

< 논문 >

## 구리-크롬 소결단조 합금의 크롬 함유량 변화에 따른 동적 물성특성

송정한\*·허훈†

(2005년 11월 14일 접수, 2006년 3월 29일 심사완료)

### Dynamic Material Property of the Sinter-Forged Cu-Cr Alloys with the Variation of Chrome Content

Jung-Han Song and Hoon Huh

**Key Words :** Sinter-Forged Cu-Cr Alloy(구리-크롬 소결단조 합금), High Speed Material Testing Machine(고속인장시험기), Split Hopkinson Pressure Bar(홉킨슨바), Dynamic Material Property(동적 물성특성)

#### Abstract

Vacuum interrupters are used in various switch-gear components such as circuit breakers, distribution switches, contactors. The electrodes of a vacuum interrupter are manufactured of sinter-forged Cu-Cr material 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 the given velocity, the dynamic material property of the sinter-forged Cu-Cr alloy is important to design the vacuum interrupter reliably and to identify the impact characteristics of a vacuum interrupter accurately. This paper is concerned with the dynamic material properties of sinter-forged Cu-Cr alloy for various strain rates. The amount of chrome is varied from 10 wt% to 30 wt% in order to investigate the influence of the chrome content on the dynamic material property. The high speed tensile test machine is utilized in order to identify the dynamic property of the Cu-Cr alloy at the intermediate strain-rate and the split Hopkinson pressure bar is used at the high strain-rate. Experimental results from both the quasi-static and the high strain-rate up to the 5000 /sec are interpolated with respect to the amount of chrome in order to construct the Johnson-Cook and the modified Johnson-Cook model as the constitutive relation that should be applied to numerical simulation of the impact behavior of electrodes.

#### 1. 서론

송전시스템에 사용되는 진공차단기는 폭증하는 전력 수요와 더불어 그 수요가 증가하고 있다. 특히 우리나라의 전력설비 용량은 점차 대형화 대형

화 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 장비로 핵심이 되는 접점 소호장치 및 소재 등의 일부를 외국 기술에 의존하는 경우가 많다. 따라서 이에 대한 기술 및 경쟁력 확보는 송전시스템 및 부차적 장비의 시장성 확보를 위하여 필수적이다.

진공 차단기에 사용되는 진공 인터럽터(Vacuum Interrupter)는 차단 시 발생 하는 아크를 신속하게

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : hhuh@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3222 FAX : (042)869-3210

\* 한국과학기술원 기계공학과

소호시키는 기구로써 진공차단기의 핵심 부품이다. Fig. 1 에 진공 차단기에 사용되는 진공 인터럽터의 형상을 도시하였다. 진공 인터럽터는 고정접점 (fixed contact), 가동접점(movable contact), 아크를 차단하는 아크 쉴드(arc shield), 진공을 유지하는 벨로우즈(bellows)와 그것을 둘러싸는 세라믹 케이스로 이루어진다

진공 인터럽터에 사용되는 접점소재는 진공 인터럽터의 기본성능을 좌우하는 중요한 인자로, 차단용량이 커야 하고, 차단 전후에 충분한 임펄스 내압강도를 가져야 하며, 전류차단 시 접점 소모가 작아야 한다.<sup>(1)</sup> 또한 고정접점과 가동접점이 차단될 때 최대 수 kV, 수십 kA 의 차단전류가 흐르기 때문에 접점의 발열에 의한 용착이 적어야 한다. 이러한 요구 조건을 만족시키기 위해서 구리와 크롬 분말을 소결시킨 재료를 사용한다. 크롬은 소결되면서 분산강화 메커니즘에 의하여 강도를 증가시키고, 녹는 점을 높이기 때문에 고전압 시 사고전류에 의한 접점의 용착을 방지하는 효과가 있다. 따라서 요구 전압용량이 커질수록 크롬의 함유량을 증가시키게 된다. 현재 진공 인터럽터의 접점에는 크롬의 함유량이 25%인 소재가 사용되고 있다.

진공 인터럽터는 보통 수 msec 정도의 짧은 시간에 접점의 개폐가 이루어지게 되므로 접점에는 큰 충격력이 발생하고 가동접점이 되튀기는 체터링(chattering) 현상이 발생하게 된다. 특히, 사고전류를 차단할 때 접점의 개폐속도가 약 1~2m/s 로 접점의 변형이 매우 짧은 시간에 일어나기 때문에 접점재료의 변형률속도에 따른 동적 효과의 고려는 필수적이다. 그러나 소재의 변형률속도에 따른 동적 특성에 관한 연구는 대부분 강판이나 알루미늄 합금<sup>(2,3)</sup> 등에 대하여 주로 수행되어 왔으며, 구리 및 구리 합금소재와 관련해서는 그 연구가 미비하다.

Johnson 과 Cook,<sup>(4)</sup> Huh 와 Lim<sup>(5)</sup> 등이 무산소동에 대한 동적 물성실험을 수행하였다. Huh<sup>(6)</sup> 등은 크롬의 함유량이 25% 인 구리-크롬 합금의 동적 실험 및 진공 인터럽터의 영향인자에 따른 충격특성에 관한 연구를 수행하였다. 이상의 연구들은 홉킨슨 바 시험기를 이용하여 변형률속도 1000/sec 이상의 고속 압축시험을 통하여 수행되었다. 그러나 Huh<sup>(6)</sup> 등이 수행한 진공 인터럽터에 대한 유한요소 해석 결과 진공 인터럽터의 충격 시 접점에서 최대 약 40~70/sec 정도의 변형률속도가 발생하는 것으로 보고 되어 있다. 따라서 이러한 중변형률속도 (intermediate strain-rate) 범위에서 구리-크롬 합금의 물성특성에 대한 정확한 고려가 요구된다.

그리고 전압용량에 따라 접점소재의 크롬함유량

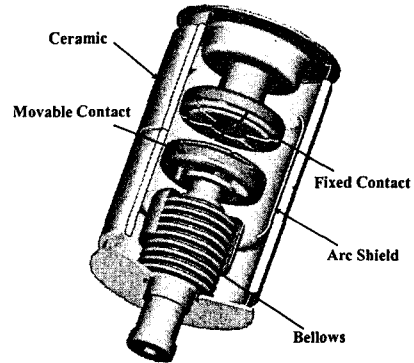


Fig. 1 Structure of the vacuum interrupter

이 변하기 때문에 소결되는 크롬함유량에 따른 소재의 동적 물성특성에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 진공 인터럽터 접점소재의 변화 및 변형률속도 변화에 따른 물성특성을 평가하기 위하여 분말 소결되는 구리-크롬 합금의 조성비를 달리하여 변형률속도에 따른 항복응력 및 파단연신율의 변화를 조사하고 동적 물성모델의 계수를 결정하였다. 분말 소결되는 크롬의 함유량을 전체의 10% wt, 15% wt, 20% wt, 25% wt, 30% wt 로 달린 소결단조 합금재료를 선정하였으며, 동적 물성특성 평가를 위하여 정적 인장실험 및 중변형률속도 범위인 1~50/sec 에서의 인장 실험, 홉킨슨바를 이용한 변형률속도 1000~5000/sec 에서의 고속 압축실험을 수행하였다.

## 2. 구리-크롬 합금의 동적 물성실험

### 2.1 구리-크롬 합금 재료의 선정

소결단조한 구리-크롬 합금의 재료 조성비에 따른 동적 물성특성을 조사하기 위하여 분말 소결되는 크롬의 함유량을 전체의 10wt%, 15 wt%, 20 wt%, 25 wt%, 30 wt% 로 각각 달린 총 5 종류의 합금 재료를 선정하였다. 원소재의 중앙부에서 채취한 시편에 대하여 SEM (scanning electron microscope) 과 EDX (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) 을 이용하여 미세조직을 관찰하고 시편의 크롬함유량을 조사하였다. 각 소재에 대하여 총 5 회 측정하였으며, 초기 소결되는 크롬의 양이 각각 10 wt%, 20 wt%, 30 wt% 인 경우에 대하여 미세 조직을 Fig. 2 에 도시하였다. 크롬 분말이 구리모재에 비정규적으로 분포하고 있으며 초기 소결되는 크롬 함유량에 따라 조직의 차이를 보인다.

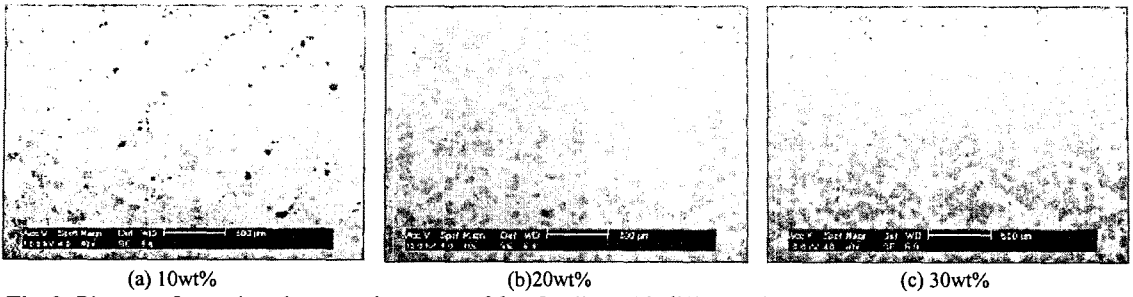


Fig. 2 Pictures of scanning electron microscope of Cu-Cr alloy with different chrome content

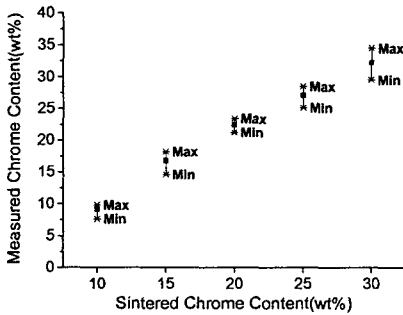


Fig. 3 The variation of measured chrome content

각 소재에 대하여 크롬 함유량을 측정된 결과 초기 소결되는 크롬의 양이 10 wt% 인 시편은 평균 9.3 wt%, 15 wt% 시편은 16.8 wt%, 20 wt% 시편은 21.8 wt%, 25 wt% 시편은 27.1 wt%, 30 wt% 시편은 32.4 wt%의 크롬을 함유하고 있다. Fig. 3에 각 소재에서 크롬 함유량의 분포 및 편차를 도시하였다. 시편에 따라 초기 소결되는 양과 차이가 나타나는 이유는 크롬 분말을 1차 고상소결과 2차 액상소결을 거쳐 생산하는 과정에서 크롬이 일정하게 분포하지 않기 때문이다. 그러나 선정된 총 5 종류의 합금에서 크롬 함유량의 평균값에서 차이가 발생하기 때문에 크롬 함유량 변화에 따른 구리-크롬 합금의 동적 물성 특성의 차이를 확인할 수 있다고 여겨진다. 그리고 각 시편의 실제 크롬 함유량은 차이가 있기 때문에 초기 분말 소결되는 크롬의 양을 기준으로 각 5 가지 시편을 90%Cu\_10%Cr, 85%Cu\_15%Cr, 80%Cu\_20%Cr, 75%Cu\_25%Cr, 70%Cu\_30%Cr로 명명하고 물성실험을 수행하였다.

2.2 구리-크롬 합금의 준정적 인장실험

구리-크롬 합금의 준정적 변형특성을 알아보기 위하여 Fig. 4에 도시한 ASTM E-8 규격의 시편에 대하여 Instron 5583을 이용하여 정적 인장실험을 수행하였다. 0.06 mm/sec의 인장속도로 실험을 수행하여 0.003/sec의 변형률속도로 인장하였다.

각 재료의 공칭응력-공칭변형률 선도를 확보하

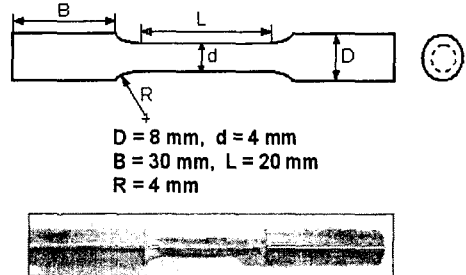
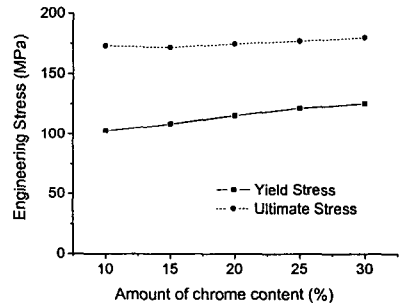
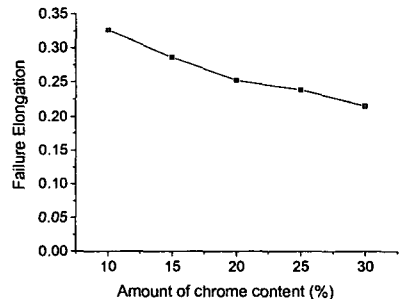


Fig. 4 The specimen for static tensile test (ASTM E-8)



(a) Yield stress and ultimate stress



(b) Failure elongation

Fig. 5 Comparison of the static test result with respect to the amount of chrome

고 이를 이용하여 Fig. 5에 크롬 함유량에 따른 항복응력 및 최대응력 그리고 파단 연신율의 변화를 도시하였다. 정적 실험결과 크롬 함유량이 증가함에 따라 항복응력 및 최대응력은 증가하는 반면에 연신율은 감소하는 경향을 보인다.

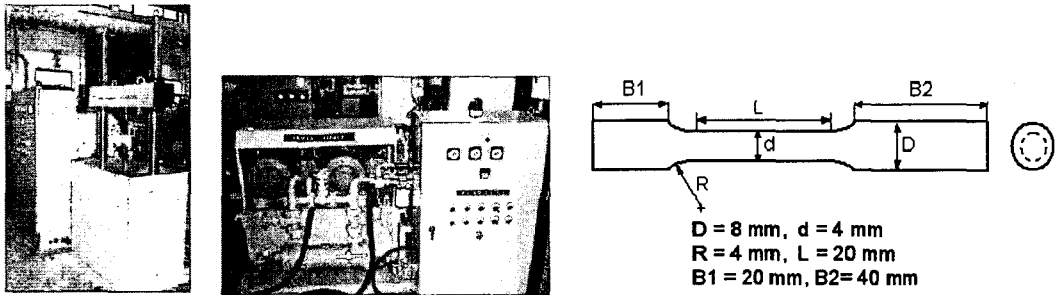


Fig. 6 High speed material testing machine and dimension of specimen for tensile test at intermediate strain-rates

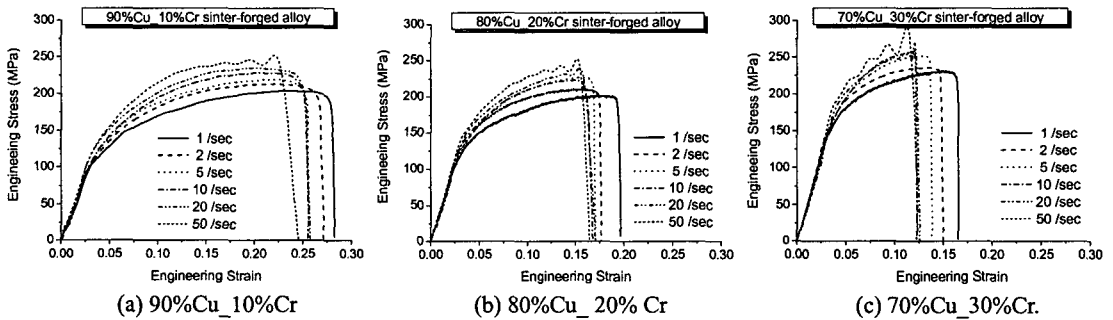


Fig. 7 Engineering stress-strain curve of sinter-forged Cu-Cr alloy with the variation of strain-rates

2.3 구리-크롬 합금의 중고속 인장실험

구리-크롬 합금의 중변형률속도에서의 동적 특성을 알아보기 위하여 Fig. 6 에 도시한 고속 인장시험기를 이용하여 인장실험을 수행하였다. 고속 인장시험기는 실린더의 최고 속도는 7000 mm/sec 이고 최대 하중은 30 kN, 최대 변위는 300 mm 이다. 작동유체를 압축시키기 위하여 45 kW 용량의 유압모터를 2 개 사용하였다. 변위와 하중의 측정은 LDT(Linear Displacement Transducer)와 압전형 로드셀을 사용하였다. 중고속 인장실험에서 일정한 인장속도를 얻기 위하여 시험기의 지그에 적합하도록 시편의 형상을 ASTM E-8 을 기준으로 조정하였다. 크롬 함유량 25 % wt 의 경우, 원판소재의 직경이 60 mm 로 균일한 속도를 보장하는 시편 제작에 어려움이 있어 제외하였다.

크롬의 함유량 변화에 따른 총 4 종류의 합금소재에 대하여, 변형률속도 1~50/sec 범위에서 중고속 인장실험을 수행하였다. 구리-크롬 합금의 응력-변형률 선도를 Fig. 7 에 도시하였다

중고속 인장시험결과, 변형률속도가 증가할수록 변형률속도 경화에 의하여 소재의 강도가 증가하고 연신율이 감소하는 경향을 보인다. 그리고 동적 인장실험의 특성상 50/sec 의 변형률속도에서 하중떨림(load ringing)현상이 관찰되었다(7).

각 소재에 대하여 변형률속도의 영향을 조사하기 위하여 항복강도 및 연신율의 변화를 Fig. 8 에

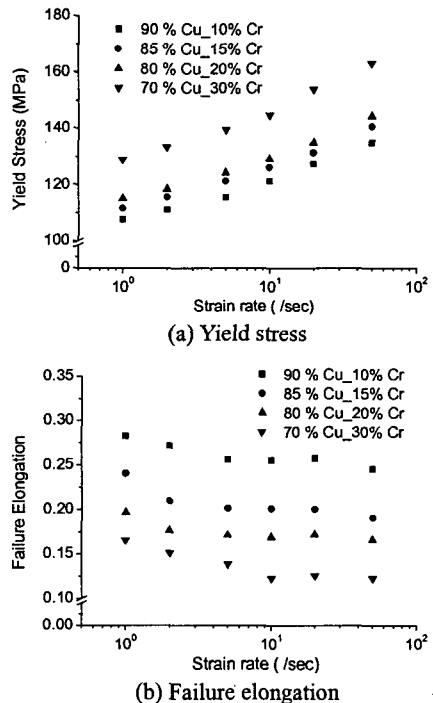


Fig. 8 Comparison of the yield stress and failure elongation at intermediate strain rates

도시하였다. 크롬 함유량의 증가는 정적실험에서의 결과와 유사하게 전체적으로 항복응력을 증가시키고 연신율을 감소시키고 있다. 크롬 함유량을

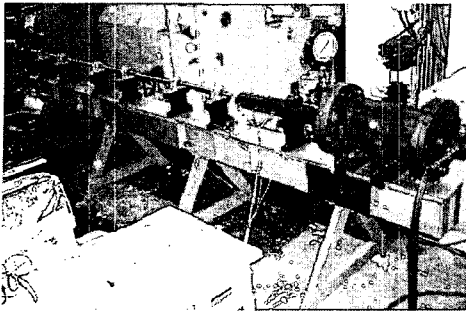


Fig. 9 Split Hopkinson pressure bar apparatus



Fig. 10 Pictures of specimen for Hopkinson bar test

달리한 각 소재의 변형률속도 증가에 따른 항복응력의 변화량을 살펴보면 거의 유사한 기울기를 보이며 항복응력이 증가함을 알 수 있다. 이는 소결되는 크롬함유량의 변화가 소재의 변형률속도 민감도(strain-rate sensitivity)에 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다. 변형률속도 변화에 따른 파단연신율의 변화를 살펴보면 크롬 함유량을 달리한 네 소재 모두 변형률속도 10/sec까지는 파단연신율이 감소하지만 10/sec 이상에서는 파단연신율의 감소가 둔화된다. 이는 변형률속도 증가에 따라 네킹(necking)이 발생하는 부분에서 국부적인 변형률속도경화(strain-rate hardening)가 발생하여 파단이 억제되기 때문이다.<sup>(7)</sup>

#### 2.4 구리-크롬 합금의 고속 압축실험

변형률속도 1000/sec 이상에서의 동적실험은 Fig. 9에 도시한 압축형 홉킨슨바 시험기를 사용하였다. 홉킨슨바 시험기는 Kolsky의 1차원 탄성파 이론에 근거하여 입력봉과 출력봉에서 반사파와 투과파를 측정하여 식(1)과 (2)와 같이 시편의 응력 및 변형률 관계를 구할 수 있다.<sup>(8)</sup>

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

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

여기서  $E$ 는 봉의 탄성계수,  $A_0$ 와  $A$ 는 봉과 시편의 단면적,  $\varepsilon_T$ 는 투과파,  $\varepsilon_R$ 는 반사파,  $C_0$ 는 응력파의 전파속도,  $L$ 은 시편의 표점거리이다.

홉킨슨바 시험기의 시편은 직경이 10 mm 이고

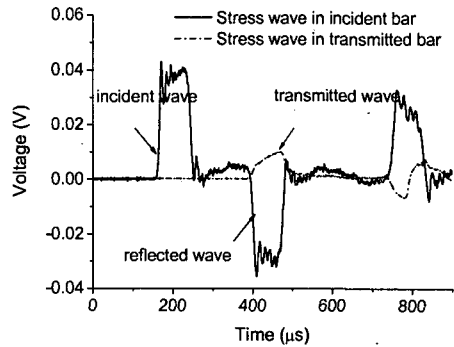


Fig. 11 Stress wave in the incident and transmitted bar from the Hopkinson bar test

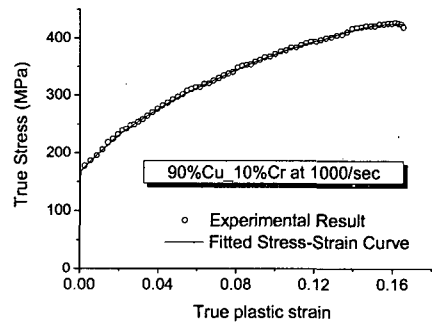


Fig. 12 Stress-strain curve from the split Hopkinson pressure bar

두께가 각각 4 mm, 6 mm, 8 mm인 원통형 시편을 사용하였다. 시편의 형상은 Fig. 10과 같다.

크롬의 함유량에 따른 총 5 종류의 구리-크롬 합금에 대하여, 변형률속도를 각각 1000/sec, 2000/sec, 5000/sec로 변화시켜 실험을 수행하였다. 변형률속도는 시편의 두께와 충격봉의 속도로 조절하였다. Fig. 11에 크롬 함유량이 10wt%인 90%Cu-10%Cr 시편에 대하여 변형률속도 1000/sec에서 스트레인 게이지를 통하여 얻어진 입력봉과 출력봉에서의 응력파를 도시하였다. 입력파 및 반사파와 투과파 모두 약 100  $\mu$ s의 파장을 갖는 사각파이며, 입력파는 약 14  $\mu$ s의 증가시간을 갖는다. 그리고 투과파는 반사파에 비하여 약간의 지연시간을 거친 후 얻어지는 것을 볼 수 있다. 이때 투과파의 크기가 작은 것은 봉과 시편의 임피던스(impedance)차이가 너무 크기 때문이다. 이와 같이 측정된 응력파를 각각 반사파와 투과파 부분으로 따로 분리된 후 식 (1)과 식 (2)의 관계를 통하여 시편의 응력-변형률 관계로 변환된다. Fig. 14에 변환된 응력-변형률 선도를 도시하였다. 변환된 응력-변형률 선도를 유동응력 곡선식으로 근사하여 사용하였다.

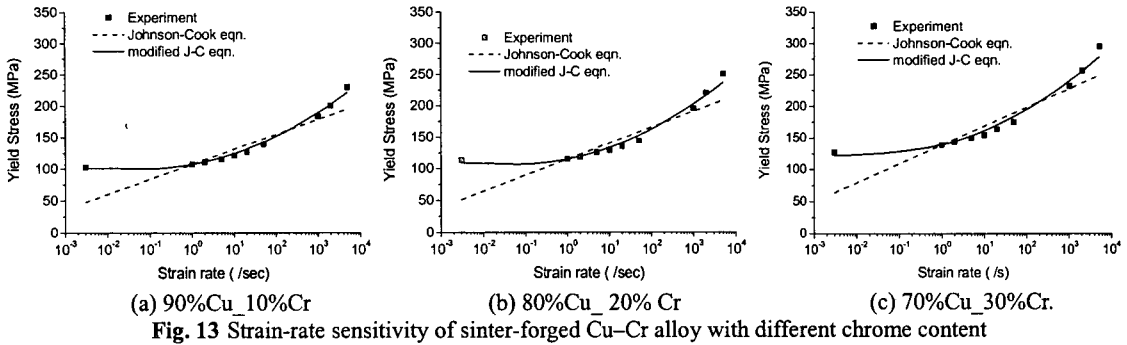


Fig. 13 Strain-rate sensitivity of sinter-forged Cu-Cr alloy with different chrome content

### 3. 구리-크롬 합금의 동적 물성모델

#### 3.1 동적 물성모델

재료의 동적 물성모델은 실험 및 이론에 근거하여 많은 연구자들이 제안하고 있다. 동적 물성모델은 많은 경우 재료 거동을 변형률 경화, 변형률 속도 경화 및 열적 연화 효과로 구분하고 각각의 영향을 서로 독립적인 항으로 수식화 한 후 재료 거동을 표현한다. 대표적인 것으로 Johnson-Cook 모델, Copwer-Symonds 모델, Zerilli-Armstrong 모델 등이 있다.<sup>(9)</sup>

Johnson-Cook 모델은 식 (3)과 같이 표현되며 실험적으로 상수 A, B, n, C, m 을 결정한다. 그리고 식 (4)처럼 T\*를 정의하여 열적 연화계수 m 을 적용하였다.<sup>(4)</sup>

$$\bar{\sigma} = [A + B\bar{\epsilon}^n][1 + C_1 \ln \dot{\epsilon}][1 + T^{*m}] \quad (3)$$

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

Johnson-Cook 모델의 첫 번째 괄호는 재료의 변형률 경화(strain hardening)효과를 두 번째 괄호는 변형률속도 경화(strain-rate hardening)를 나타내며 세 번째 괄호는 열적 연화(thermal softening)효과를 표현한다.

Johnson-Cook 모델의 경우 유동응력의 변형률속도 민감도를 1차 log함수를 이용하여 표현하였기 때문에 수 백/sec의 변형률속도 이상에서 유동응력이 급격하게 증가하는 것을 제대로 표현하지 못하는 단점이 있다. 이를 보완하기 위하여 변형률속도 경화효과를 2차 log함수로 모사하는 modified Johnson-Cook 모델이 Huh 등에 의하여 식 (5)와 같이 제안되었다.<sup>(10)</sup>

$$\bar{\sigma} = [A + B\bar{\epsilon}^n][1 + C_1 \ln \dot{\epsilon} + C_2 (\ln \dot{\epsilon})^2][1 + T^{*m}] \quad (5)$$

본 논문에서는 앞 장에서 기술한 조성비를 달리 한 총 5 종류의 구리-크롬 소결단조 합금의 준정적 인장시험, 중고속 인장시험, 고속 압축실험에서 얻은 실험결과를 Johnson-Cook 모델과 modified Johnson-Cook 모델로 근사하여 각각의 계수를 결정하였다.

#### 3.2 동적 물성모델의 계수결정

진공 인터럽터 접점 소재인 구리-크롬 합금에 관하여 Johnson-Cook 모델과 modified Johnson-Cook 모델의 변형률경화항 상수 A, B, n 을 구하기 위하여 변형률속도 1/sec 에서의 응력-변형률 선도를 Ludwick 식으로 근사하여 상수를 결정하였다.

재료의 변형률속도 경화의 효과를 알기 위해서는 각각의 재료에 대하여 변형률속도에 대한 특정 변형률에서의 응력 선도를 이용할 수 있다. 본 논문에서는 크롬의 함유량을 달리한 각각의 합금소재에 대하여 각 변형률속도에서의 초기 항복응력을 이용하여 Johnson-Cook 모델의 변형률속도 경화항의 계수 C 와 modified Johnson-Cook 모델의 계수 C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> 를 결정하였다.

Fig. 13 에 도시된 바와 같이 Johnson-Cook 모델은 변형률속도에 대한 민감도를 log 선도 상의 일차함수로 근사하기 때문에 실험 데이터를 선형적으로 근사하여 실제 실험결과와 잘 일치하지 않는 경향을 보인다. 이와 비교하여 modified Johnson-Cook 모델의 이차 곡선을 사용하게 되면 준정적인 경우 및 중변형률속도 그리고 고변형률속도 상태에서도 시험 데이터와 잘 일치하며 이차 곡선의 특성상 변형률속도 1/sec~500/sec 인 구간에서는 같은 변형률속도에 대하여 선형 근사보다 낮은 유동응력을 예측하며 그 이외의 변형률속도 구간에서는 높은 값을 예측하게 된다. 이러한 예측은 실험에서 얻어진 구리-크롬 합금의 항복응력을 적합하게 잘 표현하고 있으며, 한 개의 수식으로 준정적 및 중 고속 변형률속도 영역까지 재료거동을 나타낼 수 있게 되는 장점이 있다.

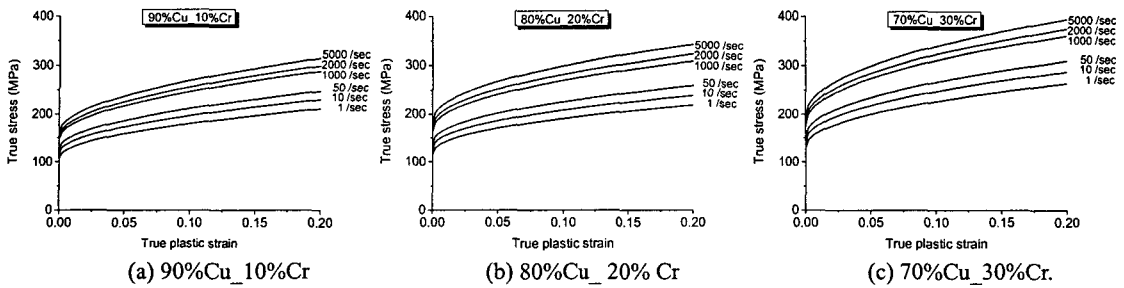


Fig. 14 Interpolated stress-Strain curves of Cu-Cr alloy using modified Johnson-Cook model

Table 1 Constants of sinter-forged Cu-Cr alloy in the original and modified Johnson-Cook mode

Cr Content	A (MPa)	B (MPa)	n	C	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	m
10 wt%	108.0	231.4	0.503	0.096	0.0331	0.0029	0.36
15 wt%	111.5	178.1	0.436	0.095	0.0334	0.0033	0.33
20 wt%	115.9	214.6	0.455	0.095	0.0298	0.0043	0.35
25 wt%	117.9	328.4	0.584	0.094	0.0321	0.0037	0.34
30 wt%	128.3	280.6	0.456	0.094	0.0328	0.0030	0.38

열적 연화항의 상수  $n$  값을 계산하기 위하여 변형률속도 2000/sec 일 때의 응력-변형률 선도를 근사하여 얻은 근사곡선에서 변형률에 따른 변형에너지가 열로 바뀐다고 근사하였다. 고속 변형이기 때문에 열이 주위로 전파될 충분한 시간이 없다고 가정하고 변형에너지의 90%가 온도상승에 효과를 준다고 가정하였다.

이상의 기술한 방법으로 크롬의 함유량을 10 wt%, 15 wt%, 20 wt%, 25 wt%, 30 wt%로 달린 소결단조 구리-크롬 합금의 Johnson-Cook 구성방정식 및 modified Johnson-Cook 구성방정식의 상수들을 결정하고 이를 Table 1에 나타내었다. 여기서 상수 A는 초기 항복응력, B와 n은 각각 경화상수와 경화지수를 나타낸다. C는 재료의 변형률속도 민감도를 나타내는 상수로서 C가 클수록 변형률속도 증가에 따른 유동응력의 증가량이 크게 나타난다. m은 시편의 열적연화와 관련된 상수로 소성변형 중 발생열에 의한 재료의 연화를 나타낸다. 이와 같은 동적 물성모델을 통하여 근사한 구리-크롬 합금의 응력-변형률 선도를 Fig. 14에 도시하였다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 진공 인터럽터 접점의 소재인 구리-크롬 분말 소결단조 합금재료의 동적 물성특성을 평가하기 위하여 변형률속도를 달리하여 준정적 물성실험, 고속 인장시험기를 이용한 중변형률속도에서의 인장실험, 홉킨슨바를 이용한 고속 압

축실험을 수행하였다. 구리-크롬 합금의 재료특성을 파악하기 위하여 소결되는 크롬 분말의 양을 10 wt%에서 30 wt%까지 5 wt%씩 조절한 총 5 종류의 구리-크롬 분말 소결합금의 변형률속도에 따른 응력-변형률 선도를 확보하였다.

동적 물성실험 결과 변형률속도가 증가함에 따라 구리-크롬 합금의 항복응력은 증가하며 파단연신율은 감소하는 경향을 보인다. 크롬 함유량을 달린 각 소재의 변형률속도 증가에 따른 항복응력의 변화량을 살펴보면 거의 유사한 기울기를 보이는데 이는 소결되는 크롬 함유량의 변화가 소재의 변형률속도 민감도(strain-rate sensitivity)에 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다. 또한 변형률속도 변화에 따른 파단연신율의 변화를 살펴보면 크롬 함유량을 달린 각 시편 모두 변형률속도 10/sec까지는 파단연신율이 감소하지만 그 이상에서는 변형률속도 경화효과에 의하여 파단연신율의 감소가 둔화된다.

이상의 실험 결과에 근거하여 조성비에 따른 구리-크롬 합금의 동적 물성특성을 Johnson-Cook 모델 및 modified Johnson-Cook로 근사하고, 각 모델의 계수를 결정하였다. Johnson-Cook 모델은 준정적인 경우와 고변형률 속도의 실험 데이터를 선형적으로 근사화한 것으로 실험결과와 오차를 보이나, modified Johnson-Cook 모델의 이차 곡선은 준정적인 경우 및 중변형률속도 그리고 고변형률속도 상태에서도 시험 데이터와 잘 일치하며 한 개의 수식으로 준정적 및 중고속 변형률속도 영역까지 재료거동을 나타낼 수 있게 된다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(과제관리번호 R-2002-B-256) 주관으로 수행된 과제임. 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Barkan, P., 1966, "A Study of the Contact Bounce Phenomenon," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 86, No. 2, pp. 231~240.
- (2) Shi, N. F. and Meuleman, D. J., 1992, "Strain Rate Sensitivity of Automotive Steels," *Proceedings of SAE International Congress Exposition*, Detroit, 922045.
- (3) Jukas, J. A., Nicholas, T., Swift, H. F., Greszczuk, L. B. and Curran, D. R., 1982, *Impact Dynamics*, John Wiley & Sons, New York.
- (4) Johnson, G. R. and Cook, W. H., 1985, "Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates Temperatures and Pressure" *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 21, pp.541~547.
- (5) Huh, H. and Lim, J. H., 2002, "High Strain-Rate Test of Sinter-Forged Cu-Cr with Split Hopkinson Pressure Bar," *Proceedings of Plasticity 2002*, pp. 645~647.
- (6) 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.
- (7) Huh, H., Lim, J. H., Kim, S. B., Han, S. S. and Park, S. H., 2004, "Formability of the Steel Sheet at the Intermediate Strain Rate", *Key Eng. Mater.*, Vols. 274-276, pp. 403~408
- (8) Kolsky, H., 1963, *Stress Waves in Solids*, Dover publications, New York, pp. 41~98.
- (9) Meyers, M. A., 1994, *Dynamic Behavior of materials*, John Wiley & Sons, New York.
- (10) Kang, W. J., Cho, S. S., Huh H. and Chung, D. T., 1999, "Modified Johnson-Cook Model for Vehicle Body Crashworthiness Simulation," *Int. J. Vehicle Design*, Vol. 21, pp.424~435.