

국산초경공구의 절삭성에 관한 비교 연구

김용성* · 배원병 · 임오강 · 유완석 · 안중환

이석호 · 김정석 · 이시복 · 이병훈

〈서울대 대학원*, 부산대 공대〉

1. 서 론

1920년대 텅스텐 카바이드(tungsten carbide) 공구의 생산은 절삭 가공 작업에 획기적인 변화를 가져왔다. 카바이드는 다른 많은 공구재료보다 단단하고 고온에서 경도를 유지할 수 있으므로 이것으로 구성된 초경공구의 내마모성을 증대시켜 공구수명을 연장시켰을 뿐 아니라 고속가공을 가능하게 함으로써 생산성을 높여 주었다. 초경공구의 마모 특성은 플랭크(flank) 마모, 크레이터(crater) 마모, 노치(notch), 칩핑(chipping) 등으로 나타낼 수 있지만 주로 플랭크 및 크레이터 마모가 중요하다. 대개 고속가공에서 크레이터 마모가 지배적인데 특히 연속형 칩을 만드는 강(steel)의 절삭에서 이러한 현상은 두드러지게 나타난다. TiC TaC를 바탕으로 하거나 가미한 초경공구는 이러한 크레이터 마모를 둔화시켰다. 또한 최근에는 피막기술의 발달과 더불어 TiN, TiC, Al₂O₃ 또는 이들 복합체 등의 피막재질을 입힌 피막공구를 사용함으로써 플랭크 및 크레이터마모의 현저한 감소를 가져왔다.

국내에서는 14~15년전부터 초경공구가 생산되었으며 피막초경공구가 생산된 것은 불과 1~2년밖에 되지 않았으므로 앞으로 많은 연구와 기술개발이 요구된다고 생각된다. 절삭공구의 절삭성에 대한 연구는 이미 많이 행하여져 왔으며 그 관점도 마모특성 및 공구수명, 표면조도, 절삭력, 최적절삭조건 등 다각적인 것이었다.

그러나 내마모성이 증가된 초경공구의 수명에 대한 실험에는 고속도강 공구나 주조합금강 공구에서 보다 훨씬 많은 실험량이 요구되었다.

이런 어려운 점을 해결하기 위해 몇 수명실험법이 제시된 바 있는데 Radio-active Tracer Method¹⁾ 약식 수명실험법²⁾ 면가공 실험법³⁾ 테이퍼 선삭실험법⁴⁾ 변수가속법⁵⁾ 등이다.

이들 방법은 경제적, 시간적 노력을 많이 감소시켜 주는 대신 테이타의 정확성을 기할 수 없다고 알려져 있다.⁶⁾ 그러나 Lambert⁷⁾ 등은 약식 수명실험법의 신뢰성에 대한 연구에서 종래의 수명실험과의 결과 비교를 통해 95% 유의수준(significance level)에서 이들의 결과를 받아들일 수 있음을 보여 주었다. 따라서 공구간의 성능비교를 위해 약식 수명실험법은 하나의 방법이 될 수 있다.

공구수명은 공구재질 및 제작회사, 공작기계 피삭재의 재질 등 영향인자의 다양성으로 분산적일 수 밖에 없으므로 한 조건에서 얻어진 마모나 수명이 일정하다고 볼 수 없다. 따라서 통계적 데이터 처리방법으로 이에 대한 충분한 정보를 얻고자 하는 노력이 시도되었는데 S.M.Wu⁸⁾는 G.E.P.Box⁹⁾가 제시한 중앙중첩 실험계획법(central composite design)을 공구수명실험에 적용하여 가정한 공구수명모델의 적합성 여부와 신뢰구간 설정을 보였다.

본 연구에서는 국산초경공구와 외산초경공구의 성능을 비교 검토하였는데 많은 절삭실험량을 줄이고 통계적 데이터 처리를 위하여 약식 수명실험법과 중앙 중첩 실험계획법을 병용하였다.

비피막 초경공구에서는 마모에 기준을 둔 공구 수명식을 산출하여 절삭변수에 따른 성능을 비교하였는데 국산공구의 성능은 많은 영역에서 외산공구와 비슷한 정도를 나타내었다. 피막초경공구에서는 국산 TiN피막공구는 비피막초경공구보다 훨씬 우수한 내마모성을 보여 주지만 외산피막공구인 TiC, Al₂O₃ 피막공구에 비해 플랭크 마모 증상이 크게 나타났다. 국산 및 외산의 피막층 유무와 피막재질에 따른 절삭력의 차이는 거의 없었다.

2. 마모특성

2.1 비피막공구의 마모 특성

2.1.1 마모의 생성 및 성장

절삭을 하는 과정에서 공구의 마모가 일어나는 부분은 그림 1에서 보는 바와 같이 공구의 여러면에서 생겨난다. 그 중 전면 절삭날 마모(end cutting edge wear)는 피삭재의 표면조도와 관계되고, 공구수명에 큰 영향을 미치는 것은 플랭크 마모와 크레이터 마모이다. 플랭크 마모는 새로 생성되는 피삭재 면과 공구의 여유면 사이의 마찰로 인하여 생기며, 크레이터 마모는 칩이 절삭공구의 경사면(rake surface)을 따라 이동할 때 마찰에 의해서 생겨난다.

크레이터 마모는 칩과 공구사이에 일어나는 마찰로 인하여 고온상태가 되므로 H.S.S. 공구의 경우에는 열경화가 일어나고 카아바이드 공구일 경우에는 고온상태 확산(solid-state diffusion)에 의해서 발달하게 되며 이의 최대 깊이를 크레이터 마모량으로 한다. 플랭크 마모는 마찰에 의해서 생기는 것으로 마모된 면이 절삭방향과 평행한 마모폭을 형성하게 되고 이것의 폭을 플랭크 마모량으로 한다.

크레이터 마모는 유동형 칩을 만드는 경우에 뚜렷하게 나타나고 주철 절삭의 경우처럼 균열형 칩을 만들 때는 크레이터 마모보다 플랭크마모가 더욱 중요하다. 이들 마모의 개략도는 그림 2와 같다. 크레이터 마모는 칩의 처음 접촉점이 절삭날에서 어떤 거리만큼 떨어져 나타나

며 이 점에서 큰 마찰력이 나타나 이 힘이 공구 뒷면을 파기 시작한다. 처음에는 느린 속도로 성장하나 이것이 어떤 크기에 도달하면 성장속도가 증가한다. 그 이유는 크레이터 마모가 발생된 공구면의 표면이 거칠어져서 칩의 흐름에 대하여 저항이 커지고 마멸작용이 증대하기 때문이다. 크레이터 마모가 성장하면 크레이터의 전방끝은 절삭날을 향하여 앞으로 퍼져간다. 크레이터가 더욱 성장하여 절삭날 가까이 가면 칩의 곡률반경이 감소하고 공구 뒷면경사각(rake angle)도 증가하여 날끝이 약화되어 칩핑이 일어날 수도 있고, 절삭저항이 급격히 증가하며 다듬질 면이 마찰되어 광택을 갖는다. 이때에 도달하면 그 공구는 더 이상 사용이 불가능하게 되며 공구수명이 다했다고 볼 수 있다.

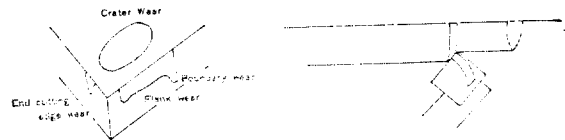


그림 1. 공구마모의 종류

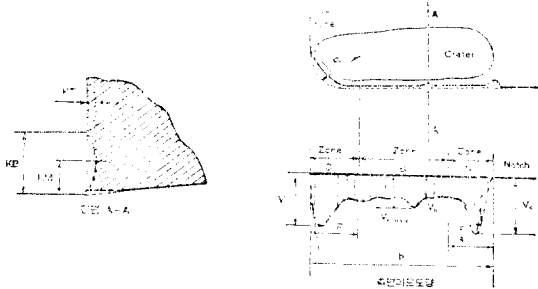


그림 2. 공구마모의 개략도

2.1.2 공구의 수명

새로운 공구를 사용하여 동일한 가공물을 일정한 조건으로 절삭하기 시작하여서부터 다시 공구를 교환해야 될 때까지의 시간인 공구수명을 판정하는 방법은

- (1) 공구인선의 마모가 일정량에 달했을 때
- (2) 절삭저항의 주분력에는 변화가 나타나지 않더라도 배분력 또는 이송분력이 급격히 증가했을 때
- (3) 완성가공면 또는 절삭가공한 직후에 가공표면에 광택이 있는 색조 또는 반점이 생길 때

△ 資 料

(4) 완성된 가공면의 치수변화가 일정량에 달했을 때

등 여러가지가 있으나 공구인선의 마모를 공구 수명의 기준으로 정하였을 경우의 초경공구에 대한 I.S.O 판정기준은

가) $V_B=0.3\text{mm}$

나) $V_{B\text{max}}=0.6\text{mm}$

다) $KT=0.06+0.3F$ (F : 이송속도)

라) $V_N=1\text{mm}$

2.1.3 초경 공구의 일반적 문제점

초경 공구에 발생하는 문제는 ①파손, ②마모, ③변형의 세가지 경우이다. 파손은 기계적, 화학적 그리고 열에 의해 영향을 받는다. 기계적 영향으로는 불충분한 기계능력과 상태이상 진동 공구의 지지상태, 공구인선의 적절하지 않은 호닝처리로 인한 절삭력의 상승 등이고, 구성인선에 의한 결과로서 생겨나는 칩핑 현상에 의해 파손의 원인이 되기도 한다. 열에 의한 크랙 파손현상은 열영향을 받은 피로에 의한 것으로 알려져 있다. 절삭과정의 절삭열에 의한 집중열이 심한 변화를 초래해 크랙 파손을 일으킬 수 있는데 이는 입자의 크기와 Co등의 결합재의 함유량 그리고 특히 TiC의 함유량 등에 관계가 있다¹⁰⁾.

마모에는 플랭크 마모와 크레이터 마모가 문제가 되는데 원자의 이동·확산등의 화학적 변화로 마모가 진행되고 초경 입자와 결합재인 코발트의 함유량이 문제가 되어 칩핑이 발생할 때 코발트량을 늘이고 초경입자를 작게하면 칩핑이 적어지나 변형의 문제가 발생하고 TiC를 늘일 때 크레이터 마모 저항이 높아지나 인성이 적어지는 결과를 초래한다. 공구재의 화학적 안정성과 반응성도 중요한 문제이다. 공구재의 화학적 마모는 다음과 같이 정리된다.

① WC의 W와 C가 분리되어 C가 칩중에 확산하여 W성분을 빼내는 경우, ② 철 중에 탄화물이 용해하는 경우, ③ 탄화물의 산화에 의한 경우 등이다. 변형에 의한 문제는 이상열 과도한 기계적 압력 등에 의해 발생한다.

이와 같이 복잡한 초경공구의 여러 문제점들

볼 때 이상적 공구는 인성이 우수하고 경도가 높으며 열과 화학적으로 견고한 공구의 개발이 요구된다. 이때 요구되는 표면특성으로는 ① 경도, ② 화학적 안정성, ③ 내마모성, ④ 저마찰계수, ⑤ 적합한 열전도성, ⑥ 코발트와 탄소확산의 방해 능력, ⑦ 평형상태의 열팽창계수, ⑧ 열에 대한 안정성등이고, 모재 특성으로는 ① 인성, ② 경도, ③ 피막층과의 화학적 적합성등이 요구된다 하겠다. 이와 같은 것으로 개발되고 있는 것이 피막공구로서 우수한 초경의 모재특성과 피막재질의 뛰어난 표면특성을 결합하여 이상적 공구의 위치를 굳혀 나가고 있는 것이다.

2.2 피막공구의 마모 특성

초경 공구의 표면에 내마모성·내용착성이 높은 물질을 피막한 공구는 초경 공구 모재의 인성을 잃지 않으면서 내마모성을 향상시켜 주므로 우수한 절삭성능을 보여준다. 초경공구가 개발되어 50년 이상 사용되면서 TiC, TaC, CrC, CbC를 이용한 합금도 개발되어 각종 피삭재의 절삭 조건을 향상시켰고 1969년에 피막기술이 소개되어 스트로우 어웨이식(throw-away type) 공구에 획기적인 돌파구를 마련하였다. 얇은 TiC 피막을 시초로 하여 TiN, Al_2O_3 , HfC, HfN 등이 계속 개발되고 피막 공정을 비롯하여 피막에 적합한 모재의 개발에 성공하여 머지 않아 강계통의 가공에는 반 이상이 피막 공구를 사용하게 되리란 전망이다¹⁰⁾. 현 단계에서는 TiC 피막이 많이 사용되고 TiN 피막도 상당한 발전을 하고 있으며 최근 Al_2O_3 피막이 단독 혹은 TiC등과 같이 피막되는 추세를 보이고 있다.

초경 공구의 손상에 파손, 마모, 변형의 세가지가 있음을 생각해 볼 때 피막은 파손과 변형에는 별로 영향을 주지 못하고 주로 마모 저항을 향상시키는 것으로 알려져 있다. 피막공구의 피막층에 요구되는 특성은 내마모성, 내용착성, 공구 모재에 대한 부착 강도, 내산화성 등이다⁹⁾. 현재까지의 실험치에 의하면 TiC는 플랭크 마모가 작고 TiN은 크레이터 마모가 작다고 알려져 있다¹¹⁾. 이것은 TiN이 화학적 특성인 산화성이 높고 열에 대해 안정성이 높은 특성이

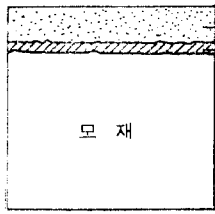


그림 3. TiC피막

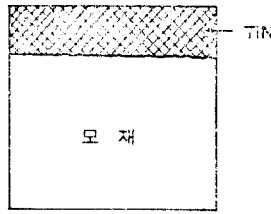


그림 4. TiN피막

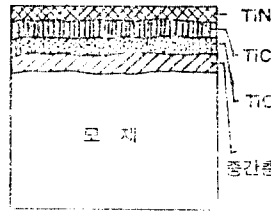


그림 5. TiC-TiCN-TiN피막

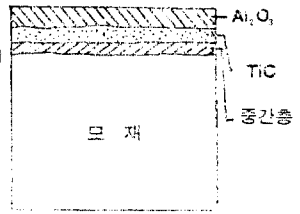


그림 6. TiC-Al₂O₃피막

있으므로 크레이터 마모에 효과적인 것으로 생각되고 플랭크면의 마모는 열적 영향 보다는 칩핑 형상에 의해 떨어지는 초경 입자등이 주로 플랭크 마모의 원인이 되는 것으로 생각되어 경도가 높아 마멸에 강한 TiC가 유리한 것으로 주장되고 있다¹¹⁾.

TiC의 피막은 그림 3과 같은 구조를 가지고 TiN의 피막은 그림 4와 같은 구조를 가지는데 TiC는 Al₂O₃나 TiN 보다도 더 경하나 피막시 화학작용으로 강도를 떨어 뜨리는 경하고 취성이 있는 중간층이 발생하는 것이 TiC피막에서 문제점으로 지적되고 있다¹²⁾.

그림 4와 같이 TiN에서는 중간층이 생기지 않아 피막 재질의 견고성이 향상되어 화학적 특성이 우수하다고 알려져 있다.

그림 5와 같이 TiC와 TiN 혹은 TiCN등을 결합하여 피막하는 것도 좋지 않은 중간층이 형성되므로, 이런 방법보다는 그림 6과 같이 Al₂O₃를 TiC위에 피막하는 것이 화학적 성질도 향상되고 TiC의 가장 경한 성질을 이용할 수 있기 때문에 최근의 개발경향은 이에 따르고 있다. 그러나 TiC, TiN, Al₂O₃등의 다층 피막은 부착강도와 생산 원가의 상승등이 해결되어야 할 문제점으로 남아 있다.

MIT에서 개발하기 시작한 Hafnium Carbide 피막은 그림 3과 비슷하게 중간층이 생겨 강도를 떨어 뜨리나 Hafnium Nitride는 그림 4와 비슷한 구조로 취성이 있는 층이 생기지 않고 다른 탄화물이나 질화물보다 훨씬 안정되며 자유 탄소가 없고 고온 경도가 높으며 열팽창 계수가 초경과 비슷하여 부착성이 우수하다는 연구결과가 발표되고 실제 절삭 실험에서 TiN피막보다 마모 저항에서 훨씬 우수하다는 것이 보

고 되고 있다.

이와 같이 내마모성, 내용착성, 공구 모재에의 부착 강도 그리고 내확산성등의 특성을 동시에 만족하는 피막 재질의 개발과 적용은 앞으로 계속해서 수행되어야 할 과제이다.

이외에 피막 재질이 마모상에서는 파손 및 변형에 큰 이점이 없는 것을 생각할 때 피막 재질의 개발 외에도 피막 재질에 맞는 초경 모재의 개발과 피막 공구의 용도에 맞추어 초경 모재의 성분과 결합 상태를 계속 개선해 나가야 할 것으로 사료된다.

그리고 밀링 가공과 같이 단속 절삭에는 충격이 계속 가해지는 경우로 충격이 피막층을 일찍 제거하기 때문에 플랭크 마모의 억제 효과가 별로 크지 않은 것으로 보고되고 있어⁹⁾ 충격에도 견딜 수 있고 부착성이 좋은 피막 기술을 개발하는 것도 요청된다.

3. 표면조도와 절삭력

3.1 표면조도의 특성

절삭작업중 공작물 표면에 생기는 표면조도(surface roughness)는 생성된 칩(chip)의 형태, 공구의 형상, 절삭조건, 절삭유 및 공작물에 따라 영향을 받게 된다¹³⁻¹⁵⁾. 일반적으로 칩의 형태가 연속형(flow type)이 되면 표면조도가 향상되며, 불연속칩(tear type or shear type)이 되면 나빠지는 경향을 보이게 된다. 그러나 연속형 칩이 발생하게 되면 공작물에 흠집을 주게 되고 칩으로 인한 작업환경의 위험성이 야기되므로 칩 브레이커(chip breaker)를 공구에 설계해야 한다.

△ 資 料

공구형상에 따른 표면조도는 공구경사각 (rake angle), 전면절삭날각 (end cutting edge angle) 및 공구날 끝 반경 (nose radius) 등에 크게 영향을 받게 된다. 대개의 경우 공구 경사각을 증가시키면 칩의 유동이 원활히 되어 연속형 칩을 생성하게 되고 구성인선 (built-up edge)의 발생을 억제하는 효과를 가져와 이에 의해 발생하는 표면조도의 나빠지는 정도를 줄일 수 있다.

전면절삭날각 및 공구날 끝 반경에 따라 기하학적으로 결정되는 표면조도의 피크 투 밸리 (peak to valley) 값은 다음과 같게 된다.

$$H = (1 + \cos\alpha)R + F \sin\alpha \cdot \cos\alpha - \sqrt{2FR\sin^3\alpha - F^2\sin^4\alpha}$$

여기서 $F \leq 2R \sin\alpha$ 인 경우에는

$$H = R - \frac{1}{2}\sqrt{4R^2 - F^2} \simeq \frac{F^2}{8R} \text{가 된다.}$$

H : 피크 투 밸리 표면조도 (peak to valley surface roughness)

F : 이송속도 (feed)

α : 전면절삭날각 (end cutting edge angle)

R : 공구날 끝 반경 (nose radius)

그런데 위의 H 값은 절삭속도가 정상영역¹⁶⁾에 도달해 갈 때 실제 절삭작업에서 측정되어지는 값과 비슷해지며 정상영역에 도달하기 전에는 절삭조건의 변화에 의한 구성인선의 발생빈도와 칩의 형태에 따라서 크게 달라지게 된다. 구성인선은 저온고압에서 발생하는 압력용착 (pressure welding)의 일종으로 고온에서는 발생하지 않는 것이 일반적인 학설이다¹⁷⁾. 따라서 정상영역은 절삭속도가 크게 되는데서 얻어지게 된다.

공구의 마모도 표면조도를 나쁘게 하는데 이는 마모가 진행되어감에 따라 절삭력이 커지게 되어 진동을 유발하기 때문이다. 그러나 측면마모가 이상적으로 이루어져 갈 때는 공구 끝반경의 증가효과를 가져와 뒷에서 보는 바와 같이 표면조도의 향상 효과를 가져오는 경우도 발생한다¹⁸⁾.

절삭유의 급유는 일반적으로 공구의 공작물간의 마찰을 줄임으로써 칩의 유동을 원활하게 하여 연속형 칩을 생성하고, 구성인선의 발생조건을 제거해 줌으로써 표면조도의 향상 효과를 가

져오게 된다.

공작물에 따른 표면조도의 변화는 공작물의 기계적 성질과 관계되는 것으로 스웰링 (swelling)에 의한 것이다. 절삭가공작업중에 변형이 적게 발생하는 가공경화 (work hardening)된 재질이나 취성재료일수록 스웰링은 적게 된다. 또한 절삭 속도가 빨라질수록 소성변형이 일어날 수 있는 시간적 여유가 적어져 고속절삭에서는 스웰링이 적게 된다¹⁹⁾.

3.2 절삭력의 특성

선반에서 선삭작업 (turning)을 할 때는 3차원 절삭 (3-dimensional oblique cutting)이 되는데 주분력 (tangential component), 이송분력 (axial component), 배분력 (radial component)의 절삭력 성분이 측정된다. 이 분력들은 절삭조건이 변화에 따라서 큰 영향을 받게 되는데 실험적인 결과에 의하면 로그 (log) 좌표에서 절삭속도, 절삭깊이, 이송속도와 선형적인 상관관계를 가지게 된다. 또한 공작물의 재질과 공구의 형상에 의해서도 영향을 받는데 공작물의 경도 (Brinell hardness)와 공구의 전면 절삭각, 경사각, 공구 끝 반경과의 실험적인 관계가 제시되고 있다²⁰⁾.

일반적으로 주분력은 배분력, 이송분력에 비해 크게 측정되어지고, 주분력 방향의 절삭속도 성분이 매우 크게 되므로 절삭작업에 소요되는 동력의 대부분은 주분력에 의해서 좌우된다.

4. 실험계획

4.1 약식 수명실험법

초경공구는 다른 많은 공구보다 내마모성이 크기 때문에 수명실험을 완전히 하려면 상당한 노력과 시간이 필요하다. 이러한 어려운 점을 해결하기 위하여 제시된 여러 수명실험법 가운데 하나가 약식 수명실험법인데, 이것은 종래의 완전한 수명실험의 전 영역을 1/2 정도로 단축함으로써 실험을 대폭 줄이는 방법이다. 전형적인 마모—수명관계는 그림 7과 같은데 영역 II에서 대개 선

국산 초경공구의 절삭성에 관한 비교 연구 □

형적으로 알려져 있다. 영역 IV에 대한 실험 결과로 얻은 선형적 관계식에서 전체 영역에 대한 결과를 예측할 수 있다는 것이 이 방법의 주요점이다. 그러나 이렇게 예측된 결과는 실제 전체 영역에서 행한 실험의 결과와 다를 것이고 그 오차의 크기가 중요한 문제점으로 남게 된다. Lambert등은 수명실험법의 신뢰성에 대한 연구에서 95% 유의수준에서 이 결과를 받아들일 수 있음을 보였다. 따라서 이 방법을 사용함으로써 어떤 추세를 보여줄 수 있는 결과를 얻기에는 충분함으로 공구간의 성능비교를 위한 본 연구에서의 실험은 이 방법에 의하였다.

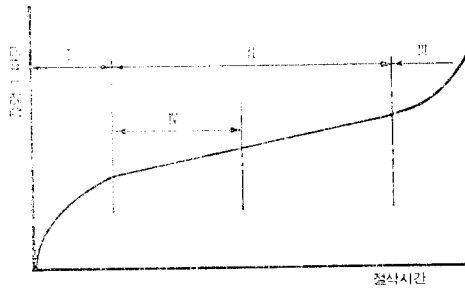


그림 7. 플랭크 마모-시간 곡선

4.2 중앙 증점 실험계획법- 1차 모델

공구수명 T , 절삭속도 V , 이송속도 F , 절삭깊이 D 라고 할 때, 일반적인 Taylor형태의 공구수명식 $T=KV^\alpha F^\beta D^\gamma$ 에서 α, β, γ 가 절삭조건 V, F, D 에 따라 변하지만 좁은 절삭영역에서는 상수로 볼 수 있다. 이때, 공구수명식을 로그(log)로 전개하면

$$y = CX_0 + \alpha X_1 + \beta X_2 + \gamma X_3$$

$$(y = \ln T, X_0 = 1, X_1 = \ln V, X_2 = \ln F, X_3 = \ln D)$$

와 같이 1차 모델로 된다. G.E.P.Box는 적은 실험으로 순수한 실험오차를 찾아냄으로써 가정한 모델의 적합성 여부와 신뢰구간 설정등 많은 정보를 얻기 위하여 중앙 증점 실험계획법을 제시할 바 있는데 3개의 변수를 가진 1차 모델에서 12개의 점으로 구성된다. 이것은 그림 8과 같이 팩토리얼 디자인(factorial design)에 의한 8개와 중앙점 4개이다.

몇몇 학자들은 공구수명, 절삭력, 표면조도

등의 실험에 이를 사용하였다^{6,21)}. 실험결과에 의한 상수 C, α, β, γ 의 값은 최소자승법에 의하여 결정될 수 있는데 이를 행렬형태로 나타내면,

$$b = (x' \cdot x)^{-1} x' y$$

이다.

$$b = \begin{bmatrix} C \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} X_0 X_1 X_2 X_3 \\ \text{12개의 실험조건} \end{bmatrix}$$

$$x' = x^T, y = [x \text{에 대응하는 실험결과}]$$

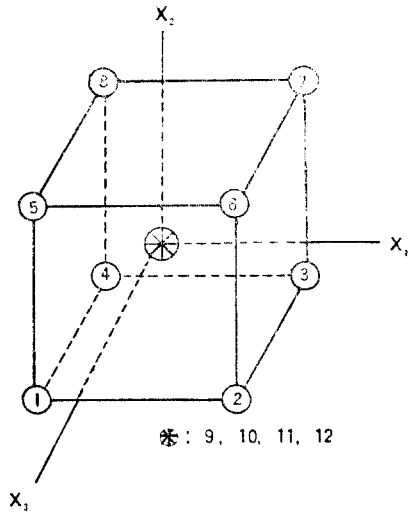


그림 8. 3개 변수의 1차 모델을 위한 중앙 증점 실험계획

b 의 요소가 각각 독립적으로 결정되기 위하여 $x'x$ 가 대각선요소만 남아야 되므로 는 직교성을 가져야 된다.

즉,

$$x = \begin{bmatrix} X_0 & X_1 & X_2 & X_3 \\ 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

이러한 실험계획을 위하여 표 1과 같이 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이의 관심있는 영역을

△ 資 料

우선 선정하고 최대, 최소, 중앙값에 대한 코우딩을 각각 1, -1, 0로 취하여 절삭조건을 선정한다.

표 1. 절삭 조건과 코우딩

Level	Speed V (m/min)	Feed F (mm/ rev)	Depth of Cut D (mm)	Coding $X_{1c} X_{2c} X_{3c}$
High	170	0.5	1.5	1 1 1
Center	130	0.32	1.02	0 0 0
Low	102	0.2	0.70	-1 -1 -1

$$X_{1c} = \frac{2(\ln V - \ln 170)}{\ln 170 - \ln 102} + 1$$

$$X_{2c} = \frac{2(\ln F - \ln 0.5)}{\ln 0.5 - \ln 0.2} + 1$$

$$X_{3c} = \frac{2(\ln D - \ln 1.5)}{\ln 1.5 - \ln 0.7} + 1$$

4.3 실험

초경공구의 수명실험과 피막공구의 마모특성 실험, 표면조도실험은 수치제어 선반을 사용함으로써 이송속도, 절삭깊이는 정확한 값을 유지할

수 있었으나, 절삭속도는 $\pm 2\%$ 정도의 오차내에서 주어진 값을 유지할 수 있었다. 절삭력에 대한 실험은 엔진선반을 사용하였다. 사용된 실험장치, 공구 및 피삭재는 다음과 같다.

4.3.1 실험장치

(1) 마모 및 표면조도실험 :

수치제어선반 (Kitagawa Co. Variant-10)

공구현미경 (Brown & Sharpe Co.)

표면조도계 (Kosaga Laboratory Co.)

(2) 절삭력실험 :

엔진선반 (Yuasa Hardware Co. Tuda)

공구동력계 (Kyowa Co. TD 500K)

4.3.2 공 구

수명실험에는 국산·외산 비피막 초경공구 4종, 마모특성실험에는 국산·외산 피막초경공구 3종, 표면조도 및 절삭력실험에는 비피막초경공구 6종, 피막초경공구 9종인데 그 형상, 재질, 생산국 등은 표 2와 같다.

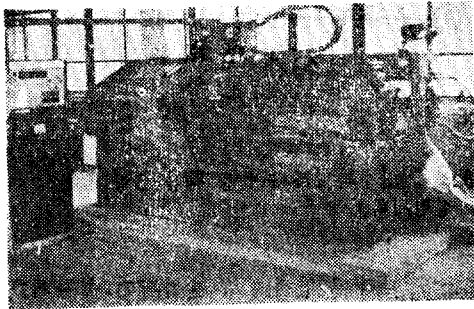


그림 9. 수치제어선반

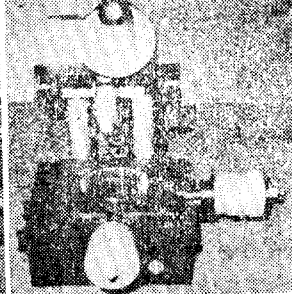


그림 10. 공구현미경

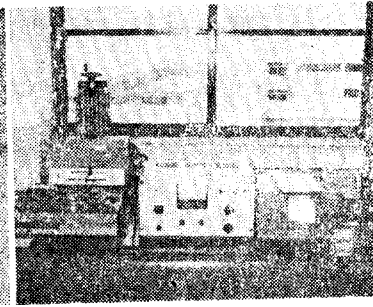


그림 11. 표면조도계

표 2. 실험에 사용된 공구 종류

Insert	Geometry & Grade	Coating Material & Maker
W 1	SNMA432 P20	-(Korea)
W 2	SNMA433 P20	-(")
W 3	SNMA432 P20	-(France)
W 4	SNMA432 P20	-(U.S.A)
W 5	SNMG432 P20	-(")
CW 6	SNMA432 P20	-(Korea)
CW 7	SNMA432 P20	TiN (Korea)
CW 8	SNMG432 P20	TiN (U.S.A)
CW 9	SNMG432 P20	TiN (")
CW10	SNMA432 P20	TiC (France)
CW11	SNMG432 P20	TiC (Japan)
CW12	SNMG432 P20	TiC+TiN (Germany)
CW13	SNMA432 P20	Al ₂ O ₃ +Ceramic+TiC (Japan)
CW14	SNMG432 P20	Al ₂ O ₃ (Germany)
CW15	SNMG432 P20	Al ₂ O ₃ +TiC (Sweden)

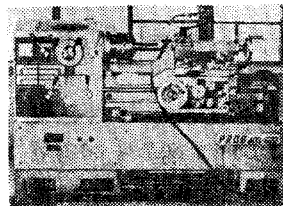


그림 12. 엔진선반 및 공구동력계

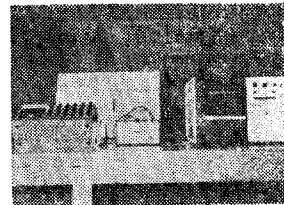


그림 13. 절삭력 측정장치

4.3.3 피삭재

실험에 사용된 피삭재는 SM50C (AISI1050)로서 그 구성 성분은 표 3과 같다.

표 3. 피삭재의 성분

Comp.	C	Si	Mn	P	S
%	0.49- 0.53	0.14- 0.31	0.70- 0.76	0.01- 0.03	0.018- 0.030

(본 성분 분석은 국립공업시험원에서 행하였음)

5. 실험결과 및 고찰

5.1 약식 수명 실험의 기준

공구 수명을 앞에서 언급된 약식 공구수명 실험법을 통해 얻기 위해서 먼저 실험 마모기준이 설정되어야 한다. 따라서 약식 수명 실험의 범위를 결정하기 위하여 비피막 공구는 W1공구, 피막공구는 CW10공구로 절삭속도 $V=102\text{m/min}$, 이송속도 $F=0.2\text{mm/rev}$, 절삭깊이 $D=1.5\text{mm}$ 의 절삭조건에서 공구수명이 다 할 때까지 실험을 수행했다. 비피막 공구 W1에 대한 실험 결과는 그림 14와 같다.

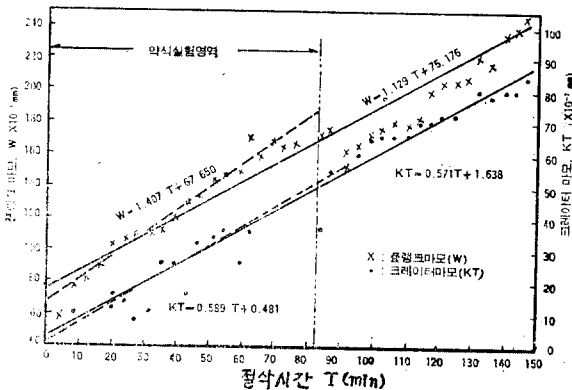


그림 14. 약식실험영역과 전체영역에서 산출한 마모시간 곡선의 비교(W1공구, $V=102\text{m/min}$, $F=0.2\text{mm/rev}$, $D=1.5\text{mm}$)

비피막 초경 공구의 수명 기준으로는 ISO공구 수명 기준⁹⁾에서 추천하고 있는 크레이터 수명 기준 마모량 $KT_f=0.06+0.3F$, 플랭크수명 기준 마모량 $W_f=0.3\text{mm}$ 를 이용하였다. 그림 14에서 보면 크레이터 마모 기준 KT_f 의 1/2에 해당하는 구간까지를 나타내는 KT 식과 전체를 나타내는 식이 거의 일치하고 있으며 플랭크 마모 W 의 경우에도 대체로 일치하고 있다. 따라서 비피막 초경공구에 대한 약식 수명 실험은 마

모가 대략 I.S.O 공구 수명 기준값의 1/2에 도달할 때까지 계속한다.

피막 초경공구의 경우는 CW10 공구로 절삭시간 $T=370\text{min}$ 정도 실험을 계속한 결과 크레이터 마모는 거의 발생하지 않았으며 플랭크 마모는 극히 적은 양이 아주 느린 속도로 진행되는 현상을 보였다. 반면에 꾸준한 증가를 보이던 노치가 급격한 증가 추세를 나타내면서 절삭중과다한 불꽃이 발생했다. 위의 결과로 미루어 피막공구는 피막층의 크레이터 마모 및 플랭크 마모에 대한 우수한 저항능력으로 같은 절삭 조건에서 실험된 앞의 비피막 공구와는 달리 노치의 성장이 공구 수명을 지배하게 된 것으로 간주된다. 일반적으로 피막공구의 마모특성은 피막층의 재질, 피막기술, 모재의 재질 등에 의해 많은 차이를 나타낼 것이므로 기존의 비피막공구와 같이 플랭크나 크레이터 마모를 일방적 수명기준으로 적용하여 공구수명식을 산출하는 것에 문제가 있다. 따라서 본연구에서는 피막초경공구의 수명식 산정보다는 각기 서로 다른 피막층 재질을 가지는 국내 및 외국 피막공구의 마모특성 비교에 중점을 두었다.

5.2 비피막 초경공구의 실험결과

약식 공구수명 실험법을 통하여 예측된 4종의 비피막 초경공구 W1, W2, W3, W4의 수명은 표 4와 같다. 여기서 4종의 공구가 절삭조건의 변화에 따라 가지는 각각의 수명 변화폭을 살펴보면 W1 공구는 $\Delta T_1=T_{max.}$ (Coding: -1, -1, -1)- $T_{min.}$ (Coding: 1, 1, 1)=310.2min, W2 공구는 $\Delta T_2=220.8\text{min}$, W3공구는 $\Delta T_3=431.6\text{min}$, W4공구는 $\Delta T_4=84.2\text{min}$ 로서 W1, W2, W3는 상당히 큰 수명 변화 폭을 보이고 있으나 W4는 상대적으로 아주 적은 폭을 가지고 있다. 이것을 중간절삭조건 (Coding: 0.0, 0.0)에서 4번 반복 실험한 결과에서 보여 주는 각 공구의 수명분포폭 W1 (36.4min), W2 (35.3min), W3 (35.1min), W4 (11.8min)에서도 W4가 상대적으로 아주 적은 분포 폭을 가지는 것과 비교해 볼 때 W4 공구는 W1, W2, W3에 비해 공구수명이 외란 및 절삭조건의 변화에 둔감한 것을 알

△ 資 料

표 4. 약식수명실험에 의하여 예측된 공구 수명

Tool Coding X_1, X_2, X_3	W1	W2	W3	W4
-1 -1 -1	318.3 ^(F)	226.4 ^(F)	436.4 ^(F)	93.2 ^(F)
1 -1 -1	31.1 ^(C)	53.3 ^(F)	46.9 ^(C)	30.4 ^(F)
-1 1 -1	78.1 ^(C)	114.7 ^(F)	230.6 ^(F)	60.6 ^(F)
1 1 -1	10.3 ^(C)	15.4 ^(C)	14.2 ^(C)	15.5 ^(F)
-1 -1 1	199.1 ^(F)	148.6 ^(F)	122.4 ^(F)	84.8 ^(F)
1 -1 1	62.0 ^(C)	41.2 ^(F)	122.4 ^(C)	51.3 ^(F)
-1 1 1	34.3 ^(C)	24.4 ^(F)	45.1 ^(C)	43.8 ^(F)
1 1 1	8.1 ^(C)	5.6 ^(C)	4.8 ^(F)	8.97 ^(F)
0 0 0	74.8 ^(C)	91.4 ^(C)	37.3 ^(C)	67.0 ^(F)
0 0 0	45.4 ^(C)	56.1 ^(C)	72.4 ^(C)	66.3 ^(C)
0 0 0	44.4 ^(C)	89.1 ^(C)	51.5 ^(C)	55.2 ^(F)
0 0 0	38.4 ^(C)	61.2 ^(C)	41.7 ^(C)	61.1 ^(F)

* 공구수명단위 : min

** (F) : 플랭크 마모가 지배적

(C) : 크레이터 마모가 지배적

수 있다. 같은 P20계열 공구들 사이의 이러한 큰 특성 차이는 제작회사 마다의 제작기술 및 제작방법의 차이에 의하여 공구들의 금속학적 조직이 서로 다르므로 해서 나타나는 것으로 보여 지는데 W4와 같이 큰 특성 차이를 가지는 것이 어떠한 금속학적 조직 차이에 기인하는 것인지 규명해 볼 필요가 있다고 본다.

표 4의 실험 결과치를 이용하여 공구의 수명식을 표 5와 같이 구하였다. 1차 모델의 수명식을 선정하고 최소자승법을 적용하여 각 상수를 독립적으로 구했으며 1차모델의 적합성을 판정하기 위해 F-Test를 수행하였다. 95% F-Test에서 W1, W2, W3의 수명식은 1차 모델이 적합한 것으로 판정되었으나 W4의 경우에 있어서는 1차 모델식이 적합하지 않는 것으로 판정되었다. 따라서 W4에 대해서는 2차 이상의 모델이 바람직하겠지만 본 연구에서의 관심인 공구간의 성능비교에서는 최소자승법을 이용한 W4의 1차 모델 결과로도 큰 무리를 수반하지 않을 것으로 본다.

표 5에서 각 공구의 공구수명식을 살펴보면

표 5. 약식수명실험으로 구한 공구수명식

Inserts	Tool-life Equation
W1	$T=48.2V^{-0.870} F^{-0.788} D^{-0.105}$
W2	$T=53.3V^{-0.776} F^{-0.715} D^{-0.404}$
W3	$T=57.3V^{-0.907} F^{-0.759} D^{-0.739}$
W4	$T=45.0V^{-0.572} F^{0.439} D^{-0.055}$

W1, W3가 W2, W4에 비해 절삭속도 및 이송속도의 영향을 크게 받고 있고 앞의 설명에서 예상되던대로 W4는 다른 공구에 비해 상대적으로 절삭조건의 변화에 둔감한 것을 식에서 확인할 수 있다. 한편 W1, W4가 W2, W3에 비해 공구 수명에 절삭 깊이의 영향을 아주 적게 받고 있으며 이송속도는 W4를 제외한 W1, W2, W3에 비슷한 정도의 영향을 갖고 있음을 알 수 있다. 이와같은 특성으로 볼 때 W1은 절삭속도 및 이송속도가 낮은 상태에서 절삭깊이를 크게 한 절삭조건에서 상대적으로 좋은 공구 수명을 기대할 수 있고 W4는 중(重), 고속(高速) 절삭조건에서 사용하는 것이 유리할 것으로 기대된다. 표 4 및 표 5의 결과를 종합하여 보면 불란서 공구 W3가 대부분의 절삭조건 영역에서 우수한 성능을 보여주고 있고 국산 공구 W1, W2도 중, 고속 절삭영역을 제외한 대부분의 영역에서 미국 공구 W4보다는 우수한 성능을 보이는 한편 W3보다는 전반적으로 뒤지지만 일부 절삭조건 영역부에서는 그에 비견되거나 우수한 성능을 나타내고 있다.

이들 동일 계열의 초경공구들은 크레이터와 플랭크 마모특성에 있어서 절삭조건마다 많은

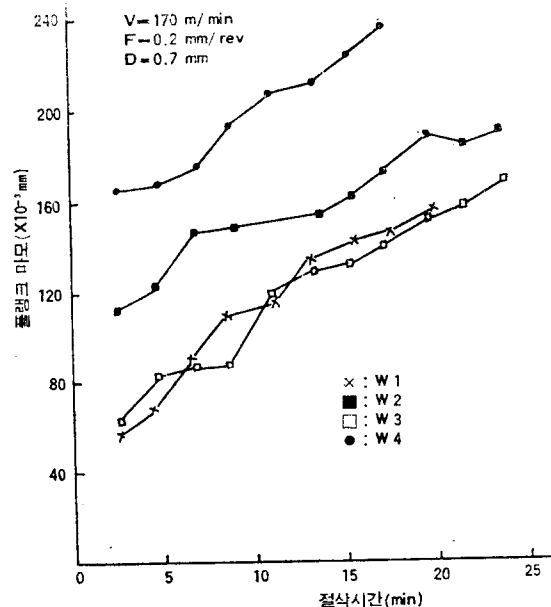


그림 15-1. 비피막 공구의 플랭크마모-시간 관계

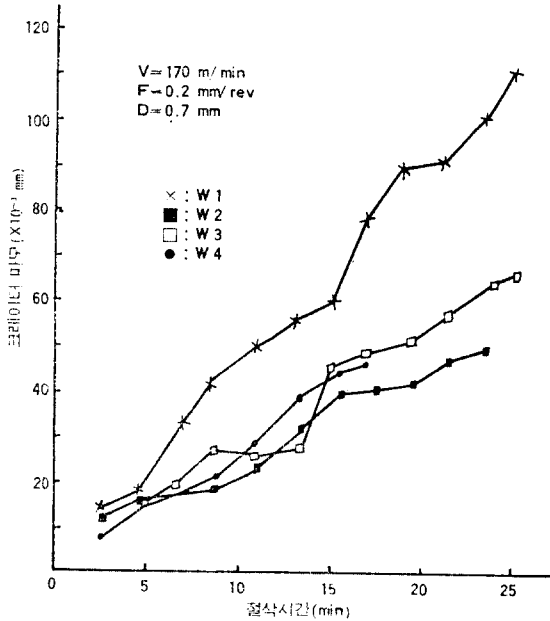


그림 15-2. 비피막 공구의 크레이터마모—시간 관계

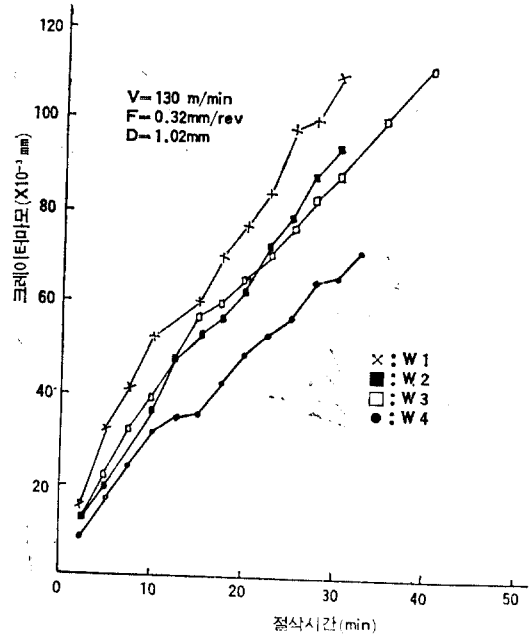


그림 15-4. 비피막 공구의 크레이터마모—시간 관계

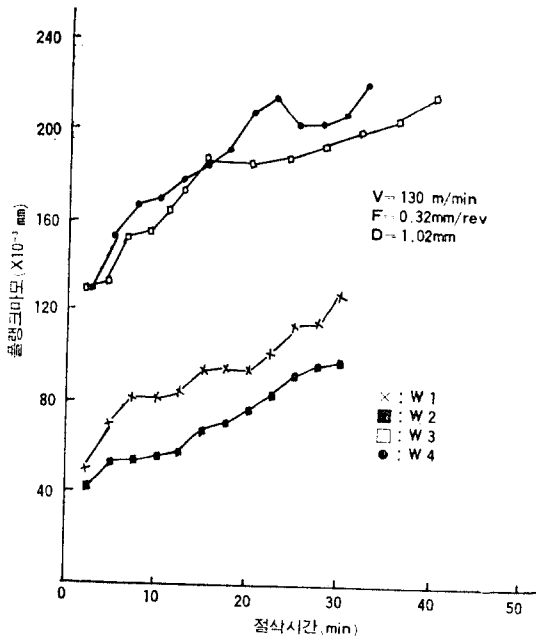


그림 15-3. 비피막 공구의 플랭크마모—시간 관계

차이를 보여서 같은 절삭조건에서도 어떤 공구는 크레이터 마모에 의하여 수명이 결정되는 반면 어떤 공구는 플랭크 마모에 의해서 수명이 결정되는 현상을 보였다.

이들 각 공구의 절삭조건, 즉 고속·경(高速·輕)절삭, 중간(中間)절삭, 저속·중(低速·重)절삭조건에서의 마모특성 실험결과를 그림 15-1 ~15-6에 나타냈다.

고속 경절삭조건에서의 마모 특성을 나타내주고 있는 그림 15-1, 15-2를 보면 W1, W3의 경우 플랭크 마모가 적고 크레이터 마모가 큰 반면 W2, W4는 그 반대현상을 나타내고 있는데 중간절삭조건에서는 그림 15-3, 15-4에서 볼 수 있듯이 전반적으로 플랭크 마모는 감소(W3제외)하고 크레이터 마모는 증가하는 추세를 보였으며 플랭크 마모와 크레이터 마모 특성 관계에 있어 W1, W4는 고속 경절삭과 유사한 마모 특성 관계를 유지하고 있으나 W2는 반대로 되었고 W3는 두 마모값이 모두 증가한 것으로 나타났다.

그림 15-5, 15-6에서 보면 저속·중절삭조건에서는 크레이터 마모와 플랭크 마모의 크기에 있어서 고속·경절삭조건에서와 비슷한 경향을 보여주고 있으나 4종의 공구가 모두 플랭크 마모에 의해 수명이 지배되는 것을 알 수 있다. 이것은 저속 중절삭조건에서 플랭크마모가 크게 나타난다는 일반적인 사실과 일치하는 결과이다.

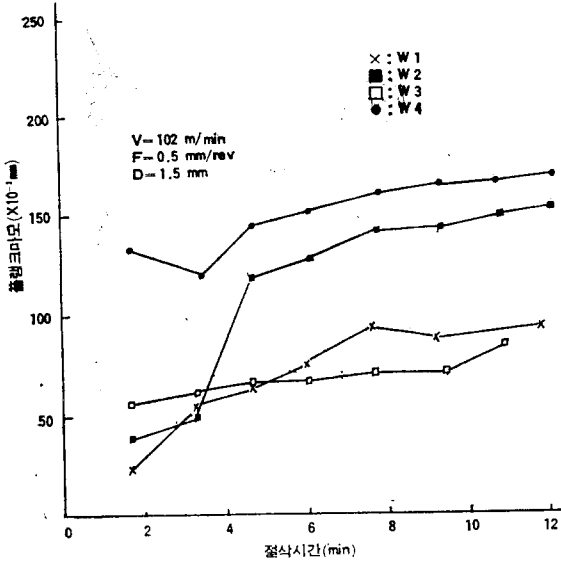


그림 15-5. 비피막 공구의 플랭크마모-시간 관계

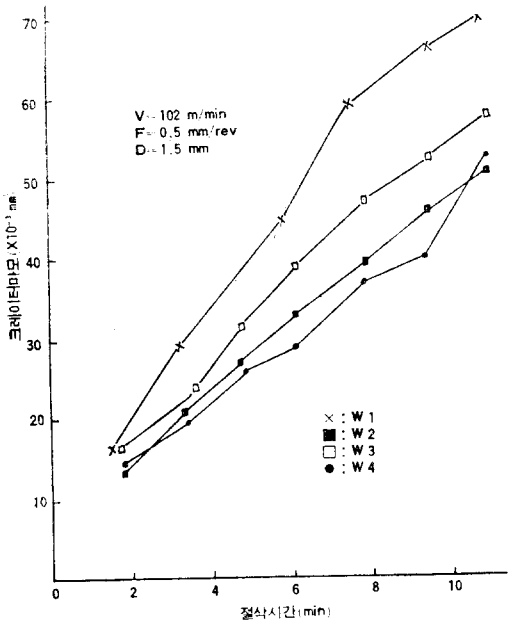


그림 15-6. 비피막 공구의 크레이터마모-시간 관계

이와 같이 각 절삭조건에서의 마모 특성을 각 공구별로 비교하여 보았는데 대체의 경향을 정리해 보면 W1공구는 절삭속도보다는 이송 및 절삭깊이에 의해 공구수명이 플랭크 마모에 지배되느냐, 크레이터 마모에 지배되느냐가 결정되

는 것 같고 W2는 일관된 경향을 보이지 않고 있는데 이것은 각 절삭조건과의 복합적 영향 즉, 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이 등이 각각 마모 특성에 같은 정도의 영향을 복합적으로 미치는 결과로 보여진다. W3에 있어서는 이것이 주로 절삭속도에 의해 영향을 받고 있으며 W4는 일관성 있게 플랭크 마모에 의해서 수명이 지배되었고 상대적으로 적은 크레이터 마모 성장을 나타내어 다른 공구에 비해 특이한 마모특성을 가지고 있다.

이상의 각 절삭 조건에서의 크레이터 마모 및 플랭크 마모 특성 비교에서 같은 P20제열의 W1, W2의 국산 공구와 W2, W4의 외산 공구들이 모두 서로 다른 마모 특성을 보여 주었다. 결국 공구수명이 마모특성에 의해 결정되므로 각 공구의 금속학적 조직 및 기계적 성질과 마모특성간의 관계를 분석, 규명하는 것이 보다 우수한 마모 특성을 가지는 공구개발을 위해 꼭 필요하다고 본다.

5.3 피막 초경공구의 실험결과

피막공구의 플랭크 마모형태는 마모가 피막층, 피막과 모재의 경계층, 모재층의 3개층에 걸쳐 일어나며 앞서 가는 피막층 마모를 뒤따라 경계층 마모, 모재층 마모등이 불확실하게 나타나 실제 플랭크 마모값을 나타내는 기준 설정에 어려움을 가지고 있다. 그러나 이러한 불확실한 마모 경계선들은 피막층 마모와 대개 일정한 간격을 유지하며 진행되었기 때문에 본 연구에서는 이 피막층 마모를 측정하여 플랭크 마모 증가율의 상대적 비교를 하였다.

저속·중절삭의 경우 그림 16-1에 나타난 바와 같이 국산 피막공구 CW7의 플랭크 마모는 외산 피막공구 CW10, CW13보다 큰 성장을 보이고 있는데, 이는 CW7이 TiN 피막으로 되어 있어서 크레이터 마모보다 플랭크 마모에 약하기 때문이다¹¹⁾. 그러나 국산 및 외산 비피막 공구들보다는 상당히 작은 마모 성장을 보이고 있어 내마모성을 위한 피막효과는 충분히 높다고 생각된다. 그림 16-2에서 알 수 있듯이 피막공구에서는 크레이터 마모가 거의 발생하지 않지만

CW7에서는 비피막공구에 비해서는 작지만 CW13 보다는 훨씬 크게 나타나고 있다. 이 결과는 TiN 피막이 크레이터 마모에 강하다는 앞서 언급된 사실과 상반되는데 이것은 피막기술 및 재질과 관련지어서 설명할 수 있을 것이다. 그림 16-3의 고속·중절삭에서도 플랭크 마모의 경향은 그림 16-1의 결과와 같다.

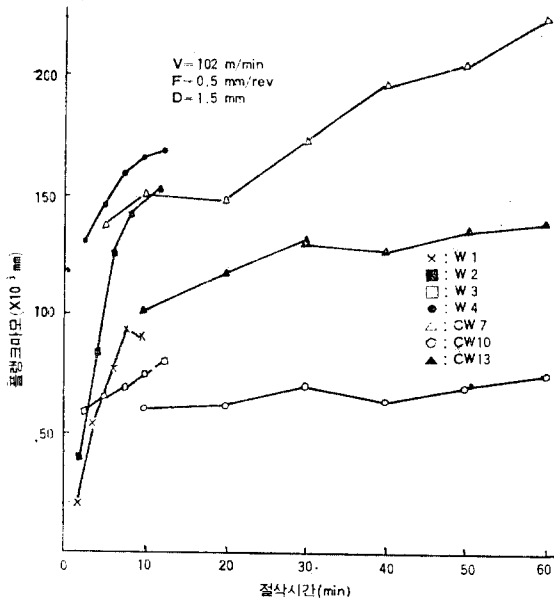


그림 16-1. 피막 및 비피막 공구의 플랭크마모—시간 관계

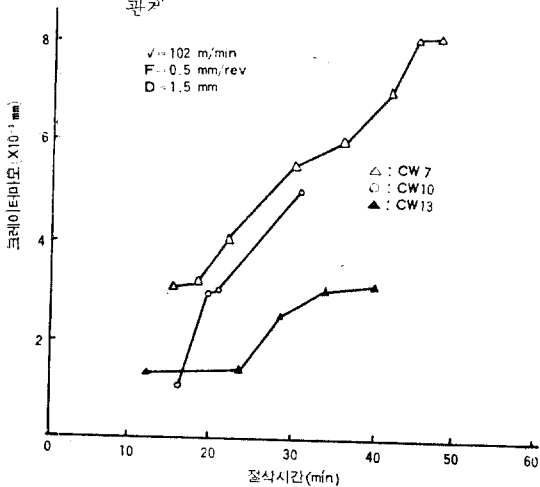


그림 16-2. 피막 공구의 크레이터 마모—시간 관계

그림 17-1, 17-2와 같이 CW7은 노치의 큰 성장이 있기 전에 플랭크 마모가 상당히 진행되는

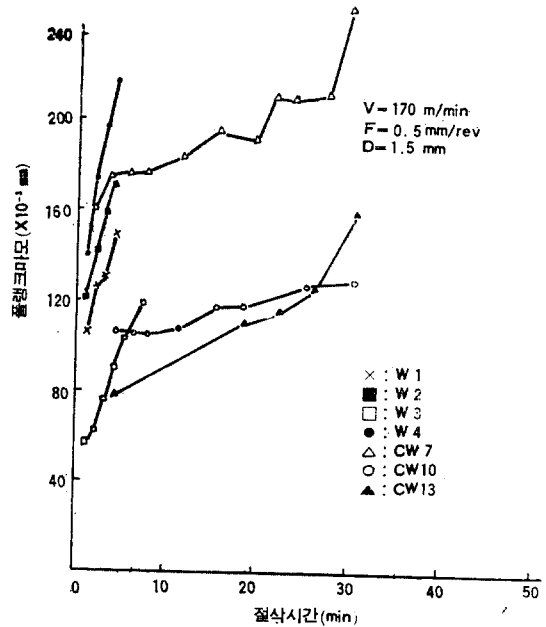


그림 16-3. 피막 및 비피막 공구의 플랭크마모—시간 관계

데 반해서 CW13, CW10에서는 어느정도 시간이 경과된 후, 노치가 플랭크 마모보다 훨씬 커지는데 그 경향은 처음 완만한 성장을 보이다가 급격한 성장을 나타내고 있다.

CW10에서의 이러한 사실은 I. Ham²³⁾ 등에 의한 TiC 공구성능실험에서 그루브(groove) 마모 및 칩핑(chipping)에 의해 수명이 결정된다는 사실과 비교될 수 있다.

따라서 피막기술 및 재질에 따라 마모특성이 달라지므로 피막공구수명의 기준이 달라져야 되며, CW10, CW13의 경우 노치가 수명기준이 되는 것이 타당하다고 생각된다.

피막공구에 대한 연구개발이 선진 각 국에서 활발히 진행되고 있고 그중 피막 재질 및 피막 기술에 대한 연구가 집중되고 있어 각종 우수한 피막 재질의 개발과 피막 기술 개발에 좋은 성과를 얻고 있음에 비추어 국내에서도 이에 대한 활발한 연구가 이루어져야만 위의 실험 결과에서 나타난 국내 피막 공구의 외산 공구에 대한 질적 차이를 극복할 수 있을 것이다.

△ 資 料

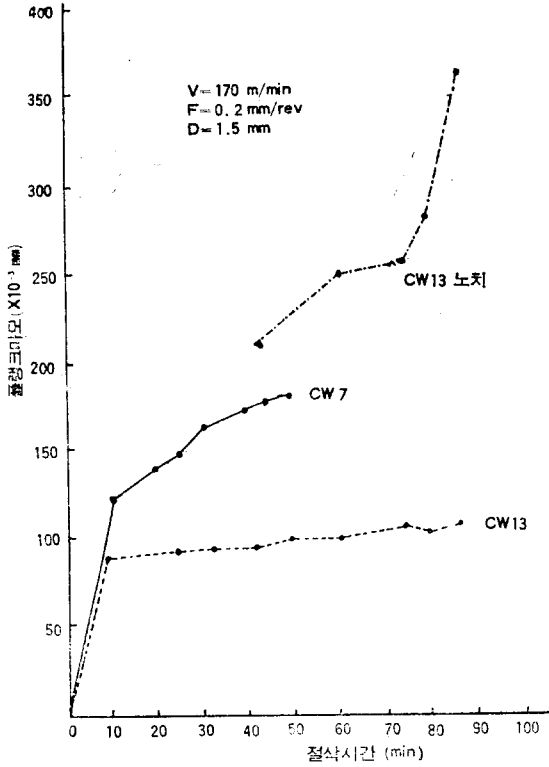


그림 17-1. 플랭크 마모 및 노차—시간 곡선

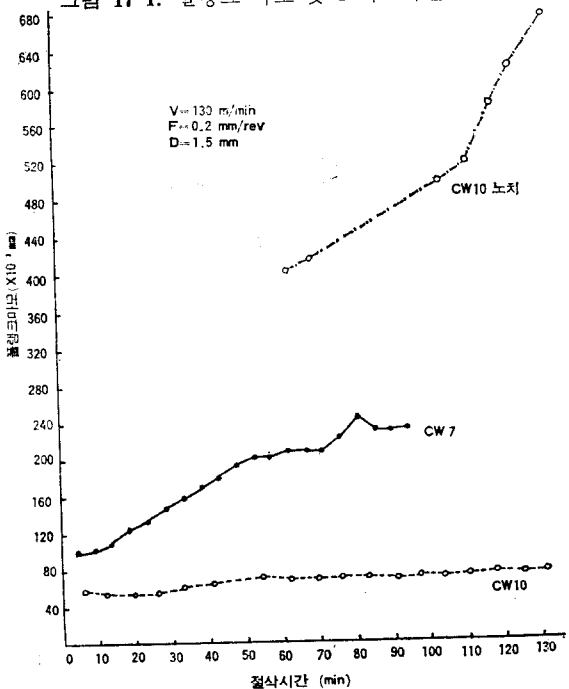


그림 17-2. 플랭크 마모 및 노차—시간 곡선

5.4 표면조도와 절삭력의 비교

공구마모가 진행됨에 따라 피삭재의 표면조도가 대부분의 절삭조건에서 나빠지는 경향을 나타내었는데 중간절삭 영역에서의 예를 그림 18에 제시하였다.

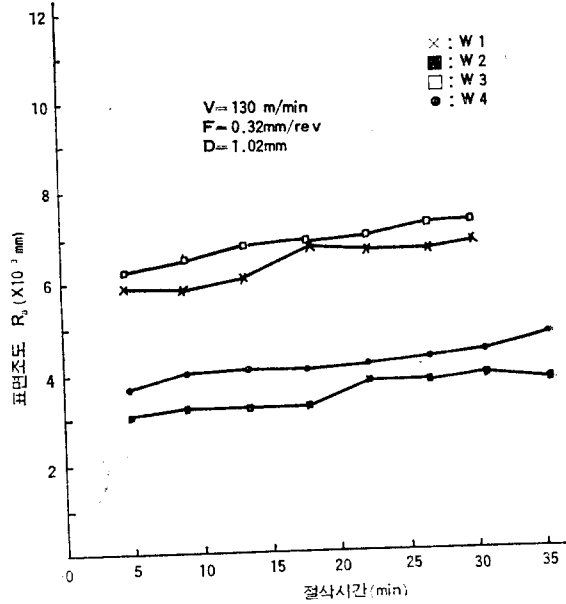


그림 18. 표면조도—절삭시간 관계

이러한 실험결과는 공구마모가 진행됨에 따라 공구 끝부분이 피삭재와 접촉하는 면적이 넓어짐으로 인하여 절삭력이 증가되고 이로부터 유발되는 공구의 진동이 표면조도에 나쁜 영향을 미쳤기 때문이라 생각된다. 이는 공구 마모가 진행됨에 따라 공구끝 반경의 증가효과를 가져와 표면조도가 좋아진다는⁸⁾ 사실과 상반되고 있다.

또한, 중간절삭 영역에서 극산과 외산 비피막 공구의 표면조도는 W2, W4, W1, W3의 순서로 나빠지고 있다. 이는 표 4에서 알 수 있듯이 중간 영역에서 이들 공구의 평균수명이 위와 같은 차례로 나빠지는 경향과 일치하고 있다.

피막층 유무, 피막재질 및 칩 브레이크 유무에 의한 절삭력의 차이를 조사하기 위하여 절삭속도 125m/min, 절삭깊이 1mm의 조건에서 공구 이송속도를 0.1mm/rev에서 0.5mm/rev까지

5가지로 변화시키며 각각의 조건에서 공구(표 2의 15종 모두)별로 절삭력을 실험하여 비교한 결과가 그림 19에 있다. 그림 19에 의하면, 제작회사(국산 및 외산)와 피삭재질에 따른 영향은 거의 찾아 볼 수 없으며 단지 칩 브레이커(chip breaker)의 유무에 따른 차이밖에 볼 수 없었다. 즉, 칩 브레이커를 가진 공구에서는 칩 브레이커의 형상이 공구의 경사각 증가효과를 가져와서 각각의 절삭력 성분이 감소하게 된다.

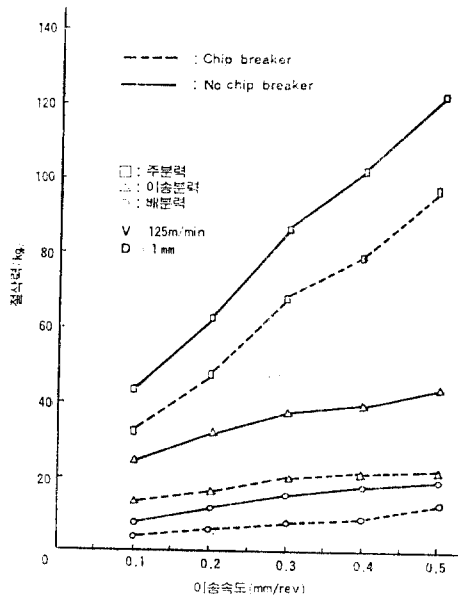


그림 19. 절삭력—이송속도 관계

6. 결 론

이제까지의 결과를 종합하여 보면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 국산 비피삭공구는 외산에 비하여 많은 절삭영역에서 양호한 성능을 가지고 있다.
2. 국산 비피삭공구 W2는 중간 절삭영역에서 국산 W1과 외산 W3, W4보다 우수한 성능을 나타낸다.
3. W1은 저속이거나 절삭깊이가 클 때, W2보다 좋은 성능을 가진다.
4. W1은 대체로 플랭크 마모에 의하여, W2는 저속·저이송에서는 플랭크마모 그리고 그밖의 영역에서는 크레이터 마모에 의하여 수명이 결

정된다.

5. 국산 피삭공구 CW7은 외산 CW10, 13에 비하여 내마모성이 떨어지지만 비피삭 공구들 보다는 내마모성이 매우 좋다.

6. 중간절삭영역에서 W2의 표면조도는 W1, W3, W4에 비하여 훨씬 좋다.

7. 피삭층 유무와 피삭재질에 따른 국산 및 외산의 절삭력 차이는 거의 없다.

부 기

본 연구는 1979학년도 문교부 특성화 공대 연구비의 지원하에 수행되었음을 밝히며, 연구비를 지원해 주신 문공부 당국에 감사말 드립니다.

참 고 문 헌

- 1) M.E. Merchant, E.J. Krabacher, "Radioactive Tracers from Rapid Measurement of Cutting Tool Life," J. Appl. phys., Vol. 22, 1957.
- 2) J.L. Thomas, B.K. Lambert, "The Reliability of Several Accelerated Tool Life Testing Methods" Int. J. Prod. Res., Vol. 13, No. 4, 1975, pp. 367~382.
- 3) G. Lorentz, "Determination of the Tool-Life Exponent from Quick Facing Tests," CIRP Annalen, Vol. 12, 1969, p. 217.
- 4) W.B. Heginbotham, R.D. Pandey, "Taper Turning Tests Produce Reliable Tool-Wear Equations," Adv. MTDR, 1966, p. 515.
- 5) W.B. Heginbotham, R.D. Pandey, "A Variable Rate Machining Test for Tool Life Evaluations," Adv. MTDR, 1967, p. 163.
- 6) S.M. Wu, "Tool Life Testing by Response Surface Methodology-Part 1, Part 2," J. of Engg. for Ind., Trans, ASME, Vol. 85, 1954, pp. 105~116.
- 7) G.E.P. Box, J.S. Hunter, "Multi-Factor Experimental Design for Exploring Response Surfaces," Ann. Math. Stat., Vol. 28, 1957, pp. 195~241.
- 8) Internatoinal Standard ISO 3585-Tool Life Testing with Single Point Turning Tools.
- 9) 鳴瀧則彦, "コーティング工具の摩耗," 機械と工具,

△ 資 料

- 1977年 8月, pp. 19~24.
- 10) 米井博敏, "超硬工具の摩耗への排載コーティング一," 機械と工具, 1977年 8月, pp. 25~31.
 - 11) 松岡甫堇, "各種コーティング超硬切削工具における TiCコーティングの有利性," 機械と工具, 1977年 8月 pp. 65~69.
 - 12) Teledyne Firth Sterling, "Hafnium Nitride Coating for Cutting Tool," Firthite Technical Bulletin TC8, 1977.
 - 13) M.C. Shaw, "Metal Cutting Principle," MIT Press, 1960, pp. 7-1~43.
 - 14) E.J.A. Armarego, "The Machining of Metals," Prentice-Hall, 1969, pp. 170~174.
 - 15) N.H. Cook and K.L. Chanderaman "Investigation on the Nature of Surface Finish and its Variation with Cutting Speed," J. of Engg for Ind., Trans, ASME, Vol. 86, 1964, p. 134.
 - 16) 한국과학기술연구소, "정밀기계기술 Seminar보고서," 1979, pp. 163~184.
 - 17) 염 영하 "공작기계의 절삭이론," 東明社, 1972, pp. 40~47.
 - 18) Tomohiko Ono, "Study on Surface Roughness in Turning," Technical Report of Mechanical Engineering Laboratory No. 91 in Japanese, 1977.
 - 19) 한국과학원, "단조소재 절삭성에 관한 연구," 1978, pp. 63~68.
 - 20) E.J.A. Armarego, "The Machining of Metals," Prentice Hall, 1969, pp. 157~169.
 - 21) K.S. Taraman and B.K. Lambert, "Application of Machining Variables," AIIE Trans., Vol. 4, 1972, pp. 111~115.
 - 22) I. Ham and D.S. Ermer, "Cutting Performance Comparison of Titanium and Tungsten Carbide Tools in Machining of Gray Iron," Adv. MTDR, 1967, pp. 1005~1017.

<473 페이지에서 계속>

参 考 文 献

- 1) 三塚: 日本機械學會 第380回 講習教材(1973.5)
- 2) 棚澤: ディセル 機関工, 山淨堂 p.76(1956).
- 3) 國岡: 野口: 鐵と鋼 58(1972) 11. s.511.
- 4) 福田: 三塚: 鐵と鋼 58(1972) 11. s. 313.
- 5) 庄司: 第12回 日本傳熱シンポジウム論文集(1975) p. 213.
- 6) 戸田: 日本機械學會 論文集 38(1972) p. 581 39(1973) p. 323.
- 7) C.J. Hoogendorn & R Hond: 5TH IHTC, IV (1974). p. 135.
- 8) 田中, 大森, 杉森: 三菱工技報 2(1965)
- 9) H. Müller & R. Jecher: Arch. Eisenhüttenwes 44(1973)
- 10) 大田, 福迫: 第12回 日本傳熱シンポジウム 論文集(1975) p. 217.
- 11) 三塚, 福田鐵 60(1974) 14 p. 2079.
- 12) A. Sakurai & M. Shiotsa: 5TH IHTC IV(1974) p. 81
- 13) 四尾, 平田: 第11回 日本傳熱シンポジウム論文集(1974) p. 1*1
- 14) B.C. Bradfield; I & EC Fundamentals, 5(1966) 2- p. 200.
- 15) 勝又, 西協, 平田: 第7回日本傳熱シンポジウム論文集(1970) p. 113.
- 16) 森岡, 平田: 日本機械學會 第50期全國大會講演論文集 No. 720-13 (1972) p. 263.