

VCR Drum 조립체의 고정나사 체결 Torque 결정에 관한 연구

손영갑*, 김재중*, 백승준*, 장석원*, 유동수*

A Study on the determination of the initial torque in tightening set screw of the drum assembly in VCR

Young-Gap Son, Jae-Jung Kim, Seung-Jun Back, Seog-Weon Chang, Dong-Su Ryu

Key Words: Set Screw(고정나사), Thermal deformation Analysis(열변형해석),
Preload Boss(예압보스), Tightening Torque(체결 토크)

Abstract

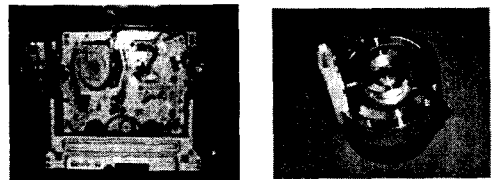
This paper presents an experimental study and numerical thermal deformation analysis in the home appliance, Video Cassette Recorder. Analyzing the change axial force of a set screw according to the change of temperature in the drum assembly, we can determine the initial torque in tightening set screw. The torque will have the preload boss not be separated from the bearing. Also we conduct the fundamental experiment to constitute a boundary condition of the numerical analysis. With the result of this study, we can change the material of preload boss, copper, for aluminum.

1. 서 론

최근 CAE 기술의 발달은 자동차, 항공 산업등 다양한 분야에서 발생하는 많은 문제를 해결하는데 있어서 큰 기여를 해왔다. 그러나 가전 산업 분야에서의 CAE 응용 연구는 미진한 실정이다.

가전 제품인 VCR(Video Cassette Recorder)은 다른 가전제품보다 기계적 공차 및 설계 정밀도 관리가 보다 더 엄격히 요구된다. 특히 VCR을 구성하는 drum assembly는 deck부에서 tape의 기록지에 기록된 data을 읽어들이며 영상을 재생하는 부품으로써 head 부와 함께 VCR 성능을 결정하는 중요요소이다. Fig.1은 VCR 및 drum assembly 위치와 형상을 나타내고 있다.

Drum assembly는 Lower Drum, Upper Drum, 축, 예압보스(Preload Boss), 고정나사, 베어링으로 구성되며 형상은 Fig. 2와 같다. Lower Drum과 Upper Drum 재질은 알루미늄, 축 재질은 SUS이



(a) VCR 내부 (b) Drum assembly

Fig. 1 VCR 내부와 Drum assembly

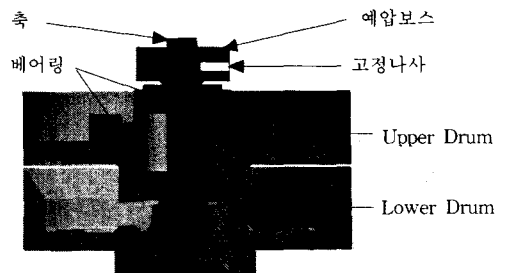


Fig 2. Drum assembly layout

* 대우전자 품질경영연구소

며 베어링은 재질은 SUJ 2, 예압보스 재질은 황동 및 알루미늄이다. 고정나사 형명은 6S-3×6×ABCA×MFZn, 재질은 SCM74813이다.

축과 Lower Drum은 열간압입 방법을 이용해 접합하고 Upper Drum과 베어링은 압입하여 조립한다. 예압보스 상면을 일정 예압으로 누르면서 고정나사에 초기 Torque를 작용시켜 예압보스를 축에 고정시킨다. 예압보스를 이용해 베어링에 일정 예압을 인가함으로써 Upper Drum 회전시 원활한 회전을 가능하게 하며 고정나사는 예압보스를 축에 고정시키는 역할을 한다. 고정 나사의 축력이 풀려 예압보스가 이탈되면 베어링에 일정 예압을 인가하지 못해 Upper Drum이 진동하게 되어 VCR 화질에 중대한 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 현재 황동재질인 예압보스를 가격 저감을 위해 알루미늄 재질로 변경할 경우, drum assembly의 신뢰성을 확보하기 위해서는 예압보스 이탈을 방지해야 하는데 이 때의 적정한 초기 체결 Torque 결정하고자 한다.

2. 본 론

2.1 연구 방법

나사의 역학적 거동은 나사 접촉부의 마찰 계수 및 표면 상태의 비선형성에 따라 많은 문제점을 내포하여 구조해석시 많은 어려움이 수반된다.

또한 본 연구 대상체인 고정나사인 경우 온도 변화에 따른 나사 축력 변화를 실험적으로 계측할 수 없으므로 기존에 제시된 여러 가지 연구 방법을 적용하기에는 많은 문제가 있다.

따라서 본 연구에서는 나사산의 접촉 특성에 관한 연구 대신 고정 나사 체결 Torque에 따른 나사 축력 및 축과 예압보스, 고정나사와 축 사이의 마찰 계수를 실험으로 측정한 결과를 온도 변화시 나사 축력 변화를 해석하기 위한 열변형 해석의 경계조건으로 사용하였으며, 해석방법의 타당성을 검증하기 위해 체결 Torque를 가변하여 열충격 시험을 실시하였다. 또한 현 사용중인 황동 예압보스와 변경 예정인 알루미늄 예압보스에 체결 Torque 결정 연구를 동시에 수행하여 본 연구 방법의 타당성 및 연구 결과의 적용 가능성을 모색하고자 한다.

2.2 열변형 해석

2차원 탄성체의 거동에 기계적 힘 뿐만 아니라 온도 효과를 고려하면 탄성체 전체 strain은 식(1)과 같이 기계적 힘과 온도에 따른 strain의 합으로 표현할 수 있다.

$$\epsilon_{ij} = \epsilon^M_{ij} + \epsilon^T_{ij} \quad (1)$$

여기서 ϵ^M_{ij} 은 기계적 힘에 의해, ϵ^T_{ij} 은 온도에 기인한 변형을 나타낸다. T_0 를 기준온도로, T 를 임의 온도로 가정하면 온도 변화에 기인한 열변형(thermal strain)은 식(2)로 표시할 수 있으며

$$\epsilon^T_{ij} = \alpha(T - T_0)\delta_{ij} \quad (2)$$

여기서 α 는 선형열팽창계수(m/m/°C)를, δ_{ij} 는 Kronecker delta를 나타내는데 i와 j가 동일할 경우 1의 값을 갖는다.

식(2)를 식(1)에 대입하고 Hooke's law를 적용하면 식(3) 및 식(4)로 표현할 수 있다.

$$\epsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \delta_{ij} \sigma_{kk} + \alpha(T - T_0)\delta_{ij} \quad (3)$$

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \nu \delta_{ij} \epsilon_{ii} - (1+\nu)\alpha(T - T_0)\delta_{ij} \quad (4)$$

위와 언급한 바와 같이 온도 변화 및 기계적 힘 변화에 대한 거동을 근거로 열변형 해석시 사용한 S/W는 MSC Nastran V69.1, H/W는 Sun Sparc 20을 사용하였으며 해석 모델은 Fig. 3과 같다.

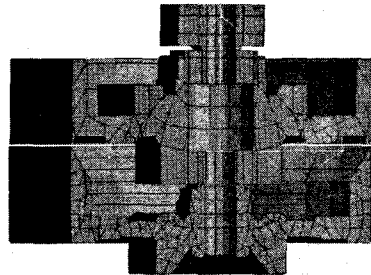


Fig 3. Drum assembly 모델링

열변형 해석은 3단계로 구성되는데 1단계에서는 초기 고정 나사 축력의 온도 변화에 따른 변화를 해석하였다. 예압보스를 Brick element를 이용해 3D 모델링 하였으며, 고정나사를 조일 때 축과 예압보스 사이의 접촉은 선접촉(line contact)이며, 나사 축력은 선접촉 전체부위에 분포한다고 가정하였다. 2단계에서는 온도 변화시 발생하는 Drum assembly 열변형이 축과 예압보스 접촉면에 미치는 영향을 해석하였다. 열팽창에 의해 예압보스에 인가되는 힘을 해석하기 위하여 Lower · Upper Drum과 Bearing은 Axisymmetric Brick element로, Lower · Upper Drum과 Bearing 사이의 접촉면은 Contact element로 모델링하였다. 또한 고정나사와 축사이의 접촉은 고정나사 특성상 점접촉으로 가정하여 나사 축력이 점접촉 지점에 작용한다고 가정하였다. 3단계에서는 1, 2단계에서 수행한 해석 결과를 토대로 온도 변화에 따른 나사 축력 변화를 분석하고 궁극적으로 열충격시 예압보스 이탈 방지를 위한 체결 Torque를 결정하였다.

2.2.1 나사 축력 변화

고정나사 초기 조립 Torque에 의해 발생하는 나사 축력이 축과 고정나사, 예압보스에 작용할 때 Fig. 4와 같다.

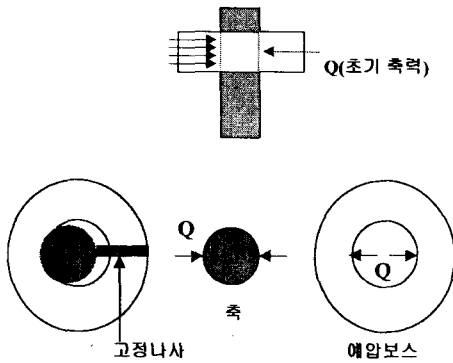


Fig 4. 나사 축력 작용

온도 변화시 나사 축력 변화는 축과 예압 보스 접촉면에서 축변형과 예압보스 변형이 동일하다는 가정하에 식(5)로 표현할 수 있다.

$$r_s \times \alpha_s \times \Delta T - \frac{Q_T}{K_s} + \delta_s + \delta_B \quad (5)$$

$$= r_B \times \alpha_B \times \Delta T + \frac{Q_T}{K_B}$$

여기서 r_s, r_B 는 축과 예압보스 반경, α_s, α_B 는 축과 예압보스 열팽창계수, K_s, K_B 는 축과 예압보스에 단위 변형당 작용하는 압축력, δ_B, δ_s 는 초기 고정나사 축력에 의한 축과 예압보스 변형량을 나타낸다. 따라서 온도 변화에 따른 나사 축력 변화는 식(6)으로 표현할 수 있다.

$$Q_T = \frac{K_s K_B}{K_s + K_B} (r_s \cdot \alpha_s \cdot \Delta T - \alpha_B \cdot \Delta T + \delta_s + \delta_B) \quad (6)$$

2.2.2 온도상승시 예압보스가 받는 압축력

항온 Chamber를 이용하는 열충격시험시 Drum assembly 전체 온도는 동일하며, VCR 정상동작시에도 Drum assembly의 전체 온도는 동일하다고 가정하였다. 온도 저감시 예압보스에 압축력은 작용하지 않는다고 가정하였다. 온도 상승시 고정 나사가 축을 일정한 힘으로 누르고 있어 고정 나사와 축이 접촉을 유지한다면 예압보스와 베어링사이의 접촉면에서 압축력이 발생한다.

Fig. 5는 예압보스 및 고정 나사를 제외한 Drum assembly 온도가 상온 25℃에서 80℃로 상승할 때의 높이 방향 변형량을 나타낸다. 그러므로, 예압보스 열변형을 각각 해석하여 예압보스와 베어링 접촉면에서 발생하는 예압보스 변형 위치와 및 베어링 상면부 변형 위치가 동일하다는 가정하여 예압보스에 작용하는 압축력을 해석하였다.

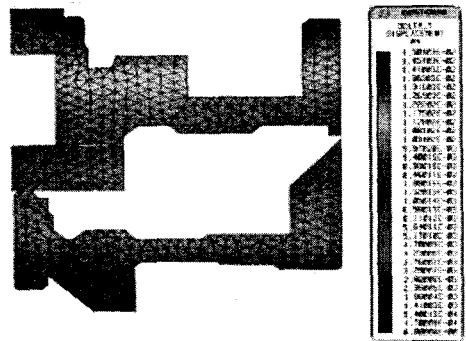


Fig 5. 온도상승시 drum assembly 열변형

2.2.3 체결 Torque 해석

Drum assembly의 온도가 상승할 때 예압보스에 작용하는 힘을 Fig. 6에 나타내었다.

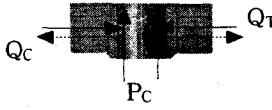


Fig 6. 온도 상승시 예압보스에 작용하는 힘

여기서 Q_T 는 온도변화에 따른 나사 축력, P_C 는 예압보스에 작용하는 압축력 P 에 의해 축과 예압보스 접촉면에서 발생하는 힘, Q_C 는 P_C 에 의해 나사 축력의 반대 방향으로 작용하는 힘을 표시한다.

본 연구에서는 예압보스와 축의 접촉면을 구속하여 예압보스 하단부에 압축력, P 인가시 발생하는 접촉면 Reaction Force를 해석함으로써, 압축력 P 에 의해 축과 예압보스 접촉면에서 예압보스를 밀어 올리는 힘, P_{TC} 를 결정하였다. 또한 P_C 에 의해 예압보스는 나사 축력의 반대 방향으로 힘을 받게 되는데 이 힘은 다음과 같다.

$$Q_C = \frac{P_C}{\mu_B} \quad (7)$$

여기서 μ_B 는 축과 예압보스 사이의 정지 마찰 계수이다. 그러므로 Drum assembly 열변형시 예압보스에 작용하는 힘은 초기 나사 축력의 온도 변화에 의한 축력(Q_T)과 2.2.2에서 구한 예압보스 압축력에 의해 발생하는 나사 축력의 반대 방향으로 작용하는 힘(Q_C)으로 나눌수 있으며 온도 변화에 따른 나사 축력은 $Q(T)$ 는 다음과 같다.

$$Q(T) = Q_T - Q_C \quad (8)$$

온도 변화시 $Q(T)$ 가 양수인 경우 예압보스와 축이 접촉을 유지하며, $Q(T)$ 가 음수인 경우 예압보스와 축은 접촉을 유지하지 못하여 예압보스가 이탈하게 된다.

2.3 실험

2.3.1 예압보스 축력 측정 실험

Fig.7과 같이 고정나사를 일정 Torque로 조일 경우 발생하는 고정나사 축력과 Torque와의 관계는 식(9)와 같다.

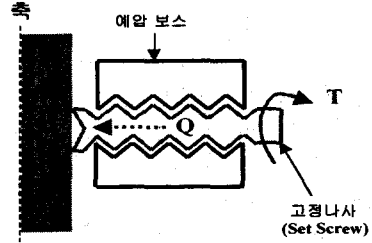


Fig 7. 고정나사 체결 Torque(T)와 나사 축력(Q)

$$T = \frac{1}{2} Q [d_2 \tan(\alpha + \rho) + \mu_s D] \quad (9)$$

여기서 T 는 고정나사 체결 Torque이며, Q 는 체결 Torque에 따른 나사 축력, d_2 는 고정나사 유효지름, D 는 고정나사와 축사이의 접촉 지름, α 는 고정나사 리이드 각, ρ 는 나사 마찰각, μ_s 는 고정나사와 축사이의 마찰 계수를 나타낸다.

그러나 식(9)로부터 고정나사 축력을 결정할 경우 고정나사와 예압보스사이의 마찰 특성(ρ) 및 고정나사와 축사이의 접촉 특성(μ_s, D)을 실험적으로 측정하기 매우 어렵다. 그러므로 본 연구에서 수행한 예압보스의 초기 체결 Torque에 따른 나사 축력 및 축과 예압보스, 축과 고정나사 간의 마찰계수를 측정하기 위한 실험 방법은 다음과 같다.

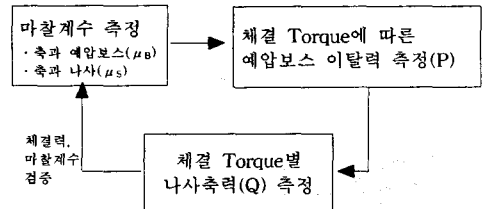


Fig.8 같이 고정나사에 일정한 체결 Torque를 작용시킬 때 예압보스를 이탈시킬 수 있는 하중 P 는 식(8)과 같다.

$$P = \mu_s Q + \mu_B Q$$

$$Q = \frac{P}{\mu_s + \mu_B} \quad (8)$$

여기서 P 는 예압보스 이탈 하중, μ_s 는 고정나사와 축사이의 마찰 계수, μ_B 는 예압보스와 축사이의 마찰 계수를 나타내며, 식(8)로부터 예압

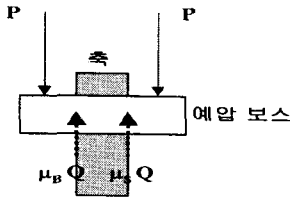


Fig. 8 예압보스 이탈력

보스 이탈력을 측정하여 나사 축력을 구할수 있다. 축과 예압보스, 축과 고정나사간의 정지마찰 계수 및 예압보스 이탈 하중을 측정함으로써 나사 체결력을 결정하였으며 이의 검증을 위해 체결 Torque에 따른 고정나사 축력을 직접 측정함으로써 축과 나사 및 예압보스 사이의 마찰계수를 보정하였다. 고정나사 축력을 측정하기 위한 실험 구성도는 Fig.9에 나타났다.

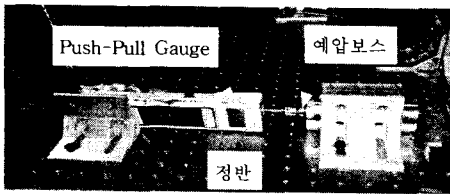


Fig. 9. 나사 축력 측정 실험 구성

고정나사 체결 Torque에 따른 나사 축력 및 축과 예압보스 사이의 마찰 계수, 축과 고정나사 사이의 마찰계수는 열변형 해석시 초기 축력 및 예압보스 이탈을 분석하기 위한 경계조건으로 이용된다.

2.3.2 열충격 실험

열변형 해석을 검증하기 위해 예압보스 초기 체결 Torque를 9, 10, 12kgf·cm로 조립하여 Fig.10 과 같은 Cycle을 기준으로 5 Cycle 열충격시험을 실시하였다. 시험 시료는 각 체결 Torque(9, 10, 12kgf·cm) 및 예압보스 재질(황동, 알루미늄)이 각기 다른 10개씩의 Drum assembly, 총 60개로 구성하였다. 또한, Height gauge를 이용하여 열충격시험 전후의 축과 예압보스의 높이 변화량을 측정함으로써 예압보스 이탈 여부를 판단하였다.

3. 연구 결과

황동 및 알루미늄 예압보스 사용시 예압보스를

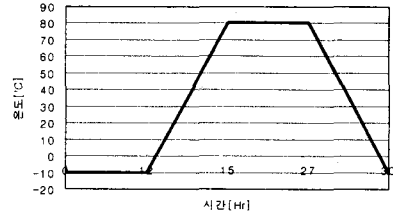


Fig 10. 열충격 Cycle 조건

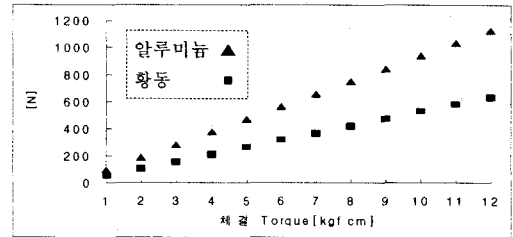


Fig 11. 체결 Torque에 따른 예압보스 이탈력

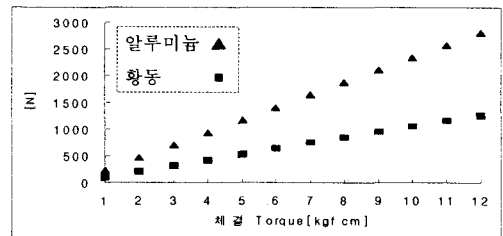


Fig. 12 체결 Torque에 따른 나사 축력

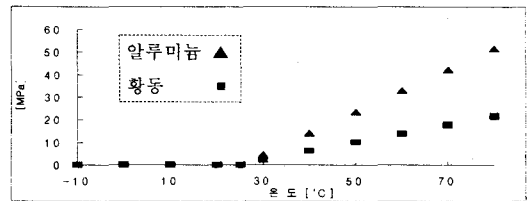


Fig 13. 온도 변화에 따른 예압보스 압축력

이탈시키는 데 필요한 힘은 Fig.11에 나타났으며, 마찰계수 측정 결과, 축과 고정나사 사이의 정지마찰계수는 0.1, 축과 황동 재질의 예압보스 접촉 마찰계수는 0.4이고, 축과 알루미늄 예압보스 접촉 마찰계수는 0.3이다. 또한 예압보스 체결 Torque에 따른 고정 나사 축력 실험 결과는 Fig.12와 같으며 고정나사에 동일한 체결 Torque 인가시 황동에 비해 알루미늄 예압보스에 보다

큰 축력이 인가되는 것을 알 수 있다.

Fig.13과 같이 온도 변화시 예압보스가 받는 압축압력은 황동재질 보다 알루미늄재질인 예압보스가 더 큰 압축압력을 받고 있다. 상온 25℃에서 초기 체결 Torque 인가시 온도 변화에 따른 나사 축력 변화를 Fig.14, 15에 표시하였다.

해석 체결 Torque는 3~12kgf·cm이며 황동은 8kgf·cm 이상, 알루미늄은 10kgf·cm 이상 고정나사를 체결하여야 만이 고정나사 축력이 작용하므로 예압보스 이탈을 방지할 수 있다. 또한 VCR 동작중 Drum Assembly의 온도는 VCR 주위공기 온도 대비 약 20℃ 정도 상승하므로 주위공기 온도가 40℃라 가정할 경우 황동보스 6kgf·cm, 알루미늄 예압보스는 7kgf·cm 이상 고정나사 체결 Torque로 관리해야 온도 상승시 고정 나사 초기 체결 Torque를 유지할 수 있다.

열충격시험 결과를 표 1에 나타냈으며, ±13μm 이내의 높이 측정오차를 감안하여 오차 범위 이상으로 예압보스 높이가 변형되었을 경우 예압보스가 이탈되었다고 판정하였다. 따라서 황동 재질은 9, 10, 12kgf·cm 조립시 예압보스가 이탈되지 않았고, 알루미늄 재질은 9kgf·cm 조립시 예압보스가 이탈되었다.

4. 결론

본 연구 결과로부터 해석 결과와 이에 대한 검증 실험 결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있으므로 가전제품 설계시 CAE 기술 적용 가능성을 확인할 수 있었다. 또한 예압보스 재질을 황동에서 알루미늄으로 변경할 때 체결 Torque 대비 나사 축력은 알루미늄이 크지만 온도 상승시 알루미늄 예압보스가 받는 압축력이 황동보다 크게 작용하여 황동 예압보스 체결 Torque보다 1kgf·cm 이상 더 높은 체결 Torque로 고정 나사를 체결해야 하며 고정 나사 초기 체결 Torque 상승시 축과 예압보스부에 걸리는 응력이 상승할 것으로 예상되므로, 고정나사 체결 Torque는 예압보스 이탈 방지를 위한 Torque 중 최저 Torque로 설정해야 할 것으로 사료된다. 향후 응력면에서 현재 설정된 체결 Torque의 적용 가능성에 대한 연구 및 본 연구에서 고려하지 못한 시간에 따른 온도 변화시 drum assembly 열 거동 분석을 수행할 예정이다.

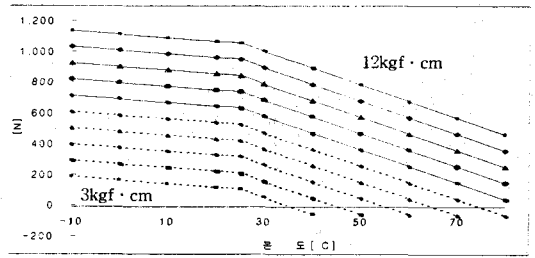


Fig 14. 온도 변화에 따른 나사 축력 변화 (황동 예압보스)

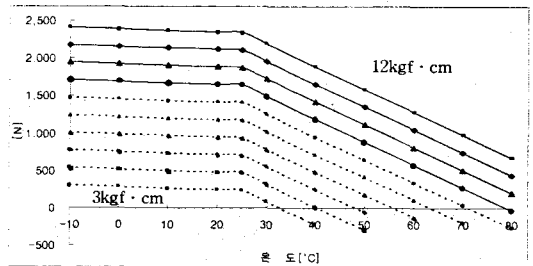


Fig 15. 온도 변화에 따른 나사 축력 변화 (알루미늄 예압보스)

표 1. 열충격 실험 결과

Torque [kgf·cm]	예압보스 변화량[μm]		축 변화량[μm]
	황동	알루미늄	
9	-8~9	368~462	-1~6
10	-10~7	-9~7	-5~8
12	-10~10	-10~9	-7~9

참고문헌

- (1) George E. Mase, G. Thomas Mase., Continuum mechanics for Engineerings, CRC, 1992
- (2) T. Fukuroka, T. Takaki, 1998, "Mechanical Behaviors of Bolted joint in Various Clamping Configurations", Transactions of the ASME, Vol. 120, pp 226~231
- (3) L. Champaney, J.Y. Cognard, P. Ladeveze, 1999, "Modular analysis of assemblages of three-dimensional structures with unilateral contact conditions", Computers & Structures, pp 249~266