

\* 이 글은 日本 “熱處理” 제 43권 4호, PP. 244~251에 게재된 내용을 번역 정리 한 것임.

## 침탄 및 침탄질화소입에 의한 변형과 이의 감소 대책

정 병 호

부경대학교 금속공학과

### Quenching Distortions after Carburizing or Carbo-nitriding and Methods to Minimize Them

B. H. Jung

Metallurgical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

#### 1. 서 언

최근 승용차 차내의 소음을 4년 동안 약 1 dB 정도 낮추는 시도를 하고 있으며, 변속기나 파이널 드라이브(final drive)로부터 발생하는 기어(gear)의 소음도 이에 맞추어 낮추도록 요구하고 있다. 기어 소음의 큰 원인 중의 하나는 기어의 정밀도 불량이다. 기어의 정밀도 불량은 대표적으로 기어의 제조공정 즉, 단조-기계가공-기어의 치형(齒形) 절삭-세이핑-침탄 및 침탄질화소입, 템퍼링-마무리 가공에서 치형 절삭 시의 가공오차와 침탄 및 침탄질화소입변형(이하 간단히 소입변형)과 마무리 시의 가공오차로 크게 나눌 수 있다. 소입변형(quenching distortion)은 변형량, 기어의 형상, 열처리 자세(셋팅 위치, 자세) 및 서로 다른 롯드(Lot)들의 취급 때문에 원하는 기어면의 형상이 안정하게 얻어지기 어려운 일이 생기는데, 이는 중요한 문제라 할 수 있다. 소입변형의 감소와 안정화는 기어의 정밀도 확보를 위해 실시되고 있는 교정소입(프레스 소입, 플러그 소입)과 소입 후 기어면의 연삭 등은 후처리 공정을 집약하거나 단축 또는 폐지시킬 수 있어 가격을 크게 낮출 수 있다. 여기서는 침탄 및 침탄질화소입에서 생기는 변형의 지배 요인으로 생각되는 것과 이의 대책 기술에 대하여 그 현상을 소개한다.

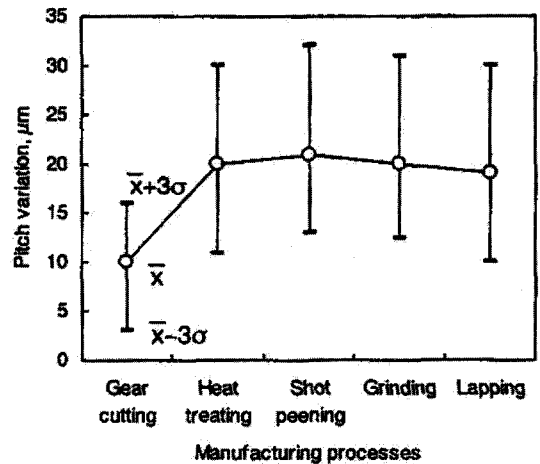


Fig. 1. Change in pitch variation during manufacturing processes.

#### 2. 열처리 변형에 영향을 주는 중요 요인

기어의 경우는 치면오차(치형치근오차), 피치오차(단일 피치오차인점 피치오차), 축 휘임 및 단면 폴리 등이 기어 소음에 영향을 주는 주요 열처리 변형들이다. 치형의 형상오차에 대한 공정변화의 일예를 Fig. 1[1]에 나타낸다. 침탄소입 후에는 변형량 및 편차의 폭도 크게 되기 때문에 침탄소입 공정의 개선은 중요한 것으로 알려져 있다.

그러나 침탄소입변형은 그 원인이 공정에만 있는

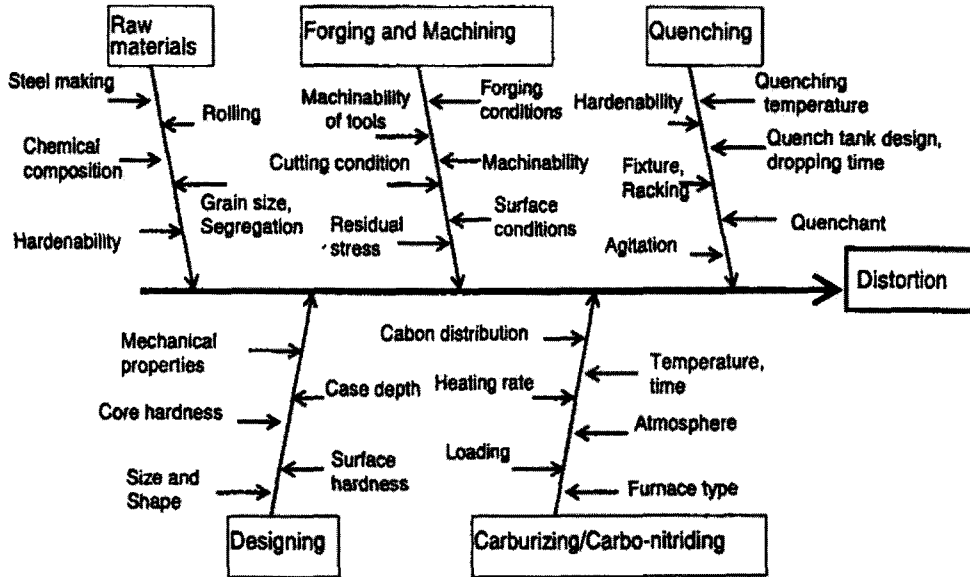


Fig. 2. Historical factors affecting the quenching distortions in carburized or carbo-nitrided steel parts.(diagram of characteristic causes).

것이 아니고 Fig. 2[2]와 같이 소재부터 설계 및 각각의 제조공정(이력)에도 있으며 또 침탄소입에 따른 초기의 변형도 처음부터 존재한다. 이러한 여러 가지 요인을 종합적으로 관리하여 최적화시켜야 하지만 서로 영향을 주는 복합적인 요인들 때문에 설명하기가 어렵다.

또 침탄소입공정은 필요에 의해 충분한 소입경도(표면 및 심부경도)를 확보한 후에는 가능한 변형 및 이의 편차를 감소시키지 않으면 안 된다. 소입변형은 앞선 공정에서의 잔류응력 및 침탄 중의 고온 크리프 현상 그리고 열응력 및 소입 시의 변태응력 등 네 가지로 크게 나눌 수 있다. 그러나 마르텐사이트 변태를 하지 않는 오스테나이트계 스테인리스강(SUS 304강)으로 제작한 펄 기어(피치원의 직경; 125 mm, 모듈; 2.5)는 변형 량 및 편차가 비교적 적은 것으로 알려져 있다[3]. 그래서 다음은 변태 스트레인에 착안한 중요 영향 인자와 대표적인 대책 사례를 소개한다.

### 3. 표면침탄, 질소량의 영향

SCr420H 강 of 원주시험편( $\phi 20 \times 60$  mm)을 이용하여 카본 포텐셜(CP)과 질소 포텐셜(NP) 값을 변

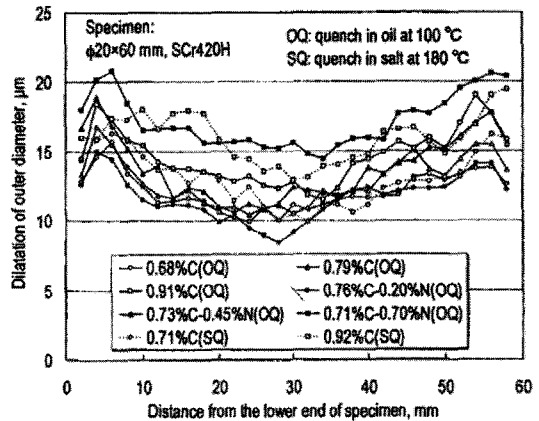


Fig. 3. Effect of carbon and nitrogen content on dilatation of outer diameter after carburizing or carbo-nitriding.

화시켜 소입(Quenching) 한 실험을 분석해보면, Fig. 3[4]에 나타난 바와 같이 표면 C 량이나 N 량 모두 외경이 증가하면 북 모양과 비슷하게 변형됨을 알 수 있다.

이것은 소입변형이 변태 스트레인에 크게 의존한다는 것을 의미한다. 그리고 여기서 표시한 C 및 N 량은 시험편 표면 아래의 100 μm 깊이에서 절단한 층을 채취하여 화학 분석한 실측값이다. 그러나 외경 202 mm, 모듈 2.48, 나사각 27°인 변속기용 링 기

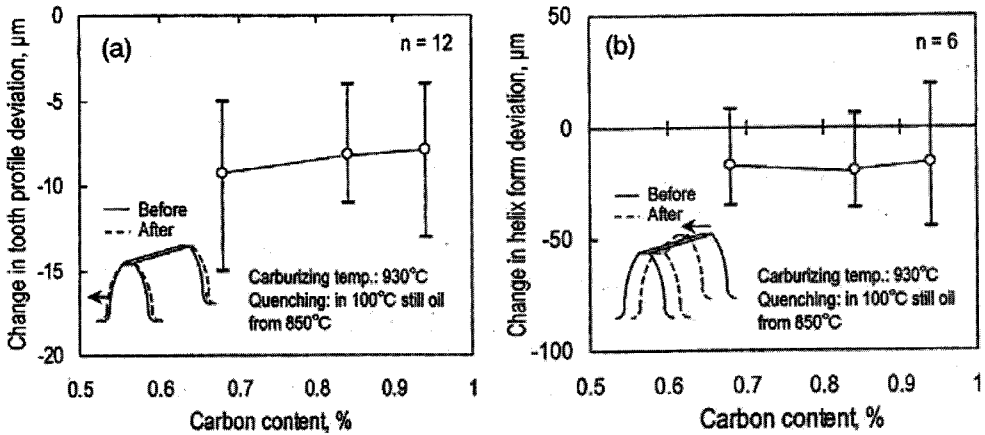


Fig. 4. Effect of carbon content on change in tooth profile deviation(a) and change in helix angle deviation(b) of carburized final gear's drive side.

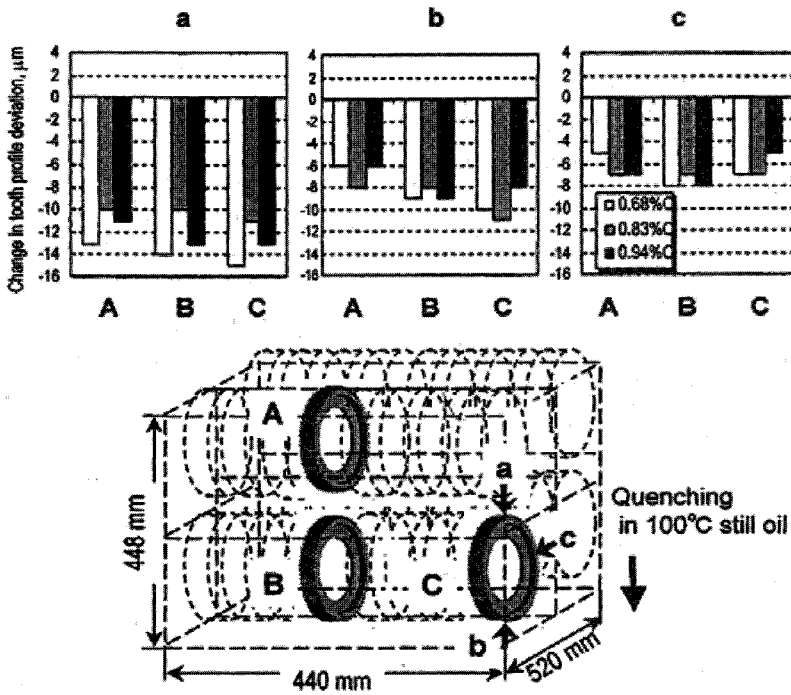


Fig. 5. Comparison of change in tooth profile deviations of various parts (a, b and c) of carburized gears arranged in different places (A, B and C).

어(명칭; 피인일 기어)에서는 표면 C량에 따른 현저한 경향성은 보이지 않고 있다(Fig. 4(a), 4(b)). Fig. 5는 기어를 종 방향으로 셋팅하여 소입 한 경우, 셋팅 위치가 다른 기어와 기어 각 부위의 치형 오차 변화량을 표면 C량 변화에 따라 조사한 결과이다. 확실히 표면 C량이나 셋팅 위치에 의한 영향

보다는 기어 부위에 따른 영향이 더욱 큰 것을 알 수 있다. 이것은 소입변형이 침탄깊이(0.35%까지의 침탄깊이)가 0.8 mm 정도가 되면 형상이 다른 각 부위의 냉각속도 차이가 소입위치에 의해 영향을 받는 것 보다 더 크게 된다는 것을 의미한다.

**Table 1.** Factors and levels for experimental design.

Factors		Level 1	Level 2
Controllable factors	A : Orientation	Horizontal	Vertical
	B : Agitating	Still	0.2 m/s
	C : A × B	-	-
	D : Lifting temperature (2nd cooling)	230°C	250°C
	E : Testing order	2nd	First
	F : B × D	-	-
	G : Final stage oil temperature (3rd cooling)	100°C	120°C
Error factor	N : Loading	7 gears overlapped × 5	Upper stage : 6 gears × 2 lines Lower stage : 6gears × 1 line

#### 4. 침탄소입변형에 미치는 기어 형상 및 소입자세의 영향

파이널 드라이브용 하이포이드(hypoid) 기어(외경; 206 mm, 모듈; 4.27, SCM420H)를 사용한 1조(槽) 3단 소입[6]에 대하여 실험계획법을 활용한 실험과 해석을 실시하였다. 1조 3단 소입은 오일(Oil)에 소입 후  $M_s$  온도 직상으로 인상하여 가열하고 그 후 다시 냉각하여 마르텐사이트로 변태시키는 마르켄칭(marquenching)으로, 이러한 세 가지 공정을 하나의 오일 욕에서 처리하는 방법이다. 오일은 JIS 2종 1호(H값; 0.100/cm, 100°C 동점도; 18.4 mm<sup>2</sup>/s)를 사용하였다. 기어의 설치 모양은 횡 방향(horizontal)에는 7매로 쌓고, 종 방향(vertical)에는 한 열에 6매를 꼬치모양으로 하여 상하 2단으로 배치하였다. 특성 값은 배면평면도로 하여 Table 1[7]

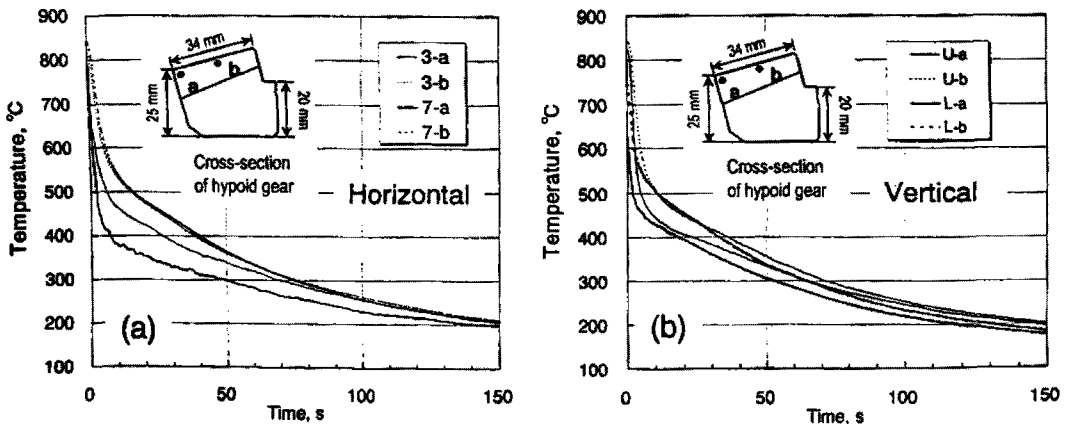
**Table 2.** Effects of various factors on amount of distortion and its dispersion.

Characteristics	A : orientation		B : agitating		D : lifting temp. °C		G : final stage oil temp. °C	
	H	V	×	○	230	250	100	120
Amount of distortion	→	↗	↗	↗	→	→	↗	↗
Dispersion	↘	→	→	→	→	→	→	→

H: Horizontal, V: Vertical, ×: still, ○: 0.2m/s

에 나타난 제어인자와 오차인자를 취하여 L8 직행표로 분할하여 나타내었다.

한편, 배면평면도에서 각 인자의 영향에 미치는 영향은 Table 2[7]에 나타내었다. 변화량은 오일욕조의 교반이나 오일 온도의 영향이 크지만, 편차는 기어의



**Fig. 6.** Temperature at positions a and b of hypoid gear's tooth tip as a function of cooling time; (a) horizontal loading, (b) vertical loading. Numbers 3 and 7 mean the stage number overlapped. Letters U and L also mean upper loading and lower loading, respectively.

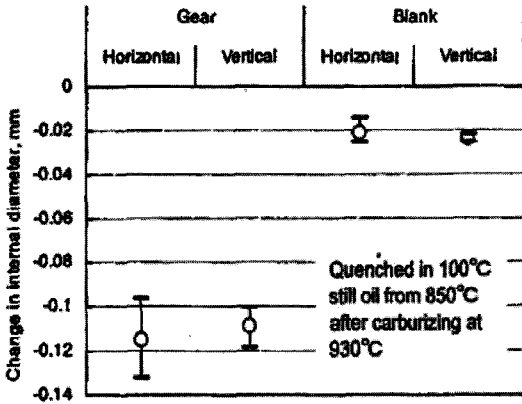
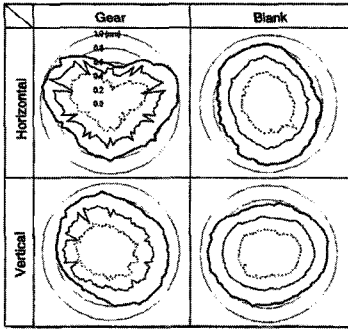


Fig. 7. Change in internal diameter of carburized output gear.



(Quenched in 100°C still oil from 850°C after carburizing at 930°C)

Fig. 8. Change in back flatness of carburized hypoid gear. Bold lines, narrow lines and broken lines denote flatness in outermost, intermediate, and inside circumference, respectively. The greater the outside spreading of the three circles shown in bold, narrow, and broken lines is, the worse the back flatness is.

자세가 크게 영향을 미친다. Fig. 6(a), (b)는 소입 시 기어 선단부(a부)와 중앙부(b)의 표면 냉각곡선을 횡방향과 종방향으로 설치한 경우에 서로 비교한 것이다. 종방향으로 설치(Fig. 6(b))한 경우가 셋팅 위치(U, L)나 부위(a, b)에 따른 온도차이가 적은 것을 알 수 있다.

이러한 이유 중의 하나는 종방향으로 설치한 경우는 수직방향에 오일 흐름에 대한 상호간섭이 적고 또 표면에 발생한 증기가 상부로 잘 나갈 수 있어 결과적으로 증기막이 붕괴하는 타이밍 차이가 적게 되는 현상이 발생하기 때문으로 생각된다. 증기막 단계를 제어하는 유면압(油面壓) 제어에 의해 증기막 및 이의 붕괴를 균질화시킬 수 있으면 변형의 감소

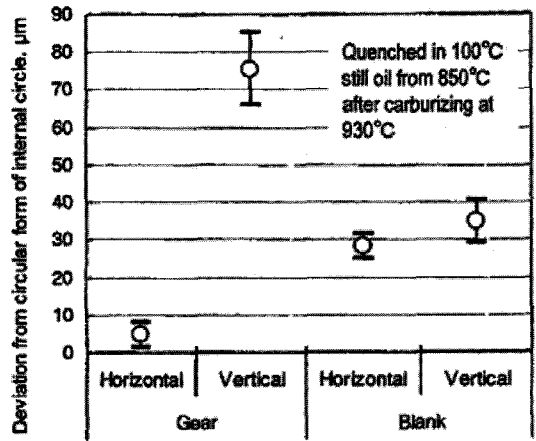


Fig. 9. Deviation from circular form of internal circle of carburized hypoid gear.

와 안정화가 이루어질 수 있다고 생각된다. 변속기용 아웃풋(Output) 기어(외경; 77 mm, 모듈; 1.77, SCr420H) 및 하이포이드 기어를 사용하여 930°C에서 침탄 후(CP = 0.85%), 100°C 오일(JIS 2종 1호)에 소입 하였다. 그리고 형상에 의한 영향을 보다 자세히 조사하기 위해 각각 절삭한 기어 재료(이하 블랭크 재)도 같이 실험하였다. 아웃풋 기어의 내경 변화량을 Fig. 7에 나타내었다. 횡방향 또는 종방향에 대한 설치의 차이는 거의 없지만 블랭크(blank) 재에 비해 절삭한 기어(완성품)의 변화량은 상당히 큰 것을 알 수 있다. 하이포이드 기어도 기어의 절삭에 의해 소입 후의 배면평면도 변화량이 크게 된다(Fig. 8).

단, 이러한 경향은 하이포이드 기어에서는 횡방향 설치의 경우만 뚜렷하게 나타나며, 종방향 설치의 경우는 명확하지 않다. 또 하이포이드 기어의 내경 진원도는 절삭한 기어의 경우, 횡방향과 종방향의 차이가 크지만 블랭크재에서는 이러한 차이가 거의 나타나지 않고 있다(Fig. 9). 이와 같이 부품형상과 소입 자세는 소입변형에 크게 영향을 준다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 10(a), (b)는 두 개의 기어 양쪽에 한 개당 10~12 곳에 열전대를 삽입시켜 소입온도로부터 냉각곡선을 실제 측정하고, 이러한 10~12 점 사이의 최대 온도 차이에 대한 시간 추이를 나타낸 것이다.

종방향 설치의 경우는 아래쪽(lower), 횡방향(side) 및 위쪽(upper)의 세 곳을 측정하였고, 횡방향 설치

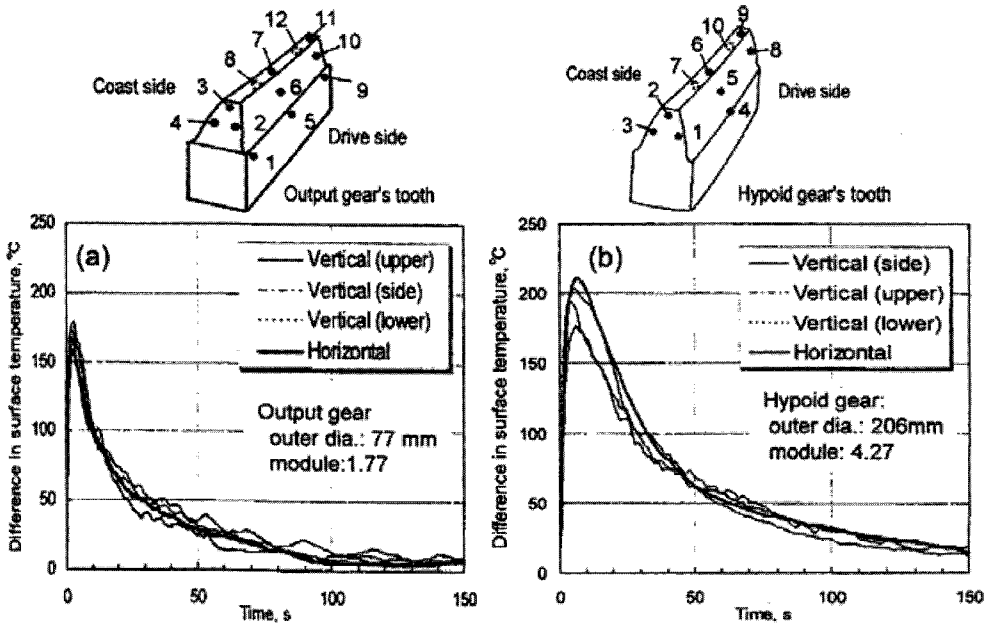


Fig. 10. Maximum temperature difference among ten or twelve positions (No.1 through 10 or 12 illustrated on top) at the tooth surface during cooling as a function of cooling time; (a) output gear, (b) hypoid gear.

의 경우는 한 쪽만 측정하였다. 어느 기어의 경우도 자세에 의해 냉각속도는 기어 선단부((a) No. 3, 11; (b) No. 2, 9)가 가장 빠르고, 기어 저부나 피치 접이 가장 늦게 나타나 있다. 이 때 생기는 온도 차이는 크기가 작은 아웃풋 기어에서는 소입 후 4s(온도 차이; 160~215°C)이고, 큰 기어인 하이포이드는 8s(온도 차이; 175~215°C)로 최대가 됨을 알 수 있다. 또 아웃풋 기어에 비해 하이포이드 기어는 평활하게 설치할 경우에 온도 차이가 크며, 종방향으로 설치할 경우에도 각 치간(齒間)의 차이가 큰 것을 알 수 있다. 이와 같이 온도 차이가 클수록 당연히 기어변형이나 변형의 편차가 크게 된다. 변형과 변형의 편차를 줄이기 위해서는 각 부위의 냉각을 될 수 있는 한 균질하게 하여 소입하는 것이 중요하다.

### 5. 용융염 2단 소입

교정소입을 제외하면 최근에는 소입변형을 감소시키고 안정화하기 위해 고온의 오일에서 소입하거나 또는 마르켄칭을 응용한 용융염 2단 소입 및 QSQ (Quick Slow Quenching)법을 광범위하게 적용시켜

큰 성과를 얻고 있다. 최근에는 진술한 1조 3단 소입 법[6]이 직경이 큰 하이포이드 기어의 프레스 소입(Press quenching)을 없애는데 큰 공헌을 하였다. 그리고 최적의 냉각곡선을 얻을 수 있는 유염압 제어의 감압(減壓)소입 법[8]도 일부 채용하고 있다. 자동변속기 기어가 채용된 지 벌써 15년이 경과하였지만 아직도 가장 우수한 효과를 얻고 있는 용융염 2단 소입 법[9]에 대하여 간단히 소개한다. 용융염의 오일과 가장 큰 차이점은 비점이 약 950°C로 높기 때문에 증기막이나 비등단계가 존재하지 않아 고온에서의 냉각이 안정하며 냉각속도가 비교적 빠르다는 것이다. Fig. 11의 (a), (b)[10]는 헬리컬 기어(모듈; 2.25, 기어 수; 50, 나사각; 23°, SCr420H)의 침탄 소입변형을 100°C의 오일 소입과 220°C의 염(50% KNO<sub>3</sub>, 50% NaNO<sub>3</sub>) 소입을 비교한 결과이다. 용융염 소입은 오일 소입(JIS 2종 1호)에 비해 인접 피치의 오차변화량을 40~60% 감소시키고 또 기어의 치근(齒筋) 오차 변화량에서도 평균변화량이 약 반으로 감소할 뿐 아니라 편차 폭도 적어지는 것을 알 수 있다. 그러나 부위에 따른 두께 차이나 표면적이 큰 부품은 충분한 효과가 얻어지지 않는 경우가 생긴다. 그래서 220°C의 염욕에서 꺼낸 후 냉각

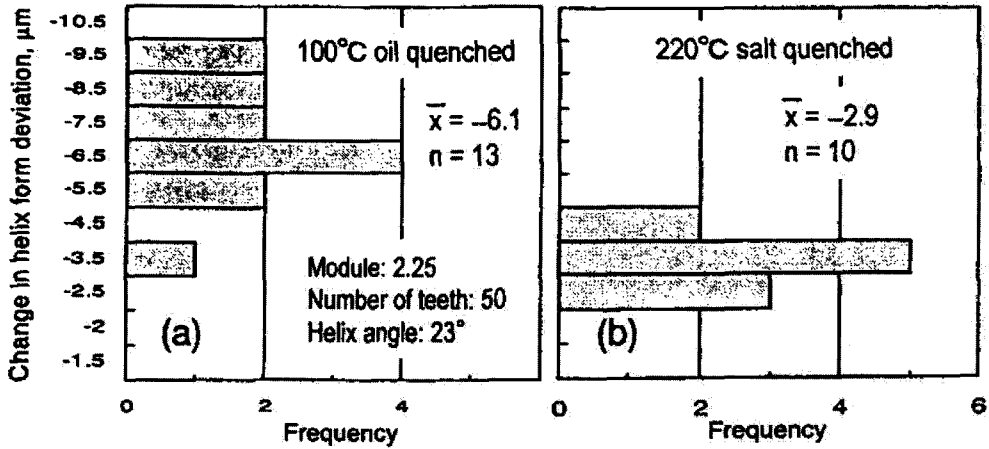


Fig. 11. Comparison of change in helix form deviation of carburized helical gears after quenching between in 100°C oil (a) and in 220°C molten salt (b).

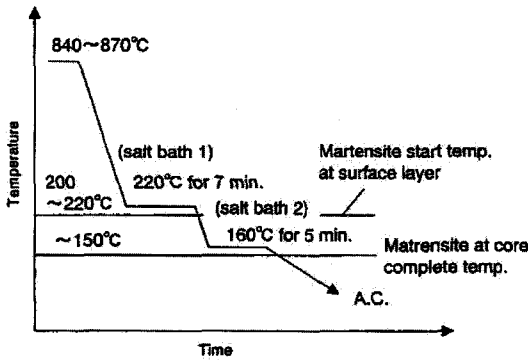


Fig. 12. Schematic explanation of improved marquenching method by using two-stage molten salt baths.

을 제어하는 목적으로 다시 저온(150~170°C)의 염욕에 침적시켜 2단계로 생각하는 개량형 마르켄칭법 [1, 10](Fig. 12)이 고안되었다.

실제의 변속기 기어를 사용한 침탄소입변형을 Fig. 13[1, 10]에 나타낸다. 이것은 하나의 예로서 기어의 치형 변화량을 조사한 결과지만, 변화량 및 편차 모두 염욕에서 2단 소입 한 경우가 가장 우수한 것을 알 수 있다. 단, 열처리 치구의 형상이나 소입조(燒入槽)의 교반조건도 예전의 오일 욕과는 별도로 최적화가 필요한 것은 말할 나위 없다. 그런데 침탄질화 처리는 최근 기어의 내피치성 개선을 목적으로 고농도(0.4~0.7%)의 N을 침입시키는 공법[11]이 사용되고 있다. 이와 같은 침탄질화법에서 총 침입 N량이 0.6%(C량은 0.7%)의 경우, 통상적인 50~100°C의

오일 소입에서 고농 N의 농도는 약 0.25%가 된다 [12]. 따라서 표면 C량을 0.6% 정도 억제시키면 고용 [C+N] 량이 약 0.85%가 되고 또 표층부의 Ms 온도는 통상적인 침탄(0.8~0.9%)의 경우와 거의 동일한 190~210°C가 된다. 소입변형에서는 N의 고용에 의해 소입성이 향상되기 때문에 변형량이 크게 되는 것으로 생각되지만, 실제 염욕 2단 소입의 경우는 동일한 소입온도에서 소입해도 침탄과 거의 차이가 없는 결과를 얻고 있다[13]. 이와 같이 용융염에서 소입하면 가격 및 환경면(폐수처리)의 문제를 포함해도 열처리 변형의 측면에서 고려해 보면 매력적인 공법이다. 앞으로는 2단 오일 소입의 응용과 더불어 액면압(液面壓) 제어에 의한 증기막과 비등단계의 제어법을 적용하는 기술개발이 요구되고 있다.

### 6. 열처리 변형감소 및 안정화를 위한 접근

예전은 침탄소입변형의 복잡한 원인을 정확하게 표현하기 어려웠기 때문에 부품 및 열처리 설비 등에서 시행착오를 많이 반복하여 허용범위로 억제하는 조업조건을 찾아내었다. 그렇지만 앞으로 생산되는 고기능화, 고정밀화 부품 및 복잡 형상 부품이나 일체형 부품 등에는 쉽게 대처하기 어렵다. 이와 같은 요구에 부응하기 위해서는 우선 열처리 변형의 주요 원인과 그 기여도를 명확히 파악하고 발생 메커니즘

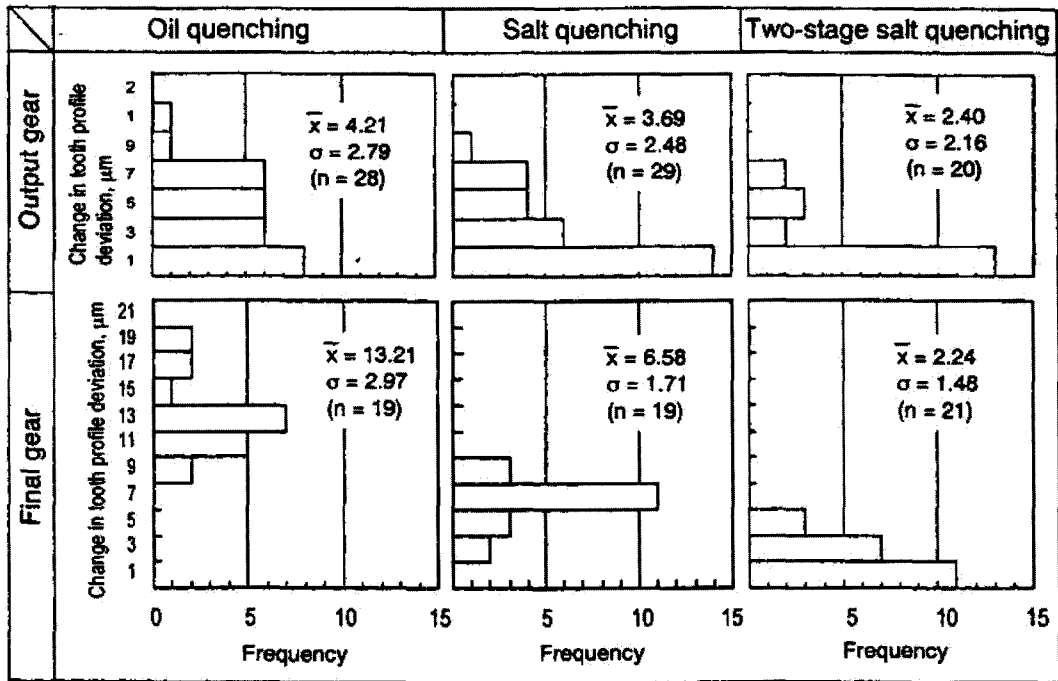


Fig. 13. Comparison of change in tooth profile deviation of carburized output gear and final gear after quenching between in 100°C oil, 220°C salt, and two-stage salt (improved marquenching method).

을 해명 할 필요가 있다. 열처리 시뮬레이션은 열처리 품질의 높은 정밀도 예측 뿐 아니라 이의 해석 도구로도 매우 유효하다. 특히 실험에서 재현할 수 없는 침탄 및 침탄질화 과정과 가열 및 냉각 과정을 10<sup>-3</sup>s나 이 이하의 시간 간격으로 모사할 수 있는 것이 가장 큰 매력이다. 한편, 열처리 현장에 쌓여 있는 Know-how를 객관적인 데이터로 취급하여 데이터베이스화 및 디지털화 하여 데이터 마이닝(Data mining) 할 수 있도록 하는 것도 유효하다. 이와 같이 지식 관리적인 취급에 의해 임팩트 데이터(Impact data)는 부품형상, 강제 및 가공열처리 조건에, 그리고 출력 데이터는 열처리 변형으로 셋팅하여 정보화하고 또 정성적인 현상을 최대한 정량화 하는 것이 중요하다.

### 7. 결 언

침탄 및 침탄질화 소입의 변형, 특히 이의 편차는 부품의 형상이나 이와 연관된 소입자세에 의해 크게 영향을 받는다. 이것은 냉각의 불균일성에 대한 대책

이 매우 중요하다는 것을 의미한다. 냉각 불균일성의 개선은 부품형상(특히 모서리 형상)이나 소입자세의 최적화 뿐 아니라 표면성상(표면조도, 산화층)이나 냉각제의 개선까지 거슬러 올라가지 않으면 안 된다. 여기서 소개한 2단 염욕 소입은 이와 같은 관점에 입각한 냉각제 개선의 한 예에 지나지 않는다. 오일에 대한 연구도 최근 급속히 진행되어 냉각 불균일성의 최대 요인인 증기막과 비등단계의 제어도 실시하고 있다[14]. 또 진공침탄 및 침탄질화와 조합한 것으로, 구주지역에서 급속히 확장되고 있는 10~20 bar의 고압가스에 의한 소입도 주목받고 있다. 가스 소입은 냉각능을 제어하기 쉬운 반면, 냉각조건의 최적화는 어렵다. 덧붙여 말하면, 국내에서 10 bar 이상의 압력기준을 엄밀하게 지키는 일이나 현재 확대 사용하고 있는 붕소강의 소입성이 충분하지 않다는 과제도 포함하고 있다. 여러 종류의 냉각제에 대한 실 부품의 냉각현상과 열전도율에 대한 자료가 적기 때문에 앞으로는 기초적이고 기반적인 연구개발이 기대된다. 그리고 앞서 설명한 바와 같이 열처리 시뮬레이션의 정밀도 향상을 위하여 지금까지의 학술적



연구와 더불어 실제의 부품에 대한 응용을 고려한 발전적인 개발 연구가 요구된다. 그리고 열처리 현장에서의 수많은 Know-how를 과학적으로 접근하여 데이터베이스화 및 디지털화 시키는 노력도 필요하다.

### 참고문헌

1. 上野完治, 渡邊陽一 : 第3回冷却能評價法研究部會資料 12月 (1995)
2. 素形材センタ : 研究調査報告 569, 2001年度-産業技術基盤強化基礎調査研究-熱處理 CAEの調査報告書, (財)素形材センタ-, (2002) 69.
3. 日産自動車(株) 社内資料.
4. 渡邊陽一, 成田直樹 : 焼入れと組織制御研究部會, 塑性工學部門委員會材料データベース研究分科會-研究成果合同發表會資料 (2001) 18.
5. 渡邊陽一, 成田直樹 : 第 53回 日本熱處理技術協會講演大會講演概要集 (2001) 57.
6. Y. Shimosato, T. Matsuura and H. Nakatsu : Proc. of The 2nd Asian Conference on Heat Treatment of Materials, (2001) 352.
7. 淺野晋司, 渡邊陽一, 下里吉計, 松浦俊幸 : 第 53回 日本熱處理技術協會講演大會講演概要集 (2001) 55.
8. 朝田 繁 : 熱處理テクニックの基礎と新しい熱處理技術 11-1 (1989)
9. 藤田博文, 田中敏行 : 第 26回 日本熱處理技術協會講演大會講演概要集 (1989) 11.
10. 田中敏行 : 第 7回 熱處理技術活性化セミナー講演資料, 東部金屬熱處理工業組合主催 (2003)
11. 渡邊陽一, 成田直樹, 村上陽一 : 日産技報, 50 (2002) 68.
12. 渡邊陽一, 成田直樹, 三島良直 : 熱處理, 40 (2000) 18.
13. 渡邊陽一 : 第 24回 熱處理研究會, 出光興産(株) 主催 (2001)
14. 市谷克實 : 熱處理, 42 (2002) 341.