index (CLI) program for evaluating various lifting tasks, *Proceedings of the Ergonomics Society of Korea Conference*, 90-90, 2024.

Lowe, B.D., Dempsey, P.G. and Jones, E.M., Ergonomics assessment methods used by ergonomics professionals, *Applied Ergonomics*, 81, 102882, 2019.

Lu, M.L., Waters, T.R., Krieg, E. and Werren, D., Efficacy of the revised NIOSH lifting equation to predict risk of low-back pain associated with manual lifting: a one-year prospective study, *Human Factors*, 56(1), 73-85, 2014.

Lu, M.L., Putz-Anderson, V., Garg, A. and Davis, K.G., Evaluation of the impact of the revised National Institute for Occupational Safety and Health lifting equation, *Human Factors*, 58, 667-682, 2016.

Mohan, S., Anand, A., Haq, M.I.U., Raina, A., Kumar, R. and Kamal, M., Development of a NIOSH-based software tool for musculoskeletal disorders, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 27(4), 860-865, 2021.

Pandalai, S.P., Wheeler, M.W. and Lu, M.L., Non-chemical risk assessment for lifting and low back pain based on Bayesian threshold models, *Safety and Health at Work*, 8(2), 206-211, 2017.

Punnett, L., Prüss-Ütün, A., Nelson, D.I., Fingerhut, M.A., Leigh, J., Tak, S. and Phillips, S., Estimating the global burden of low back pain attributable to combined occupational exposures, *American Journal of Industrial Medicine*, 48(6), 459-469, 2005.

Snook, S.H. and Ciriello, V.M., The design of manual handling tasks: revised tables of maximum acceptable weights and forces, *Ergonomics*, 34(9), 1197-1213, 1991.

Spector, J.T., Lieblich, M., Bao, S., McQuade, K. and Hughes, M., Automation of workplace lifting hazard assessment for musculoskeletal injury prevention, *Annals of Occupational and Environmental Medicine*, 26(1), 15, 2014.

Van Rossum, G., Python programming language, *Proceedings of the USENIX Annual Technical Conference*, 41(1), 1-36, 2007.

Washington State, *WAC 296-62-05174* [http://www.lni.wa.gov/wisha], 2000.

Waters, T.R., Strategies for assessing multi-task manual lifting jobs, *Proceedings of the Human Factors Society 35th Annual Meeting*, San Francisco, California, 1991.

Waters, T.R., Putz-Anderson, V. and Garg, A., Applications manual for the revised NIOSH lifting equation, *NIOSH*, 1994.

Waters, T.R., Baron, S.L., Piacitelli, L.A., Anderson, V.P., Skov, T., Haring-Sweeney, M., Wall, D.K. and Fine, L.J., Evaluation of the revised NIOSH lifting equation, *Spine*, 24, 386-394, 1999.

Author listings

Yong-Ku Kong: ykong@skku.edu
Highest degree: Ph.D., Industrial Engineering, The Pennsylvania state University
Position title: Professor, Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University
Areas of interest: Physical ergonomics, WMSDs, Occupational safety and health, Wearable exoskeleton design

Hyun-Ho Shim: shim2906@naver.com
Highest degree: M.S., Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University
Position title: Ph.D. Student, Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University
Areas of interest: Physical ergonomics, WMSDs, Analysis of Work Loads, EMG, Motion Capture, AnyBody

Hyunji Keum: khz1996@naver.com
Highest degree: M.S., Industrial Design engineering, Korea University of Technology and Education
Position title: Ph.D. Student, Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University
Areas of interest: Physical ergonomics, WMSDs, Analysis of Work Loads, Ergonomics design

Hyunseok Yang: akayhs11@g.skku.edu
Highest degree: B.S., Safety Engineering, Dongguk University
Position title: M.S. Student, Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University
Areas of interest: Vision-based motion analysis, Joint angle estimation, Ergonomic risk assessment, Posture evaluation, Musculoskeletal disorder prevention

JaeHwi Lee: j1997h@naver.com
Highest degree: B.S., Mechanical and Biomedical Engineering, Kangwon National University
Position title: M.S. Student, Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University
Areas of interest: Exoskeleton design and evaluation, Preventive management of WMSDs, Workload assessment, Ergonomic risk assessment, Improvement of the working environment

Sukyung Cha: judy7061@naver.com
Highest degree: B.S., Department of Psychology, Sungkyunkwan University
Position title: M.S. Student, Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University
Areas of interest: Physical ergonomics, WMSDs, Wearable exoskeletons, Workload assessment

Dokyeong Lee: yui5523@g.skku.edu
Highest degree: M.S., Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University
Position title: M.S., Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University
Areas of interest: Physical ergonomics, WMSDs, the NIOSH Lifting Equation, Workload assessment