

구리-크롬 합금의 조성비에 따른 동적실험 및 진공 인터럽터 충격특성에의 적용

송정한[†] · 임지호* · 허 훈*

Dynamic Material Test of Sinter-Forged Cu-Cr Alloy and Application to the Impact Characteristics of Vacuum Interrupter

Jung-Han Song, Ji-Ho Lim and Hoon Huh

Key Words : Cu-Cr alloy(구리-크롬 합금), Vacuum interrupter(진공 인터럽터),
High speed tensile test machine(고속 인장시험기), Hopkinson pressure bar(홉킨슨 바)

Abstract

Vacuum interrupters in order to be used in various switch-gear components such as circuit breakers, distribution switches, contactors, etc. spread the arc uniformly over the surface of the contacts. The electrodes of vacuum interrupters are made of sinter-forged Cu-Cr materials for good electrical and mechanical characteristics. Since the closing velocity is 1-2m/s and impact deformation of the electrode depends on the strain rate at that velocity, the dynamic behavior of the sinter-forged Cu-Cr is a key to investigate the impact characteristics of the electrodes. The dynamic response of the material at intermediate strain rate is obtained from the high speed tensile test machine test and at the high strain rate is obtained from the split Hopkinson pressure bar test. Experimental results from both quasi-static and dynamic compressive tests are interpolated to construct the Johnson-Cook model as the constitutive relation that should be applied to simulation of the dynamic behavior of the electrodes. The impact characteristics of a vacuum interrupter are investigated with computer simulations by changing the amount of chromium content.

1. 서 론

송전시스템에 사용되는 진공차단기는 폭증하는 전력 수요와 더불어 그 수요가 증가하고 있다. 특히 우리나라의 전력설비 용량은 점차 대형화 되는 추세이므로 이에 적합한 초고압 대용량의 차단기가 요구되고 있다. 이러한 초고압 대용량의 차단기에서는 접점(electrode; contact), 절연재료 등의 부품, 재료 설계기술이 필수적이다. 진공차단기(VCB; vacuum circuit breaker)는 전기적인 과부하를 차단하는 송전시스템의 일차적 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. 진공차단기에 사용되는 진공 인터럽터(vacuum interrupter)는 차단 시 발생하는 아크를 신속하게 소호시키는 기구로써 진공차단기의 핵심 부품이다. 특히 진공 인터럽터의 전극형상 및 재료는 진공차단기의 기본성능을 결정하는 중요한 요소이다.

진공 인터럽터는 보통 수 msec 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 충격특성은 더욱 나빠질 수 있기 때문에 전극형상 및 재료의 충격특성에 관한 연구가 필요하게 된다.

[†] 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : jhsong_me@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3262 FAX : (042)869-3095

* 한국과학기술원 기계공학과

특히, 충격 시 접점의 변형이 매우 짧은 시간에 일어나기 때문에 접점재료의 변형률 속도에 따른 동적 효과를 고려한 충격해석을 수행하여야 한다.

본 논문에서는 Fig. 1 에 도시한 진공 인터럽터의 부품설계 신뢰성 및 내구성 확보를 목표로 접점 재료의 동적 인장 및 압축실험을 수행하여 재료의 동적 특성을 파악하고, 충격 해석을 통한 구조적 취약부 파악 및 소재에 따른 충격특성의 변화를 조사하였다. 본 논문에서 사용한 재료는 구리와 크롬 분말을 혼합하여 소결한 재료로써 진공 인터럽터의 접점 재료로 사용되며 구리와 크롬을 75% : 25%의 비율로 소결 합금한 재료가 현재 사용되고 있다.

접점의 재료는 VI.의 기본성능을 좌우하는 중요한 역할을 하므로 다음과 같은 조건을 만족시켜야 한다. 차단용량이 커야 하고, 차단 전후에 충분한 임펄스 내압강도를 가져야 하며, 전류차단 시 접점 소모가 작아야 하고, 재단전류 (low chopping current)가 낮아야 한다. 이러한 요구 조건을 만족시키기 위해서 구리와 크롬 분말을 소결시킨 재료를 사용한다. 크롬은 강도를 증가시키고, 접점의 용착을 방지하고 고전압 시 강도를 증가시키는 효과가 있다. 따라서 요구 전압용량이 커질수록 크롬의 함량을 증가시키게 된다.

본 논문에서는 재료 조성비에 따른 진공 인터럽터의 충격 특성을 연구하기 위하여 분말 소결되는 크롬의 함유량을 10%, 15%, 20%, 25%, 30%로 달리한 구리-크롬 분말 소결 합금재료를 선정하였으며, 진공 동적 물성치를 확보하기 위하여 정적 실험 및 중변형률 속도(intermediate strain rate) 범위에서의 인장 실험, 홉킨슨 바를 이용한 변형률 속도 1000 /sec 이상의 고속 압축실험을 수행하였다. 동적 물성실험 결과에 근거하여 적합한 구성방정식의 계수를 구하고, 이러한 구성방정식을 유한요소법에 적용하여 재료의 조성비에 따른 진공 인터럽터의 충격 특성의 변화를 조사하였다.

2. 구리-크롬 합금의 동적 물성 실험

2.1 구리-크롬 합금의 정적 인장실험

진공 인터럽터의 접점재료로 사용되는 구리-크롬 합금의 저속도 변형률 특성을 알아보기 위하여 Instron 5583 을 이용하여 정적인 인장실험을 수행하였다. Instron 5583 은 최대 하중 150 kN, 최대 속도 500 mm/min 의 속도로 인장실험을 수행 할 수 있는 장치이다. 정적 실험은 Fig. 2 와 같이 ASTM E-8 규격의 시편으로 표점거리 20 mm 인 시편을

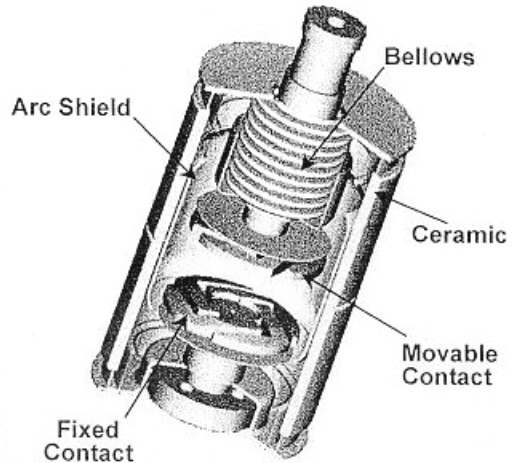


Fig. 1 Structure of a vacuum interrupter

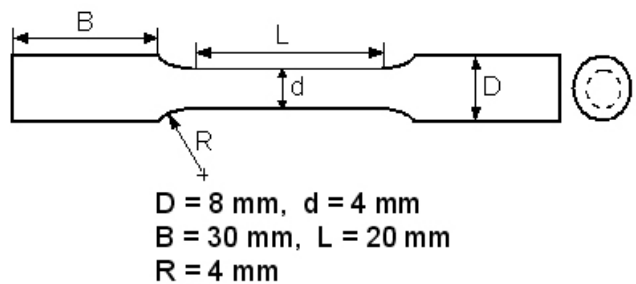


Fig. 2 Schematic diagram of specimen (ASTM E-8)

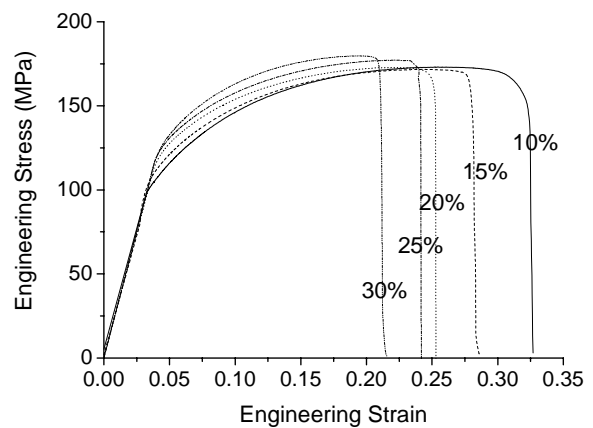


Fig. 3 Engineering stress-strain curve of sinter-forged Cu-Cr alloy from static tension test.

사용하였다.

구리와 크롬 분말의 소결 합금재료에 대하여 크롬 함유량을 10%, 15%, 20%, 25%, 30%의 총 5 종류의 시편에 대하여 정적 인장실험을 수행하였다. Fig. 3 에 정적 실험을 통하여 얻은 각 재료의 응력-변형률 선도를 도시하였으며, Fig. 4 에 크롬 함유량에 따른 항복 응력 및 최대 응력 그리고 연신율의 변화를 도시하였다. 정적 실험 결과 크롬 함유량이 증가함에 따라 항복 응력 및 최대 응

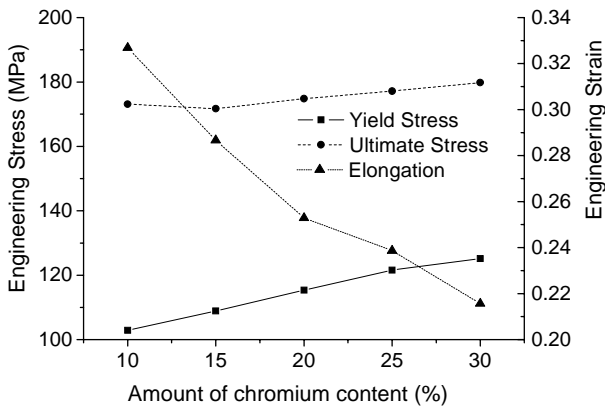


Fig. 4 Comparison of the property from the static test with respect to the amount of chromium content.

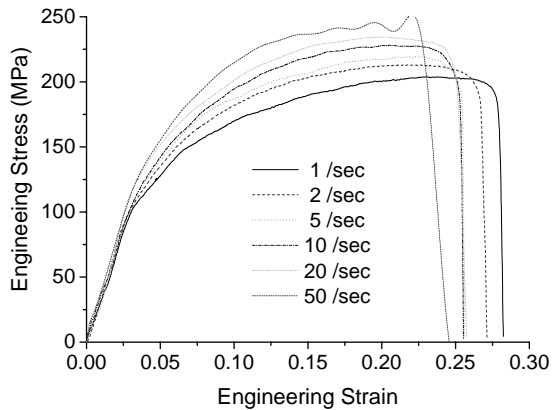


Fig. 5 Engineering stress-strain curve of 90 % Cu - 10 % Cr alloy with the variation of strain rate.

력은 증가하는 반면에, 연신율은 감소하는 경향을 보인다. 이는 구리-크롬 합금의 소결 재료에서 크롬의 함유량이 높아질수록 재료의 강도 높아지고 있음을 의미한다.

2.2 구리-크롬 합금의 중고속 인장실험

구리-크롬 합금의 중변형률 속도에서의 동적 특성을 알아보기 위하여 고속 인장 시험기를 이용하여 중고속 인장실험을 수행하였다. 크롬의 함유량을 10 %, 15 %, 20 %, 30 %로 달리하여 총 4 종류의 시편에 대하여, 변형률 속도 1 - 50 /sec 에 대한 중고속 인장실험을 수행하였다. 중고속 인장실험의 경우, 일정한 인장 속도를 얻기 위하여 시험기의 지그에 적합하도록 시편의 형상을 ASTM E-8 을 기준으로 변화시켰다. 그리고 크롬 함유량이 25 % 시편의 경우, 원판소재의 직경이 60 mm 로 균일 속도를 보장하는 시편의 제작에 어려움이 있어 제외하였다. 시편의 표점 거리 및 표점부의 직경 및 그립부의 직경은 ASTM E-8 규격과 동일하게 하였으며, 그립부의 길이를 40 mm 로 조정하였다.

중고속 변형률 속도에서 크롬의 함유량이 10 %

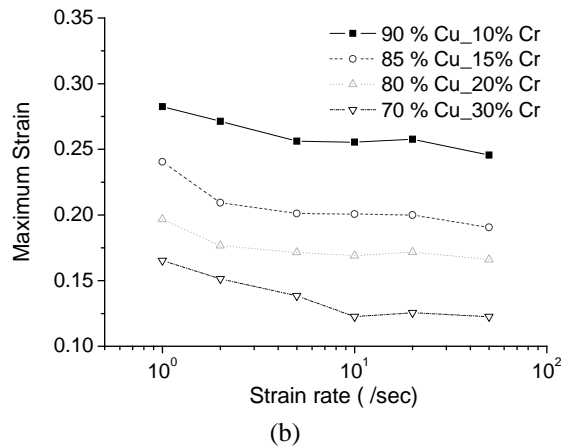
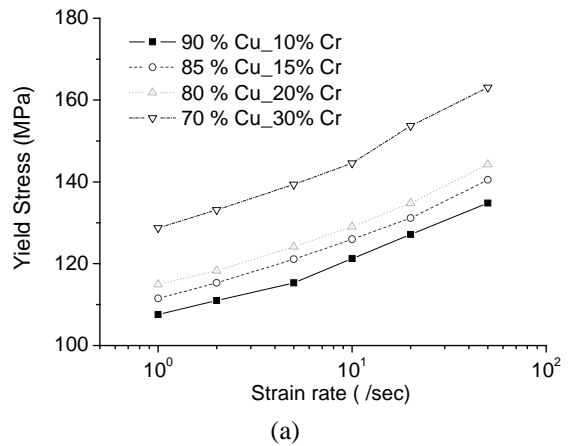


Fig. 6 Comparison of the property at intermediate strain rates with respect to the amount of chromium content: (a) yield stress; (b) elongation.

인 구리-크롬 합금의 변형률 속도에 따른 응력-변형률 선도를 Fig. 5 에 도시하였다. Fig. 5 에서 구리-크롬 합금은 변형률 속도가 증가 할수록 강도가 증가하고 연신율이 감소하는 경향을 보인다. 이를 자세히 조사하기 위하여 크롬의 함유량에 따라 항복강도 및 연신율의 변화를 Fig. 6 에 도시하였다. 크롬 함유량의 증가는 정적 실험에서의 결과와 동일하게 항복 응력을 증가시키고 연신율을 감소시키고 있다. 이는 크롬 함유량이 증가 할수록 점점 재료의 취성이 커짐을 의미하며, 충격 특성의 감소를 예측할 수 있다.

2.3 구리-크롬 합금의 고속 압축실험

일반적으로 변형률 속도 1000 /sec 이상에서 재료의 동적 실험은 홉킨슨 바 시험기를 사용하여 수행된다. 본 연구에서 사용되는 진공 인터럽터 접점 재료의 경우 소재의 크기로 인해 고속 인장 실험을 하기 어렵기 때문에 압축형 홉킨슨 바 시험기를 사용한 고속 압축실험으로 대신하였다.

홉킨슨 바 시험기는 1 차원 탄성과 이론에 근거 입력봉과 출력봉에서 반사파와 투과파를 측정

하여 식(1)과 (2)와 같이 시편의 응력 및 변형률 관계를 구할 수 있다.

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

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2C_0}{L} \varepsilon_R(t) \quad (2)$$

이때 E 는 봉의 탄성계수, A_0 와 A 는 봉과 시편의 단면적, ε_T 는 투과파, ε_R 은 반사파, C_0 는 응력파의 전파속도, L 은 시편의 표점 거리이다.

Fig. 7 에 크롬 함유량이 10%인 시편에 대한 변형률 속도 1000 /sec 의 실험에서 스트레인 게이지를 통하여 얻어진 입력봉과 출력봉에서의 응력파를 도시하였다. 입력파는 사각파이며, 투과파는 반사파에 비하여 약간의 지연시간을 거친 후 얻어지는 것을 볼 수 있다. 이때 투과파의 크기가 작은 것은 봉과 시편의 임피던스 차이가 크기 때문이다. 이와 같이 측정된 응력파를 반사파와 투과파 부분으로 따로 분리된 후 식 (1) 과 식 (2)의 관계를 통하여 시편의 응력 변형률 관계로 변환된다. Fig. 8 에 변환된 응력-변형률 선도를 도시하였다.

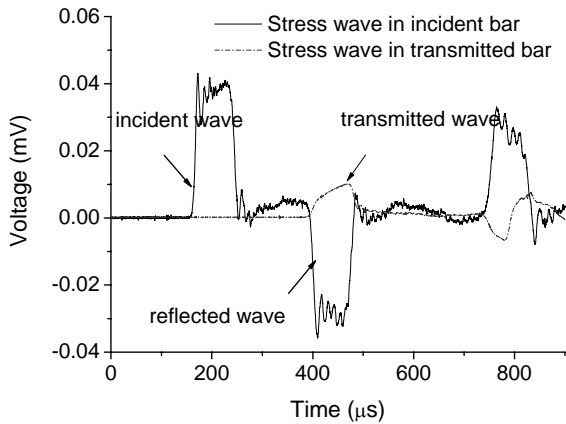


Fig. 7 Stress wave in incident bar and transmitted bar from the Hopkinson bar test.

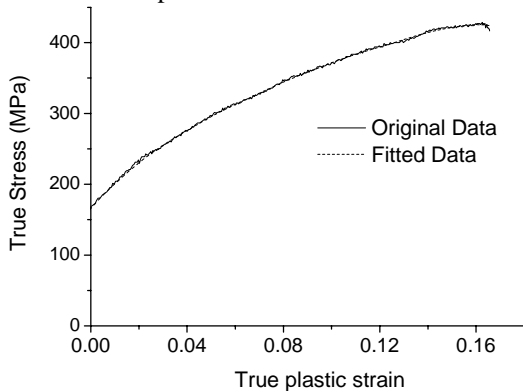


Fig. 8 Stress-strain curve from the compression test with split Hopkinson pressure bar

2.4 구리-크롬 합금의 동적 구성방정식 결정

앞절에서 기술한 바와 같이 정적 인장시험, 중고속 인장시험, 고속 압축시험에서 얻은 물성치를 아래의 Johnson-Cook 모델로 근사하였다. 이 구성방정식은 log 함수를 이용하여 변형률 속도 민감도를 표현하고 있으며, 변형률 속도가 1 /sec 인 경우에 대하여 정규화(normalize)하여 사용한다.

$$\bar{\sigma} = [A + B\bar{\varepsilon}^n][1 + C \ln \dot{\bar{\varepsilon}}][1 - T^{*m}] \quad (3)$$

여기서

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \quad (4)$$

이며, T_{room} 은 상온(27 °C)이고 T_{melt} 는 용융점이다.

세번째 열적 연화항은 변형률 속도가 1000 /sec 일 때의 응력-변형률 선도를 근사하여 얻은 근사곡선에서 변형률에 따른 변형에너지가 열로 바뀐다고 가정하여 근사식으로 구하였다. 고속변형 상태이므로 단열이 되어있다고 가정하고 변형에너지의 90%가 열에너지로 변환된다고 가정하였다. 이와 같이 결정된 Johnson -Cook 구성방정식의 근사함수는 Fig.9 와 같다.

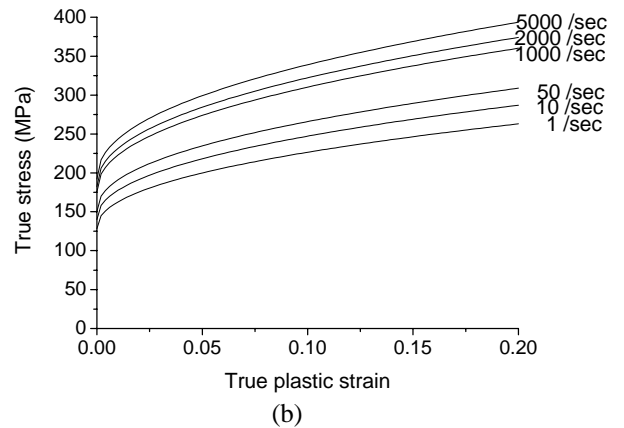
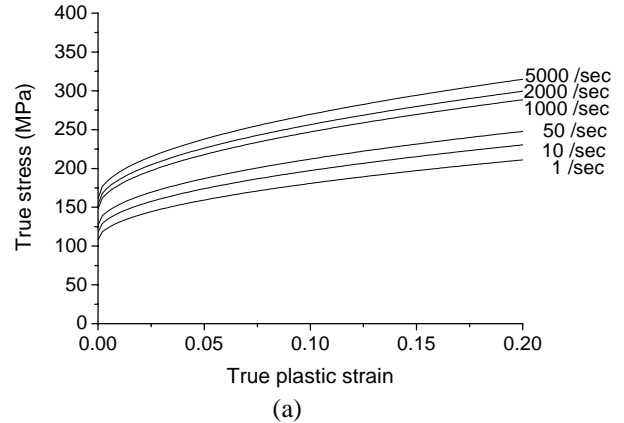


Fig. 9 Fitted stress-strain curve of sinter-forged Cu-Cr alloy for the variation of strain rates (a) 10 % chromium content; (b) 30 % chromium content.

3. 진공 인터럽터의 유한요소 해석

본 장에서는 앞 장의 동적 물성실험을 통하여 얻어진 구리-크롬 합금의 동적 특성을 적용하여 진공 인터럽터의 유한요소 충격 해석을 수행하였다. 진공 인터럽터는 보통 수 ms 정도의 짧은 시간에 접점의 개폐가 이루어지게 접점재료의 동적 거동을 고려하여 유한요소 충격해석을 수행하여야 한다. 따라서 본 장에서는 점접재료의 동적 구성방정식을 적용하여 유한요소 충격해석을 수행하고 충격 특성을 분석하였다.

횡자계 진공 인터럽터의 유한요소 충돌해석을 위하여 외연적 유한요소 프로그램인 LS-DYNA 3D를 사용하였다. 구리-크롬 재료의 밀도와 비열은 구리와 크롬의 밀도와 비열을 이용하여 선형적으로 계산하였다. Fig.10은 횡자계 진공 인터럽터의 유한요소 모델을 도시한 것이다. 사용된 유한요소 수는 8-node brick 요소이며 요소 수는 10844 개이고 절점 수는 14836 개이다. 고정부는 강체에 고정되어 있고 가동부에는 점압스프링(wipe spring)이 체결되어 있다. Fig.4에서와 같이 점압스프링은 초기 압축량을 주기 위하여 끝단이 지지대로 고정되어 있다. 점압스프링의 스프링 상수는 118.5 N/mm이며, 초기 압축량은 30.8 mm 이고 충돌 후 5.5 mm 가 추가 압축된다. 실제 충돌 속도가 1-2 m/s 범위이므로 1.2 m/s 의 충돌속도를 기준하였다. 도시한 유한요소 모델은 간략화된 모델로 실제 무게와 다르기 때문에 가동접점에 0.5 kg 의 부가질량을 추가하였다.

Fig. 11에 크롬 함유량 변화에 따른 충돌 후 시

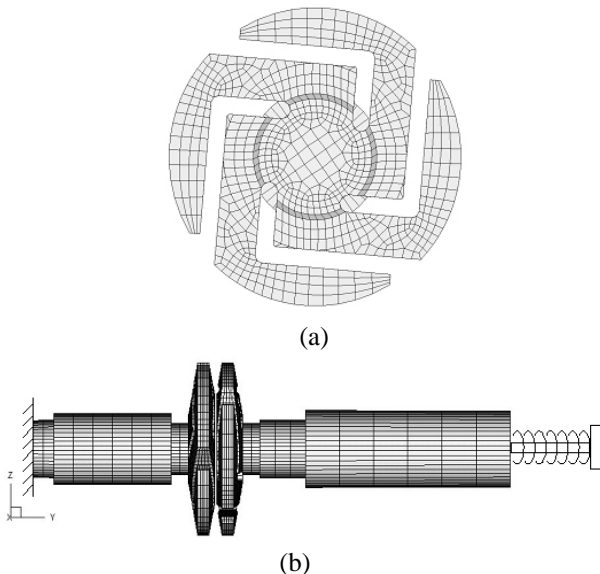


Fig. 10 Finite element model of a vacuum interrupter: (a) electrode; (b) whole model.

간에 대한 가동 접점 및 고정 접점 사이의 간격을 도시하였다. 크롬의 함유량이 적은 모델은 상대적으로 충돌 초기 체터링의 크기는 유사하지만, 시간이 지남에 따라 체터링 주기 및 진폭이 감소하는 경향을 보이고 있다. 특히 크롬 함유량이 10%인 모델의 체터링 진폭은 초기 2회 진동 후, 다른 모델과 비교하여 상대적으로 진폭이 가장 크게 줄어들고 있다.

Fig. 12에 크롬 함유량이 10%인 모델에 대하여 접점의 응력분포를 도시하였다. 해석결과 전체적으로 정지한 상태에서 접점끼리 충돌하였기 때

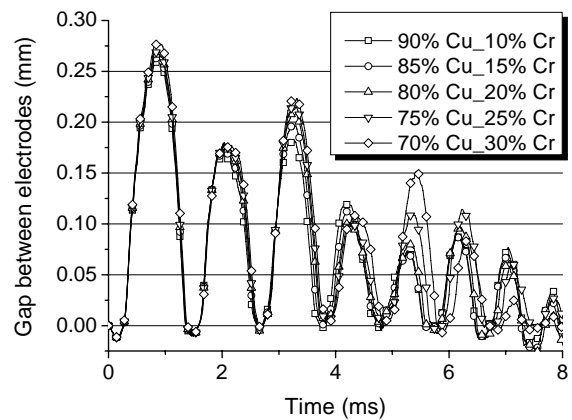


Fig. 11 Chattering characteristics with respect to the amount of chromium contents.

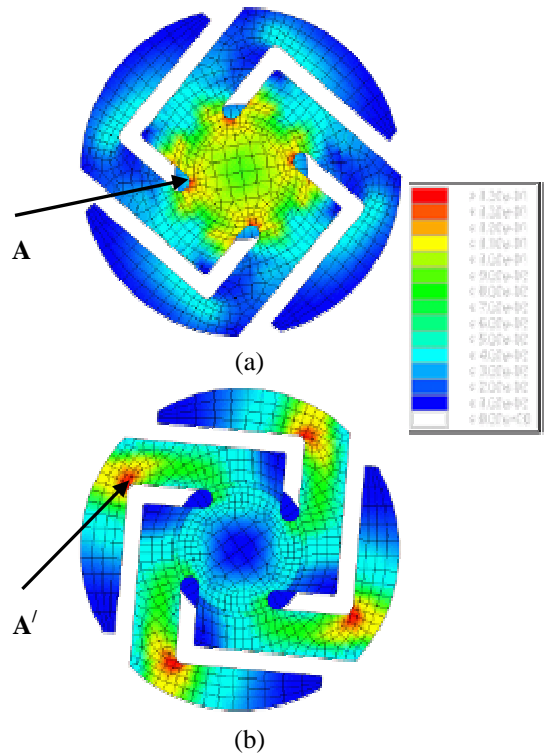


Fig. 12 Stress distribution of the electrodes for 10% chromium contents model: (a) fixed electrode; (b) movable electrode

4. 결론

진공 인터럽터 전극형상 및 재료는 진공차단기의 기본성능을 결정짓는 중요한 요소이며, 큰 충격력을 견뎌야 하고 접점의 소모가 작도록 설계되어야 한다. 진공 인터럽터의 접점 소재는 구리와 크롬을 혼합하여 소결한 재료가 사용된다. 본 논문에서는 이러한 접점의 소재인 구리-크롬 소결합금 재료의 동적 거동을 연구하기 위하여 변형률 속도를 달리하여 준정적 물성실험, 고속 인장 시험기를 이용한 중고속 변형률 속도에서의 인장실험, 홉킨슨 바를 이용한 고속 압축실험을 수행하였다. 진공 인터럽터 접점 소재의 재료특성을 파악하기 위하여 구리에 분말 소결되는 크롬 분말의 조성비 10%, 15%, 20%, 25%, 30%로 달리한 구리-크롬 소결재료의 응력-변형률 선도를 확보하였다.

조성비를 달리한 구리-크롬 소결재료의 동적 특성을 충격해석에 적용하기 위하여 Johnson-Cook 동적 물성모델의 계수를 결정하고, 합금의 조성비에 물성 데이터베이스를 구축하여 충격 해석을 수행한 결과 크롬의 조성비가 낮을수록 체터링 현상이 감소하며 접점부의 응력이 감소하는 결과를 보이고 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(과제관리번호 02-중-17) 주관으로 수행된 과제임. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Barkan, P., 1966, "A Study of the Contact Bounce Phenomenon," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. pas-86, No. 2, pp.231-240.
- (2) Kolsky, H., 1963, *Stress Waves in Solids*, Dover publications, New York, pp. 41-98.
- (3) 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.
- (4) Meyers, M. A., 1994, *Dynamic Behavior of Materials*, John Wiley & Sons, New York.
- (5) Lim, J. H., Song, J. H., Huh, H., Park, W. J., Oh, I. S., Ahn, G. Y. and Choe, J. W., 2002, "Parameter Study of Impact Characteristics for a Vacuum Interrupter Considering Dynamic Material Properties," *Trans. Of KSME(A)*, Vol. 26, No. 5, pp. 924-931

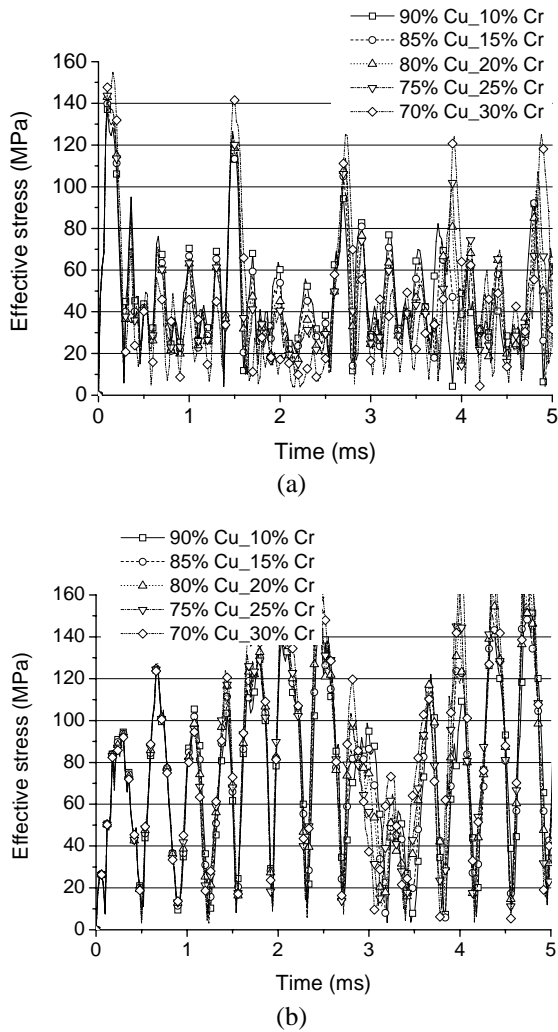


Fig. 13 Stress distribution of the electrodes with respect to the chromium contents; (a) point A of fixed electrode; (b) point A' of movable electrode

문에 고정 접점의 경우 날개가 시작하는 점 A 에서 응력이 높게 나타난 반면에 가동접점은 관성의 효과 때문에 날개가 꺾이는 점 A' 에서 응력이 가장 높게 나타났으며, 가동접점의 응력이 고정접점 보다 높게 나타났다.

크롬의 함유량 변화에 따른 영향을 조사하기 위하여 응력이 가장 높게 예측되는 고정 접점의 날개가 시작되는 부분인 점 A 및 가동 접점의 날개가 꺾여지는 점 A' 에서의 시간에 따른 유효응력 분포를 Fig. 13 에 나타내었다. 그리고 크롬의 함유량이 증가함에 따라 가동 접점 및 고정 접점의 응력도 증가하는 경향을 보인다. 고정 접점은 점 A 에서 초기 충돌 후 0.1ms 후에 응력이 가장 크게 발생하며 가동접점은 점 A' 에서 초기 충돌 후 2.4 ms 후에 응력이 가장 크게 나타나고 있다.