

기어의 열처리(1)*

이기열 · 장우양
조선대학교 신금속소재공학과

Gear Heat Treatment(1)

K. Y. Lee and W. Y. Jang

Dept. of Metallurgical Engr., Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

1. 서 론

기어는 우리의 일상생활에 필요한 여러 가지 필수품을 제조하는데 있어 중요한 역할을 한다. 우리가 기어에 관하여 생각할 때 일반적으로 두 가지로 분류할 수가 있다 즉 운동수행용 기어와 동력전달용 기어로 분류할 수 있다. 운동수행용 기어는 일반적으로 비철계 또는 플라스틱인 반면, 하중을 지탱하는 동력전달용 기어는 대개 철계 합금으로 제조된다. 본 해설에서 논의하고자 하는 기어의 열처리는 중장비 산업에 이용되는 기어를 열처리하는 방법에 관한 것이다.

열처리가 중요한 이유를 이해하기 위하여 그림 1에 있는 재료과학적 모델을 고려해 보기로 하자. 그림 1의 모델에서는 각 요소들의 상호 유기적인 의존성을 나타내는 일련의 교차된 링들을 볼 수 있다. 그림 1에서 제품을 완성하는 능력은 기계적, 물리적 그리고 야금학적인 성질들에 의하여 정의되어 진다는 것을 알 수 있으며, 이러한 성질들은 부분적인 미세 조직에 의하여 결정되며 이는 정밀한 열처리 공정에

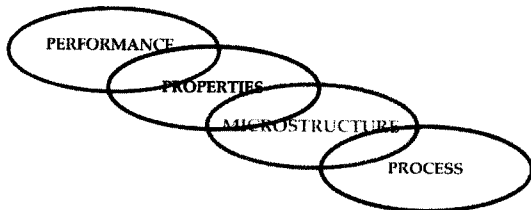


그림 1. 재료과학적 모델.

의하여 이루어지게 된다. 즉 그림 1의 모델로부터 정밀기어를 제작할 때 상당 부분의 주된 경쟁요소는 열처리에 의존한다고 하는 것을 알 수가 있다. 그 기여도는 비용절감, 내구성 및 안정성에 대해서 실질적으로 중요하다. 열처리는 전형적인 기어 제조비용 중 대략 30% 정도의 중요한 몫을 담당하게 된다(그림 2). 만약 열처리를 적절하게 이해하지 못하거나 제어하지 못할 경우에는 기어 제조 공정의 모든 측면에 있어서 심각한 손상을 가져다 줄 수도 있다(그림 3).

2. 공정의 선택

2.1. 경화이전의 단계

일반적으로 목표로 하는 기어 제조공정에는 몇몇 열처리 방법들이 이용된다.

(1) 어닐링(Annealing)은 주로 재료를 연하게 하고 기계적인 성질을 개선하고자 할 때 이용되며, 적당한 온도로 가열 및 유지한 후 적절한 속도로 냉각하는 공정으로 이루어 진다. 완전 어닐링(Full annealing)은 오스테나이트가 형성되는 온도구간인 A_{c3} 온도 이

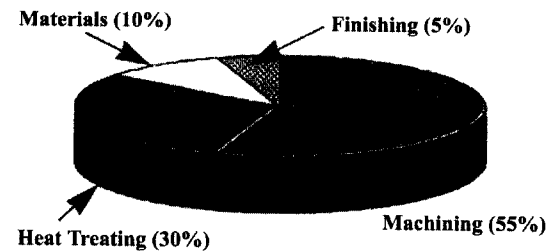


그림 2. 대표적인 기어 제조비용.

*이 글은 Heat Treating Progress, 1(1) 2001, pp.55-59에 게재된 내용을 번역한 것임.

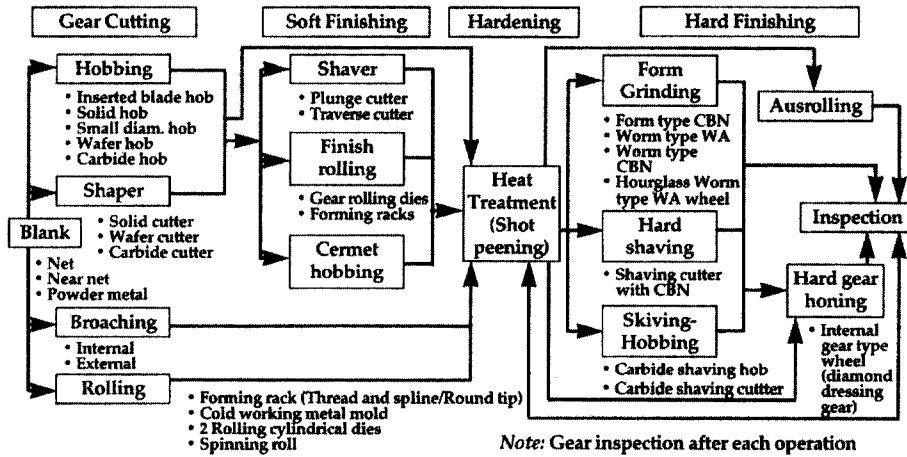


그림 3. 기어의 제조과정.

상에서 재료를 일정시간 가열한 후 대략 315°C 부근에 도달하도록 노 내에서 서냉하는 공정을 수반한다. 이상영역 어닐링(Intercritical annealing)은 오스테나이트가 가열 중 형성되기 시작하는 A_{C1} 온도 이상으로 재료를 가열하는 공정을 수반한다. 저온 어닐링(Subcritical annealing)은 A_{C1} 온도 이하로 재료를 가열한 후 노 내에서 서냉하는 열처리 공정을 의미한다. 이 경우 재료의 연화속도는 어닐링 온도가 A_{C1} 온도에 도달함에 따라 급격하게 증가한다.

(2) 노멀라이징(Normalizing)은 기어의 잔류응력을 제거하고 치수 안정성을 위하여 재료를 A_{C3} 온도 이상으로 가열한 다음 노의 외부에서 공냉하는 열처리 공정을 수반한다. 노멀라이징은 종종 열적 또는 미세조직학적인 관점에서 이해가 요구된다. 열적인 관점에서 노멀라이징은 오스테나이트처리후 공기나 질소 분위기에서 공냉하는 조작을 의미한다. 미세조직학적 관점에서 노멀라이징은 보다 균일한 조작을 보여준다. 노멀라이징 처리된 재료의 경우 가공성이 용이하나 어닐링처리된 재료보다는 더 높은 경도를 나타낸다. 아울러 노멀라이징은 침탄하는 과정에서 치수변형을 제어하는데 있어 상당히 주요한 역할을 한다.

(3) 응력제거 열처리(Stress relieving)는 뜨임처리 조작과 비슷하며, A_{C1} 온도 이하로 재료를 가열하여 잔류응력을 제거하기에 충분한 시간동안 유지한 다음 서냉(대개는 공냉)하는 열처리 조작을 의미한다. 응력제거 열처리는 제조공정의 결과로서 기어에 존재하는 내부응력을 제거하기 위하여 실시한다.

2.2. 경화 공정

기어의 경도를 증가시키기 위해서는 다양한 열처리 공정이 시도된다. 이는 대개 가열과 냉각을 수반하며 경화방법에 따라 전형적으로 다음과 같이 분류가 된다. 표면경화법(침탄법, 침탄질화법, 질화법 및 질화 침탄법 등)과 실용 에너지(화염, 레이저 및 유도)경화법

(1) 직접경화법(Direct hardening)은 표면 경화층을 형성하지 않는 열처리 방법을 말한다. 흔히 직접경화된 기어강의 대표적 예로는 AISI 1045, 4130, 4140, 4145, 4340 및 8640 등이 있다. 이 방법의 경우 경도의 균일도가 기어의 이(teeth) 전체에 걸쳐 분포하는 것을 기대할 수 없는 특징이 있다. 기어의 외부는 내부보다 빨리 냉각되므로 경도 변화가 있을 것으로 생각된다. 이 경우 강재의 최종 경도는 강재의 탄소함량에 의존하게 된다. 경도의 깊이는 냉각속도와 더불어 강재의 경화능에도 의존하게 된다. 직접경화법은 기어의 이를 절단하기 전 또는 후에 시행될 수도 있다. 원하는 경도는 재료를 오스테나이트 영역인 815~875°C까지 가열한 후 급냉과 뜨임처리를 통하여 얻어진다.

(2) 표면경화법(Case hardening)은 연성재료 위에 경질층, 내마모층 또는 표면층을 형성하게 된다. 표면경화법의 이면에 내재하는 아이디어는 피팅에 대한 저항성을 증가시키기 위해 외부표면을 경화시킴과 동시에 이의 파손을 방지하고자 대략 HRC = 30~40 정도로 기어 이의 중심부의 경도를 유지하는 것이다.

표면 경도값이 높으면 높을수록 피팅에 대한 저항성은 더욱 더 커지게 된다. 굽힘강도의 경우 표면경도는 대략 HRC = 50까지 증가하며 이후 굽힘강도의 증가는 노치 민감도가 증가함에 따라 상쇄된다.

(3) 침탄법(Carburizing)은 표면경화법중 가장 흔한 방법에 해당된다. 적절하게 침탄처리된 기어는 직접 경화된 기어보다 30~50%정도의 더 높은 하중을 지탱할 수가 있다. 침탄강은 대략 0.1~0.2%의 탄소를 함유하는 전형적인 합금강이다. 침탄 기어강에 이용되는 대표적 사례로는 20MnCr5, 16MnCr5, ZF-7B, 20MoCr4 및 V2525 등과 같은 국제규격과 더불어 AISI 1018, 4320, 5120, 8620 및 9310 등이 있다.

침탄은 800~1090°C의 온도범위에서 처리한다. 오늘날 통상적인 산업규격은 대부분의 침탄법이 870~1010°C의 온도범위에서 이루어진다고 보고하고 있다. 침탄층의 깊이는 0.13~8.25 mm의 범위에 걸쳐 변화가 이루어진다. 그러나 0.4 mm이하의 깊이를 가지는 층에 대하여는 침탄질화법이 더 효과적이다.

(4) 침탄질화법(Carbonitriding)은 질화법의 유형이 아니라 일종의 변형된 침탄법이다. 이 변형된 방법은 제조시 침탄층에 질소를 첨가시키기 위하여 침탄분위기 속에 암모니아를 불어 넣는 공정을 포함하고 있다. 침탄질화법을 대표하는 기어강의 사례로는 AISI 1018, 1117 및 12L14 등이 있다. 전형적인 침탄질화법은 침탄법에 이용되는 온도보다 낮은 700~900°C의 온도구간과 보다 짧은 시간에서 이루어진다. 질소는 탄소의 확산을 방해하므로 결과적으로 남게 되는 것은 침탄된 강재에 전형적으로 나타나는 것보다 얇은 표면 경화층이다. 침탄질화층의 두께는 보통 0.075~0.75 mm 정도이다.

(5) 질화법(Nitriding)은 표면경도를 증가시키는데 이용되는 또 다른 표면 경화법이다. 빠른 급냉조작이 이루어지지 않기 때문에 치수변형이 최소한도로 남게 되는 점이 주된 장점으로서 작용한다. 이 방법은 모든 기어 재료에 대하여 적절하지는 않다. 사용시 제한요소로서는 침탄법에 의해 얻어지는 표면보다 더 큰 취성을 나타내는 '백층'을 생성한다는 점이다. 이러한 점에도 불구하고 질화법은 표면을 경화시키는 대체 방법으로서 각광을 받고 있다. 흔히 이용되는 질화처리용 기어 강재로는 AISI 4140, 4150, 4340,

7140, 8640과 AMS 6475(Nitralloy N) 등이 있다.

질화법은 495~565°C의 온도범위에서 이루어진다. 지속적인 질화가스의 배출 및 예견되는 치수 변형의 양을 결정하기 위한 세 가지 주요 변수로는 강재의 조성, 초기 미세조직 및 내부경도 등이 있다. 표면층의 깊이와 경도 등은 지속성 및 질화법의 유형과 더불어 변화할 뿐만 아니라 세가지 변수에 의하여도 영향을 받는다. 전형적인 표면층의 깊이는 0.2~0.65 mm에 걸쳐 분포한다.

(6) 질화침탄법(Nitrocarburizing)은 침탄법의 유형이 아니고 변형된 질화법의 일종이다. 페라이트 존재 구간 즉, 가열시 오스테나이트가 형성되기 시작하는 온도 이하의 구간에서 질소와 탄소는 동시에 강재에 침투된다. 본질적인 확산영역에서 공정이 이루어지는 동안에 매우 얇은 '백층' 또는 화합물 층이 형성된다. 질화법과 마찬가지로 빠른 급냉처리는 이루어지지 않는다. 흔히 이용되는 질화침탄용 기어강의 종류로는 AISI 1018, 1141, 12L14, 4140, 4150, 5160, 8620 및 공구강 등이 있다.

질화침탄강은 일반적으로 550~600°C의 온도 구간에서 이루어지며, 최소 HRC = 58 정도의 경도를 얻는 데에 이용될 수 있으며, 재료의 종류에 따라서 이 수치는 증가된다. 백층의 깊이는 0.0013~0.056 mm에 걸쳐서 분포하며 확산구간은 0.03~0.8 mm의 범위를 갖는다.

2.3. 실용 에너지 경화법

실용 에너지에 의한 다양한 방법의 경화법이 기어의 제조시 이용되고 있으며 화염경화법, 레이저 표면경화법 및 유도경화법 등이 있다.

(1) 화염 경화법(Flame hardening)은 스피닝법이나 혹은 점진적 가열법 중 한가지 방법에 의하여 소형과 대형 기어에 이용되어 진다. 점진적 가열법에서 화염을 이용하여 점차적으로 기어를 가열시킨다. 일반 탄소강, 침탄강, 주철, 스테인레스강을 포함하여 광범위한 기어 재료들은 이러한 방법을 통하여 경화시킬 수 있다.

(2) 레이저 표면경화법(Laser surface hardening)은 기어와 같이 높은 응력을 받는 기계부품의 표면경화와 기계적 성질을 향상시키기 위하여 이용된다. 표면처리에 이용되는 레이저는 산업용 레이저의 높은

비용 때문에 상대적으로 이용의 제약을 받고 있다. 비용에 덧붙여서 레이저는 에너지 측면에서 볼 때 그리 효율적인 대상은 아니다. AISI 1045, 4340 그리고 주철(회, 가단)과 같은 기어재료들은 이러한 방법에 잘 적용될 수 있는 대상이다.

(3) 유도 경화법(Induction hardening)은 종종 기어의 열처리시 이용되어진다. 이 방법은 기어 이의 표면을 가열하는데 있어 교류전원을 이용한다. 그 다음 가열된 부위는 급냉되어 지며 그 결과 경도가 증가하게 된다. 이 조작은 상대적으로 짧은 시간에 걸쳐 이루어진다. 강재의 유형, 초기 미세조직 및 기어의 제조 특성 등은 원하는 기어의 경도, 결과적인 기어의 강도 및 잔류응력분포에 상당한 영향을 미친다.

헬리컬 기어, 베벨 기어, 워 기어 및 랙 등은 종종 유도경화처리를 통하여 제작된다. 이 방법에 이용되는 전형적인 기어강으로는 AISI 1050, 1060, 4140, 4150, 4350, 5150 및 8650 등이 있다. 4140, 4140, 4350 및 5150 등의 합금재료와 관련하여 유도 경화처리후 가능한 응력제거 열처리나 뜨임조작을 할 경우 균열이 일어날 가능성은 줄어들게 된다.

2.4. 경화후 공정(Post-hardening processes)

경화처리후 기어는 몇 가지 열적 및 기계적 공정을 거치게 된다.

(1) 뜨임처리(Tempering): A_{C1} 온도보다 낮은 임의의 온도에서 뜨임처리가 이루어 지며 최종 뜨임온도를 결정하는 것은 작업시 요구되는 재료의 경도, 강도 및 인성이다. 150~200°C의 온도구간에서 뜨임처리하는 것은 주로 압축하중이 걸리는 작업환경에서 높은 강도와 피로저항이 요구되는 기어재료와 관련하여 점차적으로 인성을 증가시켜 주는 보편적인 열처리 작업이라고 할 수가 있다. 이중 뜨임작업(double tempering)도 때때로 기어재료에 대해 실시되며, 이는 미세조직의 안정성을 향상시키거나 뜨임처리를 확실하게 완료시키고자 할 때 이용되어 진다.

(2) 심냉처리법(Subzero treatment): 최근에는 두 가지 유형의 심냉처리법이 이용되고 있다. -85°C에서 이루어지는 '저 심냉법'과 -185°C에서 실시되는 '고 심냉법' 두가지가 있다. 경우에 따라 이러한 방

법들은 연속적인 뜨임처리 조작과 연계하여 이루어질 때도 있다. 이 처리의 목적은 잔류 오스테나이트를 완전히 마르텐사이트로 변태시켜서 담금질 조직의 경도를 향상시키는데 주된 목적이 있다. 아울러 이 조작을 통하여 강재의 적절한 치수 안정성이 향상된다



그림 4. 기어 공학 모델.

. 심냉처리법은 기어재료의 내마모성과 굽힘 피로강도를 향상시키기 위해서도 이용되어 진다. 요즈음 기어 제조시 높은 완성도를 위하여 이 심냉처리 법은 자주 이용되고 있는 실정이다.

(3) 쇼트 피닝법(Shot peening): 기어의 표면을 아주 미세한 구형의 매질(보통 쇼트라고 부름)을 이용하여 피닝시키는 냉간가공 공정으로서, 구형 매질의 크기, 형상 및 속도 등을 조절하고 제어하는 공정이다. 이 경우 쇼트 피닝은 쇼트 블라스팅이나 세척공정과 혼동해서는 안된다.

3. 재료의 선정

트랜스 미션 기어에는 다양한 종류의 강 또는 주철이 이용된다. 모든 기어 제조시 재료는 최종 용도 그리고 가공경비 등을 포함한 전체 제조비 등을 고려하여 주의 깊게 선정하여야 한다. 기어 설계시 고

려할 주요한 항목들에는 점진적이거나 불연속적일 수 있는 하중의 유형, 내부의 강도 및 열처리 요구조건을 규정하는 굽힘 피로강도 또는 마모저항 등이 있다. 예를 들면, 내구성을 증진시키기 위해서는 기어 이뿌리 근처에서는 높은 표면 경도 및 잔류 압축응력이 요구된다. 또한 피치 근방에서는 파단을 방지하기 위하여 접촉응력 및 마모에 견딜 수 있도록 높은 경도와 적절한 표면강도가 필요하다. 피로강도를 영향을 미치는 인자는 다음과 같다.

- (1) 표면경도, 경화깊이 및 내부경도와 같은 경도 분포
- (2) 잔류 오스테나이트, 결정립 크기 및 탄화물(크기, 형태, 분포) 등과 같은 미세조직
- (3) 잔류 압축응력, 표면 마무리, 형상 및 입간 인성 등과 같은 결합 제어

전체적인 기어 제조계획을 수립할 때 그림 4의 기어 공학 모델에서와 같이 재료 선정, 공학적 설계

표 1. 최종 용도에 따른 기어용 재료 가이드

응용분야	설계하고자 하는 기어의 종류	선정 재료
디퍼런셜		
자동차 대형트럭	Hypoid, spiral / straight bevel Hypoid, spiral / straight bevel	4118, 4140, 4027, 4028, 4620, 8620, 8622, 8626 4817, 4820, 8625, 8822
드라이브		
산업용 트랙터 부품	Helical, spur rack and pinion, worm Crossed-axis helical, helical	1045, 1050, 4140, 4142, 4150, 4320, 4340, 4620 1045, 1144, 4118, 4140
엔진		
대형트럭	Crossed-axis helical, spur, worm	1020, 1117, 4140, 4145, 5140, 8620
장치류		
굴착기계 농장기계	Spiral / straight Bevel, zerol Face, internal, sprial/straight bevel, spur	1045, 4140, 4150, 4340, 4620, 4820, 8620, 9310 G3000, D5506, M5003, 4118, 4320, 4817, 4820, 8620, 8822
광산, 제지 / 제강 산업용	Helical, herringborn, miter, spur, spur rack and pinion	1020, 1045, 4140, 4150, 4320, 4340, 4620, 9310
스타터		
자동차	Spur	1045, 1050
트랜스미션		
자동차 대형트럭 해양산업용 비도로용 트랙터	Helical, spur Helical, spur Helical, helical conical, spiral bevel Helical, internal, spiral / straight Bevel, spur Herringbone, internal, spur	4027, 4028, 4118, 8620 4027, 4028, 4620, 4817, 5120, 8620, 8622, 9310 8620, 8622 1118, 5130, 5140, 5150, 8620, 8822, 9310 4118, 4140, 8822

및 제조방법 사이에 상승적 효과가 나타날 수 있도록 하여야 한다. 각 단계에서 우선순위는 기어의 최종적인 성능에 적합하도록 결정하여야 한다. 그러나 이러한 결정이 쉬운 일은 아니다. 특정한 기어를 제조하는 데 있어서 재료비가 적은 비율(약 10%)을 차지하기는 하지만 재료 선정은 원재료의 가격과 기어의 성능이 완벽한 조화를 이룰 수 있도록 하여야 한다. 보통강에 대한 재료 선정 가이드를 표 1에 나타낸다.

재료에 포함된 각 합금원소에 대한 지식과 합금의 물리적 성질에 미치는 합금원소의 영향을 이해하는 것은 재료 선정에 있어서 필수적이다. 재료 선정에 의해 균형있게 취할 성질들에는 연신율은 물론 인장강도, 항복강도 및 충격강도 등이 있다.

대부분의 기어를 응용하는데 있어서 중심경도(core hardness) 즉 기어 이 단면 중심부의 경도는 HRC=30~40이 요구된다. 이러한 경도에 도달하기 위해서는 재료를 선택할 때 기어의 단면 크기 및

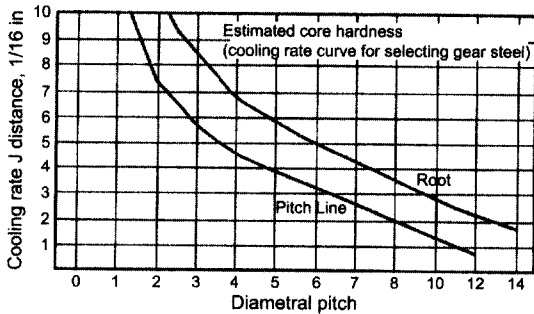


그림 5. 재료 선정 설계 도구(T-단면 기어).

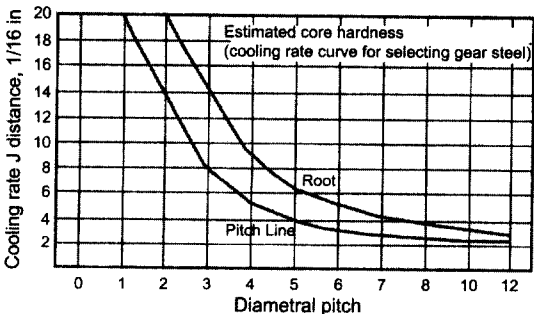


그림 6. 재료 선정 설계 도구(솔리드 기어).

기어의 핏치 크기 등을 고려하여야 한다. 만약 중심부의 경도가 너무 높으면 고하중 상태에서 표면의 경화부위를 지지할 수 없으며 반대로 경도가 너무 낮으면 표면층/중심부의 계면에서 기어의 이가 부서질 우려가 있다. 재료 선정 설계 지침(그림 5 및 6 참조)을 이용하여 기어 이의 단면 크기와 기어 핏치와의 관계를 설정할 수 있다.

이러한 설계 지침은 재료를 기름 또는 고압가스로 냉각하였을 때 수냉시험에 의해 구해진 죠미니 경화능 데이터를 이용하여 신뢰할 수 있는 중심부의 경도값을 구할 수 있게 해준다. 그러나 이 도표를 처음 사용할 때는 중심부의 경도가 정확한 가를 확인하기 위해서 실제 시편을 시험하여 확인하여야 한다. 이러한 선정 절차를 검증하기 위해서 대표적인 'T'형상의 4 핏치 링 또는 피니언 기어를 이용할 수 있다. 어떤 재료나 시험해 볼 수 있으나 여기서는 8620H 및 8822H 경화강을 비교하였다. 표 2는 8620H 및 8822H 강에 대한 죠미니 시험 결과를 나타낸다. 그림 5로부터 수평축의 핏치 직경이 4인 곳에서 수직선을 그어 핏치 라인(Pitch line)과 만나는 한 점을 구한다. 이 점에 상응하는 수직축의 죠미니 거리는 대략 J=4.5가 된다. 다음에 표 2로부터 원하는 중심경도인 HRC=30~40의 범위에 드는 재료를 선정한다. 이 경우 8822H가 가장 적절한 선택이 된다. 그러나 6 핏치 기어의 경우에는 8620H 강이 적절한 선택이 된다. 만약 기어가 "솔리드 기어"이면 그림 6을 이용하여 대체재료를 선정하여야 한다.

표 2. 몇몇 재료의 경화능 데이터

"J" distance, 1/16 in	8620 RH, HRC max.	8620 RH, HRC min.	8622 RH, HRC max.	8622 RH, HRC min.
1	47	42	49	44
2	45	39	48	43
3	41	35	47	40
4	38	30	43	35
5	34	26	40	31
6	31	24	37	29

(다음호에 계속)