동적 물성치를 고려한 V.I. 충격인자의 영향 분석

임지호* • 송정한* • 허 훈* • 박우진** • 오일성** • 최종웅**

Parameter Study for the Analysis of Impact Characteristics considering Dynamic Material Properties

J.H. Lim, J.H. Song, H. Huh, W.J. Park, I.S. Oh, J.W. Choe

Key Words : Split Hopkinson pressure bar(홉킨슨 바 시험기), Vacuum interrupter(진공 인터럽터), Strain rate hardening(변형률 속도 경화), Chattering(채터링)

Abstract

Vacuum interrupters that is used in various switchgear components such as circuit breakers, distribution switches, contactors, etc. spreads the arc uniformly over the surface of the contacts. The electrode of vacuum interrupters is used sintered Cu-Cr material satisfied with good electrical and mechanical characteristics. Because the closing velocity is 1-3m/s, the deformation of the material of electrodes depends on the strain rate and the dynamic behavior of the sintered Cu-Cr material is a key to investigate the impact characteristics of the electrodes. The dynamic response of the material at the high strain-rate is obtained from the split Hopkinson pressure bar test using cylinder type specimens. Experimental results from both quasi-static and dynamic compressive tests with the split Hopkinson pressure bar apparatus are interpolated to construct the Johnson-Cook equation as the constitutive relation that should be applied to simulation of the dynamic behavior of electrodes. To evaluate impact characteristic of a vacuum interrupter, simulation is carried out with five parameters such as initial velocity, added mass of a movable electrode, wipe spring constant, initial offset of a wipe spring and virtual fixed spring constant.

1. 서 론

송전시스템에 사용되는 진공차단기는 폭증하는 전력 수요와 더불어 그 수요가 증가하고 있다. 우리나라의 전력설비 용량은 점차 대형화 되는 추세이므로 이에 알맞은 초 고압 대용량의 차단기를 필요로 하고 있다. 이러한 초고압 대용량의 차단기에서는 접점(electrode), 절연재료 등의 부품, 재료 설계기술을 필요로 하게 된다. 진공차단기(VCB; vacuum circuit breaker)는 전기적인 과부하를 차단하는 송전시스템의 1 차적 부가 장비이므로 이에 대한 기술 및 경쟁력 확보는 송전시스템의 부차적 장비의 시장성을 위하여 필수적인 요건이다. 진공차단기는 기술의 핵심이 되는 접점, 소호장치 및 소재 등의 일부를 외국의 기술에 의존하는 경우가 많다. 이중 진공 인터럽터(vacuum interrupter)는 차단 시 발생하는 아크를 신속하게 소호시키는 기구로써 진공차단기의 핵심 부품이다. 특히 V.I.전극형상 및 재료는 진공차단기의 기본성능을 결정짓는 중요한 요소이며, 큰 충격력을 견뎌야 하고 접점의 소모가 작아야 하기 때문에 전극형상, 재료의 충격특성에 관한 연구가 필요하다.

V.I.는 보통 수 ms 정도의 짧은 시간에 접점의 개폐가 이루어지게 되므로 접점에는 큰 충격력이 발생하고 가동접점이 되튀기는 채터링(chattering) 현상이 발생하게 된다. 또한 접점의 전기저항으로 인한 발열때문에 재료의 기계적 충격 특성은 더욱 나빠질 수 있기 때문에 전극형상 및 재료의 충격특성에 관한 연구가 필요하게 된다. 충격 시 접점

* 한국과학기술원 기계공학과
** LG 산전 전력연구소

의 변형이 매우 짧은 시간에 일어나기 때문에 접점재료의 변형률 속도 효과를 고려한 유한요소법에 의한 충격해석을 수행하여야 한다. V.I.의 접점재료의 경우 구리와 크롬의 분말을 소결하여 만들게 되는데, 본 논문에서는 홉킨슨 바 시험기를 이용하여 동적 물성치를 구하고자 한다. 홉킨슨 바 시험기는 고변형률 속도 범위에서 재료의 물성치를 얻기 위하여 사용되며, 얻어진 물성치를 바탕으로 재료의 적절한 구성방정식을 구하게 된다. Johnson, Cook 이 제안한 모델을 사용할 경우, 변형률 속도 경화효과를 1/sec 에서 1000/sec 의 구간의 값을 일차식으로 근사하여 사용하게 된다.

본 논문에서는 차단기의 형상 설계기술 확보를 위한 기초기술과 요소기술을 확립하기 위하여 V.I.의 고속 충격 특성을 평가하는데 있다. 이를 위하여 먼저 접점에 사용되는 소재의 동적 물성치를 구하고 이를 이용하여 개폐기의 유한요소 해석을 수행하였다. 유한요소 해석을 통한 개폐기의 구조적 취약부를 파악하고, 채터링에 영향을 미치는 인자들의 영향을 분석하였다.

2. 접점재료의 동적구성방정식의 결정

2.1 횡자계 진공 인터럽터

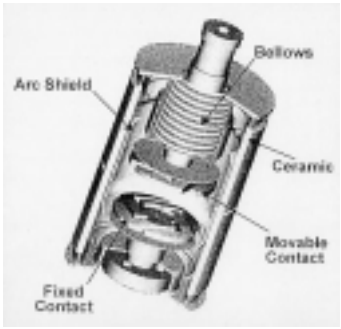

Fig. 1 Structure of a vacuum interrupter.

횡자계 방식 진공 인터럽터는 Fig.1 과 같이 고정접점(fixed contact), 가동접점(movable contact), 아크를 차단하는 아크 쉴드(arc shield), 진공을 유지하는 벨로우즈(bellows)와 그것들을 둘러싸고 있는 세라믹 케이스로 이루어져 있다. 고정접점과 가동접점이 차단될 때 최대 수 kV, 수십 kA 의 차단전류가 흐르기 때문에 신속한 투입, 분리 및 아크 소호가 필요하다. 접점의 투입 시 최대 2 m/s 의 속도로 가동접점이 고정접점을 타격하게 되는데, 이 충돌에 의한 접점의 기계적인 수명을 예측하고 바운스(bounce) 현상을 억제하여야 한다. 그러기 위해서 접점의 충돌 시 거동을 수치 해석적으로 분석해야 하며 이를 위해서 재료의 거동을 적절히 나타낼 수 있어야 한다. 진공 인터럽터는 크게 접점을 구성하는 구리와 크롬을 3:1 의 비로 분말소결한 재료와 접점을 지지하는 무산소동으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 접점의 구리–크롬 분말소결 재료와 무산소동에 대해서 동적 구성방정식을 결정하고자 한다.

2.2 접점재료의 물성 실험

본 논문에서 접점의 물성치를 구하기 위하여 정적, 변형률 속도=1/sec 및 고속 압축시험을 수행하였다. 사용한 시편의 저속도 변형률 특성을 알아보기 위하여 Instron4206 을 이용하여 ASTM E–8 규격의 시편으로 표점거리가 20mm 인 시편에 대하여 정적인장 시험을 수행하였다. 변형률 속도 1/sec 경우 피로 시험 장치인 Dynamic UTM 을 이용하였으며, 표점거리가 6mm 인 인장시편을 사용하였다.

접점의 원재료가 직경 90mm 의 원판형태이기 때문에 고속 인장시편을 만들기 어려운 관계로 고속실험은 압축형 홉킨슨 바 시험기를 사용하여 압축 실험을 하였다. 실험에 사용한 압축형 홉킨슨 시험기는 Fig.2 와 같다.

Fig. 2 Split Hopkinson pressure bar

홉킨슨 바 시험기의 반사파와 투과파를 측정하여 식(1)과 (2)와 같이 시편의 응력 및 변형률 관계를 구할 수 있다.

$$\sigma(t) = E\frac{A_0}{A}\varepsilon_T(t) \qquad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2C_o}{L}\varepsilon_R(t) \qquad (2)$$

실험에서 얻은 물성치를 아래의 Johnson–Cook 구성방정식으로 근사하였다. 이 구성방정식은 log 함수를 이용하여 변형률 속도 민감도를 표현하고 있으며, 변형률 속도가 1/sec 인 경우에 대하여 정규화(normalize)하여 사용하게 된다.

$$\bar{\sigma} = [A + B\bar{\varepsilon}^n][1 + C\ln\bar{\dot{\varepsilon}}][1 - T^{*m}] \quad (2\text{–}13)$$

여기서

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \qquad (2\text{–}14)$$

이다. 여기서 T_{room} 은 상온이고 T_{melt} 는 녹는점이고, 초기온도는 27°C 를 사용하였다.

변형률 속도가 가장 낮은 1500/sec 일 때의 응력–변형률 선도를 근사하여 얻은 근사곡선에서 변형률에 따른 변형에너지가 열로 바뀐다고 근사하였다. 고속변형이기 때문에 열이 전파될 충분한 시간이 없다고 가정하고 변형에너지의 90%가 온도상승에 효과를 준다고 가정하였다. 이와 같이 결정된 Johnson–Cook 구성방정식의 근사함수는 Fig.3 과 같다.

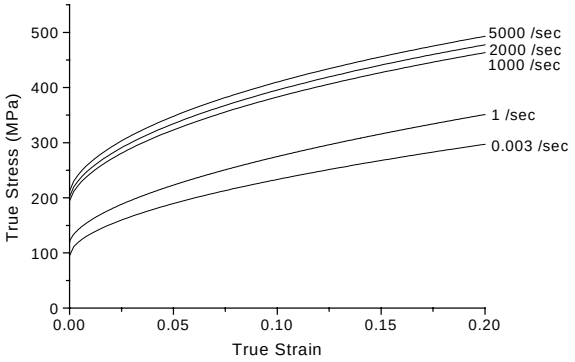

Fig. 3 Fitted stress–strain curve of sintered Cu-Cr.

3. 충격 인자들의 영향 분석

3.1 유한요소 모델

횡자계 V.I.의 유한요소 충돌 해석을 위해서 상용프로그램인 LS–DYNA3D 를 사용하였다. 구리–크롬 재료의 밀도와 비열은 구리와 크롬의 밀도와 비열을 3:1 의 비로 밀도는 8518kg/m^3, 비열은 396J/kgK 을 사용하였다. 무산소동의 밀도는 8960kg/m^3, 비열은 383J/kgK 을 사용하였다.

Fig.4 는 횡자계 진공 인터럽터의 유한요소 모델이다. 요소는 10844 개이고 절점 수는 14836 개이다. 고정부가 강체에 완전히 고정되어 있고 가동부에 접압 스프링(wipe spring)이 체결되어 있다. Fig.4 처럼 접압 스프링은 초기 압축량을 주기 위해서 끝 단이 지지대로 고정되어 있다. 접압 스프링의 스프링계수는 118.5 N/mm 이고, 초기 압축량은 30.8mm 이고 충돌 후 추가로 5.5mm 가 압축된다. 실제 충돌 속도가 1~1.5m/s 범위이므로 1.2m/s 의 충돌 속도를 적용하였다. 진공 인터럽터를 간략하게 모델링하였기 때문에 실제 무게와 다르다.

Fig.5 는 가동접점의 유효응력 분포와 응력이 집중되는 세 부분을 나타냈다. #1 은 접점 기둥과 접점의 접촉부이고, #2 는 접점 날개가 시작되는 부분이고, #3 은 날개에서 응력이 가장 크게 집중되는 부분이다.

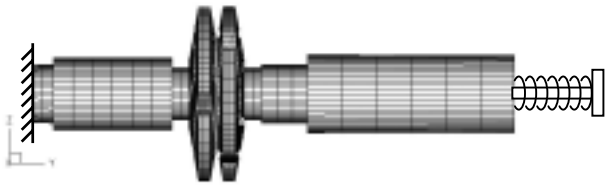

Fig. 4 The finite element model of a vacuum interrupter.

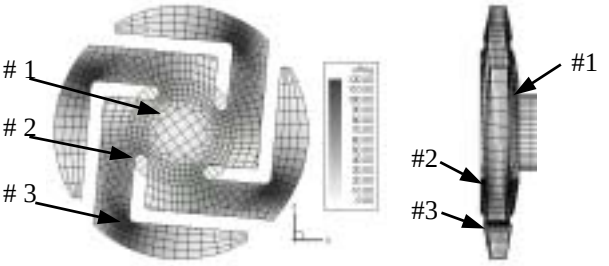

Fig. 5 Three points with the largest effective stress: (a) front view; (b) side view.

응력집중과 채터링 현상을 개선하기 위하여 가동접점의 투입속도, 스프링상수, 초기 압축량, 가동접점의 질량, 고정부의 가상스프링 상수 등의 다섯 가지 요소를 변화시키며 기본 모델의 응력과 채터링의 차이를 비교 분석하였다. 투입속도와 질량은 가동접점의 관성에 영향을 미치고, 스프링 상수와 압축량은 접점간의 압축력에 영향을 준다. 실제 충돌 시 고정접점의 고정부가 조금 움직이게 되는데 이 움직임이 충돌현상에 미치는 영향을 비교하기 위해서 고정부를 고정시키지 않고 스프링으로 모델링하였다.

3.2 가동접점의 속도에 의한 영향

Fig.6 은 가동접점의 속도변화에 따른 접점 사이의 간격을 나타낸 것이다. 실제 충돌속도가 1.0–1.5m/s 이므로 실제상황보다 나쁜 조건에서의 영향을 보기 위해서 속도 변화를 1.0, 1.2, 1.5, 1.8, 2.5 m/s 으로 변화시켰다. 속도가 증가할수록 채터링의 크기와 주기가 증가하고 지속시간이 증가함을 알 수 있다. 해석결과 고정접점은 정지한 상태에서 접점끼리 충돌하였기 때문에 #2 의 응력이 가장 높게 나타난 반면에 가동접점은 관성의 효과 때문에 #3 의 위치에서 응력이 가장 높게 나타났다. 처음 충돌 직후보다 나중에 응력이 좀 더 높게 나타난다. Fig.7 의 그래프처럼 서로 다른 고유진동수를 가진 접점날개와 가동부가 각기 진동하므로 상대가속도가 가장 큰 부분이 충돌 직후가 아닌 몇 번의 날개 진동이 발생한 후가 되는 것이다. Fig.8 은 응력이 가장 집중되는 가동접점의 #3 의 가동

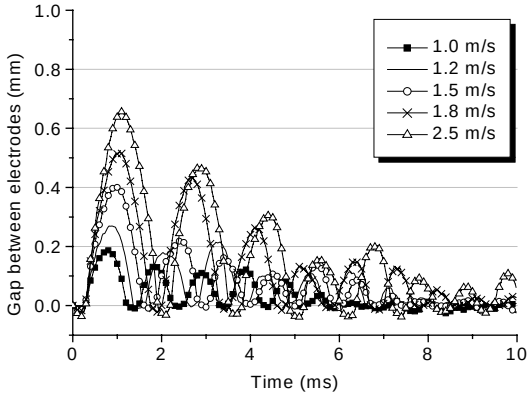

Fig. 6 The distance between the fixed and the movable electrodes with velocity of the movable electrode.

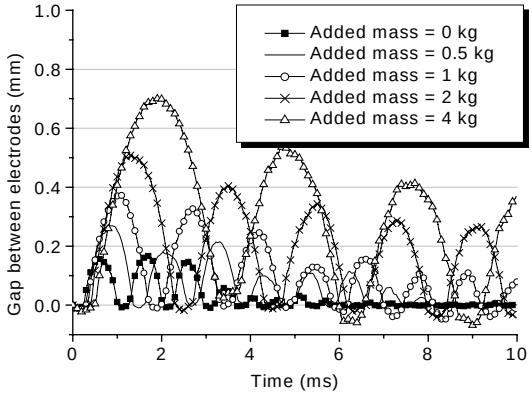

Fig. 9 The distance between the fixed and the movable electrodes with added movable mass

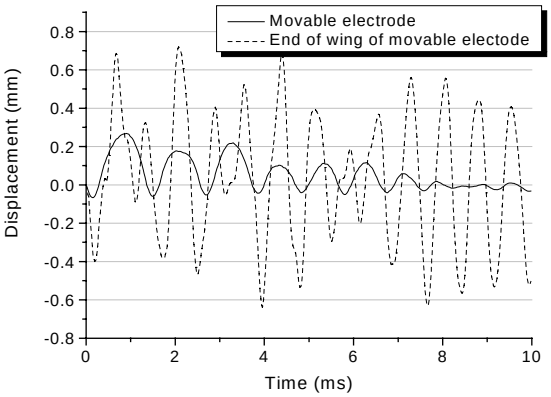

Fig. 7 Displacements of a movable electrode and the end of wing of a movable electrode.

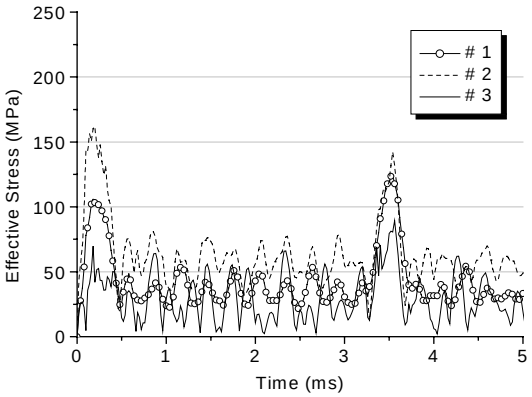

Fig. 10 The effective stress versus time graph of the movable electrode with added mass = 4kg.

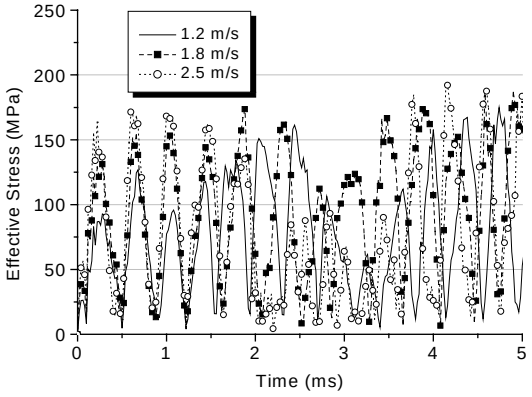

Fig. 8 The effective stress of #3 for the movable electrode with velocity of the movable electrode.

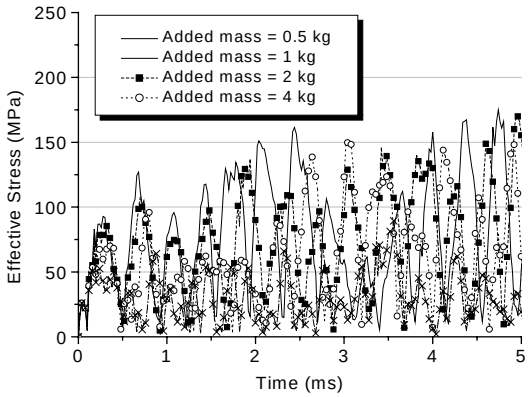

Fig. 11 The effective stress of #3 for the movable electrode with added movable mass.

부 속도에 대한 응력변화 그래프이다. 고정접점은 속도가 증가할수록 #2 의 응력이 더 커지지만, 가동부의 #3 는 고유진동수의 차이로 인한 최대응력 발생시점의 차이는 있지만 전체적으로 속도와 응력이 비례하는 경향을 보인다.

3.3 가동접점의 부가질량에 의한 영향

Fig.9 는 가동접점의 부가질량에 따른 접점 사이의 간격을 나타낸 것이다. 부가질량이 0, 0.5, 1, 2, 4kg 인 경우에 대해서 그 영향을 확인하였다. 부가질량이 클수록 관성의 증가로 인한 채터링의 지속시간과 크기가 커지는 경향을 보인다. Fig.10 은 부가질량 4kg 에 대한 가동접점의 위치에 따른 응력변화 그래프이다. 부가질량이 0.5kg 일 경우는 #3 에 가장 큰 응력이 작용했으나 4kg 의 경우는 #2 가 가장 큰 응력을 보였다. 이는 부가질량이 큰 경우에 파괴가 #3 이 아닌 #2 에서 발생할 수 있다는 것을 의미한다.

Fig.11 은 가동접점 #3 위치의 응력변화 그래프

이다. 0kg, 0.5kg, 1kg 의 부가질량에 대해서는 #3 의 응력이 #2 보다 크지만 4kg 의 부가질량에 대해서는 #2 의 응력이 더 크게 작용함을 알 수 있다. 이는 부가질량에 따른 고유진동수의 감소로 접점날개와 가동접점의 상대가속도가 감소해서 #3 의 응력이 감소했고, 반면에 관성의 증가로 인해서 #2 의 응력은 증가했기 때문이다.

3.4 접압 스프링 상수에 의한 영향

Fig.12 는 접압스프링 상수에 따른 접점 사이의 간격 변화 그래프이다. 접압스프링 상수가 커질수록 채터링의 크기와 주기가 작아지는 결과를 보인다. 이는 접압스프링 상수가 커지면 접압력과 가동부의 주기가 커지기 때문이다. Fig.13 은 가동접점의 #3 의 접압스프링 상수에 대한 응력변화 그래프이다. 접압스프링 상수가 커질수록 가동접점과 고정접점 모두 응력이 증가하는 결과를 보인다.

3.5 접압 스프링의 초기 압축량에 의한 영향

접압력을 향상시키면서 가동접점의 고유진동수를 줄이기 위해 초기 스프링 압축량을 조절하였다. Fig.14 는 초기 압축량에 따른 접점 사이의 간격이다. 초기 압축량이 증가할수록 채터링이 완화되는

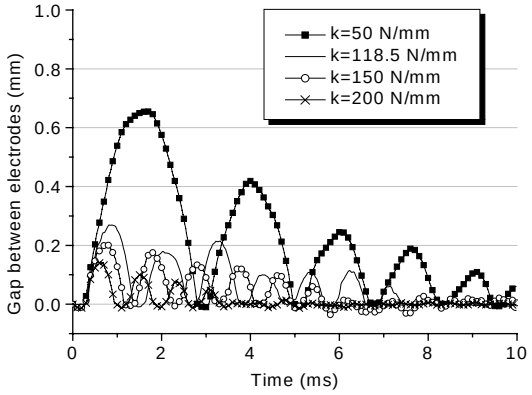

Fig. 12 The distance between the fixed and the movable electrodes with the wipe spring constant.

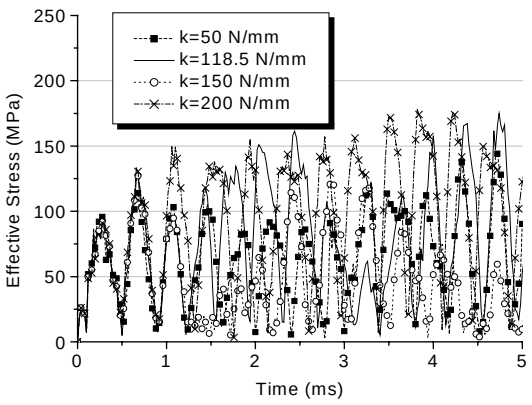

Fig. 13 The effective stress of #3 for the movable electrode with the wipe spring constant.

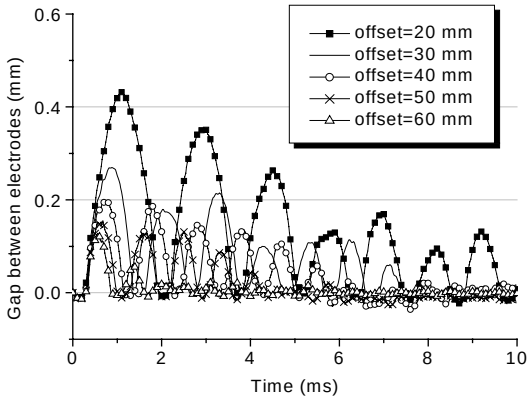

Fig. 14 The distance between the fixed and the movable electrodes with the initial offset of the wipe spring.

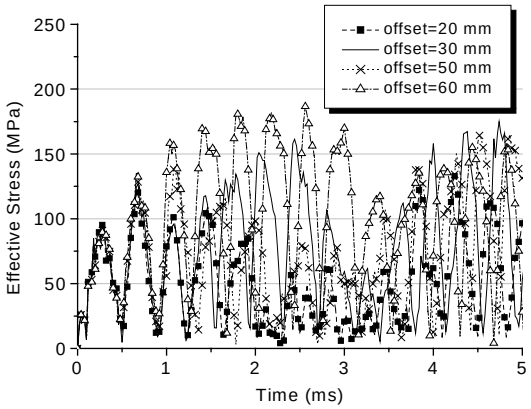

Fig. 15 The effective stress of #3 for the movable electrode with initial offset of the wipe spring.

경향을 보인다. 초기 압축량의 증가가 접점의 응력을 증가시키는 것을 Fig.15 에서 알 수 있다.

3.6 고정부의 가상스프링 상수에 의한 효과

진공 인터럽터를 실제 고정할 때 고정부의 고정정도에 따라서 충격 특성에 영향을 줄 수 있다. 진공 인터럽터가 완전 강체에 고정되어 있으면 충격에너지가 시스템 밖으로 나가지 못하여 접점의 변형에 영향을 크게 주지만 고정부가 스프링 같은 완충역할을 하는 부분과 연결되어 있으면 충격에너지 중 접점에 영향을 주는 부분이 감소하게 된다. 정도의 차이는 있지만 실제 진공 인터럽터가 체결될 때 체결부가 스프링과 같은 역할을 하므로 이 영향을 고려해야 한다. 따라서 고정부에 가상 스프링이 있다고 가정하고 스프링 상수에 따른 충격특성을 고려하였다.

Fig.16 은 가상 스프링 상수를 10, 20, 100, 1000 kN/mm 에 대해서 채터링의 변화를 도시한 그래프이다. 고정부의 가상 스프링 상수가 20kN/mm 이하인 경우는 채터링 현상이 거의 발생하지 않음을 알 수 있고 100lN/mm 인 경우도 완전 고정된 경

우보다 채터링 현상이 완화되었음을 알 수 있다. 가동접점의 경우 #3 의 위치에서 최대응력이 작용하였으나 10kN/mm 인 경우 #2 위치에서의 응력이 가장 크다. Fig.17 은 가동접점의 #3 의 응력변화 그래프이다. 가상스프링 상수가 작을수록 채터링과 접점의 응력집중이 모두 완화되는 결과를 보인다. 실제 진공 인터럽터가 완전히 고정되지 않는다는 점을 고려한다면 고정부의 체결 상태가 접점의 충격특성에 큰 영향을 줄 수 있다고 생각된다.

다섯 가지 인자가 V.I. 충격특성에 미치는 영향을 정리하면 다음과 같다. 초기속도와 부가질량이 증가할수록 응력과 채터링에 좋지 않은 결과를 보였고, 접압력이 커지면 채터링 주기와 크기는 줄지만 접압스프링 상수를 증가시키면 가동접점 날개에 응력이 증가하여 오히려 수명 측면에서 나쁜 결과를 보였다. 고정접점의 가상 스프링 상수가 작을수록 응력 집중과 채터링에 모두 좋은 결과를 나타내었다. 따라서 초기 속도와 부가질량의 감소, 접압스프링의 초기 압축량의 증가와 고정접점의 체결 완화 등이 접점의 피로 수명과 채터링에 바람직한 영향을 미치는 것으로 해석되었다. 재료의 변형률 속도 경화가 실제보다 높게 예측되었고,

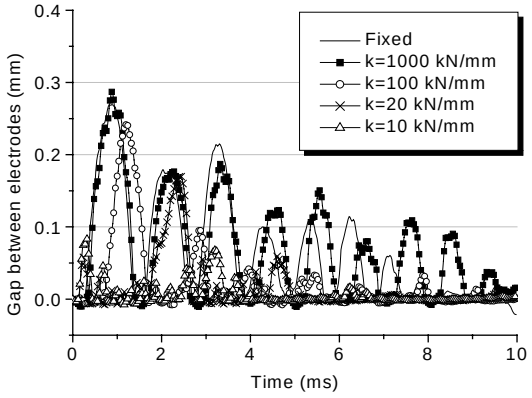

Fig. 16 The distance between the fixed and the movable electrodes with the virtual fixed spring constant.

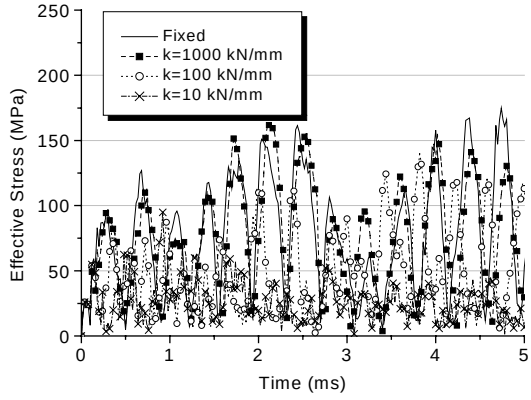

Fig. 17 The effective stress of #3 for the movable electrode with the virtual spring constant.

고정부의 체결조건이 완전 고정이 아니기 때문에 유한요소 해석 결과보다 실제 진공 인터럽터에 걸리는 응력이 더 낮을 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 논문에서는 V.I. 접점재료의 동적 물성치를 얻기 위하여 압축형 홉킨슨 바를 사용하여 구리 구리–크롬 소결재료와 무산소동의 동적거동 실험을 수행하였다. 이를 바탕으로 동적 거동을 나타내기 위하여 Johnson–Cook 구성방정식 및 이의 수정된 형태의 구성방정식을 적용하였다. 유한요소 해석을 위해서 상용 프로그램인 LS–DYNA 3D 를 사용하였고 초기모델과 변경된 모델에 대해서 적용하였다. 접점 충격 특성을 파악하기 위해서 가동접점의 초기속도, 부가질량, 접압 스프링의 스프링 상수, 스프링 초기 압축량, 고정접점의 가상 스프링 상수 등의 다섯 가지 인자에 대한 응력 변화와 채터링을 파악하였다.

후 기

본 연구는 LG 산전 주식회사의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

(1) Barkan, P., 1966, “A Study of the Contact Bounce Phenomenon,” *IEEE Transactions on Power Apparatus an Systems*, Vol. pas–86, No. 2, pp.231-240.

(2) Zener, C. and Hollomon, J. H., 1944, “Effect of Strain Rate upon Plastic Flow of Steel,” *J. Appl. Phys.*, Vol.15, pp.22-32.

(3) Kolsky, H., 1949, Stress Wave in Solids, Dover, New York, pp. 41-65.

(4) Follansbee, P. S., 1978, "The Hopkinson Bar," in Metal Handbook 9th Edition, Vol. 8, Mechanical Testing, *American Society for Metals*, pp. 198-203.

(5) Johnson, G. R. and Cook, W. H., 1983, “A Constitutive Model and Data for Metals subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures,” *in Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics*, The Hague, The Netherlands, pp.541-547.

(6) Meyers, M. A., 1994, Dynamic Behavior of Materials, John Wiley & Sons, New York.

(7) Hill, R., 1950, The Mathematical Theory of Plasticity, Clarendon Press, Oxford.

(8) Kang, W. J., Cho, S. S., Huh, H. and Chung, D. T., 1998, "Identification of Dynamic Behavior of Sheet Metals for an Auto-body with Tension Split Hopkinson Bar," *SAE Int. Congress*, Detroit, U.S.A..