원자로냉각재 펌프 주 플랜지 볼트 누설률 평가

The Evaluation for Leakage Rate of Reactor Coolant Pump
Bolting in Nuclear Power Plants

조남진* · 임석빈**

Cho, Nam Jin · Im, Seok Been

Abstract

In nuclear power plant, defected bolts used in the main flange of reactor coolant pump could have bad effect on the safety of the plant. Thus, the bolts should maintain their integrity while used in the plant. However, damaged bolts, such as corroded or cracked bolts, have been reported; thus, well-organized monitoring is required. This study evaluates safety of bolts currently used in a nuclear plant using the leakage rate. Using ANSYS program, the opening of a pump due to damaged bolts is estimated and corresponding leakage rate was estimated by SQUIRT code. The results exhibit that even in the case of 3 damaged bolts the leakage rate satisfies the allowable level, 1 gpm. However, continuous in-service inspection is still required to ensure the safety of bolts as considering the development of leakage rate.

Key words : Reactor coolant pump, Leakage rate, ANSYS program, SQUIRT Code

요 지

원자력 발전소의 원자로 압력경계 기기 중에서 냉각재 펌프의 주 플랜지에 사용되는 볼트는 건전성이 상실될 경우, 발전소의 안전성에 영향을 미칠 가능성이 있기 때문에 전 수명기간 동안 건전성이 보장되어야 한다. 하지만 이러한 볼트의 부식 및 균열에 대한 사례 보고가 있기에 이에 대한 체계적인 관리가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 볼트의 손상으로 인해 발생하는 누설률을 통해 현재 가동 중인 발전소의 허용 안전성에 대해 알아보려고 한다. 볼트 손상에 따른 펌프의 간극을 수치해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 예측하고, 누설률 평가에는 SQUIRT 코드를 사용하여 평가하였다. 해석결과 볼트손상 수량이 3개 일 경우에도 허용기준치인 1 gpm 이하인 것으로 판단된다. 비록 현재의 설계 볼트 수가 충분한 안전율을 확보한다고 판단되지만, 손상 볼트에 따른 누설률을 감았했을 때 지속적인 정기 점검을 통해 볼트의 건전도를 판단할 필요가 있다고 사료된다.

핵심용어 : 원자로냉각재펌프, 누설률, ANSYS 프로그램, SQUIRT 코드

1. 서 론

원자력 발전소에서는 1차 압력경계부분, 원자로용기, 노심 냉각펌프, 그리고 증기 발생기 등의 체결재로 볼트가 많이 사용된다. 따라서 이러한 체결재에 대한 상시 관찰 및 검사의 수행은 원전 유지를 위한 필수 조건이다. 비록 안전율 측면에서 설계 시 충분한 양의 볼트가 체결재로 사용되었지만 원전에서의 건전성 평가는 안정적인 원전 유지 및 관리를 위해 강도에 대한 평가뿐만 아니라 파손에 대한 건전성 평가도 함께 이루어져야 한다. 또한 원전 내의 중요 기기 중의 하나인 노심 냉각펌프의 체결재 열화에 의한 손상이 발생할 수 있으므로 상세 평가를 통해 관리되어야 한다. 이에 따라 운영 중인 원전은 안전한 원전 관리를 위해 매 10년 마다 모

든 부품에 대한 상세 평가가 수행되도록 관리되고 있다.

현재 국내의 원전에서는 원전 고리 1호기가 처음으로 이러한 평가를 수행하였고, 본 연구에서는 고리 2호기에 대한 노심 냉각펌프의 체결재 평가를 수행하고자 한다.

실제 해외 원전의 운전 중 체결재의 손상사례는 EPRI NP-5769 등에서 보고되고 있다. 이러한 원전에서의 볼트 관련 손상의 원인은 대부분 높은 인장응력, 과도한 예비하중, 높은 습도, 냉각수 및 봉산수 누설, 높은 항복강도 등이 있으며, 이로 인해 볼트나 스토퍼에 균열 또는 부식이 발생하는 것으로 보고되고 있다. 이러한 노심 냉각펌프에서의 볼트의 파손은 노심 냉각수의 손실로 이어지고, 원전의 비정상 조건이나 사고 조건에서 일시적으로 과도한 부하를 유발하여 더 큰 문제를 야기시킬 수 있다.

*정회원 · 경기대학교 대학원 도시방재학과 박사과정(E-mail : cnj7924@hanmail.net)

**정회원 · 삼성물산 과장(교신저자)

따라서 이러한 볼트의 균열이나 부식을 사전에 감지할 수 있는 방법으로 누설률을 통한 체결재의 손상을 예측하는 방법이 사용되고 있다. 하지만 기존에 사용하였던 Pipe Crack Evaluation Program (PICEP)의 경우 보정을 통해 누설률을 예측함에 따라 그 정확도에 대한 신뢰성이 다소 떨어진다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 정확한 누설률 평가를 위해 Seepage Quantification of Upset in Reactor Tubes (SQUIRT) 코드를 사용하여 파손에 대한 누설률을 예측하였다. 펌프 내에 발생하는 압력 및 온도 등에 대한 정보를 수치 해석 프로그램인 ANSYS에 적용하여, 볼트 손상에 따른 응력 평가 및 균열 발생 정도를 파악하였고, 이를 통해 SQUIRT 코드를 사용하여 정확한 누설률을 평가하였다.

2. 평가대상 선정 및 누설률 평가

2.1 평가대상

원자력 발전소의 원자로 압력경계를 구성하는 기기의 건전성이 상실될 경우, 이로 인해 발전소의 안전성에 직·간접적으로 영향을 미칠 가능성 있기 때문에 원자력 발전소 압력경계 기기들은 전 수명기간 동안 그 건전성이 보장되도록 설계, 제작되었다. 또한 운전 중에도 가동 중 검사 및 기타 점검을 통해 그 건전성을 주기적으로 확인하고 있다. 원자로 냉각재 펌프를 구성하는 볼트 연결부를 <표 1>에 나타내었고 원자로 냉각재 펌프 주요 볼트 연결부는 <그림 1>과 같다.

EPRI NP-5769에서는 압력경계 볼트 연결부의 허용 누설률을 제시하고 있다. 이를 참고로, 볼트 손상 시 누설률이 상대적으로 많이 발생할 수 있는 원자로 냉각재 펌프의 주 플랜지를 평가 부위로 선정하여, 누설률 평가를 수행하였다.

표 1. 볼트 연결부 및 구성

대상기기	볼트 연결부	구성
원자로냉각재 펌프(A, B)	플랜지, 밀봉부	본체, 볼트, 너트, 와셔, 개스킷 등

그림 1. 원자로 냉각재 펌프 볼트

랜지를 평가 부위로 선정하여, 누설률 평가를 수행하였다.

2.3 누설률 평가

2.3.1 누설률 평가 방법

ASME 코드에서는 작용응력이 허용응력을 초과하는지 여부를 볼트 건전성의 기준으로 적용하는데, 이는 개별 볼트의 구조적 건전성에 대한 평가 방법이다. 물론 설계 시에는 이러한 조건을 안전하게 만족시킬 수 있는 볼트 수가 설치되나 운전 사용 중에 발생하는 열화나 부식 등으로 일부 볼트가 손상되는 사례가 발생하게 된다. 따라서 EPRI NP-5769 보고서에서는 유지 관리 측면에서 볼트 손상에 따른 원자로 냉각재 누설률이 1 gpm 미만인 시점까지는 원자로 냉각재 압력경계 건전성 측면에서 여유도가 있다고 판단하고, 이를 초과하는 시점에서의 볼트 작용응력 및 볼트 손상 개수를 기초로 볼트 연결부의 건전성을 평가한다.

원자로 냉각재펌프의 중간 연결부 평가는 먼저 수치해석 프로그램을 이용하여 압력경계를 유지하는 플랜지에서 볼트가 손상될 때 남아 있는 볼트가 받은 응력을 계산하고, 이로 인해 발생하는 플랜지들 사이의 간극을 평가한다. 최종적으로 손상에 따른 누설률은 예측 프로그램을 통해 평가한다. 즉, 본 연구에서는 EPRI NP-5769에 제시된 절차에 따라 다음과 같이 평가하였다.

1단계: 볼트나 스티드의 직경 및 길이, 플랜지의 입구측 직경 등을 적용한 형상 모델링.

2단계: 기기의 온도와 압력, 볼트 예비 하중 등 설계/운전 조건 결정.

3단계: 볼트 파손 수량에 따른 주변 볼트의 응력 계산.

4단계: 손상에 의해 발생하는 간극 계산.

5단계: 누설률 평가

2.3.2 누설률 평가 SQUIRT 코드

SQUIRT 코드는 파단면의 형상, 유체의 열역학적 상태 및 파단면 양단의 압력손실의 함수로써, 누설률을 예측할 수 있게 구성되어 있다. PICEP과 비교하여 SQUIRT 코드는 높은 하중에서의 균열 발달을 설명할 수 있다. 또한 1차원 계산 시 하중과 열·수력 조건만으로 정확한 균열 크기를 직접 계산할 수 있다.

SQUIRT 코드에서 사용되는 누설률 평가 모델은 열·수력 해석의 기본인 이상(two-phase) 유체에 대한 ‘Henry-Fauske’ 모델을 기반으로 한다. Henry-Fauske 모델은 1970년에 물과 증기로 구성된 이상 유체를 통해 임계유동(critical flow)에 대한 실험을 수행하고, 실험결과를 근간으로 비 평형계수를 도입하였다.

모델 이론 (1)을 간단히 살펴보면 먼저 유체가 압축될 수 없다는 가정 하에 균열면에서 유체의 질량 유동의 제곱은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$G_c^2 = - \left[k[1+x(k-1)]x \frac{dV_g}{dp} + (V_g[1+2x(k-1)]) \right] + kV_l \left[2(x-1) + k(1-2x) \frac{dx}{dp} \right]^{-1} \quad (1)$$

여기서 G_c : mass flux of fluid at crack exit
 k : surface roughness (표면거칠기)
 x : fluid quality
 p : pressure (압력)
 V_g : vapor velocity (기체속도)
 V_l : liquid velocity (액체속도)
 t : time (시간)

또한 높은 압력에서는 유체가 균질한 유동($k \approx 1$)이 된다고 가정하면,

$$G_C^2 = - \left[x \frac{dV_g}{dp} + (V_g - V_l) \frac{dx}{dp} \right]^{-1} \text{로 단순하게 표현될 수 있다.}$$

Henry는 단일 성분의 임계유동에서 상간 질량전달률의 상관관계를 $dx/dp = N dx_E/dp$ 로 나타내었다.

여기서 x_E : equilibrium fluid quality

$$N = 20x_E \quad x < 0.05$$

$$N = 1.0 \quad x \geq 0.05$$

$x_E = [(s_0 - s_1)/(s_g - s_l)]_E$ 로 표현할 수 있고, 또한 압력에 따른 증기 비체적의 변화는 증기 압축성에 반비례하므로 $dV_g/dp = -V_g/p$ 라고 표현할 수 있다. 따라서,

$$G_C^2 = \left[\frac{xV_g}{p} - (V_g - V_{l0})N \frac{dx_E}{dp} \right]^{-1} \text{이며, 이는}$$

$$G_C = \left[\frac{xV_g}{p} - (V_g - V_{l0})N \frac{dx_E}{dp} \right]^{-\frac{1}{2}} \text{로 표현된다.}$$

2.3.3 EPRI NP-5769 누설률 예측 모델

구조물의 작은 틈새를 통해 흐르는 유체를 예측하는 적절한 모델은 유체의 조건과 균열부분의 기하학적 특성에 의해 결정된다. 이러한 경우 작은 틈새는 개스킷과 플랜지 표면 사이의 간극을 나타낸다. 유동길이 (flow path length) 대비 직경은 L/D 로 정의되고, 유출되는 유체의 열적 비평형도를 나타낼 때 적용된다. Henry의 균질 비 평형 임계유동 모델에 기초한 누설률 모델은 Collier 등에 의해서 개발되었고, 이후 Abdominalian과 Chexal에 의해 보완되었다. 유동은 등가열량인면서 균질하다고 가정하였고, 모든 비 평형 효과들은 평형도와 L/D 의 함수를 갖는 단일 인자에 영향을 받는다고 가정하였다. 1차원 질량 및 운동량 에너지 보존 방정식이 각 부품들에서의 압력강하를 계산하는데 적용되었다. 연속방정식은 식 (2)와 같다.

$$\frac{dG}{dZ} + \frac{GdA}{AdZ} = 0 \quad (2)$$

여기서 G : mass flux (질량 유동)

A : slip opening area (균열부분)

Z : direction of flow coordination (유동의 방향)

운동량 방정식은 식 (3)과 같다.

$$\frac{dP}{dZ} = \frac{1}{g_c} \left[\frac{1}{A} \frac{d}{dZ} \left(\frac{G^2 A}{\rho'} \right) \right] + \frac{f}{2D\rho_m} c^2 \quad (3)$$

여기서 P : pressure(압력)

g_c : gravitational acceleration (중력)

ρ_m : mixture density (혼합 밀도)

ρ' : density per unit (시간당 단위 부피당 질량)

f : friction factor (마찰계수)

c : sonic velocity (음속)

위의 식을 유동길이에 대해서 적분을 하면 틈새가 발생한 부분에서의 전체적인 압력강하가 각각의 개별적인 부품에서의 압력강하의 합으로 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\Delta P_{total} = \Delta P_e + \Delta P_{ae} + \Delta P_{aa} + \Delta P_f \quad (4)$$

여기서 ΔP_e : entrance pressure loss

ΔP_{ae} : acceleration pressure drop due to fluid phase change

ΔP_{aa} : acceleration pressure drop due to area change

ΔP_f : friction pressure loss

위의 식 (4)들을 계산하기 위해서는 정해진 조건과 틈새의 기하학적 조건을 적용하여 반복 계산법으로 계산해야 한다.

만약 유동이 정체되어 있지 않은 경우, 누설률은 마찰을 고려하여 단상유동 관계식으로 계산하여야 하며 계산식은 식 (5)과 같다.

$$G = 2g_c \frac{(P_0 - P_B)^{1/2}}{v_0} \quad (5)$$

여기서 P_0 : pressure at stagnation

v_0 : specific volume at stagnation

P_B : back pressure

G : leak rate

3. 평가결과 및 분석

3.1 주 플랜지 누설률 평가 결과

원자로 압력경계 볼트 연결부 누설률 평가 대상기기인 원자로 냉각재 펌프의 주 플랜지 볼트 관련 설계/운전 조건과 재질은 다음의 <표 2>와 <표 3>에 나타난 바와 같다.

원자로 냉각재 주 플랜지 볼트가 손상됨에 따라 나머지 볼트가 받는 응력을 계산하기 위해 그림 <그림 2>와 같이 모

표 2. 냉각재 펌프의 설계/운전 조건

번호	항목	규격
1	제작사	웨스팅 하우스
2	모델명	93A
3	설계압력	2,175 ksi (1.532E+05 kg/cm ²)
4	운전온도	552.5°F (289.2°C)
5	설계온도	케이싱 660°F (348.9°C)
6		주 플랜지 400°F (204.4°C)
7		열 차폐재 650°F (343.3°C)
8		주 플랜지 볼트 400°F (204.4°C)

표 3. 냉각재 펌프의 재질

No	부품	재질
1	Pressure Forgings	SA182 Gr F304, F316, F347 or F348
2	Pressure Casting	SA351 Gr CF8, CF8A or CF8M
3	Tube and Pipe	SA213, SA376 Gr TP 304 or TP 316 or SA312, Seamless Type 304 or 316
4	Pressure Plates	SA240 Type 304 or 316
5	Bar Material	SA479 Type 304 or 316
6	Closure Bolting	SA193 Gr B7 or B8 or SA540 Gr B23 or B24, or SA453 Gr 660
7	Flywheel	SA533 GR B, Class 1

그림 2. 펌프 내부 모델링

그림 4. 볼트 응력 분포

그림 3. 펌프 Mesh 생성

그림 5. 볼트 온도 분포

델을 구성하였다. 원자로냉각재펌프 주 플랜지 볼트 해석 시, 열해석을 위한 Solid90 element와 구조해석을 위한 Solid95 element로 각각 따로 mesh를 생성한 후 연성해석을 수행하였다. 그리고 <그림 3>과 같이 원자로 냉각재 펌프 내부 모델링은 symmetric 조건을 이용해서 반만 모델링 하였고, Casing 과 Thermal Barrier 내부에 정상운전 온도 및 운전 압력을 적용하였다. 또한 외부 표면 중 단열조건인 Casing 부분을 제외한 구조 상단부에 상온을 적용하였다. <그림 4>, <그림 5>는 원자로 냉각재 펌프의 주 플랜지 볼트 손상이 없는 경우에 대한 전체 응력분포 및 온도분포를 보여주고 있으며, <그림 6>, <그림 7>은 볼트 영역의 mesh 생성 및

응력분포를 보여주고 있다.

주 플랜지 볼트가 손상됨에 따라 나머지 볼트들이 받는 응력을 계산하기 위해 해석 모델에서 볼트를 하나씩 제거해 나가면서 응력을 계산하였다.

원자로 냉각재 펌프는 1/2 모델링이기 때문에, <그림 8>에서 볼트의 1/2 손상은 전체 볼트 중에서 1개의 손상을 의미한다. <그림 9>는 원자로 냉각재 펌프 주 플랜지 볼트 3개 손상 상태 시 응력분포를 의미한다.

전체적인 결과를 보면 임의의 주 플랜지 볼트가 손상되는 경우 손상된 볼트와 제일 가까운 볼트가 가장 큰 응력을 받게 되며, 손상된 볼트로부터 거리가 멀어질수록 작용응력이

그림 6. 볼트 영역 Mesh 생성

그림 9. 볼트 3개 손상 시 응력분포

그림 7. 볼트 영역 응력분포

그림 8. 볼트 1개 손상 시 응력분포

표 4. 볼트 손상 수량별 최대응력, 변위 및 간극

볼트 손상수량	볼트 최대응력 ksi (MPa)	간극 IN inch (mm)	간극 OUT inch (mm)
0	31.065 (214.1856)	0	0
1	34.754 (239.6204)	0.000201 (0.0051054)	0.000422 (0.0107188)
3	55.393 (381.9213)	0.000911 (0.0231394)	0.001065 (0.027051)
5	71.402 (492.2994)	0.002329 (0.0591566)	0.002972 (0.0755396)
7	103.295 (712.1939)	0.005908 (0.1500632)	0.006753 (0.1715262)

제(thermal barrier) 하단과 케이싱 상단의 접합면 간극이 점차 증가된다. 주 플랜지 볼트가 손상됨에 따라 간극이 발생하면 이를 통해 원자로 냉각재가 누설된다. 응력해석을 통해 계산된 간극을 기초로 정상운전 조건에서 주 플랜지의 손상된 볼트 수량에 따른 냉각재 누설률을 SQUIRT 프로그램을 통해 계산하였다. <그림 10>은 원자로 냉각재 펌프의 압력경계부에서 볼트 손상 시 누설이 발생하는 영역을 나타내고 있다. 계산을 위한 입력 사항들로는 볼트 응력 해석을 통해 계산된 간극 값과 간극이 생기는 부위의 길이 그리고 온도와

그림 10. 압력경계부 누설률 평가 영역

작아지는 결과를 보였다. <표 4>에서 볼 수 있듯이 손상된 볼트 수량이 증가할수록 해석결과상 최대응력과 간극치가 증가 하였다.

3.1.2 주 플랜지 볼트 누설률 평가 분석

원자로 냉각재 펌프에 대한 해석결과에 따르면 손상된 주 플랜지 볼트의 수량이 증가되어 체결력이 감소되면, 열 차폐

원자로냉각재 펌프 주 플랜지 볼트 누설률 평가

표 5. 볼트 손상 수량별 냉각수 누설률

볼트 손상수량	간극 IN inch (mm)	간극 OUT inch (mm)	누설률 (gpm)
1	0.000201 (0.0051054)	0.000422 (0.0107188)	0.0012
3	0.000911 (0.0231394)	0.001065 (0.027051)	0.361
5	0.002329 (0.0591566)	0.002972 (0.0755396)	3.5
7	0.005908 (0.1500632)	0.006753 (0.1715262)	28.4

그림 11. 볼트 손상 수량 별 누설률

압력 조건 등이다.

해석 결과 볼트 손상 수량별 냉각수의 누설률은 <표 5>와 <그림 11>에 나타나 있다. 결과를 통해 주 플랜지 볼트의 손상이 1개일 경우에는 냉각수 누설률이 0.0012 gpm 이었으며, 손상 볼트의 개수가 증가함에 따라 냉각수 누설률은 급격히 증가하는 결과를 보였다. 원자로 냉각재 펌프의 주 플랜지 볼트 손상에 대한 분석 결과, 볼트가 3개 손상될 경우 냉각수 누설률은 0.361 gpm으로 허용기준치인 1 gpm을 충분히 만족하였다. 하지만 <그림 11>에 나타난 대로 손상 볼트 수량별 누설률의 추이를 감안하였을 때 만약 볼트 손상 수량이 4개일 경우에는 허용기준치인 1 gpm을 초과하는 것으로 판단된다. 이 수치는 4개의 볼트가 나란히 손상되는 경우보다 더 큰 누설률을 나타낼 수 있지만, 본 연구에서는 최악의 경우를 고려하기 위해서 손상된 볼트를 나란히 배치하였다. 해석 결과 현재의 설계는 안전율을 충분히 고려하여 원자로 냉각재 펌프에 충분한 수의 볼트를 배치하였지만, 손상된 볼트 수량이 증가함에 따라 누설률이 급격하게 증가하는 경향을 보임을 알 수 있었다. 따라서 볼트 손상이 발생했을 때 즉각적인 교체를 통해 추가 손상에 따른 위험률을 줄이는 것이 바람직하다고 판단된다.

4. 결 론

원자로 냉각재 펌프 주 플랜지 볼트 연결부의 볼트 손상을 가정한 해석 결과를 바탕으로 냉각수의 누설률을 평가하였다. 평가에 이용한 값은 볼트 손상 수량별 발생하는 간극값이며, 국내에서는 처음으로 원자로 냉각재 펌프에 SQUIRT 코드를 이용하여 평가하였다.

- 1) 평가결과 원자로 냉각재 펌프의 압력 경계부 볼트는 손상되는 볼트가 3개 이내에는 허용치인 1 gpm을 만족시키는 것으로 판단되지만, 누설률 추이를 봤을 때 손상 볼트 발생 시 즉각적인 교체가 필요하다고 판단된다. 현재 국내에서 가동되고 있는 원자력 발전소의 냉각재 펌프는 가동 중 검사와 예방정비 등 정기적으로 점검이 수행되고 있다. 따라서 현재와 동일하게 정기적인 점검을 통해 원자로 냉각재 펌프의 주 플랜지 볼트의 손상에 대해 즉각적인 조치를 할 수 있도록 관리되어야 할 것이다.
- 2) ASME Section 의 요건에 따라 가동중검사 대상 기기 및 지지대 등의 볼트에 대해 육안검사와 체적검사를 수행한다. 볼트 가운데 안전등급 1 기기인 원자로 냉각재 펌프 주 플랜지의 볼트는 열구멍(heater hole)이 있고 직경이 2 inch (50.8 mm) 를 초과하므로 현재 초음파 검사가 수행되고 있다. 하지만 이와 관련하여 EPRI NP-5769에서는 음향공명 탐상기술, 잔향 탐상기술, 원주 유도파 탐상 등의 기술이 제시되어 있어, 좀 더 효과적인 체결체의 관리를 위해 이에 대한 추가적인 활용 검토가 필요하다.

참고문헌

- USNRC (1991) Generic Letter 91-17, Generic Safety Issue 29, "Bolting Degradation or Failure in Nuclear Power Plants".
- USNRC (1998) NUREG-1339, "Resolution of Generic Safety Issue 29 : Bolting Degradation or Failure in Nuclear Power Plants".
- USNRC (2005) NUREG-1801, Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report, Section XI.M 18, "Bolting Integrity Program".
- EPRI (1988) NP-5769, "Degradation and Failure of Bolting in Nuclear Power Plants".
- USNRC, NUREG-0933, Resolution of Generic Safety Issue 29 : "Bolting Degradation or Failure in Nuclear Power Plants".
- EPRI (12. 1995) TR-104213, Bolted Joint Maintenance & Applications Guide.
- EPRI TR-1015336, Nuclear Maintenance Applications Center : Bolted Joint Fundamentals.
- NUREG-0943, Threaded-Fastener Experience in Nuclear Power Plants.
- ASME, PCC-1-2010, Guidelines for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly.

© 논문접수일 : 12년 03월 09일
 © 심사의뢰일 : 12년 03월 09일
 © 심사완료일 : 12년 04월 02일