

凍結 光彈性法에 의한 로터리 경운날의 應力解析

A Stress Analysis of the Rotary Blade by Freezing Photoelastic Method

최 상 인 김 진 현
S. I. Choi J. H. Kim

Summary

In this study, the break of the rotary blade which is occurred from a stress concentration of the inside of blade by the outside impulsive load, is analyzed to 3-dimension used by the Freezing Photoelastic Method.

These results are as follows.

1. The bending and compression stress are the greatest at the location of blade case.
2. The section area of 3cm-location from the blade case is the smallest, therefore, there are broken 58% of all at this location and are proofed to the most danger section
3. The section area which by stress concentration of 3cm-location from blade case is caused by the production of blade, and it was higher danger of break than another's.
4. In the location of 6cm and 9cm from the blade case, the bending stress has received a little and the section area has larger than another's, so it is not almost possible that the break at that location
5. In order to prevent of break, the external part which has contacted soil have to made tender for receiving a little stress and the internal part which received a large stress have to strengthen.

1. 서 론

로터리날은 포장의 경운작업에 있어서 가장 많이 이용되는 기계 부품이다. 대부분의 로터리 경운날에 대한 종래의 연구는 크게 로터리 경운날의 動的特性과 性能에 관한 연구, 경운토양의 反轉特性에 대한 이론과 실험적인 고찰, 로터리 경운날의 모델 특성, 경운날의 反轉性能의 향상에 관한 연구, 경운저항의 특성등이 주종을 이루고 있다. 최근에 로터리 경운축의 最適設計理論

등에 관심이 높아지고 있으나 실제로 로터리 경운날의 파괴를 최소화 할수있는 설계분야의 연구는 대단히 미진한 실정이다. 로터리 경운날의 파괴요인에 대한 실험적인 연구는 外力에 의한 로터리 경운날의 내부에 발생하는 응력의 해석이 역학적인 원리에 의존하는 계측장치의 적용으로는 어려움이 있으며 로터리 경운날의 내부 응력을 분석할수 있는 광탄성법의 적용이 적합한것으로 판단된다. 앞서 발표된 광탄성법에 의한 로터리 경운날의 파괴요인에 대한 연구에서

* 상주산업대학 농업기계공학과

는 로터리 경운날이 포장작업중 받는 衝擊荷重을 2차원적 실험 해석을 통하여 Bolt hole에서 약 6cm 부근을 기준으로 날의 끝부분쪽으로 굽힘 모멘트가 굽힘응력보다 크고, Bolt hole 부분으로는 굽힘응력이 굽힘모멘트보다 훨씬 증가하므로 Bolt hole의 끝부근이 외부응력에 대한 危險斷面(Danger section)이라는 사실이 밝혀졌다.

본 연구에서는 로터리 경운날의 포장작업시 발생되는 應力集中(Stress concentration)現狀을 제거하고, 파괴를 줄이기 위하여 포장작업에 적합한 有限壽命(Finite life)의 새로운 로터리 경운날의 설계, 제작을 하기위한 기초자료를 얻고자 수행하였다. 그리고 凍結光彈性法(Freezing photoelastic method)으로 응력의 분포현상과 집중현상을 3차원 해석을 하기 위하여

1. 실물과 동일한 로터리 경운날을 에폭시(Epoxy)수지로 제작하고
 2. 만들어진 에폭시 시편에 굽힘응력을 凍結시키며
 3. 등색선 무늬사진(Fringe pattern)으로 응력 분포를 해석하고
 4. 파괴가 가능한 危險斷面이라 예상되는 부분을 일정거리로 切斷하여 3차원 해석을 하며
 5. 포장실험으로 나타난 파괴의 결과와 비교, 분석하므로써
- 로터리 경운날의 파괴의 요인을 규명하고자 한다.

2. 기초이론

가. 광탄성실험법의 이론식

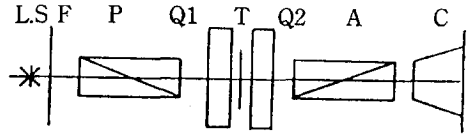
본 실험에서 이용한 광탄성법의 光學系는 그림 1과 같다.

光源의 단색광이 P를 통하여 발생하는 平面片光의 Vector는

$$P = a \sin \omega t \dots\dots\dots (1)$$

이 되고 다시 Q1을 통과하면 90도($\pi/2$)의 位相差를 갖는 圓片光이 되어 다음과 같은 식이 된다.

$$\left. \begin{aligned} Q1 &= \frac{a}{\sqrt{2}} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \\ Q2 &= \frac{a}{\sqrt{2}} \sin \omega t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$



** L.S : light source, F : filter, P : polarization
Q1, Q2 : plate of quarter wave, A : analyser
C : camera

Fig. 1 Arrangement of photoelastic experimental apparatus.

이 두선의 片光이 合成되면 다음과 같은 식으로 나타난다.

$$A = a \sin \frac{\delta}{2} \sin(\omega t + 2\theta + \frac{\delta}{2}) \dots\dots\dots (3)$$

빛의 세기는 振幅의 제곱과 동일하므로

$$I = a^2 \sin^2 \frac{\delta}{2} \dots\dots\dots (4)$$

식 (4)와 같이 얻어진다.

위상차 δ 는 $2n\pi$ 일때 빛의 세기가 0 이되므로 어둡게 되고 이 점을 연결한것이 검은 무늬로 나타난다. 그리고 두 片光의 位相差는 Brewster' law에 의하여 주응력차에 비례하므로 다음과 같다.

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} cd(\sigma_1 - \sigma_2) \dots\dots\dots (5)$$

식 (5)에서 δ 를 2π 로 나눈 값을 N이라 하고 C/λ 를 α 라 두면 식 (6)과 같이 표현된다.

$$N = \alpha d(\sigma_2 - \sigma_1) \dots\dots\dots (6)$$

여기서 시편의 두께 (d), 에폭시의 光彈性感度를 (α)라 할때 무늬차수를 측정하여 굽힘응력을 구할수 있다.

나. 곡선보의 이론식

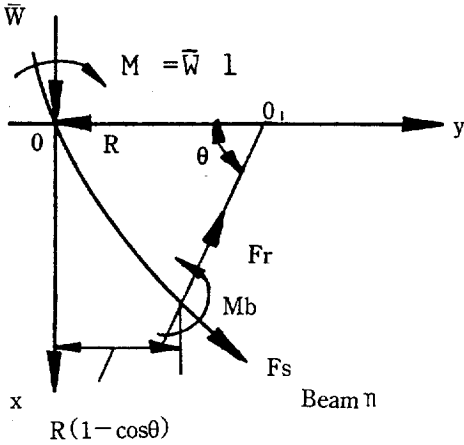


Fig. 2 Theoretical analysis of curvature beam.

굽힘모멘트

$$(M_b)\theta = W\{l + R(\cos\theta - 1)\} \dots\dots\dots (7)$$

굽힘응력

$$(\sigma)\theta = \frac{M_b}{I} y = \frac{12M_b}{bh^3} y \dots\dots\dots (8)$$

여기서

- W : 외력
- l : 외력을 받는 보의 길이
- R : 곡률반경
- θ : y축에서의 중심각
- M_b : 굽힘모멘트
- I : 보의 단면 2차모멘트

3. 재료 및 방법

가. 시편의 제작

실물과 동일한 에폭시 경운날을 제작하기 위하여 먼저 실리콘(Silicon) 주형을 완성시켜야 한다. 실리콘 주형은 먼저 실리콘(KE 1300)과 경화제를 重量比로 10 : 1 이되게 잘 섞은다음 실물 경운날을 적당한 위치에 두고 실리콘으로

완전히 잠기게하여 24시간 이상 定置 시켜두면 실리콘이 잘 굳게된다. 그리고 굳어진 실리콘속에 있는 경운날을 뽑아내면 실리콘 주형이 완성된다. 에폭시 경운날의 제작은 1400℃의 전기로속에서 완전히 용해된 아랄다이트(Araldite, C.T 2000)에 경화제를 重量比로 10 : 3 이되게 넣고 완전히 녹인뒤에 준비된 실리콘 주형속에 붓고 에폭시의 熱應固 과정을 지나면 실물과 동일한 에폭시 경운날이 된다. 그림 3은 에폭시 Molding cycle을 표시하고 있다. 그림에서와 같이 (A) 점에서 140℃로 출발하여 7시간 동안 계속하다가 (B)점에서 150℃로 하여 5시간 동안 점차 90℃로 냉각시켜서 (C)점에서 스위치를 끄고 瀟冷시켜 상온에서 出瀟시킨다. 이러한 Mould cycle은 모두 13시간이 소요된다.

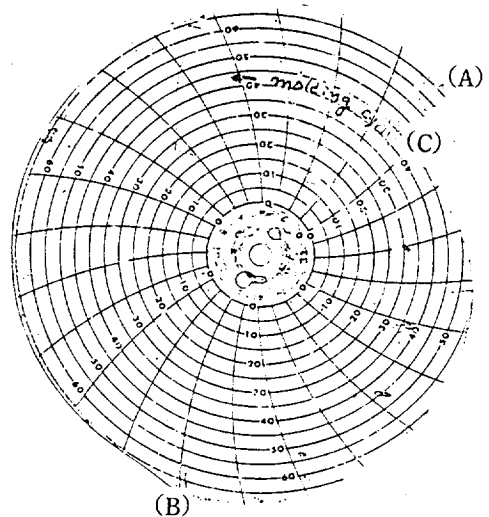


Fig. 3 Epoxy molding cycle.

나. 응력의 동결

제작한 에폭시 경운날을 그림 4와 같은 장치를 이용하여 시편의 변형이 일어나지 않는 범위에서 외력을 주며 凍結시켜야 한다. 그림에서와 같이 지름 20cm의 원판에 제작한 에폭시 경운날을 고정하고 축의 반대편 끝에 지름 10cm의 작은 원판을 설치하여 1.2 kg의 추를 원주에 달면 경운날에 回轉力이 작용된다. 이때 로터리 경운날

이 모형의 지면에 닿는 부위에 실리콘 시트(Silicon seat)로서 경운날을 고정시키면 회전이 억제되어 굽힘모멘트를 받으며 應力凍結 과정에서 내부응력이 동결된다.

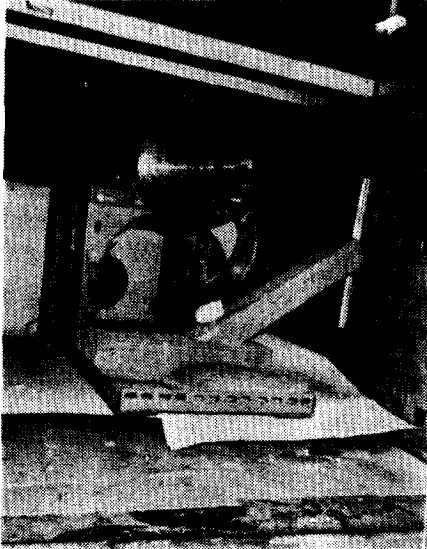


Fig. 4 Apparatus of loading system.

이때 응력동결 cycle은 그림 5와 같고 사용된 시편은 그림 6과 같다. 그림 5에서와 같이 (A) 점에서 140°C로 시작하여 8시간에 90°C로 로내의 온도를 낮추며 스위치를 끄고 瀟冷시켜 상온에서 出瀟하였다.

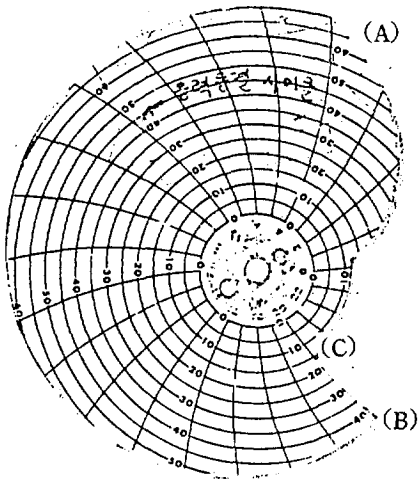


Fig. 5 Stress freezing cycle.

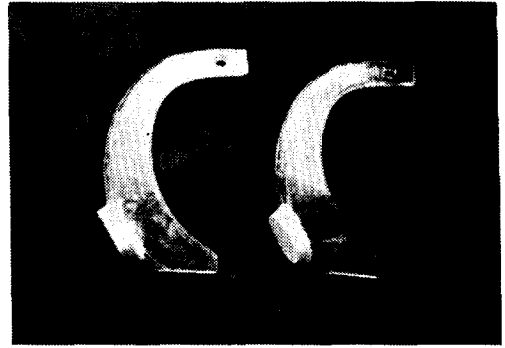


Fig. 6 Stress frozen specimens.

다. 실험장치

凍結光彈性法으로 로터리 경운날의 내부 等色線을 촬영하기 위한 光學裝置는 그림 7과 같다.

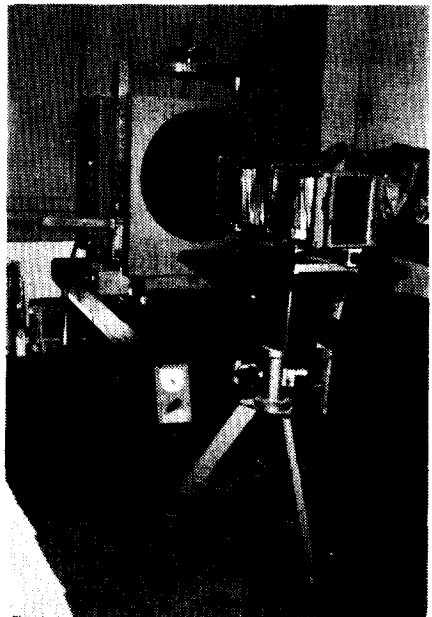


Fig. 7 Photoelastic experimental system.

4. 결과 및 고찰

가. 등색선 무늬차수 및 응력분포도

1) 외력에 의한 等色線 무늬차수
실험을 위하여 제작한 에폭시 경운날의 두께가 일정하지 않기 때문에 두께의 차이에서 발생

되는 무늬의 굴절현상을 방지하기 위하여 에폭시와 굴절률이 거의 같은 알파-프롭화 나프타렌 액속에 에폭시 경운날을 넣어서 그림 8과 같이 2차원으로 촬영하였다.



Fig. 8 Photoelastic fringe pattern.

그림에서와 같이 等色線 무늬차수에 의한 내부응력이 날집부분에서 심하게 집중되었고 날집에서 12cm의 위치에서는 무늬가 거의 나타나지 않았다. 이것은 날집부분에서는 큰 응력을 받으며 12cm의 위치에서는 외력에 의한 내부굽힘응력의 영향이 크지 않음을 보여주고 있다. 그러나 날집에서 12cm의 위치는 토양속에서 토양에 대한 접촉저항을 크게 받기 때문에 마모가 심하게 발생하는 부분이므로 장시간 사용된 후에는 단면적이 크게 변하여 응력의 분포가 달라질수 있는 것으로 사료된다.

2) 응력분포도

등색선 무늬차수에 의한 應力分布圖는 그림 9와 같다. 그림에서와 같이 날의 바깥쪽은 引張應力을 받고 안쪽은 壓縮應力을 받고 있음을 알수 있다.

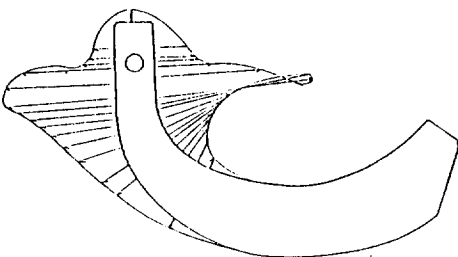


Fig. 9 Diagram of stress distribution.

그러므로 應力分布圖는 날집부분에서 큰 응력의 집중현상이 발생되며 경운날의 굽은 안쪽에 1-2차의 무늬가 많이 나타났다. 날의 굽은 안쪽에 무늬차수가 증가된 것은 날의 전체가 받는 외하중에 대하여 취약단면으로 판단되는 부분에 집중적으로 작용하는 것이므로 危險斷面임이 쉽게 예상된다. 그러므로 파괴를 줄일수 있는 危險斷面の 補強이 이루어진다면 날의 파괴를 현저히 줄일수 있을 것으로 판단되어진다.

나. 응력의 해석

1) 슬라이드에 대한 해석

포장실험의 결과에 따라 그림 10과 같이 날집부분, 날집에서 중심선의 길이가 3cm, 6cm, 9cm, 되는 4곳에 0.5cm의 두께로 切斷하였다.

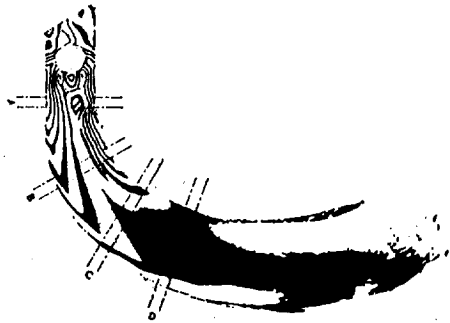


Fig. 10 Slice shape for the measurement of internal stress.

그리고 각각의 조각에 대한 단면과 평면의 등색선 무늬사진은 그림 11과 같다.

그림에서와 같이 날집부분에서는 단면의 무늬차수가 4차이고 平面에서는 안쪽면에 8차, 바깥쪽 면에는 7차의 무늬가 발생하였다. 날집에서 3cm 되는 곳에서는 단면에 1차만 나타나 있고 평면에서는 안쪽면에서 5차, 바깥쪽 면에서 2차가 발생하였다. 이것은 날집부분에서는 굽은 안쪽이 바깥쪽에 비하여 더 큰 응력이 작용되고 있음을 나타내고 있다. 그리고 날집에서 6cm 되는 곳의 단면에는 1차만 나타났고 평면에서는 안쪽과 바깥쪽이 모두 1차의 무늬를 보여주고 있다. 또한 날집에서 9cm 되는 곳에서는 단면과 평면



Fig. 11 Section(upper) and photoelastic fringe pattern(low) of each slice shape.

모두 무늬차수가 나타나지 않았다. 이러한 사실은 낱집에서 9cm 되는 곳에서는 외력에 대한 굽힘응력이 거의 받지 않고 있음을 입증하는 것으로 사료된다.

2) 각 슬라이드의 단면적 비교

예폭시 경운날의 절단한 슬라이드 형상과 단면적은 그림 12와 같다.

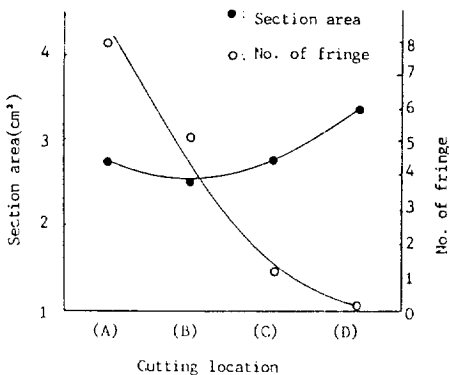


Fig. 12 Relation between section area and No. of fringe at location of slice cutting.

그림에서와 같이 낱집부분(A)은 단면적은 비교적 작지만 무늬차수가 가장크므로 가장큰 내부응력을 받고 있음을 알수있다. 그러나 낱집부분은 실제로 낱집에 고정되어 있으므로 파괴는 줄어들 것으로 사료된다. 그리고 낱집에서 3cm 되는 곳(B)은 단면적이 가장 작았다.

또한 무늬차수로 볼때 内部應力도 크므로 실제로는 이부분에서 파괴가 가장 많이 이루어 질것으로 판단되어 진다. 이것은 포장실험의 결과 전체의 58% 가 파괴된 원인을 입증하고 있다. 낱집에서 6cm 되는 곳(C)도 3cm 에 비하여 단면적은 약 7.5% 가량 증가 하였으나 내부의 응력은 오히려 떨어지므로 파괴는 줄어든 것으로 판단할 수 있다. 낱집에서 9cm 되는 곳(D)은 단면적은 큰데 비하여 무늬차수는 거의 없으므로 파괴의 확률이 가장 낮은 것으로 추정되어 진다.

3) 각 슬라이드에 대한 응력해석

실험에 의한 로터리 경운날의 굽힘응력을 절단 위치별로 구하기 위하여 각 슬라이드에서 무늬차수를 측정하고, 측정된 무늬차수와 光彈性感度, 두께를 $\sigma = N/at$, 즉 식(6)에 의하여 구한 굽힘응력값은 그림 13과 같다.

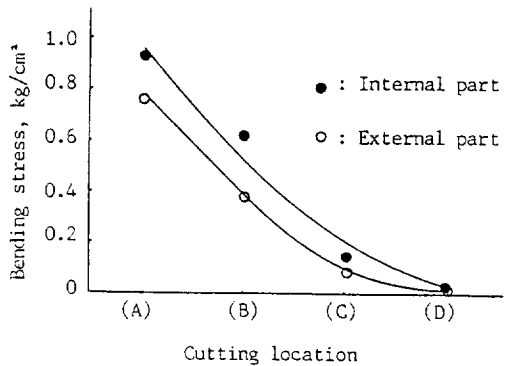


Fig. 13 Bending stress used by experimental method at location of slice cutting.

그림에서와 같이 낱집부분에서 굽힘응력값이 가장크고 낱끝에서 3cm 위치인 슬라이스B도 비교적 큰 굽힘응력을 받는데 비하여 슬라이스C와 D는 거의 굽힘응력을 받지 않았다. 그리고 낱의 안쪽에 받는 압축응력이 바깥쪽에서 받는 인장

응력보다 모두 크게 나타나므로 파괴의 주 원인은 안쪽의 압축응력이 더 큰 요인이 되는 것으로 판단된다. 그리고 식 (8)에 의하여 구한 굽힘응력값을 그림 14에 표시하였다.

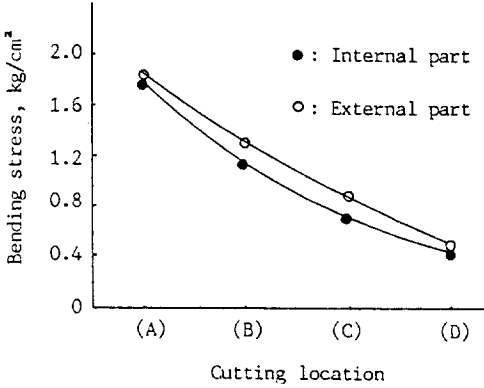


Fig. 14 Bending stress used by theoretical method at location of slice cutting.

이론식은 $\theta = Mb_y/I$, 즉 식 (8)에 의하여 구한 단면 2차모멘트의 값도 역시 날집부분에서 가장크고 날집에서 3cm의 위치와 6cm, 9cm로 갈수록 비교적 일정하게 감소 하였다. 그리고 날의 바깥쪽 부분이 받는 인장응력이 안쪽부분에 작용하는 압축응력보다 약간 크며, 또한 이론값이 전반적으로 실험값보다 크게 나타났다. 이것은 이론식에 의한 날의 斷面中心位置의 선정이 다소 차이가 나기 때문인 것으로 사료된다.

라. 포장에서의 파괴실험

凍結光彈性法에 의한 로터리 경운날의 이론 해석과 비교하고, 실제로 외부충격에 의하여 파괴되는 양상을 조사하기 위하여 시판되고 있는 로터리 경운날(22 PS, 트랙터용)을 자갈이 많은 포장에서 실험한 결과 파괴된 결과는 표 1과 같다.

표 1과 같이 작업시간은 6시간으로 하였으며 날은 36개가 파괴되었다. 파괴된 로터리 경운날의 대부분은 실험후 3시간에서 5시간 사이에 95%가 발생되었다. 이러한 결과는 외부의 충격에 대하여 로터리 경운날의 설계제작상 脆弱斷面이 있음을 입증하고 있다. 6시간 이후에는 지면에 닿은 로터리 경운날의 모서리 부분의 마모로 인하여 외력이 약화되므로 파괴가 줄어든 것으로 추정된다. 그리고 표 2는 포장에서의 破壞樣相을 나타낸 것이다.

Table. 2 Shape of the rotary blade fractured

Location	Fractured shape	No of fractured
S=3cm		N= 13(36%)
S=6cm		N= 21(58%)
S=9cm		N= 2(6%)

여기서 S는 로터리 경운날의 볼트구멍에서 중심선의 길이를 나타내고, N은 破壞量, 그리고 P는 전체의 비율이다. 표에서와 같이 날집부분에서 파괴된 것이 13개로서 전체의 36%이며 이것은 토양에 대한 외력의 집중이 날집부분에서 크게 작용되고 있음을 증명하고 날의 바깥쪽 단면에 수평방향과 수직방향의 큰 引張應力이 작용되고 있음을 나타내고 있다. 그리고 날집에서 3cm 되는 위치에서 파괴된 것이 21 개로서 전체의 반이 넘는 58%로 가장 많았다. 이 부분은 단면적이 가장작고 로터리 경운날이

Table. 1 No of fractured blade for field experiment

Hours	1	2	3	4	5	6
Numbers	0	1	11	13	10	1
Percent	0	2.5	31	36	28	2.5

토양에 잘 침입되도록 끝부분을 단조 시켜 놓으므로 날의 내부응력이 가장 크게 작용된 것으로 추정된다. 그러나 날집에서 12cm 되는 곳에는 파괴량이 2개이고 전체의 6%에 불과하며 날의 제작상의 결함에 의한 것으로 판단되어 진다.

6. 결 론

로터리 경운날이 포장작업시 받는 응력을凍結光彈性 實驗法으로 3차원의 해석하였을때 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 날집부분에서 굽힘응력과 압축응력이 가장 크게 나타났다.
2. 날집에서 3cm 되는 곳의 단면적이 가장 작고, 전체의 58% 가 파괴 되었으므로 가장 危險斷面임을 입증하였다.
3. 날집에서 3cm 되는 부분의 集中應力으로 인한 파괴의 위험이 높은 것은 제작상 날의 단조로 단면적이 다른 부분보다 작은것으로 나타났다.
4. 날집에서 6cm, 9cm 의 위치에서는 굽힘응력도 작게 받으며, 단면적은 크므로 파괴의 가능성이 거의 없었다.
5. 파괴를 방지하기 위하여 지면과 닿는 날의 바깥쪽은 응력이 작으므로 매끈하게 하고, 안쪽은 큰 응력을 받으므로 보강되어야 할것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 김 진현, 최 상인. 1983. 光彈性法에 의한 러그달린 驅動輪下の 應力分布에 관한 연구. 한국농업기계학회지.8(2) : 11~17
2. 최 상인, 김 진현, 김 창수, 김 재열. 1990. 光彈性法에 의한 로터리 경운날의 파괴요인에

- 대한 해석(정하중에 의한 응력집중). 한국농업기계학회지. 15(3) : 177~185
3. 최 상인, 최 선호, 황 재석.테프론 균열 주형법에 개발에 관한 연구. 대한기계학회지. 11(6) : 945~952
 4. 최 상인. 1990. 동력경운기의 로터리 경운날이 포장작업에서 발생하는 파괴추정에 관한 연구. 상주농전새마을연구. 제 1편
 5. 김 기대. 1986.トテワタロータリ 耕うん部の設計理論研究と CADへの 應用. 일본구주대학 학위논문.
 6. 최 규홍, 류 관희. 1984. 로터리 경운의 부하 특성 및 소요동력에 관한 연구. 한국농업기계학회지 9(2) : 27~36
 7. Stephen H. Crandall, Normann C. Dahl, Thomas J. Lardner. 1976. An Introduction to the mechanics of solids. McGraw-hill. pp. 175~176
 8. Irwin, Goro. 1957. Analysis of stress and strains near the end of a crack transversing a plate. Apollo Mecl, Vol. 24. p.361
 9. 國府田佳弘. 1984. 高速荷重おけるロータ耕うん弧の 動的舉重についでる. 日本九州大學學位論文
 10. 紫田安雄,坂井純.1980. ロータリ耕なに 刀の 耕うん 抵抗特性(1本刀のトルワ波形). 日本農業機械學會誌. 39(4).
 11. 岸武保.1981.應力動結法の 改良, 日本光彈性學會 第3回研究發表論文. No 3.
 12. 吉川敬治外1人. 1982. 應力動結法による 收縮應力の 解析. 埼玉大論集.
 13. 山本稔, 山崎良一. 1981. 砂中に 埋設さおもテルの 應力動結時の 舉動.
 14. 西田. 1986. 應力集中. 森北出版. p.681.