

光彈性法에 의한 로터리 경운날의 破壞要因에 대한 解析 — 靜荷重에 의한 應力集中 —

Analysis of the Breaking Factor of Rotary Blade by Photoelastic Method — A Stress Concentration by Static Load —

최 상 인*, 김 진 현*, 김 창 수*, 김 재 열*
S. I. Choi, J. H. Kim, C. S. Kim, J. Y. Kim

Summary

The break of rotary blade is occurred from a stress concentration of the inside of blade by the outside impulsive load. In order to examine its inside stress and stress concentration of rotary blade, a epoxy plate which is suitable to applicate by photoelastic system is used to experiment.

These results are summarized as follow.

1. Refer to the existence of bolt hole and a size of its of rotary blade, a stress concentration which cause the break of rotary blade is not exposed.
2. It is expected to be break to section of hold of rotary blade and the break of this is due to that there are concentrated by shearing force, bending moment and bending stress.
3. When the crack which caused from processing are set up to any location, the stress concentration taken to the creak point.
4. Without regard to the location of the reaction points of rotary blade, the bending stress which is greated than the bending moment is occurred within about 6 cm toward the center line of bolt hole and it was possible to break that section.

1. 緒 論

로터리 경운날에 관한 연구는 경운 토크의 특성과 로터리 경운날의 所要動力, 耕耘抵抗의 특성 또는 역학적 기초동력의 해석이 주종을 이루었다. 로터리 경운날이 토양속으로 회전할때 토크 파형의 성립요소와 저항의 발생위치 및 크기를 이론적으로 근접하여 로터리 경운날의 파괴추정을 하는 것은 아직도 과제로 남아 있다. 로터리 경운날의 개선적

인 측면에 대한 연구는 形狀角에 대한 부분 이외에는 그 연구가 미흡한 편이며 실제로·동력경운기나 소형트랙터는 경운작업시 경운날의 마모가 매우 크고 土壤의 物理的 性質이나 작업조건 및 작업자의 숙련에 따라 파괴되는 양이 대단히 많은 것으로 알려져 있다.

이것은 경운날의 제작상 결함 이외에 경운작업시 土壤과의 충격에서 일어나는 경운날의 内部應力集中現狀에 기인됨을 알 수 있다.

* 상주농업전문대학 농업기계과

이에 본 연구는 기계부품이나 구조물의 내부응력 분포가 외부하중에 따라 증가되는 光學的 무늬수 (Fringe number)로서 내부의 主應力차와 應力集中現狀을 판단할 수 있는 光彈性 實驗法(Photoelastic method)을 이용하여.

1. 로터리 경운날이 받는 應力分布圖와 전단응력선도 및 굽힘 모멘트선도를 작성하여 應力集中現狀을 해석하고,
2. 로터리 경운날의 파괴예상 부분을 규명하며,
3. 경운날을 회전축에 연결할 때 볼트지름의 크기가 응력집중에 미치는 영향을 조사하며,
4. 로터리 경운날의 제작상 결함으로 나타나는 龜裂(Crack)에 대한 應力集中現狀을 해석하므로써 로터리 경운날의 유한 수명설계에 자료로 이용하고자 한다.

2. 기초이론

가. 光彈性 應력해석의 이론식

투명한 에폭시(Epoxy)수지, 유리, 셀룰로이드 등과 같이 光學的 等價 等方體에 응력을 작용시키면 方解石과 같이 광학적 이방성을 나타내어 일시적 復屈折現狀을 일으키고 光波는 두개로 갈라져 시편을 지나는 동안에 光路差를 나타내게 되는데 이것을 光彈性 效果라고 한다. 이 光彈性 效果를 이용하여 물체에 가해진 응력을 구하는 방법이 光彈性 應력해석법이다.

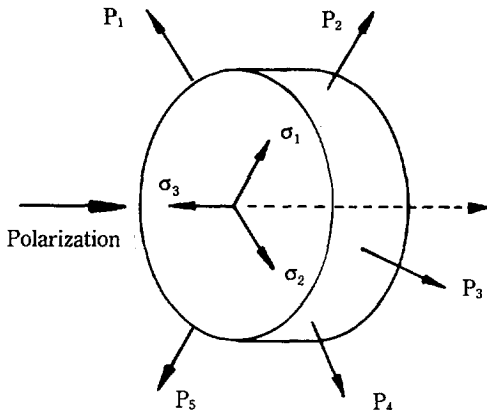


Fig. 1. Vertical projection of the polarization

그림1과 같이 二次元 平面狀態에서 σ_3 의 방향에 片光을 入射시키면 光彈性 效果는 다음의 실험적 사실에 기초된다.

(1) 입사광은 主應力 방향으로 진동하는 두개의 광으로 나누어져서 主應力面을 따라 진행한다.

(2) 두개의 光速度는 主應力에 따라 다음과 같이 다르게 나타난다. 즉,

$$\begin{aligned} n_1 - n_0 &= A\sigma_1 + B\sigma_2 \dots\dots\dots (1) \\ n_2 - n_0 &= A\sigma_2 + B\sigma_1 \end{aligned}$$

여기서

- n_0, n_1, n_2 : 무응력상태, 두 主應力差의 복굴절
- σ_1, σ_2 : 主應力
- A, B: 應力光次數 이다.

식 (1)에서

$$n_1 - n_2 = (A - B) (\sigma_1 - \sigma_2) = C(\sigma_1 - \sigma_2) \dots\dots (2)$$

진공중에서의 光速度를 C라고하고, σ_1, σ_2 방향의 片光速度를 v_1, v_2 라 하면

$$v_1 = \frac{C}{n_1}, \quad v_2 = \frac{C}{n_2} \dots\dots\dots (3)$$

가 된다. 시편의 두께를 d라고하고 시편을 투과한 두 片光의 시간차 (Δt)는

$$\Delta t = \frac{d}{v_1} - \frac{d}{v_2} = \frac{d}{C}(n_1 - n_2) \dots\dots\dots (4)$$

이다. 또한 波長(λ)과 光速度(v)는 $\lambda = \frac{C}{v} = \frac{2\pi C}{\omega}$ 의 관계가 있으며 두 片光의 光路差 (δ)는

$$\delta = \Delta t \cdot \omega = \left(\frac{d}{C}\right) \cdot \omega \cdot (n_1 - n_2) = \frac{2\pi d}{\lambda} (n_1 - n_2) \dots\dots\dots (5)$$

과 같으며 식(5)를 식(2)에 대입하여 정리하면

$$\delta = \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \cdot C\right) \cdot (n_1 - n_2) \dots\dots\dots (6)$$

이 된다. 또한 δ 를 2π 로 나눈 값을 N이라 하면

$$N = \frac{\delta}{2\pi} = \left(\frac{C}{\lambda}\right) \cdot d \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \dots\dots\dots (7)$$

이 된다. $\frac{\delta}{2\pi}$ 는 光波의 상대적 位相差가 0(Zero)이 되는 주기이고 이를 무늬차수(N)라 한다. 식(7)에서 사용한 재료의 光彈性感度(d)를 $\frac{C}{\lambda}$ 로 표시하고 정리하면 식(8)과 같다.

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{N}{\alpha \cdot d} \dots\dots\dots (8)$$

식(8)로부터 무늬차수와 시편의 두께를 측정하여 응력차를 구할 수 있다.

나. 곡선보의 전단력, 굽힘모멘트 및 굽힘응력의 이론식

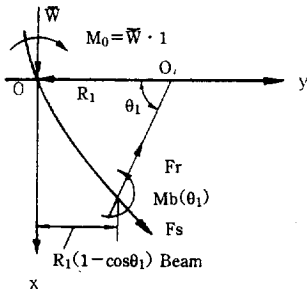
(1) Range $0 < \theta < \theta_1$, $0 < S < R_1 \theta_1$, $S = R_1 \theta_1$ 인 경우

그림 2의 A)에서와 같이

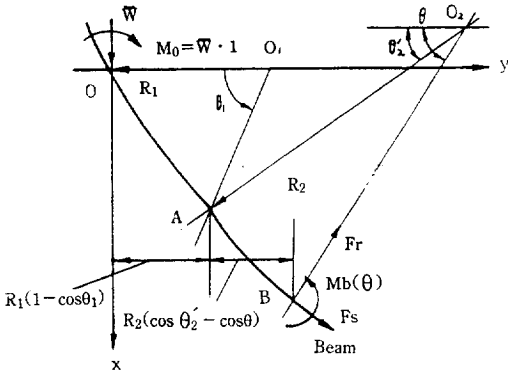
$$\text{전단력 } V = \bar{W} \sin\theta = Fr$$

$$\text{굽힘모멘트 } M_b(\theta_1) = \bar{W}[L + R_1(\cos\theta_1 - 1)]$$

$$\text{굽힘응력 } (\sigma_b)_{\max} = \frac{Mb}{Z}$$



A) One curvature



B) Two curvature

Fig. 2. Theoretical analysis of curvature beam

(2) Range $\theta_2' < \theta < \theta_2''$, $R_1 \theta_1 < S < R_1 \theta_1 + R_2(\theta_2'' - \theta_1)$,

$$S = R_1 \theta_1 + R_2(\theta - \theta_2')$$

그림 2의 B)에서와 같이

$$\text{전단력 } V = \bar{W} \sin\theta = Fr$$

$$\text{굽힘모멘트 } M_b(\theta) = \bar{W}[L_1 - R_1(1 - \cos\theta_1)]$$

$$-R_2(\cos\theta_2' - \cos\theta)], \quad i=1, 2, 3, 4$$

$$\text{굽힘응력 } (\sigma_b)_{\max} = \frac{Mb}{Z}$$

3. 재료 및 방법

가. 시편의 제작과 가공

光彈性 실험법은 모델을 이용한 상사실험이다. 그러므로 실물과 같은 透過性 재료로서 모델을 만들기 위하여 전기로 안에서 그림 3과 같이 먼저 적당한 량의 Araldite를 전기로 내에서 130°C로 계속 약 3시간 가열한다. 이때 완전히 용해시킨 뒤에 경화제를 Araldite와 重量比로 10 : 3이 되게 첨가하여 잘 저어서 완전히 녹인 후 필요한 두께로 만들기 위하여 유리판 위에 수평으로 유지하였다.

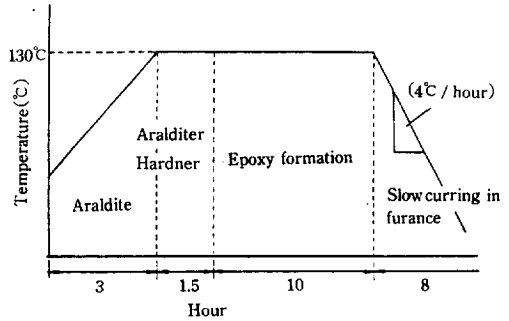


Fig. 3. Epoxy formation cycle

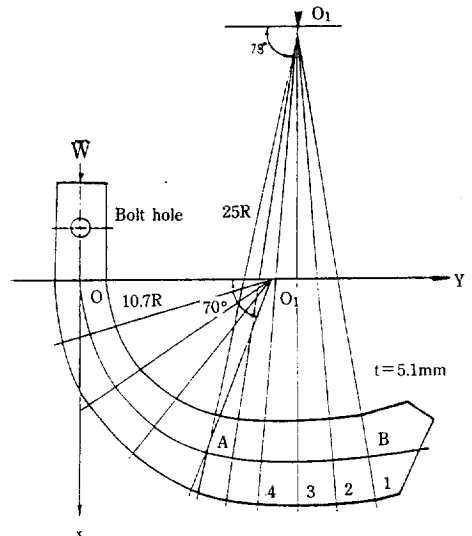


Fig. 4. Model of specimen

그리고 10시간 열 응고 시킨뒤 시간당 4℃로 서서히 냉각시켰다. 이때 냉각시 수축으로 인한 열응력 현상이 없는 깨끗한 에폭시판을 제작하였다. 제작된 에폭시판을 그림 4와 같은 크기로 끝이 굽지 않은 평면형 로터리 경운날을 가공하였다. 시편의 이론해석을 위하여 그림에서와 같이 날의 곡선 부분을 2개의 곡률로 분리하여 각각의 곡률중심을 O_1 과 O_2 로 하여 응력분포를 해석하였다.

나. 하중장치

제작된 시편에 외부 정하중을 주어 시편내부에 발생되는 光彈性 무늬사진을 촬영하기 위하여 그림 5와 같은 하중장치를 이용하였다.

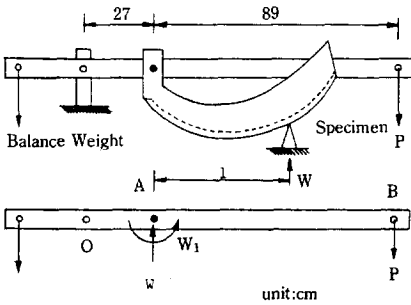


Fig. 5. Loading apparatus used in experiment

그림에서와 같이 작용중심점 O의 좌측에 평행추를 달아 작용중심점 우측의 시편에 회전모멘트와 수직력을 주었다. 평행추는 수직하중을 주지 않을 경우 시편의 회전모멘트가 0(Zero)이 되는 하중을 주었다. 또한 시편은 광학렌즈의 중앙에 위치하도록 설치하였다. 하중 P는 2.5kg으로 일정하게 하였으며 反力點의 위치 L은 16, 14, 12, 10cm로 변화시켜 等色線사진을 얻었다.

다. 광학계

제작된 시편과 하중장치로 光彈性 무늬사진을 촬영하기 위하여 그림 6과 같은 광학계(Optical system)를 이용하였다.

여기서 광원으로는 10W 형광등 30개를 사용하였으며 L1, L2는 집광렌즈, Q1, Q2는 片光板이다. S는 하중장치에 설치된 시편이며 F는 단색광을 얻기 위

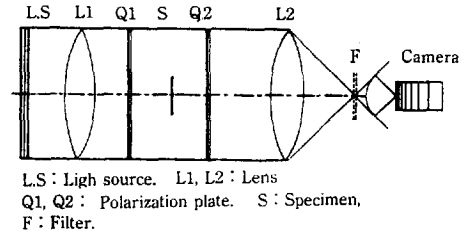


Fig. 6. Arrangement of photoelastic experimental apparatus

하여 사용된 필터이다. 그리고 L1과 L2 사이에는 평행광이 유지되도록 하였다. 等色線 무늬사진은 Ortho계의 Monochromatic 복사용 필름(ASA 10)을 사용하였으며 노출시간은 90초로 하였다.

4. 결과 및 고찰

가. 等色線 사진 촬영

1) 反力點의 변화에 대한 等色線圖

제작된 시편과 광학계를 이용하여 촬영된 等色線 무늬사진은 그림 7과 같다. 하중장치에 가한 하중은 P=2.5kg으로 일정하게 주었으며 反力點의 길이는 16, 14, 12, 10cm로 변화시켰다.

그림에서와 같이 선명한 等色線 사진이 촬영되었으며 反力點의 길이가 클수록 (A), (B), (C), (D) 모두 等色線의 무늬 차수가 증가하였고, 날의 中心線 내측과 외측에 모두 비슷한 무늬차수를 나타내었다. 等色線 무늬차수가 볼트지름 부분으로 가까워질수록 많아졌으며 볼트지름 부분에서도 복잡한 무늬차수를 보여주었다.

이것은 볼트지름 부근에서 큰 應力集中 現狀이 나타나고 있음을 보여주며 볼트지름의 위치에서도 큰 應力集中 現狀이 발생됨을 알 수 있다. 또한 날의 외측부분의 무늬 차수는 인장응력, 내측 부분의 무늬차수는 압축응력의 크기를 나타내며 날의 끝부분은 인장과 압축 응력의 영향이 거의 없었다.

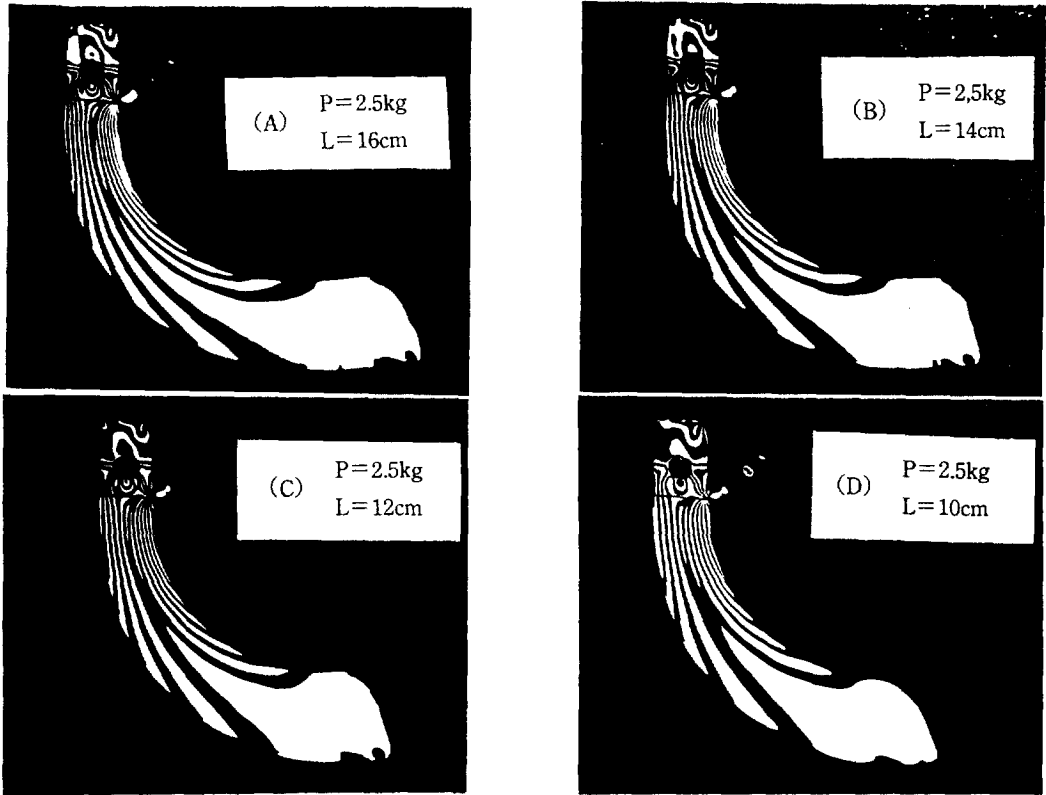


Fig. 7. Photoelastic fringe patterns for various support points

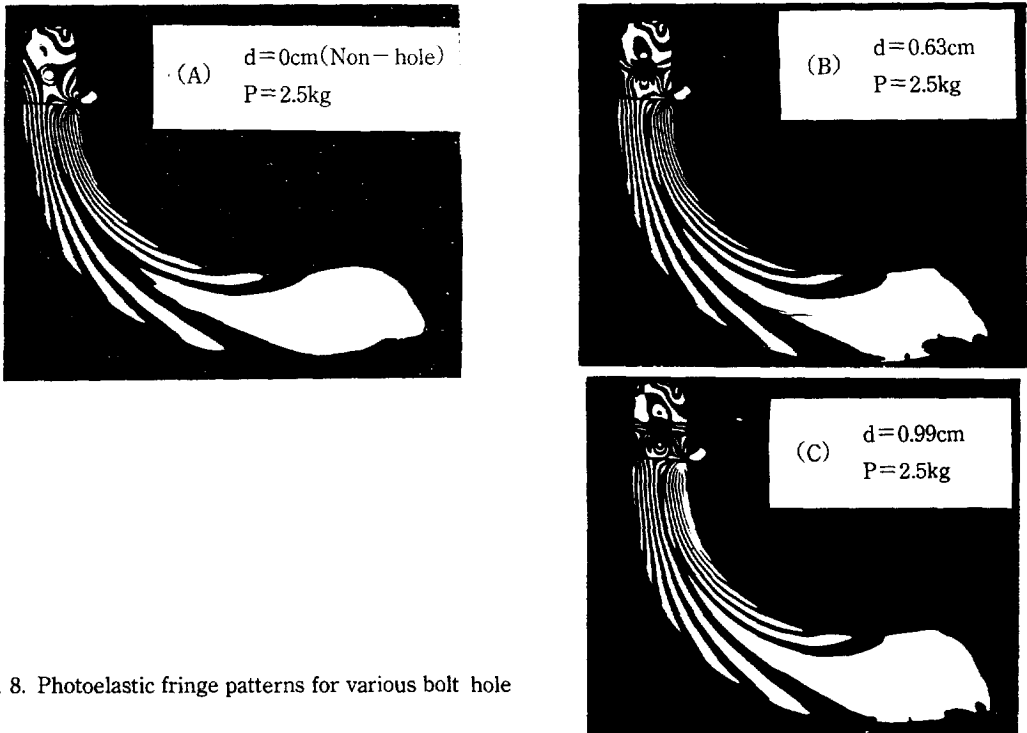


Fig. 8. Photoelastic fringe patterns for various bolt hole

2) 볼트지름의 변화에 대한 등색線圖

로터리 경운날은 회전축에 연결되어 구동되므로 회전축의 볼트지름의 영향을 구명하기 위하여 그림 8과 같이 볼트지름을 (A) Non-hole과 (B) $d=0.63$ cm, (C) $d=0.99$ cm의 3가지를 선택하였으며 하중은 $P=2.5$ kg, 反力點의 길이는 $L=16$ cm로 일정하게 하였다.

그림에서와 같이 (A)의 Non-hole에서는 거의 로터리 경운날의 몸체부분에서 나타나는 등색線 무늬차수가 그대로 연결되는 양상을 보였으며 (B), (C)의 경우에는 볼트지름의 부분에 복잡한 등색線 구조를 나타 내었으나 등색線 무늬차수는 거의 비슷한 것으로 판단되었다. 또한 볼트지름의 부분에는 인장과 압축의 2용력이 모두 작용됨을 알 수 있다.

3) 龜裂에 의한 등色線圖

로터리 경운날의 제작시 발생가능한 결함이 파괴에 미치는 영향을 조사하기 위하여 위험단면으로 예상되는 부분에 임의의 龜裂을 2mm 주고 $P=2.5$ kg, $L=16$ cm로 하였을 때 그림 9와 같은 등色線 무늬사진을 얻었다.

그림에서와 같이 A의 위치의 龜裂에서 등色線 무늬차수가 집중되어 있음을 나타내었으며 경운날의 中心線 내측부분에서는 龜裂로 인한 色等線의 변화가 거의 없었다. 이것은 로터리 경운날의 내측 부분이 받는 압축용력에는 영향이 없음을 알 수 있었다. 날의 외측부분은 인장용력을 받으므로 龜裂 부분의 應力集中現狀이 인장부분에서만 큰 영향을 주고 있음을 보여주고 있다.

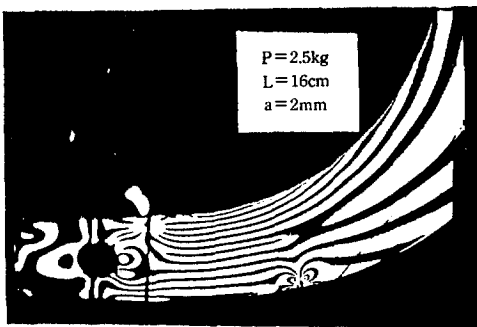


Fig. 9. Photoelastic fringe pattern obtained under a crack

나. 應力分布圖

等色線 무늬사진으로 로터리 경운날이 받는 應力分布圖를 작성한 결과는 다음과 같다.

1) 反力點의 변화에 대한 應力分布圖

그림 7의 等色線 무늬사진으로 해석한 反力點의 변화에 대한 應力分布圖는 그림 10과 같다.

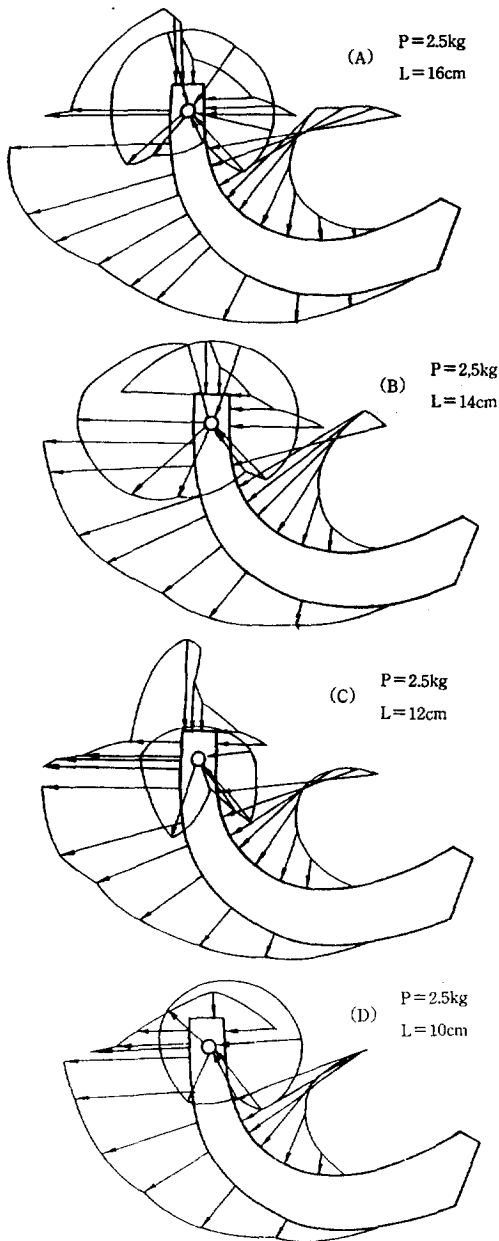


Fig. 10. Diagram of stress distributed for various support points

그림에서와 같이 (A), (B), (C), (D) 모두 로터리 경운날의 中心線 내측부분은 압축응력을 받고, 외측부분은 인장응력을 받고 있다. 뿐만 아니라 날의 내·외측에 받는 인장과 압축응력은 모두 反力點의 길이가 클수록 크게 나타났으며, 특히 날고정 부분에서는 應力集中現狀으로 인장과 압축이 최대가 되었다. 그리고 볼트지름 부분에서는 인장과 압축응력이 모두 작용되고 있으나 크기는 날고정부분보다 작음을 보여주었다. 그러므로 로터리 경운날의 모양에 대한 충격시 反力點의 길이에 관계없이 모두 날고정 부분에서 최대의 應力集中現狀이 발생되어 파괴가 예측됨을 알 수 있었다.

2) 볼트지름의 변화에 대한 應力分布圖

그림 11은 볼트지름의 변화에 대한 날의 應力分布圖를 나타내었다.

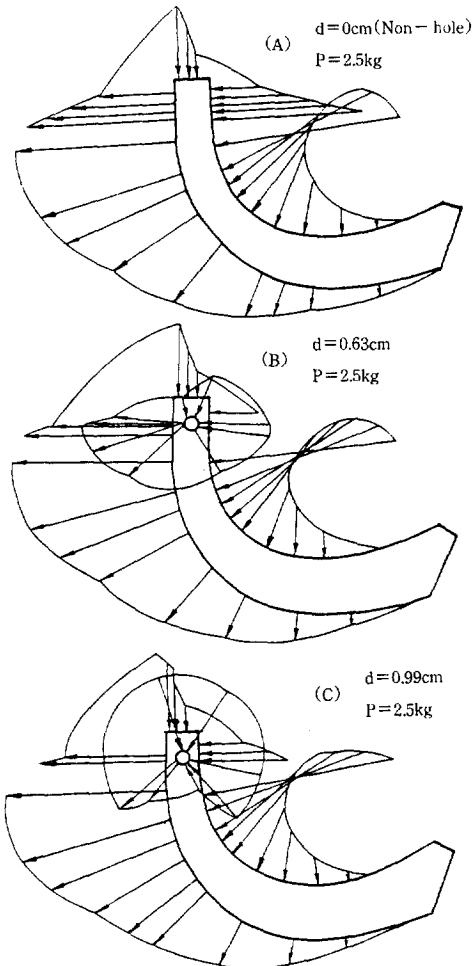


Fig. 11. Diagram of stress distributed for various bolt hole diameter

그림에서와 같이 볼트지름(A)는 Non-hole, (B)는 $d=0.63\text{cm}$, (C)는 $d=0.99\text{cm}$ 로 하였다. Non-hole에서는 날고정 부분에서 큰 인장응력과 압축응력이 발생하였으나 날고정 부분의 약간 아래부분에서 최대의 應力集中現狀이 일어났다. (B)와 (C)도 역시 볼트지름에서 인장과 압축응력이 모두 나타났으나 날고정 부분의 약간 아래에서 큰 應力集中現狀이 발생되었다. 그리고 볼트지름 부분의 응력은 날고정 부분보다 작게 나타나 로터리 경운날의 파괴에 직접적인 큰 영향을 주지 못함을 알 수 있었다.

3) 龜裂에 의한 應力分布圖

그림 12는 $P=2.0\text{kg}$, $L=16\text{cm}$ 의 조건에서 A부분에 2mm의 龜裂을 주었을 때 얻어진 應力分布圖이다. 압축응력은 中心線 내측의 날고정 부분에서 최대로 나타났으나 中心線 외측의 인장응력은 날고정 부분보다 龜裂 부분에서 큰 응력집중이 발생되어 龜裂 부분의 파괴가 예측되었다. 그러므로 로터리 경운날의 제작상 결함은 파괴에 큰 요인이 됨을 지적하였다.

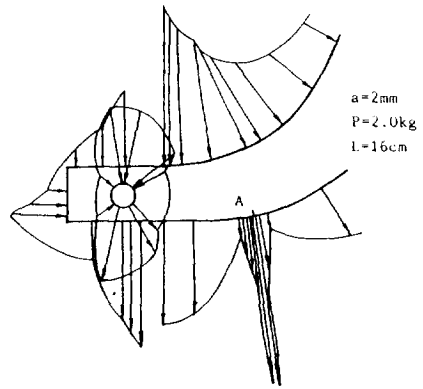


Fig. 12. Diagram of stress distributed obtained under a crack

다. 굽힘모멘트, 굽힘응력선도

로터리 경운날의 反力點의 변화에 대한 날의 中心線에 받는 굽힘모멘트의 크기를 그림 13에 나타내었다.

그림에서와 같이 反力點의 길이가 클수록 굽힘모멘트의 크기가 증가하며, 또한 날의 볼트지름 부분에 가까울수록 완만하게 굽힘모멘트가 커졌다.

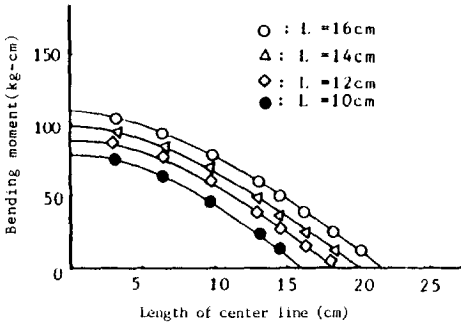


Fig. 13. The relationship between bending moment and length of center line for location of the reaction point variations

그림 14는 反力點의 變化에 對한 날의 中心線에 받은 굽힘응력의 크기를 나타내고 있다.

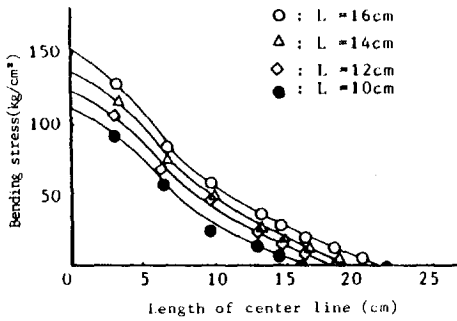


Fig. 14. The relationship between bending stress and length of center line for location of the reaction point variations

그림에서와 같이 굽힘응력도 反力點의 길이가 클 수록 증가되었고 로터리 경운날의 볼트지름 부분에 가까울수록 증가되었다. 특히 경운날의 中心線 길이가 5~10cm 부근에서 굽힘응력의 변화가 크게 나타났다. 이것은 로터리 경운날의 굽힘이 외부하중에 의하여 가장 크게 작용되는 것으로 판단된다. 응력집중 부분은 역시 날고정 부분에서 최대가 되었으며 날고정 부분의 파괴가 예상됨을 알 수 있다.

그림 15는 反力點의 길이를 변화시킨 상태에서 날의 中心線에 對한 굽힘모멘트와 굽힘응력을 비교하였다.

그림에서와 같이 (A), (B), (C), (D) 모두 볼트 지름 부분에서 中心線 방향으로 약 6cm 부분을 교점으로 날의 끝쪽으로 굽힘응력이 굽힘모멘트보다

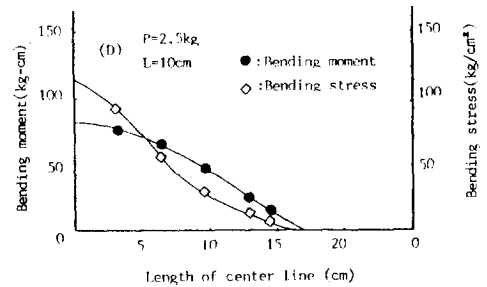
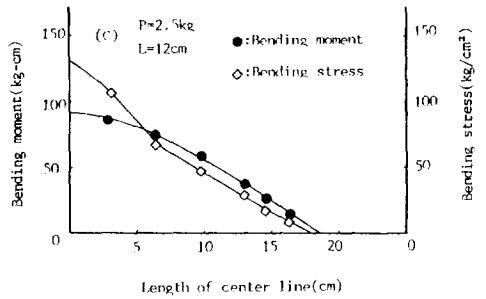
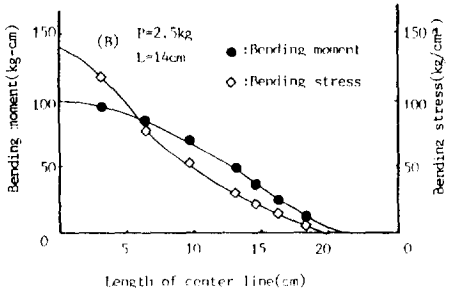
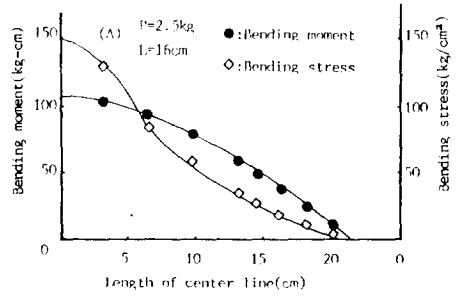


Fig. 15. Comparison of bending moment and bending stress for location of the reaction point variations, (A) L=16cm, (B) L=14cm, (C) L=12cm, (D) L=10cm

작아 파괴의 확률이 거의 없었으나 날고정 부분에서 굽힘응력이 굽힘모멘트보다 크게 나타났다. 이러한 결과는 反力點의 길이가 10cm에서 16cm의 범

위에서는 볼트지름 부분에서 약 6cm 이내에서 큰 應力集中 現狀이 발생되어 위험단면으로 보여지며 파괴가 예상된다고 볼 수 있다.

5. 결 론

로터리 경운날의 파괴는 외부 충격하중에 의한 내부응력의 증대가 집중으로 나타날 때 이루어진다. 이 내부응력과 應力集中 現狀을 규명하기 위하여 광학계의 광학적 특성재료인 에폭시판을 시편으로 하는 光彈性 실험법을 이용하였으며 외부하중은 정하중을 주었을 때 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 로터리 경운날의 볼트지름의 크기와 유무에 대해서는 날고정 부분보다 應力集中 現狀이 크지 않아 파괴에 큰 영향을 주지 않았다.

2) 전단력, 굽힘모멘트 및 굽힘응력은 로터리 경운날의 날고정 부분에서 크게 나타나 위험단면으로 파괴가 예측되었다.

3) 제작, 가공상 발생가능한 龜裂을 임의의 위치에 주었을 때 큰 應力集中 現狀이 나타났다.

4) 反力點의 위치에 관계없이 로터리 경운날의 볼트지름 중심에서 中心線 방향으로 약 6cm 이내에 굽힘응력이 굽힘모멘트보다 크게 나타나 파괴 예상 부분으로 판단되었다.

參 考 文 獻

1. 金 震顯, 崔 相寅. 1983. 光彈性法에 의한 러그 달린 驅動輪下의 應力分布에 관한 研究. 韓國農業機械學會誌. 8(2) : 11-17

2. 崔 相寅, 崔 善浩, 黃 在錫. 테프론 균열 주형법 開發에 관한 研究. 大韓機械學會論, 11(6) : 945-952.

3. 金 基大. 1986. 트라クタ 로-타리 耕うん部の 設計理論研究 と CAD への 應用. 日本九州大學 學位論文

4. 金 聲來, 김 문규, 김 기대, 허 윤근. 1979. 로우터리 麥類播種機 耕耘날의 改良試驗. 韓國農業機械學會誌 4(1) : 1-23

5. 최 규홍, 류 관희. 1984. 로우터리 耕耘의 負荷特性 및 所有動力에 관한 研究. 韓國農業機械學會誌 9(2) : 27-36.

6. Stephen H. Crandall, Normann C. Dahl, Thomas J. Lardner. 1976. An Introduction to the mechanics of solids. McGraw-hill. pp. 175-176

7. Irwin, Goro. 1957. Analysis of stress and strains near the end of a crack transversing a plate. Apollo Mecl, Vol. 24. p. 361

8. 國府田佳弘, 1984. 高速荷重わ 受ける 로-타리 耕うん弧의 動的舉重について. 日本九州大學 學位論文

9. 紫田安雄, 坂井純. 1980. 로-타리 耕なた 刀의 耕うん 抵抗特性 (1本刀의 톨크 波形). 日本農業機械學會誌 39-4

10. 西田正孝. 1988. 應力集中. 森北 出版 pp. 18-33