

냉간단조 금형 WC-Co합금의 인장시험방법 개발 및 물성평가

권인우^{1,2} · 서영호³ · 정기호^{1*}

Development of Uniaxial Tensile Test Method to Evaluate Material Property of Tungsten Carbide-Cobalt Alloys for Cold Forging Dies

I. W. Kwon · Y. H. Seo · K. H. Jung

(Received December 13, 2017 / Revised October 1, 2018 / Accepted October 15, 2018)

Abstract

Cold forging, carried out at room temperature, leads to high dimensional accuracy and excellent surface integrity as compared to other forging methods such as warm and hot forgings. In the cold forging process, WC-Co (Tungsten Carbide-Cobalt) alloy is the mainly used material as a core dies because of its superior hardness and strength as compared to other structural materials. For cold forging, die life is the most significant factor because it is directly related to the manufacturing cost due to periodic die replacement in mass production. To investigate die life of WC-Co alloy for cold forging, mechanical properties such as strength and fatigue are essentially necessary. Generally, uniaxial tensile test and fatigue test are the most efficient and simplest testing method. However, uniaxial tension is not efficiently application to WC-Co alloy because of its sensitivity to alignment of the specimen due to its brittleness and difficulty in thread machining. In this study, shape of specimen, tools, and testing methods, which are appropriate for uniaxial tensile test for WC-Co alloy, are proposed. The test results such as Young's modulus, tensile strength and stress-strain curves are compared to those in previous literature to validate the proposed testing methods. Based on the validation of test results it was concluded that the newly developed testing method is applicable to other cemented carbides like Titanium carbides with high strength and brittleness, and also can be utilized to carry out fatigue tests for further investigation on die life of cold forging.

Key Words: Cold Forging, Cermet, Brittle Material, Tungsten Carbide, Tension Test, Material Property

1. 서 론

냉간단조는 상온에서 성형이 이루어지는 단조공법으로 높은 재료회수율, 치수정밀도 및 우수한 표면품질이 장점이며, 주로 볼트류 또는 하우징류 제품 생산에 적용되고 있다.

단조금형의 수명은 일반적으로 금형의 마모, 금형의 소성변형 및 피로강도에 의해 결정되는 것으로 알려져 있는데 냉간단조의 경우 단조재 및 금형

의 가열과정이 없으므로 상대적으로 고온환경에서 쉽게 발생할 수 있는 금형의 마모 및 소성변형보다는 주로 피로파괴에 의해 금형이 파손되는 경우가 빈번한 것으로 알려져 있다.[1]

냉간단조의 금형에 사용되는 소재로는 WC-Co 합금, STD61, STD11 등이 있으며, 그 중 WC-Co 합금은 코어금형에 주로 사용되는 소재로 압축강도와 경도는 높은 반면 인장강도가 낮아 인장응력에 취약한 특징을 가지고 있다. 특히, 냉간단조로 많이

1. 한국생산기술연구원 뿌리산업기술연구소 성형기술그룹
2. 인하대학교 일반대학원 기계공학과
3. 포스코(주) 선제마케팅실 선제솔루션그룹
* Corresponding Author : KITECH, E-mail:markjung@kitech.re.kr

생산되는 볼트의 육각 모서리와 같이 곡률반경이 작은 부분에 인장응력이 집중되는데 이러한 인장응력이 반복적으로 가해져 결과적으로 코어금형의 물리적 피로파괴가 발생한다.

일반적으로 구조재료의 수명은 항복강도 이하의 탄성범위 내에서 피로시험을 통하여 도출된 S-N 선도에 기반하여 예측이 가능하는데 이러한 접근방법을 냉간단조 금형수명에 적용할 경우 유한요소해석을 통해 공정전체에 걸쳐 가장 높은 응력이 작용하는 위치의 응력값을 S-N 선도에 대입하여 수명을 산출할 수 있을 것이다.

냉간단조용 코어금형에 널리 사용되는 Tungsten-Carbide(WC)와 같이 취성이 강한 Cermet 계열 소재의 항복거동은 최대주응력에 의해 결정되는 것으로 알려져 있으므로[2] 최대주응력에 대한 유한요소해석 결과와 1축 인장시험 결과의 직접적인 비교가 필요하다. 하지만, 현재까지 WC-Co 합금과 같이 취성과 강도가 매우 높은 소재들은 통상적으로 3점 굽힘시험을 실시하여 항복 굽힘강도(transverse rupture strength)를 산출한 뒤, Weibull's statical strength theory를 통해 항복 굽힘강도를 항복 인장강도를 변환하는 방법[3]에 의존하고 있다.

$$\frac{\sigma_{tension}}{\sigma_{bending}} = \left[\frac{V_b}{V_t} \frac{1}{2(m+1)} \right]^{1/m}$$

Equation. 1 Weibull's statical strength equation [3]

여기서, $\sigma_{bending}$ 은 항복 굽힘강도, $\sigma_{tension}$ 은 항복 인장강도이고, V_t 는 인장시험편의 부피 그리고 V_b 는 굽힘 시험편의 부피이며, m 은 Weibull modulus[3]로 소재의 종류에 따라 달라지는 값으로 현재까지 연구된 WC-Co 합금에 대한 m 값은 9 또는 그 이상으로 알려져 있다[4].

하지만 굽힘강도는 소재의 단면에 인장과 압축응력이 동시에 가해지는 환경에서 얻어지고, 특히 수식을 통한 변환과정에서 일종의 재료상수인 Weibull modulus[3]에 따라 그 결과값이 크게 달라질 수 있다는 점에 주목할 필요가 있다. 현재까지 WC-Co 합금의 m 값에 대한 몇몇 연구결과들이 존재하나 [5~6], 1축 인장강도와 비교를 통한 신뢰성 등은 검증된 바가 없고, Co함량, 소결조건 및

HIP(Hot Isotropic Pressing) 여부 등의 제조방법에 따라 기계적 물성이 달라지는 것을 고려한다면 굽힘강도를 산출하기 위한 m 값을 일반화하여 사용하는 접근방법은 한계가 있는 것이 사실이다.

반면에 1축 인장시험은 소재의 강도평가에 사용되는 가장 일반적인 방법으로 굽힘시험과 달리 m 값의 임의성을 배제할 수 있을 뿐만 아니라 유한요소 해석으로부터 얻은 최대주응력과 직접 비교가 가능하므로 측정된 물성의 활용측면에서 상당히 유리하나 WC-Co와 같은 고강도의 취성재료들은 인장시험 시험편의 상하정렬 오차에 상당히 민감하고[4], WC-Co합금의 경우 경도가 매우 높기 때문에 일반적인 인장시험편과 같이 양 끝단의 나사가공이 매우 어려워 1축 인장시험이 매우 까다롭다.

Kerper 등[7]은 통상적인 인장시험방법과 유사하게 WC-Co소재로 제작된 시험편의 양 끝단에 나사산을 형성하여 시험을 진행한 사례가 있으나 이러한 시험편의 형태는 나사골(thread root)에서 노치에 의한 응력집중이 발생할 수 있어 WC-Co합금의 S-N선도 도출을 위한 피로시험까지 적용범위를 확대하는 것은 무리가 있다.

따라서, 진술한 바와 같이 냉간단조 코어금형 재료인 WC-Co 재료의 1축 인장시험뿐만 아니라, 더 나아가 피로시험을 위해서는 나사결합이 아니면서 시험편의 정렬오차를 최소화할 수 있는 새로운 형태의 인장시험 방법 및 차별화된 시험기구의 개발이 선행되어야 한다.

본 연구에서는 WC-Co합금의 1축 인장시험을 위한 별도의 결합방식과 지그(jig) 및 시험편을 설계하고, 실제 인장시험을 통해 발견된 문제점들을 유한요소 해석을 통해 개선하여 WC-Co 합금의 1축 인장시험 및 향후 피로시험까지 적용할 수 있는 새로운 형태의 지그와 시험편의 형상을 제안하고자 하였다. 또한, 본 연구에서 제안한 시험편 및 지그를 사용하여 실제 인장시험으로 얻은 물성과 기존 문헌에서 제시된 결과와 비교하여 획득한 물성치의 타당성을 평가하였다.

2. 실험 및 해석방법

2.1 시험편 및 지그 결합방식

WC-Co합금과 같이 고경도 소재에 적용이 어려운 나사산 가공을 회피하기 위하여 Fig. 1과 같이 시

편을 지그에 삽입하여 고정하는 방식을 선택하였다. 구체적으로는 지그에 'T' 형상의 삽입부를 가공하고, 덤벨 (Dumbbell) 형상의 시편을 삽입하게 되는데 WC-Co 시편에 나사가공이 필요치 않고, 소결 후 연마작업을 제외하면 별도의 가공이 요구되지 않아 시편의 제작 비용 및 가공 난이도 측면에서 장점을 가진다.

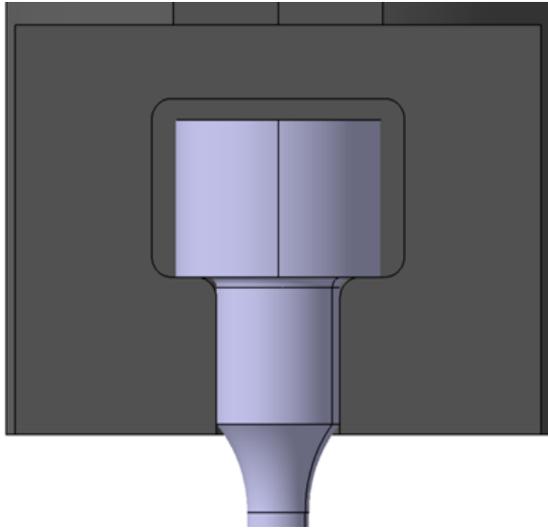


Fig. 1 Assembled jig and specimen

2.2 지그 설계

Fig. 2(a), (b), (c)와 같은 형태로 지그를 설계하여 제작하였다. Fig. 2(a)와 같이 인장시험기의 crosshead와 결합을 위하여 지그 상단 중심부에 M30 규격의 탭을 가공하였으며, 시편 삽입이 가능하면서 시험 중 시편의 이탈을 방지하고 개구부의 변형을 최소화하기 위하여 볼트 결합이 가능한 직사각형 커버를 추가하였다.

Fig. 2(b),(c)에 나타난 바와 같이 지그 하단에 위치한 시편 결합부에 시편 머리부분의 직경을 고려한 'T'형 홈을 가공하여 시편과 결합이 가능하게 하였다. 인장방향 하중의 지지를 위하여 Fig. 2(b)에 제시된 두께 "T"의 4/5 까지만 홈 가공을 진행하였으며, 인장시험 중 WC-Co 시편과 직접 맞닿아 인장하중을 견뎌야 하므로 표면경도 및 강도를 높이기 위하여 STD11 공구강으로 지그 제작 후 열처리를 진행하였다.

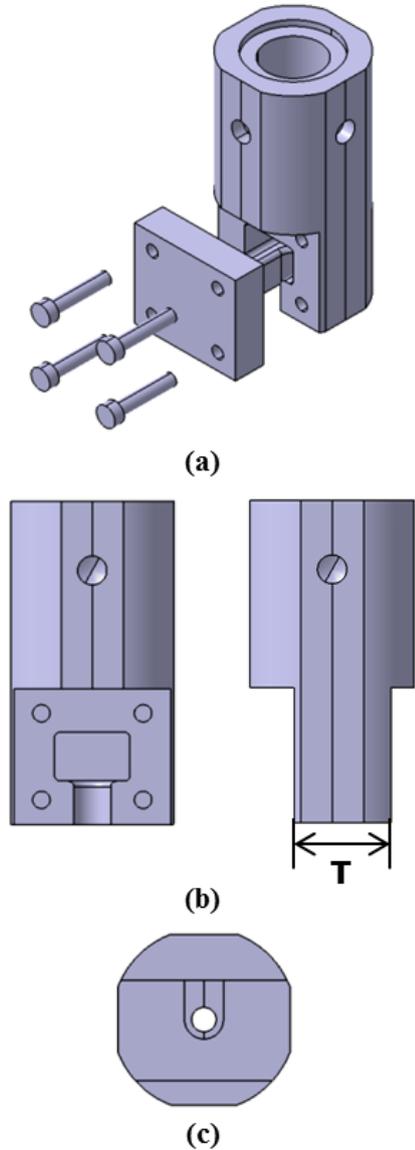


Fig. 2 (a) Assembly drawing of the initially designed jig for tensile test (b) Front and right side views (c) Bottom side view

2.3 인장시편 설계



Fig. 3 Initially designed WC-Co alloy tensile specimen

시편은 ASTM E606에 근거하여 인장시험뿐만 아니라 향후 피로시험에도 적용이 가능하도록 gage length의 직경을 6.35mm로 하였으며, 응력집중을 완화시키기 위하여 Gage length로부터 직경이 확대되는 부분의 곡률가공 또한 ASTM에서 제시된 직경 12.7mm로 설계하였다. 인장시편은 실제금형 제작에 사용된 WC-Co합금과 동일하게 중량기준으로 WC입자가 79~81%, 바인더 역할을 하는 Co입자가 19~21%로 이루어진 WC-Co분말로 제작되었으며, 300톤 프레스에서 700℃로 예비 소결을 40시간 진행하고, 약 1370℃에서 본 소결을 실시한 후 HIP (Hot Isostatic Press) 처리를 하였다. 뿐만 아니라, Gage length 부분은 실제 냉간단조에 사용되고 있는 코어금형의 거칠기와 동일한 거칠기로 설정하였다.

2.4 인장시험

Fig. 4에서 보이는 것과 같이 지그 및 인장시편을 제작한 후 Instron 8801을 이용하여 인장시험을 실시하였고, 인장속도는 2mm/min, 데이터 수집은 0.001Hz로 설정하였다.



Fig. 4 Tensile test, conducted with the initially designed jig and specimen

또한, 취성 소재의 경우 파단연신율이 매우 작으므로 정밀한 변형률 측정을 위해 시편 Gage length의 전면과 후면에 각각 스트레인 게이지(MTEC, FLA-2-11-3L)를 부착하여 연신율을 측정하였다.

2.5 유한요소해석

상용 유한요소 해석 프로그램인 DEFORM™을 사용하여 유한요소해석을 진행하였고, 사면체 요소를 사용하였으며, 인장시편 및 지그의 모델링 후 사용된 요소의 개수는 Table. 1과 같다. 또한, 인장 속도와 경계 조건은 모두 실제 인장시험과 동일하게 설정하였고, STD11 소재의 탄성계수는 기존의 데이터베이스를 이용하였다.

Table. 1 Condition of finite element analysis

Objects	Number of elements	Material
Tensile specimen	28,781	WC(Cobalt20%)
Upper jig	43,834	STD11
Lower jig	44,197	STD11

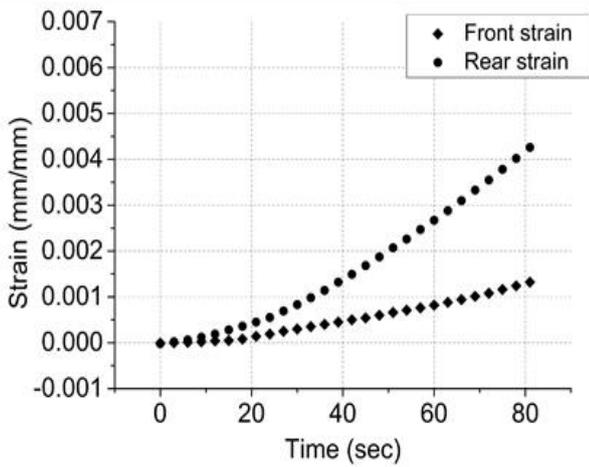
3. 결과 및 고찰

3.1 1차 인장시험 결과 및 원인분석

Fig. 5와 같이 1차 인장시험 후 시편의 머리와 목의 경계에서 파단이 일어났으며, 스트레인 게이지로 측정된 시편 전면과 후면의 변형률은 각각 0.0014, 0.00425로 서로 다른 스트레인 게이지 간에 0.0028의 측정치 차이가 확인되었다. 따라서, 시편의 머리와 목의 경계에서 파단이 발생한 점과 양측 스트레인 게이지의 측정 값을 고려하였을 때 인장력이 시편에 균일하게 가해지지 않았을 것으로 판단되었고, 앞서 언급한 바와 같이 취성소재의 경우 인장시험시 시편의 정렬이 매우 중요한 요소로 작용하므로 이를 개선하기 위하여 유한요소해석을 진행하였다.



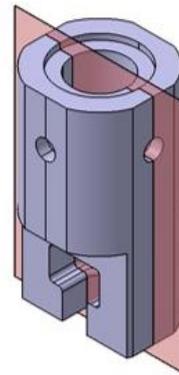
(a)



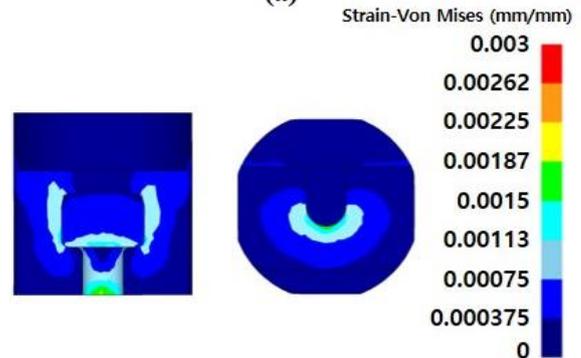
(b)

Fig. 5 (a) Fractured specimen after tensile test with initially designed jig (b) Measured strain values at two different points within gage length

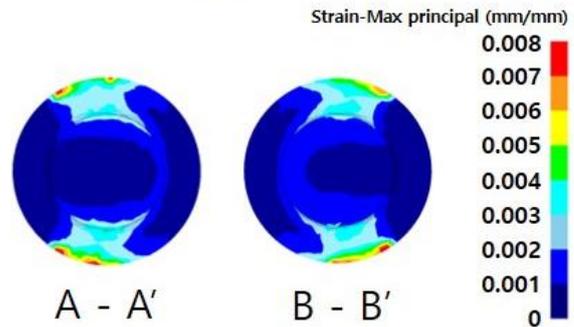
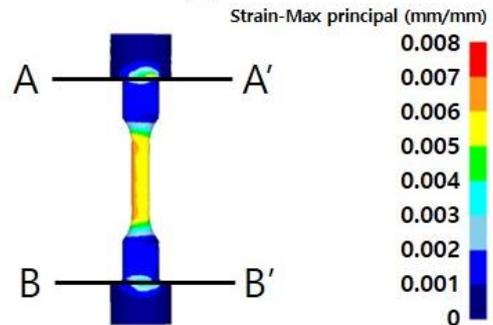
Fig. 6(a)에서 붉은 색의 수평선을 기준으로 Fig. 6(b)와 같이 지그의 전후면 변형률이 비대칭으로 분포한다는 것을 확인할 수 있었다. 이로 인해 지그의 폐쇄된 쪽이 상대적으로 더 변형하게 되고, 시편과 지그의 정렬각도에 문제가 발생하여 Fig. 6(c)와 같이 Gage length에서 비대칭 응력이 발생하고, 시편의 머리와 목의 경계부분은 꺾이면서 Gage length를 벗어난 비정상적인 위치에서 파단에 이르는 것으로 이해할 수 있었다. 따라서, 지그가 인장시험 중 비대칭이 아닌 대칭 변형을 하도록 하는 것이 중요하므로 Fig. 6(a)와 같이 전후 비대칭 형상의 지그 설계안보다는 대칭으로 수정하는 것이 가장 효과적이라고 판단하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 (a) Asymmetry of initially designed jig (b) Strain distribution of jig (c) Strain distribution of specimen

3.2 설계개선안 도출

기존 지그의 경우 시편 삽입방향의 반대면은 막혀있도록 하였으나 Fig. 7(a)와 같이 지그가 대칭 형상을 갖도록 “T”형 삽입구를 관통되도록 변경하고, 시편의 이탈을 방지하기 위한 커버를 별도로 조립하도록 수정한 후 유한요소해석을 실시하였고, Fig. 7의 (a)와 (b)에 나타내었다.

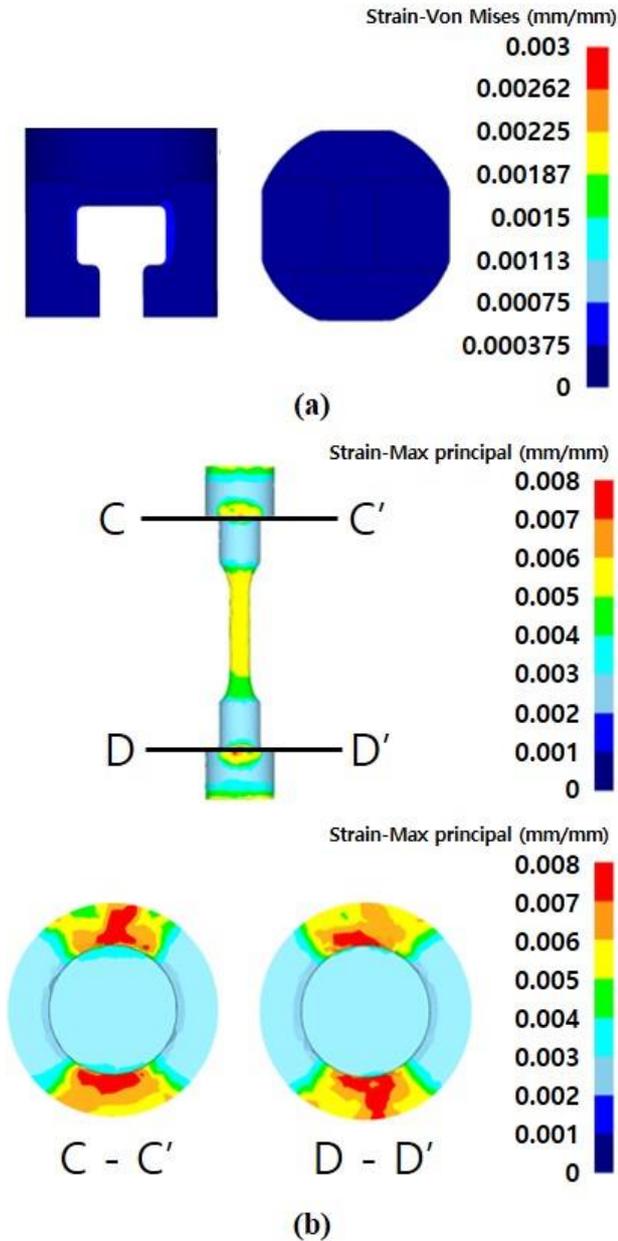


Fig. 7 (a) Strain distribution of modified jig (b) Strain distribution of specimen under tension

Fig. 7(a)에서 볼 수 있듯이 기존 설계안과 비교했을 때 지그의 변형률 분포는 확연히 균일해지고, Fig. 7(b)와 같이 Gage length에서의 변형률 분포는 균일해지고, 더불어 머리와 목의 경계부에서도 변형률 분포가 한쪽으로 치우치지 않고, 대칭적으로 나타나는 것을 확인하여 1차 인장시험에서 발생했던 문제점들을 대부분 해결할 수 있을 것으로 판단하였다.

추가적으로 WC-Co합금의 경도가 STD11의 비해 높기 때문에 Fig. 8(b)와 같이 시편과 지그의 접촉면적을 증가시켜 접촉면에 가해지는 압력을 감소시켜 지그 표면의 손상을 방지하도록 시편의 머리부 직경을 기존의 21.05 mm에서 31 mm로 증가시키고, 시편제작 비용을 감안하여 머리부 높이를 20 mm에서 10 mm로 감소시켰다.

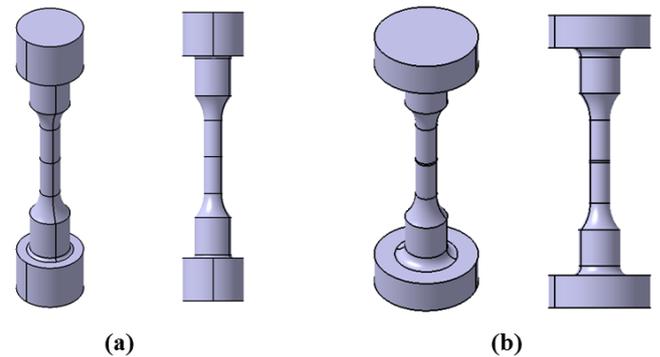


Fig. 8 (a) Initially designed specimen (b) Modified specimen with the head of Ø31 mm

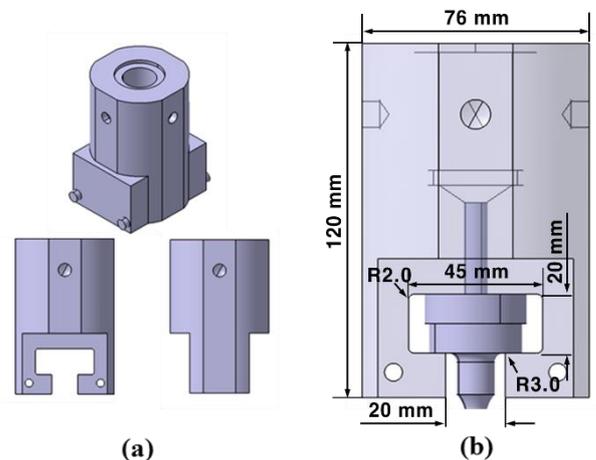


Fig. 9 (a) Modified jig with symmetry (b) Pin pressing the specimen for fatigue test

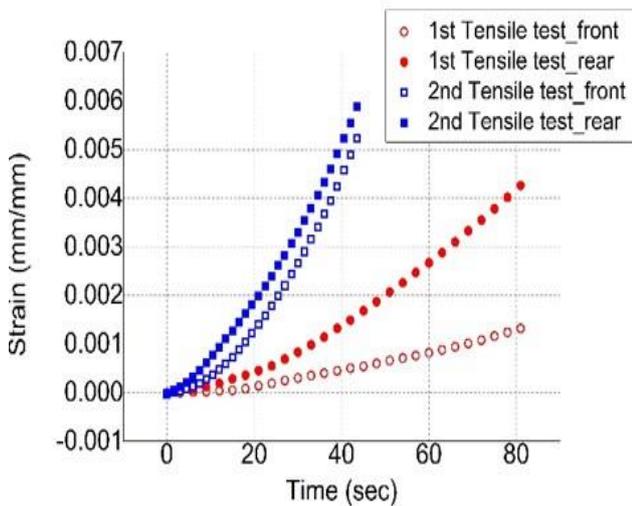
시편의 머리부 직경 증가로 인하여 지그의 관통 삽입부 폭을 45mm로 증가시켜 9(a)와 같이 수정하고, 시편과 지그간 정렬을 추가적으로 보강하면서 추후 인장피로시험 중 시편의 상하방향 진동에 의한 부적절한 충격을 막기 위하여 Fig. 9 (b)와 같은 가압 핀을 추가하였다.

3.3 2차 인장시험 결과 및 응력-변형을 선도 도출

개선된 설계안을 바탕으로 지그와 시편을 다시 제작한 후 1차 인장시험과 동일한 조건에서 2차 인장시험을 실시하여 실제 효과를 검증하였고, 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10(a)와 같이 시편의 Gage length 범위에서 파단이 발생하였다.



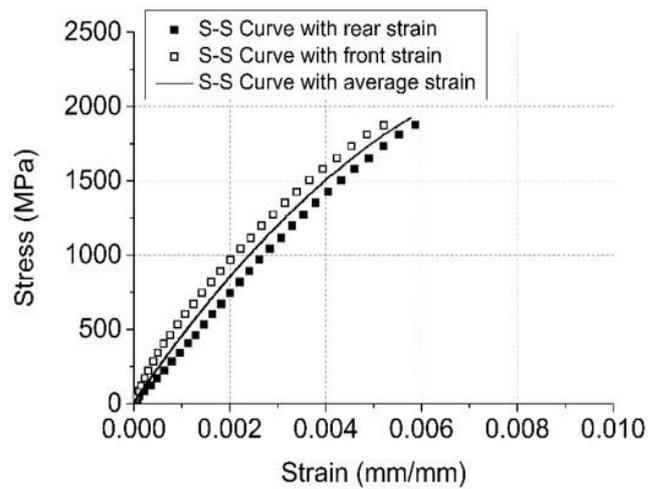
(a)



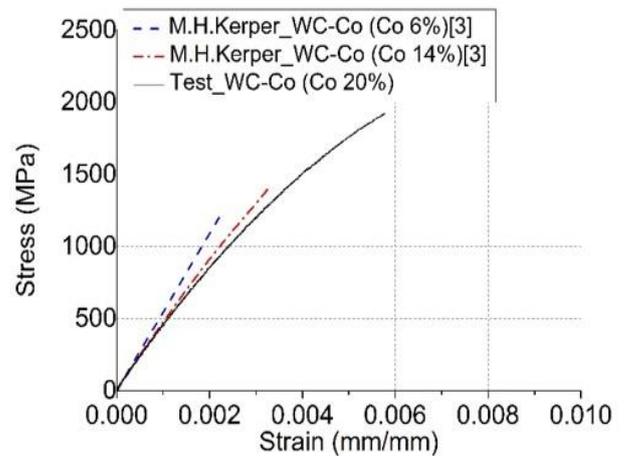
(b)

Fig. 10 (a) Fractured specimen after tensile test with modified jig and specimen (b) Measured strain values before and after modification

뿐만 아니라, Fig. 10(b)에서 볼 수 있듯이 2차 인장시험에서 측정된 파단변형율은 전면과 후면에서 각각 0.00610, 0.00544로 나타났으며, 전후면 스트레인 게이지의 측정값 차이는 약 0.00066로 1차 인장시험에서의 얻어진 차이값 0.0028에 비해 약 76.4% 감소하였다. 취성 소재의 파단변형율이 매우 작다는 점과 스트레인 게이지의 측정오차가 존재한다는 것을 감안할 때 0.0007 미만의 변형율 산포를 갖는 인장시험 결과는 신뢰할만하다고 판단하였다.



(a)



(b)

Fig. 11 (a) Stress-strain curve of WC-Co alloy (wt. Co 20%) based on tensile test result (b) Comparison to the test results in the literature (wt. Co 6% & 14%)

2차 인장시험 결과를 stress-strain 선도로 Fig. 11(a)에 도시하였고, WC-Co합금은 취성이 매우 강한 소재이기 때문에 여타 연성소재에서 보여지는 뚜렷한 항복점 및 넥킹없이 파단이 일어났으며, 각각의 스트레인 게이지로부터 측정된 변형을 차이는 0.00066에 불과하기 때문에 산술평균한 후 하나의 선도로 표현하였다.

본 연구를 통해 획득한 WC-Co합금(wt. Co 20%)의 stress-strain 선도의 타당성을 확인하기 위하여 Fig. 11(b)과 같이 Kerper 등[7]이 제시한 WC-Co 합금의 stress-strain 선도와 비교하였는데, 알려진 바와 같이 바인더 역할의 Co함량이 증가할수록 탄성계수는 낮아지는 반면 인장강도와 파단연신율은 동시에 증가하는 경향을 확인하였다. 이러한 결과는 다른 문헌[8]에 설명된 바와 같이 Co함량 20% 이하에서는 Co의 함량이 높을수록 굽힘강도가 증가한다는 내용과 일치한다.

3.4 WC소재의 기계적 물성 및 특징

일반적으로 뚜렷한 항복점이 없는 소재의 경우 변형을 0.2%에서 선형구간과 동일한 기울기를 갖는 직선과 stress-strain 선도가 교차하는 점을 항복점으로 간주하나 Fig. 12(a)-(c)에서 볼 수 있듯이 WC-Co합금의 경우 파단연신율이 매우 작기 때문에 0.2% offset 방법으로는 교차하는 점을 찾을 수 없었고, 세가지 WC-Co 합금 모두 변형률 0.001 부근까지만 선형거동이 확인되었으며, 이후에는 비선형 변형과정을 거쳐 파단에 이르는 것을 확인하였다.

마지막으로 본 연구에서의 얻은 실험결과 및 문헌에 제시된 WC-Co 합금의 stress-strain 선도로부터 선형구간의 기울기를 구하고, Co 함량에 따른 탄성계수 및 파단인장강도를 도출하여 Table. 2에 나타내었으며, 기존문헌에 언급된 바와 같이 Co함량의 증가에 따라 탄성계수는 낮아지는 반면 파단강도는 증가하는 것을 정량적으로 확인하였다.

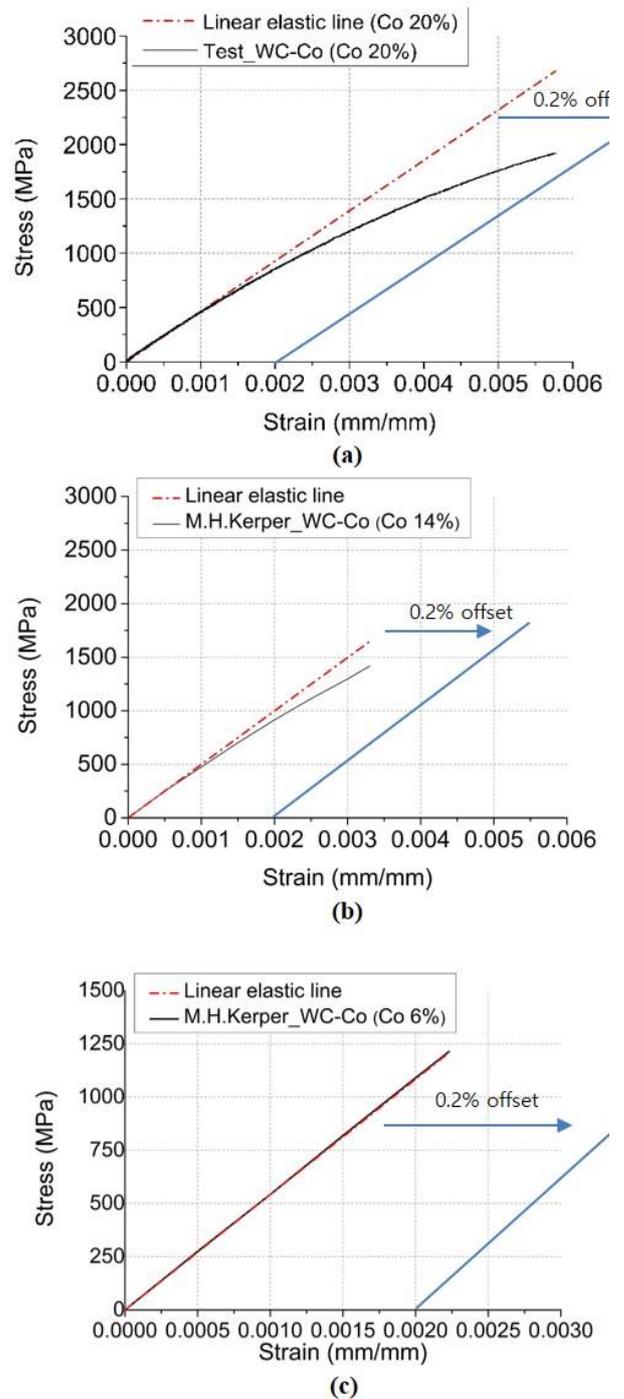


Fig. 12 Comparison of elastic range and non-linear deforming behavior depending on wt. Co contents (a) Co 20% (b) Co 14% (c) Co 6%

Table 2. Comparison of elastic modulus and tensile strengths depending on Co content

WC-Co Alloys	Specimen type	Elastic modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)
wt. Co20%	Dumbbell	463,797	1,922.58
wt. Co14% [7]	Thread	541,926	1,406.53
wt. Co 6% [7]	Thread	619,837	1,213.47

3.5 향후 연구

본 연구에서는 Co 바인더의 함량이 초경합금의 기계적 물성에 매우 큰 영향을 미치고 있는 것을 1축 인장시험과 문헌을 통해 정량적으로 확인하였고, 추가적으로 변형과정에서 Co성분이 WC기지에 미치는 영향을 정확히 파악하기 위해서는 미세조직 및 파단면 분석 등 재료적인 측면에서의 추가적인 연구가 필요하다.

향후에는 본 연구에서 제시된 방식의 WC-Co합금의 1축 인장피로시험을 수행하고, 냉간단조용 금형 수명의 예측을 시도하고자 한다.

4. 결론

본 연구에서는 초경합금의 물성을 1축 인장시험을 통해 얻고자 별도의 지그와 시편을 설계 및 제작하여 시험을 진행하였으며, 시험결과를 기존문헌을 통해 비교하고 실험결과의 타당성을 검증하여 그 신뢰성을 확인할 수 있었다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 유한요소해석을 이용하여 경도와 취성이 높은 WC-Co합금의 1축 인장시험이 가능한 지그 및 시편을 설계하였다.

(2) 개발된 지그와 시편을 이용하여 실제 WC-Co합금의 인장시험을 수행하고, 문헌과 비교하여 개발된 인장시험 방법을 검증하였다.

(3) 이러한 인장시험 방법은 WC-Co합금에 국한되지 않고 TiC, SiC 등의 다양한 고경도, 취성소재의 물성시험에도 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

Acknowledgement

본 연구는 한국생산기술연구원 공통수요기반 생산기술 개발사업(JA180038) 및 POSCO 민간연구과제(IR180045)로 수행되었음

참고문헌

- [1] T. Altan, G. Ngaile and G. Shen, 2005, Cold and hot forging : Fundamentals and Applications, ASM International, Ohio, pp. 295~296.
- [2] G. E. Dieter, 1961, Mechanical Metallurgy, McGRAW-HILL, New York, pp. 218~219.
- [3] W. Weibull, 1939, A statistical theory of the strength of materials, IVA Proceedings Nr. 151, Stockholm.
- [4] General carbide corporation, 2010, Designer's guide to tungsten carbide, <http://www.generalc Carbide.com>.
- [5] T. Klunzner S. Wurster, P. Supanic, R. Ebner, M. Jenko, J.Glatzle, A. Puschel and R. Pippan, 2011, Effect of specimen size on the tensile strength of WC-Co hard metal, Acta materialia, Vol. 59, Issue 10, pp. 4244~4252.
- [6] O. M. Tariq, 2013, Ph. D. Thesis, KTH Industrial engineering and management, Stockholm, pp. 9~19, 27~37.
- [7] Matthew J. Kerper, Lewis E. Mong, Maurice B. Stiefel, and Sylvanus F. Holley, 1958, Evaluation of tensile, compressive, torsional, transverse, and impact tests and correlation of results for brittle cermets, J. Res. Nat. Bureau of Standards 61, pp.149~169.
- [8] A. Kriz and D. Bricin, 2017, Powder metallurgy - fundamentals and case studies, INTECH, Rijeka, Chap. 12, p. 277.