

침탄치차의 잔류응력추정 및 잔류응력을 고려한
응력확대계수에 관한 연구

A Study on Estimation of Residual Stress in Carburized Spur Gears
and Its Effect on the Stress Intensity Factor

류 성 기*

Sung-Ki Lyu

(1997년 3월 14일 접수, 1997년 9월 20일 채택)

ABSTRACT

This paper deals with the residual stress of carburized spur gears is calculated being on the assumption that the main cause of residual stress is the volume difference between case and core due to the martensitic transformation in cooling. A formula is proposed to estimated the residual stress from the hardness and the amount of retained austenite. The estimated residual stress is close to the stress measured by X-ray method.

The estimated residual stress is applied to the analysis of the fracture mechanics of carburized spur gear teeth. The stress intensity factor due to the residual stress is demonstrated. The stress intensity factor is computed by the influence function method, and it is shown that the factor is decreased by the residual stress in Carburized gear tooth.

1. 서론

항공기, 자동차, 선박, 농기계 등의 동력전달 장치에 많이 사용되고 있는 치차는 근대 공업의 발달과 함께 출력 향상을 위한 동력전달의 향상과 그에너지를 관점으로 부터 경량화가 요구되어 지고 있다. 이들의 요구에 부응하기 위하여 고

경도의 신뢰성이 높은 치차설계가 필요하다.

침탄처리에 의하여 생성되는 표면경화층과 압축 잔류응력은 치차의 굽힘피로강도 향상에 큰 영향을 미친다. 침탄처리는 AGMA¹⁾의 추천으로 항공기, 자동차용 치차 등에 많이 사용되고 있는 일반적인 방법이다. Inoue는²⁾ 굽힘피로 강도에 미치는 경도와 잔류응력의 영향을 밝혔

*경상대학교 기계설계학과, 항공기부품연구센터

고, 강도계산을 위하여 실험적 추정식을 제안했다. 피로강도의 추정식은 AISI 9310 침탄치차³⁾를 포함하여 많은 피로시험결과와 비교한 결과 입증되었다.

상기의 실험식을 치차의 굽힘강도계산에 적용하기 위해서는 표면경도, 심부경도, 잔류응력 등을 알아야만 한다. 잔류응력은 X선회절법등으로 측정할 수 있다. 그러나, 치차의 크기에 따라 인접 이를 제거하지 않으면 측정할 수 없는 경우가 많으며, 인접 이를 제거할 때 측정부위의 잔류응력이 영향을 받아 편차가 상당히 크게 나타나고 있다. 따라서 잔류응력에 미치는 침탄처리조건의 영향을 밝히고, 피로강도추정식을 이용하기 위해서는 간편한 잔류응력추정법을 구하는 것이 중요할 것으로 사료된다.

강의 열처리에 의한 잔류응력은 냉각할 때 표면층조직과 내부조직의 열적수축과 변태팽창이 냉각속도에 따라 서로 다르기 때문에 야기되는 침탄처리조직의 비응적 상위 때문에 생성된 것으로 사료된다. Inoue^{4,5)}는 열처리 과정에서 일어나는 상변태의 체적변화를 선팽창계수의 온도·냉각속도에 의존한다고 가정하여 해석법을 제안하고 환봉의 잔류응력을 구하였다.

Fujio⁶⁾도 같은 방법으로 치차의 열처리 변형과 잔류응력을 구하였다. 이들의 방법은 이론적이지만 해석을 하기 위하여 냉각곡선을 구하는 측정법이 용이하지 않았다. Kojiya⁷⁾와 Yonetani⁸⁾는 잔류오스테나이트등의 영향을 고려하여 침탄처리봉의 잔류응력을 계산하여 측정값에 근사한 결과를 얻었다.

본 연구에서는 침탄치차의 잔류응력을 표면층조직과 심부조직의 비응적의 상위에 기인한다고 가정하여 SCM415 평치차의 경도와 탄소함유량의 관계를 구하였다. 이 관계를 이용하여 경도분포로부터 비응적을 추정하여 초기변형을 가지는 평면문제로서 유한요소법을 이용하여 잔류응력을 계산하는 방법을 제안하고자 한다. 그리고 잔류응력의 추정값과 X선회절법에 의하여 측정된 측정값을 비교하여 본 연구에서 제안한 잔류응력 추정방법의 타당성에 대하여 고찰하고자 한다.

또한 균열진전문제를 취급하는 기초로서, 침

탄치차의 응력확대계수를 계산하고, 잔류응력이 응력확대계수에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

2. 탄소함유량의 추정

침탄경화층의 조직을 마르텐사이트와 잔류오스테나이트가 혼합된 상으로 가정한다. 마르텐사이트, 오스테나이트, 세멘타이트를 포함한 페라이트 비응적 v_a, v_γ, v_o [cm^3/g]는 탄소함유량 C [%]의 함수로 다음 식과 같이 나타내고 있다⁹⁾.

$$\begin{cases} v_a = 0.1271 + 0.0027C \\ v_\gamma = 0.1212 + 0.0033C \\ v_o = 0.1271 + 0.0005C \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

잔류오스테나이트 γ 를 포함한 마르텐사이트의 평균비응적은 다음 식으로 주어진다.

$$v = \frac{100-\gamma}{100} v_a + \frac{\gamma}{100} v_\gamma \dots\dots\dots (2)$$

열처리전의 비응적은 v_o 라 하면, 체적팽창율 δ 는 다음 식과 같다.

$$\delta = \frac{v}{v_o} - 1 \dots\dots\dots (3)$$

위의 식으로부터 $\delta/3$ 가 되는 초기변형을 갖는 평면문제의 해로써 침탄치차의 잔류응력분포를 구할 수가 있다.

비교적 측정이 용이한 경도로부터 치차내의 탄소함유량, 비응적의 분포를 추정하기 위하여 굽힘피로시험용 SCM415 평치차 이뿌리 위험단면에서의 탄소함유량 C , 경도 $H[Hv]$ 를 EPMA와 마이크로비커스 경도계를 이용하여 측정하였다. 유효침탄깊이 $d_{eff}=0.9mm$ 의 치차에서 측정된 탄소함유량 C , 경도 H 의 측정결과를 Fig. 1에 나타냈다. Fig. 1의 굵은실선의 곡선 위를 지나가는 다수 측정값의 깊이에서 탄소함유량 C 와 경도 H 값을 읽어 Fig. 2에 플로트하였다. 같은 방법으로 $d_{eff}=0.6(6A), 1.3(13A)$ 의 시험치차에서 측정된 결과²⁾도 Fig. 2에 플로트하였다. 탄소함유량과 경도의 관계에 미치는 유효침탄깊이는 크지 않기 때문에 이들의 관계를 Fig. 2에 굵은실선으로 나타내었고, 다음과 같은 관계식을 구하였다.

$$\begin{cases} C = 0.131 \exp(3.0 \times 10^{-6} H^2) & (H < 700) \\ C = 0.103 \exp(3.5 \times 10^{-6} H^2) & (H \geq 700) \end{cases}$$

..... (4)

Fig. 1 (b)로부터 알 수 있듯이 본 연구에 사용한 시험편의 경도분포에서 표면으로부터 0.2~0.3mm의 깊이에서 최대경도값이 나타났고, 표면에서는 다소 감소하는 경향으로 나타났다. Fig. 2의 가상실선은 탄소함유량과 경도측정에서 오차의 범위를 나타내고 있다. 본 측정결과는 침탄처리 치차의 열처리 상태를 고려하면 AGMA¹⁾에서 나타난 95% 마르텐사이트의 곡선과 근사하게 나타났다. SCr22 침탄환봉을 이용한 Kojiya⁷⁾의 측정값은 C<0.6%에서는 본 실험값과 거의 일치하였다. Fig. 2에서는 100% 마르텐사이트 탄소강의 최고경도를 측정된 Burns¹⁰⁾의 결과도 함께 나타냈다.

Fig. 1 (b)에 나타난 바와 같이 표면으로부터 깊이방향의 경도를 마이크로 비커스 경도계를 사용하여 측정된 결과 40~50 μ m 이하 극표면의 경도는 측정할 수 없기 때문에 시험치차의 이틀 약 20° 경사로 절단하여 극표면의 경도를 측정해 본 결과 Fig. 3에 나타난 바와 같이 표면가까이에서는 표면이상층의 영향으로 사료되는 경도가 저하하는 영역 I이 확인되었다. 이와 같은 영향을 고려하여 경도분포식을 Fig. 3에 도시한 바와 같이 I, II, III영역으로 나누어 경도 H [Hv]를 나타내는 식을 다음과 같이 구하였다.

$$\begin{cases} H = (H_1 - H_3) \exp[-A(d - d_1)^2] + H_3 \\ A = -\frac{1}{d_1^2} \ln\left(\frac{H_0 - H_3}{H_1 - H_3}\right) \quad (d \leq d_1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} H = (H_1 - H_3) \exp[-A(d - d_2)^2] + H_3 \\ A = -\frac{1}{d_1^2} \ln\left(\frac{H_1 - H_3}{H_2 - H_3}\right) \quad (d_1 < d \leq d_2) \end{cases}$$

$$A = -\frac{1}{(d_{eff} - d_2)^2} \ln\left(\frac{550 - H_3}{H_2 - H_3}\right)$$

(d > d₂) (5)

여기에서 H₀는 표면경도, H₁, d₁은 이상층의 영향으로 경도가 저하하는 깊이와 그때의 경도, H₂, d₂는 최대경도와 최대경도를 나타내는 깊이, H₃는 심부경도, d_{eff} [mm]는 유효침탄 깊이(550Hv)를 의미한다. 탄소함유량 C의 깊이방향분포를 경도 H와 함께 Fig. 4 (a)에 도식적으로 나타냈

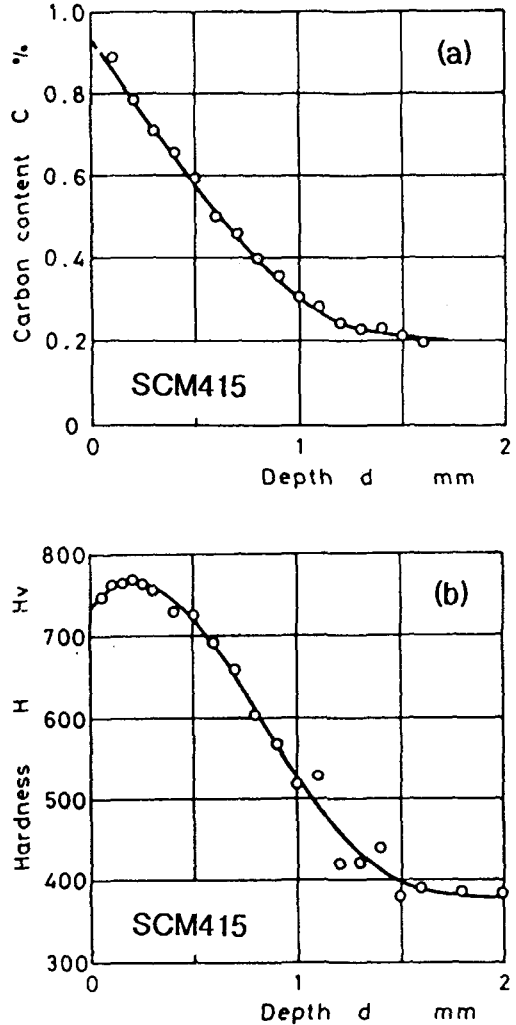


Fig. 1 Carbon content(a) and hardness(b) distribution of carburized gear tooth

다. 침탄치차의 경우 탈탄작용에 의하여 표면이상층이 생성되며, 탄소함유량은 표면에서 감소하므로 표면에서의 함유량 C₀를 탄소함유량의 실험식에 표면경도를 대입하여 구하면 탄소량과 경도의 관계는 Fig. 4 (b)에 나타난 곡선3(심부)-2-1'-0과 같이 나타낼 수 있다.

3. 잔류오스테나이트의 변화

유효침탄깊이 0.9mm의 침탄치차를 X선회절

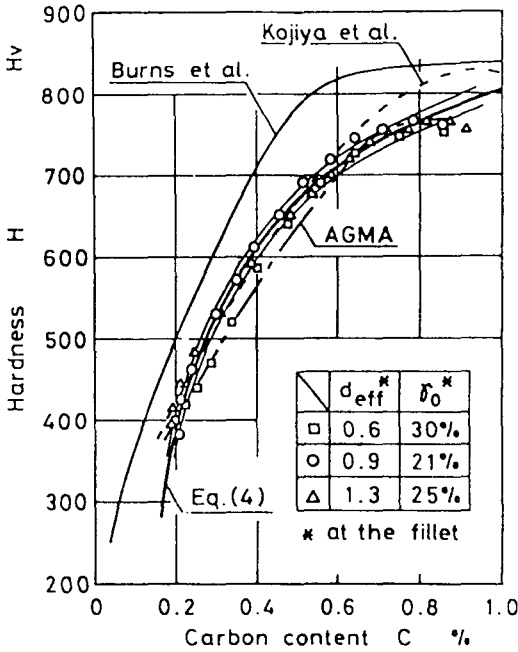


Fig. 2 Related between hardness and carbon content

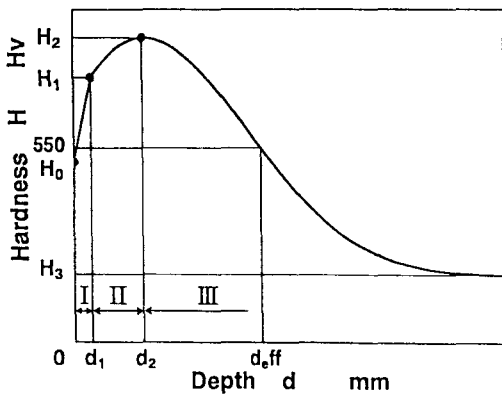


Fig. 3 Symbols in relation to the hardness distribution

법으로 측정된 잔류오스테나이트 분포를 Fig. 5에 나타냈다. 최대 잔류오스테나이트값은 약 21%로 나타났다. 실험에서 측정된 잔류오스테나이트 분포는 근사적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma = \begin{cases} \gamma_m \cdot \frac{d}{d_m} & d \leq d_m \\ \gamma_m \exp\left(-2.30 \frac{d-d_m}{1.5d_{eff}}\right) & d > d_m \end{cases} \quad (6)$$

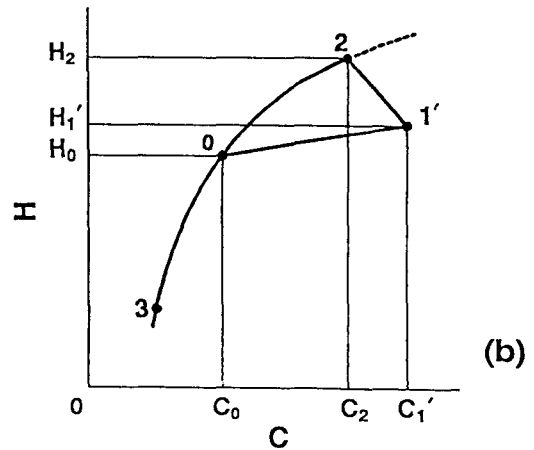
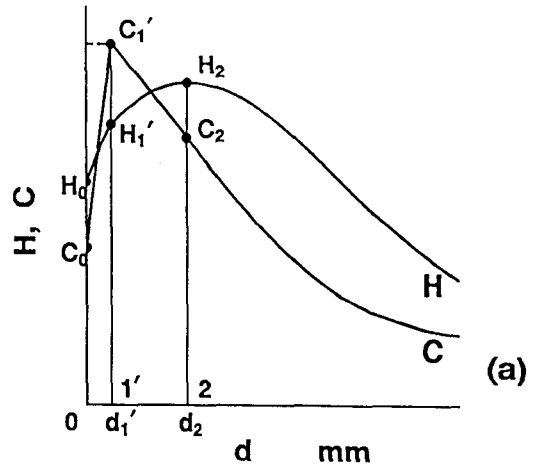


Fig. 4 Symbols in relation to the hardness distribution(a) and assumed relation between hardness and carbon content(b)

여기에서 γ_m [%], d_m [mm]은 잔류오스테나이트의 최대값과 그때의 깊이를 의미한다. Fig. 5에는 쇼트피닝침탄처차(CSP1, CSP2, CSP3)의 측정값¹¹⁾과 식(6)에 의한 잔류 오스테나이트 분포곡선도 함께 나타냈다.

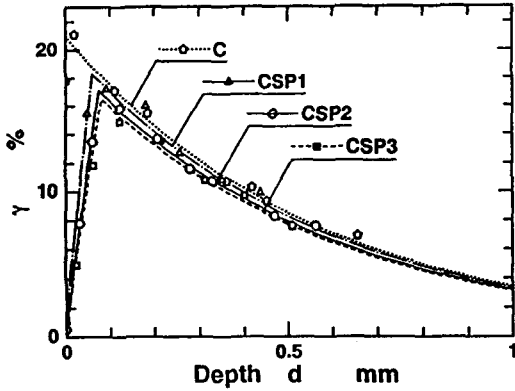


Fig. 5 Retained austenite distribution of carburized spur gear

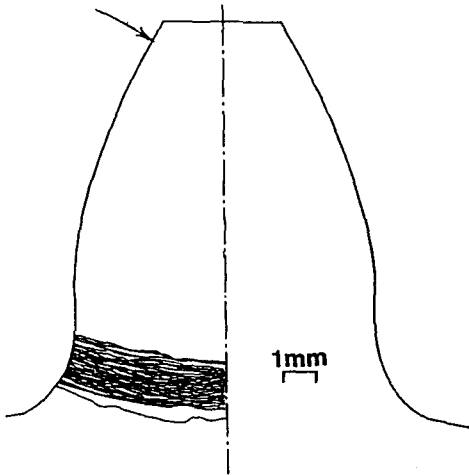


Fig. 6 Shape of crack propagation

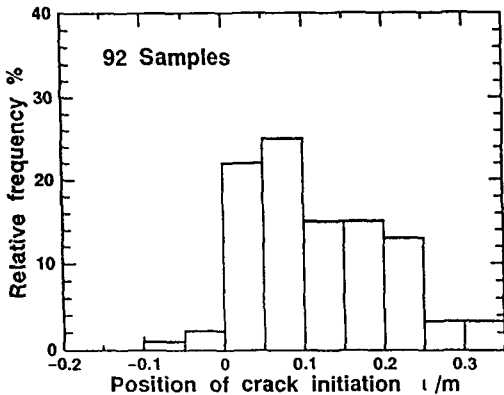


Fig. 7 Relative frequency of crack position

4. 잔류 응력 계산 및 고찰

균열 진전해석등에서 필요로 하는 응력확대 계수는 균열이 발생하여 진전하는 곳에서 구하기 때문에 시험치차의 균열 발생위치와 빈도를 정리하여 Fig. 6, 7에 나타냈다. Fig. 7의 횡축은 Hoffer 30°의 위치를 원점으로 하여 이끝방향을 정으로 하여 이뿌리 위험단면의 필렛길이 l 을 모듈 m 으로 무차원화한 값으로 나타냈다. 균열이 관찰된 $l/m = -0.15 \sim 0.35$ 를 10등분하여 빈도를 나타냈다. Fig. 7의 결과로부터 균열이 중앙 $l/m = 0.11$ 의 위치에서 발생하기 쉬운 영역임을 알 수 있었다. 또한 Fig. 6에서 알 수 있듯이 이뿌리 위험단면에서 균열의 형상을 관찰해 본 결과 표면에서 약 3mm의 깊이까지는 거의 직선으로 나타났기 때문에 요소분할은 Fig. 8과 같이 분할하였다. 잔류응력의 계산흐름도를 Fig. 9에 나타냈다.

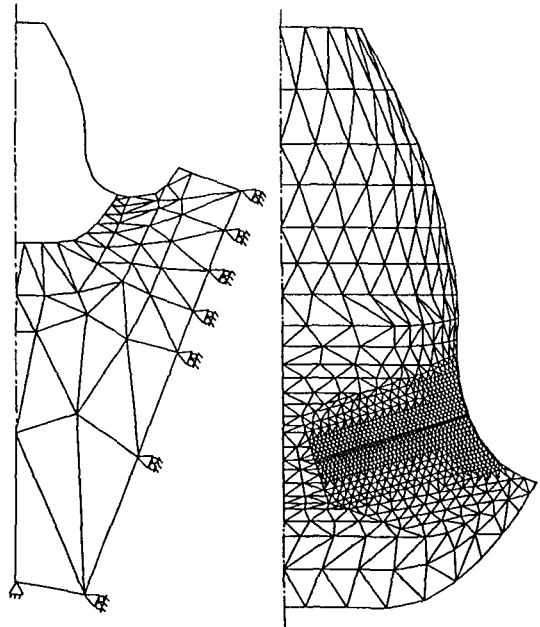


Fig. 8 Pattern of mesh and boundary conditions in the finite element

계산에는 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 $H_0, H_1, H_2, H_3, d_1, d_2, d_{eff}, \gamma$ 를 입력 데이터로써 식(5), (6)으로부터 요소 도심의 경도와 잔류오스테나

이트를 추정하고, 식(4)으로부터 구한 탄소함유량을 사용하여 비용적을 계산하였다. 본 연구에서 제안한 잔류응력 추정법에 의해 계산한 계산값과 X선회절법²⁾에 의하여 측정된 측정값의 비교를 Fig. 10에 나타냈다. 잔류응력측정은 Shimadzu계 SMX-50 Crk α 선을 사용하여 포물선 근사법으로 구하였다. Fig. 10에서 알 수 있듯이 계산값은 측정값에 근사한 값으로 나타났다. 다소 오차가 나타난 것은 전해연마를 해가면서 깊이방향의 잔류응력을 측정할 때 연마량과 연마의 정도에 따른 편차일 것으로 사료된다.

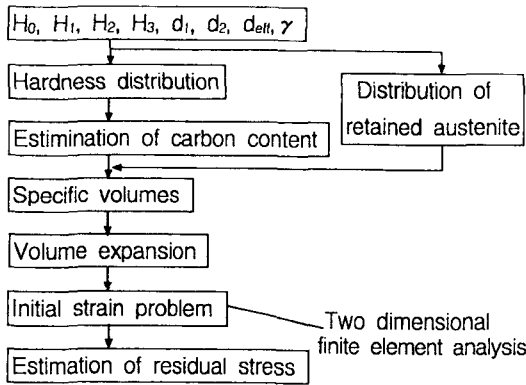


Fig. 9 Procedure of the calculation

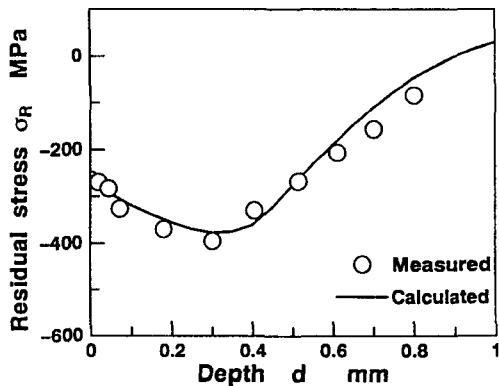


Fig. 10 Comparison of the estimated residual stress with the measured stress by X-ray method

5. 응력확대계수

본 연구에서 사용한 치차는 이나비가 작고, 측면에 동도금을 하여 측면으로부터 침탄이 방

지되었기 때문에 이나비방향의 재질은 거의 균질하다.

실제, 피로시험에서 파손한 이를 관찰해 보면 균열전후는 거의 직선과 근사하다. 따라서 2차원 선형파괴역학을 적용함으로써 본 연구에서는 영향함수법^{13,14)}을 이용하여 응력확대계수를 계산하였다. Mode I의 응력확대계수 ΔK_I 는 다음 식에 의하여 구하여진다.

$$\Delta K_I = \int_0^a f(x, a, \text{geometry}) \sigma_y(x) dx \dots (7)$$

여기에서, $\sigma_y(x)$ 는 균열에 수직인 방향의 응력이며, 부하에 의한 응력과 잔류응력의 합을 이용한다. 영향함수 f 는 균열길이 a 와 기하학적 형상으로부터 얻어지는 스트레인 에너지를 이용하여 다음과 같이 나타내어진다.

$$f = \frac{1}{2} \left(\frac{1-\nu}{E} \cdot \frac{\partial U}{\partial a} \right)^{-1/2} \frac{\partial w}{\partial a} \dots (8)$$

단, U 는 임의하중에서의 균열길이 a 를 가진 이의 스트레인 에너지이며, w 는 開口變位이다. 또한, E, ν 는 영률과 포아송비이다. 균열면에 수직방향의 단위하중을 이끝에 가하는 경우의 開口變位 w 를 균열길이로 바꾸어 계산하고, 식(8)을 차분근사시켜 영향함수를 얻는다.

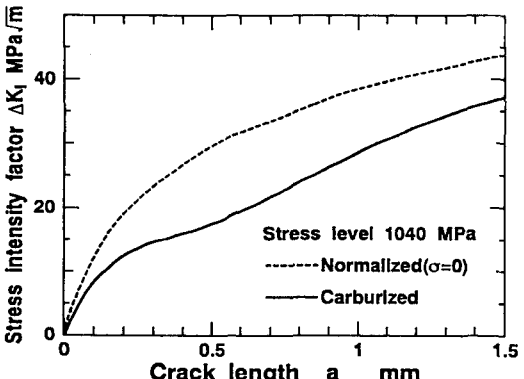


Fig. 11 Effect of residual stress on the stress intensity factor

응력레벨 1040 MPa에서 구한 침탄치차의 응력확대계수 ΔK_I 를 Fig. 11에 나타냈다. 침탄처리를 하지 않는 치차와 비교해보면 잔류응력에 의한 응력확대계수의 감소가 현저하게 나타났는데 이것은 잔류응력의 효과가 크게 나타나고 있

음을 의미한다.

몇 개의 응력레벨에 대응하는 침탄치차의 응력확대계수 계산값을 Fig. 12에 나타냈다. 이들의 결과는 균열진전 시뮬레이션과 수명의 추정을 하는데 중요한 자료로 사용된다.

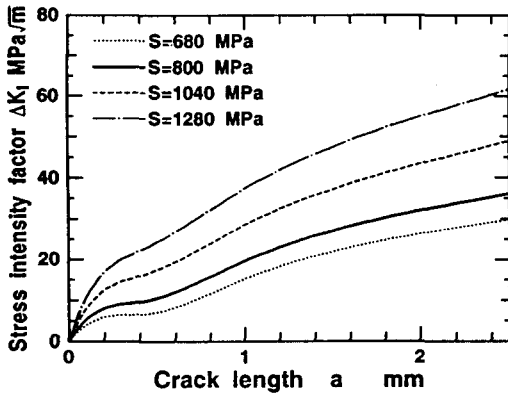


Fig. 12 Stress intensity factor for the carburized spur gear

6. 결 론

본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 잔류응력이 침탄처리의 냉각과정에서 표면층 조직과 심부조직의 비균질의 상위에 의하여 생성된다는 가정을 기초로 침탄치차의 잔류응력추정법을 제안하였다.
- 2) 잔류응력을 추정하는 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 잔류응력 추정방법에 의한 계산값과 X-선 회절법에 의해 측정된 잔류응력을 비교해 본 결과 추정법이 유효하다는 것을 알았다.
- 3) 침탄치차의 응력확대계수는 잔류응력의 효과 때문에 침탄처리를 실시하지 않는 치차의 응력확대계수보다 작게 나타났다.

참고문헌

- 1) AGMA, 246.02A, 1983.
- 2) Inoue, K., Tobe, T., Kato, M., Takatsu, N. and Morita, I., "Bending Strength of Carburized SCM420H Spur Gear Teeth",

Bull. JSME, Vol. 29, pp. 273-280, 1986.

- 3) Inoue, K., Kato, M., "Estimation of Fatigue Strength Enhancement for Carburized and Shot Peened Gears", Propulsion and Power, Vol. 10-3, pp. 562-368, 1994.
- 4) Inoue, T. and Tanaka, K., "Elastic-Plastic Analysis of Quenching with Consideration of Transformation", J. Society of Materials Science, Japan, Vol. 22, No. 234, pp. 218-223 (in Japanese), 1973.
- 5) Yamaguchi, T., Wang, Z.-G. and Inoue, T., "Analysis of Temperature, Metallic Structure and Stress in The Course of Quenching of a Gear", J. Society of Materials Science, Japan, Vol. 33, No. 370, pp. 814-820 (in Japanese), 1984.
- 6) Fujio, H., Aida, T. et al., "Distortions and Residual Stresses Caused by Hardening", 1st Report, Trans. Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 42, No. 364, pp. 4026-4032 (in Japanese), 1976.
- 7) Kojiya, M., Komura, J. and Awazu, S., "Estimation of Residual Stress Distribution in Case-Hardened Steel Bars", Trans. Japan society of Mechanical Engineers. Vol. 38, No. 312, pp. 1961-1967 (in Japanese), 1972.
- 8) Yonetani, S., Shinohara, T. and Takahashi, K., "On the Residual Stresses in Carburized and Quenched Steels", J. Japan Institute of Metals, Vol. 44, No. 5, pp. 467-473 (in Japanese), 1980.
- 9) Lement, B. S., Distortion in Tool Steels, American Society for Metals, pp. 39-45, 1959.
- 10) Burns, J. L., Moore, T. L. and Archer, R. S., "Quantitative Hardenability", Trans. American Society for Metals, Vol. 26, pp. 1-22, 1938.
- 11) 柳晟基, 井上克己, 加藤正名, "浸炭齒車の曲げ疲労強度に及ぼす表面處理の影響", 日本機

- 械學會論文集, Vol. 60, No. 572, pp. 1391-1396, 1993.
- 12) 島津X線應力測定裝置, SMX-50 取扱説明書, pp. 23-62, 1989.
- 13) Rice, J. R., "Some Remarks on Elastic Crack-Tip Stress Fields", Int. J. Solids Structures, Vol. 8, pp. 751-758, 1972.
- 14) Besuner, P.M., "Residual Life Estimates for Structures with Partial Thickness Cracks", Mechanics of Crack Growth, ASTM STP 590, American Society for Testing and Materials, pp. 403-419, 1976.