

## 스프링 링크 메커니즘에서 부재의 내충격성 향상을 위한 연구

박상후\*, 이부윤(계명대학교, 기계·자동차공학부),  
안길영, 오일성(LG 산전, 전력연구소), 윤영관, 김대균(LG 산전, 청주공장)

### A Study on the Spring-Link Mechanism to Improve the Shock-proof Characteristics of Link

S. H. Park, B.Y. Lee(Keimyung Univ.),  
K.Y Ahn, I.S. Oh (ElectroTechnology R & D Center, LGIS),  
Y.K. Yoon, D.K. Kim (Cheong-Ju Plant, LGIS)

#### ABSTRACT

One of the spring-link mechanisms, the air circuit breaker(ACB), was studied to improve the shock-proof characteristics of it. The low-cycle fatigue fracture phenomenon was occurred on the critical link, called h-link, of ACB for the repeated rapid closing and opening operations. To analyze the cause of failure, dynamic FE-analysis on the h-link part of ACB was accomplished with considered the velocity and acceleration of the links per time as boundary conditions, which were obtained by using ADAMS. Then, to reduce the maximum tensile stress on the h-link, three types of h-link were suggested and one of them was selected. From this study, we suggested the process of analysis on the high-speed motion behavior part related low-cycle fatigue fractures.

**Key Words :** Air Circuit Breaker(기중 회로 차단기), Low-Cycle Fatigue(저주기 피로), Spring-link Mechanism(스프링 링크 메커니즘), Maximum Tensile Stress(최대 인장 응력)

#### 1. 서론

스프링 링크 메커니즘(spring-link mechanism)을 가진 시스템 중에서 전력기기에 많이 사용되고 있는 기중 회로 차단기(air circuit breaker: ACB)는 배전 선로의 과전류 등의 선로 이상이 발생하였을 때 기중 소호 방식으로 전류를 차단하여 부하기기를 보호하는 전기 장치이다. 이러한 차단기는 일반적으로 차단용량이 크고, 과전류 차단장치가 부착되어 있으며 필요한 부하의 조건에 따라 조정이 가능하도록 되어 있다.

기중 회로 차단기는 전기 접점들로부터 안전한 차단을 위하여 수십 마이크로 초(micro-sec) 이내에 개폐되어야 하므로 미리 인장 또는 압축되어진 스프링에 의해 링크기구를 구동시키는 메커니즘이 사용되어진다<sup>(1)</sup>. 이러한 스프링 구동(spring-actuated) 링크기구는 구조가 간단하면서도 큰 질량을 가진 접점들을 수십 ms 동안에 높은 가속도와 속도로

움직이게 할 수 있으며, 스프링과 링크의 변경으로 간단하게 접점의 운동특성을 제어할 수 있다는 장점이 있다. Fig.1 에는 본 연구에 활용된 스프링 구동 링크를 가진 기중 회로 차단기의 외부 형상을 나타내었다.

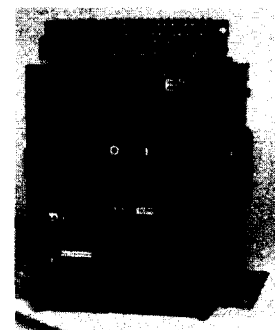


Fig. 1 Photography of air circuit breaker

전기 접점의 개폐동작을 간략하게 기술하면 Fig. 2 에 나타낸 것처럼 먼저, 모터에 의한 캠의 회전으로 메인 스프링(main spring)이 압축되면서 링크들을 가동시킬 수 있는 초기 상태가 된다. 다음으로 투입 래치(closing latch)를 해제하면 압축된 메인 스프링의 힘은 암(arm)을 상부로 운동시켜, 암에 접촉하고 있는 롤러에 연결된 링크 a 와 b 를 일직선이 되도록 한다. 이때, 가동 접점(moving contact)는 고정 접점(fixing contact)에 붙게 되고 와이프 스프링(wipe spring)은 압축되어 접점을 가압하게 된다. 이러한 접점이 붙은 상태에서 차단 래치(trip latch)를 해제하면, 링크 c 가 회전 하면서 이전에 압축된 와이프 스프링이 링크들을 운동시켜 가동 접점을 고정 접점으로부터 분리시킨다.

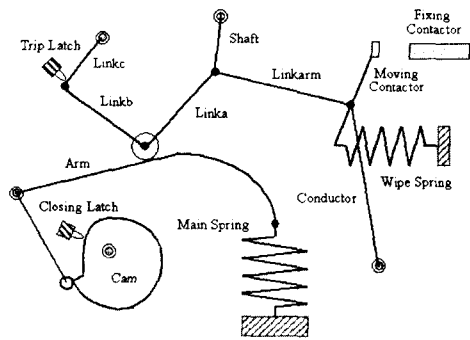


Fig. 2 Schematic diagram of operating mechanism of air circuit breaker

이러한 기중 회로 차단기의 구동 메커니즘에는 조인트들과 링크들로 구성된 복잡한 기구학적 체인구조와 스프링력에 의하여 동작시 부품들 사이에 충격에 의한 영향을 많이 받게 된다. 이러한 충격력을 반복적으로 받게 되는 경우에 링크 부재의 피로파괴(fatigue fracture) 현상이 발생하게 된다.

차단기에 대한 초기의 연구는 메커니즘에 대한 체계적 해석보다는 간단한 이론과 함께 설계자의 경험 및 시행착오(trial and error)에 의해 주로 설계되어 왔다<sup>(2,3)</sup>. 그러나 최근 컴퓨터의 이용과 발전에 따라, 여러 개의 물체로 이루어진 시스템에 대한 다물체 동역학(multi-body dynamics)을 분석할 수 있는 ADAMS<sup>(4)</sup>, DADS 와 같은 상용 프로그램들과 충격에 의한 변형을 분석할 수 있는 유한요소 기법(finite element analysis)과 툴(tool)들이 개발되어 회로 차단기들의 구동 메커니즘에 존재하는 여러 동적 현상을 모델링하고 설계의 개선 및 최적화에 이용하려는 연구가 가능하게

되었다<sup>(5-7)</sup>.

본 연구에서는 기중 회로 차단기에서 수 천회 반복 개폐동작 시험에서 차단 래치 해제시 메인 스프링력에 의하여 고속으로 링크 c가 링크 h에 충돌하여 발생하는 현상에 대하여 충격해석을 통하여 규명하였으며, 내충격성 향상을 위한 링크 h의 형상을 3 가지 검토해 보았고 스프링 링크 메커니즘의 분석에 필요한 해석적 접근 방법론을 제시하였다.

## 2. 충격해석

### 2.1 해석모델

현 설계안에 대한 링크 h의 변형거동을 분석하기 위하여 Fig. 3 과 같이 링크 h의 충격에 영향을 주는 주변 부품을 고려하여 유한요소 해석모델을 구성하였다.

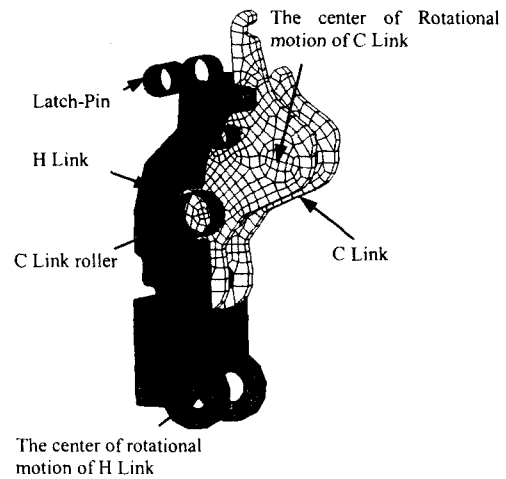


Fig. 3 Finite element model of H-Link parts

Fig. 3 에 나타낸 모델 형상은 기중 회로 차단기 구조 중에서 반복적인 개폐시험시 피로파괴 형태로 파손이 자주 일어나는 링크 h에 대한 현상을 분석하기 위한 것이다. 여기서 링크 c는 Fig.2에 기술한 바와 같이 메인 스프링력과 하부 링크 b의 영향으로 링크 h에 고속으로 접근하여 충돌하게 되는데 그 충격력에 의하여 링크 h가 영향을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 링크 h의 내충격성을 높이기 위해서는 설계가능 범위내에서 링크 h의 형상을 개선하여 충격시 링크에 걸리는 응력을 최소화시켜 피로수명이 향상되도록 하였다.

또한, 해석에 사용된 요소(element)는 링크 c와 링크 h는 육면체 요소(solid element)를 사용하였으며, 나머지 부품은 쉘 요소(shell element)를 사용하고 강

체(rigid body)로 가정하였다. 그리고 해석에 사용된 링크 c 와 링크 h 의 물성은 열처리 이전의 SM45C 재료물성을 사용하였으며, 주요 물성에 관한 것은 Table 1 과 같다<sup>(8)</sup>.

Properties	Values
Tensile strength (MPa)	652.1
Yield strength (MPa)	425.5
Poisson's ratio	0.27
Density (kg/mm <sup>3</sup> )	7.91e-06

경계조건(boundary conditions)으로는 실제 링크 c 와 링크 h 의 구속조건을 고려해 주었고, 해석에 가장 중요한 초기 입력 조건인 링크 c 의 거동은 기중 회로 차단기의 전체 거동을 ADAMS 로 해석하여 구하였다. Fig. 4 에는 기구학적 거동해석에 사용된 ADAMS 모델을 나타내었다.

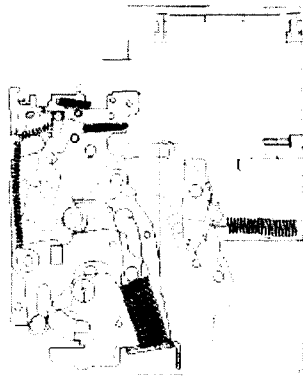


Fig. 4 ADAMS model for kinematical analysis

Fig. 4 에 나타난 기구학적 모델을 통하여 링크 c 의 시간에 대한 회전각(rotational angle)을 구하여 충격해석의 입력조건으로 사용하였으며 이러한 조건에 의하여 링크 h 에 충격을 주게 된다. Fig.5 에는 해석에 사용된 입력조건을 나타내었다.

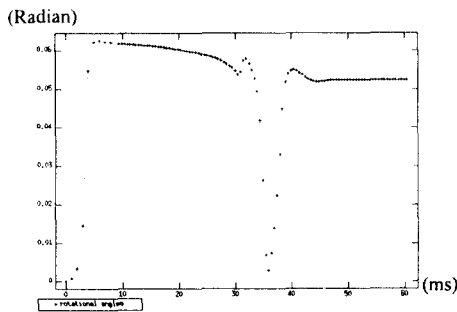


Fig. 5 Rotational angle(radian)-time(ms) curve of C-Link

## 2.2 해석 신뢰성 평가

충격해석은 Pam-Crash<sup>(9)</sup>를 사용하였는데 해석모델 및 경계조건의 신뢰성을 평가하기 위하여 ADAMS 의 해석결과와 비교해 보았다. 비교부위는 링크 c 와 링크 h 의 접촉 반력(contact force)인데 ADAMS 로 해석한 경우와 Pam-Crash 로 해석 경우의 반력이 전체적인 충격지속시간은 거의 일치하지만 반력의 크기가 다소 차이가 났다. 이것은 접촉처리를 하는 방법과 재료 모델링(material modeling)에서 차이가 나기 때문인 것으로 판단되며, 충격해석의 신뢰성에 대한 보다 정확한 것은 실험적으로 구한 변형량을 측정하여 향후 평가할 필요가 있다. Fig. 6 에는 ADAMS 와 Pam-Crash 로 구한 접촉 반력을 비교하였다.

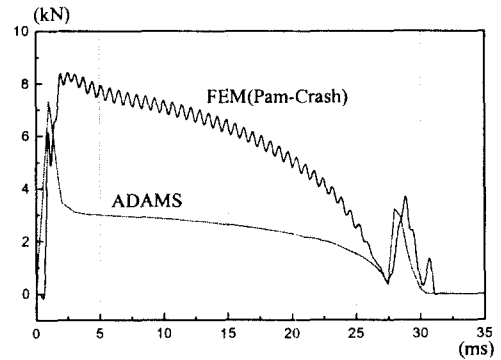


Fig. 6 Comparison the contact force of ADAMS and that of finite element method(Pam-Crash)

## 2.3 H-Link 형상설계

충격해석을 통하여 링크 c 와 링크 h 의 거동을 분석한 결과 최대 주응력(maximum principal stress)이 발생하는 부위는 실험에서 피로 파괴가 자주 발생하는 부분과 일치하였다.

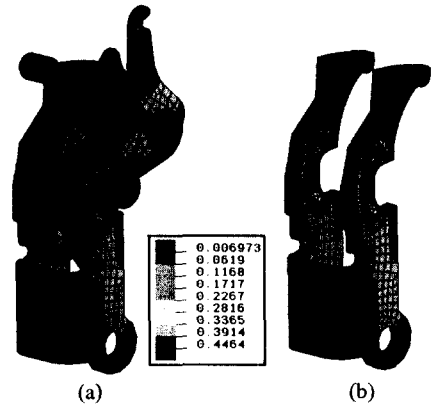


Fig. 7 Principal stress distributions of (a) analysis model and (b) H-Link

Fig. 7 에는 충격해석에서 구한 주응력 분포를 나타낸 것이다.

제품 신뢰성 평가 실험에서 링크 h 의 경우 2000~3000 회에 개폐실험에서 파손이 발생하였으므로 저주기 피로현상의 특징을 갖는다<sup>(10)</sup>. 또한, 링크 h 에 걸리는 최대 주응력이 446.4MPa 로 나타났는데 이것은 항복응력과 유사함을 알 수 있다. 그리고 Fig. 8 에 나타낸 전형적인 구조용 강(carbon steel) 의 저주기 피로곡선의 영역과도 재료는 다르지만 유사한 결과를 나타내고 있다<sup>(10)</sup>.

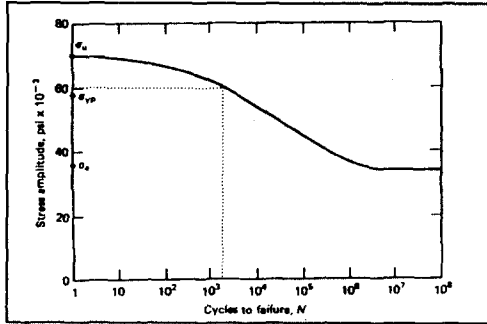


Fig. 8 Typical S-N curve showing characteristic flattening in the low-cycle fatigue range<sup>(10)</sup>

Fig. 8 에서  $\sigma_{yf}$  는 재료의 항복응력 값을 의미하는 것이다. 따라서 링크 h 의 응력 집중부의 응력 값을 최소화 시키는 것이 중요한 문제이며 본 연구에서는 재료물성 변경에 대한 내용은 배제하고 링크 h 의 형상을 적용 가능한 설계범위 내에서 몇 가지 제안해 보았다. 응력 값을 낮추기 위해서는 두께의 변경도 필요하지만 링크 h 가 충격시 충격하중에 의한 굽힘변형(bending mode)이 취약부 부근에 나타낸 것을 이용하여 굽힘강성(flexural rigidity)을 증가시키는 방향으로 형상설계를 하였다. 개략적인 설계 개념을 정립하기 위하여 순수굽힘(pure bending) 상태의 사각단면 보(Beam)에 대한 굽힘강성을 검토해 보면 식(1), 식(2)에서 굽힘강성은 탄성계수와 관성모멘트(moment of inertia)의 함수로 표현됨을 알 수 있다.

$$FR(\text{flexural rigidity}) = E \cdot I_z \quad (1)$$

$$I_z = bh^3/12 \quad (2)$$

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

링크 h 의 두께 보다는 폭을 증가시키는 것이 더 유효함을 알 수 있다.

Fig. 9 에는 굽힘에 대한 저항을 증가시키기 위하여 기존 설계안을 포함하여 개선 1 안, 개선 2 안으로 하여 링크 h 의 3 가지 형상을 나타낸 것이다. Fig. 9 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 15.85mm 로 한 것이다. 그리고 (c)는 개선 2 안으로 두께를 전체적으로 5mm 로 하고 폭을 15.85mm 로 한 것이다.

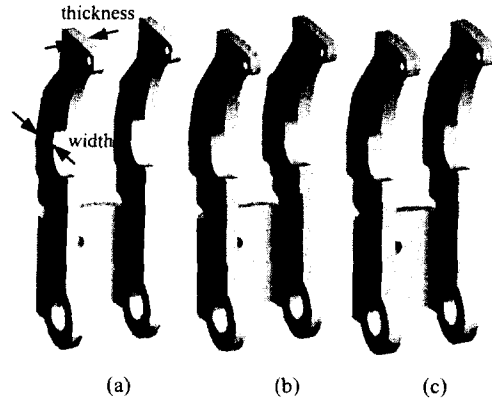


Fig. 9 Three types of shape; (a) original shape, (b) modified 1 shape, and (c) modified 2 shape

각각의 설계안에 대하여 동일 경계 조건 하에서 충격해석을 실시한 결과 응력집중부의 최대 주응력을 Table 2 와 같이 얻을 수 있었다.

Table 2 Comparison of maximum principal stresses on three types of H-Link

Type of H-Link	Max. Principal Stress (MPa)
Original shape	446.4
Modified 1 shape	434.6
Modified 2 shape	414.3

Table 2 에서 주응력이 가장 작게 나타난 것은 개선 2 안인데 기존 설계안에 비하여 약 7% 정도 개선된 것이다. 따라서 개선 2 안을 적용할 경우 링크 h 의 수명이 향상될 것으로 판단된다. 그리고 정량적인 수명에 대하여는 추가적인 재료에 대한 피로시험을 통하여 평가가 가능할 것으로 사료된다.

Fig. 10 에는 기존 설계안과 최종적으로 선택된 개선 2 안에 대한 실제 제품형상을 비교하여 나타낸 것이다.

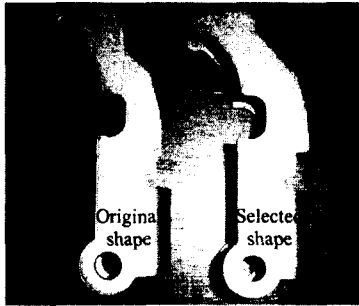


Fig. 10 Photography of original and selected shape

### 3. 결론

현재까지의 진행된 연구결과를 통하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

1. 기중 회로 차단기에서 반복적인 개폐 시험을 통하여 링크 h 부가 저주기 피로파괴 현상을 보임을 알 수 있었으며, 그 원인으로서는 링크 c 의 충돌에 의한 과도한 응력으로 판단된다.
2. 링크 h 의 굽힘변형에 의한 응력을 줄이기 위하여 개선안을 2 가지 제안하였으며 개선 2 안이 보다 효과적이며 제품에 적용할 때 피로수명이 향상될 것으로 판단된다.
3. 식(1)에서 링크 h 는 열처리 등을 통하여 물성을 개선함으로써 굽힘강성을 증대시키고, 피로수명을 향상시킬 수 있으므로 본 연구에서 제안된 설계안에 대하여 열처리하면 현재의 개선수명보다 더 향상될 것으로 사료된다.

### 후 기

본 연구는 ㈜LG 산전 전력기기 사업부의 지원에 의하여 수행되었으며, 관계자 분들께 감사 드립니다.

### 참고문헌

1. Flurschein, 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. Root, R. R., "The Circuit Breaker-A Practical Example in Engineering Optimization," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 18, No. 3, pp. 229-235, 1983.
6. 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.
7. Walser, H., "Using ADAMS in the Development of High Voltage Switching Gears," 11<sup>th</sup> European ADAMS User's Conference, pp. 365-375, Nov. 19-20, 1996.
8. 이종규, 김정규, "피로강도 및 수명에 미치는 Shot Peening 에 의한 잔류응력의 영향", *대한기계학회논문집(A)*, No. 9, Vol. 21, pp. 1498-1506, 1997
9. "Pam-Crash User's manual," ESI software, 2001
10. Jack A. Collins, "Failure of Materials in Mechanical Design," 2<sup>nd</sup> edition, A Wiley-Interscience Publication, 1993