

안전관련 모터구동밸브 및 동력구동게이트밸브의 설계기준 안전성 규제관점

Regulatory standpoints on the design-basis capability of safety-related
motor-operated valves(MOVs) and power-operated gate valves(POGVs)

김월태, 금오현

한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19번지 305-338

요 약

79년 미국 TMI 원전 사고 이후 모터구동밸브(Motor-Operated Valve, MOV)의 설계기준 안전성에 관한 문제점이 심각하게 대두되었으며, 80년 중반부터 동력구동게이트밸브(Power-Operated Gate Valve, POGV)의 압력잠김(Pressure Locking) 및 열적고착(Thermal Binding) 문제점이 부각되기 시작하여, 이 문제들이 지난 십여 년 이상 국내외 원자력 산업계의 핫 이슈 중의 하나로 논의되어 왔다. 운전경험 및 규제활동 분석 결과, 안전관련 계통에 설치된 모터구동밸브 및 동력구동게이트밸브가 설계기준 사고조건에서 요구되는 안전기능을 충분히 수행하지 못할 우려가 있으며, 기존에 수행되어 왔던 가동중 시험 규제요건만으로는 사고조건에서의 안전기능 만족여부를 확인할 수 없음이 밝혀졌다. 미국 규제기관은 NRC Bulletin 85-03, GL 89-10, GL 95-07, GL 96-05등을 통하여 문제점을 해결토록 요구하였으며, 국내 규제기관에서는 '97년 6월 '모터구동밸브 및 동력구동게이트밸브의 안전성 확인을 위한 권고사항'을 발행하여 전체 안전관련 모터구동밸브 및 동력구동게이트밸브에 대하여 설계기준 안전기능을 확인하고, 그 결과를 제출하도록 요구하였다. 규제 시 고려해야할 사항으로는, 대상 밸브의 범위 및 수행 우선 순위, 설계기준 차압조건에서의 시험, 진단장비의 정확도, 토오크 스위치 설정값 및 토오크 바이패스 범위, 구조적 취약부 건전성, 구동모터 sizing, 키 및 윤활유 재질의 적합성, 압력잠김 및 열적고착에 대한 시정조치 타당성, 설계기준안전성이 확인된 밸브에 대한 주기적 안전성 확인방법 등으로 요약될 수 있다.

Abstract

The weakness in the design-basis capability of Motor-Operated Valves(MOVs) and the susceptibility to Pressure Locking and Thermal Binding phenomena of Power-Operated Gate Valves(POGVs) have been major concerns to be resolved in the nuclear society in and abroad since Three Mile Island accident occurred in the USA in 1979. Through detailed analysis of operating

experience and regulatory activities, some MOVs and POGVs have been found to be unreliable in performing their safety functions when they are required to do so under certain conditions, especially under design-basis accident conditions. Further, it is well understood that these safety problems may not be identified by the typical valve in-service testing(IST). USNRC has published three Generic Letters, GL 89-10, GL 95-07, and GL 96-05, requiring nuclear plant licensees to take appropriate actions to resolve the problems mentioned above. Korean nuclear regulatory body has made public an administration measure called "Regulatory recommendation to verify safety functions of the safety-related MOVs and POGVs" on June 13, 1997, and in this administration measure Korean utility is asked to submit written documents to show how it assure design-basis capability of these valves. The following are among the major concerns being considered from a regulation standpoint. Program scope and implementation priority, dynamic tests under differential pressure conditions, accuracy of diagnostic equipment, torque switch setting and torque bypass percentage, weak link analysis, motor actuator sizing, corrective actions taken to resolve pressure locking and thermal binding susceptibility, and a periodic verification program for the valves once design-basis capability has been verified.

1. 서 론

국내 운전중인 발전소에 설치된 안전관련 모터구동밸브는 평균 100여대 정도이며, 누설이 제한되어야 하는 계통의 격리목적으로 주로 사용된다. 특히 공학적 안전 설비 계통에 설치된 밸브의 경우, 밸브의 안전기능 확보는 발전소 정상운전 시보다는 비정상 운전이나 설계기준사고 시 원자로 안전정지와 정지상태 유지를 위해 더욱 강조된다. 잘 알려진 바와 같이, 79년에 발생한 미국 TMI 원전 사고는 가압기의 모터구동 블록 밸브의 고장으로 인해 노심 용융 사고로까지 확대되었으며, 85년에는 미국 David-Besse 원전의 보조급수계통에 설치된 모터구동밸브가 스위치 설정 불량으로 인해 증기발생기 2차측 급수가 상실된 사고가 발생한 바 있다. 국내에서는 아직 모터구동밸브로 인해 대형 사고로 진전된 사례는 보고되지 않았으나, 외국의 원전에서 경험한 유사한 고장 사례가 발생하고 있음이 확인되었다. 한편 압력잠김 및 열적고착 현상으로 인해 동력구동(모터 구동, 유압 구동, 공기

압 구동 등) 게이트 밸브의 열림 불능 사례가 장기간에 걸쳐 보고되었고, 특히 정상운전 시에는 거의 사용되지 않고 사고 조건에서 열림 기능이 요구되는 게이트 밸브에 있어서 심각한 안전성 위험이 있음이 확인되었다. 이와 같은 문제점에 대해 세계 각국에서는 설계기준 사고조건에서의 시험 혹은 해석적 방법을 통하여 안전성을 확인하고 있으며, 국내에서는 '97. 6. 13일, 정부 규제권고사항을 발행하여 전 원전에 대한 안전성 확인작업을 수행하도록 요구하였다.

2. 안전 현안

2.1 모터구동밸브 설계기준 안전성

MOV를 포함한 모든 원전의 기기 및 구조물은 설계시에 고려된 최악의 조건에서도 본래의 안전기능이 보장되도록 설계, 제작, 설치되어야 하며, 주기적인 시험을 통하여 안전기능이 입증되어야 한다. 기존의 밸브 가동중시험 요건인 ASME OM ISTC (혹은 IWV)은 일정한 주기로 밸브 동작시험 및 누설시험을 수행하여 안전기능을 확인하도록 요구하고 있으나, 이 때 수행되는 시험은 계통에 유량 및 차압이 부가되지 않은 무부하(no-load) 조건에서 시험되고 있어, 밸브의 안전기능이 절대적으로 요구되는 설계기준 조건에서의 밸브 성능 확인과는 거리가 멀다. 실제로 발전소 운전 중 동작불능 고장이 발생한 밸브 대부분이 가동중시험 요건에 의한 시험 시 그 기능이 만족하다고 판단된 밸브였다. 표 1은 국내외 MOV 고장 사례를 결함 유형별로 비교한 결과를 나타낸다. 영광 1.2호기는 상업운전 이후 3년간 발행된 작업의뢰서에 근거한 결과이며, INPO 수치는 INPO 83-037에서 인용했다. NRC 자료는 AEOD/C203에서 발췌한 결과이다. 핀란드 TVO 1.2호기 수치는 NEA/CSNI/R(95)에서 인용하였다. Double indication, 열림/닫힘 불량, 스템 내부 누설 등도 부적절한 스위치 설정값과 관련되는 고장으로 추정할 수 있으므로 토오크 스위치 및 리미트 스위치의 설정값 문제가 가장 중요한 고장 요소임을 알 수 있다. 모터구동밸브의 설계기준 안전성을 확인하는 확실한 방법은 설계기준 조건하에서 밸브를 실제로 시험하는 것이며, 시험 시 밸브 구동자 혹은 스템

등에 스트레인 센서, 가속도 센서 등을 부착하여 도출된 신호를 분석함으로써 밸브 안전기능을 입증하는 방법이 널리 사용되고 왔다.

2.2 동력구동게이트밸브의 압력잠김 및 열적고착

압력잠김 및 열적고착 현상은 계통 혹은 주위 온도의 변화로 인해 밸브 안전기능이 방해받게 되는 경우이다. 압력잠김은 밸브 디스크와 시이트 틈새를 통하여 밸브 본넷으로 스며들어간 고온/고압의 유체가 밸브 디스크의 상단에 하향 하중으로 작용하여 열림 동작을 방해하는 현상이다. 만일 밸브 구동자의 출력 성능이 압력잠김으로 인한 추가 추력을 감당할 수 없으면 밸브는 열림 기능을 상실하게 된다. 열적고착은 디스크와 밸브 몸체 시이트 재질간에 열 팽창 계수가 다르므로 인해 디스크와 시이트가 열적으로 고착되는 현상이다. 그림 1은 압력잠김 및 열적고착 현상을 나타낸다. 이러한 현상은 특히 정상 운전조건에서 거의 사용되지 않으나, 사고 조건에서 동작되어 안전기능을 수행하는 밸브에 발생할 가능성이 높다. 왜냐하면, 이러한 밸브는 정상 시에는 운전되지 않으므로 운전원의 관심이 밸브의 현재 위치확인(열림/닫힘)에 있고, 실제 사고 시 밸브의 열림 동작이 요구되기 전까지는 밸브가 운전불능 상태에 있어도 거의 확인이 불가능하기 때문이다.

3. 국내외 규제요건

3.1 미국의 규제요건

NRC는 INEL 연구결과, AEOD 고장사례 분석결과 및 Bulletin 85-03 검사결과 등을 종합하여, MOV 설계기준 안전성을 확인하기 위한 규제요건인 Generic Letter 89-10, "Safety-Related Motor-Operated Valve Testing and Surveillance"를 발행하였다. 이는 Bulletin 85-03 요건에 부가하여, 대상 밸브 및 요구 내용을 대폭 확대한 것이다. 즉 스위치 설정값의 적절성 확인 외에, 설계기준 자료를 재검토하고, 그 검토 근거에 따라 스위치 설정값을 재 설정하며, 그 설정값에서 설

계기준조건 실증시험을 수행하여 밸브 안전기능을 입증하도록 요구하였다. 또한 밸브 고장 이력을 추적하여 반영하고, 발전소 수명기간동안 각 밸브의 설계기준조건 안전성 확인방법을 수립하도록 요구하였다. 이행 기간은 GL 발행일로부터 5년 혹은 세 번째 연차 보수 기간 중 긴 기간 내에 완료하도록 요구하였다.

한편, 압력잠김 및 열적고착 현상은 모터구동게이트밸브에만 국한되는 문제가 아니라 모든 동력구동게이트밸브, 즉 유압구동게이트밸브, 공기압구동게이트밸브 등에도 발생할 수 있음이 확인되어, GL 89-10 범위 내에 있는 모터구동게이트밸브 외에 기타 동력구동게이트 밸브에 대한 안전성 확인요건이 필요하게 되었다. 이에 따라 NRC는 GL 95-07, "Pressure Locking and Thermal Binding of Safety-Related Power-Operated Gate Valves"를 발행, 사업자로 하여금 압력잠김 및 열적고착 잠재성에 대해 검토하고 잠재성이 확인된 밸브에 대해 적절한 시정 조치를 취하도록 요구하였다.

또한 GL 89-10요건에 의거 일차적으로 설계기준 안전성이 입증된 밸브에 대해, 발전소 수명기간동안의 설계기준 안전성 확인을 위한 별도의 요건이 필요함에 따라, GL 89-10요건 중 주기적 안전성 확인요건을 대폭 보완하여 GL 96-05, "Periodic Verification of Design-Basis Capability of Safety-Related Motor-Operated Valves"를 발행하였다.

3.2 국내 규제요건

국내 규제기관에서는 모터구동밸브의 설계기준 안전성 및 동력구동게이트밸브의 압력잠김, 열적고착 문제점을 해결하기 위한 규제권고사항(과기부 원검71233-205, '97. 6. 13)을 발행하였다. 모터구동밸브는 2005년 6월 12일까지 설계기준시험을 통하여 밸브의 안전성능을 입증하고, 동력구동게이트밸브의 압력잠김 및 열적고착 문제점은 2002년 6월 12일까지 시정조치를 완료하도록 하였다. 권고사항의 전문은 다음과 같다.

가. 모든 안전관련 모터구동밸브에 대해 각 밸브의 설계기준을 검토(밸브가 설치된 계통의 설계기준사고시의 조건확인 및 밸브가 그 조건에서 적절히 동작 할 수 있도록 설계되었는지)하고,

검토결과에 따라 적절한 시정조치를 취할 것. 또한 설계기준조건(차압, 유량, 온도 등)에서의 시험을 통하여 각 밸브가 요구되는 성능을 발휘할 수 있는지를 입증할 것. 단, 시험이 불가능한 밸브는 시험이외의 대체방법으로 설계기준 성능을 입증하고, 시험이 불가능한 사유를 문서로 정당화할 것.

- 나. 모든 안전관련 동력구동 게이트 밸브에 대해 압력잠김 및 열적고착 가능성에 대해 검토하고, 검토결과에 따라 해석, 시험, 해석 및 시험, 설비개선, 운전절차서 개정 중 한가지 방법으로 시정조치를 취할 것.
- 다. 본 요건 발행일 현재 운영 및 건설중인 원전(영광 5,6호기 포함)에 대해서는 2년 이내에 모터구동밸브의 설계기준 검토계획서 및 시험계획서를 제출하고, 이 기간을 포함한 8년 이내에 설계기준 시험결과 보고서를 제출하되, 설계기준검토계획서 및 시험계획서 제출이후 매년 이행현황을 당해 연도 말까지 제출할 것. 시험대상 밸브는 각 밸브에 대한 설계기준 검토보고서를 시험수행 2개월 전까지 제출할 것. 단, 각 계획서에는 수행조직, 교육훈련 프로그램, 수행 우선 순위 및 근거, 품질보증 방안이 포함되도록 할 것.
 - ※ 상기 시험결과는 5년 이내에 제출하는 것을 목표로 추진할 것.
- 라. 본 요건 발행일 현재 운영 및 건설중인 원전(영광 5,6호기 포함)에 대해서는 2년 이내에 동력구동 게이트 밸브의 압력잠김 및 열적고착 검토계획서를 제출하고, 이기간을 포함한 5년 이내에 시정조치보고서를 제출하되, 검토계획서 제출이후 매년 이행 현황을 당해 연도 말까지 제출할 것. 시정조치 대상밸브는 각 밸브에 대한 시정조치 2개월 전까지 압력잠김 및 열적고착 검토보고서 및 시정조치계획서를 제출할 것.
- 마. 영광 5,6호기 이후에 건설되는 발전소에 대해서는 밸브 제작단계에서 모터구동 밸브의 설계기준 성능 및 동력구동 게이트밸브의 압력잠김 및 열적 고착 문제를 반영하도록 하고, 운영허가 이전까지 상기 가, 나항을 만족하는 자료를 문서로 제출할 것.
- 바. 상기 규제일정을 준수할 수 없을 경우, 사전에 그 사유를 문서로 제출하고 변경일자에 대하여 승인을 받을 것.

4. 규제 관점

규제 시 고려해야할 사항으로는, 대상 밸브의 범위 및 수행 우선 순위, 설계기준 차압조건에서의 시험, 진단장비의 정확도, 토오크 스위치 설정값 및 토오크 바이패스 범위, 구조적 취약부 건전성, 구동모터 sizing, 키이 및 윤활유 재질의 적합성, 압력잠김 및 열적고착에 대한 시정조치 타당성, 설계기준안전성이 확인된 밸브에 대한 주기적 안전성 확인방법 등이 있다.

프로그램에 포함해야 할 대상 밸브는 모든 안전관련 모터구동밸브 및 동력구동계

이트밸브이다. 안전관련으로 분류되지는 않았으나, 원자로 안전정지 혹은 안전정지 상태 유지에 필요한 밸브를 프로그램에 포함하는 여부에 대해서는 사업자의 판단에 달려 있다. 규제 권고사항에 명시한 2년의 준비기간이 끝난 후 시험을 통한 설계기준 안전성 입증단계에서는 대상 밸브의 우선 순위가 결정되어야 하며, 결정 방법은 사업자가 결정할 수 있으나, 기본적으로는 안전에 중요한 밸브가 우선적으로 확인이 되어야 한다. 우선순위 선정에 참고할 수 있는 방법론으로는 확률론적 위험도 분석(PSA), 노심손상빈도(CDF), 가동중시험 결과, 고장빈도 혹은 운전경험 등이 있다.

설계기준검토가 완료되고, 스위치 설정값이 결정된 밸브에 대해서는 설계기준차압에서 시험을 통하여 최종적인 안전기능이 확인되어야 한다. 설계기준차압 조건에서의 시험이 불가하다고 판단되면, 불가한 사유가 문서로 정당화되어야 하고, 완화된 조건에서의 시험으로 대체하되, 완화된 시험 결과를 이용하여 설계기준차압 조건에서의 안전기능을 입증할 수 있어야 한다. 정적 시험결과만으로 설계기준차압 상태에서의 안전기능을 입증하는 경우는 극히 제한되어야 할 것이다. 이 방법은 일차로 설계기준차압 상태에서의 시험에 만족하고, 운전 여유도가 충분한 밸브에 대해, 주기적 설계기준 안전성 확인단계에서는 고려할 수 있을 것이다.

정적 시험 및 동적 시험 시 사용되는 진단장비는 그 정확도가 입증되어야 한다. 기 상업화된 진단장비에 대해서도 별도의 검교정이 수행되어야 하고, 장비 회사 및 규제기관에서 기 제기한 문제점을 어떻게 반영하였는지 확인되어야 한다. 또한 새로 개발된 진단장비를 사용하고자 할 경우에는 검교정을 통한 정확도 확인 외에 기존의 진단장비와 비교하는 과정을 통하여 정확도를 입증하는 것이 바람직할 것이다.

토크 스위치 설정값은 스템의 요구 추력 및 모터 구동자 출력을 고려하여 충분한 운전 여유도를 갖도록 설정되어야 한다. 장비의 불확도, 스위치의 반복성(repeatability), 부하민감거동(load sensitive behavior), 다음 시험 주기까지의 여유도 저하 등이 충분히 고려되어야 한다. 토크 바이패스는 밸브 열림 초기단계에 걸리는 과부하를 피할 수 있을 정도까지 설정되어야 한다. 전체 행정에 대한

바이패스 비율은 밸브마다 달리 설정되어야 할 것이며, 과도한 바이패스 비율로 인한 안전성 저해 가능성도 고려해야 할 것이다.

구조적 취약부 분석 시, 밸브 설계자료를 통한 각 부품의 물성치 및 사이즈에 근거해야 한다. 밸브 설계자료를 입수하기가 곤란한 밸브의 사이즈는 실측으로 가능하며, 재질은 동일 제작사의 유사 밸브를 통하여 간접적으로 확인할 수도 있을 것이다. 최대 토오크 및 추력은 장비의 불확도, 스위치 반복도 등을 고려할 때 밸브의 개별 부품의 파괴강도를 넘지 않는 범위에 들어야 한다.

구동 모터는 전압저하 조건에서도 충분히 요구 출력을 낼 수 있어야 한다. 주위 온도에 의한 전압저하 정도, 케이블 열화, 스위치 반복도, 장비 불확도 등이 충분히 고려되어야 한다.

모터 피니언 키, 회전방지 키, 구동자 및 스템 연결 키 등의 파손으로 인한 안전기능 저해 문제, 적절하지 못한 윤활유를 사용함으로써 발생할 수 있는 운전 여유도 저하 문제 등이 적절히 고려되어 재발 방지대책이 수립되어야 한다.

모든 안전관련 동력구동게이트밸브는 운전조건을 검토하여 압력잠김 및 열적고착의 잠재성이 없는지 확인되어야 한다. 특히 GL 95-07에서 잠재성이 있는 것으로 확인된 계통의 밸브에 대해서는 적절한 시정조치가 취해져야 하고, 기타 잠재성이 있다고 판단되는 밸브에 대해서는 시험 혹은 해석을 통하여 안전기능이 입증되어야 한다. 일단 하드웨어적으로 시정조치가 취해진 밸브라 하더라도 각각의 시정조치 방법에 대한 타당성 확인과정이 필요할 것이다.

일차 설계기준 안전성이 확인된 밸브에 대해 발전소 수명기간동안 안전기능을 확인할 수 있는 절차가 마련되어야 한다. 시험 방법 및 주기는 사업자가 개별 밸브의 정적시험 및 동적시험 결과에 근거하여 결정할 수 있을 것이며, 특히 운전여유도는 다음 시험 주기까지 밸브가 안전기능을 충분히 수행할 수 있는 정도여야 한다. 또한 각 밸브의 운전 및 보수이력을 추적할 수 있는 절차가 마련되어야 하며, 차주기 시험 시 이력내용이 반영되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. USNRC Generic Letter 89-10 (1989, 6, 28) : Safety-Related Motor-Operated Valve Testing and Surveillance
2. USNRC Generic Letter 95-07 (1995, 8, 17) : Pressure Locking and Thermal Binding of Safety-Related Power-Operated Gate Valves
3. USNRC Generic Letter 96-05 (1996, 9, 18) : Periodic Verification of Design-Basis Capability of Safety-Related Motor-Operated Valves
4. NUREG 1275, Vol. 9 (1993, 3) : Operating Experience Feedback Report, Pressure Locking and Thermal Binding of Gate Valves
5. USNRC IE Bulletin 85-03 (1985, 11, 11) : Motor-Operated Valve Common Mode Failures During Plant Transients due to Improper Switch Settings

표 1. 유형별 MOV 고장사례(수치는 고장건수)

결함유형 호기	시스템 및 내부누설	열림/닫 힘 불량	토크 스 위치 불량	리미트 스 위치 불량	Trouble/ Disable	Double Indication	모터결함	기타	계
영광1.2	31	43	18	9	31	5	8	91	227
INPO	140	89	114	67			64	170	644
NRC			46	24			19	83	193
핀 란 드 TVO1.2		9	18			11		8	46

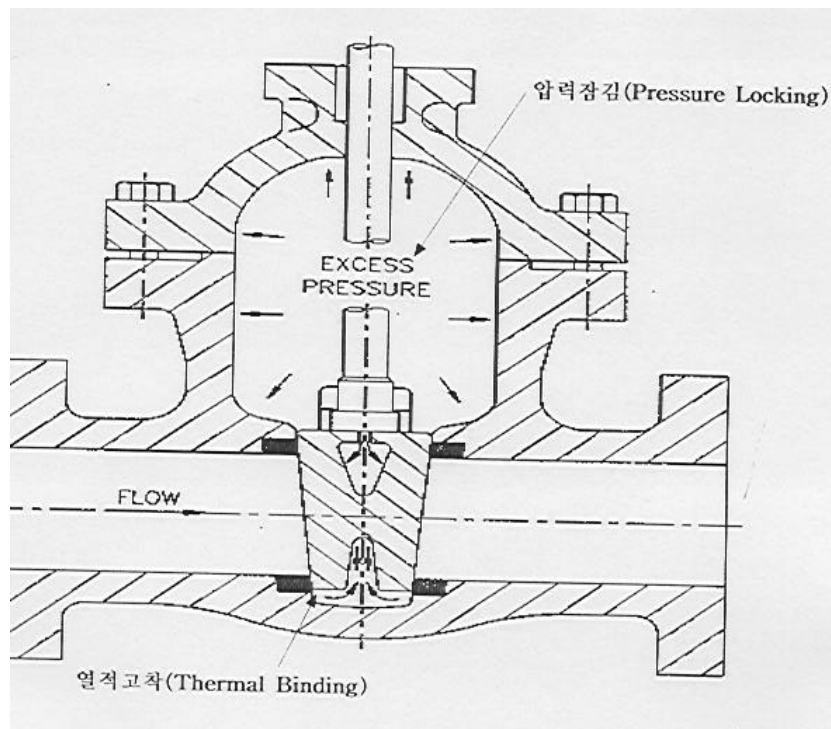


그림 1. 압력잠김 및 열적고착 현상

접수번호 : 접수일자 : 발표: 개 (), 물가 () ()not new, ()out of scope
 ()not clear, ()inadequate format

저자	김월태, 금오현		희망분야	1순위: 12,3 2순위: 10,1
논문제목	(총페이지수 : 10매) 안전관련 모터구동밸브 및 동력구동게이트밸브의 설계기준 안전성 규제관점			
연락처	주소	(우편번호:305-338) 대전광역시 유성구 구성동 19번지 한국원자력안전기술원 안전평가부 계통평가실		
	사전등록자명	김월태	전화	042-868-0226 FAX 042-861-2535

접수번호 : 접수일자 : 발표: 개 (), 물가 () ()not new, ()out of scope
 ()not clear, ()inadequate format

저자	김월태, 금오현		희망분야	1순위: 12,3 2순위: 10,1
논문제목	(총페이지수 : 10매) 안전관련 모터구동밸브 및 동력구동게이트밸브의 설계기준 안전성 규제관점			
연락처	주소	(우편번호:305-338) 대전광역시 유성구 구성동 19번지 한국원자력안전기술원 안전평가부 계통평가실		
	사전등록자명	김월태	전화	042-868-0226 FAX 042-861-2535

접수번호 : 접수일자 : 발표: 개 (), 물가 () ()not new, ()out of scope
 ()not clear, ()inadequate format

저자	김월태, 금오현		희망분야	1순위: 12,3 2순위: 10,1
논문제목	(총페이지수 : 10매) 안전관련 모터구동밸브 및 동력구동게이트밸브의 설계기준 안전성 규제관점			
연락처	주소	(우편번호 305-338) 대전광역시 유성구 구성동 19번지 한국원자력안전기술원 안전평가부 계통평가실		
	사전등록자명	김월태	전화	042-868-0226 FAX 042-861-2535

