

조립용 로봇을 위한 수동형 컴플라이언스
시스템에 관한 구조적 연구

민 정 동 안 태 영 권 구 빈
삼 성 정밀 연구 소

A Structural Study on the Passive Compliance
System for Assembly Robot

Jung-Dong MIN, Tae-Young AHN and Koo-Bin KWON
Sam Sung Precision Industries CO.,LTD. Research Lab.

Abstract

Up to now, the most studies on the passive compliance system for assembly robot were only concerned about the device itself without thorough analysis of its concept. In this paper, we have tried to analyze a structural characteristics, in the case that the passive compliance system was used in simple assembly process like inserting a round shaft or peg into a round hole.

1. 서 론

오늘날 조립용 로봇은 다품종 소량생산을 요구하는 조립작업에서 조립전용기에 비해 경제성도 있을 뿐 아니라 간단히 공구단 만을 교환하므로써 다양한 조립작업에 쉽게 응용될 수 있기 때문에 현장에서 유용하게 이용되고 있다.

그러나 이러한 생산계통에 조립용 로봇을 사용하기 위해서는 일의 능률, 100% 성공률, 미소한 공차의 부품 조립등 조립시 생기는 어려운 문제들을 해결해야만 한다.

이 해결은 근본적으로 로봇이 적용할 작업환경에서 자기의 상태를 인식할 수 있게하는 visual feedback 과 force feedback 인 sensory feedback 이다. (1)(2)

전자는 규정된 조명하에서 부품들의 위치와 방향등을 인식하는데 이용되고, 후자는 한정된 영역에서 조립할 부품들 사이의 미소 위치차를 접촉감각만으로 감지하여, 재 이동시키는 일에 응용할 수 있는데, 이는 접촉시 생기는 force 와 torque 에 대한 정확한 정보들을 제공하는 다차원 sensor 에 최선의 해를 갖게 해주기 위해서

로봇의 command system 즉 force, torque 제어를 위치, 속도제어와 동시에 해야할 필요성이 있다. (3-9)

이밖에 로봇에 적응성을 갖게하기 위해서 수행할 작업을 제어하고 로봇의 감각기관에서 검출된 새로운 상태에 해당하는 기능을 일부 또는 전부를 선택할 수 있는 고 수준 전산과학 (인공지능) 이 요구된다. (4)(8)

이상과 같은 기능을 가진 조립용 로봇의 개발은 기술적으로 난이한 문제들이 많아 지금까지 실용화 되지 않았으며 실험실에서 연구중에 있다. 따라서 로봇 연구자들은 force 와 torque 제어를 대신할 수 있는 간단한 compliance system 을 로봇 팔 끝부분(손목부분)에 장치하여 다양한 조립 생산계통에 잘 적응할 수 있도록 이 system 을 개발하여 실용화 시키고 있다. (10-19)

본 연구에서는 간단한 기계적 구조로 이루어진 탄성 passive compliance system 의 구조적 특성을 분석하여 밝히고 향후 이 system 의 개발에 기여하는 데 있다.

우선 compliance system 을 간단히 설명한 후 삽입작업시 생기는 특성과 기계적 uncoupling, 그리고 선행탄성 계통인 경우에 대한 compliance 형태를 특징지우고 그의 고유 특성들을 설명한다.

2. COMPLIANCE SYSTEM

compliance system 은 조립작업 시 두 부품들 간의 접촉으로 생기는 응력에 따라서 robot end-effector 의 상대적인 위치를 극부적으로 수정하는 system 으로 정의 될 수있다. (11)(15)

이 system 은 로봇의 손목부분에 일반적으로 위치 하여 초기 조립단계에서 고 정밀도의 위치를 필요로 하지

않으며 키워 넣는 상태에서 부품들 간의 접촉응력들을 감소 또는 없애기 위해 스스로 재 조직된다. 이는 능동형과 수동형으로 크게 나누어져 연구되고 있다. 전자는 조립할 부품들 사이의 접촉력을 sensor들로 측정하므로서 방향과 오차의 크기등을 결정할 수 있고, 또 수정하기 위한 fine motion 을 제어할 수 있지만 가격과 축소의 문제점을 해결하여야 되기 때문에 고 정밀도와 보다 중요한 적용 분야에 사용될 것이다. (2)(13)(19)

후자는 조립할 대상의 중심과 방위의 오차를 극부적으로 보상하기 위해서 필요한 미소운동을 실행할 수 있는 탄력성 기계적 구조이다. 현재 chamfer 가 거의 필요로 하지만 조립비용이 적게 들고, 조립시간이 빠르며 사용하기가 용이하기 때문에 널리 사용되고있다. (10-12)(15-18)

여기서는 이 수동형 compliance system 의 구조적 연구에 대해서 설명한다.

3. 수동형 COMPLIANCE SYSTEM 의 구조적 연구

구조적 연구는 실린더 홀속에 실린더 부품을 삽입하는 동안 원하는 수정 변위들을 다루고, 이에 적합한 기계적 uncoupling 을 표현하며 선형 탄성계통인 경우에 대해 compliance 형태를 특징지워 고유의 특성을 고찰하고 compliance 행렬과 중심을 유도 설명한다.

1). 표시 법

(1). 좌 표 축 셀

부호 Ro, R, R 를 각각 hole, peg 와 robot end-effector 의 좌표축셀 Ro(Do, Xo, Yo, Zo), R (O, X1, Y1, Z1) R (O, X2, Y2, Z2) 라 하며 오차는 hole 의 위치결합에서 유일하게 생긴다고 가정하고 R2 에 대한 position error (R0 의 차이) 와 compliance structure deflection (R1 의 차이) 를 다룬다.

(2). 변 위

arm 에 대한 peg 의 변위는 R2 와 R1 사이의 차로 계산되며 부품들의 고유의 크기에 비해 아주 미소하고 다음의 6 가지 성분으로 측정된다. (그림 1 참조)

$$\begin{aligned} \vec{U}_0 &= \vec{O}_2 \vec{O}_1 = (u_1, u_2, u_3) \vec{O}_1 \\ \vec{\phi} &= (\phi_1, \phi_2, \phi_3) = \vec{\Omega} \vec{t} \\ \vec{U}_A &= (u_1, u_2, u_3) \end{aligned} \quad \text{---- (1)}$$

여기서 \vec{U}_0 은 R2 에서 O1 의 위치로 고려되며,

$\vec{\phi}$ 와 \vec{U}_A 는 각각 주어진 점 A 에서 moment 와 변위를 함께 표현하는 general displacement vector 의 구성요소이며 6 성분 column vector $(U)_A$ 로 표현할 수 있다.

$$(U)_A = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{bmatrix}_A \quad \text{---- (2)}$$

이는 R2 의 3 base vector ($\vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z}_2$) 와 R2 축 주위의 unit rotation vector ($\phi_{x2}, \phi_{y2}, \phi_{z2}$) 로 형성된 다음과 같은 6 성분 vector 에서 정의된다.

$$R_2^* = (\vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z}_2, \phi_{x2}, \phi_{y2}, \phi_{z2}) \quad \text{---- (3)}$$

$(U)_A$ 를 안다면 아래의 식(4) 에 의해서 임의의 점 B 에 관한 $(U)_B$ 를 구할 수 있다.

$$\vec{U}_B = \vec{U}_A + \vec{\phi} \wedge \vec{AB} \quad \text{---- (4)}$$

이는 R_2^* 에서 아래의 vector 형태로 쓰여질 수 있다.

$$(U)_B = T_{AB} (U)_A \quad \text{---- (5)}$$

식 (5) 에서 T_{AB} 는 vector AB 의 좌표인 (a, b, c) 함수로 정의되며 공간상의 임의의 점 B 에서 deflection vector 와 A 점과의 관계인 (6x6) 행렬이다.

$$T_{AB} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & c & -b \\ 0 & 1 & 0 & -c & 0 & a \\ 0 & 0 & 1 & b & -a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{---- (6)}$$

(3). 힘

강체에 적용된 응력들은 $\vec{F} = (F_1, F_2, F_3)$ 와 $\vec{M}_A = (M_1, M_2, M_3)$ 에 의해서 점 A 에 대한 general force vector 를 형성한다. 이 vector 는 R 에서 6 성분 column vector $(F)_A$ 로 표현할 수 있다.

$$(F)_A = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} \quad \text{---- (7)}$$

임의의 점 B 에 대한 general force vector $(F)_B$ 는 B 에 관한 moment 표현 형태인 식 (8) 로 부터 구해진다.

$$\vec{M}_B = \vec{M}_A + \vec{F} \wedge \vec{AB} \quad \text{---- (8)}$$

이 식은 R_2^* 에서 다음과 같은 vector 형태로 쓰여진다.

$$(F)_B = T_{AB} (F)_A \quad \text{---- (9)}$$

식 (9) 에서 T'_{AB} 는 공간상에 A 점과 임의의 점 B 에서 force 와 moment 사이의 관계 행렬이다.

$$T'_{AB} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c & -b & 1 & 0 & 0 \\ -c & 0 & a & 0 & 1 & 0 \\ b & -a & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{---- (10)}$$

$T'_{AB} = {}^t T_{BA}$ 로 놓을 수 있으므로 식 (9) 는 아래 식 (11) 로 표현된다.

$$(F)_B = {}^t T_{BA} (F)_A \quad \text{---- (11)}$$

2). 감지된 응력과 수정운동 사이의 UNCOUPLING.

감지된 접촉응력들은 재 중심을 잡기위해서 일반적으로 robot 의 end-effector 에 적용하게 되는데 이것은 어떤 전달기능에 따라 수정운동을 허용하는 유연한 구조에 작용된다. 그림 (2) 의 4 가지 경우에 대해, 이동하는 부품이 peg 일 경우, 작용된 응력을 각각의 성분 에 대한 힘과 변위 사이의 uncoupling 들을 포(1) 에 나타내었다.

이 포(1)에서 coupling 들은 대각선상에만 표현되고 기호 0 는 응력 성분과 변위 사이에 어떠한 관계도 없음을 나타낸다.

3). 탄성 COMPLIANCE.

(1). 강성 행렬.

유연한 연결은 탄성을 부여하는데 이는 $(F) = F(U)$ 의 관계를 가지며 주어진 점(여기서는 O_z) 에서 결정된다. 따라서 peg 끝에서 측정되는 유연한 구조의 탄성 동작은 O_z 에 관한 $F(U)$ 의 Jacobien matrix 로 부터 다음과 같은 강성행렬 K_{O_z} 에 의해서 표현될 수 있다.

$$K_{O_z} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & 0 & k_3 & 0 \\ 0 & k'_1 & 0 & -k'_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k'_3 & 0 & k_x & 0 & 0 \\ k_3 & 0 & 0 & 0 & k'_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_5 \end{bmatrix} \quad \text{---- (12)}$$

$$k_1 = \frac{\partial F_1}{\partial u_1}, \quad k'_1 = \frac{\partial F_2}{\partial u_2}, \quad k_3 = \frac{\partial F_1}{\partial z_2} = \frac{\partial M_2}{\partial u_1}, \quad k_x = \frac{\partial F_3}{\partial u_3}$$

$$k'_4 = \frac{\partial M_1}{\partial z_1}, \quad k'_5 = \frac{\partial M_2}{\partial z_2}, \quad -k'_3 = \frac{\partial F_2}{\partial z_1} = \frac{\partial M_1}{\partial u_2}, \quad k_5 = \frac{\partial M_3}{\partial z_3}$$

그리고 관계 $F(U)$ 는 식 (13) 과 같이 쓸수 있다.

$$(F)_{O_z} = K_{O_z} (U)_{O_z} \quad \text{---- (13)}$$

(2). 고유치.

K_{O_z} 의 특성다항식 $\text{Det}(K_{O_z} - \lambda I_d) = (k_x - \lambda_1)(k_5 - \lambda_2) ((k_1 - \lambda_3)(k_4 - \lambda_4) - k_3^2)$ 로 부터 고유치 를 구한다.

a). 단일 고유치

$$\lambda_1 = k_x, \quad \lambda_2 = k_5$$

b). 이중 고유치

$$\lambda_{3,4} = \frac{k_1 + k_4}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{k_1 + k_4}{2}\right)^2 + k_3^2}$$

K_{O_z} 가 정치행렬이므로 고유치들은 모두 정치이다.

$$\lambda_1 > 0 \rightarrow k_x > 0; \quad \lambda_2 > 0 \rightarrow k_5 > 0$$

$$\lambda_{3,4} > 0 \rightarrow k_1 + k_4 > 0 \text{ 와 } k_3^2 < k_1 k_4$$

따라서 계수 k_i 는

$k_1 > 0, k_2 > 0, k_4 > 0, k_5 > 0, k_3^2 < k_1 k_4$ 를 만족하여야 한다.

(3). 고유 벡터

a). 단일 고유치 k_x, k_5 에 의한 고유 벡터 (U),

(U) 를 구하면,

$$(U)_{k_x} = {}^t (0, 0, 1, 0, 0, 0) = \vec{z}$$

$$(U)_{k_5} = {}^t (0, 0, 0, 0, 0, 1) = \vec{z}_5 \text{ 이다.}$$

이들 방향에 따라서 적용된 응력과 그 결과로 얻어진 운동사이에 순수한 비례가 존재한다.

$$F_3 = k_x U_3$$

$$M_3 = k_5 U_6$$

b). 이중 고유치 $\lambda_{3,4}$ 에 의한 고유 벡터 $(U_{\lambda_3}), (V_{\lambda_3})$

를 구하면 $(U_{\lambda_3}) = {}^t (k_3, 0, 0, 0, (k_1 - \lambda_3), 0)$ 이고,

두번째 고유 벡터 $(V_{\lambda_3}) = {}^t (0, k_3, 0, -(k_1 - \lambda_3), 0, 0)$

여기서 $k_3, k_1 - \lambda_3$ 의 관계에 의하면, \vec{z} 에 수직 병진 운동 변위와 병진운동 방향에 수직축 회전운동의 결합은 변위운동을 지닌 선상의 힘과 회전운동을 지닌 축의 토크와의 결합에 의해서 구해진다.

이러한 특별한 결합이외에, 같은 방향에서 힘과 변위 사이, 그리고 같은 축 주위의 토크와 회전운동 사이에 비례가 일반적으로 존재하지 않는다.

(4). COMPLIANCE 중심

좌표축셀 R_z 의 모든 점 M 에 관한 탄성 행렬 K_M 로 부터 compliance 중심 K_c 를 구할 수 있다.

$$K_M = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & 0 & k_3 - ck_1 & bk_2 \\ 0 & k_1 & 0 & ck_1 - k_3 & 0 & ak_1 \\ 0 & 0 & k_2 & -bk_2 & ak_2 & 0 \\ 0 & ck_1 - k_3 & -bk_2 & k_4 + b^2 k_2 + c^2 k_1 - 2ck_3 & -abk_2 & ak_3 - ack_1 \\ k_3 - ck_1 & 0 & ak_2 & -abk_2 & k_4 + a^2 k_2 + c^2 k_1 - 2ck_3 & bk_3 - ck_1 \\ bk_1 & -ak_1 & 0 & ak_3 - ack_1 & bk_3 - bck_1 & k_5 + (a^2 + b^2)k_1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

위 행렬 K_M 에서 $a=b=0$, $c=\frac{A}{k_1}$ 로 놓으면, diagonal 이 되며 이때 c 점은 $O_2 Z_2$ 축의 한점이 되며 compliance 중심이라 한다.

이러한 compliance 구조의 탄성행위는 대칭축의 한점 c 와 각 축에 따라 이 점에 관한 선형강성들과 각들을 측정하는 4 개의 양의 정수 k_1, k_2, k_4, k_5 에 의해서 결정된다.

$$K_c = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_5 \end{bmatrix} \quad (15)$$

이 중심이 그 구조물로부터 벗어난 위치에 존재하면 이를 원격 중심(remote center) 라 한다. (10)(11)

4. 결 론

실린더 홀속에 실린더 부품을 삽입하는 동안 compliance 계통의 바람직한 동작으로부터 수정작용을 결정하는 힘과 오차 그리고 Z 축의 관계를 나타내는 표시법을 결정하고, 이 관계로부터 특징짓는 감지된 용력과 수정운동 사이에 uncoupling 특성이 만족되어야 한다는 것을 보여주었다.

그리고 현존하는 수동형 compliance 계통의 대부분을 포함하는 선형 탄성계통의 경우에 한하여 compliance 행렬과 중심을 일반적으로 허용하는 개념들을 확실하게 표현하였다.

참 고 문 헌

(1) A.GIRAUD, R.PRAJOUX, "La problématique de l'assemblage automatique en robotique," 3èmes Journées Scientifiques et Technique de la production Automatisée, 1981, Juin.

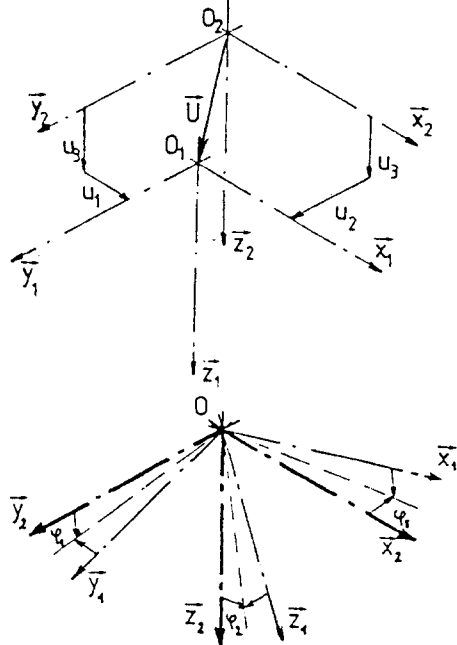
(2) T.GoTo, T.Onoyama and K.Takeyasu, "Precise insert operation by tactil controlled robot;

HI-T-HAND Expert2," Proc.4th Int.Symp.on Industrial Robot. 1974, NOV.

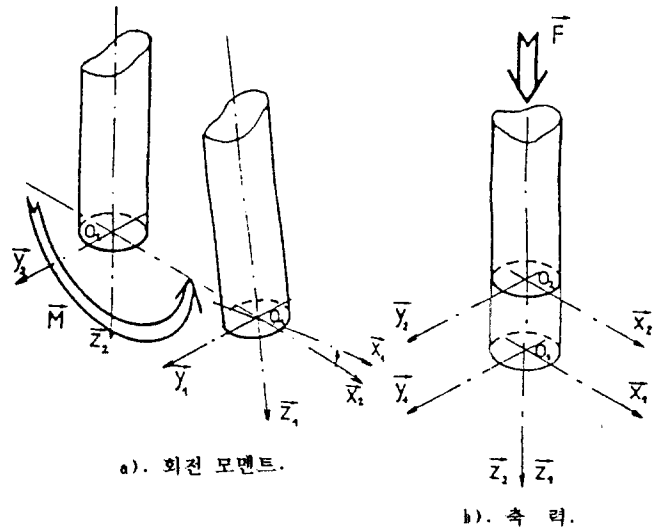
- (3) E.G.R. GERELLE, "Force feedback control," Proc. 8th Symp.on Industrial Robot, 1978, June
- (4) P.BARAONA, "Contribution à la réalisation d'un robot manipulant des objets en contact," Thèse docteur 3e cycle, 1981, JUIN.
- (5) M.RENAUD, "Contribution à la modélisation et à la command dynamique des robots manipulateurs," Thèse d'Etat en automatique à U.P.S., 1980, SEPT.
- (6) M.T.MASON, "Compliance and force control for computer controlled manipulators," IEEE Trans.on System, Man and Cybernetics, Vol, SMC-11, No 6, 1981, June.
- (7) A.GAILLET and C.REBOULET, "A isostatic six component force and torque sensor," Proc. 13th Int. Symp. Industrial Robot, 1984, April.
- (8) J.C.LATOMBE, E.MAZER, "Définition d'un langage de programmation pour la robotique; Analyse fonctionnelle de l'interpréteur," Rapport de recherche IMAG, n 197, 1980, Mars
- (9) R-C.LIU, "Automatic quick-change gripper finger for assembly automation," Proc. 5th Int. Conf. Assembly automation, 1984, May.
- (10) S.H.DRAKE, P.C.WATSON and S.N. SIMUNOVIC, "High speed robot assembly of precision parts using compliance instead of sensory feedback," Proc. 7th Int. Symp. on Industrial Robot, 1977
- (11) S.H.DRAKE, "Using compliance in lieu of sensory feedback for automatic assembly," Doct.SC.Thesis, 1977.
- (12) H.M.CALLION, G.R.TOHNSON, D.T.PHAM, "A compliant device for inserting a peg in a hole," the Indu-

strial Robot, Vol 6, n 2, 1979, June.

- (13) H.VAN. BRUSSEL and J.SIMONS, "The adaptable or compliance concept and its use for automatic assembly by Active Force Feedback Accomodation," Proc. 9th Int. Symp.on Industrial Robot, 1979.
- (14) H.MAKINO, N.PURUYA, "Selective Compliance Assembly Robot Arm," Proc. 1st Int.Conf.on Assembly Automation, 1980, March.
- (15) F.LHOTE, R.STEPOURJINE, R.GAUTIER, X.LEPLOMB, R.PAULIGNAM, "Dispositif flexible d'insertion automatique pour robot d'assemblage," 3 Journées scientifiques ADEPA, 1981, Juin.
- (16) T.ARAI, N.KINOSHITA, "The part-mating forces that arise when using a work-table with compliance," Assembly Automation, Vol 1, No 4, 1981, Aug.
- (17) F.LHOTE, "La robotique Légère," Colloque Micronora, 1982, Sept.
- (18) J.P.ROUGET, "L'assemblage en robotique," Colloque Micronora, 1982, Sept.
- (19) G.CHAOUI, "Conception d'un capture d'efforts et son utilisation dans des procédures générales d'insertion," Thèse de Docteur Ingénieur, 1982, Mai.



그림(1). (U) 의 정의.

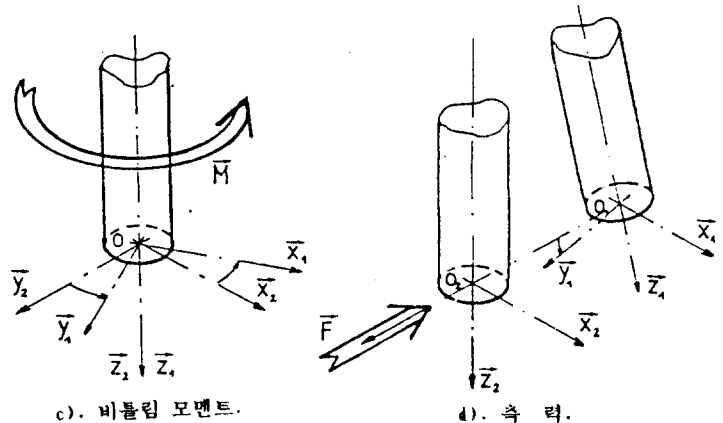


a). 회전 모멘트.

b). 축 력.

표(1). 힘과 변위사이의 Uncoupling.

F \ U	u_1	u_2	u_3	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3
F_1	///	0	0	0	///	0
F_2	0	///	0	///	0	0
F_3	0	0	///	0	0	0
M_1	0	///	0	///	0	0
M_2	///	0	0	0	///	0
M_3	0	0	0	0	0	///



c). 비틀림 모멘트.

d). 축 력.

그림(2). 응력과 변위사이의 Uncoupling.