

스프링구동 메커니즘의 충격 하중을 받는 링크부재의 내피로 특성 향상

안길영*, 박상후**, 이부윤#, 김원진**, 오일성*

Improvement of Fatigue-Proof Characteristics of Link Members Under Impact Loadings by a Spring-Actuated Mechanism

Kil Young Ahn*, Sang Hu Park**, Boo Youn Lee#, Won Jin Kim** and Il Sung Oh*

ABSTRACT

The air circuit breaker (ACB) with the spring-actuated mechanism was studied to improve the fatigue-proof characteristics of its link. The low-cycle fatigue fracture phenomenon occurred on the critical link, called h-link, of ACB from the repeated rapid closing and opening operations. To analyze the cause of failure, dynamic FE-analysis on the h-link part of ACB was performed considering the velocity and acceleration of the links per time as boundary conditions, which were obtained by using ADAMS. Also, the S-N curve obtained by experiments was used to investigate requirement on the fatigue-proof characteristics. Then, to reduce the maximum tensile stress on the h-link, three types of h-link were examined and one of them was selected.

Key Words : Air Circuit Breaker(기중 회로 차단기), Spring-Actuated Mechanism(스프링구동 메커니즘), Low-Cycle Fatigue(저주기 피로), Maximum Tensile Stress(최대 인장 응력), S-N curve(S-N 피로특성곡선)

1. 서론

기중 회로차단기(air circuit breaker: ACB)는 배전 선로의 과전류 등의 선로 이상이 발생하였을 때 기중 소호 방식으로 전류를 차단하여 부하 기기를 보호하는 전기 기기이다. 이러한 차단기는 일반적으로 차단 용량이 크고, 과전류 차단장치가 부착되어 있으며 필요한 부하의 조건에 따라 조정이 가능하도록 되어 있다.

기중 회로차단기는 전기 접점을 수십 ms 내에

고속으로 개폐(opening/closing)하기 위하여, 미리 인장 또는 압축되어진 스프링에 의해 링크 기구를 구동시키는 메커니즘을 사용한다.¹ 이러한 스프링구동 메커니즘(spring-actuated mechanism)의 장점은 구조가 간단하면서도 큰 질량을 가진 접점들을 수십 ms 동안에 높은 속도로 이동시킬 수 있으며, 스프링과 링크의 변경으로 간단하게 접점의 운동 특성을 제어할 수 있다는 것이다.

또한 링크들이 적절한 강도(strength)로 설계된 다면 차단기에 요구되는 기계적인 개폐수명을 쉽

2002년 7월 3일 접수

* LG 산전 전력연구소

교신저자, 계명대학교 기계자동차공학부

Email bylee@kmu.ac.kr Tel. (053) 580-5922

** 계명대학교 기계자동차공학부

게 달성할 수 있다. Fig. 1는 본 연구의 대상 모델인 스프링구동 메커니즘을 가진 기중 회로 차단기의 형상을 나타낸다.

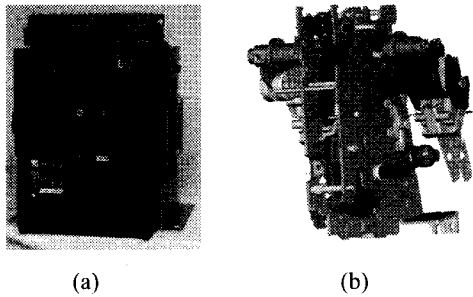


Fig. 1 Photography of air circuit breaker; (a) front view and (b) interior view

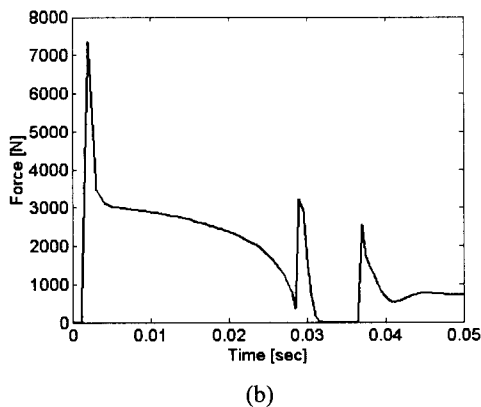
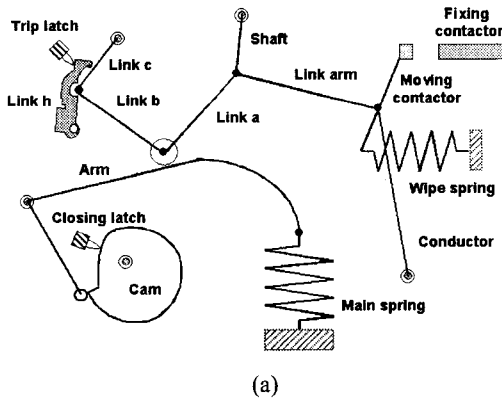


Fig. 2 Operating mechanism of air circuit breaker; (a) schematic diagram, (b) loading history of h-link during closing operation

Fig. 2(a)에서 회로차단기의 중요한 기구학적 구조를 이용하여, 전기 접점의 개폐 동작을 기술하면 다음과 같다. 먼저, 모터에 의한 캠의 회전으로 주 스프링(main spring)이 압축 되면서 링크들을 가동시킬 수 있는 초기 상태가 된다. 다음으로 폐쇄 래치(closing latch)를 해제하면 압축된 주 스프링의 힘은 암(arm)을 상부로 운동 시켜, 암에 접촉하고 있는 롤러에 연결된 링크 a와 b를 일직선이 되도록 한다. 이때, 가동 접점(moving contactor)은 고정 접점(fixing contactor)에 붙게 되고 와이프 스프링(wipe spring)은 압축되어 접점을 가압하게 됨으로써 폐쇄 동작(closing operation)은 완성된다. 다음, 이들 접점이 붙은 상태에서 차단 래치(trip latch)를 해제하면, 링크 c가 회전하면서 이전에 압축된 와이프 스프링이 링크들을 운동시켜 가동 접점을 고정 접점으로부터 분리시킨다. 따라서 개방 동작(opening operation)이 완성된다.

이러한 기중 회로차단기의 구동 메커니즘은 조인트들과 링크들로 구성된 복잡한 기구학적 체인 구조로 이루어져 있으며, 동작시 스프링력에 의하여 부품들은 충격에 의한 영향을 많이 받게 된다. 특히, 본 연구 대상의 차단기에서 폐쇄 동작시에 주 스프링력에 의해 링크들이 고속으로 운동할 때, 차단 래치와 링크 c 사이에서 링크 c의 운동을 안내(guide)하는 링크 h는 링크 c에 의해 충격을 받게 된다. Fig. 2(b)는 폐쇄 동작시에 링크 h가 받는 하중을 나타내며, 초기에 아주 큰 충격력이 작용함을 알 수 있다. 차단기의 기계적인 개폐 동작 시험과정에서 앞서 언급한 충격력을 반복적으로 받게 되는 경우에 링크 부재의 피로파괴(fatigue fracture) 현상이 발생된다.

차단기에 대한 초기의 연구는 메커니즘에 대한 체계적 해석보다는 간단한 이론과 함께 설계자의 경험 및 시행착오에 의해 주로 설계되어 왔다.^{2,3} 그러나 최근 컴퓨터의 이용과 발전에 따라, 여러 개의 물체로 이루어진 시스템에 대한 다물체 동역학(multi-body dynamics)적 거동을 분석할 수 있는 ADAMS⁴, DADS 등과 같은 프로그램들과 충격에 의한 재료역학적 변형을 분석할 수 있는 유한요소 해석(finite element analysis) 프로그램들⁵이 개발되어 차단기들의 구동 메커니즘에 존재하는 여러 동적 현상을 모델링하고 설계의 개선 및 최적화에 이용하려는 연구가 가능하게 되었다.⁶⁻¹⁰

본 연구에서는 기중 회로차단기에서 수 천회 반복 개폐 동작 시험에서 주 스프링력에 의하여 고속으로 링크 c 가 링크 h 에 충돌하여 발생하는 현상을 동적 거동해석과 충격해석을 통하여 규명하고, 충격에 의한 피로특성 향상을 위한 링크 h 의 형상을 3 가지 검토하고 실험적으로 구한 S-N 피로특성 곡선을 이용하여 피로에 대한 설계 규격의 적합성을 판정하며, 스프링 링크 메커니즘의 분석에 필요한 해석적 접근 방법론을 제시하고자 한다.

2. 재료시험

2.1 인장시험

링크 부재에 사용된 S45C 강의 기계적 물성치를 구하기 위해 상온에서 인장 시험을 수행하였다. 시편은 ASTM 규격¹¹에 의거하여 설계되었고 실제 제품에 사용되고 있는 재료는 아연도금과 칩탄에 의해 표면처리가 된 재료이므로 실제 표면 처리된 시편을 사용하여 인장시험을 하였다. Table 1 은 인장시험 결과로부터 구한 재료의 기계적 물성치의 평균값을 나타낸 것이다.

Table 1 Material properties of S45C under heat treatment

Properties	Values
Yield stress	1188.6 MPa
Ultimate stress	1434.0 MPa

재료의 평균 연신률은 1.12%였으며, 이는 전형적인 취성 파괴(brittle failure) 거동을 나타내었다.

2.2 피로시험

표면 처리된 S45C 재료의 피로 시험을 위한 시험편은 ASTM 규격¹¹에 의거하여 제작하였고, 10톤 용량의 유압식 서보 시스템(10ton MTS)에서 4~8Hz의 Sine 파형을 이용한 하중제어를 사용하여 피로시험을 수행하였다. 피로 시험 결과는 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 응력진폭은 피로수명의 log 값과 선형적인 관계가 있음을 알 수 있고 식 (1)과 같이 표현된다.

$$S = 2315 - (441.3)\log N \text{ (MPa)} \quad (1)$$

여기서 S 와 N 은 각각 응력진폭과 피로수명을 의미하며 S-N 관계식 (1)은 $R(=\sigma_{\min}/\sigma_{\max}) = -1$ 인 경우에 대한 수명식이다.

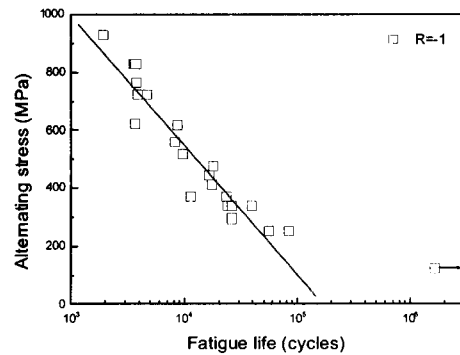


Fig. 3 S-N curve (R = -1)

일반적으로 재료의 피로수명은 같은 응력진폭 일지라도 평균응력(mean stress)이 존재할 경우 다르게 되며, 이러한 경향은 취성 거동을 보이는 재료일수록 그 영향이 크다. 따라서 본 연구에서는 피로 수명에 대한 평균응력의 영향을 고려하는 방법으로 아래 식 (2)의 Goodman 관계식을 이용하였다. 이것을 이용하여 평균응력이 작용할 경우의 등가응력진폭 σ_e 를 계산하여 식 (3)에 나타내었으며, 이때 평균응력은 148.8MPa로 두었다.

$$\sigma_a = \sigma_e \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right)^x \right] \quad (2)$$

$x = 1$ for Goodman relation
 $x = 2$ for Gerber relation

σ_a : alternating stress

σ_m : mean stress

σ_u : ultimate tensile stress = 1434 MPa

$$\sigma_e = 2306.5 - (444.3)\log N \text{ (MPa)} \quad (3)$$

기중 회로차단기의 경우 일반적으로 회로의 개폐가 5000회 이상의 성능을 만족하는 것을 요구하므로 이러한 경우에 등가응력진폭의 크기는 식 (3)에 의하여 663 MPa 이하가 되도록 링크 h의 형상을 도출하여야 하며, 설계안전계수를 감안하

여 70%를 최대 허용응력으로 고려하면 464.1 MPa 이 된다. 따라서, 본 연구에서는 해석적인 방법으로 설계허용 범위 내의 2 가지 형상을 정의하여 내피로 특성을 평가하였다.

3. 충격해석

3.1 해석모델

현 설계안에 대한 링크 h의 변형거동을 분석하기 위하여 Fig. 4 과 같이 링크 h의 충격에 영향을 주는 주변 부품을 고려하여 유한요소 해석모델을 구성하였다. Fig. 4에 나타낸 모델 형상은 기중 회로 차단기 구조 중에서 반복적인 개폐시험시 피로 파괴로 파손이 자주 일어나는 링크 h에 대한 현상을 분석하기 위한 것이며, 개폐 작동시 링크 h와 직접 접촉이 발생되거나 거동에 영향을 주는 부재들도 해석모델에 고려하였다.

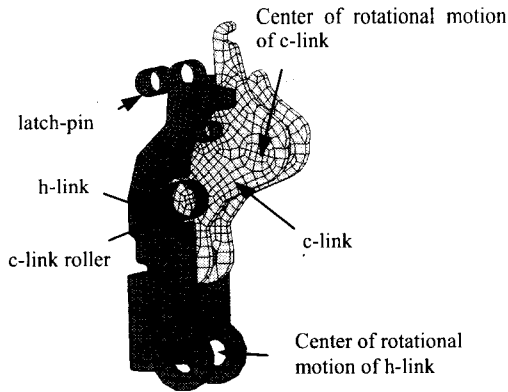


Fig. 4 Finite element model of h-link parts

여기서 링크 c는 Fig. 2에 기술한 바와 같이 주 스프링력과 하부 링크 b의 영향으로 링크 h에 고속으로 접근하여 충돌하게 되는데 그 충격력에 의하여 링크 h가 영향을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 링크 h의 충격력에 대한 내피로 특성을 높이기 위해서 설계가능 범위 이내에서 링크 h의 형상을 개선하여, 충격시 링크에 걸리는 응력을 식 (3)의 등가응력과 비교하여 피로 시험규격이 만족 되도록 해석적으로 검토하였다.

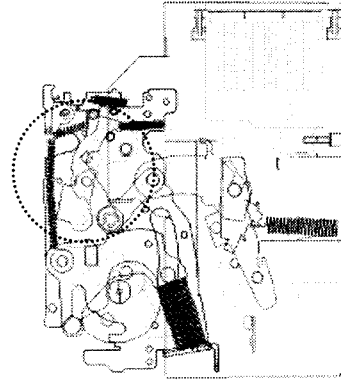


Fig. 5 ADAMS model for kinematical analysis

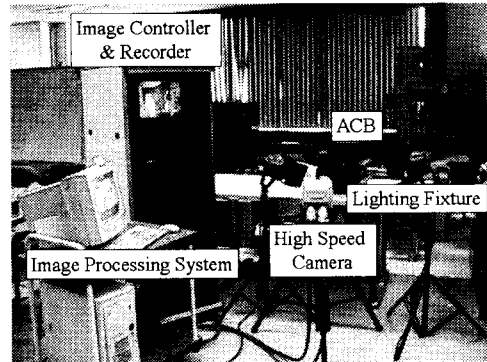


Fig. 6 Experimental setup

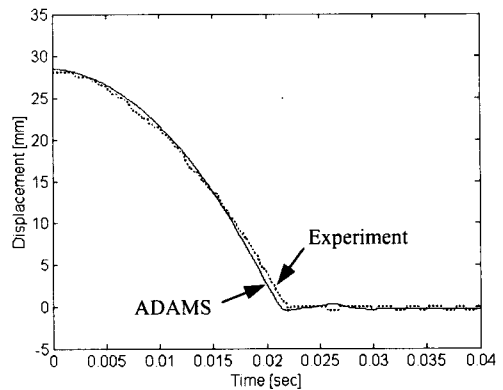


Fig. 7 Comparison of ADAMS and experimental results of displacement of moving contact during closing operation

경계조건으로는 실제와 동일하게 링크 c 와 링크 h 의 기구적 구속조건을 고려해 주었으며 충격 해석에서 가장 중요한 초기 입력 조건인 링크 c 의 거동조건을 구하기 위하여, 기중 회로차단기의 전체 형상을 ADAMS 를 사용하여 강체로 모델링하여 링크 c 에 대한 거동을 구하였다.

Fig. 5 은 기구학적 거동을 분석하기 위하여 사용된 ADAMS 의 전체 해석 모델을 나타낸 것이며 점선원 내부는 링크 h 부분이다. ADAMS 의 동적 해석에 대한 신뢰성은 고속카메라를 사용한 실험 결과와 비교하여 잘 일치함을 알 수 있었으며, Fig. 6 에는 실험장치와 Fig. 7 에는 폐쇄 동작시의 가동 접점의 거동에 대하여 실험과 ADAMS 해석 결과를 비교하여 나타내었다.¹⁰ 그리고 Fig. 8 에는 폐쇄 동작시에 ADAMS 에서 구한 링크 c 부재의 거동을 시간(ms)에 따른 회전각(radian)의 형태로 나타낸 것이다. 또한 폐쇄 동작시에 링크 h 가 받는 하중인 Fig. 2(b)도 회로차단기의 ADAMS 모델에서 구한 것이다.

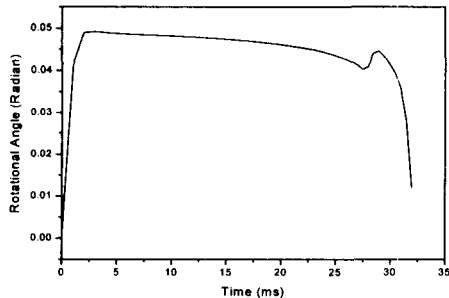


Fig. 8 Rotational angle(radian)-time(ms) curve of c-link

3.2 해석결과

충격해석을 통하여 기존 설계안의 링크 c 와 링크 h 의 거동을 분석한 결과 최대 주응력은 실험에서 피로 파괴가 자주 발생하는 부분과 일치하는 곳으로 Fig. 4 에 나타낸 링크 c 의 롤러(roller)와 접촉하는 부분에 발생하였다.

Fig. 9 는 충격해석을 통하여 기존 설계안에 대한 1 회 개폐시 발생되는 최대 주응력 분포를 나타낸 것이다. 최대 주응력의 크기는 910.2 MPa 로 항복응력 부근까지 올라감을 알 수 있으며 위치는 화살표로 나타내었다. 따라서 식 (3)을 이용하여 피로수명을 계산해 보면 약 1400 cycles 이 된다. 이것은 제품의 신뢰성 평가 실험에서 링크 h 의

수명이 2000~2500 cycles 의 개폐실험에서 파손이 발생한 것과 비교할 때, 다소 차이는 존재하지만 피로 파괴가 저주기에서 발생하는 점과 해석모델 및 피로실험의 오차를 감안할 때 큰 무리가 없는 것으로 판단된다.

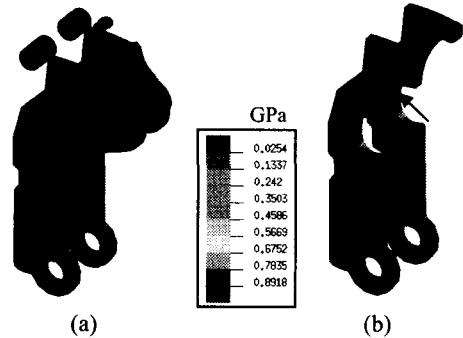


Fig. 9 Principal stress distributions of (a) analysis model and (b) h-link

따라서, 링크 h 의 형상을 설계 적용 가능한 범위 내에서 피로수명이 향상되도록 제안해 보았다. 기존의 연구에서 저주기 파손 방지를 위한 가장 중요한 설계요소로는 최대 응력을 낮추는 것이다¹². 이것을 위해서는 링크 h 의 두께 증가와 충격하중에 대한 굽힘 강성(flexural rigidity)을 증가시키는 방향으로 형상설계를 하였다.

개략적인 설계 개념을 정립하기 위하여 링크 h 가 충격에 의하여 발생하는 변형모드(deformation mode)가 굽힘변형이 지배적이므로 링크 h 를 순수 굽힘(pure bending) 상태의 사각단면 보(beam)로 가정하여 굽힘강성을 검토해 보면 식 (4), (5)에서 굽힘강성은 탄성계수(E)와 관성모멘트(moment of inertia)의 함수로 표현됨을 알 수 있다.

$$FR(\text{flexural rigidity}) = E \cdot I_z \quad (4)$$

$$I_z = bw^3/12 \quad (5)$$

여기서 b 와 w 는 굽힘 사각단면에서 가로, 세로 길이를 의미하는데 링크 h 의 굽힘모드에서 단면 형상을 적용하면 b 는 두께, w 는 링크 h 의 폭을 의미한다. 따라서 물성이 동일한 경우에 관성 모멘트의 값을 올려주는 것이 굽힘강성을 증대하는 방안이고, 링크 h 의 두께는 설계 제한조건에 의하

여 최대한 증가시키는 것으로 설계 개념을 확정하였다. Fig. 10 은 굽힘에 대한 저항을 증가시키기 위하여 기존 설계안을 포함하여 개선 1 안, 개선 2 안으로 하여 링크 h의 3 가지 형상을 나타낸 것이다. Fig. 10 에서 (a)는 기존 설계안을 나타낸 것으로 두께 4mm, 폭 12.85mm 이고, (b)는 개선 1 안으로 부분적으로 응력이 집중되는 부위에 두께를 5mm 로 하고 나머지 부위는 기존안과 동일하게 4mm 로 하며 폭은 3mm 증가시킨 15.85mm 로 한 것이다. 그리고 (c)는 개선 2 안으로 두께를 전체적으로 5mm 로 하고 폭을 기존모델에서 3mm 증가시켜 15.85mm 로 한 것이다.

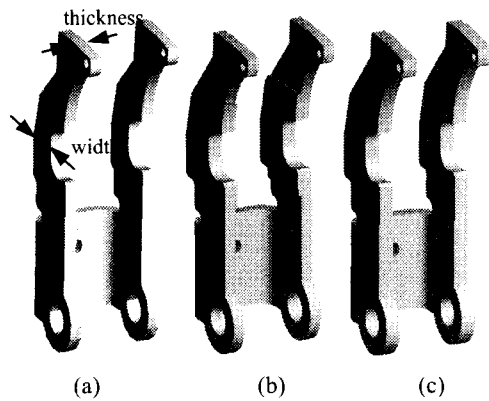


Fig. 10 Three types of h-link shape; (a) original shape, (b) modified-shape 1, and (c) modified-shape 2

각각의 링크 h 설계안은 다른 부품과의 간섭의 영향을 고려하였으며 폭의 경우 기중 회로차단기의 성능에 영향을 주지 않는 범위에서 최대한 한 것이다. 개선안에 대하여 충격해석을 실시한 결과 링크 h 응력집중부의 최대 주응력을 Table 2 와 같이 얻을 수 있었다.

Table 2 Maximum principal stresses of the h-links

Type of H-Link	Max. Principal Stress (MPa)
Original shape	910.2
Modified 1 shape	529.9
Modified 2 shape	454.4

Fig. 11 은 각 설계안에 대한 해석 결과를 나타내었으며 화살표의 위치는 최대 주응력 발생 부위이다. 개선 1 안과 개선 2 안의 경우는 기존 설계

안에 비하여 최대응력이 50% 수준으로 저감됨을 알 수 있었다. 또한 설계규격 만족 조건인 5000 cycles 이상의 피로수명을 개선 1, 2 안 모두가 만족하며, 설계안전계수를 고려하여 최대허용 응력의 70%를 고려한 경우는 개선 2 안이 만족하는 것으로 평가되었다.

Fig. 12 는 기존 설계안과 최종적으로 선택된 개선 2 안에 대한 실제 제품형상을 비교하여 나타낸 것이다.

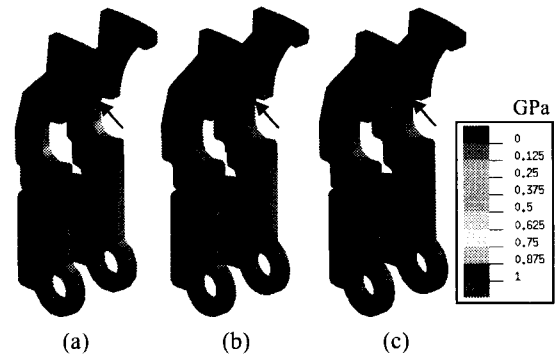


Fig. 11 Maximum principle stress distribution of the h-links; (a) original shape, (b) modified-shape 1, and (c) modified-shape 2

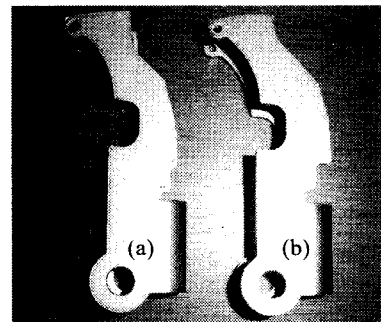


Fig. 12 Photography of (a) original and (b) modified-shape2

4. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

1. 기중 회로차단기에서 반복적인 개폐 시험을 통하여 링크 h 부분이 저주기 피로파괴 현상을 보임을 알 수 있었으며, 그 원인으로는 링크 c 의 충돌에 의한 과도한 응력으로 판단된다.

2. 링크 h 의 굽힘변형에 의한 응력을 줄이기 위한 설계 개선안 평가에서 개선 1, 2 안 모두가 설계 규격을 만족한 것으로 판단되며 이것은 굽힘강성을 증대시킴으로서 굽힘응력을 감소시키는 방향으로 형상을 개선하였기 때문으로 판단된다.
3. 최종 선택된 설계안은 개선 2 안으로서 제작 공정과 설계안전계수를 고려할 때 가장 우수한 형상으로 판단되며, 실제 적용시 피로수명 향상을 설계규격수준 이상으로 만족할 것으로 판단된다.

2001.

11. ASTM code E466-82.
12. Collins, J.A., "Failure of Materials in Mechanical Design," 2nd edition, A Wiley-Interscience Publication, 1993.

참고문헌

1. Flurscheim, C. H., Power Circuit Breaker Theory and Design, Short Run Press Ltd., 1975.
2. Van Sickle, R. C. and Goodman, T. P., "Spring Actuated Linkage Analysis to Increase Speed," Product Engineering, Vol. 24, pp. 152-157, July 1953.
3. Barkan, P., "Dynamics of High-Capacity Outdoor Oil Circuit Breaker," AIEE Transactions, Vol. 74, Part III, pp. 671-676, 1955.
4. "ADAMS User's manual," <http://www.adams.com>
5. "Pam-Crash User's manual," ESI software, 2001.
6. Root, R. R., "The Circuit Breaker-A Practical Example in Engineering Optimization," Mechanism and Machine Theory, Vol. 18, No. 3, pp. 229-235, 1983.
7. Jobes, C. C., Palmer, G. M. and Means, K. H. "Synthesis of a Controllable Circuit Breaker Mechanism," Transaction ASME-Journal of Mechanical Design, Vol. 112, pp. 324-330, Sept., 1990.
8. Walser, H., "Using ADAMS in the Development of High Voltage Switching Gears," 11th European ADAMS User's Conference, pp. 365-375, Nov. 19-20, 1996.
9. 박상후, 이부윤, 안길영, 오일성, 윤영관, 김대균, "스프링 링크 메커니즘에서 부재의 내충격성 향상을 위한 연구," 한국정밀공학회 추계학술대회논문집 pp. 777-781, 2001.
10. 안길영, 권병희, 오일성, 윤영관, "스프링구동 링크를 가진 기중회로차단기의 동적 분석," 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp. 812-815,