

세라믹 축과 금속링의 열박음 체결력 특성에 관한 연구

Characteristics of the shrink fit strength using ceramic shaft and metal ring

Sang-Hoon Choi/ 건국대학교

Chang-Kyun Kim/ 성남기능대학

ABSTRACT

Using carbon steel or ceramic as a shaft material of monolithic and slited insert ring clamped on it. The fitting strengths of the shrink fitted assemblies measured from room temperature to 300°C and following conclusions were obtained as results of this investigation.

1) The fitting condition under which the shrink fitted assemble was stronger than that using simple fit in high temperature.

2) When both material of the 30mm-diameter shaft and 55mm-diameter boss are SM45C, the clamping torque is increased 2.7times as the interference increases 3 times from 20 μ m at the contact length of 6mm monolithic fit.

3) When only the material of boss is changed to STS304, the clamping torque is increased at the rate of 37.4N.m per 1mm increase of the contact length at the interference of 50 μ m monolithic fit.

Key words : ceramic(세라믹), monolithic(단일체), slit(절개), insert(삽입), shrink fit(수축결합), coefficient thermal expansion(열팽창 계수)

1. 서론

동력을 전달하는 축과 보스의 체결 방법 중에서 수축 결합은 key, pin에 의한 체결 방법보다 정확한 축심을 유지하며 큰 체결력을 얻을 수 있다. 제트 엔진이나 증기 터빈과 같이 고온상태에서 사용되는 축과 보스에 있어서는 사용재료별 열팽창 계수의 차이에 따라 접합부에 일정 온도 상승시 체결력의 저하를 가져올 수 있다.

열박음 재료로서의 세라믹은 내식성, 내열성, 내마모성이 우수한 재료로 고온기계나 정밀기계의 부재로 사용되어지고 있으며 반면에 절삭 가공이 어려우며 취성을 지니고 있다.

세라믹을 기계 부품으로 사용할 때 일반적으로 금속을 결합해서 사용하고 있으나 열팽창 계수의 차로 인하여 고온 상태에서의 결합력은 감소한다.

결합력을 증대 시키기 위해서 단순 이중링 형태는 고온상태에서는 풀림이 발생하므로 축과 보스 사이에 원통형으로 절단된 insert ring을 삽입하여 고온상태에서도 체결력이 저하되지 않는 방법의 적용이 유용하다.

본 연구는 축과 보스에 세라믹과 금속을 사용하여 보스와의 단순 결합을 통한 특성과 열팽창율이 높은 insert ring을 사용하여 고온상태의 열팽창시에도 체결력이 저하되지 않고 일정한 체결력을 얻을 수 있도록 사용된 금속재료별 열박음 특

성을 비교 연구하고자 하였다.

Table 3.1 Description of experimental equipments

NO	NAME	Description of Specification
1	Surface roughness tester	Pick-up(E-DT-S0 1A) Amplifier and indicator(E-DT-s 03A) Dial test indicator : MITUTOYO MFG CO * Recording : 0.1μm - 400μm * Recording : 0.005μm - 50μm * Magnification : 100 - 100,000 Times
2	Hydraulic press	Model : C-Type Load capacity : 50 ton (7Kw) Table(axbxt) : 400x300x16
3	Temperin g furnace	Temper Range : 0 - 650 °C Internal Size : φ 320 mm L = 450 mm 220V, 60Hz, 4.5Kw

2. 이론적 고찰

2-1. Insert Ring을 사용한 Ceramic축의 체결

ceramic은 내식성, 내열성, 내마모성이 월등히 좋은 재료로 ceramic을 사용한 기계부품에 있어서 필요한 부분을 사용하고 타 부분은 금속을 사용하는 것이 일반적이며 ceramic축과 금속 원통을 조립시 ceramic의 열팽창계수가 적기 때문에 고온에서의 결합강도가 감소되므로 고온으로 상승시에도 결합강도가 저하되지 않는 방법으로 열팽창계수가 큰 insert ring을 사용하는 것이 효과적이다.

실온에서의 체결체의 결합부와 압력과 체결관계에서는

$$\delta = 2R_1P \left\{ \frac{1-\nu_s}{E_s} + \frac{1}{E_c} \left(\frac{R_3^2 + R_1^2}{R_3^2 - R_1^2} + \nu_c \right) \right\} (2 - 1)$$

관계가 이루어진다.

양 재료의 열팽창 차 때문에 체결체가 고온하에서의 결합부의 변화량은

$$\Delta\delta = 2 R_1 (\alpha_s - \alpha_0)\Delta T \dots\dots\dots(2 - 2)$$

로 되며 shaft가 ceramic이고 ring이 금속일 때 일반적으로 $\alpha_0 > \alpha_s$ 가 성립하므로 고온하에서의 결합력을 보장하는 목적으로 ceramic shaft와 금속링 사이에 열팽창계수가 큰 금속링을 압입하여 직방체라고 하면

$$\Delta\delta = 2\{(R_2 - R_1)\alpha_i - (R_2\alpha_c - R_1\alpha_s)\}\Delta T \dots\dots\dots(2 - 3)$$

이 되고 고온상태에서의 보다 큰 체결력을 얻을 수 있다.

3. 실험

3-1. 실험 기기

본 실험에서 사용된 주요 가공기계 및 실험 기기들은 Table 3.1과 같다.

3-2. 시험편

시험편 재료는 열처리후 표면연마한 Al₂O₃계 ceramic 축과 SM45C축을 다이아몬드 공구를 사용하여 선삭가공 하였으며 boss의 재질은 SM45C, insert ring을 STS304, 외측 링을 STS403으로 사용하여 선삭가공한 값의 표는 Table 3.2와 같다.

Table 3.2 Cutting Condition for the Specimens

	Cutting Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth of cut (mm)
SM45C STS304,403	169.6	0.15	0.1
Al ₂ O ₃	13.2	0.06	0.05

Table 3.3 Mechanical Properties of Specimens

	Young's modulus E (MPa, 20°C)	Poisson's Ratioν 20°C	Coef.of themal expansion α
Al ₂ O ₃	3.14 x 10 ⁵	0.235	7.6 x 10 ⁻⁶
STS304	1.93 x 10 ⁵	0.30	18.8 x 10 ⁻⁶
STS403	2.00 x 10 ⁵	0.30	11.7 x 10 ⁻⁶

3-3. 실험 장치

Fig 3.1과 Fig 3.2와 같이 시험 축에 결합시킨 boss를 가열하기 위하여 실험장치 부근에 설

치하였으며 축과 boss 결합부의 slip상태를 측정하기 위하여 torque 측정장치와 축 방향의 slip 발생시 하중을 측정하기 위하여 유압프레스를 사용하였다.

3-4. 실험 방법

제작된 시험편 축과 Boss, insert ring을 roughness tester의 정반 위에 고정하고 표면 거칠기(R_{max})를 구하였다.

측정 결과 SM45C는 $1.9\mu m$, ceramic은 $8.8\mu m$ 로 측정되었고, slit내면의 거칠기는 SM45C는 $9.9\mu m$, STS304는 $10.9\mu m$ 로 측정되었다.

시험편은 세척유로 세척한 후 가열로에서 $300^{\circ}C$ 까지 가열하여 충분히 열팽창 시킨 후 insert ring과 shaft를 삽입하고 시험편의 결합체를 실온까지 냉각한 후 $50^{\circ}C$ 간격으로 가열과 냉각을 반복하여 Fig 3.1과 같이 torque와 축방향의 하중을 가한 후 가해진 하중으로 인해 축과 insert ring의 slip이 발생할 때의 하중을 측정하여 접촉 면적으로 나누어 단위면적에 대한 마찰력의 값을 구하였다.

$$\mu N = \frac{W}{2\pi r^2 b} \text{ (kg/mm}^2\text{)} \dots\dots\dots(3 - 1)$$

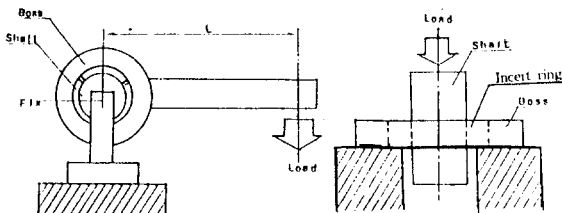


Fig 3.1 Instrument of Torque and Normal Force Test

3-5. 실험 결과

3-5-1. 접촉부 간섭량, 직경, 길이 변화에 따른 체결효과

Table 3.4, Fig 3.3은 접촉부 길이를 증가시

키고 간섭량과 직경을 증가시켜 나타난 결합강도의 결과로써 접촉부 길이를 6mm, 간섭량은 $30\mu m$ 와 $50\mu m$ 하고 $\phi 16mm$ 로부터 $\phi 30mm$ 까지 직경을 2mm씩 증가시켰다. 시험결과 SM45C의 경우 수직방향의 전단강도는 $18.1\sim 32.4MPa$ 로 변화였고 STS304의 경우 $14.7\sim 32.2MPa$ 까지 변화하였다. Table 3.5, Table 3.6, Fig 3.3, Fig 3.4는 $20\mu m$, $40\mu m$, $60\mu m$ 의 체결 간섭량의 결과로 SM45C의 체결력이 우수한 것을 보여주고 있다. 또, Table 3.7은 세라믹 축과 SM45C와 STS304를 보스 재료로하고 간섭량을 $50\mu m$ 로하여 체결한 결과이다.

3-5-2. slit, insert ring의 체결 효과

Table 3.8, Table 3.9, Fig 3.5는 slit insert ring의 두께 변화와 온도 상승에 따른전단강도에 미치는 영향에 대한 도표로서 간섭량을 $34\mu m\sim 38\mu m$ 로 하고 slit두께를 12mm, 9mm, 6mm로 하였을 때 일편의 두께가 12mm인 경우 온도 상승에 따라 체결력이 향상되고 있으며, 그것은 온도상승과 열팽창에 따른 효과적인 체결작용에 기인하는 것이라 생각된다. Table 3.10, Fig 3.6은 단일체 insert ring과 3개소를 절단한 slit ring을 $300^{\circ}C$ 까지 가열하여 수직하중을 측정한 결과이다. 단일체에서는 온도상승과 함께 전단강도가 급격히 감소하고 있으나 3개소를 slit한 insert ring에서는 온도상승에도 전단하중에 의한 강도의 변화가 크지 않았다.



Fig 3.2 Test Specimen(Shaft and Boss)

Table 3.4 Fitting Strength of normal force(SM45C, STS304)

materials		Diameter		length of contact (mm)	Fitting Interference (μm)	Normal Force(MPa) Experimental Value	
Shaft	Boss	Shaft d(mm)	Boss D(mm)			1st	2nd
SM45C	SM45C	φ16	φ55	6	30 ± 3	18.1	17.9
		φ18	"	"	"	20.6	21.3
		φ20	"	"	"	22.3	22.8
		φ22	"	"	"	23.9	24.2
		φ24	"	"	"	25.9	26.7
		φ26	"	"	"	27.8	27.2
		φ28	"	"	"	31.2	30.8
		φ30	"	"	"	32.4	32.1
SM45C	STS 304	φ16	φ55	6	50 ± 3	14.7	20.3
		φ18	"	"	"	18.3	21.2
		φ20	"	"	"	20.2	21.8
		φ22	"	"	"	22.2	22
		φ24	"	"	"	23.6	24.7
		φ26	"	"	"	27.8	26.8
		φ28	"	"	"	28.1	29.7
		φ30	"	"	"	32.2	33.4

Table 3.5 Fitting Strength of Torque test (SM45C, STS304)

material		Diameter		length of contact (mm)	Fitting Interference (μm)	Experimental Value	
Shaft	Boss	Shaft d(mm)	Boss D(mm)			Torque (N.m)	μN (kg/mm ²)
SM 45C	SM 45C	φ30	φ55	6mm	20 ± 3	120	1.44
		"	"	"	40 ± 3	147	1.77
		"	"	"	60 ± 3	325	3.83
	STS 304	"	"	"	20 ± 3	65	0.78
		"	"	"	40 ± 3	125	1.51
		"	"	"	60 ± 3	275	3.31

Table 3.6 Fitting Strength of normal force (SM45C, STS304)

material		Diameter		length of contact (mm)	Fitting Interference (μm)	Normal Force(Mpa) Experimental Value
Shaft	Boss	Shaft d(mm)	Boss D(mm)			
SM 45C	SM 45C	φ30	φ55	6mm	20 ± 3	23
		"	"	"	40 ± 3	36
		"	"	"	60 ± 3	91.1
	STS 304	"	"	"	20 ± 3	13.9
		"	"	"	40 ± 3	26
		"	"	"	60 ± 3	55

Table 3.7 Fitting Strength of normal force (SM45C, STS304)

materials		Diameter		length of contact (mm)	Fitting Interference (μm)	Normal Force(MPa) Experimental Value	
Shaft	Boss	Shaft d(mm)	Boss D(mm)			1st	2nd
Al ₂ O ₃	SM45C	φ30	φ55	6	50 ± 6	20.4	22.4
	STS 304	"	"	"	"	23.5	26.7

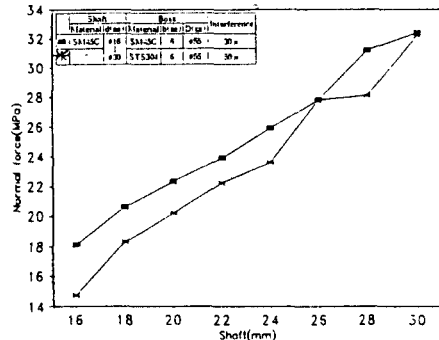


Fig 3.3 Fitting Strength of Normal test

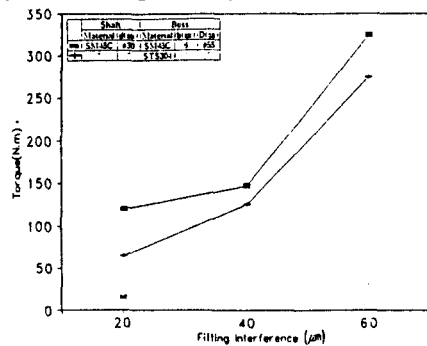


Fig 3.4 Effect of Fitting Interference of Torque Test

Table 3.8 Dimension of Test Specimen

	Diameter		Contact Length	interference
	inner	outer		
Shaft (Al ₂ O ₃)		φ 25	6	34~38μm
insert ring (STS304)	φ 25	φ 38, 45, 50	"	
outer ring (STS403)	φ 45	φ 55	"	

Table 3.9 Relation of Temperature and Shear Strength

Temp (°C)	Normal Force(Mpa)		
	φ25-φ50-φ55	φ25-φ45-φ55	φ25-φ38-φ55
50	29.1	26	21
100	32.5	28	18.5
150	35	26.2	16.2
200	38.6	24.2	15
250	40	25.5	13.4
300	42	27.2	12

Table 3.10 Relation of Temperature, Shear Strength and Insert Ring

Temp(°C)	Normal Force(Mpa) : (φ25-φ45-φ55)		
	Slit 3	Monolithic	None Slit
20	29	28.2	27
50	28.3	16	10.4
150	27.5	10	6
200	27.3	5	2
250	27	2	.
300	27.5	.	.

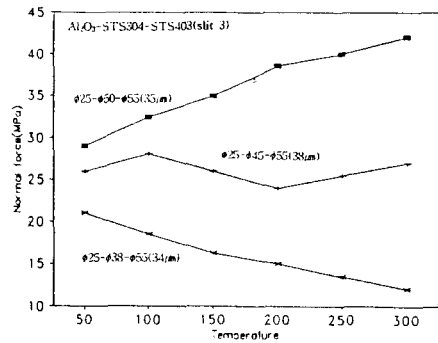


Fig 3.5 Relation of Temperature and Shear Strength at the Inner Interference

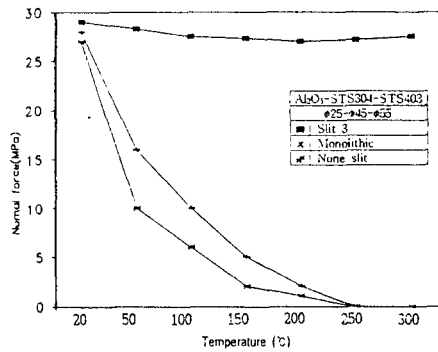


Fig 3.6 Relation of Temperature, Shear Strength at the Insert Ring

4. 고찰

축재료를 Al₂O₃, insert ring을 STS304, outer ring을 STS403을 사용하고 체결 간섭량을 40μm로 하여, 상온 20°C에서 300°C까지 50°C간격으로 가열과 냉각을 하며 열박음 체결력 강도를 시험하였다.

Fig.3.5은 축의 직경을 φ25mm로 하고 insert ring의 직경을 φ25-φ50, φ25-φ45, φ25-φ38로 체결하여 수직하중을 측정한 결과 체결체 두께와 온도 상승에 대한 체결력은 φ50의 경우 가열온도가 250°C 상승함에 따라 12.9MPa 체결력이 증가되고, φ44의 경우와 φ45의 경우 체결력의 증감이 적었으며 φ38의 경우 감소함을 보여주고 있다.

Fig.3.6은 insert ring을 3편으로 slit한 것과 slit하지 않은 단일체로 한 것, insert ring이 없는 외측링만을 체결한 것의 3종류로 온도상승에 따른 체결강도에 대한 시험 결과이다. insert ring을 3

편으로하여 체결한 것은 타결합체보다 온도상승에 대한 체결력이 우수함을 보여준다.

이하의 실험은 insert ring을 사용하지 않고 축 재료를 SM45C로 하고 보스의 재질을 SM45C와 STS304로 바꾸어 체결하고 간섭량과 직경을 변화시키며 torque와 normal force를 측정하였다.

Table 3.7에서는 체결 간섭량을 SM45C는 30 μ m로 하고 STS304는 50 μ m로 하며 결합후 직경을 ϕ 16~ ϕ 30까지 증가시키며 결합하여 측정한 결과이다. 체결 간섭량과 비교하여 볼 때 SM45C가 STS304보다 체결효과가 우수함을 보여주고 있다.

5. 결론

Ceramic과 SM45C를 축재료로 사용하고 단순축결합과 boss에 열팽창계수가 높은 STS304 insert ring을 삽입하여 크기와 결합부의 간섭량을 변화시키며 상온에서 300 $^{\circ}$ C까지 가열하면서 열박음을 하여 체결력의 크기를 실험적으로 규명한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 열팽창계수가 높은 STS304 slit insert ring을 사용한 경우 300 $^{\circ}$ C로 가열시 ring의 열팽창 효과로 인하여 수축결합강도가 감소하지 않았다.
- 2) 35 μ m의 간섭량과 insert ring 1편의 두께가 12.5mm의 것은 수직하중에 의한 체결력이 12.9MPa 상승되었다.
- 3) SM45C(ϕ 30mm) 축과 SM45C(ϕ 55mm) Boss에서, 열박음부의 접촉길이를 6mm로 하고 결합부의 간섭량을 20 μ m에서 60 μ m까지 증가시켜 체결한 결과 torque는 120N.m-325N.m로서 2.7배 증가하였다.
- 4) SM45C(ϕ 30mm) 축과 STS304 Boss에서 결합부의 간섭량을 50 μ m로 하고 수직하중에 의한 체결력을 측정한 결과 열박음 접촉부의 직경 2mm 증가시마다 평균 2.5MPa이 상승되었다.

參 考 文 獻

1. Isami NITTA 外 2人, Shrink Fit between a Ceramic and a Metal Element Using Hybrid Shrink Fitter JSME J SER C (JPN) 38卷3號 (1995) PP. 617-624
2. W.Mack and M.Bengeri, Thermal assembly of an Elastic-Plastic Shrink fit with Solid inclusion. LNT J MECH SCI (GBR) 36卷8號 (1994) PP. 699-705
3. 新田勇外 2人, Study on the fitting strength between ceramic and metal with the use of insert ring at elevated temperature (1st report proposal of the method of the shrink fit with the use of insert ring and experimental results) 日本 機械學會 論文集(C編) 55卷510號 (1989-2)論文 NO-0561A PP. 417-423
4. 小山富夫外 2人, A study on the Torque transmission characteristics of taper bushing without key 日本 機械學會 論文集 (C編) 55卷514號(1989-6)論文 NO.88-1479B PP. 1427-1431
5. 原利昭外 2人, The fitting strength between ceramic and metal with the use of an shrink fitter of bimetal at elevated temperature 日本 機械學會 論文集(C編) 56卷525號(1990-5)論文 NO.89-0243A PP. 1289-1296
6. 尾田十八外 2人, On a method of obtaining uniform stress distributions for composite components with interference fits 日本 機械學會 論文集(A編) 56卷525號(1990-5)論文 NO.89-0700A PP. 1226-1231
7. 新井田夕外 4人, A study on force-fitted spur gears in consideration of contact condition(On the internal pressure at the fitting surface and root stress of gear tooth) 日本 機械學會 論文集(C編) 52卷480號 (昭61-8)論文 NO.85-0979A PP.1287-2139

8. Yoshihiro SAKAMOTO外 3人, A synthesis of planar mechanisms with pairs of optimum tolerances" JSME international journal" seriesIII, vol.33, no.2, 1990
PP. 139-144

NOMENCLATURE

δ : Fitting interference in room temperature

R_1 : Radius of Ring

R_2 : Radius of Insert Ring

R_3 : Radius of Shaft

P : Fitting pressure

E_s : Young's modulus of Shaft

E_c : Young's modulus of Boss

ν_s : Poisson's ratio of Shaft

ν_c : Poisson's ratio of Ring

α_c : Coef. of Thermal expansion of Boss

α_s : Coef. of Thermal expansion of Shaft

α_i : Coef. of Thermal expansion of Insert ring

α_0 : Coef. of Thermal expansion of Outer ring