

技術資料

# 동합금계 고력 내마모성 소재

김휘준\*, 배정찬\*, 차영현\*\*

## Copper Alloys with High Strength and Wear Resistance

H. J. Kim\*, J. C. Bae\* and Y. H. Cha\*\*

### 1. 서 론

동합금은 전도성, 내식성, 가공성 및 기계적 성질이 우수하여 대부분 전기 및 열의 도체, 기계부품, 급배수 및 유공압부품, 내식 내해수 선박용부품 및 장식용 재료로 널리 사용되어 왔다. 그러나 현재 주석청동, 인청동, 연청동, 알루미늄청동 및 고력 황동 등과 같은 동합금의 경우 철계 부품의 상대 마모재로서 사용될 경우 철계 부품의 마모량을 최소화하면서 자신도 우수한 마모 특성을 갖고 있어 철계 부품과 접촉하면서 내마모성이 요구되는 자동차용 부품 및 유공압부품 소재로 널리 사용되고 있다.

자동차 산업의 지속적인 성장 및 최근 들어 크게 활성화되고 있는 자동화 기기산업의 발달에 힘입어 이들 산업에 사용되는 동합금계 내마모 소재 및 부품의 사용량도 증가하고 있다. 특히, 최근의 자동차 고속화 경향에 따라 가혹한 마모 환경에서 사용할 수 있는 고력내마모성 동합금 소재 및 부품에 대한 요구가 증가하고 있다.

기계 및 자동차 공업이 발달한 일본의 경우 1985년 통계자료에 따르면 연간 10만여톤의 동 및 동합금이 사용되고 있는데, 십수년전부터 이미 동합금의 분류 및 각동합금들의 기계적성질, 내마모성에 관한 자료 및 기술을 정립하여 황동계의 고력 내마모성 소재를 용해, 압출, 단조, 가공의 제조공정에 의해 자동차의 동력전달 부품, 유공압부품 및 각종 기계류의 내마모성이 요구되는 부품들에 적용하고 있으며, 수년전부터는 품

질이 더 우수하고 원가절감이 될수 있는 고력 내마모성 소재가 개발되어 현재 자동차 및 각종 기계류 부품들에 사용되고 있는 추세이다.

국내의 경우 자동차산업 및 유공압기기를 사용하는 산업기계, 공장자동화 산업의 발달로 동합금의 사용량은 매년 크게 증가하고 있으나 동합금의 용해 및 주조에 관한 자료 및 기술의 부족으로 내마모성이 요구되는 동합금소재의 품질이 조악하여 국산기계류 제작업체들의 불만이 상당히 크며, 내마모성이 요구되는 부품 제조시 내마모성 동합금 소재들의 기계적 성질 및 마모성질에 대한 자료가 미비하여 부품의 소재 선택에 어려움을 겪고 있는 실정이다.

내마모성이 요구되는 소재의 경우 하중, 윤활 조건 여부, 온도, 표면조도, 상대마모체의 조건 등과 같이 그 부품이 사용되는 환경에 따라 마모 기구가 달라져 요구되는 성질이 다르기 때문에, 내마모성이 요구되는 부품의 소재 결정시 사용 환경에 따른 소재의 기계적 성질 및 내마모 특성에 관한 충분한 자료가 필요하다. 그러나 국내에서는 내마모성 동합금 소재의 사용량에 대한 정확한 통계자료는 물론 내마모성 동합금 소재의 개발 및 연구마저 미비한 실정이어서 고력 내마모성을 요구하는 자동차 동력 전달용 부품류, 유공압 부품류들의 경우 사용환경에 요구되는 소재 특성에 대한 정확한 이해없이 일본 등으로부터의 수입에 의존하고 있는 실정이다. 따라서, 국내 국산기계류들의 내구성 및 품질향상을 위해서도 고력, 내마모성 동합금 소재에 대한 자료 및 기

\*생산기술연구원(生産技術研究院) 소성가공연구팀

\*\*고려소재개발(주)

1996년도 추계기술강연대회에서 강연한 내용임.

술의 축적을 통한 국산화가 절실히 요청되고 있다.

이에 본 글에서는 자동차용 수동 변속기에 사용되는 싱크로나이저 링(synchronizer ring)의 사용환경에 적합한 고력 내마모성 동합금 소재의 국산화과정을 통해 축적된 자료들을 토대로 동합금계 고력 내마모성 소재에 미치는 금속학적 인자 및 제조공정변수들의 영향을 소재하고자 한다.

### 2. 내마모성 동합금 소재

동 및 동합금은 크게 전기동 정도의 순도로부터 1% 정도의 타 원소를 함유한 동주물, 아연을 40% 정도까지 첨가한 황동주물, 그것을 고력황동주물, 주석을 5-15%까지 첨가한 주석청동주물, 그것에 인을 미량 첨가한 인청동주물, 알루미늄을 10% 정도 첨가한 Al청동주물, 청동에 납을 5-25% 정도까지 첨가한 연청동주물, 니켈을 첨가한 니켈청동주물 및 양백주물, 규소를 첨가한 실리콘청동주물, 그외에 베릴륨동, 크롬동, 규소동 등 각종 특수주물로 분류할 수 있으며, 이들을 통틀어 동합금주물이라 부르고 있다.

동합금은 오래전부터 축수(軸受)합금으로서 가장 널리 사용되고 있으며, 현재 주석청동, 연청동, 고력황동, 알루미늄청동 등이 많이 사용되고 있다. 그 사용범위는 유체, 고체윤활, 왕복운동 또는 저속고하중 등의 경계윤활조건하에서도 사용되어 극히 넓은 범위에 걸쳐 사용되고 있다. 이들 동합금 각종의 조직 및 마모특성의 대략적인 설명은 다음과 같다.

#### 2.1 주석 청동주물

청동주물은 보통 Sn 15wt.%까지가 사용되고 있는데, 응고 온도 범위가 넓기때문에 머쉬(mushy)형 응고가 일어나며 압탕의 보급이 곤란하고 가스의 방출도 어려우며 기포나 수축공을 생성하기 쉽다. 청동주물의 성분범위 내에서는 응고 초기에 석출되는  $\alpha$ -수지상(dendrite) 사이에  $\alpha+\beta$ 공석이 보이고, 또  $\alpha$ 상은 성장의 초기보다 종료 가까이에 정출한 부분에서 Sn농도가 높다. 만약 Zn이 첨가되면  $\alpha$ 상의 범위가 점점 좁아져  $\delta$ 상을 석출하기 쉬운 경향이 있다. Pb는

Cu에 전혀 고용되지 않으므로 주석 청동에서 생기기 쉬운 dendrite사이의 미세한 수지상가지 사이에 응집되어 내마모(4%이하 첨가) 내압성을 개선한다.

청동주물은 일반 기계에서 하중 변동이 적은 저속, 중속에 적당하며, 유막이 끊어지지 않고 다량의 윤활유가 계속 공급되는 마모환경이 필요하고, 인청동과 연청동에 비해 축수 성능은 작다.

#### 2.2 인청동 주물

Cu-Sn계에 P를 첨가하여 고상온도를 크게 저하시키고, 또 P의 고용도가 적어  $\alpha+Cu_3P$ 상을 생성시킨 인청동 주물은 P의 첨가로 응고 온도 범위가 현저하게 넓어져서 응고종료 온도가 크게 저하됨에 따라 경한  $Cu_3P$ 상이 많이 나타나 이 합금의 경도를 증가시킨다.

인청동 주물에서는 3원 공정( $\alpha+\delta+Cu_3P$ 상)이 내마모의 역할을 하며, 내압축성이 작고, 윤활유의 공급이 끊길 때, 경한 물질인  $\alpha+Cu_3P$ 가 파괴되어 scuffing을 일으키기 쉽다. 인청동 주물은 일반적으로 중하중 정도의 것에 적당하며, 용해, 주조성이 곤란하고 열간압연이 곤란하다는 단점이 있다.

#### 2.3 연청동 주물

청동 주물에 Pb를 첨가하면 Pb는 기지 중에 용해되지 않고 최후에 응고한 부분에 분산되는데, Cu-Sn계에 Pb를 첨가한 상태에서 조직을 구성하는  $\alpha$ 상 및 Pb상의 형상과 분포는  $\alpha$ -dendrite와 그 사이에 불연속적인 구상으로 존재한다.

연청동 주물은 응고조직, 즉 Pb의 분산형태에 의해 내마모성이 변하며, Pb가 윤활제로서 거동하지만, 내압출력이 작기때문에 저하중, 고속회전에 적합하다. 한편, 윤활유가 없을 때에도 어느 시간까지는 Pb에 의해 소착현상이 방지될 수 있으나, Pb는 산화되기 쉬어 마찰면에 개재하여 아산화동막의 형성을 촉진시켜 마모되기 쉽다는 단점이 있다.

#### 2.4 알루미늄 청동 주물

알루미늄 청동 중에서는 Cu-Al-Fe-Ni의 4원

계가 가장 널리 사용되고 있다. 4원계의 경우 2원계 합금보다 Ni 및 Fe의 증가에 따라서  $\alpha/(\alpha + \beta)$  용해도 곡선이 Al농도가 높은 쪽으로 이동하고,  $\alpha, \beta$  및  $\gamma_2$  이외에  $\kappa$ 상이 석출된다. 이  $\kappa$ 상은 Ni 및 Fe를 함유한 Al첨동에서 생기는 새로운 석출상의 일반적인 명칭이고, 상온에서는 NiAl 및 FeAl 또는 이들 고용체의 규칙체심입방격자이라고 생각되며 석출경화와 결정립의 미세화를 촉진시켜 기계적 성질에 큰 영향을 미친다.

알루미늄 첨동은  $\alpha, \alpha + \beta, \alpha + \gamma_2$  및  $\beta$ 상 등에 의해 내마모성이 변하고, 기계적 성질이 우수하므로 고하중, 저속도의 부품에 적합하며, 고온에서도 비교적 높은 강도를 갖고 있으므로 고온 분위기 중에서의 마모에 적합하다. 그러나 윤활유가 없을 때, 심한 응착을 일으키기 쉽기 때문에 기계적 파괴마모로 이어지기 쉽다는 단점이 있다.

### 2.5 고력황동 주물

Cu-Zn계에 Al, Fe, Mn, Ni 등을 적당히 첨가하여,  $\alpha$ 상,  $\beta$ 상에 고용시킨 고력황동 주물은 각 첨가원소의 양에 의해 아연 함유량을 변화시키면 같은 결과가 된다. 즉, 아연당량을 첨가원소의 양에 의해 조정하여 조직을 변화시킬 수 있다.

고력황동 주물에서는  $\alpha$ 와  $\beta$ 상의 석출량에 의해 내마모 특성이 변하며, 마모량은 약간 많지만 상대마모재인 강을 마모시키지 않는다. 또한, 윤활재가 끊어질 때에도 소착성이 작으며, 기계적 성질이 높고 안전성이 좋기 때문에 고하중, 불순물 존재, 윤활 불안전 등의 악조건에서 사용되는 부품에 적합하다. 한편, Cu가 67wt.% 이하에서는  $\alpha$ 상에 비해  $\beta$ 상의 상대량이 증가하고, 이  $\beta$ 상은 강하지만 연성이 적기 때문에 신율이 조악한 합금이다. 반대로 80% 이상에서는 신율은 우수하지만 강도가 저하한다.

### 2.6 특수 고력황동주물

특수 고력황동주물의 조직은 고력황동계와 같은  $\alpha + \beta$ 상이다. 이 합금의 특징은 일반적으로 동 합금에서는 불순물로 생각하는 Si를 첨가한다는 것이다. Si는 아연당량이 높아 소량의 첨가에서도 조직을 크게 변화시키지만, 취성이 있어 신율을 나쁘게 한다. 그러나  $Mn_5Si_3$ 의 금속간화합물

을 생성시켜 그 석출물이 내마모에 크게 기여한다.

특수 고력황동주물에서는  $\alpha + \beta$  또는  $\beta$ 상에 석출한  $Mn_5Si_3$ 의 금속간 화합물이 내마모성 및 내소착성에 효과가 있으며, 기계적 성질은 중간 정도이지만 고온에서는 신율이 크기 때문에 마모량을 감소시키고, 소착성이 작다. 또한, 윤활유가 끊길 때에도 상대마모재인 강의 마모가 적고 소착성도 작으며, 고하중, 저속, 불순물이 존재하는 열악한 조건하에서의 사용에 적합하고, 내마모성이 특히 좋다.

## 3. 싱크로나이저 링의 마모환경

싱크로나이저 링은 그림 1에서 보는 바와같이 자동차의 엔진과 구동바퀴 사이에 있는 수동변속기(T/M)내에서 알맞은 비로 토크(Torque)를 변화시킬 수 있도록 마찰판(Friction Clutch)역

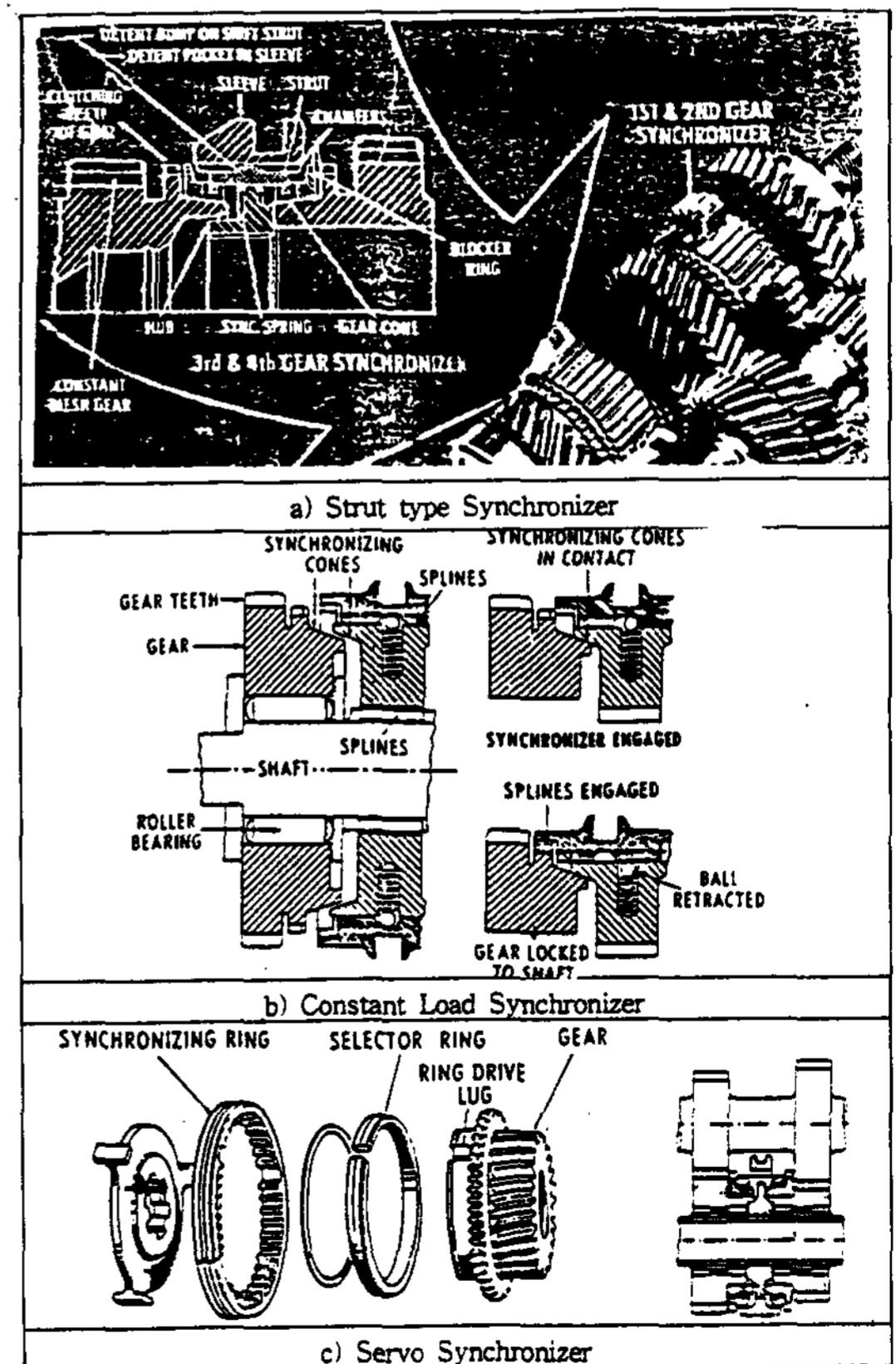


그림 1. 여러가지 형태의 싱크로나이저 링

할을 해주는 주요 부품으로서, 기어변속기 변속기 기어, 엔진 클러치, 그리고 아우풋 샤프트의 상대속도를 0(Zero)으로 만들어 주는 역할을 한다.

3.1 싱크로나이저 링 소재의 요구특성

자동차의 기어 변속시 정지해 있던 피동축의 슬리브(Sleeve)가 회전하고 있는 기어클러치쪽으로 이동하면 그 사이에 있는 싱크로나이저 링이 기어클러치와 접촉하여 마찰에 의해 회전력을 얻게되고 이 회전력이 슬리브에 전달되어 상대속도가 영에 도달할 때 변속이 완료된다. 원활한 변속을 위해서는 그림 2에서 보는 바와 같이 싱크로나이저 링 챔퍼(Synchronizer Ring Chamfer)의 접선력 P가 콘 토크(Cone Torque) T 보다 커야 한다. 이것을 링 형상의 치수를 대입해 정리하면 아래와 같은 조건이 성립되어야 변속이 가능해진다.

$$\frac{\mu}{\sin \beta} \cdot \frac{D}{D_s} > \tan \alpha$$

여기서,  $\mu$ =싱크로나이저 링의 마찰계수,  $\alpha$ =

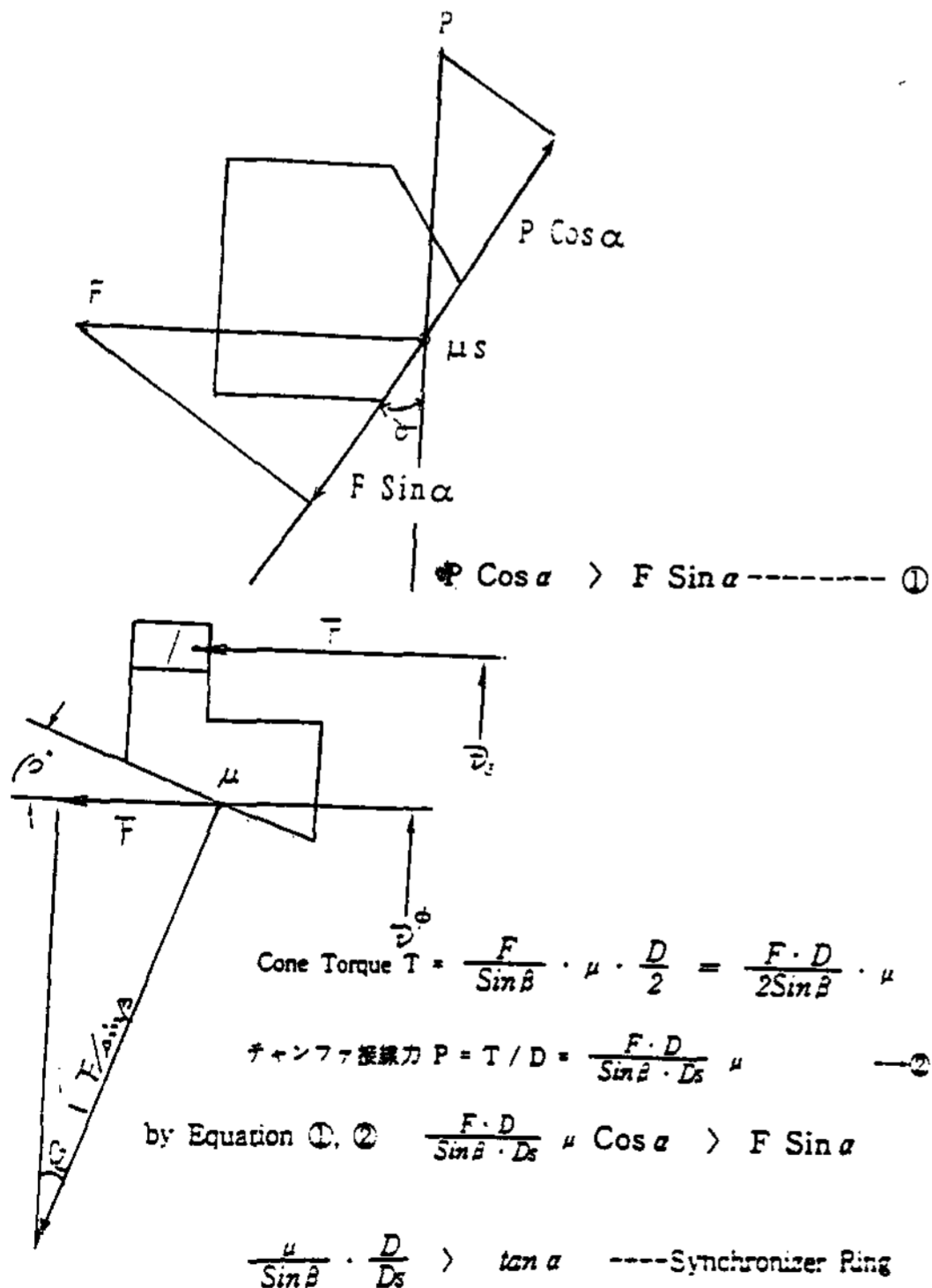


그림 2. 변속시 싱크로나이저 링에 걸리는 힘의 도해

싱크로나이저 링의 챔퍼각,  $\beta$ =싱크로나이저 링 내면의 기울기(Cone의 각도), D=싱크로나이저 링의 내경, Ds=싱크로나이저 링의 외경이다.

위의 식에서  $\alpha, \beta, D, D_s$ 는 싱크로나이저 링 설계시 설정된 값이므로 이들 설정값 내에서 식을 만족시키기 위해서는 싱크로나이저 링은 일정 마찰계수 이상을 가져야 한다. 그림 3의 현재 승용차 수동변속기용 싱크로나이저 링의 한 예를 보면  $D_s=1.25D, \alpha=30^\circ, \beta=6^\circ 30'$ 로 설정되어 있으므로 싱크로나이저 링의 마찰계수는 0.08 이상이어야 한다.

위와 같은 조건들을 정리하면 싱크로나이저 링용 소재는 다음과 같은 조건을 갖추어야 한다.

- 1) 마찰계수가 높고 온도가 가해지는 힘의 변화에 안정적일 것
- 2) 내마모성이 높을 것
- 3) 단조가공성 및 절삭성이 양호할 것
- 4) 가격이 저렴할 것

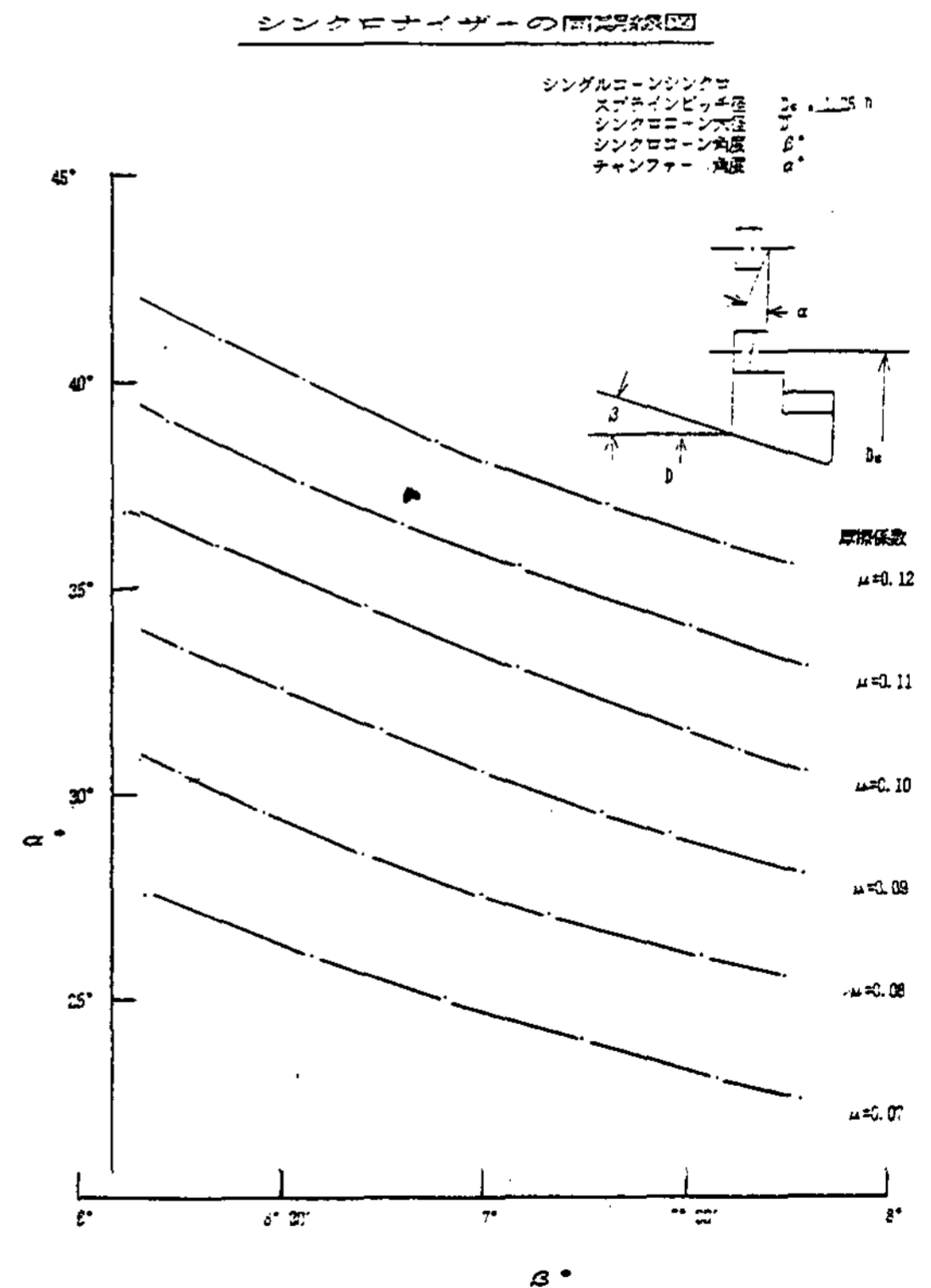


그림 3. 싱크로나이저 링의 Chamfer 및 Cone각도에 따라 요구되는 마찰계수

### 3.2 싱크로나이저 링의 마모특성 측정방법

#### 3.2.1 마찰계수 측정시험

마찰계수는 새로운 싱크로나이저 링 소재의 성능을 예측하는 것으로서 매우 의미가 있다. 마찰계수를 측정하여 종래의 소재와 새로운 소재를 비교하기 위해 변속기에 결합시키면 많은 불확정 요소가 복잡하게 얽혀있어 확실한 결과를 얻을 수 없다. 이러한 요인을 극소화하여 비교하기 쉬운 조건을 만들기 위해서 그림 4와 같은 싱크로나이저 링 전용의 단체마찰계수 측정시험기를 이용하여 마찰계수를 측정하였다.

단체마찰계수측정기는 기본적으로 오일팬내에 변속기의 싱크로 관련부품을 Setting한 다음 싱크로디스크상당재를 구동축으로 하고, 싱크로나이저 링을 피구동축으로 한다. 한편 회전수는 300~3500rpm의 범위에서 임의로 설정할 수 있다. 또한, 피구동축은 싱크로나이저 링의 편흔을 이용하여 부하를 가하는 동시에 토크측정을 할 수 있도록 설계되었다. 이외에 오일의 레벨 조절기 및 온도조절기가 설치되어 있다.

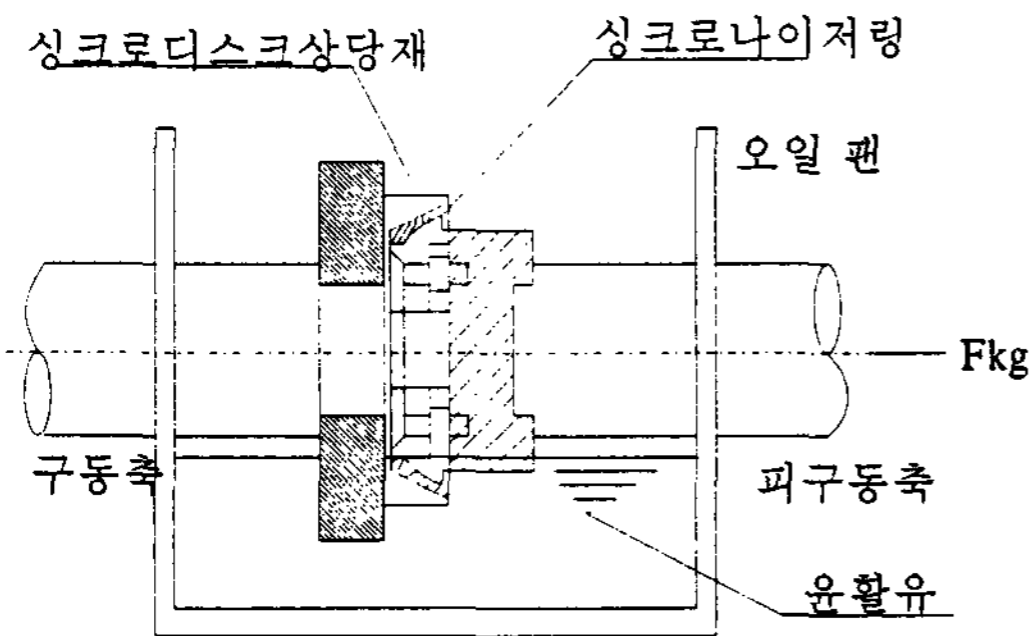


그림 4. 마찰계수 측정시험기

#### 3.2.2 내구성시험기(Bench Test M/C)

종래의 소재와 새로운 소재의 성능을 비교하기 위해 그림 5에서와 같은 변속기에 Setting하여 Bench Test를 실시하였다. 싱크로나이저 링의 성능은 조작력과 동기시간을 측정하여 평가하고 내구성능은 목표로한 Shift횟수 종료 후 싱크로나이저 링의 마모 및 정도(精度)등의 거시변화를 조사하여 평가하였다.

구동력은 모타에 의해 프로펠라 샤프트를 통해 변속기에 전달하고, 토크 변동을 막기 위해서 플라이휠이 설치되어 있다. Shift조작은 링크를 통해 레버에 의해 행해지지만 자동조작을 위

해 에어실린더 또는 더블 스프링실린더를 설치되어 있다. 이외에 오일 온도조절기를 변속기에 접속하여 오일의 온도를 제어했다.

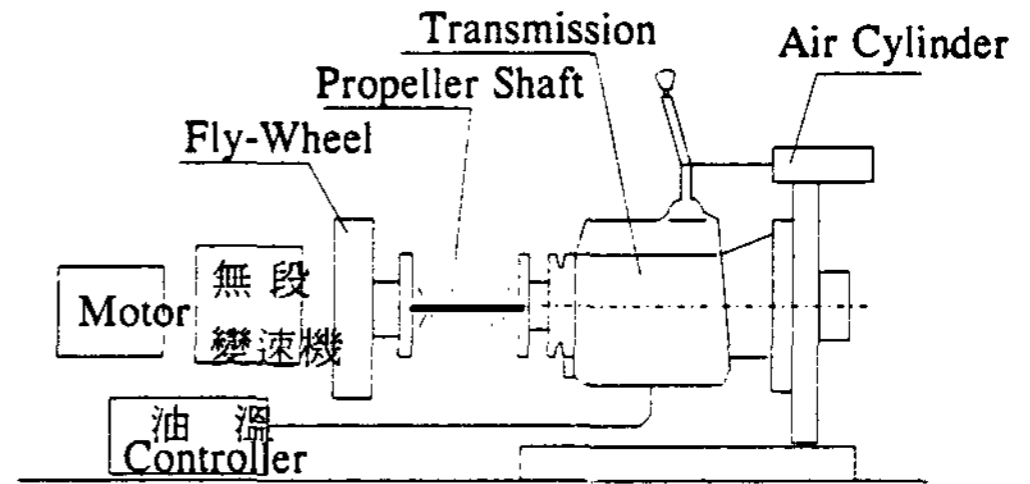


그림 5. 성능 및 내구성 시험기(Bench Test M/C)

### 3.3 Synchronizer Ring의 마모기구

싱크로나이저 링 소재의 네가지 요건 중에서 마찰계수와 내마모성에 대한 조건이 싱크로나이저 링의 요건 중에서 가장 중요하다. Karl Heinz 등에 의하면 마모란 표면 근처에서 물질에 과응력(Over Stress)가 가해지므로써 서로 접촉하고 있는 기계구성품의 이탈에 의해서 발생하는 현상이라고 정의하고 있다. 따라서 내마모성 부품의 설계자의 하중, 온도, 분위기와 같은 마모환경에 적절한 소재와 윤활조건을 사용과 하중과 운동의 전달을 최적화하여 부품의 마모를 최소화해야 한다.

싱크로나이저 링은 소재 및 마모환경에 따라 그림 6과 같은 과정에 의해 마모를 일으키는데, 안정적인 마모특성을 갖기 위해서는 초기마모

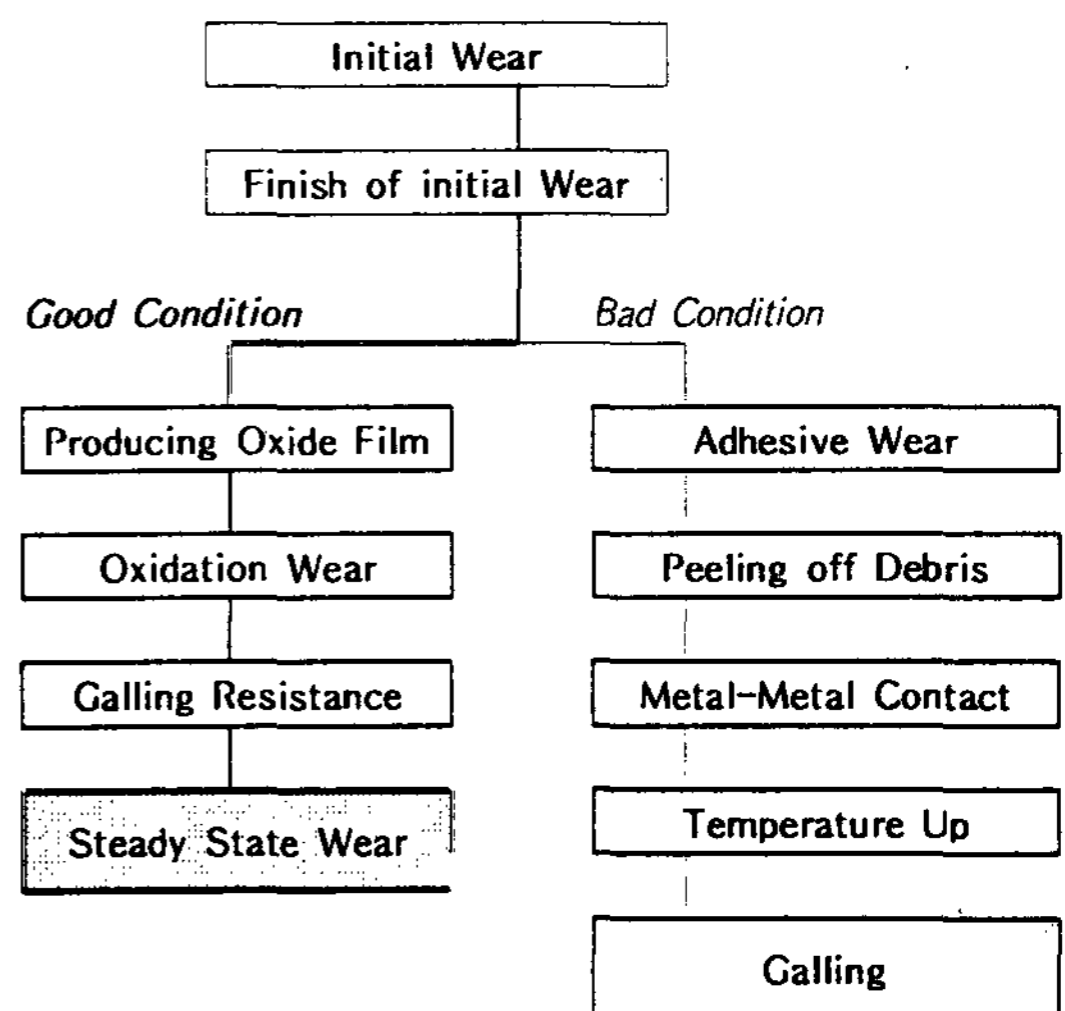


그림 6. 싱크로나이저 링의 마모과정



(Initial Wear)가 끝난 직후 전전한 산화막이 형성되어 응착마모로의 전이를 방지하도록 싱크로나이저 링의 합금설계 및 제조공정 선택을 수행해야 한다.

#### 4. 내마모성 동합금의 설계원리

자동차용 싱크로나이저 링의 사용환경에 적합한 내마모성의 고력 동합금 소재는 아래와 같은 조건을 갖추고 있어야 한다.

- 기계적 성질 : 인장강도 50kgf/mm<sup>2</sup> 이상, 연신율 10% 이상, 경도 80HRB 이상
- 내마모성 : 하중 100kgf, 마모회수 10,000회의 윤활조건하에서 0.5mm 이하
- 마찰계수 : 0.08 이상
- 주조성 : 금형주조 조건에 적합한 유동성
- 단조성 : 열간단조에 의한 파이프의 싱크로나이저 링 제조에 적합한 단조가공성

이와 같은 특성의 내마모성 고력 동합금을 제조하기 위해서는 표 1에서 보는 바와 같이 기지(matrix)내의  $\alpha$ 상의  $\beta$ 상의 분율, 금속간화합물의 석출 등과 같은 금속학적 인자들과 주조조건, 열간단조조건 등과 같은 제조공정 변수들을 최적 조건으로 제어해야 한다.

재료의 성질은 화학조성, 결정구조의 크기, 형태와 방향 등과 같은 미세구조에 의해 결정되는데, 마모를 받는 물질의 미세구조는 화학조성, 제조이력, 마모시스템(Tribo-System)의 상호작용에 의해 결정된다. 결국, 마모는 일종의 소성 변형이라고 할 수 있으므로 내마모성 소재를 제조하기 위해서는 상온의 경우 슬립면(Slip Plane) 위에서의 전위이동을 방해하므로써 소성 변형을 제어해야 한다. 즉,  $\Delta\sigma$ 만큼의 항복강도를 증가

시키려면 전위가 움직이는 길위에 방해물(원자, 입자, 전이 또는 입계)을 생성시켜야 한다. 이런 방법을 강화기구라 한다. 이러한 강화기구에는 Solid Solution Hardening, Precipitation Hardening), Dislocation Hardening, Grainboundary Hardening, Texture Hardening, Anisotropy Hardening, Transformation Hardening 등과 같은 7가지 방법이 있는데 싱크로나이저 링 소재를 강화하기 위한 방법으로는 처음 두가지인 고용강화(Solid Solution Hardening)와 석출강화(Precipitation Hardening)방법을 사용하고 있다.

표 1에서 보는 바와같이 싱크로나이저 링에 적합한 성질의 소재를 제조하기 위해서는 성질에 영향을 미치는 금속학적 인자들을 제어해야 하는데 이들은 크게 합금설계와 제조공정 변수에 의해 제어된다. 결국, 최적의 싱크로나이저 링 소재를 제조하기 위해서는 합금설계를 통해 연성이나 가공성을 해치지 않는 범위안에서 고용강화, 석출강화를 시키고, 제조공정 변수의 제어를 통해 결정립 및 석출물의 크기를 제어해야 한다.

#### 5. 고력 내마모성 동합금 소재

승용차용 싱크로나이저 링 소재로서 수십 종류 이상이 발표되었지만 상용화되어 널리 사용되고 있는 합금으로는 Mn-Si계 금속간화합물을 석출시켜 내마모성을 강화시킨  $\alpha+\beta$ 조직의 MBA-2, CSM-3ME와 승용차의 고속화 경향으로 인해 보다 가혹한 마모조건용으로 설계된  $\beta$ 단상의 P-31이 있다.

이에, 본 글에서는 상용화되어 널리 사용되고 있는 두가지 합금계, 즉 Mn-Si계 금속간화합물이 주요 내마모성 향상 석출물이고  $\alpha+\beta$ 조직인

표 1. 동합금계 내마모성 소재의 합금설계 인자

동합금계 고력 내마모성 소재의 성질에 영향을 미치는 금속학적 인자들							
기지의 강도		결정립 크기	마모시 산화피막 형성원소	석출물의 영향			
$\alpha/\beta$ 분율	고용강화			종류	강도	크기	분포형태
싱크로나이저 링 소재의 성질을 제어할 수 있는 인자들							
합금설계에 의한 제어				제조공정 변수들에 의한 제어			
- 기지의 고용강화 원소 첨가		- 결정립 미세화 원소 첨가		- 금형의 열적 성질		- 금형 예열온도	
- 석출물(금속간화합물) 형성원소 첨가				- 도형재의 종류		- 코팅 조건	
- 석출물 강화원소 첨가		- 석출물의 크기 제어원소 첨가		- 주입 온도, 주입속도			
- $\alpha/\beta$ 분율				- 기타 제조변수들			

표 2의 KMS-1/MIN-합금과 Ni-Si계 및 Fe-Co계 금속간화합물이 주요 석출물이고 β단상조직인 표 3의 KMS-2/MP-합금, 그리고 이들 합금을 보다 개량한 표 4의 KMS-2/MC-합금에 대해 성분원소에 따른 마모특성의 변화를 연구한 결과를 정리하였다. 한편, 종래에 상업화된 고력 황동합금을 개량하여 각 합금별로 합금원소들의 영향을 조사한 앞의 연구를 통해 싱크로나이저 링 소재로서 가장 적합하다고 판단된 KMS-2소재를 기초로 표 5에서 보는 바와 같이 고용강화, 금속간화합물의 석출강화를 일으키는 합금원소 Group별로 합금설계한 다음 원심주조하여 제작한 시편의 경도 및 내마모성의 변화를 분석함으로써 각 강화요인들의 기여도를 조사하였다.

5.1 Mn-Si계 금속간화합물 석출강화형 동합금

Mn-Si계 금속간화합물이 주요 내마모성 향상 석출물인 KMS-1/MIN-합금에 대한 연구는 표 2에서 보는 바와같이 기존의 MBA-2나 CSM-3ME와 유사한 MN-1을 기준으로 하여 아연당량 및 기타 합금원소를 변화시키지 않으면서 Al량을 증가시켜 고용강화 효과를 강화시킨 MN-2, Al 및 Ni의 고용강화 효과를 강화시킨 MN-3, 그리고 고용강화 및 Fe-Cr계 금속간화합물의 석출량을 증가시킨 MN-4에 대해 수행되었다.

5.1.1 미세조직 및 경도의 변화

4종의 합금 모두 아연당량은 거의 비슷하게 조절하였으며, 원심주조 후 제조한 링의 경도는 아연당량이 적은 MN-4합금이 가장 낮았다. 이와 같은 결과는 MN-4합금은 비록 고용강화 및 석출강화 원소를 보다 많이 첨가했으나, 아연당량이 가장 낮아 기지내에 α량이 가장 많기 때문으로 판단된다. 결국, α+β조직의 합금에서 경도는 α/β분율에 의해 결정된다고 판단된다. 한편, 단조후 경도는 큰 차이가 없었는데 이와 같은 결

과는 아연당량이 46~48인 경우 단조온도인 650°C~750°C에서는 β단상으로 되었다가 단조 후 상대적으로 저온인 금형에 의해 급냉되어 4종의 합금 모두 α상 분율이 주조 직후보다 줄어들기 때문으로 판단된다.

5.1.2 마모특성의 변화

합금에 따른 내마모성을 조사한 그림 7,8의 마모량 시험결과에 따르면 마찰계수는 큰 차이가 없고 모두 하한값인 0.08이상이었으며, MN-1, MN-2, MN-3, MN-4순으로 마모량이 작아 내마모성이 우수했고, MN-3와 MN-4는 큰 차이가 없었다. 이와 같은 결과는 고용강화 및 금속간화합물의 석출강화가 마모성을 향상시키는데 큰 영향을 미치며, MN-3와 MN-4의 내마모성이 큰 차이가 없는 것은 비록 MN-4 합금이 Fe-Cr계 금속간화합물이 많으나 아연당량이 낮아 α량이 많기 때문인 것으로 판단된다. 미세조직에 미치는 각 합금원소의 특성을 조사하기 위해 실시한 SEM Mapping 사진 2에 따르면 Mn-Si가 침상의 금속간화합물로 석출하고 있고, Al과 Ni은 기지에 균일하게 고용되어 있는 분포를 나타냈다. 한편, Fe와 Cr는 고용되어 있기보다는 금속간화합물을 형성하여 분포되어 있으나, 그 양은 적은 것으로 판단된다.

결국, α+β기지의 내마모성 동합금의 주조직후 경도는 주로 아연당량 즉, α분율에 의해 결정되며 단조 후에는 거의 비슷했고, 내마모성은 고용강화 및 석출강화원소의 첨가량이 증가할수록, 그리고 α분율이 적을수록 향상되었으며, 최적량은 연성 및 가공성을 악화시키지 않는 범위내에서 설정되어야 한다고 판단된다.

5.2 Ni-rich계 금속간화합물 석출강화형 동합금

Ni-rich계 및 Fe-Co계 금속간화합물이 주요 석출물이고 β단상조직인 KMS-2/MP-합금에 대

표 2. KMS-1/MN-합금의 성분 및 경도변화

합금명	Cu	Zn	Al	Si	Mn	Fe	Ni	Cr	아연당량	단조전 경도HRB	단조후 경도
MN-1	60.2	32.5	2.3	1.0	3.1	0.41	0.32	0.17	48.98	91	93.5
MN-2	61.4	30.7	2.8	0.9	3.2	0.47	0.35	0.18	48.61	91.5	94
MN-3	61.2	30.9	2.7	1.0	3.0	0.42	0.61	0.17	48.74	93	95
MN-4	61.5	30.2	2.5	1.0	3.2	0.76	0.59	0.25	47.98	90.5	93.5

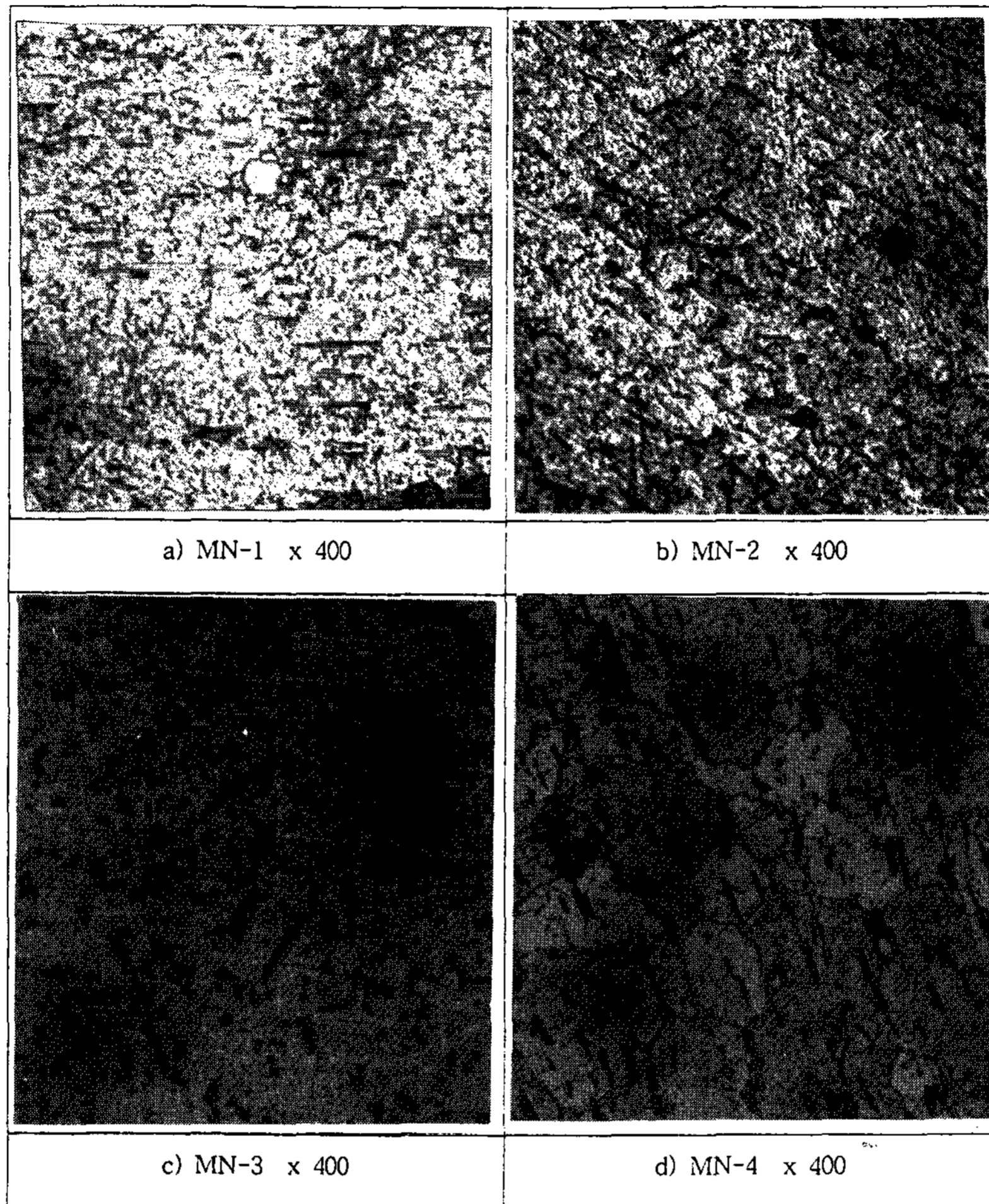


사진 1. KMS-1/MN-Series 합금의 원심주조 후 미세조직

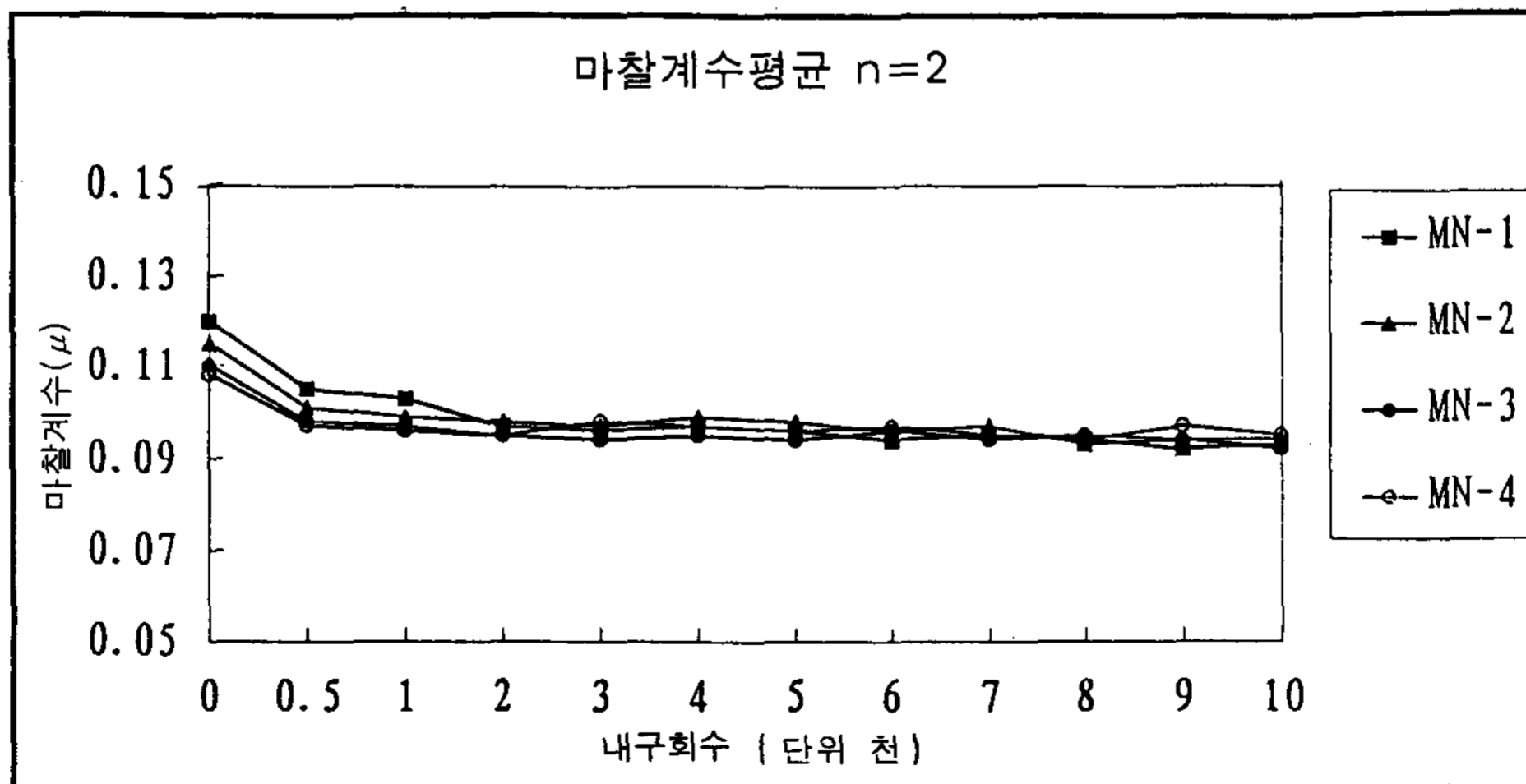


그림 7. KMS-1/MN-Series 합금의 마찰계수 변화



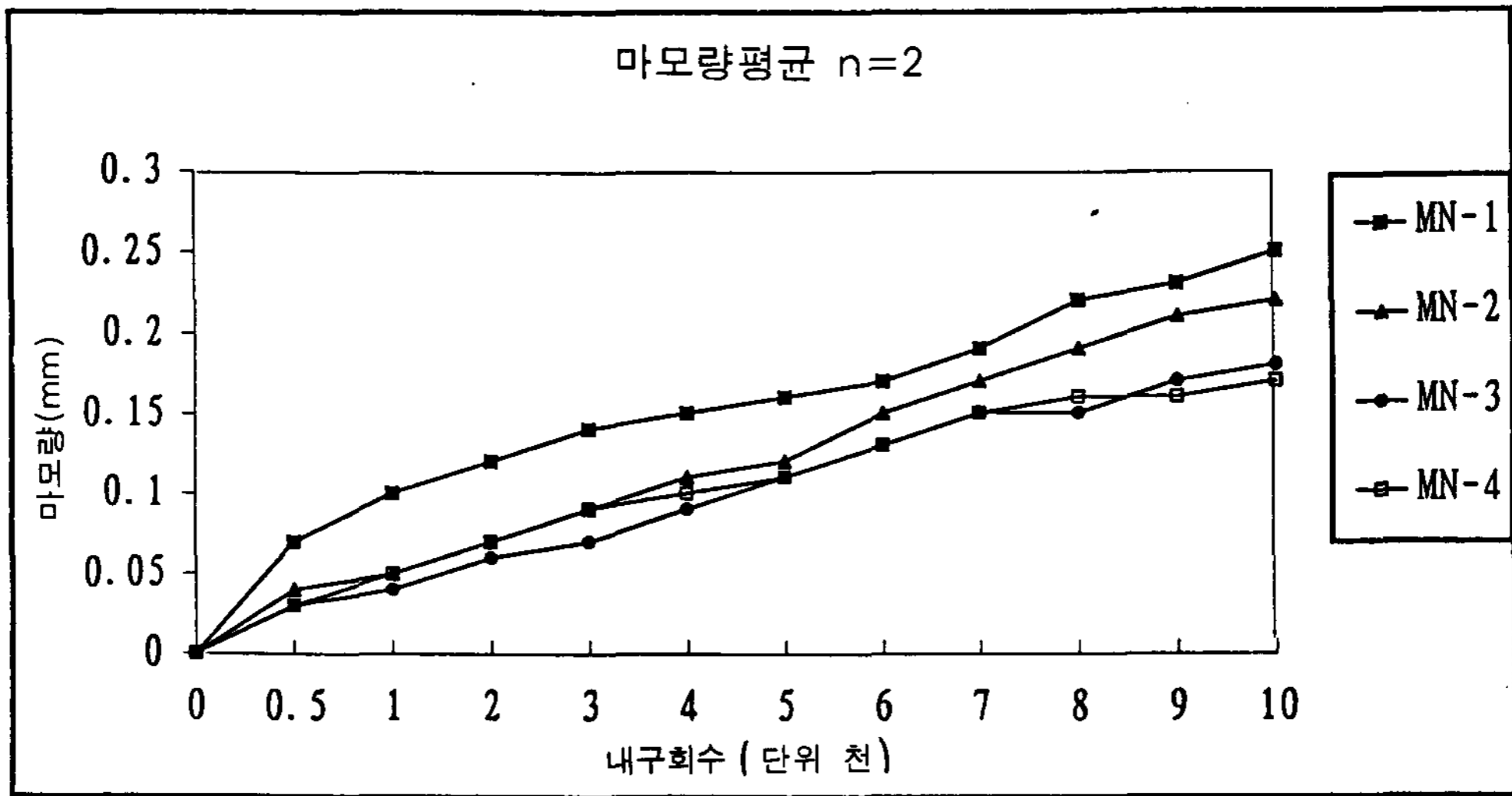


그림 8. KMS-1/MN-Series 합금의 마모량의 변화

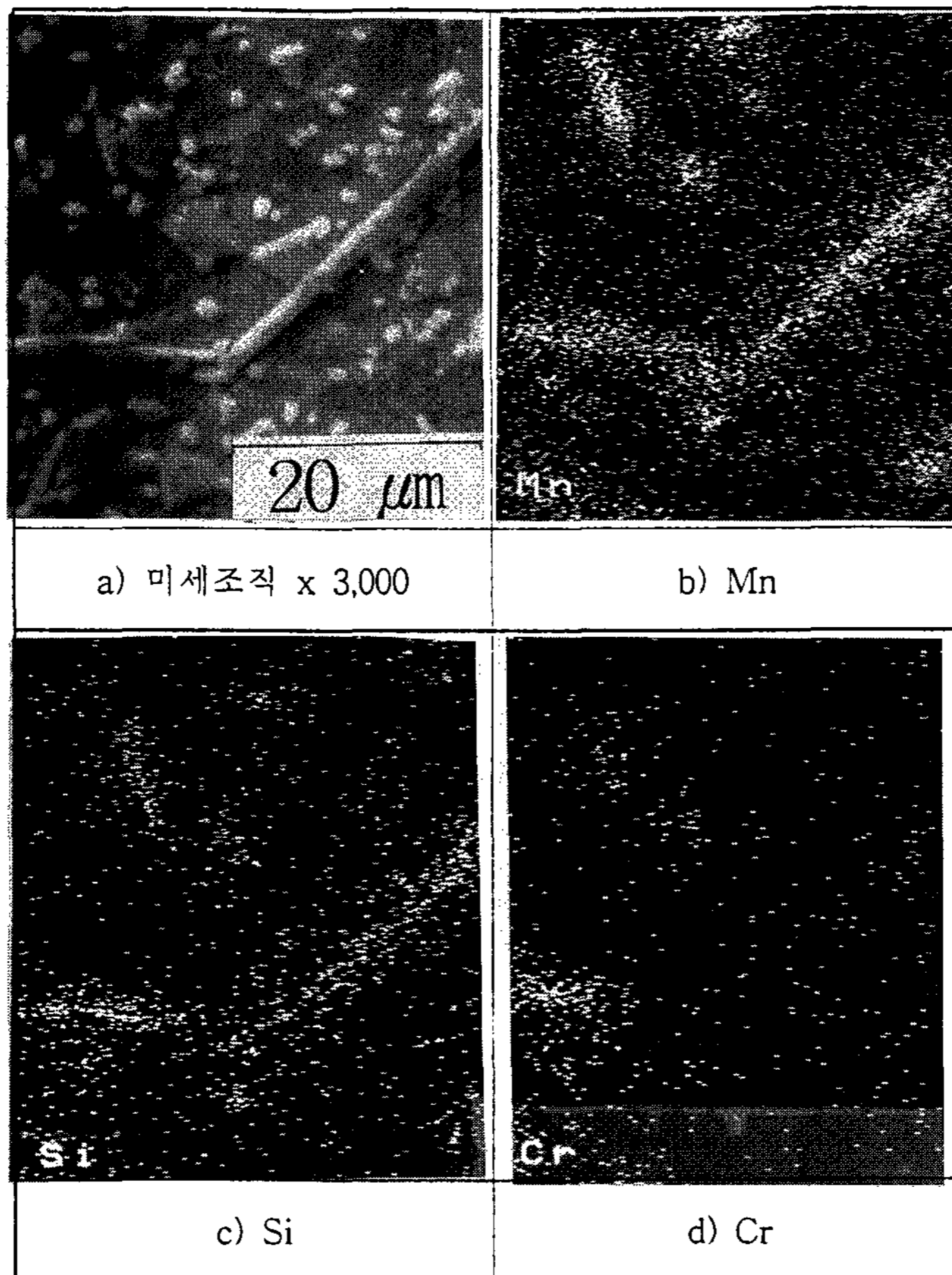


사진 2. KMS-2합금의 Mn, Si, Cr에 대한 SEM Mapping사진

한 연구는 표 3과 같이 기존의 P-31과 유사한 MP-1을 기준으로 하여 Fe-Co계 금속간화합물 생성원소인 Co의 일부를 Fe-계 금속간화합물을 형성하는 Cr으로 일부 대체한 MP-2, Co를 Cr과 Ti으로 대체한 MP-3, 그리고 Co를 전량 Cr으로 대체한 MP-4에 대해 실시되었다.

5.2.1 미세조직 및 경도의 변화

이 연구에서 4종류의 합금 모두 아연당량은 49정도로 조절하였으며, 원심주조 후 제조한 링의 경도는 MP-1과 MP-4의 경우 약간 높았으나 거의 비슷했으며, 단조후 경도는 주조직후의 경도와 큰 차이가 없었다. 이와 같은 결과는 β단상 조직인 KMS-2/MP-합금의 경우 단조전이나 단조후나 기지의 변화가 거의 없기 때문인 것으로 판단된다. 결국, β단상조직의 합금에서 경도는 단조전·후에 변화가 거의 없으며 석출되는 금속간화합물의 종류, 크기, 분포형태 등에 의해 결정된다고 판단된다.

5.2.2 마모특성의 변화

합금에 따른 내마모성을 조사한 그림 9, 10의 마모량 시험결과에 따르면 마찰계수는 Fe-Co계 금속간화합물이 많은 MP-1합금이 가장 높았으며, 다른 합금들은 큰 차이가 없고 모두 하한값인 0.08이상이었고, 마모량은 MP-1, MP-2, MP-3, MP-4 순으로 마모량이 작아 MP-4의 경도가 가장 낮았음에도 불구하고 내마모성이 우수했다. 이와 같은 결과는 MP-3의 경우 Ti이 첨가됨에 따라 석출물이 미세화되어 있고, MP-4의 경우 Cr이 고용한계를 많이 초과할 경우 Fe-Cr계 금속간화합물 이외에도 Cr산화물이 생성되어 내마모성이 향상된 것으로 판단된다. 한편, 산화물의 생성량이 많으면 연성 및 가공성이 떨어지는 것으로 나타났다. 한편, 각 합금원소의 역할을 조사하기 위해 실시한 SEM Mapping 사진 3에 따르면 Fe-Si-Cr 금속간화합물과 Ni-rich 석출물이 주요 석출강화 역할을 하고 있으며, Al과 Ni 일부는 고용강화 역할을 하고 있는 것으로 나타났다.

결국, β단상조직 동합금의 내마모성은 단조값

표 3. KMS-2/MP-합금의 성분 및 경도변화

합금명	Cu	Zn	Al	Si	Co	Fe	Ni	Cr	Ti	아연당량	단조전 경도HRB	단조후 경도
MP-1	60.5	29.8	3.8	0.9	0.7	0.8	3.5	-	-	48.85	101	102
MP-2	60.7	29.3	3.9	0.94	0.36	0.88	3.62	0.3	-	48.94	98	101.9
MP-3	61.2	28.8	4.1	1.1	-	0.75	3.4	0.29	0.36	49.78	99	102.5
MP-4	60.8	29.5	3.9	0.97	-	0.77	3.48	0.58	-	49.15	99.5	100

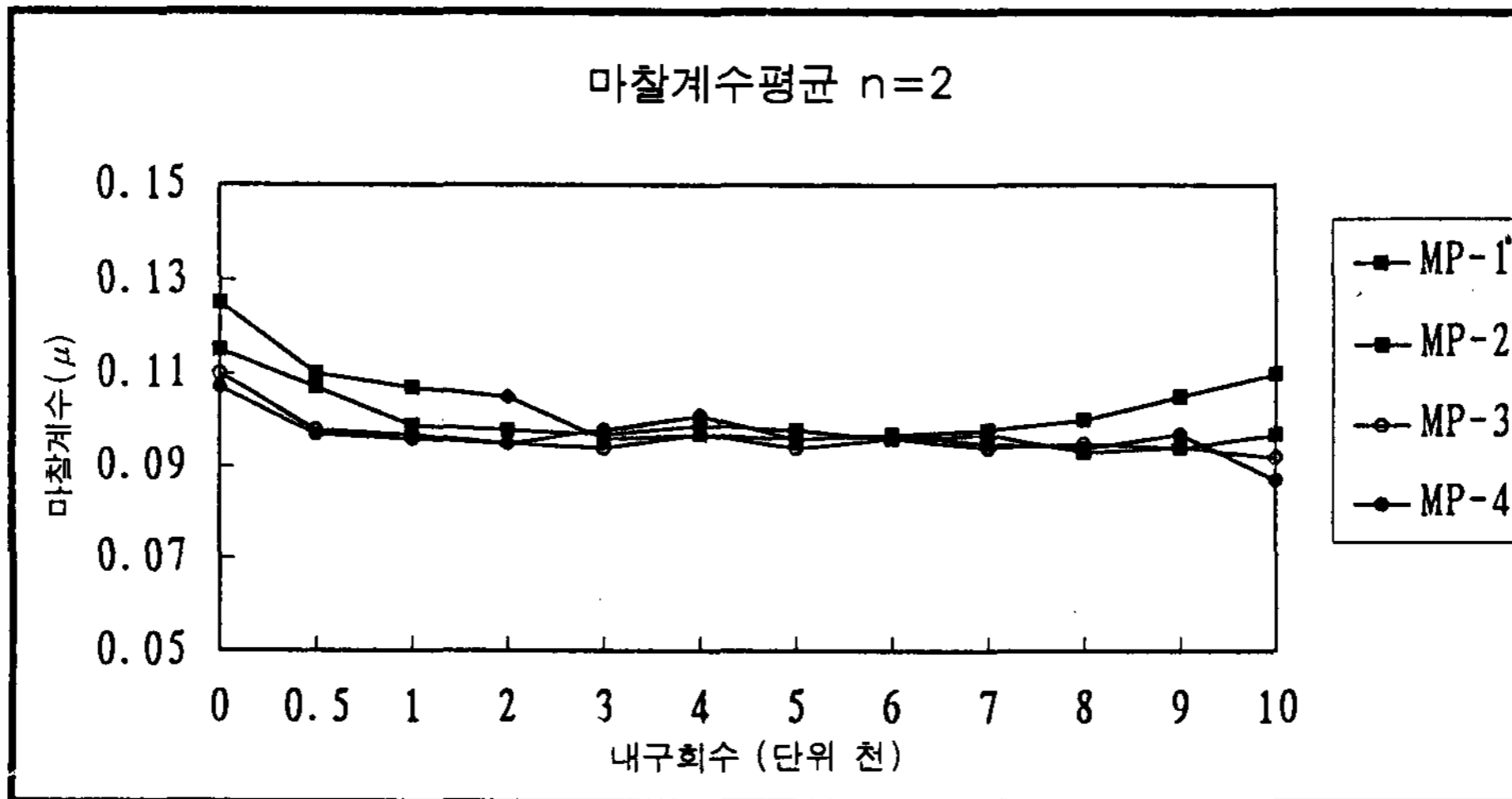


그림 9. KMS-2/MP-Series합금의 마찰계수 변화

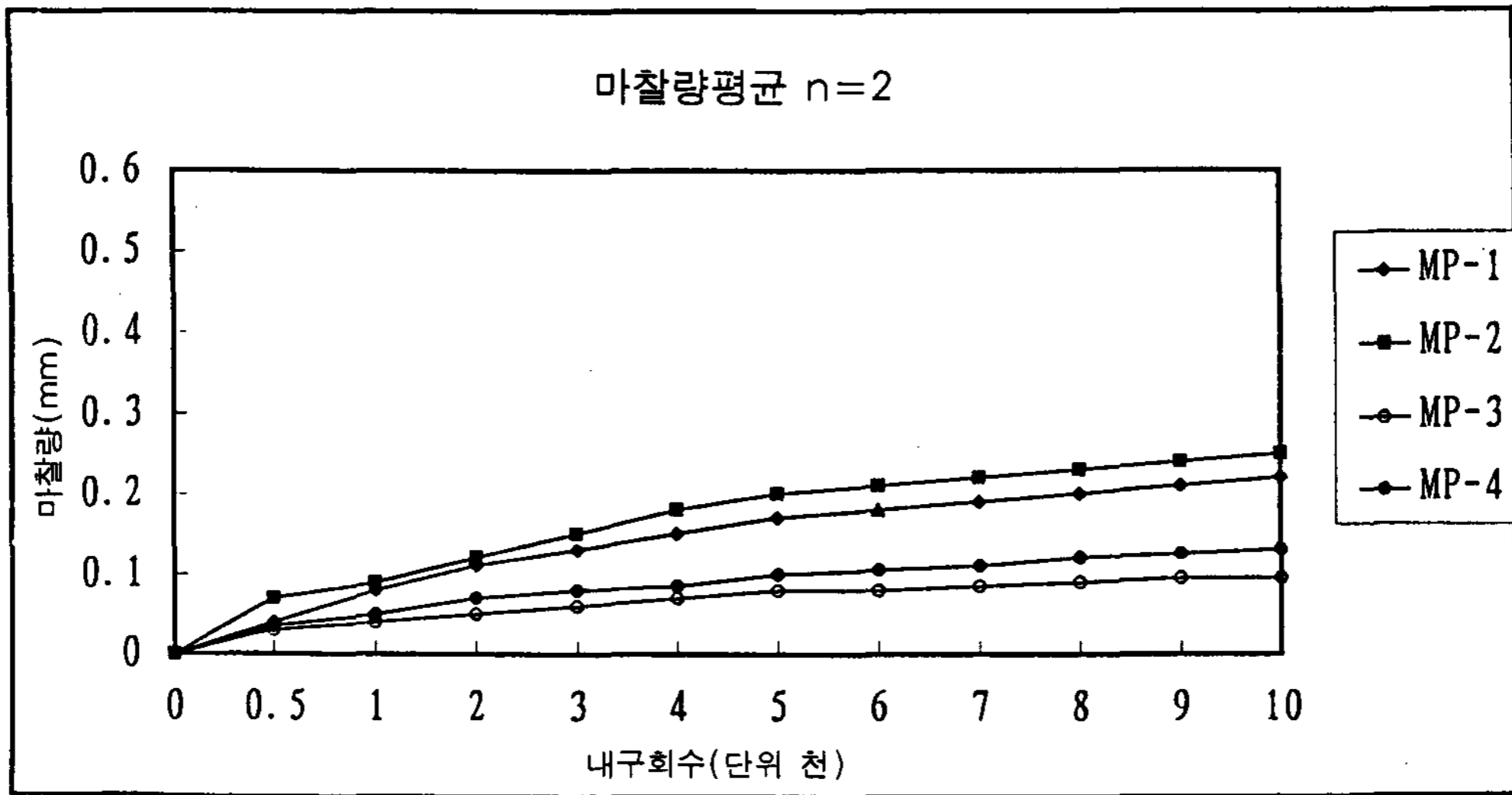


그림 10. KMS-2/MP-Series합금의 마모량 변화

과는 달리 석출물의 종류, 크기, 분포형태에 의해 결정됨을 알 수 있었고, Cr이나 Ti를 적절히 첨가함으로써 고가의 Co을 대체할 수 있으며, 단지 Cr을 적량 이상 첨가할 경우 산화물이 과다하게 석출되어 연성 및 가공성이 떨어지므로 최적의 범위를 설정해야 함을 확인할 수 있었다.

5.2.3 개량된 MC-Series 합금의 마모특성의 변화

한편, KMS-2/MP-Series 합금계에서 연성 및 가공성이 나쁘지 않으면서 우수한 내마모성을 가질 수 있는 최적의 Cr량을 설정하기 위해서 표 4에서 보는 바와 같이 MP-합금 중에서 Cr만을 0.15wt.%에서부터 1.12wt.%까지 변화시켜 KMS-2/MC-1부터 MC-6의 합금을 설계했으며, MC-7은 MC-2의 조성에 Scrap을 50% 섞어서 제조했으며, MC-8은 MC-2의 조성에 고용강화를 위해 Al량을 증가시키고, Mn을 0.2wt.% 첨가하도록 설계하여 연구를 수행하였다. 강력한 β상 촉진원소인 Al, Si량의 변화에 따라 합금의 아연당량은 47.31에서부터 51.41까지 변했다. 원심주조 후 제조한 링의 경도는 아연당량이 가장 높은 MC-8합금이 가장 높았으나, 아연당량이 가장 낮은 MC-5의 경우 아연당량이 더 높은 MC-1, MC-3, MC-4보다 오히려 높은 경도 값을 나타냈다. 이와 같은 결과는 KMS-2 합금의 경우 Al과 Ni의 첨가량이 많아 고용강화효과

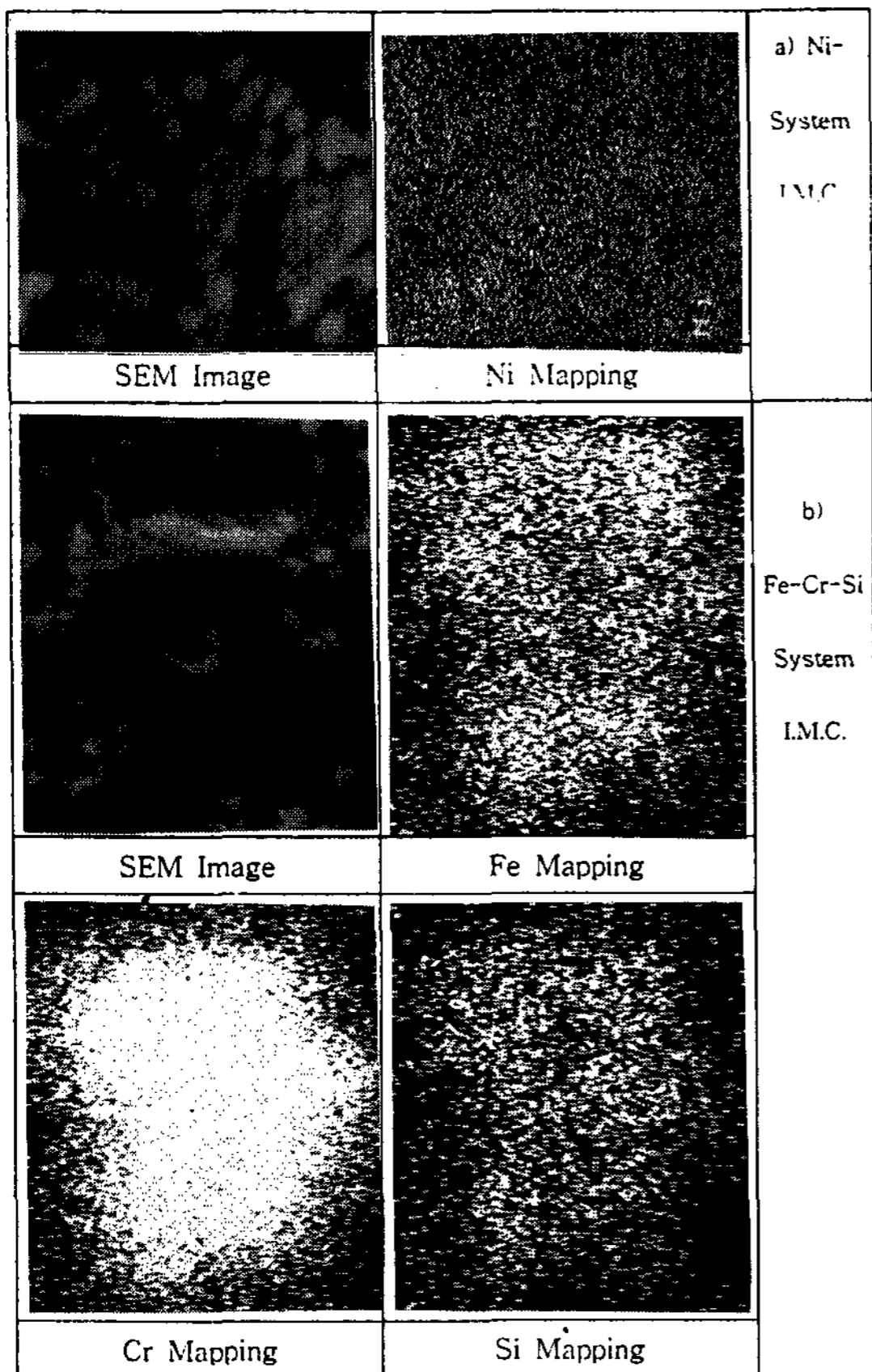


사진 3. KMS-2 합금내 Ni-rich 및 Fe-Cr-Si 금속간화합물의 SEM사진

가 기지의 영향 보다 크고, Cr량이 0.5wt.%초과 할 경우 Cr산화물이 석출되어 경도에 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다. 단조후 경도는 단조전보다 상승했으며, MC-합금 모두 거의 비슷했다. 합금에 따른 내마모성을 조사한 그림 11, 12의 마모량 시험결과에 따르면 마찰계수는 0.083mm~0.103mm로 모두 하한값인 0.08이상이었다, Scrap 50%를 함께 섞어서 제조한 MC-7의 마찰계수가 가장 높고 MC-5합금이 가장 낮았다. 마모량은 MC-8이 가장 적고 MC-3, MC-5, MC-2, MC-4 합금 순으로 마모량이 적었다. 마모시험 결과, 마찰계수가 높을수록 마모량이

이 많아 내마모성이 낮았는데, 내마모성 및 마찰계수를 동시에 고려할 때 MC-3 합금이 가장 바람직했다. Cr량이 0.5wt.%를 넘어가면 산화물의 생성량이 많아짐을 확인할 수 있었는데, 이 경우 연성 및 가공성이 불량했다.

결국, β단상기지의 KMS-2합금에서는 주조직후 경도는 아연당량 즉, α/β분율보다는 주로 Al, Ni과 같은 고용강화 원소에 의해 결정되며 단조후에는 거의 비슷했고, 내마모성은 고용강화 원소인 Al, Ni의 첨가량이 증가할수록, 그리고 Cr 첨가량이 증가할수록 향상되었으며, Cr의 최적량은 연성 및 가공성을 악화시키지 않는 범위내에서 0.4wt.% 내외임을 확인할 수 있었다.

표 4. KMS-2/MC-합금의 성분 및 경도변화

합금명	Cu	Zn	Al	Si	Fe	Ni	Cr	Mn	아연당량	단조전 경도HRB	단조후 경도
MN-1	60.6	29.83	4.32	0.84	0.76	3.5	0.15	-	49.87	100	104.2
MN-2	60.5	30.02	4.26	0.92	0.72	3.31	0.27	-	50.26	103.7	103.0
MN-3	60.3	29.96	4.14	0.76	0.72	3.7	0.42	-	49.13	101	104.5
MN-4	61.3	29.49	3.77	0.75	0.80	3.32	0.57	-	47.75	98.5	103.9
MN-5	61.3	29.05	3.69	0.75	0.91	3.44	0.86	-	47.31	101.7	103.5
MN-6	61.2	28.42	4.45	0.74	0.68	3.39	1.12	-	48.97	103	105.5
MN-7	60.0	29.88	4.41	0.92	0.74	3.81	0.24	-	50.52	101.8	105.2
MN-8	60.5	29.19	4.78	0.95	0.99	3.26	0.33	0.20	51.41	104.5	104.1

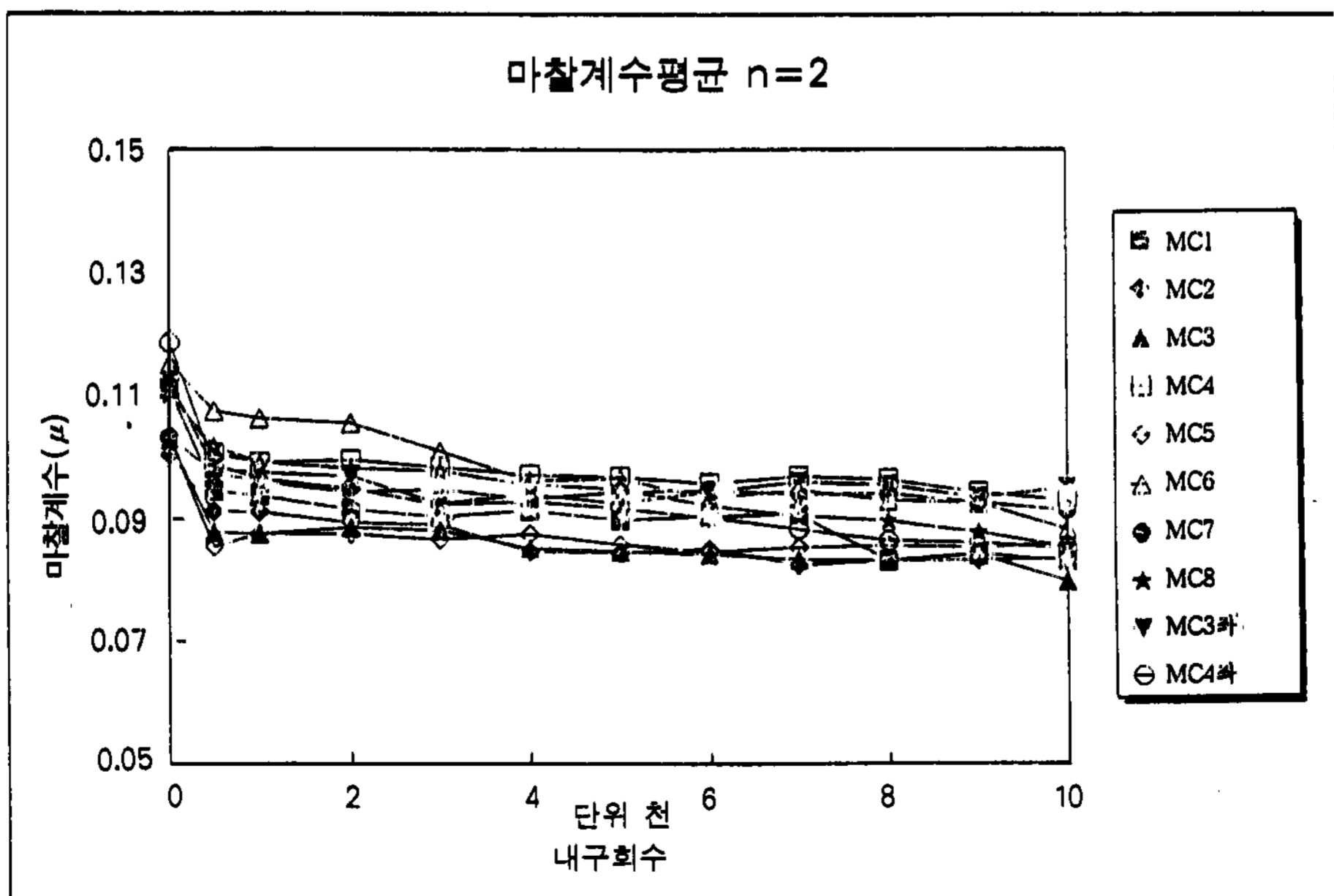


그림 11. KMS-2/MC-Series 합금의 마찰계수 변화

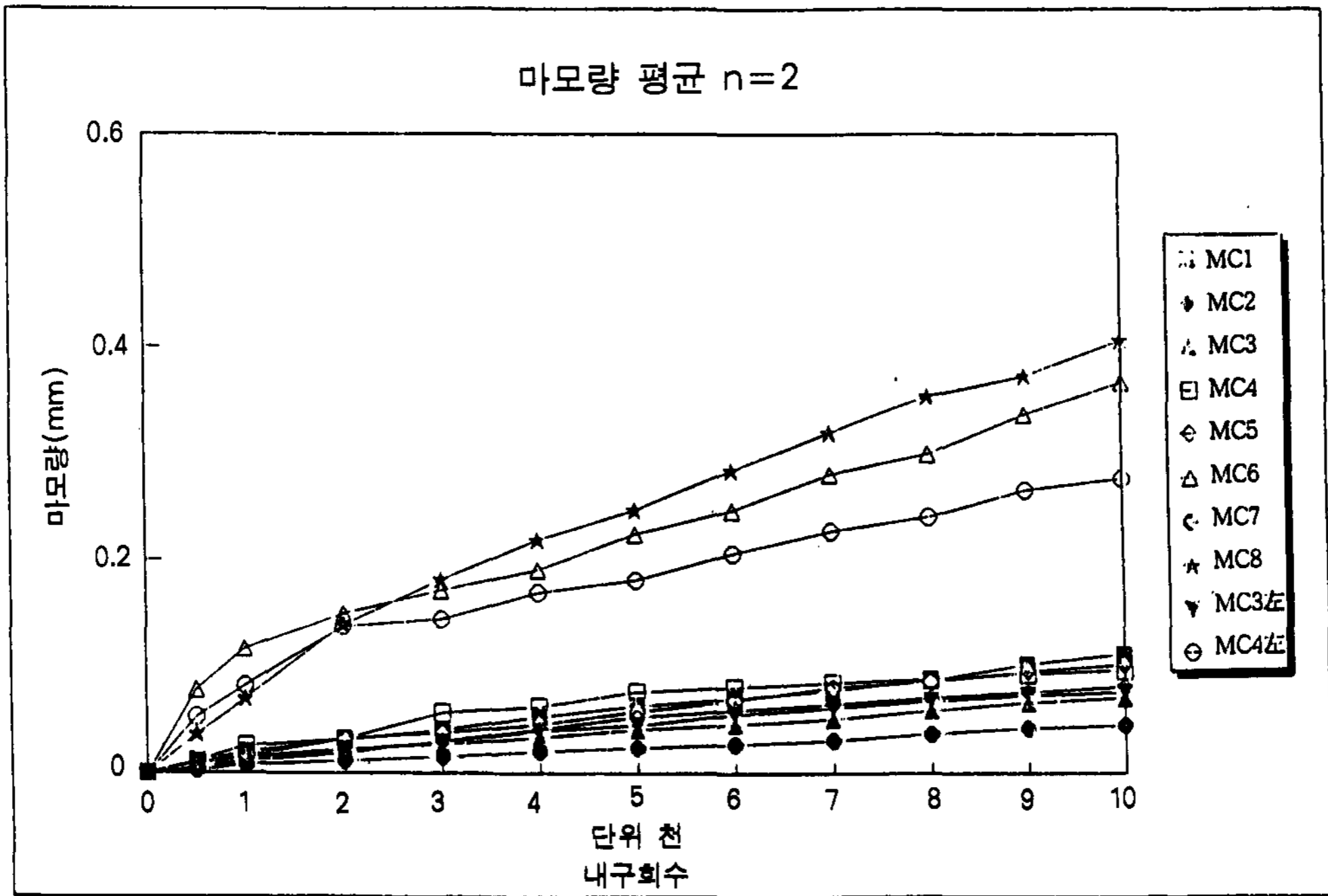


그림 12. KMS-2/MC Series 합금의 마모량의 변화

5.3 내마모성에 미치는 금속학적 주요인자들의 영향

종래에 상업화된 고력황동 합금을 개량하여 각 합금별로 합금원소들의 영향을 조사한 앞의 연구를 통해 싱크로나이저 링 소재로서 가장 적합하다고 판단된 KMS-2 소재를 기초로 표 5처럼 고용강화, 금속간화합물의 석출강화를 유발하는 합금원소Group별로 합금설계한 다음 원심주조하여 제작한 시편의 경도 및 내마모성의 변화를 분석하므로써 각 강화요인들의 기여도를 조사하였다. 합금 #1부터 #6까지 아연당량은 49.17로 설정하였는데, #1합금은 KMS-2와 동일한 아연당량하에서 Matrix Effect를 조사하려 하였으며, #2합금은 Al첨가에 의한 고용강화 효과를, #3합금은 #2합금에 Mn의 고용강화 효과를, #4합금은 #2합금에 Ni-Si계 금속간화합물 석출효과를, #5합금은 #4합금에 Fe-Si-Cr계 금속간화합물 석출효과를, 그리고 #6합금은 #5합금에 Mn-Si계 금속간화합물 석출효과를 조사하기 위해 설계되었다.

소의 첨가에 의해 점점 증가하였으며, 증가폭은 #2합금에서 #3합금으로 변할 때, 즉 Mn의 고용강화가 첨가될 때 가장 컸고, #4합금에서 #5합금으로 변할 때, 즉 Fe-Si-Cr계 금속간화합물이 석출될 때 가장 작았다. 또한, #5합금에서 #6합금으로 변할 때, 즉 Fe-Si-Cr계, Ni-Si계 금속간화합물에 Mn이 첨가될 때 역시 경도변화의 폭이 컸는데, 이와 같은 이유는 Mn첨가되어

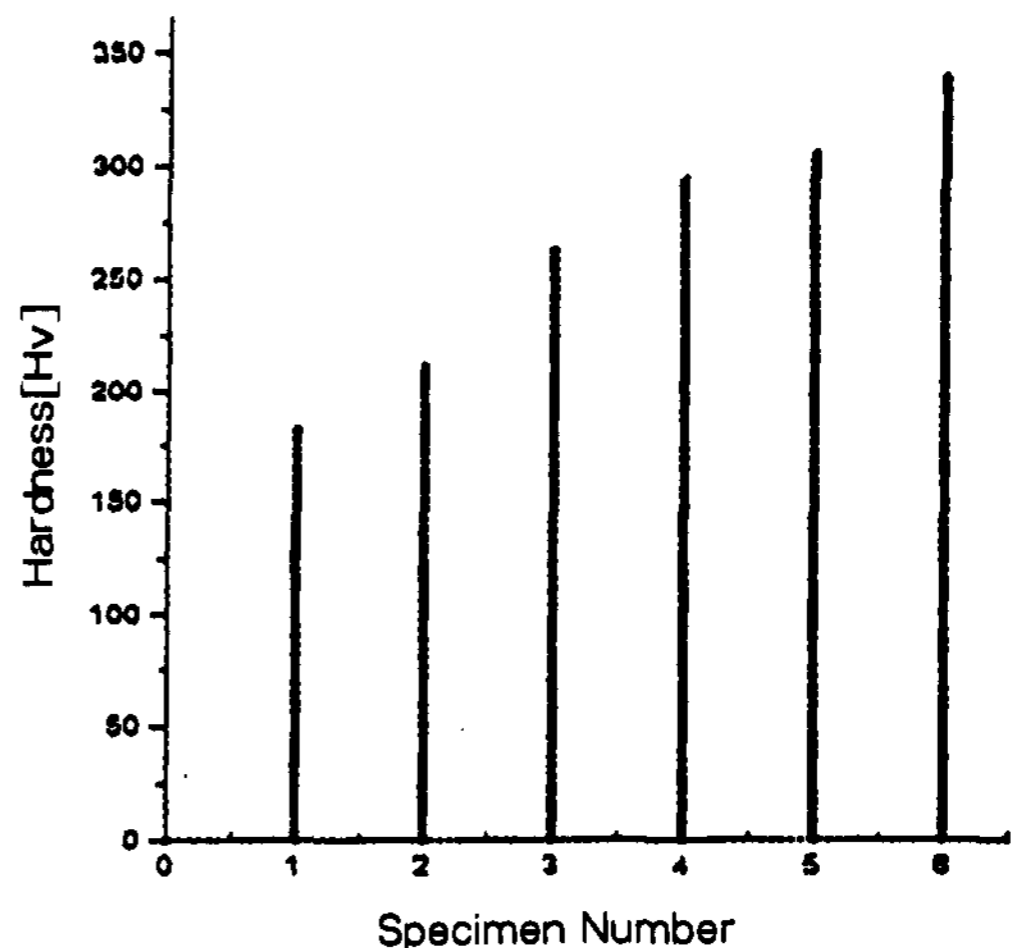


그림 13. KMS-2합금 강화원소별 경도변화

5.3.1 미세조직 및 경도의 변화

합금별 경도는 그림 13처럼 강화 유발 합금원



표 5. 고력황동합금의 내마모성에 미치는 강화기구의 인자들

시편번호	합금 조성										아연당량	특징
	Cu	Zn	Al	Ti	Cr	Si	Fe	Ni	Mn	Sn		
KMS-2	61	29	4	0.2	0.4	1	0.8	3.6	-	-	49.18	KMS-2
#1	50.83	49.17									49.17	Matrix효과
#2	61	35	4								49.17	Al의 첨가효과
#3	61	33.9	4.1						1		49.17	#2+고용강화
#4	61	30.5	3.9			1		3.6			49.17	#2+Ni-Si계 금속간화합물
#5	61	29.2	4		0.4	1	0.8	3.6			49.27	#4+Fe-Si-Cr계 금속간화합물
#6	61	27.9	4.1	0.2	0.4	1	0.8	3.6	1		49.18	#5+Mn-Si계 금속간화합물

합금설계 제어인자		방안
기지의 강도	기지의 상	Z.E.=49, β단상
	고용강화	Mn, Ni
석출강화	금속간화합물	Fe-Cr-Si, Ni-Fe-Al, Mn-Si
	미세한 석출물	Ni-rich Phase
마모시 산화피막 형성	산소 친화력이 강한 합금원소	Ti, Cr, Ni

고용강화 및 Mn-Si계 금속간화합물의 석출강화를 동시에 유발했기 때문이다.

5.3.2 마모특성의 변화

합금별 마모특성은 Pin-on-Disk type 마모시험기를 이용하여 그림 14와 같은 결과를 얻었다. #1합금의 경우 하중을 견디지 못하고 마모시험도중 시험편이 변형되어 마모량을 측정할 수 없었으며, #1합금을 제외한 #2합금부터 #5합금까지는 강화요인이 첨가됨에 따라 마모량이 감소하여 내마모성이 향상되었으나, 경도변화의 폭이 커서 내마모성 향상이 기대되었던 #6합금의 경우 내마모성은 거의 향상되지 않았다. 한편, 마모량 감소폭은 #3합금에서 #4합금으로 변화할 때, 즉 Ni-Si계 금속간화합물이 석출될 때 가장 컸다. 미세조직 관찰결과 #4합금의 경우 예상했던 Ni-Si계 금속간화합물은 발견할 수 없었으며 Ni은 고용되거나 미세한 석출물을 형성하여 소재 전반에 걸쳐 고루 분포하였고, #5합금의 경우 Fe-Si-Cr 금속간화합물과 Ni-Fe계 석출물이 주요 석출강화 역할을 하고 있었으며, #6합금은 Mn첨가에 의해 Mn의 고용강화 및 Mn-Si 금속간화합물이 석출되었음을 확인할 수 있었다. 결국, #3합금에서 #4합금으로 변할 때 마모량 감소의 폭이 가장 큰 것은 Ni-계 금속간화합물의 석출강화에 의한 것이며, XRD분석결과 Ni-

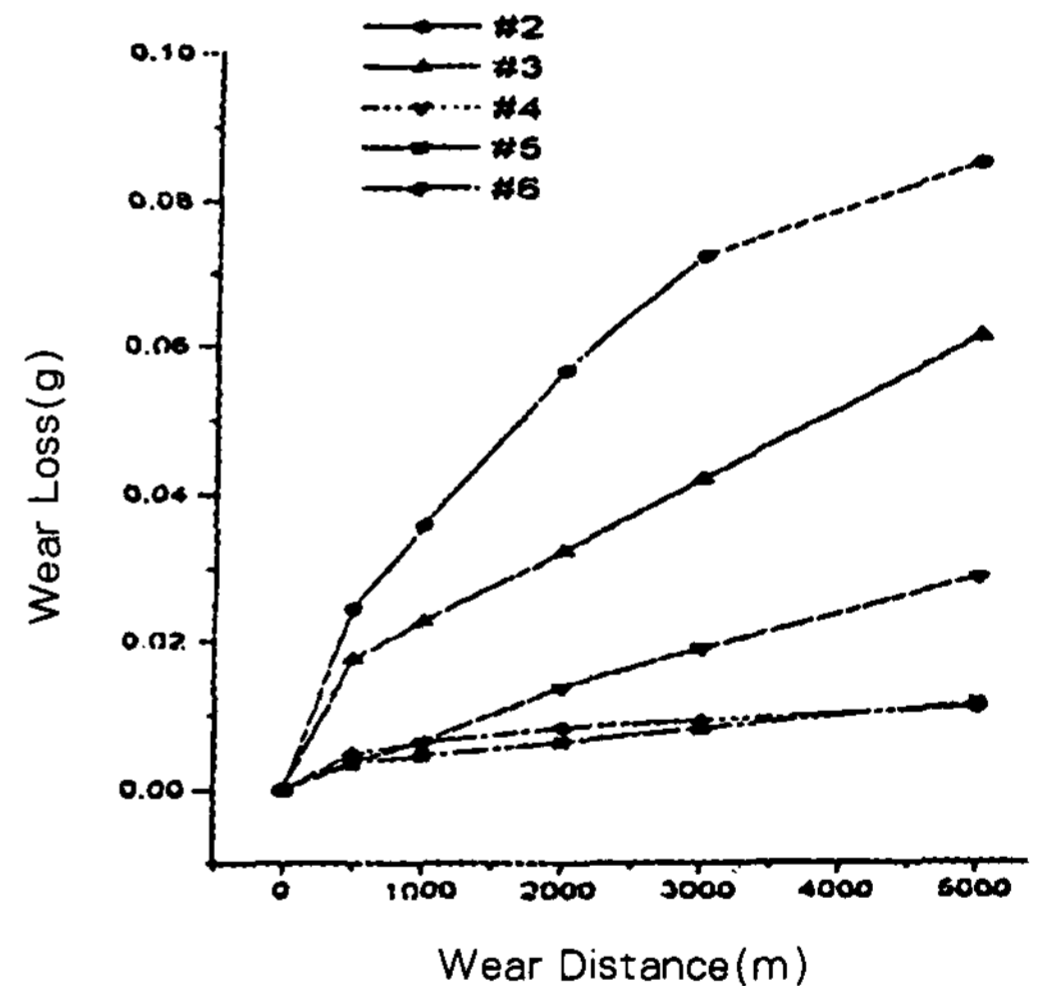


그림 14. 강화원소별 마모량 변화

Al계 금속간화합물이 주요 강화요인이고 Si-Al계 금속간화합물도 기여했음을 확인할 수 있었다. 한편, Mn첨가에 의한 내마모성 향상을 기대했던 #6합금의 경우 고용강화에 의해 경도의 증가폭은 컸으나, Mn-Si금속간화합물의 석출량이 적고, 첨가된 Si의 일부가 Mn-Si금속간화합물에 형성에 간여함에 따라 Fe-Si-Cr 금속간화합물 형성에 참여한 Si량이 줄어들어 #5합금에 비해 내마모성의 향상은 나타나지 않았다.

결국, KMS-2소재의 경우 경도는 #2합금에

서 #3합금으로, #5합금에서 #6합금으로 변할 때, 즉 Mn의 고용강화가 유발되었을 때 증가의 폭이 가장 컸으며, 내마모성은 #3합금에서 #4합금, #5합금으로 변할 때, 즉 Ni-Al계 금속간화합물과 Fe-Si-Cr계 금속간화합물이 석출될 때 큰 폭으로 향상됨을 확인할 수 있었다.

### 6. 제조공정에 따른 내마모성 동합금의 특성변화

싱크로나이저 링을 제조하는 방법으로는 그림 15에서 보는 바와 같이 크게 2가지로 구분할 수 있는데 첫번째 방법은 원심주조한 링을 열간단조, 기계가공하는 것이고, 두번째 방법은 연속주조후 열간압출하여 만든 링을 열간단조, 기계가공하는 방법이다. 일본의 경우 표 6에서 보는 바와 같이 자동차 생산대수가 100만대 이하였던 70년대 초까지는 주로 원심주조에 의해서 생산했으며, 70년대 중반이후 대량생산이 필요함에 따라 연속주조후 열간압출에 의해 싱크로나이저

링을 제조하였다.

#### 6.1 주조공정에 따른 특성 변화

원심주조법은 연속주조법에 비해 용고속도가 빨라 기지의 결정립이나, 석출하는 금속간화합물의 크기가 미세한 소재를 얻을 수 있고, 주조수율이 높고, 시설비가 적어 소량 다품종의 생산에 적합하다는 장점이 있으나 합금원소들의 밀도차

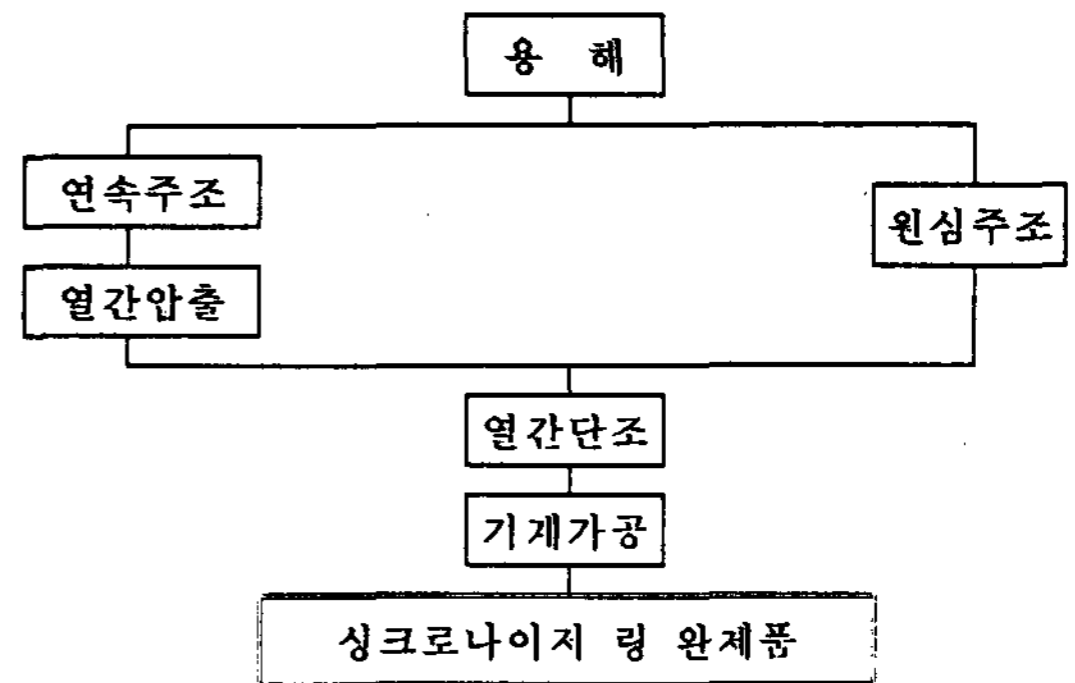


그림 15. 싱크로나이저 링의 제조 공정도

표 6. 일본의 싱크로나이저 링 소재 및 제조공정의 변천

연 도	소 재	소재Maker	제 조 공 정	비 고
'57	ALBC-3	協和	砂型鑄造後切削加工	
'60	ALBC-3	協和	精密鍛造始作	
'63~67	MBSC系變更 TM-3材	協和 中越	Shell-Mold Casting後鍛造 遠心鑄造	Prince自動車
'68~69	Mn <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> 系 CSM-3	中越 中越	遠心鑄造 遠心鑄造	協和와中越 業務提携
'73	CSM-3 P31 AT-1 HB-31	中越 中越 中越 日本伸銅	連續鑄造 連續鑄造 連續鑄造 & 遠心鑄造 金型鑄造 → 抽出	
'76	MBA-2	三菱	連續鑄造 → 抽出	日産使用始作
'85	CSM-3ME	中越	金型鑄造 → 抽出	抽出外注
'90	AT-2 CSM-3ME	中越 中越	連續鑄造 → 抽出 連續鑄造 → 抽出	中越社內에 設備保有
현재	CSM-3ME AT-2 AT-3E CK-2 MBA-2 MBA-5 AT-1 P-31	中越 中越 中越 中越 三菱 三菱 中越 中越	連續鑄造 → 抽出 連續鑄造 → 抽出 連續鑄造 → 抽出 連續鑄造 → 抽出 連續鑄造 → 抽出 連續鑄造 → 抽出 連續鑄造 & 遠心鑄造 連續鑄造 & 遠心鑄造	大形SIZE遠心鑄造

가 크면 편석이 발생할 우려가 있다. 한편, 연속 주조법은 대량생산에 적합하다는 장점이 있으나 정적주조(Static Casting)에 해당하므로 Mn-Si 계 금속간화합물의 석출강화 소재인 KMS-1합금의 경우 편석이 발생하므로 반드시 열간 압출 공정을 거쳐야 하므로 제조비용이 상승한다는 부담이 있다. 따라서, 현재 국내 실정과 같이 소량 다품종의 경우 원심주조법에 의해 싱크로나이저 링을 제조하는 것이 경제적인 방법이며, 향후 수출물량의 증가나 국내 자동차 산업의 발전에 의해 대량 생산이 요구되는 경우, 원심주조기의 자동화 또는 원심주조 공정의 단순화에 의해 대량에 적합하도록 원심주조법을 개량하던지, 아니면 연속주조 후 열간압출하는 방법을 채택해야 할 것이다.

6.2 단조온도에 따른 특성의 변화

열간단조의 공정변수 중 가장 중요한 단조온도에 따른 소재의 특성변화를 조사하기 위해, 합금 설계를 통해 싱크로나이저 링 소재로서 가장 적합하다고 판단되는 KMS-2를 아연당량을 45.41

에서 49.27로 변화시켜 기지조직내  $\alpha/\beta$ 상의 비율에 따른 단조가공성, 내마모성 및 경도의 변화를 조사한 결과이다. 소재의 단조성은 단조품의 형상 및 Flash두께를 조사하여 평가하고, 내마모성의 변화는 Bench Test를 사용하여 분석하였으며, 성분분석, 미세구조, 경도변화도 함께 조사·분석하였다.

일반적으로 단조실험의 변수로는 단조가공도, 단조가공속도, 단조온도, 단조종료 온도, Coating재의 종류 및 두께, 피단조재의 형상, 단조하중 등이 있으나, 싱크로나이저 링에 대한 다른 단조조건들은 이미 설정되어 있기 때문에 단조실험의 변수로는 온도만을 선정하여 625℃부터 850℃까지 25℃간격으로 변화시켰다.

합금별로 온도에 따라 단조한 후 Flash두께를 측정하여 각 합금의 단조저항을 조사한 결과 F#1, F#2합금의 경우 700℃이상부터 flash의 두께가 0.7~0.8mm로 안정되었으나, F#3합금의 경우 775℃이상 시험편부터 0.7~0.8mm로 안정되었다. F#1, F#2합금의 경우 700℃이상, F#3합금의 경우 775℃이상부터 flash 두께가

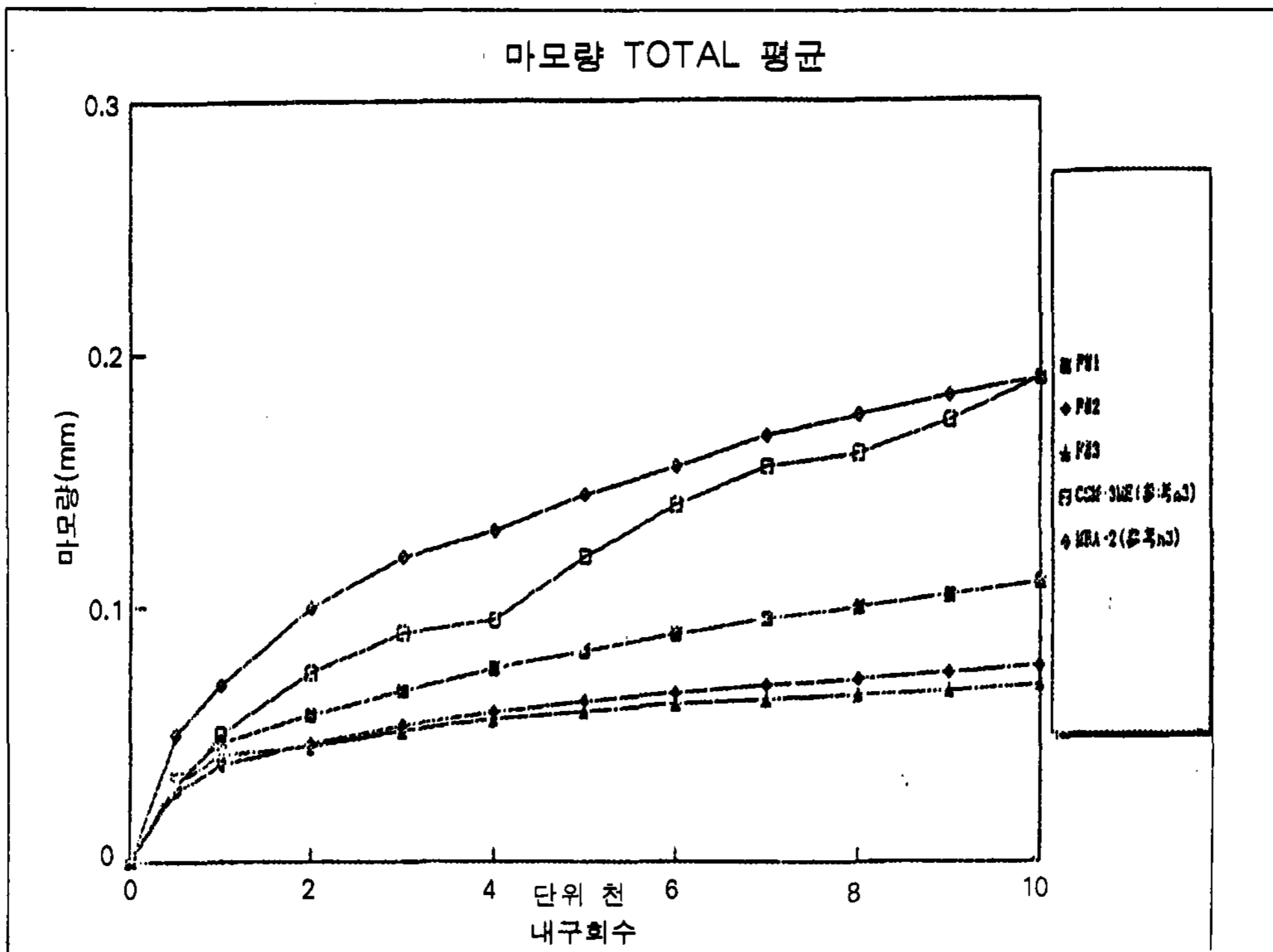


그림 16. KMS-2합금의 기지조직에 대한 단조온도별 Total마모량의 변화

일정한 것은 일정 온도이하에서는 주어진 단조조건에서 완전한 소성 변형이 발생하지 못했으며, 일정 온도이상에서 비로서 완전한 소성변형이 가능할 만큼 연신율이 증가 즉, 변형저항이 감소했기 때문이라고 판단된다. 이상의 결과로부터  $\alpha$ 상분율이 높을수록 연신율이 높아 더 낮은 온도에서도 완전한 소성변형이 가능하므로써 단조온도가 낮아질 것이라는 당초의 예상과는 달리 KMS-2합금 조성의 경우  $\alpha$ 상분율이 높을수록 단조가공성은 떨어지는 것을 확인할 수 있었다.

단조온도가 싱크로나이저 링의 내마모성에 미치는 영향을 조사하기 위해 F#1, F#2, F#3합금을 각 단조온도에 따라 내마모시험을 한 결과 그림 16에서 보는 바와 같이 KMS-2합금 모두는 기조직에 상관없이 일본의 CSM-3ME나 MBA-2보다 우수한 내마모성을 갖고 있으며,  $\beta$ 단상인 F#1합금 보다  $\alpha+\beta$ 조직인 F#2, F#3합금의 내마모성이 약간 우수했다. 완전한 단조가공성을 갖는 775°C에서의 각 합금들의 미세조직을 보면, F#3합금의 경우 다른 합금들 보다 결정립내에 미세한 석출물들의 생성량이 훨씬 많은 것을 볼 수 있으며 이것이 내마모성 향상에 기여한 것으로 판단된다.

따라서, KMS-2합금의 내마모성은 기지의 강화요인 보다는 고용강화 및 석출강화의 요인이 훨씬 강하다고 판단된다. 한편, 마찰계수는 모든 합금에서 단조온도에 큰 영향을 받지 않는 것을 확인할 수 있었다.

결국, KMS-2합금에서 우수한 내마모성을 가진 싱크로나이저 링을 제조하기 위한 최적의 단조온도란 충분한 단조가공성, 즉 최소의 단조저항성을 갖고 결정립내에 미세한 금속간화합물을 석출시킬 수 있는 온도이다. F#3합금은 내마모성은 우수하나 단조가공성이 불량하므로, F#1, F#2합금이, 즉  $\beta$ 단상이나  $\alpha$ 상분율이 적은 기지의 KMS-2합금이 싱크로나이저 링 소재로서 적합하며, 단조온도는 800°C~850°C가 적당할 것으로 판단된다.

## 7. 결 언

본 연구는 동합금계 고력 내마모성 소재 및 부품 국산화 사업에 관한 연구로서 전량 일본의 수

입에 의존하고 있는 고력 내마모성 동합금의 합금성분 원소들에 따른 기계적 성질, 미세조직 및 내마모성의 변화를 조사하고, 이 자료를 기초로 자동차 수동 변속기에 사용되는 싱크로나이저 링의 사용환경에 적합한 동합금계 내마모성 소재를 국산화 하고자한 연구결과이다.

1) 최적의 내마모성 소재를 제조하기 위해서는 합금설계 및 제조공정 변수의 제어를 기지의 강도, 결정립 크기, 석출물의 특성 등과 같은 금속학적 인자들이 내마모성을 향상시키는 방향으로 작용하도록 해야한다. 합금설계에 있어서 Mn-Si계 금속간화합물 강화 소재인 KMS-1합금의 경우 기조직, 고용강화, 석출강화 요인이, 그리고 Ni-rich, Fe-Cr계 금속간화합물 강화 소재인 KMS-2합금의 경우 석출강화 요인이 가장 큰 변수였다.

2) 고력항동은 주로 금속간화합물의 석출에 의해 내마모성이 결정되는데, KMS-1합금의 경우 Mn-Si 금속간화합물이, KMS-2합금에서는 Ni-계 금속간화합물 및 Fe-Si-Cr 금속간화합물이 내마모성에 가장 큰 역할을 한 것으로 판단된다.

3) 싱크로나이저 링의 제조공정별 경도변화는  $\alpha+\beta$ 기조직인 KMS-1합금의 경우 단조후 경도가 증가했으나,  $\beta$ 단상인 KMS-2합금에서는 단조전·후 큰 차이가 없었다. 이와 같은 이유는  $\alpha+\beta$ 기조직의 경우 단조온도에서  $\beta$ 단상으로 존재하여 단조시 급랭되므로써 단조후  $\alpha$ 상분율이 낮아지기 때문인 것으로 판단된다.

4) 합금설계를 통해 싱크로나이저 링 소재로서 가장 적합하다고 판단되는 KMS-2합금에 대해 아연당량을 변화시켜 기조직내  $\alpha/\beta$ 상의 비율에 따른 단조가공성, 경도의 변화를 조사한 결과, 경도는  $\beta$ 단상인 합금의 경도가 제일 높고  $\alpha$ 상분율이 높을수록 점차 감소하였으며,  $\alpha$ 분율이 높은 합금의 경우 단조온도가 높아질수록 단조후 경도가 증가하다 800°C이후부터 거의 변하지 않았다. 한편,  $\beta$ 단상이거나  $\alpha$ 상분율이 적을 경우 단조저항이 작고, 단조가공성이 우수하고, 기조직이 조대하여 Metal Flow가 선명했으며, 최적 단조온도도 낮았다.

6) KMS-2합금에서 우수한 내마모성을 가진 싱크로나이저 링을 제조하기 위한 최적의 단조온도란 충분한 단조가공성, 즉 최소의 단조저항성

을 갖고 결정립내에 미세한 금속간화합물을 석출시킬 수 있는 온도라고 판단되며,  $\alpha$ 상분율이 많은 합금의 경우 단조가공성이 불량하므로,  $\beta$ 단상이나  $\alpha$ 상분율이 적은 기지의 KMS-2합금이 싱크로나이저 링 소재로서 적합하며, 단조온도는  $800^{\circ}\text{C} \sim 850^{\circ}\text{C}$ 가 적당할 것으로 판단된다.

7) 동합금계 고력 내마모성의 경우 각 합금원소들은 다음과 같은 역할을 하고 있음을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

[ 1 ] Paul M. Unterweiser et al., Source Book on Copper and Copper Alloys, (1979) 69-80

[ 2 ] J. Howard Mendenhall, Understanding Copper Alloys, John Wiley & Sons, Inc., (1980) 51-146

[ 3 ] Metals Hand Book 9th Ed., Vol.15(Casting), (1988) 296-307

[ 4 ] William Rostoker et al., Interpretation of Metallographic Structures, 2nd Ed., (1977) 87-92

[ 5 ] 森俊彦, 公開特許公報 昭57-70248, (1980) 227-228

[ 6 ] 畑邦夫, 公開特許公報 昭57-123945, (1981) 259-261

[ 7 ] 平尾寛, 公開特許公報 昭52-155128, (1976) 145-147

[ 8 ] 平尾寛, 公開特許公報 昭59-177342, (1983) 215-216

### 미국 주조공학회 강좌

- Conveyor Maintenance :  
'97.1.14~16(3일간) 매일 08:45~16:00시  
미국주조공학회 기술연구소(Des Plaines, Illinois)
- Green Sand Test Procedures:  
'97.1.21~23(3일간) 매일 08:45~16:00시  
미주조공학회 기술연구소(Des Plaines, Illinois)
- Geometric Dimensioning & Tolerancing:  
'97.1.29~30(2일간) 매일 09:00~16:00시  
미주조공학회 기술연구소(Des Plaines, Illinois)