

일개 사업장 축산물 운송 노동자의 요추부(L5/S1) 생체역학적 부하 분석 및 근골격계 질환 실태 조사

김병훈^{1,2} · 김영미³ · 이균호³ · 하권철^{1*}

¹창원대학교 생명보건학부, ²민주노총 경남지역본부, ³화섬식품노조 부경지부

Analysis of Lumbar (L5/S1) Biomechanical Load and Musculoskeletal Disorders among Meat Transport Workers at a Single Workplace

Byoung Hoon Kim^{1,2} · Mi Young Kim³ · Kyunho Lee³ · Kwonchul Ha^{1*}

¹Department of Biochemistry and Health Science, Changwon National University

²Korean Confederation of Trade Unions KyeongNam Regional Council

³Korean Chemical, Textile & Food Workers' Union Bukyeong Branch

ABSTRACT

Objectives: This study was conducted to analyze the prevalence of musculoskeletal disorders among livestock handling workers in comparison to other occupations and to identify the physical risks involved by calculating the compression and shear forces acting on the L5/S1 lumbar segment using a biomechanical model.

Methods: A survey and field evaluation were conducted on workers at livestock transportation sites. The survey included demographic characteristics (age, weight, height) and work-related factors (years of service, Borg's 10-point scale). A biomechanical model was utilized to calculate the compression and shear forces on the lumbar spine (L5/S1), and MET (metabolic equivalent of task) was used to assess labor intensity. In addition, the work sampling technique was employed to analyze actual exposure time during the task.


Results: The survey results showed that 94.7% of livestock handling workers reported musculoskeletal pain, with 44.7% requiring clinical treatment. Compared to the control group of electronics assembly workers, they were exposed to significantly higher risks across all body regions ($p < .001$). Biomechanical analysis confirmed that lumbar compression and shear forces increased exponentially as the trunk flexion angle and load distance increased, with energy expenditure reaching a high-intensity level of 12.3 kcal/min. These findings suggest that extreme biomechanical overload and lack of physiological recovery led to accelerated physical damage despite a relatively short average tenure compared to other occupations.


Conclusions: Meat transport workers represent a high-risk group for musculoskeletal disorders (MSDs). To eliminate fundamental hazards, immediate engineering controls are required, such as optimizing vehicle loading heights and implementing electric rails and automated systems specifically designed for carcass handling. Institutionally, mandatory rest periods must be enforced to facilitate physiological recovery. Furthermore, a systematic medical surveillance program is essential for the early detection and proactive management of at-risk workers.


Key words: Meat transport, musculoskeletal disorder, compression force, shear force


*Corresponding author: Kwonchul Ha, Tel: 055-213-3553, E-mail: kcha@changwon.ac.kr
Department of Biochemistry and Health Science, Changwon National University, 20 Changwondaehak-ro, Uichang-gu, Changwon-si, Gyeongnam 51140

Received: February 4, 2026 Revised: March 30, 2026, Accepted: March 30, 2026

 Byoung Hoon Kim <http://orcid.org/0000-0002-5782-5340>

 Mi Young Kim <http://orcid.org/0009-0007-5469-6639>

 Kyunho Lee <http://orcid.org/0009-0006-9189-9374>

 Kwonchul Ha <http://orcid.org/0000-0001-7014-9466>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서 론

국내 1인당 육류 소비량은 1980년 8.96 kg에서 2023년 44.3 kg으로 약 5배 급증하였으며, 이에 따라 도축 후 지육(car cass)을 취급하는 유통 물량 또한 크게 증가하였다(Korea Meat Industries Association, 2025). 경남지역에서 2025년 12월 현재 정상 영업 중인 축산물 운반하는 사업장은 총 154개소이다(Ministry of the Interior and Safety, 2026). 지육 운반 노동자들은 약 50~150 kg에 달하는 중량물을 직접 어깨에 짊어지고 차량에 상차하거나 배달지까지 운반하는 고강도 작업을 수행하고 있다. 이러한 중량물 취급 작업은 요추부에 막대한 기계적 스트레스를 가하며, 하중의 지속적인 누적은 근골격계 질환을 심화시키는 주요 원인이 된다. 중량물 취급 시 인체 부담 정도는 중량, 빈도, 작업 위치, 시간 및 작업자의 개인적 특성에 따라 상이하 다. 요추부에 발생하는 스트레스를 정량화하기 위해 많은 연구에서 L5/S1 요추 분절(disc)을 주요 평가지표로 활용해 왔다(Di Natali et al., 2021). 허리 모멘트는 하중의 무게, 수평 거리, 상체 체중 및 상체 무게 중심까지의 거리 등을 변수로 구성되며(Chaffin et al., 2006), 인체 분절 모델에 따르면 전체 체중 중 상체가 차지하는 비율은 약 54.15~56.34% 수준으로 보고되고 있다(Dempster & Gaughran, 1967; Plagenhoef et al., 1983). 특히 몸통을 앞으로 숙이거나 밀고 당기는 작업 시 중력의 영향으로 상당한 전단력이 발생한다. Gallagher & Marras(2012)는 최대 전단력 한계로 1,000 N, 행동 한계치로 500 N을 권고한 바 있다. 또한, 몸통 굴곡 각도에 따른 연구에 따르면 22.5°와 45° 굴곡 시 L5/S1에 가해지는 압축 하중은 직립 상태(0°) 대비 약 2~3배 증가하는 것으로 확인되었다(Gallagher & Marras, 2003). 척추기립근에 의해 발생하는 근력은 요추의 안정성을 유지하는 핵심 요소이며, 압축력과 전단력의 크기는 분절간 힘(intersegmental force)과 각도를 이용한 역학적 평형 모델을 통해 산출할 수 있다(Xiang, 2021). 요추 하중의 허용 기준과 관련하여 NIOSH는 압축력 3,400 N을, Gallagher & Marras(2012)는 전단력 700N을 각각 권고하였다. 작업자의 개인적 특성 또한 중요한 변수이다. 근력은 30세 이후 10년마다 약 10~15% 감소하며(Kyle et al., 2001), 성별에 따른 상대적 근력 차이도 존재한다(Kim, 2012). 근육 피로를 정량적으로 평가하기 위해 Rohmert의 곡선

을 응용한 실용적 모델이 제시되기도 하였다(Xia & Frey, 2008). National Institute for Occupational Safety(NIOSH)의 NIOSH Lifting Equation(NLE)를 비롯하여 ACGIH TLVs (American Conference of Governmental Industrial Hygienists Threshold Limit Values), HSE(Health & Safety Executive) 등 다양한 요추 부하 평가 도구들이 개발되었으나 이들 도구는 주로 손으로 들어 올리는 작업에 특화되어 있다. 따라서 축산물 유통업이나 건설 현장처럼 중량물을 어깨나 머리에 지고 이동하는 특수한 작업 형태의 요추 부하를 정밀하게 평가하기에는 한계가 있다. 이에 본 연구는 축산물 운반 노동자의 근골격계 질환 실태를 타직종과 비교 분석하고, 생체역학적 모델을 통해 L5/S1 요추 분절에 작용하는 압축력(compression force) 및 전단력(shear force)을 산출하여 그 위험성을 규명하고자 한다.

II. 대상 및 방법

1. 연구 대상

경남에 있는 일개 축산물운송 사업장 노동자 38명을 대상으로 하였다. 대조군으로는 경남 지역 소재의 전자 조립, 환경미화원, 조선소 탑재 부서, 자동차 부품 노동자다. 대조군으로 활용한 자료는 민주노총 경남지역본부 조합원을 대상으로 실시한 근골격계 유해요인 조사 설문 조사 자료를 이용하였다. 조사는 2025년 9월 한 달간 이루어졌다.

2. 연구 방법

본 연구는 축산물 운송 사업장 노동자를 대상으로 설문조사와 현장 평가를 실시하였다. 설문의 주요 내용은 인구학적 특성(연령, 체중, 신장)과 작업 관련 특성(근속 연수, Borg's scale 10단계)으로 구성되었다(Borg, 1982). 요추부(L5/S1) 압축력과 전단력을 산출하기 위해 사용된 생체역학적 모델 및 보정 계수는 Table 1과 같으며(Dempster & Gaughran, 1967; Plagenhoef et al., 1983; Kyle et al., 2001; Chaffin et al., 2006; Gallagher & Marras, 2012; Kim, 2012; Xiang, 2021), 산출된 값은 NIOSH 한계치(3,400 N) 및 Gallagher & Marras(2012)의 700 N 기준과 비교 분석하였다. 또한, 노동강도를 평가하기 위해 MET(metabolic equivalent task)를 적용한 에너지 소비량을 산출하였

Table 1. Biomechanical models and adjustment factors for L5/S1 analysis

Category	Formula	Variable definitions
L5/S1 moment	$(W_l \times D_l) + (W_u \times D_u)$	W_l, W_u : Weight of load and upper body (N) D_l, D_u : Horizontal distance to load and COG* (m)
Muscle force	$ML_5 / 0.05$	0.05 m : Assumed moment arm of erector spinae
Compression force	$(W_l + W_u) \times \cos\phi + F_m$	ϕ : Trunk flexion angle (rad)
External shear	$(W_l + W_u) \times \sin\phi$	Anterior shear force due to external load/gravity
Net shear force	$F_{s_ext} - (F_m \times \sin\phi)$	Net shear force considering muscle counteraction
Age adjustment	$Limit \times (0.9)^{\frac{(age - 30)}{10}}$	-
Gender adjustment	Limit \times 0.85(for females)	-
Energy expenditure (Kcal/min)	$MET \times weight (kg) \times 0.0175$	-

*COG: Center of gravity of the upper body segments (head, arms, and trunk).

다(Ainsworth et al., 2011). 또한, work sampling 기법을 이용하여 실제 부담 노출 시간을 평가하였다.

III. 연구결과

1. 연구 대상자의 일반적 특성 및 작업 강도 분석

연구 대상자의 평균 연령은 환경미화 직종이 48.5세로 가장 높았으며, 자동차(46.4세), 축산(44.7세), 전자(44.2세) 순이었고 먼저 연구 대상자인 축산 노동자의 평균 연령은 44.7세였으며, 대조군의 평균 연령은 환경미화(48.5세), 자동차(46.4세), 전자(44.2세) 순으로 높았고 조선소가 42.3세로 가장 낮았다. 신장은 모든 직종에서 172.1 cm ~ 174.1 cm 사이로 유사한 분포를 보였으나, 체중의 경우 축산물 운반 노동자가 평균 83.0 kg으로 대조군(70.2 kg ~ 75.8 kg)에 비해 높았다. 근속 연수는 뚜렷한 차이가 관찰되었는데, 축산물 운송 노동자는 8.6년인 데 반해, 대조군은 전자(21.5

년), 자동차(21.4년), 조선(21.2년), 환경(9.4년)으로 나타나 연구 대상인 축산물 운송 노동자의 근속 기간이 상대적으로 짧았다. 노동자가 느끼는 주관적 작업 강도인 Borg scale 점수는 축산물 운반 직종이 7.2점으로 가장 높았다. 이는 대조군인 환경미화(5.6점), 조선(5.2점), 자동차(4.3점)보다 높은 수치이며, 특히 전자 조립 직종(3.4점)과 비교했을 때 2배 이상의 높은 작업 부하를 느끼고 있는 것으로 나타났다.

2. 축산물 운반 직종의 유병률

본 연구에서는 근골격계 증상 호소율을 분석하기 위해 NIOSH의 기준 1(통증 있음), 기준 2(정밀 검진 필요), KOSHA Criteria 3(병원 치료 필요)으로 중증도를 구분하였다(NIOSH, 1997; KOHSA, 2000). 설문 조사 결과 응답자의 대다수인 94.7%가 근골격계 통증을 호소하였다. 특히 전체의 76.3%가 정밀 검진 대상으로 분류되었으며, 44.7%는 병원 치료가 시급한 고위험군

Table 2. General and work characteristics

	Meat transport	Shipyards	Car part	Electronic assembly	Sanitation
	Mean (SD)**	Mean (SD)	Mean (SD)	Mean (SD)	Mean (SD)
N*	38	99	155	101	242
Age	44.7(11.6)	42.3(10.2)	46.4(9.8)	44.2(9.1)	48.5(7.6)
Height	174.1(6.0)	172.1(5.4)	172.7(5.0)	173.9(5.3)	172.2(5.9)
Weight	83.0(13.5)	70.2(8.1)	75.8(11.4)	73.5(9.8)	75.4(11.5)
Workyear	8.6(7.3)	26.2(11.1)	21.4(13.2)	21.5(11.1)	9.4(6.9)
Borg scale	7.2(1.4)	5.2(1.8)	4.3(1.6)	3.4(1.6)	5.6(1.7)

*N : No of samples **SD : Standard deviation

Table 3. Prevalence of musculoskeletal symptoms and disorders in meat transport workers (N = 38)

	Pain N (%)	Clinical exam required N (%)	Medical treatment required N (%)
Prevalence of musculoskeletal symptoms	36(94.7)	29(76.3)	17(44.7)

으로 분류되었다(Table 3).

3. 축산물 운반 직종의 신체 부위별 근골격계 질환 위험성

축산물 운반 노동자 집단은 전자 조립업 대비 조사된 모든 신체 부위에서 통계적으로 매우 유의미한($p < .0001$) 위험도 증가가 확인되었다. 구체적으로 살펴보면, 다리 부위의 위험도가 42.3배로 가장 높은 차이를 보였으며, 팔꿈치가 18.7배로 그 뒤를 이었다. 이어 허리(7.8배),

손/손목(6.9배), 목(6.8배), 어깨(5.8배) 순으로 신체 전 부위에서 고르게 높은 위험도가 나타났다.

신체 부위별 근골격계 질환 발생 위험도를 분석한 결과, 축산물 운반 노동자 집단은 기준 직종인 전자조립 대비 모든 신체 부위에서 통계적으로 매우 유의미한($p < .0001$) 위험도 증가를 보였다. 특히 다리 부위에서 가장 큰 차이가 나타났으며, 위험도가 42.3배(95% CI: 10.85-165.33)로 다른 직종인 환경미화(12.2배), 조선(15.1배), 자동차 부품(5.8배)보다 상대적으로 가장 높은 수준을 보였다. 팔꿈치 또한 18.7배(95% CI: 4.74-73.62)의 높은 위험도를 나타내 다른 직종에 비해 상대적으로 높은 수준을 보였으며, 이어 허리(7.8배), 손/손목(6.9배), 목(6.9배), 어깨(5.8배) 순으로 전반적인 신체 부위에서 일관되게 높은 위험도가 확인되었다. 목과 손/손목 부위의 경우, 환경미화 및 자동차 부품 직종에서는 통계적으로 유의한 위험 증가가 나타나지 않은 반

Table 4. Odds ratios (OR) and 95% Confidence intervals (CI) for musculoskeletal symptoms by job category (reference: electronic assembly)

Body part	Job category	Estimate (S.E.)	Chi-square	p-value	Odds ratio (95% CI)
Neck	Meat transport	1.92 (0.45)	18.15	<.0001	6.85 [2.83, 16.60]
	Sanitation	0.01 (0.36)	0.00	.9743	1.01 [0.50, 2.07]
	Shipyards	0.16 (0.36)	0.21	.6506	1.18 [0.58, 2.39]
	Car part	-0.41 (0.35)	1.38	.2408	0.67 [0.34, 1.31]
Shoulder	Meat transport	1.76 (0.45)	15.36	<.0001	5.83 [2.41, 14.06]
	Sanitation	0.80 (0.36)	5.01	.0252	2.22 [1.10, 4.47]
	Shipyards	0.82 (0.36)	5.31	.0213	2.27 [1.13, 4.55]
	Car part	0.30 (0.34)	0.81	.3683	1.35 [0.70, 2.61]
Elbow	Meat transport	2.93 (0.70)	17.49	<.0001	18.68 [4.74, 73.62]
	Sanitation	2.01 (0.64)	9.79	.0018	7.48 [2.12, 26.38]
	Shipyards	2.66 (0.63)	17.53	<.0001	14.23 [4.11, 49.30]
	Car part	1.60 (0.63)	6.37	.0116	4.95 [1.43, 17.11]
Hand/wrist	Meat transport	1.94 (0.47)	17.29	<.0001	6.93 [2.78, 17.24]
	Sanitation	0.66 (0.38)	2.94	.0865	1.93 [0.91, 4.07]
	Shipyards	0.99 (0.37)	7.07	.0078	2.70 [1.30, 5.62]
	Car part	0.35 (0.36)	0.92	.3363	1.41 [0.70, 2.85]
Back	Meat transport	2.05 (0.45)	20.58	<.0001	7.76 [3.20, 18.81]
	Sanitation	0.71 (0.36)	3.95	.0469	2.03 [1.01, 4.07]
	Shipyards	0.87 (0.35)	6.02	.0141	2.39 [1.19, 4.77]
	Car part	0.57 (0.33)	3.07	.0800	1.77 [0.93, 3.37]
Leg	Meat transport	3.75 (0.70)	29.05	<.0001	42.35 [10.85, 165.33]
	Sanitation	2.50 (0.64)	15.30	<.0001	12.17 [3.48, 42.57]
	Shipyards	2.72 (0.63)	18.48	<.0001	15.14 [4.39, 52.24]
	Car part	1.76 (0.63)	7.81	.0052	5.82 [1.69, 20.00]

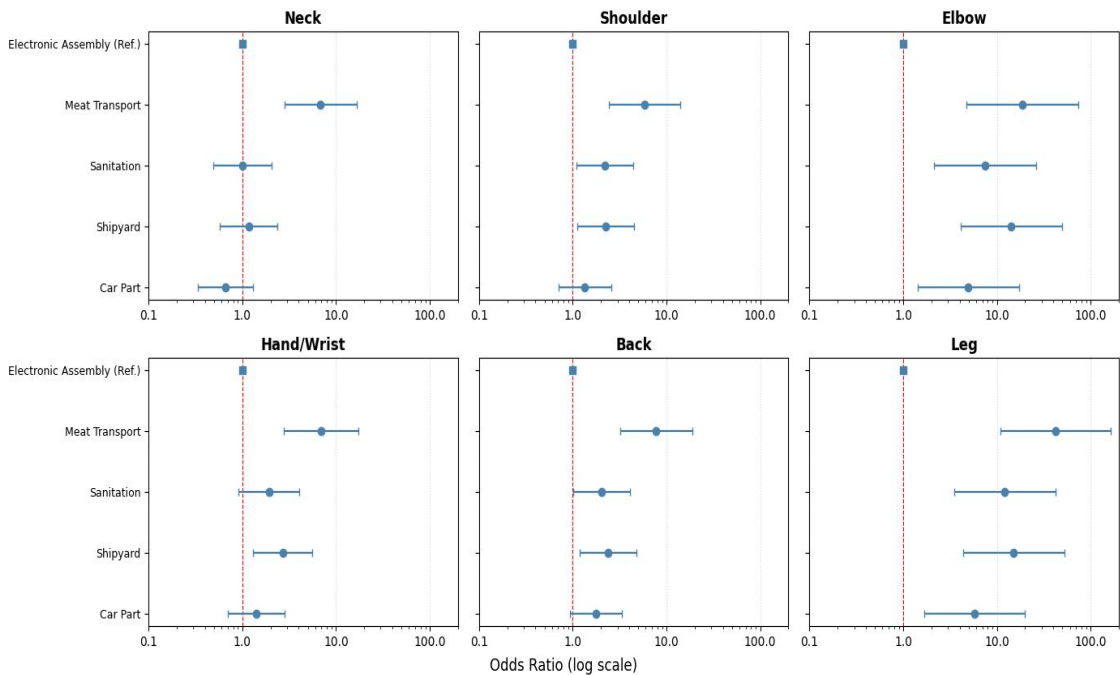


Figure 1. Odds ratios (OR) and 95% confidence intervals (CI) for musculoskeletal symptoms by job category (reference: electronic assembly).

면, 축산물 운반 노동자에서는 유의하게 높은 위험도가 관찰되었다. 이는 해당 직종의 작업 특성이 특정 부위에 국한되지 않고 전신에 걸쳐 높은 신체적 부담을 유발함을 시사한다.

4. Work sampling을 이용한 실 작업량과 노출 시간 분석(소 운반을 중심으로)

소 운반 작업에서 발생하는 신체 부담 정도를 정량화

하기 위해 work sampling을 활용하여 작업 중 발생하는 신체 부담 요인을 확인하였다. 시간대별 작업 물량과 투입 인원을 고려하여, 작업자 1인당 수행하는 실제 반복 횟수를 산출하고, 1회당 노출 시간을 이용하여 실제 작업자가 노출되는 부담 정도를 확인하였다. 분석 결과, 하루 중 작업자 1인에게 발생하는 총 누적 노출 시간은 일 평균 12,000초, 즉 3.33시간에 달하는 것으로 나타났다. 세부적으로 살펴보면, 공정 초기인 06:30

Table 5. Workload and exposure assessment using work sampling method (beef)

Time	Total units (head)	No. of workers	Workload per person (reps, A)	Exposure time (sec, B)	Total exposure time (sec) A×B=C
06:30 - 07:00	250	6	42	60	2,520
07:00 - 07:40	68	4	17	40	680
08:00 - 08:40	200	5	40	40	1,600
09:30 - 10:20	120	5	24	40	960
10:20 - 11:40	180	5	36	40	1,440
12:00 - 12:40	120	5	24	40	960
13:00 - 13:40	120	5	24	40	960
14:00 - 14:40	120	5	24	40	960
15:00 - 15:40	120	5	24	40	960
16:00 - 16:40	120	5	24	40	960
Total duration	12,000(sec) / 3,600(sec) = 3.3 hr				

Table 6. Analysis of lumbar compression and shear forces at the L5/S1 segment by category and task phase

Category	Phase / trunk angle (°)	Compression (N)*	Shear ext (N)	Net shear (N)	RELs (N)**
Beef (140 kg)	Start (0°)	3204.3	0.0	0.0	3225.5 (comp.)
	End (20°)	8751.7	626.4	-1778.3	
	End (30°)	11230.1	915.7	-3906.3	
Pork (93.7 kg)	Start (0°)	2296.2	0.0	0.0	664.1 (shear)
	End (20°)	6267.6	471.1	-1229.9	
	End (30°)	8038.8	688.7	-2734.3	
Beef/pork (60 kg)	Start (0°)	1635.3	0.0	0.0	
	End (20°)	4459.5	358.0	-830.7	
	End (30°)	5716.0	523.4	-1881.3	

*Horizontal distance of L5/S1 from shoulder = 0.05 m

**Recommended Exposure Limits (based on NIOSH/Gallagher & Marras)

에서 07:00 사이에 1인당 작업량(42회)과 단위 노출 시간(60초)이 모두 최고치에 도달하며 가장 높은 신체적 부하(2,520초)를 보였다. 09:30 이후부터는 노출 시간이 960초로 일정하게 유지되는 표준화된 양상을 보였으나, 결과적으로 오전 근무 시간대(06:30~11:40)에 전체 노출량의 약 60% 이상이 집중되는 현상이 관찰되었다. 이는 소 운반 작업의 특성상 이른 오전 시간대에 물량이 집중적으로 처리됨에 따라, 해당 시간대 작업자의 근골격계 질환 노출 위험이 타 시간대 대비 유의미하게 높을 수 있음을 시사한다.

5. 축산물 중량 및 상체 굴곡 각도에 따른 요추부 하중 분석
생체역학적 분석을 위해서 소 운반, 돼지 운반 노동자 각 1명을 선정하고, 사전 당사자의 동의를 받았다.

소와 돼지를 운반하는 노동자의 연령은 각 35세였으며, 몸무게는 90 kg, 85 kg이다. 상체 굴곡의 각도는 탑재 차량의 크기에 따라 차이가 있었다. 탑재 차량의 크기가 작을수록 작업자의 상체 굴곡 각도가 증가하며, 이것이 요추 과부하의 결정적 원인이 된다는 것이다. 차량의 적재 공간이 협소할수록 작업자는 무게 중심을 낮추기 위해 상체를 더 깊게 숙여야 하며, 이 과정에서 발생하는 각도의 증가는 생체역학적으로 매우 파괴적인 결과를 초래할 수 있다. 즉, 상체 굴곡 각도가 커지고 취급 중량이 무거울수록 요추에 가해지는 역학적 과부하가 급격히 심화되는 것으로 나타났다(Table 6). 몸무게 85 kg의 남성노동자의 소(140 kg) 취급 시 요추 압축력은 작업 시작 시(굴곡 0°) 3,204.3 N, 작업 종점 시, 굴곡 20°일 때, 8751.7 N, 굴곡 30°일 때 11,230.1 N의

Table 7. L5/S1 compression and shear forces by distance, load, and angle

Horizontal distance (shoulder to L5/S1, m)	Phase / trunk angle (°)	Load weight (kg)	Compression (N)	Shear (N)	
0.05	Initial / 0	140	3,205.2	0	
		60	1,635.3	0	
	Final / 20	140	8,751.7	- 1,778.3	
		60	4,459.5	- 830.7	
	0.1	Initial / 0	140	4,578.1	0
			60	2,224.5	0
Final / 20		140	9,730.5	- 2,248.1	
		60	4,868.1	- 1,032.2	
0.15		Initial / 0	140	5,950.2	0
			60	2,812.1	0
	Final / 20	140	11,018.4	- 2,717.4	
		60	5,418.8	- 1,233.2	

로 각각 산출되었으며, 특히 종점 시 IOSH 권고 한계치를 약 3.4배 초과하였다. 돼지(93.7 kg)와 소와 돼지(60 kg)의 30° 굴곡 시 압축력 또한 각각 8,038.8 N, 5,716.0 N을 기록하여, 모든 조건에서 NIOSH 권고 한계치(3,400 N)를 크게 상회하였다. 전방 외력 전단력은 상체 굴곡 30°에서 소(140 kg) 915.7 N, 돼지(93.7 kg) 688.7 N, 소와 돼지(60 kg) 523.4 N 순으로 산출되었다. 척추기립근의 견인력을 포함한 최종 순 후방 전단력(net shear)은 소(140 kg) 30° 굴곡 시 -3,906.3 N에 달해 요추 분절에 극심한 기계적 스트레스를 가하는 것으로 분석되었다. 상체를 30°로 굴곡한 모든 작업 조건에서 압축력은 허용한계(3,225.5 N)를 초과하였다. 특히 소(140 kg) 취급 시에는 전단력 또한 기준치(664.1 N)를 훨씬 상회하여, 상체 각도가 기울어짐에 따라 요추의 구조적 손상 위험이 매우 큰 것으로 확인되었다. 또한, 어깨와 L5/S1의 거리에 따른 위험도도 달랐다. 즉, 소 140 kg(0°) 운반 시 0.05 m일 때와 0.15 m 일 때 요추부 압축력의 차이는 각 3,205.2 N, 5,950.2 N으로 2,745 N 차이를 보였다(Table 7).

6. 축산물 운송 작업 노동강도

축산물 운송 작업 시 노동강도를 확인한 결과 가장 근접한 것은 45 kg의 물건을 들고 이동하는 8.5 MET에 해당하였다. 하지만, 이보다 더 무거운 중량물을 취급하고 있다는 점에서 이는 최소 기준으로 볼 수 있다. 이를 에너지 소비량 환산 기준에 따라 계산하면 평균 12.3 kcal/min에 해당한다.

IV. 고찰

본 연구는 축산물 운반 노동자의 근골격계 질환 실태를 타 직종과 비교·분석하고, 생체역학적 모델을 활용하여 L5/S1 요추 분절에 작용하는 압축력(compression force)과 전단력(shear force)을 산출함으로써 해당 작업의 위험성을 규명하고자 수행되었다. 연구 결과, 축산물 운반 노동자의 요추부 기계적 부하는 인체 허용 한계를 현저히 초과하는 수준임이 실증적으로 확인되었다.

설문조사 결과, 응답자의 대부분이 근골격계 통증을 호소하였으며, 상당수가 의료적 관리가 필요한 상태로 나타났다. 이러한 결과는 대조군인 전자 조립업과의 비교에서 모든 신체 부위에서 통계적으로 유의미한 위험도 증가가 관찰되었다는 점에서, 단순한 주관적 인식

차이를 넘어 작업 특성에 따른 부담 차이를 반영한 결과로 해석될 수 있다($p < .0001$).

생체역학적 분석 결과, 소(140 kg) 운반 작업의 종점 자세(상체 굴곡 30°)에서 요추 압축력은 최대 11,230.1 N에 도달하여 NIOSH 권고 한계치를 약 3.4배 초과하는 것으로 나타났다. 이는 추간판의 물리적 파열이나 퇴행성 변화를 유발하기에 충분한 하중 수준으로 판단된다.

특히 주목할 점은 순 후방 전단력(net posterior shear force)이 -3,906.3 N까지 산출되었다는 점이다. 이는 Gallagher & Marras(2012)가 제시한 전단력 허용 노출 한계(664.1 N)와 비교할 때 약 6배에 달하는 극단적인 수치로 본 작업이 요추 분절에 매우 심각한 전단 부하를 유발함을 의미한다. 이러한 과도한 기계적 부하는 하중에 의해 요추의 전방 전위를 억제하기 위해 척추기립근이 강하게 수축하는 과정에서 요추 분절이 후방으로 견인되며 발생한 결과로 해석된다. 이로 인한 기계적 스트레스는 요추 안정화에 관여하는 후관절 및 인대 복합체에 중대한 손상을 초래할 수 있으며, 이는 본 연구에서 확인된 높은 허리 부위 유병률을 설명하는 핵심적인 역학적 근거가 된다. 특히, 해당 작업자의 소 운반 작업 시 평균 누적 시간은 약 3.3시간으로, 고강도의 중량물을 장시간 취급함으로써 요추부 유병률을 더욱 악화시킬 가능성이 있다.

또한, 본 연구는 탑재 차량의 크기와 작업자의 상체 굴곡 각도 간의 밀접한 상관관계를 확인하였다. 차량의 크기가 작고 적재 공간이 협소할수록 작업자의 상체 굴곡 각도는 증가하는 경향을 보였으며, 이러한 각도 변화는 요추 건강에 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 실제로 굴곡 각도가 20°에서 30°로 10° 증가했을 때 요추 압축력은 8,751.7 N에서 11,230.1 N으로 약 2,478.4 N 급증하였다. 이는 굴곡 각도의 증가가 요추 압축 하중을 단순히 선형적으로 증가시키는 것이 아니라, 기계적 부하를 비선형적으로 증폭시킴을 시사한다. 이미 20° 굴곡 상태에서도 NIOSH 권고 한계치의 약 2.6배를 초과하는데, 차량 구조로 인해 30°까지 추가 굴곡이 발생할 경우 압축력은 한계치의 3.4배를 넘어서 요추 구조적 손상 위험이 극대화된다. 전단력 역시 20° 대비 30°에서 약 46% 이상 증가하는 양상(626.4 N → 915.7 N)을 보였다. 결과적으로 소형 차량은 작업자를 생체역학적 '안전 한계' 밖으로 밀어내어 극심한 손상 위험 구간에서의 작업을 강요하는 환경을 조성하며, 이러한 위험은 취급 중량이 증가할수록 더욱 가중된다.

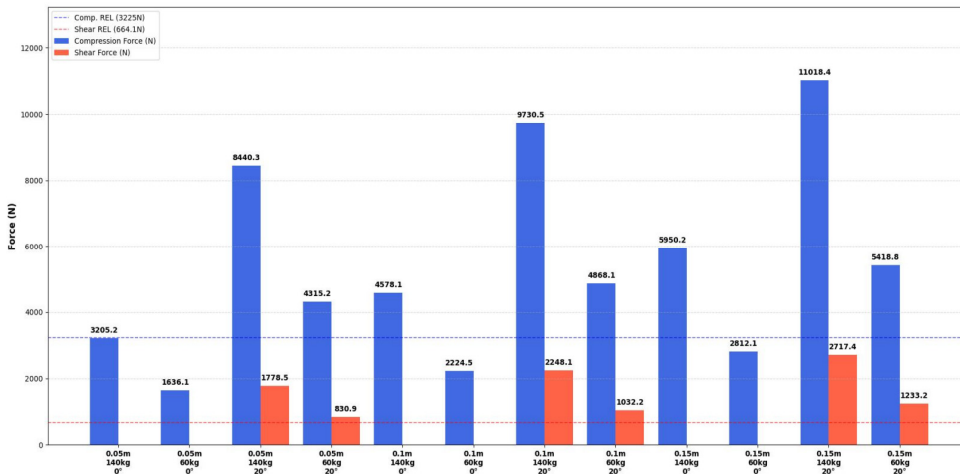


Figure 2. L5/S1 Compression and shear forces by distance, load, and angle

Table 8. Energy expenditure (METs) for meet transport activities involving heavy loads (100 lbs or more)

Code	METs	Major heading	Specific activities
11850	8.5	Occupation	Walking or walk downstairs or standing, carrying objects about 100 lbs or more

이와 관련하여 Christie et al.(1995)은 요추 후방부에 작용하는 압축력과 전단력의 변화가 자세 유지근의 긴장도를 변화시켜 요통 발생에 기여한다고 보고한 바 있다. 요추 후방 구조물의 역할에 대해서는 상반된 견해가 존재하는데, 요추 전만 증가와 무게중심의 후방 이동이 후관절 및 요천추 관절의 전단력을 증가시켜 요통을 유발한다는 주장(Tuzun et al., 1999)과, 반대로 후방 구조물이 부하를 분담함으로써 추간판 하중을 감소시킨다는 주장(Lord et al., 1997)이 공존한다. 후자의 경우, 선 자세가 앉은 자세보다 상대적으로 유리한 이유를 요추 전만으로 인해 후관절이 체중 부하를 일부 분담하기 때문이라고 설명한다. 그러나 본 연구와 같이 초고중량 하중을 반복적으로 취급하는 작업 환경에서는 후방 구조물의 부하 분담 능력을 초과하는 전단력이 발생하므로, 보호 효과보다는 구조적 손상 위험이 지배적일 가능성이 높다. Kim(1998)도 요통 호소군에서 요추 압력이 유의하게 높았음을 보고하여 이러한 해석을 뒷받침한다.

한편, 에너지 소비량 분석 결과인 12.3 kcal/min은 본 작업이 생리적으로 매우 가혹한 고강도 작업임을 명확히 보여준다. 평균 근속 연수가 8.6년으로 비교적 짧은 음에도 불구하고 높은 근골격계 유병률이 관찰된 것은, 이러한 생체역학적 과부하와 생리적 회복 불능 상태가

단기간에 누적된 결과로 해석할 수 있다. 또한, 본 연구에서는 하중의 무게와 상체 굴곡 각도뿐만 아니라, 하중과 신체 간의 수평 거리 역시 요추 부하에 중요한 영향을 미침을 확인하였다. 기존 연구(NIOSH, 1991; ACGIH, 2020)에서 지적된 바와 같이, 하중 중심이 어깨 위치에서 단 0.1 m만 이탈해도 요추 압축력이 약 1.8배 증가(3,205.2 N → 5,950.2 N)하는 것으로 나타났다. 이는 미세한 자세 차이가 요추 부담에 결정적인 차이를 유발할 수 있음을 의미하며, 특히 숙련도가 낮은 노동자가 초기 손상에 노출될 위험이 매우 높음을 시사한다.

본 연구는 요추부에 초점을 맞추어 전신 관절의 복합 부하를 정량적으로 평가하지 못했다는 제한점을 지니고 있다. 그럼에도 불구하고 다음과 같은 의의를 가진다. 첫째, 고중량 지육 취급 작업에서 전단력 발생의 심각성을 규명하여 기존 연구에서 상대적으로 간과되었던 차별화된 위험 요소를 제시하였다. 둘째, 차량 크기에 따른 상체 굴곡 각도의 증가가 요추 손상 위험을 비선형적으로 증폭시킴을 입증함으로써 작업 환경 개선의 과학적 근거를 제공하였다. 셋째, 타 직종과의 비교 분석을 통해 축산물 운반 노동자의 근골격계 위험 수준을 객관적으로 제시함으로써 향후 산업안전보건 가이드라인 및 정책 수립의 필요성을 뒷받침하였다.

V. 결 론

본 연구는 축산물 운송 노동자의 요추부 기계적 부하가 인체 허용 한계를 현저히 초과하고 있음을 실증적으로 확인하였다. 현재 요추 후방 전단력에 대한 명확한 작업 노출 권고 기준은 충분히 확립되어 있지 않으나, 본 연구에서 산출된 전단력 수준은 척추 분절의 구조적 안정성을 저해할 가능성이 높은 범위로 해석된다. 이러한 결과는 축산물 운송 작업이 요추 손상 위험이 매우 높은 고위험 작업에 해당함을 시사한다. 이에 따라 근본적인 위험 저감을 위해서는 탑재 차량 크기의 적정화, 전동 레일 및 자동화 설비 도입과 같은 공학적 개선이 우선적으로 고려되어야 한다. 아울러 제도적 차원에서는 매 시간 일정 수준의 충분한 휴식 시간 보장과 함께, 고위험군을 조기에 선별하기 위한 체계적인 의학적 감시 프로그램의 구축이 병행될 필요가 있다. 또한, 비숙련 노동자를 대상으로 올바른 작업 자세와 하중 취급 방법이 요추 부하를 실질적으로 감소시킬 수 있음을 인지시키는 체계적인 교육·훈련이 반드시 함께 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2025~2026년도 국립창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

References

- ACGIH, 2025 TLVs and BEIs Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices by ACGIH Signature Publications, (z-lib.org).; 2025
- Ainsworth BE, Haskell WL, Herrmann SD, Meckes N, Bassett DR Jr, Tudor-Locke C, Greer JL, Thompson J, Whitt-Glover MC, Leon AS. 2011 Compendium of Physical Activities: A second update of codes and MET values. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 2011;43(8):1575-1581 <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31821ece12>
- Borg G. A category scale with ratio properties for intermodal and interindividual comparisons. *Psychophysical Judgment and The Process of Perception*,; 1982. p. 25-34
- Chaffin DB, Andersson GBJ, Martin BJ. *Occupational Biomechanics* (4th ed.). Wiley-Interscience.; 2006
- Christie HJ, Kumar SA, Warren S. Postural aberrations in low back pain. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 1995;76(3):218-224
- Dempster WT, Gaughran GR. Properties of body segments based on size and weight. *American Journal of Anatomy* 1967;120:33-54
- Di Natali C, Chini G, Toxiri S, Monica L, Anastasi S, Draicchio F, Caldwell DG, Ortiz J. Equivalent weight: Connecting exoskeleton effectiveness with ergonomic risk during manual material handling. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2021;18(5):2677 <https://doi.org/10.3390/ijerph18052677>
- Gallagher S, Marras WS. Compression and shear loads on lumbar spine motion segments in neutral and flexed postures. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 2003;47(10):1303-1307
- Gallagher S, Marras WS. Tolerance of the lumbar spine to shear: a review and recommended exposure limits. *Clinical Biomechanics* 2012;27(10):973-978
- Information Disclosure Available from: <https://www.data.go.kr/data/15045049/fileData.do#> Access data, 2026.01.26.
- Information Disclosure Available from: https://www.kmta.or.kr/kr/data/stats_spend.php Access data, 2026.01.12.
- Kim HS. Age- and gender-related differences of muscle mass in Korean. *Journal of Obesity & Metabolic Syndrome* 2012;21(4):220-227
- Kim JY. The ergonomic evaluation of low back pain of the manual lifting workers. *Korean Journal of Occupational and Environmental Medicine* 1998;10(3):343-361
- KOSHA. Assessment of occupational risk factors for the prevention of musculoskeletal disorders related to work, 2000
- Kyle UG, Genton L, Hans D, Karsegard L, Slosman DO, Pichard C. Age-related differences in fat-free mass, skeletal muscle, body cell mass and fat mass between 18 and 94 years. *European Journal of Clinical Nutrition* 2001;55(8):663-672 <https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1601198>
- Lord MJ, Small JM, Dinsay JM, Watkins RG. Lumbar lordosis: Effect of sitting and standing. *Spine* 1997;22(21):2571-2574
- NIOSH. Revised NIOSH lifting equation (Waters TR et al.). CDC Stacks. 2021 <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/110725>
- Plagenhoef S, Evans FG, Abdelnour T. Anatomical data for analyzing human motion. *Research Quarterly for*

Exercise and Sport 1983;54(2):169-178

Tuzun C, Yorulmaz I, Cindas A, Vatan S. Low back pain and posture. Clinical Rheumatology 1999;18(4):308-312

Xia T, Law LAF. A theoretical approach for modeling peripheral muscle fatigue and recovery. Journal of Biomechanics 2008;41(14):3046-3052 <https://>

doi.org/10.1016/j.jbiomech

<저자정보>

김병훈(박사, 민주노총), 김영미(조직국장, 민주노총),
이균호(지회장, 민주노총), 하권철(교수)