JESK J Ergon Soc Korea 2026; 45(3): 177-189
https://dx.doi.org/10.5143/JESK.2026.45.3.177
https://jesk.or.kr eISSN:2093-8462

Development of an SLI-Based Program for Sequential Lifting Task Analysis and Task Sequence Optimization

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

Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 16419

SLI 기반 순차 들기 작업 분석 및 작업 순서 최적화 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 : February 09, 2026
Revised : May 04, 2026
Accepted : May 11, 2026

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

Objective: The aim of this study was to develop programs that calculates the Sequential Lifting Index (SLI) to evaluate workers' physical workload during sequential lifting tasks, and to propose an optimized task sequence that minimizes cumulative physical load.

Background: Work-related low back injuries have long been a significant occupational health concern with low back pain recognized as one of the leading causes of disability associated with musculoskeletal disorders. Lifting tasks are closely associated with an increased risk of lumbar spine disorders, and the types of these tasks have become increasingly diverse. Among them, sequential lifting tasks refer to the consecutive performance of multiple lifting activities within a work period. To properly assess the influence of task order in the sequential lifting tasks, the Sequential Lifting Index (SLI) should be appropriately applied to evaluate physical workload. However, the computational complexity of SLI Calculation poses a barrier to its widespread adoption and practical application in industrial settings.

Method: In this study, an algorithm for calculating Sequential Lifting Index (SLI) in sequential lifting tasks was systematically developed based on the SLI formula. In addition, an optimization algorithm-referred to as the SLI Solution algorithm-was designed to identify the optimal task sequence that minimizes lumbar load by comparing the SLI values across all possible task orders. Possible task sequences were limited to those with a total continuous working duration of 240 minutes or less, reducing computational burden and ensuring practical applicability. To evaluate the applicability of the developed programs, a hypothetical scenario involving sequential lifting tasks was constructed and analyzed.

Results: This study was conducted in two phases, utilizing two main functions: SLI Calculation and SLI Solution. First, the SLI Calculation function computes the SLI for a given sequential lifting task based on user-defined task parameters in a specified order. Then, the SLI Solution function incorporates the required number of repetitions for each task element, automatically generates all possible task sequences, and compares their corresponding SLI values to determine the optimal task sequence that minimizes cumulative physical workload. For all analyses, the total continuous working duration was assumed not to exceed 240 minutes. In the applied case study, two lifting tasks (Task A and B) and one non-lifting task (Task C) were defined, each with a duration of 50 minutes. Tasks A and C were performed once, while Task B was

performed twice, resulting in a task sequence of ABBC for initial evaluation. The SLI Calculation yielded an SLI value of 1.98 for this task sequence. Subsequently, the SLI Solution function generated and analyzed 12 possible task sequence permutations based on the given constraints. Among these, the four optimal sequences-ABCB, BCBA, BACB, and BCAB-produced reduced the SLI values of 1.60 indicating a significant improvement in ergonomic efficiency.

Conclusion: This study supports the evaluation and redesign of sequential lifting tasks through the development of programs that enables both SLI-based workload assessment and task sequence optimization. In particular, the SLI Solution function allows the rapid identification of task sequences that minimized workloads, thereby enhancing ergonomic efficiency and practical applicability.

Application: The developed programs are expected to provide practical support for field practitioners by enabling rapid and accurate evaluation of complex sequential lifting tasks that are challenging to assess manually in industrial environments. This, in turn, enhancing the efficiency of risk analysis, task design, and process work improvement.

Keywords: NIOSH lifting equation, Sequential Lifting Index (SLI), Lifting analysis tools, Manual material handling (MMH), Job rotation

1. Introduction

작업 관련 허리 부상은 오래전부터 빈번하게 발생하는 대표적인 직업성 손상 중 하나로 보고되어 왔으며, 개인의 기능적 장애를 유발할 뿐 아니라 사회·경제적으로도 큰 비용 부담을 초래하는 문제로 간주되어 왔다(Waddell and Burton, 2001). 특히 전 세계 160개국 중 근골격계 질환으로 인한 장애의 가장 큰 원인이 요통인 것으로 나타났으며(WHO, 2022), 이에 따라 요통의 발생 원인을 정확히 파악하고 이를 예방하기 위한 체계적인 접근이 필수적이라 할 수 있다.

이와 관련하여 들기 작업은 허리의 굽힘 자세 및 반복적인 과부하를 유발하여 요추 질환 발생 위험을 높이는 주요 요인으로 널리 알려져 있다(Punnett et al., 2005; Coenen et al., 2014). Waters et al. (2016)에 따르면 들기 작업의 유형은 (1) 특정 높이, 무게 등의 환경에서 들기 작업을 반복 수행하여 작업 변수가 변동 없이 일정한 단일 들기 작업(single lifting task), (2) 변수가 다른 10개 이하의 여러 단일 들기 작업을 반복 수행하는 복합 들기 작업(composite lifting task), (3) 작업자가 작업 순환으로 특정 작업장에서 일정 시간 동안 단일 들기 작업 또는 복합 들기 작업을 수행한 후, 다른 작업장으로 이동하여 또 다른 들기 작업을 수행하는 순차 들기 작업(sequential lifting task)으로 구분할 수 있다.

이와 같이 다양한 유형의 들기 작업으로 인한 요통과 작업 관련 부상을 효과적으로 예방하기 위해서는 작업 특성을 적절히 반영할 수 있는 정확한 평가 지표를 사용해야 한다. 특히 순차 들기 작업은 작업자들이 여러 난이도의 작업을 번갈아 수행함으로써 신체에 걸리는 부하가 한 곳에 집중되지 않도록 하는 것을 목적으로 하는 작업 순환(Jorgensen et al., 2005; Azizi et al., 2010; Comper and Padula, 2014)의 한 형태로 볼 수 있다. 따라서 순차 들기 작업을 평가할 때에는 작업 순서가 작업자의 신체 부담 정도에 미치는 영향도 반영해야 한다.

이에 따라, 순차 들기 작업으로 인한 신체 부담을 추정할 수 있는 해결방안으로 기존 Revised NIOSH Lifting Equation (Waters et al., 1994)을 확장한 SLI (Sequential Lifting Index)가 제안되었다(Waters et al., 2007). SLI는 CLI (Composite Lifting Index, Waters et al., 1994) 공식을 기반으로 개발되었으며, 동일 작업량에 대해 작업 순서와 각 작업의 상대적 작업시간까지 고려한다는 특징이 있다. SLI의 수식은 식 (1)과 같다.

$$SLI = LI_1 + (LI_{max1} - LI_1) \times K, \quad \text{---- eq.} \quad (1)$$

where

$$K = \frac{LI_{max1} \times TF_1 + LI_{max2} \times TF_2 + LI_{max3} \times TF_3 + \cdots + LI_{maxn} \times TF_n}{LI_{max1}}$$

LI_n : FM actual duration 기반, 산출한 n^{th} 작업의 LI 또는 CLI
LI_{maxn}: FM total duration 기반, 산출한 n^{th} 작업의 LI 또는 CLI
TF_n : 4시간(240분)을 적용한, n^{th} 작업의 작업시간 비율(Time Fraction)

FM actual duration: 각 작업 요소의 최대 연속 작업시간에 해당하는 FM (Frequency Multiplier) 값
FM total duration : 전체 들기 작업의 최대 연속 작업시간에 기반한 각 작업 요소 별 FM 값

여기서 LI은 해당 작업 요소가 독립적으로 수행될 때의 신체 부담 수준을 나타내며, LI_{max}는 전체 순차 들기 작업 조건을 기준으로 해당 작업 요소가 가질 수 있는 최대 부담 수준을 의미한다. 특히 LI_{max1}은 부담이 가장 높은 작업으로서 기준값이 되어, 이후 작업들의 누적 부담이 이 기준에 상대적으로 반영되는 방식으로 SLI 산출에 기여한다. TF는 4시간 대비 각 작업 요소가 차지하는 시간 비율로, 해당 작업이 작업 부담에 기여하는 정도를 나타낸다. 이러한 구성 요소를 통해 SLI는 개별 작업의 부담 수준뿐만 아니라, 최대 부담 작업의 영향과 작업 수행 시간 비중을 함께 반영하여 순차 들기 작업에서의 누적 신체 부담을 평가할 수 있도록 설계된 지표이다.

다만 보는 바와 같이, 식 (1)에 제시된 SLI 수식은 개념적 이해가 어렵고, 계산 절차가 복잡하여 산업 현장에서 실무자들이 쉽게 사용하는 데에는 많은 어려움이 있다. 실제로 Bosch et al. (2015)은 평가자의 80% 이상이 CLI (Composite Lifting Index), SLI (Sequential Lifting Index), 그리고 VLI (Variable Lifting Index)와 같은 들기 작업 평가 지표의 존재조차 인지하지 못한다고 보고하였으며(Choobineh et al., 2024), 이는 산업 현장에서 평가 지표에 대한 인식과 활용이 매우 부족함을 시사한다. 이로 인해 순차 들기 작업을 단일 들기 작업의 평가 지표인 LI (Lifting Index)를 적용하여 평가할 경우, 작업 요소의 순서에 따른 영향을 반영하지 못하며, 과대평가나 과소평가할 우려가 있어 적절한 평가가 수행되기 어렵다(Waters et al., 2007).

이에 본 연구에서는 순차 들기 작업 분석과 작업 설계 및 개선 과정에서의 의사결정을 지원하기 위한 프로그램을 개발하고자 한다. 기존 연구가 SLI의 이론적 체계 수립에 기여했다면, 본 연구는 이를 실무에서 활용 가능한 형태로 구현하고, 나아가 작업 순서 최적화 기능을 통해 작업 설계 단계에서의 의사결정을 정량적으로 지원한다는 점에서 실무적 기여를 갖는다. 이를 위해 (1) SLI 산출 공식에 기반한 calculation 알고리즘을 설계하고, (2) 작업 설계 및 개선을 지원하는 보조 도구로서 가능한 모든 작업 순서를 자동 생성·비교하여 최적의 작업 순서를 제안하는 solution 알고리즘과 분석 체계를 구축하며, (3) 개발된 프로그램의 적용을 검증하기 위해 들기 작업 사례를 적용하고자 한다.

2. Method

2.1 Design of SLI Calculation algorithm

SLI Calculation은 순차 들기 작업 시 작업 순환 동안 수행되는 작업 순서에 대한 SLI를 산출하는 기능을 수행한다. 본 연구에서 사용된 SLI Calculation 개발에 적용된 알고리즘의 전체적인 처리 절차는 Figure 1과 같다.

Step 1. 변수 입력 & Step 2. 계수 및 FILI 산출

첫 번째 단계는 평가하고자 하는 순차 들기 작업을 구성하는 각 작업 요소들의 변수를 입력 받는다. 이때, SLI Calculation은 분석하고자 하는 작업 순서와 동일한 순서로 작업 변수를 입력하도록 설계하였다. 이후 입력된 작업 변수를 이용하여 각 작업의 계수 값과 FILI (Frequency Independent Lifting Index)를 산출한다.

Step 3. FM actual duration 및 FM total duration 산출

본 단계에서는 각 작업 요소의 FM actual duration과 FM total duration을 산출한다. 앞서 언급한 바와 같이, FM actual duration은 각 작업 요소의 최대 연속 작업시간을, FM total duration은 전체 들기 작업의 최대 연속 작업시간을 기준으로 산출되므로(Waters et al., 2007), 작업 순서에 따른 영향이 반영된다.

Step 4. 작업 유형 판별 및 LI (or CLI) & LI_{max} (or CLI_{max}) 산출

본 단계에서는 순차 들기 작업을 구성하는 작업 요소의 작업 유형을 판별한 뒤, LI (or CLI)와 LI_{max} (or CLI_{max})를 산출한다. 작업 요소가 단일 들기 작업일 경우, Step 4-1과 같이 LI와 LI_{max}를 바로 산출하는 반면, 작업 요소가 복합 들기 작업일 경우에는 CLI 공식을 적용하여 다시 누적된 빈도에 대한 FM actual duration과 FM total duration을 구한 뒤 CLI와 CLI_{max}를 각각 산출하는 과정을 거치도록 했다 (Step 4-2).

Step 5. TF (Time Fraction) 산출

SLI 계산에 필요한 TF 산출을 위해 각 작업 요소마다 해당 작업 요소의 전체 들기 작업시간을 240분으로 나누어 산출하도록 설계하였다.

Step 6. SLI 산출

마지막 단계에서는 선행 단계에서 산출된 계수, LI, LI_{max} 등의 파라미터를 SLI 공식에 대입하여, 해당 순차 들기 작업의 최종 SLI 값을 산출한다.

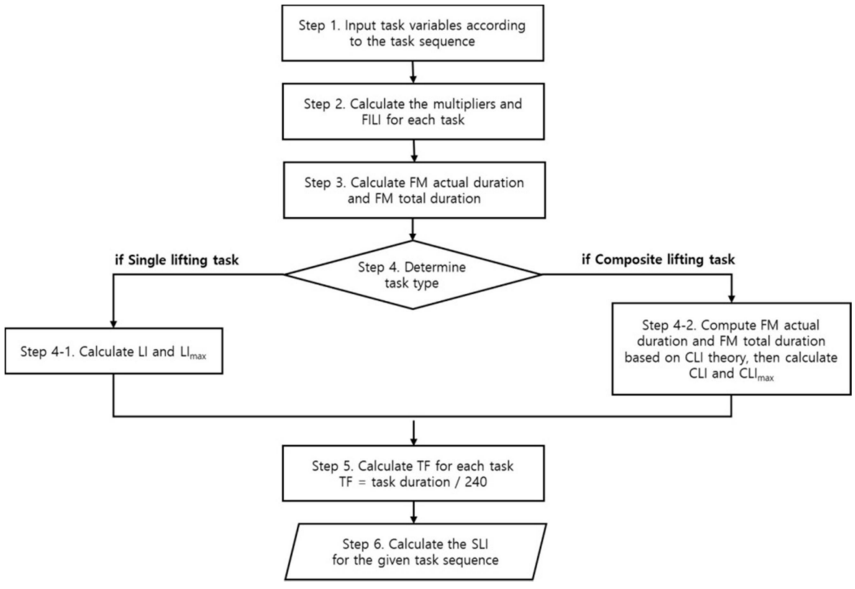

Figure 1. Structure of SLI Calculation algorithm

2.2 Design of SLI Solution algorithm

SLI Solution 알고리즘은 산출된 SLI 값을 기반으로 요추 부담이 가장 적은 최적의 작업 순서를 제안하는 기능을 수행한다. 해당 알고

리즘의 전체적인 절차는 Figure 2에 제시하였다.

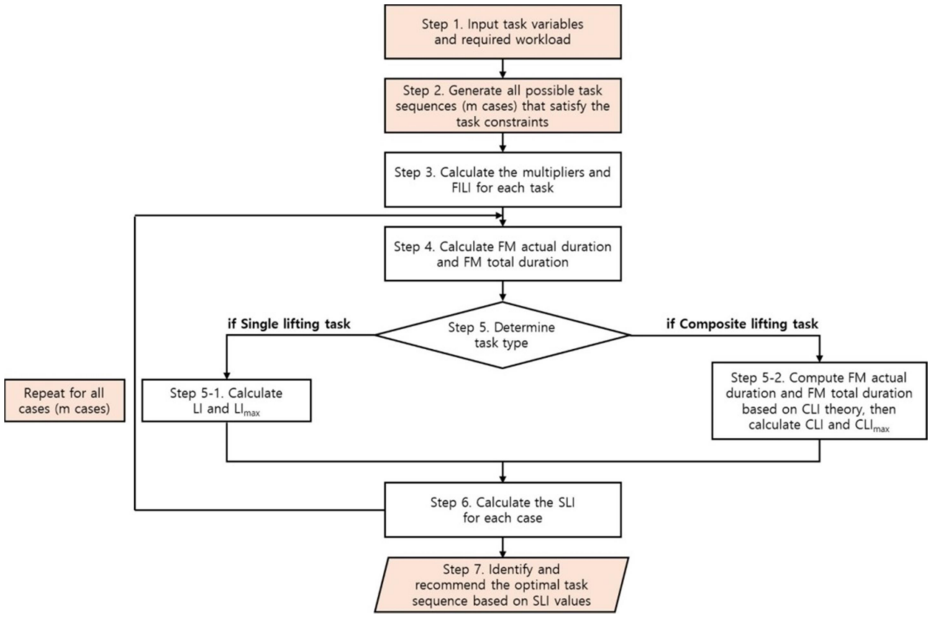

Figure 2. Structure of SLI Solution algorithm

Step 1. 변수 입력

기본적인 변수 입력 방식은 SLI Calculation과 유사하나, SLI Solution에서는 각 작업 요소의 수행 횟수 즉, 작업량을 추가로 입력한다는 점에서 차이가 있다.

Step 2. 가능한 모든 작업 순서(대안) 생성

본 단계는 입력된 각 작업 요소의 작업시간과 수행 횟수, 즉 작업량을 바탕으로 가능한 모든 작업 순서를 조합한다. SLI는 들기 작업의 최대 연속 작업시간이 240분을 초과하지 못한다고 가정되기 때문에(Waters et al., 2007), 본 알고리즘에서도 최대 연속 작업시간이 240분을 초과하지 않는 경우만을 대상으로 작업 순서 케이스를 생성하도록 설계하였다.

Step 3 ~ Step 6. 각 케이스 별 SLI 산출

Step 3부터 Step 6는 생성된 모든 작업 순서 케이스에 대해 각각의 SLI를 산출하는 단계이다. 이때 각 케이스의 SLI 산출 절차는 2.1절에서 설명한 SLI Calculation과 동일하게 적용된다.

Step 7. 최적 대안(작업 순서) 제안

해당 단계에서는 최적의 작업 순서를 제안하도록 설계하였다. 이를 위해 앞 단계에서 산출된 모든 작업 순서 케이스의 SLI 값을 비교하여, 작업 부담이 가장 적은 즉, SLI 값이 가장 적은 작업 순서를 최적해로 제시한다.

2.3 Application example setup

본 프로그램의 적용을 확인하기 위해 8시간 동안 Task A, Task B, Task C를 순차적으로 수행하는 임의의 순차 들기 작업을 설정하였다. 본 사례는 프로그램의 기능 검증을 주된 목적으로 구성된 가상 시나리오로, 단일 들기 작업과 복합 들기 작업을 포함한 순차 들기 작업에서 발생할 수 있는 작업 유형을 반영하고자 하였다. 작업 중량, 작업시간, 반복 횟수 등의 설정 값은 Waters et al. (1994)의 Revised NIOSH Lifting Equation에서 제시된 작업 변수의 적용 범위 및 관련 선행 연구(Waters et al., 2007)에서 보고된 일반적인 순차 들기 작업 조건을 참고하여, 실제 산업 현장에서 관찰될 수 있는 수준의 범위 내에서 설정하였다.

Task A는 8kg 중량물을 취급하는 단일 들기 작업으로 설정하였으며, Task B는 6kg 및 15kg 중량물을 취급하는 두 개의 작업 요소로 구성된 복합 들기 작업으로 정의하였다. 마지막으로 Task C는 들기 작업이 아닌 일반 작업으로 설정하였으며, 들기 작업에 해당하는 Task A와 Task B의 세부 작업 변수는 Table 1에 제시하였다.

Task A, B, C는 모두 50분간 수행되며, Task A, C는 각각 1회, Task B는 2회 반복 수행된다고 가정하였다. 작업 간에는 10분의 휴식을 포함하였으며, 전체 수행 순서는 ABBC로 설정하였다. 즉, 본 순차 들기 작업은 단일 들기 작업(Task A)을 수행한 후, 복합 들기 작업(Task B)을 연속으로 두 차례 수행하고, 마지막으로 들기 작업이 아닌 일반 작업(Task C)을 수행하는 방식으로 구성된다. 작업 순서 및 작업 구성에 대한 개요는 Figure 3과 같다.

Table 1. Example of input variables for SLI Calculation

Task name	Weight (kg)	H (cm)	V (cm)	D (cm)	A (°)	F (lifts/min)	C
Task A	8	43	170	79	0	1	Poor
Task B	6	55	160	74	0	2	Fair
	15	44	133	23	0	1	Good

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

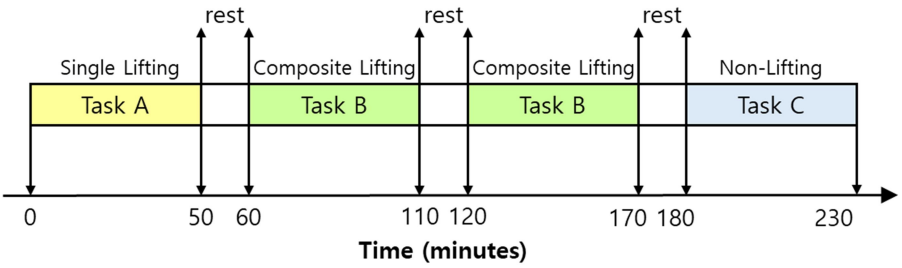

Figure 3. Visual summary of task setup for SLI Calculation

3. Results

3.1 Program structure

각 알고리즘의 기능과 목적이 다르기 때문에 calculation과 solution 기능이 독립적으로 수행될 수 있도록 SLI Calculation page와 SLI Solution page로 구분하여 개발하였다. 두 페이지는 변수 입력 방식, 계산 절차 및 결과 표현 형식에서 서로 차이를 갖는다.

3.1.1 SLI Calculation page

SLI Calculation page는 작업 순서가 정해진 순차 들기 작업에 대한 SLI 값을 제시하는 기능을 수행한다. 본 페이지는 데이터 입력부터 SLI 계산 실행 및 결과 확인 과정에 따라 총 5개(a~e) 영역으로 구성하였다(Figure 4).

먼저, a 영역에 각 작업 요소의 변수를 기입한 후, b 영역의 'Input Data'를 통해 입력할 수 있다. 이때, 순차 들기 작업을 이루는 작업 요소는 서로 다른 작업 유형을 가질 수 있으므로 task type을 Single lifting task, Multi lifting task, Non-lifting task 중 하나로 지정하게 하였다.

입력된 작업 변수는 c 영역에 저장되며, 이때 실제 작업 순서와 동일한 순서로 입력되어야 한다. 작업 입력의 편의성을 높이기 위해 b 영역의 'List Up'과 'List down' 버튼으로 이미 입력된 작업 요소의 순서를 수정할 수 있도록 하였다. d 영역의 'Calculate SLI'를 통해 SLI 계산을 실행하며, e 영역을 통해 계수 값을 포함한 주요 파라미터 값들과 최종 SLI 값을 확인할 수 있다.

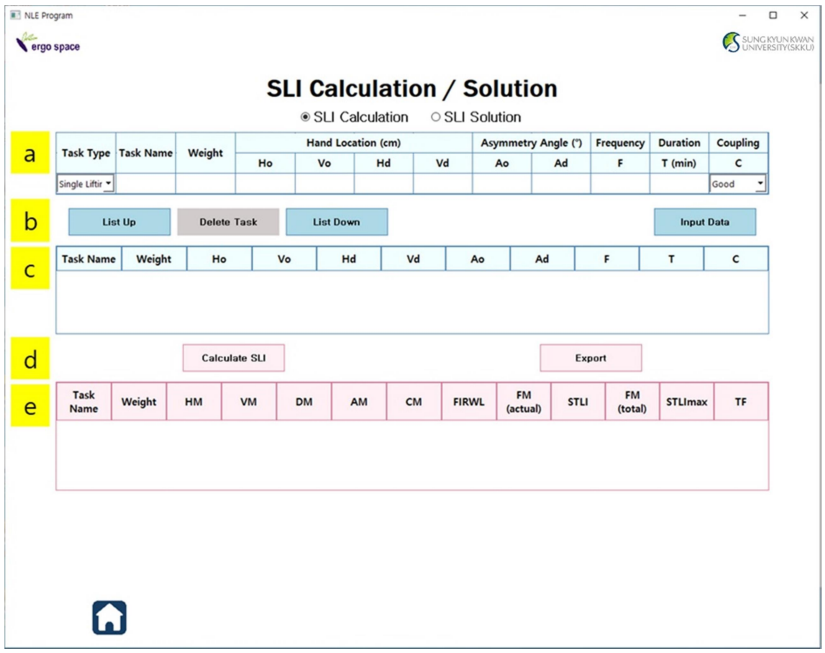

Figure 4. Screenshot of program execution: SLI Calculation page

3.1.2 SLI Solution page

SLI Solution page는 전체 들기 작업의 최대 연속 작업시간이 240분을 초과하지 않는 조건을 충족하는 모든 작업 순서 중 작업 부담이 가장 적은 최적의 작업 순서를 제안하는 기능을 수행한다. 페이지의 전반적인 화면 구성은 SLI Calculation page와 유사하나, 작업 변수 입력과 결과 표기 형식에서 차이가 존재한다(Figure 5).

SLI Solution page에서는 a 영역에 변수를 기입할 때 작업 요소 별 작업 횟수, 즉 작업량을 추가로 입력해야 한다. 또한, 작업 변수를 c 영역에 작업 요소를 입력할 때 SLI Calculation과 달리 변수 입력 순서는 고려되지 않으며, 각 작업 요소는 1회만 입력하면 된다. 이때 b 영역의 'Input Data'를 통해 변수를 c 영역으로 입력하지만, 변수의 순서는 고려되지 않기 때문에 SLI Calculation과 달리 입력 변수의 순서를 수정하는 'List Up'과 'List down' 기능은 제거하였다.

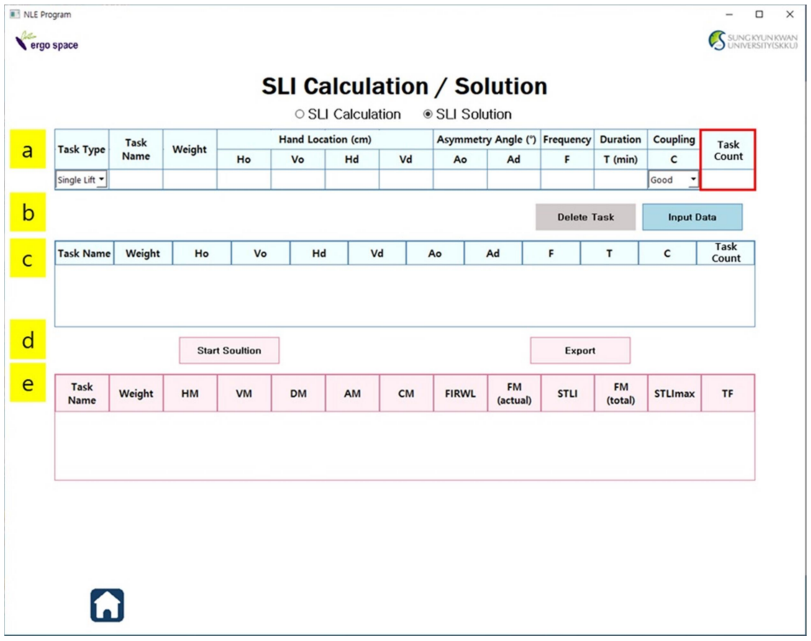

Figure 5. Screenshot of program execution: SLI Solution page

SLI Solution 역시 d 영역의 'Start Solution'을 통해 실행을 시작할 수 있다. e 영역에 표기되는 결과의 경우, 계수 값과 같은 파라미터의 표기 방식은 SLI Calculation page와 동일하나, 하단에 표 형태로 최적 작업 순서와 해당 SLI 값 등이 제시된다는 점에서 SLI Calculation의 결과 표기 형식과 차이가 있다. 두 페이지 간 자세한 결과 표기의 차이는 Figure 6과 Figure 7을 통해 확인할 수 있다.

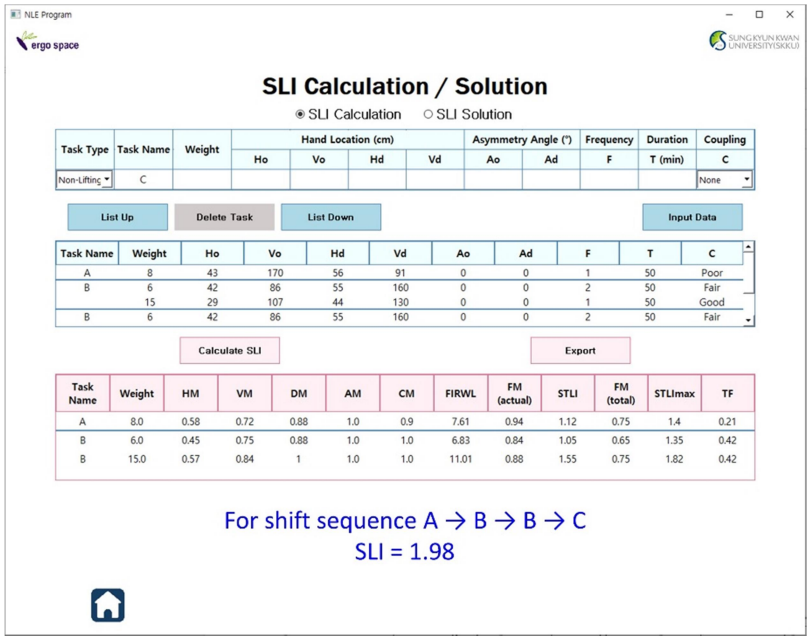

Figure 6. Screenshot of program execution: Results of SLI Calculation

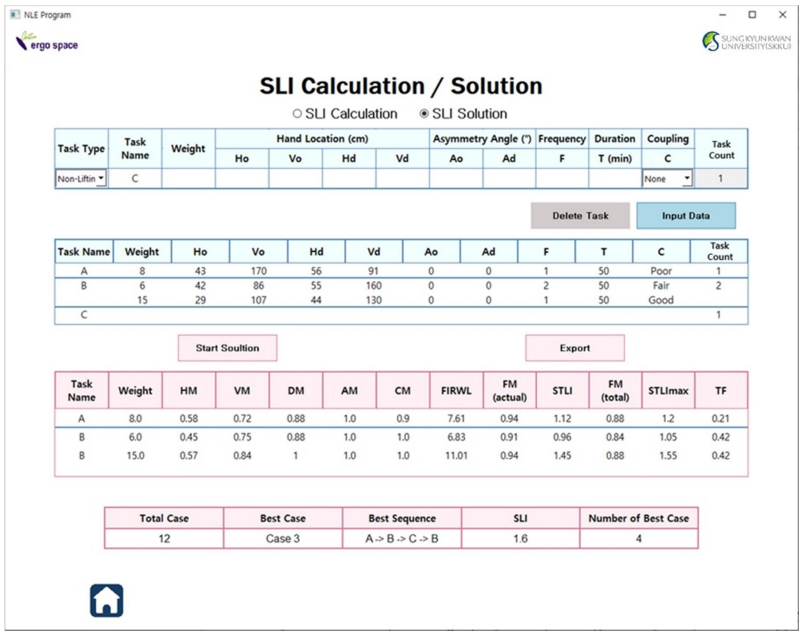

Figure 7. Screenshot of program execution: results of SLI Solution

3.2 Program application

3.2.1 Results of SLI Calculation

본 연구에서 개발된 프로그램을 이용하여 설정된 순차 들기 작업의 SLI 값을 계산한 결과, 해당 작업 순서(ABBC)일 때 SLI는 1.98로 도출되었다. 해당 값은 들기 작업인 Task A, B의 변수를 Table 1에 제시된 작업 변수를 입력하고, 들기 작업이 아닌 Task C의 변수는 공란으로 두어 계산된 결과이다.

3.2.2 Results of SLI Solution

본 예시에서는 3개 작업 요소(Task A, Task B, Task C)에 대해 Task A와 Task C는 1회, Task B는 2회 작업하는 조건을 설정하였다. 이에 따라 해당 조건 하에 가능한 작업 순서는 총 12개 경우(Case 1: ABCB; Case 2: BBAC; Case 3: BCBA; … ; Case 11: ACBB; Case 12: CBAA)가 가능하게 된다.

Table 2. SLI values by task sequence

Case no.	Task sequence				SLI	Case no.	Task sequence				SLI
Case 1	A	B	C	B	1.60	Case 7	A	B	B	C	1.98
Case 2	B	B	A	C	1.98	Case 8	B	A	C	B	1.60
Case 3	B	C	B	A	1.60	Case 9	C	B	B	A	1.98
Case 4	C	A	B	B	1.98	Case 10	B	C	A	B	1.60
Case 5	B	A	B	C	1.92	Case 11	A	C	B	B	1.66
Case 6	B	B	C	A	1.66	Case 12	C	B	A	A	1.92

모든 12개 작업 순서 별 SLI를 분석한 결과(Table 2), 작업 순서에 따라 SLI는 1.60 (Case 1, 3, 8, 10)부터 1.98 (Case 2, 4, 7, 9)까지의 범위를 보였다. 기존 작업 배치인 Case 7 (ABBA)의 경우 SLI가 1.98로 산출된 반면, Case 1 (ABCB), Case 3 (BCBA), Case 8 (BACB), Case 10 (BCAB)과 같은 순서로 작업할 경우, SLI는 가장 낮은 1.60이 된다. 따라서, 프로그램은 기존 배치인 Case 7보다 작업자의 작업 부담을 경감할 수 있는 Case 1, 3, 8, 10을 제안하게 된다.

4. Discussion

본 연구는 순차 들기 작업의 평가 지표인 SLI의 적용상 한계를 보완하고 활용성을 높이기 위해, 해당 순차 들기 작업에 대한 SLI 계산은 물론, 작업 부담을 최소화하는 최적 작업 순서를 제안하는 프로그램을 개발하였다.

본 프로그램은 SLI 공식과 절차에 기반하여 calculation 알고리즘을 체계화하였으며, 입력된 변수를 기반으로 프로그램이 SLI 값을 산출하도록 구현하였다. 특히, 순차 들기 작업을 구성하는 각 작업 요소의 작업 유형을 고려하여, 단일 들기 작업 또는 복합 들기 작업에 따라 프로그램이 LI와 LI_{max} 또는 CLI와 CLI_{max}를 자동으로 선택하여 처리하도록 설계함으로써 사용자의 계산 부담을 최소화하였다.

임의의 순차 들기 작업 사례에 프로그램을 적용한 결과, 기존 작업 순서(ABBC) 조건에서 SLI는 1.98로 산출되었으며, 작업 순서를 개선(ABCB, BCBA, BACB, BCAB)했을 때 SLI는 1.60으로 감소하여 약 19.2%의 작업 부담 경감 효과가 확인되었다. 이는 들기 작업 사이에 일반 작업이 포함되면서 중량물 작업으로 인한 요추의 부하가 감소되고, 회복 시간이 제공됐기 때문이라 판단된다(Waters et al., 2007). 본 사례에서는 요추 부하가 상대적으로 큰 작업인 Task B가 연속적으로 수행되지 않고, 그 사이에 일반 작업인 Task C가 배치됨으로써 요추의 회복 효과를 기대할 수 있었을 것으로 사료된다.

기존 SLI 관련 연구들은 주로 순차 들기 작업에서의 신체 부담을 정량적으로 평가하기 위한 지표의 개발과 적용에 초점을 두고 있다(Waters et al., 2007). 이러한 연구들은 작업의 위험 수준을 파악하고 작업 간 상대적 부담을 비교하는 데에는 유용하지만, 동일한 작업 조건 내에서 작업 순서를 어떻게 재구성할 경우 부담을 감소시킬 수 있는지에 대한 구체적인 의사결정 지원까지는 확장되지 못한 한계를 갖는다.

이에 반해 본 연구는 SLI를 단순한 평가 지표로 활용하는 것을 넘어, 작업 순서에 따른 SLI 변화를 기반으로 가능한 작업 순서를 생성하고 이를 비교함으로써 최적 작업 순서를 도출하는 분석 체계를 제안하였다. 이러한 접근은 SLI를 활용한 분석 결과를 실제 작업 개선안 도출로 직접 연결할 수 있게 하며, 기존 SLI 적용 연구 대비 실무적 활용 가능성을 확장한다는 의의를 갖는다.

순차 들기 작업은 여러 난이도의 작업을 번갈아 수행함으로써 특정 신체 부위에 작업 부하가 집중되는 것을 방지하고자 하는 작업 순환(Job rotation)의 일환으로 활용된다(Jorgensen et al., 2005; Azizi et al., 2010). 이러한 특성상 작업 순서에 따라 작업자의 신체 부담이 달라질 수 있으므로, 작업 부담 완화를 위해 작업 순서를 고려한 평가와 설계가 필수적이다. 순차 들기 작업이 작업 순환의 한 형태로 적용된다는 점을 고려할 때, 본 연구에서 개발한 프로그램은 작업 순서에 따른 신체 부담의 차이를 정량적으로 비교·분석할 수 있는 실무적 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

다만, 본 연구는 임의로 설정한 들기 작업 사례를 통해 프로그램의 적용 결과를 제시하였다는 한계를 갖는다. 본 사례에서는 프로그램의 기능 검증을 주된 목적으로 들기 작업인 Task A와 Task B의 비대칭 각도(A)를 0도로 설정하였으나, 실제 산업 현장에서는 비대칭 작업 자세가 수반되는 경우가 빈번하다. 산업 현장에서 수행되는 작업은 보다 복합적인 형태의 경우가 많고 작업 변수가 더 다양하므로, 향후 연구에서는 실제 산업 현장에서 수집된 작업 데이터를 적용하여 프로그램의 타당성과 실효성을 검증할 필요가 있다. 또한, 실제 현장 적용 시에는 작업 변수의 정확한 측정 및 작업 요소의 명확한 정의가 선행되어야 하며, 작업 경계가 모호하거나 작업 변수 측정이 어려운 환경에서는 프로그램의 입력 데이터 구성 자체가 현실적 제약 요인으로 작용할 수 있다.

이와 함께, 본 연구에서 제안한 SLI Solution 알고리즘은 가능한 모든 작업 순서를 생성하여 각 경우에 대한 SLI 값을 비교하는 방식으로 최적 작업 순서를 도출한다. 이러한 구조는 작업 요소의 수 및 각 작업의 반복 횟수가 증가할 경우, 생성 가능한 작업 순서의 수가 factorial 수준으로 급격히 증가할 수 있어 계산 부담이 증가할 수 있는 한계를 갖는다. 예를 들어, 본 연구 사례와 같이 Task A 1회,

Task B 2회, Task C 1회로 구성된 경우 가능한 작업 순서는 총 12개이지만, 여기에 추가 작업(Task D)을 1회 수행하는 조건이 포함될 경우 가능한 작업 순서는 60개로 증가하게 된다. 그러나 SLI는 최대 연속 들기 작업시간이 240분을 초과하지 않는 것을 전제로 하며(Waters et al., 2007), 본 연구에서도 해당 조건을 반영하여 탐색 범위를 제한하였다. 또한, 실제 산업 현장에서는 작업 요소의 수와 반복 횟수가 제한적인 경우가 많아, 본 알고리즘은 현실적인 작업 조건 범위 내에서 적용 가능할 것으로 판단된다. 향후 연구에서는 보다 복잡한 작업 조건에서의 계산 효율성을 검토하고, 필요에 따라 휴리스틱 기법 등의 도입을 통해 알고리즘의 확장 가능성을 모색할 필요가 있다.

한편, 본 프로그램의 평가 범위와 관련하여 추가적인 한계도 존재한다. 본 사례에서는 Task C를 요추 부담이 없는 비틀기 작업으로 가정하였으나, 실제 산업 현장에서는 비틀기나 굽힘 작업 등 작업 자세나 작업 환경 등에 따라 요추에 부담을 줄 수 있으며, 개인 특성 역시 요추 부담에 영향을 미칠 수 있다(Kerr et al., 2001; Al Amer, 2020). 따라서 향후 연구에서는 작업 자세나 작업 빈도 등 추가적인 인간공학적 요인을 함께 고려할 수 있도록 프로그램을 확장한다면, 보다 현실적이고 효과적인 작업 설계 도구로 발전할 수 있을 것으로 판단된다.

5. Conclusion

본 연구에서는 순차 들기 작업에 대한 체계적인 평가와 작업 개선을 지원하기 위해, SLI 공식에 기반한 들기 작업 분석 및 작업 설계 의사결정 지원 프로그램을 제안하였다. 이를 위해 SLI 계산 절차를 알고리즘으로 체계화하였으며, 가능한 모든 작업 순서 케이스를 자동으로 생성하고 평가하여 작업 부담을 최소화할 수 있는 작업 방안을 도출하는 solution 알고리즘을 설계하였다.

개발된 프로그램은 단순한 들기 지수 산출에 그치지 않고, 작업 설계 및 재설계 과정에서 의사결정을 지원할 수 있는 분석 체계로 확장되었다. 특히 solution 기능을 통해 분석 결과를 작업 개선안으로 연결함으로써, 본 프로그램이 단순 계산이나 평가 도구에 그치지 않고, 작업 설계와 개선을 위한 의사결정 지원 도구로 활용될 수 있음을 시사하였다.

본 프로그램은 산업 현장의 실무자들이 순차 들기 작업을 수작업으로 분석해야 하는 부담을 경감시키고, 작업 설계 및 재설계 단계에서 작업 순서와 요추 부담을 고려한 의사결정을 지원하는 데 기여할 수 있을 것이라 기대된다.

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.

Azizi, N., Zolfaghari, S. and Liang, M., Modeling job rotation in manufacturing systems: The study of employee's boredom and skill variations, *International Journal of Production Economics*, 123(1), 69-85, 2010.

Bosch, T., Douwes, M., Hoozemans, M., van Dieën, J., Kuijt-Evers, L. and Smit, R., Impact, usability and validity of the NIOSH method for assessing manual lifting, TNO Report, *TNO*, 2015.

Choobineh, A., Dortaj, E., Razeghi, M., Ghaem, H. and Daneshmandi, H., Assessment of load manual lifting among shelf-stocking workers in chain stores: A cross-sectional study, *Applied Bionics and Biomechanics*, 2024(1), 2324416, 2024.

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.

Comper, M.L.C. and Padula, R.S., The effectiveness of job rotation to prevent work-related musculoskeletal disorders: protocol of

a cluster randomized clinical trial, *BMC Musculoskeletal Disorders*, 15(1), 170, 2014.

Jorgensen, M., Davis, K., Kotowski, S., Aedla, P. and Dunning, K., Characteristics of job rotation in the Midwest US manufacturing sector, *Ergonomics*, 48(15), 1721-1733, 2005.

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

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.

Waddell, G. and Burton, A.K., Occupational health guidelines for the management of low back pain at work: Evidence review, *Occupational Medicine*, 51(2), 124-135, 2001.

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

Waters, T.R., Lu, M.L. and Occhipinti, E., New procedure for assessing sequential manual lifting jobs using the revised NIOSH lifting equation, *Ergonomics*, 50(11), 1761-1770, 2007.

Waters, T.R., Occhipinti, E., Colombini, D., Alvarez-Casado, E. and Fox, R., Variable lifting index (VLI): A new method for evaluating variable lifting tasks, *Human Factors*, 58(5), 695-711, 2016.

WHO, Musculoskeletal health, *World Health Organization*, https://iea.cc/what-is-ergonomics (retrieved November 23, 2022).

Author listings

Yong-Ku Kong: ykong@skku.edu
Highest degree: PhD, 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