

광디스크 드라이브 방진마운트의 동특성 예측

김국원*, 김남웅**, 임종락**, 안태길***

Dynamic Characteristics Prediction of Rubber Mounts for Anti-Vibration of an Optical Disk Drive

Kug Weon Kim*, Nam Woong Kim**, Jong Rak Lim** and Tae-Kil Ahn***

ABSTRACT

With the increase of storage density and data transfer rates in optical disk drive, mechanical issues, mainly noise and vibration, become critical. Rubber materials are extensively used in various machine design application, mainly for vibration/shock/noise control devices. However, there are still a lot of difficulties in the use of designing the rubber components with complex shape and under pre-deformed state. It was demonstrated in ^[1] that the variation of rubber component stiffness with the pre-deformed state were calculated by the finite element method and the reliability of numerical results were checked by compared with the measuring the deflection values. This paper presents a efficient design method of rubber mounts for anti-vibration of an optical disk drive. With an empirical equation to estimate elastic modulus from hardness, and dynamic characteristics of rubber material of a cylindrical shape, this method is capable of predicting the dynamic characteristics of rubber components at design stage.

Key Words : Rubber Mounts for Anti-Vibration (방진마운트), Optical Disk Drive (광디스크 드라이브), Finite Element Method (유한요소법)

1. 서론

고무재료는 뛰어난 감쇠특성, 성형성 및 가격 경쟁력 등으로 인해 대부분의 기계구조물의 방진/방충장치로 널리 이용되고 있다. 그러나 고무재료의 기계적 특성이 매우 난해하기 때문에 설계단계에 있어서 엄밀한 부품기능성을 만족시키기란 매우 어려운 일이며, 일단 제작하고 그 기계적 특성에 대해 확인을 한 다음 다시 제작하는 시행착오 법이 설계의 주종을 이루고 있다. 광디스크 드라이브의

방진제로 사용되는 고무 부품 역시 현재까지는 요구되는 기계적 특성이 그리 엄밀하지 않았기 때문에 정확한 해석 및 설계보다는 지지하는 시스템의 무게를 고려한 정적 설계로써 충분한 경우가 많았다. 그러나 광 디스크 드라이브의 개발 방향이 고밀도화, 고배속화 등에 있음에 따라 기계적 성능, 특히 진동에 대한 허용량이 엄격해지고, 이에 따라 시스템에서 유일하게 진동대책으로 사용되는 방진마운트에도 이전과는 다른 엄격한 기계적 특성을 요구하고 있다. 이러한 기계적 특성은 정적인 특성

2001년 6월 29일 접수
* 순천향대학교 기계공학과
** LG전자 디지털미디어(연)
*** 호서대학교 기계설계전공

과 동적인 특성 두 가지로 분리할 수 있는데, 정적인 특성인 방진마운트의 강성에 의하여 시스템의 공간위치가 결정되고, 동적인 특성인 고유진동수와 감쇠비에 의해 시스템의 동적거동이 결정된다. 실제적으로 방진고무를 설계하는 단계에 있어서 고려 사항은 더욱 많다. 방진고무와 시스템의 조립성, 온도열화에 따른 방진고무 성능변화, 방진고무의 수명 등등 여러 가지이지만, 현재까지 이러한 요소들을 합리적 단계에 따라 설계하는 경우는 매우 드물며, 설계자의 경험에 주로 의존하고 있다.

저자의 이전연구⁽¹⁾에서는 광디스크 드라이브의 방진마운트에 대하여, 압축정도에 따른 시스템의 강성 변화를 유한요소법을 이용하여 계산할 수 있었으며 이에 따른 시스템의 고유진동수 변화를 유효하게 예측할 수 있었다. 이러한 결과는 방진마운트의 공진주파수를 알고 있다면, 방진마운트가 변형된 경우 공진주파수의 변화를 알기 위하여 실험을 수행할 필요없이 유한요소해석을 통하여 방진마운트의 강성변화를 계산하고 이를 이용하여 고유진동수의 변화를 유효하게 예측할 수 있으므로 실제적으로 제품개발 시 유용한 장점이 있다. 그러나 아직 많은 시간과 비용을 필요로 하는데, 고무재료의 물성치를 결정하기 위하여 인장 시험을 실시해야 하며 설계시 고안된 방진마운트를 일단 제작한 후 동특성을 측정해야 하는 문제가 있다.

본 연구에서는 위에서 언급한 단점들을 제거하여 광디스크 드라이브 방진마운트를 효과적으로 설계할 수 있는 방법을 제시한다. 광디스크 드라이브의 경우 방진마운트의 변형이 비교적 작기 때문에 고무경도로부터 탄성계수를 예측하는 실험식을 이용하여 고무의 물성치를 결정하고, 표준형상(원통형)의 시편에 대한 정/동 물성비를 이용하여 복잡한 형상을 지닌 방진마운트의 동특성을 효과적으로 예측하고자 한다.

2. 경도로부터 물성치 예측

고무재료는 그 성분에 따라 변형 양상이 큰 차이를 나타내기 때문에 직접 재료실험으로부터 하중-변형 관계를 구하고 이를 가장 적절히 나타내는 변형률 에너지 함수를 결정한다. 어떠한 변형률 에너지 함수를 사용할 것인가와 그 함수의

계수를 결정하는 방법에 대해서도 많은 연구가 수행되었다.^(2,3) 보통 변형률 150%까지의 범위에서는 Mooney-Rivlin 모델이 적합하지만, 그 이상의 변형에서는 Ogden 모델이 시험자료를 잘 묘사한다고 알려져 있다. 그러나 Mooney-Rivlin 모델이 Ogden 모델에 비해 간단하여 이용하기 쉽고, 고무재료는 공학적으로 100%를 넘는 변형률 영역에서는 거의 사용되지 않으며 또한, 실제적으로 많이 사용되는 압축영역에서는 시험자료를 비교적 잘 나타내기 때문에 Mooney-Rivlin 모델이 설계적 관점에서 적합하다고 판단된다.

본 연구에서는 고무재료의 거동을 Mooney-Rivlin 모델로 묘사함에 있어서, 고무의 경도로부터 직접 재료상수를 추정하였고 이의 타당성을 검토하였다. 이러한 방법은 고무재료의 비선형 거동을 어떠한 재료시험없이 예측할 수 있기 때문에 설계적 관점에서 매우 유용한 것이라 사료된다.

2.1 고무의 탄성이론

고무는 낮은 응력에서도 높은 변형성을 갖는 초탄성체이므로 변형률에너지 함수를 사용하여 거동을 묘사할 수 있다. 등방성, 비압축성이라 가정하면 변형률에너지 함수를 변형률 불변계수 I_1, I_2 으로 나타낼 수 있다.

$$U = U(I_1, I_2) \quad (1)$$

Mooney-Rivlin 모델의 경우 변형률에너지 함수는 다음과 같이 표현된다.

$$U = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3) \quad (2)$$

여기서 C_1, C_2 는 물질상수로서 재료시험으로부터 얻어진 하중-변형관계에 의해 결정된다.

고무가 일축응력상태인 경우 응력 σ 와 신장률 λ 사이에는 다음의 관계식이 성립한다.⁽⁴⁾

$$\sigma = 2(\lambda - \lambda^{-2})(C_1\lambda + C_2) \quad (3)$$

위 식에서의 응력은 진응력을 나타내며, 공학적으로 많이 사용하는 공칭응력의 경우 진응력을 신장

률로 나누어주어야 한다. 즉 공칭응력(engineering stress) S 에 대해 나타내면 다음과 같다.

$$S = 2(\lambda_1 - \lambda_1^{-2})(C_1 + C_2\lambda_1^{-1}) \quad (4)$$

고무의 탄성계수는 신장률에 대해 다음과 같이 정의된다.

$$E(\lambda) = \lambda \frac{dS}{d\lambda} \quad (5)$$

따라서 탄성계수는 신장률과 다음의 관계식을 나타낸다.

$$E(\lambda) = [C_1F_1(\lambda) + C_2F_2(\lambda)] \quad (6)$$

여기서

$$F_1(\lambda) = 2\left(2\lambda + \frac{1}{\lambda^2}\right), \quad F_2(\lambda) = 2\left(1 + \frac{2}{\lambda^3}\right) \quad (7)$$

고무의 변형이 아주 적은 경우 즉 신장률이 1에 가까워지면, 식(6), (7)로부터 고무의 탄성계수는 근사적으로 $6(C_1 + C_2)$ 이 된다.

2.2 경도로부터 변형률에너지 함수 예측

일반적으로 고무제작 기술자들은 고무를 근사적으로 특성화시키고 분류하기 위해 경도값을 선호한다. 그러나 고무재료를 이용하여 제품에 응용하고자하는 설계자들은 재료의 탄성계수를 필요로 하며, 미소변형인 경우 이를 이용함으로써 그 부품의 강성을 추정하게 된다. 따라서 측정된 경도로부터 탄성계수를 결정하는 손쉬운 방법이 필요하다.

문헌조사에 의하면 경도와 탄성계수의 관계에 대해 많은 연구가 있었다. 이 중 Gent⁽⁵⁾는 다음의 수식을 제안하였다.

$$E_g = \frac{56 + 7.66H_r}{2.67r(254 - 2.54H_r)} \quad (8)$$

여기서 r 은 경도측정기의 압입반경이며, 근사적으로 0.0515 cm의 값을 사용한다. E_g 의 단위는 kg/cm^2 이다.

위의 경험식은 고무의 변형이 아주 적은 경우 유용하게 탄성계수를 예측할 수 있다. 그러나 Mooney-Rivlin 변형률 함수를 결정하기 위해서는 한가지 정보를 더 필요로 한다. 즉 경도로부터 예측되는 탄성계수는 $6(C_1 + C_2)$ 이기 때문에 C_1 , C_2 를 결정하기 위해서는 하나의 식이 더 필요하다. 본 연구에서는 물질상수의 비 C_1/C_2 에 대해 3가지 값을 가정하고 각각의 경우 나타내는 거동을 측정된 인장시험 결과와 비교하였다. 인장시험 결과는 참고문헌 4를 인용하였고, 고무경도 3가지 즉, Duro 40, 50, 60에 대해 각각 비교하였다. 이 경도들은 방진마운트에 많이 적용되는 값이다. 물질상수의 비는 0.1, 0.5, 1.0 등 3가지 경우에 대해 검토하였으며, 이 경우 계산되는 Mooney-Rivlin 물질상수 값을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Material constants calculated for various C_1/C_2 based on Hardness

	C_1/C_2	C_1 [MPa]	C_2 [MPa]
Duro 40	0.1	0.0257	0.2568
	0.5	0.0942	0.1883
	1.0	0.1412	0.1412
Duro 50	0.1	0.0373	0.3733
	0.5	0.1369	0.2737
	1.0	0.2053	0.2053
Duro 60	0.1	0.0548	0.5480
	0.5	0.2009	0.4019
	1.0	0.3014	0.3014

Fig. 1 (a), (b), (c)에 물질상수의 비에 따른 응력-신장률 관계를 나타내었는데, 인장시험 결과와 비교하였다. 관심영역을 신장률 2.5 정도까지로 한정하였고, 이 범위까지의 실험결과 및 계산결과를 비교하였다. 결과를 살펴보면, 우선 재료의 경도로부터 예측되는 응력-신장률 곡선이, C_1/C_2 의 값이 0.1과 0.5 사이인 경우, 실험결과를 비교적 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다. C_1/C_2 의 값이 0.5 이상인 경우 비교적 큰 오차를 나타내며, 본 연구에서 사용하는 고무에는 적용할 수 없음을 알 수 있다.

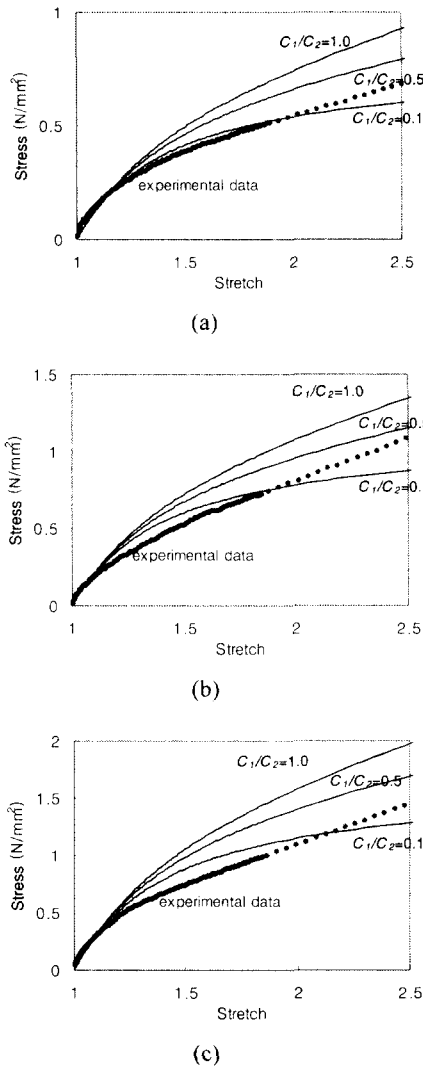


Fig. 1 Comparison of stress-stretch curves with experiment, Mooney-Rivlin model based on numerical data with various ratios of C_1/C_2 for : (a) Duro 40; (b) Duro 50; (c) Duro 60

이상의 결과로부터, 고무의 응력-신장률 관계를 번잡스럽고 힘든 재료시험을 통하지 않고, 재료의 경도로부터 곧바로 Mooney-Rivlin 물질상수를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 물질상수를 계산함에 있어서 C_1/C_2 의 값은 0.1과 0.5 사이의 값을 사용해야 할 것으로 판단되며, 그림들을 살펴보면 0.1에 가까운 값을 사용하는 것이 더 정확하

리라 생각된다. 또한 큰 값을 사용할수록 상대적으로 큰 응력값이 계산됨을 알 수 있다.

3. 방진마운트 동특성 예측

본 연구에서는 방진마운트를 설계함에 있어서 고무의 주파수 의존성과 예하중 의존성을 효과적으로 모두 고려하는 방법을 제시하고자 한다. 고무의 물성치는 주파수 의존성만을 가지는 것으로 가정하고, 예하중 및 경계조건의 변화에 대한 강성의 변화는 유한요소해석에 의해 계산한다. 이 때 유한요소해석을 하기 위해서 필요한 고무의 물성치는, 경도로부터 탄성계수를 계산하는 실험식에 의존하므로 어떠한 재료시험없이 정적 거동을 예측할 수 있게 된다. 따라서 고무의 주파수 의존 재료 특성 자료만이 필요하게 된다. 주파수 의존성을 효과적으로 적용하기 위하여 한가지 가정을 또 하게 되는데, 바로 고무의 정적인 강성과 동적인 강성의 비가 형상에 구애받지 않는다는 가정이다. 이는 고무가 비록 비선형 상태에 있더라도, 하중 진폭이 크지 않은 경우 동특성 해석은 선형으로 가정해도 유효하다고 보기 때문이다. 이러한 가정하에 하중-변위 관계가 이미 비선형상태에 있는 경우에도 그때의 정적 강성을 $K_x(0)$, 동적인 강성을 $K_x(\omega)$ 라 하고, 이 방진마운트의 재료물성치 실험에서 구해지는 정적 탄성계수를 $E(0)$, 동적 탄성계수를 $E(\omega)$ 라 하면 다음의 관계식이 성립한다.

$$K_x(\omega) = K_x(0) \frac{E(\omega)}{E(0)} \tag{9}$$

이러한 가정하에서 설계하고자 하는 방진고무의 재료시험으로부터 얻어지는 정적 탄성계수와 동적 탄성계수와의 관계를 안다면, 임의의 형상을 설계하는 것이 가능해진다. 즉, 원통형 표준시편에 대한 동특성 실험결과로부터 고무의 정/동 강성비를 계산하고 이를 이용하여 복잡한 형상 및 경계조건을 가지는 방진마운트에 적용하고자 한다.

3.1 정적강성과 동적강성의 차이

본 절에서는 원통형 고무시편에 대해 동적강성과 동적강성과의 관계를 살펴보겠다. 대상으로 하는 고무는 Duro 30 부틸고무이다. 저자의 이전 연

구에서⁽⁴⁾ 고무의 동특성을 임피던스 방법으로 구한 바 있다. 마찬가지로 부틸고무 30에 대해 원통형 시편을 제작하고 최소한의 예하중(5% pre-strain)을 가한 상태에서 주파수별 탄성계수의 변화 실험을 수행하였다. 시편형상 및 시험조건은 Table 2에 표시하였고 Table 3에 실험 결과를 나타내었다. 자세한 실험방법은 문헌 4를 참조하기 바란다.

Table 2 Specimen shape and test conditions

Specimen Shape		Test Conditions	
Diameter (mm)	Length (mm)	Pre-strain (%)	Dynamic Amplitude (%)
15	5	5	2

Table 3 Young's modulus from impedance test of duro 30 (pre-strain, dynamic amplitude)

Frequency (Hz)	(5%, 2%)
1	3.085
5	3.373
10	3.554
20	3.829
50	4.263
100	4.818
150	5.242
200	5.540

[unit : MPa]

고무의 정적강성은 유한요소법을 이용하여 계산할 수 있다. 이 경우 고무의 변형률에너지 함수를 결정해야 하는데, 앞절에서의 내용에 따라 Duro 30 부틸고무의 Mooney-Rivlin 재료상수값은, C_1/C_2 의 값을 0.1 라 가정하면 C_1, C_2 는 각각 $1.736 \times 10^4, 1.736 \times 10^5$ 이다. 원통형 시편을 모델링하고 양 끝단을 고정된 상태에서 5% pre-strain을 부여한 결과 유한요소해석에 의한 정적강성은 약 1.77 MPa 이었다.

3.2 방진마운트의 강성해석

내용전개의 이해를 돕기 위하여 저자의 이전 연구내용을 간략히 설명하겠다. Fig. 2에 나타낸 바와 같은 광디스크 드라이브의 방진마운트에 대하여 고정나사의 압축정도에 따른 방진마운트의 강성변화를 유한요소법을 이용하여 해석하고 이러한 강성의

변화가 시스템의 동특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 이 때 스페이서의 압축량은 각각 0.8, 1.3, 2.25 mm 이었고 해석의 타당성은 실제 시스템의 처짐량으로 검증하였다. 또한 각각 압축된 상태에서 전달률 실험을 수행하였고 시스템의 고유진동수를 측정하였다. 그 결과 압축된 상태에 따른 정적강성의 변화로써 고유진동수의 변화를 충분히 예측할 수 있었으며 따라서 방진마운트의 공진주파수를 알고 있다면 방진마운트의 경계조건이나 압축정도가 바뀐 경우에도 새로이 동특성 실험을 수행할 필요없이 정적강성의 변화로써 동특성 변화를 예측할 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다.

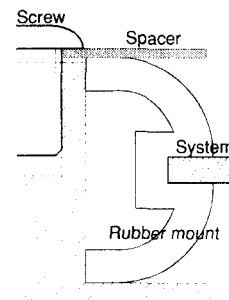


Fig. 2 Schematic diagram of the rubber mount

Table 4는 유한요소해석에 의한 강성의 변화와 스페이서 압축량에서의 전달률실험에 의한 고유진동수 변화를 나타낸 표이다. 여기서 스페이서 압축량 0.8 mm에 비해 1.3, 2.25 mm에서 방진마운트의 강성이 각각 약 1.52, 2.44배 증가하였으며 이는 곧 공진주파수가 각각 1.23, 1.56배 증가할 것이라 예측된다. 실제로 공진주파수는 1.29, 1.57 배 증가하였으며, 이로써 정적 상태 방진마운트의 강성변화로써 공진주파수 변화를 예측할 수 있음을 알 수 있다.

Table 4 Comparison between FEM analysis and natural frequency

Spacer Compression [mm]	Stiffness by FEM [kN/m]	Natural Frequency by Experiment [Hz]
0.8	8.1	42
1.3	12.3	54
2.25	19.8	66

3.3 방진마운트 동특성 계산

원통형 시편의 정/동적 강성의 관계로부터 방진마운트의 동특성은 다음과 같이 계산된다. 설계하고자하는 방진마운트의 공진주파수가 약 50 Hz 근처이며 동적강성이 주파수변화에 민감하지 않으므로 설계단계에서는 고무의 동적 강성을 50 Hz에서의 값으로 가정한다. 이 경우 동적강성과 정적강성의 비(식 (9)에서 $E(\omega)/E(0)$)는 2.41이다. 고정나사 0.8 mm 압축에서는 정적강성값이 8.1 kN/m 이므로 수식 (9)를 이용하여 방진마운트의 동적강성 및 시스템의 고유진동수를 예측해보면, 약 19.52 kN/m, 51.26 Hz 가 된다. 마찬가지로 고정나사 1.3 mm 압축의 경우 약 29.64 kN/m, 63.17 Hz, 고정나사 2.25 mm 압축 경우 약 47.72 kN/m, 79.73 Hz 이다. 이상의 결과를 Table 5에 정리하였다. 예측되는 시스템의 공진주파수는 측정된 값에 비하여 전반적으로 약 20% 정도의 오차를 가지고 있으며 이러한 오차발생의 원인으로는 우선 고무의 경도로부터 변형률함수를 예측할 때, 다음 방진마운트의 정적강성 계산 시 포함되어 있는 오차, 마지막으로 고무의 정/동적 강성관계를 결정할 때 사용된 근사 값에서 발생한다고 사료된다. 이러한 요인에도 불구하고 발생한 약 20 %의 오차는 방진마운트의 초기 설계시 유용하게 이용될 수 있다고 사료된다.

4. 결론

1) 경도로부터 탄성계수를 예측하는 경험식(Gent의 경험식⁽⁵⁾)으로부터 Mooney-Rivlin 물질상수를 계산하였고, 인장시험결과와 비교하여 그 유용성을 확인하였다. 이 경우 물질상수를 결정함에 있어서 C_1/C_2 의 값은 0.1에서 0.5 사이의 값이 적당하였다. 이러한 결과는, 고무의 응력-신장률관계를 재료시험을 통하지 않고, 고무의 경도로부터 Mooney-Rivlin 물질상수를 계산할 수 있으므로 고무해석에 있어 매우 효과적이라 생각된다.

2) 이전의 연구⁽¹⁾에서는 방진마운트를 설계함에 있어서 일단 먼저 원하는 형상을 만들어 한번의 동특성 실험을 수행하여야 했다. 그러나 본 연구에서 제시된 방법은 원통형 시편의 정/동적 강성의 관계가 어떠한 형상 및 경계조건에 대해서도 성립한다는 가정하에 수치해석을 수행하였고, 그 결과 실험값과 비교하여 약 20% 내외의 오차를 보였다. 이러한 방법은 방진마운트를 제작하기 전,

형상과 재질의 정보로부터 동특성을 예측할 수 있으므로 방진마운트 설계시 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

Table 5 Dynamic and static stiffness relation and natural frequency prediction

Cylinder Specimen (5% pre-strain)					
Static Stiffness, $E(0)$ [MPa]		Dynamic Stiffness, $E(\omega)$ [MPa]		Dynamic /Static, $E(\omega)/E(0)$	
1.77		4.263		2.41	
Rubber Mount					
Spacer compression [mm]	Dynamic Stiffness, $K_x(\omega)$ [kN/m]		Natural Frequency [Hz]		
	FEM	Exp.	FEM	Exp.	Error [%]
0.8	19.52	13.2	51.26	42	22.0
1.3	29.64	21.7	63.17	54	17.0
2.25	49.7	33.2	79.73	66	20.8

$$[\text{Error} = |f_{FEM} - f_{exp}| \times 100 / f_{exp}]$$

참고문헌

1. 김국원, 임종락, 안태길, "압축된 방진고무의 강성해석," 한국정밀공학회지 제16권 제6호, pp. 141 ~ 147, 1999.
2. James, A. G., Green, A., and Simpson, G. M., "Strain Energy Functions of Rubber I. Characterization of Gum Vulcanizates," Journal of Applied Polymer Science, Vol. 19, pp. 2033 ~ 2058, 1975.
3. Haines, D. W. and Wilson, W. D., "Strain Energy Density Function for Rubberlike Materials," Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 27, pp. 345 ~ 360, 1979.
4. 김국원, 임종락, 한용희, 손희기, 안태길, "압축하중을 받는 방진고무의 동특성 해석 및 실험," 한국소음진동공학회지 제8권 제5호, pp. 900 ~ 907, 1998.
5. Gent, A. N., "On the Relation Between Indentation Hardness and Young's Modulus," Rubber Chemistry and Technology, Vol. 31, pp. 896 ~ 906, 1958.