

단순화된 기준에 기반한 경추안마기 구동부 설계안의 평가

Evaluation of Design Variants of Drive Mechanisms for a Neck Massager based on a Simplified Criterion

박정현¹, 김권희^{2,✉}, 채수원², 조창희²
Jung Hyun Park¹, Kwon Hee Kim^{2,✉}, Soo Won Chae², and Chang Hee Cho²

¹ 고려대학교 대학원 기계공학과 (Mechanical Engineering, Graduate School, Korea University)

² 고려대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Korea University)

✉ Corresponding author: kwonhkim@korea.ac.kr, Tel: +82-2-3290-3360

Manuscript received: 2014.6.10 / Revised: 2014.11.27 / Accepted: 2014.12.1

At the early stages of engineering design, a number of design concepts may be suggested. With a great degree of freedom, making a good choice may be a challenge at this stage. In this study, a simplified evaluation criterion for design concepts is presented based on cost, simplicity and safety. Cost is estimated by the amount of materials and the required level of tolerance. Simplicity is represented by the number of parts, assembly steps, and fasteners. Safety is assessed by the level of potential failure. The proposed criterion is applied to an example design of driving mechanisms for cervical vertebrae massage machine.

Key Words: Design evaluation (설계평가), Cost (비용), Simplicity (단순성), Safety (안전성), Simplified criterion (단순화된 평가기준)

기호설명

m = mass

p = price/mass

i = part number

N_d = dimensional tolerances

N_g = geometric tolerances

N_p = total number of parts

N_{as} = assembly steps

N_f = number of fasteners

L_f = length of force flow line through a part

N_{oc} = number of orientational changes in the force flow line greater than 45 degree

1. 서론

직관적 방법이나, TRIZ 및 생태모방학과 같은 체계적인 방법을 이용한 개념설계 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.¹⁻³ 이러한 기법들은 여러 제품의 혁신적 설계에 적용되고 있다. 제품 개발의 초기 단계에서는 다양한 설계 개념이 제안될 수 있다. 개념설계의 취약성은 높은 개발비용과 제품의 결함으로 낮은 생산성의 원인이 된다. 따라서 개념설계 단계에서 다양한 설계개념을 신속히 평가하여 올바른 선택을 하는 것은 매우 중요하다.

설계의 평가와 관련하여 여러 연구가 진행되다 있다: Singh 등⁴의 경첩구조에 대한 제조비용 평

가모델; Li등⁵의 경첩구조에 대한 공차민감도분석을 이용한 제조비용 평가모델; Sevaraj등⁶의 항공기 도어패널 형상에 따른 제조비용관계를 분석하여 제안한 형상최적화 모델; Sanz-Lobera등⁷의 금속부품 절삭가공비용 추정 모델; Lin등⁸의 헬리콥터 로터-블레이드 세트에 대한 재료비 및 제조비용모델; Nagahanumaiah등⁹의 사출 금형 제작비용 평가모델; Roy등¹⁰은 항공기 꼬리날개의 재료비 기반 비용평가모델; Madan등¹¹의 다이캐스팅 부품의 제작비용 평가모델; Ruffo등¹²의 레이저 소결 부품의 소결 시간 최적화 모델; Zhang등¹³의 연간 풍력발전 전력당 발생비용 최소화 모델; Agyapong-Kodua등¹⁴의 열 교환기 제조비용 산출모델 등의 연구가 있었다.

기존 설계평가 방법들은 부품들의 구체적인 형상 및 치수,^{4,14} 각 치수의 구체적인 공차수준,^{4,6,8,10} 각 부품의 재질,^{8,10,11} 제작방법 및 정밀도,^{4,9,11,14} 유지비용¹³ 등에 대한 정보들을 요구한다. 또한 기존 연구들로부터 제안된 설계평가모델들은 많은 설계 변수들로 이루어진 복잡한 수식으로 표현되어 있다. 하지만 설계 초기 단계인 개념설계 단계에서는 각각의 설계변수들에 대한 구체적인 값을 알 수 없다. 더구나 도출된 아이디어들을 신속하게 평가하여야 하기 때문에, 기존의 제안된 평가모델보다 단순하고 기초적인 변수들로만 이루어진 새로운 평가 방법이 필요하다. 본 연구에서는 제품 개발의 개념설계 단계에서 적용 가능한 단순화된 설계평가모델을 제안하였다. 또한, 제안된 평가모델을 경추안마기¹⁵ 구동부 설계에 적용하여, 타당성과 유용성을 검증하였다.

2. 단순화된 개념 설계 평가기준

Pahl과 Beitz¹⁶는 구현설계의 기본원리로 명료성, 단순성, 안전성을 제안하였다. 이는 각 부품의 기능이 명확해야 하고, 각 부품의 형상이 단순하면서 전체 수량이 적어야 하고, 각 부품이 파손에 대하여 안전해야 한다는 뜻이다. 공학적 설계에서 고려해야 하는 요소들은 많이 있겠으나 모든 요소들은 결국 위의 세가지 원리로 귀결될 수 있다. 명료성은 부품 간의 과다구속, 열변형, 간섭 등을 배제함으로써 얻어지는데, 이 부분은 구현설계 단계에서 조치 가능한 것으로 보고 설계개념의 평가 기준에서 배제한다. Pahl과 Beitz가 제안한 구현설계의 기본 원리 중에서 특히 단순성과 안전성은 개념설계 단계에서 결정된 설계변수들에 의한 영향

이 구현설계에서 구체화 되는 것이기 때문에, 개념설계 단계에서 위의 변수들에 대한 고려는 필수적이다. Pugh¹⁷ 또한 공학설계에서 단순성을 강조하였다. 단순성은 제조의 용이성을 통한 생산비용의 감소로 귀결된다.

단순성은 부품 수(PC)와 조립편의성(EA)으로 구성된다. 부품 수는 최하위 단계의 부품 총 수량을 의미하고, 조립편의성은 총 조립 공정 수와 체결 요소(나사 등) 숫자의 총합으로 정의한다. 일단 각 부품의 설계 개념이 선택되면 이로부터 각 부품의 제조에 필요한 소재비용(MC)과 공차비용(TC)이 결정된다. 소재비용은 각 부품의 형상에 따른 최종중량기준으로 산정하며, 공차비용은 치수공차나 형상공차가 필요한 부위 개수의 총합으로 결정된다.

소재비용이나 공차비용은 단순성을 확보하는 과정에서 결정되므로 구현설계 단계에서 평가가 가능하나, 경험이 풍부한 엔지니어들은 개념설계 단계에서도 어느 정도 추정이 가능하다. 소재비용과 공차비용은 총 비용에서 차지하는 비중이 특별히 크므로, 여기서는 별도의 제작비용 항목으로 구분하여 평가하기로 한다.

안전성은 파손가능성(PF)으로 판단하며, 주요 부품의 하중전달경로 총 거리와 하중전달 경로상에서 45도 이상의 방향 전환 횟수로 판단한다. 이상 PC, EA, MC, TC, PF 등 5가지 요소에 대한 가중치는 설계 대상 제품의 특성에 따라 유연하게 선택하도록 한다.

2.1 단순성 평가

Ulrich등¹⁸은 DFM (design for manufacture)를 통하여 소재 및 공정비용을 예상하여 이것을 감소시키는 방법을 제안하였고, Boothroyd¹⁹는 DFA (design for assembly)를 통하여 제품의 부품수, 부품의 취급 용이성, 삽입 용이성 등으로 조립의 효율성을 예상하고 설계를 개선하는 방법론을 제안하였다. 이러한 기존의 연구 결과를 반영하면서도 개념설계 단계에서 신속하게 설계를 평가할 수 있는 방법으로 부품수의 최소화와 조립의 편의성을 고려할 수 있다. 부품수는 설계에서 제안된 부품의 총 수량을 의미하며, 조립편의성은 총 조립 공정 수와 체결요소(나사 등) 숫자의 총합으로 정의한다.

$$PC = N_p \tag{1}$$

$$EA = N_{as} + N_f \tag{2}$$

2.2 제작비용 평가

제작비용은 각 부품의 소재비용과 공차수준에 따른 가공비용으로 분류할 수 있다. 소재비용은 소재의 종류와 사용량에 따라 결정되는데, 단순화를 위하여 각 부품의 가공여유를 제외하고 최종형상을 기준으로 소재비용을 산정한다. 공차비용은 치수공차와 형상공차를 관리해야 하는 부위의 개수와 공차의 수준으로 결정된다. 역시 단순화를 위하여 공차의 수준은 반영하지 않고, 공차관리 부위의 수로 비용을 판단한다. 치수공차에 비하여 형상공차는 물리적으로 구현하기가 어려우므로 치수공차 대비 비용의 가중치를 2배로 선택한다.

$$MC = \sum_{i=1}^n (m \times p)_i \tag{3}$$

$$TC = N_d + 2N_g \tag{4}$$

2.3 안전성 평가

Pahl과 Beitz¹⁶는 하중전달경로를 힘흐름선(flowlines of force)으로 표현하고 힘흐름선의 길이와 굴곡이 최소화 되어야 한다는 이론을 제안하였다. 부품의 하중전달 경로가 짧으며, 하중전달 경로상의 방향이 급격하게 바뀌지 않을수록 파손가능성은 낮아진다. 이러한 관점에서 파손가능성을 다음과 같이 정의한다.

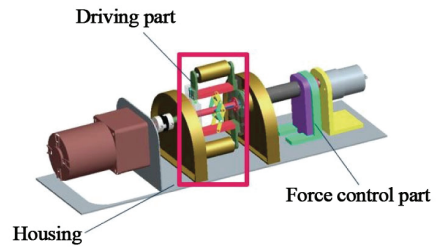
$$PF = N_f \times N_{oc} \tag{5}$$

3. 경추안마기 구동기구 설계 및 평가

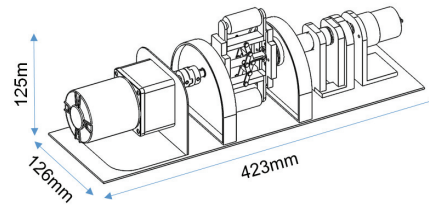
3.1 경추안마기 구동기구

본 연구의 대상인 경추안마기를 Fig. 1에 나타내었다. 경추안마기는 하중제어부, 구동부, 하우징등으로 구성되며 본 연구의 대상인 구동부를 Fig. 1(c)에서 보여준다.

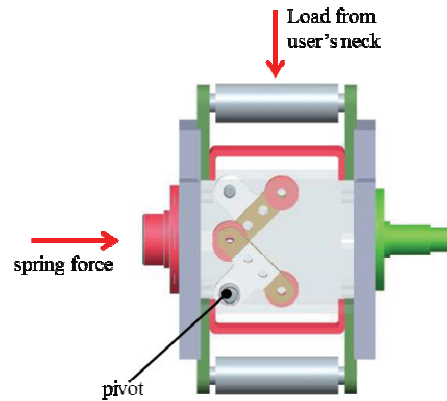
경추안마기는 누운 자세에 있는 사용자의 목부분을 지지하는 롤러가 목의 길이 방향으로 이동을 하면서 마사지를 수행한다. 경추안마기의 구동부는 스프링의 하중을 경추로 전달하는 것이 가장 중요한 기능이며, 이 기능을 구현하는 여러 가지 설계안을 생각할 수 있다. 이 기능을 수행하기 위한 구동부 기구의 네 가지 설계 아이디어로 기존의 피벗형 구조, 유압형 구조, 췌기형 구조 및 링크형 구조를 제안할 수 있다.



(a) Layout of neck massager



(b) Dimensions



(c) Driving structure (pivot)

Fig. 1 Neck massager

Fig. 2는 피벗형 구조의 구동부를 보여준다. 예비 압축된 코일 스프링으로 제어되는 탄성력을 T형 구조의 롤러에 가하면, 피벗핀에 의하여 T구조가 회전하면서 반대쪽 롤러가 경추 가압부에 하중을 전달하도록 하는 구조이다. Fig. 3은 유압형 구조이다. 스프링의 탄성력은 T형 유체관 내부의 유체를 압축하고, 이 유체의 압력에 의해 경추 가압부를 지지하도록 한다. Fig. 4는 췌기형 구조를 보여준다. 삼각형 모양의 췌기를 이용한 미끄럼 구조를 적용하여 수평방향 탄성력을 수직방향 하중으로 전환하여 경추 가압부에 전달되도록 하는 구조이다. 마지막으로 Fig. 5는 링크형 구조로, 링크와 조인트를 이용하여 탄성력을 전달한다.

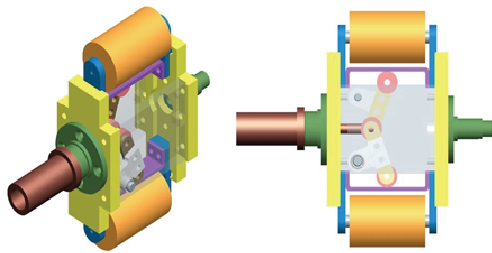


Fig. 2 Pivot type of driving structure

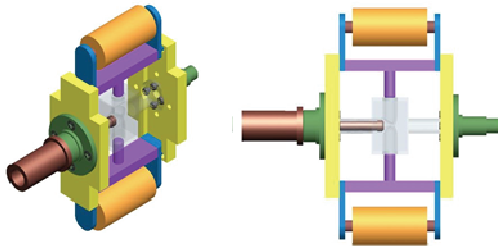


Fig. 3 Hydraulic type of driving structure

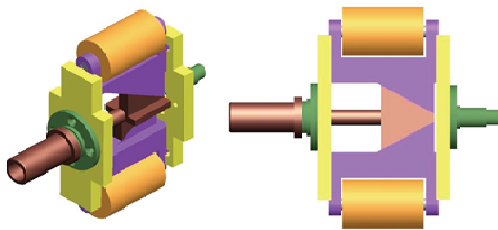


Fig. 4 Wedge type of driving structure

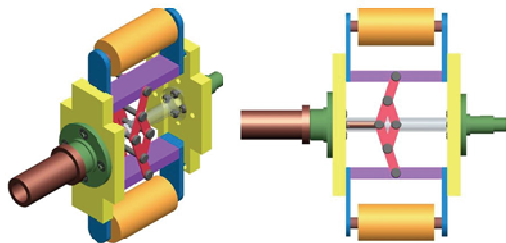


Fig. 5 Linkage type of driving structure

3.2 경추안마기 구동기구 설계 평가

소재의 단가는 시장 가격에 따라 nylon66는 ₩4,000/kg, S45C는 ₩600/kg, POM은 ₩2,000/kg, rubber는 ₩4,800/kg, ESTER ₩2,100/kg 으로 계산하였으며, 소수점의 경우 올림으로 판단하였다.

Table 1, Table 2, Table 3, Table 4, Table 5는 각각 피벗형 구조, 유압형 구조, 쐼기형 구조, 링크형

Table 1 Simplified evaluation of PC

	N_p
Pivot type	30
Hydraulic type	29
Wedge type	12
Linkage type	41

Table 2 Simplified evaluation of EA

	N_{as}	N_f	EA
Pivot type	18	16	34
Hydraulic type	16	24	40
Wedge type	8	8	16
Linkage type	14	24	38

Table 3 Simplified evaluation of MC

Types	Part name	Material	mass(g)	MC (won)
Pivot type	C- frame	S45C	2.44	2
	Base frame	Nylon66	26	104
	Load plate	S45C	1.24	1
	Support plate	S45C	0.85	1
	Sliding ring	Nylon66	1.34	1
	Sliding block	Nylon66	5.8	23
	Hinge pin	S45C	0.42	1
Hydraulic type	T-frame	S45C	8.5	5
	guide	Nylon66	5	20
	Sliding block	Nylon66	5.8	23
	Load fluid	ESTER	10	21
	Rubber ball	Rubber	0.04	1
Wedge type	Sliding block	POM	24	48
	Wedge	POM	5	10
	Wedge pin	POM	6.95	14
Linkage type	I-frame	S45C	7.4	5
	long link	S45C	4.18	3
	short link	S45C	2.28	2
	pin(large)	S45C	2.97	2
	pin(medium)	S45C	4.12	3
	pin(small)	S45C	1.48	1
	guide	Nylon66	2.15	9

Table 4 Simplified evaluation of TC

	N_d	N_g	TC
Pivot type	6	0	6
Hydraulic type	7	0	7
Wedge type	5	0	5
Linkage type	5	0	5

Table 5 Simplified evaluation of PF

	L_f , (mm)	N_{oc}	PF, (mm)
Pivot type	101	5	909
	101	4	
Hydraulic type	101	3	606
	101	3	
Wedge type	101	4	707
	101	3	
Linkage type	122	5	1098
	122	4	

Table 6 Total evaluation of the four design variants

		PC	EA	MC	TC	PF	Total
Pivot type	Value	29	41	113	6	909	2
	Score	0	0	0	1	1	
Hydraulic type	Value	18	32	70	7	606	9
	Score	2	2	2	0	3	
Wedge type	Value	12	16	72	3	707	12
	Score	3	3	1	3	2	
Linkage type	Value	28	39	25	5	1098	7
	Score	1	1	3	2	0	

구조에 대하여 본 연구에서 제안하는 단순화된 설계평가기준을 적용하여 평가한 결과를 각 평가 항목별로 보여준다.

3.3 평가요소의 점수화

앞서 평가한 5개 평가요소 간 가중치는 동일하게 설정하였다. 각 평가 요소에 6 점을 배분하였다. 네 가지 설계 안의 요소 별 점수는 1위 3점, 2위 2점, 3위 1점, 4위 0점으로 부여하며, 동점자가 존재할 경우 동점순위의 점수를 합산하여 동점자의 인원수만큼 점수를 나누어 배분한다.

Table 6은 본 연구에서 제안된 단순화된 평가기준을 이용하여 경추안마기 구동구조에 대한 네 가지 개념설계에 대한 종합평가를 정리한 것이다.

4. 결론

첫 번째 디자인은 평가요소 중 MC 값을 낮추기 위한 설계이다. 소재비용을 낮추기 위하여 각 부품의 부피를 최대한으로 줄였으며, 일반적으로 많이 사용되는 기계용 탄소강등을 사용하여 소재비용을 낮추도록 설계하였다. 두 번째 디자인은 PF 값을 낮추기 위한 설계이다. 파손가능성을 최

대한 줄이기 위하여 부품에 받는 하중이 최대한 줄이기 위하여 유체를 사용하여 힘을 전달하였다. 또한 상하대칭구조를 사용하여 구동부의 안전성을 높일 수 있도록 설계하였다. 세 번째 디자인은 PC 값을 낮추기 위한 설계이다. 복수의 부품을 하나의 부품으로 만들어 부품의 수를 최대한으로 줄일 수 있도록 설계하였다. 네 번째 디자인은 TC 값을 낮추기 위한 설계이다. 부품간의 마찰을 최대한 줄일 수 있도록 설계하였으며, 미끄럼과 마찰이 발생하는 부분만 치수공차를 적용하여 공차관리를 하였다. 모든 요소들을 종합한 개념평가에 의하면 가장 높은 점수를 얻은 췌기형 구조가 가장 좋은 설계로 판단된다.

본 연구에서 개념설계 단계에서 판단 가능한 설계변수만을 이용하여 도출된 아이디어들을 평가하는 방법을 제안하였다. 평가방법은 설계의 단순성, 제작비용, 안전성에 기반한 모델로 표현되었다. 본 모델을 이용하여 설계를 빠르고 간편하게 평가할 수 있으며, 설계의 우수성을 수치적으로 표현할 수 있다. 또한 단순화된 평가방법은 제품특성과 사용 상황에 맞추어 가중치의 적용이 가능하기 때문에 유연한 적용이 가능하다.

개념설계 단계에서 얻을 수 있는 제한된 설계 변수들로만 설계를 평가하는 것은 자칫 부정확한 결과가 도출될 수 있다. 현실적으로 설계문제들은 많은 변수들을 갖고 있기 때문에 구현설계 단계에서는 기존 연구들에서 제시한 다양한 평가모델들이 필요할 수 있다. 단순성을 추구하는 본 연구의 평가모델을 활용하기 위해서는 상황에 따라 적절한 가중치를 부여할 수 있는 설계자의 경험과 판단력이 필요하다.

후 기

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2007-0056094).

REFERENCES

- Field, B. W., "Visualization, Intuition, and Mathematics Metrics as Predictors of Undergraduate Engineering Design Performance," *Journal of Mechanical Design*, Vol. 129, No. 7, pp. 735-743, 2007.

2. Lackner, J., Waldhauser, W., Major, R., Major, L., and Hartmann, P., "Biomimetics in Thin Film Design–Wrinkling and Fracture of Pulsed Laser Deposited Films in Comparison to Human Skin," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 215, pp. 192-198, 2013.
3. Cho, C.-H., Chae, S.-W., and Kim, K.-H., "Search for a New Design of Deburring Tools for Intersecting Holes With Triz," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 70, No. 9-12, pp. 2221-2231, 2014.
4. Singh, P., Jain, P., and Jain, S., "A Genetic Algorithm-based Solution to Optimal Tolerance Synthesis of Mechanical Assemblies with Alternative Manufacturing Processes: Focus on Complex Tolerancing Problems," *International journal of production research*, Vol. 42, No. 24, pp. 5185-5215, 2004.
5. Li, Y.-H., Li, W., and Ge, Z., "Research of Optimizing Cost Model of Tolerance based on Robust Design," *International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (ICQR2MSE)*, pp. 26-29, 2011.
6. Selvaraj, P., Radhakrishnan, P., and Adithan, M., "An Integrated Approach to Design for Manufacturing and Assembly based on Reduction of Product Development Time and Cost," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 42, No. 1-2, pp. 13-29, 2009.
7. Sanz-Lobera, A., Sebastián, M. A., and Pérez, J. M., "New Cost–Tolerance Model for Mechanical Part Design," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 51, No. 5-8, pp. 421-430, 2010.
8. Lin, T., Lee, J.-W., and Bohez, E., "New Integrated Model to Estimate the Manufacturing Cost and Production System Performance at the Conceptual Design Stage of Helicopter Blade Assembly," *International journal of production research*, Vol. 50, No. 24, pp. 7210-7228, 2012.
9. Mukherjee, N. and Ravi, B., "An Integrated Framework for Die and Mold Cost Estimation using Design Features and Tooling Parameters," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 26, No. 9-10, pp. 1138-1149, 2005.
10. Roy, R., Souchoroukov, P., and Griggs, T., "Function-based Cost Estimating," *International journal of production research*, Vol. 46, No. 10, pp. 2621-2650, 2008.
11. Madan, J., Rao, P., and Kundra, T., "System for Early Cost Estimation of Die-Cast Parts," *International journal of production research*, Vol. 45, No. 20, pp. 4823-4847, 2007.
12. Ruffo, M., Tuck, C., and Hague, R., "Empirical Laser Sintering Time Estimator for Duraform PA," *International journal of production research*, Vol. 44, No. 23, pp. 5131-5146, 2006.
13. Zhang, J., Chowdhury, S., Messac, A., and Castillo, L., "A Response Surface-Based Cost Model for Wind Farm Design," *Energy policy*, Vol. 42, pp. 538-550, 2012.
14. Agyapong-Kodua, K., Brown, R., Darlington, R., and Ratchev, S., "An Integrated Product–Process Design Methodology for Cost-Effective Product Realisation," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 25, No. 9, pp. 814-828, 2012.
15. Cho, C. H., Kim, K. H., Kim, J. H., and Chae, S. W., "Cervical Vertebrae Massage Machine," *KOR Patent*, No. 10-1399744, 2014.
16. Pahl, G. and Beitz, W., "Engineering Design: A Systematic Approach," Springer, 1996.
17. Pugh, S., "Total Design," Addison-Wesley, 1991.
18. Ulrich, K. T. and Eppinger, S. D., "Product Design and Development," Irwin McGraw-Hill, 2003.
19. Boothroyd, G., "Product Design for Manufacture and Assembly," Marcel Dekker Inc, 2007.